



MODERN TIMES (les temps modernes, 1936)

Transmission de puissance par engrenage

Chapitres 29-30-31 du GSTI

29

ENGRENAGES ÉTUDE GÉNÉRALE

OBJECTIFS

- Décrire et indiquer les caractéristiques essentielles (terminologie, formules, étude cinématique, propriétés) des principaux types d'engrenages et des dentures en développante de cercle.

Les engrenages sont des composants mécaniques essentiels. Ils font partie des systèmes de transmission de mouvement et de puissance les plus utilisés, les plus résistants et les plus durables.

Ils sont normalisés. Les engrenages fabriqués avec la norme internationale ISO présentent l'avantage d'être facilement interchangeables et permettent des possibilités de fabrication plus économiques (conception type, méthodes de calcul normalisées, taillage et contrôle automatisés, équipements standards).

Lorsqu'il s'agit d'engrenages pour très grandes séries (automobiles...) les constructeurs s'écartent de ces standards afin d'optimiser les coûts.

Définition:

Les engrenages sont des composants mécaniques essentiels. Ils font partie des systèmes de transmission de mouvement et de puissance les plus utilisés, les plus résistants et les plus durables.

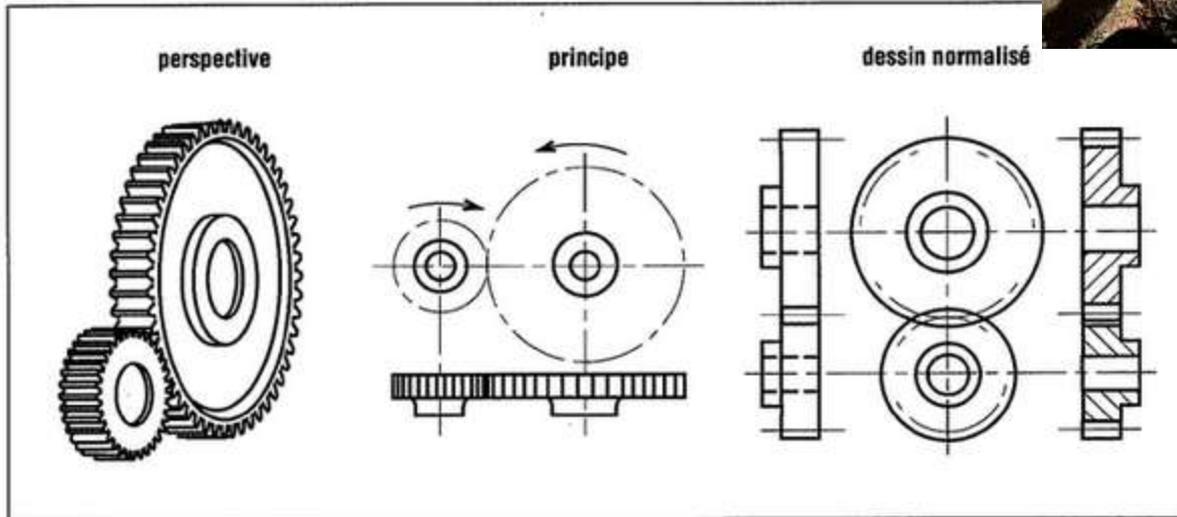
Ils sont normalisés. Les engrenages fabriqués avec la norme internationale ISO présentent l'avantage d'être facilement interchangeables et permettent des possibilités de fabrication plus économiques (conception type, méthodes de calcul normalisées, taillage et contrôle automatisés, équipements standards).

Lorsqu'il s'agit d'engrenages pour très grandes séries (automobiles...) les constructeurs s'écartent de ces standards afin d'optimiser les coûts.

I - Différents types d'engrenages

Définition : on appelle engrenage l'ensemble des deux roues dentées engrénant l'une

1. Engrenages droits à denture droite



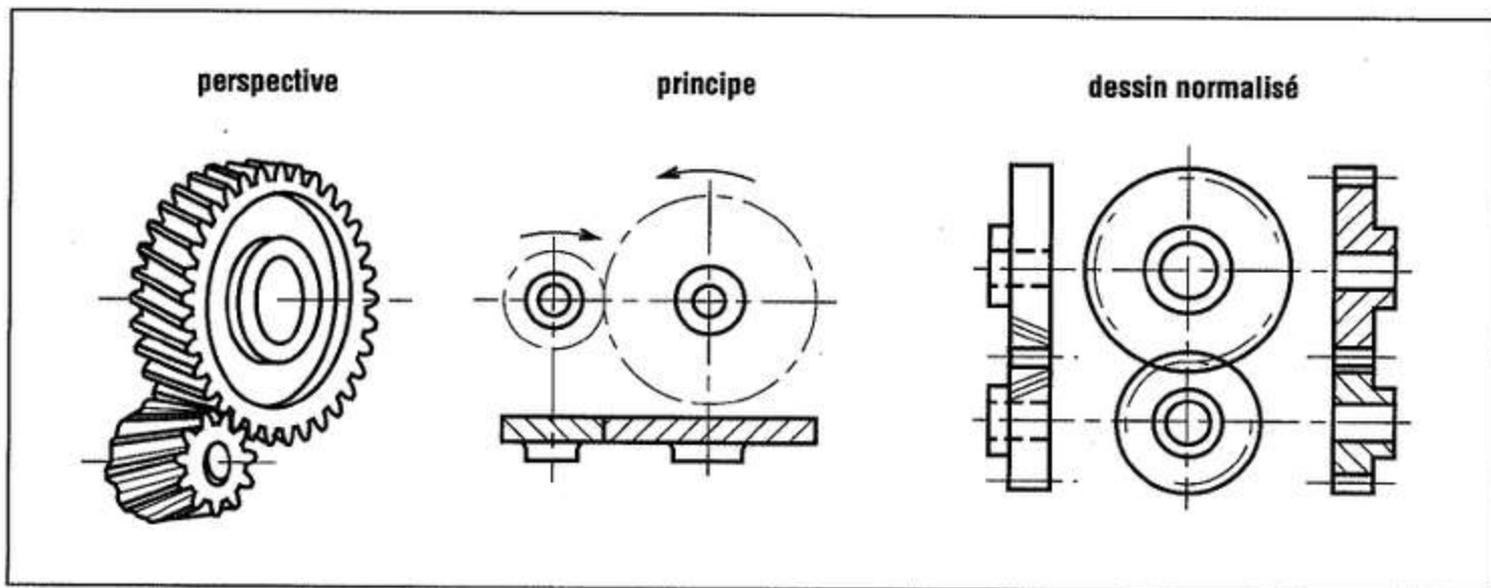
1. Engrenage droit à denture droite pour arbres parallèles.

Les plus simples et les plus économiques, ils sont utilisés pour transmettre le mouvement et la puissance entre deux arbres parallèles. Les dents des deux roues de l'engrenage sont parallèles à l'axe de rotation des arbres.

Du fait de leur relative simplicité, ils sont souvent utilisés pour introduire les relations de cinématique et les définitions normalisées concernant la géométrie des engrenages.



2. Engrenages droits à denture hélicoïdale



2. Engrenage droit à denture hélicoïdale pour arbres parallèles.

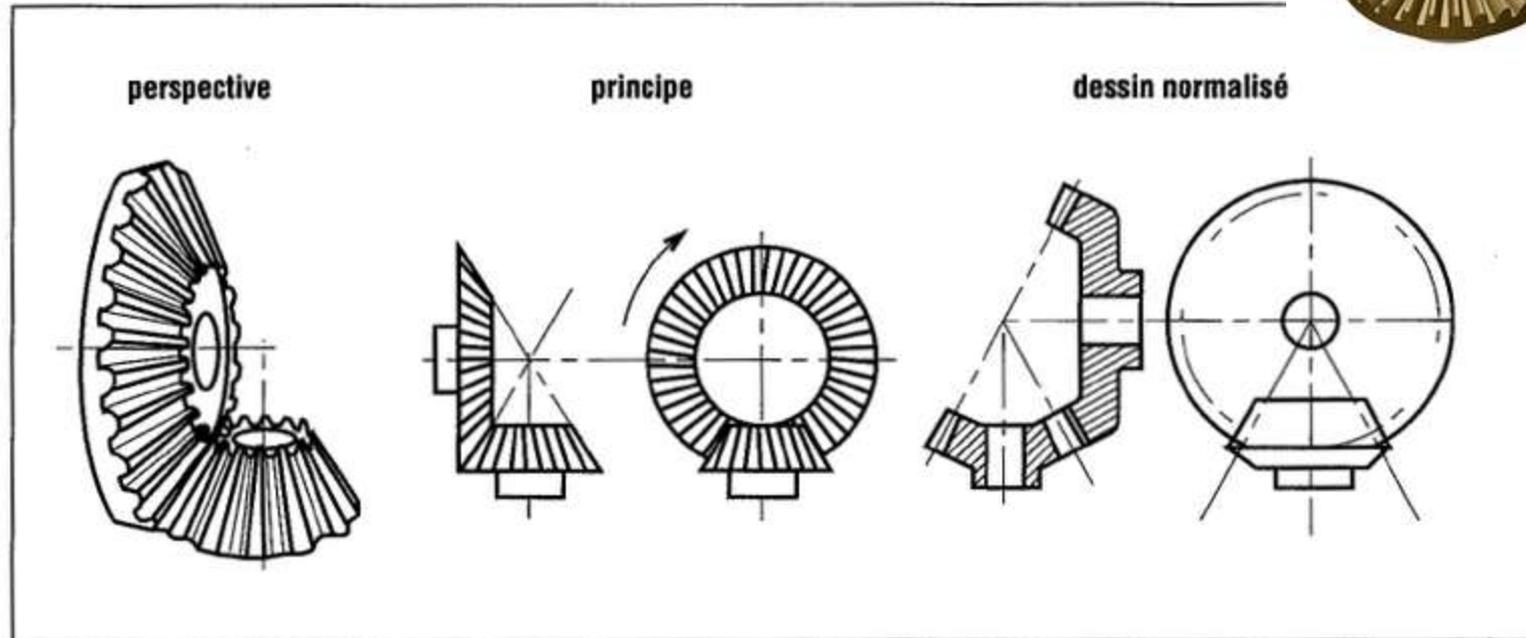
De même usage que les précédents, ils sont très utilisés en transmission de puissance ; les dents des roues sont inclinées par rapport à l'axe de rotation des deux arbres.

À taille égale, ils sont plus performants que les précédents pour transmettre puissance et couple. Du fait d'une meilleure progressivité et continuité de l'engrènement ils sont aussi plus silencieux.

L'inclinaison de la denture engendre des efforts axiaux, suivant l'axe de l'arbre, qui doivent être supportés par les paliers et des couples supplémentaires qui accentuent le fléchissement des arbres.

Remarque : ils sont parfois utilisés pour transmettre le mouvement entre des arbres non parallèles et sont appelés engrenages gauches.

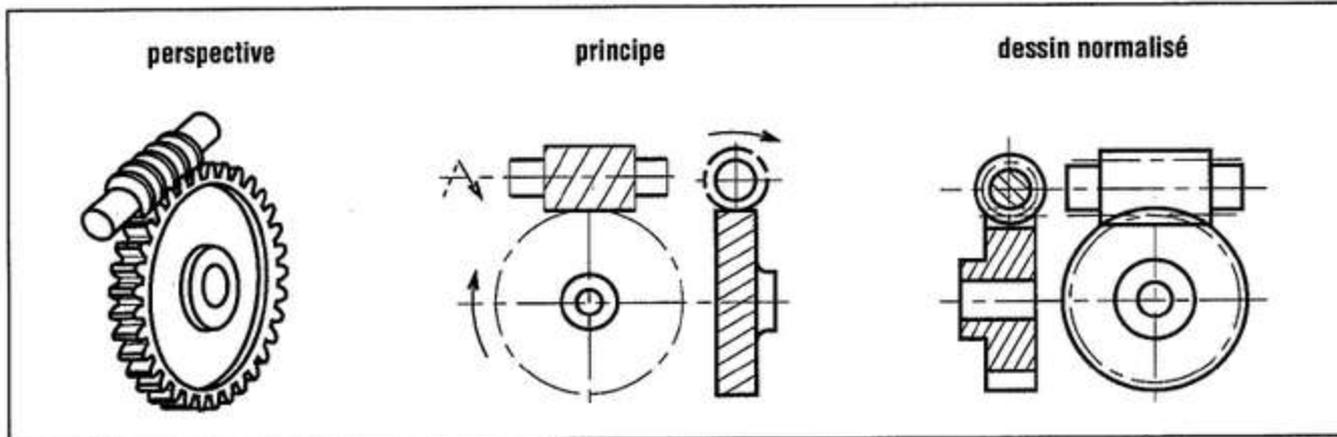
3. Engrenages coniques



3. Engrenage conique à denture droite pour arbres concourants.

Leurs dents sont taillées dans des surfaces coniques. Ils sont utilisés pour transmettre le mouvement entre des arbres concourants, perpendiculaires ou non. La denture peut être droite mais aussi hélicoïdale, ou spirale.

4. Engrenages roue et vis sans fin



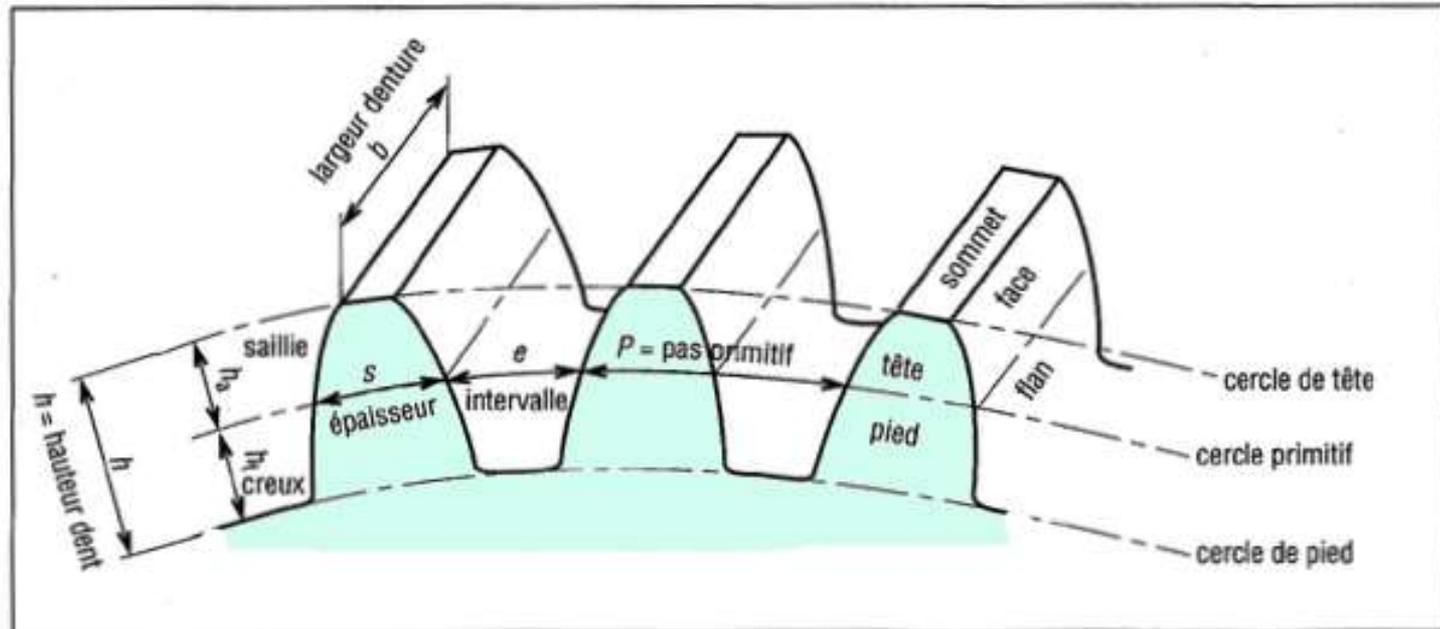
4. Engrenages roues et vis entre arbres orthogonaux.

L'une des roues ressemble à une vis et l'autre à une roue hélicoïdale. Le sens de rotation de la roue dépend de celui de la vis mais aussi de l'inclinaison de la denture, filet à droite ou à gauche. L'irréversibilité est possible.



II - Engrenages droits à denture droite

1. Définitions, terminologie et symboles normalisés ISO



7. Symboles et vocabulaire utilisés pour décrire la forme de la denture.

Diamètre primitif : diamètre de la roue de friction.

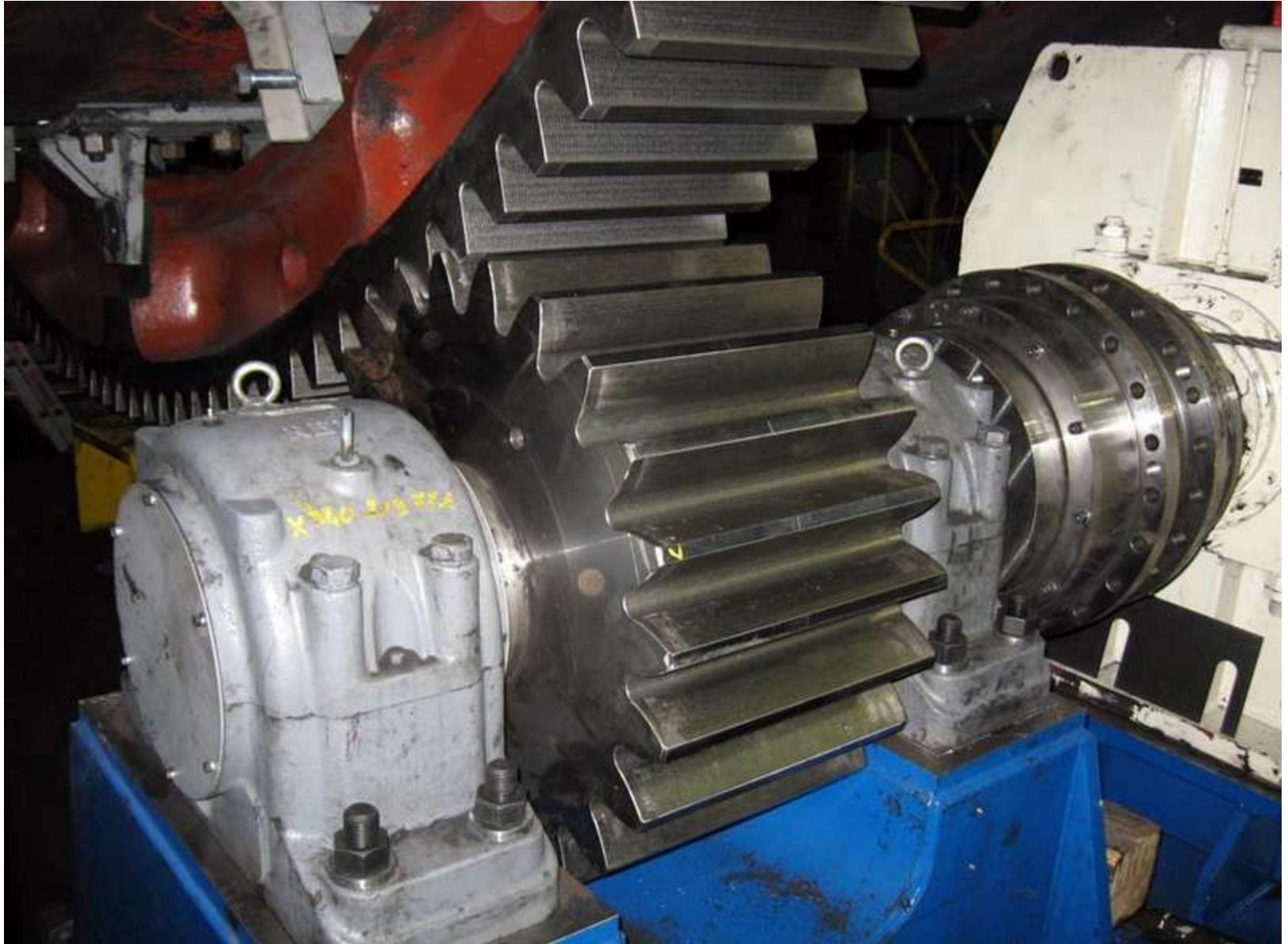
Saillie : ce qui dépasse du diamètre primitif.

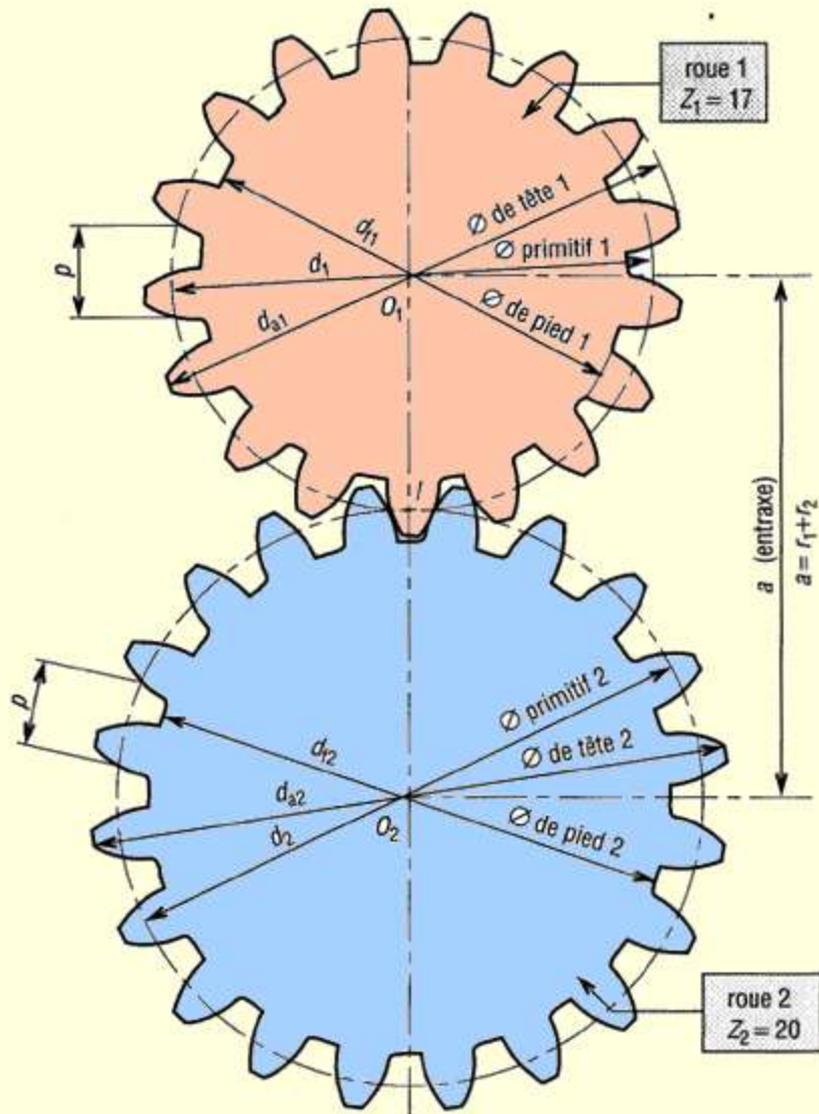
Creux : comme son nom l'indique. $>$ à la saillie.

Largeur de denture.

Pas primitif.







Diamètre de tête

Diamètre de pied

Diamètre primitif

Les diamètres primitifs sont les diamètres des roues de friction qui donneraient le même rapport de réduction :

$$\omega_2 = -\frac{r_{p1}}{r_{p2}} \cdot \omega_1$$

La puissance transmise par l'engrenage est égale à :

Puissance reçue par la roue 1 :

$$C_1 \cdot \omega_1$$

Puissance donnée par la roue 1 ou reçue par la roue 2 :

$$C_2 \cdot \omega_2$$

$$C_2 = C_1 \cdot (\omega_1/\omega_2) ; \quad C_2 > C_1$$

Valeurs normalisées du module m

valeurs principales en mm					valeurs secondaires en mm				
0,06	0,25	1,25	5	20	0,07	0,28	1,125	5,5	22
0,08	0,30	1,5	6	25	0,09	0,35	1,375	7	28
0,10	0,40	2	8	32	0,11	0,45	1,75	9	36
0,12	0,50	2,5	10	40	0,14	0,55	2,75	11	45
0,15	0,75	3	12	50	0,18	0,7	3,5	14	55
0,20	1,0	4	16	60	0,22	0,9	4,5	18	70

Caractéristiques et formules des engrenages droits à denture droite

caractéristiques	symboles ISO	observations et formules usuelles
vitesse angulaire	ω	$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \approx 0,1 n$ (unités : rad/s)
nombre de tours par minute	n	n_1 (roue 1) et n_2 (roue 2)
module	m	valeurs normalisées (tableau des modules)
pas primitif	p	$p = \pi m = 3,14159 m$ ($p = p_1 = p_2$)
nombre de dents	Z	Z_1 (roue 1) et Z_2 (roue 2)
rayon primitif	r	r_1 (roue 1) et r_2 (roue 2) ; $r = d/2$
diamètre primitif	d	$d_1 = mZ_1$ et $d_2 = mZ_2$
entraxe entre les 2 roues	a	$a = r_1 + r_2 = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{m(Z_1 + Z_2)}{2}$
largeur de la dent	b	$b = k \cdot m$ ($7 \leq k \leq 12$)
saillie	h_a	$h_a = m$
creux	h_f	$h_f = 1,25 m$
hauteur de dent	h	$h = h_a + h_f = 2,25 m$
diamètre de tête	d_a	$d_a = d + 2m$
rayon de tête	r_a	$r_a = r + m = d_a/2$
diamètre de pied	d_f	$d_f = d - 2,5m$
rayon de pied	r_f	$r_f = r - 1,25m = d_f/2$
épaisseur de la dent	s	$s_1 = e_2 = s_2 = e_1 = \pi m/2$ (avec jeu nul)
intervalle	e	$s_1 + e_1 = s_2 + e_2 = p$
angle de pression	α	valeur usuelle : $\alpha = 20^\circ$
rayon de base	r_b	$r_b = d_b/2$
diamètre de base	d_b	$d_b = d \cdot \cos \alpha$
pas de base	p_b	$p_b = p \cdot \cos \alpha$

a) Circonférence primitive : de périmètre ($\pi.d$), elle doit impérativement comporter un nombre entier de dents (Z) toutes placées à intervalles successifs égaux au pas primitif (p). Il en résulte que :

$$\pi.d = p.Z = \text{périmètre circonférence primitive.}$$

En posant :

$$m = p/\pi = \text{module}$$

l'expression se simplifie et devient :

$$d = m.Z$$

b) Pas primitif (p)

$$p = \frac{\text{circonférence primitive}}{\text{nombre de dents}} = \frac{\pi.d}{Z} = \frac{\pi.(mZ)}{Z} = \pi m = 3,141\ 59 m$$

c) Module (m)

Quel que soit le nombre de dents, toutes les roues de même module et de même angle de pression (α) peuvent être fabriquées à partir du même outil.

Pour limiter le nombre des outils et des systèmes de mesure, une série de modules a été normalisée (tableau p. 337).

L'épaisseur de la dent et sa résistance dépendent du choix du module. Ce choix ne doit pas être improvisé mais étudié et calculé (voir chapitre 31 : efforts sur les dentures).

Indices normalisés utilisés	
indice	observations
1	relatif au pignon
2	relatif à la roue
a	de tête
b	de base
f	de pied
n	réel (ou normal)
t	apparent (ou tangentiel)

On pose

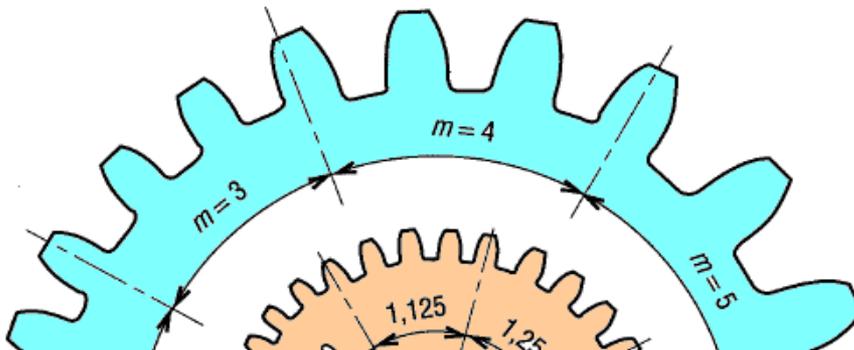
$$\text{Pas} = \pi . m$$

m est appelé **module**

$$\text{Circonférence} = \text{pas} . z$$

z : nombre de dents

$$\Rightarrow d_p = m . z$$



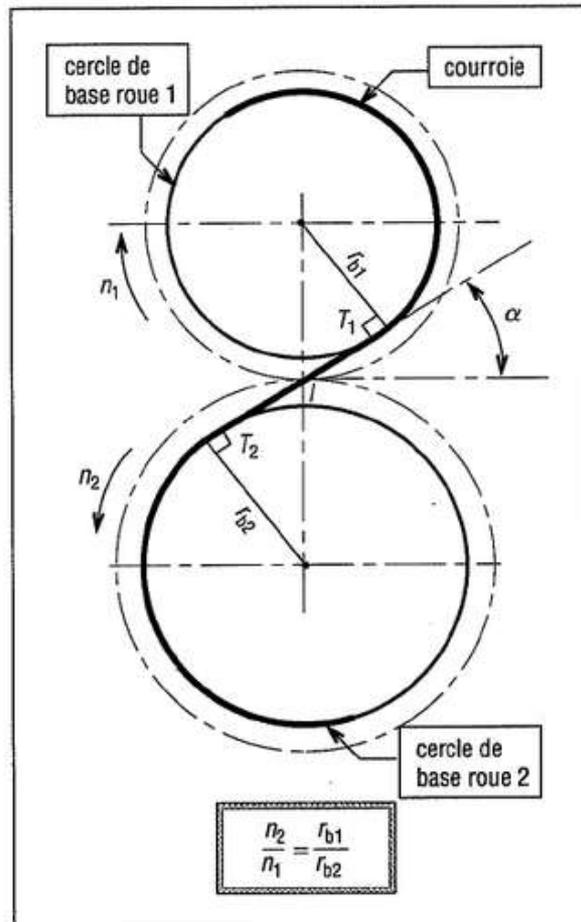
2. Étude cinématique

b) Propriétés et caractéristiques du profil en développante de cercle

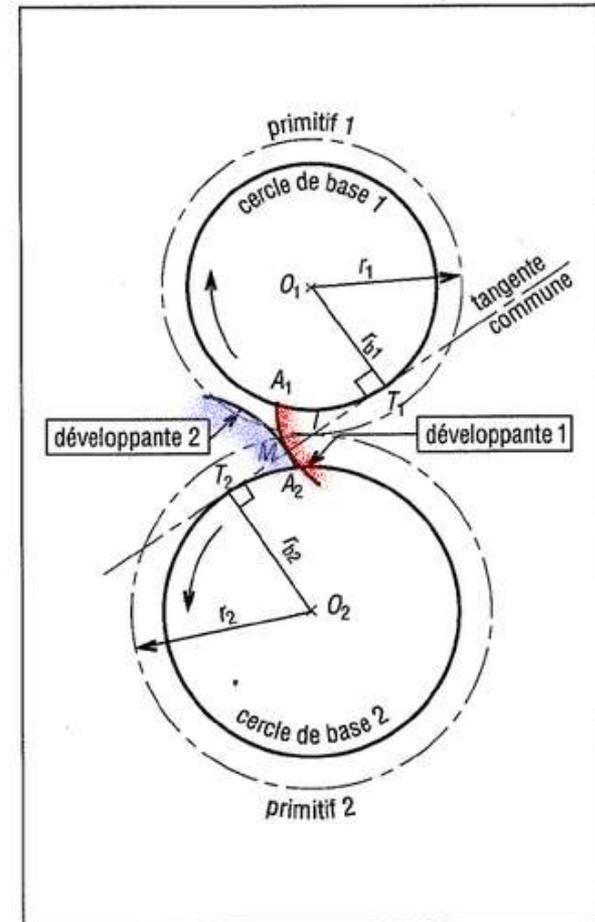
Le profil en développante de cercle est le plus utilisé ; il est insensible aux variations d'entraxes et se laisse tailler à l'aide d'outils relativement simples.

Le profil cycloïdal, également utilisé, est surtout employé en micromécanique.

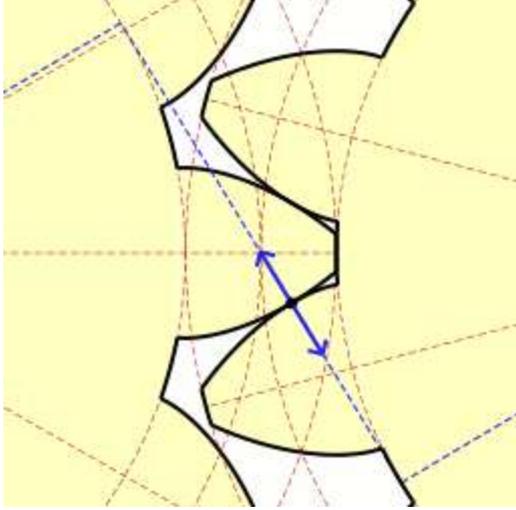
Propriété : il permet d'obtenir des roues avec de petits nombres de dents sans interférence de taillage. Inconvénient : il est sensible aux variations d'entraxes.



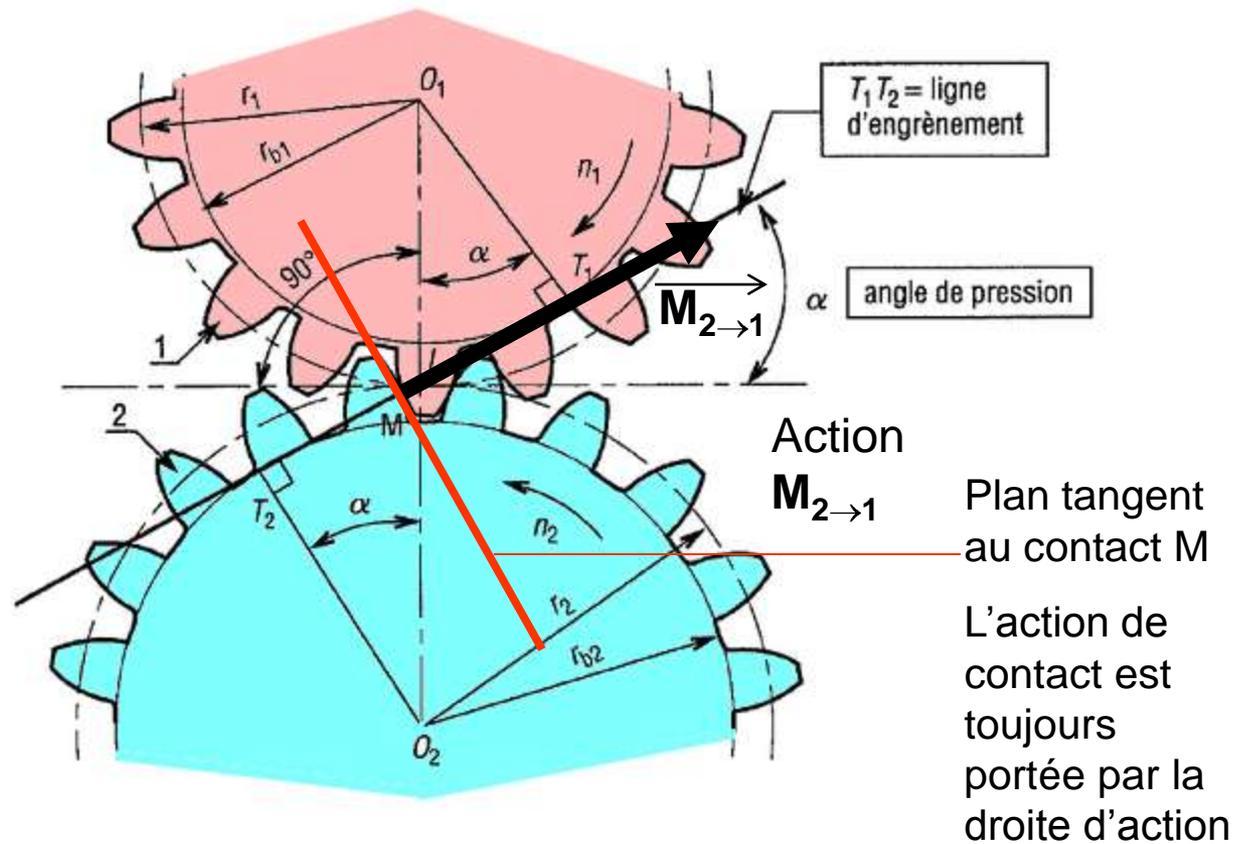
14. Analogie avec une transmission par courroie.



15. Cercles de base et cercles primitifs.

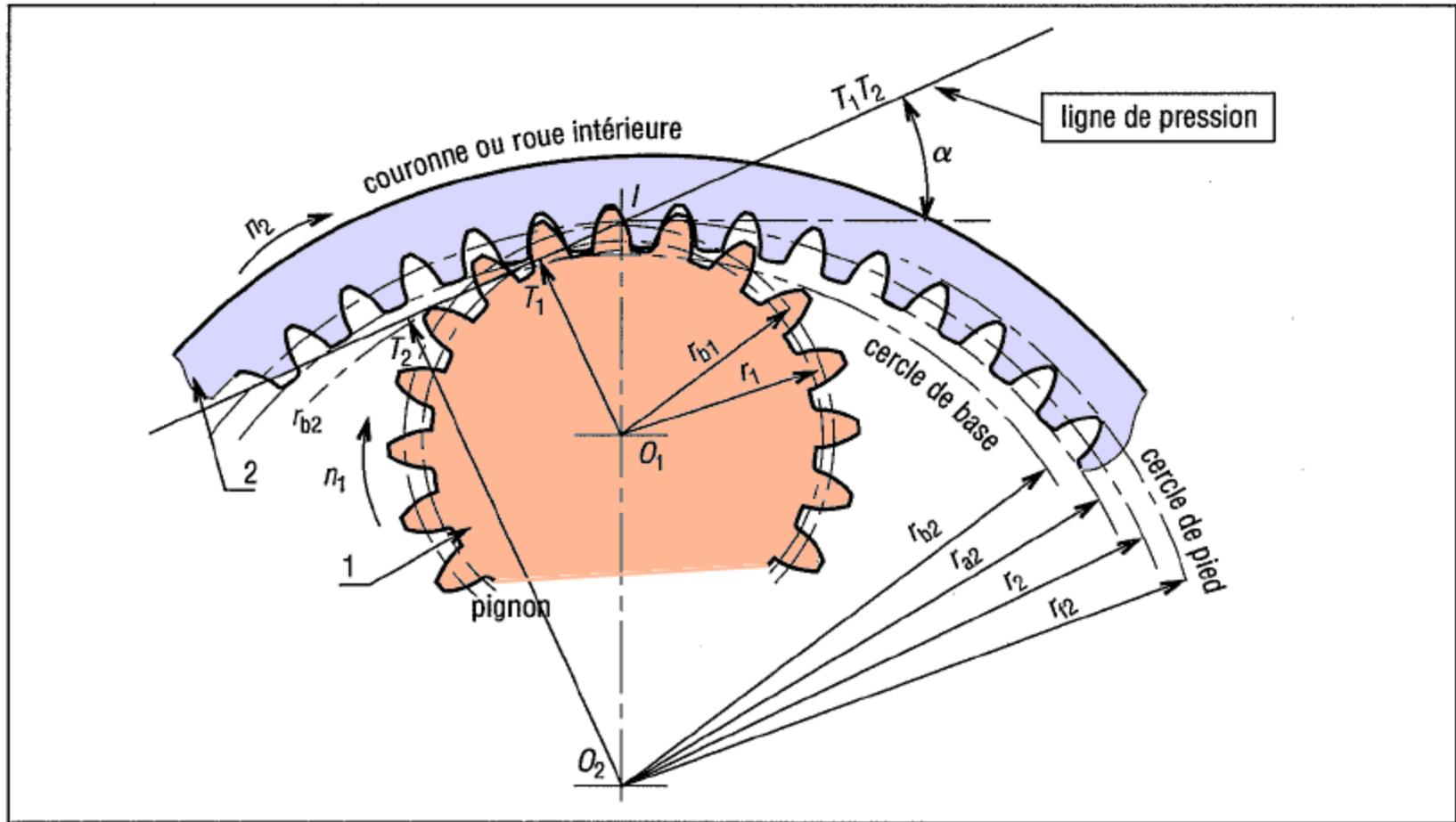






16. Angle de pression et ligne d'engrènement.

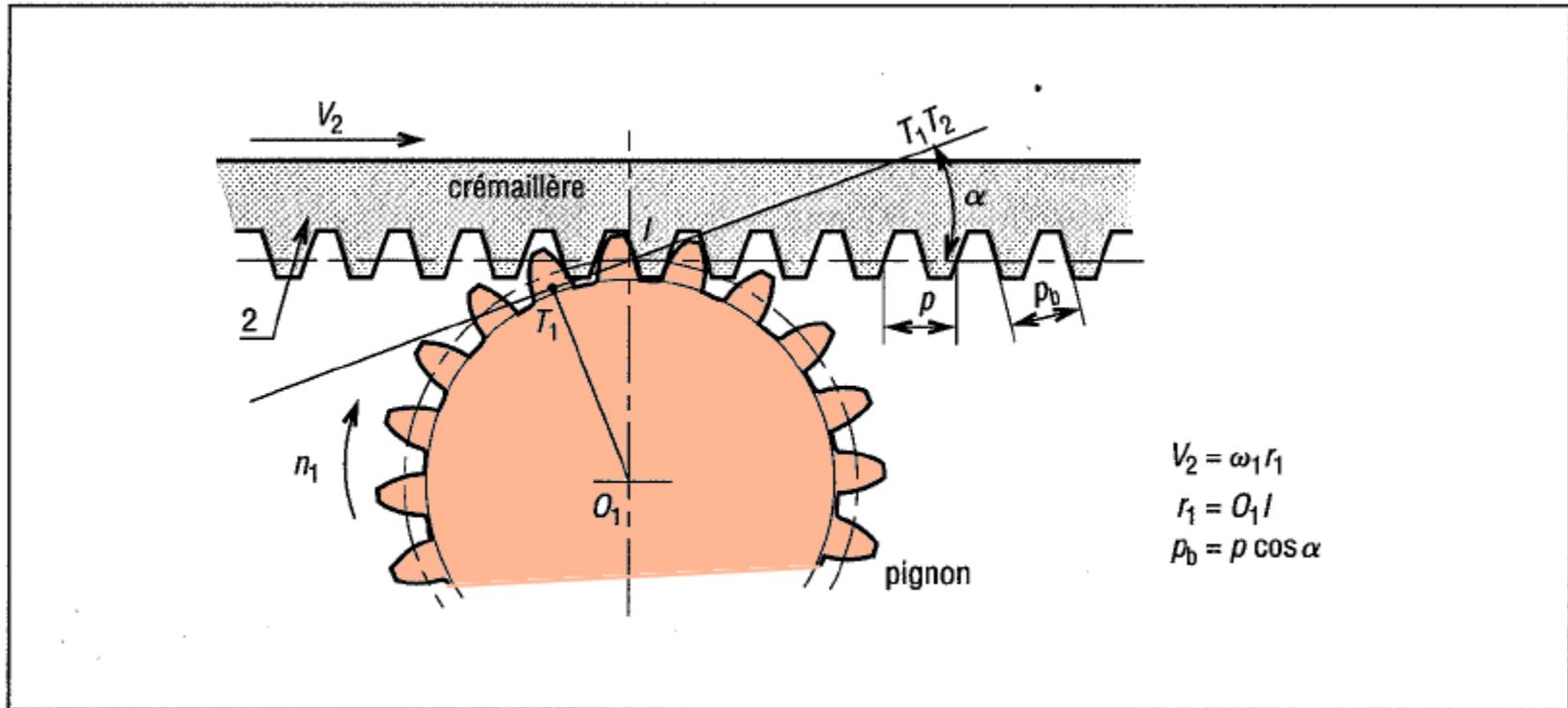
4. Cas des roues intérieures et des crémaillères



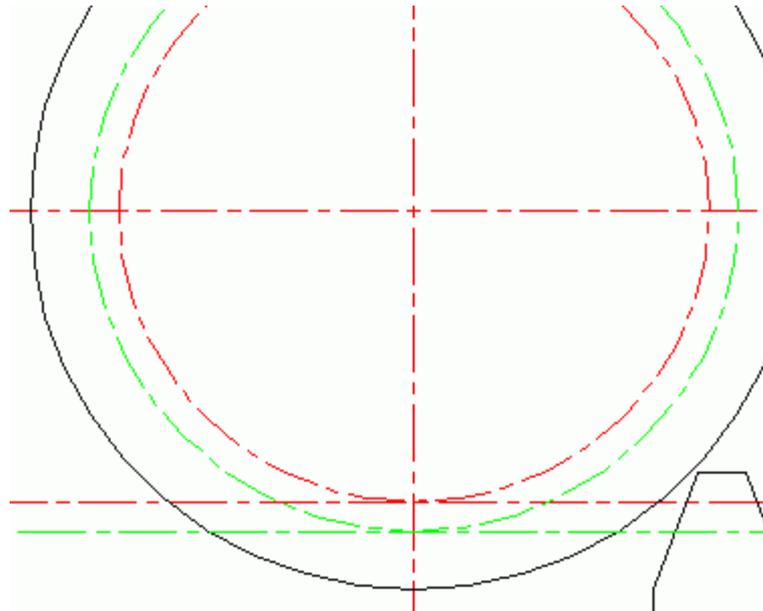
21. Cas d'un pignon et d'une roue intérieure.

La crémaillère est une roue de rayon infini. Elle est très utilisée en transformation de mouvement :

rotation \leftrightarrow translation

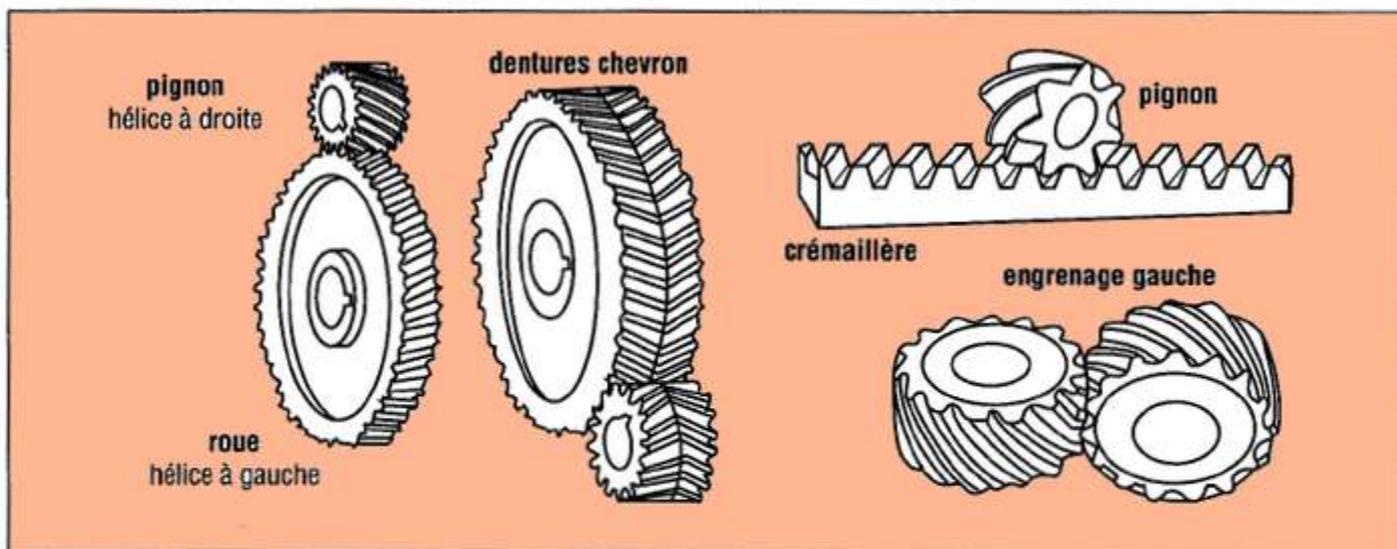


22. Cas d'un pignon et d'une crémaillère.



III - Engrenages droits à denture hélicoïdale

Ils transmettent le mouvement entre deux arbres parallèles. L'angle d'inclinaison de la denture, l'angle d'hélice, est le même pour les deux roues, mais en sens inverse.



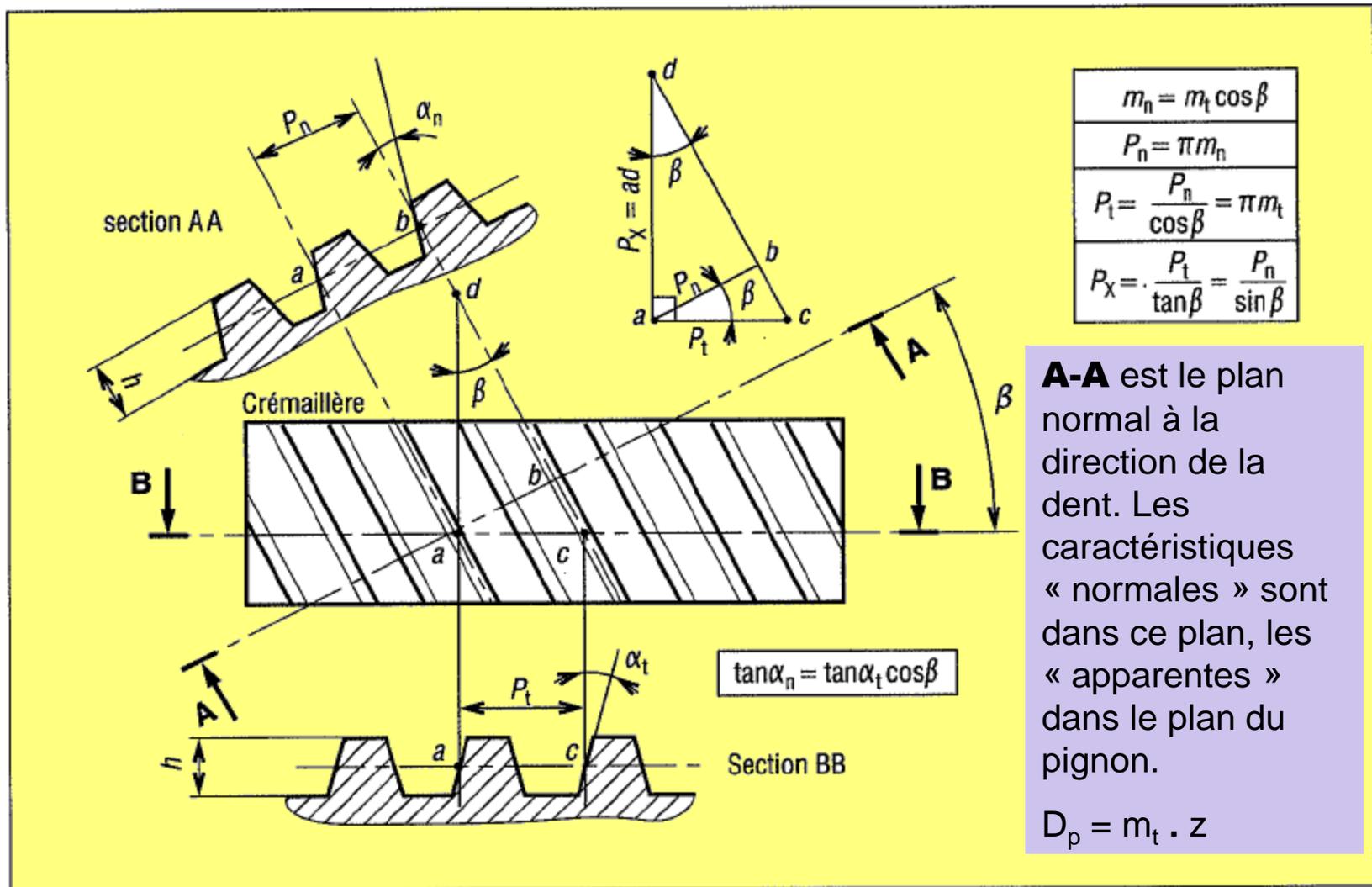
24. Différents types d'engrenages hélicoïdaux.

1. Comparaison entre dentures droites et dentures hélicoïdales

Avantages de la denture hélicoïdale : transmission plus souple, plus progressive et moins bruyante ; conduite plus grande : 2, 3 ou 4 couples de dents toujours en prise ; transmission d'efforts importants à vitesses élevées ; réalisation facile d'un entraxe imposé en faisant varier l'angle d'hélice.

Inconvénients : efforts supplémentaires dus à l'angle d'hélice (force axiale sur les paliers et augmentation des couples de flexion) et rendement un peu moins bon. L'utilisation est impossible sous forme de baladeur ; ces engrenages doivent toujours rester en prise.

2. Définitions et caractéristiques



25. Définition des principales caractéristiques à partir d'une crémaillère hélicoïdale.

Angle d'hélice β : il mesure l'inclinaison de la denture, ou de l'hélice, par rapport à l'axe de la roue ; les valeurs usuelles se situent entre 15 et 30° . De grandes valeurs de β amènent plus de douceur et de progressivité mais aussi des efforts axiaux plus grands. Un engrenage droit est un engrenage hélicoïdal avec $\beta = 0^\circ$.

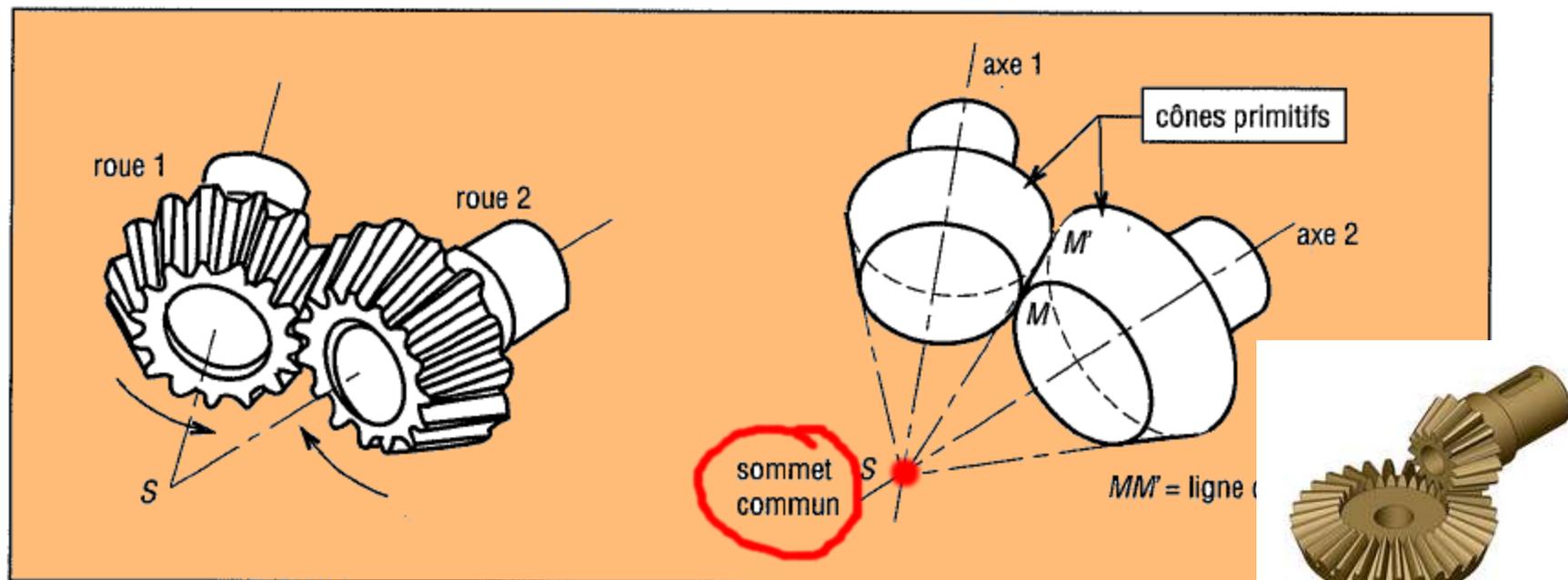
Grandeurs réelles (ou normales) : p_n , m_n et $\alpha_n (=20^\circ)$.
Elles sont normalisées et mesurées perpendiculairement à l'hélice.

Grandeurs apparentes (ou tangentielles) : p_t , m_t et α_t ne sont pas normalisées et dépendent de la valeur de β . Elles sont mesurées dans le plan de rotation de la roue (analogie avec une denture droite).

Entraxe a : il dépend de l'angle β . En faisant varier β on peut obtenir n'importe quel entraxe désiré, ce qui est particulièrement intéressant pour les trains d'engrenages.

Largeur b : pour des raisons de continuité et de progressivité la largeur b de la roue doit être supérieure au pas axial p_x ($b \geq 1,2p_x$ est nécessaire, valeurs usuelles : $b \geq 2p_x$).

IV - Engrenages coniques ou à axes concourants



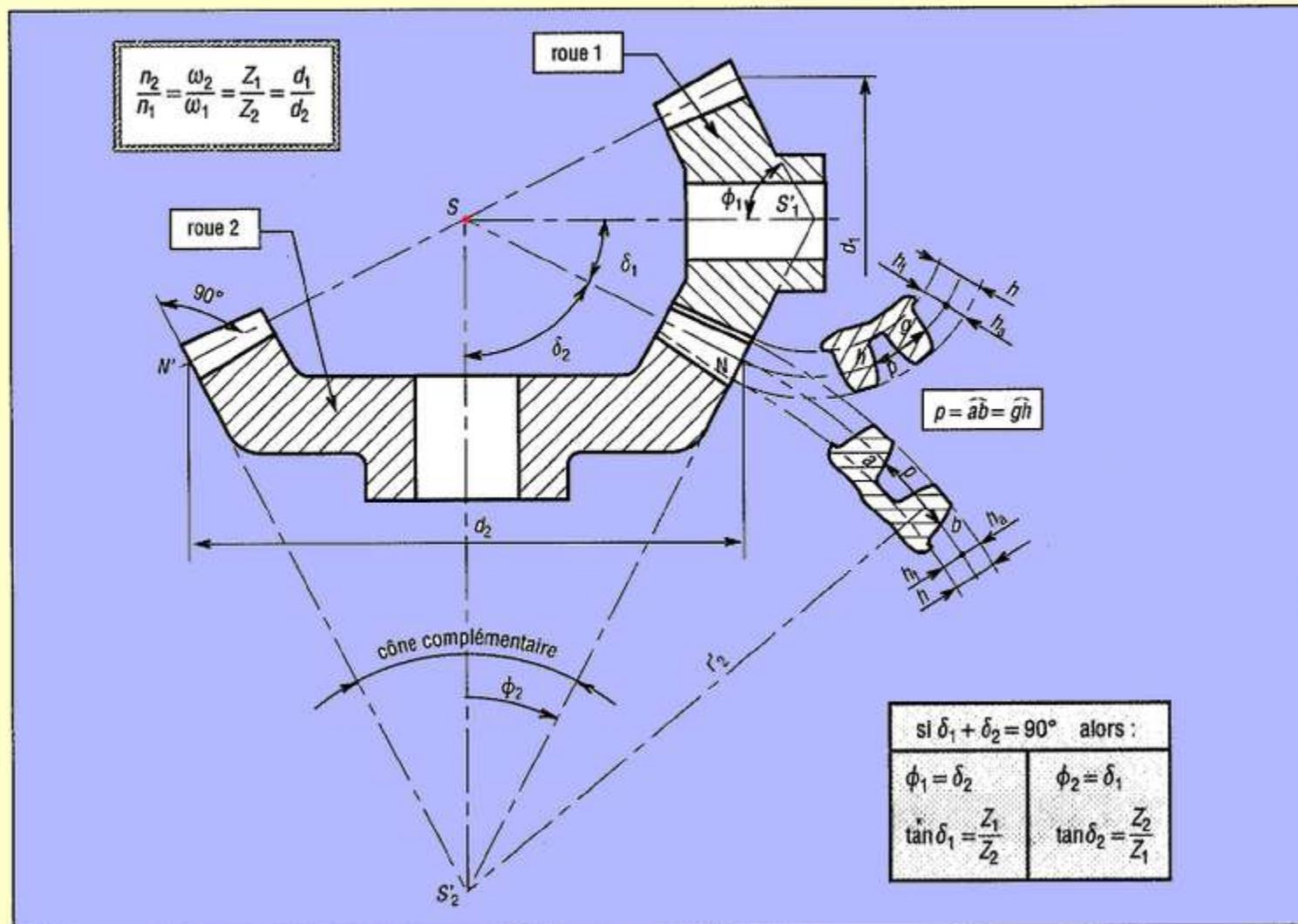
28. Engrenages coniques ou à axes concourants.

C'est un groupe important utilisé pour transmettre le mouvement entre deux arbres non parallèles dont les axes sont concourants ; les axes à 90° sont les plus courants.

Les surfaces primitives ne sont plus des cylindres mais des cônes (cônes primitifs). Les cônes sont tangents sur une ligne de contact MM' et leur sommet commun est le point S , c'est aussi le point d'intersection des axes de rotation des deux roues.

2. Caractéristiques des engrenages coniques à denture droite

La taille et la forme de la dent (module m , pas p , d , d_a , d_f , h , h_a , h_f) sont définies à partir du plus grand cercle ou sur l'extrémité la plus large de la denture.



30. Cas d'arbres perpendiculaires.

V - Engrenages roues et vis sans fin

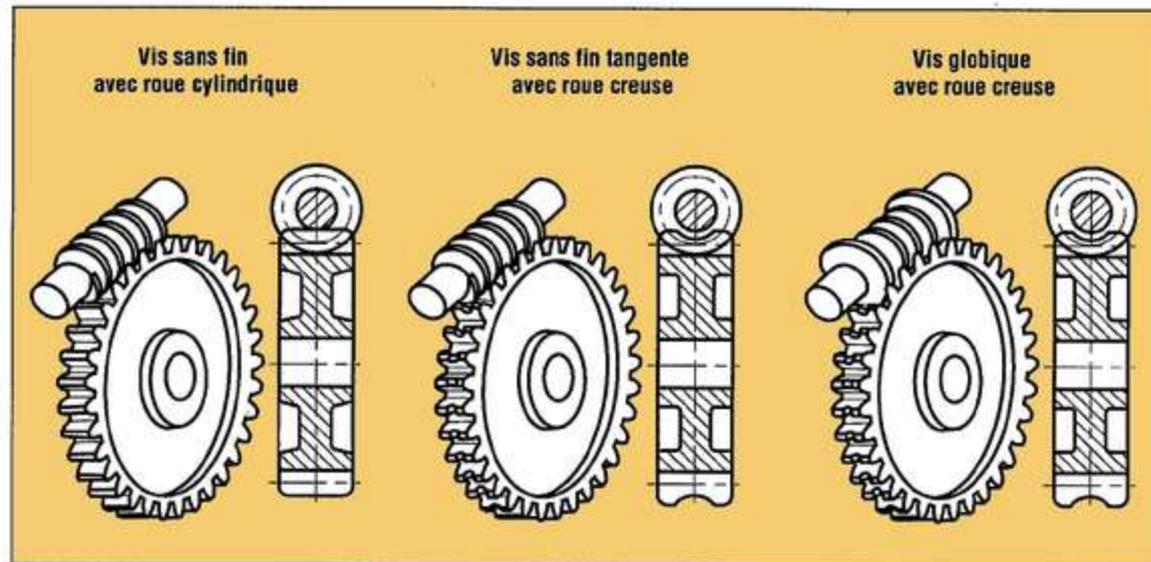
La vis ressemble à une vis d'un système vis/écrou et la roue à une roue droite à denture hélicoïdale. La transmission de mouvement est effectuée entre deux arbres orthogonaux.

Ces engrenages permettent de grands rapports de réduction (jusqu'à 1/200) et offrent des possibilités d'irréversibilité.

Ils donnent l'engrènement le plus doux de tous les engrenages, silencieux et sans chocs. Contrepartie : un glissement et un frottement important provoquent un rendement médiocre. De ce fait, une bonne lubrification est indispensable ainsi que des couples de matériaux à faible frottement (exemple : vis acier avec roue en bronze).



1. Principales familles



32. Principaux engrenages roue et vis.

Rendement : 30 à 40%

En général irréversible.



2. Caractéristiques cinématiques et géométriques

Particularité : le rapport des nombres de dents est différent du rapport des diamètres primitifs comme pour les engrenages hypoides.

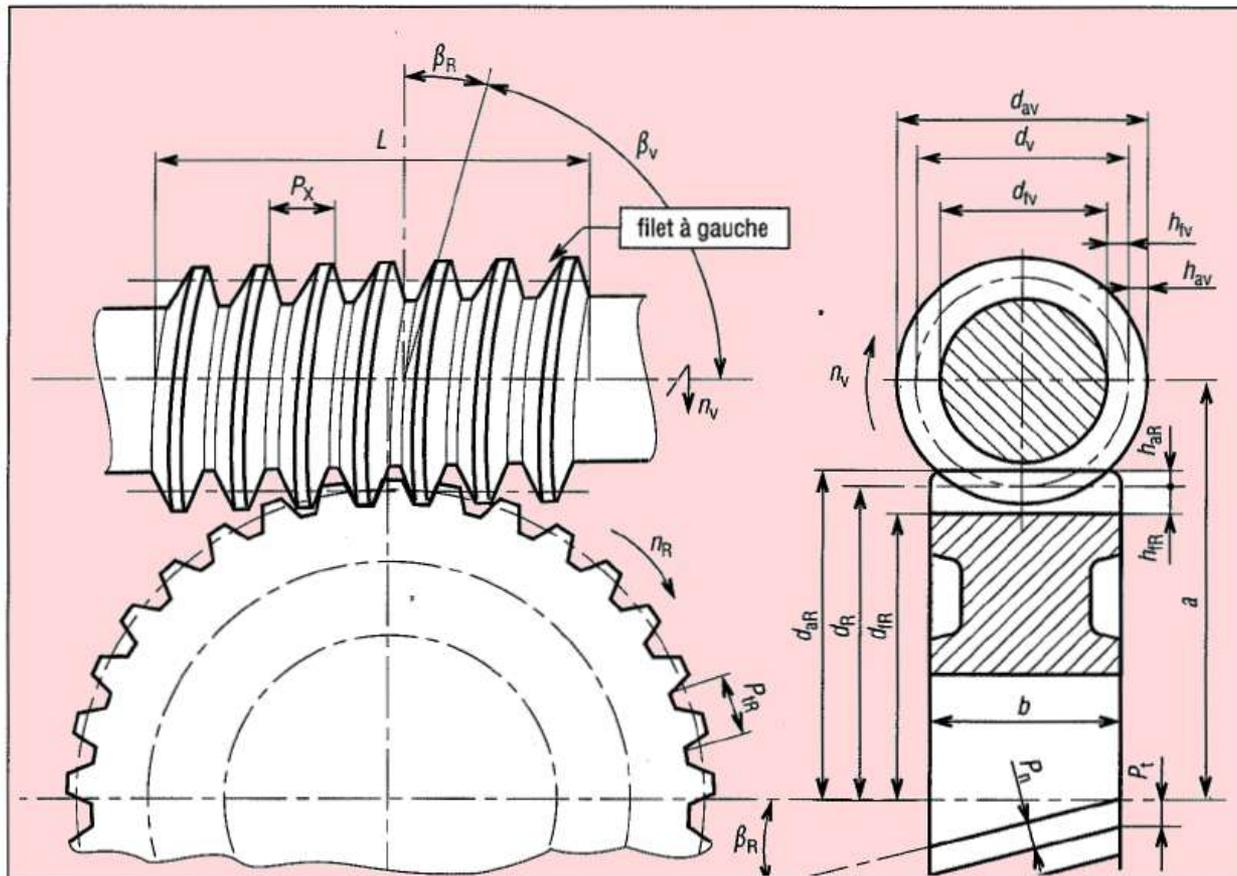
Les caractéristiques de la roue sont celles d'une roue droite à denture hélicoïdale (paragraphe III).

Z_v représente le nombre de filets de la vis (de 1 à 8 filets et parfois plus).

Le pas axial p_x mesure la distance (suivant l'axe) entre deux filets consécutifs de la vis.

Le pas de l'hélice p_z représente le pas du filet, ou d'un des filets, de la vis ($p_z = Z_v \cdot p_x$ et $\tan \beta_v = p_z / \pi d_v$).

La vis et la roue ont même pas normal p_n . Le pas axial de la vis est égal au pas apparent de la roue ($p_x = p_t R$).



Passons au chapitre 30

TRAINS D'ENGRENAGES

