

Engrenages

NF ISO 701 – NF EN ISO 2203

Un engrenage est un mécanisme élémentaire composé de deux roues dentées mobiles autour d'axes de position relative invariable.

L'une des roues entraîne l'autre par l'action des dents successivement en contact.
La roue qui a le plus petit nombre de dents est appelée pignon.

Suivant la position relative des axes des roues, on distingue :

- les engrenages parallèles (axes parallèles) ;
- les engrenages concourants (axes concourants) ;
- les engrenages gauches (les axes ne sont pas dans un même plan).

Une combinaison d'engrenages est appelée **train d'engrenages**.

1 - Engrenages parallèles*

1.1 - Définitions

CYLINDRE PRIMITIF DE FONCTIONNEMENT

Cylindre décrit par l'axe instantané de rotation II' du mouvement relatif de la roue conjugué par rapport à la roue considérée.

La section droite du cylindre primitif est le **cercle primitif de diamètre d** .

CYLINDRE DE TÊTE

Cylindre passant par les sommets des dents. Sa section droite est le **cercle de tête de diamètre d_a** .

CYLINDRE DE PIED

Cylindre passant par le fond de chaque entre-dent. Sa section droite est le **cercle de pied de diamètre d_f** .

LARGEUR DE DENTURE (b)

Largeur de la partie dentée d'une roue, mesurée suivant une génératrice du cylindre primitif.

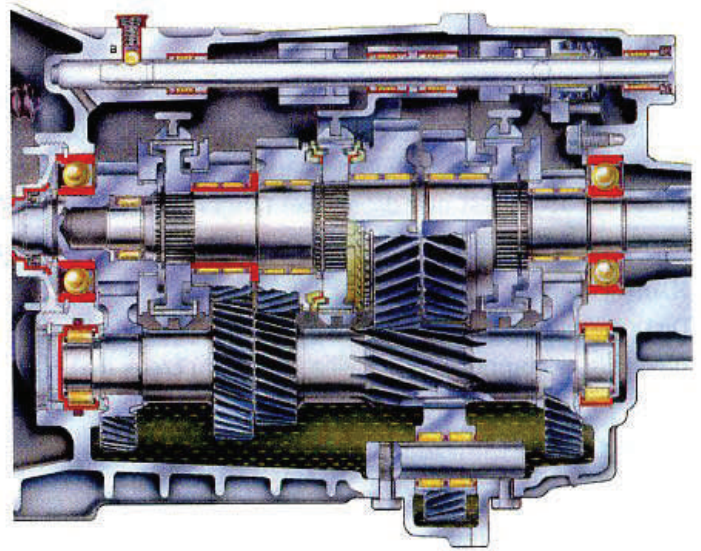
FLANC

Portion de la surface d'une dent comprise entre le cylindre de tête et le cylindre de pied.

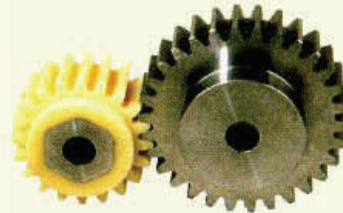
PROFIL

Section d'un flanc par un plan normal à l'axe (en mécanique générale, on n'utilise pratiquement que le profil en développante de cercle).

Boîte de vitesses d'automobile



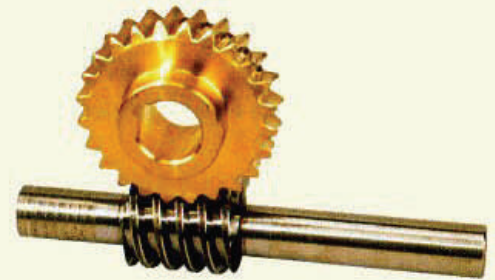
Engrenage parallèle



Engrenage concourant



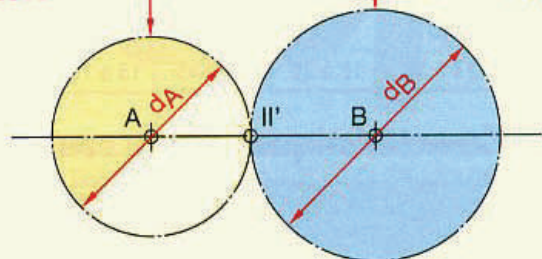
Engrenage gauche



Cylindres primitifs de fonctionnement

Cercle primitif
roue A

Cercle primitif
roue B

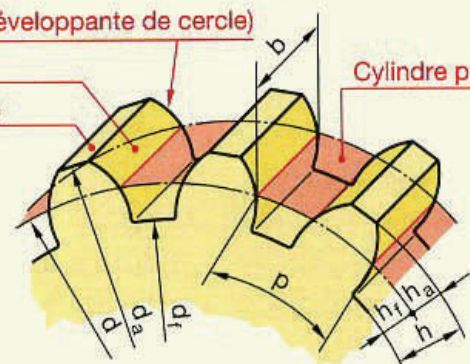


Profil (développante de cercle)

Flanc

Cylindre
de tête

Cylindre primitif



ANGLE DE PRESSION (α)

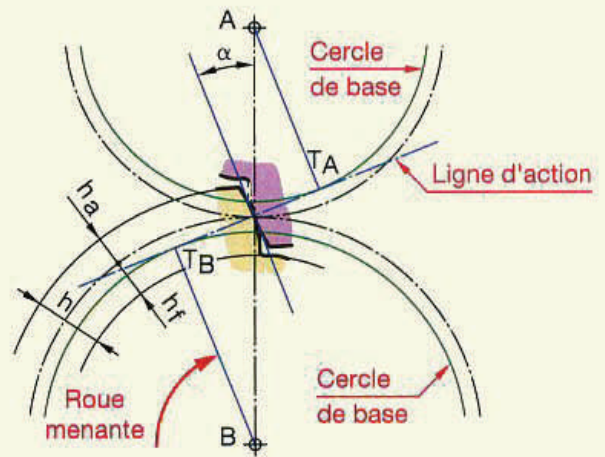
Angle aigu entre le rayon du cercle primitif passant par le point où le profil coupe le cercle primitif et la tangente au profil de ce point.

LIGNE D'ACTION

Normale commune à deux profils conjugués en leur point de contact. Dans un engrenage à développante, la ligne d'action est une droite fixe tangente intérieurement aux deux cercles de base.

HAUTEUR DE DENT (h)

Distance radiale entre le cercle de tête et le cercle de pied. Elle se compose de la saillie (h_a) et du creux (h_f).



1.2 - Crémaillère de référence

Le profil de la crémaillère de référence définit les caractéristiques communes à toutes les roues cylindriques à développante de cercle.

MODULE (m)

Le module est le quotient du pas exprimé en millimètres par le nombre π .

En première approximation, le module peut être calculé par la formule :

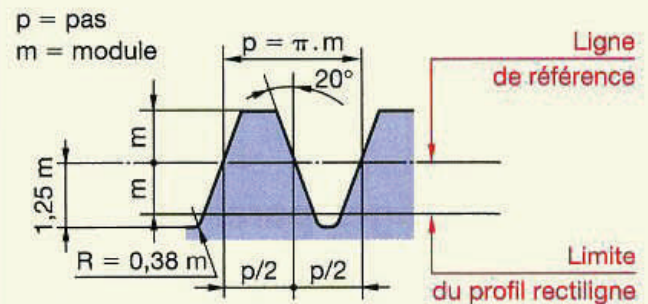
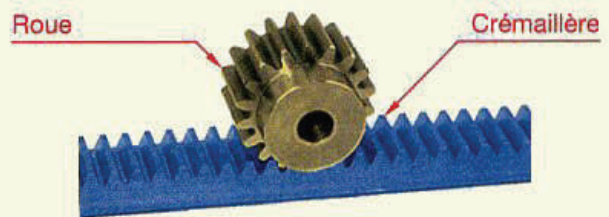
$$m = 2,34 \sqrt{\frac{\|F_t\|}{k \cdot R_{pe}}}$$

$\|F_t\|$ = force tangentielle en newtons.

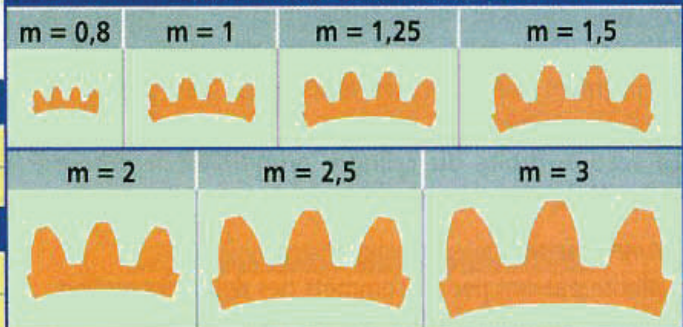
k = coefficient de largeur de denture, valeur choisie entre 6 et 10.

R_{pe} = résistance pratique à l'extension du matériau de la dent en mégapascals.

Crémaillère de référence



Taille réelle des dentures



Modules normalisés	
Série principale	0,3 0,5 0,8 1 1,25 1,5 2 2,5 3 4 5 6 8 10
Nombre minimal de dents*	
Z_A	13 14 15 16 17
Z_B	13 à 16 13 à 26 13 à 45 13 à 101 13 à ∞

1.3 - Caractéristiques d'une roue à denture droite normale ($\alpha = 20^\circ$)

Module	m	Déterminé par un calcul de résistance des matériaux
Nombre de dents	z	Déterminé à partir des rapports des vitesses angulaires : $\frac{\omega_A}{\omega_B} = \frac{n_A}{n_B} = \frac{z_B}{z_A}$
Pas	p	$p = m \cdot \pi$
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 primitif	d	$d = m \cdot z$
Diamètre de tête	d_a	$d_a = d + 2 m$
Diamètre de pied	d_f	$d_f = d - 2,5 m$
Largeur de denture	b	$b = k \cdot m$ (k valeur à se fixer, fréquemment on choisit entre 6 et 10.)
Entraxe de deux roues	a	$a = \frac{d_A + d_B}{2} = \frac{m \cdot z_A}{2} + \frac{m \cdot z_B}{2} = \frac{m(z_A + z_B)}{2}$

* Afin d'éviter l'interférence entre les dents de la roue et du pignon

1.4 - Caractéristiques d'une roue à denture hélicoïdale normale

L'étude concerne les engrenages parallèles (les axes des roues sont parallèles entre eux).

1.4.1 - Définitions

HÉLICE PRIMITIVE

Intersection d'un flanc avec le cylindre primitif d'une roue hélicoïdale. L'hélice de pas p_z peut être « à droite » ou « à gauche »

ANGLE D'HÉLICE (β)

Angle formé par la tangente à l'hélice primitive et une génératrice du cylindre primitif. Le complément de l'angle β est appelé inclinaison γ .

PAS APPARENT (P_t)

Longueur de l'arc du cercle primitif compris entre deux profils homologues consécutifs.

PAS RÉEL (P_n)

Longueur de l'arc compris entre deux flancs homologues consécutifs, mesurée le long d'une hélice du cylindre primitif orthogonale aux hélices primitives.

MODULE APPARENT (m_t)

Quotient du pas apparent (en mm) par le nombre π .

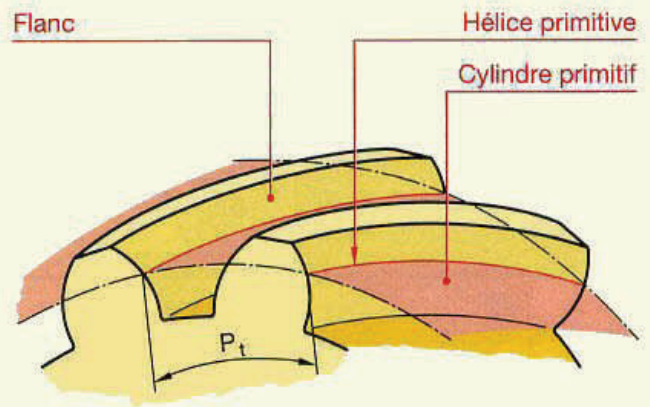
MODULE RÉEL (m_n)

Quotient du pas réel (en mm) par le nombre π .

1.4.2 - Détermination des caractéristiques

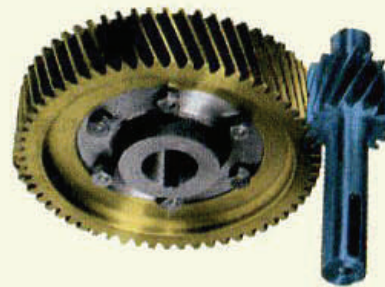
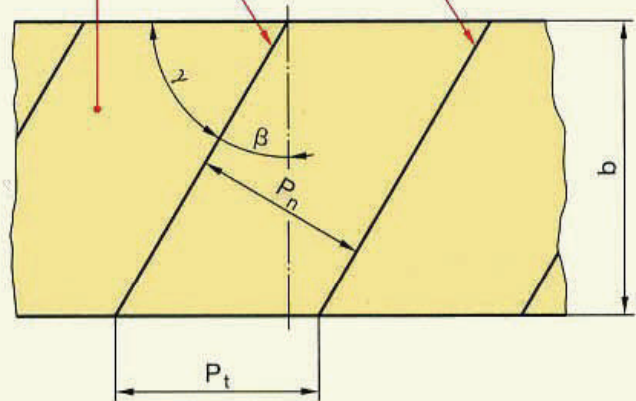
Toutes les roues à denture hélicoïdale de même module (réel ou apparent) et de même angle d'hélice engrènent entre elles, quels que soient leur diamètre et leur nombre de dents, mais les hélices doivent être de sens contraire (l'une à droite et l'autre à gauche).

Roue à denture hélicoïdale



Développement du cylindre primitif

Développement d'hélices primitives homologues consécutives



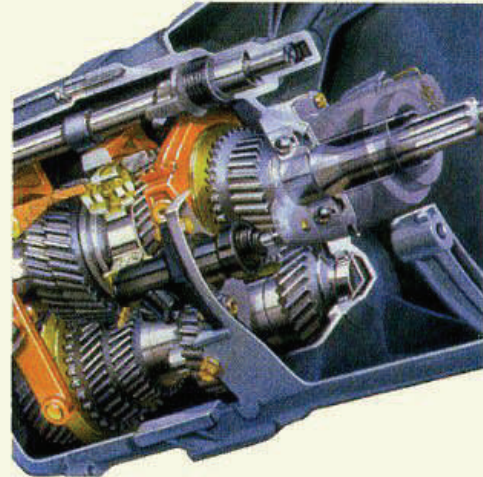
Module réel	m_n	Déterminé par la résistance des matériaux et choisi dans les modules normalisés
Nombre de dents	z	Déterminé à partir des rapports des vitesses angulaires : $\frac{\omega_A}{\omega_B} = \frac{n_A}{n_B} = \frac{z_B}{z_A}$
Angle d'hélice	β	Choisi habituellement entre 20° et 30° .
Sens de l'hélice « à droite » ou « à gauche »		Pour un même engrenage, les hélices des roues sont de sens contraire.
Module apparent	m_t	$m_t = m_n / \cos \beta$
Pas apparent	P_t	$P_t = m_t \cdot \pi$
Pas réel	P_n	$P_n = m_n \cdot \pi$ $P_n = P_t \cdot \cos \beta$
Pas de l'hélice primitive	P_z	$P_z = \pi d / \tan \beta$
Saillie	h_a	$h_a = m_n$
Creux	h_f	$h_f = 1,25 m_n$
Hauteur de dent	h	$h = h_a + h_f = 2,25 m_n$

Diamètre primitif	d	$d = m_t \cdot z$
Diamètre de tête	d_a	$d_a = d + 2 m_n$
Diamètre de pied	d_f	$d_f = d - 2,5 m_n$
Entraxe de deux roues A et B	a	$a = \frac{d_A + d_B}{2} = \frac{m_t \cdot z_A}{2} + \frac{m_t \cdot z_B}{2}$
Largeur de denture	b	La transmission du mouvement est continue si, le contact cessant entre un couple de dents, un autre couple de dents est déjà en prise, soit : $b \geq \frac{\pi \cdot m_n}{\sin \beta}$

La figure représente, en coupe pédagogique, une boîte de vitesses d'automobile.

Les dentures hélicoïdales assurent une transmission avec un faible frottement d'un flanc sur l'autre (moins de vibrations, bon rendement), mais elles engendrent une poussée axiale.

On peut remédier à cette poussée en utilisant deux dentures inclinées en sens inverse (denture en chevrons).



2 - Engrenages concourants*

Les roues assurant la transmission sont coniques. Afin d'assurer une transmission sans glissement, les sommets des roues d'un engrenage concourant doivent être confondus avec le point de rencontre S des axes de chaque roue.

L'étude est limitée aux roues coniques à denture droite.

2.1 - Définitions

CÔNE PRIMITIF

Cône décrit par l'axe instantané SM du mouvement relatif de la roue conjuguée par rapport à la roue considérée.

CÔNE COMPLÉMENTAIRE

Cône S'MM' dont les génératrices sont perpendiculaires à celles du cône primitif, à l'extrémité externe de la largeur de denture.

CÔNE DE TÊTE

Cône passant par le sommet des dents.

CÔNE DE PIED

Cône passant par le fond de chaque entre-dent.

DIAMÈTRE PRIMITIF (d)

Diamètre du cercle d'intersection du cône primitif avec le cône complémentaire.

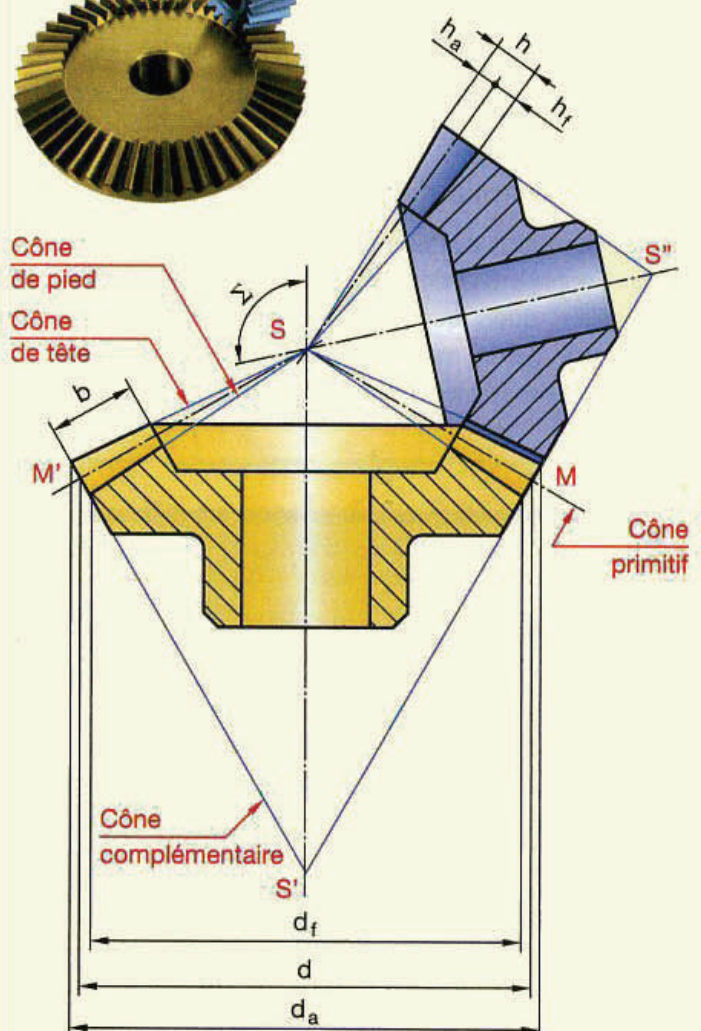
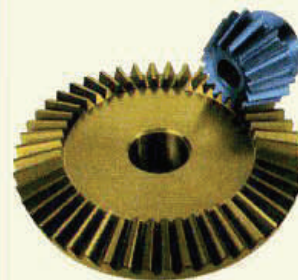
DIAMÈTRE DE TÊTE (d_a) ET DIAMÈTRE DE PIED (d_f)

Diamètre du cercle d'intersection du cône de tête (ou de pied) avec le cône complémentaire.

LARGEUR DE DENTURE (b)

Largeur de la partie dentée de la roue et mesurée suivant une génératrice du cône primitif.

Engrenage concourant



PAS (p)

Longueur de l'arc du cercle primitif compris entre deux profils homologues consécutifs.

MODULE (m)

Quotient du pas (en mm) par le nombre π .

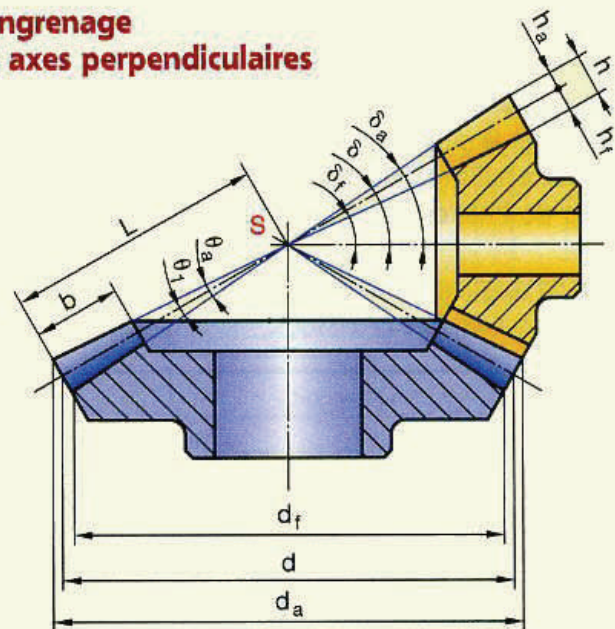
HAUTEUR DE DENT (h)

Distance entre le cercle de tête et le cercle de pied, mesurée suivant une génératrice du cône complémentaire. Elle se compose de la saillie (h_a) et du creux (h_f).

2.2 - Caractéristiques d'un engrenage à axes perpendiculaires

Deux roues coniques n'engrènent correctement que si les modules sont égaux et si les cônes primitifs ont à la fois une génératrice commune et leurs sommets confondus.

Engrenage à axes perpendiculaires



Module (sur le cône complémentaire)	m	Déterminé par la résistance des matériaux et choisi dans les modules normalisés	
Nombre de dents	z	Déterminé à partir du rapport des vitesses angulaires : $\frac{\omega_A}{\omega_B} = \frac{n_A}{n_B} = \frac{z_B}{z_A}$	
Largeur de denture	b	Pour des raisons de taillage : $\frac{1}{4} L < b < \frac{1}{3} L$	
Diamètres primitifs	d	$d_A = m \cdot z_A$	$d_B = m \cdot z_B$
Angles primitifs	δ	$\tan \delta_A = z_A / z_B$	$\tan \delta_B = z_B / z_A$
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	$d_{aA} = d_A + 2 m \cos \delta_A$	$d_{aB} = d_B + 2 m \cos \delta_B$
Diamètre de pied	d_f	$d_{fA} = d_A - 2,5 m \cos \delta_A$	$d_{fB} = d_B - 2,5 m \cos \delta_B$
Angle de saillie	θ_a	$\tan \theta_a = m/L$	avec $L = \frac{d_A}{2 \sin \delta_A}$
Angle de creux	θ_f	$\tan \theta_f = 1,25 m/L$	
Angle de tête	δ_a	$\delta_{aA} = \delta_A + \theta_a$	$\delta_{aB} = \delta_B + \theta_a$
Angle de pied	δ_f	$\delta_{fA} = \delta_A - \theta_f$	$\delta_{fB} = \delta_B - \theta_f$

3 - Engrenages gauches

Les deux axes ne se rencontrent pas et forment un angle Σ quelconque. Ces transmissions engendrent des frottements importants.

3.1 - Engrenages gauches hélicoïdaux

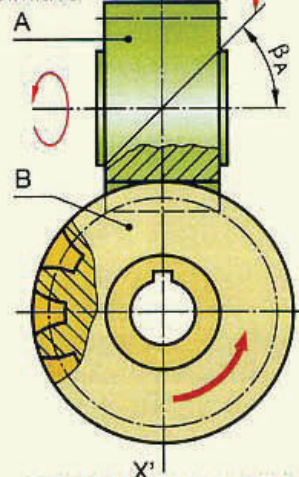
Les engrenages gauches hélicoïdaux sont composés, chacun, de deux roues à denture hélicoïdale (caractéristiques § 73.14), mais contrairement aux engrenages hélicoïdaux à axes parallèles, le sens des hélices primitives est le même pour les deux roues.

Dans le cas d'axes orthogonaux ($\Sigma = 90^\circ$), on a souvent : $\beta_A = \beta_B = 45^\circ$.

Les engrenages gauches hélicoïdaux sont également appelés « engrenages hélicoïdaux à axes croisés ».

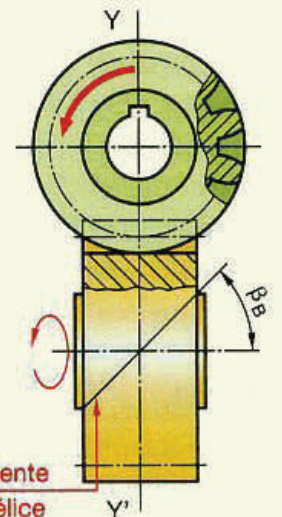
Engrenage gauche hélicoïdal

Tangente à l'hélice primitive



Coupe locale suivant Y'Y'

Coupe locale suivant X'X



Tangente à l'hélice primitive

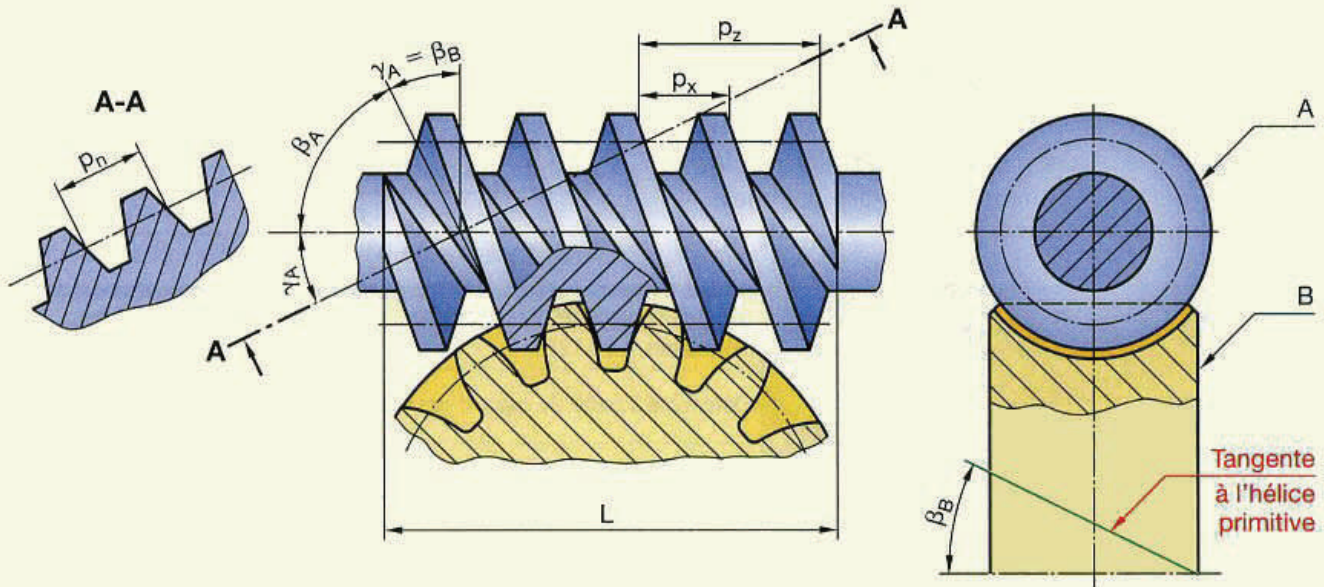
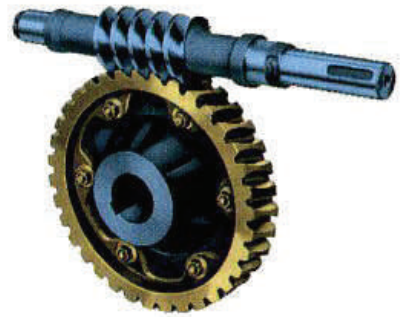
3.2 - Roues et vis sans fin

La transmission est réalisée à l'aide d'une vis à un ou plusieurs filets engrenant avec une roue. Afin d'augmenter la puissance transmissible, on choisit des matériaux à faible coefficient de frottement.

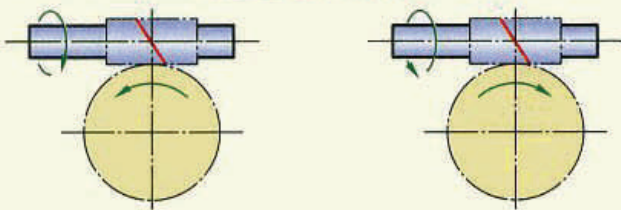
Le sens de l'hélice est le même pour la vis et la roue.

Le sens de rotation de la roue en fonction du sens de l'hélice est schématisé ci-dessous.

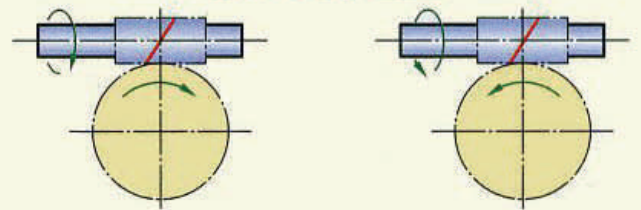
Roue et vis sans fin



Hélices à droite



Hélices à gauche



Caractéristiques de la vis A

Nombre de filets	z_A	Fonction du rapport des vitesses angulaires : $\frac{\omega_A}{\omega_B} = \frac{n_A}{n_B} = \frac{z_B}{z_A}$	
Angle d'hélice	β_A	Fonction de la réversibilité de la transmission (si $\gamma_A < 5^\circ$ système pratiquement réversible). $\beta_A + \gamma_A = 90^\circ$.	
Sens de l'hélice « à droite » ou « à gauche »		La vis a le même sens d'hélice que la roue	
Module réel	m_n	Déterminé sur la roue,	$\gamma_A = \beta_B$
Module axial	m_x	$m_x = m_n / \cos \gamma_A$	$\tan \gamma_A = \frac{p_z}{\pi d_A}$
Pas réel	p_n	$p_n = m_n \cdot \pi$	$\sin \gamma_A = \frac{p_n \cdot z_A}{\pi d_A}$
Pas axial	p_x	$p_x = p_n / \cos \gamma_A$	
Pas de l'hélice	p_z	$p_z = p_x \cdot z_A$	
Diamètre primitif	d_A	$d_A = p_z / \pi \tan \gamma_A$	
Diamètre extérieur	d_a	$d_a = d_A + 2 m_n$	
Diamètre intérieur	d_f	$d_f = d_A - 2,5 m_n$	
Longueur de la vis	L	$L \approx 5 p_x$	

Caractéristiques de la roue B

Mêmes formules que pour une roue à denture hélicoïdale (§ 73.14) en tenant compte :		<ul style="list-style-type: none"> - Angle d'hélice $\beta_B = \gamma_A$ et de même sens que pour la vis et la roue - Module apparent de la roue égal au module axial de la vis
Entraxe	a	$a = \frac{d_A + d_B}{2}$

4 - Cotation d'une roue

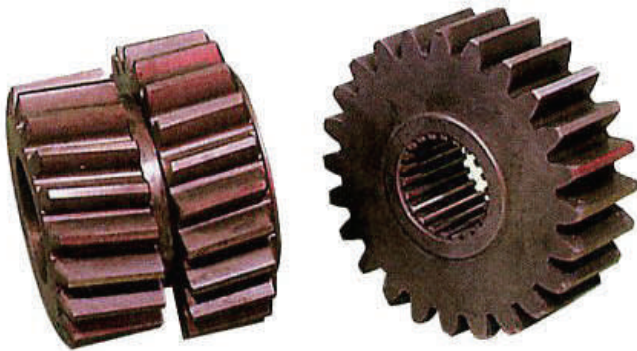
La cotation d'une roue d'engrenage doit respecter les règles de la cotation fonctionnelle.

La cotation fonctionnelle d'une pièce ne peut se faire qu'en connaissant exactement son emploi.

C'est pourquoi seules sont indiquées les caractéristiques de denture communes à la majorité des applications.

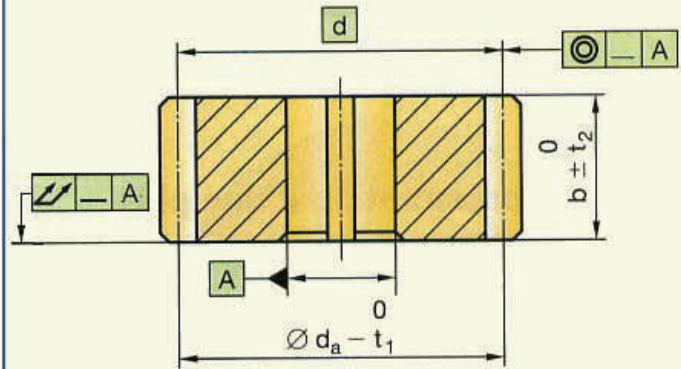
REMARQUES

- ▶ Si cela n'entraîne aucune confusion, il est couramment admis de ne pas indiquer :
 - le profil des dents (s'il est en développante de cercle) ;
 - l'angle de pression (s'il est égal à 20°).
- ▶ La précision et le contrôle des engrenages parallèles à denture en développante est définie par la norme ISO 1328. Elle détermine **treize classes de précision** numérotées de 0 à 12 dans l'ordre croissant des tolérances.



Classe de précision	6	7	8	9	10	11	12	
Roue alésée Tolérance sur le \varnothing d'alésage	IT 6	IT 7	IT 7	IT 8	IT 8	IT 8	IT 8	
Roue arbrée Tolérance sur le \varnothing de l'arbre	IT 5	IT 6	IT 6	IT 7	IT 7	IT 8	IT 8	
Tolérance t_1 sur le \varnothing de la tête	IT 8	IT 8	IT 8	IT 9	IT 9	IT 11	IT 11	
Module		Tolérance de coaxialité en microns						
$d \leq 20$	$m_n \leq 2$	13	18	25	36	51	72	102
	2 à 3,5	13	19	27	38	53	75	106
d 20 à 50 inclus	$m_n \leq 2$	16	23	32	46	65	92	130
	2 à 3,5	17	24	34	47	67	95	134
	3,5 à 6	17	25	35	49	70	99	139
d 50 à 125 inclus	$m_n \leq 2$	21	29	42	59	83	118	167
	2 à 3,5	21	30	43	61	86	121	171
	3,5 à 6	22	31	44	62	88	125	176
Rugosité des flancs Ra en microns	0,4	0,8	3,2	6,3				
Tolérance d'entraxe $+t$	1/2 IT 7	1/2 IT 8	1/2 IT 9	1/2 IT 11				

Roue cylindrique



Roue à denture droite

Caractéristiques de la denture

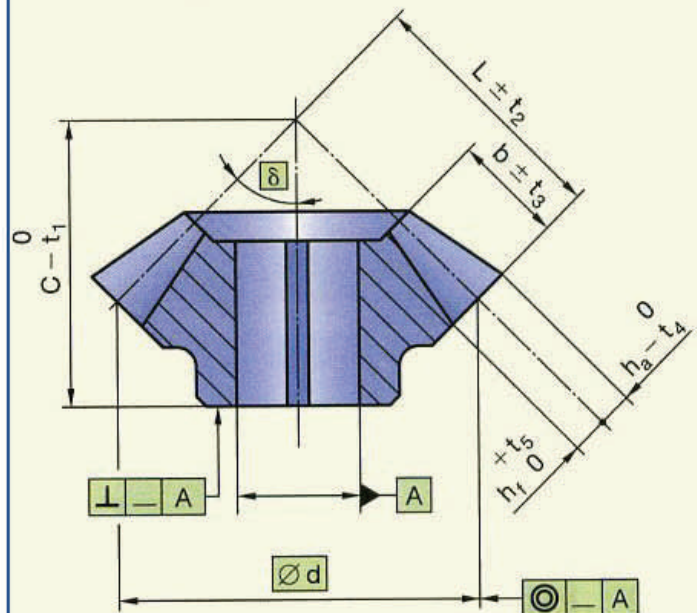
Classe de précision :	—	ISO 1328
Nombre de dents :	z	Angle de pression : 20°
Module :	m	Rugosité des flancs : $\sqrt{\quad}$
Crémaillère de référence :	—	

Roue à denture hélicoïdale

Caractéristiques de la denture

Classe de précision :	—	ISO 1328
Nombre de dents :	z	Angle d'hélice : β
Module réel :	m_n	Sens d'hélice : —
Angle de pression :	20°	Rugosité des flancs : $\sqrt{\quad}$
Crémaillère de référence :	—	

Roue conique à denture droite



Caractéristiques de la denture

Nombre de dents :	z	Rugosité des flancs : $\sqrt{\quad}$
Module :	m	Épaisseur de dent : $e - t$
Angle de pression :	20°	
Crémaillère de référence :	—	
Roue conjuguée :	plan n° —	

5 - Représentation des engrenages NF EN ISO 2203

5.1 - Représentation d'une pièce dentée

En vue non coupée

Dessiner la roue comme une pièce pleine non dentée avec, pour seule adjonction, le tracé de la surface primitive en trait mixte fin.

En coupe axiale

Représenter la roue comme s'il s'agissait, dans tous les cas, d'une roue à denture droite ayant deux dents diamétralement opposées et non coupées.

Position de la denture

S'il est fonctionnellement indispensable de la préciser, tracer une ou deux dents en trait continu fort, afin de la définir sans ambiguïté.

Orientation de la denture

S'il est utile de préciser graphiquement l'orientation de la denture, utiliser les symboles ci-dessous en les disposant convenablement dans la vue parallèle à l'axe de la roue.

Symboles d'orientation	
Denture hélicoïdale	
Denture en chevrons	
Denture spirale	

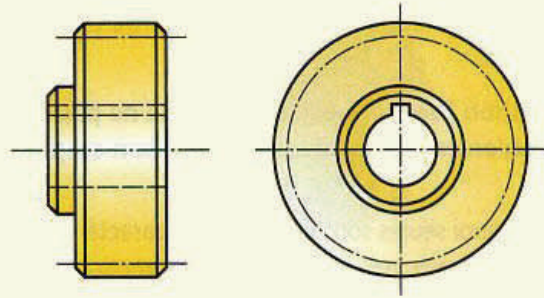
Dans le cas d'un engrenage, ne faire figurer le symbole que sur une roue.

5.2 - Représentation d'un engrenage

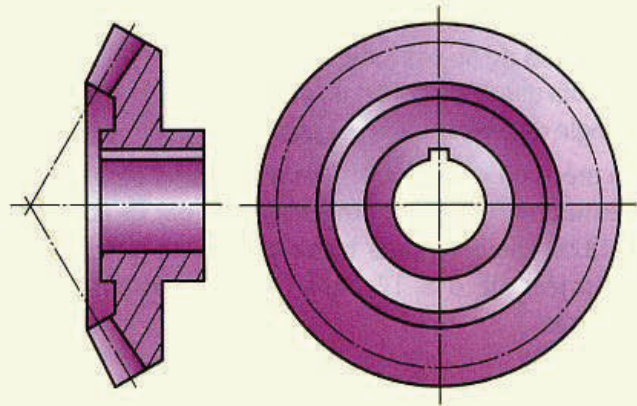
Dans la partie en prise, aucune des deux roues d'un engrenage n'est supposée cachée par l'autre. Toutefois, si les deux roues sont représentées en coupe axiale, l'une des dents en prise est arbitrairement supposée cachée. Si l'une des roues est non coupée, elle cache la dent de la roue conjuguée représentée en coupe.

Représentation d'une roue

Vue non coupée

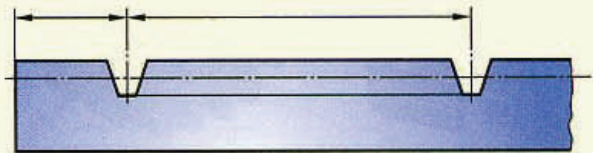


Vue axiale

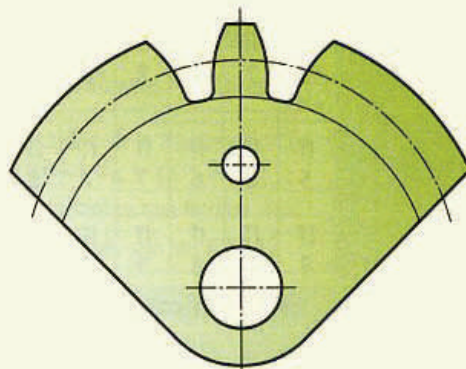


Position de la denture

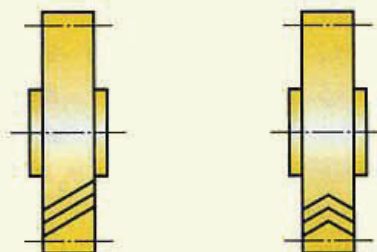
Crémaillère



Secteur denté

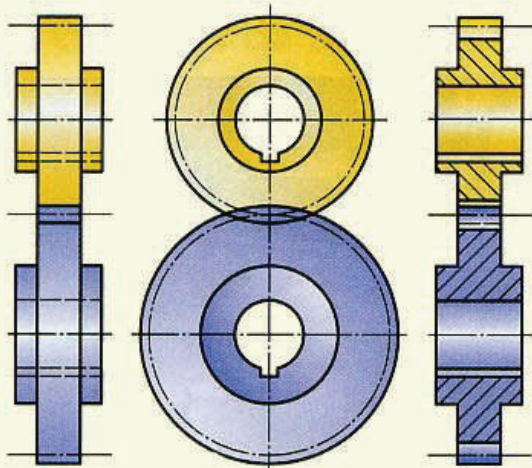


Orientation de la denture

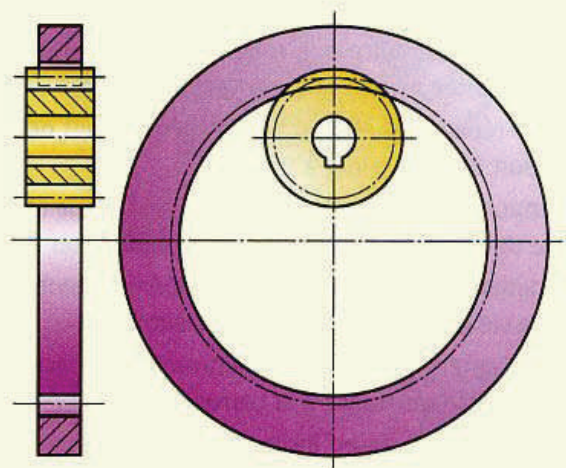


Représentation des engrenages

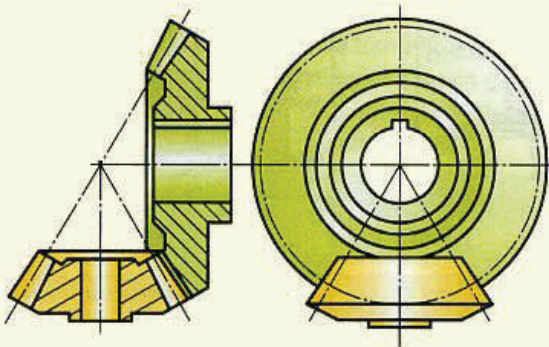
Engrenage extérieur de roues cylindriques



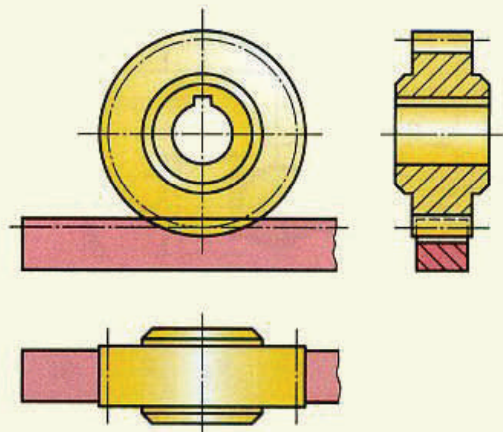
Engrenage intérieur de roues cylindriques



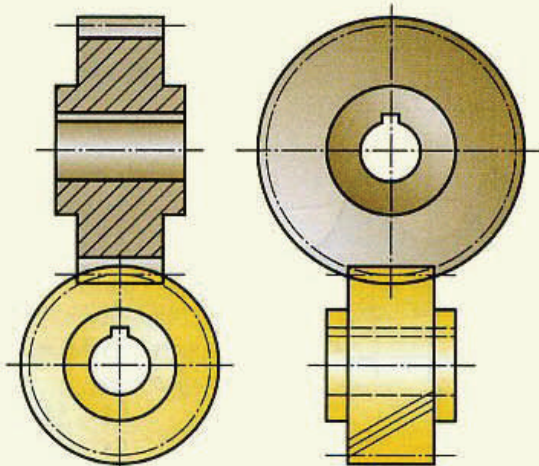
Engrenage de roues coniques



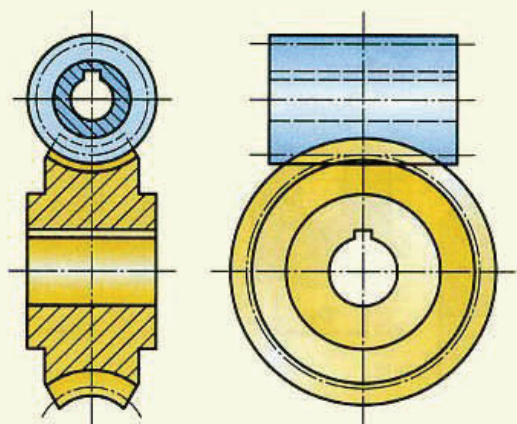
Engrenage à roue et à crémaillère



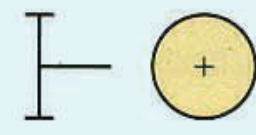
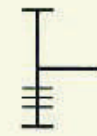
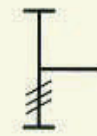
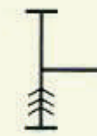
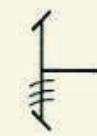
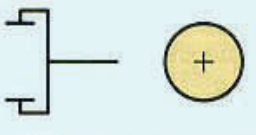


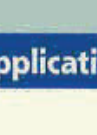

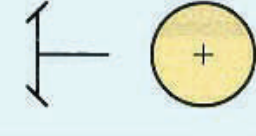
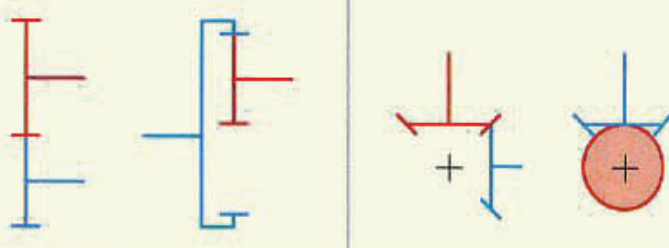
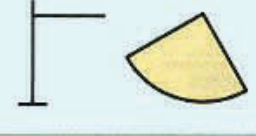
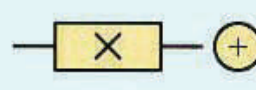
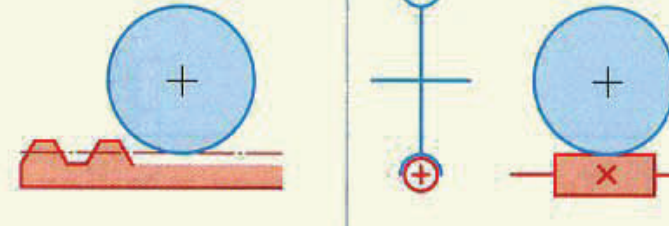
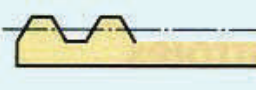
Engrenage gauche hélicoïdal



Engrenage à roue et à vis sans fin



6 - Symbolisation

		Type de dentures*			
		Droite	Hélicoïdale	Chevron	Spirale
Roue à denture extérieure					
Roue à denture intérieure					
Roue conique		<p style="text-align: center;">Exemples d'application</p> 			
Secteur denté					
Vis sans fin					
Crémaillère					

* Indication facultative.