

**Chapitre IV : Actions mécaniques de la coupe
(Forces de coupe et puissances)**

IV.1. Introduction

En processus d'usinage par enlèvement de matière, le processus de formation du copeau est inévitablement lié à la nécessité d'une force appropriée, entraînant ainsi une exigence de puissance de coupe (P_c) à la broche. Cette puissance de coupe est fournie par le moteur électrique de la machine-outil, dont la puissance nominale (P_m) est généralement légèrement supérieure. Cette marge supplémentaire prend en compte le rendement mécanique (η) du système, qui est affecté par les pertes résultant des frottements dans les mécanismes de transmission de mouvements.

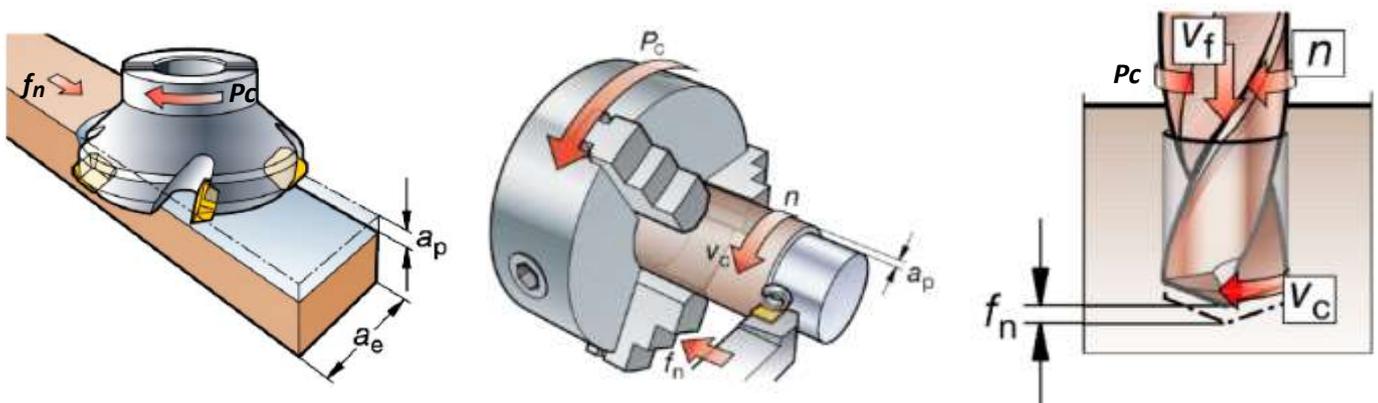
En effet, la formation du copeau résulte de l'interaction complexe entre l'outil de coupe et la matière à usiner. Pour assurer un enlèvement de matière efficace, la force appliquée par l'outil doit être suffisante pour surmonter la résistance du matériau. Cette force de coupe est directement liée à la géométrie de l'outil, la vitesse de coupe et la profondeur de coupe.

La compréhension des forces de coupe (F_c) et de la puissance de coupe (P_c) s'avère essentielle, car elle offre plusieurs avantages pratiques :

- Elle permet de dimensionner correctement les montages d'usinage.
- Elle facilite le contrôle du serrage de la pièce et de l'outil.
- Elle guide le choix de la machine-outil en fonction du critère de puissance (P_m).
- Elle facilite le contrôle et la régulation des paramètres de coupe pour une adaptation optimale du régime de coupe.

Dans le cas où il est possible de choisir la puissance de la machine, il est recommandé de calculer la puissance de coupe (P_c) et de sélectionner celle pour laquelle $P_m \geq P_c/\eta$. Cette approche assure une correspondance adéquate entre la puissance nominale de la machine et la puissance de coupe effective, prenant en compte le rendement mécanique (η) du système.

Si le choix de la machine-outil n'est pas flexible, il devient alors impératif d'ajuster les paramètres de coupe de manière à respecter la relation $P_c \leq P_m \cdot \eta$. Cette démarche garantit que la puissance de coupe nécessaire reste inférieure ou égale à la puissance nominale de la machine, en tenant compte du rendement mécanique. Ainsi, même en l'absence de flexibilité dans le choix de la machine-outil, il est possible d'adapter les paramètres de coupe pour garantir des opérations d'usinage efficaces et conformes aux capacités de la machine disponible.



IV.2 Les efforts de coupe

IV.2.1 Décomposition et Répartition des Efforts

Dans le contexte d'une opération de chariotage sur un tour, les efforts de coupe peuvent être décomposés selon les trois directions principales de la manière suivante, (figure IV.1) :

F_c : Effort tangentiel en direction du mouvement de coupe.

F_a : Effort axial en direction du mouvement d'avance.

F_r : Effort radial en direction du mouvement de pénétration.

La répartition de ces forces dépend du type d'outil utilisé et de sa configuration géométrique. De manière approximative, on estime cette répartition comme suit :

$$F_a = (0,3-0,6) * F_c$$

$$F_r = (0,1-0,4) * F_c$$

La résultante totale des forces F peut alors être calculée comme la racine carrée de la somme des carrés de ces composantes, soit :

$$F = \sqrt{(0,45 * F_c)^2 + (0,25 * F_c)^2 + (F_c)^2}$$

En simplifiant cette expression, on obtient :

$$\boxed{F = 1,2 * F_c \approx F_c}$$

En comparant cette valeur à l'effort tangentiel F_c , on assimile donc F à F_c , soulignant ainsi que l'effort total est essentiellement gouverné par l'effort tangentiel dans ce scénario spécifique d'opération de chariotage sur tour.

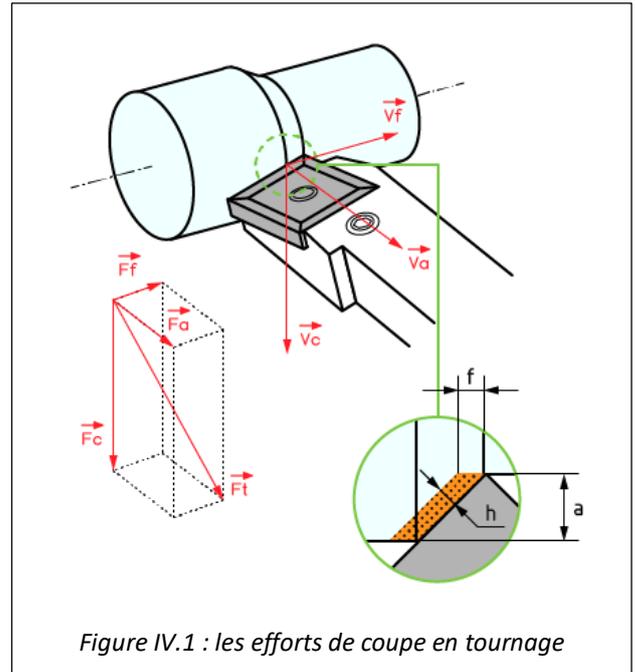


Figure IV.1 : les efforts de coupe en tournage

IV.2.2 Calcul des efforts de coupe

a. Première approche

En tant qu'approche initiale pour évaluer les efforts de coupe, nous avons adopté un modèle basé sur la section du copeau et la résistance à la rupture par traction du matériau de la pièce, formulé comme suit :

$$F_c = K * S_c * R_t$$

Où :

F_c : Effort de coupe (en N)

S_c : Section du copeau (en mm²)

R_t : Résistance du métal à usiner (en N/mm²)

K : Coefficient spécifique de coupe

$K = 2,5$ à 4 pour les Aciers

$K = 4$ à 5 pour les Fontes

À titre d'exemple, considérons le chariotage d'une pièce en acier C38 avec ($a = 4$ mm), ($f = 0,3$ mm/tr) et ($V_c = 32$ m/min). Les résultats obtenus sont les suivants :

$$F_c = 3,25 * 650 * 4 * 0,3 = 1950 * 4 * 0,3 = 2730 \text{ N}$$

$$P_c = F_c * V_c / 60 * 1000 = 2730 * 32 / 60000 = 1,46 \text{ kW}$$

Il est à noter que ce modèle présente des limitations, notamment en raison de l'utilisation de la caractéristique de résistance à la traction, ce qui peut affecter la précision des résultats dans certaines situations. Des considérations plus approfondies peuvent être nécessaires pour affiner l'évaluation des efforts de coupe, en prenant en compte d'autres paramètres et caractéristiques du processus d'usinage.

b. Deuxième approche

Afin de réduire au minimum l'erreur associée à l'utilisation de la caractéristique de résistance du matériau de la pièce dans l'estimation de l'effort de coupe F_c , nous avons adopté un modèle basé sur la section du copeau (ou section de coupe) et un coefficient spécifique de coupe K_c formulé comme suit :

$$F_c = K_c * S_c = K_c * a * f$$

Où :

F_c : Effort de coupe (en daN)

S_c : Section du copeau, $S_c = a * f$ (en mm²)

K_c : Coefficient (pression) spécifique de coupe (en daN/mm²)

Le facteur K_c est déterminé expérimentalement à travers une série d'essais, et il dépend principalement de la nature du matériau à usiner. Il peut également être corrélé à d'autres facteurs de coupe tels que l'avance f , l'épaisseur du copeau hm , et l'angle de coupe γ . Il est indispensable de mesurer avec précision la valeur de K_c pour chaque type de matériau et pour chaque procédé de coupe expérimenté. Cette approche offre une méthode plus ajustée et adaptative, permettant de mieux prendre en compte les caractéristiques spécifiques du matériau et du processus d'usinage.

IV.2.2.1 Cas de tournage

Le tableau IV.1, fourni ci-dessous répertorie les valeurs du coefficient spécifique de coupe K_c en daN/mm² en fonction de la nature du matériau à usiner et de la valeur de l'avance f . Cette classification permet de sélectionner le coefficient K_c approprié en fonction des paramètres spécifiques du processus d'usinage.

La formule de calcul de l'effort de coupe F_c en fonction de l'avance f et de l'épaisseur de coupe a est la suivante

$$F_c = K_c * f * a \text{ (daN)}$$

Il est important de souligner que la valeur de K_c joue un rôle critique dans la précision de cette estimation. Cette valeur est déterminée expérimentalement par des essais pratiques qui prennent en compte non seulement la nature du matériau, mais aussi d'autres paramètres tels que l'épaisseur du copeau hm et l'angle de coupe γ .

Ks (en daN/mm ²)		avance f (mm/tr)			
Matière à usiner		0,1	0,2	0,4	0,8
Aciers Ordinaires	E26 – A33	360	260	190	140
	E36	400	290	210	150
	A60	420	300	220	160
	A70	440	315	230	165
Aciers fins pour TT	XC38 – XC42	320	230	170	125
	XC55 – XC65	360	260	190	140
	XC70	390	285	205	150
Aciers spéciaux	au Mn	470	340	245	180
	au Ni,Cr	500	360	260	185
	au Cr,Mo	530	380	275	200
	Inox	520	375	270	190
Fontes	Ft10–Ft 15	190	136	100	70
	Ft20-Ft25	290	210	150	110
	Fonte alliée	325	230	170	120
	Fonte malléable	240	175	125	90
Alliages de Cuivre	Laiton	160	115	85	60
	Bronze	340	245	180	130
Alliages d'Aluminium	avec Si<13%	140	100	70	50
	de moulage (R<19)	115	85	60	45
	... (19<R<27 hbar)	140	100	70	50
	... (27<R<37 hbar)	170	122	85	65

Tableau IV.1 : les valeurs du coefficient spécifique de coupe K_c en daN/mm²

Exercice :

Soit une opération de chariotage avec un outil couteau sur un axe en Ft10 (diamètre brut : 100 mm, diamètre usiné : 96 mm).

L'usinage se fera dans les conditions suivantes :

$$V_c = 20 \text{ m/min}$$

$$f = 0,4 \text{ mm/tr}$$

$$K_c = 100 \text{ daN/mm}^2$$

$$F_c = 100 \times 2 \times 0,4 = 80 \text{ daN}$$

IV.2.2.2 Cas de fraisage

La configuration des efforts lorsqu'une dent est en prise est analogue à celle observée lors d'opérations de tournage. L'effort tangentiel de coupe est formulé de manière similaire, comme illustré dans la figure IV.2. La détermination du coefficient K_c est également influencée par l'épaisseur du copeau. Étant donné que cette épaisseur peut varier, comme le met en évidence la figure, la procédure pour déterminer ce coefficient requiert l'établissement d'une épaisseur moyenne de copeau hm . (Voir le tableau IV.2 récapitulatif de la démarche de recherche de la valeur de K_c).

Dans cette représentation graphique, l'effort tangentiel de coupe F_c est déterminé par la formule associée, et le coefficient K_c intervient en fonction de l'épaisseur moyenne du copeau hm . La figure démontre la variation de cette épaisseur dans le contexte de l'usinage.

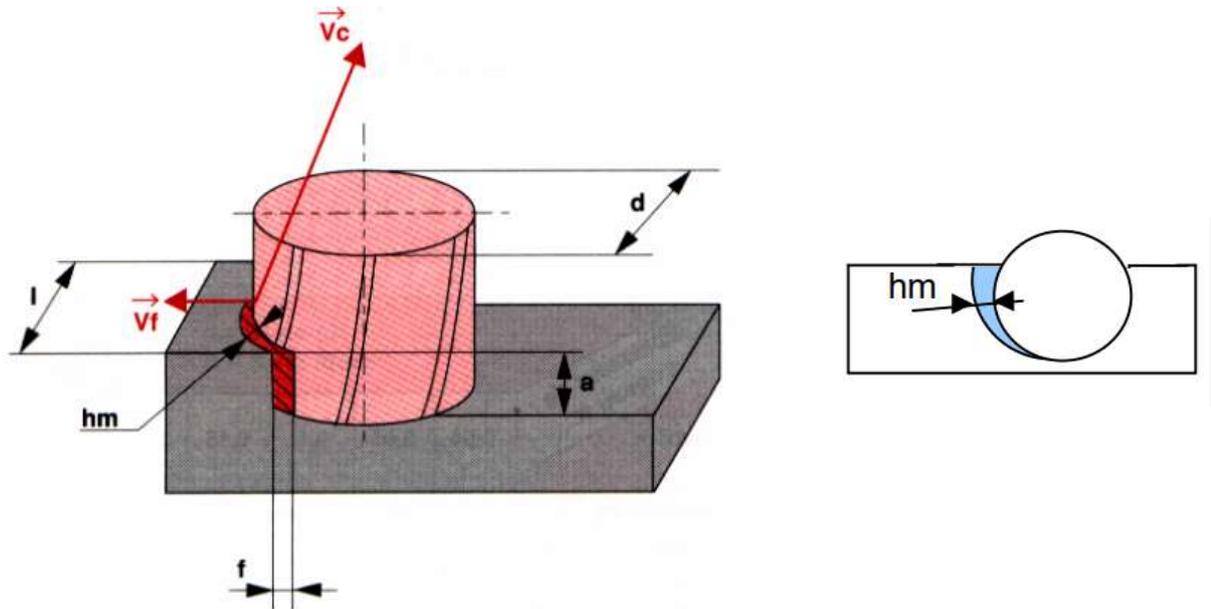


Figure IV.2 : Illustration de la situation et du processus

Étape 1 : Détermination de K_c en fonction du matériau à usiner. Le tableau IV.3, ci-dessous présente les valeurs de K_c pour différents matériaux fréquemment utilisés en construction mécanique. Les valeurs de K_c sont données pour $hm = 0.2$ et $\gamma = -0.7^\circ$

Étape 2 : Correction de la valeur calculée de K_c en fonction de l'angle de coupe γ . Appliquez une correction de 1,5% par degré de changement d'angle. Ainsi, un angle de coupe plus grand (positif) réduira la valeur de K_c , et inversement, ($\gamma = +3^\circ$ donne un K_c de 15 % inférieur à la valeur du tableau).

Étape 3 : Détermination de l'épaisseur moyenne du copeau hm en fonction de l'avance par dent. Utilisez les paramètres de coupe pour calculer cette épaisseur, car elle est un facteur crucial dans l'évaluation des efforts de coupe (Tableau IV.4).

Étape 4 : Recherche de la valeur de correction fh en fonction de hm . Utilisez le graphe $fh = f(hm)$, pour ajuster la valeur de K_c en fonction de hm (figure IV.3).

Étape 5 : Calculer la valeur du coefficient spécifique de coupe pour l'opération considérée en appliquant la formule : $K_c = K_c (\text{provisoire}) * fh$

Ces étapes méthodiques garantissent une approche systématique pour déterminer le coefficient K_c ajusté en fonction des caractéristiques spécifiques du matériau, de l'angle de coupe, de l'épaisseur du copeau, et de l'avance par dent, offrant ainsi une estimation plus précise des efforts de coupe dans le contexte de l'usinage.

Tableau IV.2 : Récapitulatif de la démarche de recherche de la valeur de K_c

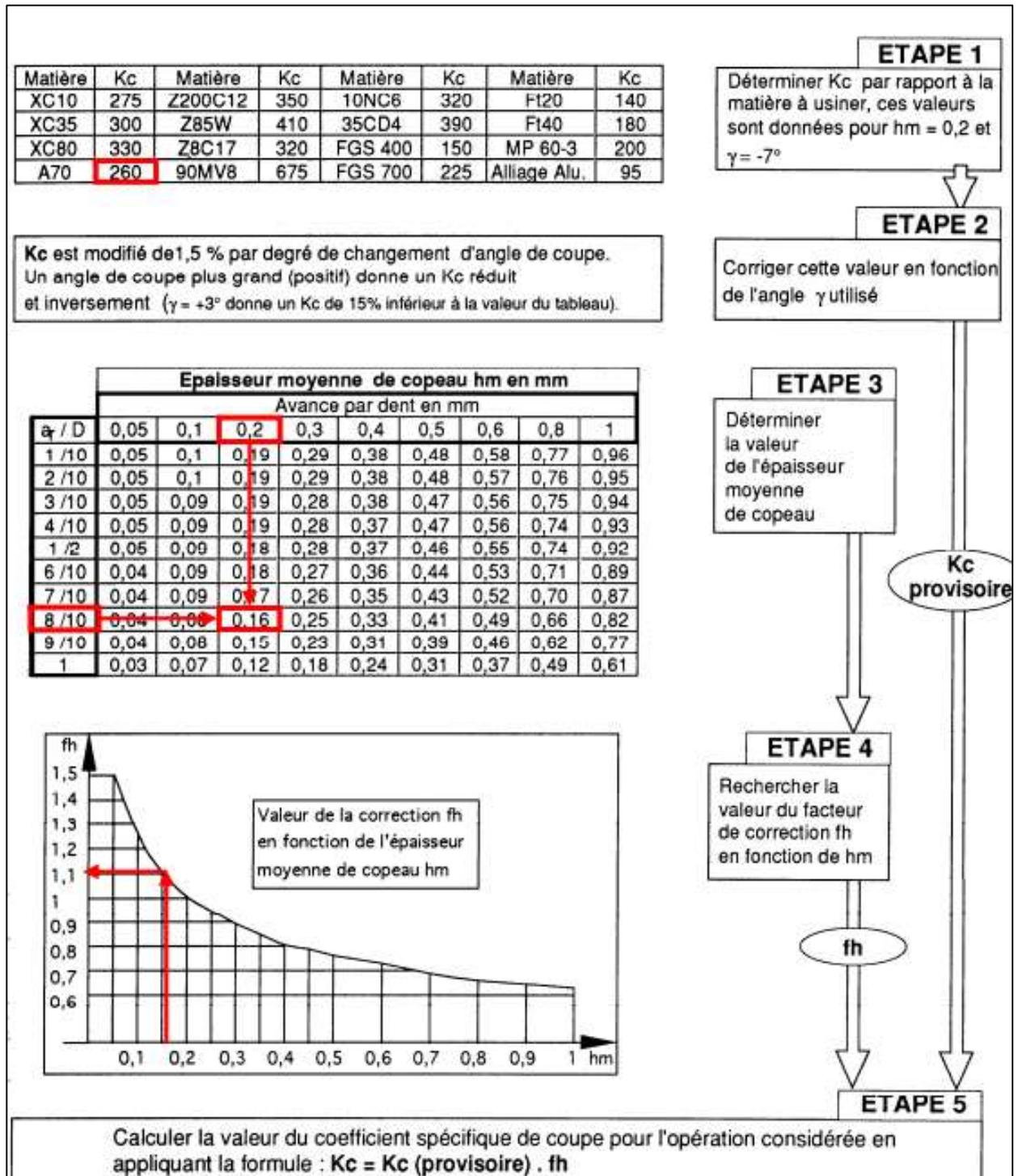


Tableau IV.3 : Valeurs de K_c en fonction de la matière à usiner (étapes 1 & 2)

Matière	Kc	Matière	Kc	Matière	Kc	Matière	Kc
XC10	275	Z200C12	350	10NC6	320	Ft20	140
XC35	300	Z85W	410	35CD4	390	Ft40	180
XC80	330	Z8C17	320	FGS 400	150	MP 60-3	200
A70	260	90MV8	675	FGS 700	225	Alliage Alu	95

Tableau IV.4 (étape 3)

Épaisseur moyenne de copeau h_m [mm]									
Avance par dent en mm									
a_r/D	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1
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	0,29	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
1/2	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	0,51	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	0,0	0,07	0,12	0,18	0,24	0,31	0,37	0,49	0,61

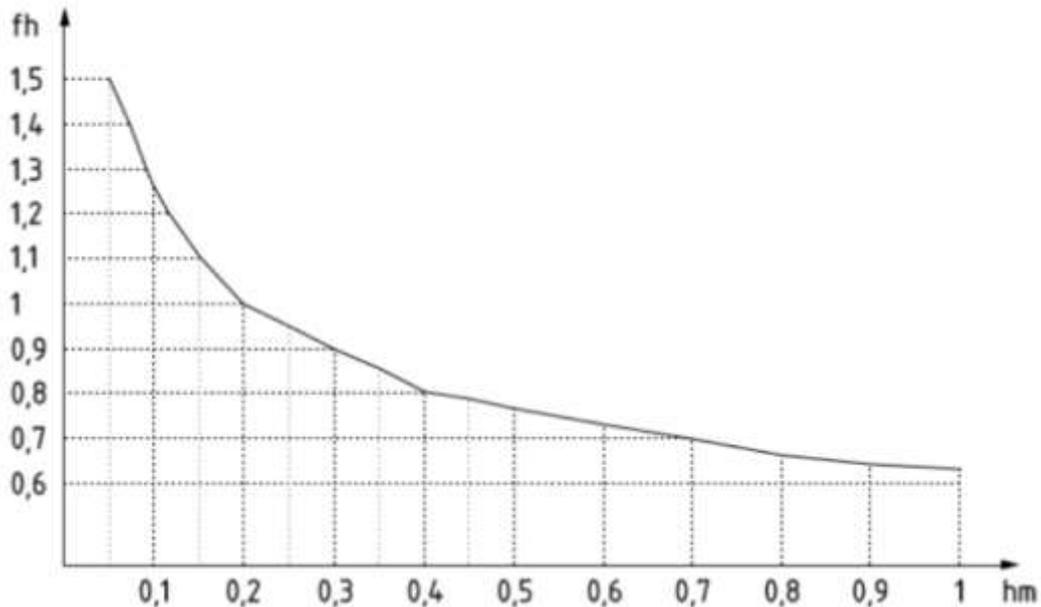


Figure IV.3 : La valeur de correction f_h en fonction de h_m (étape 4)

Exercice :

Soit un fraisage à effectuer sur une pièce en A70 de largeur $a_r = 80$ mm avec une fraise de diamètre : 100 mm (8 dents). $V_c = 20$ m / min

L'angle de coupe γ est de -1° , l'avance est de 0,2 mm/dent/tr, la pénétration est de 1 mm

Étape 1 :

$K_c = 260 \text{ daN/mm}^2$

Étape 2 :

$\gamma = -1^\circ$, 6° d'écart (plus grand)

$K_c(\text{provisoire}) = 260 - (260 \times 9/100) = 236,6 \text{ daN/mm}^2$

Étape 3 :

$a_r/D = 80 / 100 = 0,8$, $f = 0,2 \text{ mm/dent/tr}$, $h_m = 0,16 \text{ mm}$

Étape 4 :

$$fh = 1,1$$

Étape 5 :

$$Kc = 236,6 * 1,1 = 260.26 \text{ daN/mm}^2$$

$$Fc = 260.26 * 1 * 0.2 = 52,052 \text{ daN}$$

IV.2.2.2 Cas de perçage

La décomposition de l'effort de coupe conduit à :

- Deux forces tangentielles f_c agissant sur les deux lèvres, générant un moment Mt
- Deux forces radiales f_p opposées qui s'annulent en cas de symétrie parfaite.
- Deux forces axiales f_a qui s'ajoutent pour donner une poussée axiale $Fa = 2 * f_a$

Cette répartition des forces offre une perspective claire sur les composantes individuelles de l'effort de coupe, avec les forces tangentielles responsables de la rotation de l'outil, les forces radiales équilibrées en cas de symétrie, et les forces axiales contribuant à la poussée globale dans la direction axiale de l'outil.

Pour le calcul de l'effort d'avance on utilise la relation $Fa = k * f * d$, avec k un coefficient déterminé expérimentalement (voir le tableau IV.5).

Fa (en N), f (en mm/tr), d (en mm) et k (en N/mm²)

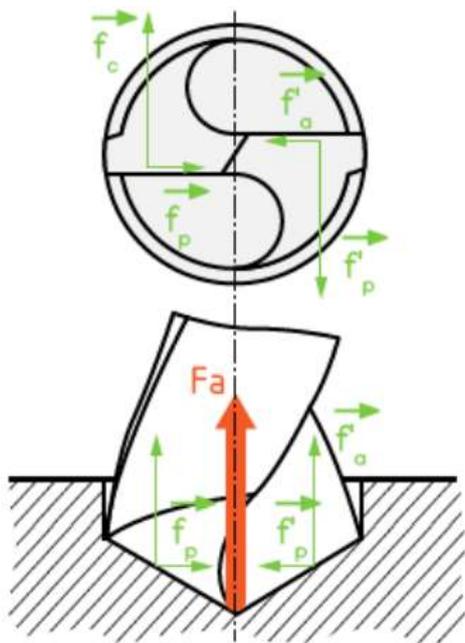


Tableau IV.5

Matière	K	k
Aciers R ≤ 600 MPa	11	1000
Aciers R > 600 Mpa	11.5	1200
Aciers inoxydables	15	1300
Aciers au nickel-chrome	14	900
Aciers au chrome-molybdène	13	1600
Fontes grise	8	700
Fontes GS	7.5	1100
Laitons	3.5	800
Laitons	5	850

Figure IV.4 : représentation de la situation des efforts de coupe

IV.3 La puissance de coupe

L'analyse et l'évaluation des forces de coupe revêtent une importance particulière dans le domaine de l'usinage. Elles permettent essentiellement d'évaluer la puissance de coupe, facilitant ainsi la sélection judicieuse d'une machine-outil.

La puissance de coupe, absorbée par la broche, est déterminée à l'aide d'une formule qui prend en considération plusieurs éléments, notamment :

- Les paramètres de coupe en fonction de la matière à usiner,
- Les forces de coupe exercées par l'outil sur la pièce, exprimées à travers une variable K_c désignée comme "Pression spécifique de coupe" : $K_c = F_c / A_D$

K_c : Pression spécifique de coupe en (N/mm²)

F_c : Force de coupe en (N)

A_D : Section du copeau en (mm²)

Remarque : K_c représente donc une force de coupe par unité de surface.

On distingue deux puissances :

- LA PUISSANCE DE COUPE (P_c) :

Elle dépend principalement de la vitesse de coupe (V_c) et de l'effort tangentiel de coupe (F_c).

- LA PUISSANCE AU MOTEUR (P_m)

Elle est fonction du rendement de la chaîne cinématique $P_m = P_c / \eta$

La formule générale de la puissance de coupe P_c peut s'écrire : $P_c = \frac{A_D * K_c * V_c}{60 * 10^3}$

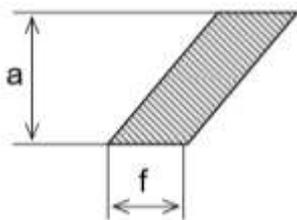
Avec : P_c : est exprimée en KW et V_c en m/min

En utilisant les abaques de calcul de puissance tant pour le tournage que pour le fraisage, il devient possible d'établir la puissance de coupe (P_c) en fonction des données spécifiques à l'usinage, telles que les paramètres de coupe, l'outil utilisé, la matière à usiner, et les caractéristiques de la machine.

Ces abaques sont des outils permettant de se dispenser de la nécessité de recourir à la formule de calcul de la puissance de coupe.

IV.3.1 Puissance de coupe en tournage absorbée par la broche

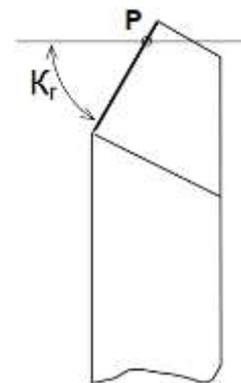
Si l'on considère la section de copeau pour un outil donné



La section du copeau s'écrit : $A_D = f * a$

f : l'avance

a : la profondeur de passe



La formule de la puissance de coupe peut s'écrire

$$P_C = \frac{f * a * K_C * V_C}{60 * 10^3}$$

On peut utiliser l'abaque de calcul de puissance de coupe de **tournage** (voir annexes), pour déterminer P_C .

IV.3.2 Puissance de coupe en fraisage absorbée par la broche

Illustration d'une dent en prise. La section du copeau moyen peut s'écrire :

$$A_{Dm} = h_m * b_D$$

La puissance développée par F_C peut s'écrire :

$$P_C = \frac{K_C * Q}{60 * 10^3}$$

$$Q = S * Vf; S = a_a * a_r; Vf = N * f_z * Z$$

Q : débit du copeau en mm^3/min

Vf : vitesse d'avance en mm/min

N : fréquence de rotation tr/min

S : section du copeau en mm^2

$$P_C = \frac{a_a * a_r * f_z * K_C * V_C * Z}{\pi * D * 60 * 10^3}$$

P_C : en KW

K_C : en N/mm^2

V_C : en m/min

Z : nombre de dents

a_a : Profondeur axiale en mm

a_r : Profondeur radiale en mm

f_z : Avance en $\text{mm}/\text{tr}/\text{dent}$

D : Diamètre de la fraise en mm

On peut utiliser l'abaque de calcul de puissance de coupe de **fraisage** (voir annexes), pour déterminer P_C .

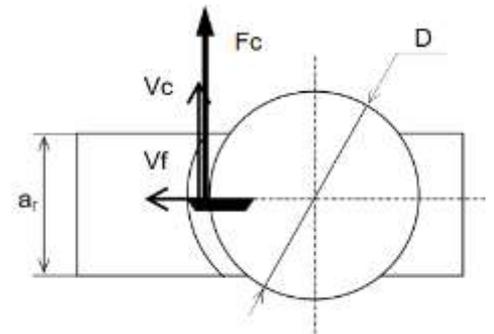
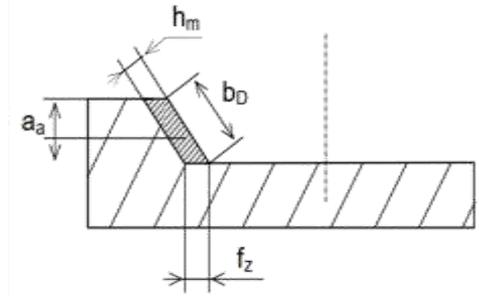
IV.3.3 Puissance de coupe en perçage

La puissance nécessaire à la coupe pour ce type d'opération se calcule à l'aide de la relation

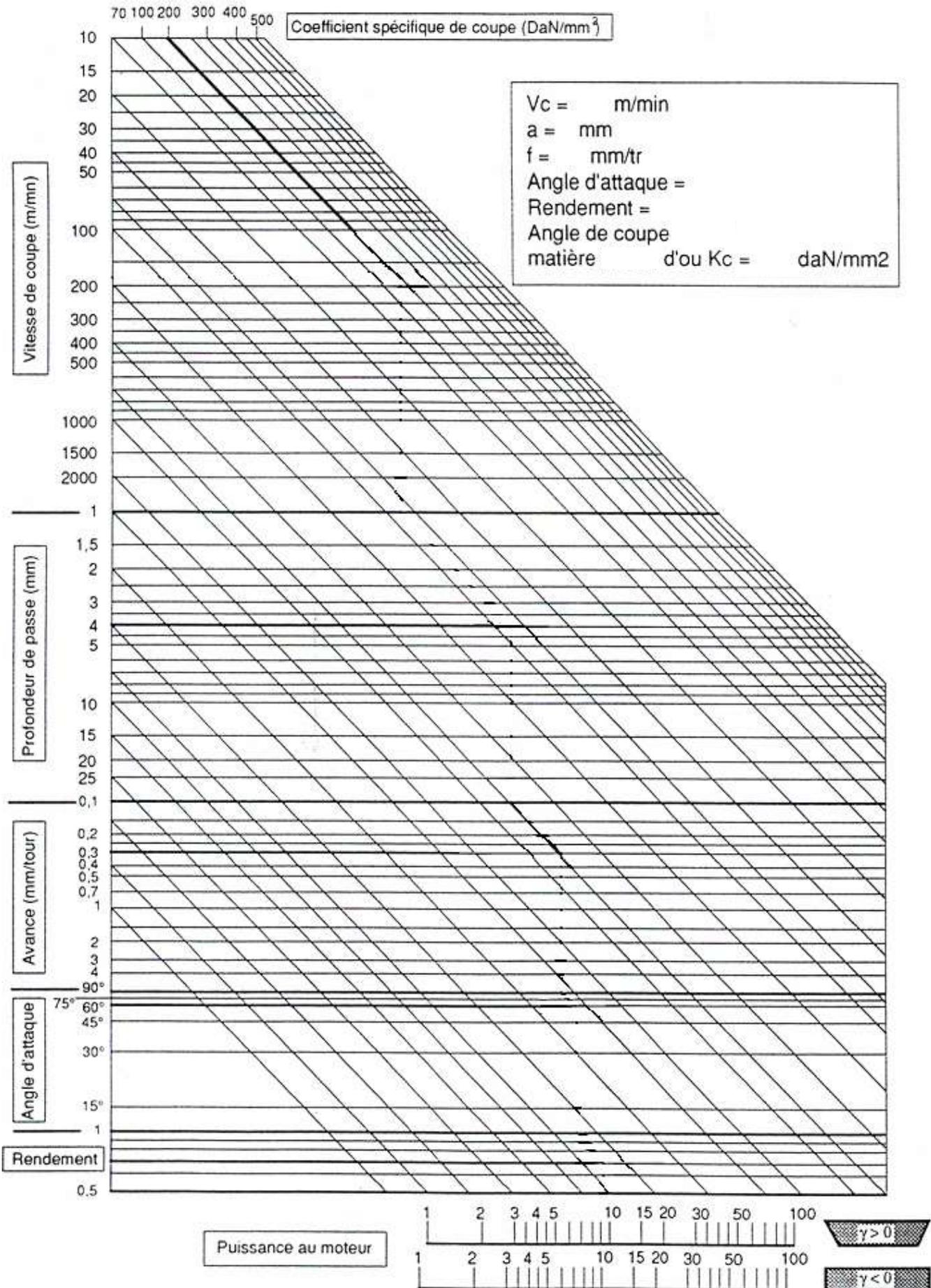
$$P_C = \frac{K * f * d * V_C}{60 * 10^3}$$

K : est donné par le tableau IV.5 en N/mm^2

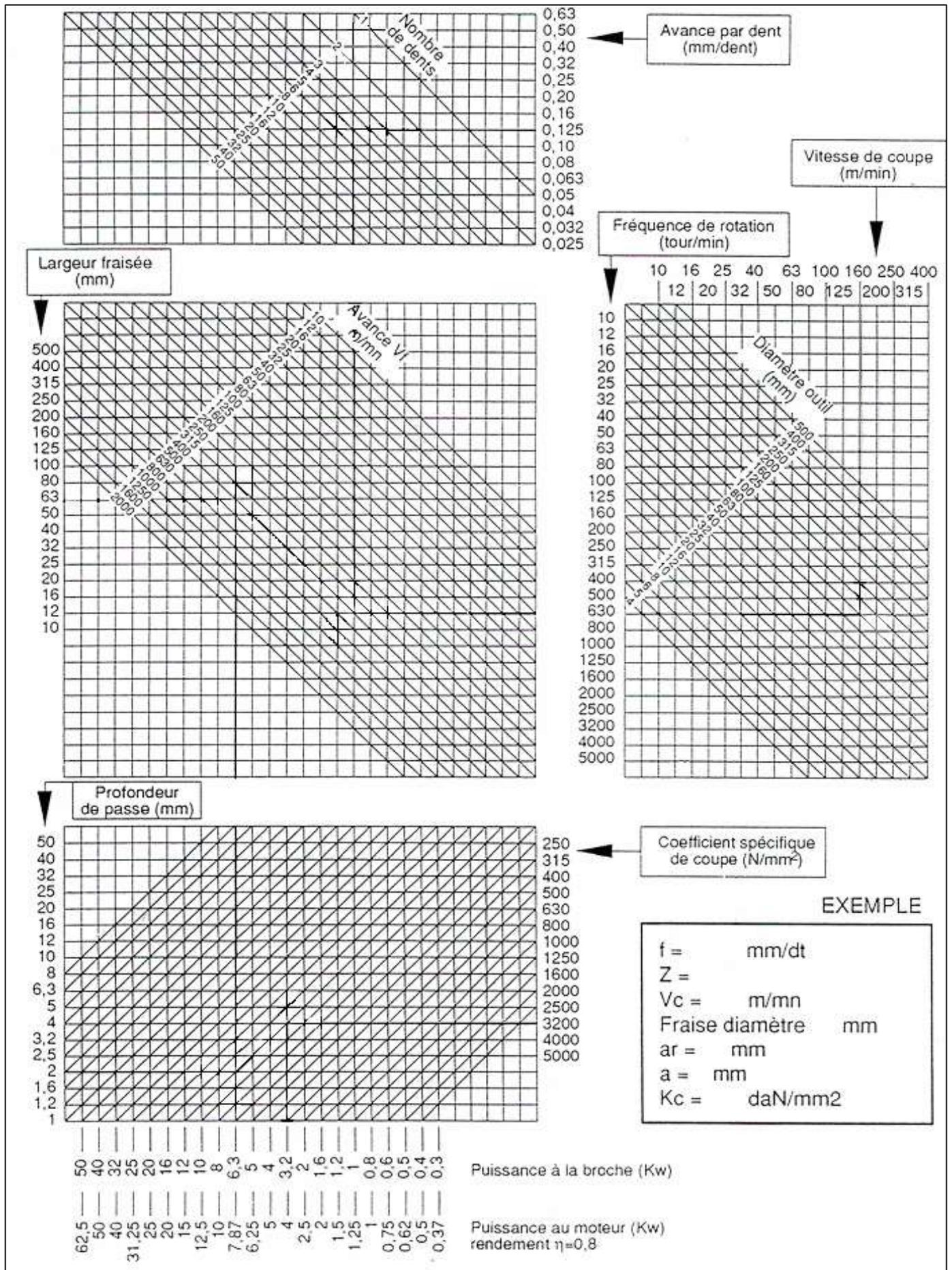
f (en mm/tr), d (en mm)



Abaque de calcul de puissance en tournage

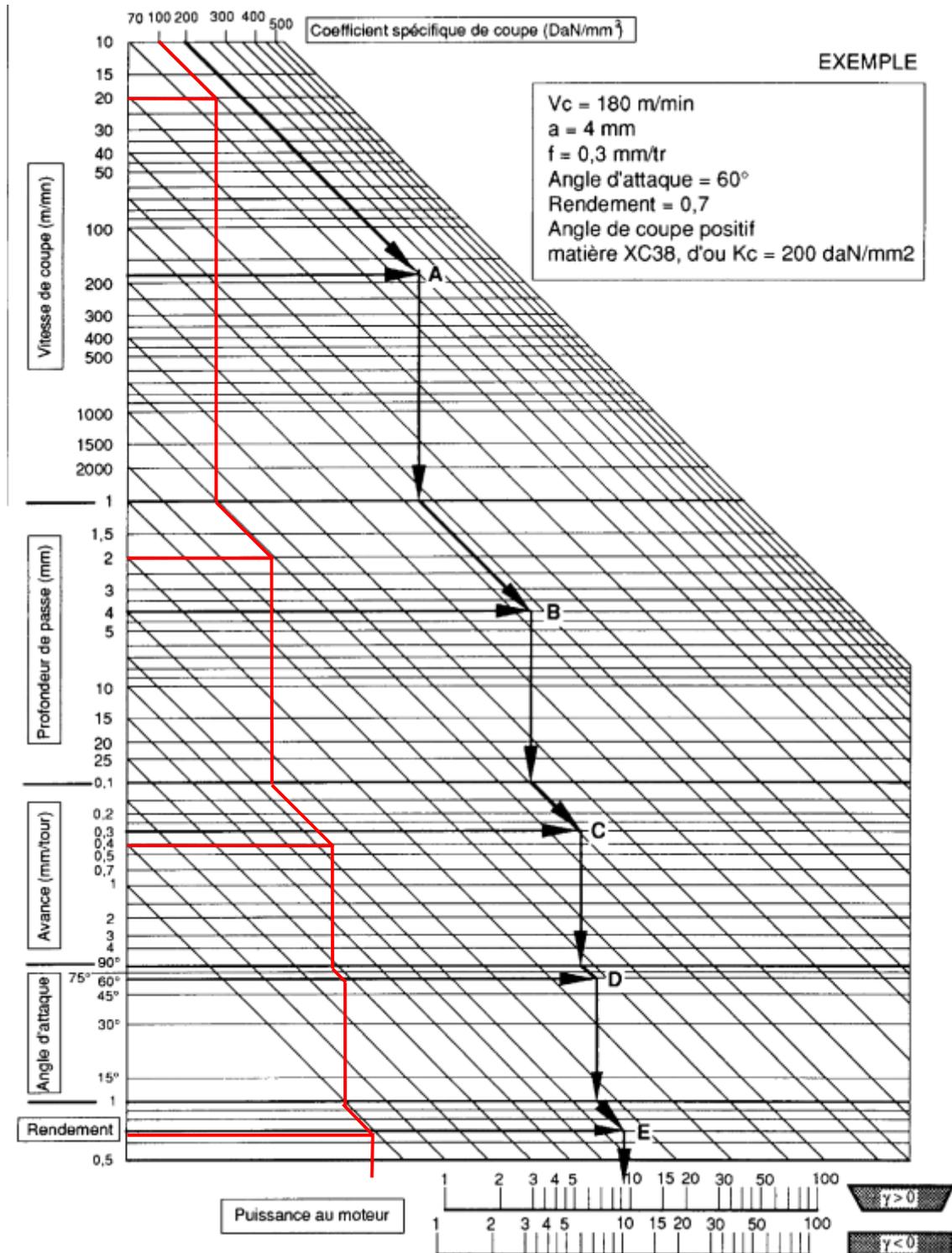


Abaque de calcul de puissance en fraisage



Exercice :

- ✓ $a = 2 \text{ mm}$
- ✓ $f = 0,4 \text{ mm/tr}$
- ✓ $V_c = 20 \text{ m/min}$
- ✓ $K_c = 100 \text{ daN/mm}^2$
- ✓ Angle d'attaque : 90°
- ✓ Rendement : $0,7$
- ✓ $\gamma < 0$



Exercice :

$K_c = 260 \text{ daN/mm}^2$, $a_r = 80 \text{ mm}$, $V_c = 20 \text{ m/min}$, fraise de diamètre :100 mm (8 dents) angle de coupe γ est de -1° , l'avance de 0,2 mm/dent/tr, pénétration est de 1mm.

