

SAM MECANIQUE DES FLUIDES POMPES

PROJET 2
PROSIT 7

Objectifs

- ▶ **Connaître les différents types de pompe et leur fonctionnement**
- ▶ **Savoir dimensionner une pompe en fonction du circuit**

Technologie des pompes

A quoi sert une pompe hydraulique ?

D'après l'équation de Bernoulli, l'énergie existe sous 4 formes :

- Énergie de pression.
 - Énergie potentielle.
 - Énergie cinétique.
 - Énergie de friction.
-
- Une pompe sert donc à fournir de l'énergie à un fluide afin de :
 - d'augmenter sa pression,
 - de le faire monter,
 - de lui donner de la vitesse (débit),
 - de compenser les pertes de charges.

Technologie des pompes

Les pompes sont classées en deux grandes catégories basées sur leur principe de fonctionnement lié au mode de transmission de l'énergie au fluide.

- Les pompes volumétriques :

Le débit ne dépend que de la vitesse de rotation mais est indépendant de la pression au refoulement. Le transfert du fluide est obtenu par le déplacement d'un volume élémentaire caractéristique des organes mobiles de la pompe.

- Les pompes dynamiques :

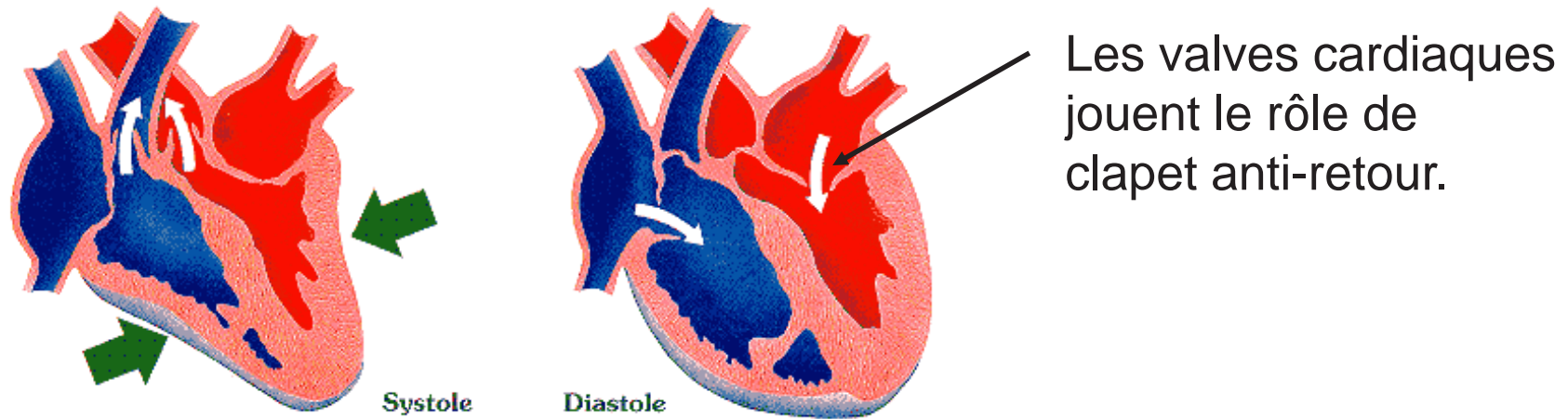
Elles transmettent au fluide une charge dépendant du débit qui la traverse. Une roue fournit au fluide de l'énergie cinétique qui est ensuite transformée en pression dynamique dans une volute.

Technologie des pompes

Exemple de pompes volumétriques : déplacement d'un volume élémentaire.

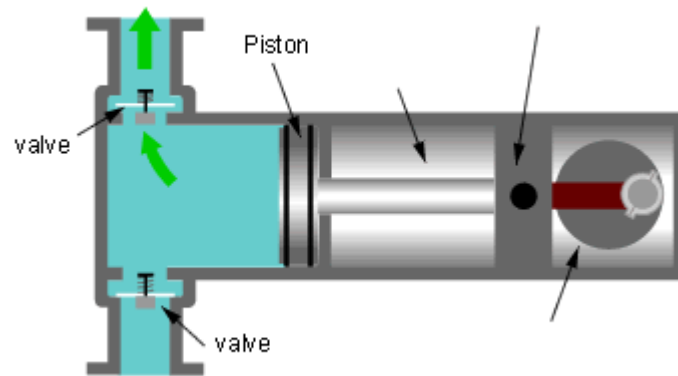
Le cœur est un muscle creux qui remplit la fonction de pompe.

Les ventricules se contractent (systole) pour propulser le sang dans les artères. Les ventricules se relâchent (diastole) et se remplissent de sang venant des oreillettes.

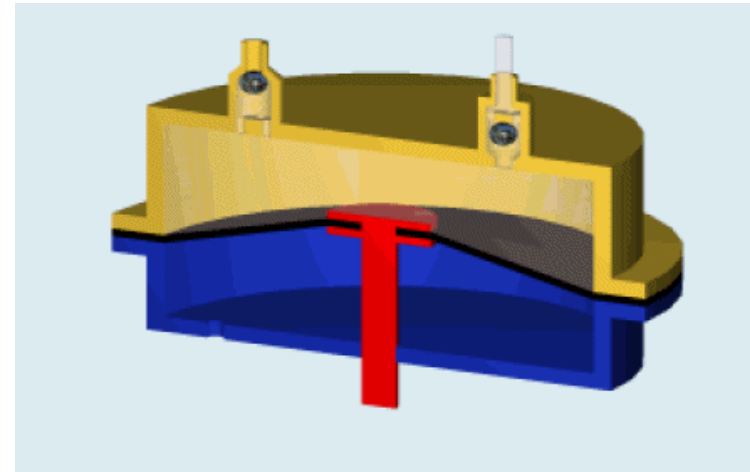


Technologie des pompes

Exemple de pompes volumétriques : déplacement d'un volume élémentaire.



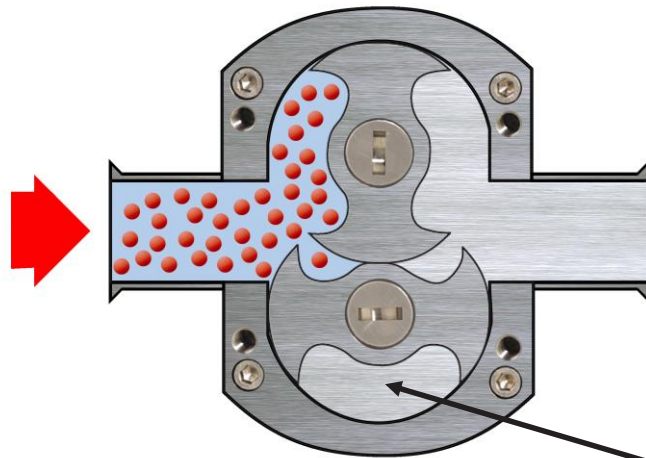
Pompe à piston



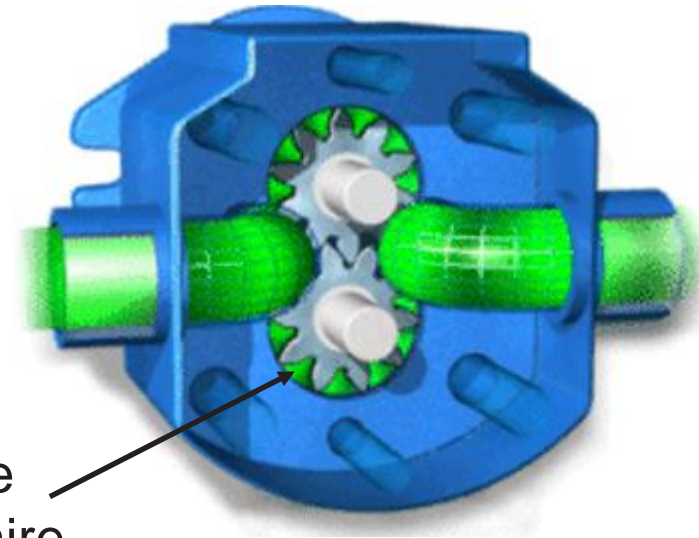
Pompe à membrane

Technologie des pompes

Exemple de pompes volumétriques : déplacement d'un volume élémentaire.



Pompe à piston



Pompe à engrenages
externes

Volume
élémentaire

Technologie des pompes

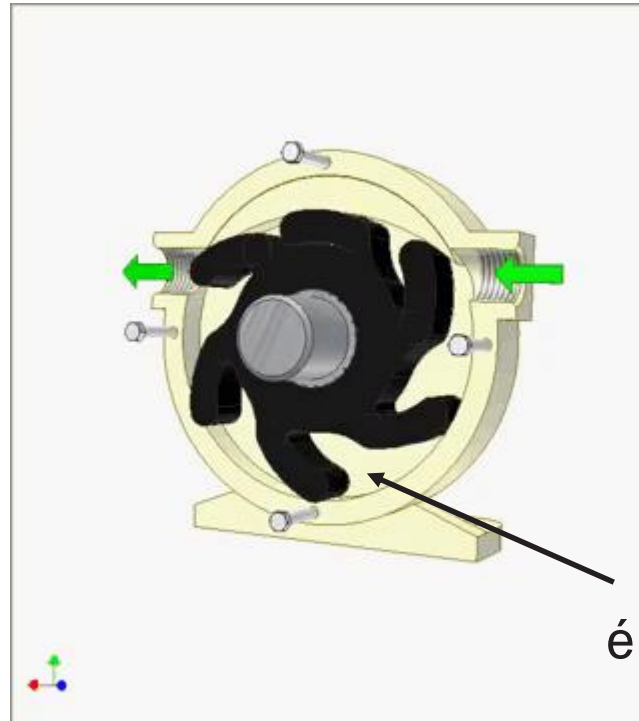
Exemple de pompes volumétriques : déplacement d'un volume élémentaire.

Pompe à engrenages
externes

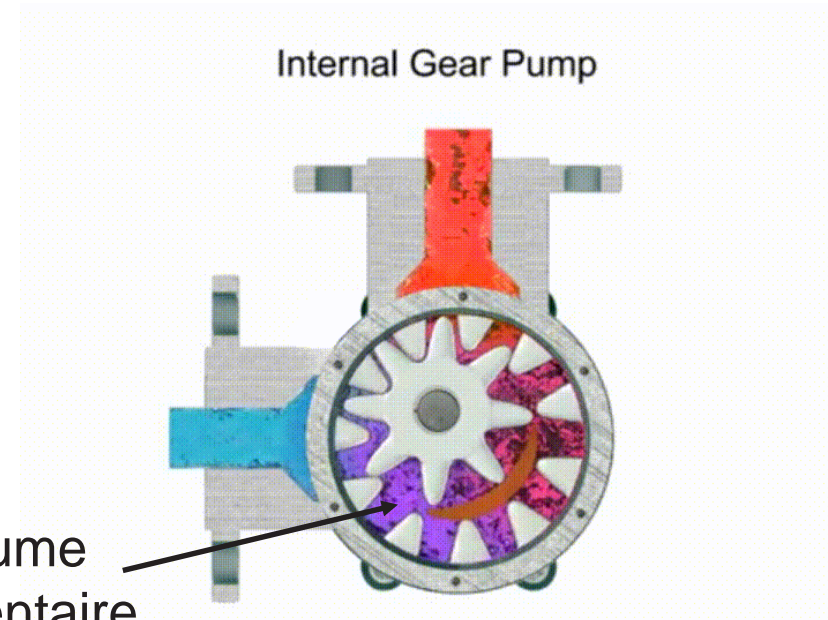


Technologie des pompes

Exemple de pompes volumétriques : déplacement d'un volume élémentaire.



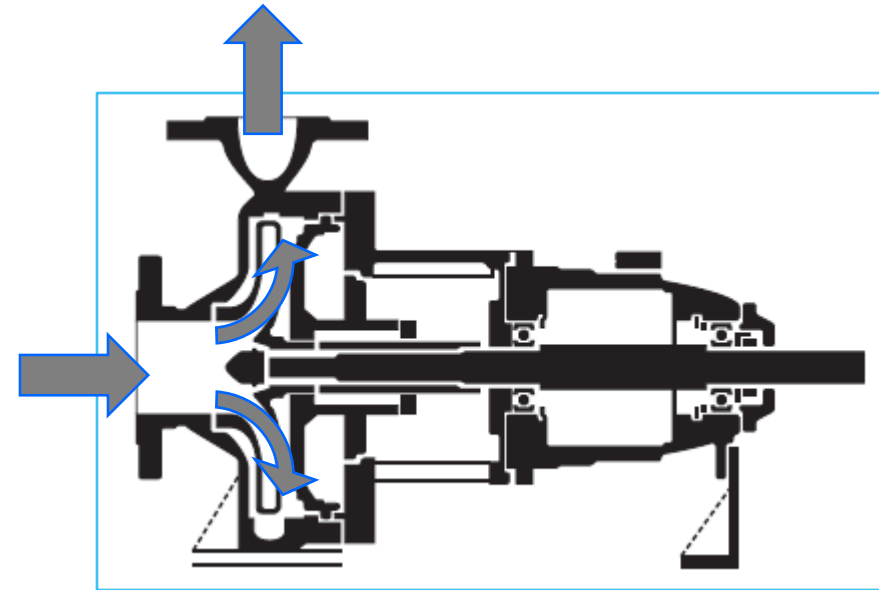
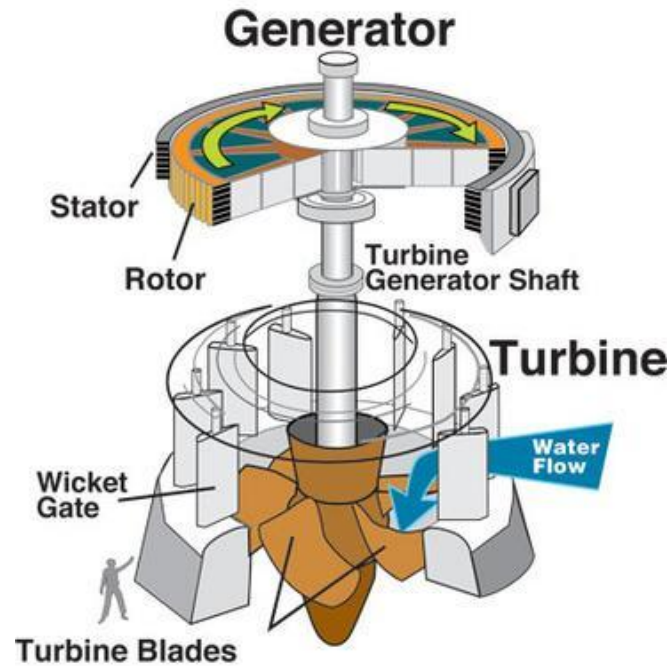
Pompe à lamelles
souples



Pompe à engrenage
interne

Technologie des pompes

Exemple de pompe dynamique :

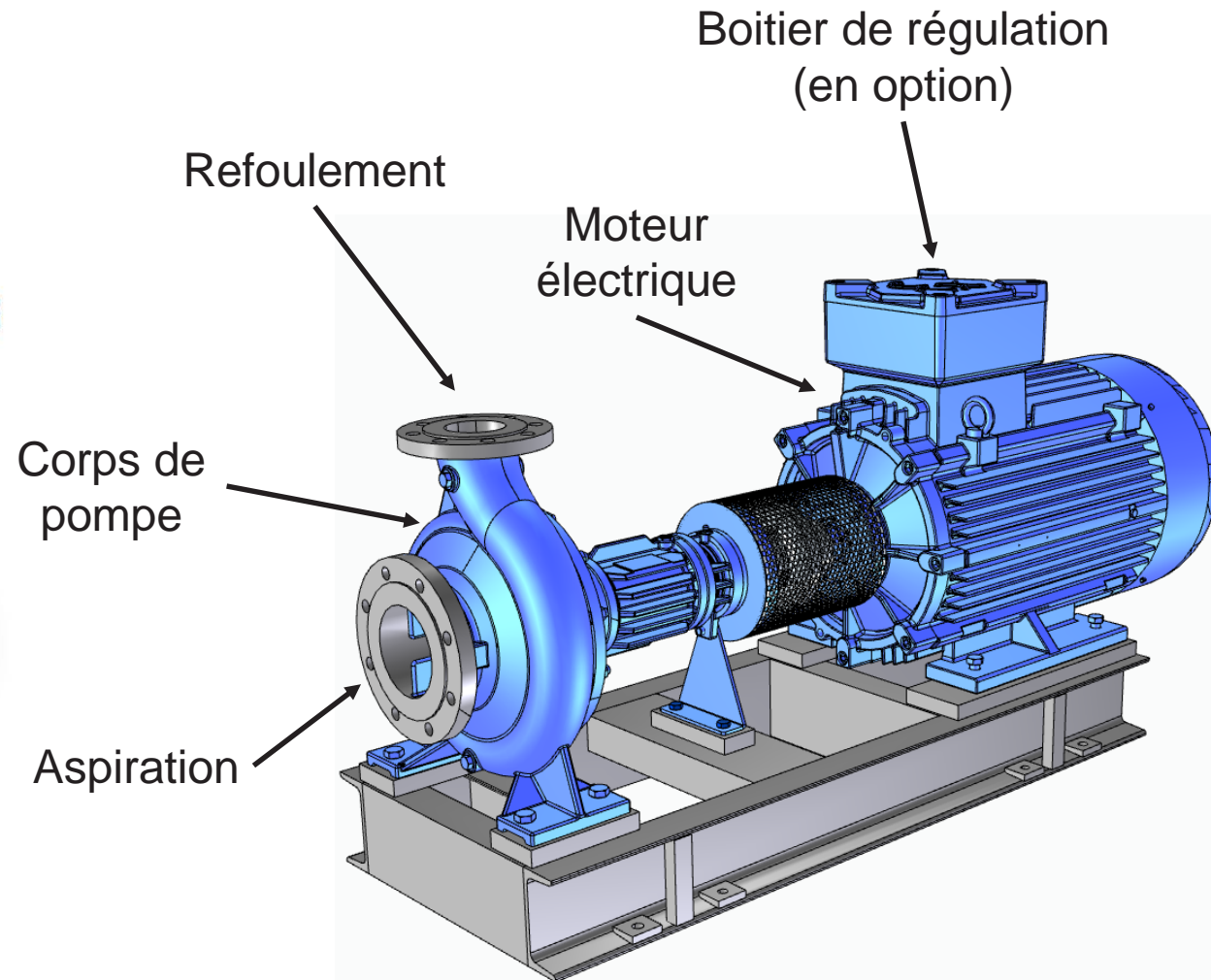
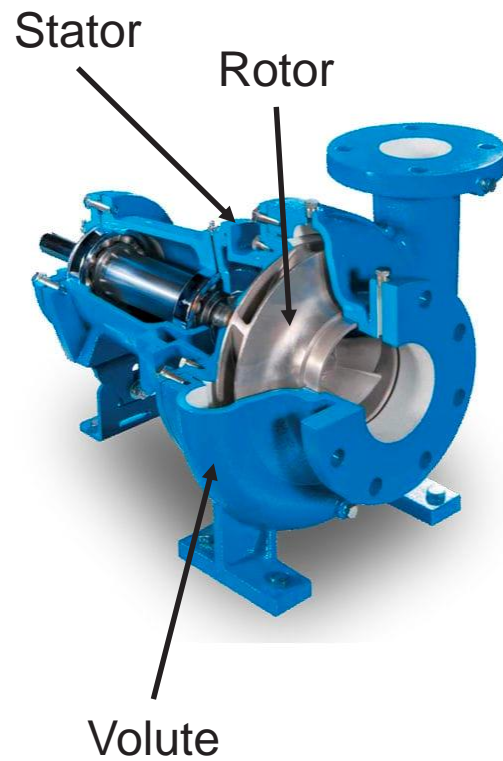


Pompe centrifuge

Nous ne traiterons que des **pompes centrifuges** que nous désignerons, par simplification, par le terme de pompes.

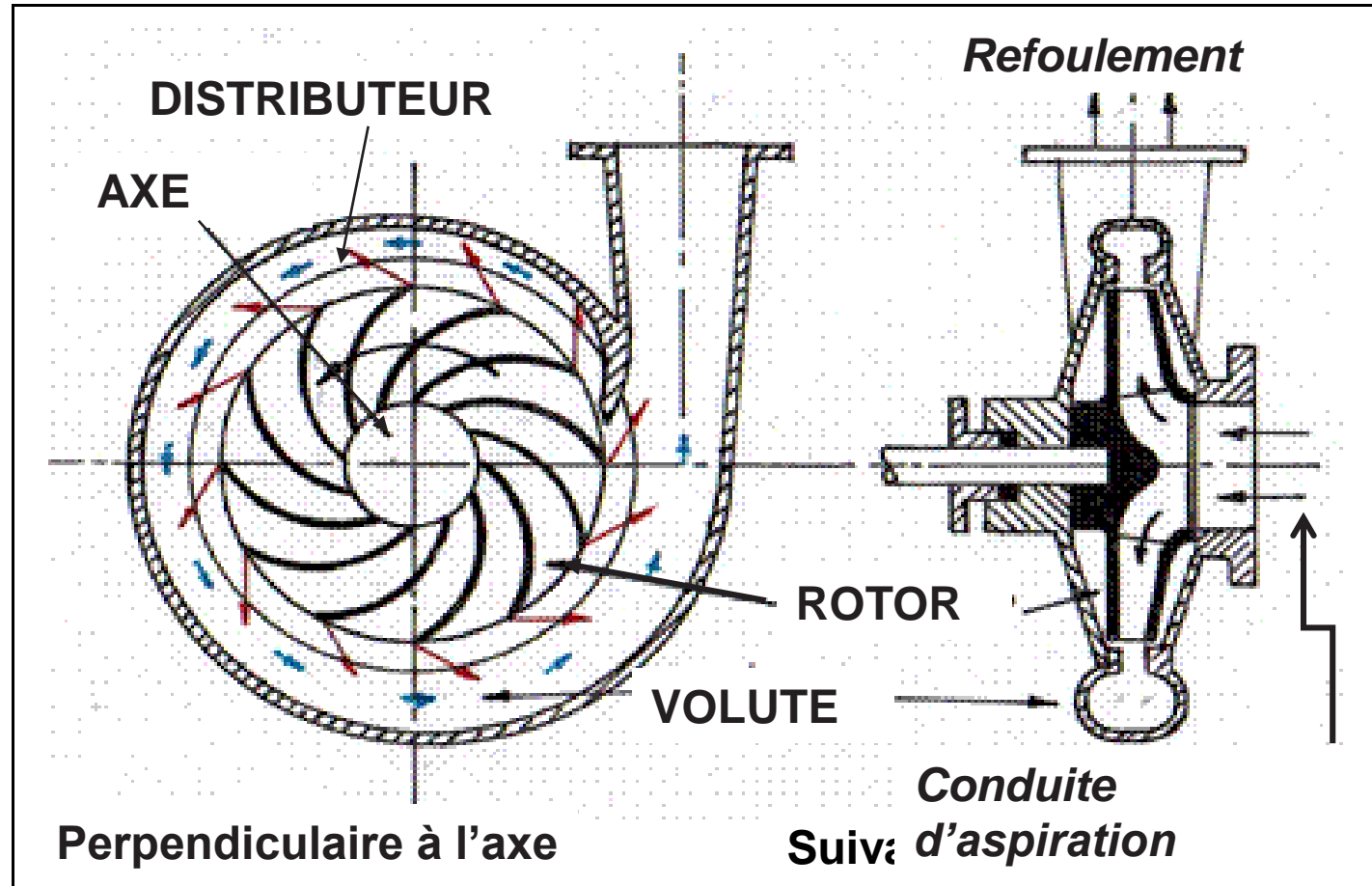
Technologie des pompes

Composition d'une pompe :



Technologie des pompes

Coupe d'une pompe :



Fonctionnement d'une pompe centrifuge :

- Le principe repose sur la conversion de l'énergie d'une source de mouvement (le moteur) d'abord en énergie cinétique (vitesse) puis en énergie de pression.
- L'effet centrifuge sert à déplacer le liquide et à augmenter la pression.
- A l'intérieur d'une chambre hermétique équipée d'une entrée et d'une sortie (volute) tourne une roue à ailettes, le cœur de la pompe, qui convertit l'énergie du moteur en énergie cinétique.
- La partie statique de la pompe (volute) convertit l'énergie cinétique en pression.
- La roue est fixée à l'arbre de pompe, couplée à l'arbre de transmission du moteur.

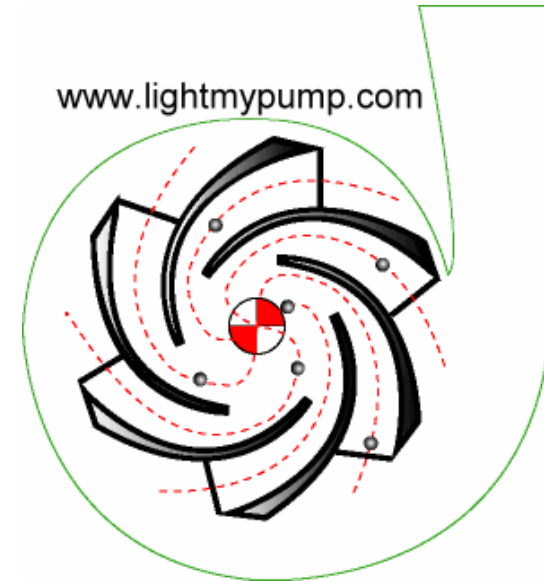
Fonctionnement d'une pompe centrifuge :

- Lorsque le liquide entre dans le corps de la pompe, la roue projette le fluide à la périphérie du corps de la pompe grâce à la force centrifuge produite par la vitesse de la roue : le liquide emmagasine ainsi une énergie potentielle qui sera transformée en débit (ou énergie cinétique) et en hauteur d'élévation (autre forme d'énergie potentielle).
- Ce mouvement centrifuge provoque au même moment une dépression capable d'aspirer le fluide à pomper. En connectant ensuite la pompe à la tuyauterie de refoulement, le liquide sera facilement canalisé et être utilisé dans un circuit.

Technologie des pompes

Coupe d'une pompe centrifuge suivant son plan équatorial pour montrer la modélisation du phénomène physique :

- L'arrivée de liquide se fait perpendiculairement (axialement) à ce plan.
- Les lignes en pointillés rouges sont les trajectoires relatives.



Le formalisme mathématique qui décrit le phénomène physique est le théorème d'Euler. Confère « annexe SAM 4 ».

Animation Flash sur internet beaucoup plus parlante :

http://www.pumpfundamentals.com/pump_glossary.htm#gl52

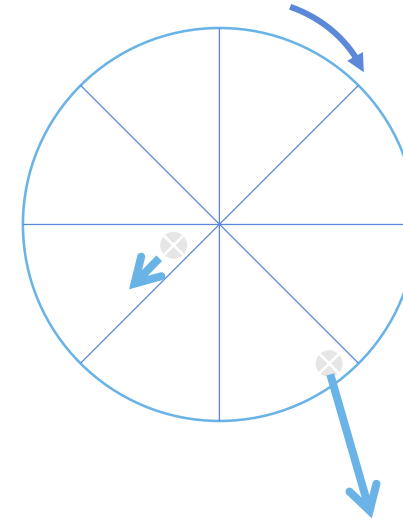
Technologie des pompes

Analogie avec des éléments physiques :

- Carrousel (*merry-go-round*)



Au centre la pression est plus faible qu'à l'extérieur.



- Panier à salade (*spin-me-round*)



Les feuilles de salade jouent le rôle d'ailettes (sinon remplir un sceau d'eau et le faire tourner ne produit aucune pression)

Notion de charge

La notion de **charge** H est couramment utilisée en hydraulique.

Elle correspond à l'**énergie mécanique totale des particules fluides par unité de poids** (d'où le terme de « perte de charges ») et s'exprime donc en mètre de colonne d'eau (mCE) ou plus généralement, en mètre de colonne de fluide/liquide (mCF/mCL).

$$H = \frac{E_T}{\rho \cdot g \cdot V} = f \left(\frac{P}{\rho \cdot g}, z, \frac{1}{2g} v^2 \right)$$

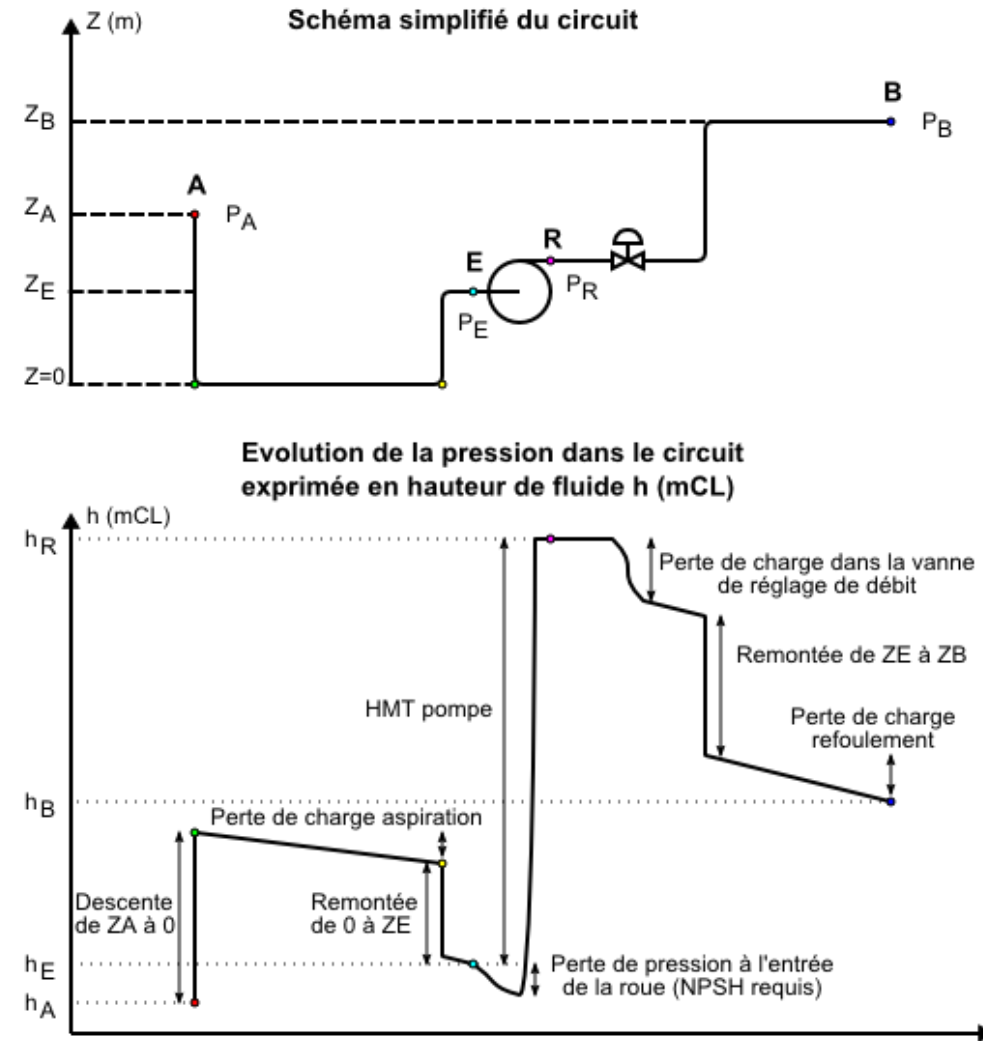
Nous parlerons de :

- hauteur manométrique H_m pour la charge d'une pompe,
- hauteur manométrique totale H_{mt} pour la charge d'un circuit hydraulique.

Notion de charge

Prenons par exemple le circuit hydraulique ci-contre.

Le second graphique montre l'évolution de la pression locale dans le circuit. Cela illustre parfaitement les différentes charges et pertes de charges mises en jeux.



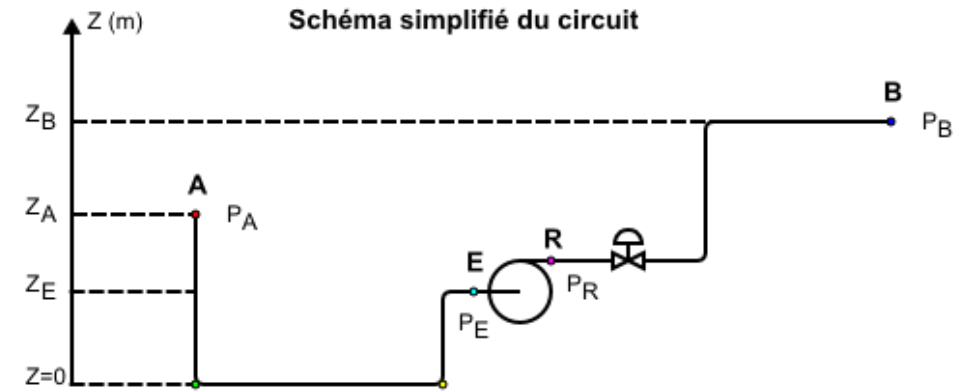
Notion de charge

Équation de Bernoulli entre les points A et B :

$$\frac{P_A}{\rho \cdot g} + z_A + \frac{1}{2g} v_A^2 + H_m = \frac{P_B}{\rho \cdot g} + z_B + \frac{1}{2g} v_B^2 + H_{rég} + H_{sing}$$

$$H_m = \frac{P_B - P_A}{\rho \cdot g} + z_B - z_A + \frac{1}{2g} (v_B^2 - v_A^2) + H_{rég} + H_{sing}$$

Lorsque le circuit est à l'équilibre, nous avons $H_m = H_{mt}$ car la pompe fournit la charge nécessaire à la circulation du fluide dans le circuit.



Caractéristique des pompes

On considère la pompe en régime permanent, donc $q_v = C^{st}$.

Chaque pompe de circulation est principalement identifiée par une courbe caractéristique $H_m = f(q_v)$.

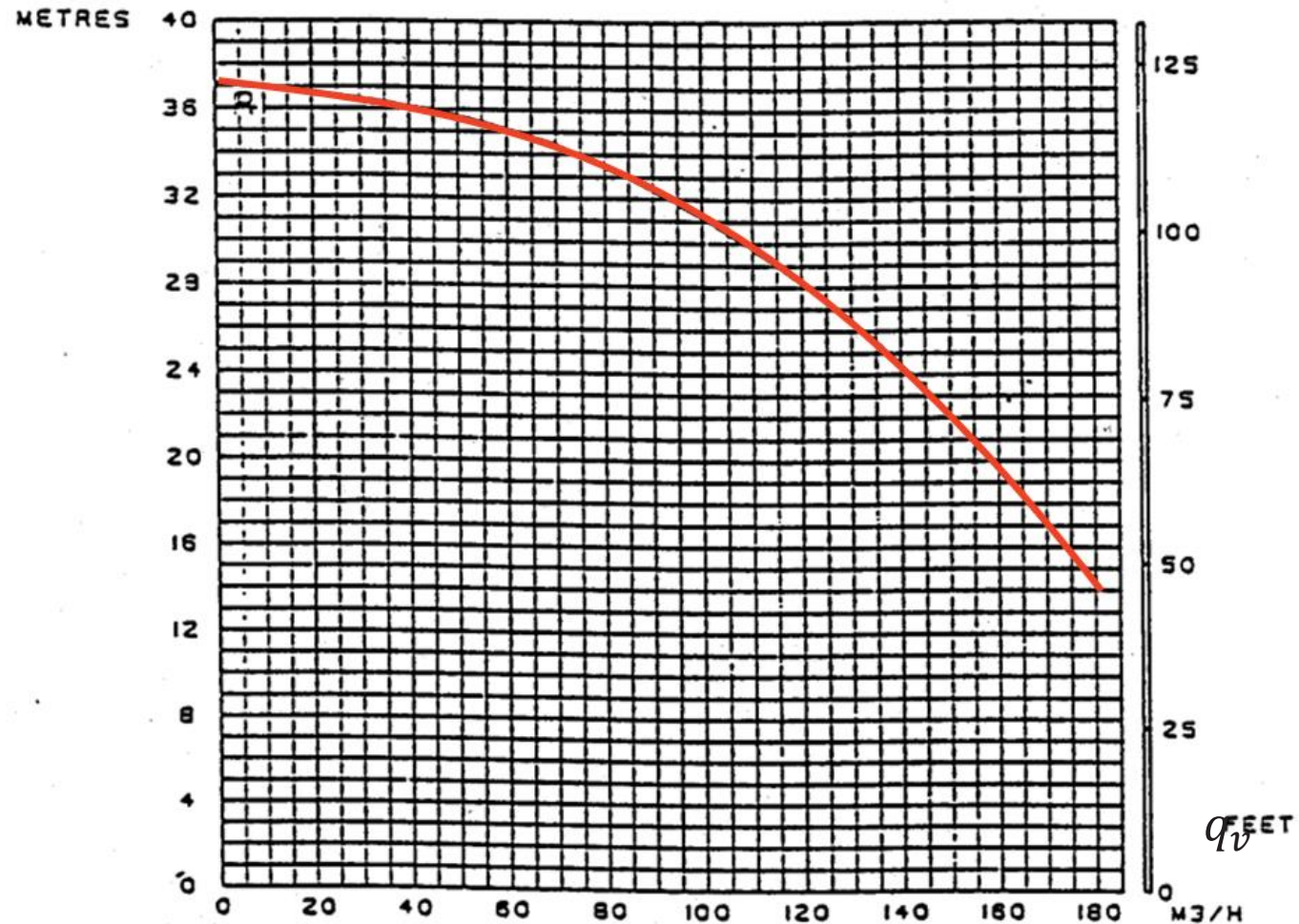
La hauteur manométrique H_m correspond à la charge (ΔP exprimée en mCE) que doit fournir la pompe entre le point d'aspiration et le refoulement pour faire circuler le fluide.

$$(1 \text{ mCE} = 10 \text{ kPa} = 0,1 \text{ bar})$$

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h$$

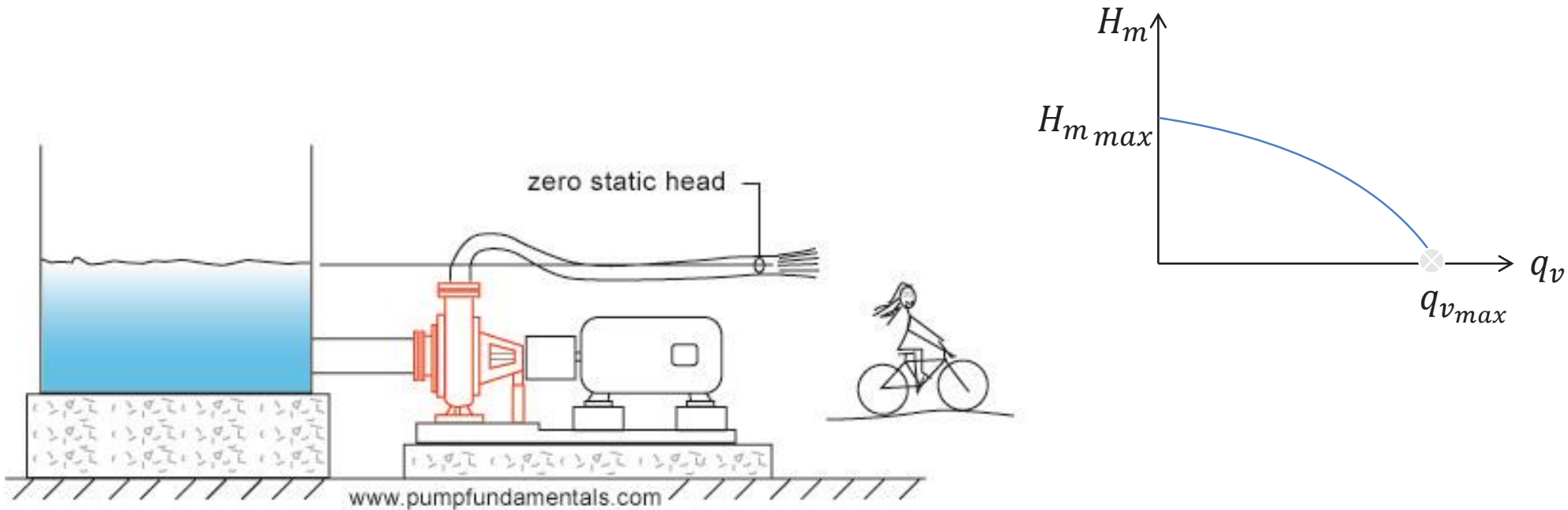
Caractéristique de la pompe : $H_m = f(q_v)$

H_m



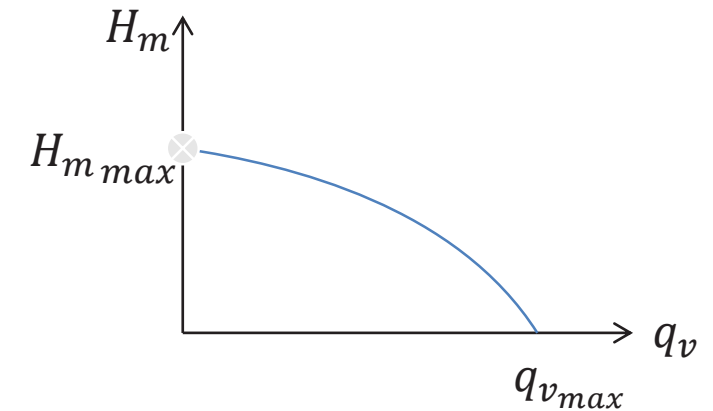
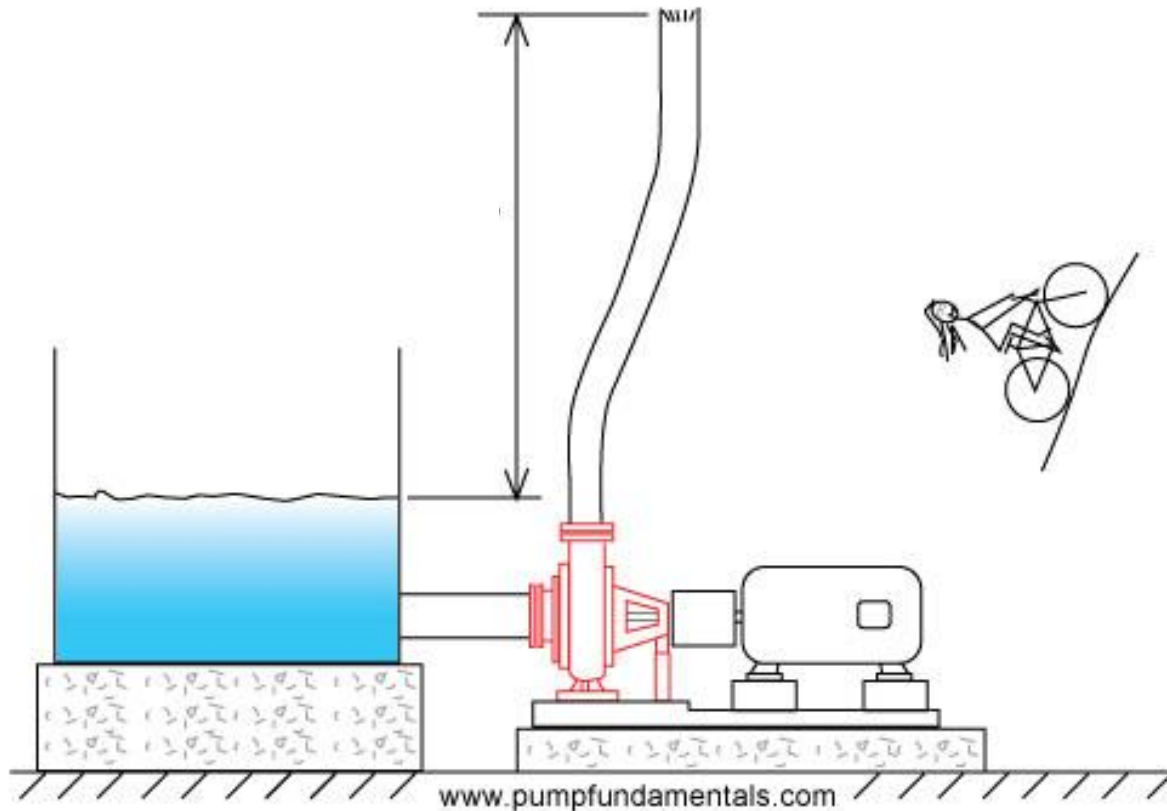
Caractéristique de la pompe : $H_m = f(q_v)$

Si le tuyau de refoulement est à la même hauteur que la surface du liquide, alors la pression (en hauteur d'eau) est nulle et le débit sera limité seulement par les frictions dans le système.



Caractéristique de la pompe : $H_m = f(q_v)$

Si le tuyau de décharge est relevé verticalement jusqu'à ce que le débit q_v cesse, la pression au refoulement est alors à son maximum.



Charge à l'aspiration / refoulement

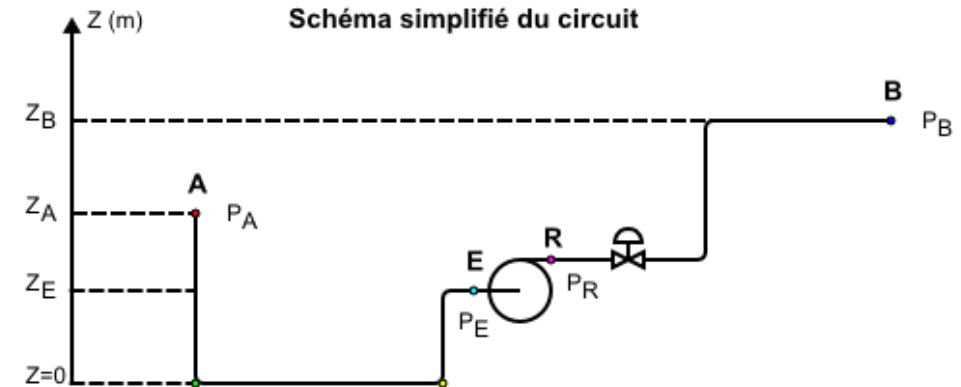
Soit H_{sing}^a et $H_{rég}^a$, les pertes de charges singulières et régulières à l'aspiration et H_{sing}^r et $H_{rég}^r$ celles au refoulement.

L'équation de Bernoulli entre les points A et B s'écrit :

$$\frac{P_A}{\rho \cdot g} + z_A + \frac{1}{2g} v_A^2 + H_m - H_{sing}^a - H_{rég}^a = \frac{P_B}{\rho \cdot g} + z_B + \frac{1}{2g} v_B^2 + H_{sing}^r + H_{rég}^r$$

$$H_m = \underbrace{\frac{P_B}{\rho \cdot g} + z_B + \frac{1}{2g} v_B^2 + H_{sing}^r + H_{rég}^r}_{H_r} - \underbrace{\frac{P_A}{\rho \cdot g} + z_A + \frac{1}{2g} v_A^2 + H_{sing}^a + H_{rég}^a}_{H_a}$$

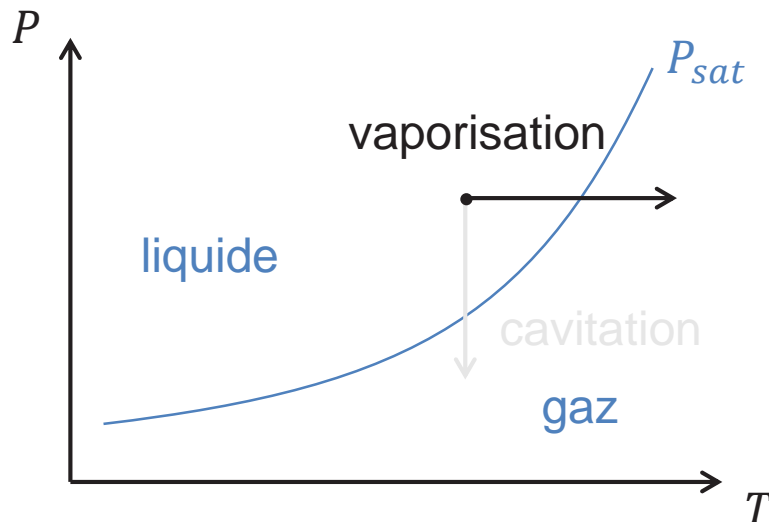
- La pompe doit donc compenser H_a à l'aspiration et H_r au refoulement.



Cavitation

Lorsque la pompe met en mouvement le fluide, elle crée une dépression à l'aspiration afin de compenser H_a .

Si cette dépression est égale à la pression de vapeur saturante P_{sat} , le fluide est en partie vaporisé et les microbulles d'air viennent percuter principalement les rotors. Cela occasionne une érosion anormale et prématurée de la pompe, souvent accompagné de bruit et de vibration. Il s'agit du phénomène de cavitation.



NPSH disponible

La cavitation limitant la durée de vie de la pompe, son débit, son rendement et étant aussi dangereuse (risque de rupture de pièce métallique en rotation), il faut s'en prémunir lors du dimensionnement de la pompe.

Nous devons calculer la charge nette absolue disponible (NPSH : Net Positive Suction Head) en mCF correspondant à la différence entre la pression totale à l'aspiration et la pression de vapeur saturante :

$$NPSH_{dispo} = \left(\frac{P_{ep}}{\rho \cdot g} + \frac{v_{ep}^2}{2 \cdot g} \right) - \frac{P_{sat}}{\rho \cdot g}$$

P_{ep} : pression en entrée de pompe (Pa),

v_{ep} : vitesse du fluide en entrée de pompe (m.s⁻¹),

P_{sat} : pression de vapeur saturante du fluide (Pa).

NPSH disponible

$$NPSH_{dispo} = \boxed{\frac{P_{ep}}{\rho \cdot g}} + \frac{v_{ep}^2}{2 \cdot g} - \frac{P_{sat}}{\rho \cdot g}$$

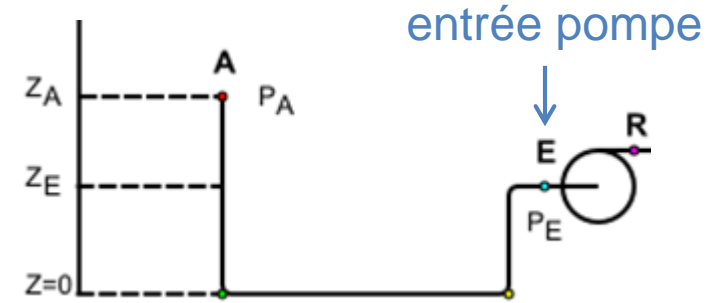
Équation de Bernoulli entre A et E :

$$\frac{P_A}{\rho \cdot g} + z_A + \frac{v_A^2}{2 \cdot g} = \frac{P_E}{\rho \cdot g} + z_E + \frac{v_E^2}{2 \cdot g} + H_{rég} + H_{sing}$$

$$\boxed{\frac{P_E}{\rho \cdot g}} = \frac{P_A}{\rho \cdot g} + z_A - z_E + \frac{v_A^2}{2 \cdot g} - \frac{v_E^2}{2 \cdot g} - H_{rég} - H_{sing}$$

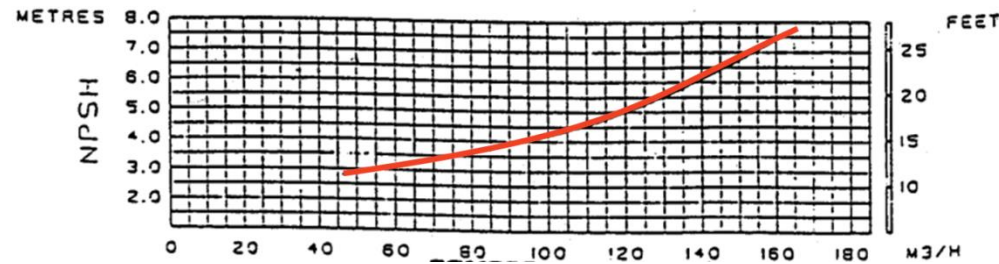
$$NPSH_{dispo} = \frac{P_A}{\rho \cdot g} + z_A - z_E + \frac{v_A^2}{2 \cdot g} - \frac{v_E^2}{2 \cdot g} - H_{rég} - H_{sing} + \frac{v_E^2}{2 \cdot g} - \frac{P_{sat}}{\rho \cdot g}$$

$$\boxed{NPSH_{dispo} = \left(\frac{P_A}{\rho \cdot g} + \frac{v_A^2}{2 \cdot g} + z_A - z_E - H_{rég} - H_{sing} \right) - \frac{P_{sat}}{\rho \cdot g}}$$



NPSH requis

Les fabricants de pompe fournissent la **courbe du $NPSH_{requis}$** en fonction du débit.



Pour **éviter la cavitation**, il faut que

$$NPSH_{dispo} > NPSH_{requis} + 0,5 \text{ ou } 1 \text{ mCE}$$

marge de sécurité

Si ce n'est pas le cas, il faut :

- limiter les pertes de charges à l'aspiration (pas de vanne, filtre propre),
- refroidir le fluide ($P_{sat} \nearrow qd T \nearrow$),
- mettre plusieurs pompes en série,
- limiter la hauteur de l'aspiration de la pompe ou l'immerger, etc.

Rendement de la pompe : $\eta = f(q_v)$

En pratique, les transformations d'énergie ne peuvent pas s'effectuer sans pertes interne dans la pompe.

- Pertes hydrauliques par frottement visqueux de l'écoulement dans son passage à travers les éléments de pompe (aubage, flasques).
- Pertes volumétriques par fuites du fluide à travers les jeux entre rotor et partie fixe.
- Pertes mécaniques dues au frottement des paliers, butées, et joints d'étanchéité .

La hauteur manométrique H_m fournie par la pompe s'écrit : $H_m = H_{th} - \Delta H$ avec H_{th} la charge théorique et ΔH les pertes.

De plus, la charge H_m de la pompe est reliée au travail W_{pompe} qu'elle fournit.

$$H_m = \frac{W_{pompe}}{\rho \cdot g \cdot V}$$

Rendement de la pompe : $\eta = f(q_v)$

La puissance utile est $\mathcal{P}_u = q_v \times \Delta P_{pompe}$

$$\mathcal{P}_u = q_v \cdot \rho \cdot g \cdot H_m$$

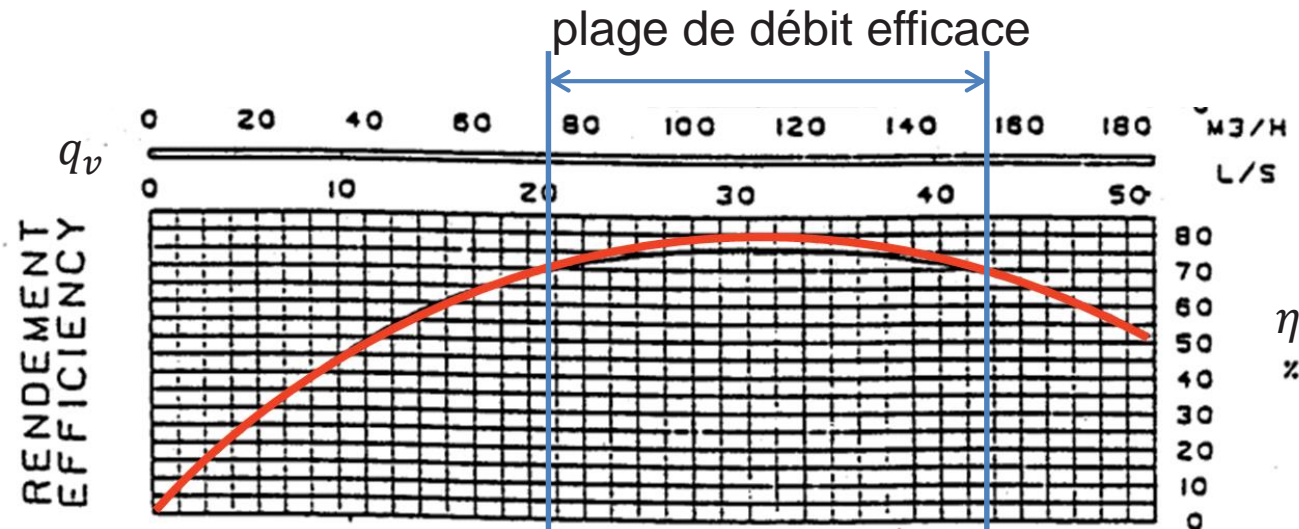
Le rendement est

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_u}{\mathcal{P}_{elec}}$$

\mathcal{P}_u : puissance utile (W),
 \mathcal{P}_{elec} : puissance électrique (W),
 ρ : masse volumique ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$),
 q_v : débit volumique ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$),
 H_m : charge de la pompe (mCF).

$$1\text{W} = 1\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$$

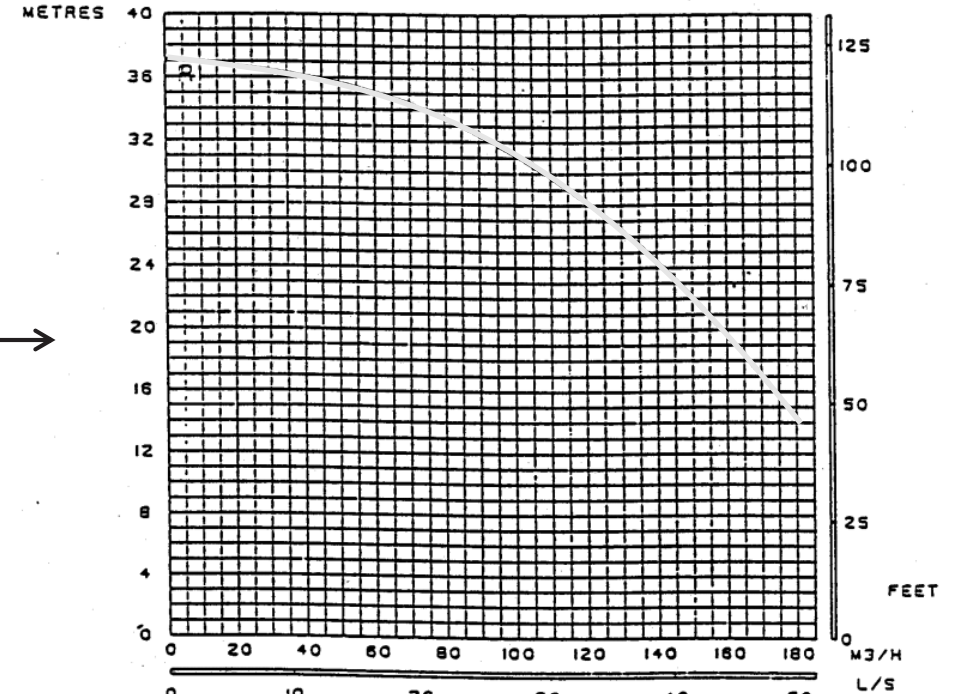
Rendement généralement compris entre 50 à 80 %.



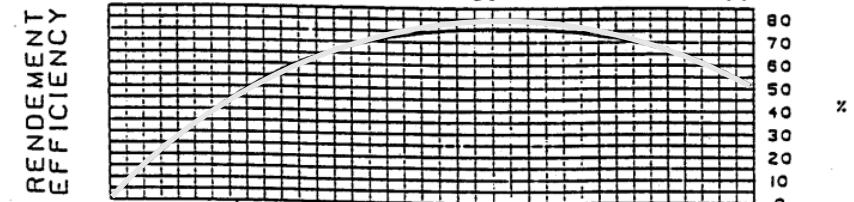
Fiche technique pompe

POMPE CENTRIFUGE CENTRIFUGAL PUMP		NORBLOC 6x16-15 MBX 6x16 RI-15			
Densité: 1 viscosité: 100	TOLERANCE ISO 2548 CLASSE C	Moteur 2 Pôles	ROGNAGE-TRIMMING RI-155	ASP: 180 SUC REF: 185 DEL	50HZ

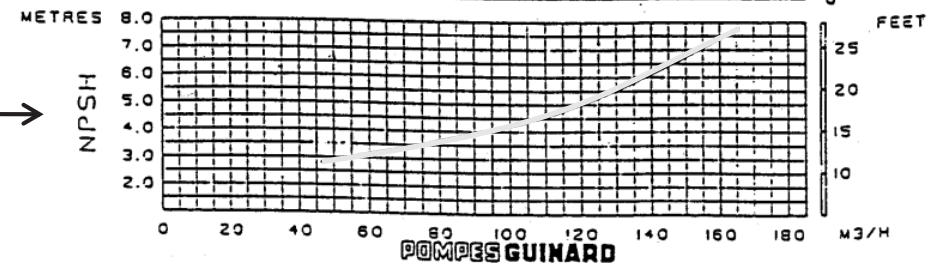
courbe $HM = f(q_v)$ →



courbe $\eta = f(q_v)$ →



courbe $NPSH_{requis} = f(q_v)$ →



Courbe caractéristique d'un réseau

C'est le graphique des pertes de charge en fonction du débit. Cette courbe indique comment varie la résistance du réseau H_{mt} avec l'augmentation du débit q_v .

Dans les réseaux fermés, la relation est la suivante :

$$H_{mt} = K \cdot q_v^n$$

H_M : hauteur manométrique (mCE),

q_v : débit ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$),

K : coefficient de proportionnalité (su),

$n = 1,83$ à 2 pour les pertes par frottement,

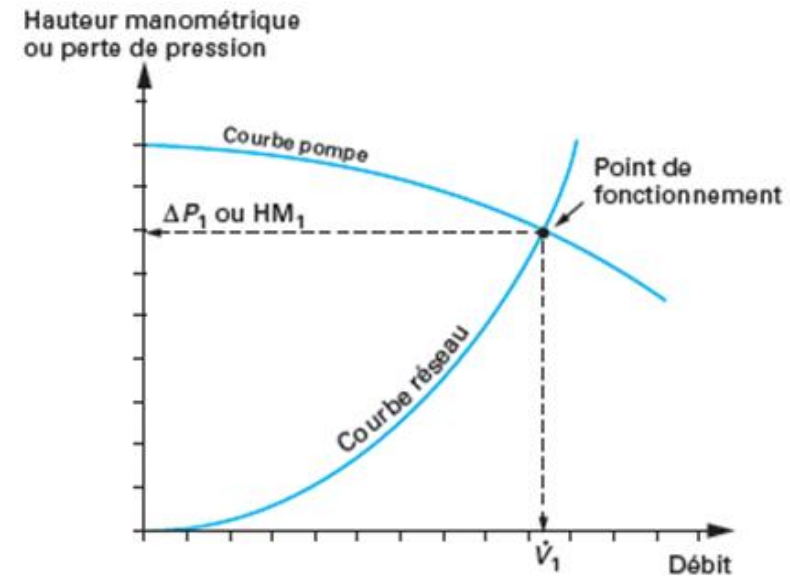
$n = 1,9$ pour les pertes par accidents.

Courbe caractéristique d'un réseau

La représentation graphique est définie sur la figure ci-contre.

Le point de fonctionnement d'une pompe sur un réseau est défini par l'intersection de la courbe de la pompe et de la courbe caractéristique du réseau.

À chaque fois que le réseau est modifié (vanne, ou autre accident), la courbe caractéristique est modifiée.



Le point de coupure des courbes caractéristiques de la pompe et du réseau détermine le point de fonctionnement caractérisé par le couple (débit / perte de pression).

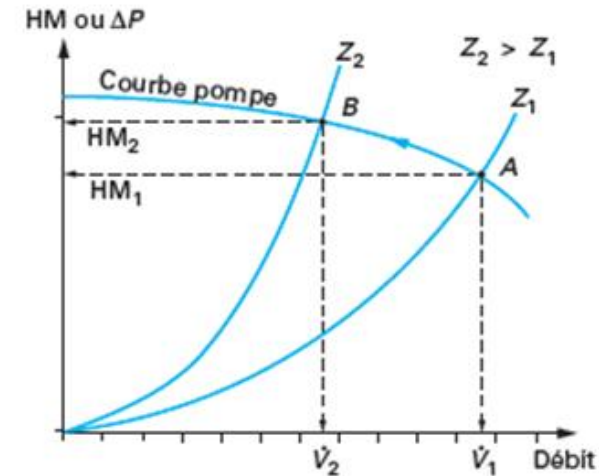
Point de fonctionnement
d'une pompe et d'un réseau

Variation des pertes de charges

La fermeture plus ou moins partielle et en plus ou moins grand nombre des régulations (robinets thermostatiques, électrovannes, etc.) fait évoluer constamment le coefficient de pertes de charge global du réseau (somme des coefficients de Darcy λ et du coefficient des pertes singulières ζ).

Cela se traduit par :

- un point de fonctionnement qui remonte la courbe caractéristique de pompe,
- une diminution du débit global.



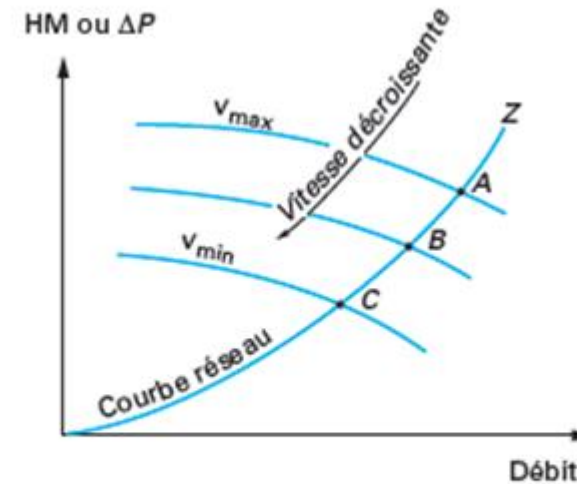
Lorsque la résistance hydraulique du réseau augmente par suite de la fermeture de régulations terminales, le point de fonctionnement se déplace sur la courbe caractéristique de pompe (de A vers B) avec pour conséquences :

- une diminution du débit ;
- une augmentation de la hauteur manométrique (HM).

Évolution du point de fonctionnement

Pompe à vitesse variable

L'utilisation de pompes à vitesse variable rend possible le pilotage de la pression dans un réseau. En effet d'après la théorie des pompes centrifuges d'Euler il suffit d'augmenter (respectivement diminuer) la vitesse de rotation des aubes pour augmenter (respectivement baisser) la pression dans la volute.

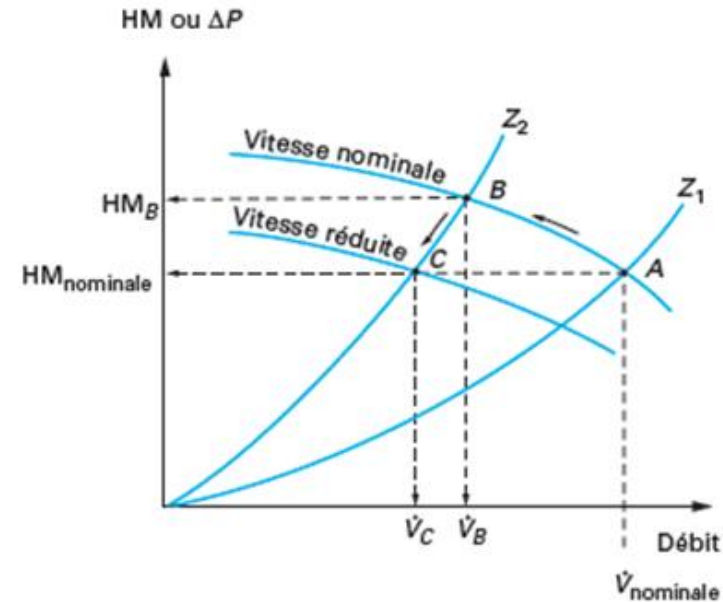


Selon la vitesse choisie le point de fonctionnement se déplace sur la courbe caractéristique du réseau.

Courbes caractéristiques
d'une pompe à vitesse
variable

Pompe à vitesse variable régulée

Généralement la vitesse est commandée par des capteurs de pression différentielle situés en tête de réseau de telle sorte que la hauteur manométrique est maintenue constante quel que soit le degré de fermeture des régulations terminales.

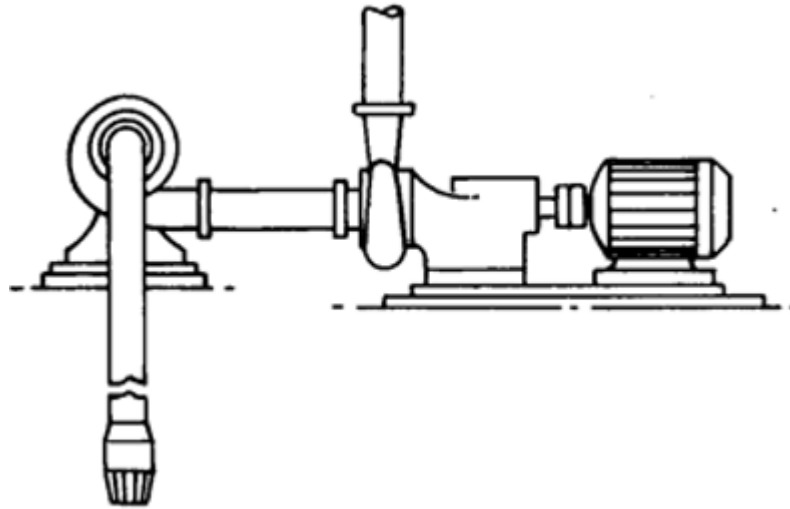


Le point A caractérise les conditions nominales ($Z_{\text{réseau}} = Z_1$)
Le point B caractérise les nouvelles conditions de fonctionnement en l'absence de régulation ($Z_{\text{réseau}} = Z_2$)
Le point C caractérise les conditions de fonctionnement lorsque la pompe est équipée d'un dispositif de régulation de la hauteur manométrique.

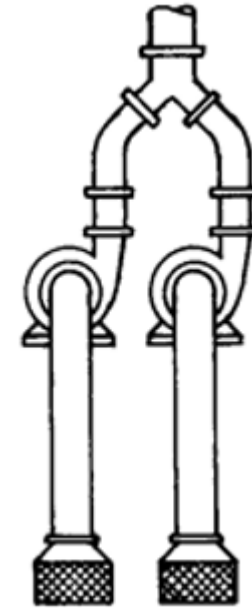
Régulation du point de fonctionnement (hauteur manométrique fixe)

Pompes en série ou en parallèle

Si une seule pompe n'est pas suffisante, nous pouvons mettre des pompes en série ou en parallèle.



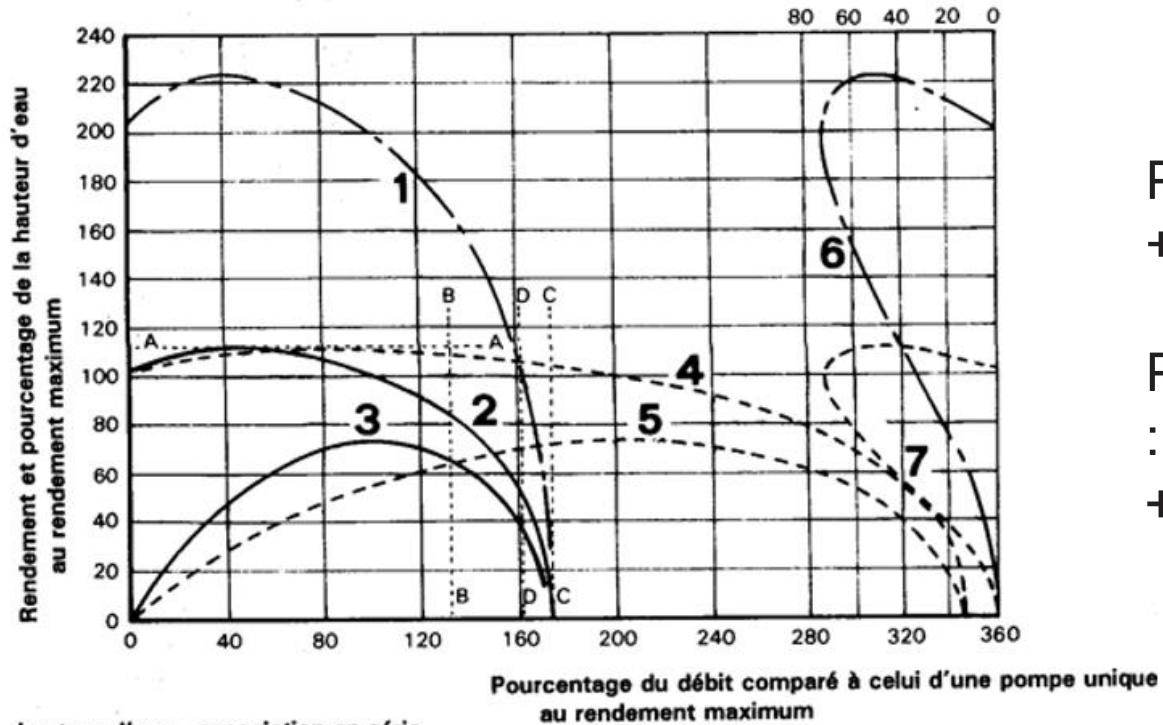
Pompe en série



Pompe en
parallèle

Pompes en série ou en parallèle

C. Courbes caractéristiques de deux pompes centrifuges analogues montées en parallèle ou en série



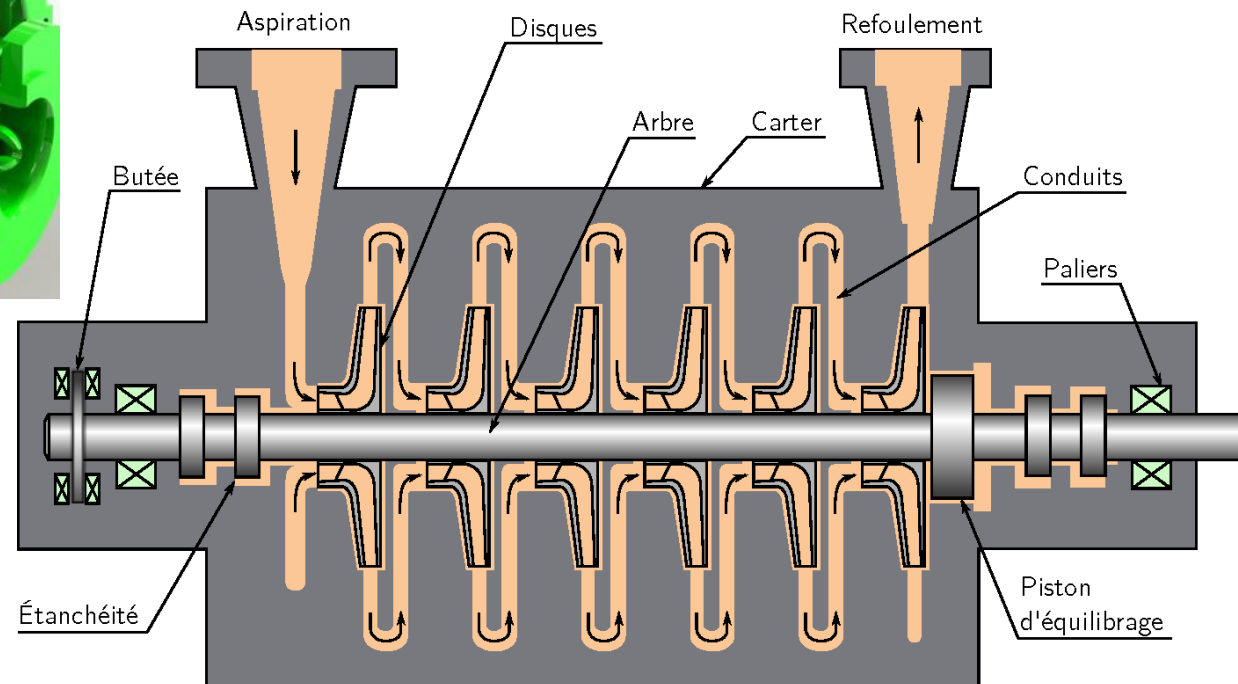
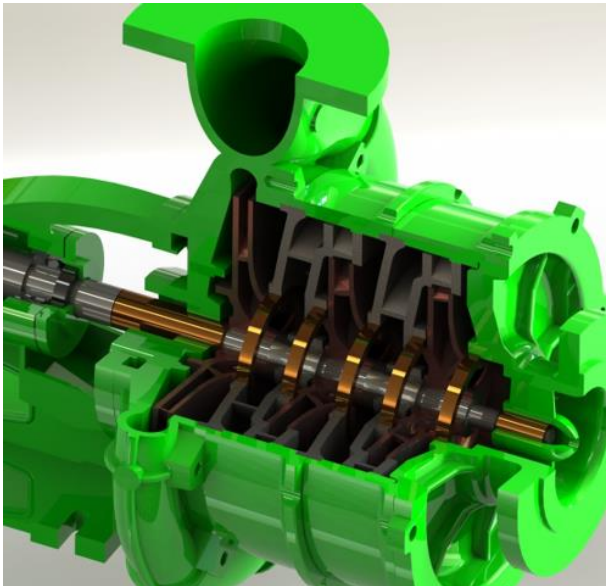
- 1 hauteur d'eau - association en série
- 2 hauteur d'eau - pompe seule
- 3 rendement - pompe seule ou association en série
- 4 hauteur d'eau - association en parallèle
- 5 rendement - association en parallèle
- 6 hauteur - rendement - association en série
- 7 hauteur - rendement - pompe seule ou association en parallèle

Pompe en série :
+ de hauteur d'eau

Pompe en parallèle :
+ de débit

Pompe multicellulaire

Les pompes multicellulaires sont comme une suite de pompe en série.



Protection et pompes auto-amorçantes.

Afin de protéger le corps de pompe des grosses impuretés, il faut installer une crépine, avec ou sans clapet anti-retour.



Il existe des pompes auto-amorçantes qui n'ont pas besoin de clapet anti-retour car l'aspiration est décalée vers le haut afin de toujours garder du liquide à l'intérieur du corps de pompe.



Webographie

<https://www.youtube.com/watch?v=d6P4GleZWOs>

Comment dimensionner une pompe en hauteur d'eau pour transporter de l'eau entre deux réservoirs à travers une canalisation comportant tuyaux, raccords, coudes, joints.

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

Différence de débit en fonction du diamètre du tube pour une même différence de pression statique.

https://www.youtube.com/watch?v=_mYfze3NTD4

Vidéo sur l'effet centrifuge.