

# Engrenages, conditions d'engrènement et procédés d'obtention

Les engrenages, composants mécaniques fréquents et indispensables, permettent la transmission de puissance entre deux arbres rapprochés. Les roues dentées composant l'engrenage sont en contact et transmettent la puissance par obstacle à l'aide des dents. Utilisés dans de nombreux domaines, à des dimensions très différentes (de l'horlogerie à l'industrie lourde), les engrenages présentent un bon rendement énergétique dans de bonnes conditions de production, montage et fonctionnement.

Cette ressource précise quelques notions élémentaires préalables à la présentation de différents procédés de production des engrenages et à leur contrôle. Les ressources « *Taillage des engrenages par génération, outil crémaillère et outil pignon* », « *Taillage des engrenages par génération, outil fraise-mère* » et « *Taillage des engrenages sans génération* » traitent de la production des roues dentées ; la ressource « *Contrôle des engrenages* » aborde les points de mesure à contrôler sur les dentures obtenues.

## 1 – Rôle d'un engrenage

Un engrenage est une transmission de puissance entre deux arbres rapprochés, modifiant le couple transmis ainsi que la vitesse de rotation dans un rapport précis et constant. Les deux arbres doivent être proches, ils peuvent être parallèles, concourants, orthogonaux ou encore de position quelconque entre eux (figure 1).

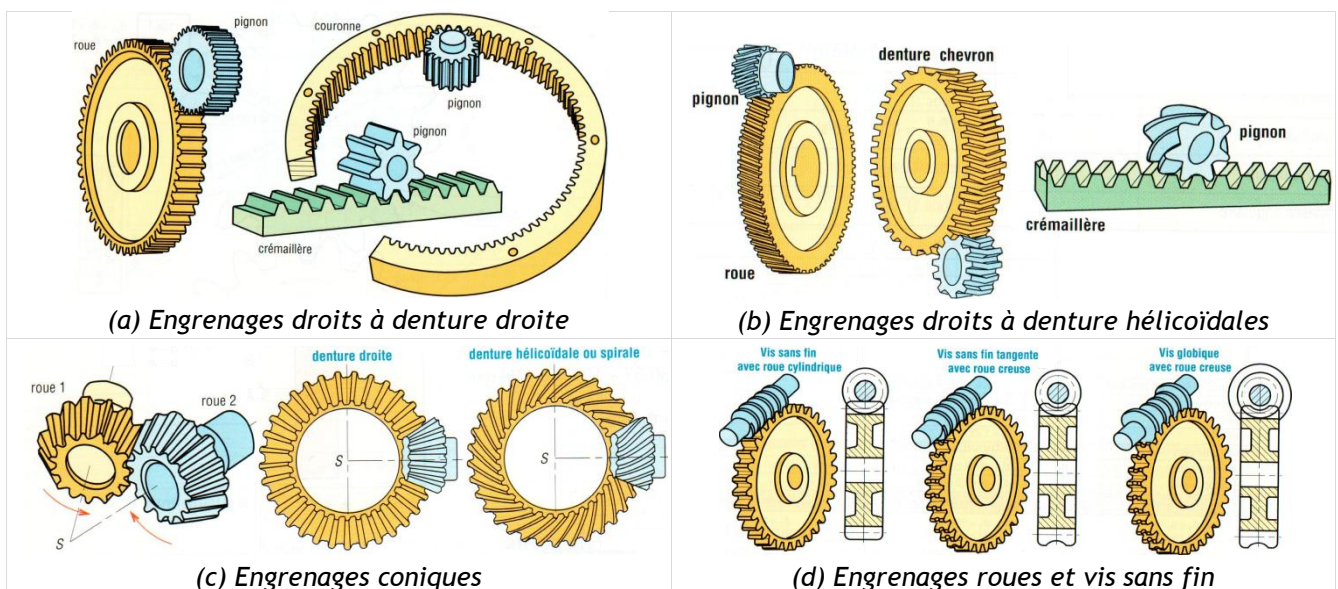


Figure 1 : Différentes positions des arbres d'un engrenage :  
(a) et (b) axes parallèles, (c) axes concourants, (d) axes orthogonaux  
Images J.-L. Fanchon [1]

Un engrenage cylindrique droit offre une analogie avec un couple de roues cylindriques de friction. L'entraînement dans le cas des roues de friction se fait par adhérence limitant ainsi les efforts transmissibles par la présence d'un glissement angulaire. Dans le cas des engrenages, la

liaison est réalisée par obstacle, le rapport des vitesses est alors fixe et précis, et les efforts transmissibles peuvent s'avérer considérables. Un engrenage est un ensemble de deux roues dentées engrenant ensemble, la roue qui a le nombre de dents le plus faible est appelé pignon.

## 2 – Profil des dents

Les dents doivent permettre de toujours maintenir les deux roues en contact, d'assurer une rotation continue d'une roue par rapport à l'autre et de ne pas bloquer le fonctionnement de l'engrenage. Le profil d'une dent de roue dentée n'est ni une droite ni un arc de cercle (figure 2).



Figure 2 : Profil d'une dent, comparaison avec une droite et un arc de cercle

### 2.1 - Profils conjugués et conditions

Deux profils sont dits conjugués lorsque les profils restent constamment tangents durant le temps où les surfaces de denture en contact assurent la transmission. Si les profils de deux roues dentées engrenant ensemble sont constamment tangents (figure 2a) alors les deux profils ont à chaque instant une normale commune. Si le rapport des vitesses est constant et égal au rapport inverse des diamètres primitifs alors la normale commune passe à chaque instant par le centre instantané de rotation du mouvement de l'une des circonférences primitives par rapport à l'autre supposée fixe (figure 2b). Ce point, point de contact  $I$  des deux circonférences primitives, est appelé point primitif.

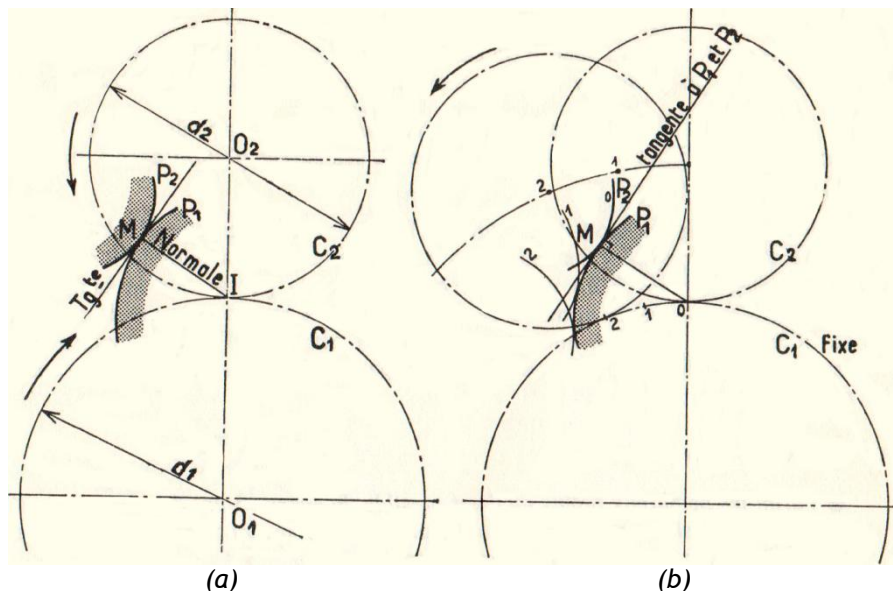


Figure 2 : Conditions d'engrènement de profils conjugués, image [2]

La condition de conduite correcte est remplie si la courbe  $P_1$  est l'enveloppe des positions successives de  $P_2$  ;  $P_1$  est aussi l'enveloppe des positions de la tangente commune en  $M$ . La méthode de taillage par génération présentée dans les deux ressources « *Taillage des engrenages par génération, outil crémaillère et outil pignon* » et « *Taillage des engrenages par génération, outil fraise-mère* » est basée sur ce résultat.

## 2.2 - Développante de cercle et tracé

Le profil des dents suit une courbe géométrique nommée développante de cercle qui se trace selon la méthode suivante (figure 4) :

- Tracer un cercle support de la développante (figure 4a),
- Tracer un diamètre assimilé à une corde fixée en  $\times$ , enroulée autour du cercle et un crayon fixé à l'extrémité libre (figure 4a),
- Dérouler la corde avec le crayon traçant la courbe rouge (figures 4b et 4c) : la développante de cercle,
- Une dent est définie à partir de deux développantes de cercle (figure 4d).

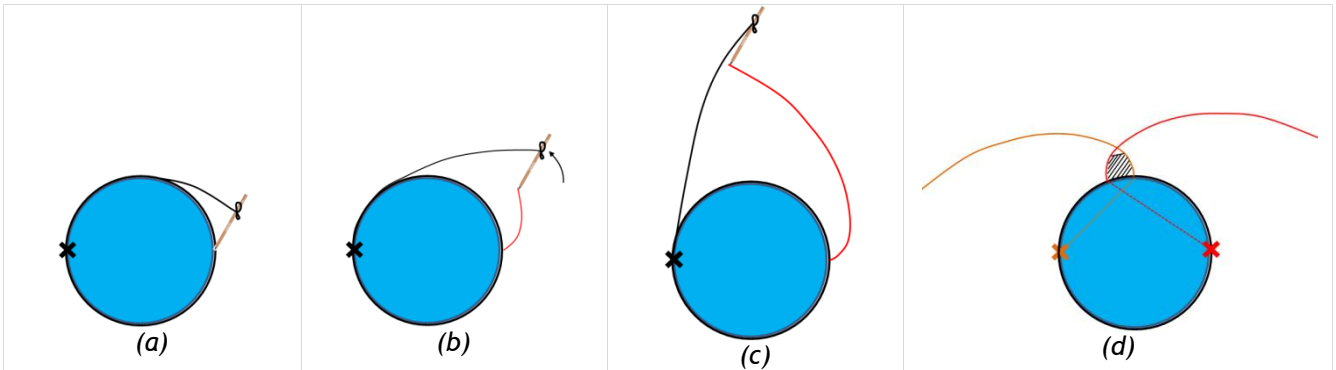


Figure 4 : Tracé d'une dent à partir de développantes de cercle

## 2.3 - Equation de la développante de cercle

Une développante de cercle est une courbe définie par l'ensemble des points  $M$  tels que, en coordonnées polaires (figure 5) :

$$\overline{TM} = \text{arc}(TP)$$

Le cercle de base  $C_b$  de rayon  $r_b$  définit la développante de cercle.

$$r_b \tan \alpha = r_b (\theta + \alpha)$$

$$\rho = r_b / \cos \alpha$$

$$\theta = \tan \alpha - \alpha$$

$$\theta = \text{inv} \alpha_r \text{ et } \text{inv} 20^\circ = 0,0149043835$$

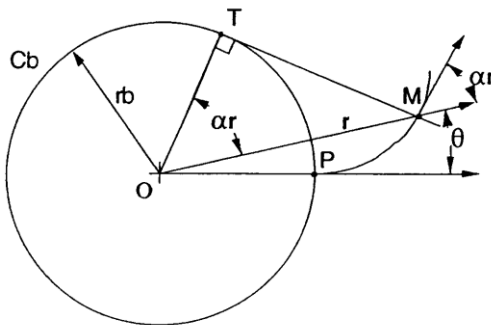


Figure 5 : Paramétrage de la développante de cercle

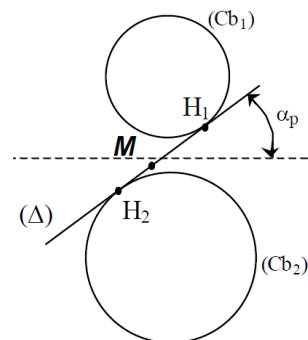


Figure 6 : Angle de pression

Les profils des dents en développante de cercle d'un engrenage (ensemble de deux roues dentées en contact) sont conjuguées : les développantes de cercle des deux roues sont tangentes en  $M$  (figure 6). La direction de la résultante des efforts dus au contact entre les dents est portée par

l'axe  $\Delta$  d'angle  $\alpha_p$ , angle de pression. Cette direction constante lors de l'engrènement, permet un comportement dynamique intéressant limitant les vibrations.

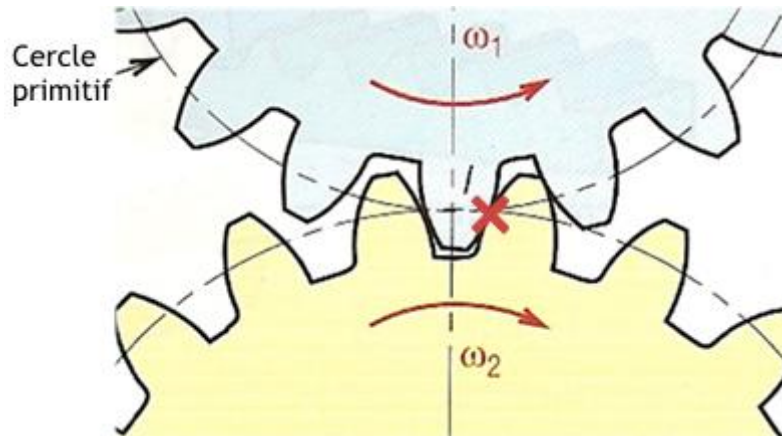


Figure 7 : Engrènement de deux profils en développantes de cercle, image [1]

### 3 – Caractéristiques d'une denture, terminologie

Le cercle primitif est celui représentant le diamètre de la roue de friction (figure 8). Le cercle de tête est le diamètre extérieur de la roue dentée au sommet des dents, le cercle de pied est à la base des dents : *cercle de tête = cercle de pied + 2 × hauteur des dents*. La hauteur des dents est décomposée en un creux et une saillie, proportionnels au module (voir paragraphe suivant).

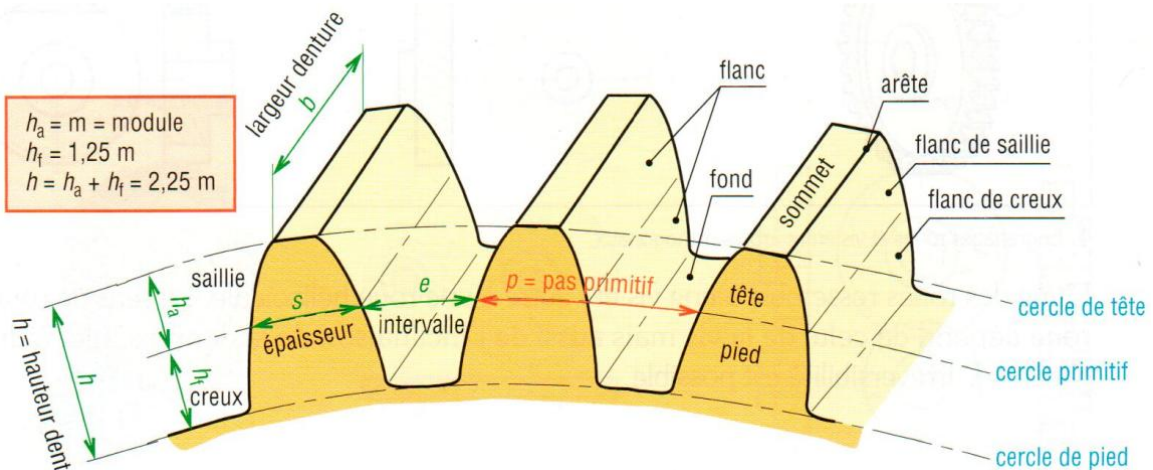


Figure 8 : Caractéristiques d'une denture, image [1]

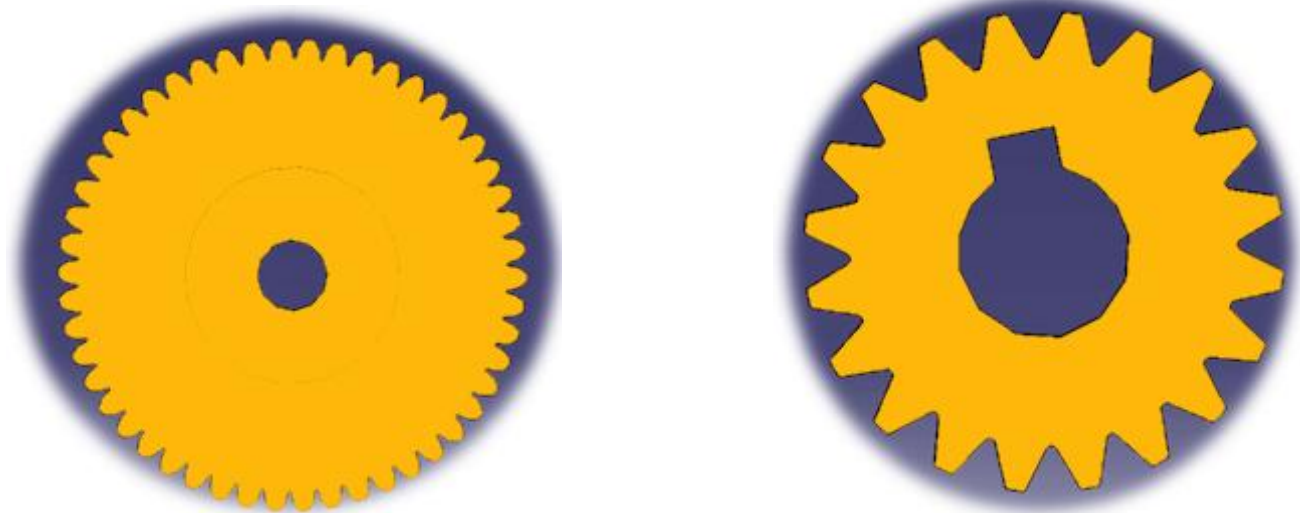
### 4 – Module et hauteur de dent

Le module  $m$ , est une grandeur caractéristique d'une denture exprimée en millimètres. Représentant la dimension de la denture,  $m$  est donné par la formule :

$$m = \frac{D_p}{Z}$$

Avec  $D_p$ , le diamètre primitif de la roue,  $Z$ , le nombre de dents de la roue.

L'épaisseur et la hauteur d'une denture sont proportionnelles au module : plus le module d'une denture est grand, plus les dents sont grosses. Prenons deux roues de même diamètre primitif (figure 9) : (a) possède plus de dents que (b), les dents de (a) sont d'épaisseur et de hauteur plus petites que la denture de (b)  $\rightarrow m_a$ , le module de (a) est plus petit que  $m_b$ , le module de (b).



(a) (b)  
 Figure 9 : Comparaison de deux dentures de pignons de mêmes diamètres primitifs et de modules différents.

Ces deux roues ne peuvent pas engrener ensemble : les dentures d'un engrenage ne peuvent pas être de formes différentes sur les deux roues dentées. Comme le module conditionne les dimensions des dents, la règle fondamentale des engrenages est logiquement :

**Deux roues ne peuvent engrener ensemble que si elles ont le même module.**

Il n'existe pas de denture de n'importe quel module, les modules sont normalisés :

Les premières valeurs normalisées de $m$																					
0,06	0,08	0,1	0,12	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,75	1	1,25	1,5	2	2,5	3	4	5	6	8	...

Figure 10 : Quelques exemples de modules normalisés

## 5 – Obtention des roues dentées

Les dentures des roues sont dotées d'un profil complexe. Les moyens d'obtenir ces formes sont divers. Le module conditionne la forme des outils et beaucoup d'outils ne sont conçus que la fabrication d'une seule forme de denture donc d'un unique module normalisé.

Le taillage par génération est le procédé d'usinage de dentures le plus utilisé. Il nécessite une machine spéciale rentabilisée par des fabrications en grandes séries. Les outils utilisés sont :

- L'outil crémaillère, voir ressource « *Taillage des engrenages par génération, outil crémaillère et outil pignon* »
- L'outil pignon, voir ressource « *Taillage des engrenages par génération, outil crémaillère et outil pignon* »
- La fraise-mère, voir ressource « *Taillage des engrenages par génération, outil fraise-mère* ».

Il existe d'autres procédés (voir ressource « *Taillage des engrenages sans génération* ») :

- L'usinage par fraise-disque,
- Le forgeage,
- Le brochage,
- Le frittage,
- ...

## 6 – Interférences

Lorsque le nombre de dents du pignon est faible (inférieur à 12 dents), le fond du creux de la dent (voir figure 8) est alors étroit. Lorsque le nombre de dents de la roue est grand, le sommet des dents est large, l'engrènement est alors difficile, voire même impossible : la tête des dents de la grande roue ne peut pas se déplacer dans le creux des dents du pignon. Il y a alors interférence de fonctionnement, on dit aussi que les dents interfèrent.

### Interférence de taille

Lors du mouvement de génération de la denture par l'outil crémaillère (voir ressource «*Taillage des engrenages par génération, outil crémaillère et outil pignon* »), il se peut qu'un des points de l'outil recoupe au niveau du pied de la dent le profil déjà usiné, ainsi le profil enveloppe en développante de cercle est alors tronqué et il n'y a plus de continuité de tangence. Un risque d'amorce de rupture de la dent est aussi ajouté.

Lors du taillage, l'outil façonne donc le fond des creux de dents créant ainsi une interférence de taille. La figure 11 montre l'usinage du fond des creux d'un pignon taillé par un outil crémaillère. Cette interférence de taille est supérieure à l'interférence de fonctionnement, et fragilise considérablement la dent.

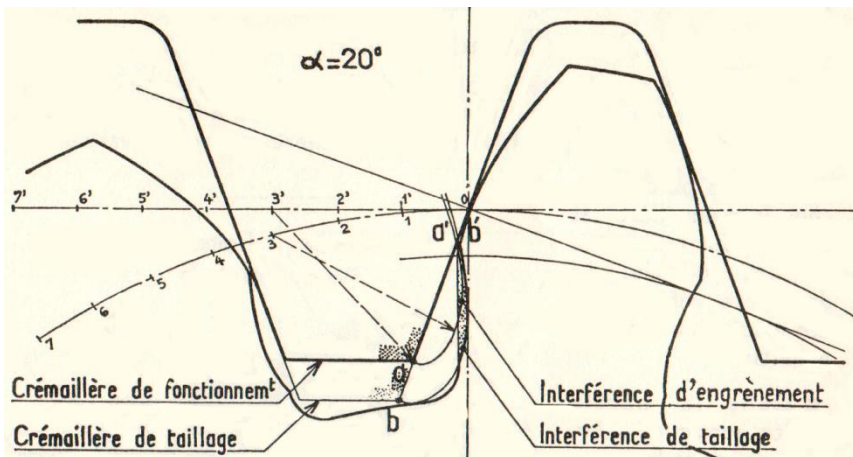


Figure 11 : Interférences de taille : courbe aa' lieu du sommet a de la crémaillère de fonctionnement, courbe bb' : lieu de fonctionnement b de la crémaillère de taillage, image [2]

Pour éviter les interférences, les corrections de denture ont été introduites dans la construction des engrenages apportant des améliorations sensibles sur la résistance et l'usure des dents. Prévenir le phénomène d'interférence conduit à vérifier la relation suivante :

$$Z \geq 2(1-x) / \sin^2 \alpha_0$$

Avec  $Z$  le nombre de dents,  $x$  le coefficient de déport et  $\alpha_0 = 20^\circ$ , angle de pression (en pratique le coefficient de déport  $x$  est limité à  $-0,5 \leq x < 0,8$ ).

Les corrections sont réalisées par augmentation de l'angle de pression ou par déport de denture.

## 7 – Déport de denture

La figure 12 met en évidence l'influence du coefficient de déport  $x$  sur la forme de la dent et sa position par rapport à la géométrie de référence (soit  $x = 0$ , le cercle de base  $C_b$  et le cercle primitif d'engrènement  $C_0$ ).

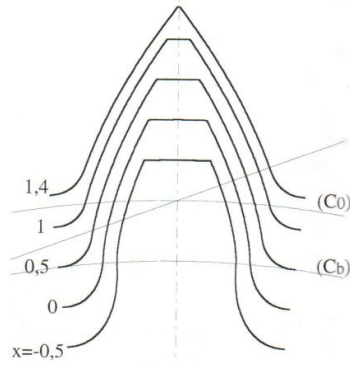


Figure 12 : Influence du coefficient de déport de denture sur sa forme, Image J. Dufailly [3]

Si  $x > 0$  alors l'épaisseur au pied de la dent  $s_b$  augmente mais la dent devient plus pointue.

Si  $x < 0$  alors la dent se creuse progressivement au niveau de son pied et au contraire l'épaisseur de tête augmente.

Le déport  $d$  décale la denture par rapport au cercle primitif (figures 13 et 14) cependant l'entraxe reste inchangé.

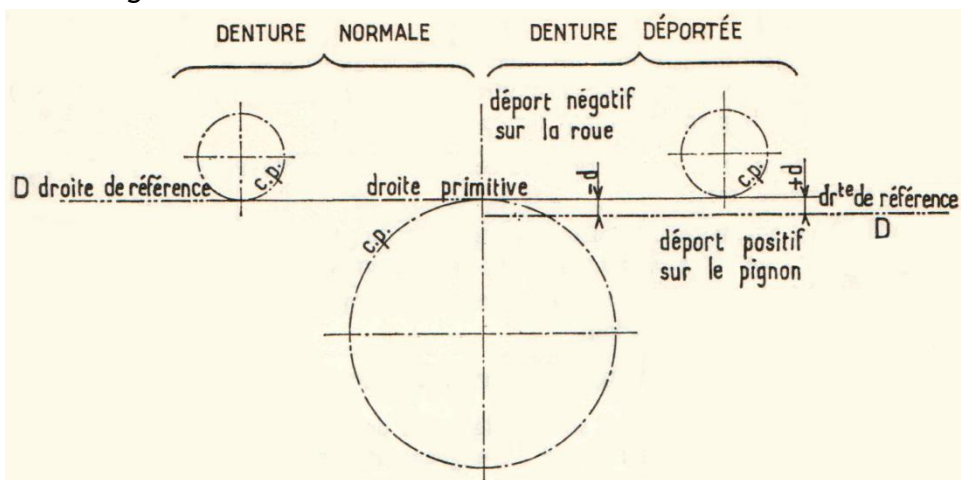


Figure 13 : Comparaison denture normale et denture déportée ; déport de denture  $d$  sur le pignon qui engrène sans variation d'entraxe avec la roue taillée avec un déport de  $-d$ , image [2]

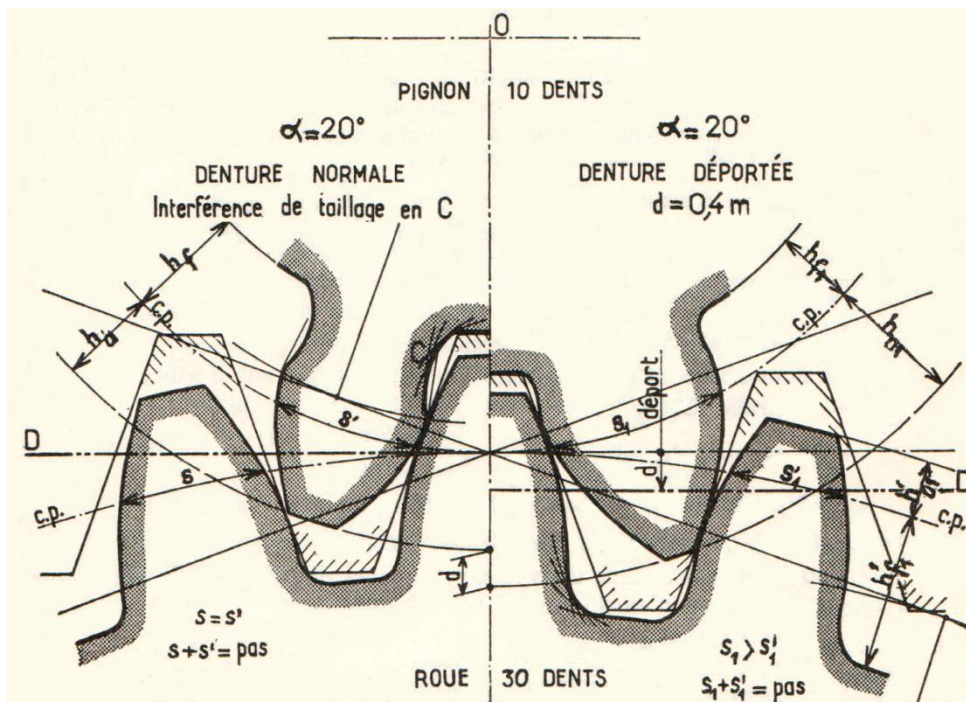


Figure 14 : Influence du déport de denture  $d$  sur le profil de dent, image [2]

## 6 – Conclusion

Le module d'une denture conditionne les techniques choisies pour sa fabrication. Des dents de gros module sont de grande taille, tous les procédés ne sont pas utilisables dans ce cas. Lors d'une production d'une roue dentée, il est donc nécessaire de connaître son module.

Différents procédés de production des engrenages sont présentés dans trois ressources : « *Taillage des engrenages par génération, outil crémaillère et outil pignon* », « *Taillage des engrenages par génération, outil fraise-mère* » et « *Taillage des engrenages sans génération* ». La ressource « *Contrôle des engrenages* » permet d'aborder les points de mesure à contrôler.

### Référence :

[1]: Guide des sciences de technologies industrielles, J.-L. Fanchon, AFNOR Nathan

[2]: Construction mécanique, tome 3, G. Lenormand, R. Mignée, J. Tinel, Foucher

[3]: Etude géométrique des engrenages cylindriques de transmission de puissance, J. Dufailly, Ellipses