

Les couples coniques hypoïdes

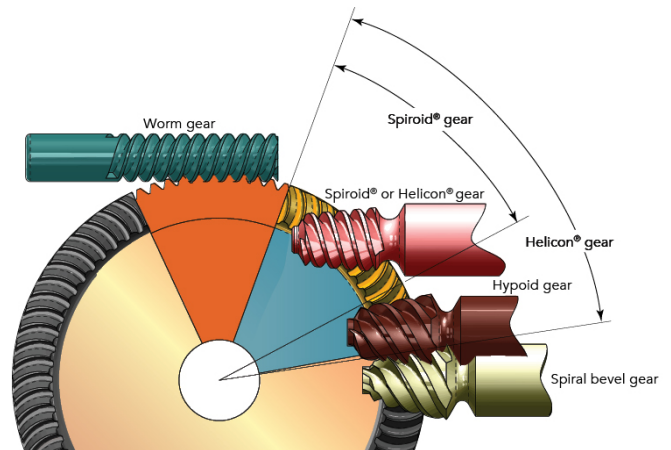
Principes de base et notes relatives à leur utilisation sur Toyota HDJ80

Les couples coniques à denture spirale hypoïdes sont utilisés sur les ponts avant et arrière de HDJ80 et sur de nombreux autres véhicules.

On peut classer les engrenages à axes croisés en 4 principales grandes familles, selon le décalage de l'axe du pignon par rapport à l'axe de la couronne. De haut en bas sur l'illustration :

- Vis sans fin
- Spiroïdes
- Hypoïdes
- Couples coniques à denture spirale

Pour les Spiroïdes, le rendement lorsque la couronne entraîne le pignon est très faible, de 5 à 10% environ, pour les vis sans fin il est pratiquement nul. Donc ces deux derniers types de sont pas utilisables dans un pont où les deux directions de rotation doivent avoir un rendement élevé pour permettre l'utilisation en marche avant, en marche arrière, ainsi qu'en situation d'accélération ou de décélération.



Par contre, une vis sans fin est utilisée par exemple sur le treuil mécanique du HDJ80. Elle permet d'éviter un retour en arrière du tambour lorsque le couple d'entraînement de la vis est relâché.

La grande famille des hypoïdes

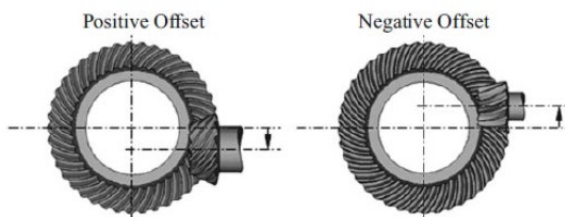
En particulier sur les ponts de véhicules tout terrain, les engrenages hypoïdes sont fréquemment utilisés parce qu'ils offrent plusieurs avantages (au prix d'une légère perte de rendement) : une meilleure résistance au couple, un rapport de transmission plus élevé si nécessaire, moins de bruit de fonctionnement, la possibilité de décaler la hauteur du pignon par rapport à la couronne, une usure plus régulière.

Les 4 types d'engrenages hypoïdes

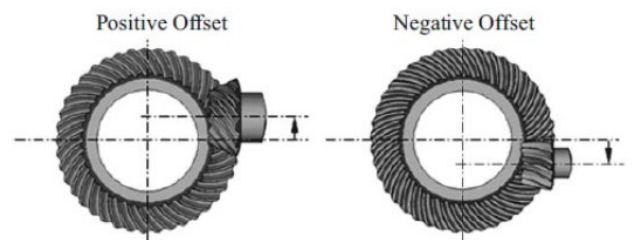
Il existe 4 types d'engrenages hypoïdes :

- en fonction de l'orientation de l'angle de spirale de la denture
- en fonction du décalage du pignon en hauteur par rapport à l'axe horizontal de la couronne.

Deux types avec denture spirale à droite



Deux types avec denture spirale à gauche

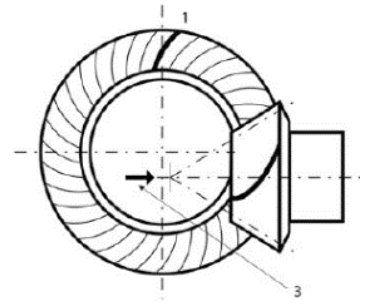


Pour déterminer le type, par convention, il faut regarder l'engrenage avec le pignon à droite et devant la couronne, comme sur les illustrations ci-dessus, puis déterminer l'orientation de la spirale de denture et le décalage vertical du pignon. Si le pignon se trouve derrière la couronne, on retrouve ces 4 mêmes types en visualisant par l'arrière.

L'orientation de la spirale de denture

Pour déterminer l'orientation de la spirale de denture, on regarde vers quel côté se déporte la courbure d'une dent qui se trouve proche de la verticale sur le sommet de la couronne.

Ici, la spirale est orientée vers la droite :



L'orientation de la spirale de denture a une influence directe sur la capacité de transmission du couple par rapport au sens de rotation de l'engrenage. Voir le chapitre sur la transmission du couple.

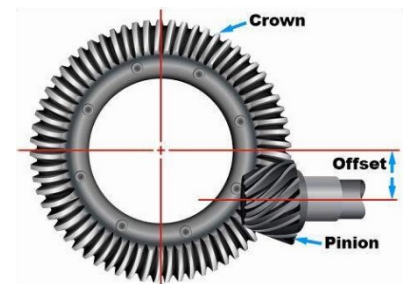
NB : Lorsque la spirale de denture est orientée vers la gauche, le terme "Reverse Cut" est souvent employé.

Le décalage du pignon en hauteur, ou offset

Le décalage (offset) du pignon est soit positif, soit négatif. Sa position en hauteur, au-dessus ou en dessous de l'axe horizontal de la couronne aura une importance dans un montage, mais elle ne qualifie pas complètement le type. **Le type dépend du décalage du pignon par rapport à l'orientation de la spirale de denture.** Pour une même position du pignon en hauteur, le type sera donc différent pour une orientation de spirale différente.

Par définition, le décalage est positif lorsque le pignon est décalé dans la direction indiquée par la courbure de la dent qui se trouve à droite sur l'axe horizontal de la couronne. Il est négatif dans le cas contraire.

Sur l'illustration ci-contre, le décalage est positif car la dent qui se trouve à droite sur la couronne indique la direction vers laquelle le pignon est décalé.



Un décalage positif implique un angle de spirale plus important, et donc un pignon plus gros (et donc plus solide) que s'il se trouvait sur l'axe horizontal de la couronne. Le décalage positif est le cas le plus fréquent.

Il est recommandé d'utiliser un décalage positif du pignon parce qu'il induit une augmentation du diamètre du pignon, il offre un rapport de contact frontal plus élevé, une meilleure résistance aux piqûres et à la flexion. En général, en raison du glissement longitudinal, le décalage ne doit pas dépasser 25 % du diamètre primitif extérieur de la couronne (diamètre de tête), et pour les applications lourdes, il doit être limité à 12,5 %.

NB : le jargon automobile utilise les termes "high pinion" ou "low pinion". C'est un raccourci qui n'indique pas seul à quel type on a affaire, puisqu'il faut connaître également l'orientation de la spirale de denture pour qualifier le type. Le qualificatif "high pinion" ou "low pinion" indique seulement que le pignon se trouve plus haut ou plus bas par rapport à l'axe de la couronne. Un montage "high pinion" pourra donc proposer un pignon plus gros ou plus petit selon la direction de la spirale de denture qui définira deux types différents.

Un décalage négatif induit un pignon plus petit : engrenage hypoïde

Un décalage positif induit un pignon plus grand : engrenage amboïde

L'un ou l'autre sera choisi selon les caractéristiques recherchées, gain de place ou résistance plus grande du pignon.

NB : Le terme amboïde que j'introduis ici, peu courant, est parfois employé à juste titre pour qualifier un décalage positif. Il est intéressant parce qu'il permet de rappeler par la même occasion que le pignon est plus gros dans ce cas (ambo).

Le terme hypoïde prend alors tout son sens, pour qualifier un décalage négatif, avec donc un pignon plus petit (hypo).

Néanmoins le terme hypoïde est le plus souvent employé pour qualifier les deux types, à décalage positif ou négatif, ce qui peut amener de la confusion.

La configuration de montage, pignon devant ou derrière la couronne

On ne peut pas parler de types à proprement parler, mais si on positionne le pignon derrière la couronne en conservant le signe du décalage, on inverse le sens de rotation en sortie et la position du pignon en hauteur. Par contre le mode de fonctionnement, drive ou coast, n'est pas affecté. Cela porte à 8 les possibilités de montage en utilisant les 4 types de base. Voir les cas N°4 et N°4HR plus loin dans le tableau des modes de fonctionnement.

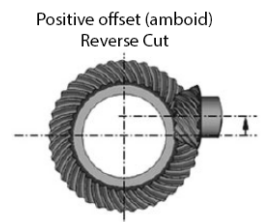
L'influence des types sur le sens de rotation

- Le sens du décalage du pignon ne change pas la direction de rotation en sortie d'engrenage.
- La direction de la spirale de denture ne change pas la direction de rotation en sortie.
- Le sens de rotation en sortie dépend uniquement de la position du pignon par rapport à la couronne (devant ou derrière la couronne). Si on retourne la couronne sur un montage, le sens de rotation en sortie est inversé. On retrouve alors les 4 types de base.

Les ponts avant et arrière sur HDJ80

Sur le pont avant du HDJ80, le pignon est au-dessus de l'axe horizontal de la couronne (montage "High Pinion"), avec une spirale à gauche "Reverse Cut".

Le décalage est positif, le pignon est donc plus gros que la normale. Le type est "Amboid Reverse Cut" comme ci-contre :



La tête de pont avant du HDJ80, représentée comme montée sur le véhicule, avec l'avant du véhicule qui serait à gauche.

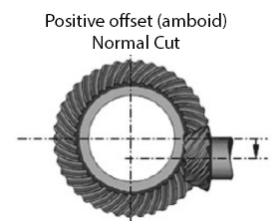
En marche avant, le pignon tourne dans la direction inverse des aiguilles d'une montre, vu de l'arrière du pignon ou de l'arrière du véhicule. A l'accélération en marche avant, on se trouve dans le cas N°4 du tableau des modes de fonctionnement présenté plus loin.

Ce type de montage permet :

- D'obtenir plus de résistance au couple à l'effort d'accélération en marche avant. Mais moins de résistance en marche arrière.
- De remonter l'arbre de transmission, ce qui permet d'avoir un plus grand débattement de suspensions sans trop incliner l'arbre et également d'avoir une meilleure garde au sol.
- De compenser (en marche avant tout du moins) la couronne plus petite et donc plus fragile à l'avant (8 pouces de diamètre au lieu de 9.5 pouces à l'arrière).

Sur le pont arrière du HDJ80, le pignon est en-dessous de l'axe horizontal de la couronne (montage "Low Pinion"), avec une spirale à droite "Normal Cut". Comme sur le pont avant le décalage est positif, donc le pignon est également plus gros que la normale.

Le type est "Amboid Normal Cut" comme ci-contre :



La tête de pont arrière du HDJ80, représentée comme montée sur le véhicule, avec l'avant



du véhicule qui serait à droite. En marche avant, le pignon tourne dans la direction inverse des aiguilles d'une montre, vu de l'arrière du véhicule. Comme pour le pont avant, l'engrenage est plus résistant en marche avant (à l'accélération), c'est le cas N°1 du tableau des modes de fonctionnement présenté plus loin. Le montage "Low Pinion" à l'arrière permet un meilleur alignement avec la sortie de boîte de transfert et dégagement de la place pour le plancher de l'habitacle.

La transmission du couple

Contrairement aux couples coniques sans décalage, la capacité de transmission du couple d'un engrenage hypoïde ne dépend pas seulement de la taille de leurs éléments, de leur qualité de fabrication et de la qualité de lubrification. Elle dépend aussi de l'orientation de la spirale de denture, du sens de rotation, et de la source du couple moteur (pignon ou couronne). Ces critères déterminent le mode de fonctionnement.

Les modes de fonctionnement ou modes de transfert du couple, "drive" et "coast"

Deux modes de fonctionnement existent :

Le mode "drive", est celui où la situation est favorable pour la transmission du couple.

Le mode "coast", est celui où la situation est défavorable pour la transmission du couple.

Le mode est défini par les flancs des dentures du pignon et de la couronne qui sont en contact lors de l'effort.

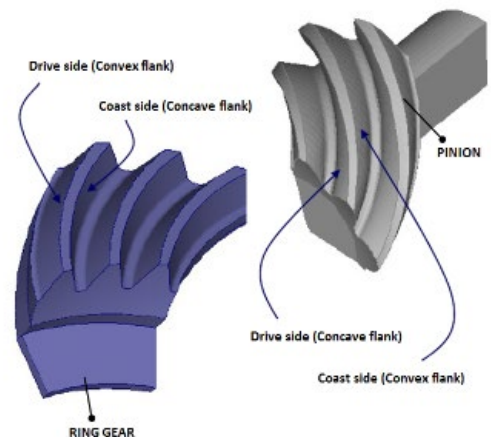
Pour le pignon comme pour la couronne, chaque dent possède un flanc drive et un flanc coast. C'est la courbure de leur denture qui le détermine.

Pour le pignon (pinion) :

- le flanc concave est appelé flanc "drive side"
- le flanc convexe est appelé flanc "coast side"

Sur la couronne (ring) c'est l'inverse :

- le flanc convexe est appelé flanc "drive side"
- le flanc concave est appelé flanc "coast side"



Lors de l'engrenage selon le sens de l'effort de couple, il y a deux possibilités au niveau des surfaces en contact, soit le pignon engrène avec ses flancs "drive side" sur les flancs "drive side" de la couronne, soit le pignon engrène avec ses flancs "coast side" sur les flancs "coast side" de la couronne.

Pour obtenir la meilleure résistance au couple, il faut que pignon et couronne utilisent leurs flancs "drive side".

L'engrenage est alors en mode drive. En mode coast, le couple transmissible est plus faible, en général 30% à 40% de différence. Plus le décalage du pignon est important, plus la différence est importante et plus le rendement diminue.

Le mode drive est subdivisé en deux cas selon la source du couple :

- Le pignon entraîne la couronne (cas du HDJ80 en marche avant à l'accélération).
- La couronne entraîne le pignon (cas du HDJ80 en marche arrière à la décélération).

Le mode coast est également subdivisé en deux cas :

- Le pignon entraîne la couronne (cas du HDJ80 en marche arrière à l'accélération).
- La couronne entraîne le pignon (cas du HDJ80 en marche avant à la décélération).

L'inversion de la source de couple (par exemple le passage d'une accélération à une décélération) pour un même sens de marche entraîne le passage du mode drive au mode coast ou vice-versa.

Pour un type d'engrenage donné, il existe donc 4 possibilités en ce qui concerne le mode de transfert de couple, selon le sens de rotation et selon la source du couple moteur, pignon ou couronne.

Si on veut répertorier tous les cas possibles il faut multiplier le nombre de modes de fonctionnement par le nombre de types, soit $4 \times 4 = 16$ cas différents, voir 32 cas si on tient compte des montages avec pignon derrière la couronne.

Pour savoir si on est en mode drive ou en mode coast, il faut simplement déterminer quels flancs de la denture du pignon et de la couronne sont en contact lors de l'effort.

L'engrenage fonctionnera en mode drive ou coast selon :

- Le sens de rotation du pignon (vu de l'arrière du pignon, coté arbre).
- L'orientation de la denture de spirale.
- La source du couple moteur, coté pignon ou coté couronne.

Voici les schémas des 32 cas possibles avec les 4 types d'engrenage hypoïde de base. Plutôt que d'utiliser la terminologie du décalage positif ou négatif, utilisée en bureau d'étude, la terminologie "High Pinion" et "Low Pinion" a été utilisée ici car elle est plus parlante dans le cadre d'un pont de véhicule. On peut remarquer que la force axiale exercée sur le pignon s'inverse en fonction du mode de fonctionnement. En mode coast, elle pousse toujours le pignon vers la couronne, ce qui tend à réduire le jeu de l'engrenage jusqu'à éventuellement l'endommager.

- NB :
- Le sens de rotation du pignon est indiqué vu de l'arrière du pignon, coté arbre.
 - Le sens de la spirale de denture est indiqué en regardant la couronne coté denture.
 - Les schémas de la première colonne à gauche, N°4 à 4Rc, sont ceux correspondants au pont avant du HDJ80.
 - Les schémas de la 3ème colonne, N°1 à 1Rc, sont ceux correspondants au pont arrière du HDJ80.

Couples coniques hypoïdes

Modes de fonctionnement

© Olivier ADLER 2024
StoneRecording.art

		Type Amboïde (pignon plus gros que la normale)			
		Montage High pinion		Montage Low Pinion	
		Pignon devant (Reverse Cut)	Pignon derrière (Normal Cut)	Pignon devant (Normal Cut)	Pignon derrière (Reverse Cut)
Pignon Moteur	Mode Drive				
	Mode Coast				
Couronne Motrice	Mode Drive				
	Mode Coast				

Couples coniques hypoïdes

Modes de fonctionnement

© Olivier ADLER 2024
StoneRecording.art

		Type Hypoïde (pignon plus petit que la normale)			
		Montage High pinion		Montage Low Pinion	
		Pignon devant (Normal Cut)	Pignon derrière (Reverse Cut)	Pignon devant (Reverse Cut)	Pignon derrière (Normal Cut)
Pignon Moteur	Mode Drive				
	Mode Coast				
Couronne Motrice	Mode Drive				
	Mode Coast				

Le tableau suivant simplifié décrit les configurations dans les modes drive et coast, avec les sens de marche pour le HDJ80. Le sens du décalage du pignon est omis car il n'influence pas le mode de fonctionnement même s'il a une influence non négligeable sur le couple transmissible, parce qu'il occasionne un pignon plus ou moins grand. Le sens de montage du pignon devant ou derrière la couronne est également omis parce qu'il ne définit pas un type à proprement parler.

Modes de fonctionnement des couples coniques à dentures spirales					
Sens de rotation du pignon	Source de couple	Orientations de la spirale de denture	Mode résultant	Cas du HDJ80 , train avant	Cas du HDJ80 , train arrière
A gauche	Pignon	A droite	Coast		Marche arrière en accélération, cas N°1c
A gauche	Pignon	A gauche (reverse cut)	Drive	Marche avant en accélération, cas N°4	
A gauche	Couronne	A droite	Drive		Marche arrière en décélération, cas N°1R
A gauche	Couronne	A gauche (reverse cut)	Coast	Marche avant en décélération, cas N°4Rc	
A droite	Pignon	A droite	Drive		Marche avant en accélération, cas N°1
A droite	Pignon	A gauche (reverse cut)	Coast	Marche arrière en accélération, cas N°4c	
A droite	Couronne	A droite	Coast		Marche avant en décélération, cas N°1Rc
A droite	Couronne	A gauche (reverse cut)	Drive	Marche arrière en décélération, cas N°4R	

Deux observations qui découlent des modes de fonctionnement : sur HDJ80 il faut éviter de forcer en marche arrière, et éviter de retomber d'un saut avec les roues qui tourneraient beaucoup moins vite qu'au décollage.

Les effort axiaux

Au niveau des efforts axiaux sur le pignon, quel que soit le type de montage :

En mode drive, le pignon tend à vouloir reculer vers l'arbre, donc le jeu augmente.

En mode coast, le pignon tend à vouloir avancer dans la couronne, le jeu se réduit, jusqu'à éventuellement détériorer les dentures.

Les tailles et résistances des couronnes de couple conique sur les 4x4 Toyota

Il existe 4 tailles de couronne de couple conique sur les 4x4 Toyota :

- 7.5" : à l'avant sur les Runner, sur les Hilux à roues indépendantes. Très fragile. A éviter en tout terrain intensif.
- 8" : à l'arrière sur les Runner, Hilux, KZJ/KDJ, à l'avant sur les HDJ80, HDJ100, HZJ78. Il casse parfois sur les Runner, souvent sur les KZJ. Il casse de temps en temps sur l'avant des 80 et des 100.
- 9" : à l'avant sur les VDJ200
- 9.5" : à l'avant et à l'arrière sur les HJ60/61, BJ70/71. Pratiquement incassable.
- 9.5" avec une couronne plus large : à l'arrière sur les HDJ80, HDJ100, HZJ78. Réputé incassable.

Les tailles de couronnes en mm :

7.5" -> 190mm

8" -> 208mm

9" -> 220mm

9.5" -> 240mm

Notes de Gleason, fabricant leader de machines spéciales de taillage d'engrenages hypoïdes (traduction) :

"L'ingénieur en charge des engrenages devrait, dans la mesure du possible, concevoir des couples coniques avec un décalage du pignon. De petits décalages permettent déjà d'obtenir les avantages souhaités sans les inconvénients potentiels que le décalage hypoïde peut induire. Même un très petit décalage permet d'éviter les piqûres de corrosion le long de la ligne de tangage, comme on les connaît dans les couples coniques à denture spirale. Les inconvénients possibles des décalages hypoïdes, au-delà de 5 % du diamètre de la couronne, sont l'utilisation nécessaire d'huiles hypoïdes avec des additifs et le risque de rayures pendant la période de rodage des dentures. Les engrenages hypoïdes dont le décalage est supérieur à 20 % ont un faible rendement et une température de fonctionnement élevée. Le décalage optimal, compris entre 10 et 15 %, permet d'obtenir des engrenages supérieurs aux couples coniques à denture spirale en termes de résistance, de silence de fonctionnement et d'efficacité. Les couples coniques hypoïdes ont également les températures de fonctionnement les plus basses par rapport aux autres transmissions angulaires."

Version 2.21 pour relecture