

# Taillage et rectification des engrenages : procédés

par **Jean KALETA**

*Ancien enseignant de l'Institut des Engrenages et des Transmissions (IET)  
Responsable Méthodes-Production Hispano-Suiza*

<b>1. Taillage des engrenages cylindriques sans génération.....</b>	<b>BM 7 155 - 2</b>
1.1 Taillage par fraise de forme .....	— 2
1.2 Taillage par fraise-disque à grande productivité .....	— 3
1.3 Taillage par brochage.....	— 3
<b>2. Taillage par génération.....</b>	<b>— 4</b>
2.1 Taillage par outil-crémaillère .....	— 4
2.2 Taillage par fraise-mère .....	— 5
2.3 Taillage par outil-pignon .....	— 9
<b>3. Taillage des engrenages coniques .....</b>	<b>— 11</b>
3.1 Généralités .....	— 11
3.2 Cas des dentures droites .....	— 11
3.3 Cas des dentures hélicoïdales .....	— 13
3.4 Cas des dentures spirales.....	— 13
<b>4. Rectification d'engrenages cylindriques.....</b>	<b>— 17</b>
4.1 Rectification par génération .....	— 17
4.2 Rectification par meule de forme.....	— 19
<b>5. Rectification des engrenages spiraux-coniques .....</b>	<b>— 21</b>
5.1 Généralités .....	— 21
5.2 Principe de la rectifieuse d'engrenages coniques .....	— 22
5.3 Balancier de développante .....	— 22
5.4 Broche porte-pièce .....	— 22
5.5 Diamantage.....	— 23
5.6 Meules utilisées.....	— 23
5.7 Paramètres d'utilisation pour meules céramiques ou à liants en résine artificielle.....	— 23
<b>Pour en savoir plus .....</b>	<b>Doc. BM 7 155</b>

**L**a réalisation d'engrenages est caractérisée par deux grandes fonctions :  
— la **fonction de coupe** pour opérer un enlèvement de matière ;  
— 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.

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.

Cet article est un exposé simplifié, mais permet de prendre connaissance des machines disponibles sur le marché et donne un aperçu des chaînes cinématiques des moyens, à commande numérique.

La liste des équipements évoqués dans ce document est une liste non exhaustive.

Le lecteur qui désire connaître d’une manière plus approfondie les thèmes qui suivent, peut se reporter aux brochures des constructeurs qui figurent dans la partie documentation. Les outils de taillage sont traités dans l’article B 7 097 [2] et on pourra également se reporter aux articles *Machine-outil* [3] [4] et *Brochage* [5].

# 1. Taillage des engrenages cylindriques sans génération

## 1.1 Taillage par fraise de forme

### 1.1.1 Généralités

La figure 1 représente une **fraise-module**. C’est une fraise-disque à profil constant dans tous les plans d’affûtage passant par l’axe.

Il existe une **standardisation** de ces fraises-modules (tableau 1). Une même fraise couvre une plage d’un nombre de dents de l’engrenage à tailler. Les profils de ces dentures sont remplacés par un certain nombre d’arcs de cercle. La figure 2 représente, par exemple, le tracé approché d’une fraise, qui comporte six arcs de cercle.

Les **machines à tailler** sont de simples fraiseuses.

### 1.1.2 Denture droite

Le taillage est, dans ce cas, effectué par simple division de la broche porte-pièce (division suivant le nombre de dents à tailler).

Dans le cas d’une denture droite, le profil est identique à celui de l’entredent de la roue à tailler.

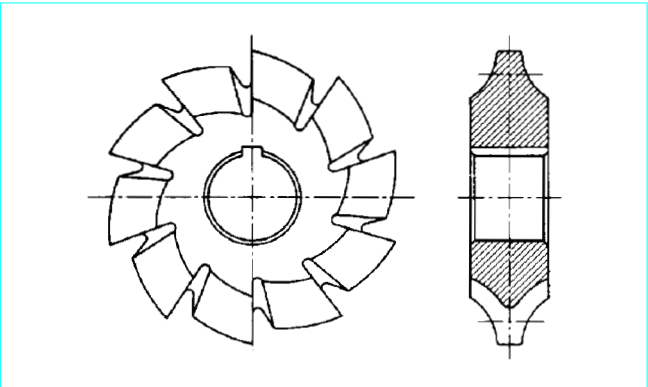


Figure 1 – Fraise-module

Tableau 1 – Fraises-modules standardisées (1)								
Module  (mm)	Alésage							
	22 mm		27 mm		32 mm		40 mm	
	$d_0$ (mm)	$z_0$	$d_0$ (mm)	$z_0$	$d_0$ (mm)	$z_0$	$d_0$ (mm)	$z_0$
1	57	22						
1,25	61	21						
1,50	64	20						
1,75	64	19						
2	67	18	67	18	73	20	83	24
2,25	67	17	67	17	73	19	83	23
2,50			70	16	77	18	86	22
2,75			70	16	77	17	86	21
3			73	15	83	17	92	20
3,25			75	14	83	16	92	19
3,50			77	13	86	15	96	18
3,75			80	12	86	14	96	17
4			80	12	89	14	99	16
4,5			86	11	96	13	105	15
5			86	10	96	12	105	14
5,5			92	9	102	11	111	13
6			96	8	108	10	118	12
6,5			105	8	111	9	121	12
7					115	9	124	11
8					121	8	130	10
9							134	9
10							140	9
11							147	8
12							147	8

(1)  $d_0$  (mm) diamètre extérieur de la fraise,  
 $z_0$  nombre de dents.

### 1.1.3 Denture hélicoïdale

Il suffit pour cette denture de se placer dans un plan réel, par rapport à l’hélice primitive de la pièce. Dans ce cas, un train de roues de rechange assure la conjugaison du déplacement du chariot porte-fraise et la rotation de la broche porte-pièce (engrenage).

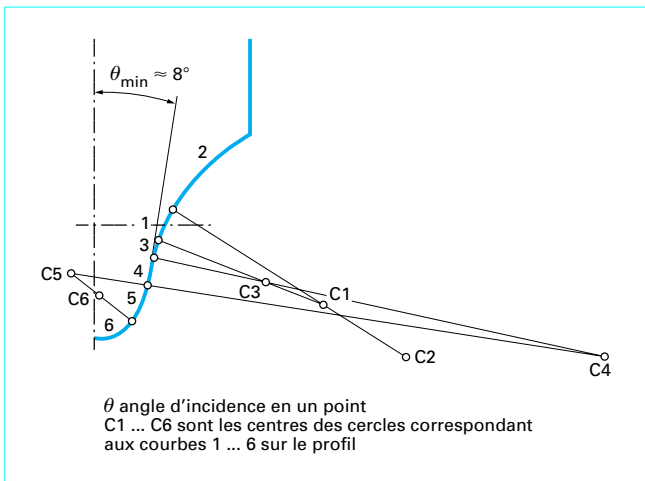


Figure 2 – Fraise n° 8 comportant six arcs de cercle

## 1.2 Taillage par fraise-disque à grande productivité

Les fraises-disques servent surtout à l'**ébauche** et permettent ainsi d'obtenir, par grands enlèvements de copeaux, des profils satisfaisants. Dans certaines applications, la qualité des engrenages est suffisante ; les engrenages tournent, dans ce cas, à des vitesses de rotation très lentes.

La figure 3 représente une portion de fraise-disque de 24 lames avec 530 mm de diamètre, de 100 mm d'alésage et de module 36.

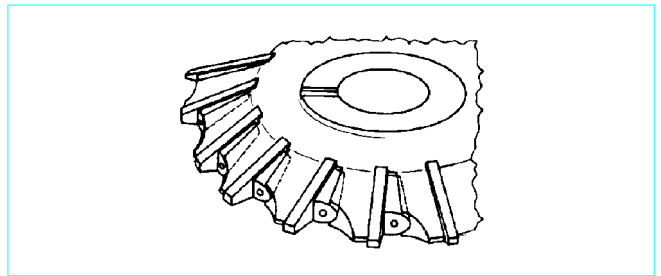


Figure 3 – Fraise-disque en carbure Ingersoll

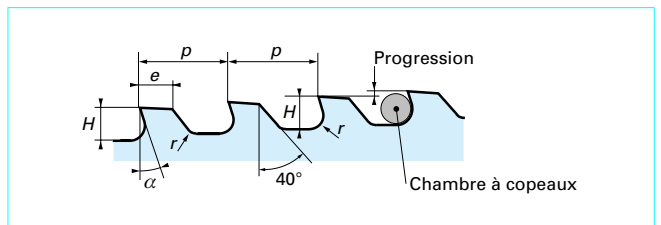


Figure 4 – Forme usuelle de la denture normale d'une broche

## 1.3 Taillage par brochage

Le brochage permet l'obtention de cannelures intérieures dans la mesure où la géométrie de la pièce permet le passage d'une broche ronde de part et d'autre de la pièce à brocher [5]. La broche se compose d'un certain nombre de dents, dont le diamètre augmente depuis la première dent d'ébauche jusqu'à la première dent de finition.

■ La figure 4 représente la **forme d'une broche** et précise ses différents paramètres :

- $e$  : épaisseur d'une dent détalonnée,
- $p$  : pas de la denture,
- $H$  : hauteur de la dent,
- $r$  : rayon de raccordement,
- $\alpha$  : angle de coupe.

La **progression** est l'épaisseur (en mm) de copeau enlevé entre deux dents de la broche.

Les dents de finition sont toutes du même diamètre et servent au calibrage qui détermine la dimension de l'engrenage fini.

■ La figure 5a donne les paramètres du **pas de la broche**. On a :

$$z = p / H$$

$z$  est le nombre de dents de la broche, et est fonction de l'épaisseur totale du métal à enlever.

Les **paramètres** sont :

- la matière à usiner ;

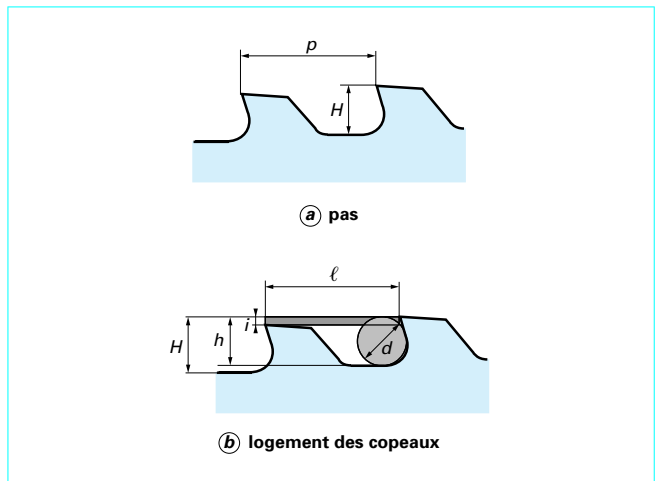


Figure 5 – Paramètre du pas des broches et logement des copeaux

- la longueur de cannelure à usiner ;
- le volume de copeaux à enlever par dent, de manière que celui-ci puisse se loger entre deux dents consécutives.

On a ainsi :

- pour l'aluminium :

$$z = p / H = 2$$

- pour la fonte douce, le bronze et le laiton :

$$z = p / H = 2,24$$

- pour l'acier doux et la fonte dure :

$$z = p / H = 2,5$$

- pour l'acier dur :

$$z = p / H = 2,8$$

■ Le **logement des copeaux** est représenté figure 5b. Ces derniers doivent trouver leur place dans l'intervalle compris entre deux dents.

On a :

$\ell$  : longueur du copeau,

$i$  : épaisseur du copeau,

$H$  : hauteur de dent disponible et copeau,

$h$  : hauteur de dent utile et copeau,

$d$  : diamètre maximal du logement du copeau.

On constate que la hauteur  $H$  de la dent de la broche est plus grande que le diamètre du copeau à loger. L'espace  $h$  pour le logement du copeau sera porté au maximum.

## 2. Taillage par génération

### 2.1 Taillage par outil-crémaillère

■ Les machines usuelles employées dans l'industrie sont principalement les machines MAAG et Sunderland. Nous allons étudier la **chaîne cinématique** de la machine MAAG.

Les figures 6a et 6b montrent respectivement deux types de machine :

a) type SH 75 ( $\varnothing$  750 mm) ;

b) type SH 600 ( $\varnothing$  6 000 mm) pour les grandes puissances.

La machine comporte des éléments assurant divers mouvements (figure 7).

#### ● Mouvement alternatif du coulisseau

C'est une commande par un *dispositif bielle-manivelle* ①. La boîte de vitesses et la boîte engrenages des avances permettent de régler la vitesse du mouvement de coupe et du mouvement d'avance (grosesse des copeaux).

#### ● Mouvement de génération

La commande s'effectue par l'arbre ; cet arbre, par l'intermédiaire de l'automate, tourne d'un certain nombre de tours bien défini ; cela correspond à un déplacement du chariot ② égal au pas de l'outil ou à une rotation de la table ③ égale au pas angulaire de la roue taillée.

#### ● Mouvement de préhension de l'outil

La figure 8 montre le coulisseau avec le dispositif de préhension de l'outil-crémaillère.

**Nota** : pour plus de précisions sur le fonctionnement de ces équipements, le lecteur se reportera au traité théorique et pratique des engrenages de G. Henriot [1].

■ La figure 9 représente le **cycle de taillage**. L'outil-crémaillère possède un nombre limité de dents, inférieur au nombre de dents (de hauteur  $h$ ) de la roue à tailler. La roue est à axe vertical et l'outil n'a aucun déplacement transversal.

On commence par régler la profondeur de taillage, et le chariot porte-roue est déplacé transversalement jusqu'à ce que cette roue effleure l'outil (figure 9a).

Le **mouvement de génération** est ensuite embrayé, avec le roulement sans glissement du cercle primitif (de diamètre  $d$ ) de génération de la roue sur la ligne primitive de la crémaillère équivalente à l'outil. Lorsque la roue se trouve dans la position de la figure 9b, après déplacement du chariot de la quantité  $\ell$  (distance entre les points  $O_1$  et  $O_2$ ), la dent n° 1 ne prend plus de copeaux. On enclenche alors l'automate de la machine (figure 7) qui agit de la façon suivante :

— le coulisseau s'arrête en position haute ;

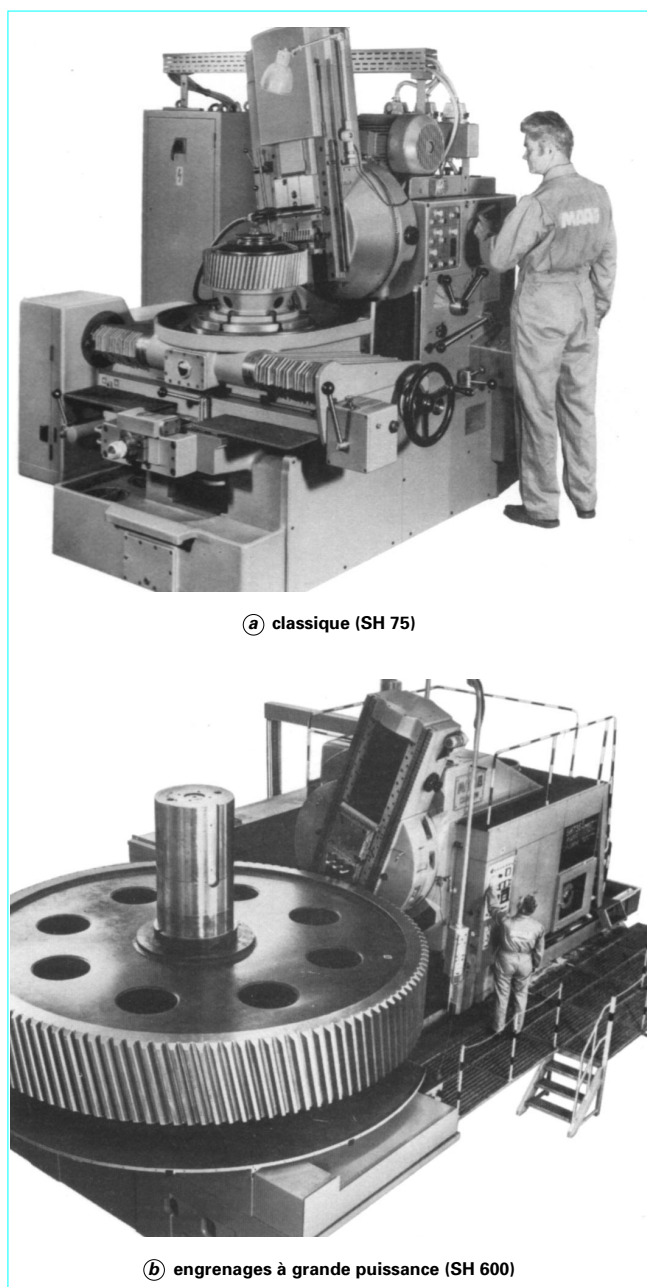


Figure 6 – Taillage par machine à crémaillère [MAAG]

- le mouvement de génération est débrayé ;
- le chariot exécute un mouvement rétrograde (figure 9c) de  $O_2$  à  $O_3$  ;
- le mouvement de coupe est à nouveau enclenché ;
- la génération se poursuit jusqu'en  $O_4$ , après déplacement du chariot d'une quantité égale au pas.

Le **mouvement de division** s'effectue alors comme indiqué précédemment, et ainsi de suite, automatiquement, jusqu'à la finition totale de la passe sur toute la périphérie de la pièce.

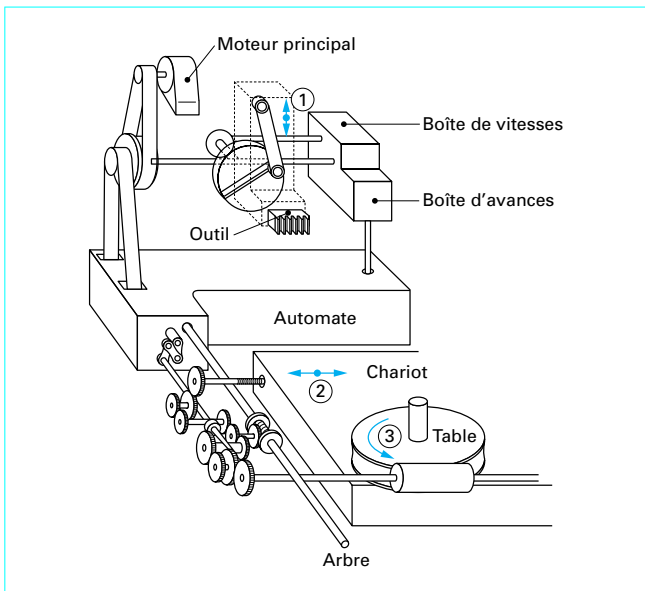


Figure 7 – Chaîne cinématique d'une machine à crémaillère [MAAG]

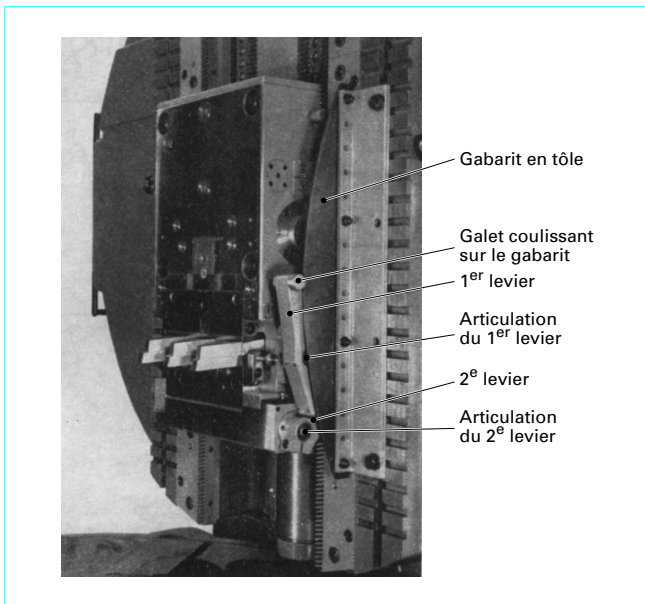
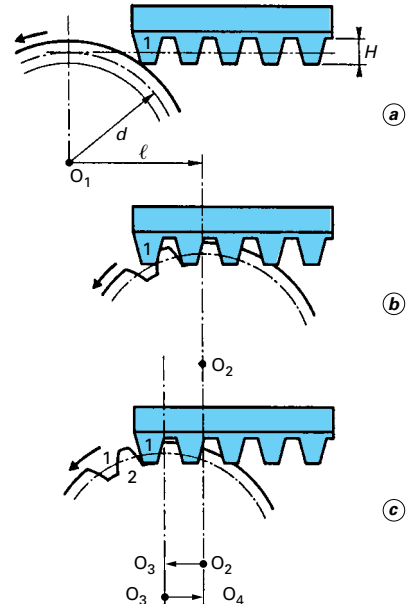


Figure 8 – Préhension de l'outil-crémaillère sur le porte-outil

## 2.2 Taillage par fraise-mère

La machine à tailler les engrenages emploie un outil qui apparaît sous l'aspect d'une vis sans fin entaillée suivant un certain nombre de gorges longitudinales de façon à aménager des arêtes tranchantes.

Dans le mode de taillage, les équipements sont nombreux (cf. Pour en savoir plus [Doc. B 1 700]).



$l = O_1O_2$  distance parcourue par le centre de la pièce pour tailler le premier pas de l'engrenage

Figure 9 – Exécution du mouvement de génération d'un pas par outil-crémaillère

■ La **commande numérique** CN perfectionne la machine à tailler. Elle permet de supprimer des transmissions mécaniques et réalise la synchronisation des différents entraînements.

La figure 10 représente le plan de travail d'une machine Pfauter (type P 253). On remarque la table porte-pièce avec le coulisseau porte-fraise. Les différents mouvements de la machine sont :

- le mouvement radial du bâti porte-pièce ① ;
- le mouvement axial du coulisseau porte-fraise ② ;
- le mouvement tangentiel de la fraise ③ ;
- le mouvement rotation de la pièce ④ ;
- le mouvement rotation de la fraise ⑤ .

La figure 11 montre les différents asservissements d'une machine CNC (commande numérique par ordinateur) Pfauter :

- entraînement de la fraise ① ;
- entraînement de la table ② ;
- avance radiale ③ ;
- avance axiale ④ ;
- pivotement de la tête de taillage ⑤ ;
- avance tangentielle ⑥ .

Cette commande, qui possède un *programme dialogue*, met en relation les entraînements séparés et les systèmes de mesure d'axes. L'intégration de cette CNC est facile à incorporer dans les cellules de travail et les systèmes flexibles.

■ La figure 12 représente une fraise-mère en train de tailler une roue à denture droite. La vis équivalente à la fraise est une vis sans fin dont la surface de filet contient toutes les arêtes tranchantes. Cette vis équivalente varie avec l'état d'affûtage de la fraise. On peut dire que avec une fraise-mère de module réel  $m_0$  (module nominal de la fraise) et d'angle de pression  $\alpha_0$  (angle de pression nominal de la fraise), nous pouvons tailler une infinité de **roues cylindriques** (droites et hélicoïdales).

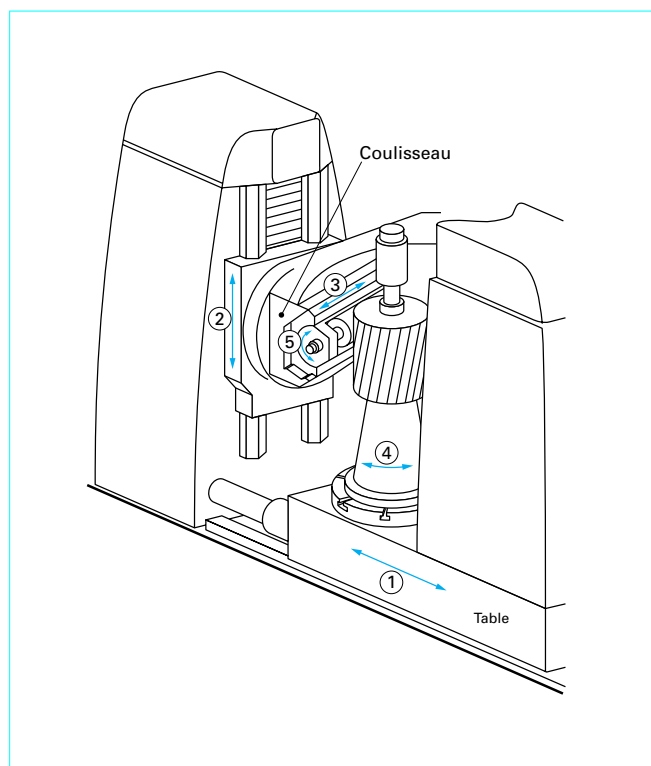


Figure 10 – Plan de travail avec les différentes directions des mouvements pour une machine CNC [Pfauter]

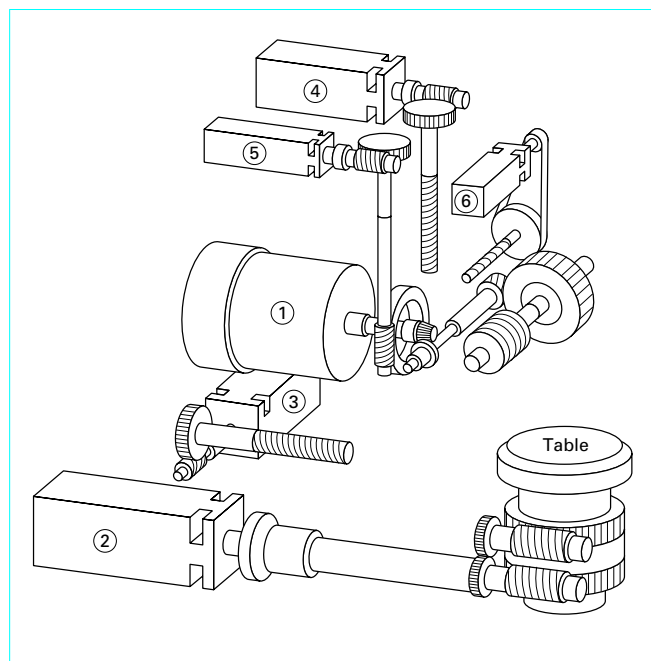


Figure 11 – Entraînement avec moteur d'une machine CNC [Pfauter]

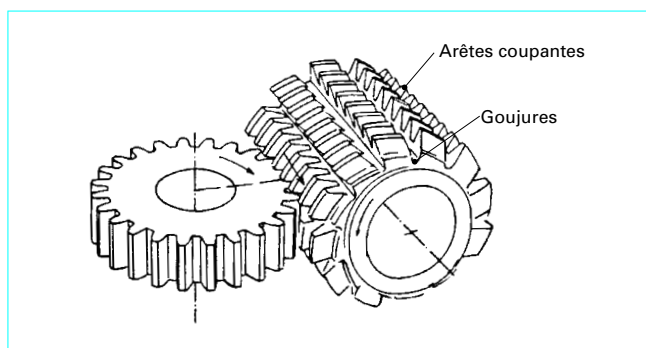


Figure 12 – Fraise-mère et pièce taillée

Le taillage des **engrenages cylindriques** s'effectue avec une fraise-mère comportant un angle d'hélice  $\beta$  (vis sans fin avec hélice  $\beta$ ) et nécessite des réglages différents suivant que l'on taille des engrenages cylindriques droits ou des engrenages cylindriques hélicoïdaux.

Le tableau 2 donne toutes les **combinaisons possibles** suivant le sens d'inclinaison du filet de la fraise et du sens d'inclinaison de l'engrenage à tailler en avalant, avec :

- $S_x$  avance axiale de la fraise-mère à chaque tour de la roue,
- $\beta_0$  angle de l'hélice de l'outil,
- $\gamma_0$  inclinaison du filet de la fraise,
- $\eta$  angle de pivotement de la fraise.

Les surfaces en noir indiquent l'emplacement de la zone de travail des tranchants de la tête des dents de la fraise, c'est-à-dire les endroits où est effectué le travail d'ébauche. Les figures de ce tableau montrent l'emplacement de la zone d'ébauche par rapport au centre de la machine.

On peut également réaliser le taillage des engrenages cylindriques *en repoussant*.

■ La figure 13 montre d'autres possibilités de la machine.

Afin d'utiliser le plus uniformément possible la largeur de la fraise, et afin de répartir les usures des dents de l'outil, la machine offre la possibilité de pratiquer la **méthode du shifting**. Entre chaque affûtage, la majorité des dents sont utilisées.

● Le **principe** de déplacement de l'outil est le suivant : après un nombre de pièces (ou un nombre de serrages, en cas de serrage par paquets) pré réglable, la fraise-mère est déplacée d'une certaine valeur en direction de l'axe. Ce déplacement a lieu après que le chariot axial et le chariot radial sont revenus à la position de départ du cycle carré.

Le schéma de principe montre deux cycles carrés successifs **a** et **b** :

- 1 : avance axiale  $S_x$  (taillage en avalant) ;
- 2 : retour rapide axial (la fraise retourne à la position de départ du cycle carré qui vient de se dérouler) ;
- 3 : pas de déplacement (au début du nouveau cycle carré), la fraise est déplacée d'un pas.

● L'**avantage** de cette méthode est de permettre l'utilisation de l'outil, pour un plus grand nombre de pièces à tailler.

Le déplacement pas à pas de la fraise permet de répartir l'usure plus régulièrement sur toute sa longueur utile. De ce fait, on arrive souvent, à un accroissement considérable de la durée d'usage de la fraise.



Tableau 2 – Taillage des engrenages cylindriques en avalant

À droite		À gauche	
Pièce inclinaison à droite  $\eta = \beta_2 - \gamma_0$	Pièce inclinaison à gauche  $\eta = \beta_2 + \gamma_0$	Pièce inclinaison à droite  $\eta = \beta_2 + \gamma_0$	Pièce inclinaison à gauche  $\eta = \beta_2 - \gamma_0$
Pièce à denture droite  $\eta = \gamma_0$		Pièce à denture droite  $\eta = \gamma_0$	

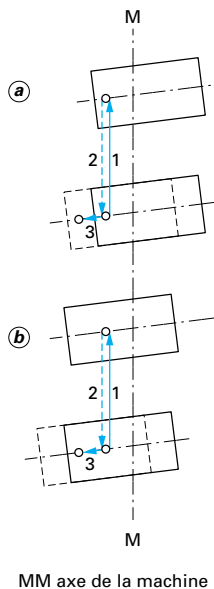


Figure 13 – Méthode de shifting ou déplacement automatique pas à pas de la fraise-mère

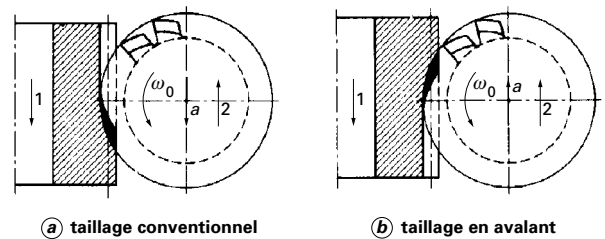


Figure 14 – Conditions de coupe de la fraise-mère

■ Au sujet des **conditions de coupe de la fraise-mère**, nous distinguerons (figure 14),  $\omega_0$  étant la vitesse angulaire de la fraise et 1 l'action de l'outil sur la pièce :

- la **méthode conventionnelle** : avance  $a$  du porte-outil de même sens que la rotation  $\omega_0$  de la fraise et de sens opposé à la réaction 2 de l'outil ; les jeux mécaniques s'annulent ;
- le **taillage en avalant** : avance  $a$  du porte-outil opposée à la rotation de la fraise et de même sens que la réaction 2 de l'outil ; les jeux mécaniques s'additionnent.

Cette deuxième méthode donne généralement de meilleurs résultats de productivité, mais nécessite des machines avec suppression des jeux dans les organes de transmission. Les machines à commande numérique qui suppriment les trains roues d'avance et les trains roues de division sont adaptées à cette méthode.

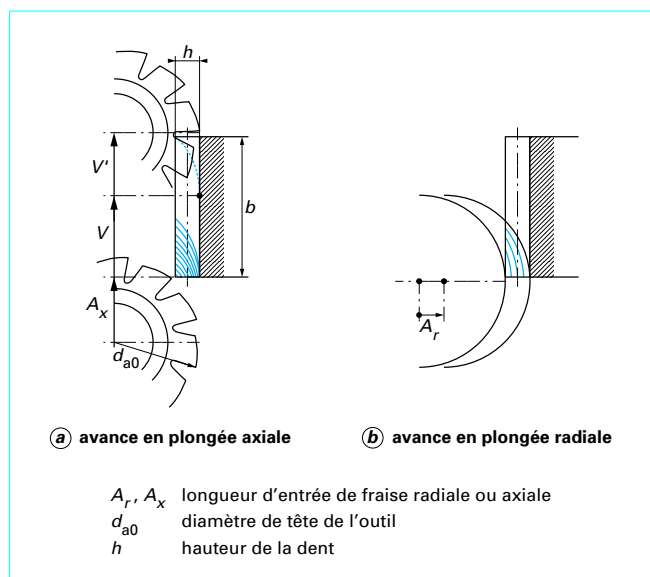


Figure 15 – Conditions d'entrée de la fraise-mère

Au sujet des **conditions d'entrée de fraise**, nous distinguerons :  
 — l'avance en **plongée axiale** (figure 15a) ;  
 — l'avance en **plongée radiale** (figure 15b), permettant une économie sensible dans le temps mort, appelé **longueur d'entrée axiale**  $A_x$ , s'ajoutant à la largeur de denture proprement dite  $b$ .

L'entrée de fraise axiale  $A_x$  peut avoir une valeur très importante augmentant très fortement la course d'avance de taillage. La section de copeaux, par contre, part d'une valeur nulle, peut atteindre le maximum après la course  $A_x$ , rester constante pendant la course  $V$  et diminuer ensuite pendant la course  $V'$ .

Les machines à commande numérique se prêtent très bien à l'adoption de **cycles très divers**, dont la figure 16 donne un certain nombre d'exemples.

#### ● Taillages en avalant

Pour la figure 16a, on a :

- avance radiale rapide jusqu'en position de départ du taillage ;
- avance axiale  $a_x$  avec entrée de fraise  $A_x$  (valeur constante ou programmée) ;
- dégagement rapide de la fraise ;
- retour rapide du chariot à sa position inférieure.

Pour la figure 16b, on a :

- avance rapide jusqu'au contact de la fraise avec le cylindre de tête de la roue ;
- avance radiale  $a_r$ , (valeur constante ou programmée) ;
- avance axiale  $a_x$  ;
- dégagement rapide de la fraise ;
- retour rapide du chariot à sa position inférieure.

● **Taillage d'une denture bombée** avec bombé symétrique (figure 16c) :  $a_b$  est la trajectoire de taillage dans le cas d'une denture bombée.

● **Taillage d'une denture avec conicité** (figure 16d) :  $a_c$  est la trajectoire de taillage dans le cas d'une denture cône.

● **Taillages successifs de deux dentures** (figure 16e) avec :

- pour la denture 1 :  $z_1$  dents, module  $m_1$  et inclinaison  $\beta_1$  ;
- pour la denture 2 :  $z_2$  dents, module  $m_2 = m_1$  et inclinaison  $\beta_2$ .

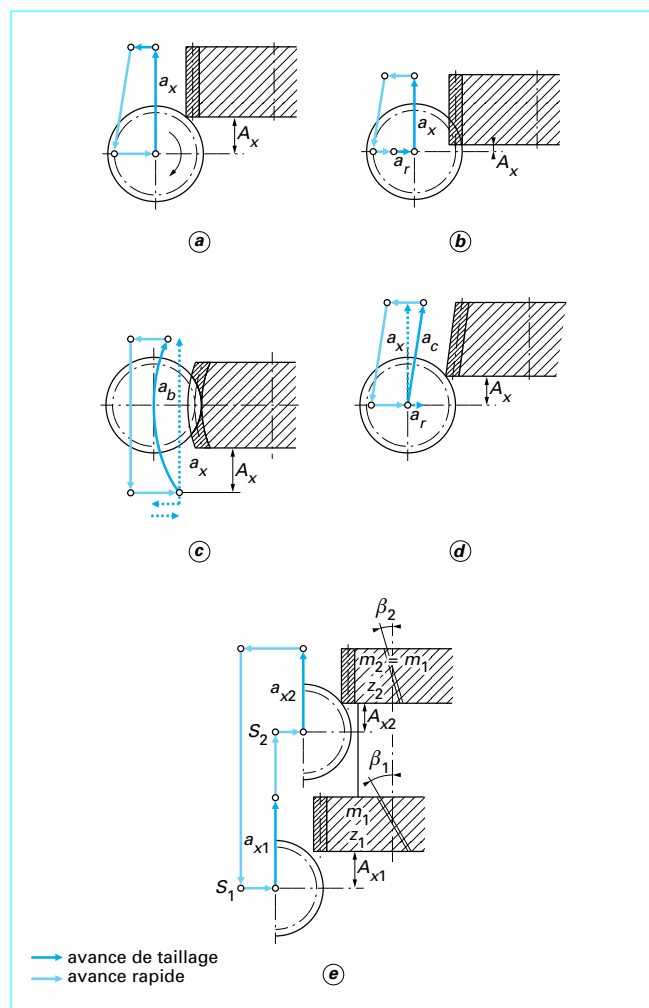


Figure 16 – Divers cycles de taillage par fraise-mère sur les machines à commande numérique

Pour le cycle de taillage en avalant ; on a,  $\sigma_0$  représentant l'angle de filet de la fraise :

- inclinaison  $S_1$  de la tête porte-fraise telle que :

$$S_1 = \beta_1 \pm \sigma_0 ;$$

- avance rapide jusqu'au contact de la fraise avec le cylindre de tête de la denture 1 ;
- avance axiale  $a_{x1}$  (valeur constante ou programmée) ;
- avance rapide axiale, puis radiale jusqu'au contact avec la denture 2 ;
- changement d'inclinaison de la tête porte-fraise tel que :

$$S_2 = \beta_2 \pm \sigma_0 ;$$

- avance axiale  $a_{x2}$  (valeur constante ou programmée) ;
- dégagement rapide de la fraise ;
- retour rapide du chariot à sa position inférieure.



## 2.3 Taillage par outil-pignon

### 2.3.1 Généralités

Le taillage par outil-pignon est un procédé par mortaisage ; le mouvement de génération est l'engrènement de la roue équivalente à l'outil avec l'engrenage à tailler. Les rotations de l'outil et de la pièce à tailler doivent être conjuguées, aussi bien en ce qui concerne les sens de rotation que les rapports des vitesses angulaires.

On voit sur la figure 17, pour le taillage d'une denture extérieure, que les sens de rotations sont opposés. Dans le cas du taillage d'une denture intérieure, les sens de rotations sont identiques. Nous avons toujours la relation :

$$\frac{\omega_0}{\omega} = \frac{z}{z_0}$$

avec  $\omega_0$  vitesse angulaire de l'outil,  
 $\omega$  vitesse angulaire de la pièce,  
 $z_0$  nombre de dents de l'outil,  
 $z$  nombre de dents de la pièce.

Dans la famille des équipements, avec ce procédé de taillage, nous trouvons les machines Lorenz, Fellows, Syres, etc.

La chaîne cinématique comporte, comme on le voit figure 18, des éléments permettant les mouvements suivants :

- axe X : mouvement radial du chariot porte-pièce ;
- axe C : mouvement de génération de l'outil ;
- axe D : mouvement de génération de la pièce ;
- axe L : longueur de la course de l'outil.

Les différentes commandes sont les suivantes :

MZ/L commande de l'axe Z ; mouvement linéaire sur une longueur L

MC commande de la rotation C de l'outil-pignon,

HM commande du nombre de coups par minute de l'outil-pignon,

MD commande de rotation de la table porte-pièce,

MX commande du rapprochement de la table suivant l'axe X.

La figure 19 donne un descriptif plus complet des principaux éléments d'une machine Lorenz du type LS 424.

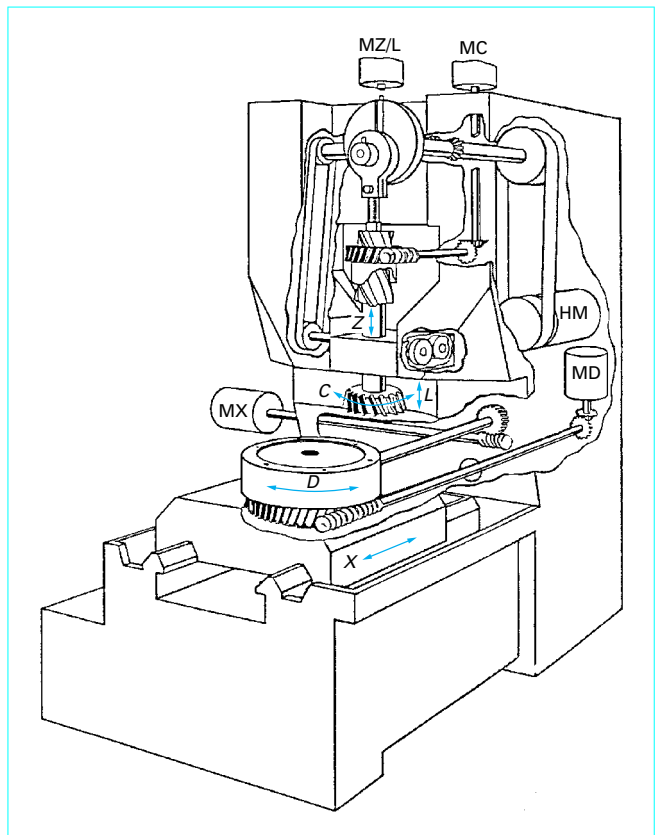


Figure 18 – Machine Lorenz de taillage par outil-pignon

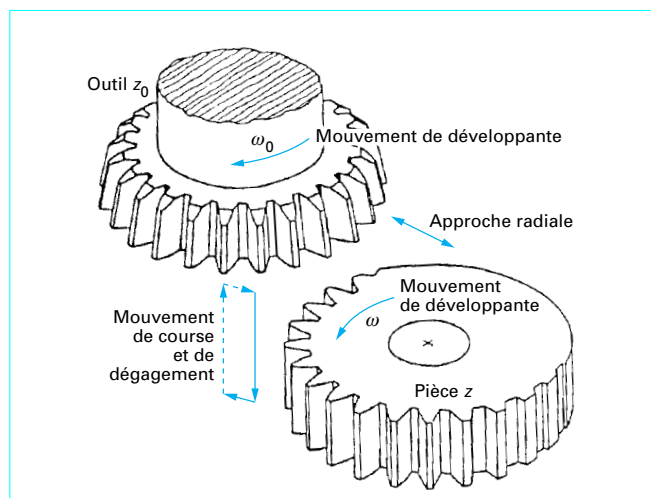


Figure 17 – Taillage en développante par outil-pignon

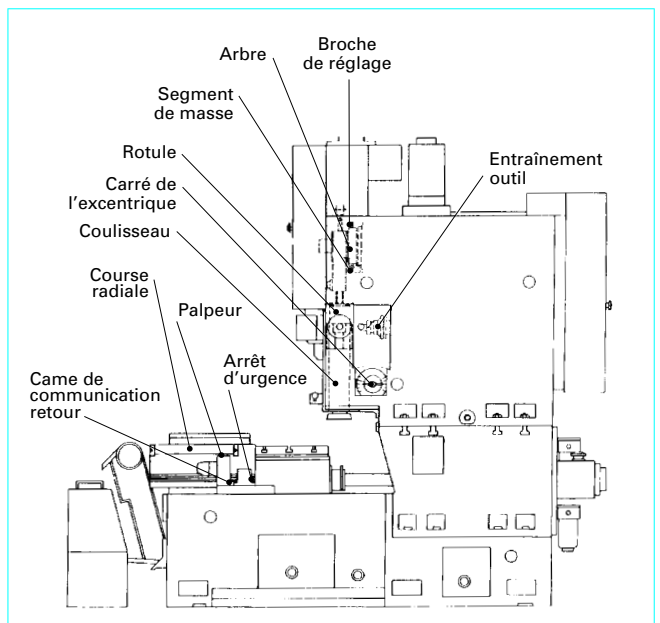


Figure 19 – Machine Lorenz de taillage : description

### 2.3.2 Procédés de taillage

La figure 20 présente les différents procédés de taillage par outil-pignon, avec l'allure des courbes cinématiques correspondantes. On trouve les axes suivants :

- $X$  : axe de l'outil ;
- $C$  : axe de rotation de l'outil ;
- $D$  : axe de rotation de la pièce.

■ La figure 20a montre l'**avance radiale avec mouvement de génération**. Le procédé conventionnel de pénétration est utilisé.

■ La figure 20b montre l'**avance radiale sans mouvement de génération**. Ce procédé est recommandé :

- pour éviter un frottement de l'outil contre la pièce, au taillage de dentures intérieures, à la remontée, dans le cas de pièces avec géométrie de denture difficile ;
- pour réduire le temps de pénétration ;
- pour la réalisation de profils ne pouvant être taillés par génération (taillage dent à dent).

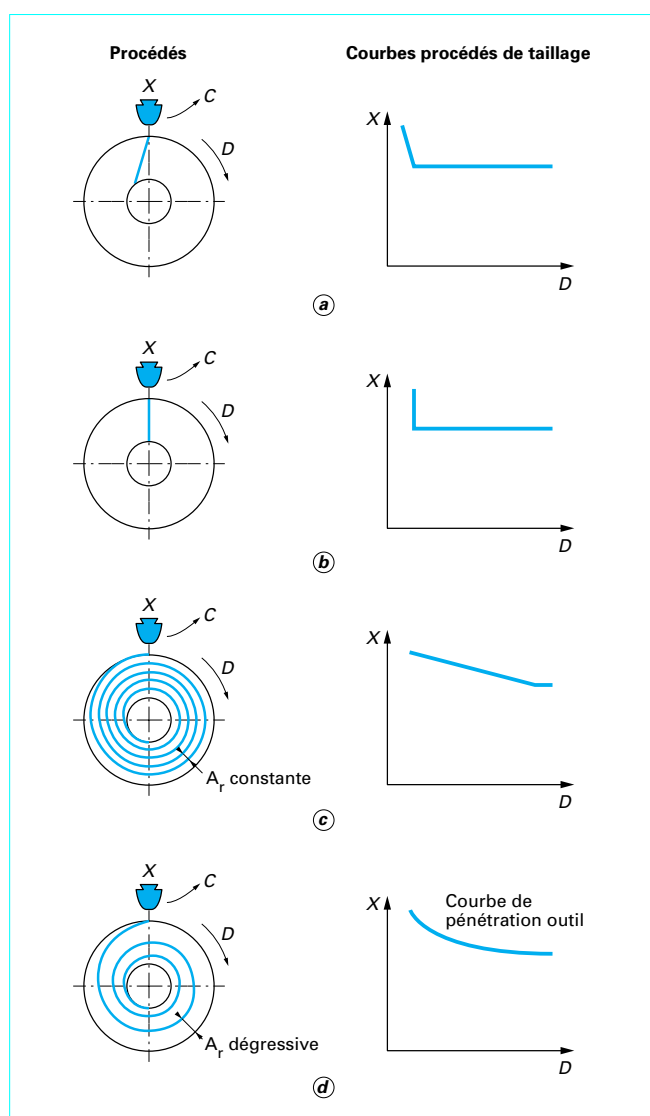


Figure 20 – Procédés de taillage par outil-pignon

■ La figure 20c montre la **pénétration en spirale**, avec **avance radiale  $A_r$  constante**.

Dans ce cas, le volume de copeaux augmente au fur et à mesure de la pénétration de l'outil. Cela signifie une charge croissante pour la machine et pour l'outil jusqu'à la profondeur de dent finale.

■ La figure 20d montre la **pénétration en spirale** avec **avance radiale  $A_r$  dégressive**. La vitesse de pénétration diminuant au fur et à mesure de la pénétration, le volume de copeaux produits reste sensiblement égal pendant toute la durée du process de pénétration.

Le résultat est donc une meilleure exploitation de l'outil et une meilleure qualité de l'état de surface des flancs de dents.

### 2.3.3 Taillage des dentures hélicoïdales

Pour le taillage d'une denture hélicoïdale, la roue équivalente à l'outil doit être une roue à denture hélicoïdale de même angle d'hélice et de sens opposé.

La figure 21 montre le jeu de guides mâle (GM) et femelle (GF) permettant de réaliser le mouvement de mortaisage hélicoïdal.

### 2.3.4 Particularités du réglage du coulisseau - porte-outil

#### ■ Inversion du mouvement de dégagement

Si la machine est adaptée au taillage de dentures intérieures, il faut inverser le sens de dégagement, ce qui est réalisé par le simple décalage d'un excentrique (figure 22a).

#### ■ Dispositif pour modifier la direction de l'axe du coulisseau

La direction de l'axe du coulisseau peut être modifiée d'un angle de  $\pm 30$  minutes en sens radial par rapport à la pièce. On peut ainsi tenir compte de déformations du corps de roue et prévenir des déformations par traitement thermique.

La figure 22b précise l'angle de dégagement entre l'outil et la pièce qui est réalisé par déplacement latéral du montant de la machine. Pour des conditions de taillage extrêmes, en particulier au taillage de dentures intérieures, on peut ainsi éviter un frottement de l'outil pendant la remontée de l'outil.

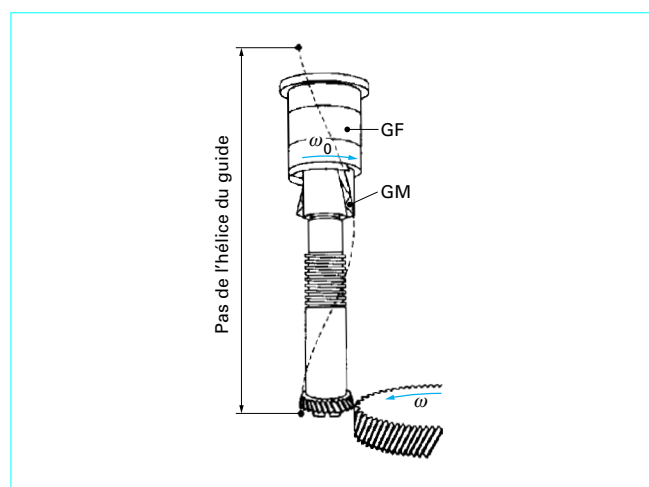


Figure 21 – Schéma du guidage de l'outil-pignon pour taillage d'une denture hélicoïdale

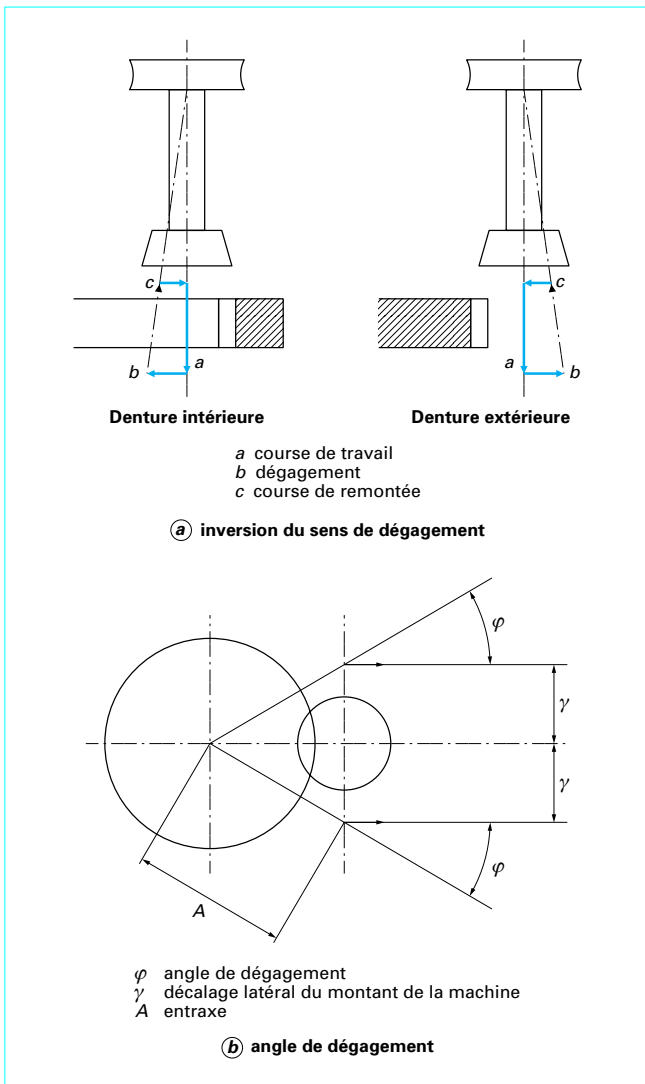


Figure 22 – Réglage du coulisseau porte-outil

## 3. Taillage des engrenages coniques

### 3.1 Généralités

De même qu'une crémaillère est la limite d'une roue cylindrique dont le cylindre primitif est devenu un plan primitif, nous appellerons **roue plate** une roue conique dont le cône primitif est devenu un plan, c'est-à-dire dont le demi-angle au sommet est devenu  $90^\circ$ . Une roue plate tourne autour d'un axe qui est normal à son plan primitif.

Nous commencerons par étudier la génération de la denture d'une roue conique à partir d'une roue plate génératrice. La figure 23 représente le cône primitif  $C_1$  d'une roue conique taillée, d'axe  $X_1$ , tangent suivant SI au plan primitif P de la roue plate génératrice, tournant autour de l'axe  $X_0$ .

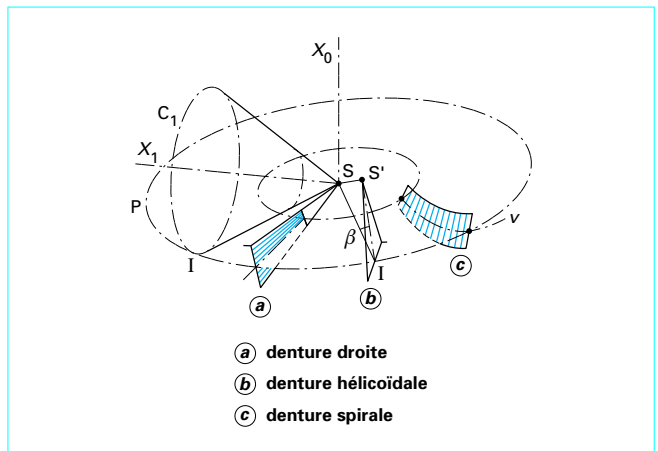


Figure 23 – Génération à partir d'une roue plate génératrice

La forme de la denture de la roue plate génératrice permet de définir trois principaux **types de denture** :

- denture **droite** (figure 23a), dent prismatique passant par le sommet S ;
- denture **hélicoïdale** (figure 23b), dent prismatique passant par un point  $S'$  décalé par rapport à S d'un angle  $\beta$  ;
- denture **spirale** (figure 23c), surface d'égale pente, formée par les segments également inclinés par rapport à P, s'appuyant sur une courbe directrice  $v$  caractérisant le type de la denture :
  - si  $v$  est un cercle, c'est une denture Gleason ;
  - si  $v$  est une épicycloïde allongée, c'est une denture Oerlikon ou Klingelnberg.

### 3.2 Cas des dentures droites

■ La figure 24 schématise la disposition générale d'une **machine type Gleason**.

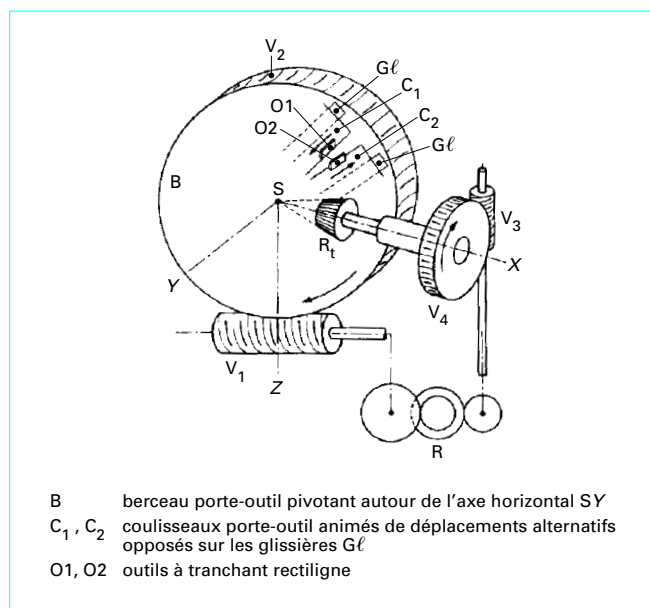
L'ensemble (berceau-outils) matérialise la roue plate génératrice, ou plutôt une **roue conique génératrice**  $R_c$ . En effet, le mortaisage est dirigé normalement à l'axe du berceau (figure 25) : cela signifie que le cône primitif de la roue taillée n'est pas tangent à un plan normal à l'axe du berceau, mais tangent à un cône de demi-angle au sommet  $[(\pi/2) - \nu_f]$  avec  $\nu_f$  représentant l'angle de creux de la denture.

La **roue taillée** (figure 24),  $R_t$ , d'axe  $S_t$ , est inclinée par rapport au plan du berceau d'un angle  $(\delta - \nu_f)$ ,  $\delta$  étant l'angle primitif de cette roue (figure 23). Les engrenages à vis sans fin ( $V_1, V_2$ ) et ( $V_3, V_4$ ) commandent respectivement les rotations du berceau et de la roue taillée. Le train de roues interchangeables R permet la conjugaison des deux rotations de telle sorte que le cône primitif de la roue taillée roule sans glisser sur le cône primitif de la roue conique génératrice.

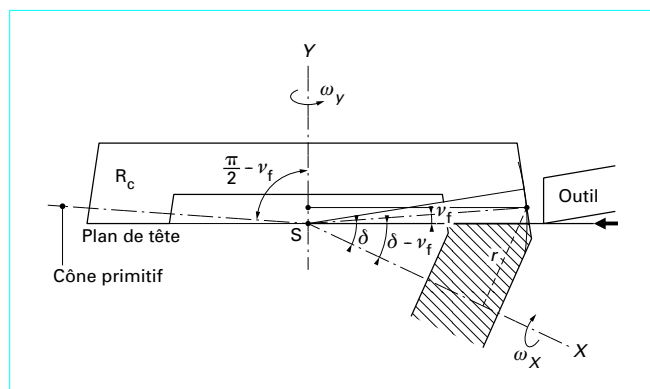
Le réglage des outils O doit assurer la convergence de la course de ceux-ci en S. L'angle  $\gamma$  d'ouverture des glissières permet le réglage de l'épaisseur des dents (figure 26). L'opération de taillage est discontinue.

La figure 27 représente la finition de la dent 1 ; une opération préliminaire effectuée l'ébauche sur toute la roue, sans génération, par simple enfoncement de la roue taillée vers les outils.

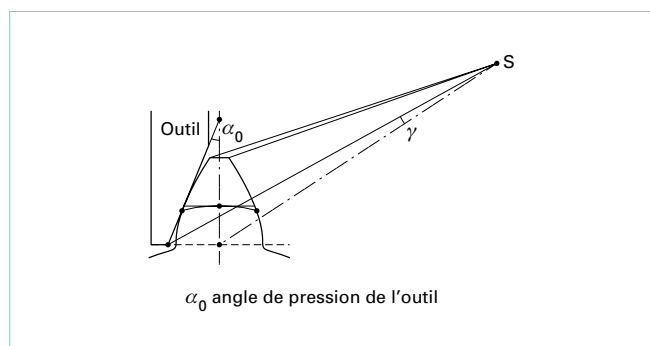
La base coulissante porte-roue se dégage parallèlement à l'axe du berceau ; le diviseur fait tourner la pièce de 1 pas angulaire ; le berceau revient à sa position inférieure de départ ; la base coulissante est ramenée à la position de taillage : c'est l'opération de **division**.



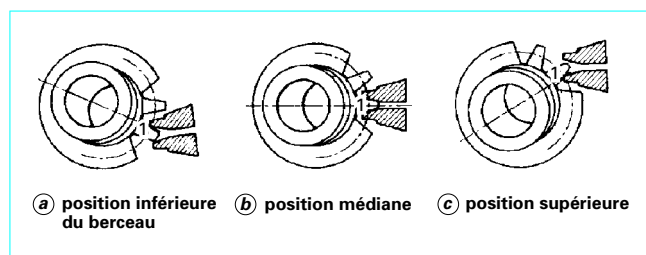
**Figure 24 – Schéma cinématique d'une machine type Gleason à tailler les roues coniques à denture droite par génération**



**Figure 25 – Génération à partir d'une roue conique génératrice**



**Figure 26 – Génération d’une dent de roue conique à denture droite par outil à tranchant unique**



**Figure 27 – Phases successives de la génération d’une dent de roue conique**

Indiquons que certains aménagements de la machine permettent l'exécution de dentures avec un léger bombé longitudinal.

■ La **machine Heidenreich et Harbeck** est légèrement différente, en ce sens que le cône primitif de la roue taillée est tangent au plan normal à l'axe du berceau ; la course de mortaisage n'est plus normale à cet axe, mais peut être réglée suivant la valeur de l'angle  $\nu_1$  : la génération s'effectue alors par roulement sans glissement du cône primitif de la roue taillée sur le plan primitif de la roue plate génératrice.

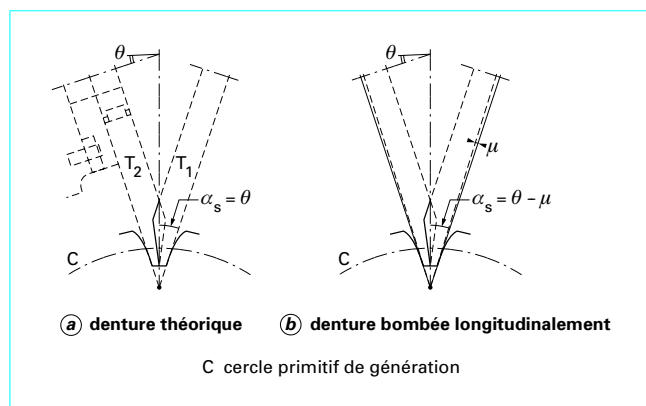
■ Pour le **taillage en grande série**, et pour des pignons de largeur de denture réduite, la firme Gleason a conçu une machine plus rapide, dans laquelle les deux outils à tranchant rectiligne animés de déplacements de mortaisage sont remplacés par deux fraises-disques de grand diamètre couvrant toute la largeur de denture. Ces fraises sont deux tourteaux  $T_1$  et  $T_2$  comportant une succession de lames tranchantes à la périphérie (figure 28).

Sur la figure **28a**, les lames sont situées dans le plan normal  $\theta$  aux axes de fraises et l'angle  $\theta$  d'inclinaison de ces axes est égal à l'angle de pression  $\alpha_s$  : les dentures sont théoriques.

Sur la figure **28b**, les lames sont disposées sur une surface conique creuse définie par l'angle  $\mu$ , de sorte que :

$$\theta = \alpha_s + \mu ;$$

les dentures taillées présentent alors un bombé longitudinal d'autant plus accentué que  $\mu$  est important.



**Figure 28 – Taillage par deux fraises-disques d'une roue conique à denture droite**

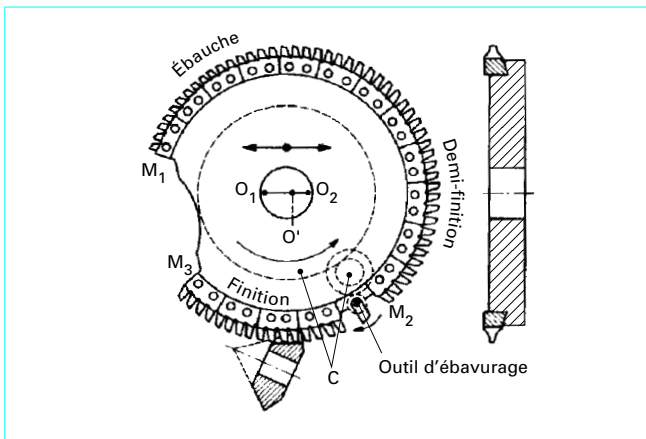


Figure 29 – Outil Revacycle de taillage de denture conique droite

■ Pour le **taillage de petits pignons** à denture droite, en très grande série, la firme Gleason a prévu une **machine Revacycle**. La fraise est constituée d'un disque à axe horizontal, dont le diamètre dépasse 600 mm, portant à sa périphérie une succession d'outils de forme déterminée (figure 29) :

- dans la zone  $M_1M_2$  sont disposés les outils d'ébauche et demi-finition ;
- les outils de finition sont disposés dans la zone  $M_2M_3$  ;
- l'intervalle  $M_3M_1$  ne comporte aucun outil : il correspond au moment où s'effectue la division du pignon taillé.

La fraise est animée d'une rotation uniforme tandis que son support se déplace parallèlement au pied de la denture taillée. On distingue les différentes phases suivantes :

- $O_1$  à  $O'$ , ébauche avec avance réduite ;
- $O'$  et  $O_2$ , demi-finition avec avance augmentée ;
- $O_2$  à  $O_1$ , finition.

Nous apercevons la commande C de l'outil d'ébavurage permettant de faire le chanfrein au gros bout. Étant donné la rapidité de l'opération de taillage, quelques dizaines de secondes, il est nécessaire de prévoir la machine avec des dispositifs de serrage, desserrage et d'alimentation automatiques.

La machine Revacycle est utilisée en automobile pour une fabrication de pignon de différentiel.

### 3.3 Cas des dentures hélicoïdales

Ce type de denture est très peu utilisé : on lui préfère la denture spirale. La différence fondamentale par rapport à la génération de la denture droite est le décalage par rapport au centre S de rotation du berceau de la direction du déplacement des outils (figure 23b, qui montre le déplacement de S vers S' et figure 24 qui montre le point S pour une denture droite) ; ceux-ci convergent vers un point S' tel que :

$$SS' = SI \sin \beta,$$

$\beta$  étant l'angle d'inclinaison extérieur de la denture.

Il existe un type de machine Gleason et un de machine Heidenreich permettant la réalisation de ce type de denture.

### 3.4 Cas des dentures spirales

#### 3.4.1 Généralités

Il existe deux principaux types de denture spirale définis comme indiqué figure 23c par la forme de la denture de la roue plate génératrice.

Les outils sont constitués par un tourteau cylindrique à la périphérie duquel est disposée une succession d'outils à lame tranchante rectiligne (figure 30), O étant l'axe du porte-outil.

Nous distinguerons :

- la denture à **hauteur variable**, généralement préconisée par la société Gleason (figure 31a) : l'axe de la fraise est normal à la génératrice de pied ;
- la denture à **hauteur constante**, préconisée par les sociétés Oerlikon et Klingelnberg (figure 31b) : l'axe de la fraise est évidemment normal à la génératrice de pied, mais également normal à la génératrice primitive.

#### 3.4.2 Denture Gleason

##### 3.4.2.1 Généralités

Les lames tranchantes sont situées à égale distance du centre du tourteau : la surface de denture de la roue plate génératrice est donc un tronç de cône de révolution, la courbe directrice  $v$  de la figure 23c étant alors un cercle.

Les différents **types de fraises Gleason** sont donnés sur la figure 32,  $R_f$  représentant le rayon de la fraise :

- la fraise à tranchants extérieurs (figure 32a), taillant le flanc concave de la denture ;
- la fraise à tranchants intérieurs (figure 32b), taillant le flanc convexe de la denture ;

la fraise à tranchants alternés (figure 32c), taillant les deux flancs d'un creux de denture.

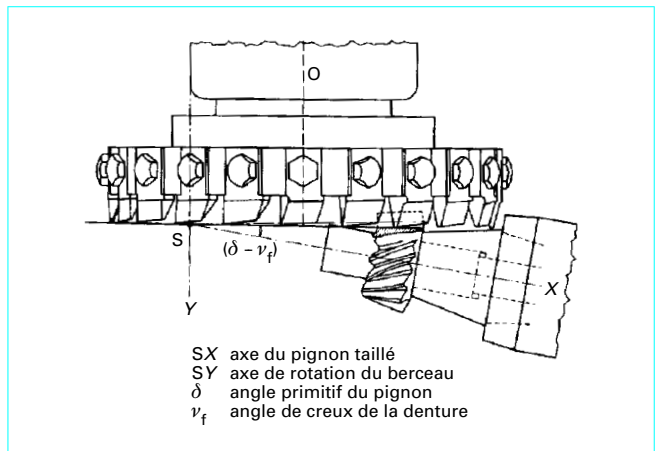


Figure 30 – Fraise Gleason pour dentures coniques spirales

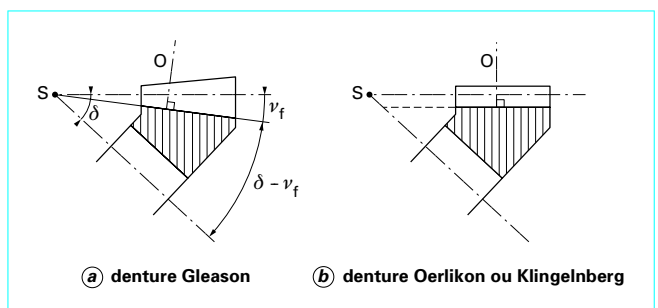


Figure 31 – Roues coniques à denture spirale

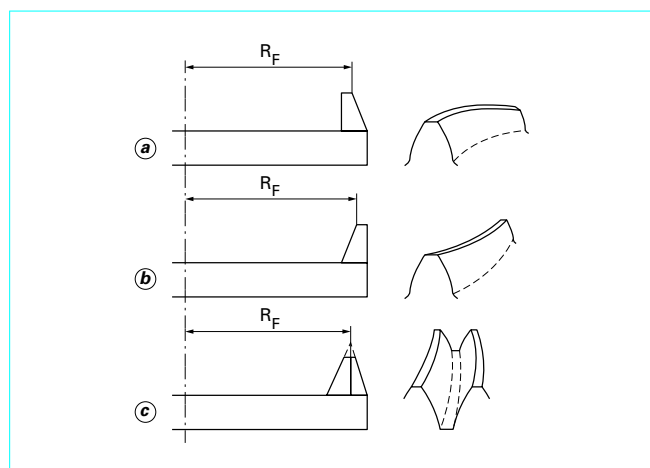


Figure 32 – Différents types de fraises Gleason

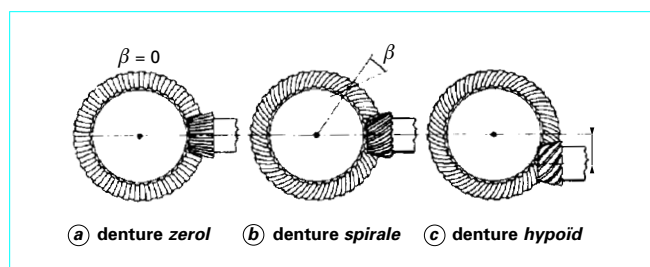


Figure 33 – Différents types de dentures Gleason

Adoptons les appellations Gleason pour définir les trois principales **dispositions de denture**,  $\beta$  étant l'angle de spirale :

- la denture **zerol** (figure 33a), cas particulier de denture spirale avec  $\beta$  nul ;
- la denture **spirale** (figure 33b), pignon et roue d'un engrenage à axes concourants ;
- la denture **hypoid** (figure 33c), pignon et roue d'un engrenage à axes décalés.

### 3.4.2.2 Taillage par génération par la méthode des roulettes

La figure 34 schématise une machine Gleason.

Le plan contenant le sommet des arêtes tranchantes étant tangent au cône de pied de la denture, cela signifie que l'axe SX de la roue taillée est incliné par rapport au plan du berceau d'un angle  $(\delta - \nu_f)$  (figure 30).

L'ensemble (berceau-fraise) matérialise la roue conique génératrice, de demi-angle au sommet  $[(\pi/2) - \nu_f]$  (figure 25). Il faut obtenir le roulement sans glissement du cône primitif de la roue taillée sur le cône primitif de la roue conique génératrice : il faut donc un train de roues de rechange de conjugaison  $R_1$ .

L'opération est discontinue. Après la finition d'un creux, la roue est dégagée de la fraise ; un dispositif diviseur, avec roues de rechange  $R_2$ , fait tourner d'un pas angulaire.

La figure 35 schématise un exemple de **cycle de taillage**, dans lequel les deux flancs d'un creux sont usinés en même temps à l'aide d'une fraise à tranchants alternés (généralisation pour le taillage d'une roue ; pour le taillage du pignon, les deux flancs sont généralement taillés séparément) :

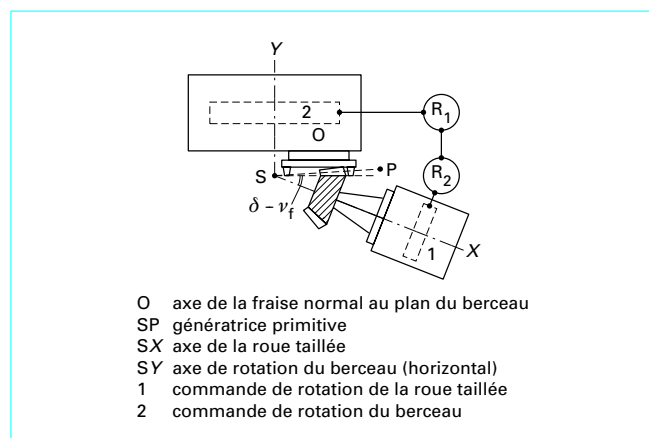


Figure 34 – Chaîne cinématique d'une machine Gleason à tailler les roues coniques à denture spirale

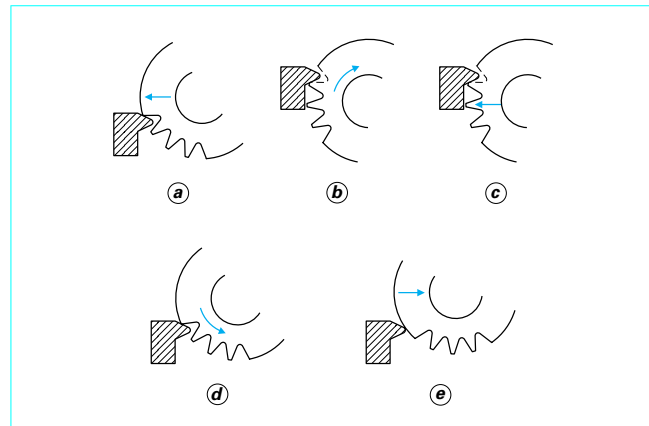


Figure 35 – Cycle de taillage-finition par la méthode des roulettes

- a)** roue avancée sur la fraise jusqu'à la profondeur de plongée ;
- b)** mouvement de génération ; ébauche ;
- c)** avance de plongée complémentaire rapide de la roue jusqu'à la profondeur de finition ;
- d)** inversion du sens de mouvement de génération par la finition complète du creux ;
- e)** dégagement de la roue pour l'exécution du mouvement de division.

Le positionnement de l'axe de la fraise par rapport à l'axe du berceau permet d'obtenir l'angle de spirale  $\beta$  désiré.

La génération par la **méthode des roulettes** consiste à utiliser pour le taillage de la denture de la roue et le taillage de la denture du pignon des ensembles générateurs (berceau-fraise) en coïncidence (comme par exemple pour le taillage d'une roue et d'un pignon à axes parallèles à partir de la même crémaillère génératrice).

### 3.4.2.3 Taillage sans génération par la méthode des enveloppes

Contrairement à la méthode des roulettes, l'ensemble générateur (berceau-fraise) pour le taillage de la denture du pignon matérialise cette fois la denture de la roue avec laquelle doit engrener le pignon.



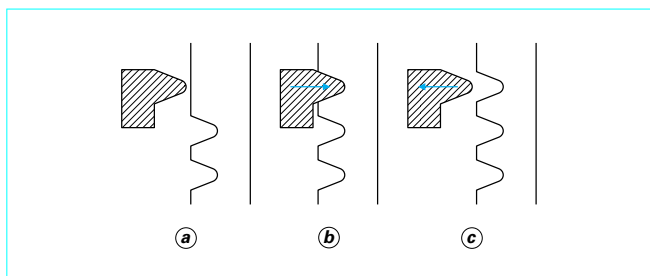


Figure 36 – Cycle de taillage d'un creux de la roue par la méthode des enveloppes

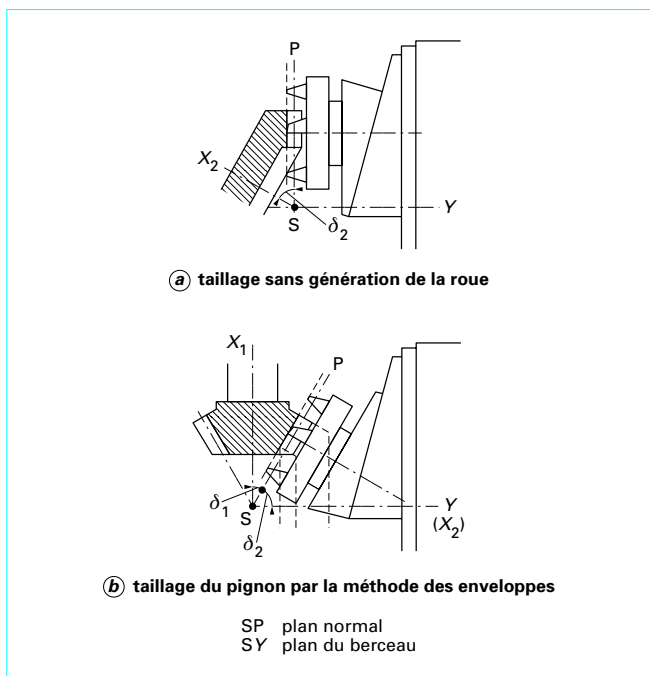


Figure 37 – Taillage des dentures spirales par la méthode des enveloppes

La figure 36 représente les trois **phases du taillage** d'un creux de la roue, sans aucune génération, par simple plongée de la fraise dans la roue (figure 36b) ; c'est une méthode de taillage très rapide généralement utilisée pour la très grande série.

Après dégagement rapide de la fraise (figure 36c), on exécute le mouvement de division.

La figure 37a représente le taillage sans génération de la roue et la figure 37b représente le taillage du pignon par la **méthode des enveloppes**. L'axe du berceau SY matérialise alors l'axe de la roue SX<sub>2</sub> et la fraise, la denture de la roue. Cette figure est relative à la denture Oerlikon ou Klingelnberg à hauteur constante, mais le principe reste le même pour une denture à hauteur variable.

### 3.4.3 Denture Oerlikon ou Klingelnberg

#### 3.4.3.1 Généralités

La fraise est composée d'un certain nombre  $Z_F$  de groupes identiques d'outils. La rotation de la fraise est uniforme : un groupe

d'outils pénètre dans un creux de la denture taillée, tandis que le groupe suivant doit pénétrer dans le creux suivant.

Sur la figure 38a, il y a cinq groupes d'outils comprenant chacun une lame extérieure  $a$  et une lame intérieure  $i$ . Nous devons donc déjà respecter ce que nous appellerons le **rapport de division** :

$$\frac{\text{vitesse angulaire de la roue taillée}}{\text{vitesse angulaire de la fraise}} = \frac{Z_F}{z}$$

avec  $z$  nombre de dents de la roue taillée.

Cette conjugaison de mouvements permet de matérialiser la roue plate génératrice.

On démontre que,  $z_1$  et  $z_2$  étant les nombres de dents d'un engrenage à axes perpendiculaires concourants, le **nombre de dents de la roue plate génératrice** est :

$$Z_p = \sqrt{z_1^2 + z_2^2}$$

Nous devons évidemment avoir :

$$\frac{\text{vitesse angulaire de la roue taillée}}{\text{vitesse angulaire de la roue plate}} = \frac{Z_F}{z}$$

et

$$\frac{\text{vitesse angulaire de la roue plate}}{\text{vitesse angulaire de la fraise}} = \frac{Z_F}{Z_p}$$

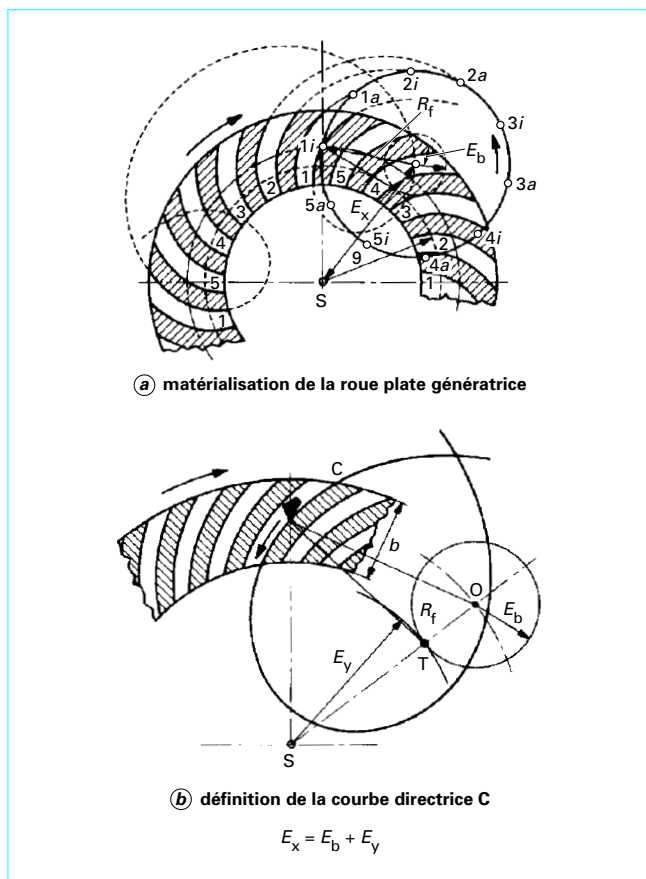


Figure 38 – Génération de la roue plate génératrice d'une denture Klingelnberg

### 3.4.3.2 Taillage avec génération par la méthode des roulettes

La roue plate génératrice étant ainsi matérialisée, il reste à opérer le roulement sans glissement du cône primitif de la roue taillée sur le plan primitif de la roue plate (figure 23c). On communique alors une certaine rotation, de vitesse angulaire  $\omega_b$ , au berceau porte-fraise, ce qui revient à communiquer une rotation complémentaire de même valeur à la roue plate. Il faut alors produire, sur la roue taillée, une rotation complémentaire, venant s'ajouter à celle résultant de la conjugaison de division. Nous appellerons **rapport de génération** le rapport défini comme suit :

$$\frac{\text{vitesse angulaire de la roue taillée}}{\text{vitesse angulaire d'avance du berceau } \omega_b} = \frac{Z_p}{z}$$

En conséquence, la vitesse angulaire de la roue plate est la somme de celle qui résulte de la relation  $Z_F/Z_p$  (§ 3.4.3.1) et de la rotation du berceau.

Définissons la roue plate par la courbe directrice C sur le plan primitif. Considérons par exemple la pointe d'un outil taillant le flan convexe (figure 38b), située sur le cercle de rayon de la fraise  $R_f$ .

Les vitesses angulaires de la roue plate et de la fraise sont dans le rapport constant défini par  $Z_F/Z_p$ . Cela revient à dire que le mouvement relatif de ces deux organes résulte du roulement sans glissement en T d'un cercle de rayon  $E_b$  lié à la fraise sur un cercle de rayon  $E_y$  lié à la roue plate tel que :

$$\frac{E_b}{E_y} = \frac{Z_F}{Z_p}$$

La trace C de la pointe d'outil est donc une épicycloïde allongée.

Dans la **méthode des roulettes**, le pignon et la roue d'un engrenage sont taillés à partir de deux roues génératrices en coïncidence, avec roulement sans glissement des cônes primitifs sur le plan primitif commun aux deux roues plates.

Le **cycle de taillage**, dans ce cas, est différent de celui représenté sur la figure 35. La figure 37 décrit un taillage continu sur le pourtour de la pièce (taillage similaire à celui de la fraise-mère pour engrenages cylindriques).

### 3.4.3.3 Taillage sans génération par la méthode des enveloppes

Il suffit de se reporter au paragraphe 3.4.2.3 correspondant aux machines Gleason, et à la figure 37.

## 3.4.4 Obtention du bombé longitudinal relatif

Dans les dentures Gleason, Oerlikon ou Klingelnberg, nous pouvons signaler qu'il est prévu de produire un bombé longitudinal relatif des flancs conjugués du pignon et de la roue d'un engrenage, en modifiant certains éléments des fraises ou par utilisation de fraises de conception spéciale. Nous n'entrerons pas dans le détail dans cet article.

## 3.4.5 Contrôle de portée de denture

Dans le cas d'engrenages concourants ou gauches, la portée des dentures conjuguées est très influencée par tout défaut de positionnement des organes. Il existe des bancs de contrôle de portée permettant de repérer la position relative correcte qui devra être ensuite reproduite dans le carter de l'engrenage.

Des bancs de rodage sont généralement utilisés, surtout pour des engrenages avec dentures traitées.

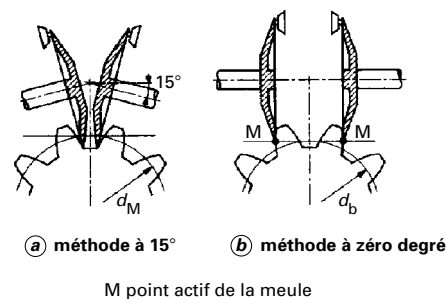
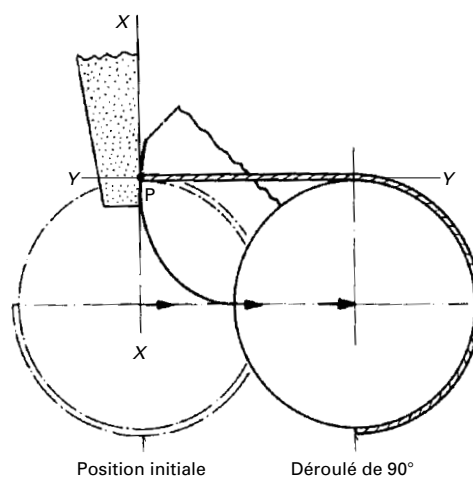
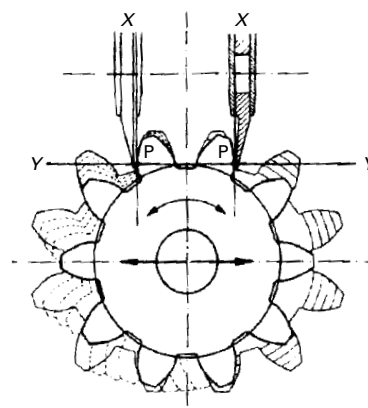


Figure 39 – Procédés MAAG de rectification des roues cylindriques par génération



(a) arc de roulement d'obtention de la développante



X-X' axes des deux meules  
Y-Y' plan tangent au cercle de base

(b) génération de la pièce

Figure 40 – Génération des flancs de dents en développante par la méthode MAAG de rectification à 0°

## 4. Rectification d'engrenages cylindriques

### 4.1 Rectification par génération

#### 4.1.1 Procédés MAAG

La rectification s'effectue à partir d'une **crémaillère génératrice** matérialisée par les deux plans contenant l'arête active de deux meules. Selon la disposition de ces deux meules, nous distinguons deux méthodes (figure 39).

■ La méthode de rectification la plus ancienne est celle avec des meules à  $15^\circ$  (figure 39a) ;  $d_M$  est le diamètre primitif de génération de la roue rectifiée.

■ La méthode de rectification avec des meules à  $0^\circ$  est donnée figure 39b ;  $d_b$  est le diamètre de base de la développante.

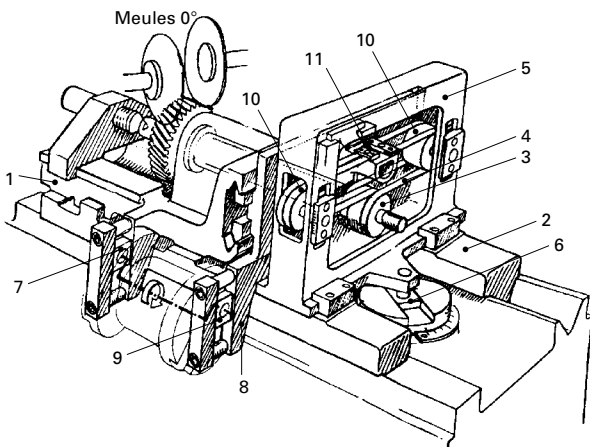
● La figure 40 donne le **principe** de génération de la méthode dite à  $0^\circ$ . X-X est le plan de la meule, Y-Y le plan des rubans de roulement, c'est-à-dire le plan primitif tangent au cercle de base.

Les deux meules sont parallèles entre elles et se présentent sous un angle de pression de rectification de  $0^\circ$  (d'où le nom de la méthode). Elles touchent les flancs de dents au point P par le point le plus bas de leur bord intérieur.

● La figure 41 donne la **cinématique** d'une machine MAAG rectifiant suivant la méthode « zéro degré ».

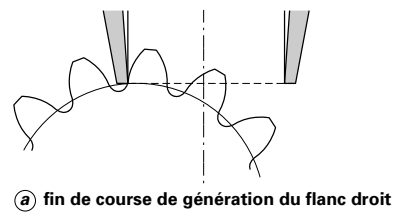
● La figure 42 montre le **principe de rectification** avec la génération complète d'une paire de flancs :

- a) flanc droit rectifié ;

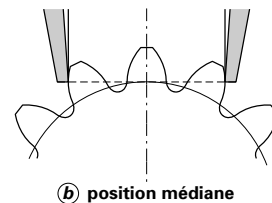


- 1 translation transversale du chariot de génération
- 2 glissière du chariot transversal
- 3 galet de roulement
- 4 rubans alternés reliés au bâti
- 5 bâti support des rubans
- 6 coulisseau pour hélice
- 7 maneton réglable
- 8 règle de l'excentrique
- 9 excentrique
- 10 disques auxiliaires
- 11 fixation des rubans de roulement

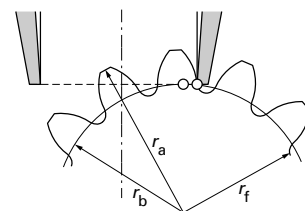
Figure 41 – Cinématique d'une machine MAAG rectifiant suivant la méthode à  $0^\circ$



(a) fin de course de génération du flanc droit



(b) position médiane



(c) fin de course de génération du flanc gauche

- $r_a$  rayon de tête  $= r + 1$  module (théorique)
- $r_b$  rayon de base  $= r \cos \alpha$
- $r_f$  rayon de fond de dent  $= r - 1,25$  module (théorique)

$$r = Z \times \text{module}$$

Figure 42 – Rectification avec génération complète d'une paire de flancs

b) pièce en position médiane ;

c) flanc gauche rectifié.

Cette méthode de rectification est aujourd'hui la plus utilisée.

■ La machine MAAG, qui utilise des meules *assiettes*, possède un dispositif permettant le rattrapage de l'usure de la meule, en cours de rectification, et également le rattrapage de l'usure de réaffûtage automatique de cette meule. De ce fait, on peut considérer que les meules occupent, pendant le cycle de rectification, une position toujours identique.

Suivant le type de machine, ces équipements permettent la rectification d'engrenages cylindriques droits et cylindriques hélicoïdaux. Deux dispositifs équipent ces machines pour pouvoir réaliser des profils corrigés et des hélices corrigées (figure 43a et 43b).

#### 4.1.2 Procédés Reishauer

Le procédé Reishauer est un procédé de rectification par génération qui utilise une meule ayant la forme d'une vis sans fin. Nous pouvons facilement rapprocher ce procédé avec celui du taillage par fraise-mère (§ 2.2). Les rotations de la meule et de l'engrenage à rectifier sont continues et conjuguées. La machine que nous allons évoquer est une machine à commande numérique du type RZ 301 S.

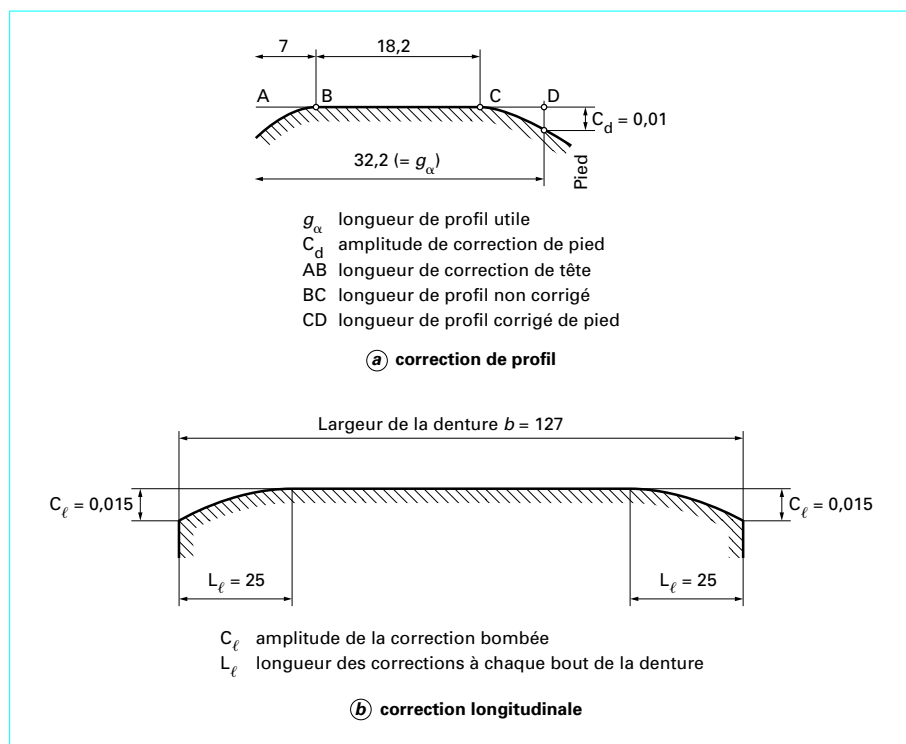


Figure 43 – Corrections de profils et correction d'hélice

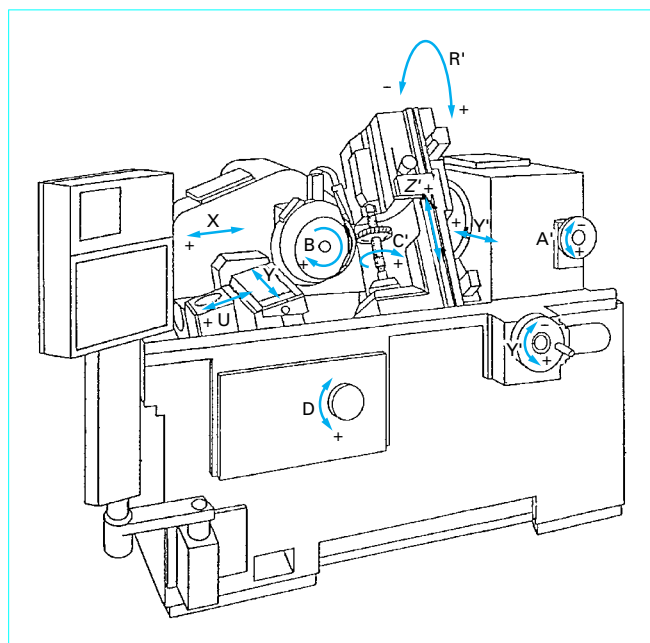


Figure 44 – Axes des mouvements d'une machine à commande numérique utilisant le procédé Reishauer

■ Étudions les différents **mouvements** de la machine (figure 44) :

- X : approche chariot porte-meule,
- V : déplacement du chariot de retailage meule (transversal),

- U : recul du chariot de retailage meule,
- B : rotation de la meule,
- C' : rotation porte-pièce,
- Z' : mouvement monte et baisse chariot porte-pièce (coulisseau),
- Y' : manivelle de recul du porte-pièce,
- A' : inclinaison du coulisseau porte-pièce (manivelle) indicateur,
- D : indicateur de stabilisation du faux-rond pièce,
- Y : mouvement de recul du porte-pièce,
- R : mouvement d'inclinaison du coulisseau porte-pièce.

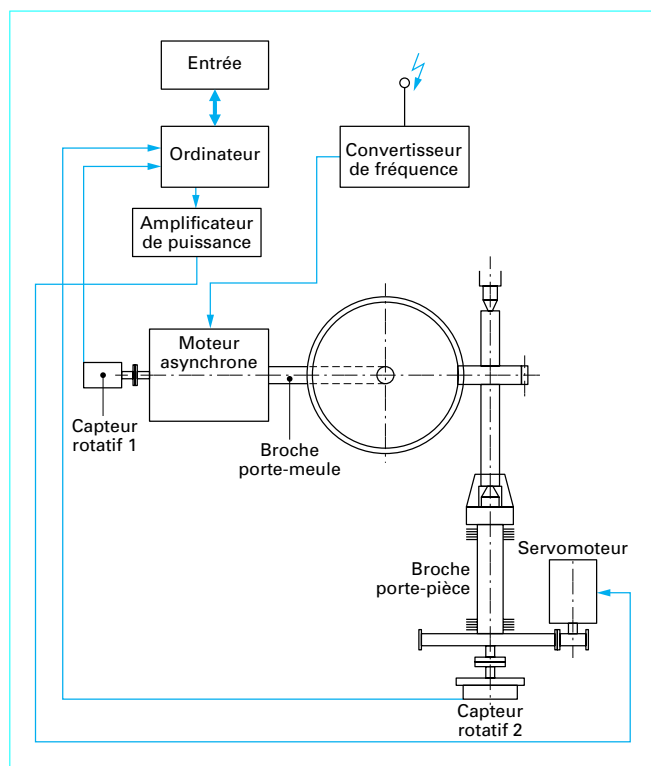
■ La figure 45 montre les **commandes** de la meule et de la pièce.

Un moteur asynchrone entraîne directement la broche porte-meule. Un convertisseur de fréquence en règle la vitesse progressivement entre 1 100 et 1 900 tr/min. Un capteur rotatif est accouplé à l'extrémité arrière de la broche porte-meule ; par révolution de la broche, il fournit un nombre élevé d'impulsions électriques et il mesure continuellement la position angulaire de la meule-mère. Les impulsions sont la grandeur de référence pour l'entraînement réglé de la pièce.

Le moteur de pièce (un servomoteur à courant continu à grande vitesse de réaction) entraîne la broche porte-pièce par un engrenage précontraint (sans jeu) spécial ; la broche est accouplée elle aussi à un capteur rotatif WSG 2. L'ordinateur et l'amplificateur de puissance pilotent le moteur de pièce.

L'ordinateur règle avec une dynamique et une précision élevées la vitesse de rotation et la position angulaire de la broche porte-pièce conformément aux données entrées et à la grandeur de référence.

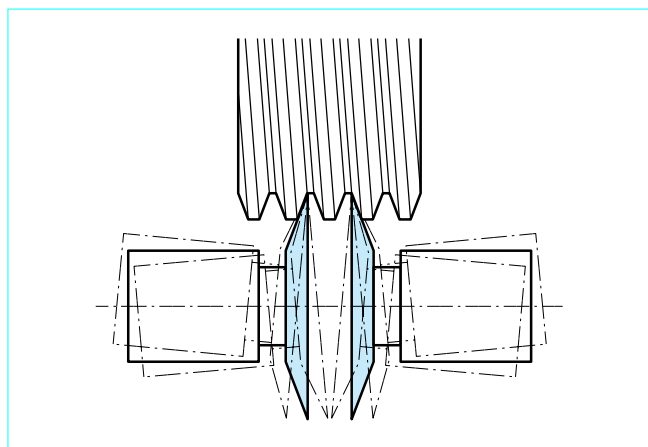
Pour la rectification des roues à denture hélicoïdale, un mouvement rotatif complémentaire de la pièce est nécessaire afin de pouvoir générer le pas d'hélice. Cette rotation est générée par un différentiel dans l'ordinateur. Les impulsions nécessaires sont fournies par une règle à impulsions qui mesure l'avancement de la pièce.



**Figure 45 – Commande de la meule et de la pièce d’une machine à commande numérique utilisant le procédé Reishauer**

■ Une particularité de la machine réside dans son système de diamantage de la meule. Les molettes diamantées sont inclinables sur le dispositif de profilage (figure 46), ce qui permet, avec un angle de profil de la molette de 20°, par exemple de profiler également des angles de pression de 15° et 25°. Des molettes spéciales servent au défonçage du noyau afin de ménager les molettes diamantées.

La configuration des molettes diamantées permettent l’obtention de profils de denture.



**Figure 46 – Utilisation des molettes diamantées**

Ces profils peuvent être :  
— des profils théoriques ;  
— des profils comportant des corrections de tête de dent et des corrections de pied de dent (figure 43a).

Le constructeur préconise des meules de conception de la société Winterthur. Le tableau 3 précise les caractéristiques.

## 4.2 Rectification par meule de forme

La rectification par meule de forme s’effectue avec une meule-disque, dont le profil correspond au profil de l’entredent de l’engrenage. Dans ce genre de rectification, on peut citer certains constructeurs (cf. Doc.). Nous nous proposons de décrire les machines KAPP.

### 4.2.1 Principe de rectification de dentures intérieures

Nous allons étudier le principe d’une machine KAPP à rectifier les dentures intérieures (figure 47).

**Tableau 3 – Exemple de choix de meule : 38 A 60 L 5 V BE**

Nature de l’abrasif	Type d’abrasif	Grosueur du grain	Dureté ou grade	Structure	Type d’agglomérant	Référence du fabricant
38	A	60	L	5	V	BE
	A : abrasif alumineux	gros : 8-24	tendre A	espacement croissant fermée O	V : vitrifié	propre à chaque fabricant
	: carbone de silicium	moyen 30-60	moyen L	moyenne 6	B : résinoïde	
Ensemble de lettres ou chiffres et une lettre ou chiffres		fin : 70-180	dur Z	ouverte 14	R : rubber	
		très fin : 220-600			E : Shellac	

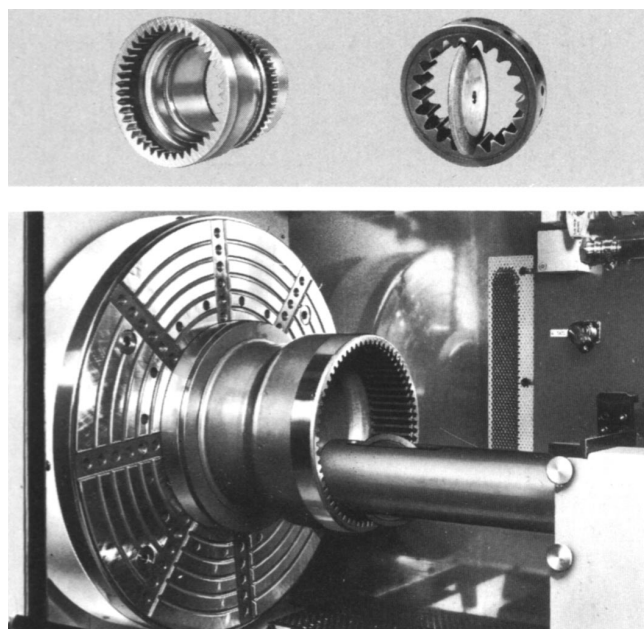


Figure 47 – Machine à rectifier les dentures intérieures [Doc. KAPP]

La figure 48 montre les différents axes de cette machine CNC de type VIG 332 assurant les divers mouvements.

**Axe A** : mouvement de rotation de la broche de division. En cas de vue sur la broche de division en sens - X :

+ A = rotation à gauche (= centre le sens de l'aiguille d'une montre) ;

- A = rotation à droite (= sens de l'aiguille d'une montre).

**Axe X** : mouvement linéaire du chariot de rectification :

+ X = mouvement de la table vers la droite ;

- X = mouvement de la table vers la gauche (dans le sens vers la broche de division).

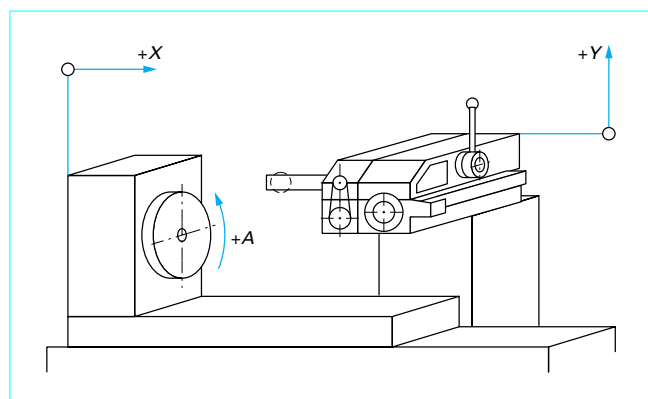


Figure 48 – Axes des mouvements d'une machine à commande numérique à rectifier les dentures intérieures [Doc. KAPP]

**Axe Y** : mouvement linéaire du déplacement vertical du support de rectification :

+ Y = mouvement du support vers le haut ;

- Y = mouvement du support vers le bas (= vers la table).

La **commande CNC** équipe les axes de la machine ; les **cycles de travail** sont automatiques, programmés et mémorisés. Les **déplacements** linéaires sont commandés par des vis à billes et le mécanisme diviseur avec vis duplex est entraîné par des servomoteurs.

Les **capacités de rectification** de ce modèle sont :

— module 1 à 6 mm ;

— diamètre intérieur de profils environ 20-450 mm.

La rectification par meule de forme est correctement obtenue si le profil de la meule est correct, et si le montage de cette meule sur le bras de rectification est bien positionné dans l'axe d'un entredent de l'engrenage.

Le tableau 4 et la figure 49 précisent les différents défauts de profils que l'on obtient si les paramètres de réglages de la machine sont imprécis :

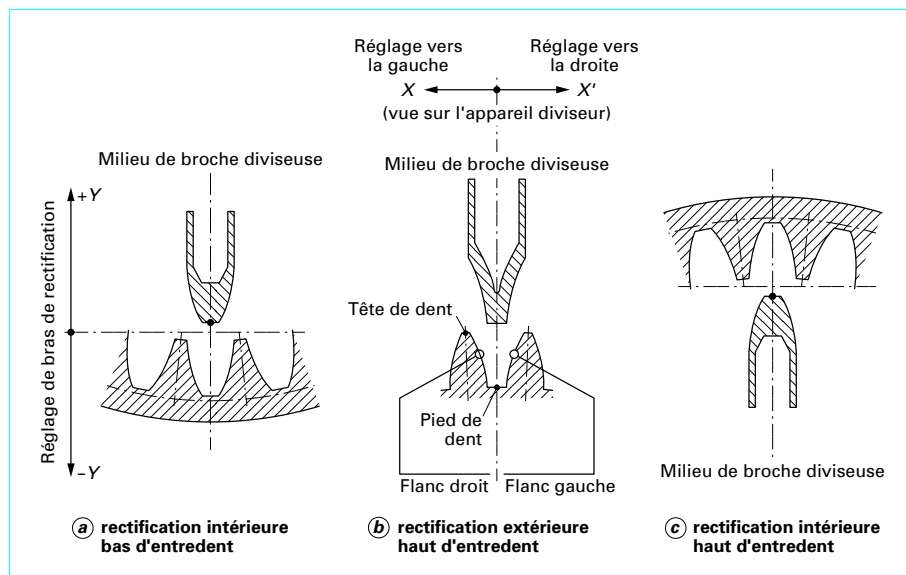
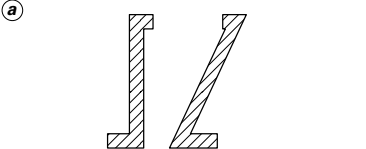
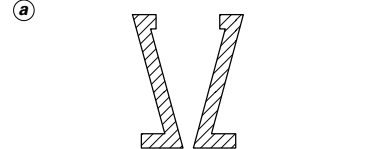
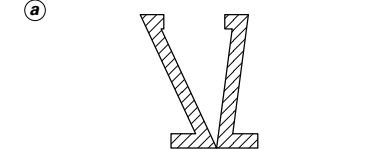
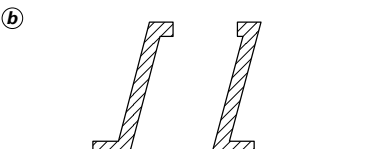
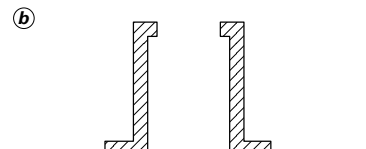
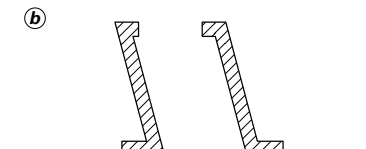
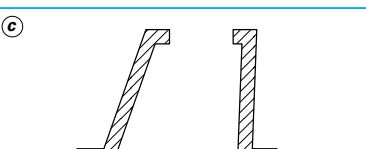
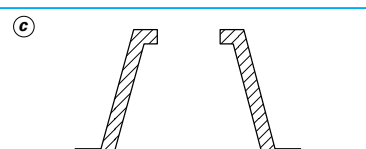
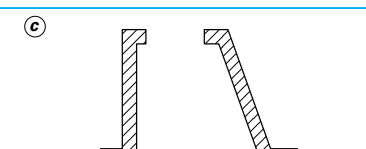


Figure 49 – Départ de l'enregistrement de développante en fonction du réglage de la machine



**Tableau 4 – Profils obtenus en fonction, d’une part, de la position de la meule, de la position de la meule par rapport à l’entredent, et, d’autre part, de la position de la meule en haut ou en bas de la couronne à rectifier**

Cas A	Meule à droite du milieu	Meule sur le milieu	Meule à gauche du milieu
Cas B	Meule à gauche du milieu	Meule sur le milieu	Meule à droite du milieu
Cas C	Meule à gauche du milieu	Meule sur le milieu	Meule à droite du milieu
À la limite de tolérance supérieure			
Au milieu de la gamme de tolérance			
À la limite de tolérance inférieure			

**Cas a :** rectification intérieure avec meule placée en bas de la couronne dentée (désaxage suivant  $Y + Y$ ) ;

**Cas b :** rectification d’un engrenage à denture extérieure (désaxage suivant  $XX'$ ) ;

**Cas c :** rectification intérieure (denture) avec meule placée en haut de la couronne dentée (désaxage suivant cas a).

Le tableau 3 donne les différents profils obtenus en cas de désaxage de la meule.

La figure 50 présente un bras de rectification, avec :

Z1, Z2, Z3, Z4 roues dentées ;

R1, R2 courroies crantées ;  
L1, L2, L3 paliers de roulement ;  
W arbre de meule ;  
M roue de contact.

#### 4.2.2 Meules utilisées

Il existe des meules de forme de différents diamètres sans aucun dressage pour la rectification.

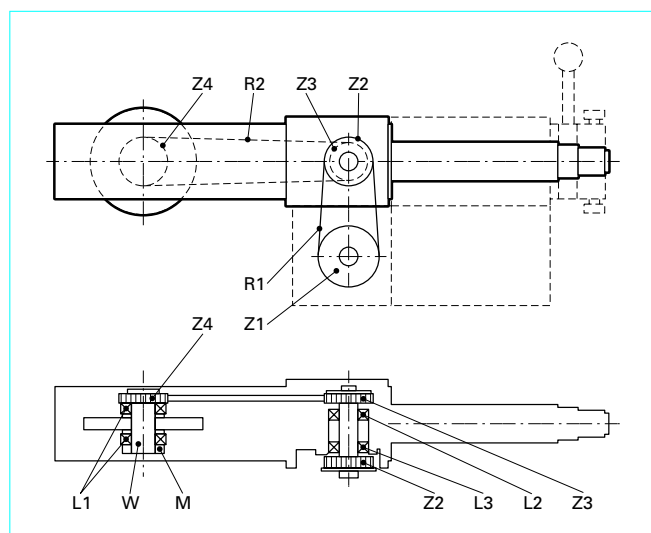
La **conception** d’une meule de forme est la suivante :

- un corps de base en acier traité avec profil de base rectifié ;
- un dépôt d’une mono-couche de carbure de nitrure de bore par procédé galvanique avec liant nickel, granulométrie de 30-600  $\mu\text{m}$  ;
- une qualité de forme suivant les exigences du secteur automobile ou de l’aéronautique ;
- la possibilité de regarnissage du dépôt de carbure de nitrure de bore.

## 5. Rectification des engrenages spiraux-coniques

### 5.1 Généralités

Les constructeurs existants sur le marché sont les sociétés Gleason, Klingelnberg et Oerlikon.



**Figure 50 – Bras de rectification**



Figure 51 – Rectifieuse de précision WNC 80

Les machines Gleason du type 27 et 463 sont utilisées et, dans la nouvelle gamme, la machine Phoenix a pris le relais avec la numérisation des axes et du taillage de meules.

La société Klingelnberg a commercialisé ses machines à commande numérique du type, entre autres, WNC 30 et WNC 80. Ces machines rectifient les dentures Gleason, Klingelnberg et Oerlikon. Nous nous proposons d'étudier particulièrement la machine WNC 80 de Klingelnberg. Nous allons mettre en évidence la technologie de cette machine grâce à l'application de la CNC des axes et la numérisation du système de taillage des deux meules. Une meule est destinée à la rectification du flanc convexe, l'autre destinée à la rectification du flanc concave.

La **machine WNC 80** est une **rectifieuse de précision** pour la finition des engrenages coniques à denture hélicoïdale (figure 51).

Elle dispose d'une tête de meule double avec deux broches porte-meules pour meules-boisseaux circulaires. Le mouvement par excentrique de la meule est une spécialité technique. Selon le nombre de tours déterminé pour l'excentrique, il se produit un palpage et un retrait continu de la pièce à usiner par la meule. L'huile de meulage a ainsi suffisamment de temps pour atteindre les emplacements où a lieu la rectification. La conséquence en est un danger minimal de surchauffe de meulage pour un enlèvement très élevé de matériau. Naturellement, le mouvement par excentrique n'a aucune influence sur la rigidité de la broche porte-meule ou sur la qualité de surface des profils de dents.

L'unité de diamantage intégrée permet le profilage des outils à l'intérieur de la machine. Le positionnement de l'outil de profilage du diamantage permet de plus l'emploi d'un seul rouleau diamant pour tous les cas d'utilisation.

## 5.2 Principe de la rectifieuse d'engrenages coniques

Cette rectifieuse possède six axes commandés numériquement (figure 52) :

- axe Y : balancier de développante ;
- axe Z : axe de développante roue d'usinage ;
- axe X : avance en plongée ;
- axe A : chariots transversaux ;
- axe V : cote de montage ;
- axe W : déplacement axial ;
- axe TK : réglage angle primitif.

Le réglage de l'angle primitif de référence devra être fait manuellement à la machine. La machine WNC 80 est équipée d'un enco-

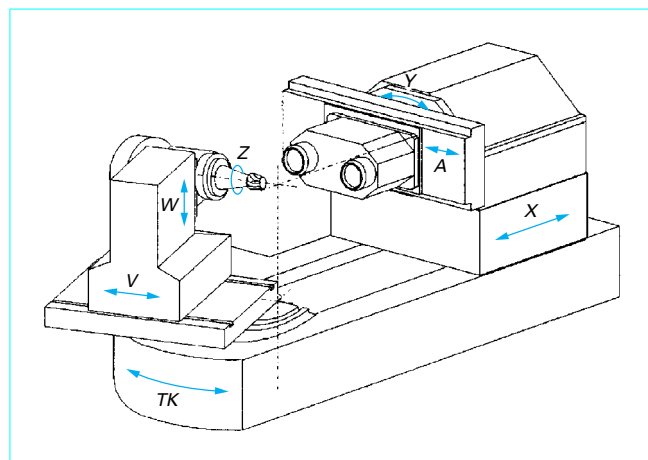


Figure 52 – Axes des mouvements d'une rectifieuse d'engrenages coniques [WNC 80 de Klingelnberg]

deur électro-optique dans le milieu de la machine. L'angle primitif de référence est indiqué sur l'écran du système de commande et résulte de la position angulaire du pignon conique par rapport à la roue conjuguée.

La machine comporte trois éléments de base différents :

- le balancier de développante, sur lequel est fixé la tête de meule avec les deux broches de rectification et, ce faisant, représente la roue plate d'usinage ;
- la broche porte-pièce ;
- l'appareil diamantage.

## 5.3 Balancier de développante

Le balancier est porté par des grands paliers-glissoirs et mis en mouvement par une transmission à vis sans fin de haute précision. Sur ce balancier, un coulisseau transversal est monté pour régler l'excentricité. Ce coulisseau porte de plus un élément composé de deux broches porte-meules, d'un moteur à meuler et d'un moteur d'excentrique.

La broche porte-meule est montée dans un excentrique qui est lui-même actionné par un moteur d'excentrique. Grâce à ce mouvement excentrique supplémentaire, la meule est soulevée pendant la coupe juste avant le point de coupe, de sorte que de l'huile de coupe fraîche parvient au point de coupe.

## 5.4 Broche porte-pièce

La broche porte-pièce fonctionnant en coupe interrompue est fixée dans des paliers-glissoirs à la tête porte-pièce. Celle-ci peut être déplacée verticalement de telle sorte qu'on peut également rectifier des pignons coniques avec déplacement axial. Le porteur de broche porte-pièce est construit de façon fixe et disposé de façon à pivoter autour du centre de la machine. L'actionnement de la broche porte-pièce se fait par une servocommande et une transmission à vis sans fin assure la démultiplication.

À la partie arrière de la broche porte-pièce se trouve l'unité hydraulique pour serrer les pièces à usiner avec une barre de traction actionnée hydrauliquement. Le serrage des pièces à usiner se fait au moyen de ressort à disques et la précontrainte des ressorts à disques (desserrage de la pièce à usiner) se fait hydrauliquement.

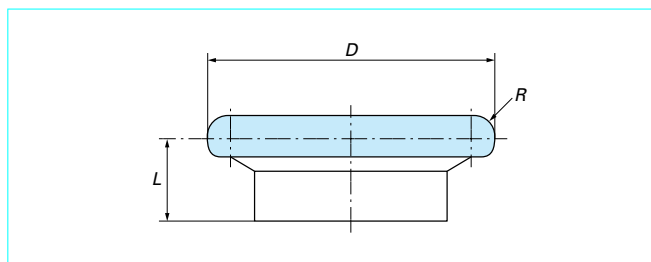


Figure 53 – Molette de diamantage meules

## 5.5 Diamantage

Le diamantage se trouve sur un montant à part. Avec l'aide d'un cylindre de pivotement hydraulique, le diamantage est placé par pivotement dans la plage d'opération de la machine. Sur le montant du diamantage, se trouve une broche de diamantage actionnée, sur le nez de laquelle le rouleau de diamantage (figure 53) est monté :  $R$  (rayon de la molette),  $L$  (distance moyenne de la face d'appui au milieu de l'épaisseur diamantée) et  $D$  (diamètre de la molette) sont des dimensions standards fournies par le constructeur Klingelnberg. Pour des problèmes d'interférences ou d'encombrements, le client peut déroger à ces dimensions standards.

La broche de diamantage se compose d'une broche motorisée qui est logée dans des coussinets de très haute précision. La broche de diamantage est une unité complète et ne peut être démontée que par le fabricant, le montage de cette broche devant répondre à de très hautes exigences d'exactitude.

## 5.6 Meules utilisées

La molette diamantée commandée par commande numérique permet de tailler les meules à volonté ; et on obtient tous les profils désirés. Ces profils de meules peuvent comporter des profils concaves, convexes, avec des corrections de tête ou pied de meules ; sur la figure 54, on distingue les paramètres  $D_1$ ,  $D_2$  et  $D_3$  nécessaires à la rectification.

$D_1$  : utilisation du flanc intérieur de la meule : ce diamètre  $D_1$  est à prendre en considération pour le réglage machine ;

$D_2$  : utilisation des 2 flancs de la meule ; ce diamètre  $D_2$  est à prendre en considération pour le réglage machine ;

$D_3$  : utilisation du flanc extérieur de la meule ; ce diamètre  $D_3$  est à prendre en considération pour le réglage machine.

## 5.7 Paramètres d'utilisation pour meules céramiques ou à liants en résine artificielle

Les figures 55a et 55b mettent en évidence :

- la meule taillée au profil théorique (figure 55a) ;
- la meule avec corrections (figure 55b).

● Les **paramètres d'utilisation** sont dépendants des spécifications des meules, de la qualité exigée pour la surface et la denture, de même que de la taille de la pièce à usiner.

- Acier trempé (rectification en développante/en plongée)
- Vitesse de taille : 15 - 30 m/s
- Découpe par passe : 0,03 - 0,15 mm
- Profondeur par passe : 0,05 - 0,5 mm
- Épaisseur de diamantage : 0,05 - 0,15 mm
- Vitesse de diamantage : 20 - 400 mm/min
- Nombre de passes : 1 - 10

### ● Spécifications des meules :

- Fabricant : par exemple Norton, Fag, Winterthur, Effgen
- Grain : 60 - 120

— Dureté H - K

Composition : Corindon raffiné, pouvant contenir également des particules frittées, par exemple carbure de silicium, oxyde d'aluminium, sol-gel (SG) entre autres.

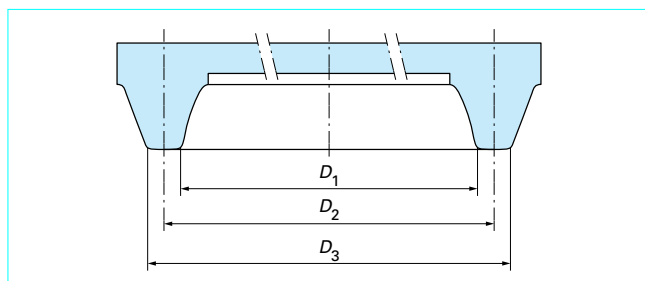
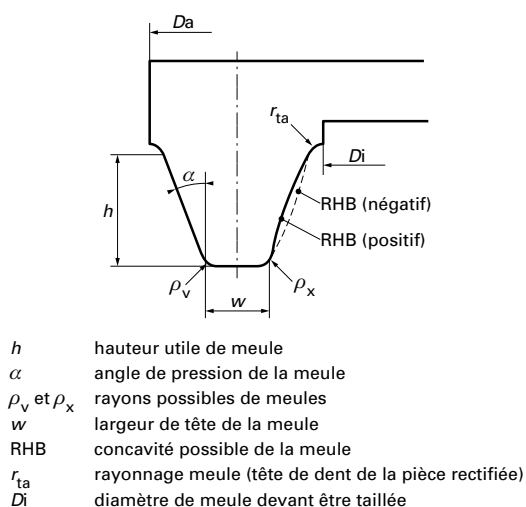
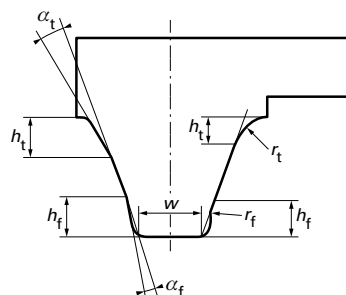


Figure 54 – Diamètre des meules utilisées



### (a) données de base de la géométrie de meule



- $\alpha_t$  rayonnage de la meule suivant un angle  $\alpha_t$   
 $r_t$  rayonnage de la meule suivant un rayon  $r_t$   
 $h_t$  hauteur de meule modifiée  
 $h_f$  hauteur de meule modifiée  
 $\alpha_f$  rayonnage de la tête de la meule suivant un angle  $\alpha_f$   
 $r_f$  rayonnage de la tête de la meule suivant un rayon  $r_f$   
 $w$  largeur de tête de la meule

### (b) dépouille de tête et de pied avec angle (à gauche) ou rayon (à droite)

Figure 55 – Données de base de géométrie de meule

# Taillage et rectification des engrenages : procédés

par **Jean KALETA**

*Ancien enseignant de l'Institut des Engrenages et des Transmissions (IET)  
Responsable Méthodes-Production Hispano-Suiza*

## Références bibliographiques

- [1] HENRIOT (G.). – *Traité théorique et pratique des engrenages - Tome II - Fabrication contrôle Lubrification - traitement thermique - ensemble à engrenages*. Bordas - Dunod. 1983.
- [2] BELLAIS (Cl.). – *Outils coupants. Taillage des roues cylindriques*. Traité Génie mécanique. B 7 097, 1996.
- [3] PRUVOT (F.C.). – *Machine-outil*. Traité Génie mécanique. B 7 120 à B 7 123, 1997.
- [4] PRUD'HOMME (G.). – *Commande numérique des machine-outils*. Traité Génie mécanique B 7 130, 1996.
- [5] BELLAIS (Cl.). – *Outils coupants. Brochage*. Traité Génie mécanique. B 7 087, 1997.

## Constructeurs-Fournisseurs

### Outil-crémaillère

MAAG  
SUNDERLAND

### Fraise-mère

BARBER  
BROWN  
CIMA  
DAVID  
HARBECK  
HINDEREICH  
KOEPPER  
LIEBHEER  
MIKRON  
MODUL  
PFAUTER

### Outil-pignon

FELLOWS  
LORENZ  
SYRES

### Fraise-disque

INGERSOLL

### Meules de forme

KAPP  
NILES  
OERLIKON (OPAL)  
ORCUTT  
RED-RING  
WINTERTHUR

### Engrenages spiraux-coniques

GLEASON  
KLINGELNBERG  
OERLIKON

### Engrenages cylindriques

EFFGEN  
FAG  
MAAG  
NORTON  
WINTERTHUR  
REISHAUER