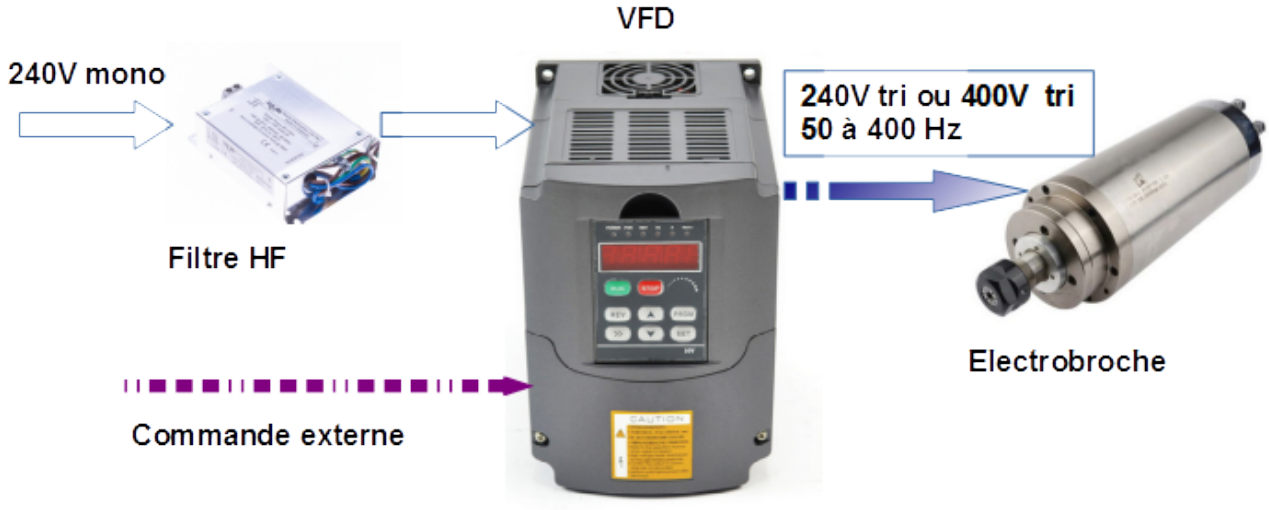
Les objectifs de ce document sont :

- d'éclaircir quelques point essentiels sur les électrobroches HF utilisées sur les petites fraiseuses à portique
- avoir une méthode pour estimer l'effort de coupe et donc pouvoir à la fois dimensionner l'électrobroche et ensuite à chaque fois optimiser les paramètres de coupe

Broche d'usinage

Les fraiseuses à portique chinoises d'entrée de gamme sont livrées avec des électrobroches « haute vitesse » (en fait 25000 trs/mn maxi). Pour être clair on devrait parler du couple VFD-Electrobroche car l'un ne va pas sans l'autre.



Quelques mots sur le VFD[1]

VFD , Variable Frequency Drive, signifie pilote à fréquence variable. C'est en fait à la base un variateur de vitesse.

`--> Le VFD doit être correctement appairé et programmé en fonction de l'électrobroche.`

La plupart des électrobroches fonctionnent avec un moteur triphasé, donc il vaut mieux s'assurer que la sortie du VFD est en triphasé. Cela tombe sous le sens que le VFD ne doit pas être sous-dimensionné, mais pas excessivement surdimensionné non plus car il s'éloignerait de son point de fonctionnement optimal. Il est préconisé de le dimensionner à 1,3 voire 1,5 fois la puissance maximale en service continu de l'électrobroche.

Pour faire simple, le VFD va recevoir du courant monophasé (réseau 240V) il va ensuite produire un courant triphasé à fréquence variable, généralement pour nos applications entre 50Hz et 400 Hz. Pour les modèles les mieux conçus, le VFD offre au moins des rampes d'accélération/décélération

1 *Nommés aussi adjustable-frequency drive, variable speed drive, AC drive, micro drive* or *inverter drive*

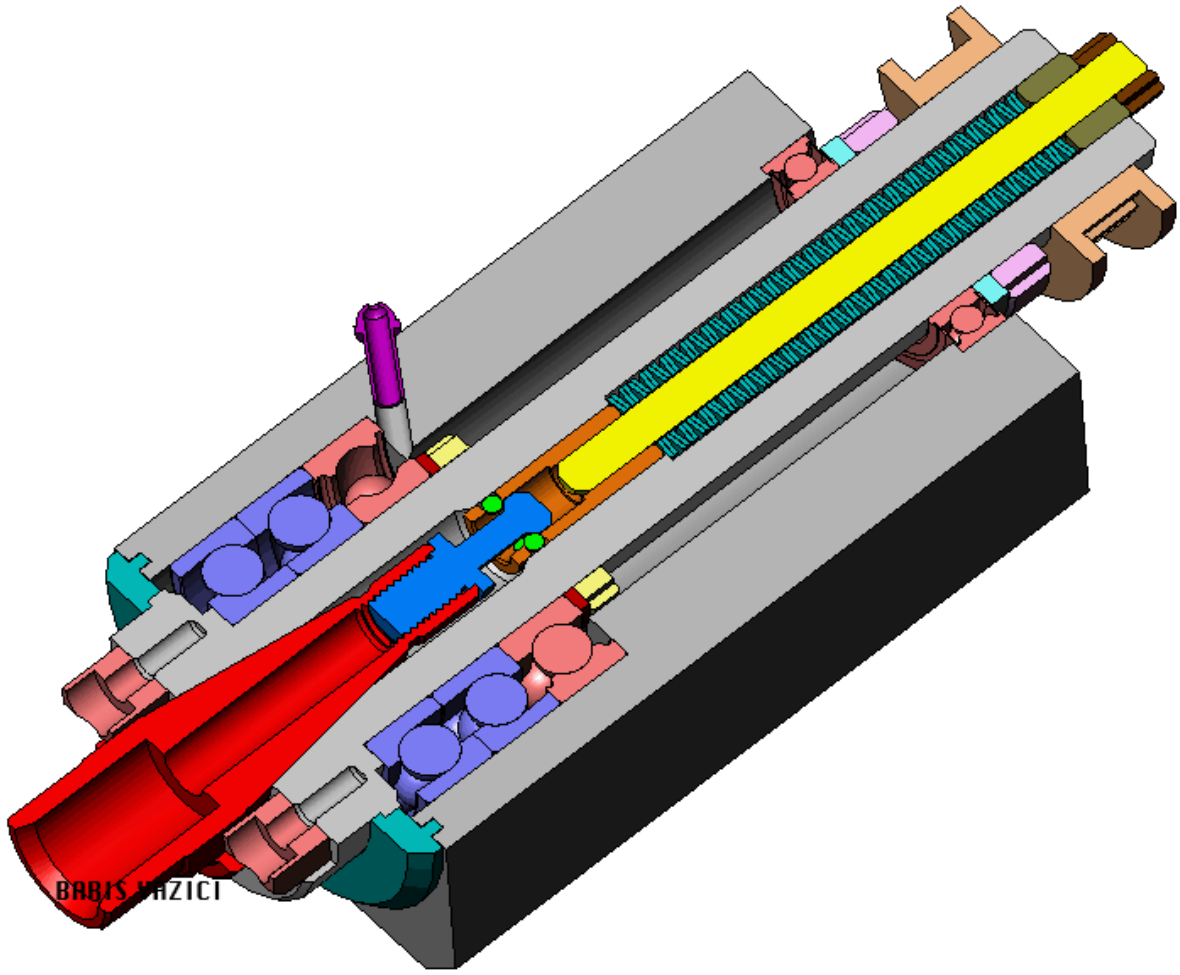
programmables, un pilotage à couple constant[2], un filtre EMI haute fréquence intégré pour éviter de perturber le réseau en amont. Ces appareils possèdent en face face avant des boutons de commande et de programmation. Le VFD doit pouvoir recevoir des commandes de pilotage externe sinon ce serait se priver d'un élément de conduite important pour notre application. La carte de contrôle-commande « tout-en-un » livrée d'origine avec les machines chinoises incluent un VFD sommaire, mais leur performance et leur durée paraissent sujettes à caution.

Il est vital d'obtenir la documentation technique (datasheet) auprès du fournisseur ou du fabricant de VFD pour régler (paramétrage) et faire fonctionner au mieux le dispositif ; même si dans les grandes lignes les principes généraux sont identiques, d'un constructeur à l'autre il peut y a voir des différences notables en termes de précision, de fonctions disponibles et de réglages à faire.

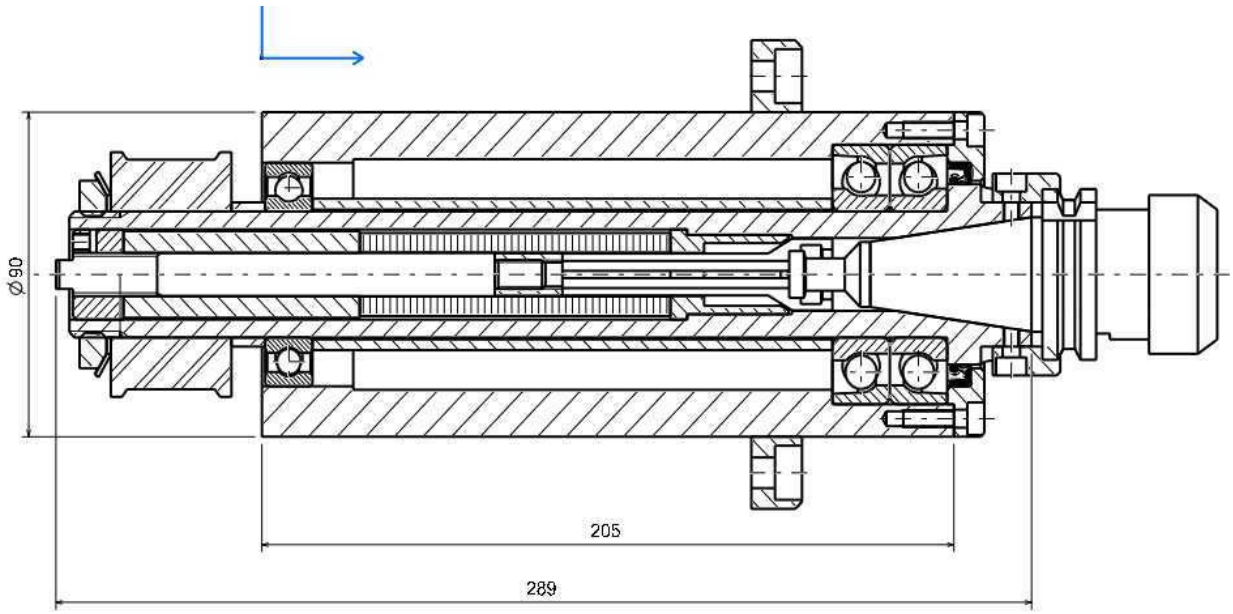
Electrobroche

Les porte outils Dremel que possèdent de nombreux modélistes sont un bon exemple de ce qu'est une électrobroche d'usinage.

On voit sur les dessins ci-dessous le principe technique d'une broche rapide avec changeur automatique d'outil. *(source : CNC Cookbook)*



2 Vector control en anglais



Il existe plusieurs grandes familles d'électrobroche. En ce qui concerne les paliers il y aura des paliers précontraints à roulement à billes, acier ou céramique, des paliers magnétiques, des paliers fluides (air ou hydraulique).

Pour les applications grand public ce sont des broches à roulement qui sont proposées. La qualité des roulements est critique : ils déterminent la précision et la durée de vie de l'équipement. Dans l'offre chinoise le pire côtoie le juste correct. La technologie des roulements céramiques n'est apparemment pas utilisée sur les broches chinoises. La précision revendiquée est de l'ordre de +/- 0,03 à +/- 0,05mm.

---> S'assurer, quand cela est possible, que la broche soit montée avec des roulements grande vitesse, roulement(s) précontraint(s) pour le ou les roulements de tête.

En usinage CNC, l'électrobroche peut avoir à usiner une heures d'affilée ou plus ; il vaut mieux donc avoir une électrobroche robuste et fiable.

---> Même si ce n'est pas à proprement parler un consommable ces électrobroches s'usent (perte de précision, grippage). Elle ne sont pas réparables, tout au moins pour le commun des mortels. Il convient d'en prendre soin et des les conduire correctement pour les faire durer et conserver leur précision.

Refroidissement liquide

Le refroidissement liquide fait l'unanimité par rapport au refroidissement à air. Ce type de refroidissement a beaucoup d'avantages :

- Beaucoup moins de bruit,
- évacuation de la chaleur mieux répartie,

- plus grande « densité » de chaleur évacuée,
- pas de consommation de puissance par le ventilateur externe.
- **Refroidissement indépendant de la vitesse de rotation.** Les turbines des électrobroches refroidies par air voient vite leurs performances se dégrader avec la baisse de vitesse de rotation.

  L'eau pure n'est pas conseillée, il faut utiliser un liquide de refroidissement adapté pour éviter entartrage et corrosion du carter en aluminium. La température moyenne à ne pas dépasser pour le fluide est de 35 à 40°C.

Rodage - préchauffage :

Les roulements de tête sont de type précontraints (du moins espérons-le) et, pour une électrobroche neuve, il convient de les roder par des cycles de fonctionnement à vide. Ce serait même, d'après certains, vital s'il s'agit de roulements céramiques. Les cycles conseillés sont souvent indiqués dans la notice constructeur.

Le préchauffage de l'électrobroche est important avant usinage et se résume souvent à un cycle à vide à mi-vitesse d'une à deux minutes avec des courtes rampes d'accélération/décélération

Porte-outil

Préférer les portes outils utilisant des pinces ER qui, étant standard, offrent un grand choix de fournisseurs. Pour des électrobroches de 500W à 800W opter pour un jeu de pinces et un porte-pinces ER11. Les ER11 serrent de 0,5mm à 7mm. De 1,5kW à 2,2 kW les ER16 feront l'affaire.

Facteur de service

Le facteur de service décrit la puissance électrique admissible pour un type de fonctionnement donné. La norme a décrit et explicité 11 services types.

S1 est le service de fonctionnement continu. Certains services peuvent être plus pénalisants que le service continu comme, par exemple, l'enchaînement de cycles courts (démarrage, utilisation à Pmax pendant une courte période, freinage jusqu'à l'arrêt). Les informations complètes sur le sujet des services type sont faciles à trouver.

Conduite de l'électrobroche : choix des paramètres d'usinage

Le calcul des efforts de coupe se trouve dans des tableaux et abaques destinés à des machines conventionnelles. Avec les électrobroches de petite puissance ils sont à peu près inutilisables car on se retrouve en dehors du domaine d'utilisation de ces abaques. J'ai placé en annexe une méthode pour estimer l'effort de coupe, et donc régler au mieux les paramètres de coupe dont fait partie la vitesse de rotation de la broche.

Le réglage des paramètres de coupe est beaucoup plus critique sur une fraiseuse à portique que sur une machine d'établi conventionnelle. En voici selon moi les raisons :

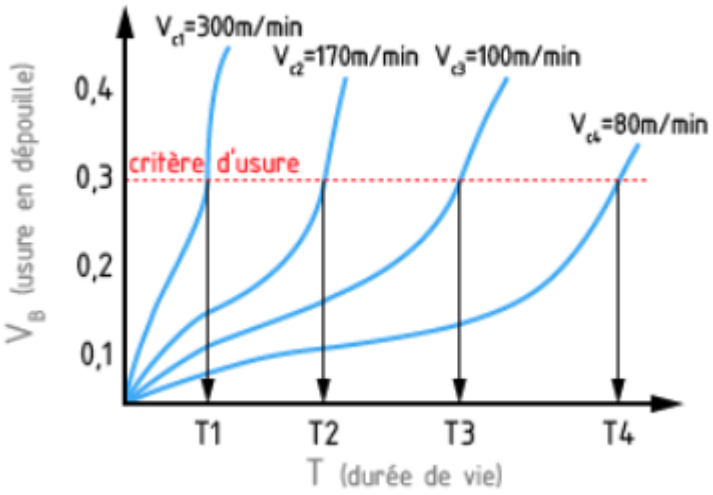
- faible couple mécanique disponible sur le porte outil même si la puissance consommée est importante,

- réduire l'usure des fraises et en diminuer la casse. Ces fraises de petit diamètre sont fragiles et coûteuses. Elles ne sont pas réaffûtables avec un équipement amateur, alors autant ne pas les user prématurément,

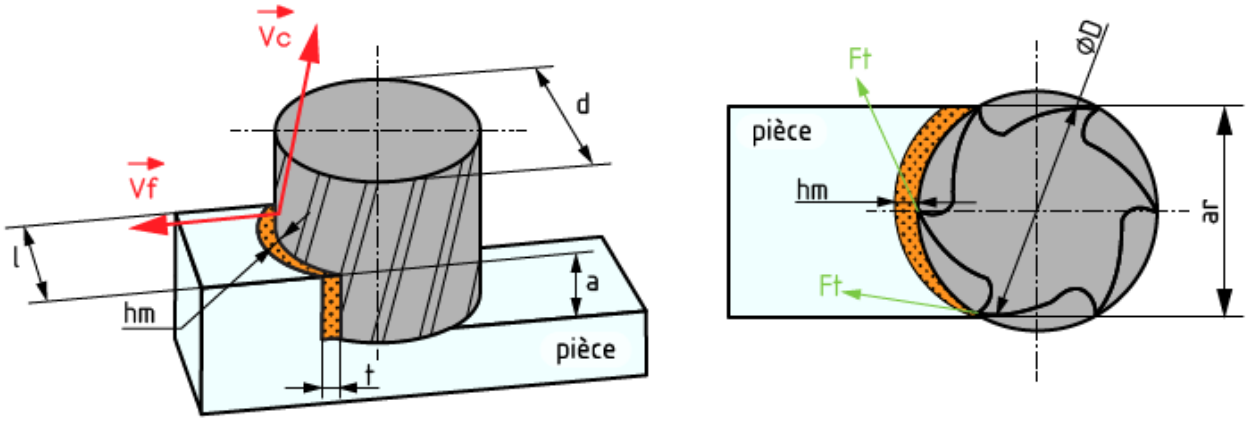
- avoir un usinage de qualité,

- diminuer si possible le temps d'usinage, diminution qui passe aussi par une optimisation des trajectoires d'usinage.

On voit ci-après l'aspect de courbe d'usure par test normalisé. Il ne faut pas beaucoup insister pour comprendre l'importance du réglage des paramètres de coupe. Après c'est l'éternelle histoire du compromis (temps d'usinage ; durée de vie d'outil)



Paramètres de coupe



Source schéma:http://analyse-fabrication.univ-lille1.fr/co/ch4_5_2.html

Profondeur de passe

c'est la cote *a* du schéma. Elle est généralement notée *ap* . Constante sur les machines d'établi traditionnelles, la profondeur de passe peut être variable sur les CNC, par exemple pour exécuter les rampes linéaires de fraisage de poches ou les rampes hélicoïdales de perçage de trous.

Largeur de passe

C'est la cote *ar* , aussi notée *ae* .

Vitesse de coupe

Vc est une vitesse tangentielle à ne pas confondre avec la vitesse d'avance *Vf.* C'est la vitesse tangentielle de l'arête de coupe. *Vf=r.ω avec ω*[3] *vitesse de rotation en radians/sou radians/mn*

Voici un tableau pour des machines industrielles conventionnelles, la vitesse de coupe est en m/mn

	Ebauche	Finition
Fonte	20-25	25-32
Acier (daN/mm²) 35-58 60-70 85-100	 25-32 12-16 8-10	 33-40 16-20 10-12
Bronze	30-40	40-50
Laiton	65	80
Alliages aluminium	200	320

Source : Campa et Rollet-Procédés d'usinage (tome III)

Avance à la dent

c'est la distance dont la dent avance dans la direction de coupe pour un tour de broche. Elle détermine, combinée à la vitesse de coupe *Vc*, la vitesse d'avance *Vf.*

On l'exprime en mm/tour ;

$$v_f = f_z \times n \times z_c$$

Zc= nombre de dents en prise sur la pièce.

Nombre de dents en prise

Sur le schéma plus haut (vue de dessus) *Zc*=3.

Pour calculer le nombre dents en prise on doit distinguer le cas du fraisage centré de celui du fraisage latéral. (cf. Annexe)

Pression de pénétration

La pression de pénétration *Kc* dépend du matériau et de l'épaisseur moyenne de copeau *hm* ainsi que d'autres paramètres comme l'angle de coupe. *Kr* s'exprime en daN/mm². Il existe des tables et formules à ce sujet.

---

3 *ω* se lit Omega

Choix de fraise : angle d'attaque, nombre de dents, angle d'hélice

Les débats sur le sujet sont sans fin. Notons qu'une part croissante des outils proposés à l'amateur sont en carbure monobloc.

`---> L'une des grandes problématique des outils de petit diamètre tournant à grande vitesse est l'évacuation de copeaux. Le nombre de dents et l'angle d'hélice des cannelures sont les points importants du choix.`

Deux points sur lesquels la vigilance s'impose :

- échauffement de l'outil, dégagement de chaleur. C'est un point particulièrement sensible pour les matériaux plastique (Téflon, ABS, Polycarbonate,...). Ce que j'ai lu sur le sujet m'incite à penser qu'il vaut mieux casser sa tirelire et acheter des fraises professionnelles et s'en tenir aux préconisations du fabricant en refroidissant à l'air comprimé si l'on possède un compresseur un peu costaud question débit.
- Arête rapportée : c'est le phénomène de quasi soudure du copeau sur l'arête tranchante de l'outil. Certains alliages d'aluminium sont particulièrement pénibles de ce point de vue. Il vaut mieux tout arrêter nettoyer la fraise et réfléchir car la force de coupe *Fc*[4] et la force axiale *Fa* vont considérablement augmenter d'où découlent une augmentation du couple à la broche et un fort échauffement local de la pièce à usiner. Quelques pistes d'améliorations :changer de nuance d'alliage, lubrifier, tester des combinaisons (*Vf*, *Vc*),

Angle d'attaque

L'angle d'attaque *Kr* est l'angle que fait la face de l'outil avec le plan de coupe. Il dépend de la conception de l'outil.

Il intervient dans le calcul de la section moyenne de copeau *Ad* exprimée en mm². L'épaisseur des copeaux, les forces de coupe et la durée de vie d'outil sont influencées par l'angle d'attaque.

La réduction de l'angle d'attaque, k_r, sur des arêtes rectilignes réduit l'épaisseur moyenne des copeaux, (h_m), pour une avance, f_z donnée. Cet effet d'amincissement des copeaux répartit la quantité de matière sur une portion plus importante de l'arête de coupe.

- Un angle d'attaque plus petit permet une entrée en coupe plus progressive, ce qui réduit la pression radiale et protège les arêtes de coupe.
- Des forces de coupe axiales plus élevées avec des angles d'attaques plus petits contribuent à augmenter la pression sur la pièce.

Couple vs Puissance

Ces deux notions sont distinctes et doivent bien être assimilées.

`---> Le couple est un effort appliqué à un axe pour le mettre en mouvement, le stopper ou le maintenir en position stable.`

4 Notée *Ft* sur le schéma

---> La puissance (en Watts) est la capacité à effectuer un travail en un temps donné.

Par exemple monter 2 tonnes de béton à 3 m de hauteur va demander la même quantité d'énergie, qu'on le fasse en 5 mn ou en une heure (60mn). Pour le faire en 5 mn cela demandera 12 fois plus de puissance qu'en une heure.

1 oz.in=0,00706 N.m ; N.m=141,612 ozf.in

Puissance= Couple*Vit_Rotation que l'on peut aussi écrire Couple=Puissance/Vit_Rotation

P en W ; Couple en N.m ; Vit_Rotation en radians par seconde.

360°= 2*π radians=6,28 radians

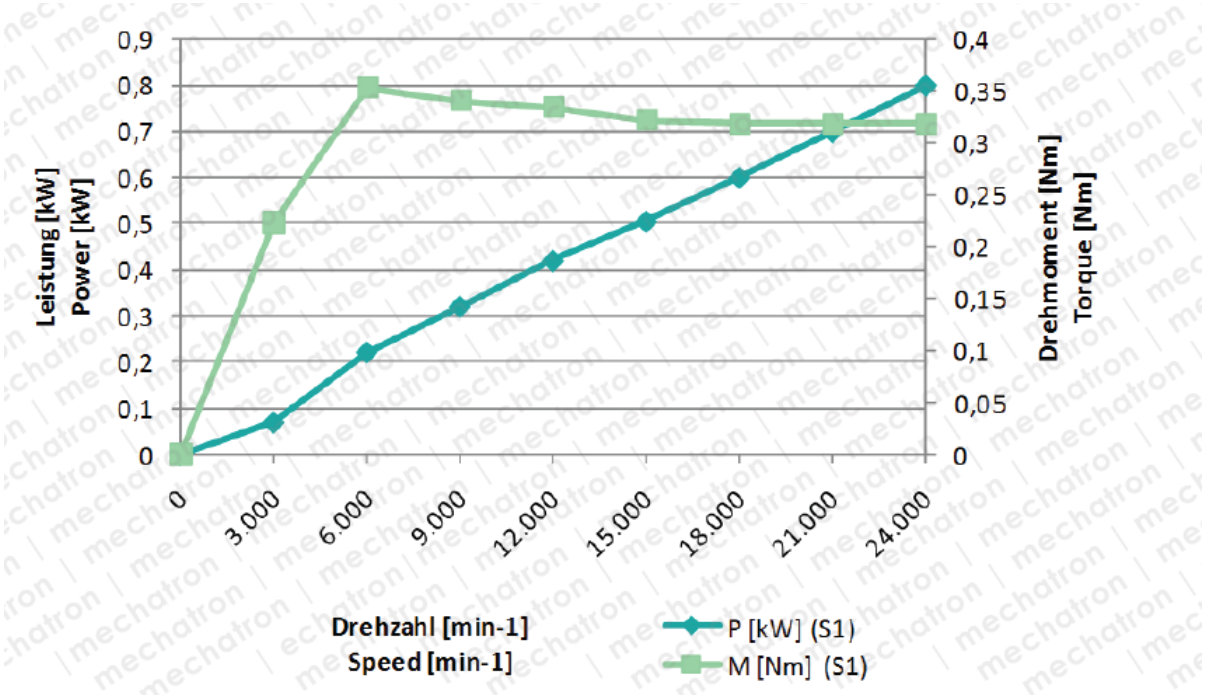
Exemple :

- Fraiseuse d'établi tournant à 800 trs/mn avec un moteur de 1100 W.
  800 trs/mn devient (800/60)*(2*3,1416)=83,77 radians/s
  avec un rendement électrique-mécanique de 80 % le couple est de :
  Couple=(1100*0,8)/83,77 = 10,5 N.m
- Dans le cas d'une électrobroche de 1100W tournant à 24000 trs/mn le couple sur l'axe n'est plus que 10,5/24000*800= 0,36 N.m.

Conversion des couples

	Nm	cm kg	cm N	m Nm	cm gr	in.oz	lb.Ft
1b.Ft	1,383	=13,83	=138,3	=1383	=13830	=192	=1
in.oz	0,00072	=0,0723	=0,723	=7,23	=72,3	=1	=0,0052
cm gr	0,0001	=0,001	=0,01	=0,1	=1	=0,0,139	=0,0000723
m Nm	0,001	=0,01	=0,1	=1	=10	=0,139	=0,000723
cm N	0,01	=0,1	=1	=10	=100	=1,39	=0,00723
cm kg	0,1	=1	=10	=100	=1000	=13,9	=0,0723
Nm	1	=10<					

Exemple : Electrobroche Mechatron HFS-6508 de 800W



On voit que le couple est maintenu constant à environ 0,3 N.m dans une plage de 6000 à 24000 trs/mn grâce à l'action du VFD.

`---> Même si la puissance est conséquente, le couple à la broche est faible, comparé à une fraiseuse d'établi.` Avec le moteur en prise directe le couple d'une fraiseuse d'établi va couramment se situer entre 2,5 et 4 N.m.

Comme on va le voir dans la section suivante une électrobroche peinera à entraîner des fraises de plus de D=6mm dans des métaux tendres.

Bezeichnung Name	MECHATRON HFS-6508
Refroidissement Cooling	**Refroidissement liquide** Liquid cooling
Puissance nominale Rated Power	S1 (100%) 0,8kW
Température réfrigérant Coolant temperature	Max. 35°C
Tension Voltage	230VAC
Paliers de broche Spindle bearings	**2 roulements acier** 2x Steel
Intensité Current	S1 (100%) 4.0A
Lubrification Lubrication	**Graissé à vie** Grease,maintenance free

Vitesse de rotation Rotation Speed	24.000 min^{-1}
Porte pince Collet	ER11 4008E DIN6499B
Fréquence Frequency	400Hz
Diamètre d'outils Clamping range	1-7mm (1-8mm auf Anfrage) 1-7mm (1-8mm auf Anfrage)
Nbe paires de pôles Pole pairs	1
Faux- rond Runout (inner Taper)	<5,0µm **Pris à l'intérieur du cône ER11**
Changement d'outil Tool Change	**Manuel par écrou de serrage** Manually, clamping nut
Poids Weight	2,5kg

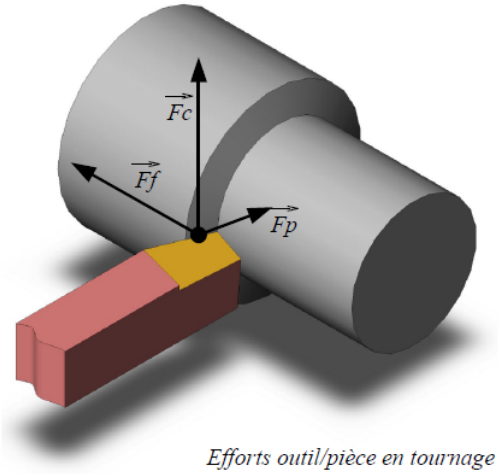
Ci dessus les caractéristiques de l'électrobroche de chez Mechatron, constructeur qui a une bonne réputation. On notera la très bonne précision (0,005 mm) par rapport aux broches chinoises données pour 0,03 à 0,05 mm. Les performances sont données pour un service S1 (fonctionnement continu). La broche peut être pilotée par un courant de fréquence allant jusqu'à 400 Hz.

Effort de coupe

Il est intéressant d'avoir une méthode d'estimation de l'effort de coupe ne serait-ce que pour ne pas surcharger l'électrobroche. L'effort se décompose en trois forces élémentaires.

- l'effort de coupe $\overrightarrow{Fc}$,
- l'effort d'avance $\overrightarrow{Ff}$,
- l'effort de pénétration $\overrightarrow{Fp}$.

D'une manière générale : $\overrightarrow{Ff} \approx (\frac{1}{2} à \frac{2}{3}) \overrightarrow{Fc}$ et $\overrightarrow{Fp} \approx 0,3 \overrightarrow{Fc}$



Efforts outil/pièce en tournage

Le cas du tournage est plus facile à visualiser, mais le fraisage n'en diffère pas substantiellement.

L'expression de l'effort de coupe à la broche s'écrit sous la forme générale :

$Fc = k_c * A_D$

avec kc=pression de coupe dépendant du couple outil-matériau et de l'épaisseur moyenne du copeau

A_D = section moyenne du copeau= avance_par_tour * profondeur_de_passe

Les valeurs k_c se lisent dans des tables ou des abaques qui sont différents selon l'usinage : tournage, fraisage, perçage.

La puissance de coupe est donnée par :

$P_C = F_c * V_c + F_f * V_f$. En général $V_f < V_c/100$ donc le terme $F_f * V_f$ est négligeable.

Caractéristiques de coupe

Diamètre fraise *Dcap*	6	*mm*
Nbe de dents *Z*	3	
Angle d'attaque *Kr*	75	*degré*
Largeur de fraisage *ae*	4,5	*mm*
Profondeur de passe *ap*	0,5	*mm*
Vitesse de coupe *Vc*	220	*m/mn*
Avance à la dent *fz*	0,15	*mm/dent/tour*
Vitesse de broche n	11671	*trs/mn*

Fraisage latéral

Force de coupe *Fc =Kc*Ad*	**86,3**	*N*
Puissance de coupe *Pc=Fc*Vc*	**316,3**	*W*
Couple à la broche	**0,259**	*N.m*

Dans ce calcul on ne se soucie ni de la tenue de l'outil (flexion) ni des efforts qui sont repris par le portique mobile. La vitesse de déplacement est élevée mais reste compatible avec la capacité des moteurs pas à pas monté sur ces fraiseuses. La machine est cependant poussée à ses limites.

En se reportant sur les courbes couple/puissance de l'électrobroche Mechatron, à 12000 trs/mn pour un couple de 0,330 N.m on se trouve dans des conditions raisonnables de fonctionnement.

---> On voit qu'avec une fraise D=6mm à 3 dents qui travaille dans un alliage d'aluminium on commence à approcher la valeur limite du couple alors que la puissance consommée est à peine un peu plus d'un tiers de la puissance maximale. Sur les électrobroches ce sera souvent le couple disponible qui sera la valeur limitante des conditions de coupe.

Quelques principes à observer en fraisage

Entrée dans la matière

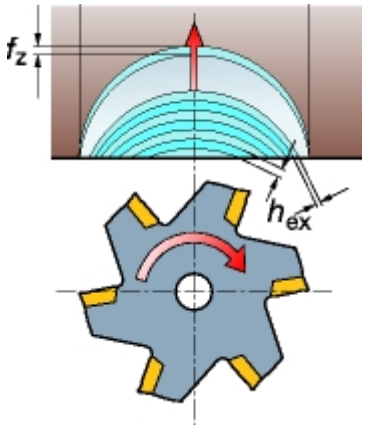
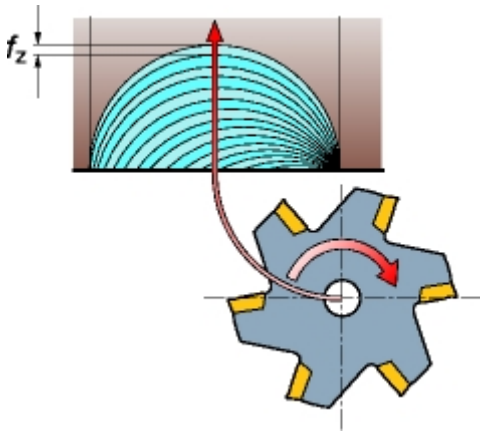
Si la fraise entre en coupe tout droit dans la pièce, des copeaux épais en sortie seront produits jusqu'à l'engagement complet. Ceci peut réduire considérablement la durée de vie de l'outil, surtout si la matière est un acier trempé, du titane ou un superalliage réfractaire.

Par ailleurs, une entrée douce en coupe est aussi nécessaire pour éviter les vibrations.

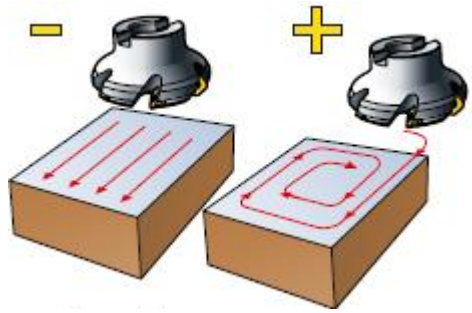
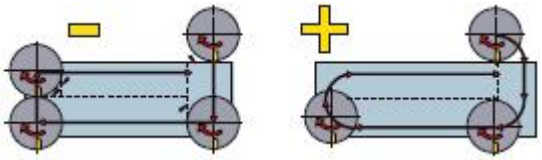
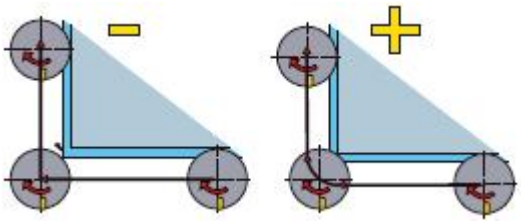
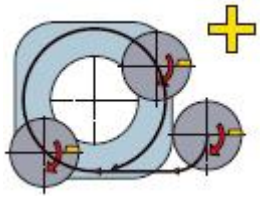
Ce problème peut être résolu de deux manières :

1. Réduire l'avance
Réduire l'avance à 50 % de sa valeur jusqu'à l'engagement complet de la fraise.

2. Entrée en coupe par interpolation circulaire
Programmer une entrée par interpolation circulaire dans le sens des aiguilles d’une montre (le sens contraire ne permet pas d’éviter le problème de l’épaisseur des copeaux en sortie). Avec l'interpolation circulaire, l'épaisseur des copeaux en sortie est toujours nulle, ce qui permet une avance plus élevée et prolonge la durée de vie de l'outil.

	
Copeaux épais en sortie jusqu'à l'engagement complet de la fraise	Copeaux amincis

La fraise doit être engagée en permanence

	Les changements brusques de direction posent les mêmes problèmes que l'entrée directe dans la matière. • Le fraisage des angles doit toujours être pratiqué par interpolation circulaire afin de sécuriser et d'optimiser le process. • La largeur de coupe, a_e, doit être de 70 % de D_c pour couvrir l'angle au maximum. • La fraise doit être engagée en permanence. • Les interruptions de la matière et les trous doivent être contournés, si possible.
	En surfaçage, les changements brusques de direction génèrent des copeaux épais en sortie
	En contournage, usiner les angles par interpolation circulaire.
	Les interruptions de la matière et les trous doivent être contournés

Annexe 1 : Effort de coupe

On ne traite pas le fraisage de profil propre aux fraiseuses horizontales.

Le calcul simplifié se passe en plusieurs étapes :

1. Définition des conditions de coupe
2. Calcul de la vitesse de broche et de la vitesse d'avance, nombre de dents en prise.
3. Calcul de l'épaisseur moyenne de copeau *hm* , calcul de la section de copeau *Ad*
4. Calcul ou lecture de *Kc* ; pour les tableaux et abaques : correction éventuelle de *Kc*
5. Calcul de la force de coupe *Fc*, de la puissance de coupe *Pc*, du couple moteur minimal *Mc*

J'ai choisi les paramètres de coupe suivants comme données d'entrée.

- Diamètre de coupe effectif *Dcap*. Ce n'est pas nécessairement le diamètre de la queue de fraise
- Nombre de dents de la fraise *Z*, angle d'attaque *Kr* (selon données constructeur)
- Avance à la dent *fz*, vitesse de coupe *Vc*.
- Largeur de fraisage *ae*, profondeur de fraisage *ap*
- choix du matériau ce qui donnera une valeur provisoire de *Kc* lue avec l'épaisseur maximale de copeau

http://robert.cireddu.free.fr/Ressources/Prod/Efforts%20et%20puisance%20de%20coupe/index.htm

Matières	Kc en daN/mm^2			
	Épaisseur de copeau			
	0,1	0,2	0,4	0,8
E 26	360	260	190	140
E 36	400	290	210	150
A 60	420	300	220	160
XC 38 – XC 42	320	230	170	125
XC 70	390	285	205	150
Acier Inox	520	375	270	190
Ft10 - Ft15	190	136	100	70
Ft20 – Ft25	290	210	150	110
Fontes alliées	325	230	170	120
Fontes malléables	240	175	125	9
Laiton	160	115	85	60
Bronze	340	245	180	130
Alliage alu Rr < 19	115	85	60	45
Alliage alu 19 < Rr < 27	140	100	70	50

Quelques conditions de coupe courantes sur fraiseuses conventionnelles

http://197.14.51.10:81/pmb/COURS%20ET%20TUTORIAL/Mecanique/cours-fabrication-akourri.pdf

Fraisage en bout : Surfaçage											
		Outils A.R.S.					Outils Carbure				
		Ébauche			Finition		Ébauche			Finition	
Matières	Rr Mpa	Vc m/min	a_p max mm	f mm/tr	Vc m/min	f mm/tr	Vc m/min	a_p max mm	f mm/tr	Vc m/min	f mm/tr
Acier S235	500	29	2	0.11	40	>0.06	100	2	0.2	120	>0.07
Acier INOX	500	18	2	0.08	22	>0.05	72	2	0.15	92	>0.07
Acier 35CD4	1100	20	2	0.06	25	>0.04	80	2	0.12	90	>0.07
PVC	60	200	4	0.2	300	>0.50	800	4	0.3	1 000	>0.07
Nylon PA6	80	100	2	0,15	200	>0.20	400	2	0.35	500	>0.07
Plexi PMMA	78	60	2	0.15	80	>0,20					
Laiton UZ30	400	72	1	0.09	95	>0.07	930	2	0.5	180	>0.16
Bronze UE12P	200	23	1	0.07	31	>0.06	60	2	0.2	82	>0.16
Alliage d'alu	280	150	1	0.07	190	>0.06	500	3	0.1	800	>0.08

Fraisage en roulant : Rainurage, Combiné...											
		Outils A.R.S.					Outils Carbure				
		Ébauche			Finition		Ébauche			Finition	
Matières	Rr Mpa	Vc m/min	a_p max mm	f mm/tr	Vc m/min	f mm/tr	Vc m/min	a_p max mm	f mm/tr	Vc m/min	f mm/tr
Acier S235	500	29	2	0.08	32	>0.05	100	2	0.15	120	>0.07
Acier INOX	500	18	2	0.06	28	>0.04	72	2	0.1	92	>0.07
Acier 35CD4	1100	20	2	0.04	24	>0.03	80	2	0.1	90	>0.07
PVC	60	200	4	0.15	300	>0.50	800	4	0.3	1 000	>0.07
Nylon PA6	80	100	2	0,10	200	>0.20	400	2	0.35	500	>0.07
Plexi PMMA	78	60	2	0.10	80	>0,20	200	2	0.1	300	>0.03
Laiton UZ30	400	72	1	0.16	95	>0.03	930	2	0.2	180	>0.1
Bronze UE12P	200	23	1	0.18	31	>0.03	60	2	0.1	82	>0.05
Alliage d'alu	280	150	1	0.07	190	>0.06	500	3	0.2	800	>0.08

Ces tableaux donnent des ordres de grandeur sachant qu'il faut prendre en compte la faible rigidité des fraiseuses à portique (CNC router) grand public.

Notations conventionnelles

Variable	Signification	Unité métrique
D_{cap}	Diamètre de coupe à la profondeur de coupe réelle, a_p	mm
f_z	Avance/dent	mm
z_n	Nombre total de dents de la fraise	pces
z_c	Nombre de dents en coupe	pces
v_f	Avance table	mm/min
f_n	Avance/tr	mm
a_p	Profondeur de coupe	mm
v_c	Vitesse de coupe	m/min
γ_0	Angle de coupe	
a_e	Engagement	mm
n	Vitesse de broche	tr/min
P_c	Puissance nette	kW
M_c	Couple	Nm
Q	Débit copeaux	cm^3/min
h_m	Épaisseur moyenne des copeaux	mm
h_{ex}	Épaisseur maximale des copeaux	mm
κ_r	Angle d'attaque	degrés
D_m	Diamètre usiné (diamètre pièce)	mm
D_w	Diamètre non usiné (diamètre pièce)	mm
v_{fm}	Avance de table de l'outil sur D_m (diamètre usiné)	mm/min

Source Sandvik-Coromant

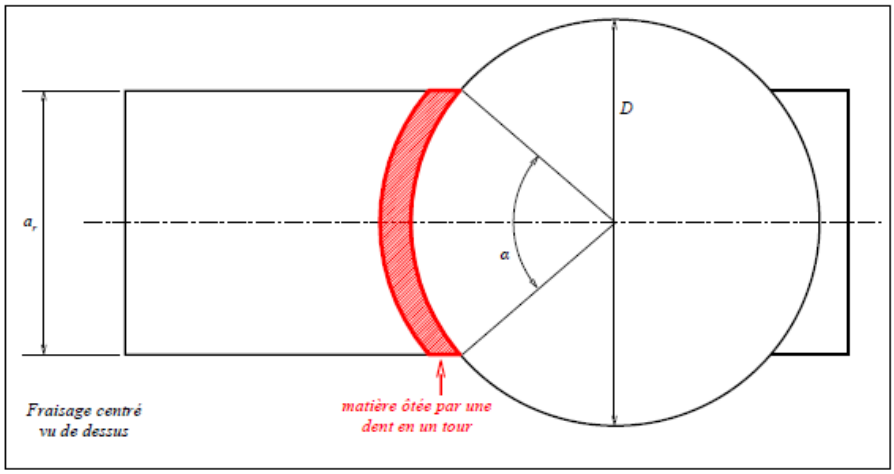
http://www.sandvik.coromant.com/fr-fr/knowledge/milling/formulas_and_definitions/formulas/pages/default.aspx

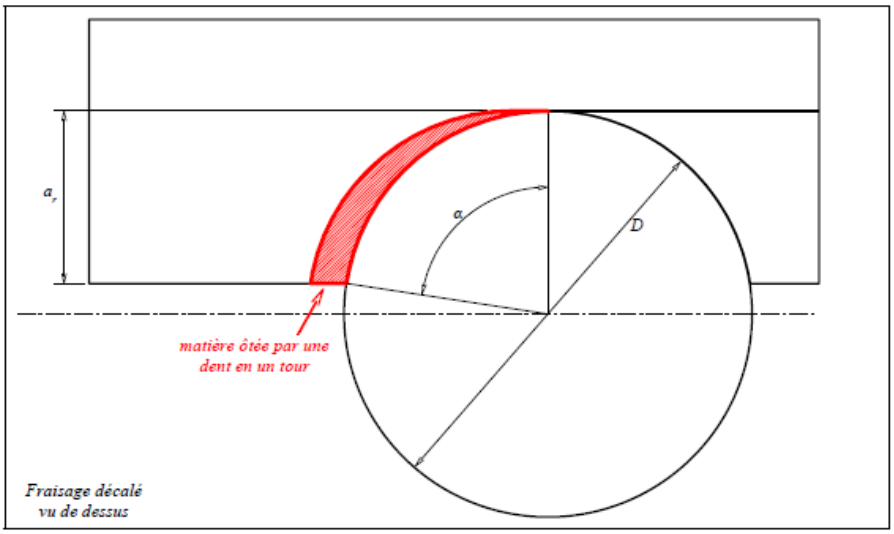
Vitesse de broche *n*-Vitesse d'avance *Vf*

Vitesse de broche	$n = \frac{v_c \times 1000}{\pi \times D_{cap}}$	En tours/mn.
Avance (de la table)	$v_f = f_z \times n \times z_c$	En mm / mn

Nombre de dents en prise *Zc*

Formule générale	Zc=α /(2*π) *Z	
Alfa en fraisage centré	α =2*asin(a_e/D)	D=Dcap ; Alfa en radians 360°=6,28 radians
Alfa en fraisage latéral	α =acos(1-2a_e/D)	D=Dcap ;Alfa en radians 360°=6,28 radians





Nota :
il existe un grand nombre de calculatrices scientifiques comme par exemple Sycion Calculator pour obtenir directement les résultats des formules de calcul de l'angle Alfa

Calcul de l'épaisseur moyenne de copeaux *hm*

En fraisage latéral	$h_m = \frac{360 \times \sin \kappa_r \times a_e \times f_z}{\pi \times D_{cap} \times \arccos\left(1 - \frac{2 \times a_e}{D_{cap}}\right)}$	*hm* en mm. *arccos()* en degrés dans la formule
En fraisage centré	$h_m = \frac{180 \times \sin \kappa_r \times a_e \times f_z}{\pi \times D_{cap} \times \arcsin\left(\frac{a_e}{D_{cap}}\right)}$	*hm* en mm *arcsin()* en degrés dans la formule

Epaisseur moyenne de copeau "hm"en mm (κr = 75°)

	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

Epaisseur moyenne de copeau "hm"en mm (κr = 90°)

	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 *Kr* est différent de celui des tableaux, appliquer une règle de proportionnalité

$$h_m = \frac{h_{m_{tableau}}}{\sin K_{r_{tableau}}} \times \sin K_r$$

hm sert entre autre aux corrections à effectuer sur le coefficient *kc*.

Calcul de *Kc*

Kc représente la pression de coupe.

- Au premier ordre *Kc* dépend du couple Outil-Matière et pour une application donnée la valeur réelle de *Kc* sera obtenue par essais et mesures
- Au second ordre *Kc* dépend de l'angle de coupe γ et de l'épaisseur du copeau.

--> Ce qui est expérimentalement constaté est une augmentation de l'effort corrélativement à la diminution de l'angle de coupe et de la diminution de l'épaisseur moyenne de copeau.

Selon les tables et abaques il y a des corrections à apporter, généralement en fonction de *hm* et de l'angle de coupe γ. Pour notre activité une table comme la suivante, sans correction est à mon avis suffisante.

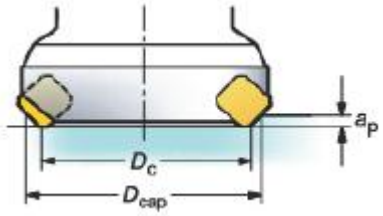
Matières	Kc en daN/mm²			
	Épaisseur de copeau			
	0,1	0,2	0,4	0,8
E 26	360	260	190	140
E 36	400	290	210	150
A 60	420	300	220	160
XC 38 – XC 42	320	230	170	125
XC 70	390	285	205	150
Acier Inox	520	375	270	190
Ft10 - Ft15	190	136	100	70
Ft20 – Ft25	290	210	150	110
Fontes alliées	325	230	170	120
Fontes malléables	240	175	125	9
Laiton	160	115	85	60
Bronze	340	245	180	130
Alliage alu Rr < 19	115	85	60	45
Alliage alu 19 < Rr < 27	140	100	70	50

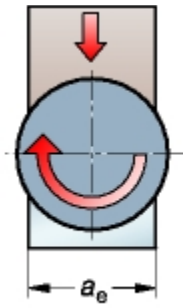
Puissance de coupe

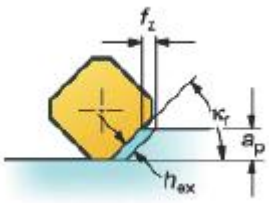
Débit de copeaux	$Q = \frac{a_p \times a_e \times v_f}{1000}$	En cm3 / mn ; a_p profondeur de coupe, a_e engagement
Puissance nette requise	$P_c = \frac{a_p \times a_e \times v_f \times k_c}{60 \times 10^6}$	En kW. Kc est lu dans une table ou calculé par des formules empiriques
Couple	$M_c = \frac{P_c \times 30 \times 10^3}{\pi \times n}$	En N.m

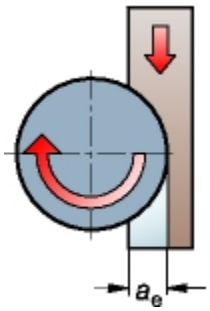
Formules complémentaires

Pour documentation mais fraises jamais utilisées à ma connaissance sur les fraiseuses à portique, sauf les fraises à bout sphérique. Source : Sandvik Coromant



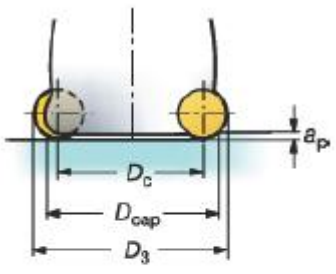


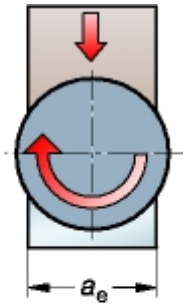


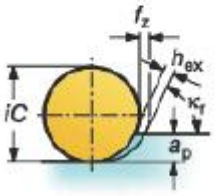


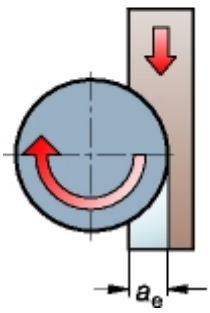
Fraises avec arêtes rectilignes

$D_{cap} = D_c + \frac{2 \times a_p}{\tan \kappa_r}$	$f_z = \frac{h_{ex}}{sin\ \kappa_r}$	$f_z = \frac{h_{ex} \times D_{cap}}{2 \times \sin \kappa_r \times \sqrt{D_{cap} \times a_e - a_e^2}}$
Diamètre de coupe max. à une profondeur spécifique (mm).	Surfaçage (pièce centrée) arête rectiligne et fraisage latéral ($a_e > D_{cap}/2$) mm.	Fraisage latéral ($a_e < D_{cap}/2$) arête rectiligne mm.





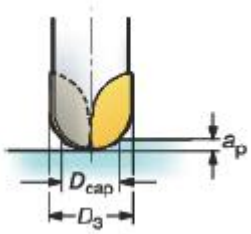


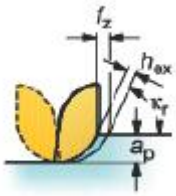


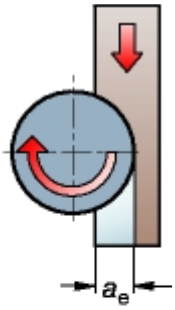
Fraises à plaquettes rondes

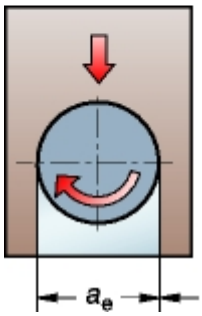
$D_{cap} = D_c + \sqrt{iC^2 - (iC - 2 \times a_p)^2}$	$f_z = \frac{h_{ex} \times iC}{2 \times \sqrt{a_p \times iC - a_p^2}}$	$f_z = \frac{h_{ex} \times iC \times D_{cap}}{4 \times \sqrt{a_p \times iC - a_p^2} \times \sqrt{D_{cap} \times a_e - a_e^2}}$
Diamètre de coupe max. à une profondeur spécifique (mm).	Fraises à surfacer à plaquettes rondes ($a_e > D_{cap}/2$) mm.	Fraisage latéral ($a_e < D_{cap}/2$) et plaquette ronde ($a_p < iC/2$) mm.

Fraises à bout sphérique





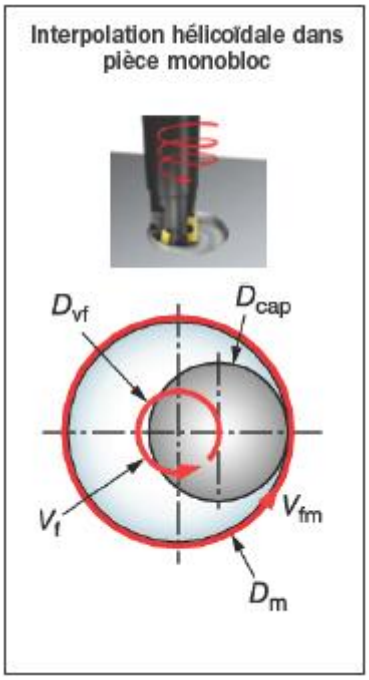


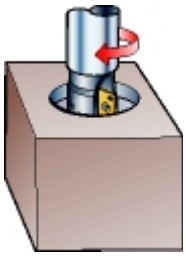


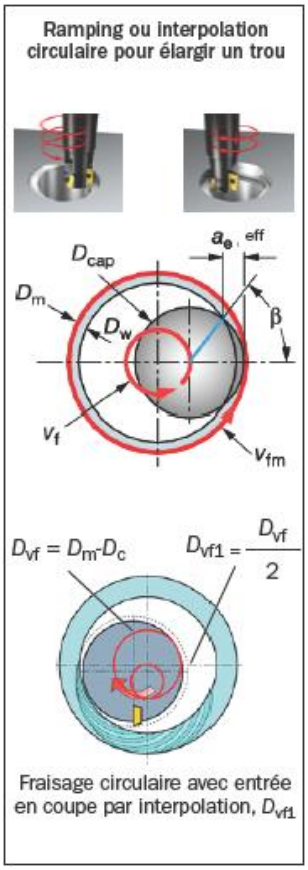
$D_{cap} = \sqrt{D_3^2 - (D_3 - 2 \times a_p)^2}$	$f_z = \frac{D_3 \times h_{ex}}{D_{cap}}$	$f_z = \frac{D_3 \times h_{ex}}{\sqrt{D_{cap}^2 - (D_{cap} - 2 \times a_e)^2}}$
Diamètre de coupe max. pour une profondeur spécifique (mm).	Avance à la dent (mm/dent), fraise centrée.	Avance à la dent (mm/dent), fraisage latéral

Interpolation hélicoïdale à l'intérieur (3 axes) ou interpolation circulaire (2 axes)

$v_{fm} = n \times f_z \times z_c$	$v_f = \frac{v_{fm} \times (D_m - D_{cap})}{D_m}$	$a_{e\ eff} = \frac{D_m^2 - D_w^2}{4\,(D_m - D_{cap})}$
Avance périphérique (mm/min)	Avance centrale de l'outil (mm/min)	Profondeur de coupe radiale (mm)
$f_z = h_{ex}$ *Où* $D_w = 0$ and $a_{e\ eff} = D_m/2$	$f_z = \frac{h_{ex}}{\sqrt{1 - \cos^2 \beta}} = \frac{h_{ex}}{\sin \beta}$ $\beta = \arccos\left(1 - \frac{2 \times a_{e\ eff}}{D_{cap}}\right)$	
Avance à la dent (en mm) dans une pièce monobloc	Elargissement d(un trou. Avance à la dent en mm	

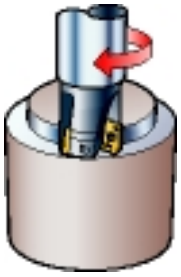


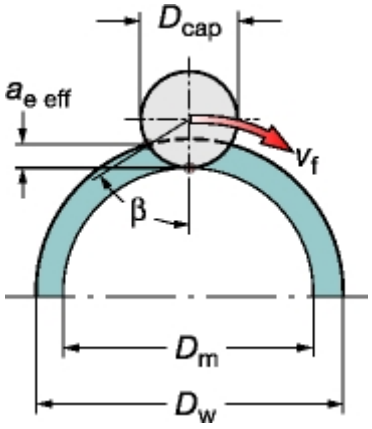




Interpolation hélicoïdale à l'extérieur (3 axes) ou interpolation circulaire (2 axes)

$v_{fm} = n \times f_z \times z_c$	$v_f = \frac{v_{fm} \times (D_m + D_{cap})}{D_m}$	$f_z = \frac{h_{ex}}{\sin \beta}$
Avance périphérique (mm/min)	Avance centrale de l'outil (mm/min)	Avance à la dent(mm)
$a_{e\,eff} = \frac{D_w^2 - D_m^2}{4\,(D_m + D_{cap})}$	$\beta = \arccos\left(1 - \frac{2 \times a_{e\,eff}}{D_{cap}}\right)$	





Annexe 3 : Tables de calcul de Kc

http://analyse-fabrication.univ-lille1.fr/co/ch4_5_2.html

Ce paramètre étant variable, la démarche de recherche de ce coefficient nécessite de déterminer une épaisseur moyenne de copeau, *hm*; cette estimation se fait conformément aux étapes décrites ci-dessous.

Choisir une valeur de *Kc* pour un angle de coupe γ=-7°.

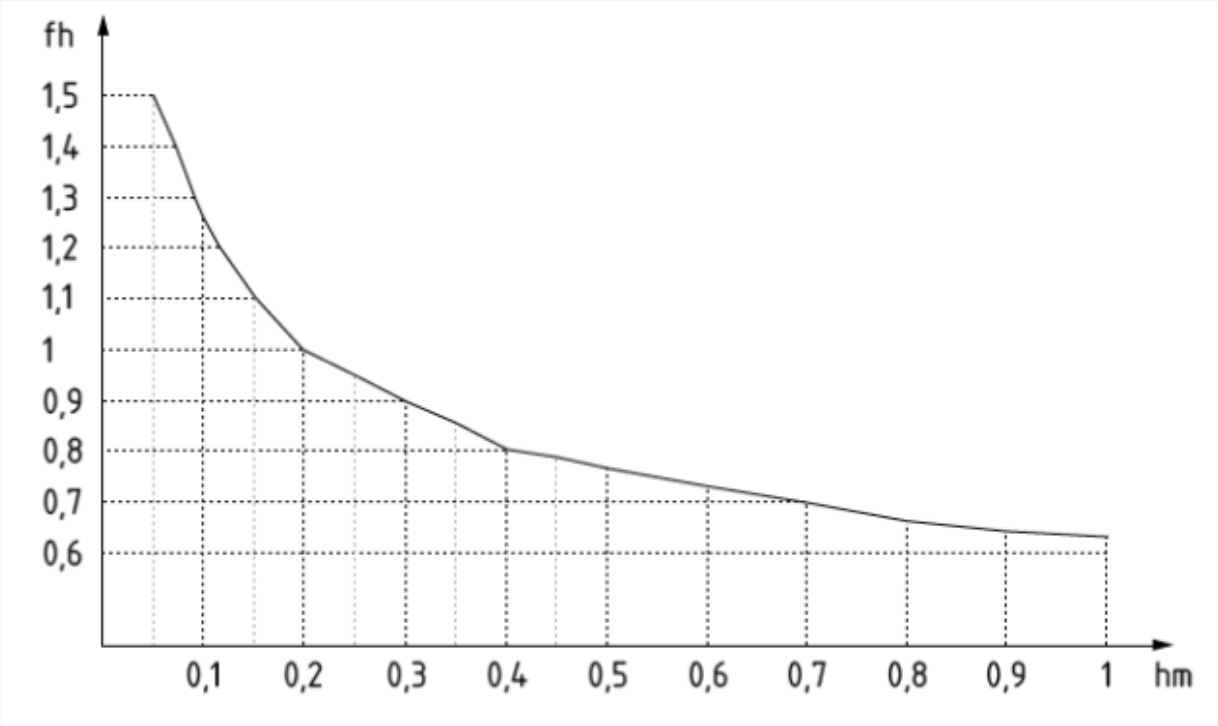
Matière	Kc	Matière	Kc	Matière	Kc	Matière	Kc
XC10	275	Z200C12	350	10NC6	320	Ft20	140
XC35	300	Z85W	410	35CD4	390	Ft40	180
XC80	330	Z8C17	320	FGS 400	150	MP 60-3	200
A70	260	90MV8	675	FGS 700	225	Alliage Alu	95

Corriger la valeur calculée de *Kc* en fonction de l'angle de coupe γ. On applique une correction de 1,5% par degré de changement d'angle. Un angle de coupe plus grand (positif) donnera donc un *Kc* réduit et inversement.

Épaisseur moyenne de copeau hm [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

Rechercher (utiliser la figure suivante) la valeur de correction *fh* en fonction de *hm*

Calculer la valeur du coefficient spécifique de coupe pour l'opération considérée en appliquant la formule : $Kc = Kc_{provisoire} * fh$



Valeur de la correction fh en fonction de l'épaisseur moyenne de copeau hm

Autres méthodes de correction

Par rapport au coefficient $Kc_{réf}$ de référence obtenu par essais et mesures , certains auteurs proposent des méthodes de correction à partir de formules afin de trouver le *Kc* qui correspond aux conditions réelles de coupe envisagées. Voici une des formes les plus courantes proposées.

$$k_c = k_c(e_0, \gamma_0).k_e.k_\gamma$$

$k_c(e_0, \gamma_0)$ valeur de référence (dépendance du matériau) pour une épaisseur de copeau e_0 et un angle de coupe γ_0 donnés

$k_e = \left(\frac{e}{e_0}\right)^{-0.3}$ influence de l'épaisseur de copeau

$k_\gamma = 1 - 0.02.(\gamma - \gamma_0)$ influence de l'angle de coupe

} Valeurs proches de 1

.