

Outils coupants

Taillage des roues coniques

par **Claude BELLAIS**

Ancien Chef de section Méthodes de Renault SA

1. Outils pour le taillage des dentures droites	B 7 098 - 2
1.1 Taillage par génération.....	— 2
1.1.1 Outil droit	— 2
1.1.2 Fraise-disque.....	— 2
1.2 Taillage par reproduction : fraise <i>Revacycle</i> (Gleason)	— 2
2. Outils pour le taillage des dentures spirales	— 3
2.1 Fraises pour cycle avec division intermittente.....	— 3
2.2 Fraises pour cycle avec division et génération continues.....	— 4
2.2.1 Fraise-tourteau.....	— 5
2.2.2 Fraise-mère monobloc conique.....	— 6
3. Matériaux de coupe	— 7
4. Conditions de coupe	— 7

La grande utilisation des couples coniques se concentre principalement dans les secteurs de la mécanique générale, des poids lourds ou de l'aviation. En revanche, l'évolution dans l'automobile vers des solutions traction avant/moteur en travers a fait régresser leur utilisation dans ce domaine utilisateur des techniques et moyens de grande production.

Le lecteur intéressé par un développement de la partie théorique et l'étude des procédés pourra se reporter aux articles **Engrenages** dans le présent traité et auprès des sociétés Gleason et Klingelnberg-Oerlikon qui ont fourni les différents documents référencés et apporté leur collaboration à la rédaction de cet article.

1. Outils pour le taillage des dentures droites

Le **taillage avec gabarit** (figure 1) reste le procédé le plus simple pour obtenir une denture conique droite mais il n'est pratiquement plus utilisé sauf pour des cas spéciaux de grandes dimensions.

1.1 Taillage par génération

1.1.1 Outil droit

Le montage comporte deux outils symétriques animés d'un mouvement de coupe rectiligne alterné. Chaque outil est à tranchant unique usinant un flanc de dent pleine. Un second mouvement est nécessaire pour générer toute la hauteur des flancs : phases *a* vers *b* puis *c* de la figure 2. L'équipement peut comporter :

- des outils d'ébauche ; dans ce cas, le taillage est réalisé sans génération par simple plongée jusqu'au fond de dent ;
- des outils de finition ;
- des outils effectuant ébauche et finition dans un même cycle (Completing, § 2).

1.1.2 Fraise-disque

Deux fraises de grand diamètre (monoblocs ou à lames rapportées) s'imbriquant l'une dans l'autre sont placées dans l'entredit de la denture à réaliser (figure 3). N'ayant aucun mouvement de déplacement, elles doivent couvrir toute la largeur de denture, ce qui limite leur emploi à des pignons coniques de plus faible dimension. Par contre, le mouvement de génération subsiste, les fraises ayant ici remplacé les outils droits représentés sur la figure 2.

En denture théorique, l'arête active est confondue ou parallèle avec la face d'appui de la fraise (figure 3a). Pour obtenir un léger bombé longitudinal, il suffit que cette arête soit disposée suivant une surface conique creuse d'inclinaison intérieure μ (figure 3b).

Le détail d'une dent de fraise monobloc est représenté sur la figure 4, l'angle μ ayant pour valeur $1^{\circ}28'$. Le profil comprenant les arêtes actives est détalonné en hélice et seule la face de coupe A_γ est reprise à l'affûtage suivant un angle de coupe γ_p positif. Au cours de cette dernière opération, on doit veiller à ce que l'arête active principale soit alignée dans l'axe de la fraise.

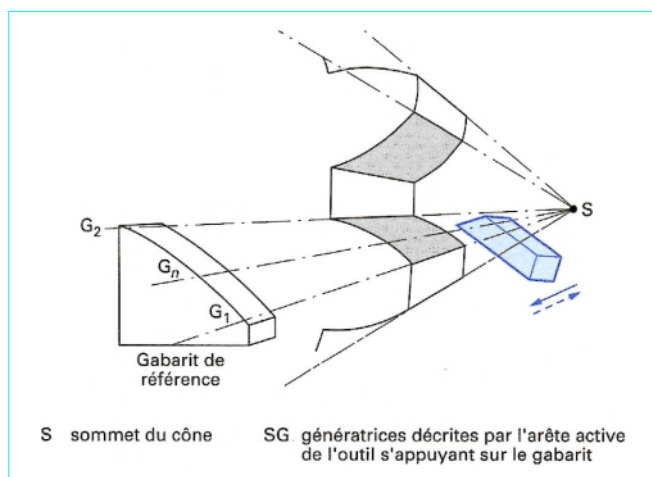


Figure 1 – Taillage avec gabarit : schéma de principe

1.2 Taillage par reproduction : fraise Revacycle (Gleason)

Ce procédé a surtout été développé pour la grande série dans l'automobile, son principal avantage restant ses performances de productivité, environ 2 à 3 s pour tailler un creux de dent. Mais son utilisation reste limitée aux pignons coniques de très faibles dimensions comme les pignons de différentiel. La fraise Revacycle est une fraise de grand diamètre (≈ 600 mm), travaillant à la façon d'une broche circulaire (figure 5). Une succession de secteurs dentés et profilés sont disposés sur la périphérie du corps de fraise et vont venir usiner progressivement tout le creux d'une dent.

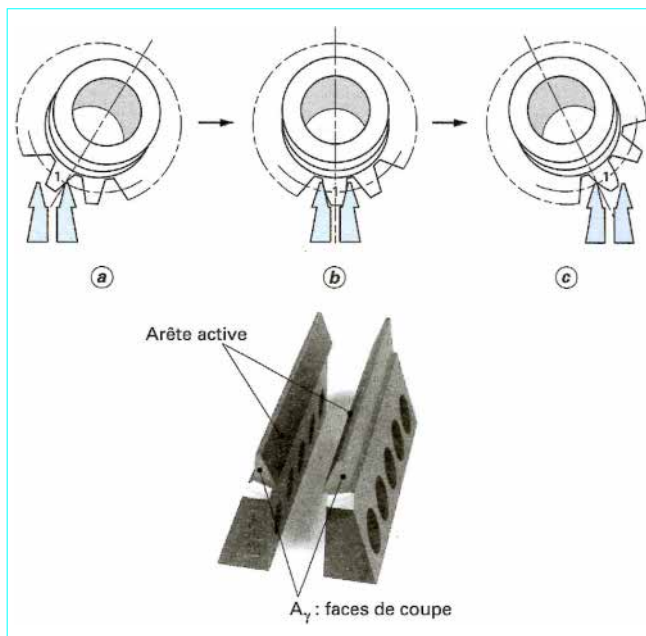


Figure 2 – Phases de finition par génération d'une dent de roue conique

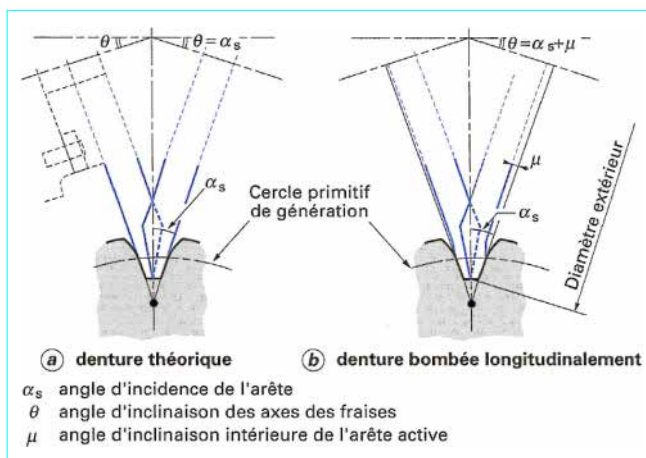


Figure 3 – Taillage par deux fraises-disques d'une roue conique à denture droite

Le cycle s'effectue sur un tour complet de la fraise : d'abord une première zone d'ébauche à partir de M_1 , puis de demi-finition jusqu'à M_2 . Ensuite, on peut trouver un outil effectuant l'ébavurage avant la zone de finition jusqu'à M_3 M_4 . La rotation de la fraise étant ininterrompue, la division rapide de la pièce (passage à la dent suivante) s'effectue dans la zone M_4 M_1 dégagée à cet effet, puis l'ébauche de la dent suivante reprend en M_1 . Les arêtes actives sont profilées suivant des arcs de cercle.

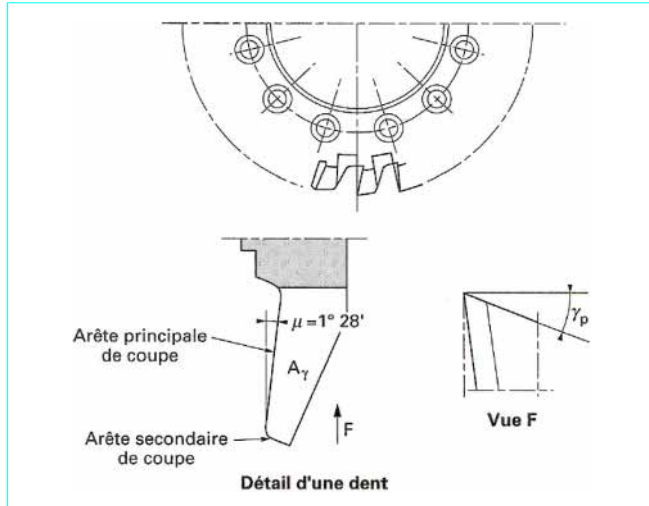


Figure 4 – Fraise-disque de grand diamètre pour taillage de roues coniques droites par génération (doc. Gleason)

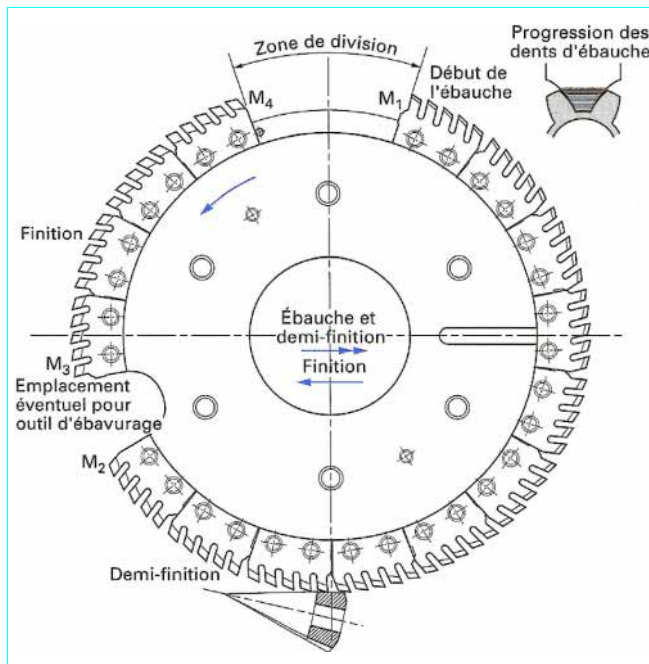


Figure 5 – Fraise Revacycle (doc. Gleason)

2. Outils pour le taillage des dentures spirales

L'arrivée des machines à commande numérique multi-axes a fait évoluer les procédés. Désormais, le taillage s'effectue en cycle unique [Completing], plus rarement en opérations décomposées d'ébauche puis de finition, sauf pour des secteurs comme l'aviation.

Dans ce type de denture, on trouve deux grandes familles d'outils :

- **les fraises monoblocs ou à lames rapportées** taillant complètement une dent avant de s'effacer pour permettre la division. Nous désignerons cette famille d'outils par *fraises pour cycle avec division intermittente*. Généralement, couronne et pignon formant un couple sont exécutés avec génération mais, en grande série, la couronne peut être réalisée sans génération ;

- **les fraises-tourteaux à lames rapportées** disposées par secteur, chacun pénétrant successivement dans un creux de dent suivant un mouvement continu de génération et de division. Cette seconde famille d'outils sera désignée par *fraises pour cycle avec division et génération continues*.

2.1 Fraises pour cycle avec division intermittente

Suivant que l'arête active est extérieure, intérieure ou alternée (figure 6) seront usinés respectivement les flancs concave, convexe ou les deux flancs en simultané.

D'origine, les fraises étaient monoblocs ; elles sont désormais souvent remplacées par des corps recevant toute une gamme de lames avec des modes de fixation particuliers à chaque type de corps.

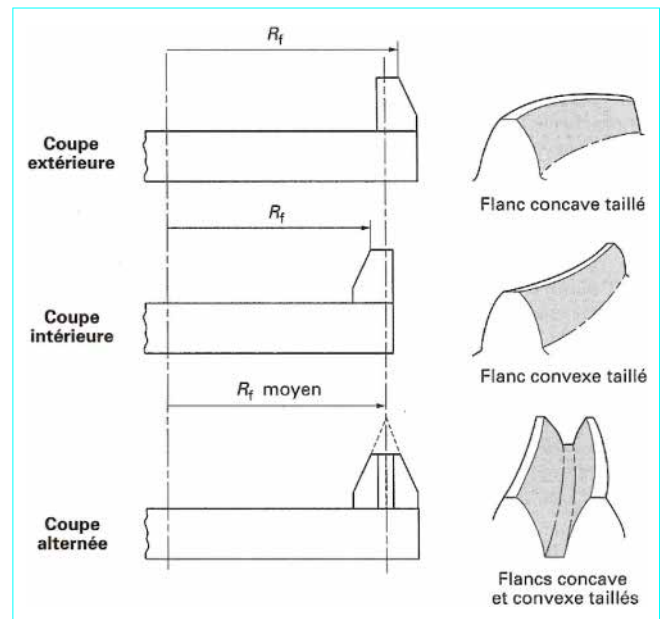


Figure 6 – Différents types de fraise avec division intermittente

La figure 7a montre une fraise monobloc à coupe alternée. Les dents de fraise sont ici régulièrement réparties sans interruption, la pièce ou la fraise devra donc s'effacer pour permettre la division.

En grande série et avec un rapport roue-pignon important, la société Gleason a développé le *procédé Formate* sans génération s'apparentant au brochage et à rotation continue de la fraise (figure 7b). Elle est aussi à denture alternée avec une zone de demi-finition : dents 1 à 8 dont les arêtes 1, 3, 5 et 7 sont progressivement rapprochées du centre pour usiner le flanc convexe ; inversement, les arêtes 2, 4, 6 et 8 sont éloignées de ce même centre pour usiner le flanc concave. Les dents 9, 11 et 12 sont supprimées pour permettre aux dents 10 et 13 de finir seules chacun des flancs. Comme pour la fraise *Revacycle* (§ 1.2), un espace est neutralisé entre les dents 13 et 1 pour que s'effectue la division de la pièce.

La progression de chaque arête est prévue pour enlever un copeau de 0,02 à 0,10 mm d'épaisseur en demi-finition et 0,02 à 0,03 mm en finition. Ce procédé est très rapide puisqu'il permet de réduire de 4 à 5 fois le temps d'usinage par rapport à une fraise standard (où pièce et fraise doivent s'effacer pour effectuer la division).

Exemple : pour mémoire, citons la méthode *Cyclax* de la société Gleason qui est une variante, où l'ébauche et la finition sont réalisées en une seule opération, mais désormais peu utilisée.

En ce qui concerne les caractéristiques, les fraises monoblocs sont à diamètre fixe, celui des fraises à lames rapportées peut varier par l'intermédiaire de jeux de cales de réglage et ainsi conférer une plus grande souplesse d'utilisation. Le choix du diamètre dépend de la génération primitive, de la largeur de denture, du module et de l'angle de spirale.

Lors du taillage, les surfaces génératrices sont les cônes enveloppés par les arêtes actives. Les dents (ou lames) (figure 8) sont généralement détalonnées à profil constant (suivant l'angle α_{te}), tel que tous les points A restent à égale distance de l'axe de la fraise :

$O_1 A_1 = O_2 A_2 \dots$ L'affûtage s'effectue sur la face de coupe A_y en s'assurant que l'arête $A_1 B_1$ soit rectiligne et passe par l'axe de la fraise. Pour satisfaire cette condition, quand les angles de coupe γ_p et γ_f deviennent positifs, on doit avoir :

$$\tan \gamma_p = \cotan K_r \sin \gamma_f$$

avec : $K_r = \frac{\pi}{2} - \alpha_s$

Exemple : avec les valeurs pratiques portées sur la figure 7, on obtient :

$$\tan \gamma_p = \cotan 71^\circ \sin 24^\circ 15' \quad \text{soit } \gamma_p = 8^\circ 8'$$

En pratique, Gleason vise $\gamma_f \approx 20^\circ$. Les dépouilles orthogonales sont d'environ 3° .

La figure 9 reproduit une vue globale de deux types de fraises à lames rapportées couramment utilisés par Gleason :

- Ridg-Ac conçue pour l'ébauche ;
- Hardac III permettant le taillage de la roue et du pignon en une seule opération d'ébauche et finition.

2.2 Fraises pour cycle avec division et génération continues

Dans ce procédé où l'outil et la roue sont en rotation continue, on trouve deux grandes familles d'outils :

- la fraise-tourteau avec répartition des arêtes actives par secteur et par flanc ;
- la fraise-mère monobloc conique.

Le premier type a été développé à l'origine par la société Oerlinkon et reste le plus utilisé par rapport au second mis au point par la société Klingelnberg.

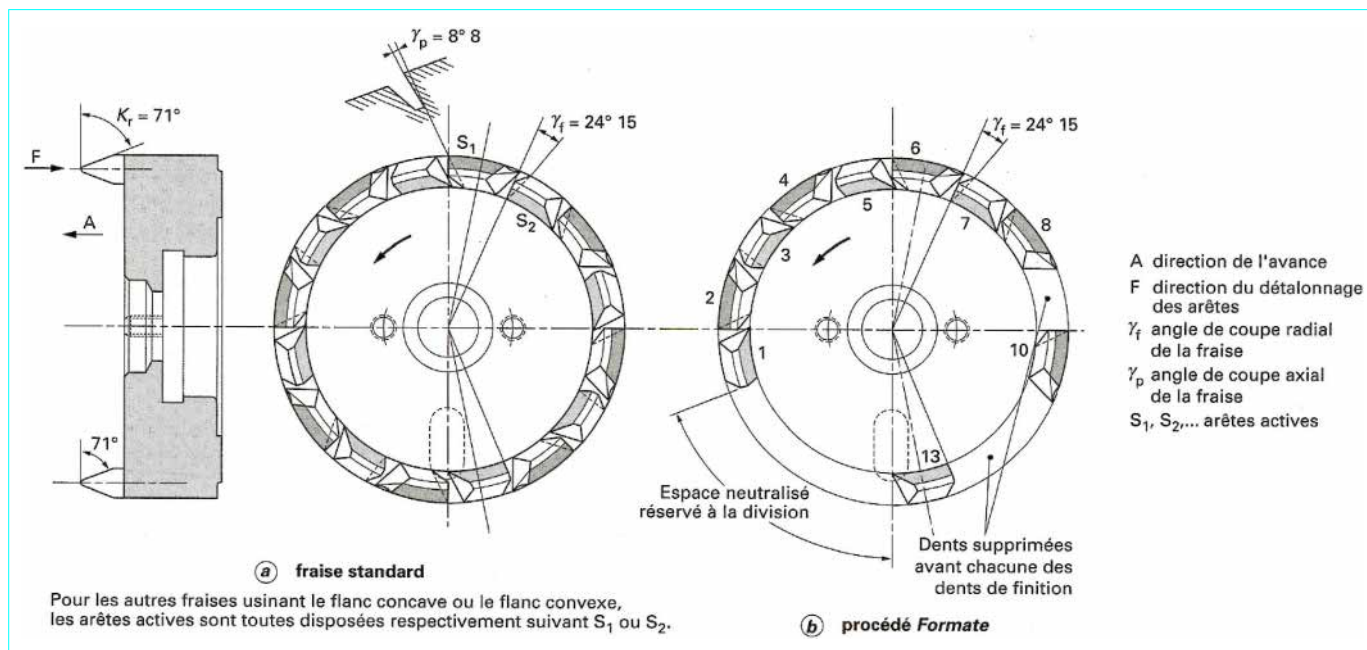


Figure 7 - Fraises monoblocs Gleason à denture alternée

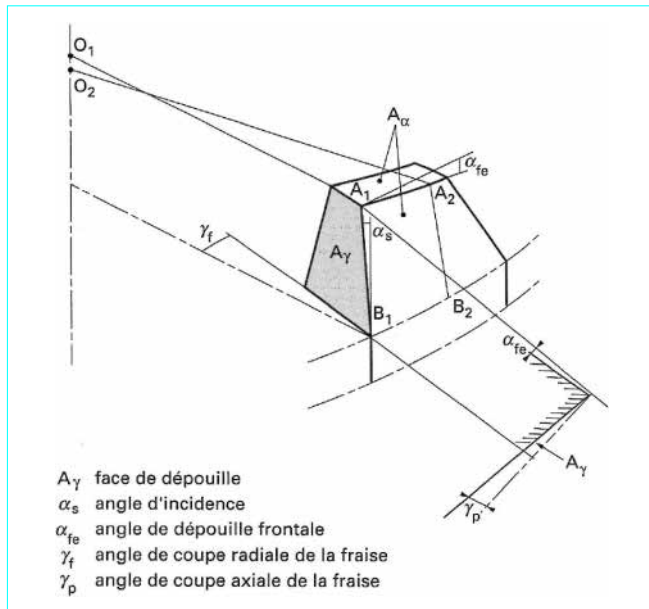


Figure 8 – Détail d'une dent de fraise à coupe extérieure (usinage du flanc concave)

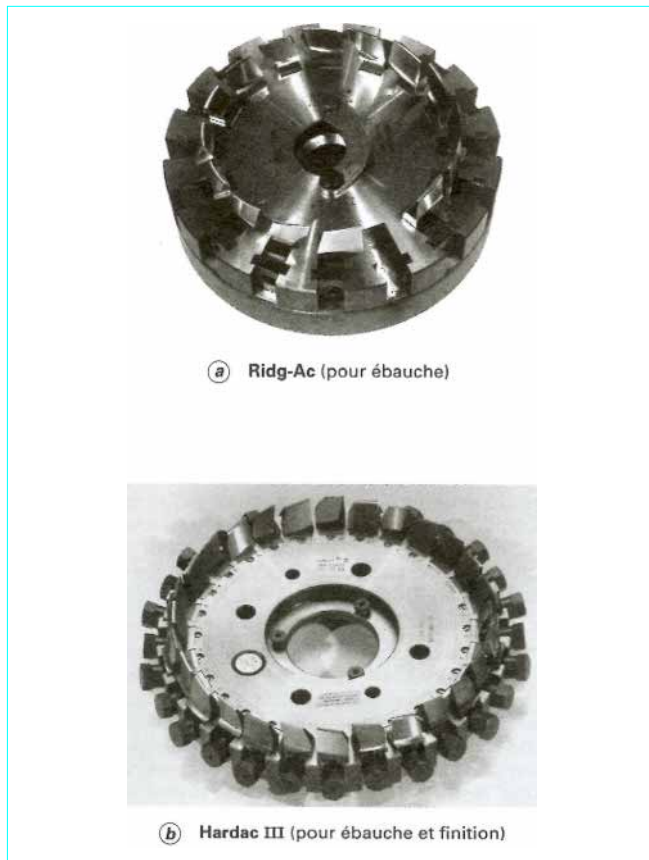


Figure 9 – Fraises Gleason à lames rapportées

2.2.1 Fraise-tourteau

La figure 10a illustre le principe général de génération et division continues avec ici trois groupes d'outils générateurs tels que le groupe 1 qui va tailler le creux de la dent 1, le groupe 2 la dent 2, le groupe 3 la dent 3, le groupe 1 la dent 4, et ainsi de suite.

Chaque groupe comporte deux outils dont l'un (indice e) exécute le flanc convexe, l'autre (indice a) le flanc concave. Chaque point de l'arête active décrit une courbe C_{1e} , C_{1a} , C_{2e} ... de forme épicycloïdale allongée, matérialisant la roue plate fictive génératrice (figure 10b). Si Z_p représente le nombre de dents imaginaire de cette roue, on a la relation : $Z_p = \sqrt{Z_1^2 + Z_2^2}$.

Le sens attribué aux arêtes actives n'est donné qu'à titre indicatif dans la figure 10a, il peut être inversé pour évacuer la bavure de taillage vers l'extérieur et faciliter son élimination.

La fraise comporte un certain nombre Z_f de groupes d'outils (dans la figure 10a, $Z_f = 3$). Les arêtes actives de tous ces outils sont toutes situées à égale distance du centre O, soit R_f rayon primitif.

Sur la figure 10a, si l'outil 1e est en P_1 dans le creux de dent 1, l'outil 2e sera en P_2 dans le creux de dent 2 après une certaine rotation de la fraise égale à $2\pi/Z_f$; cette valeur représente donc l'écartement angulaire de deux outils successifs usinant les mêmes flancs concave ou convexe se succédant. L'écartement angulaire de deux outils successifs du même groupe, par exemple 1e1a, sera égal à π/Z_f , soit 60° dans l'exemple retenu. Pour obtenir une meilleure localisation de portée, on peut soit faire varier légèrement ces valeurs tout en respectant le rayon primitif R_f , soit excentrer ce même rayon.

Pour éviter les erreurs de division périodiques, le nombre de dents Z de la roue ou du pignon ne doit pas être un multiple de Z_f , nombre de groupes d'outils.

On peut également, sur un même tourteau et pour une même opération, grouper outils d'ébauche et de finition. Dans ce cas, on trouve trois outils par groupe : l'outil supplémentaire d'ébauche placé en avant des outils usinant les flancs à une distance R_f plus grande que le rayon primitif de base.

La société Gleason a développé une fraise-tourteau TRI-AC équipée de lames pouvant chacune usiner le flanc et une partie du fond sans avoir recours à une lame d'ébauche intercalée (figure 11). Cette lame est profilée, dépouillée de a en b pour accepter un enlèvement de matière de a' à b'. Avec la seule face de coupe A_γ , la partie comprise entre c et a' serait complètement en contre-coupe mais, grâce à la rainure longitudinale spécialement aménagée, on obtient dans cette partie une seconde face de coupe A'_γ en fond de rainure non négative. Cette rainure a aussi comme avantage de faire office de brise-copeau en évitant la formation d'un copeau à trois branches très préjudiciable à la tenue de l'arête et au rendement général. La face de coupe A_γ et la rainure peuvent être revêtues par PVD (TIN), la remise en état se faisant par reprofilage de la partie ab.

La figure 12 montre une fraise-tourteau Oerlinkon où les lames peuvent être réglées individuellement dans les deux directions : axiale ou radiale. La remise en état s'effectue par profilage en bout, plus rarement sur la face de coupe.

Klingelnberg utilise aussi une fraise-tourteau avec des groupes de deux lames accouplées sur le corps, chaque élément usinant l'un le flanc concave, l'autre le flanc convexe. La figure 13 représente une tête universelle Klingelnberg complète pour roue et pignon avec $Z_f = 5$ groupes de lames. Ces têtes, contrairement aux lames, ne sont pas dépendantes du sens de la spirale. Les lames elles-mêmes peuvent être utilisées pour toute une gamme de modules ; en outre, elles peuvent être retenues pour le taillage de la roue et du pignon en adaptant après réglages le corps et les lames sans qu'il soit nécessaire de recourir à des lames spéciales. La remise en état s'effectue sur la face de coupe, ce qui permet l'utilisation d'outils revêtus (TIN).

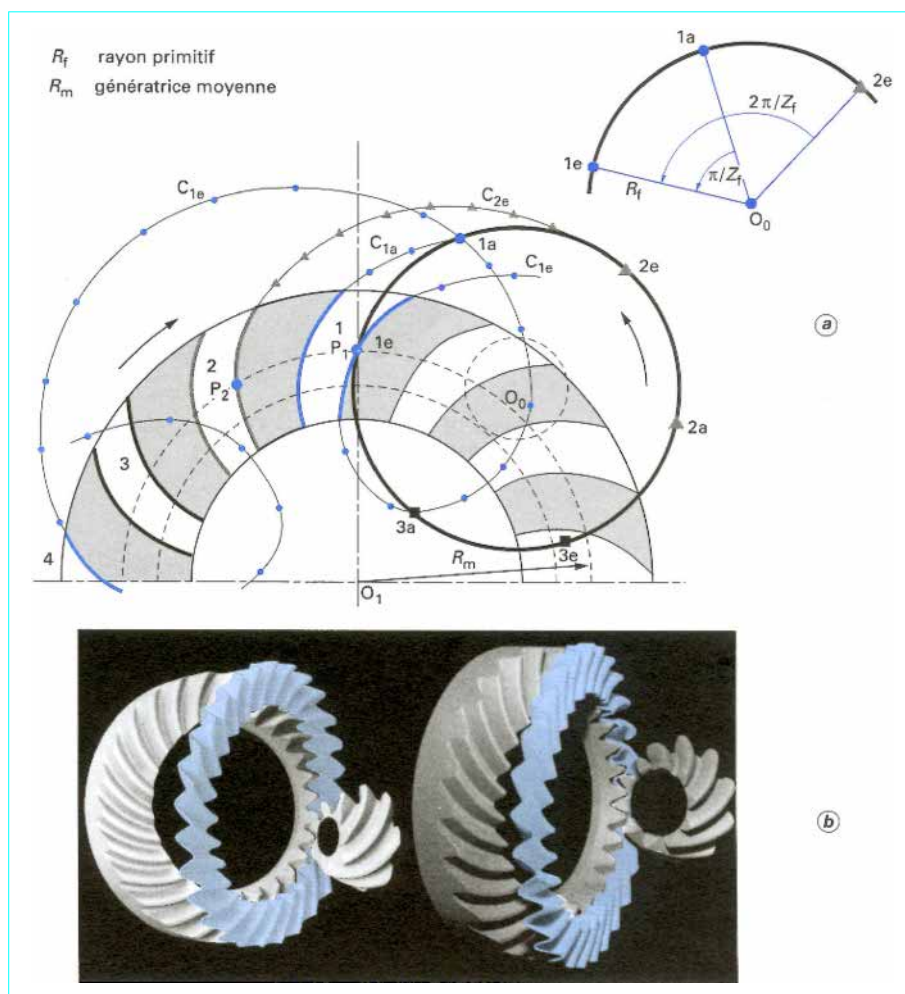


Figure 10 – Principe de génération et de division continues

Le profilage des lames est soumis à une opération de rectification de grande précision. Avec la CAO, on peut désormais définir ce profil dans le cadre du calcul général du couple conique. Dans le processus CDS (*Controlled Disk System*) mis au point par Oerlinkon, les données sont transmises directement à une rectifieuse automatique de profilage à commande numérique.

■ L'arrivée des machines à commande numérique et le développement de nouveaux matériaux de coupe (carbures, nitrures de bore, etc.) ont permis de terminer des roues cémentées et trempées à des duretés de 58-60 HRC.

● **Fraise de finition TAN-TRU (Gleason)** : des pastilles en carbure sont rapportées sur des lames conventionnelles équipant des tourteaux standards. La denture est préalablement préachèvement avant trempe, avec protubérance et surépaisseur d'environ 0,25 mm à reprendre par flanc.

Exemple d'un poste équipé :

pièce	diamètre : 746,64 mm, largeur de denture : 127 mm, module : 14,51 mm, hauteur totale de dent : 33,26 mm et rapport d'engrenage : 18 x 51
outil	fraise de diamètre : 640 mm, nombre d'arêtes par flanc : 4 et vitesse de coupe : 37 m/min
résultats	rugosité moyenne obtenue : 0,4 à 0,8 μm en R_a et 1 à 2 μm en R_t .

● Fraise de finition Klingenberg

— **Procédé HPG*** : les porte-plaquettes sont équipés de pastilles en carbure interchangeables, l'ensemble est monté sur le corps de fraise par l'intermédiaire d'un support de blocage. Ce procédé peut accepter des roues pouvant aller jusqu'à 2 000 mm de diamètre, des modules de 8 à 35 mm, des vitesses de coupe de 40 à 50 m/min et des surépaisseurs de 0,05 à 0,10 mm par passe, pour obtenir un état de surface de $R_t \leq 4 \mu\text{m}$.

— **Procédé HPG-S*** : le matériau de coupe utilisé est du nitrure de bore polycristallin cubique rapporté sur un support en carbure. Ce procédé est adapté pour des roues de dimensions inférieures au précédent en diamètre et module (module de 1 à 15,5 mm). L'emploi de ce matériau permet de réduire le nombre de passes à environ 2, de retenir une vitesse de coupe plus élevée et d'utiliser un lubrifiant. L'état de surface obtenu est $R_t \leq 2 \mu\text{m}$.

*HPG : High Power Gear.

2.2.2 Fraise-mère monobloc conique

C'est un outil très différent de ceux précités. Par contre, la méthode de taillage est comparable, la génération étant toujours réalisée à partir de la roue plate fictive. Z_f représente non plus le nombre de groupes mais le nombre de filets de la fraise-mère. Dans ce procédé continu, la fraise effectue un déplacement tangentiel, ce qui nécessite une correction complémentaire de la rotation de la pièce dans la liaison cinématique.

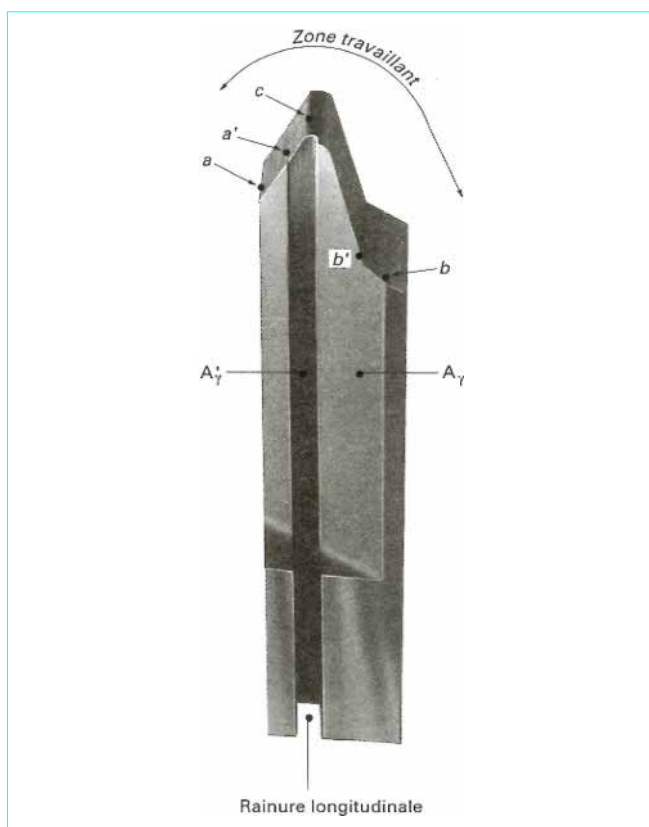


Figure 11 – Lame de fraise TRI-AC Gleason



Figure 12 – Fraise Oelinkon à lames réglables axialement ou radialement

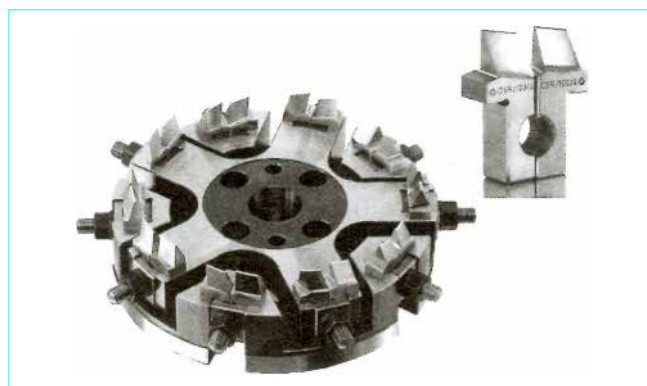


Figure 13 – Fraise Klingelnberg comportant 5 groupes de lames avec le détail d'un élément de groupe

3. Matériaux de coupe

Comme pour les roues cylindriques, les outils coupants pour le taillage des roues coniques font largement appel aux aciers rapides type M2. Le développement des équipements à lames rapportées a permis l'introduction d'aciers rapides surcarburetés dont les aciers frittés ASP 23, ASP 30 avec des possibilités de revêtement par PVD (TiN). L'emploi des carbures et du nitrure de bore reste limité aux postes de finition après trempe.

Nota : pour plus de détails, le lecteur intéressé pourra se reporter aux articles *Outils coupants. Taillage des roues cylindriques* [B 7 097] et *Matériaux pour outils de coupe* [BM 7 080] dans ce traité.

4. Conditions de coupe

L'introduction des nouveaux matériaux d'outils revêtus (TiN) utilisés sur les machines standards a surtout privilégié les performances : usure moindre pour un plus grand nombre de pièces usinées entre affûtages. Par contre, l'arrivée des machines à commande numérique avec des possibilités d'emploi beaucoup plus étendues a permis d'utiliser ces mêmes outils revêtus dans des conditions plus sévères et d'abaisser notablement les temps de taillage.

Le type de matériel retenu en taillage conique est très spécifique ; aussi chaque constructeur fournit cas par cas des abaques et même des logiciels permettant à l'utilisateur de choisir les conditions d'emploi optimales, sans qu'il soit fait appel à des recherches particulières de mise au point.

À titre indicatif, nous reproduisons ci-après quelques tendances très générales extraites des recommandations Gleason.

Taillage conique droit									
	Matière taillée Acier <i>R</i> (MPa)	Vitesse de coupe maximale (1) (m/min)	Avance/coup (2) (mm)						
Outil droit à mouvement alternatif	500 < <i>R</i> ≤ 600	50 à 40	0,100 à 0,180						
	600 < <i>R</i> ≤ 800	44 à 36	0,080 à 0,150						
	800 < <i>R</i> ≤ 950	40 à 32	0,070 à 0,130						
	950 < <i>R</i> ≤ 1 100	32 à 20	0,065 à 0,115						
	Matière taillée Acier <i>R</i> (MPa)	Vitesse de coupe (m/min)	Temps (s) pour tailler un creux de dent complet module (mm)						
			1,411	2,116	2,540	3,175	4,233	6,350	
Fraise- disque	500 < <i>R</i> ≤ 600	56 à 46	}	5,5	5,5	5,5	6,5	9,3	13,0
	600 < <i>R</i> ≤ 750	46 à 41		5,3	5,3	7,5	10,7	12,8	19,2
	750 < <i>R</i> ≤ 950	41 à 35			7,5	10,7	12,8	19,2	
	950 < <i>R</i> ≤ 1 100	40 à 30			7,4	9,9	12,4	17,3	24,7
	Matière taillée Acier <i>R</i> (MPa)	Vitesse de coupe (m/min)	Temps moyen pour tailler un creux de dent complet : de 1,6 à 3,1 s suivant le diamètre de fraise.						
Fraise Revacycle	400 < <i>R</i> ≤ 500	49							
	500 < <i>R</i> ≤ 700	42							
	700 < <i>R</i> ≤ 880	38							

(1) Vitesse de finition ou d'ébauche/finition dans un même cycle (*Completing*)

(2) Avances progressives pour un module d'environ 1,50 mm à environ 6,35 mm.

Nota : conditions pour une fraise à 24 dents pour un module ≤ 6,50 mm et une longueur taillée ≤ 28,5 mm.

Au-delà, Gleason préconise une fraise à 16 dents.

Taillage spiro-conique				
Matière taillée Acier <i>R</i> (MPa)	Vitesse de coupe (m/min)		Avance par arête (mm)	
	(1)	(2)	triplex (3)	alternée (4)
500 < <i>R</i> ≤ 600	46 à 38	100 à 50	0,180 à 0,250	0,120 à 0,190
600 < <i>R</i> ≤ 700	37 à 33	90 à 45	0,150 à 0,180	0,060 à 0,110
700 < <i>R</i> ≤ 800	32 à 20	80 à 40	0,080 à 0,150	0,050 à 0,080
(1) Vitesse de coupe pour machine standard. (2) Vitesse de coupe pour machine à commande numérique en passes ébauche finition, séparées ou dans un même cycle (<i>Completing</i>). (3) Soit 1 lame défonceuse et 1 lame pour chacun des deux flancs. (4) 2 lames alternées flanc par flanc.				