

Commande Hydraulique et Pneumatique



Chapitre I.

Rappel : Systèmes hydrauliques et pneumatiques

1- Définition

L'hydraulique industrielle consiste en l'étude de la transmission et la commande de forces et de mouvements par des liquides (essentiellement de l'huile).

2- Domaines d'application

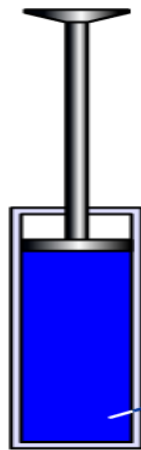
La possibilité de fournir une énergie de forte puissance (réglable avec précision) conduit à rencontrer des applications de l'hydraulique dans un grand nombre de domaines :

- ☐ Aéronautique (train d'atterrissage, dérive, portes...)
- ☐ Marine (gouvernail, grues de pont...)
- ☐ Travaux publics (engins de chantier...)
- ☐ Machinisme agricole,
- ☐ De nombreux autres domaines (automobile, manutention, simulateurs...)

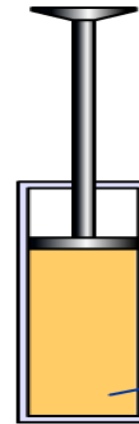


Comparaison: Pneumatique/ Hydraulique

Expérience : actionnez les pistons de ces deux récipients.



Le récipient est uniquement rempli d'air qui occupe tout l'espace.



Le récipient contient de l'huile.
On négligera l'influence de l'air présent entre le piston et l'huile.

Comparaisons

	Pneumatique	Hydraulique
Pression de travail	Basse pression (6 à 8 bars)	Haute pression (plusieurs centaines de bars)
Efforts transmis	Faibles (du fait de la basse pression)	Importants (si la pression est élevée)
Vitesses obtenues	Grandes vitesses mais irrégulières du fait de la compressibilité de l'air.	Vitesses très régulières moins grandes qu'en pneumatique.
Installation	Une unique source d'énergie pour l'ensemble d'une installation (un seul compresseur).	Chaque machine possède son propre groupe hydraulique pour lui fournir l'énergie nécessaire.
Mise en œuvre	Relativement simple (tuyaux souples, raccords rapides...)	Moins simple qu'en pneumatique (gestion de l'étanchéité, du retour à la bâche...)

Avantages de l'hydraulique

Les vérins et moteurs hydrauliques peuvent démarrer en charge, y compris avec des charges élevées.

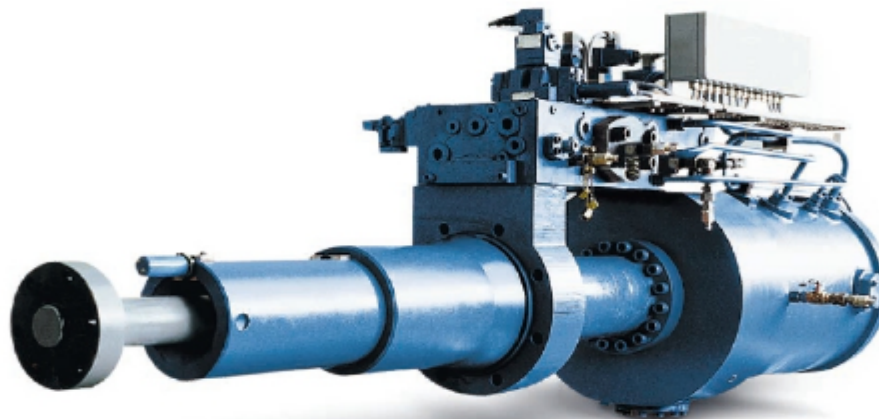
Les actionneurs sont autolubrifiés lors de leur fonctionnement : leur fiabilité est accrue.

Inconvénients de l'hydraulique

Les pressions élevées peuvent être cause d'accidents en cas de fuites.

La longueur ou la complexité du circuit hydraulique provoque des pertes de charges dans l'installation. Le rendement en est alors affecté.

Coûts d'installation et des équipements élevés. Cependant, à service équivalent, l'installation pneumatique sera souvent d'un coût supérieur.

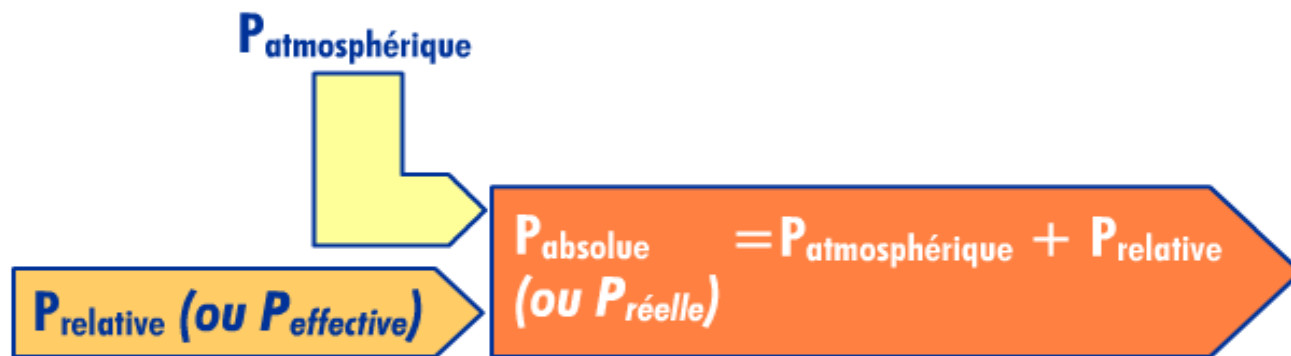


Différentes pressions en présence

Tout corps est soumis à la pression atmosphérique.

Lorsqu'une pression extérieure est exercée sur ce corps, elle vient s'ajouter à la pression atmosphérique.

Le corps est alors soumis à une pression absolue, somme des deux précédentes.



Un fluide dans un récipient exerce sur les parois de ce récipient une **pression hydrostatique**.

Un fluide en mouvement exerce une **pression hydrodynamique**.

En unités SI, les pressions s'expriment en Pascal (Pa).
Cependant, on utilise aussi le bar, unité pratique.

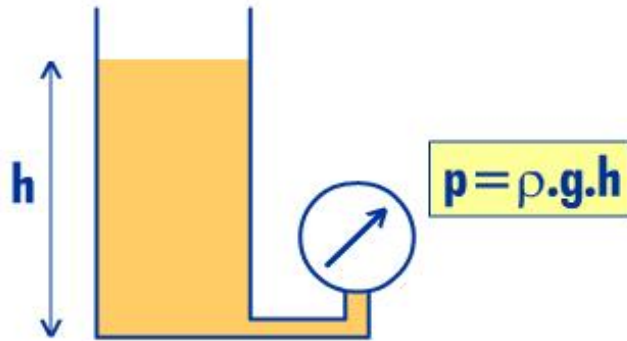
$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

Pression hydrostatique

Définition

Tout liquide, en raison de son poids, exerce sur sa surface de contact, une pression hydrostatique fonction de la hauteur de la colonne de liquide et de sa masse volumique.

C'est cette pression qui s'exerce sur les tympans d'un plongeur sous-marin ou encore sur un barrage hydro-électrique.



La pression hydrostatique exerce une force sur le fond du récipient :

$$F = p \cdot S$$

p : pression hydrostatique (en Pa)

ρ : masse volumique de l'huile (en kg/m^3)
Pour une huile minérale : 880 à 900 kg/m^3

g : accélération due à la pesanteur ($9,81 \text{ m/s}^2$)

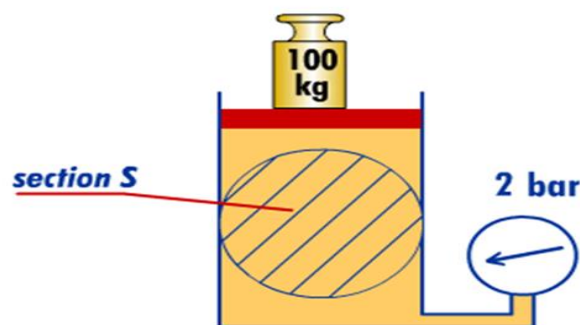
h : hauteur (en m)

	unités SI	unités usuelles
p : pression	Pa	bar
F : force	N	daN
S : surface	m^2	cm^2

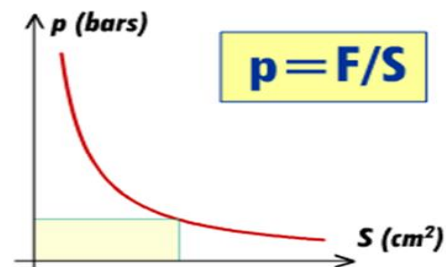
$$1 \text{ bar} = 1 \text{ daN/cm}^2 = 10^5 \text{ Pa}$$

Pression dans les liquides, expérience 1

On imagine un réservoir fermé par un piston de masse négligeable (par rapport à la masse supportée), étanche et de section variable. La charge constante de 100 kg exerce un effort de 98.1 daN.

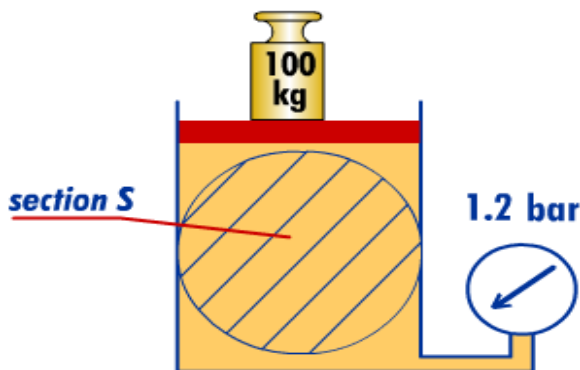


Section $S = 50 \text{ cm}^2$

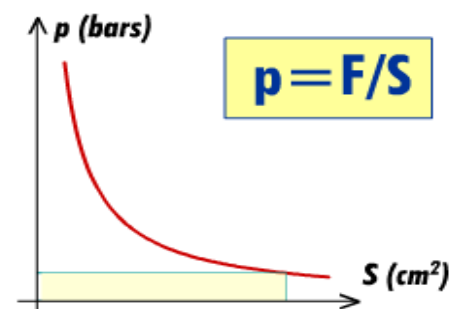


Pour une charge constante, l'huile étant incompressible, la pression dans la cuve augmente quand la surface d'appui du piston diminue.

On constate que la pression varie inversement à la surface d'application de l'effort.



Section $S = 85 \text{ cm}^2$

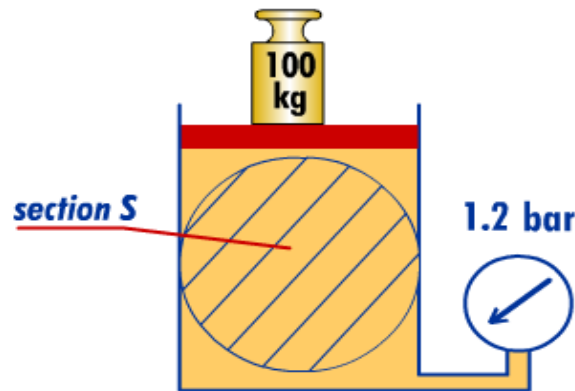


Pour une charge constante, l'huile étant incompressible, la pression dans la cuve augmente quand la surface d'appui du piston diminue.

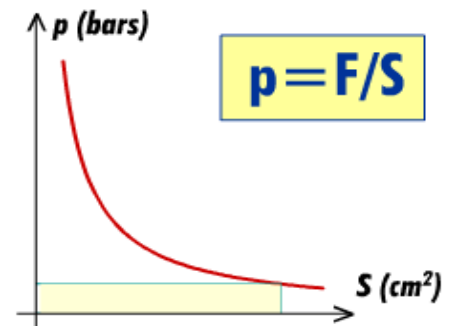
On constate que la pression varie inversement à la surface d'application de l'effort.

Pression dans les liquides, expérience 1

On imagine un réservoir fermé par un piston de masse négligeable (par rapport à la masse supportée), étanche et de section variable. La charge constante de 100 kg exerce un effort de 98.1 daN.

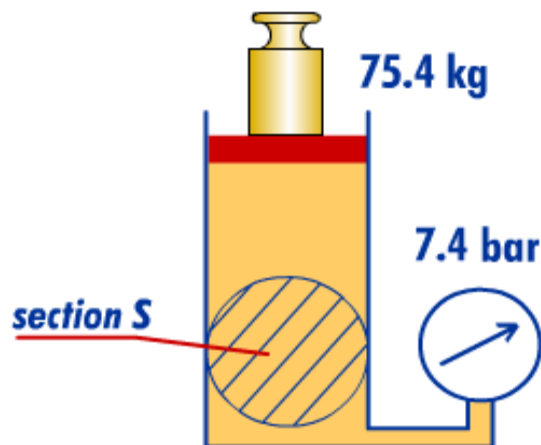


Section $S = 85 \text{ cm}^2$

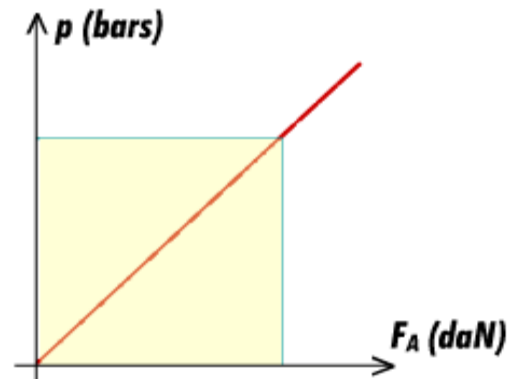


Pour une charge constante, l'huile étant incompressible, la pression dans la cuve augmente quand la surface d'appui du piston diminue.

On constate que la pression varie inversement à la surface d'application de l'effort.



$F_A = 740 \text{ daN}$



Pression hydrodynamique

Définition

La pression hydrodynamique permet de mesurer l'énergie cinétique d'un liquide en mouvement. Elle correspond à une force exercée dans la direction du mouvement du fluide.

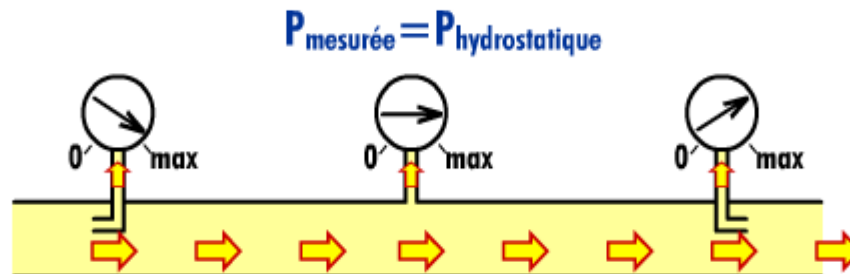
$$P_{\text{hydrodynamique}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$$

$P_{\text{hydrodynamique}}$ en Pa

ρ : masse volumique de l'huile (en kg/m^3)

Pour une huile minérale : 900 à 1100 kg/m^3

v : vitesse d'écoulement du fluide (en m/s)



$$P_{\text{mesurée}} = P_{\text{hydrostatique}} + P_{\text{hydrodynamique}}$$

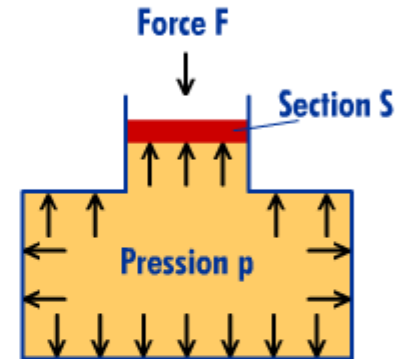
$$P_{\text{mesurée}} = P_{\text{hydrostatique}} - P_{\text{hydrodynamique}}$$

Théorème de Pascal

Enoncé du théorème

Toute variation de pression en un point d'un liquide entraîne la même variation en tous ses points.

Sachant qu'il y a une relation directe entre pression et force, on peut aussi dire qu'une force appliquée sur un liquide en équilibre en modifie la pression qui se transmet intégralement dans toutes les directions à l'intérieur de ce liquide.



$$p = \frac{F}{S}$$

ou bien

p : pression (en Pa)

F : force (en N)

S : surface du fond du récipient (en m²)

p : pression (en bar)

F : force (en daN)

S : surface du fond du récipient (en cm²)

Application

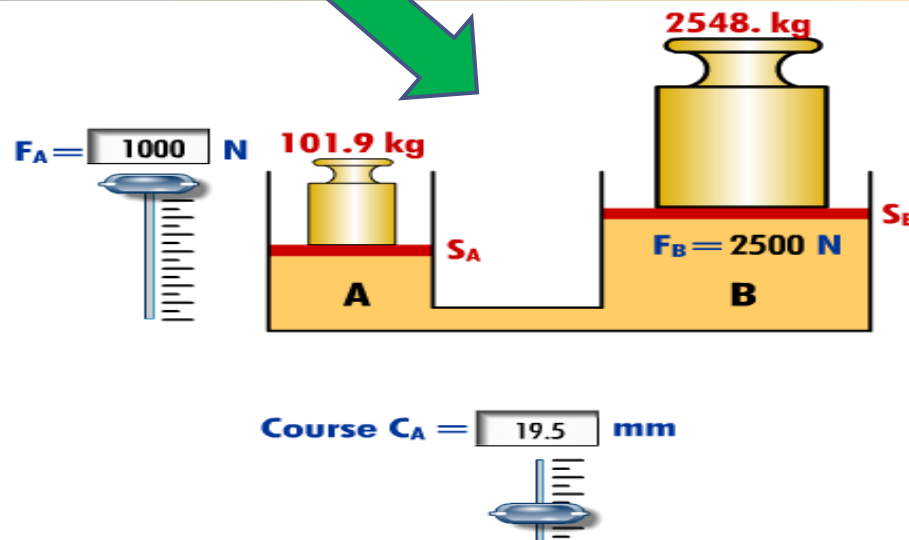
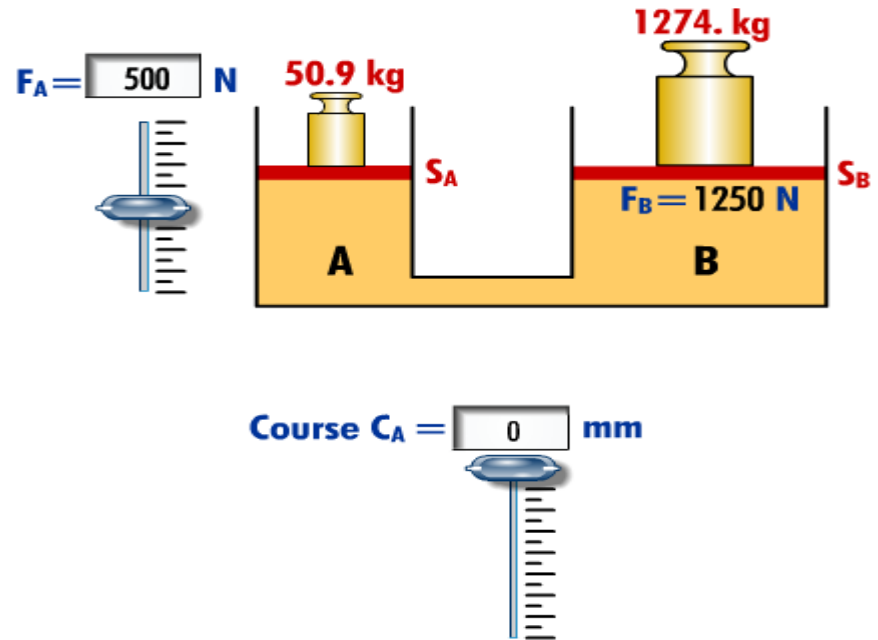
Dans cette installation, le liquide est placé entre deux pistons S_A et S_B .

Le liquide subissant en A une force F_A , la transmet en B en multipliant son intensité par le rapport des surfaces de contact.

$$\frac{F_A}{F_B} = \frac{S_A}{S_B}$$

Si l'application de l'effort en A, avec un effort en B constant, provoque un déplacement du piston d'une course C_A , le piston B se déplacera alors d'une course C_B telle que :

$$\frac{C_B}{C_A} = \frac{F_A}{F_B}$$



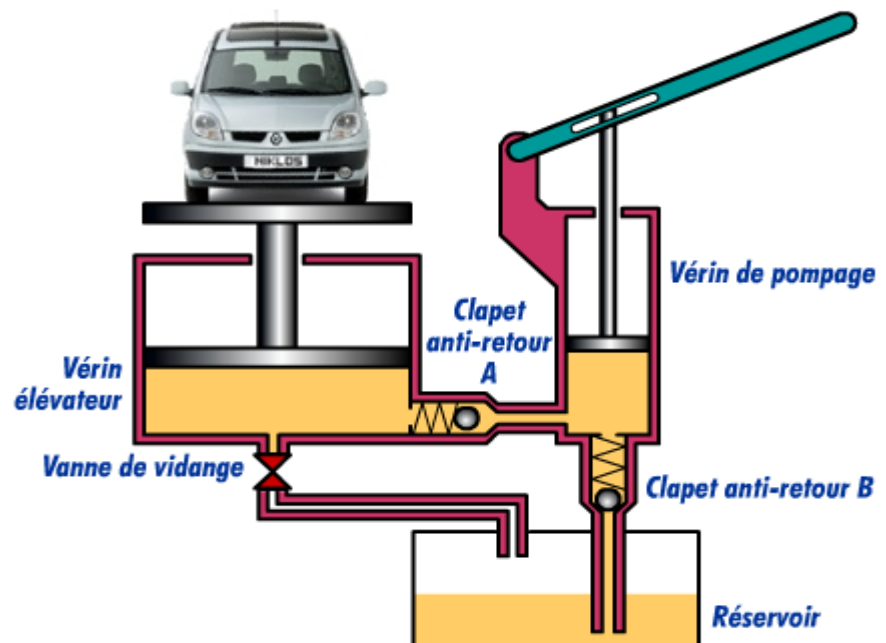
Exemple : élévateur hydraulique

Voilà une application du principe de Pascal dans cet élévateur hydraulique simplifié.

Le vérin élévateur est isolé du vérin de pompage : lorsque ce dernier aspire de l'huile dans le réservoir, le clapet anti-retour A empêche le véhicule de descendre.

Lorsque le vérin de pompage refoule l'huile dans la chambre inférieure du vérin élévateur, le clapet anti-retour B se ferme.

En actionnant la vanne de purge, la chambre inférieure du vérin élévateur se vide et le véhicule redescend.



Vitesse et débit

Définitions

Vitesse : distance parcourue par unité de temps.

Unité légale : m/s

Unité pratique : cm/s ou mm/s

Débit volumique : volume de liquide déplacé par unité de temps dans le circuit.

Unité légale : m³/s

Unité pratique : cm³/s ou l/min

Le débit volumique alimentant un vérin est proportionnel à sa section et sa vitesse : $Q_v = v \cdot S$

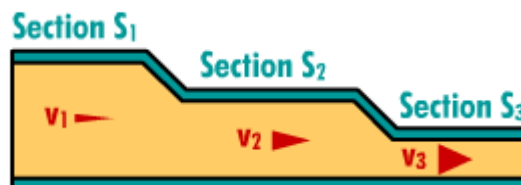
La vitesse du vérin est :

$$v \text{ (cm/s)} = \frac{Q_v \text{ (cm}^3\text{/s)}}{S \text{ (cm}^2\text{)}}$$

$$v \text{ (m/s)} = \frac{Q_v \text{ (l/min)}}{S \text{ (cm}^2\text{)}} \cdot 6$$

Loi de conservation des débits

Lorsqu'un liquide s'écoule dans une conduite dont la section n'est pas uniforme, sa vitesse varie afin d'assurer la conservation d'un débit identique.



$$Q_v = S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 = S_3 \cdot v_3$$

$$\text{Donc } v_3 > v_2 > v_1$$

Frottement

1- Conséquences du frottement

L'écoulement d'un liquide dans une canalisation produit un échauffement en raison du frottement sur les parois.

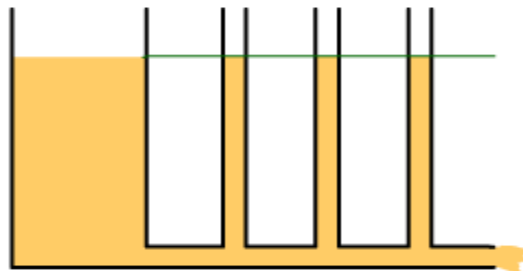
Les principales causes de frottement et donc d'échauffement sont :

- ☐ conduites trop longues,
- ☐ coudes trop nombreux,
- ☐ vitesse d'écoulement du fluide élevée.

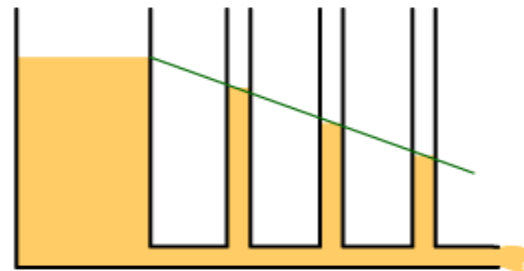
2- Influence sur la pression

L'échauffement causé par le frottement est une perte d'énergie qui produit alors une perte de pression.

L'expérience illustrée ci-dessous montre que les frottements, causés par l'écoulement du fluide dans les canalisations lorsque le réservoir principal se vide, provoquent une chute de la pression visualisée par la baisse de niveau dans les tuyaux successifs.



Fluide parfait et aucun frottement



Situation réelle

Perte de charge

Définition

Les fluides étant visqueux, les **frottements**, lors du déplacement entre deux points d'un circuit, provoquent une perte d'énergie interne, appelée également enthalpie (traduite par un échauffement de la tuyauterie).

Cette perte d'énergie se constate par une chute de pression : la perte de charge Δp .

$$\Delta p = p_{\text{hydrostatique en amont}} - p_{\text{hydrostatique en aval}} = \frac{K \cdot \rho \cdot v^2}{2}$$

avec K = coefficient fonction du type de pertes de charge

ρ = masse volumique du fluide (kg/m^3)

v = vitesse d'écoulement du fluide (m/s)

Pertes de charge régulières (réparties dans les canalisations droites)

$$K = \frac{\lambda \cdot l}{d}$$

avec λ = coefficient de perte de charge (voir page suivante)

l = longueur de la canalisation (m)

d = diamètre de la canalisation (m)



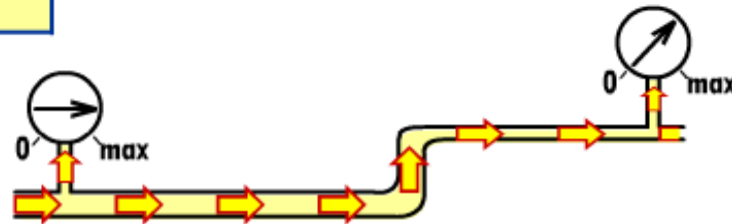
Pertes de charge singulières (localisées au niveau des singularités du circuit)

Dans les coudes des canalisations, les sections variables (restrictions, étranglements...), la détermination des pertes de charge est expérimentale.

Elles obéissent généralement à une loi du type :

$$\Delta p = \frac{K \cdot \rho \cdot v^2}{2}$$

avec K = coefficient lié à la forme des accidents de parcours



Coefficient de perte de charge

Le coefficient de perte de charge est fonction du **régime d'écoulement** :

Si $Re < 2000$ (écoulement laminaire) : $\lambda = 64 / Re$

Si $3000 < Re < 4000$ (écoulement turbulent) : $\lambda = 0,316 / Re^{0,25}$

Si $Re > 4000$: $\lambda = 0,79 \cdot (\Sigma / \rho)^{1/2}$ Σ dépend de la rugosité du tuyau

environ 0,03 mm pour un tube en acier hydraulique

environ 0,25 mm pour un tube en acier

environ 0,4 mm pour un tube en fonte

Groupe hydraulique

Le groupe hydraulique est chargé de fournir à l'installation, en toute sécurité, l'énergie hydraulique nécessaire.

Le mouvement de rotation d'un moteur (électrique ou thermique) et son couple sont transformés en débit par une pompe de refoulement.

Éléments constitutifs

Un groupe hydraulique est constitué de nombreux éléments. Selon l'importance du groupe, certains de ceux présentés ci-dessous peuvent être absents ou au contraire en plusieurs exemplaires (appareils de mesure...)

- ☐ **Moteur** pour entraîner la pompe
- ☐ **Pompe** de refoulement
- ☐ **Réservoir** d'huile, qui recueille aussi l'huile retournée par l'installation.
- ☐ Des **filtres** chargés d'assurer en permanence une qualité optimum de l'huile.
- ☐ Des **instruments de mesure** (niveau d'huile, pression, température...)
- ☐ Des **valves** de sécurité (surpression) et de commande...

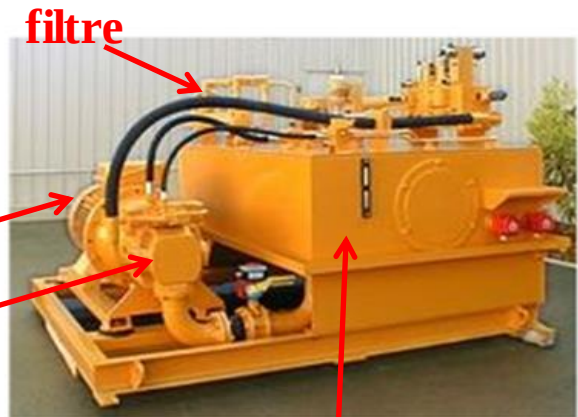
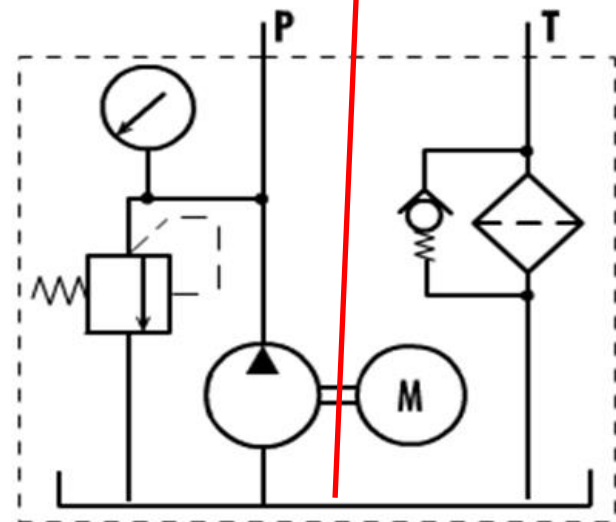
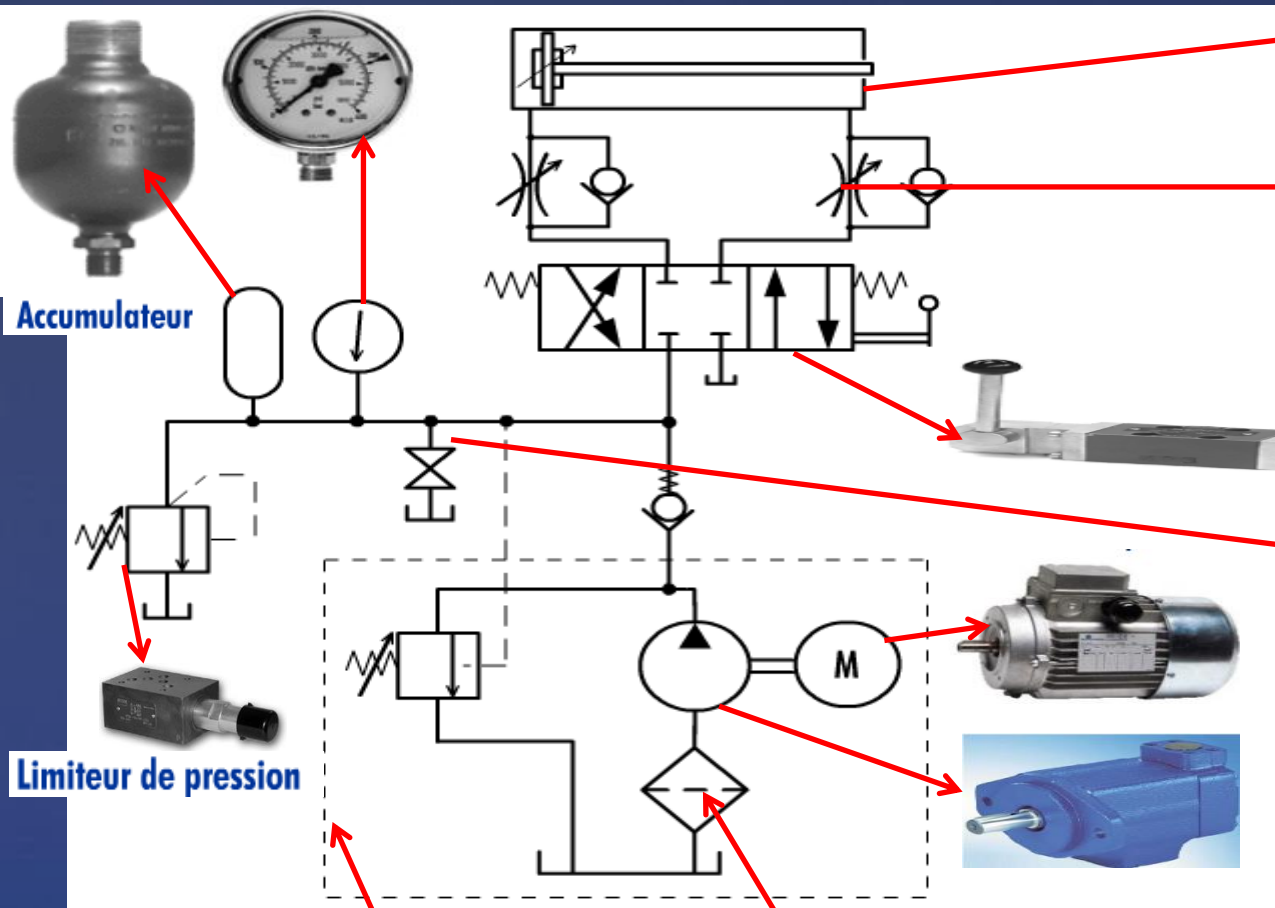


Photo ACHP



Circuit hydraulique de base

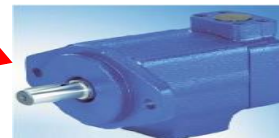


Accumulateur

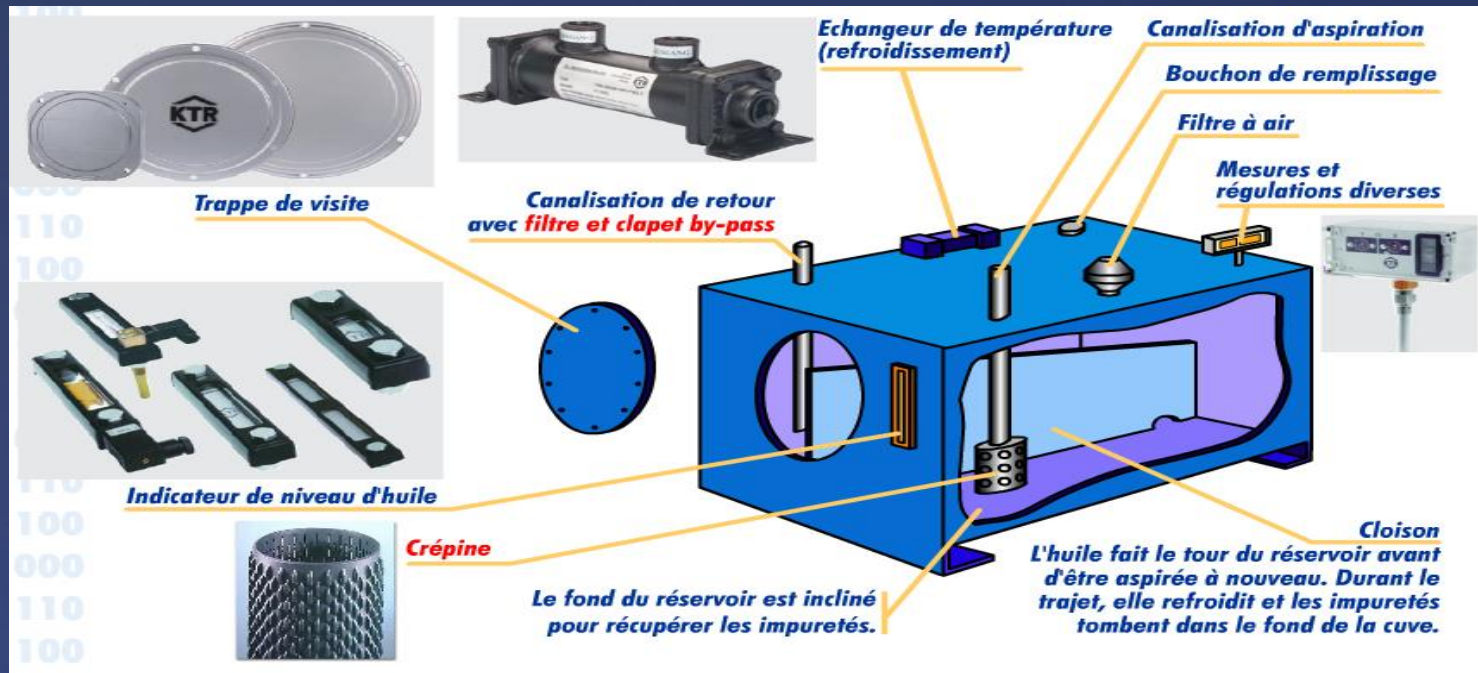
Limiteur de pression

Réducteur de débit

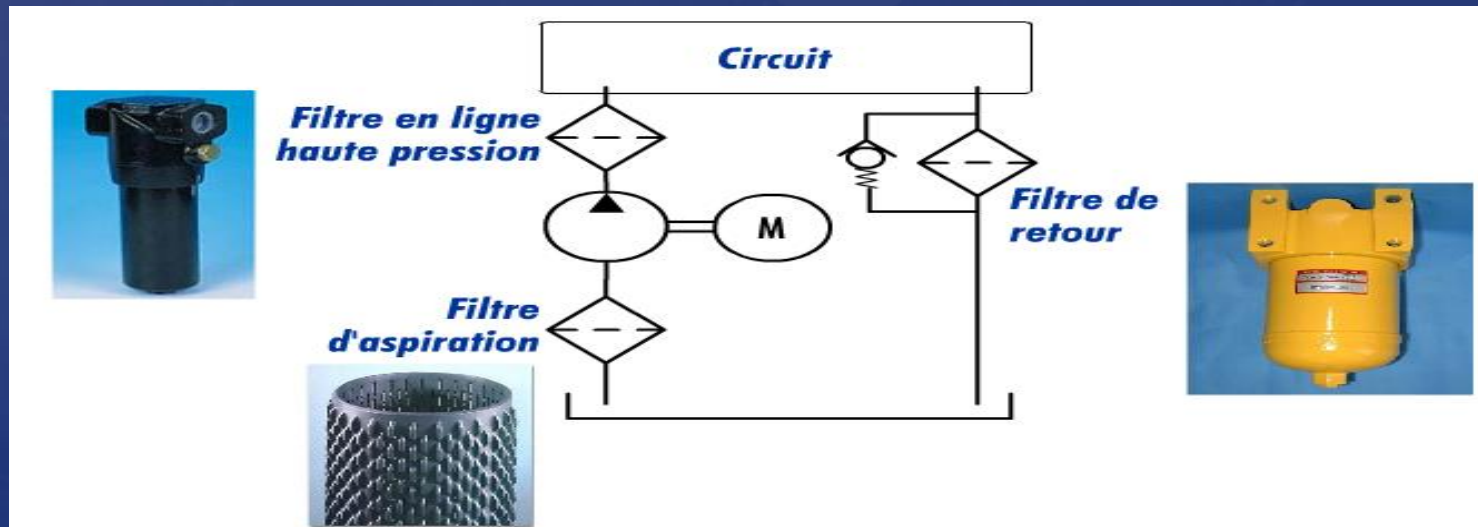
Robinet de décharge de l'accumulateur



Réservoir



Filtres



Clapet de non retour

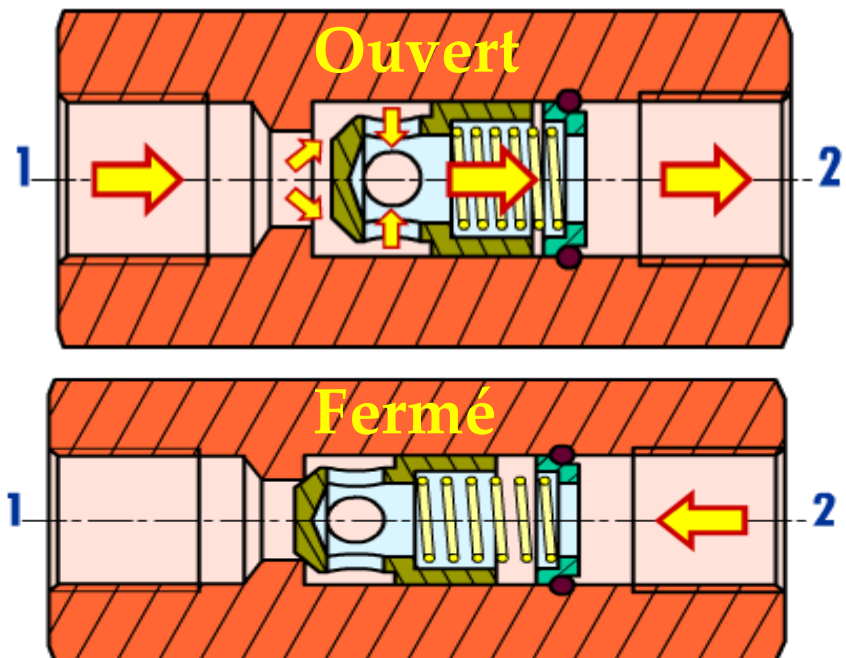
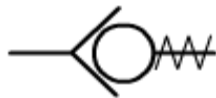
Le clapet de non retour (ou clapet anti-retour) permet de faire circuler le fluide dans un sens et de le bloquer dans l'autre sens.

Au repos, le clapet est plaqué sur son siège par le ressort.

Si la pression du fluide en 1 est suffisante pour vaincre l'effort du ressort, le clapet libère le passage de l'huile.

Si la pression du fluide en 1 baisse ou si le fluide arrive en 2, le clapet se referme sous l'action du ressort ou du fluide et la canalisation est obturée.

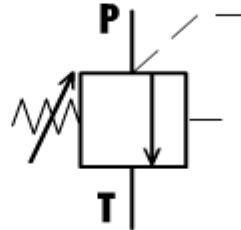
Le seuil de déclenchement est déterminé par le type de ressort utilisé (généralement entre 0,5 et 5 bars).



Limiteur de pression à action directe (faible Q)

Le ressort de tarage permet de maintenir le clapet sur son siège. Tant que la pression (en P) est inférieure à la pression de tarage, le clapet reste en position.

Lorsque la pression augmente et dépasse la valeur de tarage, le clapet est déplacé par le fluide qui peut s'échapper vers le réservoir (orifice T).

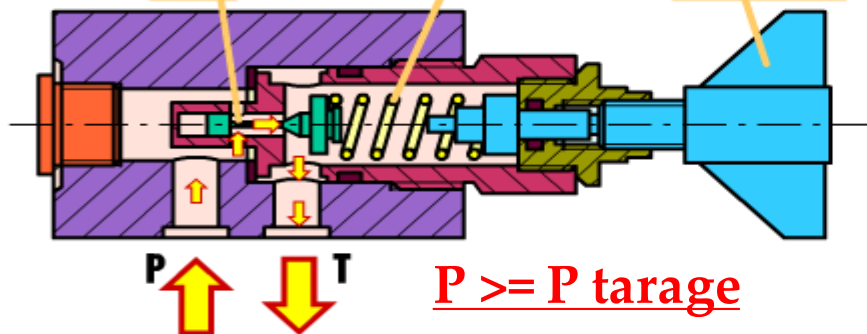


Ouvert

Clapet

Ressort de tarage

Vis de tarage

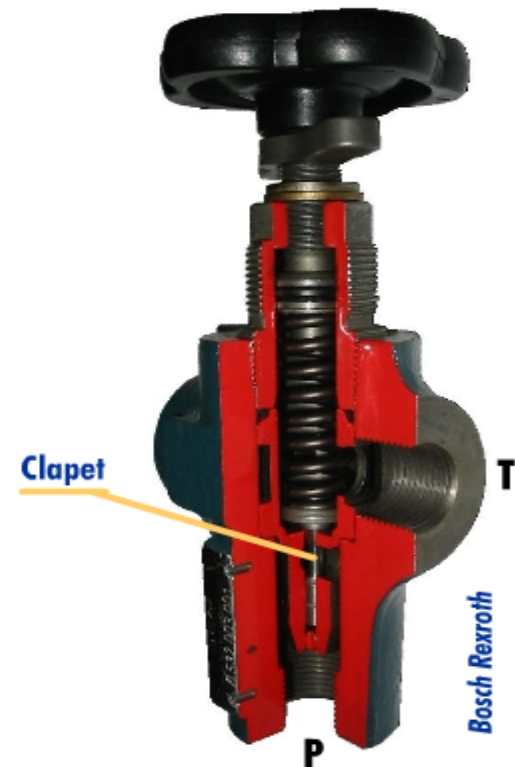
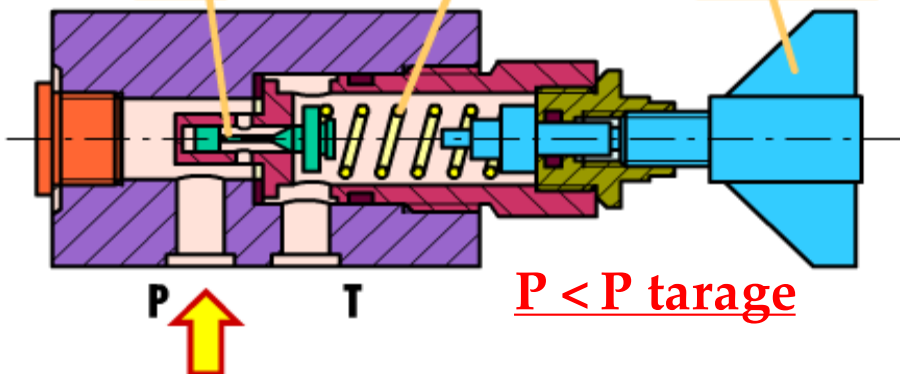


Fermé

Clapet

Ressort de tarage

Vis de tarage

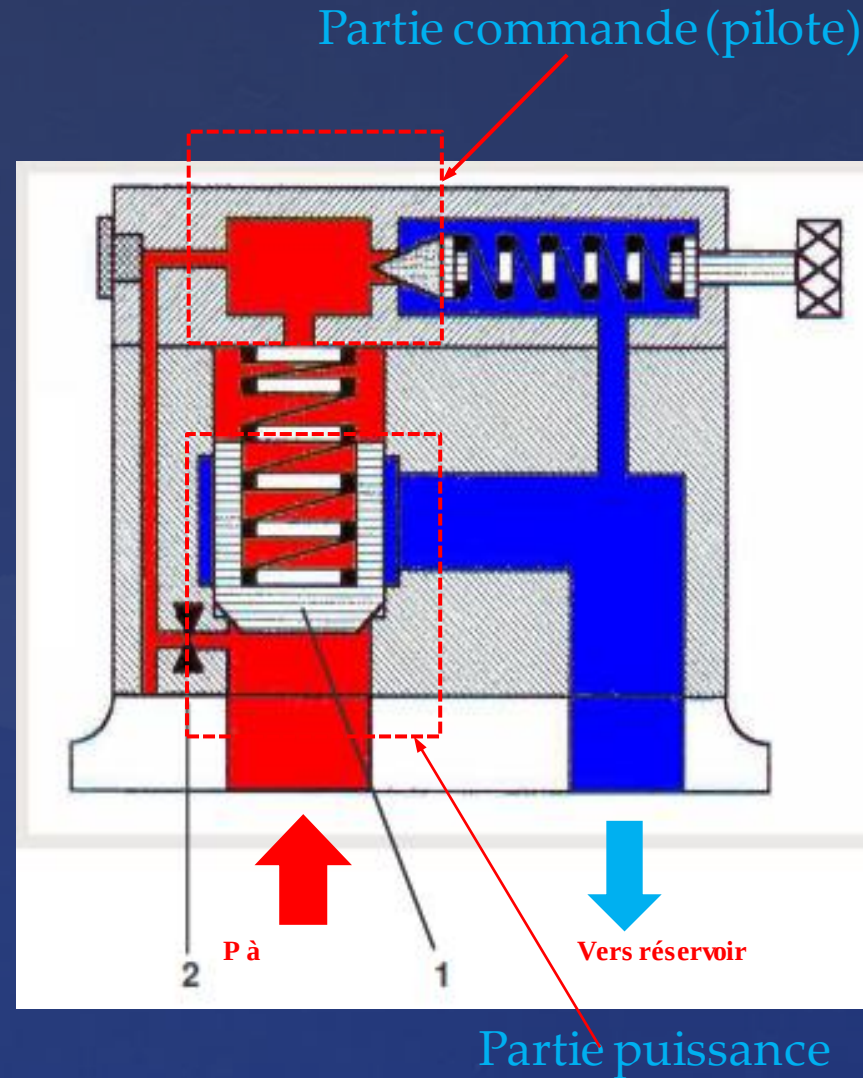


Limiteur de pression à action indirecte (fort Q)

Le clapet n'est plus appliqué sur son siège par la seule force d'un ressort. La pression de l'huile s'exerce aussi sur la face supérieure, ce qui permet un équilibrage hydraulique. Il suffit alors d'un faible ressort pour vaincre les frottements et assurer la fermeture du clapet.

Cette soupape comporte deux parties :

- une partie puissance constituée par le **clapet équilibré 1**, qui fait **retourner à la bêche tout débit excédentaire** ; l'alimentation en huile de la face supérieure du clapet ou du piston se fait au travers d'une **restriction 2 logée soit dans le clapet (ou le piston)**. Cette restriction apporte une légère temporisation au déséquilibre des forces agissant sur le clapet et provoque la levée de celui-ci, permettant ainsi l'évacuation du fluide excédentaire.
- une partie pilote composée d'une petite soupape de sûreté à action directe. Cette soupape est en communication avec la chambre située à la face supérieure du clapet principal et permet de tarer, avec une assez bonne précision, la pression admissible dans la conduite



Animation

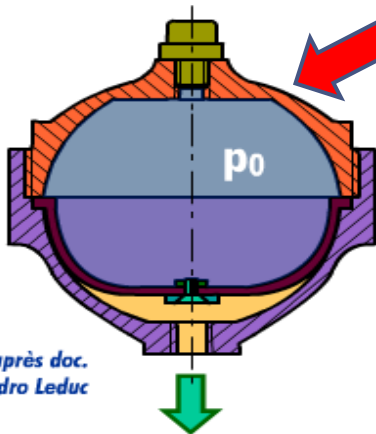
→ <https://www.youtube.com/watch?v=A2JTf1NWH4k>

Accumulateur hydraulique

L'accumulateur hydraulique permet de restituer de l'énergie ou une pression dans le circuit lors d'un appel brutal de puissance importante ou pour compenser des pertes dues à des fuites.

Installé derrière la pompe, il accumule l'énergie hydraulique pendant les temps morts et la restitue lorsqu'une baisse subite de la pression apparaît. Il peut aussi absorber les surplus dus à des irrégularités de fonctionnement.

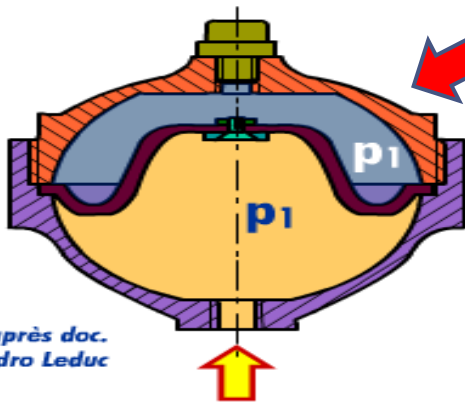
Accumulateur avec précontrainte au gaz



D'après doc.
Hydro Leduc

Toute baisse de pression dans le circuit hydraulique entraîne une restitution de l'huile par l'accumulateur jusqu'à revenir à la pression de référence p_0 .

● Recommencer...



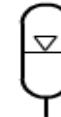
D'après doc.
Hydro Leduc

Lorsque l'huile sous une pression p_1 supérieure à p_0 pénètre dans l'accumulateur, le gaz se comprime jusqu'à la pression p_1 et la membrane se déforme. L'espace libéré permet ainsi de retenir un volume d'huile correspondant.

● Suite...



Accumulateur sans précontrainte

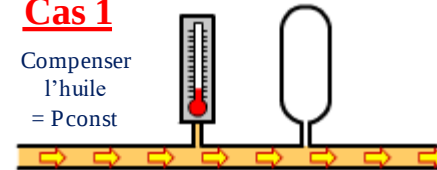


Accumulateur avec précontrainte au gaz



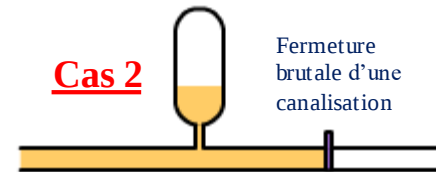
Cas 1

Compenser l'huile = P_{const}



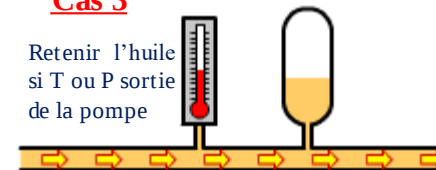
Cas 2

Fermeture brutale d'une canalisation



Cas 3

Retenir l'huile si T ou P sortie de la pompe



Différents types



Animation → <https://www.youtube.com/watch?v=fQPNTK-p4dk>

Manomètre de pression

Le manomètre est un appareil de mesure de pression.

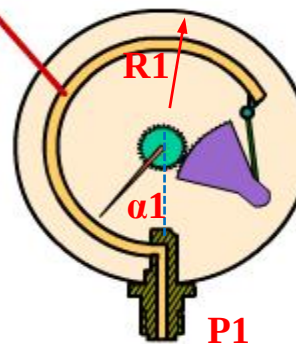
Il fonctionne grâce à la déformation élastique d'un de ses organes (le tube de Bourdon) : plus la pression est élevée, plus le rayon de courbure du tube augmente, entraînant la déviation de l'aiguille.



$$P_2 > P_1 \rightarrow R_2 > R_1 \\ \alpha_2 > \alpha_1$$

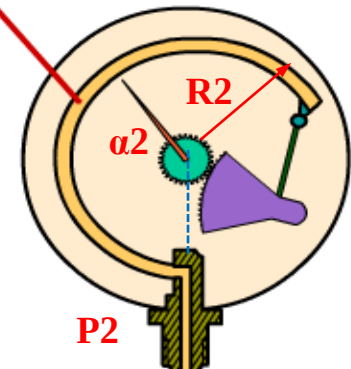


Tube de Bourdon



Tube de Bourdon

$$P_2 > P_1$$



Limiteur de débit unidirectionnel

Le limiteur de débit unidirectionnel (ou valve d'étranglement unidirectionnelle) est un composant chargé de limiter le débit de circulation de l'huile dans un sens et de laisser la circulation au débit maximum dans l'autre sens.

Ce composant est constitué d'un **limiteur de débit** et d'un **clapet de non retour**.

Son sens d'**utilisation** dépend du système où il est placé.

Il existe également des limiteurs de débits unidirectionnels **doubles**.



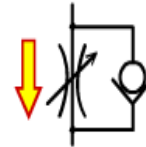
Photo Bosch Rexroth



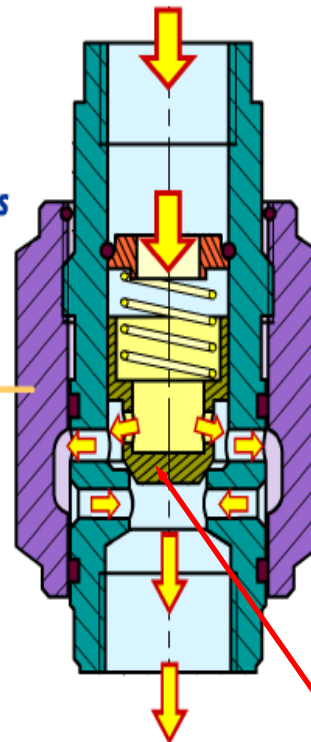
- *Fluide dans l'autre sens*
- *Cacher les fluides*

Déplacer la douille de réglage pour régler le débit.

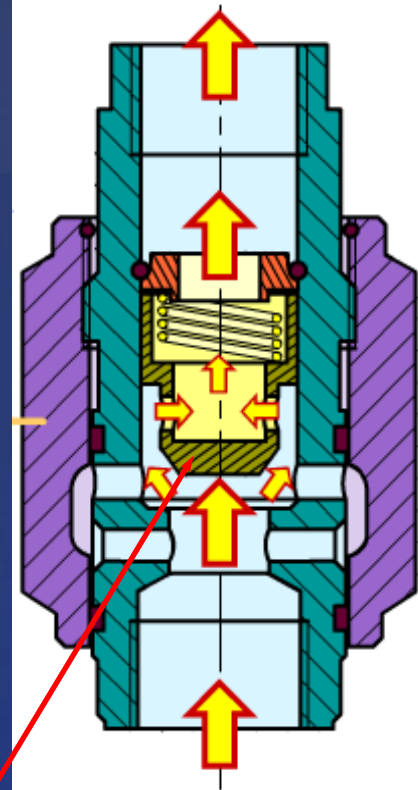
Régler de la section
=
Limiter le débit
=
Contrôler la vitesse
de sortie vérin



$Q = Q_{\text{limite}}$



$Q = Q_{\text{Max}}$



Clapet

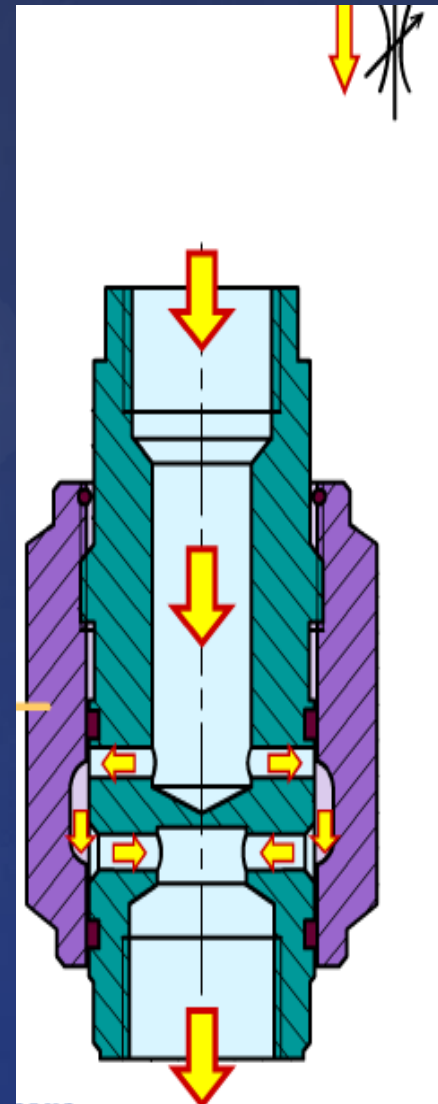
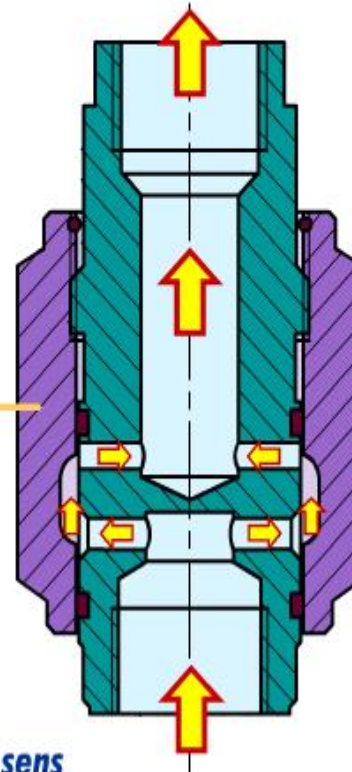
Limiteur de débit bidirectionnel

Le limiteur de débit bidirectionnel est un composant chargé de limiter le débit de circulation de l'huile dans les deux sens de circulation.



Déplacer la douille de réglage pour régler le débit.

- Cacher les fluides
- Fluide dans l'autre sens



Rôle : contrôler la vitesse de sortie et de rentrée d'un vérin

Valve d'étranglement double

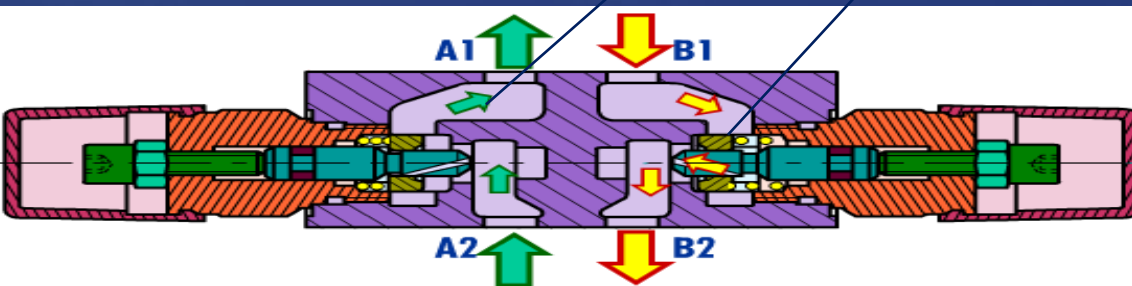
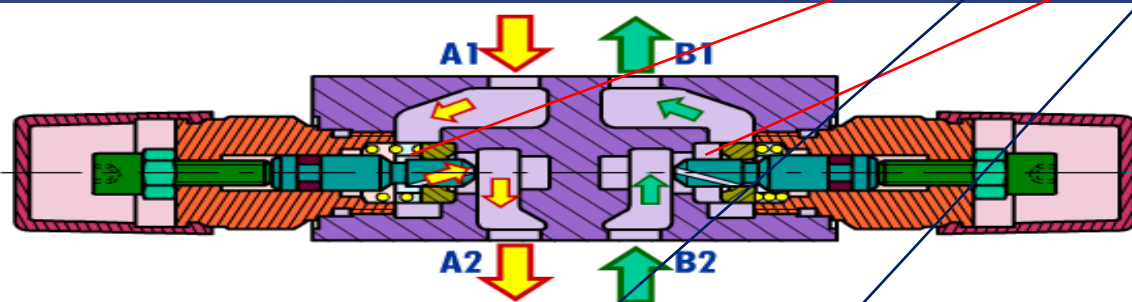
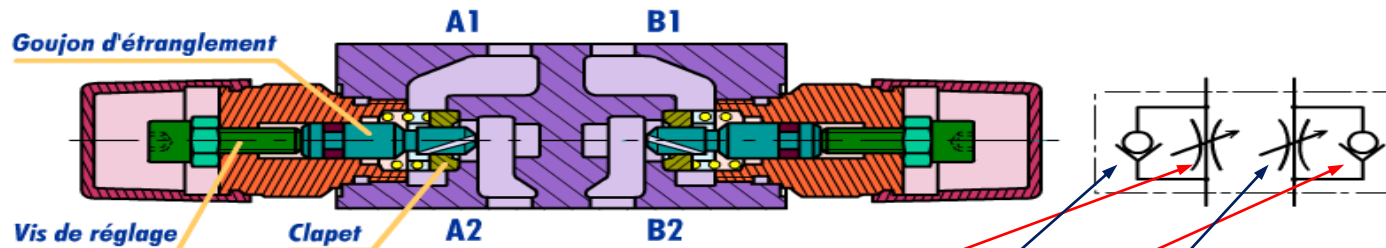
Une valve d'étranglement double est constituée d'un double **limiteur de débit unidirectionnel**. Elle est conçue pour être assemblée sur un distributeur.

Le goujon d'étranglement est déplacé par la vis de réglage pour régler la dimension de l'étranglement.

Sous l'action d'une pression en B, le clapet recule pour permettre un passage à plein débit.



Photo Bosch Rexroth



Elle régule le débit dans les deux sens, garantissant une maîtrise totale du fluide, souvent utilisée dans des applications hydrauliques ou pneumatiques où la charge est motrice dans les deux sens.

Utilisation

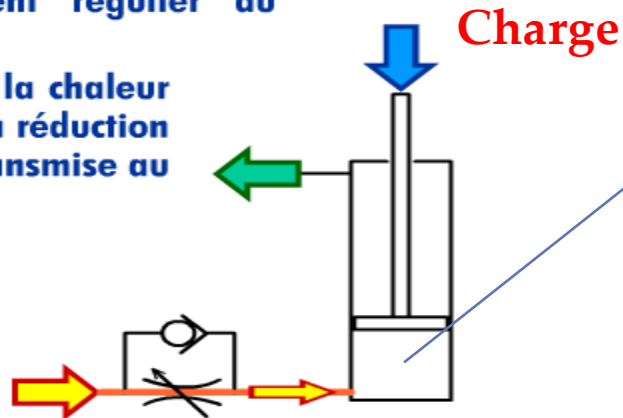
Des **limiteurs de débit unidirectionnels** peuvent être montés pour réduire le débit d'alimentation ou le débit de refoulement. Chaque montage correspond à un usage particulier et dépend principalement de la nature de la charge à entraîner.

Etranglement à l'alimentation

Ce montage est recommandé dans les applications où la charge entraînée s'oppose à l'effort de l'actionneur (et donc au débit de l'huile).

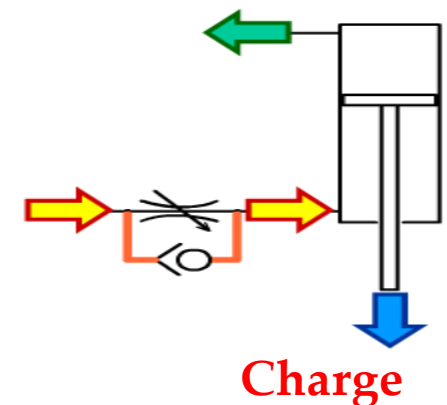
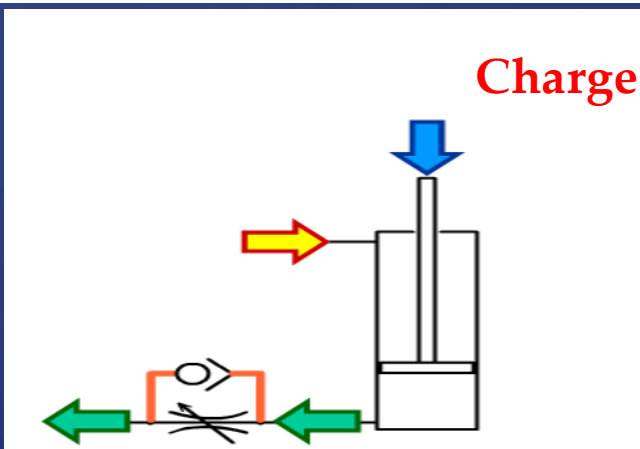
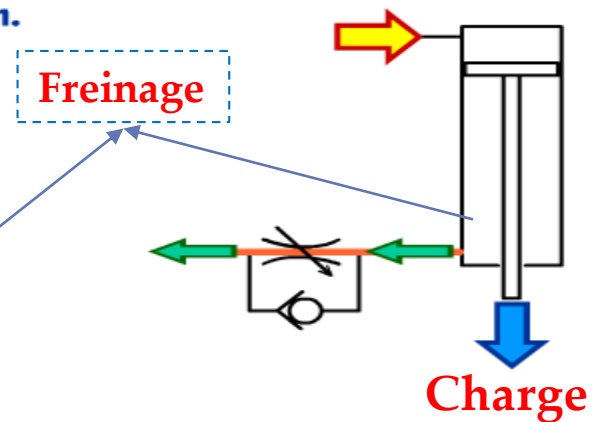
Le débit accordé à l'effort résistant de la charge permet un déplacement régulier du piston.

Inconvénient : la chaleur dégagée par la réduction de débit est transmise au vérin.



Etranglement au refoulement

Ce montage est recommandé dans les applications où la charge est entraînée et tend à accélérer le déplacement du piston. La limitation du débit de refoulement freine le piston.

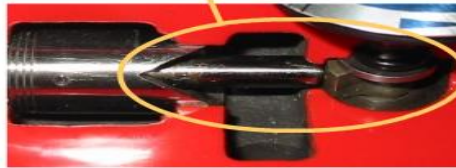


Régulateur de débit

Rôle du régulateur de débit

Le régulateur de débit doit fournir un débit d'huile constant à une valeur déterminée indépendamment des variations de charge, de viscosité ou de pression.

Il est constitué d'un étranglement réglable permettant d'afficher le débit souhaité...



...et d'un étranglement mobile piloté par un dispositif de comparaison. Il sert à comparer la pression de part et d'autre de l'étranglement réglable et maintient le débit constant.



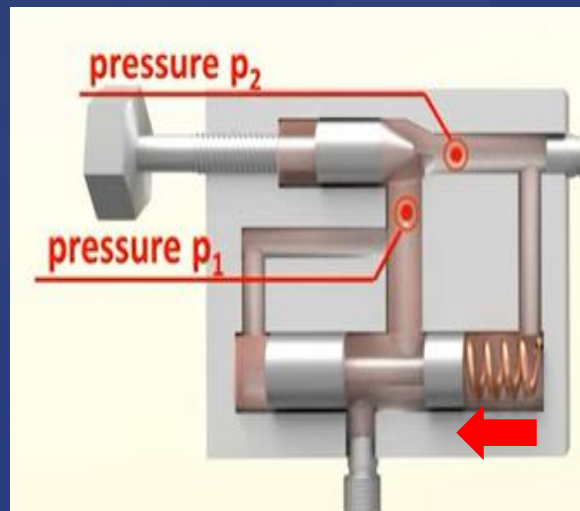
$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad \dots 1$$

$$Q = V \times S \quad \dots 2$$

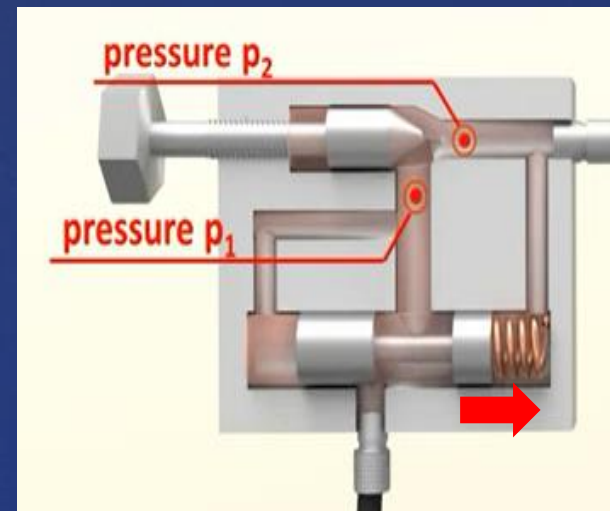
Principe de Bernoulli : Si la vitesse (V) augmente (par exemple lors d'un rétrécissement de la section (S) de la conduite, effet Venturi), la pression (P) statique du fluide chute

- Q : Débit volumétrique (m^3/s).
- C_d : Coefficient de décharge (dépend de la géométrie).
- A : Section de l'étrangleur (m^2).
- ΔP : Différence de pression entre l'amont (P_1) et l'aval (P_2) en Pa.
- ρ : Masse volumique du fluide (kg/m^3).

• Débit massique : $\dot{m} = \rho \cdot Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{2\rho\Delta P}$



P2 augmente ... le tiroir s'ouvre
→ P1 augmenter → $P_2 - P_1 = \text{const}$



P2 diminue ... le tiroir se ferme
→ P1 diminue → $P_2 - P_1 = \text{const}$

Rôle et application :

Régulation et : Maintient un débit constant pour garantir la précision, contrairement au limiteur qui fixe seulement un maximum.

Protection et Sécurité : Protège les composants hydrauliques des à-coups et des surpressions, prolongeant ainsi leur durée de vie.

Fonctionnement : Utilise souvent un principe d'étranglement (réduction de section) combiné à une balance de pression qui ajuste l'ouverture en fonction de la charge.

Applications variées : Utilisé dans l'industrie pour les fluides, la plomberie (limitation)