



TRANSMISSION DE PUISSANCE

Partie : Accouplements

Pierre Duysinx

LTAS – Ingénierie de Véhicules Terrestres

Département Aérospatiale & Mécanique

Université de Liège

Année Académique 2021-2022

Plan du cours

- Accouplements rotation – rotation sans changement de vitesse
 - Rigides
 - Semi-élastiques
 - Élastiques
 - Articulés

Références

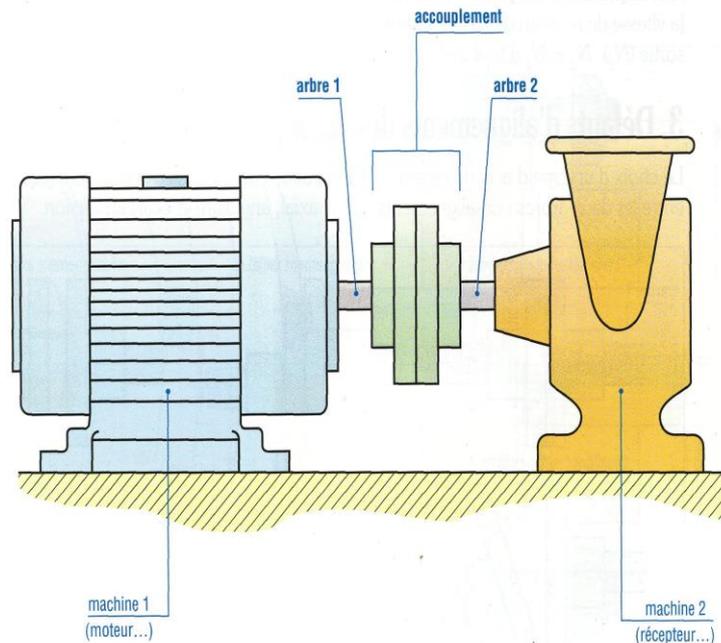
- Ressources Internet
- http://www.zpag.net/Tecnologies_Industrielles/accouplements.htm



ACCOUPLLEMENTS

Accouplements

- Accouplement: se dit d'une **liaison établie** entre deux organes d'un système, généralement deux arbres de telle manière que la rotation de l'un entraîne celle de l'autre.
- C'est aussi le nom donné au **dispositif permettant cette liaison**.

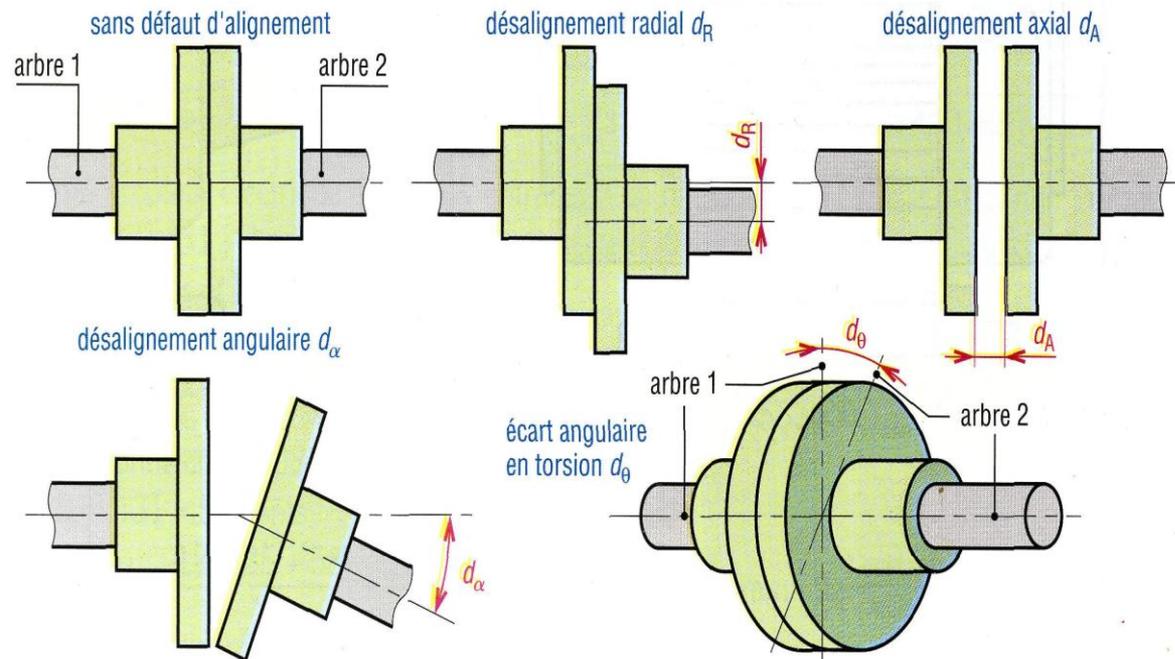


Accouplements

- Types d'accouplements:
- Les accouplements assurent la transmission de puissance **entre deux arbres alignés** ou possédant quelques défauts d'alignement.
- Il est également possible d'assurer la transmission de puissance **entre deux arbres sécants** par des joints d'accouplement appelés joints de Cardan.
- Suivant la solution, la transmission peut être homocinétique ou non. Elle est **homocinétique** sur la vitesse de rotation de sortie reste à tout instant égale à la vitesse de rotation d'entrée.

Accouplements

- Défauts d'alignements: Le choix d'un type d'accouplement dépend d'abord **des défauts d'alignement** pouvant exister entre les deux arbres : désalignements radial, axial, angulaire et écart en torsion



Accouplements

- Types d'accouplements:
- Un accouplement peut être rigide, semi-élastique, élastique ou articulé.
- Un accouplement peut être permanent ou temporaire

Principaux types d'accouplements et symboles normalisés						
accouplements permanents				accouplements temporaires		
accouplements rigides	accouplements flexibles	accouplements élastiques	cardans et assimilés	embrayages	freins	divers
aucun désalignement possible – à plateaux – à manchon goupillé – à douille biconique...	non flexibles en torsion – joint d'Oldham – à denture bombée – à soufflet...	flexibles en torsion – à ressort – à blocs en caoutchouc – à membrane souple...	– joints de cardans – joints tripodes – joints à quatre billes	– à disques – centrifuges – coniques...	– à disques – à tambour – à bande...	– limiteurs de couple – roues libres – convertisseurs – coupleurs...
$dR = 0 ; dA = 0$ $d\alpha = 0$ et $d\theta = 0$	désalignements : dR, dA et $d\alpha$	désalignements : $dR, dA, d\alpha$ et $d\theta$	désalignement angulaire $d\alpha$	pas de désalignement	pas de désalignement	pas de désalignement
						symboles page 576

* NF E 22 610, non retenu par NF EN ISO 3952-3 page 576



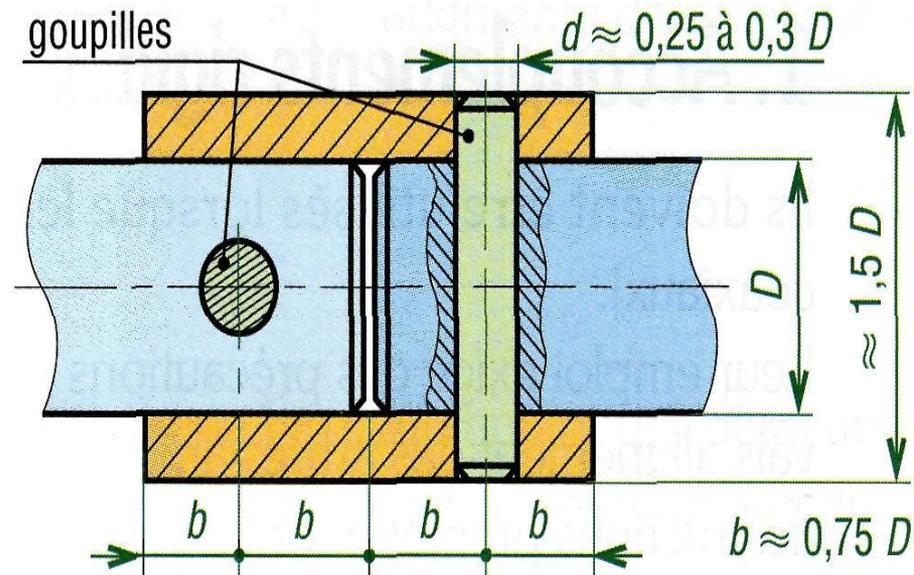
ACCOUPLLEMENTS RIGIDES

Accouplements rigides

- Type de liaisons consistant à **lier de façon rigide** les deux arbres.
- Une **pièce intermédiaire** crée la liaison.
- Plusieurs types de montages:
 - Manchon ou plateau
 - Vis de pression
 - Serrage par mâchoires,
 - Montage en force,
 - Clavetage...
- Principal inconvénient: ne tolèrent pas de défaut d'alignement entre les arbres

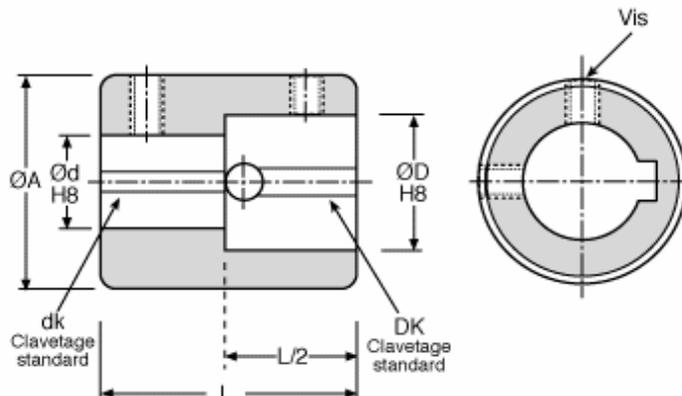
Accouplements par manchon à goupilles

- Accouplement par manchon et goupille reste le plus simple dans le cas des petits accouplements.
- Les deux goupilles travaillent au cisaillement et offrent une certaine sécurité en cas de surcharge.



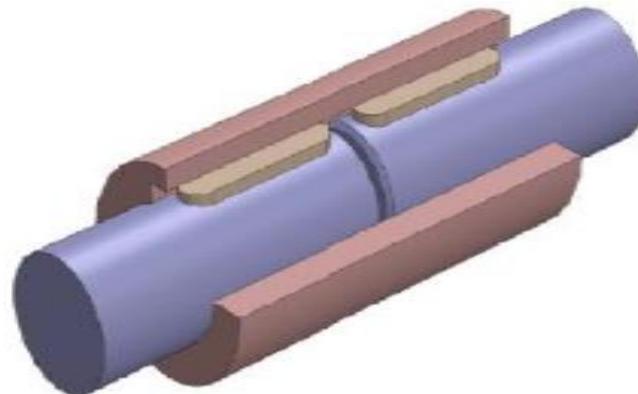
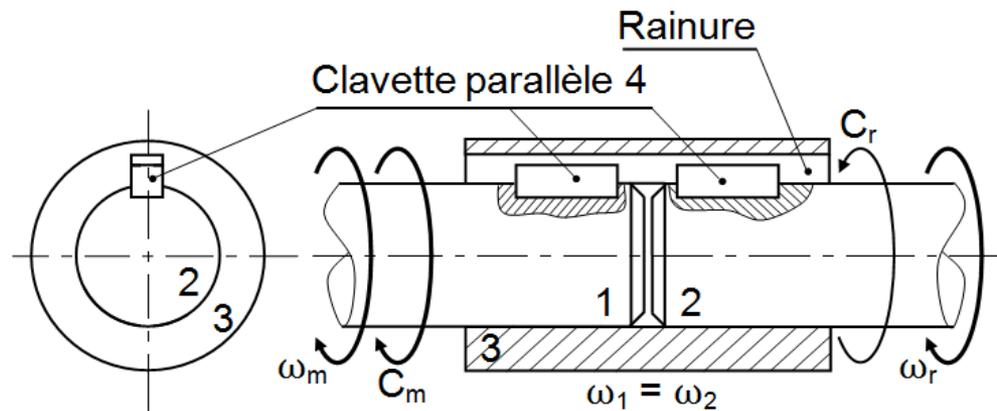
Accouplements à goupilles

- Variantes : Goupilles remplacées par des clavettes ou des cannelures.
- **L'arrêt en translation du manchon** peut être réalisé par une vis de pression agissant sur la clavette, par une goupille passant entre les deux extrémités des deux arbres, par un circlips...
- Utilisation d'une **vis de pression**



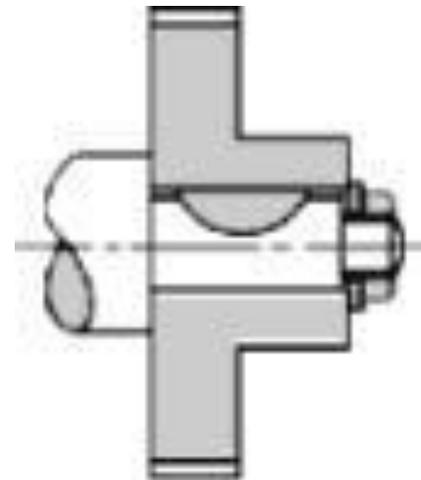
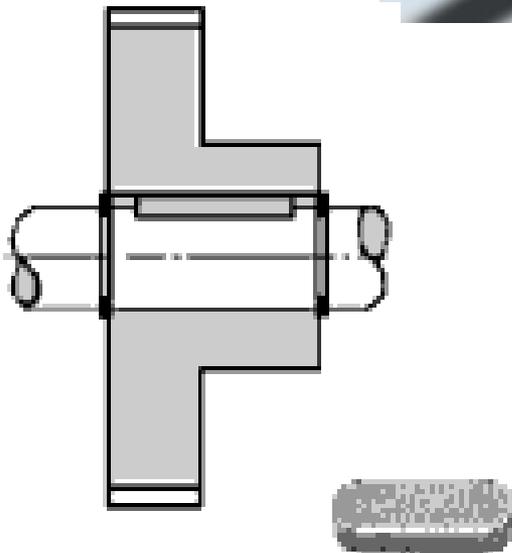
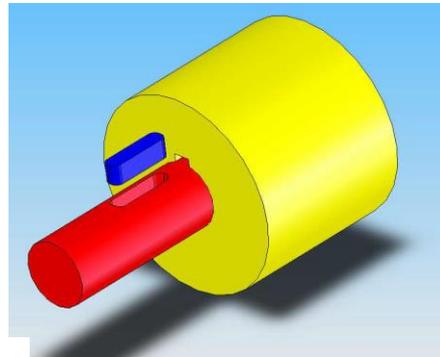
Assemblage par manchon et clavette

- Accouplement par manchon et clavette



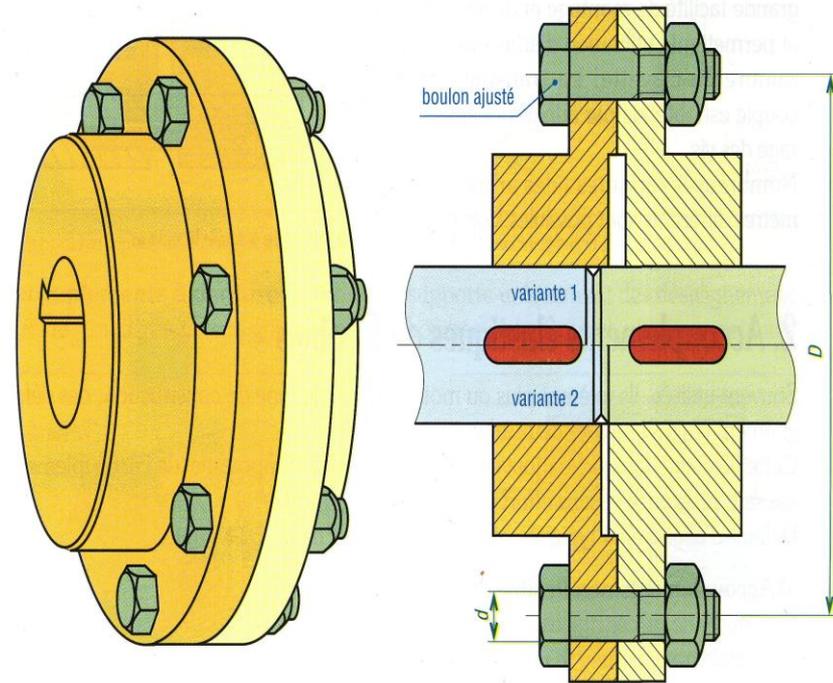
Assemblage par clavetage

- Accouplement par manchon et clavette



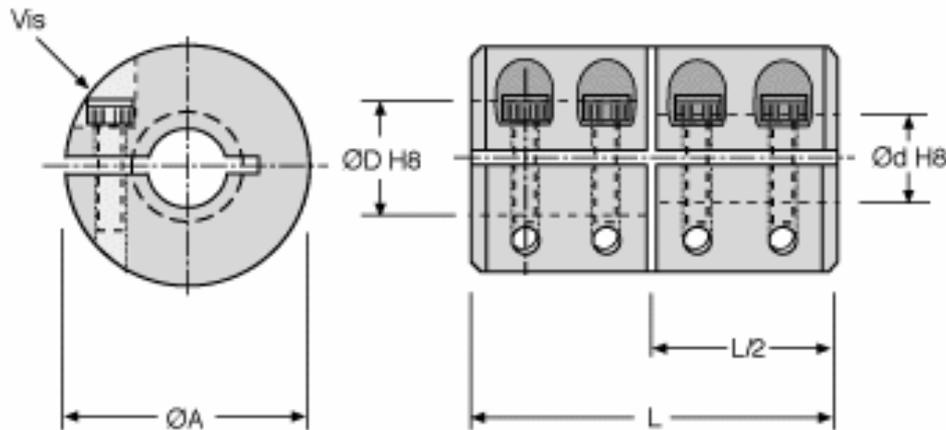
Accouplements à manchon à plateau

- Très utilisés, précis, résistants, assez légers, encombrants radialement, ils sont souvent frettés ou montés à la presse.
- La transmission du couple est en général obtenue par une série de boulons ajustés. En cas de surcharge, le cisaillement des boulons offre une certaine sécurité.



Accouplements par mâchoires

- Serrage par mâchoires

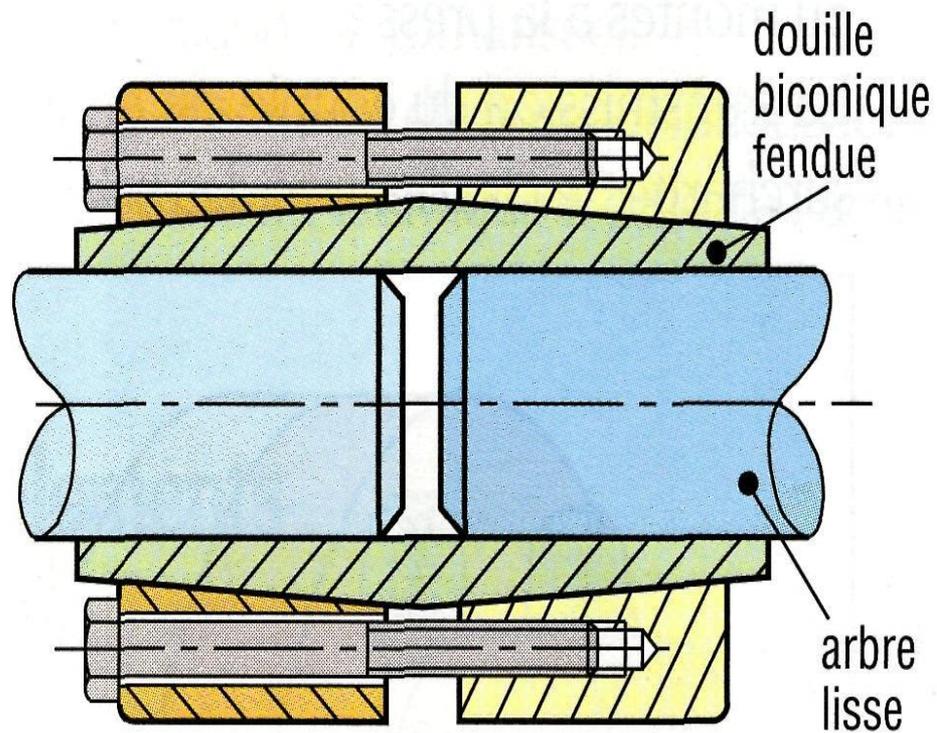


Accouplements biconiques

- La transmission du couple est obtenue **par adhérence** après serrage des vis.
- Technologie assez récente.
- Grande facilité de montage et de démontage
- Permettent l'utilisation d'arbres lisses sans rainure de clavette.
- Des arbres de diamètres différents sont possibles.
- Nombreuses variantes

Accouplements biconiques

- Accouplement biconique

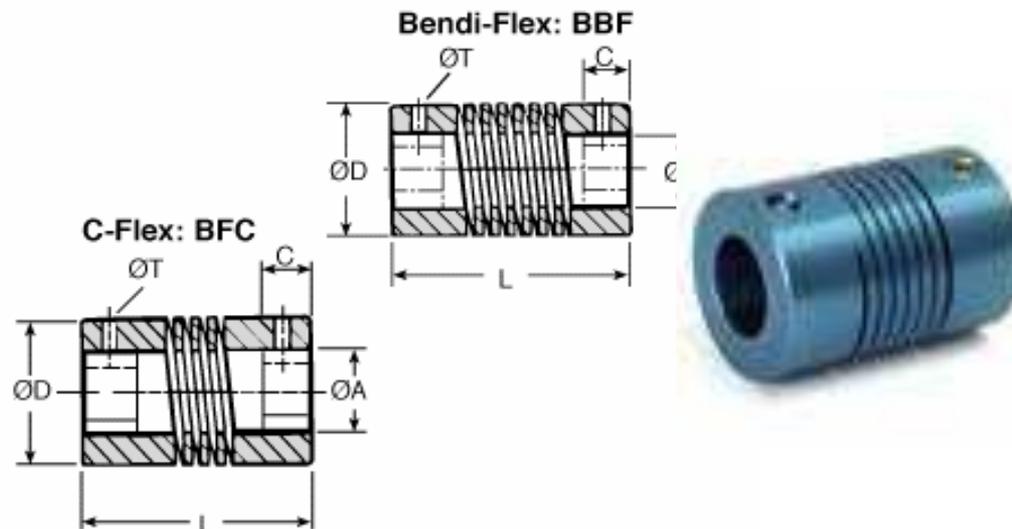




ACCOUPLLEMENTS SEMI-ELASTIQUES

Accouplements semi-élastiques

- Les accouplements dit semi-élastiques permettent de **rattraper les petits défauts d'alignement**, typiquement les défauts d'usinage.
- Défauts d'alignement typiques : $d_\alpha = \pm 3^\circ$; $d_R < 1 \text{ mm}$; $d_A \geq 1 \text{ mm}$
- Des accouplements sont généralement constitués de deux parties rigides solidaires des arbres et d'une partie flexible qui rattrape les défauts d'alignement.



Accouplements semi-élastiques

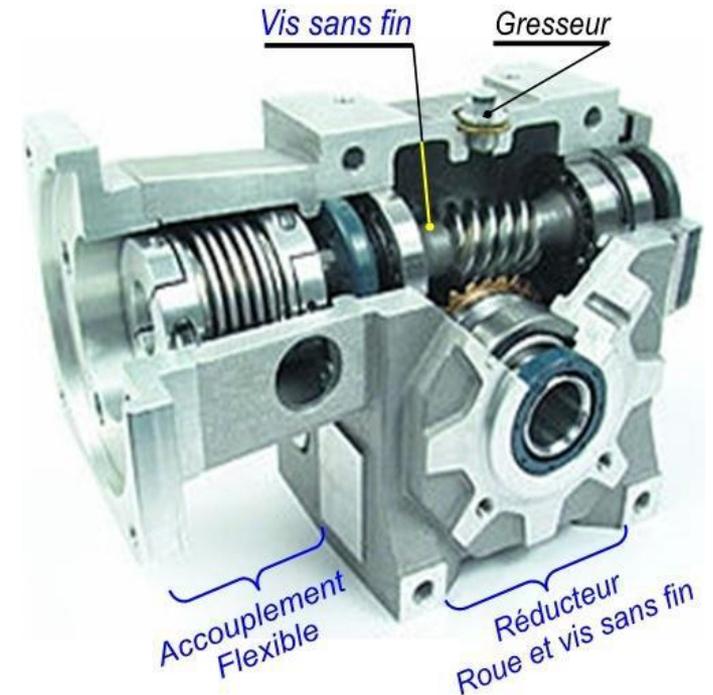
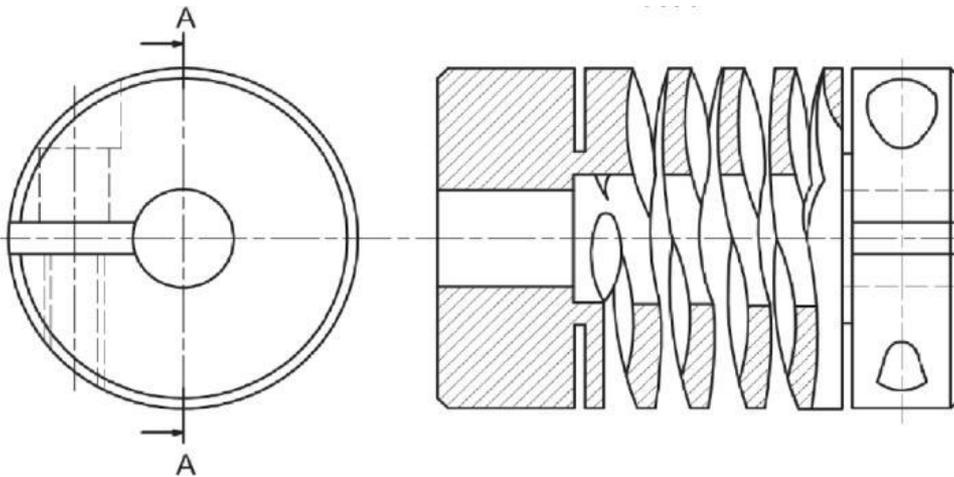
- Il existe une multitude d'accouplements de ce type.
- Les critères de sélection à prendre en compte sont:
 - Le prix
 - L'encombrement
 - La vitesse de rotation maximale
 - Le désalignement angulaire
 - Le désalignement axial et radial
 - La durée de vie

Accouplements flexibles

- Proches des accouplements élastiques (qui sont vus par la suite), ces accouplements ont une **rigidité en torsion** importante.
 - Acceptent certains défauts d'alignement à l'exception de l'écart angulaire de torsion ;
 - Ne filtrent pas les vibrations.
- Ces accouplements ont généralement **d'excellentes propriétés homocinétiques**, c'est-à-dire que le mouvement de l'arbre de sortie est fidèle au mouvement de l'arbre d'entrée.

Accouplement flexible Multibeam

- Élément élastique métallique en forme de profilés hélicoïdaux, générés par usinage d'une gorge en hélice débouchant dans un tube cylindrique.





ACCOUPLLEMENTS ELASTIQUES

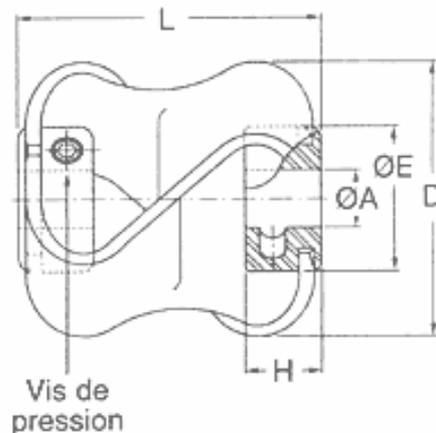
Accouplements élastiques

- Ces composants sont constitués de deux **éléments rigides** reliés par un **ou plusieurs éléments l'intermédiaires élastiques** (caoutchouc, ressort...).
- Ils ont pour rôle de remédier aux inconvénients des accouplements rigides à savoir :
 - Permettre une légère variation de la position relative des axes
 - Amortir les vibrations.



Accouplements élastiques

- Basés sur le même principe que les accouplements semi-élastiques, les accouplements élastiques supportent des **désalignements plus importants**.
- En général ils ne conservent généralement **pas** les propriétés **homocinétiques**.
- En dynamique, on génère un retard entre les mouvements d'entrée et de sortie à cause de la torsion de la partie flexible.

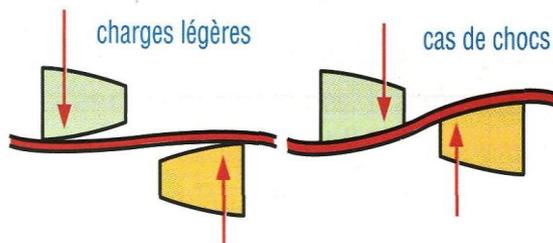
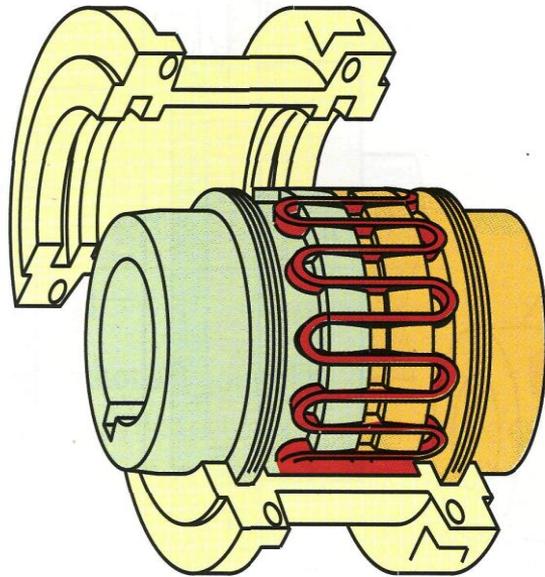


Accouplements élastiques

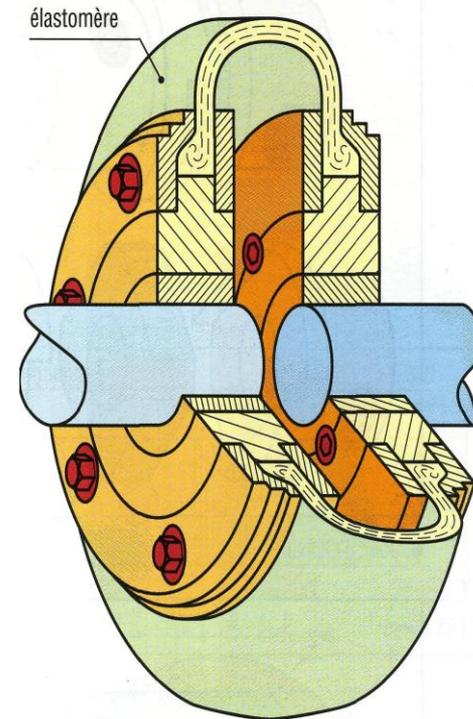
- En plus de pièces rigides, ils se composent de parties élastiques, ressorts ou blocs en élastomère, permettant la flexibilité en torsion.
- Ils sont conçus pour **transmettre le couple en douceur** (réduisent et amortissent les chocs et les irrégularités de transmission) tout en corrigeant plus ou moins les différents défauts d'alignement.
- Les réalisations utilisant des **éléments en élastomère** (membrane, blocs...) supportent en même temps et à des degrés divers tous les types de désalignements.

Accouplements élastiques

- Élastique en torsion d_θ

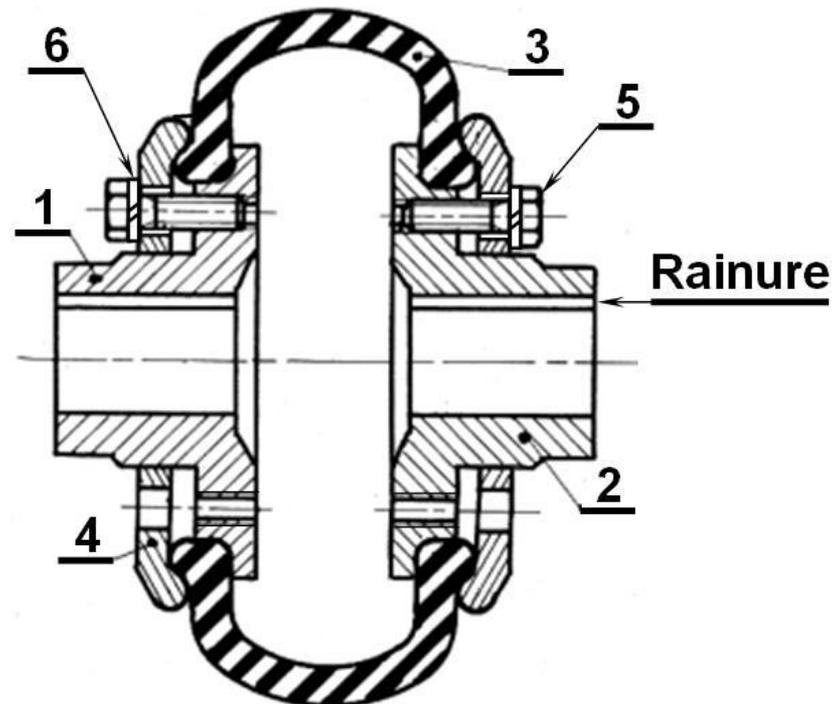


- Élasticité en flexion d_a et en torsion d_θ



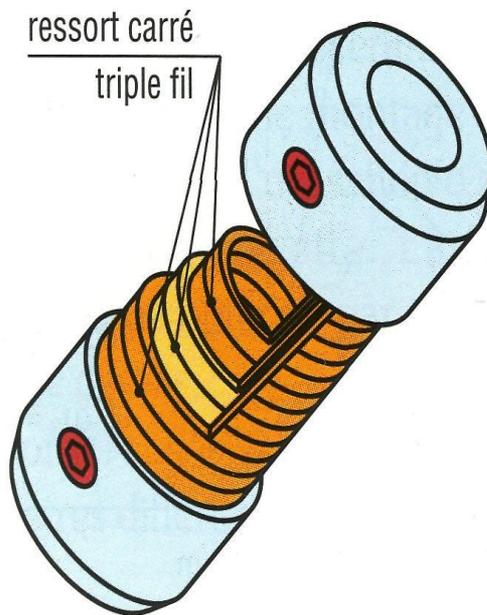
Accouplement élastique de torsion

- Accouplement élastique de torsion : sont basés sur une gaine flexible
- Ils permettent de grands déplacements angulaires

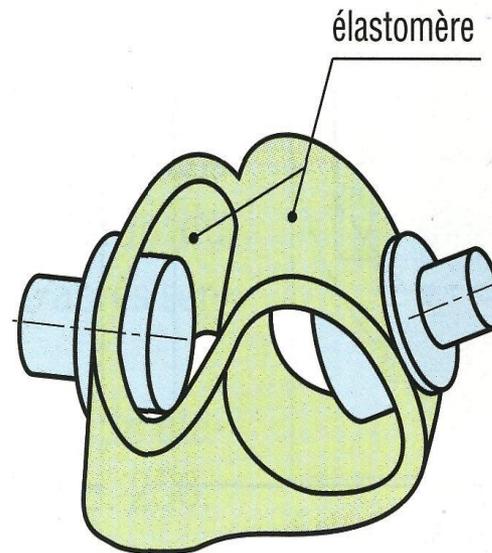


Accouplements élastiques

- Ressort carré triple fil (d_a , d_θ)

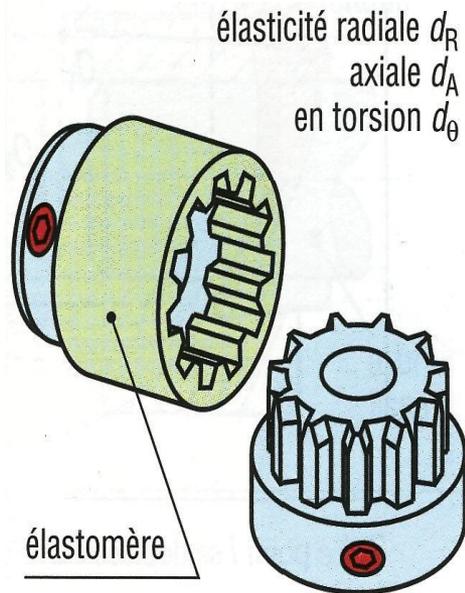


- Grand angle d_a , axial d_A et d_θ

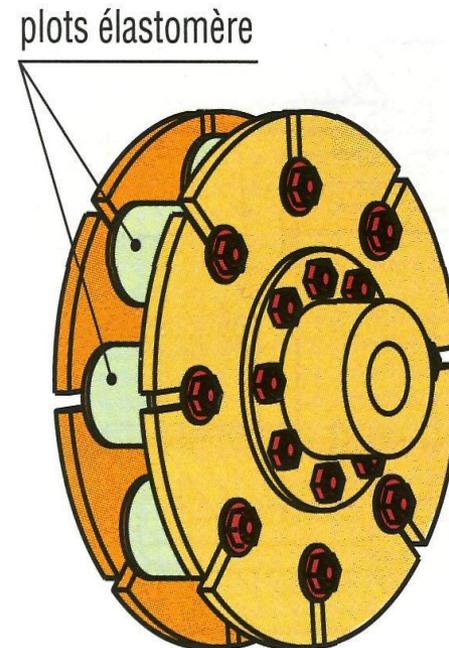


Accouplements élastiques

- Élasticités
 d_R, d_A, d_θ

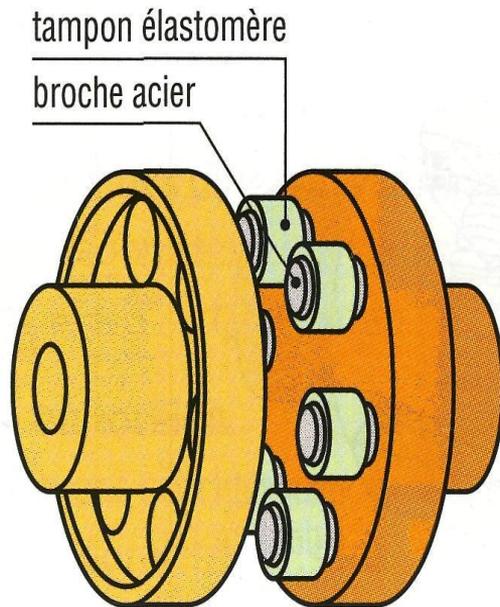


- Désalignement
 d_θ et d_R

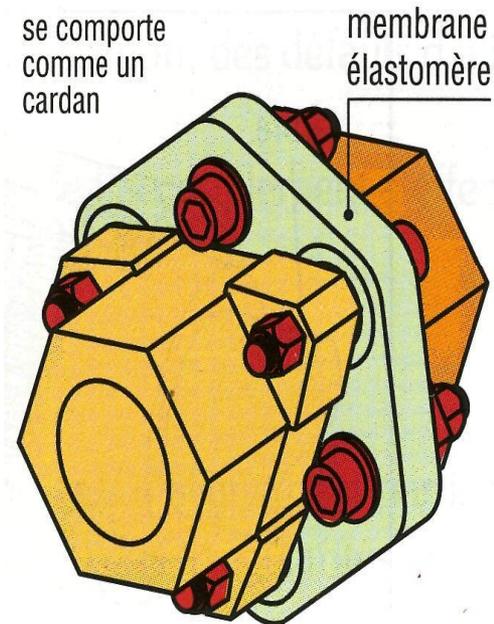


Accouplements élastiques

- Désalignements d_A et d_θ

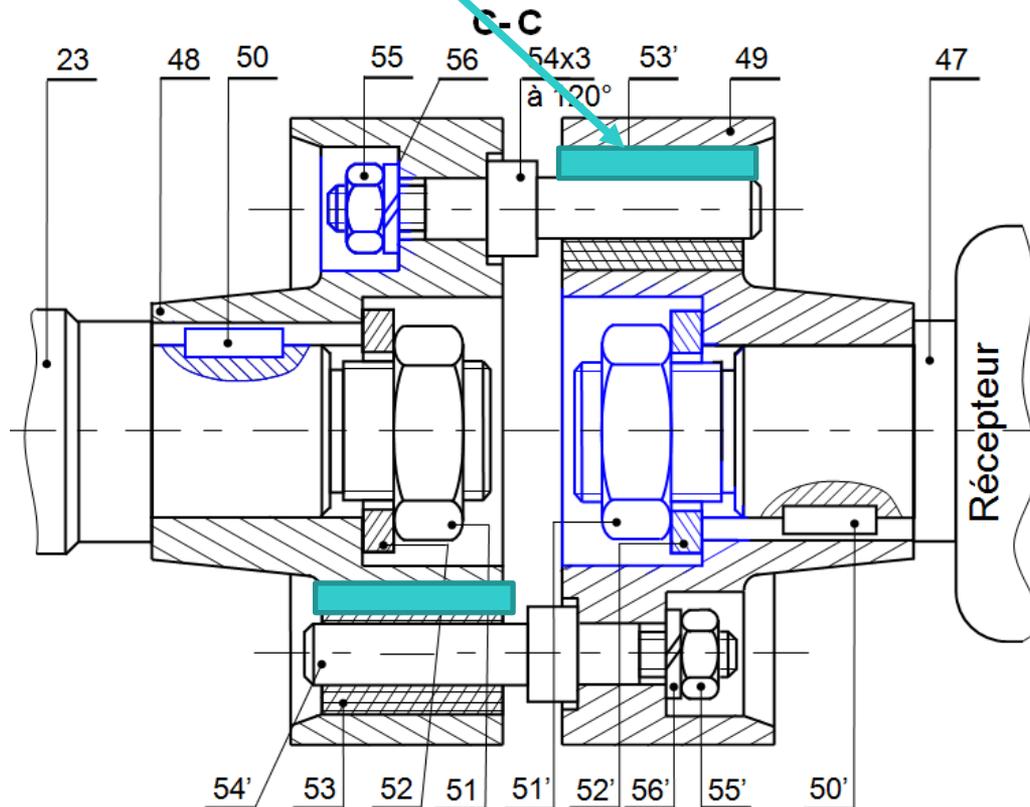


- Désalignements d_a et d_θ



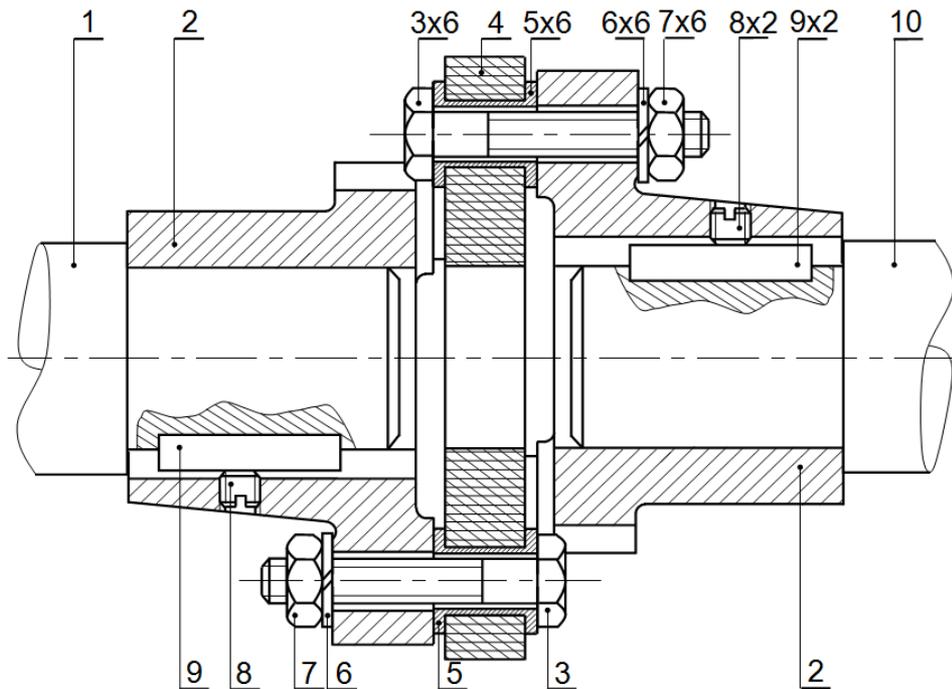
Accouplement élastique à broche

- Les manchons (ici 53 et 53'') sont en cuir ou en caoutchouc pour permettre des déplacements axiaux importants



Accouplement élastique de cisaillement

- Les manchons en caoutchouc autorisent du cisaillement





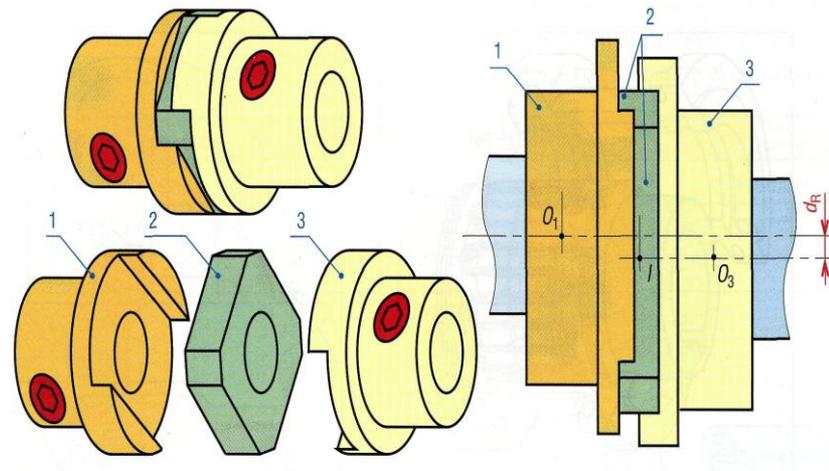
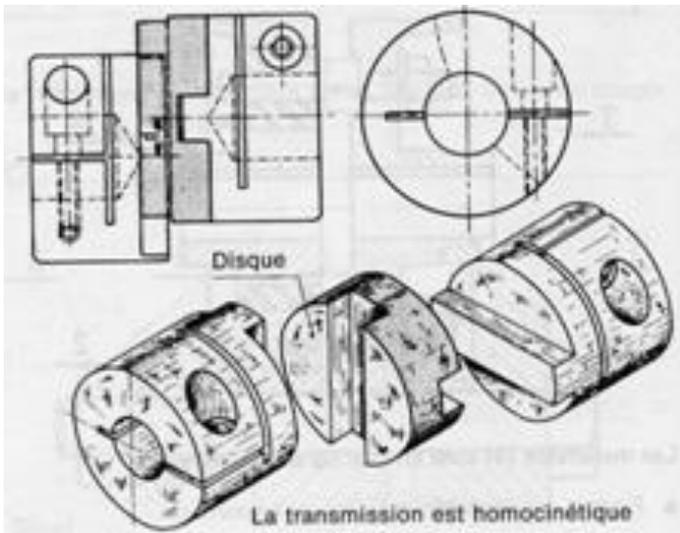
ACCOUPLLEMENTS ARTICULES

Accouplements articulés

- Les accouplements articulés assurent la transmission entre des arbres concourants.
- Les accouplements élastiques supportent des défauts angulaires (d_α) inférieurs à 3° environ.
- Pour des **désalignements supérieurs à 3° environ**, il faut utiliser les joints de cardans et assimilés (d_α où α va jusqu'à 45°).
- Non flexibles en torsion ($d\theta = 0$), ils peuvent transmettre des **couples très élevés**.
- L'utilisation de pièces en mouvement présente deux inconvénients:
 - L'usure des pièces
 - Le coût de fabrication

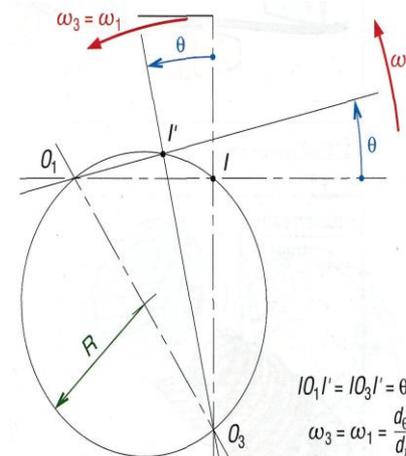
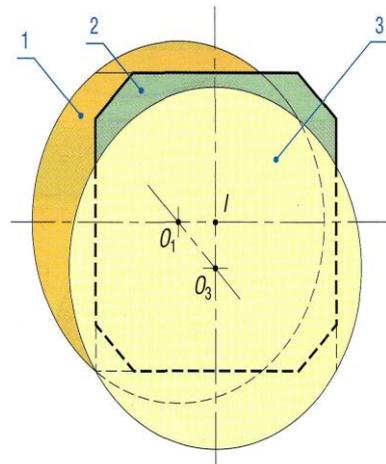
Joint d'Oldham

- Un joint d'Oldham est constitué de 3 pièces:
 - Deux bagues solidaires des arbres
 - Un patin lié aux bagues par des liaisons prismatiques
- La double liaison prismatique permet au patin de voyager dans un plan perpendiculaire aux arbres tout en transmettant le couple.
- Plusieurs variantes possibles



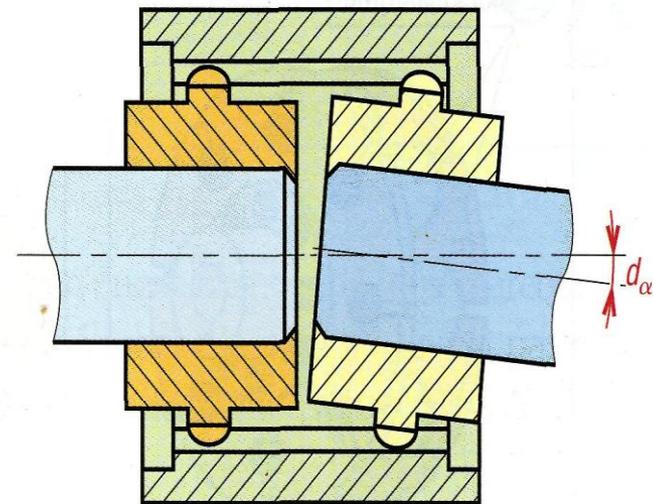
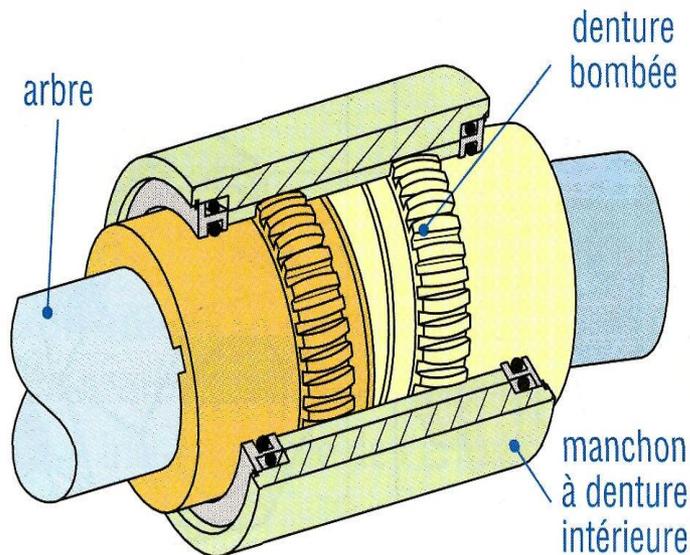
Joint d'Oldham

- Il supporte uniquement des désalignements radiaux (d_R) et permet la transmission entre deux arbres parallèles présentant un léger décalage.
- Au cours de la rotation, le centre I du plateau intermédiaire (2) décrit un cercle de diamètre O_1O_3 (l'angle O_1IO_3 étant constamment égal à 90°).
- Le joint est **parfaitement homocinétique** : les angles de rotation IO_1I' et IO_3I' sont constamment identiques (interceptent tous deux l'arc II').



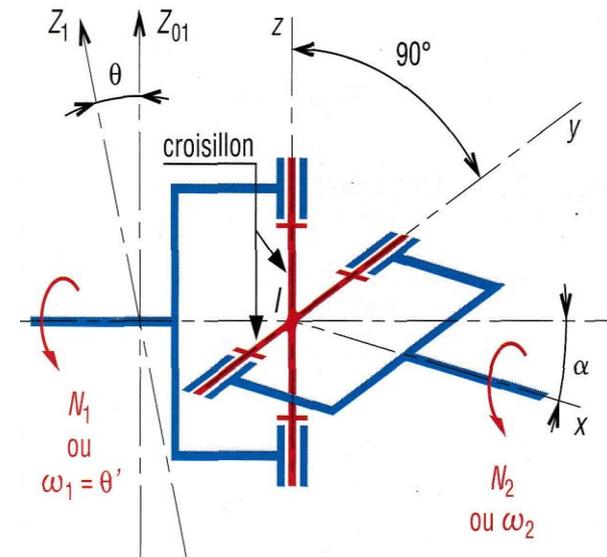
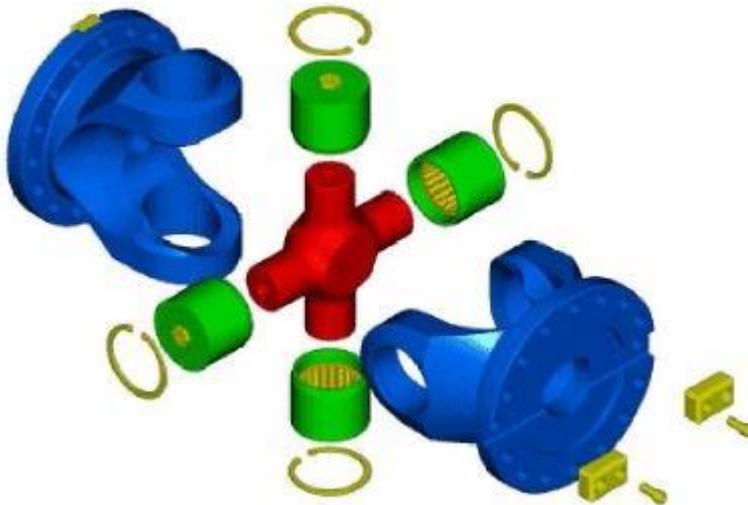
Accouplements à denture bombée

- Ils supportent uniquement des désalignements angulaires (d_α) modérés (obtenus grâce à la forme bombée de la denture), plusieurs variantes.



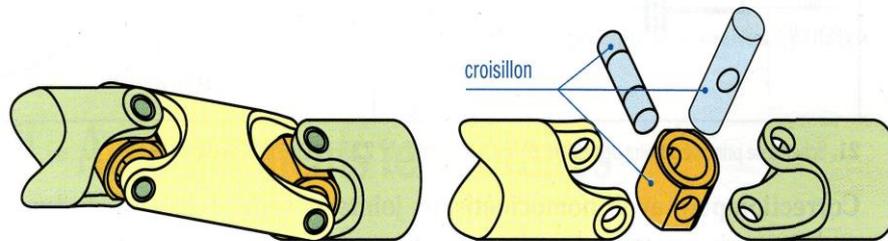
Joint de Cardan

- Encore appelé **joint universel** ou **joint de Hooke**, son invention remonte au XVI^e siècle (Jérôme Cardan).
- Le mouvement se transmet par l'intermédiaire d'un croisillon libre en rotation par rapport aux deux arbres (deux liaisons pivots d'axes perpendiculaires et concourants).

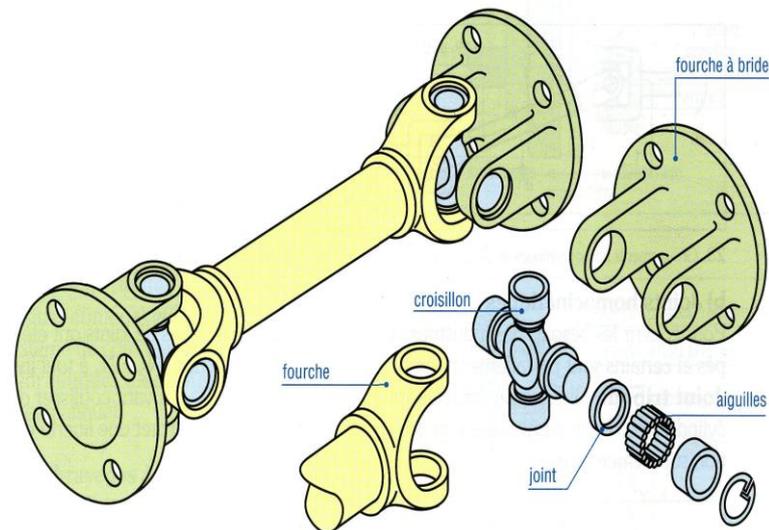


Joint de Cardan

- Joint de cardan pour faible couple



- Joint de Cardan pour fort couple



Joint de Cardan

- Ce type de liaison accepte des **angles (angles de brisure) importants** entre l'axe moteur et l'arbre de sortie.
- L'angle de brisure maximum est de 45° .

Angles (α) possibles entre les deux arbres			
vitesses maximales admissibles	très lentes	10 tr/min	> 600 tr/min
angles α possibles	45°	30°	15 à 20°

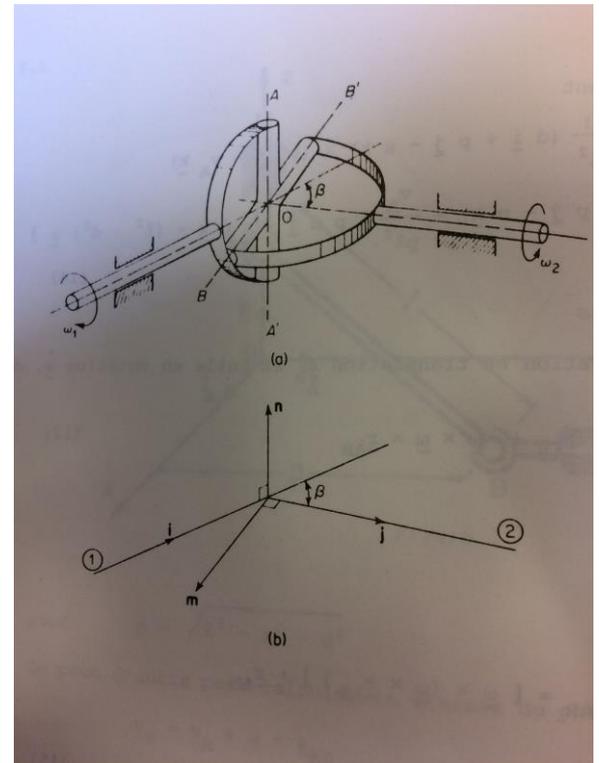
- C'est un joint **non homocinétique** ; bien que le nombre de tours parcourus par les deux arbres soit le même, la vitesse de rotation de l'arbre d'entrée (ω_1) n'est pas égale à chaque instant à celle de l'arbre de sortie (ω_2). Il existe des fluctuations, fonctions de l'angle α des deux arbres.

Joint de Cardan

- Si l'arbre 1 est tourné d'un angle θ à partir de la configuration de référence représentée sur la figure et donne lieu à un angle de rotation ϕ de l'arbre 2, on peut écrire

$$\vec{OA} = \vec{r}_1 = \vec{n} \cos \theta + \vec{i} \times \vec{n} \sin \theta$$

$$\vec{OB} = \vec{r}_2 = \vec{m} \cos \phi + \vec{j} \times \vec{m} \sin \phi$$



Joint de Cardan

- Dans toutes les configurations les vecteurs OA et OB restent orthogonaux de sorte que

$$\vec{r}_1 \cdot \vec{r}_2 = (\vec{n} \cos \theta + \vec{i} \times \vec{n} \sin \theta) \cdot (\vec{m} \cos \phi + \vec{j} \times \vec{m} \sin \phi) = 0$$

- Notant que

$$\vec{m} \times \vec{j} = \vec{n} \quad (\vec{i} \times \vec{n}) \cdot \vec{m} = \cos \alpha$$

- On obtient la relation géométrique entre les angles d'entrée et de sortie

$$\cos \theta \sin \phi = \cos \alpha \sin \theta \cos \phi$$

$$\tan \phi = \cos \alpha \tan \theta$$

Joint de Cardan

- Par différentiation, on obtient

$$\begin{aligned}\tan \phi &= \cos \alpha \tan \theta \\ \frac{1}{\cos^2 \phi} \dot{\phi} &= \frac{\cos \alpha}{\cos^2 \theta} \dot{\theta}\end{aligned}$$

- Par substitution, on trouve

$$\frac{1}{\cos^2 \phi} = 1 + \tan^2 \phi = 1 + \cos^2 \alpha \tan^2 \theta$$

- Et finalement

$$\omega_2 = \frac{\cos \alpha}{1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \theta} \omega_1$$

- En différentiant une nouvelle fois, on obtient les accélérations

$$\dot{\omega}_2 = \frac{\omega_1^2 \sin^2 \alpha \cos \alpha \sin 2\theta}{(1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \theta)^2} \dot{\omega}_1$$

Joint de Cardan

- Fluctuation de la vitesse de sortie: on démontre que

$$\tan \phi = \cos \alpha \tan \theta$$

- Et

$$\omega_2 = \frac{\cos \alpha}{1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \theta} \omega_1$$

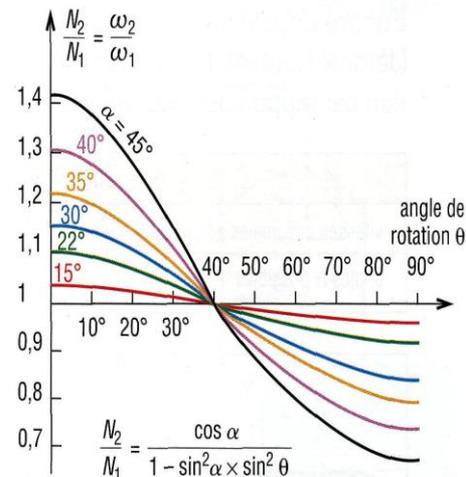
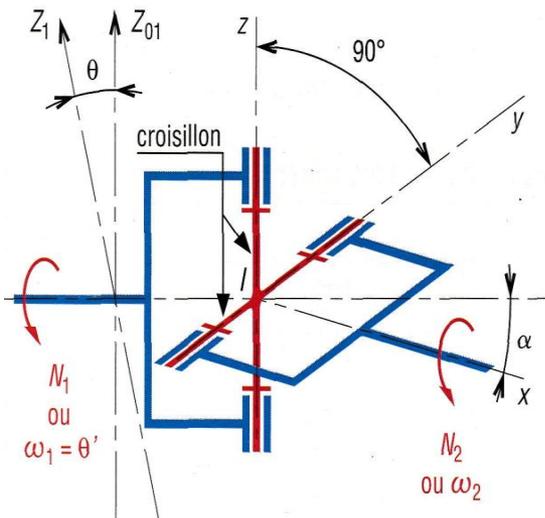
$$\dot{\omega}_2 = \frac{\omega_1^2 \sin^2 \alpha \cos \alpha \sin 2\theta}{(1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \theta)^2} \dot{\omega}_1$$

- A moins que l'angle de brisure α ne soit petit, l'utilisation d'un joint de Cardan peut donner lieu à des variations de vitesse et des accélérations angulaires gênantes pour un mouvement d'entrée à vitesse constante.

Joint de Cardan

- Le caractère non homocinétique du joint de Cardan est générateur de vibrations importantes d'autant plus élevées que α et ω_1 sont grands

Fluctuation de la vitesse d'un cardan en fonction de l'angle des deux arbres					
α	10°	20°	30°	40°	50°
$\frac{N_2}{N_1}$	0,98 à 1,02	0,94 à 1,06	0,87 à 1,15	0,76 à 1,30	0,64 à 1,55



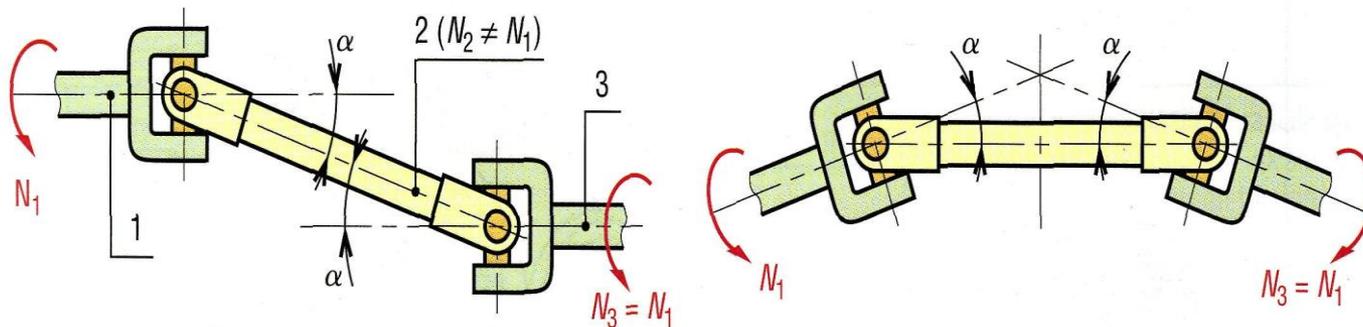
Double joint de Cardan

- Pour rendre le système homocinétique, il est possible de combiner deux joints de Cardan à condition de les déphaser de 90° et d'adopter des angles de brisures identiques
- Soit la fonction qui lie la vitesse de l'arbre moteur à la vitesse de sortie de l'arbre récepteur au travers du joint de Cardan

$$\omega_2 = F_\alpha(\omega_1)$$

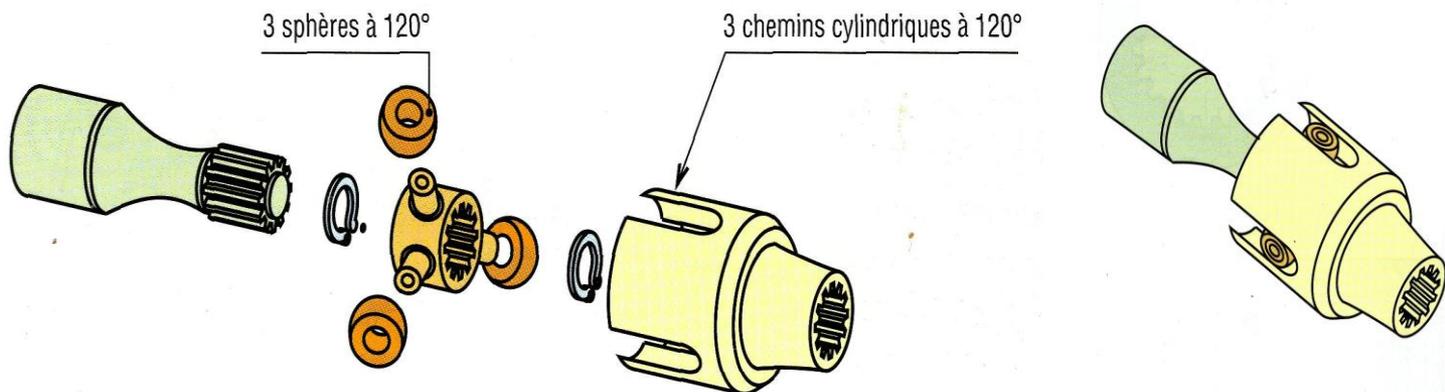
$$\omega_3 = F_{-\alpha}(\omega_2)$$

$$\omega_3 = F_{-\alpha}(F_\alpha(\omega_1)) = \omega_1$$



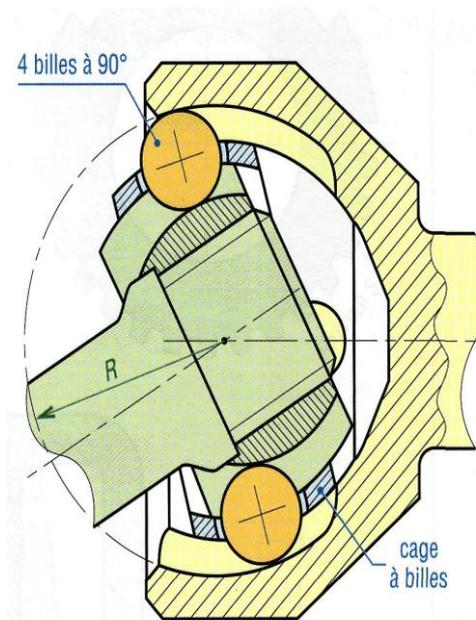
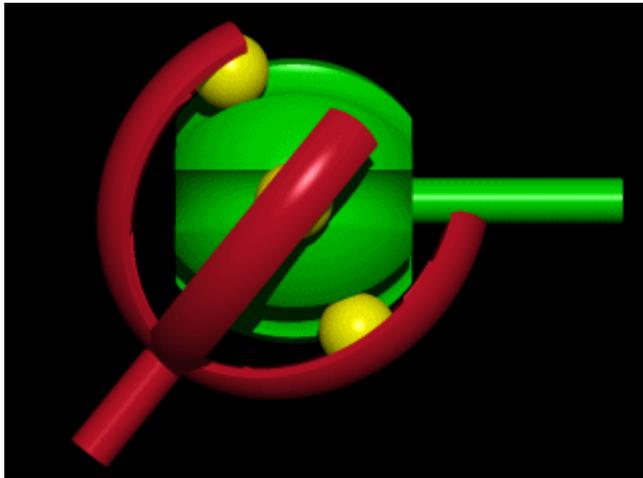
Joint homocinétiques

- Pour couvrir les besoins des industries (automobile...) d'autres types de joints ont été développés et certains sont **parfaitement homocinétiques** par construction ($N_2 = N_1$ à tout instant).
- **Joint tripode** : il est basé sur trois sphères articulées à 120° pouvant coulisser dans trois cylindres coaxiaux parallèles à l'un des arbres.
- Particularité : il permet une liberté en translation supplémentaire.



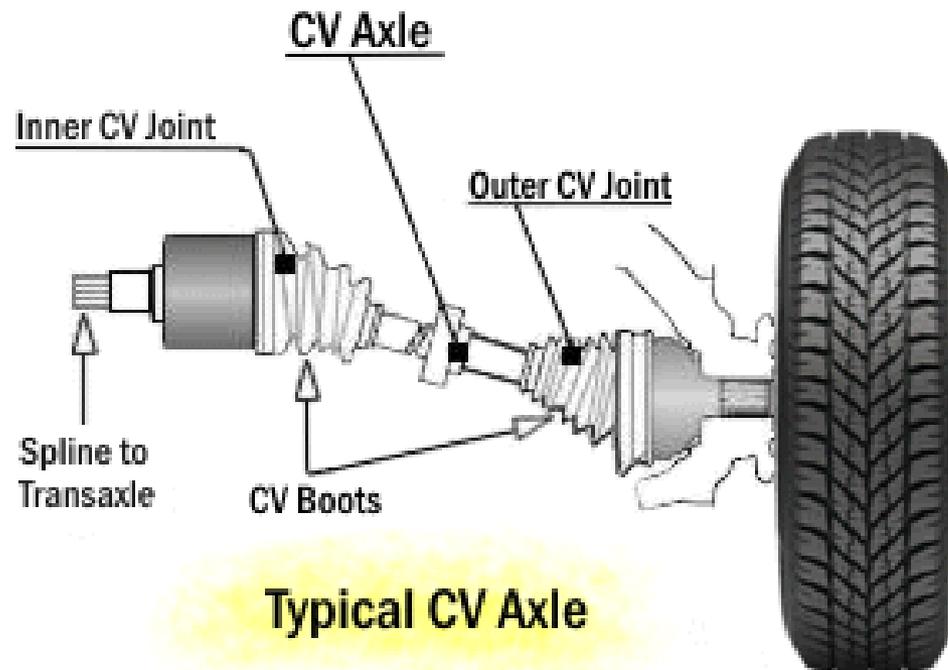
Joint homocinétiques

- **Joint à quatre billes (type Rzeppa)** : il est basé sur quatre billes à 90° pouvant rouler dans des chemins de forme torique (analogie avec les roulements) de forme torique.



Joint homocinétiques

- Les deux joints homocinétiques sont souvent combinés dans les arbres de transmission entre le différentiel et les roues

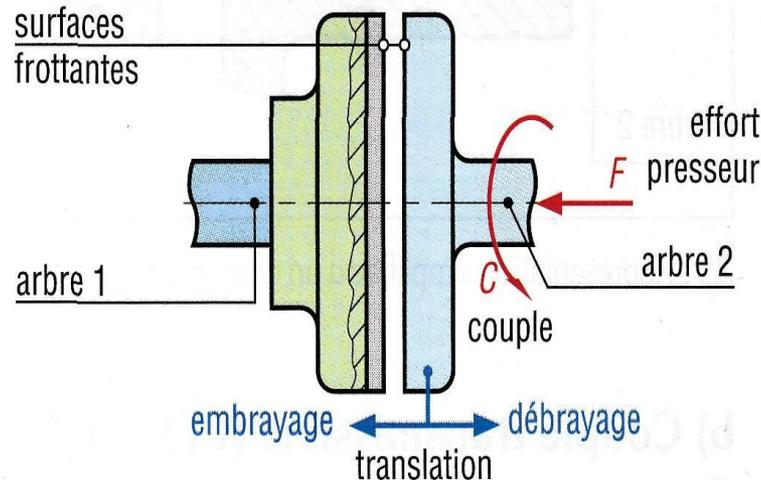


Accouplements temporaires

- On compte parmi ceux-ci
 - Les embrayages
 - Les freins

Embrayages

- Basés sur les propriétés du frottement, les **embrayages** réalisent l'accouplement, ou le désaccouplement, de deux arbres au gré d'un utilisateur ou d'un automatisme, après les avoir amenés à la même vitesse de rotation.
- Ils ne supportent pas ou très peu les défauts d'alignement
- Ils peuvent être classés à partir de la forme des **surfaces soumises à frottement** (disque, cylindrique, conique) et de **l'énergie du système de commande** (mécanique, hydraulique, électromagnétique, pneumatique).



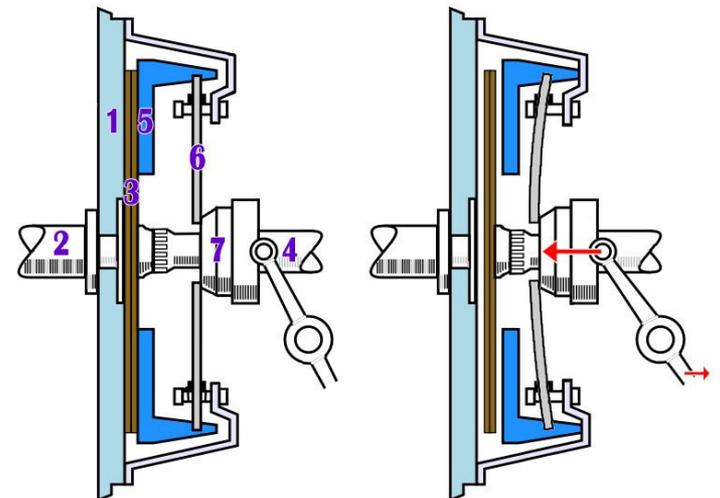
Embrayages à disques

- Les embrayages à disques sont les plus utilisés
- Le nombre de disques est variable et dépend de l'encombrement ou de la place disponible pour loger l'embrayage.
- A couple transmis identique, un monodisque sera plus encombrant radialement (plus grand diamètre) et moins axialement (moins large) qu'un multidisque.



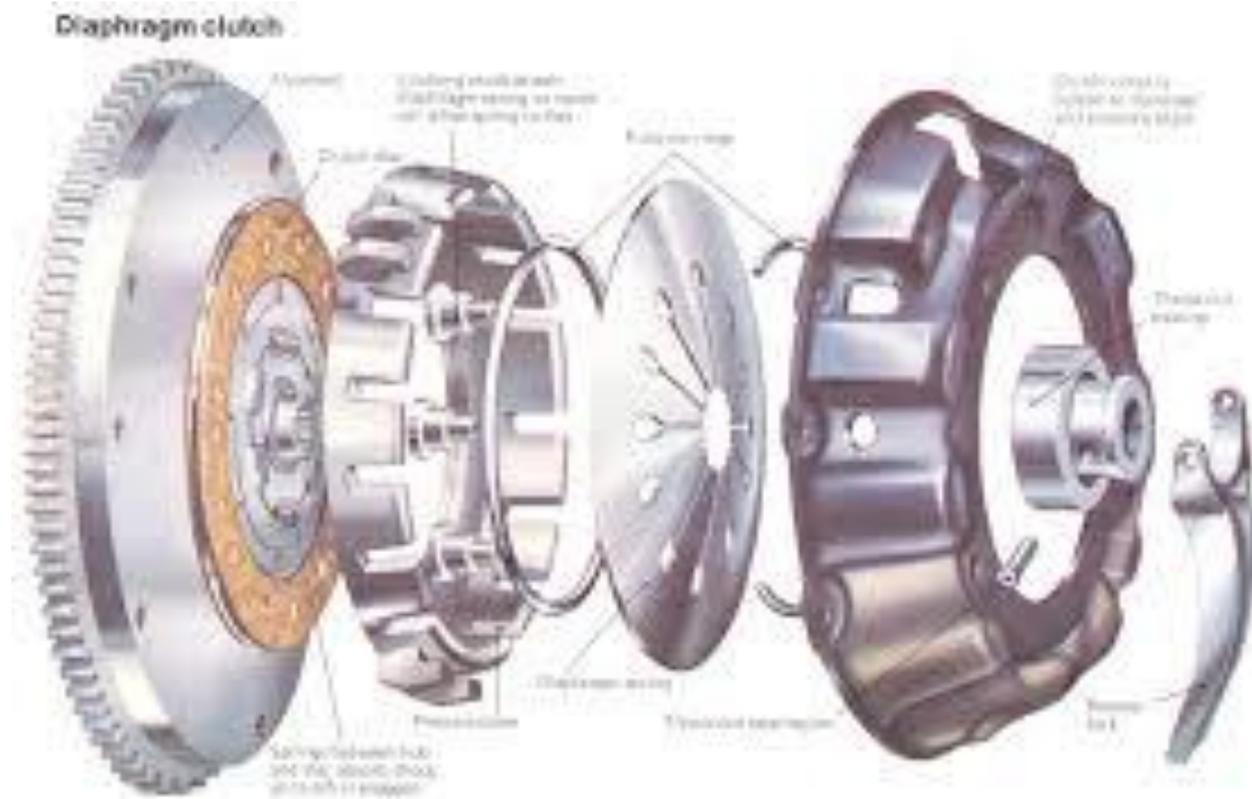
Position embrayée

Position débrayée

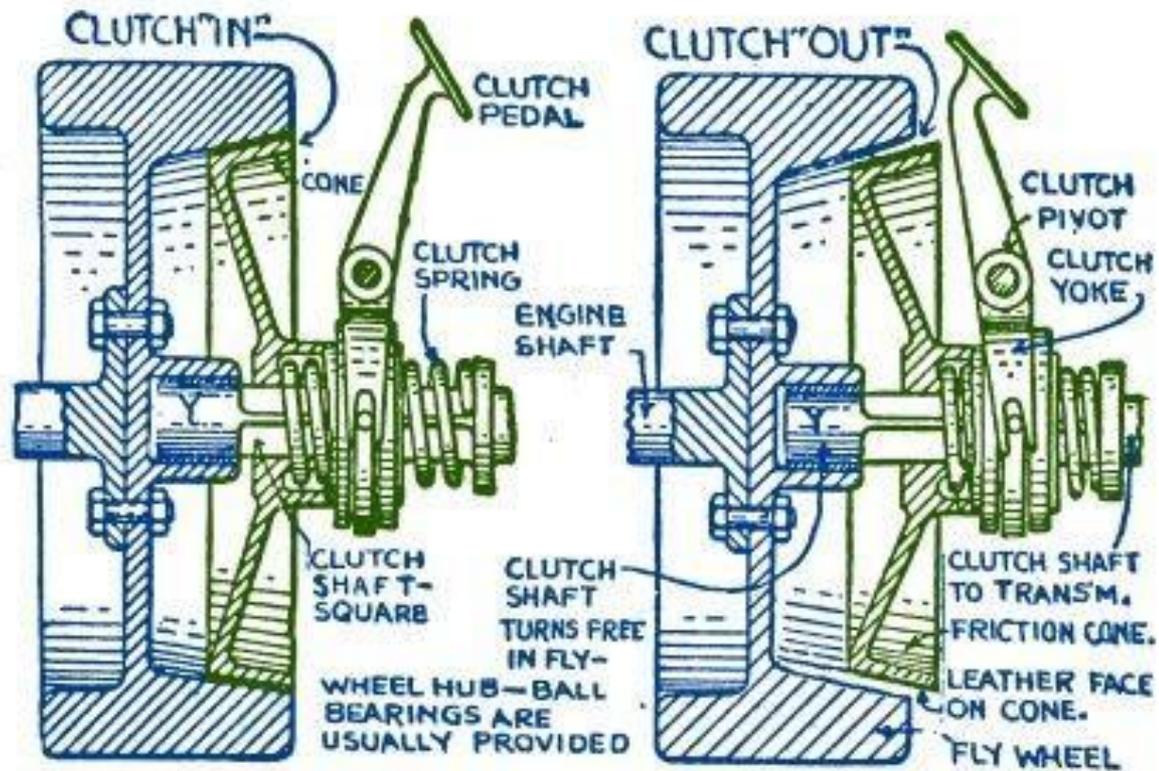


Embrayages à disques

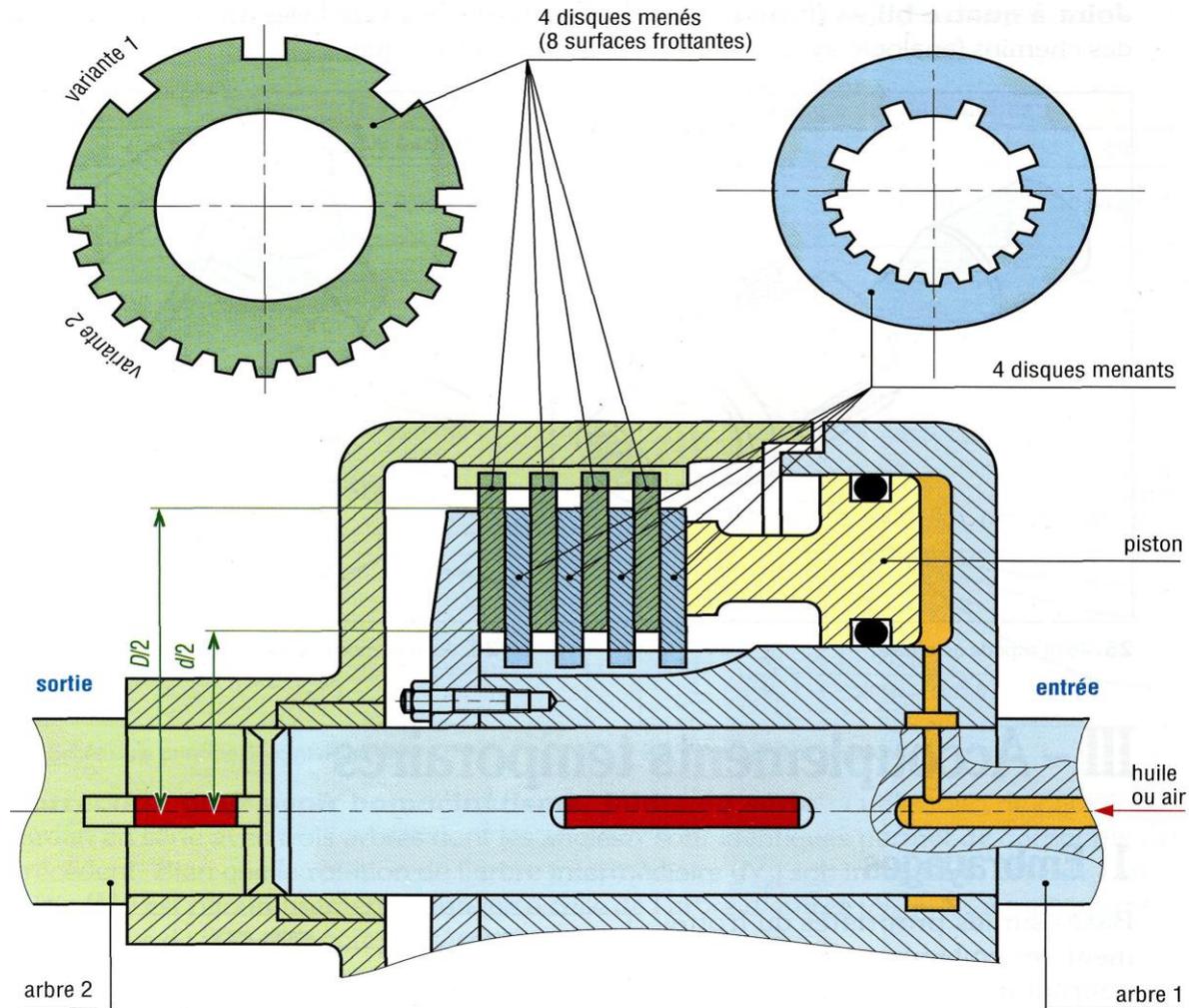
- Schéma d'un embrayage à disque pour automobile



Embrayages coniques



Embrayages multi disques

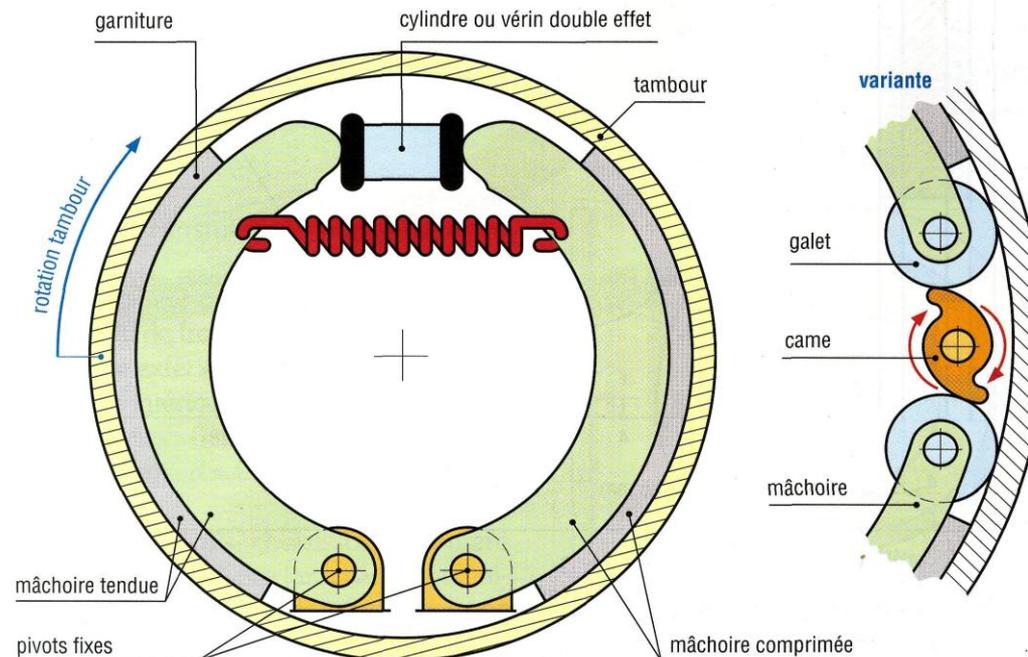


Freins

- Les freins fonctionnent de la même manière que les embrayages mis à part que l'un des arbres, fixe, sert de base pour arrêter progressivement le second par absorption de l'énergie cinétique des masses mobiles. Cette énergie est transformée en chaleur puis dissipée dans l'air ambiant.
- Il existe plusieurs types d freins:
 - À bande
 - A patin
 - A disque
 - A tambour
 - ...

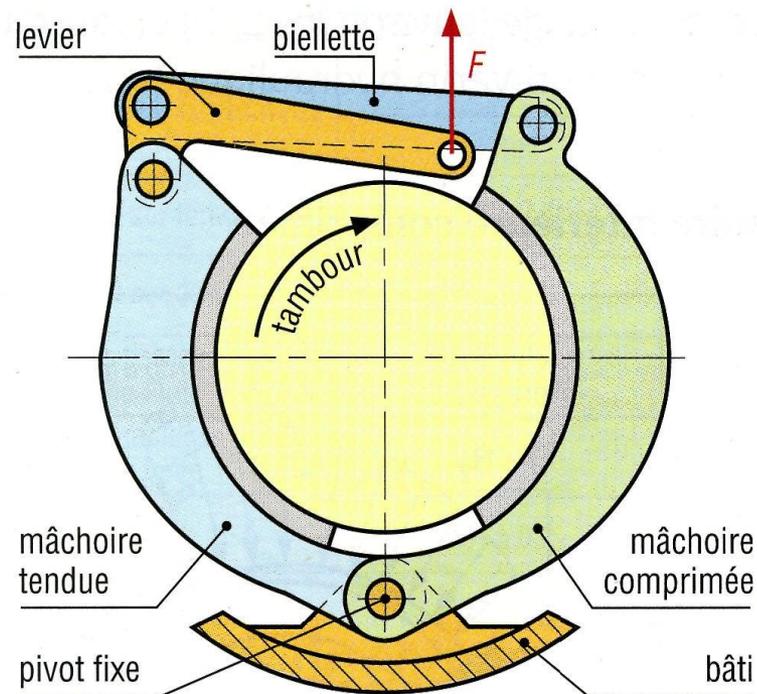
Freins à tambour

- Grande puissance de freinage sous un faible effort de commande.
- Aux vitesses élevées et en usages intensifs on leur préfère les freins à disques.
- Il existe plusieurs variantes.



Freins à tambours et mâchoires extérieures (ou sabots)

- Les freins à mâchoires sont utilisés sur certains équipements industriels pour réaliser des couples de freinages très élevés. Le couple de freinage est exactement le même que pour une mâchoire intérieure

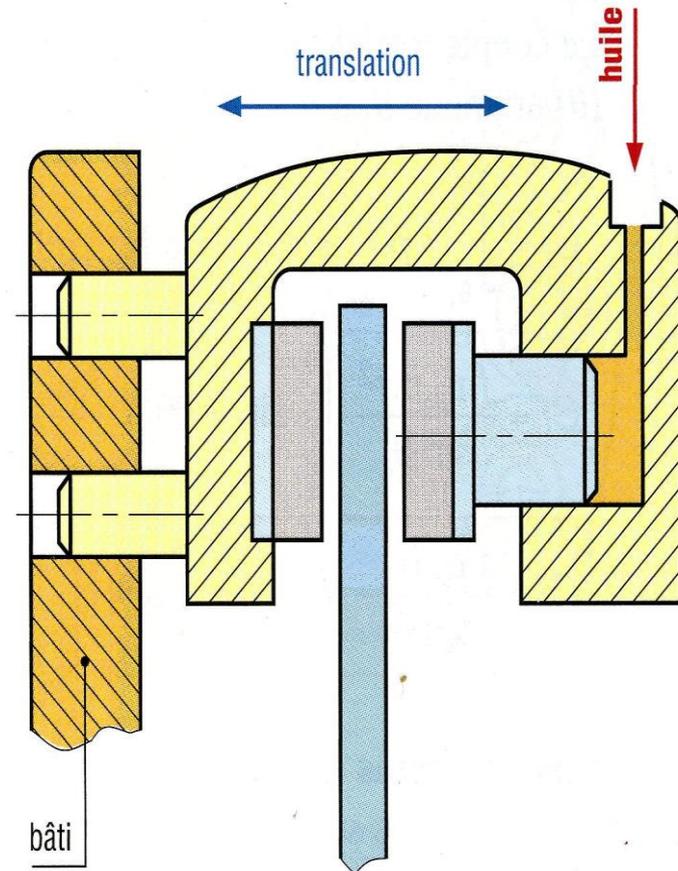
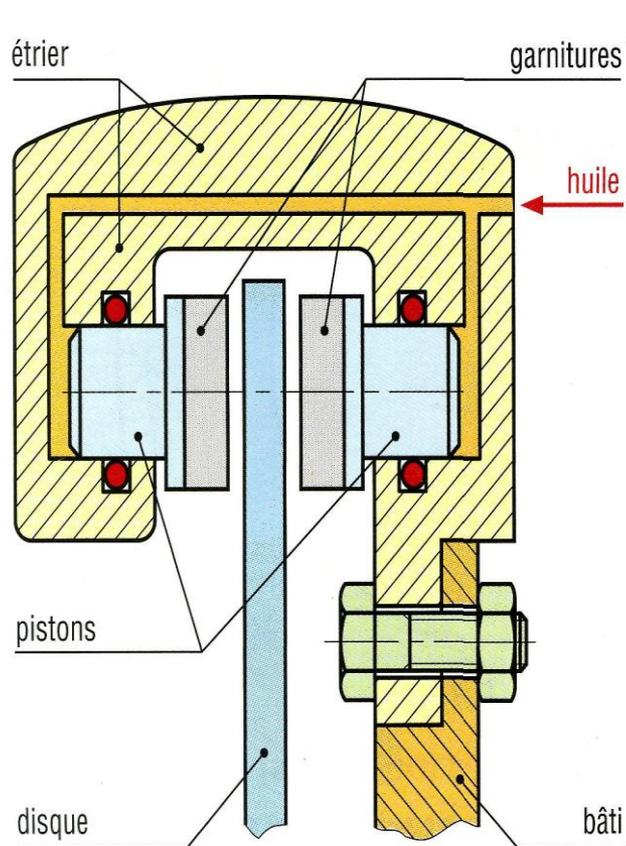


Freins à disque

- Les freins à disque ont pour eux la stabilité du couple de freinage, notamment aux vitesses élevées et une bonne tenue dans des conditions sévères d'utilisation (services intensifs, surcharges, etc.).
- Ils permettent une meilleure évacuation de la chaleur que les freins à tambour, un freinage plus progressif, plus stable, sont plus facile à commander et sont plus faciles à entretenir.
- Cependant, à encombrement égal et à effort de commande identique (F) leur couple de freinage est deux à quatre fois plus faible.

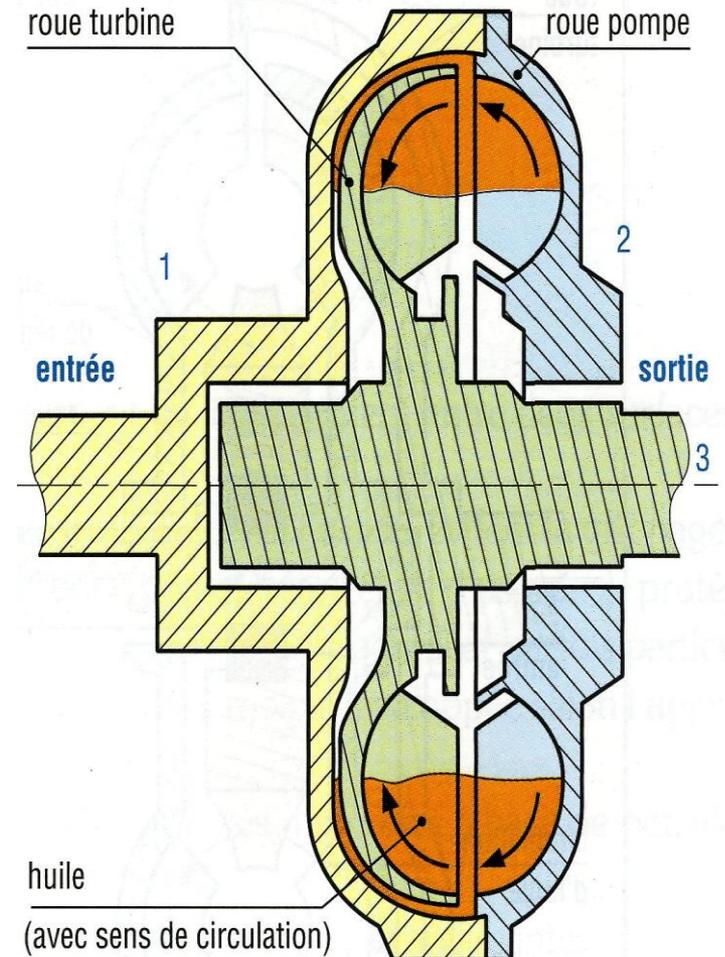
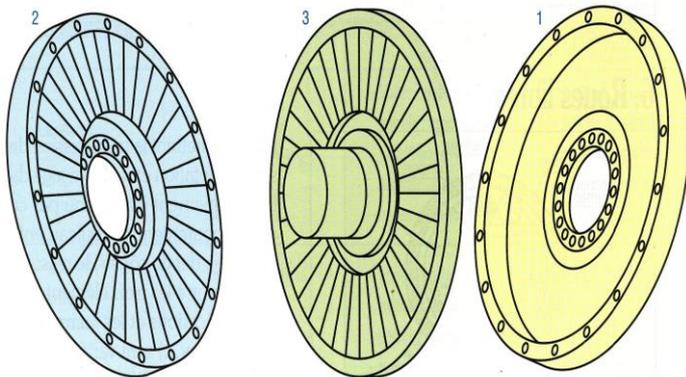
Freins à disque

- Freins à étrier fixe vs à étrier flottant



Coupleur hydraulique

- Sous l'effet de la rotation de l'arbre d'entrée (roue pompe), le fluide intérieur (huile spéciale) est accéléré, l'énergie cinétique acquise est ensuite transmise à l'arbre de sortie (roue turbine) entraînant ainsi sa rotation

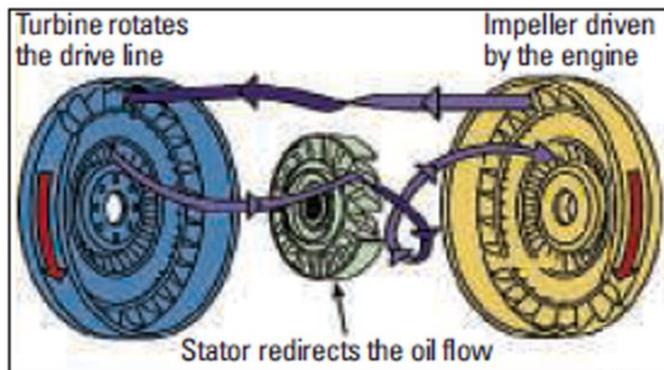


Coupleur hydraulique

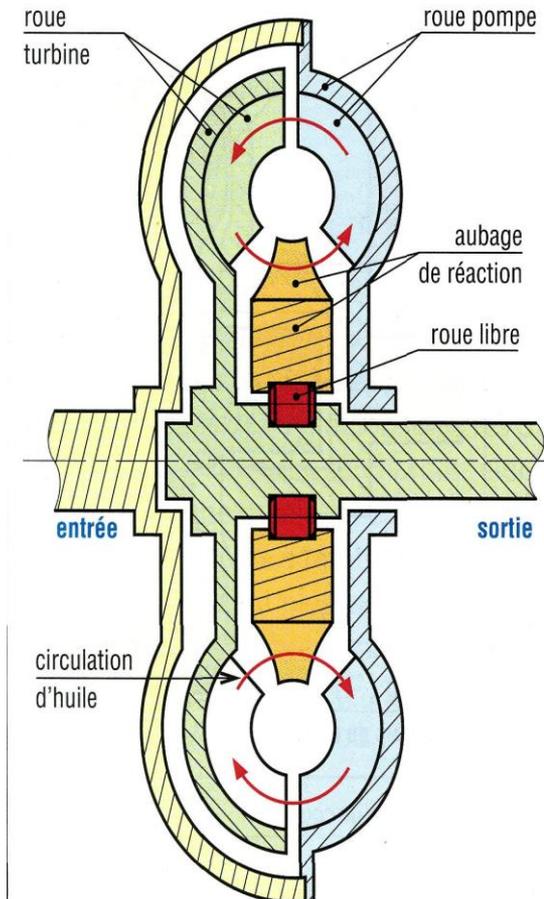
- Le couple transmis, très faible ou nul au démarrage, augmente progressivement avec la vitesse de rotation (varie avec le carré de cette vitesse). Les moteurs peuvent ainsi démarrer à vide ou sans charge.
- Les coupleurs hydrauliques entraînent systématiquement un certain glissement entre la vitesse de sortie et la vitesse d'entrée.

Convertisseurs de couple

- Ils ne doivent pas être confondus avec les coupleurs. Ils permettent, grâce à un **troisième organe** (aubages ou ailettes de réaction pouvant modifier le sens de circulation du fluide) de faire varier le couple.

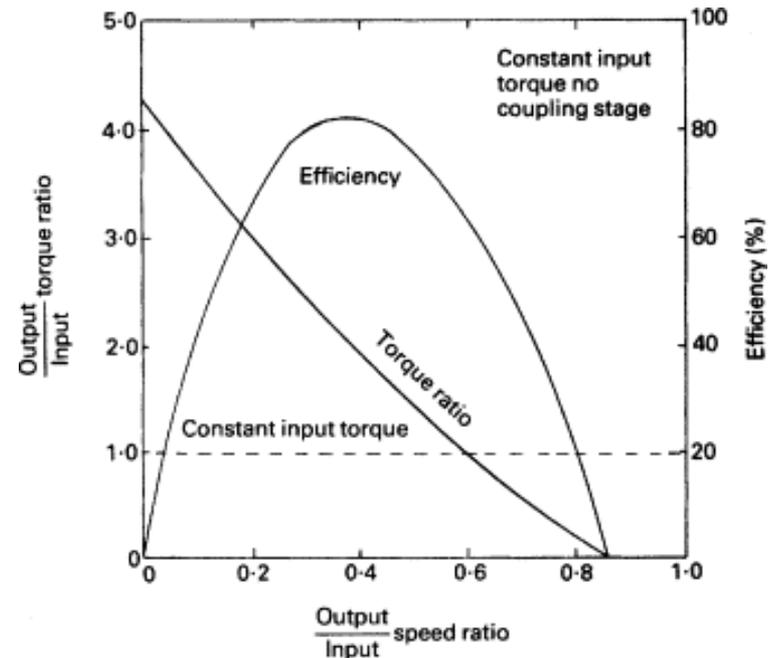
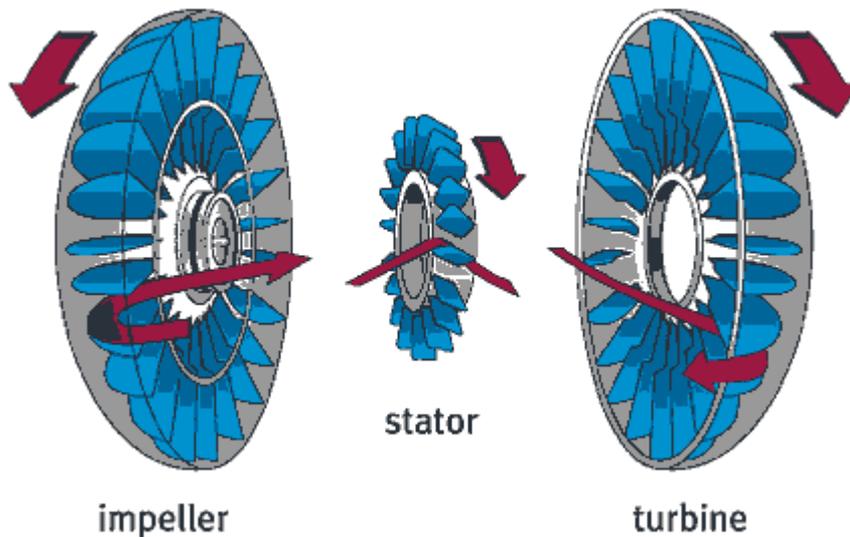


This diagram shows how fluid flows through the various parts of a torque converter.



Convertisseurs de couple

- Il y a augmentation du couple lorsque la roue turbine se bloque ou tourne au ralenti alors que la roue pompe est à sa vitesse maximale. Le couple peut alors être **multiplié par deux ou plus**.



Convertisseurs de couple

- Si la pompe et la turbine tournent à la même vitesse les aubages de réaction tournent eux aussi dans le même sens et le convertisseur fonctionne **comme un coupleur**, sans amplification du couple.

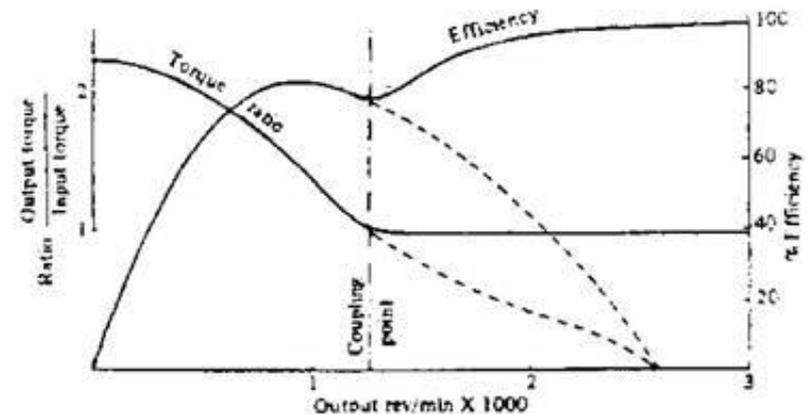
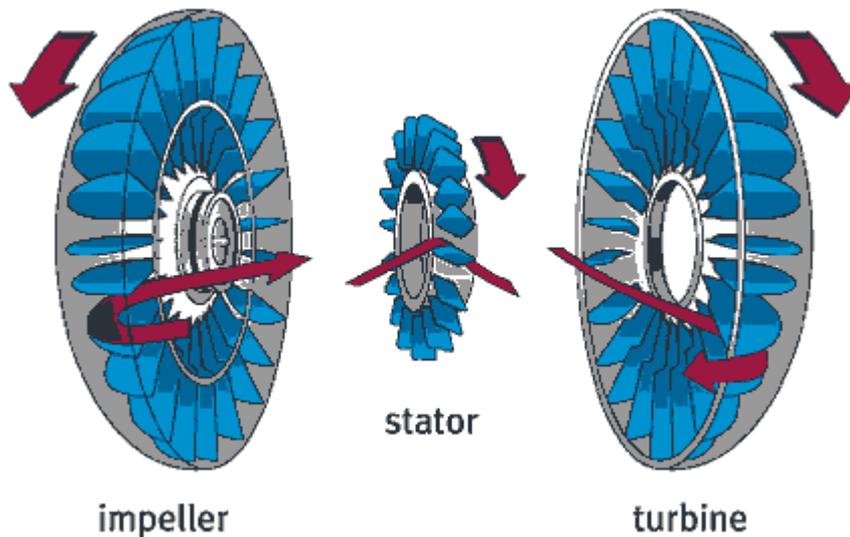
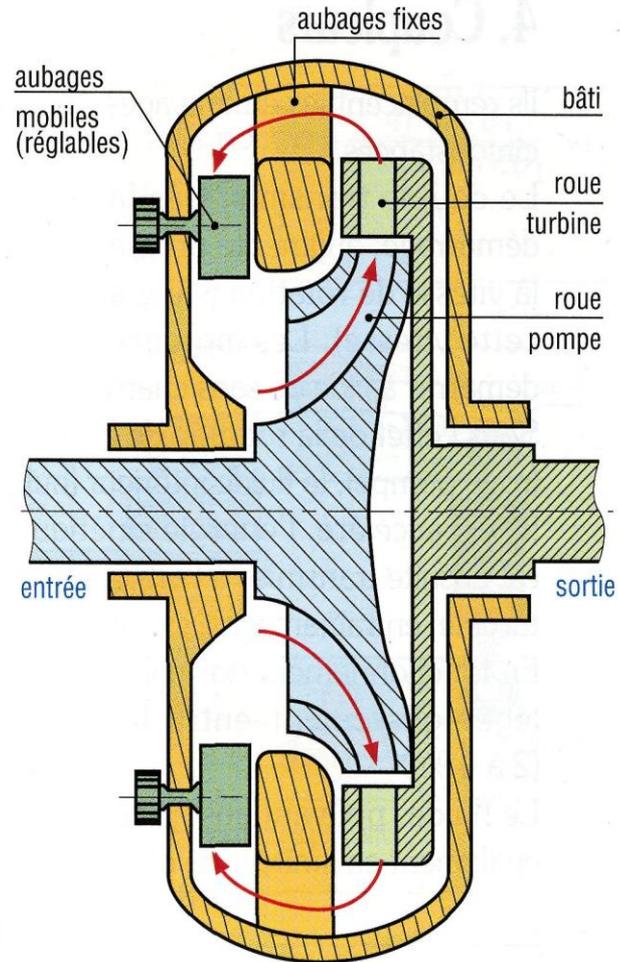


Figure Torque-ratio/efficiency curves

Convertisseur de couple

- Variante: implantée sur de grosses installations, elle utilise des aubages réglables (par servomoteurs ...) permettant de gommer les différences entre couple moteur et couple récepteur (fonction égalisatrice). Lorsque les aubages mobiles obturent complètement la circulation d'huile, le moteur est presque déchargé.



Roue libre

- Elles permettent la transmission dans un seul sens de rotation et le débrayage dans l'autre. L'entraînement est obtenu par coincement ou arc-boutement du rouleau entre les deux arbres, « effet de cône », le ressort assurant le contact entre les trois éléments.
- Les applications et les technologies (formes des rouleaux...) sont variées.

