

## **Chapitre 2 :**

# **Pompes, compresseurs et moteurs hydrauliques**

### **(6 semaines)**

- Les pompes : Types, construction et choix des pompes à pistons axiaux, pompes à pistons radiaux, pompes à palettes, pompes à engrenages, pompes à vis.
- Éléments de calcul des pompes.
- Les compresseurs : Types, construction et choix des compresseurs.
- Éléments de calcul des compresseurs.
- Les moteurs hydrauliques : Moteurs à pistons axiaux, moteurs à pistons radiaux, moteurs à engrenages, moteurs à palettes, moteurs lents à came et galets.
- Éléments de calcul des moteurs hydrauliques.
- Les vérins à simple effet, vérin à double effet, vérin à double effet double tige, vérin télescopique, vérin rotatif.
- Calcul des vérins.

a.touahria@centre-univ-mila.dz

## **Chapitre 2 : Pompes, compresseurs et moteurs hydrauliques (6 semaines)**

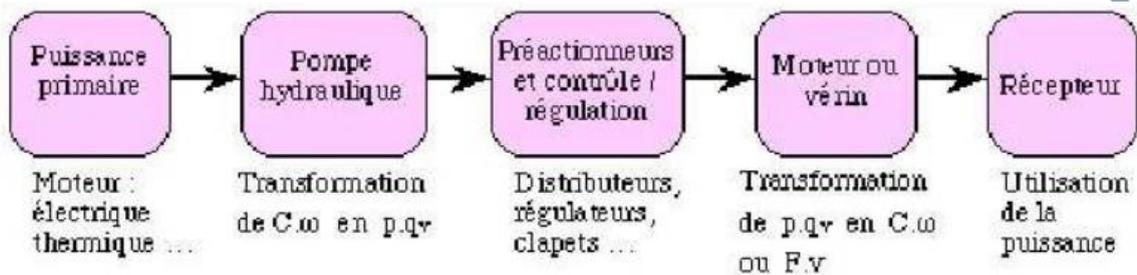
**Chapitre 2 :** Pompes, compresseurs et moteurs hydrauliques

**(6 semaines)**

- Les pompes : Types, construction et choix des pompes à pistons axiaux, pompes à pistons radiaux, pompes à palettes, pompes à engrenages, pompes à vis.
- Éléments de calcul des pompes.
- Les compresseurs : Types, construction et choix des compresseurs.
- Éléments de calcul des compresseurs.
- Les moteurs hydrauliques : Moteurs à pistons axiaux, moteurs à pistons radiaux, moteurs à engrenages, moteurs à palettes, moteurs lents à came et galets.
- Éléments de calcul des moteurs hydrauliques.
- Les vérins à simple effet, vérin à double effet, vérin à double effet double tige, vérin télescopique, vérin rotatif.
- Calcul des vérins.

## 1. Architecture d'un circuit Hydraulique ou Pneumatique:

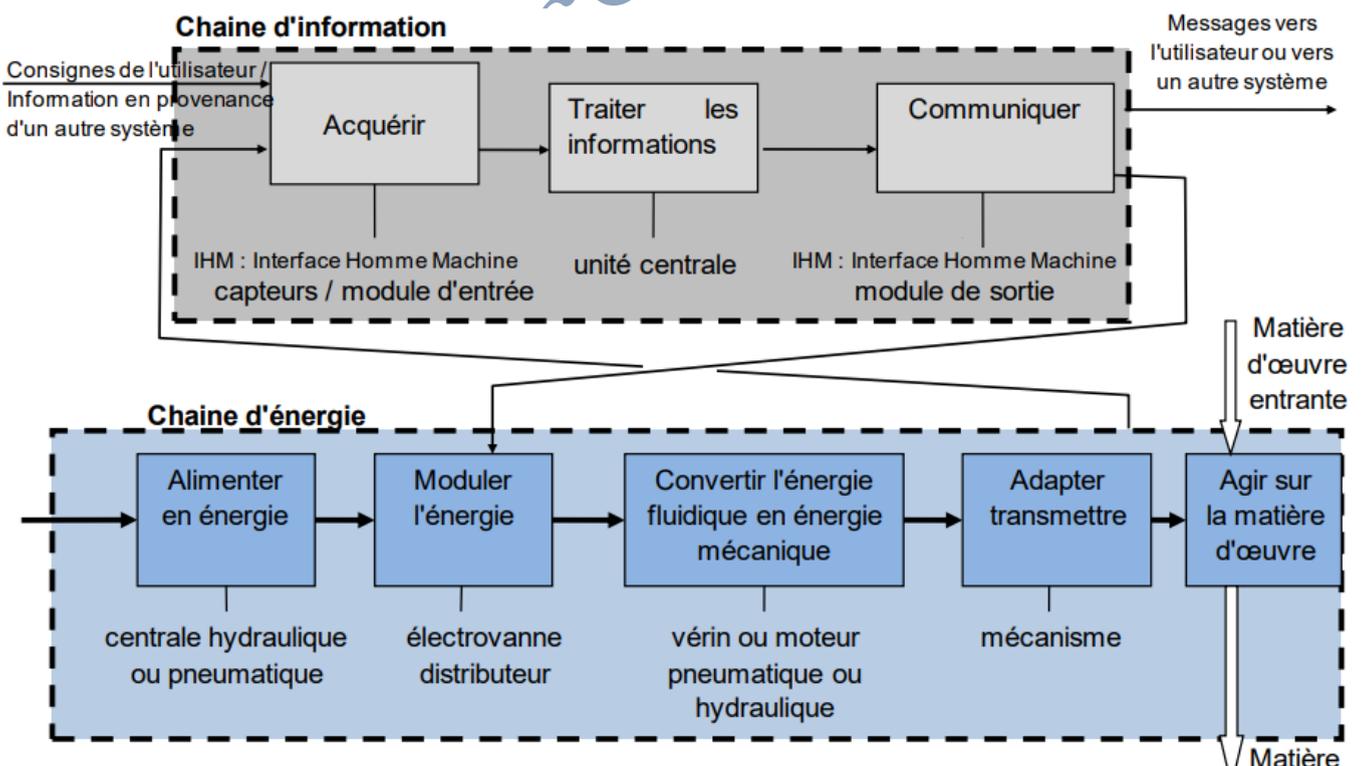
Une transmission de puissance consiste à véhiculer de l'énergie d'une source primaire à un récepteur, en un récepteur, en changeant éventuellement sa "forme" (électrique, mécanique, hydraulique...) et ses caractéristiques (couple, vitesse, intensité...). Dans les transmissions hydrostatiques, l'énergie primaire est mécanique (produite par un moteur électrique, thermique ...) et l'énergie fournie au récepteur est également mécanique. Cette énergie est transportée sous la forme (débit x pression), ce qui explique la grande facilité de contrôle et de régulation que l'on a dans ces transmissions (voir ci a dans ces transmissions (voir ci-dessous).



Il va de soi que chaque transformation provoque une perte énergétique qui diminue le rendement global de la transmission de puissance.

## 2. L'énergie pneumatique et hydraulique dans la chaîne fonctionnelle d'un système

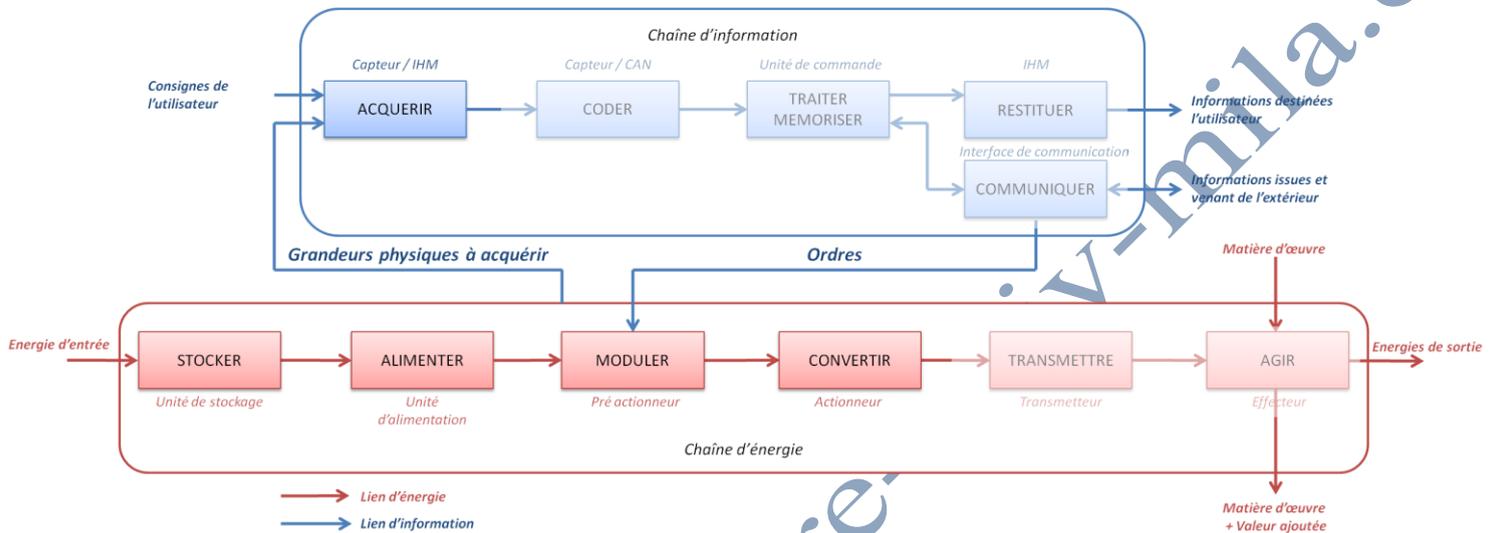
La chaîne d'information utilise généralement de l'énergie électrique.



Chaîne d'énergie pneumatique ou hydraulique et sa chaîne d'information

Dans certains cas typiques (atmosphère explosive notamment), la chaîne d'information peut utiliser une énergie de même nature que la chaîne d'énergie. L'unité centrale est alors constituée d'une logique câblée pneumatique ou hydraulique. La différence essentielle entre les deux chaînes est le niveau des pressions relatives mises en jeu.

On peut trouver aussi la **Chaîne d'énergie pneumatique ou hydraulique et sa chaîne d'information** sous la forme :



### Définitions

✓ **Énergie pneumatique**

Le fluide utilisé est de l'air comprimé.

✓ **Énergie hydraulique**

Le fluide utilisé est une huile hydraulique minérale ou difficilement inflammable (aqueux ou non).

### Comparatif

	Avantage	Inconvénients
<b>Énergie pneumatique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Production : air disponible partout et en quantité illimitée.</li> <li>- Transport aisé dans des conduites bon marché.</li> <li>- Matière d'œuvre propre.</li> <li>- Composants peu coûteux.</li> <li>- Possibilité de vitesses et de cadences élevées.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Source d'énergie exigeant un excellent conditionnement (filtration). Aucune impureté, aucune poussière, etc., ne doit pénétrer dans le système.</li> <li>- Difficulté d'obtenir des vitesses régulières du fait de la compressibilité de l'air.</li> <li>- Forces développées restent relativement faibles (pression d'utilisation de 3 à 10 bars).</li> </ul>

<p style="text-align: center;"><b>Énergie hydraulique</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transmission de forces et de couples élevés.</li> <li>- Une grande souplesse d'utilisation dans de nombreux domaines.</li> <li>- Une très bonne régulation de la vitesse sur les appareils moteurs, du fait de l'incompressibilité du fluide.</li> <li>- Le démarrage en charge des moteurs hydrauliques et des vérins.</li> <li>- Une augmentation de la longévité des composants, contrairement aux systèmes pneumatiques, où il est nécessaire d'utiliser un lubrificateur après la filtration de l'air. Les systèmes hydrauliques, du fait de la présence de l'huile, possèdent un excellent moyen de lubrification.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Risques d'accident dus à l'utilisation de pressions élevées dans les systèmes <math>50 &lt; P &lt; 700</math> bars.</li> <li>- Fuites qui entraînent une diminution du rendement.</li> <li>- Pertes de charge dues à la circulation de l'huile dans les tuyauteries.</li> <li>- Risques d'incendie dus à l'utilisation d'une huile hydraulique minérale inflammable.</li> <li>- Matériel coûteux dont la maintenance est onéreuse du fait du prix de revient élevé des composants, du remplacement de l'huile hydraulique et des filtres.</li> </ul>
---------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Remarque :**

Les principaux inconvénients de l'air sont résultent de ses propriétés physiques :

- ✓ sa compressibilité ;
- ✓ Son échauffement lors de sa compression et son refroidissement en phase de détente ;
- ✓ sa masse volumique variable en fonction de la température. En première approximation, ces paramètres sont liés par l'équation des gaz parfaits :  $p V / T = \text{cte}$  en notant  $p$  la pression du gaz,  $V$  son volume et  $T$  sa température.

**- Stockage et alimentation d'énergie**

Pour obtenir de l'énergie pneumatique, on utilise un compresseur. L'énergie hydraulique est obtenue grâce à des pompes. Des exemples de pompes seront donnés ultérieurement. Les pompes ou les compresseurs sont actionnés par un moteur électrique ou thermique. Dans les systèmes pneumatiques, la circulation d'air se fait généralement en circuit ouvert. Dans le cas des systèmes hydrauliques, le fluide est en circuit fermé. Cela impose des conditions sur les constituants des réseaux.



*Symboles d'une pompe à deux sens de*

*Symboles d'une groupe moteur +*

### - Systèmes de stockage

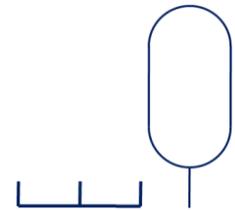
Dans le cas de l'huile, elle peut être stockée à pression atmosphérique dans un réservoir (appelé aussi «bâche») ou dans un réservoir haute pression. Les compresseurs pneumatiques sont souvent reliés à une cuve qui garde l'air sous pression.



*Compresseur 100L – 10 bars [5]*



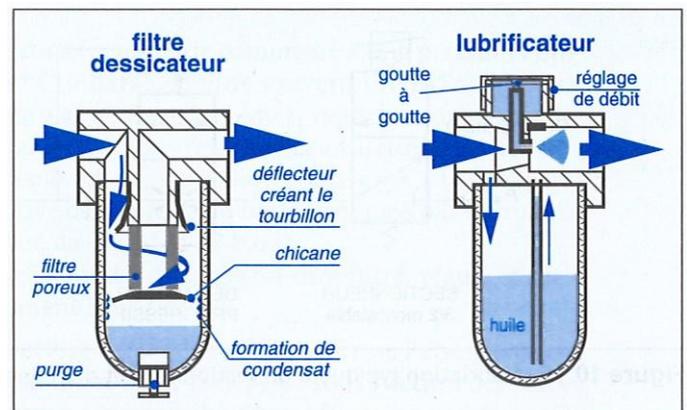
*Réservoir de 50 à 25'000 L [6]*



*Symboles du réservoir et de l'accumulateur*

### - Systèmes de conditionnement

Il est nécessaire de conditionner le fluide avant de la faire circuler dans le circuit. Dans le cas de l'énergie pneumatique, il est indispensable de s'assurer de la pureté de l'air ainsi que d'un faible taux d'humidité. Pour cela on utilise d'une part des filtres permettant de filtrer l'air entrant dans le réseau en amont et en aval du compresseur. Il est aussi nécessaire d'utiliser d'un refroidisseur-assécheur permettant de réduire le taux d'humidité.



Dans le cas d'un système hydraulique, le fluide est filtrée afin d'éliminer les impuretés.



Symboles d'un filtre



Symboles d'un déshydrateur

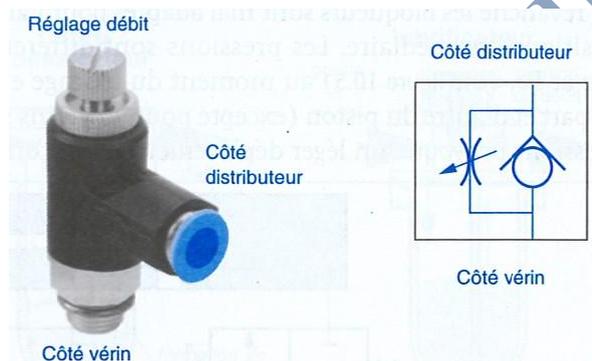


Symboles d'un lubrificateur

**- Systèmes de sécurité**

Afin de maîtriser la pression dans les conduites, on peut avoir recours à des manomètres afin d'avoir une information sur la pression. Les régulateurs de pression permettent quant à eux d'évacuer l'air du système lorsque la pression est trop grande. Les limiteurs de débit permettent de maîtriser le débit de fluide.

Les systèmes de clapet anti-retour permettent d'imposer le sens de circulation d'un fluide.



Régulateur de débit

**Exemples**

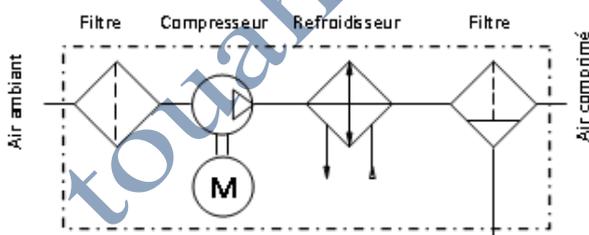
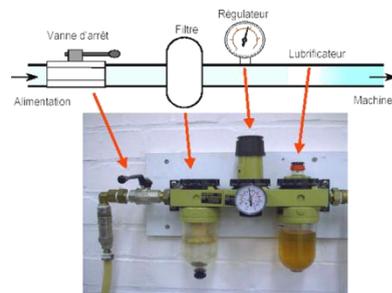
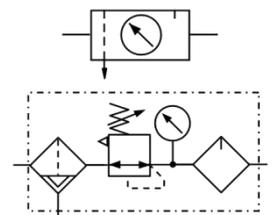


Schéma de compresseur intégré



Unité Filtre – mano-Régulateur – Lubrificateur



### 3. Convertisseurs d'énergie

- Conversion en énergie mécanique de translation

Pour obtenir une **translation** (Fonction "convertir l'énergie pneumatique ou hydraulique en **énergie mécanique linéaire** "), les **vérins** sont les composants privilégiés.

Un **vérin** est un récepteur hydraulique ou pneumatique sert à créer un mouvement de **translation** mécanique grâce à la pression du fluide qui s'applique sur le piston qui coulisse dans le cylindre. Il peut être à simple effet, à double effets, avec amortissement, à double tiges, télescopique etc...



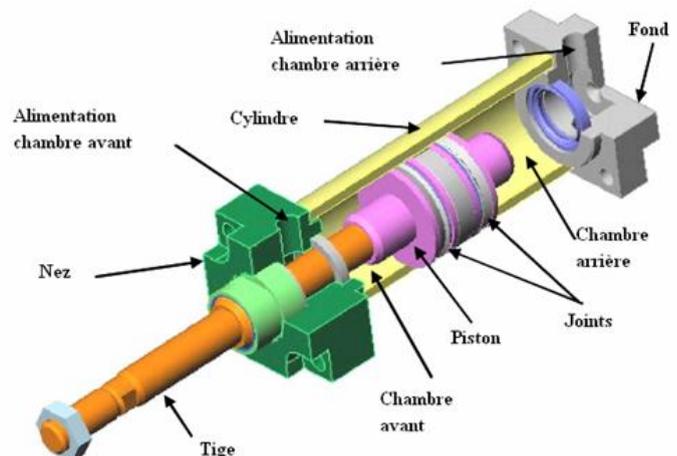
Un **vérin** est un actionneur utilisant de l'énergie pneumatique pour produire une énergie mécanique lors d'un **déplacement linéaire** ou **rotatif** limité à sa course. Le vérin permet de convertir de l'énergie pneumatique (ou hydraulique) en énergie mécanique.

Dans les deux cas le produit des deux valeurs donne une puissance, la puissance  $P.Q$  pneumatique étant convertie en puissance  $F.V$  mécanique. Il est à noter que le rendement de ces actionneurs est mauvais ( $\eta = 0,5$  environ) : une grande partie de l'énergie pneumatique est perdue sous forme d'énergie calorifique et lors de la mise à l'échappement de l'air comprimé. En prenant en compte le rendement du compresseur ( $\eta = 0,4$ ), on obtient un rendement global très faible pour la chaîne d'action pneumatique ( $\eta = 0,2$ ).

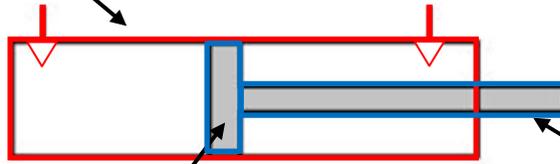
- **Composants principaux d'un vérin :**

Il se compose de :

- \* Corps avec un flasque arrière
- \* Piston avec tige muni de joints toriques
- \* De plusieurs tampons d'amortissent
- \* Bagues de guidage.



**Le corps:** contient le fluide et permet sa circulation dans les 2 sens par des connexions situées de chaque côté du cylindre.



**Le piston:** sépare le volume intérieur du corps en 2 volumes distincts que l'on appelle les chambres (l'étanchéité est assurée par des joints).  
L'entrée du fluide dans l'une ou l'autre des chambres conduit au déplacement du piston.

**La tige du piston:** permet de relier le piston à une pièce extérieure (Parfois pas de tige : transmission magnétique).

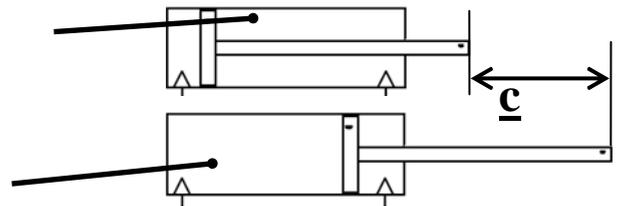
Un vérin est caractérisé principalement par :

- le diamètre  $D$  du piston (en m),
- le diamètre  $d$  de la tige (en m),
- la course  $c$  du piston.



La rentrée du piston est provoquée par l'admission de fluide dans cette chambre (à condition que le fluide situé dans l'autre chambre puisse s'échapper).

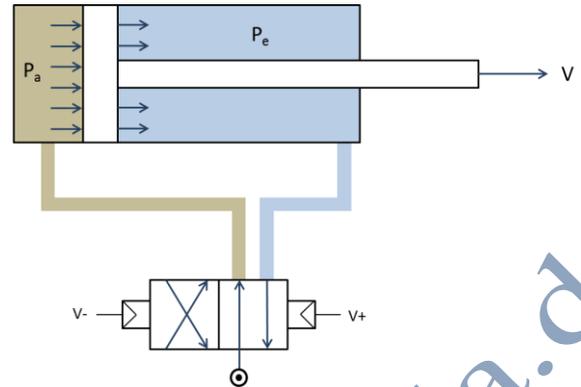
La sortie du piston est provoquée par l'admission de fluide dans cette chambre.



Un vérin est l'élément récepteur de l'énergie dans un circuit hydraulique. Il permet de développer un effort très important avec une vitesse très précise. Leur classification tient compte de la nature du fluide, pneumatique ou hydraulique, et du mode d'action de la tige : simple effet (air comprimé admis sur une seule face du piston), double effet (air comprimé admis sur les deux faces du piston)...

- **Fonctionnement d'un vérin pneumatique**

Considérons le vérin représenté par un distributeur à deux positions. On note  $P_a$ , la pression dans la chambre coté admission,  $P_e$ , la pression dans la chambre coté échappement (parfois appelée "contre pression d'échappement") et  $P_u$ , la pression d'utilisation fournie par le secteur pneumatique.



Au moment précis où le distributeur vient de commuter sous l'action de la commande  $v +$ , la chambre arrière est brusquement reliée à la pression d'utilisation et simultanément la chambre avant est mise à la pression atmosphérique.

Le déplacement de l'ensemble tige et piston s'effectue en trois phases.

**Phase 1 : démarrage, de  $t = 0$  à  $t_1$  :**

La pression  $P_a$  augmente progressivement pendant que la pression  $P_e$  diminue. Pendant cette phase, de courte durée, le piston est immobile.

**Phase 2 : déplacement, de  $t_1$  à  $t_2$**

Dès que la différence des pressions  $P_a$  est suffisante pour vaincre les efforts résistants, le piston se déplace. Pendant cette phase, la pression diminue dans la chambre à l'admission, car le débit d'air ne peut pas compenser l'augmentation du volume de la chambre, et dans la chambre d'échappement pour les raisons inverses. La vitesse du vérin augmente.

**Phase 3 : arrêt, de  $t_2$  à après**

Lorsque le piston arrive en butée avant du vérin il se produit un arrêt brutal, la vitesse chute quasi instantanément. Les pressions s'équilibrent assez rapidement pour atteindre la pression d'utilisation dans la chambre à l'admission et la pression atmosphérique dans la chambre à l'échappement.

- **Système d'amortissement intégré**

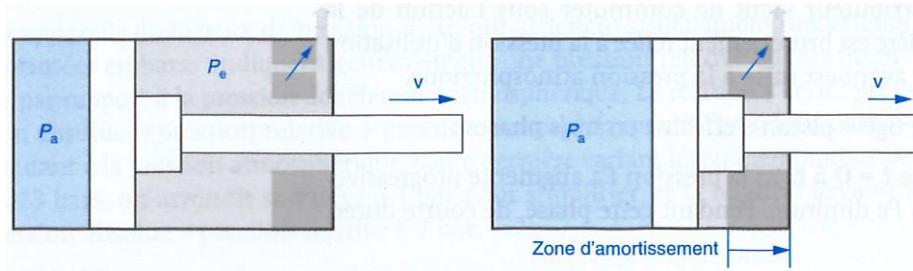
Ce qui précède permet de constater que, dans le cas où le vérin travaille sur la totalité de sa course, **un choc important** a lieu en fin de course. En utilisation l'ensemble des éléments mobile liés à sa tige. Pour ce faire les vérins sont dotés de **dispositifs d'amortissement** de deux types :

Amortissement élastique intégré, il s'agit de bagues élastomères qui ne peuvent absorber qu'une énergie faible ;

Amortissement pneumatique intégré, ces derniers, plus efficaces, sont réglables par vis.

Le principe d'un amortisseur intégré est le suivant : tant que le piston est éloigné de la zone d'amortissement, l'échappement s'effectue normalement. Dès que le piston rentre dans la zone d'amortissement, il vient obturer le cylindre d'échappement : l'air doit alors passer par la restriction

réglable ce qui augmente la contre pression  $P_e$  et diminue la vitesse.



- **Efforts développés par un vérin**

Pour les raisons déjà évoquées de complexité de modélisation du comportement de l'air, les constructeurs ne fournissent pas de courbes caractéristiques de fonctionnement pour ce type d'actionneur, contrairement aux moteurs électriques ou aux vérins hydrauliques. Afin de pouvoir mener des calculs, on introduit les hypothèses simplificatrices suivantes.

- **Effort statique (ou théorique)**

Il correspond à l'effort développé par le vérin en butée. En considérant que la liaison entre cylindre et piston + tige est parfaite, que la pression motrice  $P_a$  est constante et égale à la pression d'utilisation  $P_a = P_u = P$  et que la contre pression d'échappement  $P_e$  est nulle, l'effort statique développé par un vérin est :

$$F_s = P \cdot S_u$$

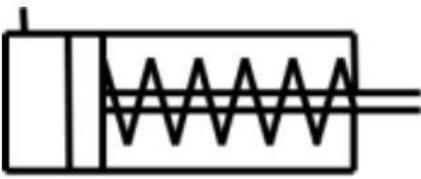
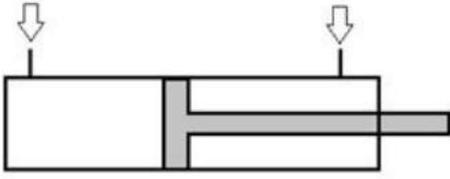
On note  $P$  la pression d'utilisation,  $S_u$ , surface utile du piston. Dans le cas des vérins à tige, l'effort statique en rentrée  $F_{sr}$  est différent de celui en sortie  $F_{ss}$ , les surfaces utiles étant différentes.

En posant  $D$  le diamètre du piston et  $d$  le diamètre de la tige, on obtient :

$$F_{ss} = P \frac{\pi D^2}{4} \quad \text{et} \quad F_{sr} = P \frac{\pi (D^2 - d^2)}{4}$$

## Type des vérins.

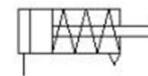
Deux grandes classes de vérins usuelles

Vérin simple effet	Vérin double effet
	
<p>Le retour du vérin en position se fait par le ressort ou la charge.</p> <p><b>Avantage</b> : économique. <b>Inconvénient</b> : encombrant, course réduite. <b>Utilisation</b> : serrage, éjection, levage.</p>	<p>L'ensemble tige piston peut se déplacer dans les 2 sens par l'action du fluide. L'effort est plus faible en tirant (entrée de la tige) qu'en poussant (sortie de tige).</p> <p><b>Avantages</b> : plus souple, réglage simple de la vitesse. <b>Inconvénient</b> : + cher que le vérin simple effet. <b>Utilisation</b> : grand nombre d'applications industrielles.</p>

### 1. Les vérins à simple effet,

Vérins à simple effet (**VSE**) L'ensemble tige-piston se déplace dans un seul sens sous l'action du fluide sous pression. Le retour est effectué par un autre moyen que l'air comprimé : ressort, charge, ... Pendant le retour, l'orifice d'admission de l'air comprimé est mis à l'échappement.

Alors, ce vérin ne peut développer un effort que dans un seul sens. La course de rentrée s'effectue grâce à un ressort de rappel incorporé entre le piston et le flasque avant. Il ne possède qu'une seule entrée d'air.

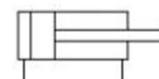
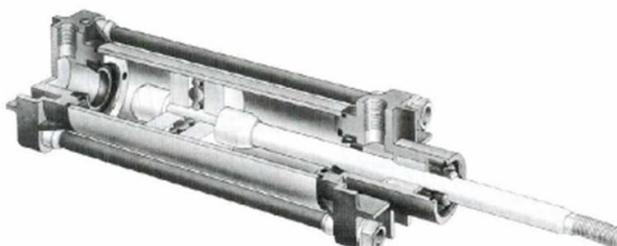


Symbole

### 2 vérin à double effet,

Vérins à double effet (**VDE**) L'ensemble tige-piston peut se déplacer dans les deux sens sous l'action du fluide sous pression. L'effort en poussant (sortie de la tige) est légèrement plus grand que l'effort en tirant (entrée de la tige) car la pression n'agit pas sur la partie de surface occupée par la tige.

Ce type de vérin peut fournir un travail en tirant et en poussant.

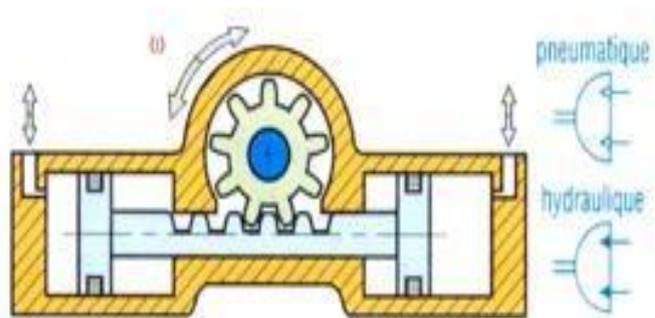
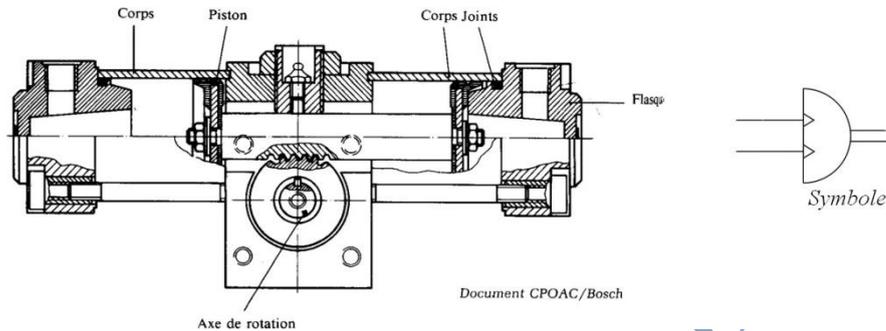


Symbole

### 3 vérin rotatif.

Vérins rotatifs (**VR**) L'ensemble de piston-tige sous forme de crémaillère peut se déplacer dans les 2 sens entraînant un engrenage dans son déplacement, Pendant le retour du piston vers un sens, l'autre orifice est mis à l'échappement. Il doit être toujours muni d'un distributeur.

Le mouvement de translation d'un ensemble tige / piston est transformé en rotation.



Du même les Vérins à **double effet double tige** et les Vérins **télescopique** (Voir figure)

## Éléments de calcul des vérins.

### Caractérisation des flux d'énergie entrant et sortant

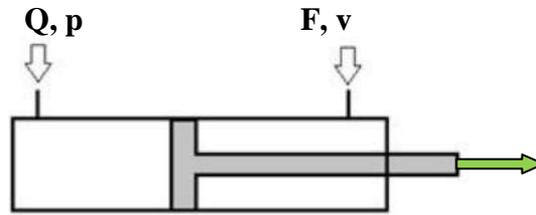
#### Puissance pneumatique ou hydraulique à l'admission du vérin :

$$P_e = Q \cdot p$$

$P_e$  en W

$Q$  (en  $m^3s^{-1}$ ) : débit de fluide entrant

$p$  (en Pa): pression du fluide à l'admission



#### Puissance mécanique de translation

Disponible sur la tige du vérin :  $P_s$  en W

$$P_s = F \cdot V$$

$F$  (en N): force disponible tige-corps

$V$  (en m/s): vitesse de la tige / corps

La puissance est toujours un produit entre une grandeur flux et une grandeur effort. Où  $p$  et  $F$  sont des grandeurs d'effort.  $Q$  et  $V$  sont des grandeurs de flux.

### Loi entrée – sortie

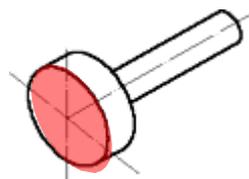
La **surface projetée  $S$  du piston** est au centre des lois entrée/sortie d'un vérin. La surface projetée est la surface du piston en contact avec le fluide projetée dans la direction de déplacement du vérin :

- **en poussant** (la tige du piston sort du vérin), la surface coté air comprimé vaut

$$S = \pi \cdot \frac{D^2}{4}$$

$S$  (en  $m^2$ ): surface projetée du piston,

$D$  (en m): diamètre du piston



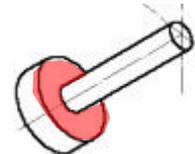
- **en tirant** (la tige du piston rentre dans le vérin) la surface coté air comprimé vaut

$$S = \pi \cdot \frac{D^2}{4} - \pi \cdot \frac{d^2}{4}$$

$S$  (en  $m^2$ ): surface projetée du piston,

$D$  (en m): diamètre du piston,

$d$  (en m) : diamètre de la tige.



## Relation "cinématique"

### Hypothèses :

- le fluide est considéré comme incompressible et sans fuite au niveau des joints.

$$Q = V \cdot S$$

Q (en  $m^3 \cdot s^{-1}$ ) : débit entrant ou sortant de la chambre considérée du vérin

V (en  $m \cdot s^{-1}$ ) : vitesse linéaire du déplacement piston / corps

S (en  $m^2$ ) : surface projetée selon la direction de déplacement piston / corps

## Relation "statique"

### Hypothèses:

- en régime permanent : lorsque le piston est à l'arrêt ou se déplace à vitesse constante.

$$F = (p \cdot S - Fr)$$

F (en N) : force exercée entre la tige et le corps,

p (en Pa) : pression à l'admission,

Fr (en N) : force résistante interne au vérin.

Vérin simple effet :  $Fr =$  force du ressort de rappel (+ frottement)

Vérin double effet :  $Fr = p_r \cdot S_r$  (+ frottement)

$p_r$  (en Pa) : pression au refoulement,

$S_r$  (en  $m^2$ ) : surface projetée du piston en contact avec le fluide refoulé.

## Unités usuelles parfois rencontrées

Force : F en "kg" ( $1 \text{ kg} \rightarrow 10 \text{ N}$ )

Vitesse : V en km/h ( $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 3,6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ )

## Taux de charge

On peut définir un rendement  $\eta$  (appelé aussi le taux de charge), pour quantifier les pertes en régime permanent dues:

- au frottement de la tige et du piston sur le corps,
- à la résistance du fluide au refoulement ou du ressort de rappel (vérin simple effet),
- au passage du fluide d'une chambre à l'autre (négligeable lorsque les joints sont en bon état).

$$\eta = \frac{P_s}{P_e}$$

$\eta$  : rendement ou taux de charge du vérin,

$P_s$  : puissance mécanique disponible au niveau de la tige du vérin,

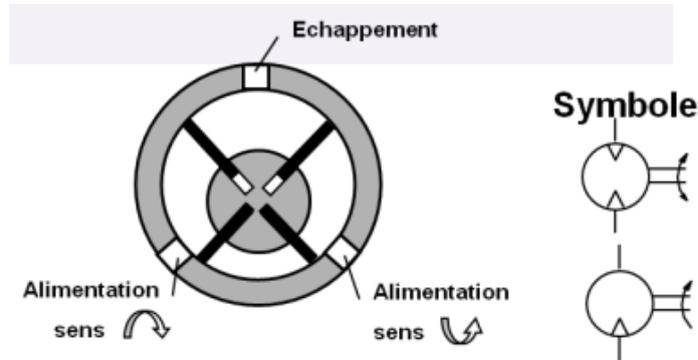
$P_e$  : puissance pneumatique ou hydraulique du fluide à l'admission.

Le taux de charge peut dépendre des pressions et des débits (ordre de grandeur pour un vérin pneumatique  $\eta = 0,6$ ).

- Conversion en énergie mécanique de rotation**

- Moteur pneumatique ou hydraulique**

Si on souhaite une rotation continue, on utilise un moteur.



- Puissances dans un moteur pneumatique ou hydraulique**

Puissance hydraulique ou pneumatique disponible à l'entrée du moteur (en W)

$$P_e = Q \cdot (p - p_r)$$

Q (en  $m^3 \cdot s^{-1}$ ): débit en sortie de pompe  
 p (en Pa): pression du fluide à l'admission  
 $p_r$  (en Pa): Pression du fluide à l'échappement

Puissance mécanique en rotation disponible à la sortie (en W)

$$P_s = C \cdot \omega$$

C (en N.m): couple disponible à l'arbre de sortie  
 $\omega$  (en rad/s): taux de rotation de la pompe



V (en  $m^3/tr$ ): cylindrée (volume déplacé par tour de pompe)

**Moteur**

**Loi entrée – sortie pour un moteur pneumatique ou hydraulique**

**Relation "cinématique"**

**Hypothèse :**

Fluide incompressible, pas de fuite entre les chambres (d'autant moins vrai que les pressions augmentent).

$$Q = \frac{Cyl \cdot \omega}{2 \cdot \pi}$$

**Unité SI :**

Q (en  $m^3 \cdot s^{-1}$ ): débit en sortie de pompe  
 Cyl (en  $m^3 \cdot tr^{-1}$ ): cylindrée (= volume déplacé par tour de pompe)  
 $\omega$  (en  $rad \cdot s^{-1}$ ): taux de rotation de la pompe.

Unité usuelles

$$Q=Cyl.N$$

Q (en  $L. min^{-1} \equiv dm^3. min^{-1}$ ): débit en sortie de pompe

Cyl (en  $L. tr^{-1} \equiv dm^3. tr^{-1}$ ) : cylindrée (= volume déplacé par tour de pompe)

N ( $tr. min^{-1}$ ) : fréquence de rotation de la pompe.

**Exemple :**

Un moteur de moto de cylindrée de  $Cyl = 250cm^3. tr^{-1}$  tournant au taux de rotation  $\omega=1000 rad. s^{-1}$  (environ  $10\ 000 tr. min^{-1}$ ) a besoin d'un débit d'air théorique :

$$Q = \frac{250. (10^{-2})^3 * 1000}{2\pi} = 0,04 m^3. s^{-1}$$

### Relation "statique"

Le lien entre p et C est donné par  
des abaques

a.touahria@centre-univ-mila.dz

a.touahria@centre-univ-mila.dz