

Outils coupants

Taillage des roues cylindriques

par **Claude BELLAIS**

Ancien chef de section Méthodes de Renault SA

1. Outil taillant par reproduction	B 7 097 - 2
1.1 Fraise en bout	— 2
1.2 Fraise-disque (ou fraise-module)	— 3
2. Outil taillant par génération	— 4
2.1 Outil-crémaillère	— 4
2.2 Fraise-mère	— 5
2.2.1 Crémaillère génératrice : caractéristiques liées directement à la roue	— 5
2.2.2 Crémaillère génératrice : caractéristiques non directement liées à la roue	— 6
2.3 Outil-pignon	— 9
2.4 Outil de rasage.....	— 13
2.4.1 Principe.....	— 13
2.4.2 Phénomènes de glissement.....	— 14
2.4.3 Croisement des axes	— 14
2.4.4 Remise en état de l'outil.....	— 14
2.4.5 Forme générale de la dent	— 15
3. Matériaux de coupe.....	— 17
4. Conditions de coupe	— 17
Références bibliographiques	— 19

L'outil de taillage est toujours caractérisé par deux grandes fonctions : — la **fonction de coupe** pour opérer un enlèvement de matière ; le lecteur se reportera sur ce point à la théorie de la coupe commune à tous les outils dans l'article **Matériaux pour outils de coupe** [BM 7 080] dans ce traité ; — la **fonction de réalisation de dentures** soit par reproduction directe, soit par génération. Dans ce dernier cas, les lois de mouvement de coupe sont intimement liées aux procédés cinématiques souvent complexes. Ce sera l'objet de cet article. Le lecteur pourra se reporter toutefois à l'article **Taillage et rectification des engrenages : procédés** [BM 7 155] consacré plus particulièrement aux machines.

C'est à partir d'un cahier des charges, ou tout au moins d'un plan de définition, que l'**engrenagiste** va prendre connaissance du produit à réaliser. Le coût global, le niveau de qualité, la quantité à produire par unité de temps, la fiabilité des matériels utilisés, etc., viendront compléter ces données. Comme on le verra dans les paragraphes suivants, la solution retenue sera précédée d'une recherche optimisant le produit lui-même et les moyens mis en œuvre pour le réaliser.

Les coûts de taillage sont généralement élevés. Néanmoins, ils ont pu être notablement réduits grâce aux gains de productivité obtenus lors des dernières décennies. Pour donner un ordre de grandeur, pour une production de grande série, la part outils coupants de taillage représente environ le quart de l'ensemble des dépenses outils coupants (affûtage inclus) affectés au groupe motopropulseur (moteur et boîte de vitesses). Sur les mêmes bases, pour une opération de taillage, la répartition du coût à l'opération est sensiblement la suivante :

- de 35 à 50 %, amortissements machine ;
- de 20 à 25 %, coûts outils coupants avec affûtage ;

- de 15 à 40 %, frais de main-d'œuvre ;
- de 8 à 10 %, frais divers dont les fluides, l'énergie, le loyer, l'entretien, etc.

Ce texte n'aborde que la partie traitant de l'outil de taillage dans sa fonction de coupe. Les caractéristiques de denture traitées dans ce texte ne le sont que dans le cadre de celle-ci. Le lecteur intéressé par un développement de la partie théorique des engrenages et par l'étude des procédés est vivement conseillé de se reporter aux articles **Engrenages : éléments pratiques de définition, de dessin et de calcul** [B 636] et **Taillage et rectification des engrenages : procédés** [BM 7 155] dans le présent traité, ainsi qu'aux ouvrages généraux [1].

Notations et symboles	
Symbol	Définition
A_α	face de dépouille
A_γ	face de coupe
a	entraxe
b	largeur de denture
d	diamètre primitif
d_a	diamètre de tête
d_f	diamètre de pied
d_b	diamètre de base
e	intervalle de denture
h	hauteur de denture
h_a	saillie de denture
h_f	creux de denture
m	module
m_t	module apparent
p	pas
p_{bn}	pas de base réel
p_{bt}	pas de base apparent
p_z	pas hélicoïdal
r	rayon primitif
s	épaisseur de dent
t	temps (min)
v_c	vitesse de coupe (m/min)
v_g	vitesse de glissement (m/min)
z	nombre de dents ou de filets
α	angle de pression réel
α_{n0}	angle de pression de l'outil
α_t	angle de pression apparent
α_{fe}	angle de dépouille frontale
α_{oe}	angle de dépouille orthogonale
β	angle d'hélice
γ_f	angle de coupe radiale
γ_p	angle de coupe axiale
γ_{oe}	angle de coupe orthogonale
σ_0	angle de filet ou de pas
Σ	angle de croisement d'axes
ω	vitesse angulaire

extrait des normes NF ISO 701 Notation internationale des engrenages. Symboles de données géométriques (juin 1992).

ISO 3002-1 Grandeur de base pour la coupe et la rectification. Partie 1 : géométrie de la partie active des outils coupants (1982).

Liste des Indices	
0	outil
1	pignon (pignon menant)
2	roue (pignon mené)

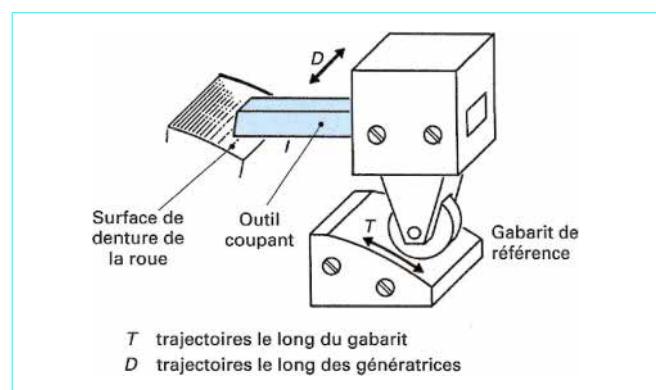
1. Outil taillant par reproduction

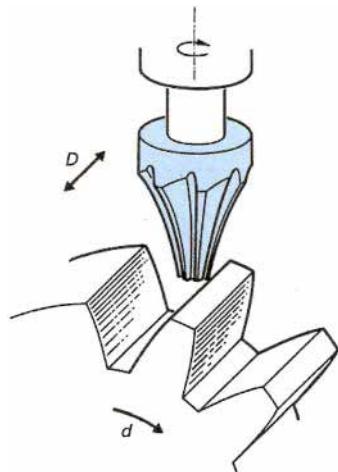
Pour mémoire, le procédé le plus simple pour obtenir une denture est le **taillage avec gabarit** mais il est rarement utilisé, sauf pour des cas très spéciaux de grandes dimensions. La figure 1 donne le schéma de principe où le mouvement de coupe se rapproche de celui d'un étau-limeur ; l'outil est à arête unique.

Actuellement, les outils taillant par reproduction les plus courants sont la **fraise en bout** et la **fraise-disque** (ou fraise-module).

1.1 Fraise en bout

Comme le montre la figure 2, les arêtes de coupe droites ou hélicoïdales sont réparties sur la forme de la denture à reproduire ; la fraise se déplace le long des flancs de denture. Le mauvais rendement de ce type d'outil, dû aux difficultés d'aménagement des goujures en bout, limite ce procédé aux gros modules en denture à chevrons.





D déplacement axial de l'outil ou de la roue
d déplacement pas à pas de la roue

Figure 2 – Fraisage en bout

1.2 Fraise-disque (ou fraise-module)

C'est un outil à denture profilée, dépouillée par détalonnage, reproduisant directement par fraisage la forme désirée. En usinage grande série, ces fraises sont montées sur des fraiseuses spéciales à cycles automatiques, pouvant comporter deux postes de travail. La rigidité de ces matériels permet d'utiliser des conditions de coupe de hautes performances.

Les dentures taillées avec ce type de fraise (figure 3a) sont souvent des **cannelures sur arbre**, plus rarement des dentures ayant une fonction d'engrènement.

En grande série, ce procédé tend à être remplacé dans les cas suivants :

— *cannelures à fonction de coulissemement*, comme les moyeux de crabotage par exemple. Dans ce type de fonction, et pour obtenir un meilleur coulissemement de l'ensemble, il faut éviter les vagues dues à l'avance et aux défauts de concentricité que laisse l'usinage par fraisage. On lui substitue alors l'un des procédés suivants :

- le taillage par outil-pignon (§ 2.3),
- le brochage par pot (cf. article spécialisé),
- ou encore l'élaboration des dentures par frittage (métallurgie des poudres) ;

— *cannelures à fonction de manchonnage à petit module* ; on retient le formage à froid par roulage entre crémaillères, ce procédé ayant aussi l'avantage de donner une meilleure structure de la denture sous l'effet du fluage de la matière.

Le plan d'exécution d'une fraise-disque (figure 3b) est défini par le profil de a en b avec flancs droits ou flancs courbes, le nombre de dents z_0 , le diamètre de tête d_{a0} , complété des différentes caractéristiques de coupe telles que :

— γ_f angle de coupe radiale et γ_p angle de coupe axiale, ces deux angles définissant la face de coupe A_γ remise en état par l'affûtage ;

— α_{fe} angle de dépouille frontale (ou périphérique) et α_{oe} angle de dépouille orthogonale en travail, ces derniers angles étant obtenus par le détalonnage de la dent de fraise, avec les relations :

$$\tan \alpha_{fe} = \frac{h_c z_0}{\pi d_{a0}}$$

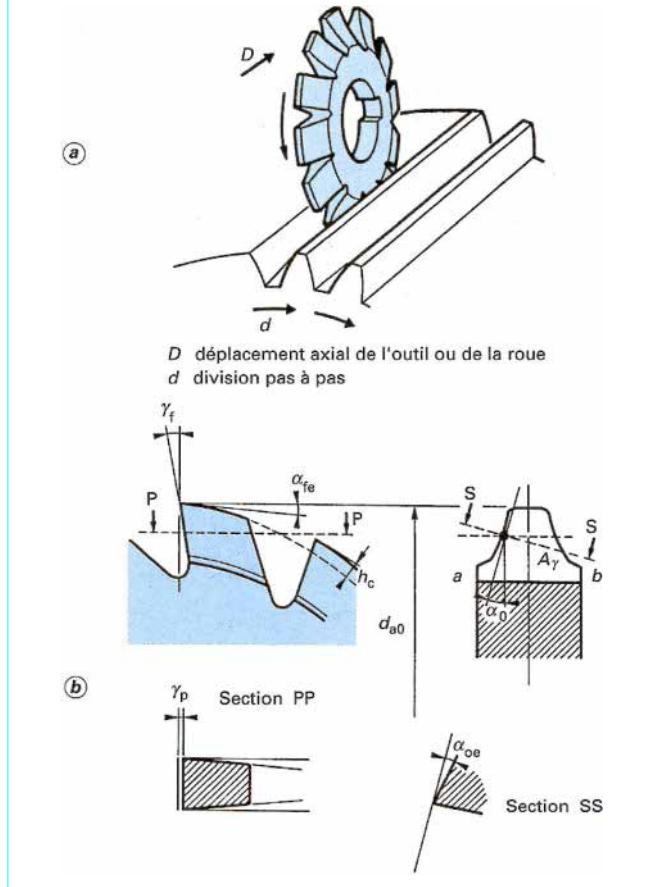


Figure 3 – Fraise-disque : caractéristiques

h_c étant la hauteur de la came de détalonnage,

et

$$\tan \alpha_{oe} = \tan \alpha_{fe} \tan \alpha_0$$

α_0 étant l'angle de pression, ou angle d'incidence, au point mesuré pour le flan courbe,

Le mouvement de détalonnage est en spirale de cercle, assurant ainsi un profil qui reste toujours constant tout le long de la partie affûtée ; les détalonnages rectilignes sont peu utilisés, n'ayant pas cette particularité. La réalisation du profil détalonné est presque toujours obtenue par rectification. La zone de passage de la meule entre la fin de la partie dépouillée et la dent suivante reste très limitée, entraînant par là l'utilisation d'un petit diamètre de meule, puis la limitation des valeurs de dépouille α_{fe} et α_{oe} . Pour contourner ces difficultés, il y a eu quelques tentatives de profil non rectifié et terminé avant la trempe, mais la diffusion de ces outils est surtout orientée vers la mécanique générale.

L'affûtage sur la face de coupe A_γ s'effectue suivant les angles γ_f nul ou légèrement positif, 3 à 6° en moyenne, et γ_p de valeur nulle sauf pour des cas particuliers comportant des dentures alternées.

En pratique, on s'efforce d'obtenir une valeur de dépouille orthogonale en travail $\alpha_{oe} \geq 1^{\circ} 30'$, pour ne pas fragiliser l'angle de taillant quand on augmente α_{fe} , l'angle de taillant étant égal à $\frac{\pi}{2} - (\gamma_f + \alpha_{fe})$.

Des précautions sont à prendre lors du **montage de la fraise** : concentricité, axe de symétrie passant exactement par l'axe de la pièce à tailler, tout écart entraînant des distorsions de profil de la denture exécutée.

Avec des gros modules et surtout en opération d'ébauche, on utilise des fraises avec plaquettes de carbure qui accroissent le rendement.

2. Outil taillant par génération

C'est le mode de taillage le plus utilisé tant pour la qualité de réalisation que pour les performances économiques obtenues. Il comprend trois grandes familles d'outils : l'outil-crémaillère, la fraise-mère et l'outil-pignon.

Le choix de l'un ou l'autre de ces outils, donc du procédé, se fait suivant des critères généraux, voire spécifiques. Quelquefois, le choix tient compte des outils ou machines disponibles. Dans une approche globale, on notera que :

— l'**outil-crémaillère** est très utilisé avec des *grosses modules et surtout en travail unitaire ou de série réduite*. Son exécution est facile à réaliser et, comme pour la fraise-mère, il peut tailler n'importe quel engrenage ayant même module et même angle de pression (éventuellement même angle d'hélice) ;

— la **fraise-mère** reste l'*outil le plus utilisé*. Sa productivité, donc son coût à l'opération, place toujours cet outil devant les autres. La formation des vagues résultant de l'avance et de la génération est également une particularité qui facilite l'opération de finition par rasage ;

— l'**outil-pignon** est retenu pour les *moyennes et grandes séries*, pour des dentures à fonction de coulissolement, mais aussi pour toutes les dentures ayant un épaulement ne permettant pas le passage d'un outil cylindrique.

Ces trois modes de taillage permettent d'obtenir des dentures entièrement terminées ou préébauchées ; dans ce dernier cas, elles nécessitent alors une opération de **finition par rasage** (§ 2.4) ou d'autres opérations comme la rectification ou le rodage (cf. articles spécialisés dans ce traité).

2.1 Outil-crémaillère

L'outil-crémaillère (figure 4) est généralement à denture droite, le mouvement de coupe s'effectuant selon une direction parallèle à l'axe de la roue à tailler, ou inclinée par rapport à cet axe suivant que la denture à réaliser est droite ou hélicoïdale. Seuls les cas de dentures épaulées hélicoïdales nécessitent des outils à dentures inclinées.

L'outil-crémaillère agit comme un outil classique de mortaisage : l'enlèvement de matière s'effectue dans un sens, avec un recul de l'outil ou de la roue lors du retour pour éviter le frottement outil-roue. À chaque cycle, un léger mouvement d'engrènement va s'effectuer entre l'outil et la roue et générer le profil de l'engrenage.

Afin de ne pas avoir à utiliser de trop grande longueur de crémaillère, ce que ni l'exécution propre de l'outil ni la machine ne pourraient accepter, une cinématique particulière permet de s'affranchir de cette longueur.

Comme le montre la figure 5, dans un premier temps, la roue va venir se placer de O_1 en O_2 , soit une course complète d'engrènement dès l'instant où la dent 1 prend contact (**a**) jusqu'à sa sortie de la pièce (**b**). En cette position, le chariot de la roue seul effectue un mouvement rétrograde de O_2 en O_3 correspondant à un pas π_{m0} ou π_{mt0} , la rotation correspondante de la roue amenant le creux de la dent 2 sur la dent 1 de l'outil (**c**). Puis, le mouvement de coupe et de génération reprend tel que O_3 revient en O_4 , et ainsi de suite jusqu'à réalisation complète de l'engrenage.

Les facteurs de coupe influants de la crémaillère génératrice sont abordés dans le paragraphe consacré aux fraises-mères (§ 2.2). Les paramètres de l'outil-crémaillère assurant l'enlèvement de matière sont représentés sur la figure 6.

Le profil de dent est constant et obtenu après un détalonnage rectiligne de valeur α_{fe} (dépouille frontale).

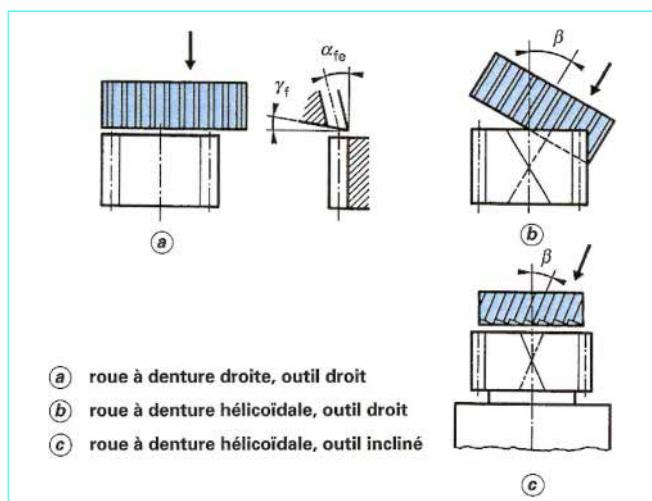


Figure 4 – Taillage par outil crémaillère

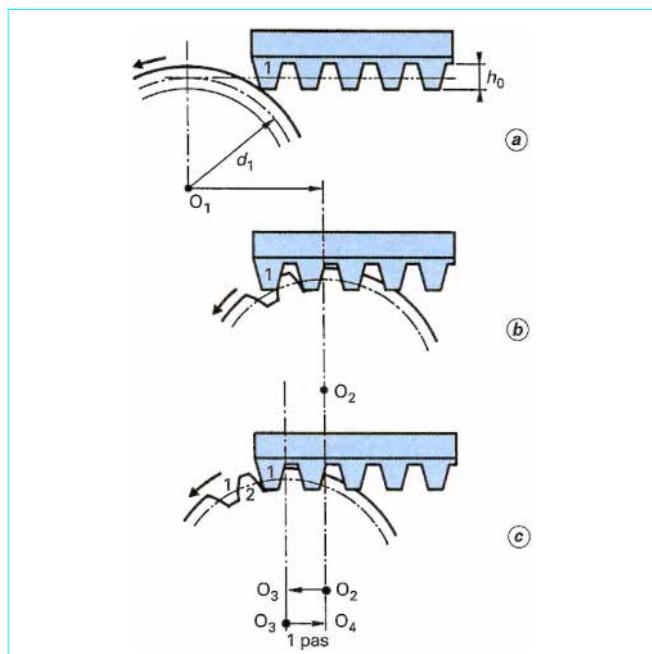


Figure 5 – Génération par outil-crémaillère

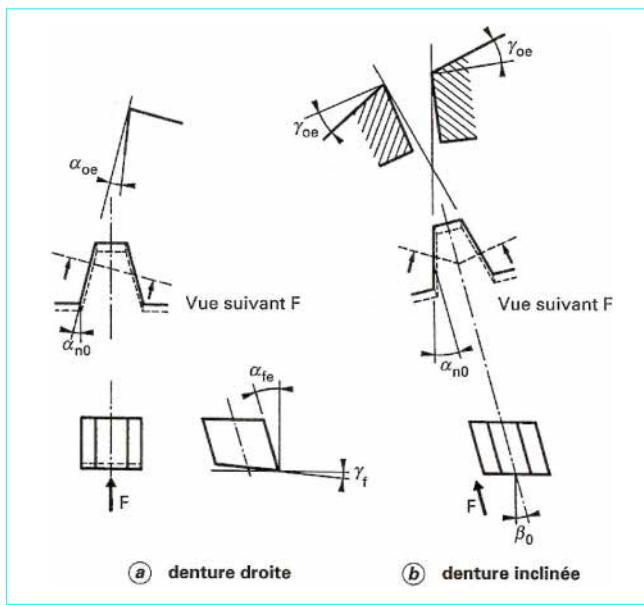


Figure 6 – Caractéristiques de coupe d'un outil-crémaillère

La dépouille orthogonale α_{oe} va dépendre de cette première valeur et de celle donnée par l'angle de pression α_{n0} (angle du flanc), soit :

$$\tan \alpha_{oe} = \tan \alpha_{fe} \tan \alpha_{n0}$$

En pratique, on retiendra :

$$\alpha_{fe} \approx 6^\circ \quad \text{avec } \alpha_{oe} \geq 1^\circ 30'$$

Exemple de valeurs courantes :

pour $\alpha_{n0} = 18^\circ$ et $\alpha_{fe} = 6^\circ 30'$, on obtient $\alpha_{oe} = 2^\circ 07'$.

L'angle de coupe radiale γ_f définissant la pente d'affûtage est nul ou légèrement positif ($\approx 5^\circ$ maximum).

L'angle de coupe orthogonale γ_{oe} est, pour des dentures droites, sensiblement nul et, pour des dentures inclinées, égal à :

$$\tan \gamma_{oe} = \tan \beta_0 \cos \alpha_{n0}$$

avec β_0 angle d'hélice de l'outil,

α_{n0} angle de pression de l'outil.

Ainsi, pour $\alpha_{n0} = 18^\circ$ et $\beta_0 = 21^\circ 16' 27''$, on obtient un angle $\gamma_{oe} \approx \pm 20^\circ 20'$, donc très positif sur un flanc et très négatif sur l'autre.

Pour y remédier, on peut soit effectuer un affûtage normal à β_0 (figure 7a), soit procéder à un renforcement d'arête sur le flanc très positif et à une coupe cuillère sur l'autre (figure 7b). Afin de ne pas modifier les valeurs nominales, on devra veiller à la bonne exécution de ces aménagements.

2.2 Fraise-mère

La fraise-mère est matérialisée par une vis sans fin sur laquelle on a aménagé des goujures dont les intersections avec le (les) filet(s) sont autant d'arêtes coupantes. Ainsi, la vis équivalente à la fraise-mère est l'enveloppe de toutes les arêtes coupantes.

La figure 8a est représentative de la liaison cinématique qui lie l'outil à la roue : à chaque tour de fraise, on génère une dent avec un filet, 2 dents avec 2 filets, etc. Ce mode de taillage présente des similitudes avec la génération par outil-crémaillère. Par contre, avec

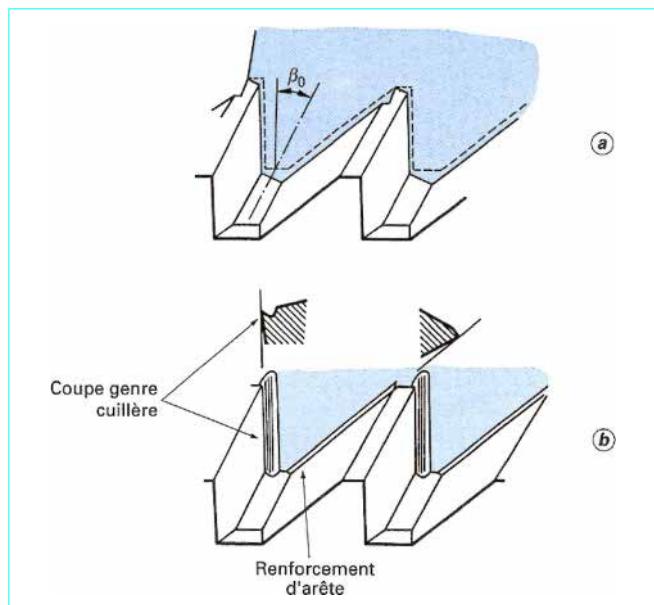


Figure 7 – Aménagements possibles des arêtes de dentures d'outil-crémaillère

la fraise-mère l'enlèvement de matière s'effectue en fraisage continu et la formation du copeau est plus complexe et soumet l'outil à de fortes sollicitations.

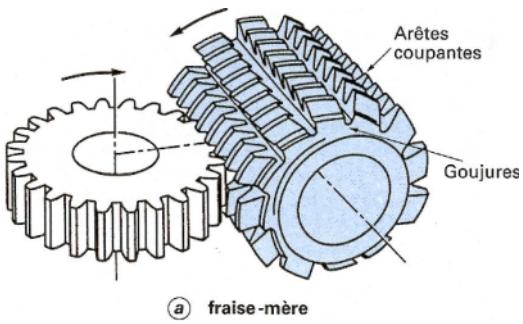
2.2.1 Crémaillère génératrice : caractéristiques liées directement à la roue

Reprendons le filet de la vis équivalente, ses flancs sont des surfaces réglées par des génératrices g tangentes au cylindre et à l'hélice de base du filet (figure 8b). Ces surfaces ainsi réglées s'appellent aussi hélicoïdes développables et toutes les dentures générées avec celles-ci sont de développement de cercle.

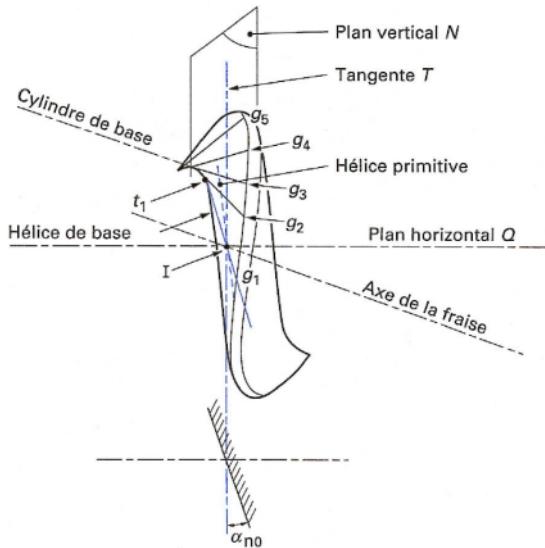
Sur cette figure, exemple d'une roue à denture droite et d'une fraise-mère avec filet à droite, la génératrice g_1 passe par I lieu où les cylindres primitifs de la fraise-mère et de la roue sont tangents. En ce point, le filet de la fraise-mère et la denture ont la même tangente T commune à l'hélice primitive et à l'hélicoïde suivant la génératrice g_1 . La tangente T et la génératrice g_1 sont contenues dans le plan vertical N . Le filet de la vis équivalente a pour enveloppe ce plan N et si on coupe celui-ci par un plan Q horizontal passant par I , on obtient le profil rectiligne dont l'inclinaison a pour valeur α_{n0} , angle de pression réel de la fraise-mère.

En première approche, le concepteur va établir un tracé (figure 9a) se référant au cahier des charges. Ce document de travail contient tout ou partie des éléments suivants : rapport du couple, entraxe de fonctionnement, volume disponible, charge totale et poussées axiales tolérées, durée de vie, niveau de qualité géométrique et acoustique, etc.

En possession de ces informations, l'*engrenagiste* va affiner ce premier tracé en optimisant la denture de la roue et celle de l'outil, en intégrant dans sa démarche l'opération ultérieure de finition. Actuellement et avec la CAO, on peut visualiser un grand nombre de solutions, puis retenir ce qui constitue le meilleur compromis. Un dialogue nécessaire doit s'instaurer entre le responsable du produit et l'*engrenagiste*. Enfin, la notion de coût doit toujours être présente dans la démarche de chacun.



(a) fraise-mère



g_n génératrices tangentes au cylindre et à l'hélice de base
 t_1 point de tangence de la génératrice g_1

(b) détermination de la crémaillère génératrice

Figure 8 – Génération par fraise-mère

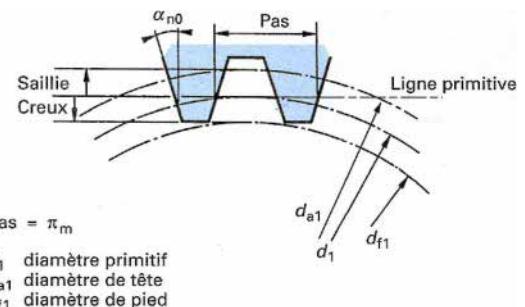
En petite série, la crémaillère génératrice peut être imposée : ou la denture rentre dans une série normalisée, ou l'outil existe déjà.

En moyenne et grande séries, l'outil fait l'objet d'études spécifiques pouvant remettre en cause une partie des caractéristiques de la denture à réaliser comme le nombre de dents du couple, son module, l'angle de pression ou d'hélice, etc.

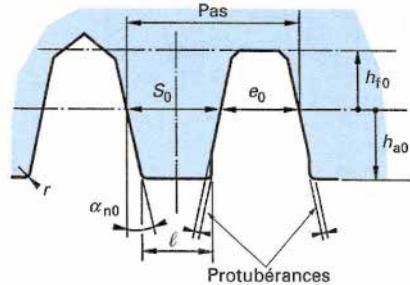
Quand on agit sur l'angle de pression α_{n0} , on agit directement sur différents éléments :

— son augmentation favorise la dépoileuse orthogonale α_{oe} , ce qui entraîne une meilleure résistance à l'usure sur les flancs des dents de l'outil. En revanche, cela entraîne par effet contraire une réduction de la largeur en sommet, d'où une fragilisation en deçà d'une certaine valeur. Cela renforce également le pied de dent taillée, offrant une plus grande résistance à la rupture sous charge ;

— inversement, sa diminution favorise l'effet d'interférence, ménageant ainsi un meilleur dégagement en pied pour le passage de l'outil lorsque la denture est terminée par rasage. On peut obtenir les mêmes avantages sans trop diminuer l'angle de pression α_{n0} , en retenant une légère protubérance en sommet de dent de l'outil. La figure 10 montre le dégagement obtenu et la possibilité d'avoir



(a) définition de la crémaillère de base



Semi-topping :
le fond de dent de l'outil
ne travaille pas.

Topping et protubérance :
le fond de dent de l'outil
travaille.

$$\begin{aligned} \text{pas} &= S_0 + e_0 \\ h_0 &= h_{f0} + h_{a0} \quad \text{hauteur de dent} \\ r &\quad \text{rayon au sommet} \\ \ell &\quad \text{largeur au sommet} \end{aligned}$$

(b) profils définitifs d'une crémaillère

Figure 9 – Crémaillère génératrice : caractéristiques liées à la roue

la dent taillée avec semi-voire *topping*, c'est-à-dire avec seulement le chanfreinage ou tout l'usinage complet du diamètre extérieur d_a et du chanfrein. Cette dernière possibilité garantit une parfaite régularité du profil et du chanfrein ; elle permet aussi d'agir sur les coûts, en élargissant les tolérances d'ébauche au tour du diamètre d_a .

La crémaillère génératrice a tout ou partie des caractéristiques reportées sur la figure 9b. En pratique et pour des engrenages type automobile, on veille à retenir les valeurs suivantes :

- $\alpha_{n0} \geq 16^\circ$
- $r \geq 0,40 \text{ mm}$
- $\ell \geq 0,30 \text{ mm}$

2.2.2 Crémaillère génératrice : caractéristiques non directement liées à la roue

Le rendement global de la fraise-mère a une incidence directe sur les coûts de l'opération ; il dépend des options retenues pour constituer la crémaillère génératrice, mais aussi des autres caractéristiques de la fraise-mère et des facteurs d'utilisation dont une grande partie sont contenus dans ce qui constitue le **temps de taillage**, comprenant deux éléments distincts : *temps morts* et *temps d'usinage ou temps copeaux*.

Le temps copeaux dans une opération de taillage par fraise-mère est donné par la relation :

$$t_{\text{copeaux}} = \frac{b_1 z_1 d_{a0} \pi}{S_x z_0 v_c \times 1000}$$

avec b_1 largeur de denture augmentée des longueurs d'approche et de sortie de la fraise-mère,
 z_1 nombre de dents taillées,
 z_0 nombre de filets de la fraise-mère,
 d_{a0} (mm) diamètre extérieur de la fraise-mère,
 S_x (mm) avance axiale de la fraise-mère à chaque tour de la roue,
 v_c (m/min) vitesse de coupe.

En dehors de b_1 et z_1 , on peut agir directement sur les autres facteurs. Le temps va ainsi diminuer pour toute augmentation de S_x , z_0 et v_c et/ou pour toute diminution du diamètre de fraise-mère d_{a0} .

Les grandeurs S_x et v_c sont déterminées soit lors des mises au point, soit par les spécifications des conditions de coupe (§ 4). Elles influent sur la qualité de la roue ainsi que sur la durée de vie de l'outil.

La qualité obtenue dépend des conditions de coupe, de la qualité d'outil, mais aussi d'un nombre minimal d'arêtes coupantes générant la denture. Ce nombre croît quand le nombre de goujures augmente, mais il diminue pour toute augmentation du nombre de filets z_0 .

La diminution du diamètre extérieur d_{a0} est un facteur important de réduction du temps copeaux mais avec des limites : un grand nombre de filets, entraînant aussi un plus grand nombre de goujures nécessaire à l'obtention de la qualité, va réduire la longueur affûtable de dent de l'outil et ainsi augmenter le coût de l'outil par unité produite. L'utilisation de fraises-mères de diamètre réduit est parfois nécessaire pour des limites de passage, comme dans le cas de pignons épaulés.

En pratique, on évite que z_1 soit multiple de z_0 afin de ne pas reproduire les erreurs de division du pas sur la ligne primitive de la crémaillère génératrice, erreurs provenant de l'exécution de l'outil. Néanmoins les améliorations obtenues dans les nouvelles générations de fraises-mères et de machines à tailler permettent de s'affranchir de cette restriction, surtout dans les taillages subissant ensuite une opération de finition.

L'augmentation du nombre de filets z_0 peut être limitée par la capacité cinématique de la machine utilisée. Par exemple, avec une fraise-mère multifilet taillant un petit nombre de dents z_1 et utilisée à grande vitesse de coupe, la vitesse de rotation du plateau porte-pièce (roue) peut devenir excessive et dépasser le seuil maximal donné par le constructeur de la machine.

D'origine, les fraises-mères étaient du type monobloc à profil détalonné par rectification. Pendant la dernière guerre apparurent en Allemagne les premières fraises à lames rapportées, le but recherché à l'époque étant l'économie de matière : lames en acier rapide montées sur un corps en acier ordinaire. Rapidement, ce type d'outil va apporter d'autres avantages tels que :

- des lames de faible section permettant un choix plus élaboré d'acier rapide et une meilleure maîtrise de leur traitement thermique en dureté, puis en déformation ;

- une nette amélioration de la qualité du profil rectifié. En effet, la rectification des lames s'effectuant comme pour une vis sans fin, les lames sont montées en position cylindrique sur un corps spécial de rectification (figure 11). Avec une telle disposition, on peut utiliser des meules de grand diamètre améliorant le rendement et l'état de surface ;

- une plus grande longueur utilisable de la dent après affûtage et la possibilité d'utiliser de plus grandes dépouilles en sommet. En effet, comme le montre la figure 11, ce type de fraise échappe aux contraintes de remontée de meule qui limitent les dépouilles, les

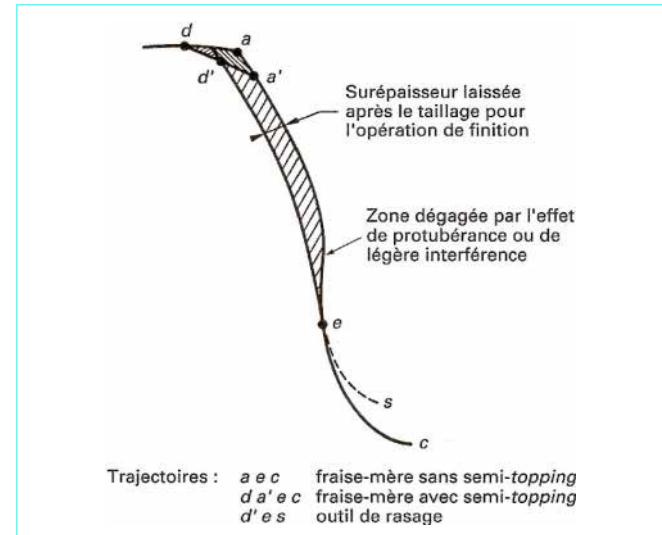


Figure 10 – Profil de la dent obtenu sur la roue taillée

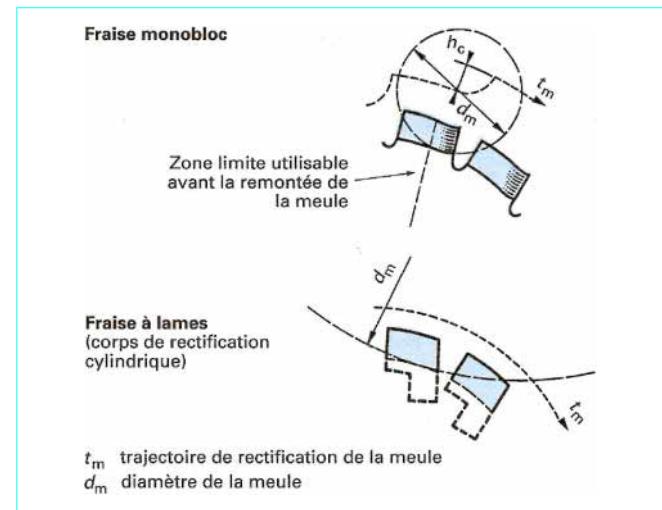


Figure 11 – Rectification de denture de la fraise-mère

longueurs utilisables et bien sûr le diamètre de meule propres aux types monoblocs.

Cependant, la fraise à lames étant détalonnée suivant une courbure cylindrique, la dent de l'outil une fois basculée sur le corps de fraise n'est plus en théorie à profil constant tout le long de sa longueur affûtable, mais les écarts sont infimes et donc acceptables en utilisation pratique.

Au cours des années 50, les États-Unis vont développer les fraises monoblocs à profil détalonné et terminé avant la trempe ; celles-ci portent alors le nom de **fraises-mères à profil non rectifié**. N'ayant plus les contraintes de remontée de meule, elles vont permettre de retrouver les avantages des fraises à lames : longueur utilisable et dépouille augmentées, avec une réduction notable des coûts de

réalisation. Mais leur niveau de qualité reste dans des classes inférieures à ceux atteints avec les dents terminées après traitements thermiques par rectification.

Actuellement, on assiste à un développement de fraises de petits diamètres à profil rectifié, dont les revêtements multicouches pourraient déboucher sur des outils non affûtables. N'étant plus tenu d'assurer une capacité d'affûtage, on peut retenir des multifiles z_0 avec un grand nombre de goujures. Ces outils étant fortement sollicités (v_c , S_x), les gains sont :

- une réduction de la section du copeau :

$$\text{section du copeau} \approx \frac{S_x z_0}{\text{nombre de goujures}}$$

- de grandes performances de productivité en agissant sur les quatre facteurs de gain du temps copeaux : d_{a0} , S_x , z_0 et v_c ;

- le maintien de la qualité de taillage.

■ Les longueurs de fraise ont beaucoup évolué. Avant l'arrivée des machines modernes, l'outil était monté sur la tête de fraiseuse, l'ensemble restait fixe. Puis apparaissent les premières possibilités de déplacement de la fraise dans le sens axial. Ce déplacement pas à pas prit le nom de *shifting* (figure 12). L'amélioration des machines conduit à toute une panoplie de conditions d'utilisation programmables comme :

- une valeur de déplacement pas à pas (ou *shifting*) s_h très précise : 0,01 mm près ;
- un nombre de pièces ou de paquets de pièces entre chaque déplacement ;
- un nombre total de pièces qui, une fois atteint, met la machine hors cycle.

Ces développements ont entraîné l'augmentation des longueurs de fraise. La figure 12a montre la longueur minimale ab qui est nécessaire et suffisante pour réaliser la génération complète d'une denture droite. Elle est augmentée pour une denture hélicoïdale surtout, comme le montre la figure 12b, s'il s'agit d'un taillage par procédé oblique où la fraise-mère se déplace suivant la direction de l'hélice.

■ Le sens de déplacement n'est pas choisi au hasard. Dans le sens de rotation représenté sur la figure 12a, la dent de fraise attaque la pièce au point a (début de génération) pour atteindre le point b (fin de génération). L'avance étant continue, c'est dans la zone suivant ce point a , appelée zone d'attaque ou d'ébauche E , que va s'effectuer le plus gros travail d'enlèvement de matière, entraînant l'usure la plus importante sur les dents de l'outil. La seconde partie de l'empreinte, qui se termine au point b , concerne la zone dite de finition F beaucoup moins sollicitée ; elle va être peu affectée par l'usure.

En choisissant le sens de déplacement tel qu'il évacue toujours les dents les plus usées, donc dans un sens qui s'oppose à la rotation de la pièce, on garantit l'introduction de dents intactes en zone de finition et on préserve la qualité géométrique de la denture générée. Ces dispositions, faciles à respecter en taillage axial, le sont moins quand il s'agit d'un taillage oblique, où la zone usée peut se trouver recyclée suivant l'importance de l'hélice et de la longueur taillée (figure 12b).

■ L'orientation du sens du filet, à droite ou à gauche, va influer sur le sens et l'importance de l'inclinaison de l'axe de la fraise-mère en position de travail. La figure 13 indique tous les cas possibles. Afin de limiter l'inclinaison du chariot porte-fraise de la machine, ce qui n'est pas toujours acceptable compte tenu des volumes disponibles, on choisit un même sens outil-roue, ce qui donne l'inclinaison $\beta - \sigma_0$. Cette disposition a aussi un autre avantage, celui de maintenir en appui constant la vis de commande du plateau porte-pièce (roue). Mais cette disposition est moins sensible avec les machines modernes à double commande.

■ Les valeurs de dépouille des arêtes actives de l'outil ont pu être augmentées grâce aux possibilités des fraises à lames et des fraises

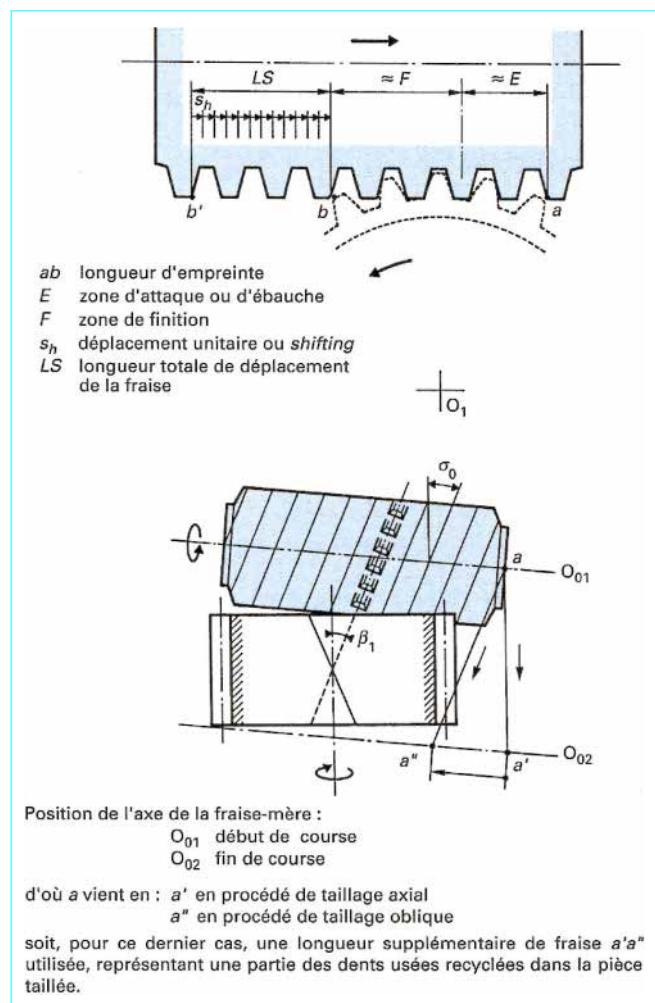


Figure 12 – Longueur de fraise-mère

à profil non rectifié. Si, avec les fraises monoblocs, les dépouilles frontales sont limitées vers 6° , avec les fraises à lames, en revanche, elles peuvent atteindre 18° .

Exemple de valeurs courantes : en prenant $\alpha_{fe} = 18^\circ$ et $\alpha_{no} = 17^\circ$, la dépouille orthogonale est de :

$$\tan \alpha_{oe} = \tan 18^\circ \cdot \tan 17^\circ, \text{ soit environ } 5^\circ 40'$$

En augmentant les valeurs de dépouille sur flancs de denture, on a pu réduire les usures, généralement réparties le long des rayons au sommet (figure 14).

Connaissant la hauteur de came de détalonnage h_c , on en déduit la valeur de la dépouille frontale avec :

$$\tan \alpha_{fe} = \frac{\text{nombre de goujures} \cdot h_c}{\pi d_{a0}}$$

Avec la fraise à lames, α_{fe} se déduit directement par l'inclinaison de la lame sur son corps de fixation ; le calcul de α_{oe} reste identique.

Depuis les applications des traitements de durcissement superficiel, comme les traitements PVD (*Physical Vapor Deposition*), la

résistance à l'usure en dépouille s'est accrue et on a vu apparaître des destructions en sommet de dent sous l'effet de l'usure par cratérisation (figure 14). La tendance est de revenir sur les valeurs de dépouille, pour renforcer l'angle de taillant égal à $\frac{\pi}{2} - (\alpha_{fe} + \gamma_f)$.

La face de coupe A_γ remise en état après affûtage est définie suivant deux angles : l'angle de coupe radiale γ_f et l'angle de coupe axiale γ_p .

γ_f est en général nul et γ_p est également nul quand la goujure exécutée en hélice reste normale à l'axe du filet. En théorie, les goujures devraient toujours être hélicoïdales mais, pour faciliter l'exécution et le contrôle de la crémaillère génératrice ainsi que l'opération d'affûtage, on retient souvent des goujures droites tant que l'angle d'inclinaison σ_0 du filet reste limité ($\leq 7^\circ$).

L'angle de coupe orthogonale γ_{oe} a pour tangente :

$$\tan \gamma_{oe} = \tan \sigma_0 \cos \alpha_{n0}$$

$$\text{avec } \sin \sigma_0 = \frac{z_0 m_0}{d_0}$$

Exemple de valeurs courantes : avec $m_0 = 2,80$, $z_0 = 3$, $d_0 = 90,64$ mm et $\alpha_{n0} = 20^\circ$, on obtient : $\sigma_0 = 5^\circ 19'$ et $\gamma_{oe} = \pm 5^\circ$.

En retenant une goujure droite, l'angle γ_{oe} a donc une valeur positive sur un flanc et négative sur l'autre.

En plus des avantages déjà cités, les goujures droites ont permis la grande diffusion des fraises-mères à lames qui, par construction, ne peuvent être hélicoïdales. En revanche, celles-ci trouvent leur limite d'utilisation dès que σ_0 dépasse sa valeur limite, donc dès que z_0 , m_0 augmentent et inversement d_0 diminue.

■ L'**entraînement** des fraises s'effectue soit par clavette longitudinale, soit par tenon frontal. En petit diamètre et en grande longueur, on tend à développer des fraises-mères de type arbré (alésage supprimé) offrant plus de résistance.

■ Les **consignes de montage et d'affûtage** doivent être strictement observées car leur non-respect entraîne toujours des erreurs sur le produit réalisé. La figure 15 montre quelques exemples de montages défectueux et leurs conséquences (exagérées pour la compréhension) sur la qualité géométrique de la denture taillée.

2.3 Outil-pignon

Bien que le taillage par outil-pignon ait connu des améliorations, ses performances et donc son coût à l'opération restent relativement moins bien placés par rapport à ceux obtenus avec la fraise-mère. Néanmoins, comme indiqué au début du paragraphe 2, ce procédé est retenu pour toutes dentures épaulées ne permettant pas le passage d'une fraise et pour les dentures à fonction de coulissemement.

La figure 16a montre succinctement le principe : faire engrer deux roues, l'un étant la roue à tailler, l'autre l'outil-pignon animé d'un mouvement de mortaisage. Les deux axes roue/outil sont reliés cinématiquement suivant la relation :

$$\frac{\omega_0}{\omega_1} = \frac{z_1}{z_0}$$

Pour avoir des arêtes actives, l'outil-pignon possède une face de coupe et les flancs de dent sont dépouillés. Les arêtes actives matérialisent la roue équivalente à l'outil (figure 17) qui va changer après chaque affûtage sous l'effet des flancs dépouillés, entraînant une diminution du diamètre de l'outil, depuis son plan neuf jusqu'à son plan limite d'utilisation. L'outil-pignon, contrairement aux outils crémaillères et fraises-mères, n'est pas à profil de dent constant (figure 16b).

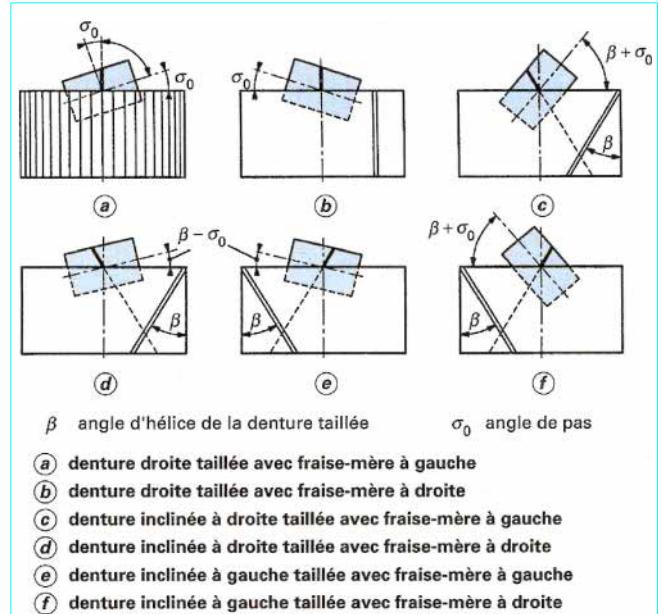


Figure 13 – Positions relatives de la roue et de la fraise-mère, compte tenu du sens d'inclinaison du filet de la vis équivalente et de celui de la denture taillée

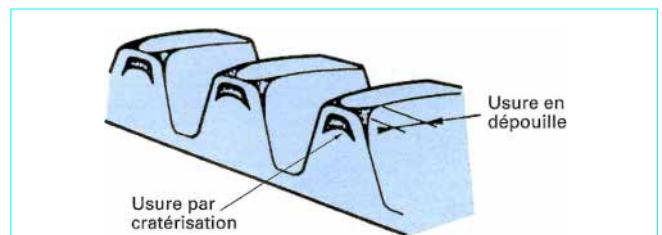


Figure 14 – Répartition type d'usure sur les dents d'une fraise-mère

Pour satisfaire la continuité d'engrènement, les pas de base outil-roue doivent être identiques, donc les diamètres de base constants, soit :

$$p_{b0} (\text{ou } p_{bt0}) = p_{b1} (\text{ou } p_{bt1})$$

$$\text{et } d_{b0} = \frac{z_0 p_{b0} (\text{ou } p_{bt0})}{\pi} = d_{b1} \frac{z_0}{z_1}$$

Après chaque affûtage, le diamètre outil-pignon diminuant, l'entraxe outil-roue va également diminuer :

$$a = m_0 (\text{ou } m_{t0}) \frac{z_0 + z_1}{2}$$

z_0 et z_1 étant par définition constants, c'est donc le module de taillage qui va changer. Comme ce facteur entre dans la détermination du diamètre primitif de taillage, ce dernier va également changer après chaque affûtage :

$$d_0 = z_0 m_0 (\text{ou } m_{t0})$$

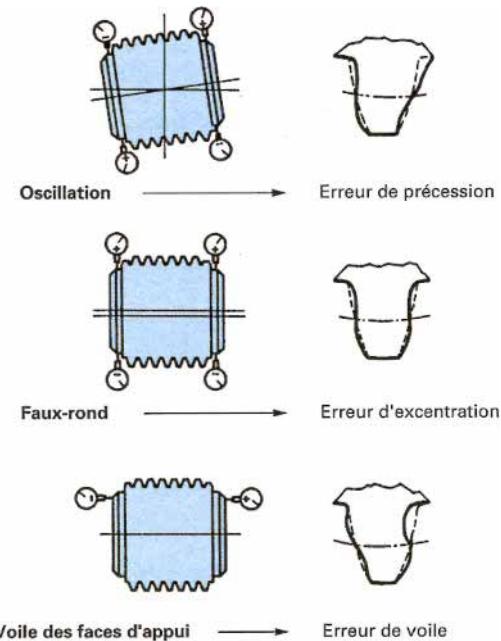


Figure 15 – Défauts de montage et incidence sur le profil de denture de roue obtenu

Le diamètre de base reste constant, le diamètre primitif d_0 varie, l'angle de pression de taillage va également varier au fur et à mesure des affûtements soit :

$$\cos \alpha_{n0} (\text{ou } \cos \alpha_{t0}) = \frac{d_{b0}}{d_0}$$

L'angle d'incidence suit la variation d'angle de pression. Le flanc de dent dépoluillé étant toujours exécuté sur la même développante de cercle d_{b0} , la dent de l'outil va être moins évasée en fin d'utilisation. Les valeurs de dépoluille sur flanc étant généralement très faibles, cela va entraîner des risques de frottement, surtout vers le plan de fin d'utilisation, avec destruction des flancs de dent de l'outil et des états de surface de la roue. On peut minimiser ce risque en augmentant la valeur de recul lors du retour de l'outil, mais les masses en mouvement liées aux grandes vitesses utilisées font que l'on limite celles-ci pour ne pas rencontrer de problème d'inertie.

Inversement, avec un outil neuf, l'angle d'incidence augmente, avec pour conséquence une faible largeur de dent en sommet, fragilisant celle-ci et pouvant conduire à des ruptures sous les chocs de coupe répétés. La longueur totale utilisable de l'outil-pignon est donc bornée par ces deux seuils :

- *plan neuf*, par la largeur minimale au sommet de dent ;
- *plan limite d'utilisation*, par angle d'incidence minimale.

Pour améliorer la résistance à l'usure, le sommet de dent est souvent rayonné tel que le montre la figure 18. Ce rayonnage n'est pas toujours uniforme tout le long de la dent ; en effet, il peut avoir une valeur progressive du plan neuf vers le plan limite ayant alors une action correctrice sur le diamètre actif de tête de l'outil pour diminuer les interférences de taillage.

Le fond de dent de l'outil-pignon peut être étudié pour effectuer un *semi-topping* ; en revanche, le *topping* complet n'est pas possible sur ce type d'outil.

L'angle de coupe γ_f va compliquer l'étude et la réalisation des flancs. S'il reste nul, les deux surfaces latérales détalonées sont deux hélicoïdes développables d'inclinaison ε (figure 19) ; leur intersection avec un plan normal à l'axe (plan ①) donne une arête coupante ad_1 , qui est partie intégrante de la développante de cercle

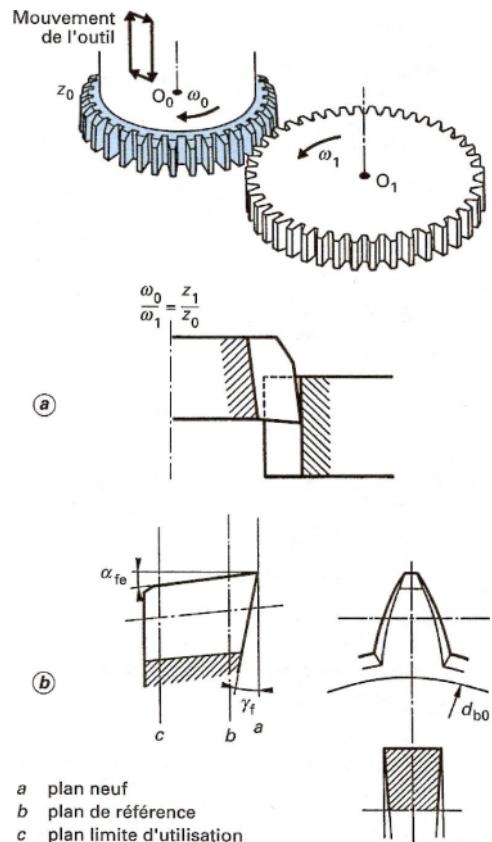


Figure 16 – Taillage par outil-pignon

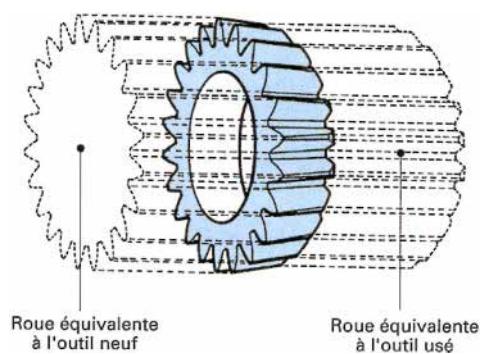


Figure 17 – Roues équivalentes à l'outil-pignon : neuf et usé

de diamètre d_{b0} . Dès que l'on donne une valeur positive à l'angle de coupe γ_f (plan ②), il faut alors corriger le profil du flanc pour que l'intersection ab , nouvelle arête coupante, génère toujours une développante de cercle de diamètre d_{b0} . La rectification des flancs de dents utilise deux procédés : par *meule profilée avec passage au travers* ou par *meule battante*. Dans le premier procédé, la correction s'effectue directement sur le profilage de la meule. Dans le second, on se rapprochera le plus près possible des conditions théoriques.

L'étude d'un outil-pignon est très complexe et se complique encore quand il s'agit d'une denture hélicoïdale. La CAO apporte une aide

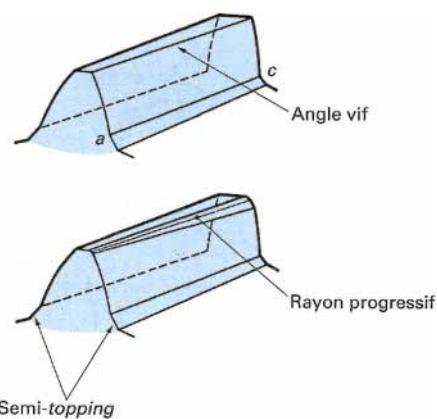


Figure 18 – Dent d'outil-pignon avec ou sans rayonnage et semi-topping

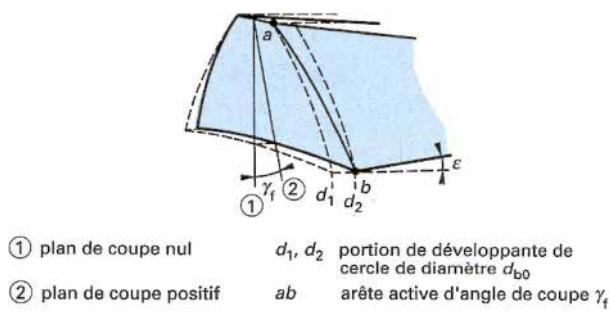


Figure 19 – Influence de l'angle de coupe γ_f sur le profil de denture

dans l'étude et la réalisation de l'outil. La figure 20 donne un schéma de processus CAO intégrant jusqu'à la détermination et les paramètres de réglage de la meule génératrice (procédé avec passage au travers) pour réaliser l'outil.

L'**angle de coupe** γ_f a souvent une valeur comprise entre 3 et 10°. Il faut éviter un angle de taillant trop fragile favorisant les écaillages, voire les ruptures en sommet de dent. Cet angle peut être aussi limité par des dégagements réduits. Comme l'indique la figure 21a et dans le cas de dentures épaulées, on doit s'assurer que toutes les arêtes actives de l'outil sont bien sorties de la dent taillée avant d'atteindre la face de l'épaulement augmentée d'un espace e de sécurité nécessaire pour loger le copeau et la trajectoire de recul de l'outil avant sa remontée.

En denture hélicoïdale, il faut en plus tenir compte de l'orientation de la face de coupe dans un plan normal à la direction de l'hélice (figure 21b). Dans ce cas, l'arête d'un flanc peut atteindre la cote e avant que tous les points coupants de l'autre arête aient terminé leur travail. Quand les dégagements deviennent trop étroits, on peut retenir un affûtage à plat, comme pour l'outil crémaillère, avec coupe cuillière sur le flanc à coupe négative et renforcement d'arête sur l'autre (figure 21c).

En pratique et toujours pour le taillage hélicoïdal, on peut aménager un affûtage dit *chip control* : il consiste à favoriser le flanc haut (figure 21d) avec une coupe positive de 0 à 7° environ. Cet artifice améliore l'enroulement du copeau, d'où son nom, et réduit les contraintes de dégagement. Le flanc opposé dit flanc bas passe en coupe négative mais sans conséquence dans les valeurs retenues.

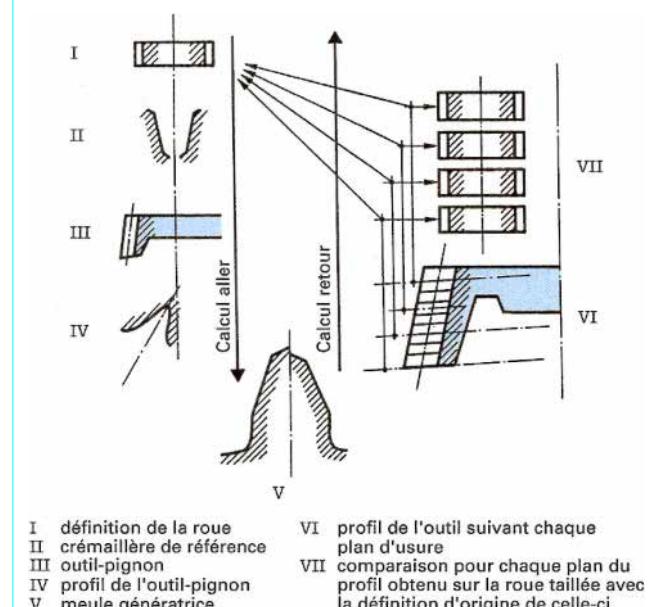


Figure 20 – Schéma de calcul par CAO

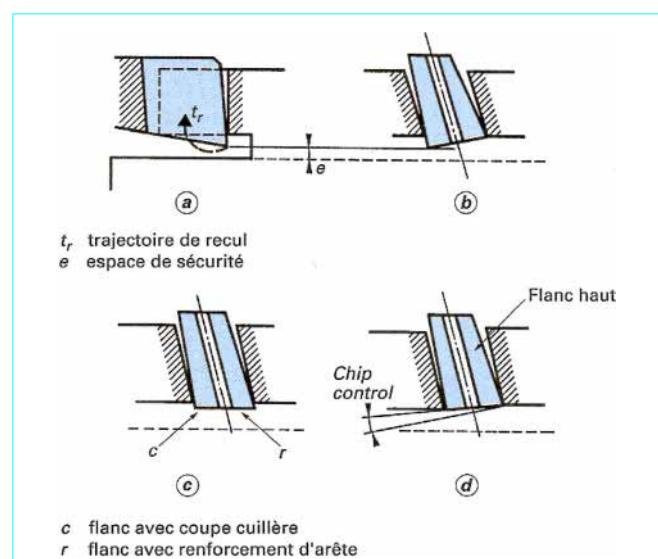


Figure 21 – Limites de passage en denture épaulée

La **dépouille frontale** γ_{fe} est donnée par la génératrice conique du diamètre extérieur de l'outil et se situe dans des valeurs de 3 à 10° environ. Comme on l'a vu précédemment, l'effet correcteur du rayonnage en sommet permet de limiter la dépouille frontale pour renforcer l'angle de taillant, de respecter le diamètre actif de pied et, enfin, de contenir l'interférence éventuelle de taillage vers la fin d'utilisation.

La **dépouille orthogonale** en travail dépend de l'angle d'inclinaison et reste dans des valeurs faibles, environ 1°30'.

L'action de coupe est du type **mortaisage**, commandé par un système bielle-manivelle. La loi de mouvement sinusoïdale fait que la vitesse de coupe est variable à tout instant : nulle en début et fin de course, maximale à mi-course. La loi de mouvement indiquée sur la figure 22 montre que la course totale comprend la largeur b de denture à tailler augmentée d'une longueur d'entrée et de sortie ; ainsi, quand l'outil attaque et quitte la roue à tailler, c'est avec une certaine vitesse de coupe v_c .

La vitesse maximale en milieu de course est :

$$v_{t\max} = \omega r_m$$

avec r_m (m) rayon de la manivelle,
 ω (rad/s) vitesse angulaire.

En un point quelconque, la vitesse est :

$$v_t = \omega r_m \cos \omega t$$

avec ωt angle de position de la manivelle par rapport à la position de référence correspondant à $v_{t\max}$.

Exemple de valeurs courantes avec $b = 22$ mm, 3 mm pour l'entrée et pour la sortie et une vitesse de rotation de la bielle de 400 tr/min :

$$\text{vitesse angulaire : } \omega = \frac{400 \times 2\pi}{60} = 41,887 \text{ rad/s}$$

$$\text{rayon de manivelle : } r_m = (22 + 2 \times 3)/2 = 14 \text{ mm}$$

$$\text{d'où } v_{t\max} = 41,887 \times 0,014$$

$$= 0,58 \text{ m/s (ou } 35,1 \text{ m/min)}$$

ωt correspondant au point d'attaque ou de sortie de l'outil :

$$\sin \omega t = \frac{14 - 3}{14} \quad \text{d'où } \omega t = 51^\circ 47'$$

vitesse en un point quelconque :

$$v_t = \omega r_m \cos \omega t = 0,36 \text{ m/s (ou } 21,8 \text{ m/min)}$$

Ainsi, dans ce cas, la vitesse de coupe varie de 21,8 m/min à l'attaque et à la sortie pour atteindre 35,1 m/min, maximale en milieu de course. Cette variation peut devenir plus importante quand b devient lui-même important.

Pour une denture hélicoïdale, les valeurs ci-dessus sont majorées en fonction de l'angle d'hélice β :

$$V_{th\max} = \frac{V_{t\max}}{\cos \beta}$$

et en un point quelconque : $V_{th} = \frac{\omega r_m \cos \omega t}{\cos \beta}$

L'outil-pignon travaille dans des conditions très sévères : chocs répétés lors de l'attaque, v_c variables, formation complexe des copeaux. La figure 23 montre, d'une manière simplifiée, les phases de génération de denture suivant le nombre de tours retenu pour atteindre la profondeur de denture ; elle montre également un type de copeau dit à trois branches, caractéristique de ce procédé, dont l'enroulement anarchique est facteur d'élévation de température, d'usure, voire de destruction de l'arête de coupe. Pour optimiser les conditions d'utilisation et le rendement, l'utilisateur, s'il dispose de machines récentes, pourra composer une variété de cycles adaptés à chacun des cas traités : cycles en multipasses, en spirale, possibilité de faire varier les valeurs en ébauche et finition pour les vitesses de coupe, avances de plongée et de génération, etc.

L'usure normale va surtout se développer sur les faces de dépouille A_α vers le raccordement des parties frontale et latérale, d'où l'intérêt du rayonnage déjà cité.

Contrairement à la fraise-mère, où le sens de déplacement permet d'évacuer les dents les plus usées, l'outil-pignon va constamment recycler celles-ci et affecter la géométrie même de la dent taillée quand l'usure va croître ; c'est pourquoi l'évolution de l'usure doit être parfaitement maîtrisée pour respecter la qualité de denture recherchée.

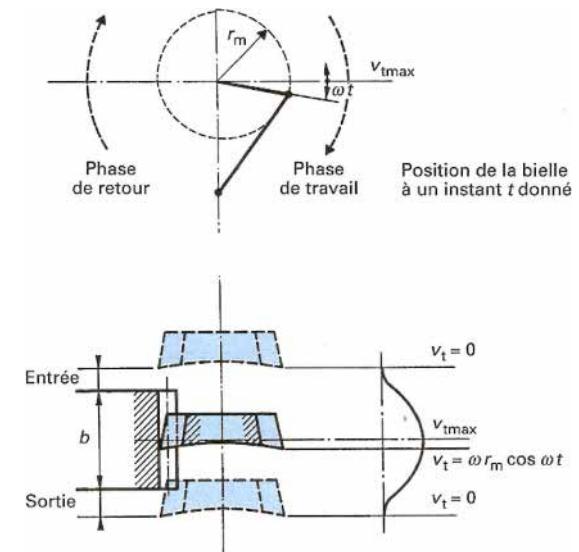


Figure 22 – Mouvement de coupe sinusoïdal

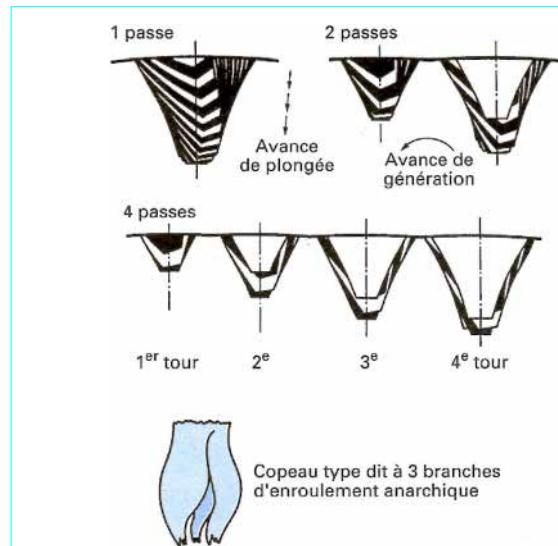


Figure 23 – Phases d'enlèvement de matière en fonction du cycle de taillage

Les outils-pignons sont à dentures rectifiées. Faisant l'objet d'études spécifiques, leurs diamètres et nombre de dents sont choisis pour les dentures droites en fonction des capacités des machines, $d_{a0} \leq 250$ mm. Pour les dentures hélicoïdales, les diamètres et nombre de dents sont en revanche choisis en fonction du pas de guide disponible. En effet, comme l'indique la figure 24, et à partir d'un même pas de guide, il suffit de faire varier les diamètre et nombre de dents pour obtenir différentes valeurs d'angle β .

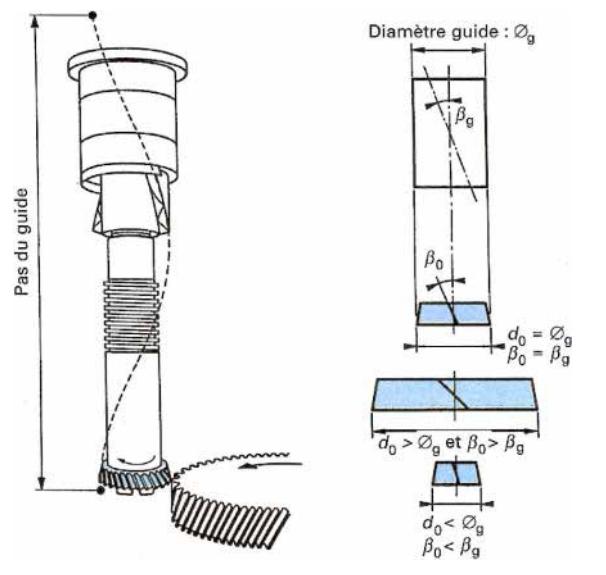


Figure 24 – Variation de l'angle β en fonction du diamètre de l'outil pour un pas de guide donné

2.4 Outil de rasage

L'opération de rasage est encore appelée **shaving**, en référence à l'origine de son développement aux États-Unis. C'est une opération de finition après taillage et avant le durcissement par trempe de l'engrenage. Ce procédé est très utilisé en moyenne et grande production. Sa productivité et son coût à l'opération atteignent de grandes performances. Quant à sa généralisation, elle a été rendue possible grâce aux progrès de la technique elle-même, mais aussi grâce à une meilleure maîtrise des traitements thermiques limitant les déformations après trempe.

2.4.1 Principe

Son principe consiste à former un engrenage gauche c'est-à-dire à axes croisés (figure 25a). Dans ce type d'engrènement, le contact sur flanc est ponctuel avec un glissement relatif ; c'est ce dernier qui est utilisé pour enlever la matière. L'outil a pris la place de l'une des roues, outil sur lequel est réparti un ensemble de mortaises (stries) qui sont autant d'arêtes coupantes.

L'outil de rasage a peu d'aptitudes pour la coupe : il travaille par râlage, enlève de fines particules sous de fortes pressions de contact. C'est un procédé qui améliore beaucoup les états de surface, mais corrige peu les erreurs géométriques inhérentes au taillage ; c'est pourquoi la denture préébauchée de la roue devra être très proche des caractéristiques définitives.

L'outil de rasage possède un grand nombre de dents z_0 pour rechercher un rapport de conduite par le profil supérieur à 2. Dans les classes de modules d'automobile, les diamètres d_{00} dépassent généralement 200 mm ; ils rentrent aussi dans des standards satisfaisant la capacité de la machine à raser.

Le **nombre de dents z_0** est un nombre premier afin d'éviter les reproductions cycliques sur la roue ; z_0 rentre également dans des standards de diviseurs pour l'opération d'affûtage.

Pour des modules moyens, comportant un faible nombre de dents z_1 à raser, certaines bases d'étude introduisent la notion de **parité**

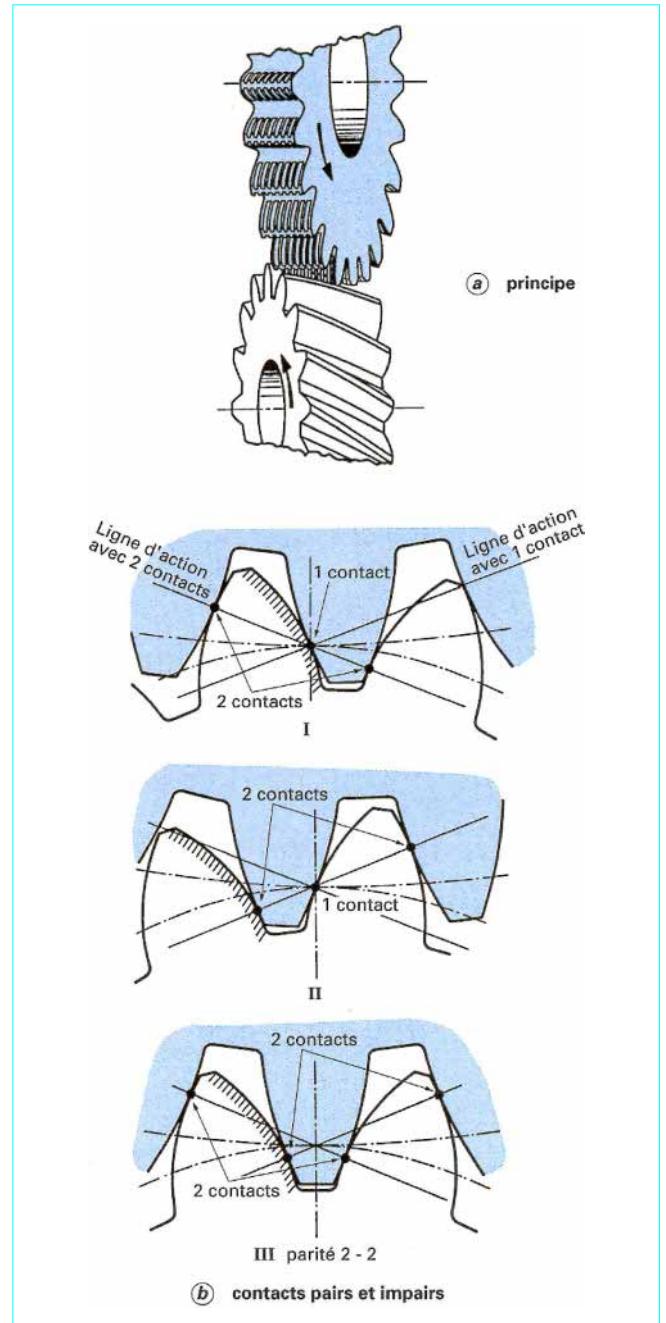


Figure 25 – Outil de rasage : schéma de principe et notion de parité

de contact. En rasage, et contrairement aux engrènements habituels de tout couple, les deux flancs homologue et antihomologue sont constamment en contact sous la forte pression exercée pour l'enlèvement de matière. À chaque instant, et comme le montre la figure 25b (I et II), le nombre de flancs en contact peut être différent sur les deux lignes d'action ; cela entraîne des différences de pression sur les zones en contact, donc des variations d'enlèvement de matière. On conçoit très bien alors que ces disparités vont avoir une influence directe sur la qualité géométrique de la denture rasée :

erreurs de pas, distorsion de profil, etc. Pour remédier à cela, on veille à ce qu'à chaque état d'utilisation il y ait un nombre de flancs en parité de contact à tout moment de l'engrènement : 1-1, 2-2, 3-3, etc. (figure 25b III).

2.4.2 Phénomènes de glissement

Le couple à axes croisés formé par l'outil et la roue à raser est la base des phénomènes de glissement utilisés pour enlever les fines particules de matière lors de l'opération de finition des dentures. Le contact étant ponctuel (en réalité, et sous les fortes pressions appliquées, ce point est en fait une très petite zone d'écrasement), c'est ce point ou cette zone qui va tracer les différentes lignes de coupe (figure 26). Celles-ci sont la résultante de deux composantes de glissement :

- le glissement par le profil v_g ;
- le glissement longitudinal v_ℓ .

Glisement par le profil

Comme pour tout engrenage, ce glissement est d'abord nul au point I, lieu d'intersection des droites d'action, et va croissant de part et d'autre de ce point. Dans le cas du rasage (figure 26a), les flancs homologue et antihomologue sont en contact permanent sous la pression de la coupe exercée, le glissement a tendance à faire fluer la matière dans les sens indiqués : pour un sens de rotation donné, fluage vers le point I pour un flanc, fluage vers l'extérieur de ce point pour l'autre flanc, et inversement quand le sens de rotation change.

La vitesse de glissement par le profil est complexe à déterminer ; n'étant pas constante, elle doit être reconSIDérée pour chaque point.

Le traité des engrenages donne la formule suivante :

$$v_g \approx (\omega_{v0} + \omega_{v1}) IA_0$$

avec $\omega_{v0} = \omega_0 \cos^3 \beta_0$,

$\omega_{v1} = \omega_1 \cos^3 \beta_1$,

IA_0 distance sur la ligne d'action du point de contact A_0 considéré au point I.

Glisement longitudinal

Il dépend uniquement du croisement des deux axes, issus des hélices respectives de l'outil β_0 et de la roue β_1 .

La figure 26b montre la ligne de contact du flanc de denture, siège des différentes composantes de vitesses de glissement :

- v_ℓ vitesse de glissement longitudinal de valeur constante ;
- v_g vitesse de glissement par le profil, nulle au point I, de valeur croissante de part et d'autre de ce point ;
- v vitesse résultante de v_ℓ et v_g imprimant les différentes trajectoires, telles qu'on peut les observer au niveau des états de surface obtenus sur les dents rasées de la roue.

La vitesse de glissement longitudinal est facile à déterminer :

$$v_\ell = \omega_0 r_0 (\sin \beta_0 + \cos \beta_0 \cdot \tan \beta_1)$$

avec $r_0(m)$ rayon primitif de l'outil.

La détermination de la vitesse de coupe ne justifie pas toujours le recours à ces calculs longs et complexes. En pratique, on retient simplement la vitesse périphérique de l'outil comme valeur de vitesse de coupe v_c (m/min) :

$$v_c = \omega_0 r_0 \times 60$$

Quand le rapport z_0/z_1 devient trop important, on peut être conduit à réduire la vitesse pour des raisons de sécurité. En effet, la rotation excessive de la pièce, donc des masses en mouvement, peut se traduire dans les cas de pignons arbres de grande longueur par des risques d'échappement hors des pointes de prises de pièce.

2.4.3 Croisement des axes

En rasage, la valeur du croisement des axes Σ (cf. figure 29) est très importante et détermine ensuite la valeur que l'on va donner à l'inclinaison primitive de la denture de l'outil. En pratique, la valeur optimale se situe $\Sigma \approx 12^\circ$, sauf dans le cas de pignons épaulés où cette valeur peut descendre jusqu'à $\approx 6^\circ$.

De la relation suivante, on tire β_0 :

$$\Sigma = \beta_1 \pm \beta_0$$

avec signe + pour hélices de même sens,

signe - pour hélices de sens opposé.

En denture droite, $\Sigma = \beta_0$.

En général, on choisit β_0 de sens opposé à β_1 pour limiter l'inclinaison de la tête porte-outil sur la machine à raser.

Une faible valeur de Σ diminue le glissement longitudinal pouvant conduire à un contact sans enlèvement de matière, donc fortement écrouï. Inversement, son augmentation améliore le même glissement mais avec un détérioration de l'engrènement génératrice de distorsions des profils de denture rasées.

2.4.4 Remise en état de l'outil

La remise en état de l'outil après utilisation s'effectue par une opération de rectification de très grande précision des flancs de dents où on limite à moins de 0,06 mm la quantité enlevée par flanc. Ainsi, les caractéristiques de l'outil vont se modifier du plan neuf vers le plan limite d'utilisation.

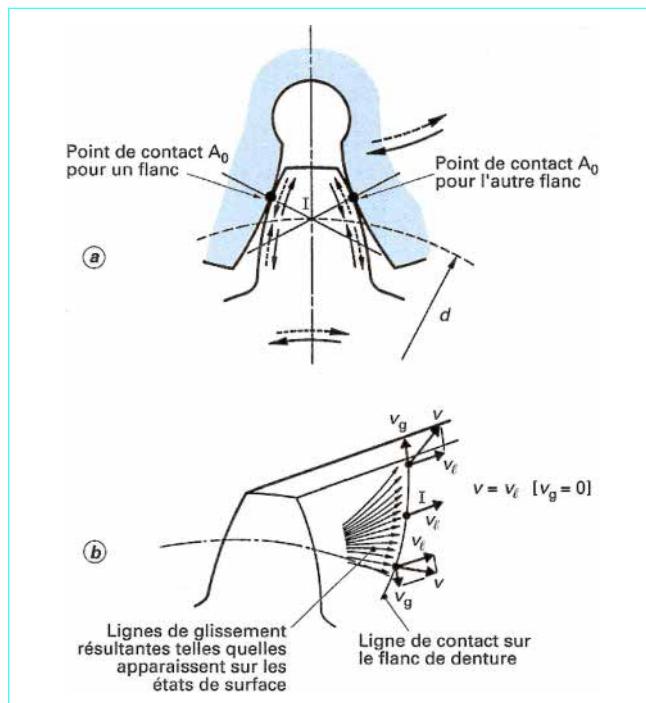


Figure 26 – Sens et orientations des différents glissements dus à l'engrènement

Pour satisfaire aux conditions d'engrènement, le pas de base p_{bt0} et le diamètre de base d_{b0} sont constants. En revanche, l'angle de pression de l'outil va évoluer dans une certaine fourchette : 10 à 22° étant une base optimale.

2.4.5 Forme générale de la dent

L'étude de l'outil doit aussi intégrer la forme générale de dent suivant les recommandations indiquées sur la figure 27 :

- en plan neuf : épaisseur ℓ minimale au sommet pour éviter une fragilisation excessive dans cette partie de dent, très dégagée elle-même par la profondeur des mortaises ;
- en plan usé (fin d'utilisation) : profondeur p_c de mortaises et hauteur h de dents encore suffisantes ;
- épaisseur minimale en pied de dents calculée pour résister à la rupture sous charge.

Le concepteur dispose aussi de moyens CAO pour mener son étude et ceux-ci vont intégrer tous les paramètres précisés. Les résultats sur la denture rasée sont également connus à ce stade, comme les différentes trajectoires et rayons actifs (figure 28). La connaissance de ces éléments permet de mieux maîtriser le rapport saillie/épaisseur de la dent de l'outil après chaque affûtage.

La largeur b_0 de l'outil doit être suffisante pour couvrir la zone de contact, mais pas trop non plus pour ne pas rectifier une partie inutile de denture, sachant que cette opération est longue et mobilise des moyens onéreux. Cette largeur dépend directement du procédé retenu (figure 29) :

- en rasage conventionnel longitudinal ou oblique, il y a déplacement cinématique c des axes outil-roue pour $b_0 < b_1$;
- en rasage transversal, il y a déplacement cinématique en travers c des axes outil-roue pour $b_0 \approx b_1$;
- en rasage plongée, les axes sont fixes, l'outil doit couvrir toute la largeur, soit $b_0 > b_1$. Dans ce procédé, la dent de l'outil dans le sens de l'hélice devra souvent être affûtée en creux pour obtenir un bombardé correspondant sur la dent rasée de la roue.

Les mortaises aménagées le long des flancs (figure 30) vont répondre à des lois de répartition très précises. La face de coupe A_γ reste brute de mortaisage et n'est jamais reprise par une opération de remise en état, d'où la nécessité d'obtenir d'origine un très bon état de surface.

L'angle de coupe γ_f est nul. La partie formant dépouille (α_{fe}) fait partie du flanc de dent ; obtenue par rectification de grande précision, elle est également remise en état lors des affûtages. Sa valeur est par construction toujours nulle. Ainsi défini, l'outil de rasage montre bien peu d'aptitudes à la coupe des matériaux.

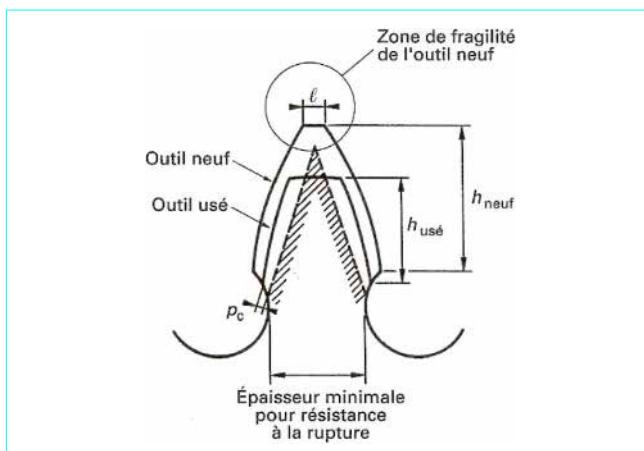


Figure 27 – Exemple de forme de dent d'un outil de rasage

La figure 31 donne une vue très schématique des phases de travail accomplies par les mortaises. Une forte pression est nécessaire pour imprimer celles-ci dans la roue, provoquant des zones fortement écrasées alternant avec les zones raclées par l'arête de coupe. À chaque tour de roue ou à chaque translation, l'outil s'enfonce d'une valeur p , avance de plongée ; également à chaque tour de roue, l'arête coupante se décale d'une valeur d , avance donnée soit par le mouvement cinématique, soit par le décalage des mortaises.

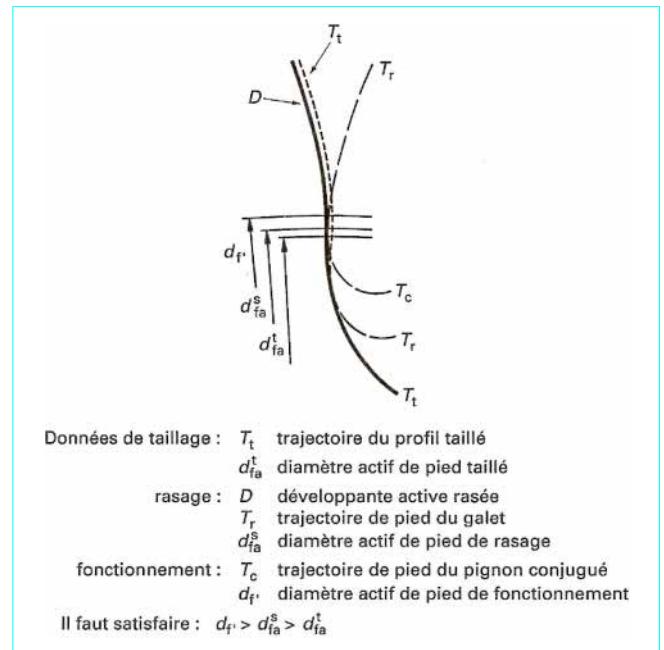


Figure 28 – Courbes de raccordement du profil rasé

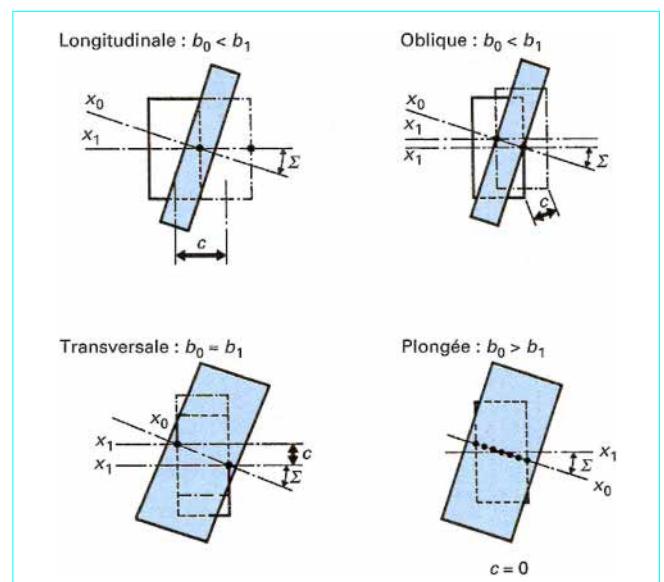
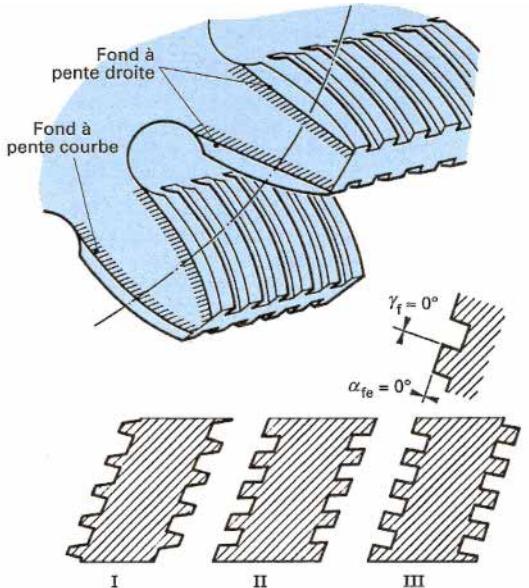


Figure 29 – Courses, largeurs d'outil en fonction des méthodes de rasage



Coupes transversales montrant différentes formes de mortaises : la forme III est la plus utilisée, puis la II et peu ou pas la forme I.

Figure 30 – Mortaises d'un outil de rasage

La figure 32 représente les deux types de distribution de mortaises de l'outil :

— mortaises concentriques pour les outils utilisés en conventionnel. L'avance d est donnée par les conditions de la machine ;
— mortaises distribuées en hélice pour les méthodes : plongée ou transversale. Le décalage après un tour soit $z_1 + 1$ dents représente l'avance d dont la valeur choisie est souvent comprise de 0,1 à 0,40 mm. Connaissant d , il est facile ensuite de déterminer le décalage dent à dent e correspondant à un angle d'hélice σ des mortaises. Les valeurs du plat p et du creux c de celles-ci sont de petites dimensions mais dépendent surtout de la capacité de l'outil-peigne utilisé pour les réaliser. En effet, le plat p , qui doit rester réduit pour limiter l'écrouissage, dépend directement de la largeur de la meule exécutant l'empreinte correspondante sur le peigne. En pratique, on peut descendre jusqu'à des plats de 0,80 mm.

Les machines à raser permettent désormais un choix étendu de conditions d'utilisation. Dans cette technique particulière, l'utilisateur est souvent conduit à traiter séparément chaque cas abordé par des mises au point adaptées. Ainsi, il peut faire varier un ensemble de paramètres comme la vitesse de rotation outil-roue, les avances, les inversions de rotation, les planages, le recul de déformation, etc. Ces recherches sont accompagnées de corrections ponctuelles apportées aux profils de denture de l'outil.

Si le rasage reste une opération très répandue en moyenne et grande série, la rectification de la denture après trempe est toujours retenue sur les engrenages dont la dimension ne permet pas le passage sur machine à raser, les engrenages de gros modules, ou sur tout engrenage ayant des fonctions particulières. D'autres techniques sont également appliquées en finition de denture après trempe, comme la superfinition par outil abrasif, l'emploi de fraise avec plaquettes carbure fortement négatives ou de crémaillère revêtue de couches dures, mais leur emploi reste très limité.

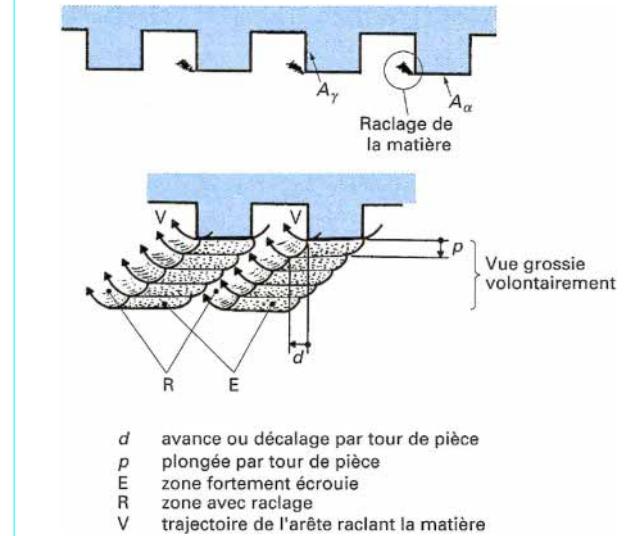
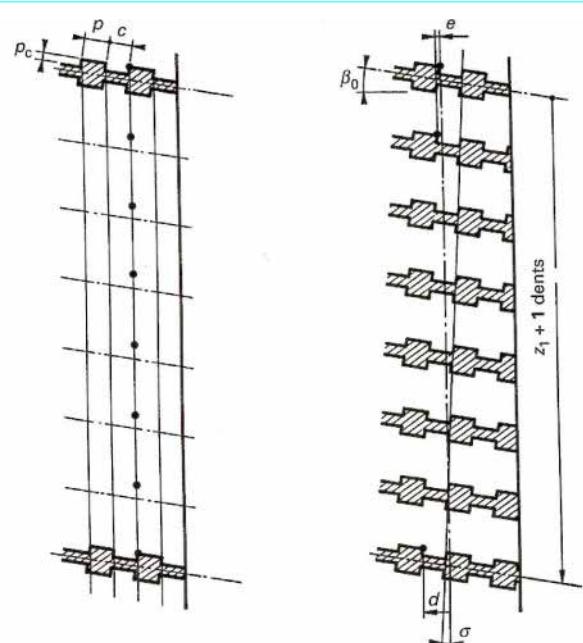


Figure 31 – Schéma de coupe d'un outil de rasage



(a) distribution concentrique après un tour $z_1 + 1$: l'arête coupante reste toujours dans le même plan
 c creux de mortaise σ angle d'hélice de distribution de mortaisage
 p plat de mortaise e décalage dent à dent de l'outil
 p_c profondeur de mortaise d décalage ou avance après 1 tour complet de la roue rasée soit $z_1 + 1$

Figure 32 – Lois de mortaisage de l'outil

3. Matériaux de coupe

Pour plus de détails, le lecteur intéressé pourra se reporter utilement à l'article spécialisé *Matériaux pour outils de coupe* [BM 7 080] dans ce traité.

Compte tenu de leur géométrie particulière, de la précision dans la réalisation et des conditions d'emploi, les outils de taillage sont réalisés en aciers rapides. Travaillant souvent sous fortes températures provoquées par la formation complexe des copeaux d'usinage, ils conservent leurs propriétés, en particulier leur dureté à 63-67 HRc.

Contrairement à ce qui se passe pour les autres outils, les carbures sont peu utilisés dans ces techniques. Des essais ont été tentés mais se sont souvent soldés par des échecs, dus principalement au travail en discontinu, et surtout aux chocs thermiques qui se produisent dans l'usinage des aciers. Par contre, des postes de taillage d'engrenages en fonte ont pu être équipés avec succès.

Le choix des nuances d'acier rapide dépend des propriétés recherchées pour la réalisation et des conditions auxquelles l'outil sera soumis (usinabilité, déformations contrôlées, ténacité, résistance à l'usure, etc.). Au cours de cette dernière décennie, on a développé, sur ces matériaux, les revêtements de surface mono- et multicouches, comme les dépôts PVD (exemple, TiN). Les performances obtenues ont pu remettre en cause le matériau de base, ainsi que les caractéristiques de coupe de l'outil. Ces revêtements sont très répandus pour les fraises-mères, mais peu pour les outils de rasage.

■ Acier Z85WDCV (M2)

C'est l'acier de base pour tous les outils de taillage. Il peut être à nuance resulfurée pour améliorer les états de surface des flancs détalonnés à l'outil et à déformations contrôlées pour les dents terminées avant trempe.

■ Acier Z85WDKCV (M35)

Il est très utilisé pour les fraises-mères à lames, les outils-pignons et les outils de rasage.

■ Acier Z85WDKCV (M35c)

Identique au précédent, mais avec une teneur en carbone plus élevée, 1,10 au lieu de 0,90.

■ Acier Z110WKCDV (M41)

Très carburé, on l'utilise pour les fraises-disques et pour les outils-pignons taillant des aciers à haute résistance.

■ Aciers frittés

Obtenus par la métallurgie des poudres, leur emploi se développe. Ils présentent des structures uniformes avec de très bonnes répartitions des éléments et les procédés d'élaboration éliminent la présence des carrés de ségrégation. Pour de grandes dimensions d'outils et pour réduire le coût de la matière, ce procédé permet également de constituer un agglomérat fritté, dont la partie coupante est en acier rapide, le reste en acier de construction (application sur outil-pignon). La gamme utilisée comprend :

- ASP23 ; c'est le plus employé, principalement sur outil-pignon ;
- ASP30 et 60 ; ces séries sont très carburées (C, V, et Co). Leur emploi est encore peu répandu et fait l'objet de mises au point pratiques.

4. Conditions de coupe

Les conditions de coupe sont souvent optimisées, surtout en moyenne et grande série. Les entreprises ne disposant pas d'un échelon technique spécialisé ont recours aux recommandations fournies par les constructeurs d'outils et de machines. Dans certains cas de gros investissements, les constructeurs peuvent mettre à disposition des moyens « clés en main ».

L'introduction des nouvelles générations d'outil issues des études CAO et utilisant les nouveaux matériaux de coupe revêtus a remis en cause soit les performances d'outils, soit leurs conditions d'emploi. Ainsi :

— aux conditions de base, les performances d'outil ont pu être multipliées par 4 à 8 fois pour la fraise-mère et 3 à 4 fois pour l'outil-pignon ;

— inversement, en conservant des performances d'outil identiques, ce sont les vitesses qui ont pu être multipliées par 1,5 à 3 fois.

Très souvent, l'introduction de ces outils a permis d'obtenir un gain sur les vitesses et les performances en retenant un compromis de deux.

À titre d'information, nous donnons également sous forme de tableau les conditions générales et résultats obtenus pour les trois familles d'outil sur des postes type boîtes de vitesses automobile en fabrication grande série ; les cas cités ne le sont qu'avec des fraises-mères et outils-pignons revêtus PVD (TiN).

Nous reproduisons également ci-après des extraits de tableaux issus des publications Machining Data Handbook avec l'autorisation de *The Institute of Advanced Manufacturing Sciences* [2] ; il s'agit de recommandations très générales pour des outils non revêtus PVD qui constituent une base de référence qu'il faudra ensuite adapter cas par cas (tableaux 1, 2 et 3).

Tableau 1 – Conditions de coupe pour taillage à la fraise-mère [2]

	Matériau à usiner	Module (mm)	Vitesse (1) (m/min)	Avance (2) (mm/tr)
Aciers alliés à moyen carbone (1)	600 < R ≤ 800 MPa	25,4 à 6,35	37	1,5
		5,08 à 2,54	41	1,5
		2,309 à 1,337	44	1,3
		> 1,337	49	1,3
	800 < R ≤ 950 MPa	25,4 à 6,35	30	1,5
		5,08 à 2,54	34	1,3
		2,309 à 1,337	37	1,3
		> 1,337	43	1,3
	950 < R ≤ 1 100 MPa	25,4 à 6,35	26	1,1
		5,08 à 2,54	29	1,1
Fontes	150 < Δ ≤ 190 HB	2,309 à 1,337	32	1,1
		> 1,337	33	1,1
	190 < Δ ≤ 220 HB	25,4 à 6,35	30	1,6
		5,08 à 2,54	33	1,3
		2,309 à 1,337	39	0,8
		> 1,337	41	0,4
		25,4 à 6,35	23	1,6
		5,08 à 2,54	26	1,3
		2,309 à 1,337	29	0,8
		> 1,337	33	0,4

R résistance et Δ dureté Brinell.

Le type de taillage est conventionnel pour les modules ≥ 6,35 et avalant pour les autres.

(1) Les vitesses de coupe, valables pour les aciers alliés à moyen carbone doivent être, pour une même résistance, multipliées par 1,1 pour les aciers au carbone à usinabilité améliorée, et par 0,9 pour les aciers à haut carbone.

(2) Bien que le Machining Data Handbook ne le précise pas, ces avances sont valables pour des fraises-mères à un seul filet (des avances plus fortes peuvent être obtenues avec plusieurs filets).

Tableau 2 – Conditions de coupe pour taillage à l'outil-pignon [2]					Tableau 3 – Conditions de coupe pour rasage de denture (1) [2]					
Matériau à usiner	Module (mm)	Vitesse (m/min)	Avance (mm/tr)	Nombre de passes	Matériau à usiner	Module (mm)	Vitesse (m/min)	Avance (mm/tr)		
Aciers alliés à moyen carbone (1)	600 < R ≤ 800 MPa	25,4 à 6,35	20	0,45	3	Aciers alliés à bas ou à haut carbone, alliés ou non	25,4 à 6,35	140	0,30	
		5,08 à 2,54	20	0,30	2		5,08 à 2,54	140	0,20	
		2,309 à 1,337	20	0,25	2		2,309 à 1,337	140	0,13	
		> 1,337	20	0,20	2		> 1,337	140	0,08	
	800 < R ≤ 950 MPa	25,4 à 6,35	15	0,40	3		25,4 à 6,35	115	0,30	
		5,08 à 2,54	15	0,30	2		5,08 à 2,54	115	0,20	
		2,309 à 1,337	15	0,25	2		2,309 à 1,337	115	0,13	
		> 1,337	15	0,20	2		> 1,337	115	0,08	
	950 < R ≤ 1 100 MPa	25,4 à 6,35	14	0,40	3		25,4 à 6,35	100	0,30	
		5,08 à 2,54	14	0,30	2		5,08 à 2,54	100	0,20	
		2,309 à 1,337	14	0,25	2		2,309 à 1,337	100	0,13	
		> 1,337	14	0,20	2		> 1,337	100	0,08	
Fontes	150 < Δ ≤ 190 HB	25,4 à 6,35	26	0,45	3		25,4 à 6,35	90	0,30	
		5,08 à 2,54	26	0,30	2		5,08 à 2,54	90	0,20	
		2,309 à 1,337	26	0,25	2		2,309 à 1,337	90	0,13	
		> 1,337	26	0,20	2		> 1,337	90	0,08	
	190 < Δ ≤ 220 HB	25,4 à 6,35	21	0,45	3		25,4 à 6,35	90	0,30	
		5,08 à 2,54	21	0,30	2		5,08 à 2,54	90	0,20	
		2,309 à 1,337	21	0,25	2		2,309 à 1,337	90	0,13	
		> 1,337	21	0,20	2		> 1,337	90	0,08	
<p>R résistance et Δ dureté Brinell.</p> <p>(1) Les vitesses de coupe valables pour des aciers alliés à moyen carbone sont, pour les mêmes résistances, à multiplier par 1,2 pour les aciers au carbone à usinabilité améliorée ($600 < R \leq 1\ 100 \text{ MPa}$) et par 0,9 pour les aciers alliés à haut carbone.</p>										
<p>R résistance et Δ dureté Brinell.</p> <p>(1) Bien que le Machining Data Handbook ne le précise pas, les conditions de coupe de ce tableau sont valables pour le rasage conventionnel ; les autres procédés (type <i>underpass</i>, <i>diagonal</i>, et <i>plongée</i>) ont des temps plus réduits.</p>										

Fraise-mère

Pièce	Outil			Conditions de coupe		Performances d'outil	
poste/matiériaux	z_1	module (mm)	diamètre (mm)	z_0	vitesse (m/min)	avance (mm/tr)	nombre de pièces taillées entre z affûtages
Pignon arbré (acier 33 CD 4)	11	2,40	90	2 filets	72	1,5	2 000
	22	2,30	90	3 filets	62	2,2	2 500
	31	2,00	109	3 filets	62	3,0	2 500
Pignon monobloc (acier 30 CD 4)	33	2,00			64	2,7	2 200
	39	2,40	109	4 filets	66	3,6	2 400
	39	1,55			73	3,2	1 000
Pignon de pont (acier 27 CD 4R)	17	2,60	109	3 filets	60	3,1	1 600
Couronne de pont (acier 33 CD 4)	57	2,80	109	4 filets	65	3,0	550
	58	2,60			62	2,3	680

Remarques : toutes ces dentures sont hélicoïdales et sont toutes préébauchées à la fraise-mère en mode avalant et terminées par rasage ; les postes cités sont tous équipés de fraise-mère à filets multiples, ce qui confirme bien les évolutions consécutives aux réductions des temps d'usinage.

Outil-pignon									
Pièce			Outil	Conditions de coupe				Performances d'outil	
matériaux	z_1	module (mm)	z_0	vitesse maximale (m/min)		avance (mm/coup)		nombre de pièces taillées entre z affûtages	
				ébauche	finition	plongée	génération éb./finit.		
Pignon arbré (acier 33 CD 4)	11 19	2,40 2,10	85 82	40 47	62 70	0,03 0,03	1,65/0,40 2,60/1,30	1 000 700	
Pignon monobloc (acier 30 CD 4)	29	2,00	80	40	60	0,03	2,40/1,20	400	
Pignon de pont (acier 30 CD 4)	15	2,60	43	52	80	0,04	1,70/0,80	350	

Remarque : le premier poste est à denture droite, les autres à denture hélicoïdale. Tous ces postes sont également terminés par rasage. Dans les cas cités, la pénétration de l'outil-pignon s'effectue en continu (cycle dit *en spirale*).

Outil de rasage (pour méthodes en plongée)										
Pièce			Vitesse de coupe périphérique	Temps copeaux	Pièce				Vitesse de coupe périphérique	Temps copeaux
poste	z_1	module (mm)	(m/min)	(min)	poste	z_1	module (mm)	(m/min)	(min)	
pignon arbré	11 à 17 18 à 38	2,50 à 2,20 2,45 à 1,55	70 à 110 115 à 145	0,25 à 0,40	pignon de pont	15 à 17	2,80 à 2,60	100 à 115	≈ 0,45	
pignon monobloc	27 à 39	2,45 à 1,55	90 à 240	0,16 à 0,35	couronne de pont	56 à 61	2,80 à 2,60	200 à 280	≈ 0,85	

Remarques : les outils utilisés pour ces postes ont un diamètre d'environ 200 mm. Les gammes de vitesse sont très étendues : plus faibles avec un petit nombre de dents à raser, fortes avec un plus grand nombre donc un grand diamètre de roue. Les vitesses retenues et les temps copeaux obtenus concernent des pièces préalablement préébauchées aux conditions citées dans les deux tableaux précédents.

Références bibliographiques

- [1] HENRIOT (G.). – *Traité théorique et pratique des engrenages*. Tome 1 et 2, Bordas-Dunod (1983).
- [2] Machining Data Handbook. 3^e éd., Institute of Advanced Manufacturing Sciences Inc., Cincinnati, Ohio (USA) (1980).