

## TD PUISSANCE DE COUPE – ELEMENTS DE CORRECTION

### Exercice N°1

Le surfacage va se faire de deux manières

- Fraisage / surfacage de face sans décalage
- Fraisage / surfacage de profil

Le surfacage de face est sans décalage de l'axe de la fraise par rapport à celui de la surface à usiner.

La puissance de coupe en fraisage est donnée par l'expression suivante :

$$P_C = \frac{Q \cdot K_{cmcor}}{612 \cdot 10^2}$$

$P_C$  : Puissance nécessaire à la coupe en W

$Q$  : Débit de copeau en  $\text{mm}^3/\text{min}$

$K_{cmcor}$  : Effort spécifique de coupe moyen corrigé en MPa

Il convient donc de calculer  $Q$  et  $K_{cmcor}$  pour avoir la puissance de coupe recherchée.

#### ▪ Détermination du débit $Q$ .

Le débit est calculé avec la relation suivante :

$$Q = a_e \times a_p \times V_f$$

$a_e$  : largeur de la surface usinée en mm

$a_p$  : profondeur de passe en mm

$V_f$  : vitesse d'avance de la table en mm/min qui se calcule avec la relation :

$$V_f = f_z \times Z \times N$$

$f_z$  : avance par dent en mm/dent

$Z$  : nombre de dents

$N$  : Vitesse de rotation de la broche en tr/min qui se calcule avec la relation :

$$N = 1000V_c / \pi D$$

$V_c$  : vitesse de coupe en m/min

$D$  : diamètre de la fraise en mm

**Donc pour déterminer le débit de copeau, il faut :**

- **Calculer la fréquence de rotation de la broche  $N$  et choisir la fréquence réelle  $N_r$  qui est la fréquence la plus proche des valeurs figurant dans le tableau des vitesses de rotation de la broche.**
- **Calculer la vitesse d'avance de la table  $V_f$  à partir de la fréquence réelle  $N_r$**
- **Calculer enfin le débit du copeau  $Q$**

#### ▪ Détermination de l'effort spécifique de coupe moyen corrigé $K_{cmcor}$

On choisit  $K_{cm}$  en fonction de la nature du matériau à usiner à partir du tableau 6. Les valeurs du tableau sont données en MPa pour une épaisseur moyenne de copeau de 0.2 mm obtenu avec une fraise à angle de coupe  $\gamma_{fe} = -7^\circ$ .

Ces valeurs doivent donc être corrigées en fonction de l'angle de coupe latéral  $\gamma_{fe}$  de la fraise utilisée et de l'épaisseur moyenne calculée de l'opération considérée.

#### ✓ Correction de $K_{cm}$ en fonction de l'angle de coupe latéral $\gamma_{fe}$ de la fraise utilisée :

Les valeurs de  $K_c$  du tableau doivent être corrigées en fonction de l'angle de coupe latéral  $\gamma_{fe}$  d'environ 1.5% par degré de différence. La valeur de  $K_c$  diminue lorsque l'angle de coupe latéral  $\gamma_{fe}$  augmente.

$$K_{cm \gamma_{fe}} = K_{cmTab} (1 + 1,5\% \Delta \gamma_{fe}), \text{ avec } \Delta \gamma_{fe} = \gamma_{feTabl} - \gamma_{fe \text{ outil}} = -7 - \gamma_{fe \text{ outil}}$$

### ✓ Correction de $K_{cm}$ en fonction de l'épaisseur moyenne du copeau calculée $hm$

La correction de  $K_{cm}$  est faite avec le coefficient de correction  $f_h$ . Ce coefficient peut être déterminé avec la relation  $f_h = 0,62 \cdot hm^{-0,3}$  ou pris du tableau 7 si la valeur de  $hm$  calculée figure dans le tableau.

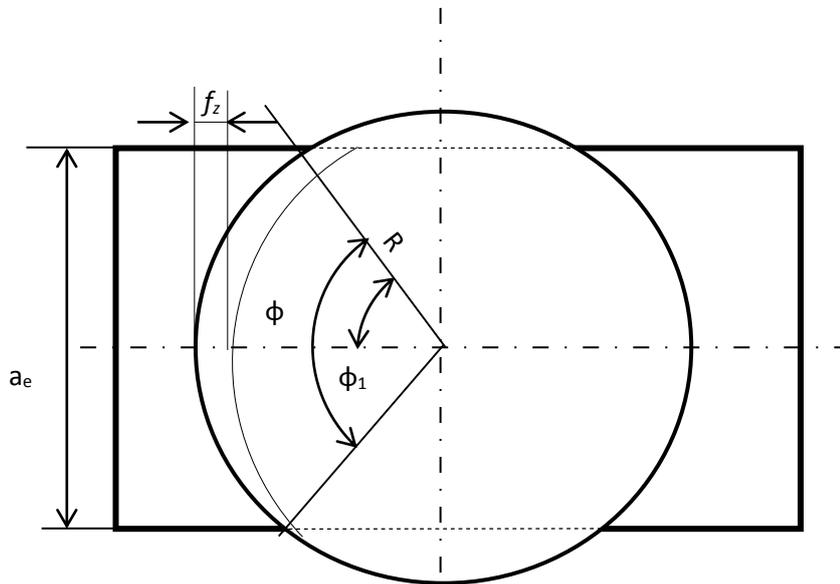
La valeur de  $K_{cm}$  corrigée en fonction de  $\gamma_{fe}$  doit être multipliée par le coefficient de correction  $f_h$  correspondant à l'épaisseur  $hm$  calculée.

$$K_{cm\text{cor}} = K_{cm} \gamma_{fe} \times f_h$$

Traitons séparément les 2 situations : fraisage / surfaçage de face et fraisage / surfaçage de profil :

#### 1- Surfaçage de face sans décalage

##### Données :



**Fraise :** Diamètre  $D=400\text{mm}$ , Hauteur  $H=60\text{mm}$ , Nombre de dents  $Z=8$  dents, Angle de direction principale  $Kr=90^\circ$ , Angle de coupe  $\gamma_{fe} = 6^\circ$ .

**Conditions de coupe :**  $V_c=120$  m/min,  $a_p=4\text{mm}$ ,  $f_z= 0.3$  mm/dent

**Matériau usiné :** 25CD4 acier au chrome molybdène.

**Surface usinée :** largeur  $a_e=40\text{mm}$

#### a – Calcul du débit :

Le débit est calculé avec la relation suivante :

$$Q = a_e \times a_p \times V_f$$

- Fréquence de rotation de la broche  $N$  :

$$N = 1000V_c / \pi D = 1000 \times 120 / 3.14 \times 400 = 382.12 \text{ tr/min}$$

La vitesse de rotation de la broche la plus proche figurant dans la gamme des fréquences de rotation de la machine est :

$$N_r = 390 \text{ tr/min}$$

- Vitesse d'avance  $V_f$  de la table à partir de la fréquence de rotation réelle de la broche  $N_r$  :

$$V_f = f_z \times Z \times N = 0.3 \times 8 \times 390 = 936 \text{ mm/min}$$

- Débit du copeau Q :

$$Q = a_e \times a_p \times V_f = 4 \times 40 \times 936 = 149760 \text{ mm}^3/\text{min}$$

$$Q = 149760 \text{ mm}^3/\text{min}$$

### b- Détermination de l'effort spécifique de coupe moyen corrigé $K_{cmcor}$

D'après les données  $K_{cmTab} = 3200 \text{ MPa}$ , cette valeur correspond à une épaisseur moyenne de copeau de 0.2 mm et une fraise à angle de coupe  $\gamma_{fe} = -7^\circ$ .

Cette valeur doit donc être corrigée en fonction de l'angle de coupe latéral  $\gamma_{fe}$  de la fraise utilisée et de l'épaisseur moyenne calculée de l'opération considérée.

✓ Correction de  $K_{cm}$  en fonction de l'angle de coupe latéral  $\gamma_{fe}$  de la fraise utilisée :

Les valeurs de  $K_c$  du tableau doivent être corrigées en fonction de l'angle de coupe latéral  $\gamma_{fe}$  d'environ 1.5% par degré de différence. La valeur de  $K_c$  diminue lorsque l'angle de coupe latéral  $\gamma_{fe}$  augmente.

$$K_{cm \gamma_{fe}} = K_{cmTab} (1 + 1,5\% \Delta \gamma_{fe})$$

$$\Delta \gamma_{fe} = \gamma_{feTabl} - \gamma_{fe \text{ outil}} = -7 - 6 = -13$$

$$K_{cm \gamma_{fe}} = 3200 (1 - 1,5 \times 13/100) = 2576 \text{ MPa}$$

✓ Correction de  $K_{cm}$  en fonction de l'épaisseur moyenne du copeau calculée  $h_m$  :

Pour cela calculons l'épaisseur moyenne  $h_m$ . Nous sommes en présence d'une opération de surfacage,  $h_m$  s'écrit :

$$h_m = \sin \varphi \frac{180 f_z a_e}{\pi \varphi R}$$

$\varphi$  : angle de recouvrement exprimé en degrés

$R$  : rayon de la fraise

L'angle de recouvrement est déterminé à partir de la figure du haut.  $\varphi = 2\phi_1$

$$\sin \phi_1 = a_e / 2R = 40 / (2 \times 50) = 0,4 = 23,58^\circ \quad \varphi = 2\phi_1 = 47,16$$

$$h_m = \sin 90 \frac{180 \cdot 0,3 \cdot 40}{\pi \cdot 47,16 \cdot 50} = 0,292 \text{ mm} \quad \text{On prend } h_m = 0,3 \text{ mm}$$

Pour cette valeur de  $h_m$ , le tableau 7 nous donne une valeur du coefficient de correction  $f_h = 0,89$ . L'effort spécifique moyen corrigé est :

La valeur de l'effort spécifique moyen corrigé est obtenue en multipliant  $K_{cm}$  corrigé en fonction de  $\gamma_{fe}$  par le coefficient de correction  $f_h$  correspondant à l'épaisseur  $h_m$  calculée.

$$K_{cmcor} = K_{cm \gamma_{fe}} \times f_h = 2576 \times 0,89 = 2292,64 \text{ MPa}$$

### c- Calcul de la puissance nécessaire à la coupe :

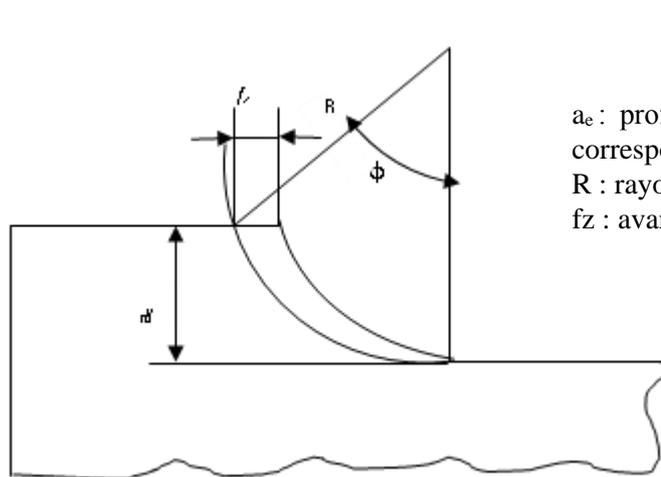
$$P_c = \frac{Q \cdot K_{cmcor}}{612 \cdot 10^2} = \frac{149760 \cdot 2296,64}{612 \cdot 10^2} = 5620 \text{ W}$$

La puissance nécessaire au surfacage sans décalage est :

$$P_c = 5,26 \text{ kW}$$

## 2- Surfaçage de profil

La différence avec le surfaçage de face réside dans le calcul de l'épaisseur moyenne du copeau et tout ce qui lui est rattaché.



$$h_m = f_z \sqrt{\frac{a_e}{2R}}$$

$a_e$  : profondeur d'usinage en mm. Elle correspond à la profondeur de passe  $a_p$ .  
 $R$  : rayon de la fraise  
 $f_z$  : avance par dent

### ▪ Calcul du débit :

Géométriquement par rapport au surfaçage de face la profondeur de passe devient la largeur d'usinage et inversement. Donc  $a_e=4\text{mm}$  et  $a_p=40\text{mm}$ . De plus la vitesse d'avance de la table est la même car on ne change pas de vitesse de rotation de la broche ni l'avance par dent. Numériquement le débit ne change pas.

$$Q = a_e \times a_p \times V_f = 4 \times 40 \times 936 = 149760 \text{ mm}^3/\text{min}$$

$$Q = 149760 \text{ mm}^3/\text{min}$$

### b- Détermination de l'effort spécifique de coupe moyen corrigé $K_{cmcor}$

- Calcul de l'épaisseur moyenne  $h_m$

$$h_m = f_z \sqrt{\frac{a_e}{2R}} = 0.3 \sqrt{\frac{4}{100}} = 0.06 \text{ mm}$$

- Détermination du coefficient de correction de l'effort spécifique de coupe moyen  $f_h$  :

On peut déterminer ce coefficient en utilisant les tableaux 4 et 5 ou en utilisant la formule d'interpolation  $f_h = 0,62 \cdot h_m^{-0,3}$ .

$$f_h = 0,62 \cdot 0,06^{-0,3} = 1,44$$

- Détermination de  $K_{cm cor}$ .

$$K_{cmcor} = K_{cm \gamma_{fe}} \times f_h$$

$K_{cm \gamma_{fe}}$  calculé dans le cas du surfaçage de face = 2576 MPa

$$K_{cmcor} = K_{cm \gamma_{fe}} \times f_h = 2576 \times 1,44 = 3714,43 \text{ MPa}$$

### c- Calcul de la puissance nécessaire à la coupe :

$$P_C = \frac{Q \cdot K_{cmcor}}{612 \cdot 10^2} = \frac{149760 \cdot 3714,43}{612 \cdot 10^2} = 9105,3 \text{ W}$$

La puissance nécessaire au surfaçage de profil est :

$$P_C = 9,2 \text{ kW}$$

**Exercice N°2 :****1- Puissance nécessaire à la coupe**

$$P_c = \frac{Q \cdot K_{c.cor}}{612 \cdot 10^2}$$

**a- Débit de copeau :**

$$Q = a_p \times a_e \times V_f = 15 \times 20 \times 480 = 144000 \text{ mm}^3/\text{min}$$

✓ **Fréquence de rotation de la fraise :**

$$N = \frac{1000 V_c}{\pi \cdot D} = \frac{120 \times 10^3}{\pi \times 200} = 192 \frac{\text{trs}}{\text{min}}$$

Nous choisirons la fréquence disponible la plus proche soit  $N=200$  trs/min.

✓ **Vitesse d'avance de la table de la machine- outil :**

$$V_f = f_z Z N = 0.2 \times 12 \times 200 = 480 \text{ m/min}$$

Cette vitesse est disponible sur la machine-outil

**b- Effort spécifique de coupe moyen corrigé  $K_{cmcor}$ :**

$$K_{ctab} = 3200 \text{ MPa}, \gamma_{fe} = 2^\circ$$

✓ **Correction de  $K_c$  due à l'angle de coupe  $\gamma_{fe}$ .**

L'angle  $\gamma_{fe}$  de notre outil est plus grand que l'angle de référence de  $-7^\circ$  d'où

$$K_c(\gamma_{fe}) = K_c(tab) \times \left( 1 - \frac{(2 + 7) \times 1,5}{100} \right) = 2768 \text{ MPa}$$

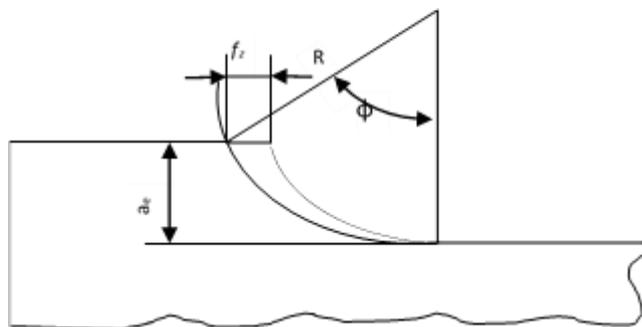
✓ **Correction de  $K_c$  due à  $h_m$ .**

Emploi de la formule simplifiée :

$$h_m = f_z \sqrt{\frac{a_e}{2R}} = h_m = 0,2 \sqrt{\frac{20}{200}} = 0,06 \text{ mm}$$

Emploi de la formule générale :

$$h_m = \sin K r e \frac{180 f_z a_e}{\pi \varphi R}$$

✓ **Calcul de l'angle de recouvrement :**

$$\cos \varphi = \frac{R - a_e}{R} = \frac{100 - 20}{100} = 0,8 \rightarrow \varphi_1 = 36.86^\circ$$

L'épaisseur moyenne sera :

$$h_m = \sin K_r e \frac{180 f_z a_e}{\pi \phi R} = 1 \times \frac{180 \times 0,2 \times 20}{\pi \times 36.86 \times 100} = 0,062 \text{ mm}$$

**Remarque :** Nous pouvons constater dans ce cas que les 2 méthodes de calcul de  $h_m$  donnent le même résultat.

✓ Calcul du facteur de correction  $f_h$  relatif à  $h_m$

$$f_h = 0,62 \times h_m^{0,3} \Rightarrow f_h = 0,62 \times 0,062^{0,3} = 1,44$$

L'effort spécifique moyen corrigé sera donc :

$$K_{cmco} = K_{cm(\gamma_{fe})} \times f_h = 2768 \times 1,44 = 3991,3 \text{ MPa}$$

**c- Puissance nécessaire à la coupe :**

$$P_C = \frac{Q \cdot K_{c.cor}}{612 \cdot 10^2} = \frac{144 \times 10^3 \times 3991,3}{612 \cdot 10^2} = 9391,3 \text{ W} \Rightarrow P_C = 9,4 \text{ kW}$$

Cette puissance est la puissance nécessaire à la coupe. En tenant compte du rendement de la transmission de puissance du moteur à la pointe de l'outil on calcule la puissance que doit développer le moteur de la machine.

$$P_C = P_M \times \eta \text{ la puissance du moteur est donc : } P_M = P_C / \eta = 9,4 / 0,85 = 11,06 \text{ kW}$$

**La puissance du moteur doit être  $\geq 11,06 \text{ kW}$**

**Exercice N°3****1- Calcul de la puissance du moteur électrique**

$$P_m \geq P_c \quad P_c = \frac{Q \cdot K_c \cdot m_{cor}}{612 \cdot 10^2}$$

$$Q = a_p \times a_e \times V_f, \quad V_f = fN, \quad f = f_z \cdot Z,$$

1<sup>er</sup> cas  $f_z = 0.3 \text{ mm/dent}$ ,  $V_c = 123 \text{ m/min}$

- Calcul du débit

a- Calcul de  $V_f$  :

- Calcul de la fréquence de rotation.

$$N = \frac{1000 V_c}{\pi \cdot D} = \frac{123 \times 10^3}{\pi \times 125} = 313,4 \frac{\text{trs}}{\text{min}}$$

On prend  $N = 314 \text{ tr/min}$

- Calcul de  $V_f$

$$V_f = 0.3 \times 7 \times 314 = 660 \text{ m/min}$$

b- Calcul de  $Q$  :

$$Q = a_p \times a_e \times V_f = 3 \times 100 \times 660 = 198 \cdot 10^3 \text{ mm}^3/\text{min}$$

- Calcul de  $K_{cmcor}$

a- Correction de l'effort spécifique en fonction de  $\gamma_{fe}$ .

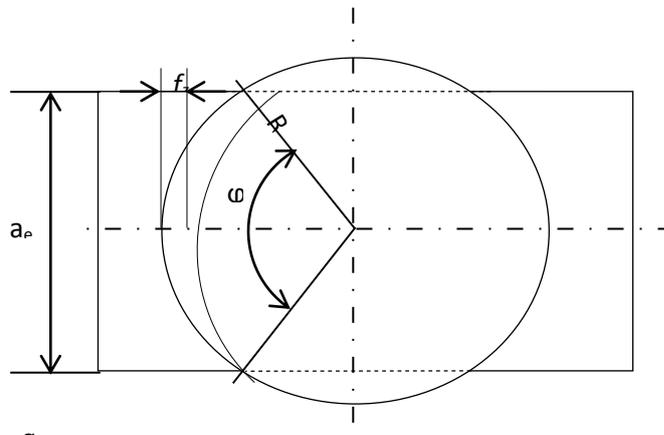
$$\gamma_{fe(ref)} = -7^\circ; \gamma_{fe} = +8^\circ$$

$$K_{cm\gamma_{fe}} = K_{ctab} \left( 1 - \frac{(\gamma_{fe(ref)} - \gamma_{fe}) \times 1,5}{100} \right) \Rightarrow K_{cm\gamma_{fe}} = 3000 \left( 1 - \frac{(8+7) \times 1,5}{100} \right) = 2325 \text{ MPa}$$

b- Calcul de l'épaisseur moyenne  $h_m$

$$h_m = \sin K_r e \frac{180 f_z a_e}{\pi \phi R}$$

- ✓ Calcul de l'angle de recouvrement  $\phi$



$$\sin \frac{\phi}{2} = \frac{a_e}{2R} = \frac{50}{62.5} = 0.8 \text{ soit } \frac{\phi}{2} = \arcsin 0.8 = 53.13^\circ \text{ et } \phi = 106.26^\circ$$

- ✓ Calcul de  $h_m$

$$h_m = \sin K_{re} \frac{180 f_z a_e}{\pi \phi R} = \sin 90 \times \frac{180 \times 0.3 \times 100}{\pi \cdot 106.23 \times 62.5} = 0.259 \text{ mm}$$

- ✓ Détermination du facteur de correction  $f_h$

$$f_h = 0.62 h_m^{-0.3} = 0.62 \times 0.259^{-0.3} = 0.929$$

- ✓ Correction de l'effort spécifique  $K_{mcor}$  en fonction à  $h_m$

$$K_{mcor} = 2325 \times 0.929 = 2162 \text{ MPa}$$

- Calcul de  $P_c$

$$P_{c1} = \frac{Q \cdot K_{mcor}}{612 \cdot 10^2} = \frac{198000 \times 2162}{612 \cdot 10^2} = 7 \text{ kW}$$

La puissance que doit développer le moteur est :

$$P_{M1} = P_{c1} / \eta = 7 / 0.6 = 11.66 \text{ kW}$$

On procède de la même façon pour les autres cas. On obtient :

2ème cas  $f_z=0.2 \text{ mm/dent}$ ,  $V_c=140 \text{ m/min}$

La puissance nécessaire à la coupe  $P_{c2}=7.5 \text{ kW}$

$$P_{M2} = P_{c2} / \eta = 7.5 / 0.6 = 12.5 \text{ kW}$$

3ème cas  $f_z=0.1 \text{ mm/dent}$ ,  $V_c=180 \text{ m/min}$

La puissance nécessaire à la coupe  $P_{c3}=4.6 \text{ kW}$

$$P_{M3} = P_{c3} / \eta = 4.6 / 0.6 = 7.6 \text{ kW}$$

**Conclusion : la fraiseuse doit disposer d'un moteur dont la puissance minimale est de 12.5kW**

## 2- Détermination de la profondeur de passe compatible avec la puissance du moteur de la fraiseuse.

On pose la condition

Pour que la coupe ait lieu il faut que :  $P_M \eta \geq P_c$

Expression de la puissance de coupe  $P_c$  :

$$P_c = \frac{Q \cdot K_{mcor}}{612 \cdot 10^2} \text{ avec } Q = a_p \times a_e \times V_f$$

$$P_{broche} = P_c = \frac{a_{pmax} \times a_e \times V_f \times K_{mcor}}{612 \cdot 10^2}$$

A partir de cette expression on tire la valeur maxi de la profondeur de passe  $a_{pmax}$ .

$$a_{pmax} \leq \frac{612 \cdot 10^2 \times P_M \eta}{a_e \times V_f \times K_{mcor}}$$

**Application numérique :**

1<sup>er</sup> cas  $f_z=0.3 \text{ mm/dent}$ ,  $V_c=123 \text{ m/min}$   $a_{pmax1}=0.376 \text{ mm}$

2ème cas  $f_z=0.2 \text{ mm/dent}$ ,  $V_c=140 \text{ m/min}$   $a_{pmax2}=0.354 \text{ mm}$

3ème cas  $f_z=0.1 \text{ mm/dent}$ ,  $V_c=180 \text{ m/min}$   $a_{pmax3}=0.71 \text{ mm}$