

Transmissions Hydrauliques

1 - Généralités :

L'objectif de ce cours est de voir les grandes familles de transmissions hydrauliques et plus précisément les pompes et moteurs hydrauliques.

Les vérins ne seront pas étudiés.

Cette étude n'est pas exhaustive. Il vous appartient de parfaire votre culture en consultant les nombreux ouvrages consacrés à ce sujet et qui seront nécessairement plus développés.

Un peu de sémantique : hydro et hydrau proviennent du grec *hudôr* eau

2 – Principe des transmissions hydrauliques

On distingue 2 types :

- les transmissions hydrostatiques.
- les transmissions hydrodynamiques.

2.1. Transmission hydrostatique

Dans un système hydrostatique, une machine volumétrique transmet l'énergie au moyen d'un liquide.

Il comporte au moins une pompe hydraulique et un moteur hydraulique; la pompe engendrant un courant de liquide sous pression (sans changement notable de la vitesse) qui alimente le moteur.

- circuit ouvert

Dans ce cas, la pompe aspire le liquide, principalement à partir d'un réservoir dans lequel ce liquide retourne quand il a transféré son énergie au moteur hydraulique.

- circuit fermé

Dans ce cas, le liquide détendu est essentiellement renvoyé du moteur vers la pompe.

En outre, on distinguera les transmissions à *distance* (la pompe et le moteur sont réunis par des canalisations) qui peuvent permettre à une même pompe d'alimenter plusieurs moteurs (en parallèle ou en série) et les transmissions *compactes* dans lesquelles la pompe et le moteur sont intégrés dans un carter commun qui sert de réservoir d'huile et qui contient les éléments de commande.

2.2. Transmission hydrodynamique

Dans un système hydrodynamique, une pompe centrifuge transmet l'énergie produite par les forces d'inertie qui résultent des variations de vitesse d'un liquide en mouvement.

Toutes les transmissions hydrodynamiques comportent une roue ou couronne motrice, reliée à un arbre moteur. Celui-ci communique au liquide en circuit fermé une énergie transférée à une turbine solidaire de l'arbre récepteur.

2.3. Le fluide hydraulique

Avec la pompe et le moteur, le fluide hydraulique constitue le troisième élément d'une transmission. Les fonctions que celui-ci remplit sont :

- transmettre la puissance à l'intérieur du système.
- lubrifier les organes mobiles afin de minimiser l'usure.
- résister à l'oxydation.
- protéger le système de la corrosion due à la présence d'air humide.

3 – Les transmissions hydrostatiques

3.1. Classification

C'est le mode de transport du fluide hydraulique qui sert de critère.

On distinguera les transmissions utilisant des :

- pompes ou moteurs à pistons radiaux.
- pompes ou moteurs à pistons axiaux.
- pompes ou moteurs à palettes.
- pompes ou moteurs différents.

La variation de volume du fluide hydraulique déplacé peut se faire :

- soit par action sur la pompe.
- soit par action sur le moteur.
- soit par action sur l'un et l'autre.

Le tableau suivant résume les caractéristiques :

Déplacement de la pompe	Déplacement du moteur	Couple	Puissance	Vitesse	Observations
Fixe	Fixe	Constant	Constante	A rapport constant	
Variable	Fixe	Constant	Augmentant avec V	Infiniment variable	Aussi à embrayage
Fixe	Variable	Décroissant avec V	Constante	Infiniment variable	Généralement avec une capacité de moteur plus grande que celle de la pompe pour fournir une puissance Cte en sortie, au-dessus d'une gamme de vitesse donnée
Variable	Variable	Constant puis décroissant rapidement avec V	Croissante avec V puis constante	Infiniment variable	aussi à embrayage

3.2. Transmissions à pistons radiaux

Les pompes et les moteurs hydrauliques radiaux se composent schématiquement d'un bloc-cylindre dans lequel un certain nombre de cylindres (généralement impair) sont disposés radialement.

Deux types de construction existent :

- le bloc-cylindre tourne autour d'une valve centrale fixe. (type 1)
- le bloc-cylindre est fixe et les pistons se déplacent grâce à une came (ou par excentrique) (type 2)

3.2.1. Exemples de type 1

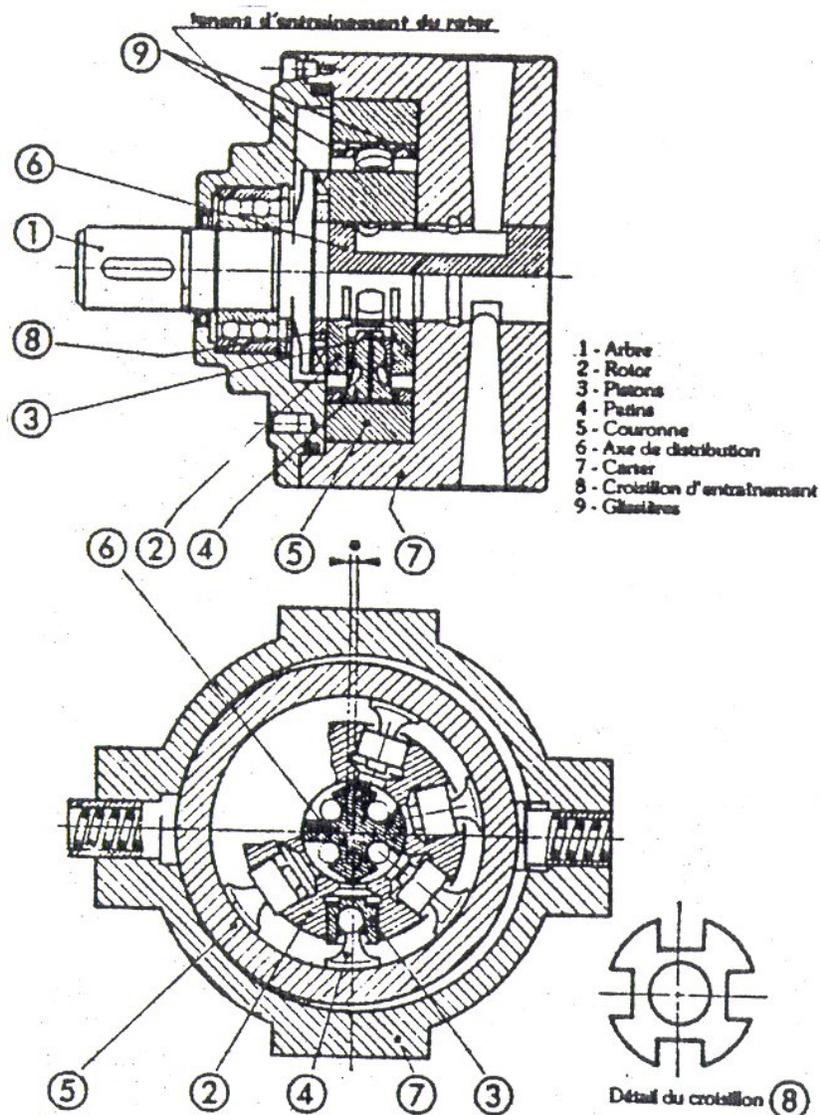
La **pompe** comporte un arbre d'entraînement **1**, un bloc-cylindre **2** entraîné en rotation un accouplement **8** entre arbre et bloc-cylindre, un ensemble de pistons **3** qui s'appuient par des patins **4** à équilibrage hydrostatique sur un anneau **5**, un dispositif de manœuvre **9** de l'anneau **5**.

Le principe de fonctionnement est le suivant :

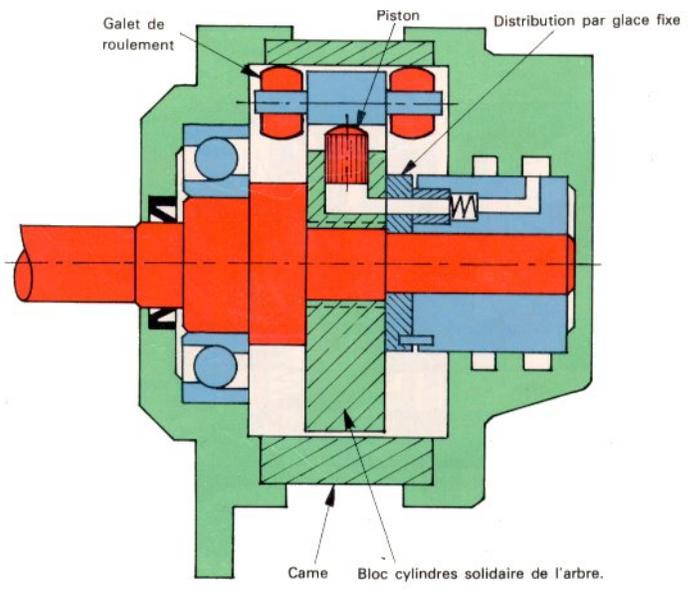
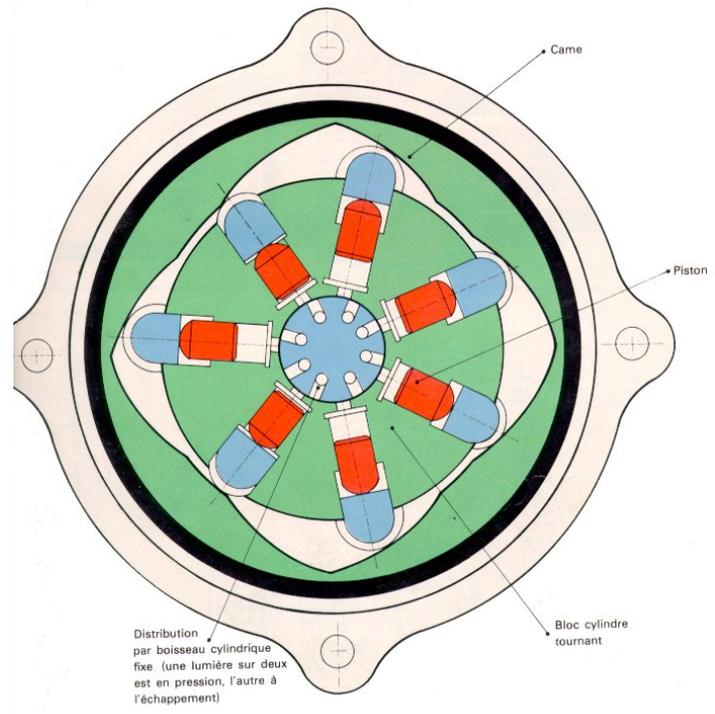
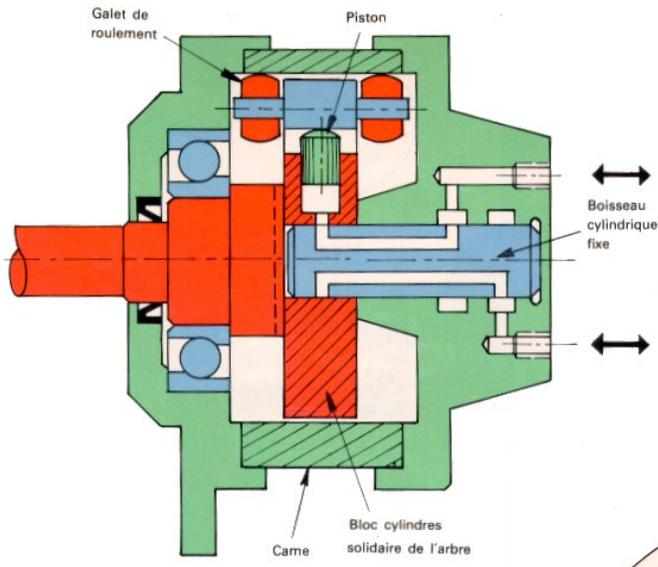
Le rotor **2** tourne autour de la valve **6** qui est un distributeur fonctionnant à l'aspiration et au refoulement. Ce bloc-cylindre comporte un nombre impair de pistons actionnés par une couronne à excentricité modifiable, ce qui permet de faire varier la course ou la cylindrée des pistons.

Dans cet exemple, les pistons sont liés à des patins (Liaison rotule) maintenus au contact de la couronne par l'effet d'inertie centrifuge. Ils fonctionnent en milieu lubrifié grâce aux fuites internes venant des tiges de pistons.

Le fonctionnement dans les 2 sens de rotation est quasi instantané.



Détail de construction d'une pompe à pistons radiaux à excentrique extérieur (origine Bosch)



3.2.2. Exemple de type 2

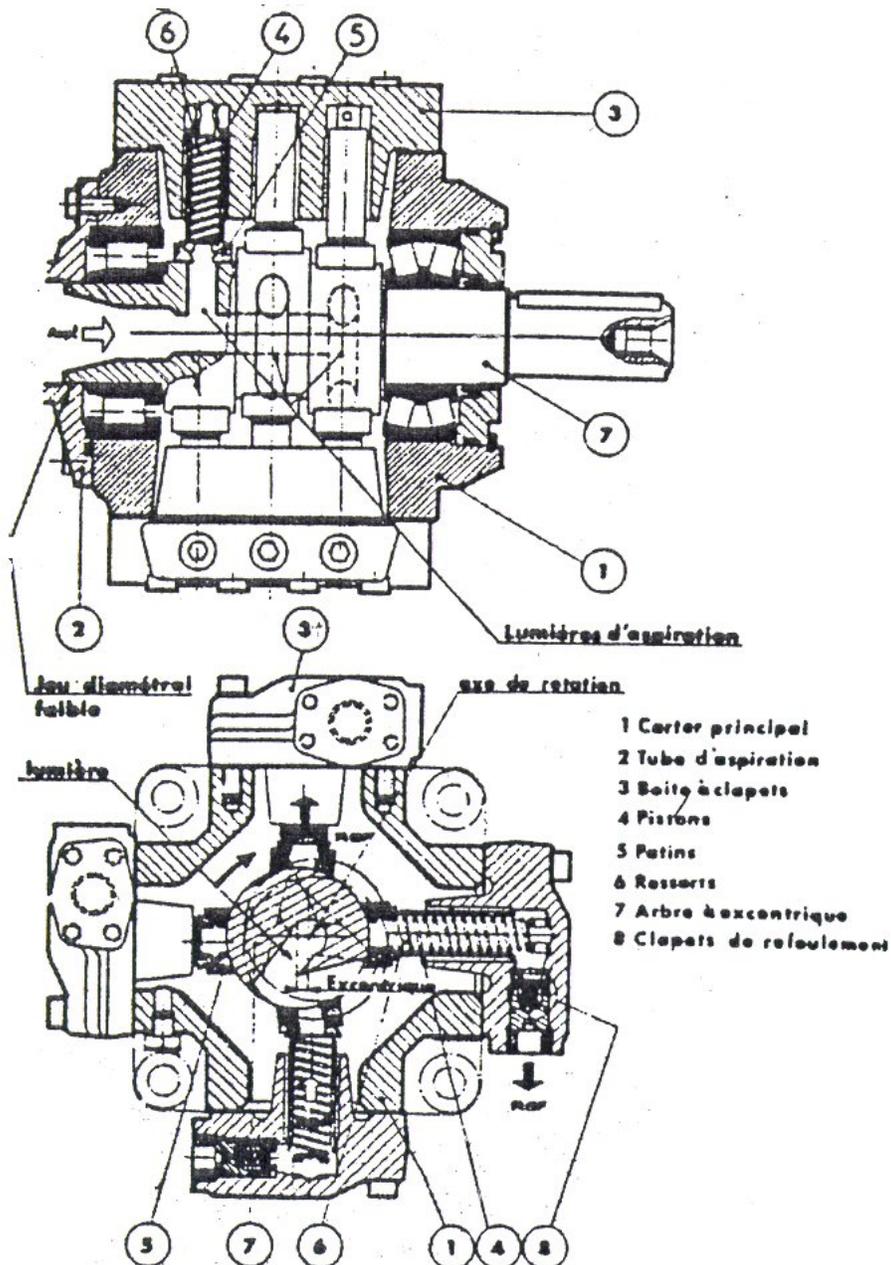
La **pompe** comporte un arbre excentré **7** entraîné en rotation, un ensemble de bloc-cylindres **3** fixes, un ensemble de pistons **4** qui s'appuient par des patins sur l'arbre **7**, des tubes d'aspiration **2**, des clapets de refoulement **8**.

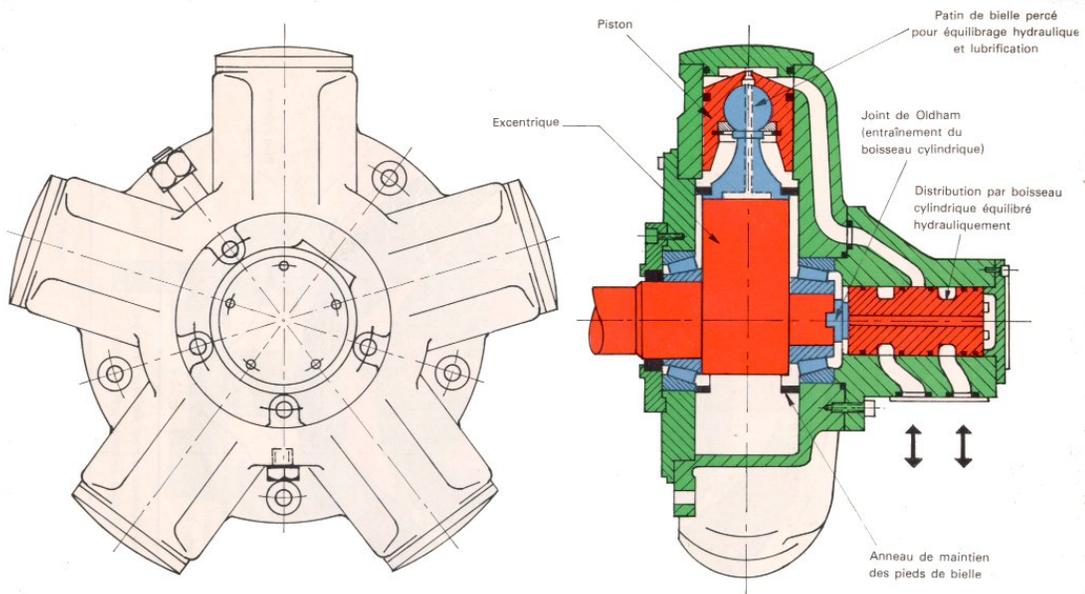
Le principe de fonctionnement est le suivant :

Le mouvement des pistons est provoqué par l'arbre avec excentrique, l'aspiration s'effectuant à travers l'arbre et le refoulement par des clapets.

Un patin (assisté par un ressort) assure la liaison entre le piston et l'excentrique.

L'aspiration par lumières permet de fonctionner à des vitesses de rotation élevées, d'autant plus que l'huile est centrifugée par l'arbre excentré et le refoulement par clapets assure un rendement volumétrique élevé.





3.3. Transmissions à pistons axiaux

Dans ce type de transmission, les axes des cylindres sont parallèles à l'axe de l'arbre d'entraînement ou font avec lui un angle faible.

Deux types de construction peuvent être rencontrés :

- type à *plateau* : le bloc-cylindre peut tourner et produire le mouvement alternatif nécessaire aux pistons par leur contact avec un plateau ou il peut rester fixe tandis que le plateau tourne et communique un mouvement aux pistons.

- type à *bloc inclinable* : le plateau est remplacé par une joue fixe montée sur l'arbre et par rapport à laquelle le bloc-cylindre bascule pour déplacer les pistons.

3.3.1. exemple à plateau

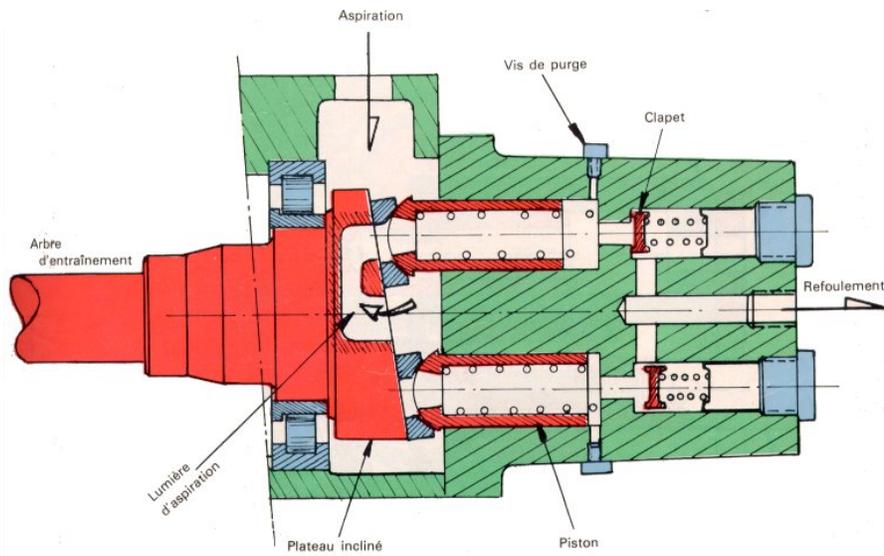
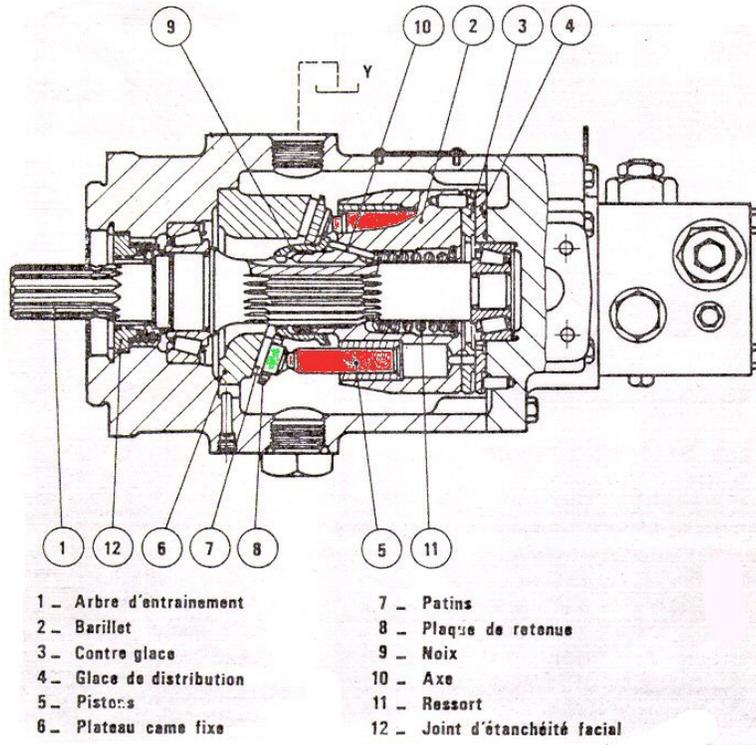
Il s'agit ci d'un **moteur** hydraulique.

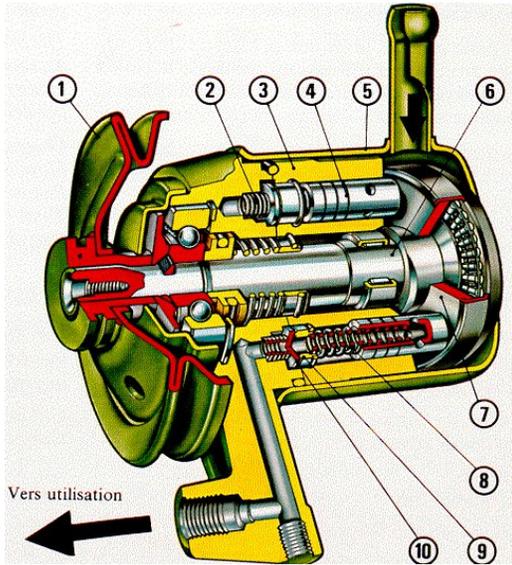
L'huile parvenant à l'orifice d'alimentation chemine à travers le distributeur **4** jusqu'aux alésages du bloc-cylindre **2**

Le distributeur comporte 2 lumières de sorte qu'un certain nombre de pistons soient en communication avec l'admission d'huile, les autres avec l'orifice de refoulement.

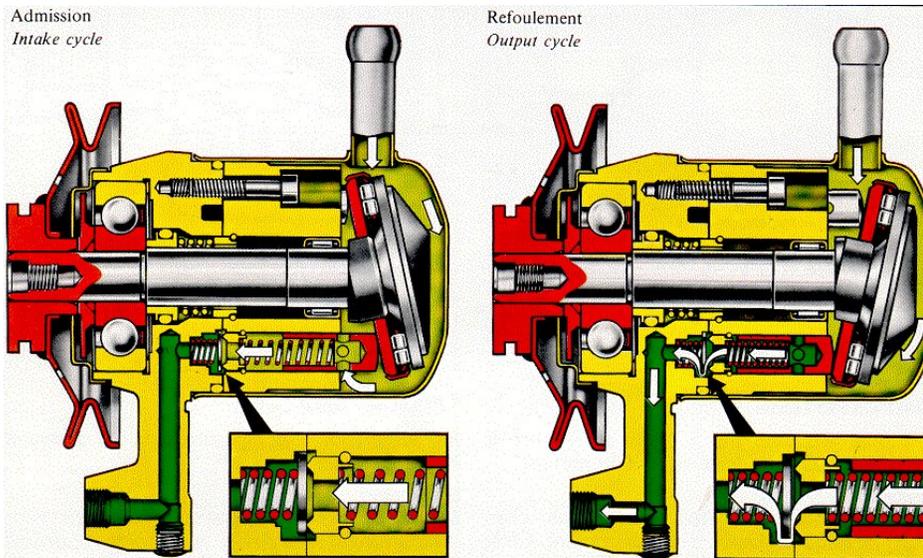
La poussée exercée par l'huile sur les pistons **5**, en contact par des patins hydrostatiques avec le plateau-came fixe **6**, provoque la rotation du bloc-cylindre **2** et donc de l'arbre **1**, du fait de l'inclinaison du plateau.

Le sens d'arrivée de l'huile détermine le sens de rotation du moteur.





Pompe Citroen 5 pistons



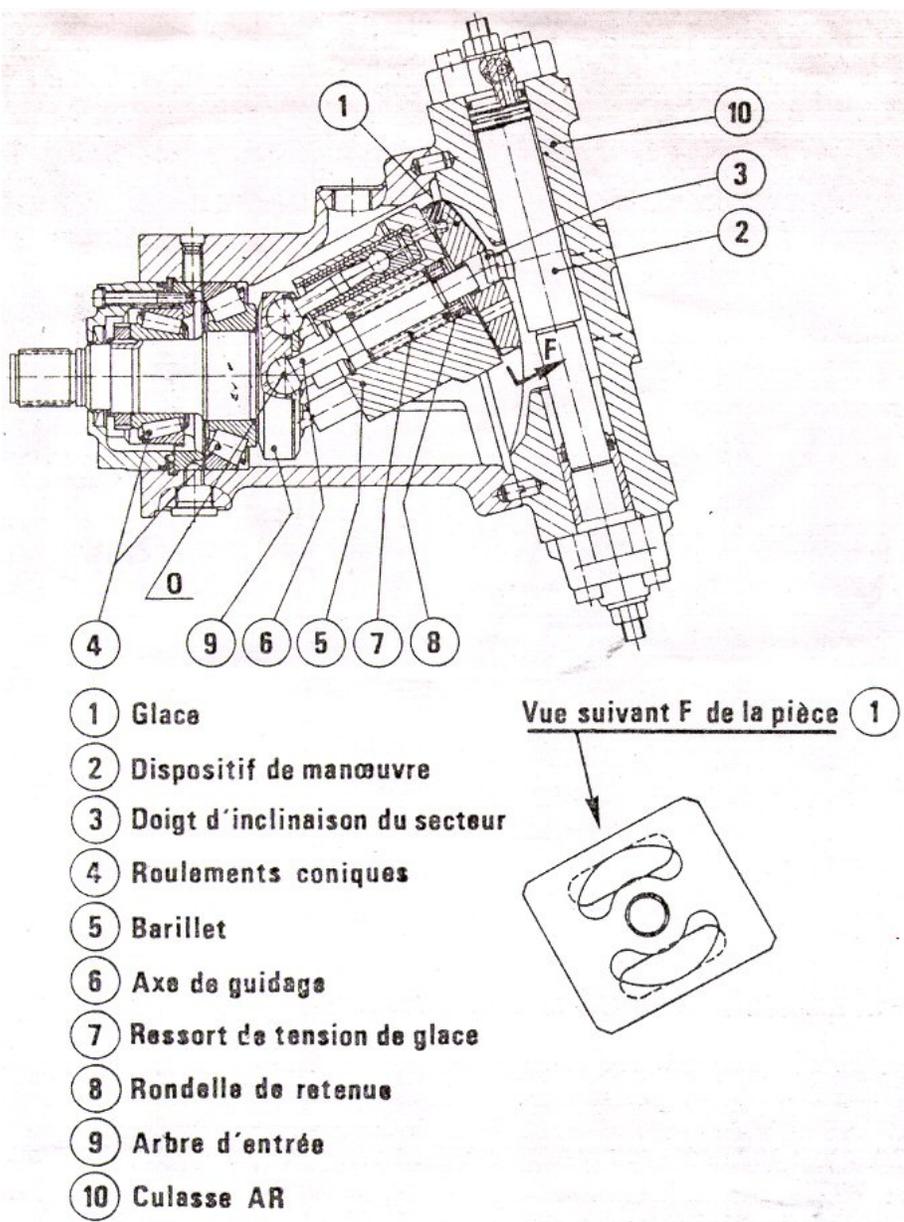
3.3.2. exemple à bloc incliné

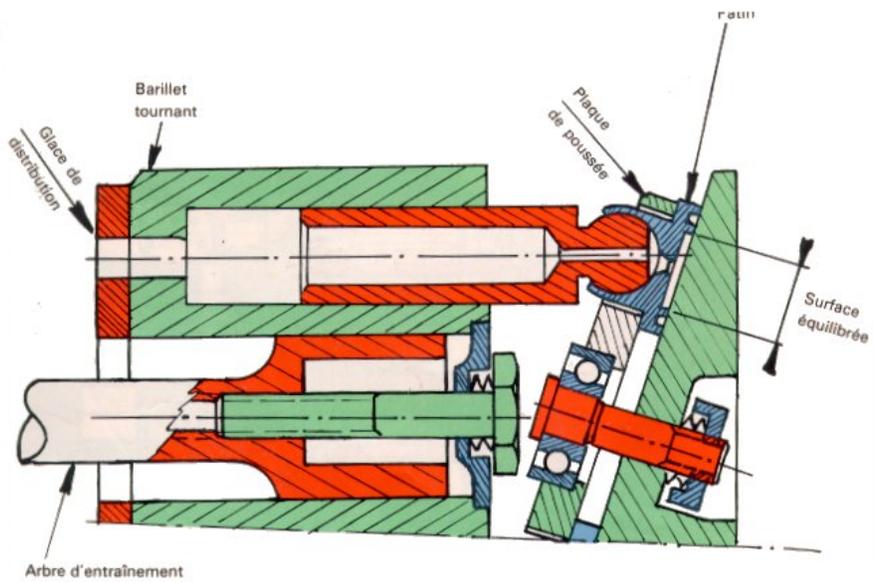
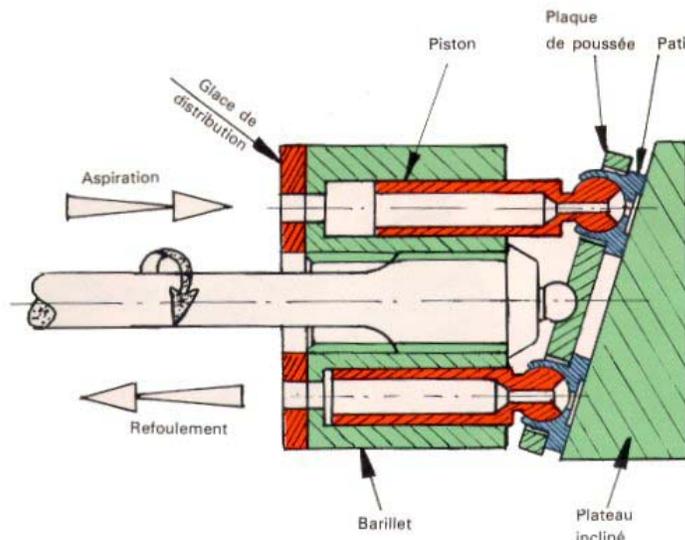
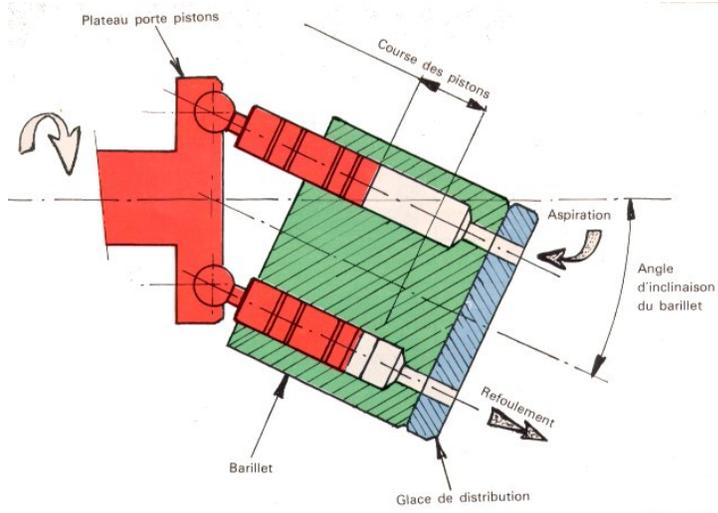
Ce **moteur** hydraulique comporte un plateau **9** sur lequel sont articulées les têtes des bielles des pistons, un bloc-cylindre **5** qui contient les logements des pistons, une plaque de distribution **1** mobile assurant la liaison hydraulique entre le bloc-cylindre et la culasse AR **10**, une plaque arrière avec les connexions d'arrivée et de retour d'huile, un dispositif de manœuvre **2** de la plaque de distribution **1**.

Du fait de l'inclinaison du bloc-cylindre, l'action d'un piston sur l'arbre **9** a une composante radiale qui induit le mouvement de rotation et une composante axiale encaissée par les roulements à rouleaux coniques.

L'angle d'inclinaison pouvant être réglé, la cylindrée peut varier, ce qui permet d'adapter le couple transmis en fonction de la vitesse.

Par rapport à l'exemple précédent, ce moteur possède un meilleur rendement au démarrage et un rapport de cylindrée plus élevé (3,5).







3.4. Transmissions à palettes

Schématiquement une pompe ou un moteur à palettes se compose d'une cage ou stator et d'un rotor excentré par rapport à la cage.

Ce dernier porte des palettes guidées et coulissant radialement dans des rainures.

L'espace compris entre le rotor et le stator varie progressivement en raison de l'excentricité en augmentant et en diminuant au cours de la rotation.

Le contact palettes – stator est maintenu grâce à l'effet d'inertie centrifuge (assisté quelquefois par l'huile ou par des ressorts)

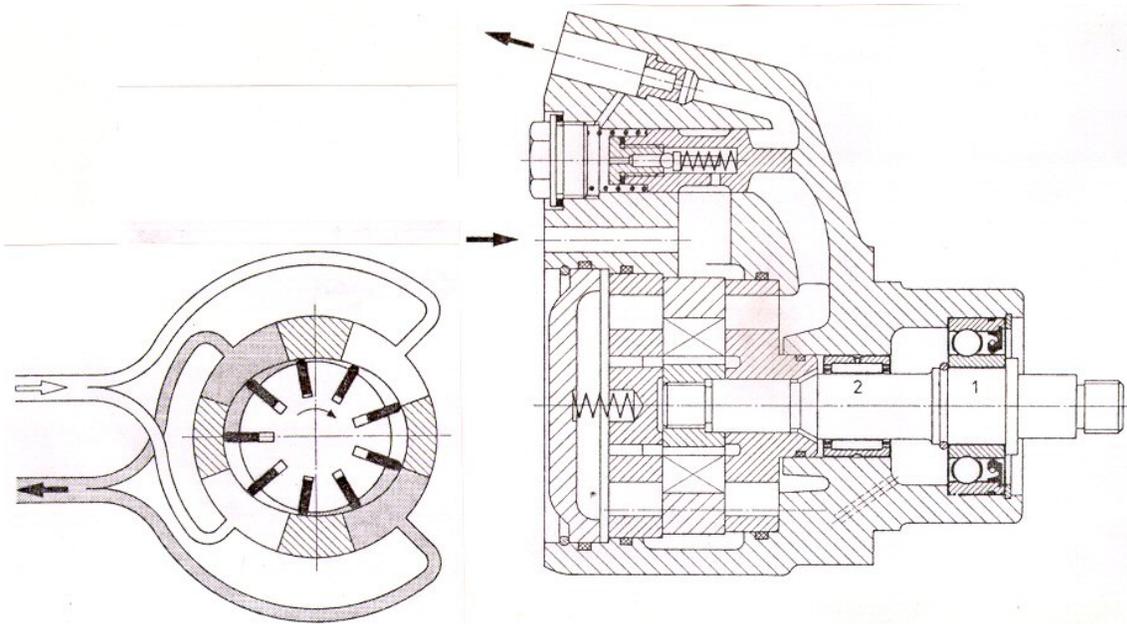
Le mouvement des palettes provoque une aspiration et un refoulement alternés du fluide hydraulique au travers de lumières opposées diamétralement.

On obtient une transmission équilibrée si le rotor tourne dans un anneau ovalisé :

le cycle se produit alors 2 fois par tour (les efforts radiaux sur le rotor se compensent)

Dans l'exemple qui suit, la **pompe** à palettes fournit la pression d'huile nécessaire à l'asservissement d'une direction assistée.

Elle est plus particulièrement destinée aux véhicules légers et l'entraînement est assuré par un moteur à régime élevé.



Caractéristiques de fonctionnement

vitesse mini

$n=500\text{t/min}$

vitesse maxi

$n=6000\text{t/min}$

Pression maxi

$p=100\text{ bars}$

débit d'huile taré par un gicleur

$Q= 6 \text{ à } 9\text{ l/min}$

Puissance d'entrée constante $P=1,1\text{ kW}$

Puissance (p et vit. maxi)

$P=15\text{ kW}$

Choix des roulements

L'arbre d'entrée est équipé d'un roulement à aiguilles NK (palier libre) et d'un roulement à billes KXN 3 (palier fixe) De la disposition symétrique des chambres d'admission et de refoulement, il résulte un équilibre des efforts sur le porte-palettes et, par conséquent l'effort sur les paliers est relativement faible.

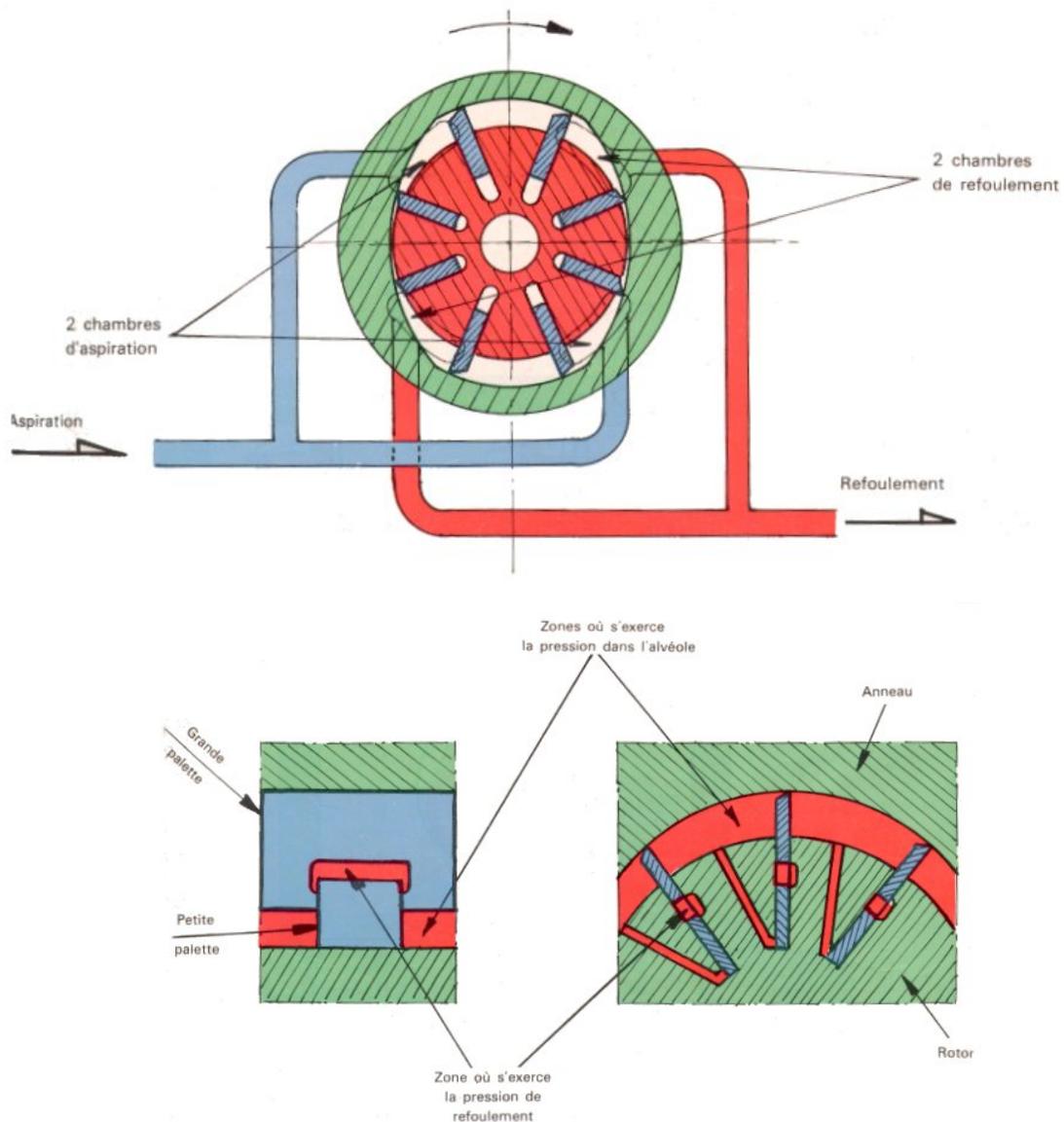
Étanchéité et lubrification

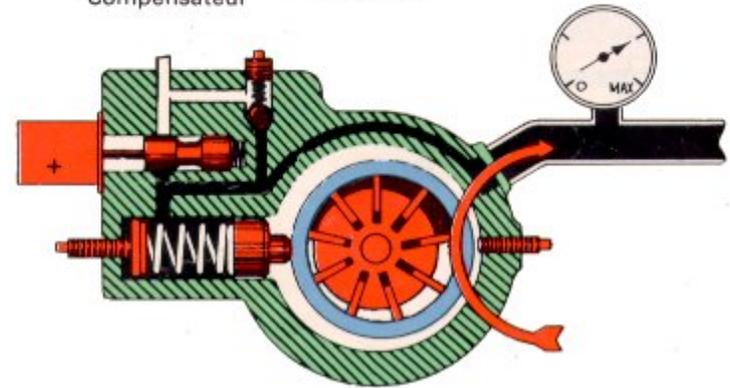
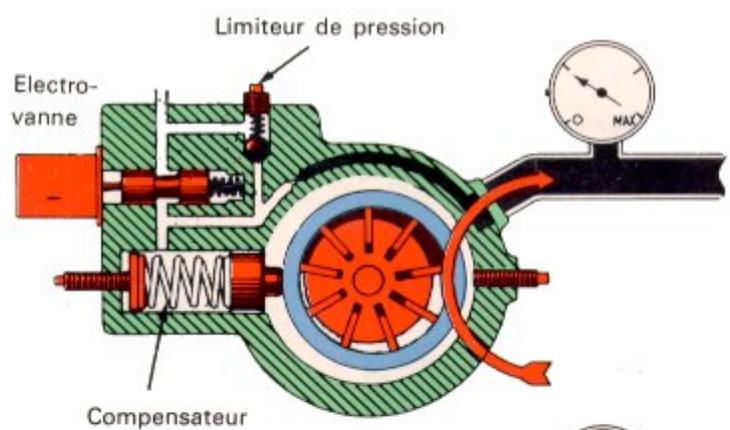
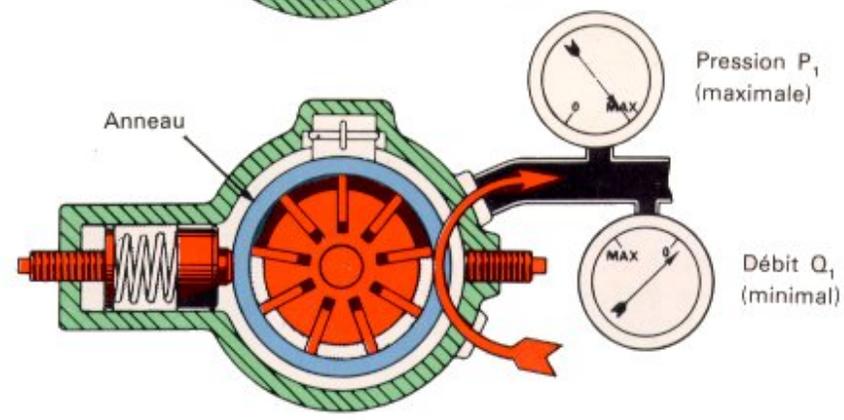
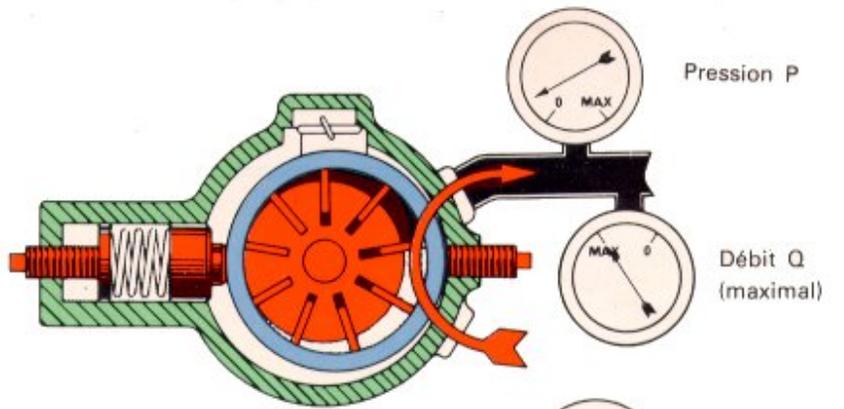
L'étanchéité des chambres d'admission et de refoulement est réalisée par des joints toriques. En permanence, l'huile provenant des fuites chemine le long de l'arbre d'entraînement jusqu'au roulement et revient vers l'admission par un perçage aménagé dans le corps. Le joint à lèvres à ressort du roulement à billes et le joint torique logé dans la gorge de la bague extérieure évitent la sortie de l'huile.

Choix des ajustements

Repère 1 : arbre **k5** Logement **J6**

Repère 2 : arbre **k5** Logement **K6**





3.5. Autres transmissions

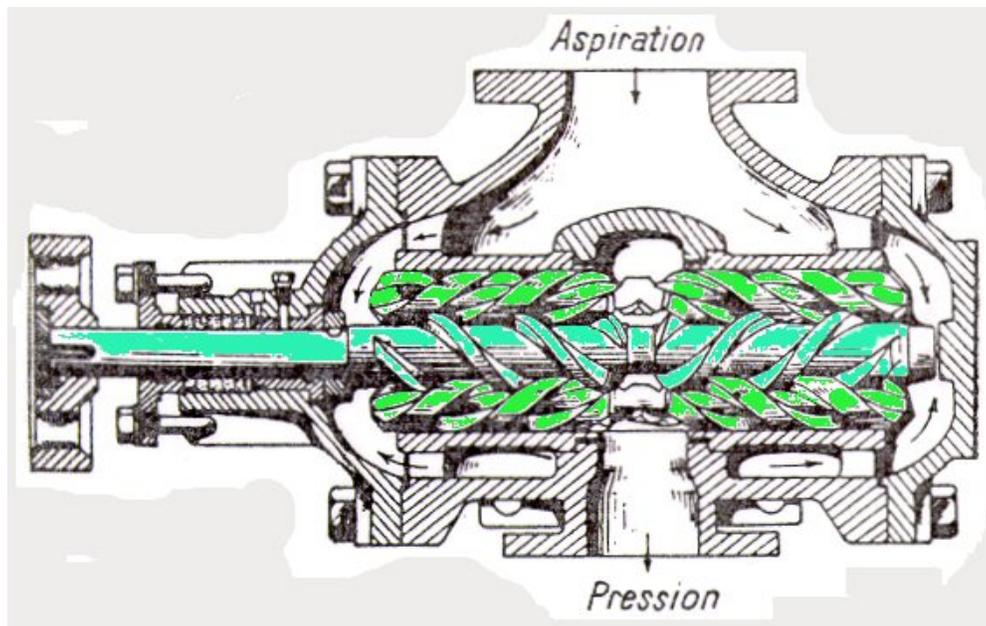
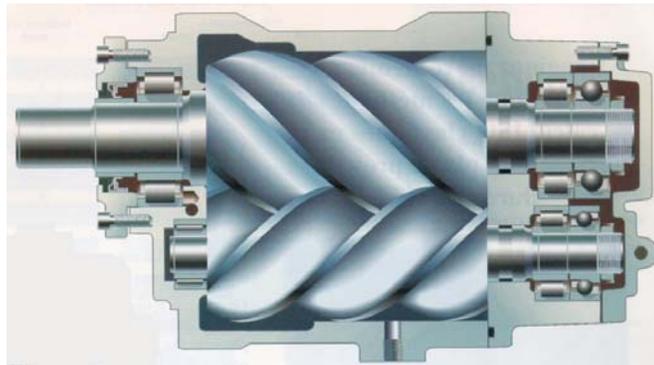
3.5.1. Transmissions à vis



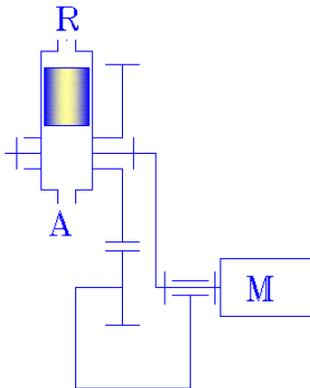
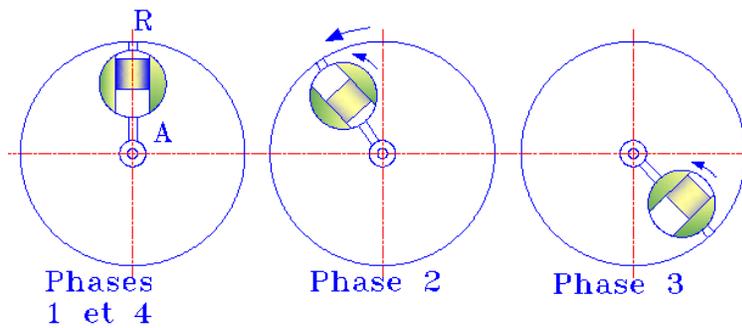
L'huile aspirée remplit les filets de vis à pas contraire. La vis centrale, entraînant en rotation les autres vis, permet le déplacement de l'huile emprisonnée vers le refoulement.

Les profils des filets sont conjugués et l'engrènement de ceux-ci n'entraînent pas nécessairement la rotation : des roues dentées sont prévues pour cela. Cette pompe est très silencieuse.

Les pressions obtenues sont élevées : 60 à 180 bars.
Le rendement est très élevé (0,9 environ)



3.5.2. Transmissions à pistons libres



Le corps de **pompe** est entraîné en rotation autour de son axe par un moteur.

Le piston coulisse librement dans le satellite. Sous l'action de l'effet d'inertie centrifuge, le piston crée une aspiration du fluide hydraulique dans le conduit A, mais aussi une poussée devant lui.

Le satellite, solidaire d'un pignon, engrène avec un planétaire fixe et possède ainsi 2 degrés de liberté en rotation.

3.5.3. Transmissions à membrane

La **pompe** à double membrane est entraînée par un motoréducteur et sert à déplacer des liquides toxiques et corrosifs.

Un excentrique, en combinaison avec un poussoir, met en action une première membrane.

Au travers d'un liquide tampon, le mouvement est communiqué à la seconde membrane qui est en contact avec le liquide à transporter.

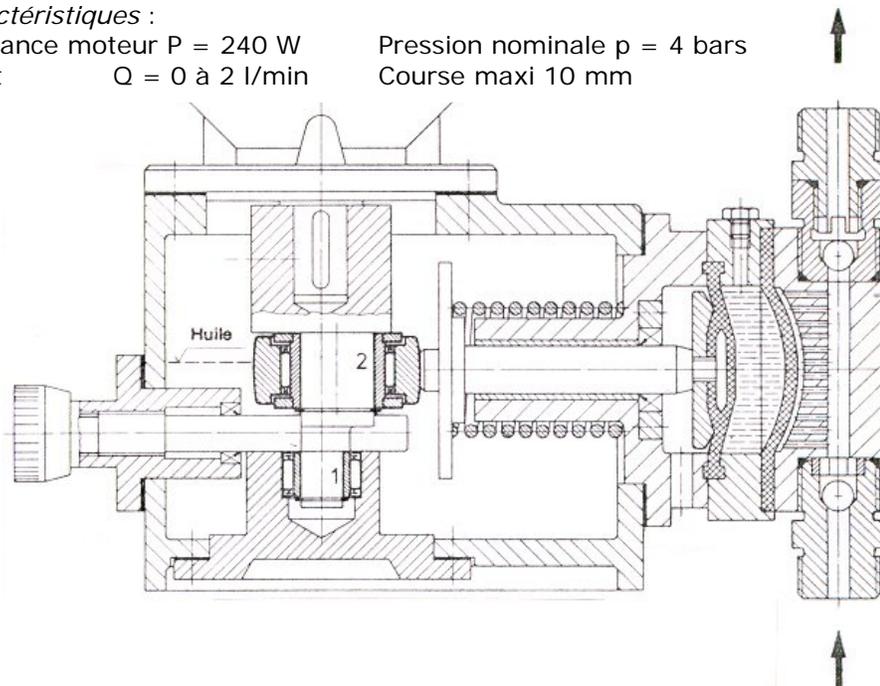
Caractéristiques :

Puissance moteur $P = 240 \text{ W}$

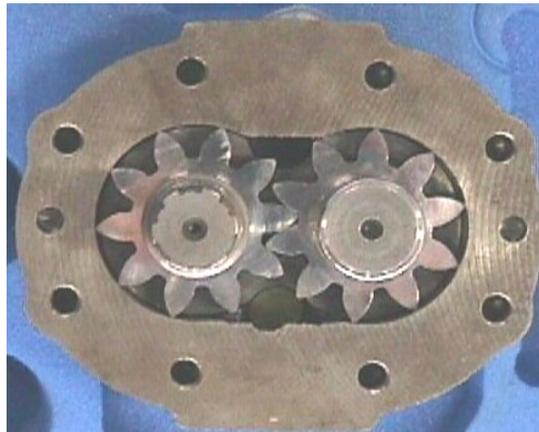
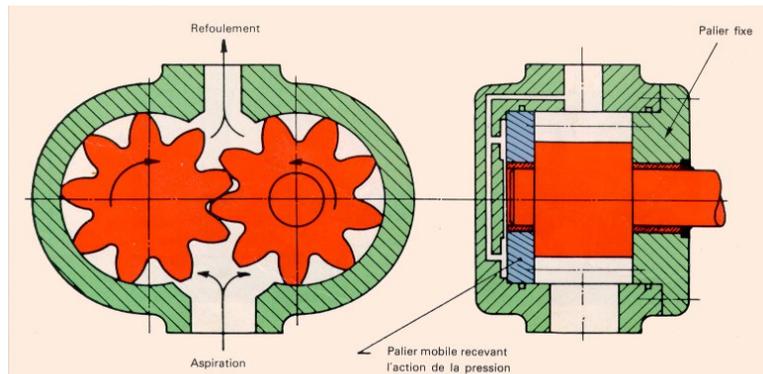
Pression nominale $p = 4 \text{ bars}$

Débit $Q = 0 \text{ à } 2 \text{ l/min}$

Course maxi 10 mm



3.5.4. Transmissions à engrenages



Dans l'exemple précédent, un pignon moteur entraîne un autre pignon. L'espace libre entre les dents se remplit d'huile qui se trouve ainsi transportée vers la sortie. A la fin de la rotation, l'huile est évacuée par la dent de l'autre pignon qui expulse l'huile.

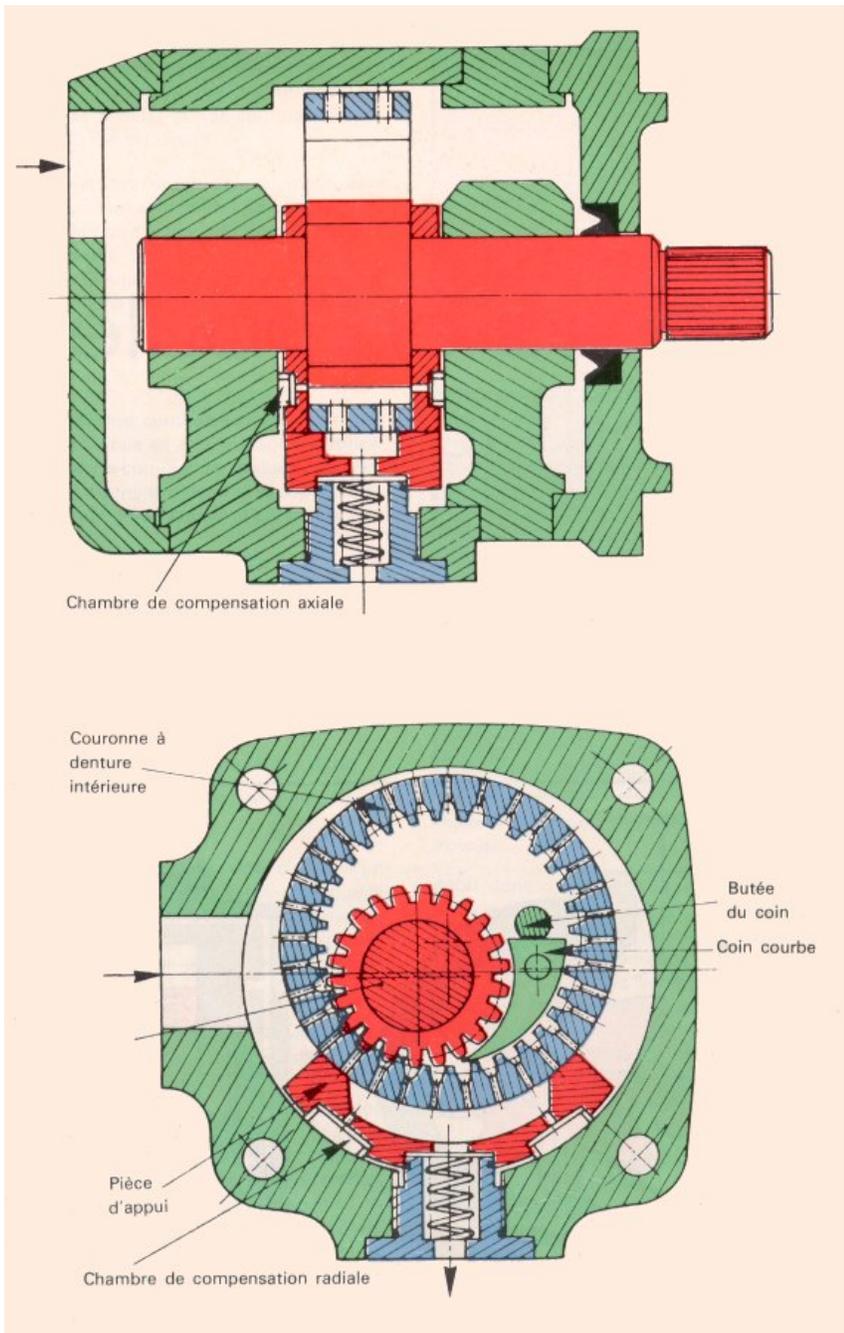
Du fait de la liaison pivot, un léger jeu latéral existe. Pour réduire son influence, un des flasques est mobile axialement tandis que l'autre demeure fixe. Au repos, un ressort maintient le flasque en appui sur le pignon. En fonctionnement, la pression de refoulement est exercée sur le flasque mobile, ce qui crée un effort proportionnel à cette pression : *compensation hydrostatique* ; ce qui permet de réduire les fuites internes et de fonctionner à des pressions plus élevées.

Caractéristiques :

Pompe non compensée	Pompe compensée
$P_{max} = 70 \text{ à } 80 \text{ bars}$	$P_{max} = 150 \text{ à } 250 \text{ bars}$
$N = 2000 \text{ à } 3000 \text{ t/min}$	$N = 3000 \text{ à } 6000 \text{ t/min}$
$\eta = 0,6 \text{ à } 0,75$	$\eta = 0,7 \text{ à } 0,85$

Dans l'exemple suivant, les engrenages sont *internes* : une couronne dentée est entraînée en rotation par un pignon interne et le transport de l'huile est assuré par l'intermédiaire d'un coin en arc.

Les pompes ainsi réalisées sont plus silencieuses. Les pressions obtenues peuvent atteindre 300 bars.



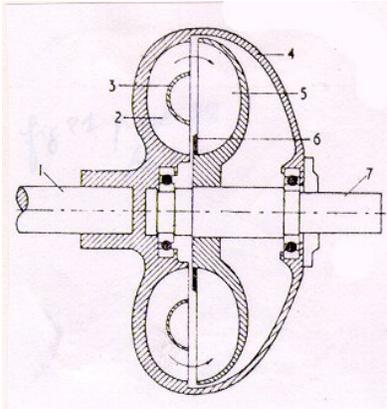
4 – Les transmissions hydrodynamiques

On distingue 3 types :

- les coupleurs.
- les convertisseurs.
- les coupleurs convertisseurs.

4.1. Les coupleurs hydrauliques

4.1.1. Constitution



Il se compose :

- d'une couronne motrice **2** entraînée en rotation par l'arbre d'entrée **1** et sur laquelle est fixé un couvercle faisant office de carter et de réservoir d'huile;

- d'une couronne réceptrice **5** solidaire de l'arbre de sortie **7**. Les 2 couronnes sont des disques évidés munis de palettes radiales dont les intervalles constituent les conduits dans lesquels circulera l'huile très fluide contenue dans le mécanisme. Le nombre de palettes est différent pour chacune d'entre elles afin d'éviter que la couronne réceptrice devienne motrice.

Il peut être prévu une couronne guide **3** pour aider la circulation de l'huile ainsi qu'un déflecteur **6**.

4.1.2. Principe

L'énergie est transmise par la circulation du fluide hydraulique entre les 2 rotors.

L'huile enfermée entre les aubages de la couronne **2** est entraînée en rotation autour de l'axe moteur puis centrifugée.

Elle quitte alors la couronne **2** et expulse l'huile contenue entre les aubages de la couronne **5** vers l'intérieur de la couronne **2**.

Une circulation d'huile est alors établie, qui met les couronnes en liaison hydrodynamique. Par suite, un effort tangentiel est créé, qui produit un couple constamment égal à celui fourni par le moteur.

Il faut toutefois remarquer que l'existence de la circulation d'huile, donc du couple, est due à la présence d'un glissement. En effet, la pression dynamique de l'huile dans la couronne réceptrice **5** s'oppose à celle plus élevée dans la couronne motrice **2**, d'où une différence de vitesse de circulation d'huile.

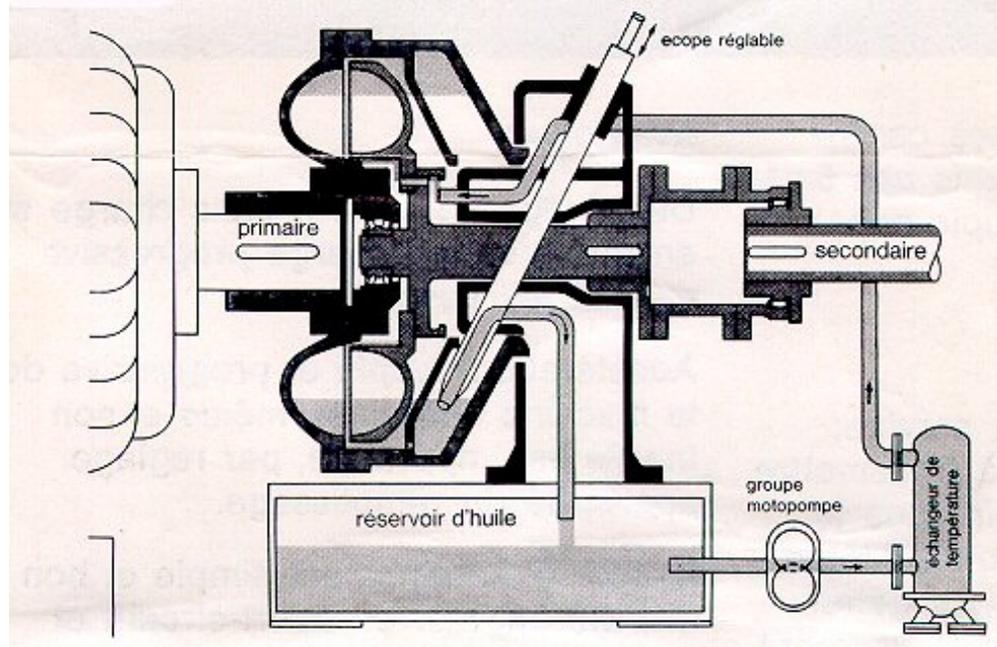
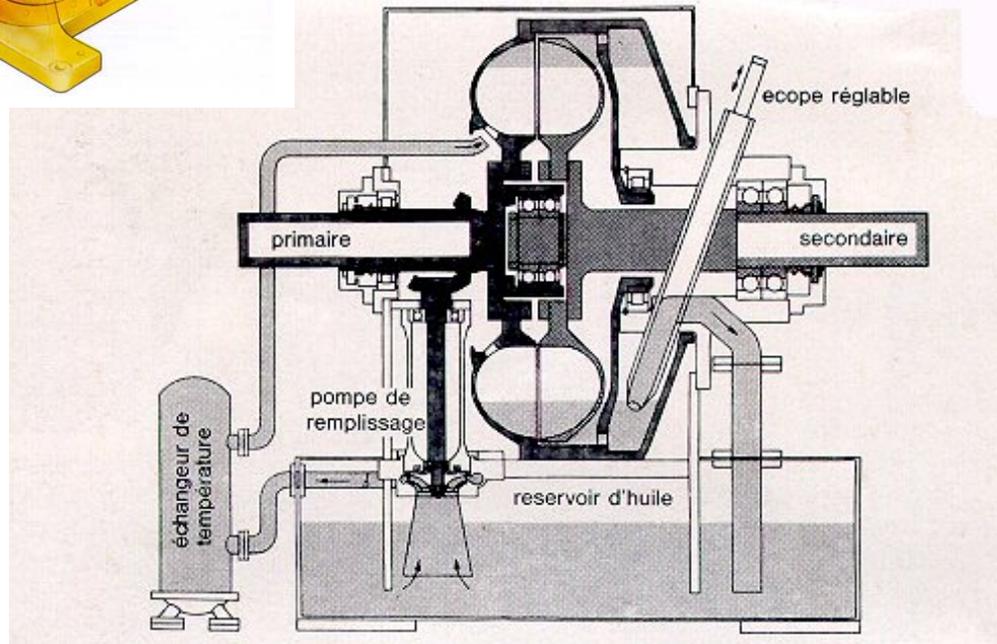
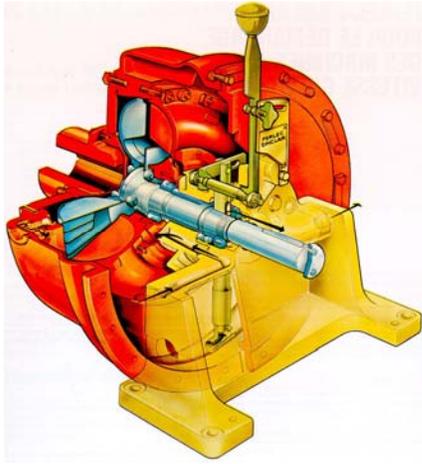
Le rendement s'exprime par le rapport entre la vitesse de sortie et la vitesse d'entrée.

Comme le couple est constant, l'analogie avec les embrayages est immédiate.

4.1.3. Remarque

Il est possible, moyennant une transformation, d'utiliser le coupleur hydraulique comme un variateur en faisant varier le glissement : **coupleur à écope**.

Un tube, ou écope réglable, commandé par un levier plonge dans un anneau d'huile et peut retourner une partie du fluide hydraulique à l'enveloppe interne par un conduit axial.



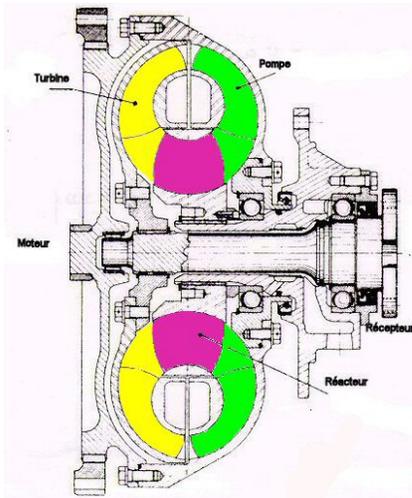
4.2. Les convertisseurs de couple

4.2.1. Remarque

Dans un coupleur hydraulique, la couronne réceptrice en charge subit une perte de vitesse et le moteur réagit aux efforts sur celle-ci par une baisse de régime.

Il est donc nécessaire d'éloigner l'organe moteur de la transmission de l'organe récepteur. C'est ce qu'on a recherché dans le convertisseur en interposant un organe de réaction.

4.2.2. Fonctionnement



Le convertisseur n'est pas fondamentalement différent du coupleur. Néanmoins les aubes des couronnes ne sont pas radiales mais possèdent un profil cambré (voisin du profil d'aile NACA). La cambrure est déterminée pour que le couple à la sortie soit important à vitesse réduite et faible à grande vitesse de sorte que la puissance de sortie soit sensiblement constante.

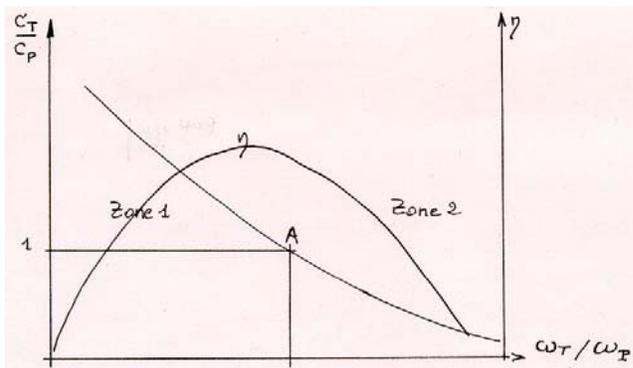
L'interposition d'un organe de réaction fixe, constitué par une couronne d'ailettes radiales inclinées par rapport à l'axe, va permettre de modifier entre la sortie Turbine et l'entrée Pompe, l'intensité et la direction de la vitesse du fluide.

Si la couronne réceptrice est soumise à des charges qui réduisent sa vitesse, alors le flux d'huile jaillira à travers l'organe de réaction qui s'ajoutera à celle exercée par le moteur. Plus les charges seront élevées, plus le jet d'huile sera fort et ainsi la vitesse de la couronne sera maintenue.

Le convertisseur fonctionne donc comme une boîte de vitesses mais fournit en plus, automatiquement, le rapport de réduction exact qu'exige l'entraînement d'une charge variable.

4.3. Les coupleurs-convertisseurs

Dans un convertisseur de couple, l'organe de réaction est fixe; il n'y a donc qu'un seul point où le convertisseur fonctionnera en coupleur.



L'observation des courbes montre

que le rendement $\eta = \frac{C_T \omega_T}{C_P \omega_P}$ passe

par un maximum pour décroître rapidement vers le point où s'annule la courbe du rapport des couples.

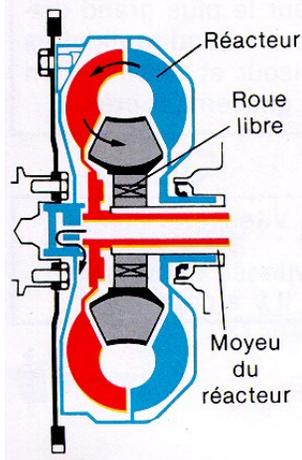
Pour le point A (pt d'accrochage), η est égal au glissement d'un coupleur ω_T / ω_P

A des vitesses supérieures au point A, C_T devient supérieur à C_P , ce qui entraîne une chute rapide du rendement bien que le glissement diminue.

Alors, si dans cette zone, on pouvait substituer un coupleur au convertisseur, 2 avantages seraient tirés.

- transmission intégrale de C_p .
- augmentation du rendement.

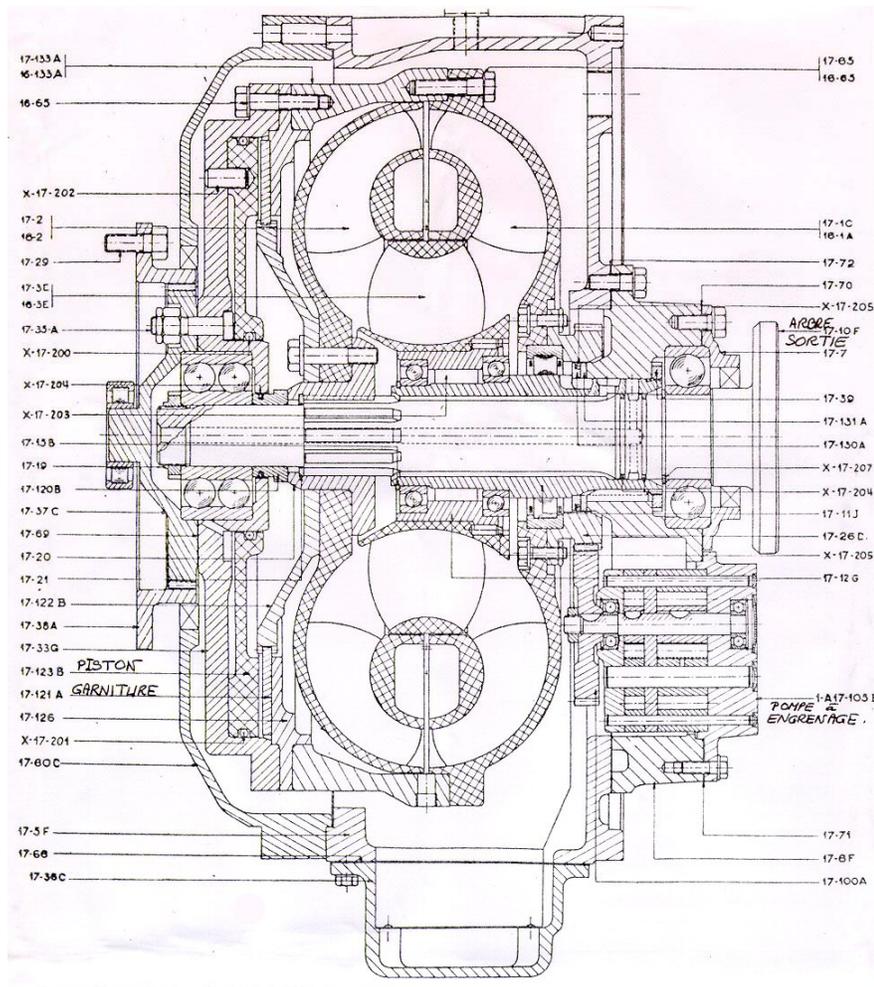
Ces améliorations peuvent être réalisés de la façon suivante :



- soit l'organe de réaction est montée sur une roue libre, ce qui lui permet de tourner dans le même sens que les couronnes, mais l'empêche de tourner en sens inverse.

Ainsi, l'organe de réactions era fixe jusqu'au point d'accrochage $C_T = C_P + C_R$, puis tournera librement à partir de ce point à $C_T = C_R$.

- soit en réalisant automatiquement un accouplement positif à partir du point d'accrochage. (look-up)



L'huile refoulée par la pompe à engrenages passe au travers de l'arbre grâce à un trou axial et agit sur le piston d'embrayage.

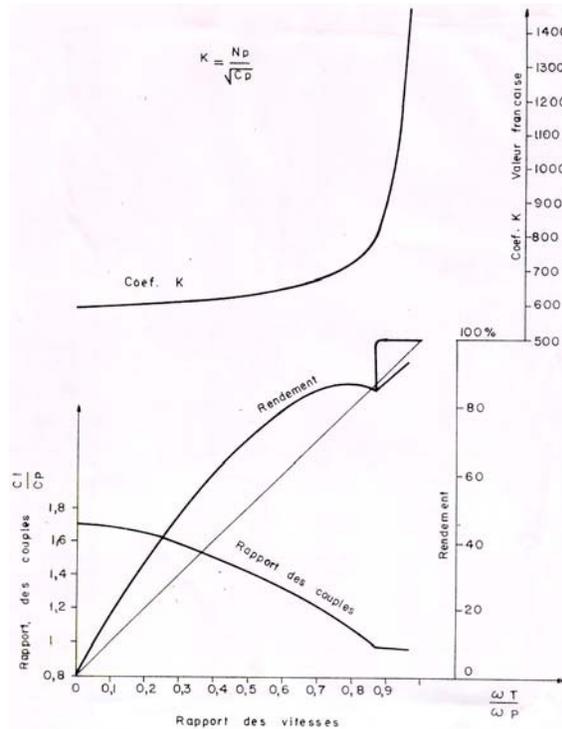
Le piston se déplace et vient appuyer sur la garniture qui se solidarise avec le moteur.

Toute la puissance est alors directement transmise à l'arbre de sortie.

La commande du verrouillage (admission de l'huile derrière le piston) s'effectue manuellement ou automatiquement en fonction de la vitesse d'utilisation.

La pompe à engrenages est à 2 étages :

- alimentation du convertisseur et du dispositif de verrouillage.
- reprise des fuites.



5 – Conception des transmissions hydrostatiques

Les différents facteurs à définir dans un cahier des charges sont :

- nature de la machine à entraîner.
- déroulement du cycle de travail.
- puissance et couple nécessaires en marche AV et AR en fonction de la vitesse de rotation.
- couple au démarrage à partir de la position de repos et surcharges temporaires lors des accélérations et des freinages.
- masses à accélérer ou à freiner ou leurs moments d'inertie par rapport à l'axe.
- temps de réglage lors du parcours complet de la gamme des vitesses de rotation ainsi que les temps d'accélération et de freinage.
- nature du dispositif de réglage (manuel, à distance, réglé)
- conditions de montage.
- nature, fréquence et durée des surcharges.
- conditions particulières de travail.

Les composants se divisent en 2 familles :

- les transformateurs : pompes, moteurs, vérins, ...
- les accessoires : valves, composants mécaniques.

5.1. Les Pompes

5.1.1. Fonctions

La pompe doit :

- transformer une énergie mécanique fournie par un générateur de puissance en énergie hydraulique.
- accepter de tourner à la vitesse des moteurs thermiques et électriques.
- assurer la variation progressive du débit dans les 2 sens pour obtenir la variation de vitesse et l'inversion du sens de marche.
- comporter une commande de variation de débit bien adaptée.
- intégrer le maximum d'accessoires évitant ainsi les raccordements.

Elle est définie par :

- son principe.
- sa cylindrée.
- sa vitesse maximale d'entraînement.
- sa pression maxi de fonctionnement.
- le type et les caractéristiques des accessoires.
- sa géométrie.

5.1.2. Matériaux

Pompes à pistons :

rotor

bronze phosphoreux

fonte (C : 3,2% Mn : 1% P : 0,26% Si : 0,75% Cr : 0,85% Ni : 0,06%)

piston et arbre de distribution : acier au Ni-Cr cémenté trempé.

couronne : 100 Ni Cr6

Pompe à palettes :

palettes : acier rapide

stator : acier au Cr traité (nitruré ou cémenté)

rotor : acier au Cr-Mo traité.

disques latéraux : bronze.

5.1.3. Jeux fonctionnels

Pompes à pistons :

piston-cylindre : $J < 5$ à $8 \mu\text{m}$

ovalisation couronne $< 10 \mu\text{m}$

ovalisation piston cylindre $< 5 \mu\text{m}$

bloc cylindre distributeur : $J < D / 1000$ (coin d'huile)

Pompe à palettes :

rotor disques latéraux : $J < 15$ à $20 \mu\text{m}$ par coté.

5.2. Les Moteurs

5.2.1. Fonctions

Le moteur hydraulique transforme l'énergie hydraulique apportée en énergie mécanique.

A quelques détails près, il s'agit du principe symétrique d'une pompe.

Les critères sont les mêmes que pour la pompe, auxquels il faut rajouter la puissance en continu et en pointe, les capacités de reprise d'efforts extérieurs.

5.2.2. Matériaux

identiques à ceux des pompes.

Bibliographie

Manuel des transmissions hydrauliques (C.C.P.)
Revue Entraînements et Systèmes.
Transmission de Puissance (Lentz)
Transmissions hydrauliques (Manillier)
Hydraulique industrielle appliquée (Diez Usine Nouvelle)
La transmission automatique (ETAI)
Documents Abex Denison.
Documents INA.
Documents Marrel-Hydro.
Documents SIME.
Documents Vickers.
Documents Volvo.