

Efforts de coupe et puissance

INTÉRÊT

L'étude et l'évaluation des forces de coupe présente un intérêt en usinage principalement :

- x pour dimensionner les outils et les éléments de machine-outil,
- x pour évaluer la puissance de coupe et permettre ainsi le choix rationnel d'une machine-outil.

EFFORTS DE COUPE EN TOURNAGE

L'action de l'outil sur la pièce peut être décomposée en trois efforts simples :

- x l'effort de coupe \vec{F}_c ,
- x l'effort d'avance \vec{F}_f ,
- x l'effort de pénétration \vec{F}_p .

D'une manière générale : $\vec{F}_f \approx (\frac{1}{2} \text{ à } \frac{2}{3}) \vec{F}_c$ et $\vec{F}_p \approx 0,3 \vec{F}_c$

Calcul de \vec{F}_c

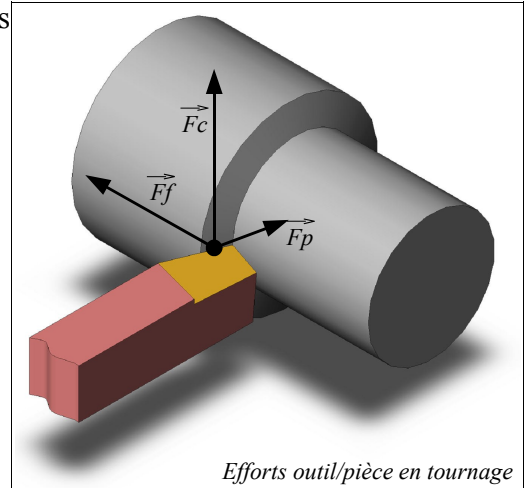
La valeur de l'effort de coupe est donné par la formule :

$$F_c = kc A_D$$

Avec :

- x kc : pression spécifique de coupe dépendant du matériau et de l'épaisseur moyenne du copeau.
- x A_D : section du copeau.

Remarque : Pour cela on fait l'hypothèse que l'effort de coupe est réparti uniformément sur tout le copeau et que la variation de la vitesse de coupe sur la surface du copeau est négligeable.



Efforts outil/pièce en tournage

PUISSANCE DE COUPE EN TOURNAGE

La puissance de coupe est donnée par la formule : $P_c = F_c \cdot V_c + F_f \cdot V_f$

Puisque V_f n'est en général que de l'ordre de $1/100^{\text{me}}$ de V_c , on néglige couramment le terme $F_f V_f$.

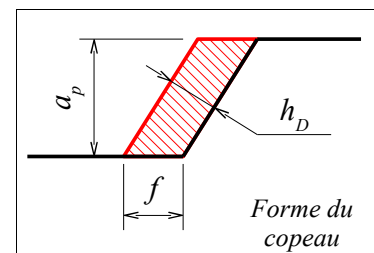
On obtient donc la formule : $P_c = kc \cdot A_D \cdot V_c$ (A_D = section du copeau)

En tournage, $A_D = f \cdot a_p$

Ce qui donne : $P_c = kc \cdot f \cdot a_p \cdot V_c$ (unités du système international)

Nous utiliserons donc la formule
$$P_c = \frac{kc \cdot f \cdot a_p \cdot V_c}{60 \cdot 10^3}$$
 avec :


- x kc : pression spécifique de coupe en N/mm^2 (proportionnelle à l'épaisseur du copeau h_D),
- x f : avance en mm/tr ,
- x a_p : profondeur de passe en mm ,
- x V_c : vitesse de coupe en m/min ,
- x P_c : puissance de coupe en kW .



Efforts de coupe et puissance

La pression spécifique de coupe (autrement appelée force de coupe par unité de surface) k_c est donné dans des tableaux en fonction de l'épaisseur du copeau h_D ($h_D = f \cdot \sin K_r$), et de la matière.

Le tableau ci dessous présentent les valeurs approximatives de k_c pour un outil en carbure avec $\gamma = 6^\circ$ et $K_r = 75^\circ$.

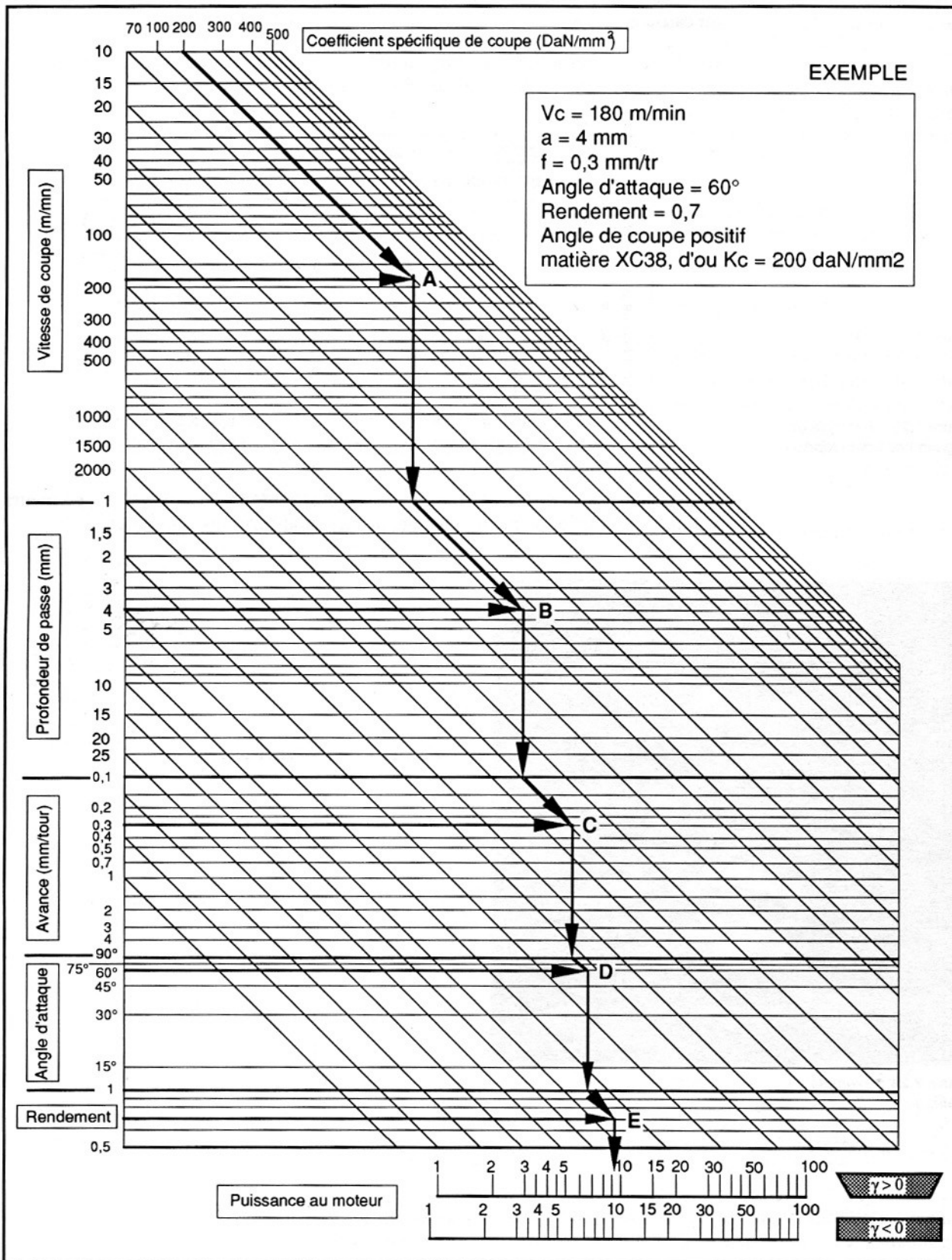
Paramètres d'usinage (suite)					
• Force de coupe par unité de surface K_c (N/mm²) : cas du tournage					
Valeurs indicatives (à partir de SANDVIK)					
Tableau 1					
Force de coupe par unité en fonction de la matière usinée, de sa résistance à la traction (ou dureté Brinell) et de l'épaisseur h_D . Pour des outils en carbure avec $\gamma_n = + 6^\circ$ et $\kappa_r = 75^\circ$.					
Matière	Résistance R_m en N/mm ² ou dureté Brinell	Force de coupe par unité de surface pour une épaisseur h_D en mm de :			
		0,1	0,2	0,4	0,8
Aciers d'usage général					
A 34-2*	330 à 410	3600	2600	1900	1350
E 295	490 à 630	4000	2900	2100	1500
E 335	590 à 710	4200	3000	2200	1550
E 360	690 à 830	4400	3150	2300	1650
Aciers non alliés pour TTh.					
C 35E, C 45E, XC 65*	500 à 600	3700	2800	2050	1500
C 35E, C 45E, XC 65*	850 à 1190	4700	3400	2500	1800
XC 80*	630 à 850	4800	3600	2600	1900
Aciers faiblement alliés	470 à 770	4100	3000	2200	1600
Aciers faiblement alliés	750 à 1570	4800	3600	2600	1900
Aciers fortement alliés	540 à 850	4800	3600	2600	1900
Aciers fortement alliés	850 à 1750	7900	5800	4250	3100
Acier inox ferritique	540 à 910	4700	3400	2500	1800
Acier inox austénique	540 à 910	4800	3600	2600	1900
Acier au manganèse coulé	690 à 1010	6000	4300	3200	2300
Fonte EN-GJL 150	HB jusqu'à 200	2050	1500	1100	800
Fonte EN-GJL 200	HB 200 à 250	2900	2080	1500	1080
Fonte EN-GJS 350-22	350 à 400	1850	1360	1000	720
Fonte EN-GJS 500-7	500 à 600	3350	2500	1800	1300
Cuivre	HB 50 à 85	2100	1520	1100	800
Laiton	HB 60 à 110	1400	1000	750	550
Laiton rouge	HB 60 à 110	1300	950	700	520
Bronze coulé	HB 85 à 110	3250	2400	1750	1300
Alliage au zinc (Z A10 U2)		940	700	560	430
Aluminium pur	HB 25	1050	760	550	400
Alliage d'aluminium à haute teneur en Si (11 à 13,5 % Si)	HB 55 à 95	1400	1000	700	520
Alliage pour pistons AL-Si (11 à 13 % Si)	HB 55 à 95	1100	1000	700	620
G-Al-Si (11...13,5 % Si)	HB 65 à 80	1250	900	650	480
Alliages de magnésium	HB 60 à 65	580	300	300	220

* Ancienne désignation, sans équivalence.

Efforts de coupe et puissance

Les puissances de coupe en tournage peuvent aussi être déterminées graphiquement :

Abaque de calcul de puissance en tournage



Efforts de coupe et puissance

CAS DU PERÇAGE

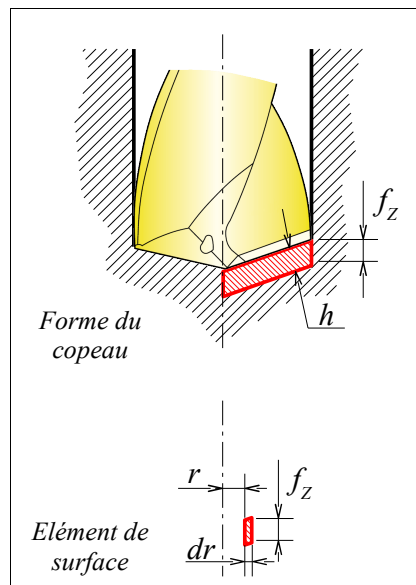
Si on considère une pression spécifique de coupe uniformément répartie le long de l'arête de coupe, on trouve :

Perçage sans avant-trou

$$P_c = \frac{kc \cdot V_c \cdot f_z \cdot Z \cdot D}{4} = \frac{kc \cdot V_c \cdot f \cdot D}{4} \quad (\text{avec les unités SI})$$

Formule finale $P_c = \frac{kc \cdot f \cdot D \cdot V_c}{240 \cdot 10^3}$ avec :

- x kc : pression spécifique de coupe en N/mm^2 ,
- x f : avance en mm/tr ,
- x D : diamètre du foret en mm ,
- x V_c : vitesse de coupe périphérique (pour un diamètre D) en m/min ,
- x P_c : puissance de coupe en kW .

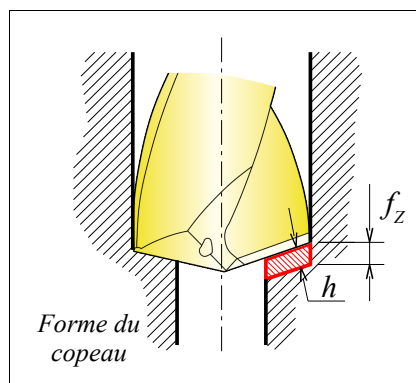


Perçage avec avant-trou

$$P_c = \frac{kc \cdot f \cdot V_c}{4} \times \frac{D^2 - d^2}{D} \quad (\text{avec les unités SI})$$

Formule finale $P_c = \frac{kc \cdot f \cdot V_c}{240 \cdot 10^3} \times \frac{D^2 - d^2}{D}$ avec :

- x kc : pression spécifique de coupe en N/mm^2 ,
- x f : avance en mm/tr ,
- x D : diamètre du foret en mm ,
- x d : diamètre de l'avant-trou en mm ,
- x V_c : vitesse de coupe périphérique (pour un diamètre D) en m/min ,
- x P_c : puissance de coupe en kW .



Épaisseur moyenne du copeau : $h_m = f_z \cdot \sin K_r$

Efforts de coupe et puissance

kc : N/mm²

Force de coupe par unité de surface.

Perçage

A partir de données HERTEL

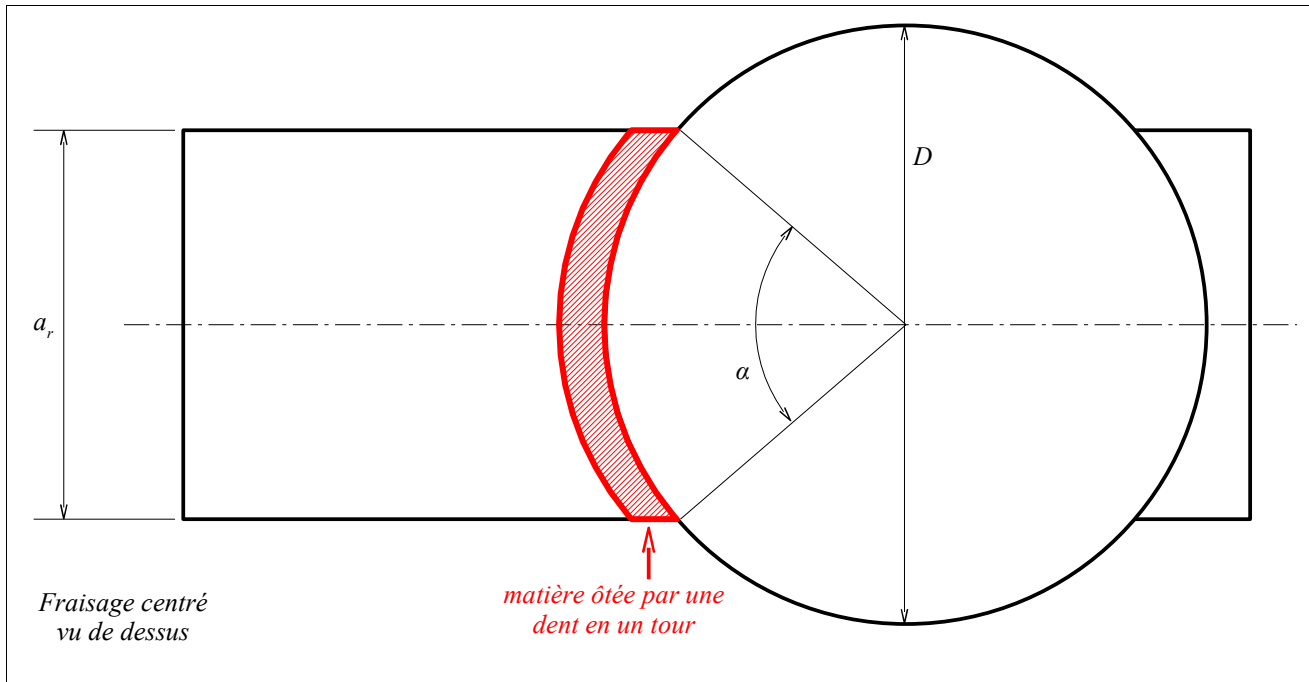
Tableau 4. (valeurs indicatives à défaut de valeurs mesurées).

Force de coupe par unité de surface en fonction de la matière usinée, de sa résistance à la traction (ou dureté Brinell) et de l'épaisseur de copeau h_D pour $\gamma = +6^\circ$ (fontes -6°) et pour des outils en carbure.

Matière	Résistance Rm en N/mm ² ou dureté Brinell	Force de coupe par unité de surface pour une épaisseur h_m de :					
		0,04	0,06	0,1	0,16	0,25	0,4
Aciers d'usage général :							
A 50-2	560	3840	3350	2920	2540	2220	1930
A 70-2	820	4500	3870	3320	2860	2450	2110
Aciers non alliés pour TTh:							
XC 12	< 400	3670	3210	2810	2470	2160	1890
XC 35	500	4000	3450	2970	2560	2200	1900
XC 48	660	3510	3090	2710	2380	2100	1840
XC 65	770	3380	3050	2760	2490	2250	2030
Aciers faiblement alliés à l'état recuit :							
16 MC 5	500	3710	3220	2800	2430	2110	1830
16 NC 6	590	3400	3030	2680	2380	2100	1860
20 MC 5	590	3370	2980	2640	2340	2070	1830
42 CD 4	780	3620	3230	2870	2560	2280	2020
35 NCD 6	830	3190	2880	2600	2340	2110	1900
50 CV 4	670	3770	3320	2920	2580	2270	2000
100 C6	620	4300	3770	3300	2880	2520	2210
Aciers fortement alliés à l'état recuit :							
Z 200 C12	700	3970	3510	3110	2750	2440	2160
Inoxydable martensitique :							
Z 20 C13	880	2790	2580	2390	2210	2050	1900
Z 40 C 14	700	3340	3040	2770	2520	2300	2090
Inoxydable austénitique							
Z 6 CND 17-11	560	2940	2700	2480	2270	2090	1920
Fonte FGL							
- faible résistance	HB 190	3150	2690	2300	1960	1670	1430
- moyenne résistance	HB 200	3200	2780	2410	2090	1820	1580
	HB 210	2990	2610	2270	1980	1730	1510

Efforts de coupe et puissance

CAS DU FRAISAGE CENTRÉ



Par analogie avec le tournage, on a pour une dent : $P_{c_{1dt}} = F_c \cdot V_c = \frac{kc \cdot A_D \cdot V_c}{60 \cdot 10^3}$

Section moyenne du copeau sur un tour $A_{D_m} = \frac{2 \cdot f_z \cdot a_r \cdot a_a}{\alpha D}$

Calcul du nombre de dents en prises : Z'

La fraise a Z dents au total donc sur une portion d'angle α de la fraise on a : $Z' = \frac{\alpha}{2\pi} Z$

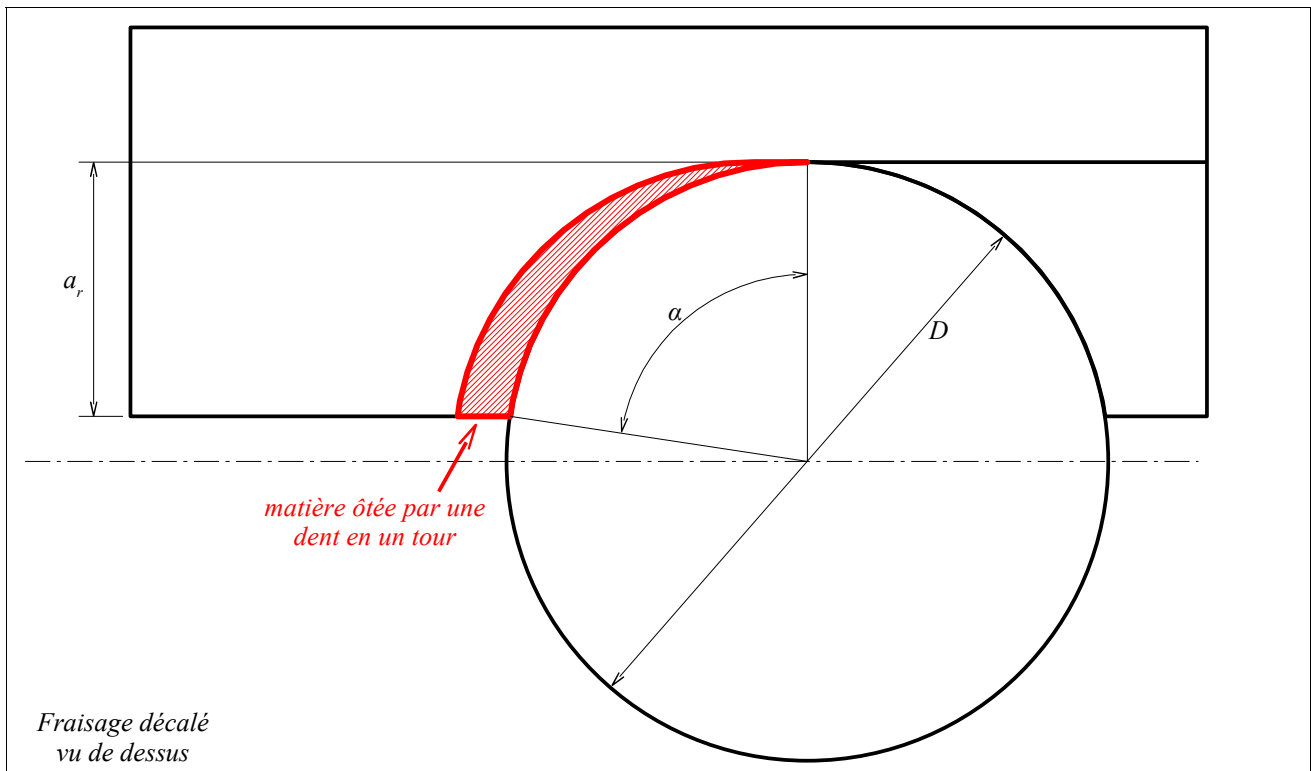
Formules finales :

en fonction de V_c : $P_c = \frac{kc \cdot a_a \cdot a_r \cdot f_z \cdot Z \cdot V_c}{60 \cdot 10^3 \cdot \pi D}$

ou de V_f : $P_c = \frac{kc \cdot a_a \cdot a_r \cdot V_f}{60 \cdot 10^6}$

Efforts de coupe et puissance

CAS DU FRAISAGE DÉCALÉ



Comme en fraisage centré, on a pour une dent : $P_{c_{1dt}} = F_c \cdot V_c = \frac{kc \cdot A_D \cdot V_c}{60 \cdot 10^3}$

Section moyenne du copeau sur un tour $A_{D_m} = \frac{2 \cdot f_z \cdot a_r \cdot a_a}{\alpha D}$

Remarque : la section moyenne du copeau est la même que pour le fraisage centré.

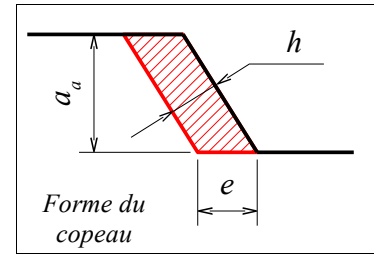
On retrouve donc les mêmes formules finales que pour le fraisage centré :

en fonction de V_c : $P_c = \frac{kc \cdot a_a \cdot a_r \cdot f_z \cdot Z \cdot V_c}{60 \cdot 10^3 \cdot \pi D}$ ou de V_f : $P_c = \frac{kc \cdot a_a \cdot a_r \cdot V_f}{60 \cdot 10^6}$

Efforts de coupe et puissance

Les tableaux donnant la pression spécifique de coupe donnent k_c en fonction de h_m (épaisseur moyenne du copeau).

Or $h_m = e_m \sin K_r$ donc $h_m = \frac{2 f_z a_r}{D \alpha} \sin K_r$



Fraisage centré

On a $\alpha = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{a_r}{D}\right)$ donc $h_m = \frac{f_z \cdot a_r \cdot \sin K_r}{D \cdot \arcsin\left(\frac{a_r}{D}\right)}$

Finalement : $h_m = \frac{360 \cdot f_z \cdot a_r \cdot \sin K_r}{2 \pi D \cdot \arcsin\left(\frac{a_r}{D}\right)}$ (angles en degrés)

Fraisage décalé

On a $\alpha = \arccos\left(1 - \frac{2 a_r}{D}\right)$ donc $h_m = \frac{2 f_z \cdot a_r \cdot \sin K_r}{D \cdot \arccos\left(1 - \frac{2 a_r}{D}\right)}$

Finalement : $h_m = \frac{360 \cdot f_z \cdot a_r \cdot \sin K_r}{\pi D \cdot \arccos\left(1 - \frac{2 a_r}{D}\right)}$ (angles en degrés)

On peut aussi trouver h_m en consultant les tableaux ci-dessous :

Épaisseur moyenne de copeau "hm" en mm ($\kappa_r = 75^\circ$)									
	avance par dent : fz								
a_r/D	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
1/10	0,05	0,1	0,19	0,29	0,38	0,48	0,58	0,77	0,96
2/10	0,05	0,1	0,19	0,28	0,38	0,48	0,57	0,76	0,95
3/10	0,05	0,09	0,19	0,28	0,38	0,47	0,56	0,75	0,94
4/10	0,05	0,09	0,19	0,28	0,37	0,47	0,56	0,74	0,93
5/10	0,05	0,09	0,18	0,28	0,37	0,46	0,55	0,74	0,92
6/10	0,04	0,09	0,18	0,27	0,36	0,44	0,53	0,71	0,89
7/10	0,04	0,09	0,17	0,26	0,35	0,43	0,52	0,70	0,87
8/10	0,04	0,08	0,16	0,25	0,33	0,41	0,49	0,66	0,82
9/10	0,04	0,08	0,15	0,23	0,31	0,39	0,46	0,62	0,77
1/1	0,03	0,07	0,12	0,18	0,24	0,31	0,37	0,49	0,61

Fraisage centré

Épaisseur moyenne de copeau "hm" en mm ($\kappa_r = 90^\circ$)								
	avance par dent : fz							
a_r/D	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
1/20	0,02	0,04	0,07	0,09	0,11	0,13	0,18	0,22
1/10	0,03	0,06	0,10	0,13	0,16	0,19	0,26	0,32
2/10	0,04	0,09	0,13	0,17	0,22	0,26	0,34	0,43
3/10	0,06	0,10	0,16	0,21	0,26	0,31	0,42	0,52
4/10	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,35	0,47	0,59
5/10	0,06	0,13	0,19	0,25	0,32	0,38	0,50	0,63
6/10	0,07	0,14	0,20	0,27	0,34	0,41	0,54	0,68
7/10	0,07	0,14	0,21	0,28	0,36	0,43	0,57	0,71
8/10	0,07	0,14	0,22	0,29	0,36	0,43	0,58	0,72
9/10	0,07	0,14	0,21	0,28	0,36	0,43	0,57	0,71
1/1	0,06	0,13	0,19	0,25	0,32	0,38	0,50	0,63

Fraisage décalé

Si K_r est différent de celui du tableau faire la conversion : $h_m = \frac{h_{m \text{ tableau}}}{\sin K_{r \text{ tableau}}} \times \sin K_r$

Efforts de coupe et puissance

$k_c : \text{N/mm}^2$

Fraisage

Force de coupe par unité de surface.

A partir de données HERTEL et SANDVIK

Tableau 3. (valeurs indicatives à défaut de valeurs mesurées).

Force de coupe par unité de surface en fonction de la matière usinée, de sa résistance à la traction (ou dureté Brinell) et de l'épaisseur de copeau h_m pour $\gamma = -6^\circ$ et pour des outils en carbure.

Matière	Résistance R_m en N/mm^2 ou dureté Brinell	Force de coupe par unité de surface pour une épaisseur h_m de:					
		0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Aciers d'usage général :							
A 50-2	300 à 600	3230	2700	2280	2025	1900	1800
A 70-2	550 à 850	3350	2680	2150	1850	1720	1600
Aciers non alliés pour TTh :							
XC 12	< 400	3000	2530	2130	1900	1790	1690
XC 35, XC 42	500 à 600	3150	2640	2210	1970	1850	1750
XC 35, XC 42	600 à 750	3240	2650	2180	1910	1780	1670
XC 65	700 à 950	3040	2570	2180	1950	1850	1750
Aciers faiblement alliés recuits :							
16 MC 5	500	2650	2340	2060	1890	1810	1740
16 NC 6	590	3040	2550	2140	1910	1800	1700
42 CD 4	570	3210	2680	2230	1980	1860	1750
42 C4	620	3200	2670	2220	1970	1850	1740
100 C6	625	3230	2820	2460	2250	2150	2060
Aciers faiblement alliés traités pour :	690 à 1570	4180	3510	2950	2630	2490	2350
Aciers fortement alliés recuits :	540 à 850	3750	3150	2650	2360	2240	2110
traités pour :	850 à 1750	4390	3690	3100	2770	2620	2470
Aciers inoxydables							
- ferritiques	610 à 770	3860	3240	2720	2430	2300	2170
- austénitiques	540 à 690	4180	3510	2950	2630	2490	2350
Aciers coulés							
- non alliés	770	2790	2340	1970	1760	1660	1570
- faiblement alliés	540 à 850	3000	2520	2120	1890	1790	1690
Fonte FGL							
- faible résistance	HB 150 à 225	1500	1260	1060	950	890	850
- haute résistance	HB 200 à 300	1930	1620	1360	1220	1150	1090
Fontes malléables							
- à copeaux courts	HB 110 à 145	2360	1980	1670	1490	1400	1330
- à copeaux longs	690 à 850	2140	1800	1510	1350	1280	1200

Efforts de coupe et puissance

Les puissances de coupe en fraisage peuvent aussi être déterminées graphiquement :

Abaque de calcul de puissance en fraisage

