

TRANSMISSION DE PUISSANCE



Compétences visées :

- A3-01** Associer les fonctions aux constituants.
- A3-02** Justifier le choix des constituants dédiés aux fonctions d'un système.
- A3-05** Caractériser un constituant de la chaîne de puissance.
- D1-02** Repérer les constituants réalisant les principales fonctions des chaînes fonctionnelles.
- F2-01** Proposer et hiérarchiser des critères de choix.
- F2-03** Choisir les composants de la chaîne de puissance.
- F3-01** Dimensionner un composant des chaînes fonctionnelles à partir d'une documentation technique.

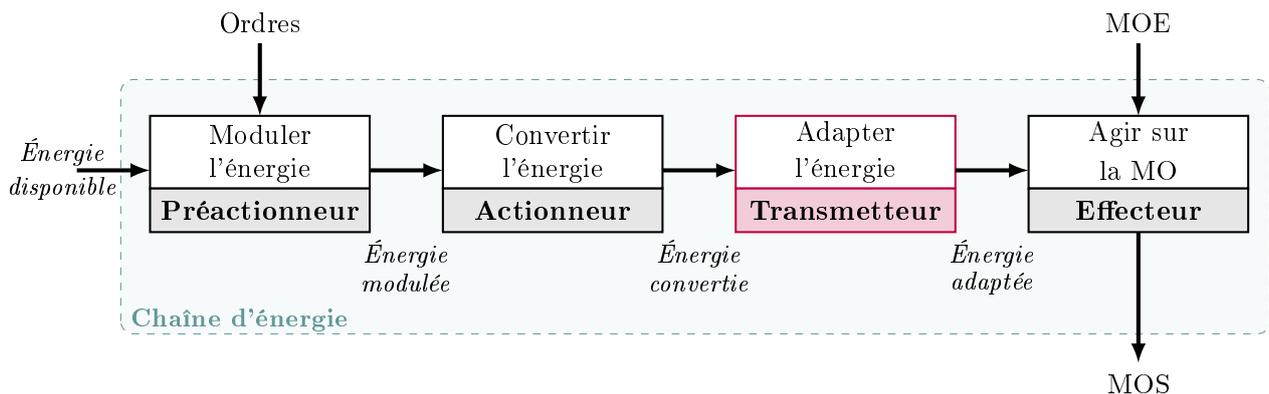
Table des matières

1	Introduction	3
2	Systèmes de transformation de mouvement usuels	4
2.1	Système vis-écrou	4
2.2	Système pignon-crémaillère	4
2.3	Systèmes à came	5
2.4	Systèmes à excentrique	5
2.5	Système à bielle-manivelle	5
2.6	Croix de malte	6
3	Transmission de puissance : joints et accouplements mécaniques	6
4	Réducteurs et variateurs	7
4.1	Définitions	7
4.2	Roues de friction	8
4.3	Poulies-courroie	8
4.4	Pignons-chaîne	9
4.5	Systèmes par engrenages	10
5	Les engrenages	10
5.1	Principe	10
5.2	Normalisation d'un engrenage	11
5.3	Différents types d'engrenages	12
5.4	Géométrie des dentures	13
5.5	Puissance transmissible et particularités de la transmission	14
6	Trains d'engrenages	15
6.1	Trains simples	15
6.2	Trains épicycloïdaux	15

1 Introduction

La chaîne d'action ou d'énergie comprend :

- des préactionneurs qui permettent de moduler (distribuer) le transfert d'énergie de la source d'entrée (énergie disponible) vers l'énergie d'entrée de l'actionneur (énergie modulée) ;
- des actionneurs (vérins, moteurs) qui convertissent une énergie électrique, hydraulique, pneumatique en énergie mécanique ;
- **des transmetteurs qui adaptent et transmettent l'énergie.** On parle généralement dans ce cas de **transmission de puissance** ;
- des effecteurs qui agissent directement sur la matière d'œuvre.



Un transmetteur permet de transmettre et adapter une puissance entrante P_e délivrée par un actionneur en une puissance de sortie P_s utilisable notamment par un effecteur. Une puissance (unité : Watt) est une grandeur scalaire qui est toujours le produit de deux grandeurs variables :

- une variable d'**effort**, notée en général $e(t)$, qui « tend » à déplacer une certaine quantité de matière (ou de quelque chose qui en tient lieu) ;
- une variable de **flux**, notée en général $f(t)$, qui traduit le déplacement avec un certain « débit » d'une quantité de matière (ou de quelque chose qui en tient lieu).



Attention

Ces deux termes génériques sont à prendre dans un sens large non liés à un domaine physique ou technique particulier. Par conséquent il ne faut surtout pas penser que terme effort correspond seulement à une force !

Domaine	Effort e	Flux f
Mécanique de translation	Force F (N)	Vitesse v (m.s ⁻¹)
Mécanique de rotation	Couple C (N.m)	Vitesse angulaire ω (rad.s ⁻¹)
Électricité	Tension u (V)	Courant i (A)
Hydraulique, pneumatique	Pression P (Pa)	Débit volumique Q_v (m ³ .s ⁻¹)
Thermodynamique, thermique	Température T (K)	Flux d'entropie \dot{S} (J.K ⁻¹ .s ⁻¹)

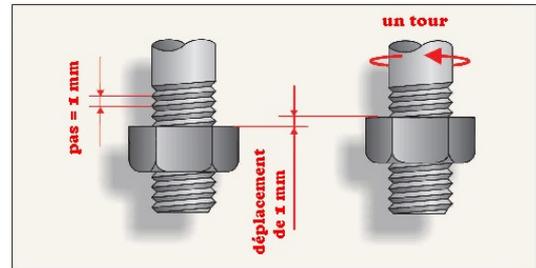
Dans le cadre de l'étude de transmetteurs mécaniques, les variables de flux correspondent à des vitesses (en m.s⁻¹) ou à des vitesses de rotation (en rad.s⁻¹). Les variables d'effort correspondent à une force (en N) ou à un couple (en N.m).

2 Systèmes de transformation de mouvement usuels

2.1 Système vis-écrou

La cinématique du système vis-écrou est définie par le **pas de la vis**, noté p , exprimé en mm/rad ou en mm/tour, qui correspond à la distance entre deux filets successifs (pour les vis à 1 seul filet !), et le sens de l'hélice par la relation (pour un pas à droite) :

$$V_{\text{vis/écrou}} = \frac{p}{2\pi} \omega_{\text{vis/écrou}}$$



- Le pas d'une vis est à droite, si le filet monte à droite lorsqu'on tient la vis verticalement (pas largement majoritaire).
- Une augmentation du nombre de filets permettra une augmentation du pas tout en conservant une bonne résistance aux efforts.

Transformation : Rotation continue \leftrightarrow translation continue

Caractéristique : Pas de la vis p et sens de l'hélice

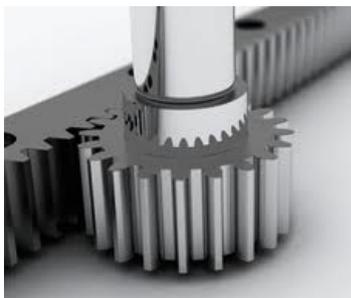
Réversibilité : Dépend des frottements dans la liaison. Ce système est souvent irréversible lorsqu'on n'a pas interposition d'éléments roulants limitant le frottement.

Applications : Vérins électriques, chariots de machines outils, pilote automatique, élévateurs, etc.

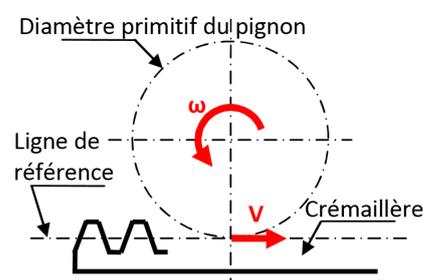
2.2 Système pignon-crémaillère

Cette transformation fait partie de la famille des engrenages (cf §5). La vitesse de translation de la crémaillère est fonction du diamètre de la roue dentée :

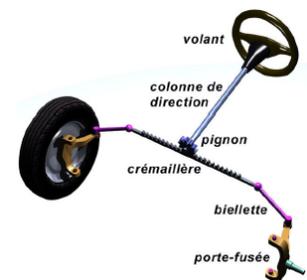
$$V_{\text{crémaillère}} = R \omega_{\text{pignon}}$$



Exemple



Principe



Direction de voiture

Transformation : Rotation continue \leftrightarrow translation continue

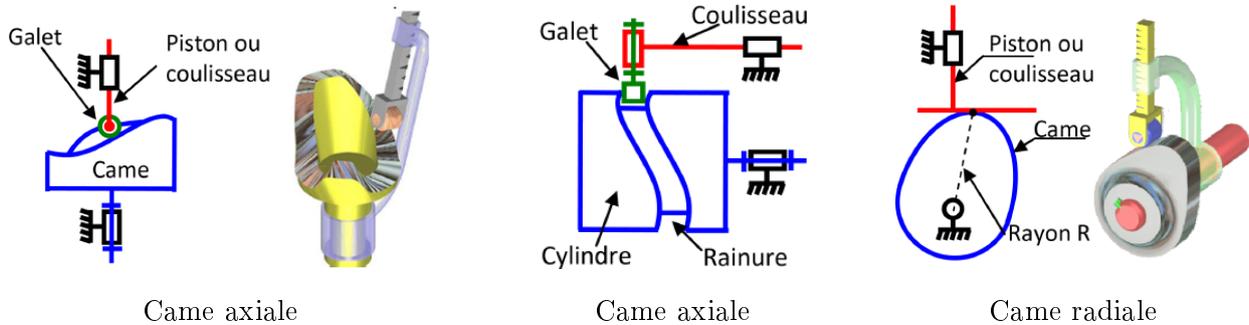
Caractéristique : Rayon du pignon R

Réversibilité : Oui

Applications : Portes de TGV, portes de garage, directions de voiture, etc.

2.3 Systèmes à came

La loi entrée-sortie (relation entre l'angle de rotation de la came et la translation générée) est fonction du profil de la came (généralement défini en coordonnées polaires). Les systèmes varient en fonction de la position de l'axe de translation par rapport à l'axe de rotation.



Came axiale

Came axiale

Came radiale

Type : Rotation continue \leftrightarrow translation alternative

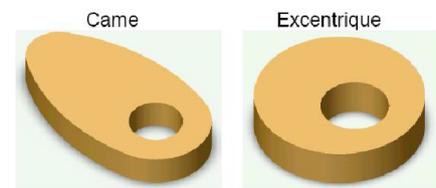
Caractéristique : Profil de la came ($R(\theta)$). Dépend aussi de l'architecture du mécanisme.

Réversibilité : Oui (moteur \leftrightarrow pompe)

Applications : Pompes et moteurs hydrauliques, systèmes d'indexation, arbres à cames de moteur à explosion, etc.

2.4 Systèmes à excentrique

Les systèmes à excentriques reposent sur le même principe. La rotation continue d'entrée est transformée en translation alternative de la sortie. La principale différence réside dans le fait que la came a un rayon polaire variable alors que le système à excentrique est uniquement défini par l'excentrique (sic).



Type : Rotation continue \rightarrow translation alternative

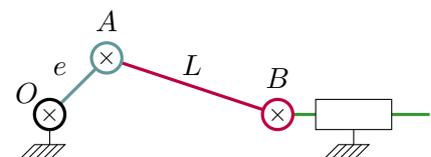
Caractéristique : Excentrique e

Réversibilité : Extrêmement rare

Applications : Pompes hydrauliques, scie sauteuse, taille haies, etc.

2.5 Système à bielle-manivelle

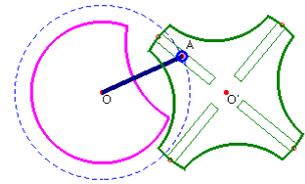
Le système le plus connu (utilisé, entre autres, dans les moteurs thermiques) est le système bielle-manivelle. La longueur de l'excentration sur la manivelle (ou excentrique) e et la longueur de la bielle L jouent sur la relation entre l'angle de la manivelle et la translation de la tige.



Type :	Rotation continue \leftrightarrow translation alternative (ou l'inverse)
Caractéristique :	e et L . Les positions extrêmes appelées point mort haut et point mort bas sont toujours obtenues lorsque les 3 points O , A et B sont alignés
Réversibilité :	Oui
Applications :	Moteurs thermiques, compresseurs, certaines pompes et moteurs hydrauliques, etc.

2.6 Croix de malte

Ce système est utilisé pour des applications de transfert et permet de **transformer une rotation continue en rotation discontinue**. Il permet donc de faire tourner un moteur de manière continue afin de produire un mouvement de rotation discontinue en limitant le nombre de phases de démarrage/arrêt du moteur qui sont un des facteurs d'usure des moteurs.



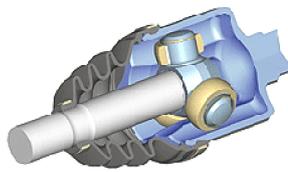
Type :	Rotation continue \rightarrow rotation intermittente
Caractéristique :	Entraxe $L = OO'$, longueur du maneton $R = OA$
Réversibilité :	Jamais
Applications :	Plateaux indexeurs (ex : capsuleuse de bocaux)

3 Transmission de puissance : joints et accouplements mécaniques

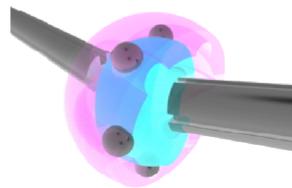
Plusieurs solutions permettent de **transmettre** un mouvement de rotation entre deux arbres, parallèles ou non, concourants ou non. L'homocinétisme (vitesse de sortie constante pour une vitesse d'entrée constante) est parfois recherché. Le joint de cardan n'est pas homocinétique tandis que le joint tripode l'est quasiment et le joint Rzeppa l'est complètement.



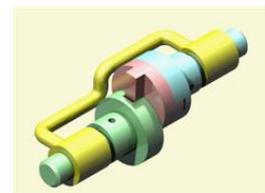
Joint de cardan



Joint Tripode



Joint Rzeppa



Joint de Oldham



Remarque

Sur les automobiles, on ne retrouve pas de joints de cardan : c'est un abus de langage. Ce sont en fait des joints tripodes associés à des joints Rzeppa qui sont réellement utilisés.

4 Réducteurs et variateurs

Les réducteurs permettent d'adapter le couple et la vitesse de rotation d'un moteur en un couple et une vitesse sur l'arbre de sortie. La vitesse d'un moteur est souvent élevée et le couple faible alors que la vitesse souhaitée sur l'arbre récepteur est beaucoup plus faible et le couple bien plus élevé.

On peut classer les réducteurs en différentes catégories en fonction de la technologie employée pour transmettre le mouvement :

- transmission par adhérence : roue à friction (dynamo de vélo), système poulie-courroie (alternateur de voiture)
- transmission par obstacle : système poulie-courroie avec courroie dentée (courroie de distribution d'une voiture), système à chaîne (vélo, moto), système à engrenage (boite de vitesse).

4.1 Définitions

4.1.1 Aspect cinématique

La norme ISO 1122-1 de 1998, ainsi que la norme NF E 23-001 définissent la notion de rapport de transmission.



Définition *Rapport de transmission*

Le rapport de transmission est défini comme étant le quotient de la vitesse angulaire de l'arbre d'entrée ω_e par celle de l'arbre de sortie ω_s du système transmetteur de puissance.

$$i = \frac{\omega_e}{\omega_s}$$

Le rapport de transmission est positif lorsque les vitesses angulaires sont de même sens et négatif lorsqu'elles sont de sens inverse.

Cette norme introduit cependant une confusion avec la manière dont on définit les fonctions de transferts par exemple, où la fonction de transfert est définie comme le quotient de la grandeur de sortie sur la grandeur d'entrée. De plus, on utilise de manière usuelle l'inverse du rapport de transmission pour déterminer les lois d'entrée-sortie dans un système de transmission de puissance. En effet, on connaît très souvent la vitesse de rotation à l'entrée et on recherche celle de sortie.

On utilisera donc quasiment systématiquement la notion de **rapport de réduction**, défini comme étant l'inverse du rapport de transmission.



Définition *Rapport de réduction*

Le rapport de réduction est défini comme étant le quotient de la vitesse angulaire de l'arbre de sortie ω_s par celle de l'arbre d'entrée ω_e du système transmetteur de puissance.

$$r = \frac{1}{i} = \frac{\omega_s}{\omega_e}$$

Le rapport de réduction est positif lorsque les vitesses angulaires sont de même sens et négatif lorsqu'elles sont de sens inverse.



Définition Terminologie

- Lorsqu'on a $|r| < 1$, on parle de **système réducteur** et de **rapport de réduction**.
- Lorsqu'on a $|r| > 1$, on parle de **système multiplicateur** et de **rapport de multiplication**.
- On parle aussi d'**inverseur** lorsqu'il y a inversion du sens de rotation ($r < 0$).

4.1.2 Aspect énergétique

Si le rendement du réducteur ou du multiplicateur est idéal, on a la relation de conservation de la puissance mécanique entre l'entrée et la sortie du système de transmission de puissance :

$$P_e = P_s \quad \Rightarrow \quad C_e \omega_e = C_s \omega_s$$

Dans le cas d'un réducteur de fréquence de rotation, il y a multiplication du couple. Dans le cas d'un multiplicateur de fréquence de rotation, il y a réduction du couple.

Si l'on prend en compte le rendement η de la transmission, on a :

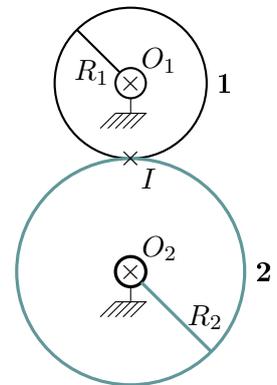
$$\eta = \frac{P_s}{P_e} = \frac{C_s \omega_s}{C_e \omega_e} = \frac{C_s}{C_e} r$$

4.2 Roues de friction

On appelle transmission par **roue de friction** un mécanisme constitué de **deux roues roulant sans glisser l'une sur l'autre**. On trouve ce type de transmission sur l'alternateur et la roue d'un vélo. En utilisant la relation de roulement sans glissement au point de contact $\vec{V}_{I \in 2/1} = \vec{0}$ entre les deux roues, on montre que :

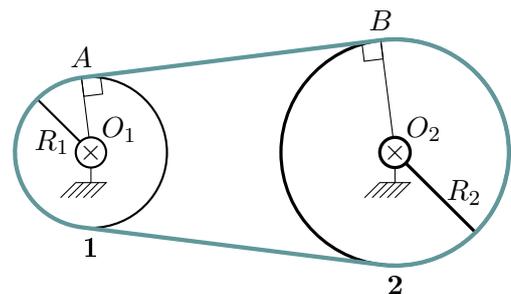
$$r = \frac{\omega_{2/0}}{\omega_{1/0}} = -\frac{R_1}{R_2}$$

L'inconvénient de ce type de transmission est que le rapport n'est certain que s'il y a réellement roulement sans glissement. Pour assurer le non-glissement, il est nécessaire d'avoir un coefficient de frottement et un effort presseur entre les deux roues importantes. Dans le cas de puissance plus importantes à transmettre, on évitera cet écueil en utilisant des transmissions par obstacle.



4.3 Poulies-courroie

C'est certainement la transmission de puissance la plus ancienne ; elle est utilisée depuis le début de l'époque industrielle. Elle permet de véhiculer l'énergie mécanique entre deux arbres parallèles et relativement éloignés (on peut aussi avoir des systèmes de renvois qui permettent d'utiliser des courroies entre des arbres inclinés ou perpendiculaires).



Du fait de l'inextensibilité de la courroie, les vitesses de tous ses points ont la même norme. Si la courroie ne glisse pas sur les poulies, on en déduit le rapport de réduction du système poulies-courroie :

$$r = \frac{\omega_{2/0}}{\omega_{1/0}} = \frac{R_1}{R_2}$$

Ce type de transmission de puissance est encore énormément utilisé, par exemple dans l'industrie automobile (courroie d'accessoires, courroie de distribution, courroie d'alternateur). Les courroies peuvent être plates, trapézoïdales, striées ou synchrones.



Remarque

Cette relation n'est valable que s'il y a non glissement entre la courroie et les poulies, ce qui nécessite un coefficient de frottement élevé et un système permettant de tendre constamment la courroie.

Pour augmenter le couple transmissible par un tel système, on peut utiliser des courroies crantées qui suppriment le glissement (courroie de distribution dans les moteurs 4 temps).

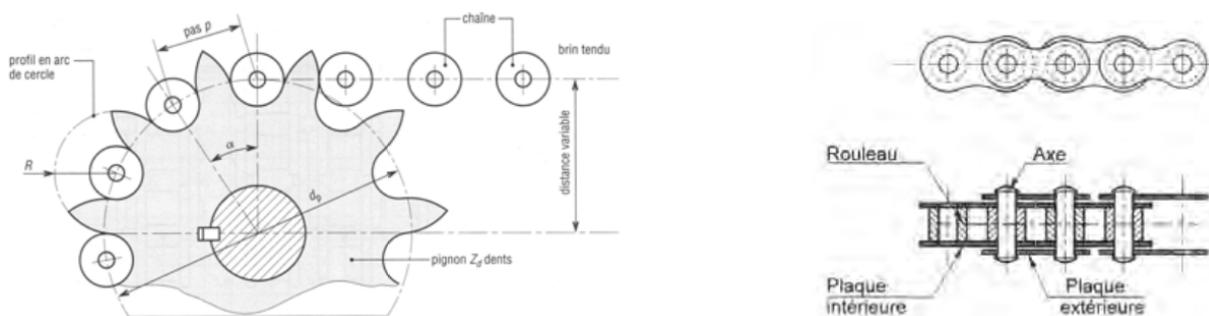
Avantages - inconvénients :

- Avantages : économique, utilisation possible avec axes de poulies non // par ajout de galets intermédiaires, silencieux, amortissement des à coups grâce à l'élasticité des courroies.
- Inconvénients : non adapté aux conditions difficiles à cause des matériaux de la courroie, durée de vie limitée, glissement possible (sauf courroies crantées).

4.4 Pignons-chaîne

Seule l'architecture ressemble à celle de la transmission par poulies - courroie, car la transmission de puissance par pignons et chaîne ne s'effectue plus par adhérence, mais **par obstacle**.

L'arbre moteur et l'arbre récepteur sont aussi relativement éloignés. La première figure ci-dessous représente l'engrènement de la chaîne sur une roue dentée. La deuxième montre la constitution d'une chaîne à rouleaux qui sont les chaînes les plus couramment utilisées.



Les systèmes de chaîne-pignon sont utilisés en automobile pour la distribution, pour la transmission de puissance des cycles (vélo, moto), pour les systèmes de convoyage dans l'industrie.

Il n'y a pas de glissement entre la chaîne et les roues dentées, ce qui garantit un rapport de transmission constant. Il s'exprime par :

$$r = \frac{\omega_{2/0}}{\omega_{1/0}} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{Z_1}{Z_2}$$

Avantages - inconvénients :

- Avantages : transmission de couples très important, aucun glissement, entraînement à rapport constant (indépendamment du couple). Le sens de rotation peut être facilement inversé.
- Inconvénients : technologie bruyante, lubrification nécessaire.

4.5 Systèmes par engrenages

Les engrenages sont constitués de roues dentées engrenant l'une avec l'autre. Chaque roue est en rotation autour d'un axe. La transmission de mouvement entre les deux roues se fait par obstacle (contact entre les différentes dents).

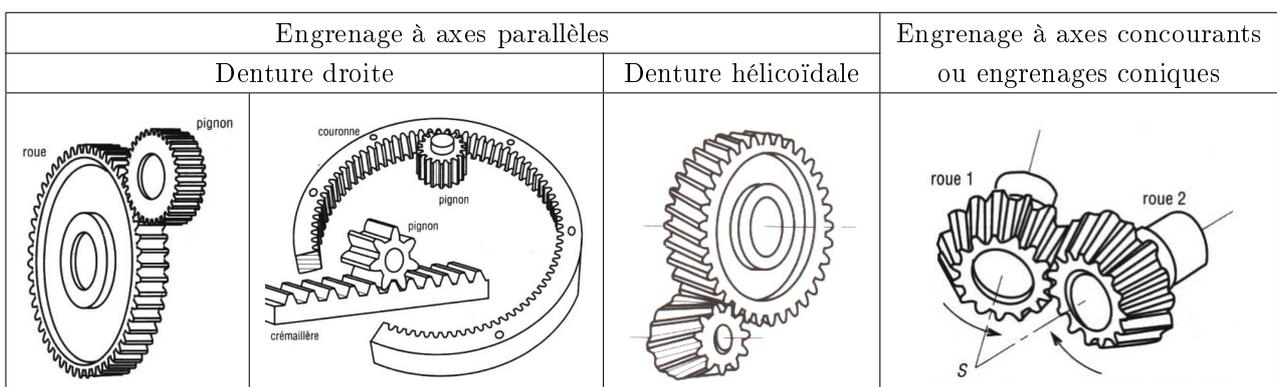
Les systèmes de réduction de vitesse par engrenages sont très nombreux. Nous y reviendrons au chapitre 6, mais dans un premier temps, nous allons nous intéresser à la technologie des engrenages.

5 Les engrenages**5.1 Principe**

La transmission de puissance par engrenage véhicule l'énergie mécanique entre deux arbres sans éléments supplémentaires et par obstacles (contact direct). L'arbre moteur et l'arbre récepteur peuvent être **parallèles**, **sécants** ou **orthogonaux**. Ce mode de transmission de puissance est vieux de plus de 2000 ans, il était ainsi possible d'observer des roues possédant des dents faites de bâtons de bois en vue de transmettre un mouvement de rotation dans les puits à eau.

Un engrenage est la constitution d'un **pignon** et d'une **roue dentée** (le terme pignon est réservé pour la roue munie du plus petit nombre de dents). On parle aussi de **pignon arbré** lorsque le pignon est directement usiné sur l'arbre et n'est pas rapporté.

Les systèmes par engrenages ont pour fonction de transmettre la puissance mécanique et d'adapter la vitesse de rotation et le couple transmissible.

**Définition Engrenage**

On appelle engrenage « non gauche » un mécanisme constitué de 2 roues dentées, cinématiquement équivalent à deux roues de friction.



Définition *Diamètre primitif*

On appelle **diamètres primitifs** d_1 et d_2 les diamètres des roues de friction équivalentes.

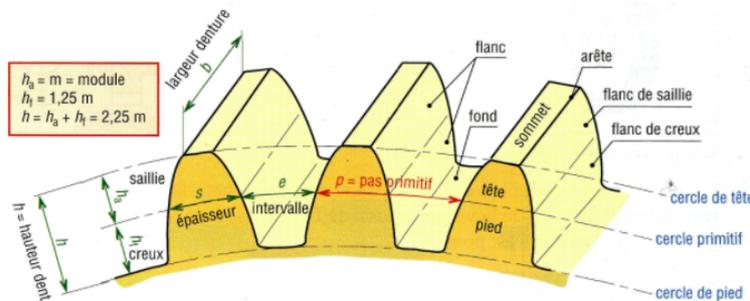
On a alors, en écrivant la relation de roulement sans glissement au point de contact (qui est aussi centre instantané de rotation de **2/1**) :

$$r = \frac{\omega_{2/0}}{\omega_{1/0}} = -\frac{R_1}{R_2}$$

Remarque : il existe des mécanismes à engrenage « gauche » tel que l'équivalence cinématique ne soit pas réalisée, les deux roues tournent dans le même sens de rotation (engrenage Mercier).



5.2 Normalisation d'un engrenage



Définition *Terminologie*

Le pas primitif p est la **distance entre deux dents** consécutives sur le cercle primitif.

Le module m d'un engrenage est défini par la relation $p = \pi m$. Il caractérise la géométrie des dents. On peut alors poser la relation entre le module, le diamètre et le nombre de dents Z d'une roue dentée : $d = mZ$

- Deux roues ne peuvent engrener que si elles ont le même pas et le même module.

$$p = \pi \frac{D_1}{Z_1} = \pi \frac{D_2}{Z_2} = \pi m$$

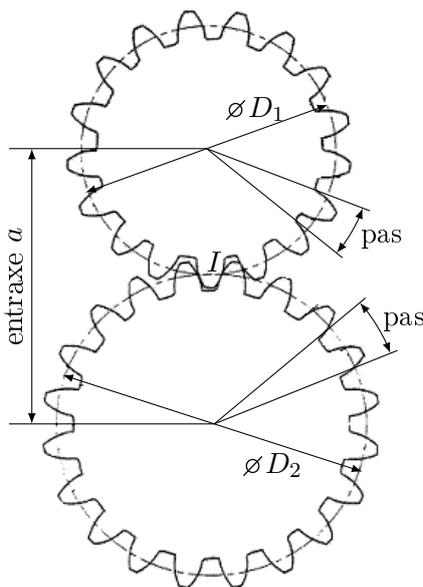
- Comme $D_1 = mZ_1$ et $D_2 = mZ_2$, on a :

$$\frac{D_2}{D_1} = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{R_2}{R_1}$$

- Il y a **roulement sans glissement au point de contact** des cercles primitifs :

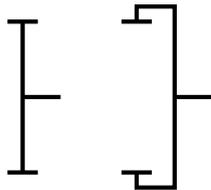
$$\overrightarrow{V_{I \in 2/1}} = \vec{0}$$

- L'**entraxe** a est la distance : $a = R_1 + R_2 = \frac{D_1 + D_2}{2}$



5.3 Différents types d'engrenages

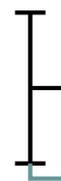
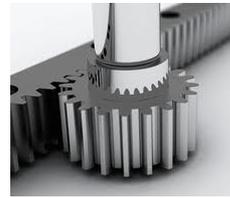
Chaque type d'engrenage dispose de sa représentation normalisée, à utiliser notamment dans les schémas cinématiques.



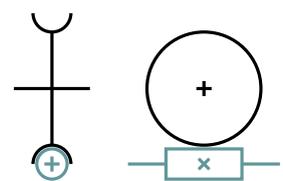
Engrenage cylindrique



Engrenage conique



Pignon crémaillère



Roue vis sans fin

5.3.1 Engrenages cylindriques

Un engrenage cylindrique est un engrenage où les roues de friction correspondantes sont des cylindres de révolution. Le contact peut être intérieur ou extérieur et influence le sens de rotation (engrenage intérieur : même sens de rotation ; engrenage extérieur : sens de rotation inversé entre les deux roues).

On utilise fréquemment ce type d'engrenage pour les montres, voitures à friction (jouet), réducteurs, etc.

5.3.2 Engrenages coniques

Les axes de rotation des engrenages coniques sont concourants. Les roues de friction sont coniques. Il est nécessaire que les sommets des cônes primitifs coïncident pour assurer un fonctionnement sans glissement. Un dispositif de réglage de la position axiale des pignons doit systématiquement être prévu. Les dents peuvent être droites ou hélicoïdales.

5.3.3 Pignon-crémaillère

C'est un engrenage cylindrique dans lequel la roue (roue dentée la plus grande) a un rayon infini.

5.3.4 Roue et vis sans fin

Les axes de rotation de la roue et de la vis sans fin sont orthogonaux mais non concourants. Le sens de l'hélice est le même pour la roue et pour la vis.

Le signe du rapport de réduction dépend de l'orientation des axes de rotation mais aussi du sens de l'hélice.

$$\left| \frac{\omega_{\text{roue/bâti}}}{\omega_{\text{vis/bâti}}} \right| = \frac{\text{nombre de filets}}{Z_{\text{roue}}}$$

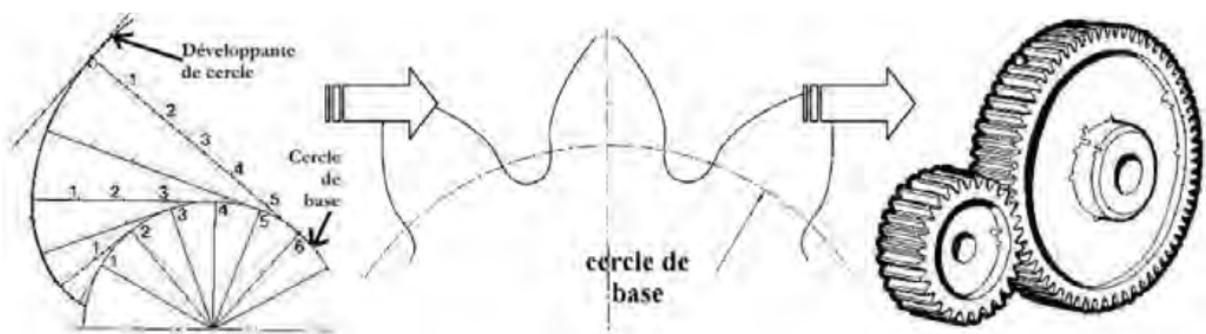
Ce système est très souvent **irréversible**. Cette irréversibilité est fonction de l'angle de la vis (si les filets sont quasi orthogonaux à l'axe, le système est irréversible). La vis entraîne la roue mais la roue n'entraîne par la vis.

5.4 Géométrie des dentures

5.4.1 Principe

Les premiers systèmes d'engrenage utilisaient des parallélépipèdes en guise de denture. Le temps aidant, les utilisateurs se sont aperçus que les dents ainsi utilisées s'usaient suivant une forme qui ne s'apparentait ni à un parallélépipède, ni à un cercle. Il a fallu attendre le XIX^e siècle pour affiner la formulation mathématique de ces courbes : la **développante de cercle** était née.

La courbe à développante de cercle est le profil tracé par l'extrémité d'un segment de droite roulant sur un cercle de base. Concrètement, une développante de cercle s'obtient en enroulant un fil autour d'un cylindre de diamètre donné (cercle de base). Si un crayon est attaché à l'extrémité du fil, et si ce dernier est ensuite tendu vers l'extérieur, la pointe du crayon décrira une courbe à développante.



On peut utiliser des dentures **droites** ou **hélicoïdales**. Dans ces deux cas, la géométrie des dents est la même. Seule l'inclinaison des dents par rapport à l'axe de la roue dentée change.

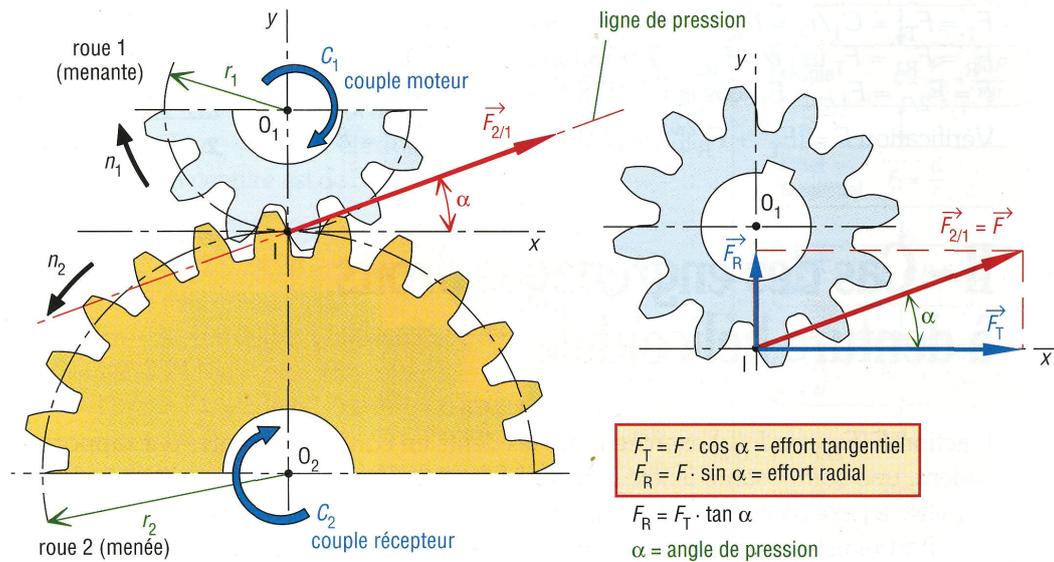
Les dentures hélicoïdales sont plus solides (la surface de contact est plus grande) et plus silencieuses (cf. boîte de vitesse). Elles sont par contre plus chères à usiner et entraînent des efforts axiaux que les liaisons doivent encaisser.

Une solution consiste à utiliser deux engrenages pour que les efforts axiaux se compensent. *Citroën* a été le précurseur de cette idée avec son chevron.

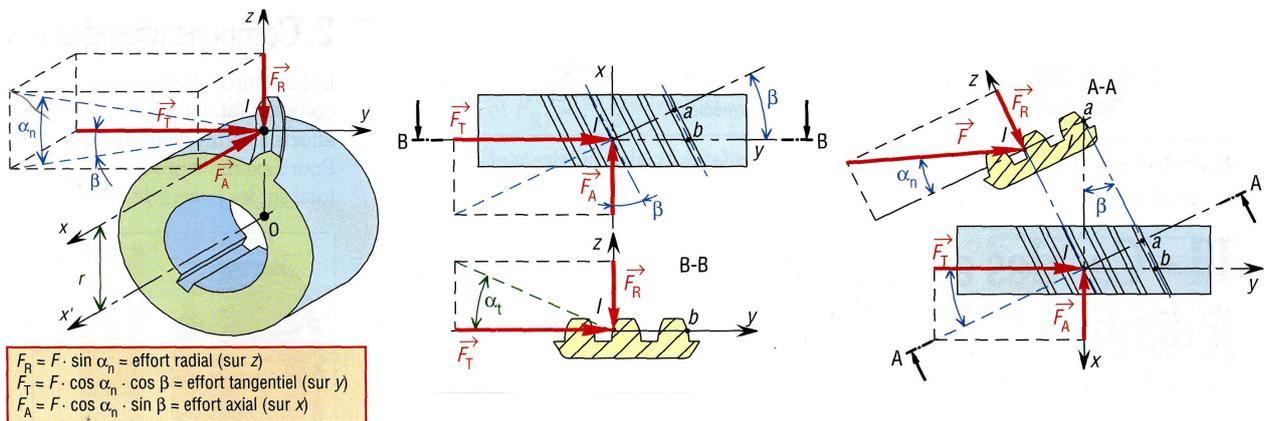
5.4.2 Transmission des efforts

La ligne d'engrènement (ou ligne de pression) est la tangente aux deux cercles de base. C'est la ligne qui porte (en permanence) l'effort de contact s'exerçant entre les deux roues. Le point de contact M entre les dents est toujours situé sur cette ligne. Le contact en M entre les deux dents se fait à la fois avec du **roulement** et du **glissement**.

L'angle de pression α est une autre caractéristique importante : il définit l'inclinaison de la droite de pression (ainsi que l'action de contact exercée entre les roues), mais aussi la forme de la dent. $\alpha = 20^\circ$ est la valeur la plus utilisée, $\alpha = 25^\circ$ est un standard aux USA.



Pour les dentures hélicoïdales, la droite de pression n'est plus dans le plan de la roue dentée, mais inclinée d'un angle d'inclinaison de denture β .



5.5 Puissance transmissible et particularités de la transmission

- La puissance transmissible peut être très élevée (plusieurs centaines de kW).
- Le rapport de transmission peut difficilement être inférieur à 1/8.
- Le rendement de la transmission est de l'ordre de 0,98.

La transmission par engrenage est certainement la transmission la moins économique car elle nécessite un usinage soigneux des roues et un entraxe précis des deux arbres. Elle nécessite une lubrification, ce qui permet notamment d'obtenir une durée de vie élevée. Les avantages majeurs de la transmission par engrenage sont :

- la possibilité de transmettre la puissance quelle que soit la position relative des deux arbres,
- la précision,
- les couples et les puissances transmissibles sont élevés.

6 Trains d'engrenages

6.1 Trains simples



Définition *Train d'engrenages simple*

On appelle **train d'engrenages simple**, une succession d'engrenages constitués de roues dont les axes sont fixes les uns par rapport aux autres.

Les roues d'entrée et de sortie étant identifiées, on exprime, en général, le **rapport de réduction**

$$r = \frac{\omega_{\text{sortie/bâti}}}{\omega_{\text{entrée/bâti}}}$$

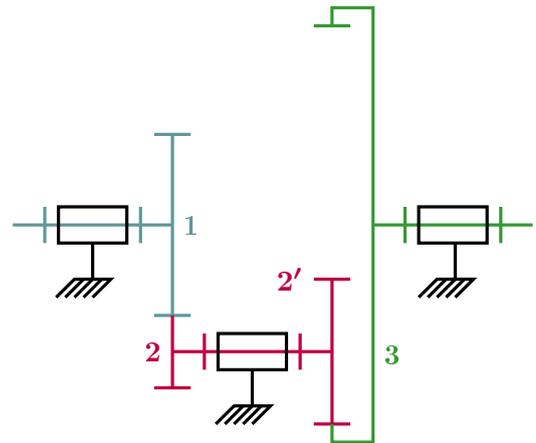
Pour calculer le rapport du train, on effectue le produit des rapports des engrenages qui constituent le train tout en identifiant clairement pour chaque engrenage l'entrée et la sortie :

$$r = (-1)^k \frac{\prod Z_{\text{roues menantes}}}{\prod Z_{\text{roues menées}}}$$

où k est le nombre de contacts extérieurs.

Dans l'exemple ci-contre :

$$r = \frac{\omega_{3/0}}{\omega_{1/0}} = \frac{\omega_{3/0}}{\omega_{2'/0}} \frac{\omega_{2'/0}}{\omega_{2/0}} \frac{\omega_{2/0}}{\omega_{1/0}} = \frac{\omega_{3/0}}{\omega_{2'/0}} \frac{\omega_{2/0}}{\omega_{1/0}} = \frac{Z_{2'}}{Z_3} - \frac{Z_1}{Z_2} = -\frac{Z_1 Z_{2'}}{Z_2 Z_3}$$



Remarque

Si $r < 1$, le train est réducteur (rapport de réduction). Si $r > 1$, le train est multiplicateur.

6.2 Trains épicycloïdaux

6.2.1 Définition

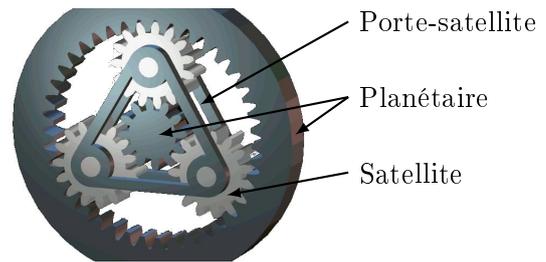


Définition

On appelle **train d'engrenage épicycloïdal**, un train d'engrenage pour lequel certaines roues dentées ne tournent pas toutes autour d'axes fixes dans le repère lié au bâti.

La ou les roues qui tournent autour d'un axe en mouvement dans le repère lié au bâti sont appelés **satellites** (pièce 4 sur le schéma cinématique). Les **trois entrées** du train épicycloïdal sont :

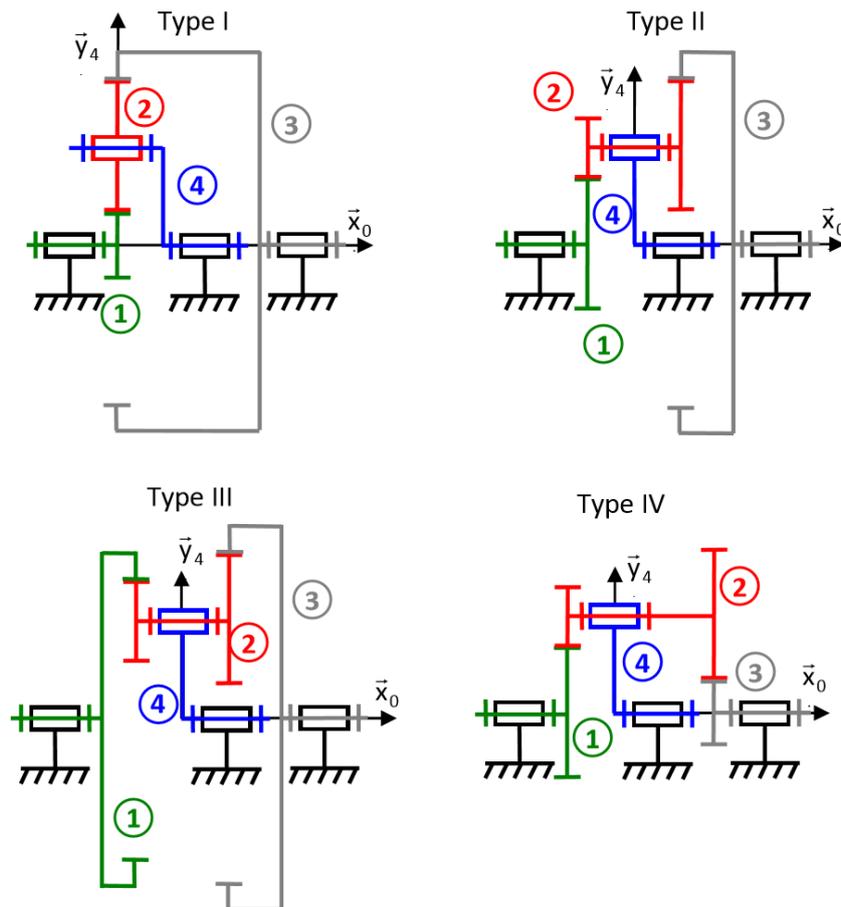
- le **porte-satellite** avec lequel les satellites sont en liaison pivot. C'est la seule pièce qui n'est pas un engrenage (**sans dents**) ;
- les deux **planétaires** dentés (pignon et couronne) en contact avec les dents des satellites.



Les trains épicycloïdaux sont utilisés pour diminuer l'encombrement et garantir un rapport de réduction élevé. Ils sont, par contre, plus chers et plus complexes à réaliser. On les retrouve dans de nombreux systèmes industriels ou grand public.

6.2.2 Dispositions constructives

Un train épicycloïdal est dit plan si tous les axes sont parallèles, cette disposition constructive concerne la majorité des trains (roue de camion, treuil, boîte de vitesse automatique, motoréducteur,...). Il existe 4 configurations de train épicycloïdal plan.



Un train épicycloïdal est dit sphérique si tous les axes sont concourants, on y retrouve donc des engrenages coniques (différentiel de voiture par exemple. Voir TD).

Pour les trains épicycloïdaux plans, les planétaires ou le porte satellite peuvent être l'arbre d'entrée ou de sortie mais généralement pour la majorité des cas, un des deux planétaires est l'entrée alors que l'autre est fixe et le porte satellite est alors la sortie.

6.2.3 Détermination de la loi entrée-sortie



Définition Formule de Willis

Elle fournit la relation entre les vitesses de rotation des trois entrées par rapport au référentiel du bâti $\mathbf{0}$: $f(\omega_{1/0}, \omega_{2/0}, \omega_{3/0}) = 0$:

$$\frac{\omega_{pB/ba} - \omega_{ps/ba}}{\omega_{pA/ba} - \omega_{ps/ba}} = \lambda = (-1)^p \frac{\prod Z_{menantes}}{\prod Z_{menees}}$$

Méthode globale

La méthode la plus rapide est d'utiliser les relations des trains simples.

1. on identifie les composants (planétaires, satellite(s), porte satellite) en se rappelant que le satellite n'a pas son axe de rotation fixe et que le **porte-satellite n'a pas de dents** ;
2. on se place dans le référentiel du porte-satellite, le train épicycloïdal est alors *vu* comme un train simple (les deux axes de rotations sont des axes du porte-satellite) ;
3. on écrit la relation des trains d'engrenages simples dans ce référentiel en prenant les deux planétaires (**1 et 2**) comme entrée et sortie (λ est la raison du train) :

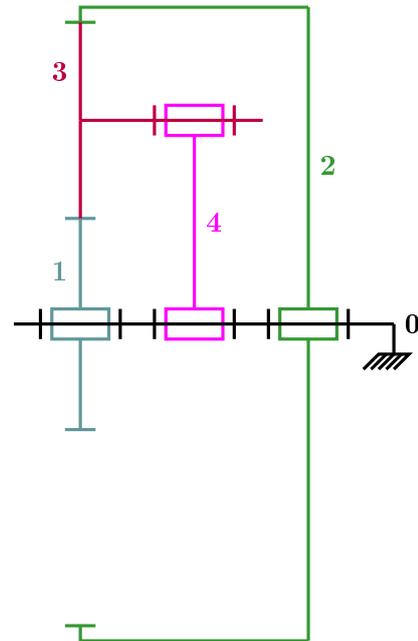
$$\lambda = \frac{\omega_{2/4}}{\omega_{1/4}} = -\frac{Z_1}{Z_3} \times \frac{Z_3}{Z_2} = -\frac{Z_1}{Z_2}$$

4. on utilise la composition des mouvements pour repasser dans le référentiel bâti, et retrouver ainsi le 2^e terme de la formule de Willis :

$$\lambda = \frac{\omega_{2/0} - \omega_{4/0}}{\omega_{1/0} - \omega_{4/0}}$$

5. En transformant cette égalité, on peut poser la « relation de Ravignaux » :

$$\omega_{2/0} - \lambda \omega_{1/0} + (\lambda - 1) \omega_{4/0} = 0$$

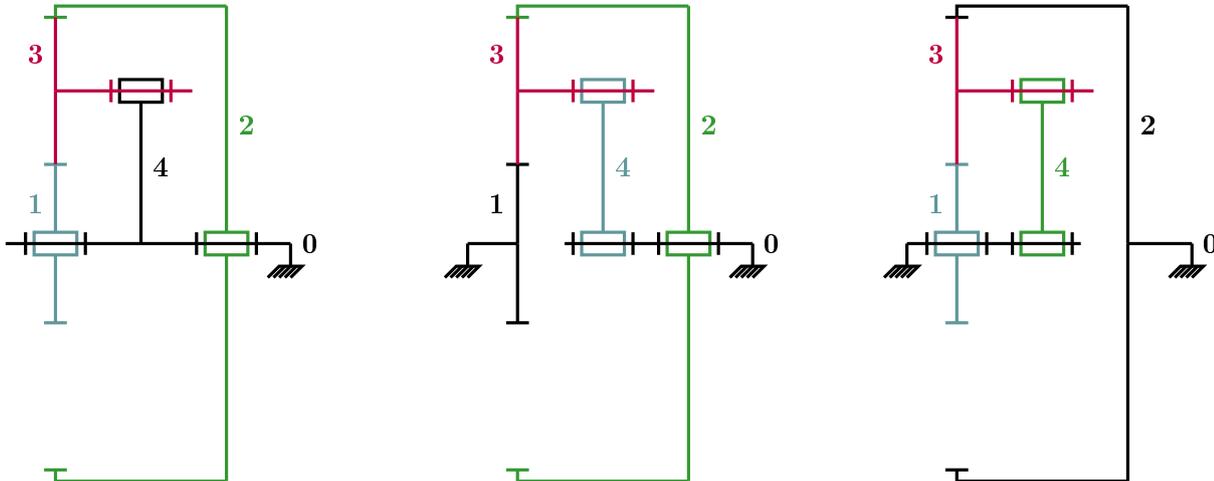


Attention

Ne pas retenir la formule de Willis mais la méthode !

Fonctionnement du train

Généralement, la vitesse de rotation de deux entrées est imposée (le plus couramment, une des deux entrées est liée au bâti (bloquée)). La vitesse de la troisième entrée (qui est alors la sortie) est alors donnée par la relation de Willis en prenant en compte la vitesse nulle de l'entrée bloquée.

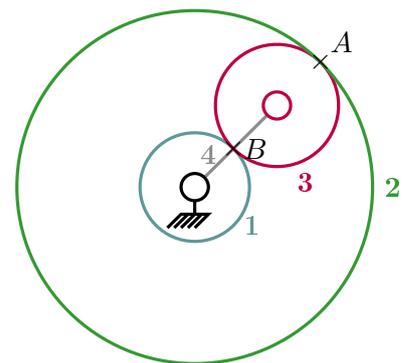


Méthode par les vitesses de glissement

Il est aussi possible d'écrire les conditions de roulement sans glissement entre les roues de friction théoriques $\mathbf{3/2}$ (satellite/couronne) en A et $\mathbf{3/1}$ (satellite/pignon) en B .

Cette méthode est plus lourde que la précédente et ne sera utilisée que si demandée par le sujet.

À vous de vous entraîner....



Références

- [1] P. BERTHET : Cours de mécanique, 1998. PT* - Lycée Livet - Nantes.
- [2] S. GERGADIER : Cours de sciences de l'ingénieur, 2016. PCSI - Lycée Chaptal - Paris.
- [3] A. CAIGNOT : Cours de sciences de l'ingénieur, 2013. PCSI - Lycée Janson de Sailly - Paris.
- [4] E. THOMAS : Cours de sciences de l'ingénieur, 2014. PT - Lycée Jules Garnier - Nouméa.
- [5] J-L. FANCHON : *Guide des Sciences et Technologies Industrielles*. Nathan, 2001.
- [6] F. ESNAULT : *Construction mécanique - Transmission de puissance - Tome 1 : Principes et Éco-conception*. Dunod, 2009.
- [7] ZETPAG.NET : zetpag.net.