



Université Mohamed Boudiaf – M'Sila
Faculté de Technologie
Département Génie électrique

Commande électrique des mécanismes industriels

Par : KHODJA Djalal Eddine

Année académique 2019-2020

Systemes d'entraînements électriques

Introduction Générale

Au total, 80% de la consommation d'électricité industrielle revient aux moteurs électriques. Les pompes et les installations à air comprimé y contribuent pour une part importante. Dans le secteur tertiaire également, les moteurs représentent une consommation considérable, avec comme principales applications la ventilation, les systèmes de réfrigération et la climatisation.

Beaucoup de systèmes utilisant des pompes, des ventilateurs, des compresseurs, ... et devant travailler dans des conditions de charge variable, sont régulés par étranglement ou par by-pass. Ce mode de régulation est énergivore : on accélère et on freine en même temps.

Introduction Générale

Il est nettement plus efficace de réduire la vitesse des moteurs pour l'adapter aux besoins. Par exemple, réduire de moitié la vitesse d'un ventilateur pour adapter le débit d'air frais à l'occupation d'un local permet de diviser par huit la consommation électrique du moteur.

Ceci est possible grâce aux variateurs de vitesse et aux énormes progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance.

Ainsi, dans toute application utilisant des moteurs (distribution de chauffage, ventilation, pompage, traction, ...), l'intérêt de la régulation de vitesse mérite d'être étudié: des dizaines de pourcents d'économie peuvent être faits sur la consommation électrique des moteurs.

La régulation de vitesse offre en outre des possibilités de régulation très attrayantes qui peuvent contribuer à l'amélioration du procédé principal.

Introduction Générale

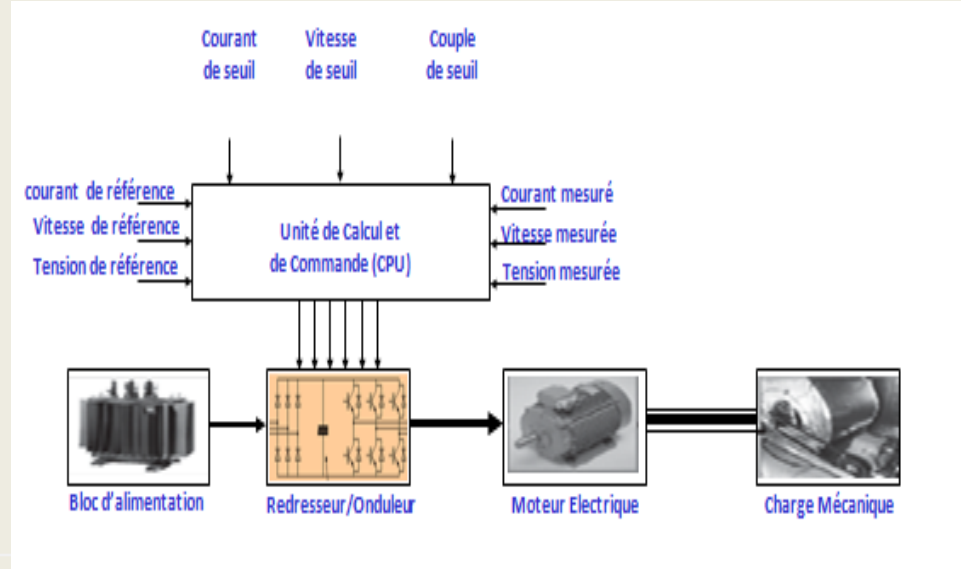
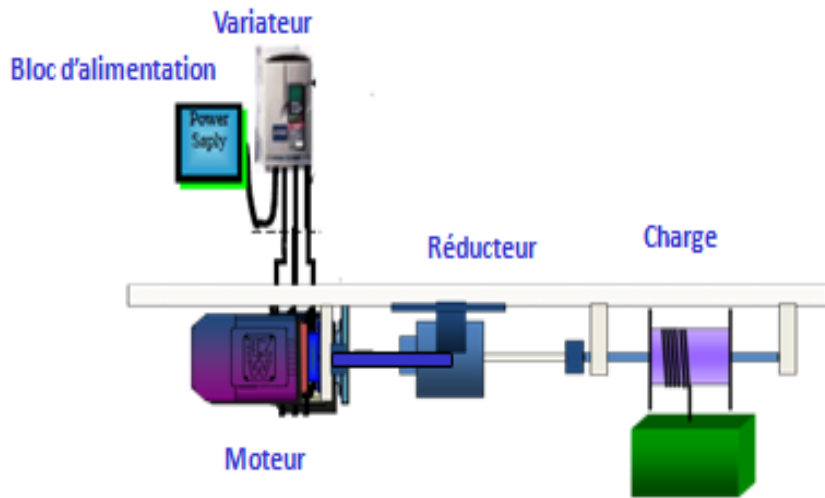
A l'origine, seuls les moteurs à courant continu étaient utilisés pour les entraînements à vitesse variable car ils permettaient d'obtenir la vitesse et le couple requis sans recourir à des dispositifs électroniques complexes.

Cependant, le développement des variateurs de vitesse à courant alternatif résulte en partie de la volonté d'obtenir les niveaux de performances très élevés des moteurs à courant continu (en termes de temps de réponse en régulation de couple et de précision en régulation de vitesse) avec des moteurs à courant alternatif, réputés pour leur robustesse, leur coût plus abordable et leur simplicité de maintenance.

Enfin, dans cette partie, on étudie la commande des machines électriques entraînant différentes machines de productions à savoir : les ventilateurs, les pompes, les tapis roulants, les transporteurs, broyeurs, les enrouleuses..., etc.

Système d'entraînements électriques

Un des composants essentiels des processus industriels actuels s'avère être le système électromécanique, qui est constitué d'un ensemble moteur, convertisseur-commande, et de la charge mécanique (voir figure 1.1). Sa gamme de puissance étendue et sa souplesse d'utilisation liées aux progrès de l'électronique de puissance ont contribué à son application réussie dans différents domaines [1].



Par ailleurs, Un système d'entraînement électrique ou système électromécanique convertit l'énergie électrique en énergie mécanique (un moteur électrique entraînant une charge $P_e=UI$ / $P_m=T\omega$) et vice-versa (une turbine entraînant un alternateur $P_m=T\omega$ / $P_e=UI$).

Cette transformation d'énergie est contrôlée généralement par un convertisseur électronique (redresseur, gradateur, onduleur ou hacheur selon l'entraînement ou l'application).

Un système d'entraînement c.a. comporte, en général, un transformateur d'entrée ou une alimentation électrique, un convertisseur de fréquence, un moteur c.a. et la charge entraînée.

Le convertisseur de fréquence comprend lui-même un redresseur, un circuit c.c. et un onduleur.

Constitution d'un système d'entraînement électrique :

A- Charge mécanique :

appelée aussi les machine de production (machine entraînée), on peut citer les pompes, ventilateurs, monte-charges, grues, scies, les pompes centrifuges, mélangeurs, Broyeurs, Séparateurs, concasseurs...etc., Ces machines de productions sont entraînées par des moteurs électriques et qui exercent sur ces moteurs un couple résistant qui peut être constant ou variable en fonction de la variation des la vitesse. Cette dernière fonction appelée caractéristique mécanique des machines de productions ($T_r=f(\omega)$).

B- Moteur électrique :

C'est la partie essentielle pour la conversion de l'énergie (machine entraînant). Cette partie qui peut être un moteur à courant continu ou un moteur asynchrone, développe un couple qui doit être supérieur au couple résistant au démarrage afin de pouvoir vaincre la charge. Une fois le moteur tourne, la vitesse prend de la valeur (Accélération), ainsi que la force électromotrice ou la tension induite, ce qui provoque la diminution du courant absorbé et le couple développé par le moteur jusqu'à où le couple devient égale au couple résistant ; par conséquent, la vitesse se stabilise et elle devient constante. Enfin, l'accélération, la décélération et le réglage de la vitesse du sont commandés par l'ensemble convertisseur et commande.

Constitution d'un système d'entraînement électrique :

C- Convertisseur électronique :

c'est un dispositif qui convertit l'énergie électrique en énergie électrique sous plusieurs formes pour l'alimentation du moteur électrique. Ce convertisseur peut être un redresseur, un gradateur, un onduleur ou un hacheur.

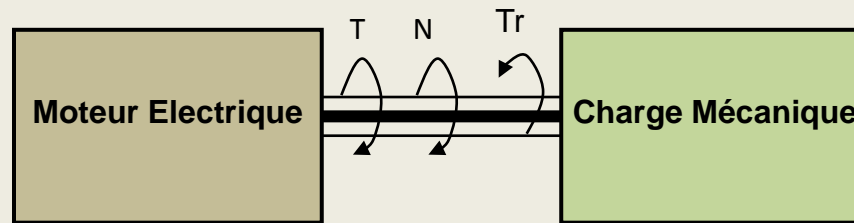
D- Unité de calcul et de commande :

C'est une partie informatique qui est à la base de l'électronique numérique. Elle sert à comparer les signaux de sorties qui proviennent de la partie mécanique et électrique avec les signaux d'entrées (signaux de références) afin de commander le convertisseur électronique pour l'alimentation du moteur électrique. En outre, cette partie s'occupe de la surveillance, de la régulation de la protection et de la mesure..., etc.

Equation de mouvement (la loi de commande) :

La deuxième loi de Newton (Eq I.1) caractérise la loi de commande de l'entraînement électrique appelé aussi équation de mouvement. A partir de cette équation, on peut suivre le comportement de la machine électrique entraînant une charge mécanique (voir figure .I.2).

$$T - T_r - f\omega = J_{tot} \frac{d\omega}{dt} \quad (I.1)$$



T : Couple développé par le moteur

T_r : Couple résistant de la charge exercé sur le moteur

$f\omega$: Couple résistant dû au frottement

f : Coefficient de frottement

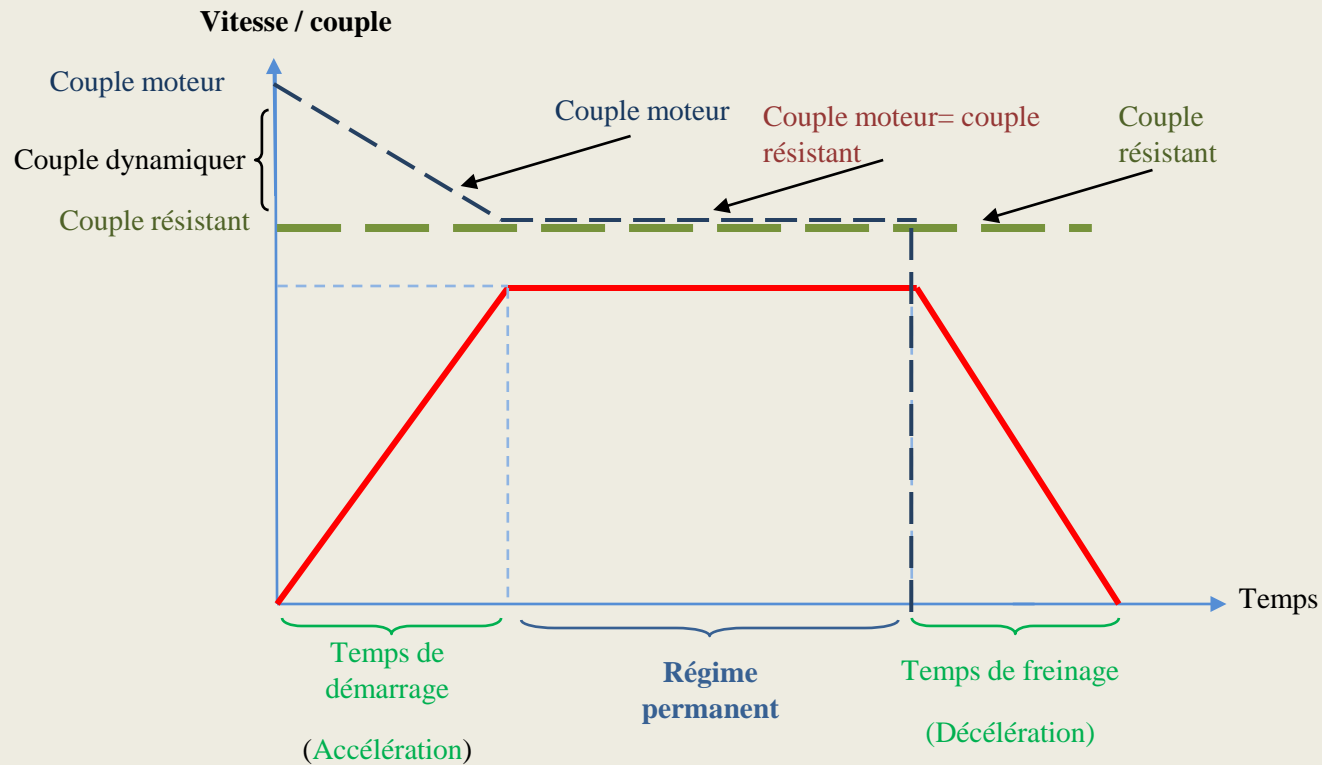
ω : Vitesse de rotation moteur

J_{tot} : La somme des moments d'inertie moteur plus la charge

$\frac{d\omega}{dt}$: Accélération du moteur

Evolution de l'équation de mouvement :

Selon l'équation de mouvement, la machine peut fonctionner en trois régimes de fonctionnement (voir figure I.3).

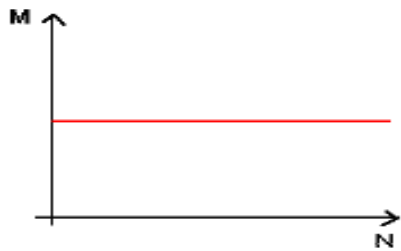


Caractéristiques mécaniques des machines de production (machines entraînées)

Les caractéristiques mécaniques des machines de production sont généralement représentées par les diagrammes vitesse - couple ou vitesse - puissance. Nous avons présenté ces caractéristiques pour les applications classiques suivant quatre catégories. La première (1) regroupe les transporteurs, grues, pompes volumétriques et machines-outils. La seconde (2) correspond aux machines de type rouleaux, laminoirs, malaxeurs. La troisième (3) regroupe les machines utilisant la force centrifuge, comme les ventilateurs et pompes centrifuges, centrifugeuses. Enfin la quatrième (4) correspond aux machines utilisant une force de traction pour enrouler des matières.

Courbes caractéristiques du MAS et des différentes charges.

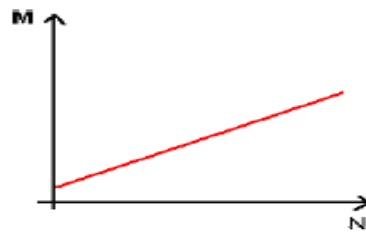
Allures de couples résistants caractéristiques



M constant
P linéaire

Levage, pompage

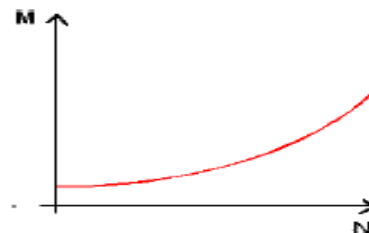
$$M = k_1$$



M proportionnel
P quadratique

pompe volumétrique,
mélangeur

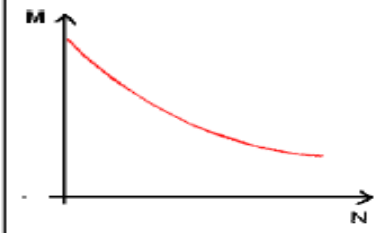
$$M = k_1 + k_2.N$$



M quadratique ou
cubique

ventilateur

$$M = k_1 + k_2.N + k_3.N^2$$



M inversement
proportionnel
P constante

enrouleur, compresseur,
essoreuse

$$M = k/N$$



Mécanismes industriels

Constitutions et caractéristiques techniques

LES POMPES :

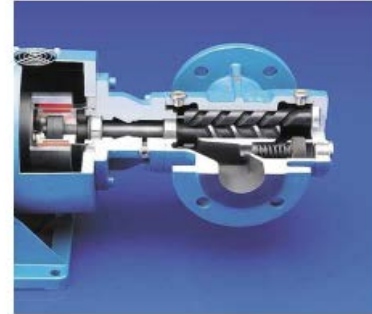
Par définition, une pompe est un dispositif permettant d'augmenter la pression et/ou le débit d'un liquide. Lorsque le fluide transporté est un gaz, il est plus correct de parler de ventilateur, de compresseur ou de soufflante.



Pompe centrifuge



Pompe péristaltique



Pompe à vis

LIQUIDE



Soufflante



Compresseur



Ventilateur

GAZ

Il existe deux grandes familles de pompes :

- **les pompes volumétriques**
- **les pompes rotodynamiques**

Dans les premières, l'accroissement de l'énergie du fluide est obtenu en faisant varier le volume d'une « capacité ».

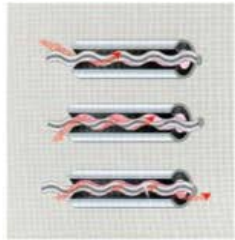
Dans les secondes, l'accroissement de l'énergie du fluide est réalisé grâce à une pièce en rotation appelée la roue, le rotor ou l'hélice.

Pompes volumétriques

Compte-tenu de leur fonctionnement, les pompes volumétriques ne refoulent du liquide que pendant une partie de cycle et, en conséquence, le débit du fluide n'est pas constant dans le temps mais pulsé.

La régularité du débit peut être obtenue par une pompe double effet (les deux faces du piston travaillent) ou à deux têtes ou par une pompe multi-têtes. Pour éviter les pulsations, la conduite de refoulement peut être équipée d'une capacité anti-pulsatoire encore appelée anti-bélier.

Pompes volumétriques rotatives



À rotor hélicoïdal



À lobes



À vis



À engrenages

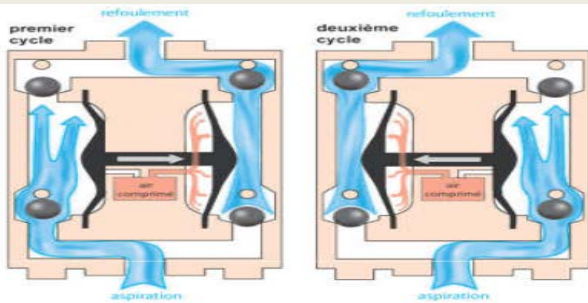


À palettes

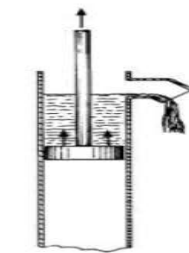
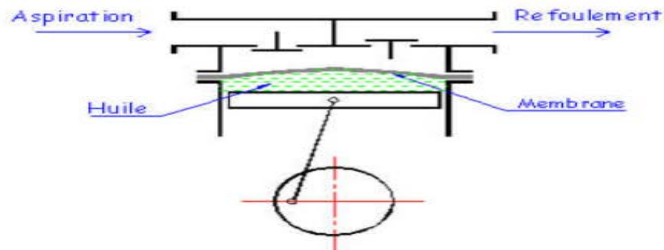


péristaltiques

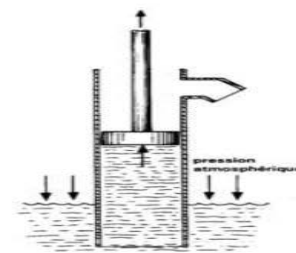
Pompes volumétriques alternatives



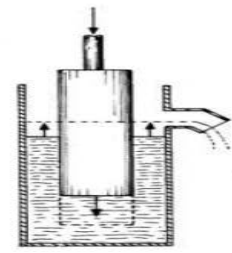
À membrane



(a) élévation directe

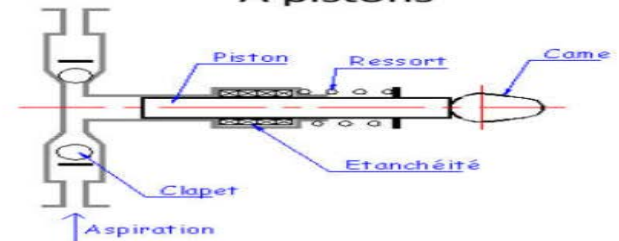


(b) Aspiration



(c) Foulage

À pistons



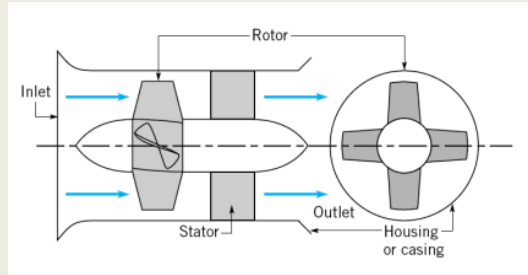
Pompes volumétriques - avantages et inconvénients

Pompe	Avantages	Inconvénients
Pompe à membrane	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de pièces en rotation • Fonctionnement à sec possible • Etanchéité par garniture mécanique 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitée par la température (plastique) • Pulsations importantes • Etanchéité des clapets (liquides chargés)
Pompe à engrenages	<ul style="list-style-type: none"> • Débit régulier • Silencieuse • Etanchéité par garniture mécanique 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de particules solides • Pas de fonctionnement à sec • Etanchéités des clapets (liquides chargés)
Pompe à vis	<ul style="list-style-type: none"> • Silencieuse, auto-amorçante • Bon rendement, rapides, réchauffage possible • Etanchéité par garniture mécanique 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de particules solides, ni de produits abrasifs • Nombreuses pièces d'usures
Pompe à vis excentrée	<ul style="list-style-type: none"> • Débit régulier, silencieuse • Permet le passage de particules solides, de produits abrasifs, de pâtes... 	<ul style="list-style-type: none"> • Ne tolère pas la marche à sec • Non auto-amorçante • Encombrement important
Pompe à péristaltique	<ul style="list-style-type: none"> • Pompage de produits chargés et abrasifs • Fonctionnement à sec possible • Silencieuse, auto-amorçante 	<ul style="list-style-type: none"> • Pulsations importantes • Faibles températures d'utilisation • Maintenance préventive : risque rupture du tube
Pompe à palettes	<ul style="list-style-type: none"> • Silencieuse, auto-amorçante • Pas d'émulsion due au pompage 	<ul style="list-style-type: none"> • Usures de corps par frottement des palettes • Pression limitée • Entretien coûteux

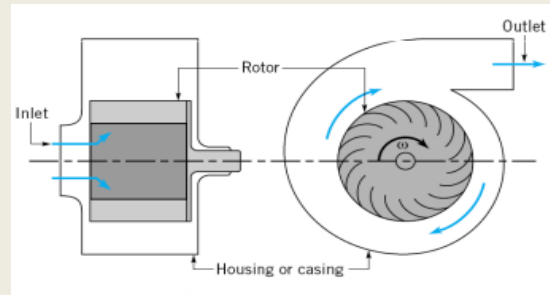
Pompes rotodynamiques

Parmi les pompes rotodynamiques, on distingue 3 familles selon la direction moyenne de l'écoulement.

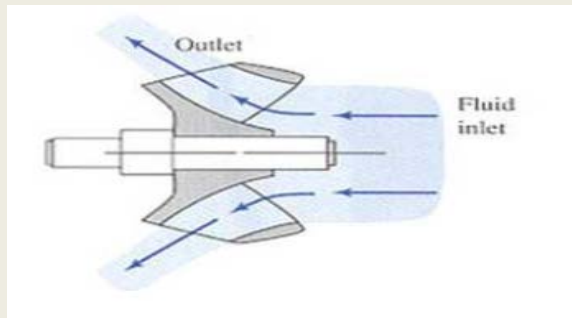
Si la direction générale de l'écoulement est parallèle à l'axe de rotation de la machine, on dit que la turbomachine est **axiale**.



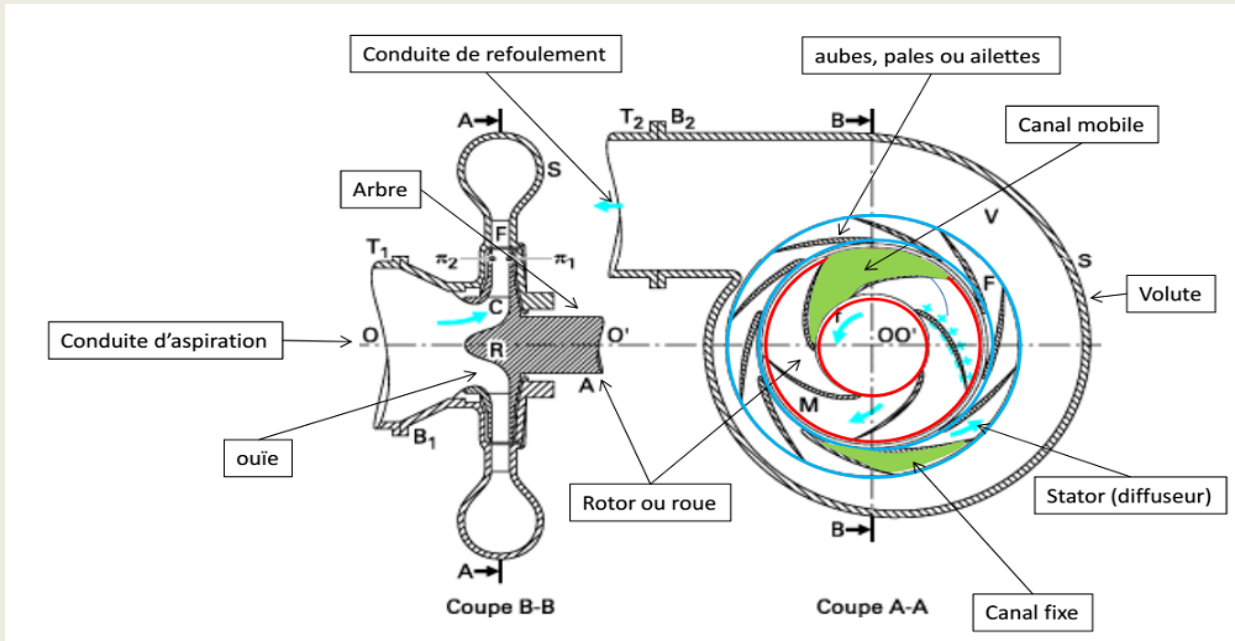
Si la direction générale de l'écoulement est perpendiculaire à l'axe de rotation de la machine, on dit que la turbomachine est **radiale**.



Il existe des turbomachines dans lesquelles la direction générale de l'écoulement a une composante axiale et une composante radiale. On parle alors de turbomachine **mixte**.



Pompes centrifuges – description générale



Pompes centrifuges – transfert de l'énergie

Etape 1 : le rotor donne un travail au fluide par l'intermédiaire des aube

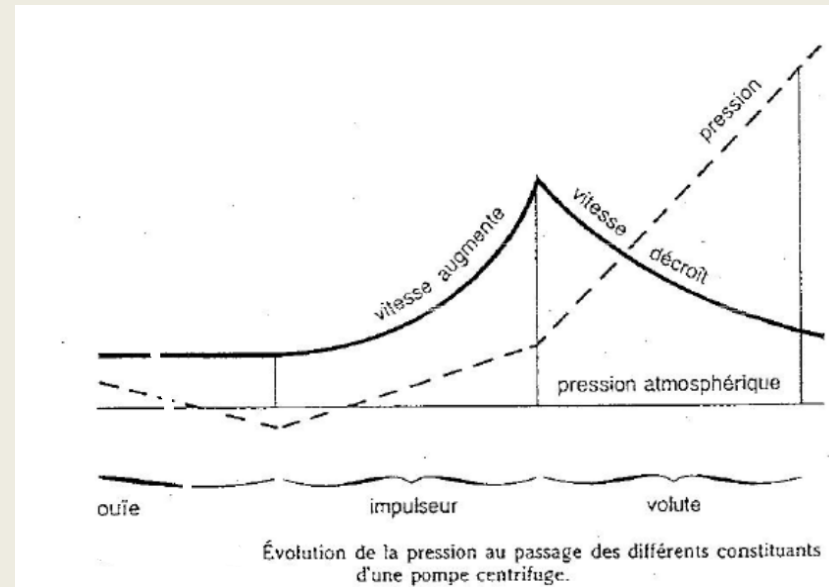
Augmentation de l'énergie cinétique du fluide

Etape 2 : le fluide est ralenti dans le diffuseur (stator)

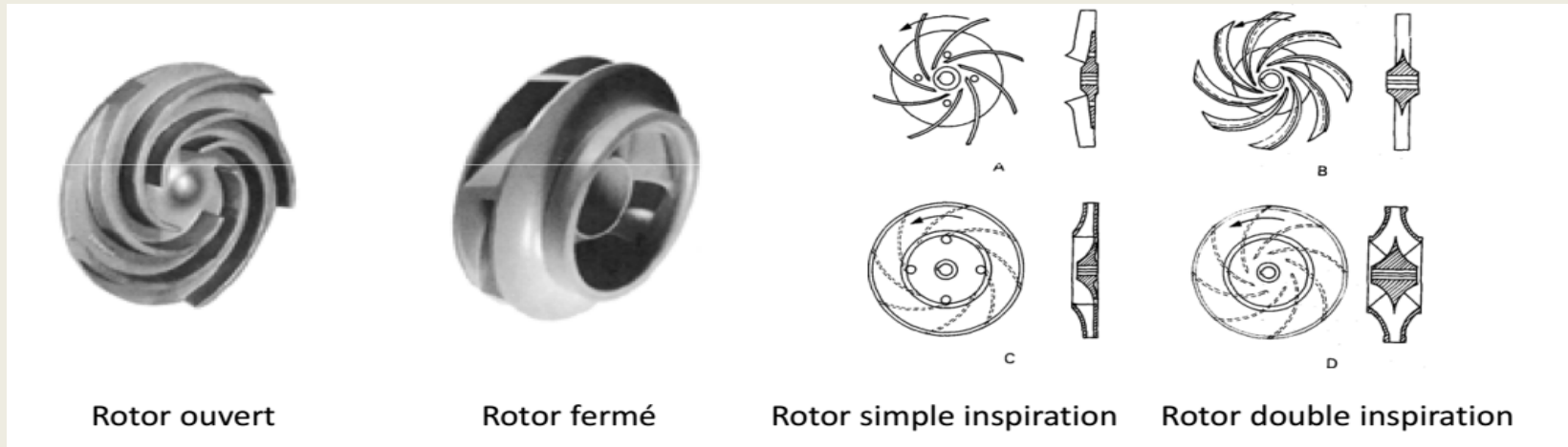
Transformation de l'énergie cinétique du fluide en énergie de pression

Etape 3 : le fluide est encore ralenti puis évacué dans la volute

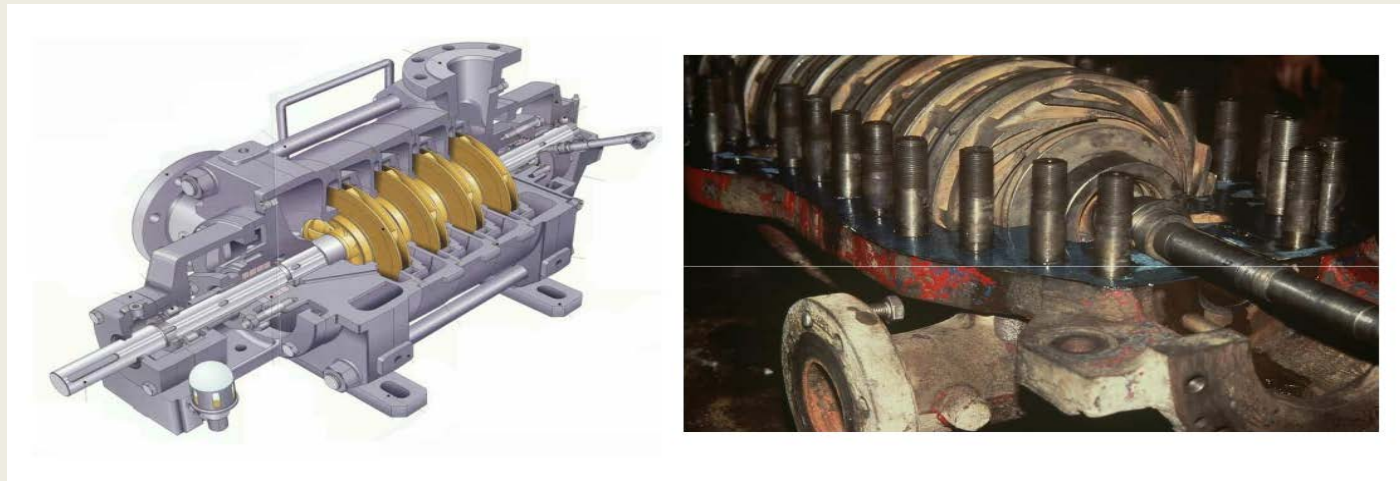
Transformation de l'énergie cinétique résiduelle du fluide en énergie de pression



Pompes centrifuges – types de rotor



Pompes centrifuges multi-étages



- même débit que dans une pompe mono étage
- chaque étage apporte une élévation de pression supplémentaire

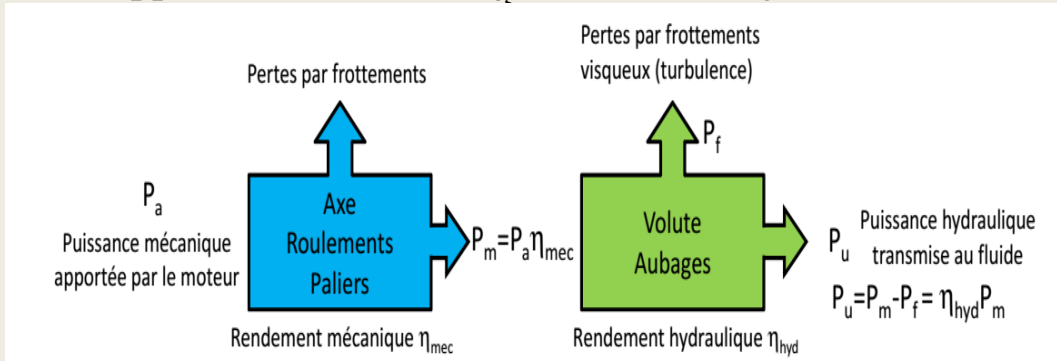
Notion de rendement

- La pompe fonctionne grâce à un moteur qui l'actionne et qui apporte une puissance P_a qu'on appelle la puissance à l'arbre.
- Sans perte, dans l'idéal, cette puissance serait entièrement cédée au fluide. On pourrait théoriquement élever le fluide de la hauteur H_{th} telle que :

$$P_a = q_v \rho g H_{th}$$

- En réalité, à cause des pertes, le fluide ne récupère qu'une fraction η_g de cette puissance à l'arbre. On l'appelle la puissance réelle ou utile P_u .
- L'eau ne s'élève que de la même fraction η_g de la hauteur théorique. On l'appelle la hauteur manométrique ou la charge utile ou la charge réelle H_u .
- On appelle cette fraction η_g le rendement global :

$$\eta_g = \frac{P_u}{P_a} = \frac{H_u}{H_{th}}$$



Avec la puissance P_u récupérée, on peut théoriquement élever le fluide sur une hauteur H avec un débit q_m tels que:

$$P_u = q_m g H = \eta_{hyd} P_m$$

Le rendement hydraulique est donc :

$$\eta_{hyd} = \frac{q_m g H}{P_m} = \frac{P_u}{P_m}$$

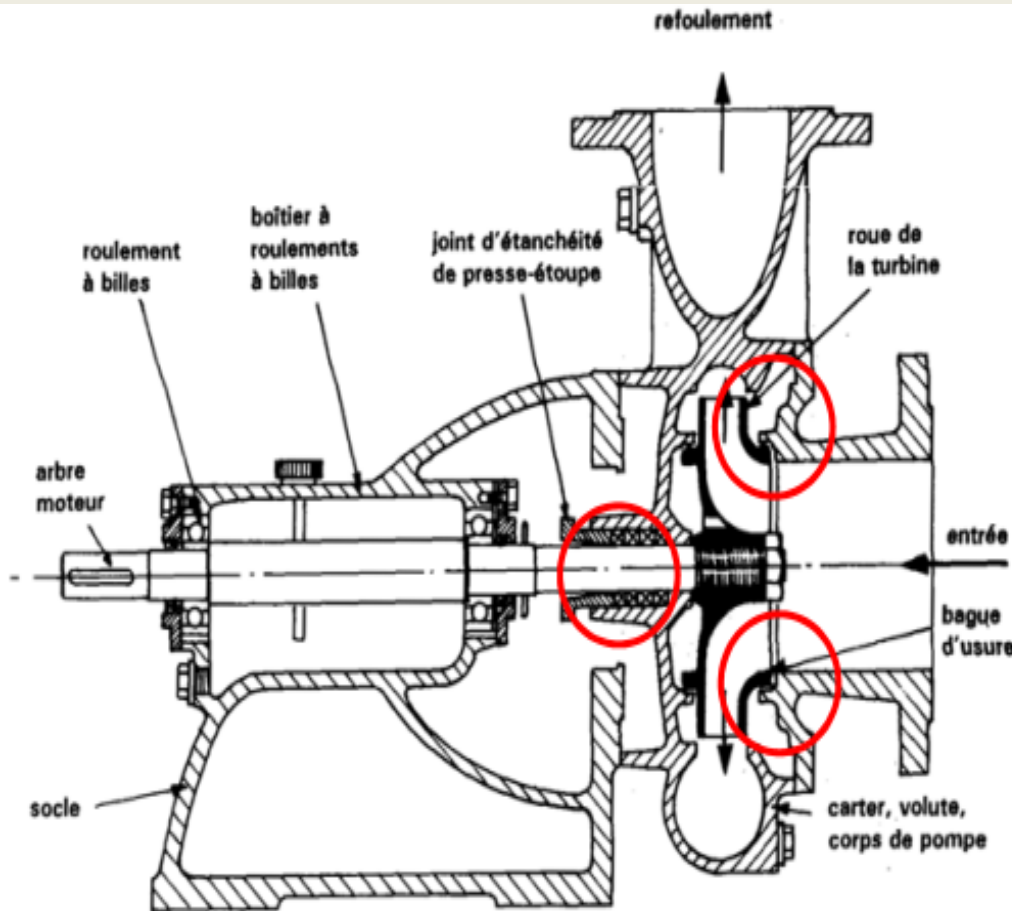
La puissance motrice pour une pompe rotative P_m se calcule à l'aide de la relation d'Euler

$$\eta_{global} = \eta_{hyd} \times \eta_{mec}$$

Notion de rendement - pertes par fuites

- Entre la roue et la partie fixe, il y a un débit de fluide que l'on réduit au maximum par un système de garniture.
 - Le long de l'arbre, il peut également y avoir des pertes de fluide.
- q_{fuites}

Ces pertes sont caractérisées par le rendement volumétrique

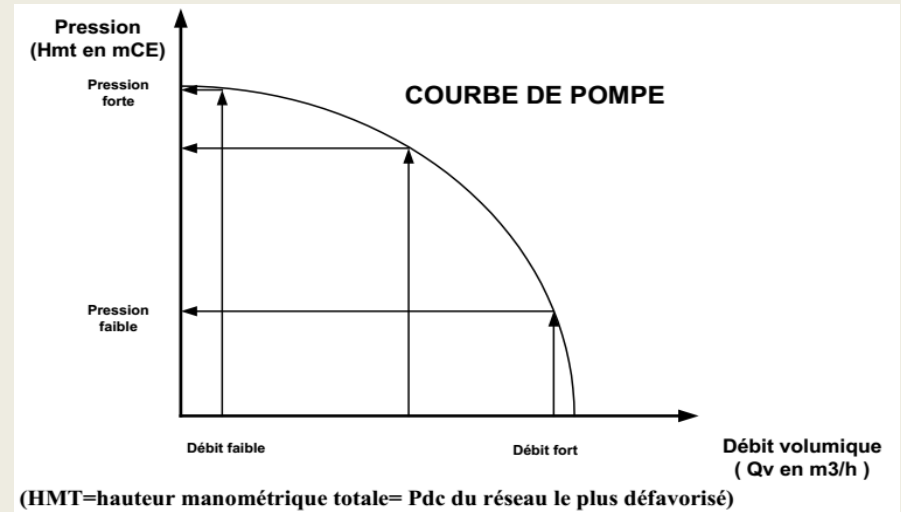
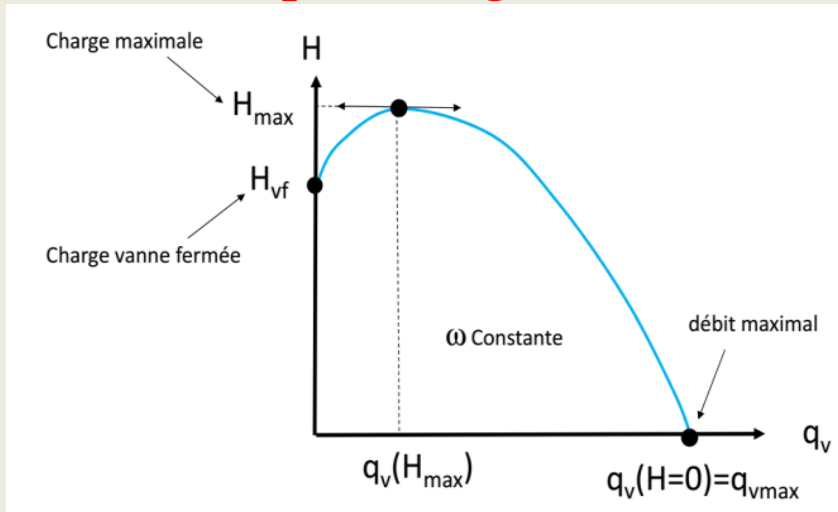


Débit du fluide qui traverse les aubes

$$\eta_v = \frac{q_v}{q_v + q_{fuites}}$$

Débit total du fluide dans la machine

Caractéristique Charge-Débit



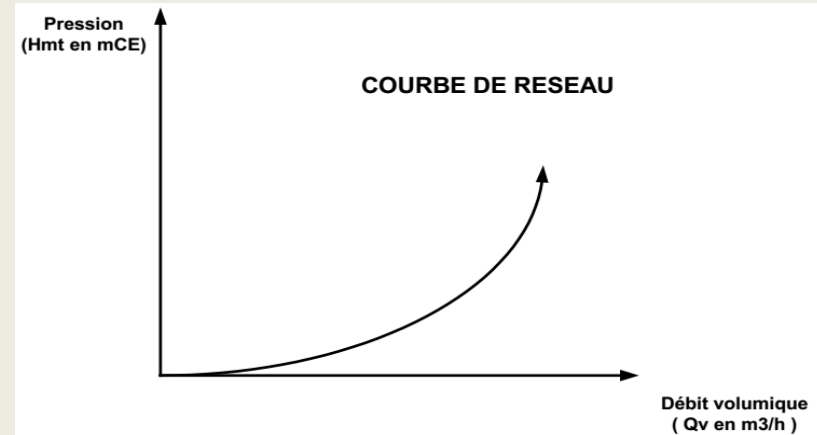
Caractéristique d'un réseau

A un débit donné, correspond une Pdc (différence de pression DP) du aux frottements dans les canalisations et aux accidents de parcours. Plus le débit augmente dans les canalisations et plus il y a de Pdc. La relation exprimant l'évolution des Pdc en fonction du débit volumique est :

$$\frac{DP1}{Qv1^2} = \frac{DP2}{Qv2^2}$$

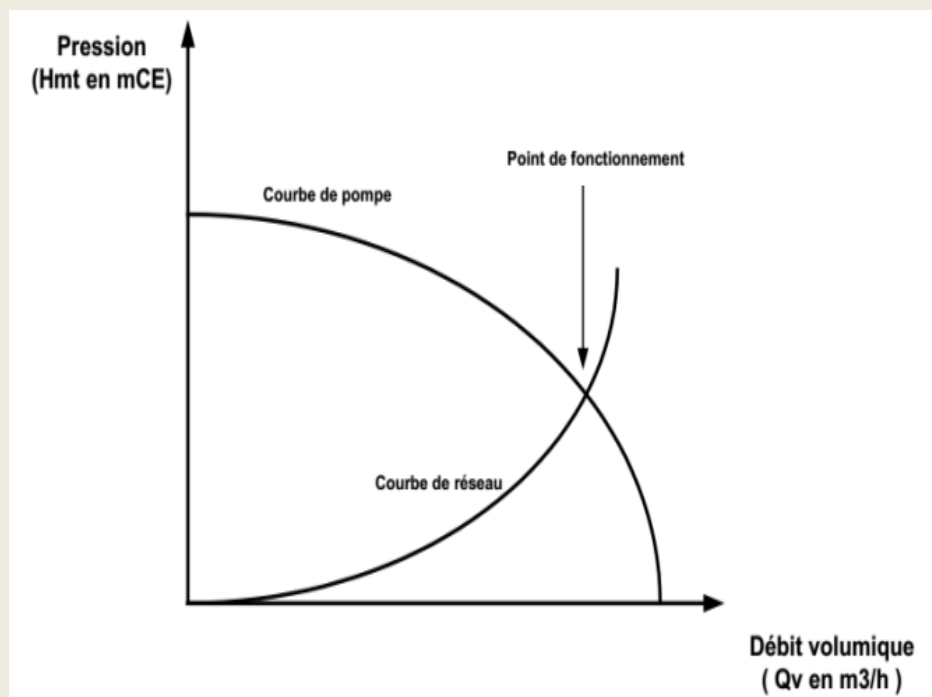
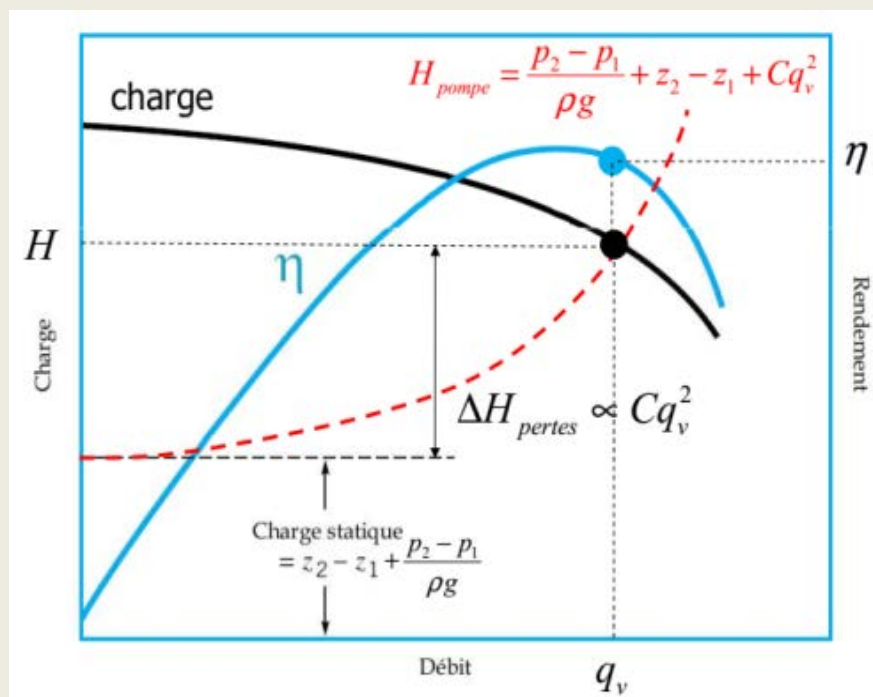
On s'aperçoit que le rapport des Pdc varie en fonction du carré du débit.

$$\frac{Qv1^2}{Qv2^2} = \frac{DP1}{DP2} \quad \text{ou} \quad \frac{DP1}{Qv1^2} = \frac{DP2}{Qv2^2}$$



Recherche du point de fonctionnement théorique

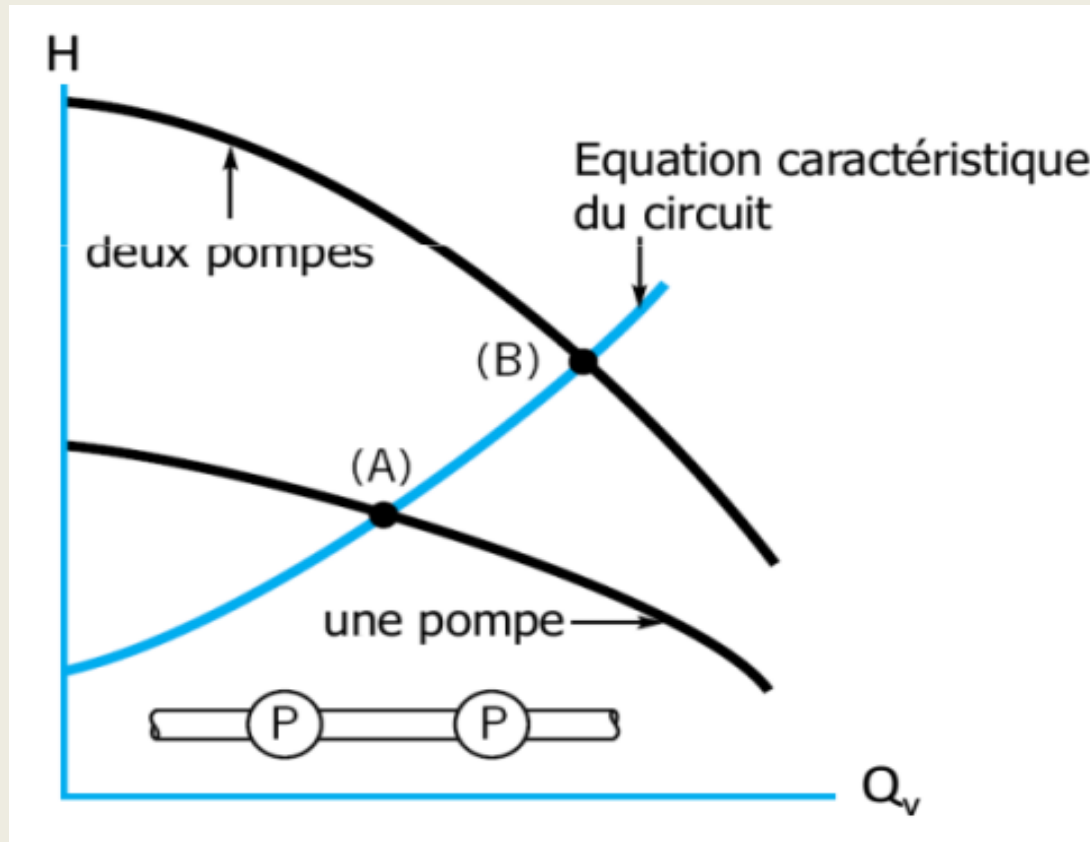
Le point de fonctionnement du réseau est le point d'intersection entre la courbe de réseau et la courbe de pompe.



Pompes en série

On utilisera des pompes en série lorsqu'on cherchera à augmenter la charge du réseau (agrandissements du réseau).

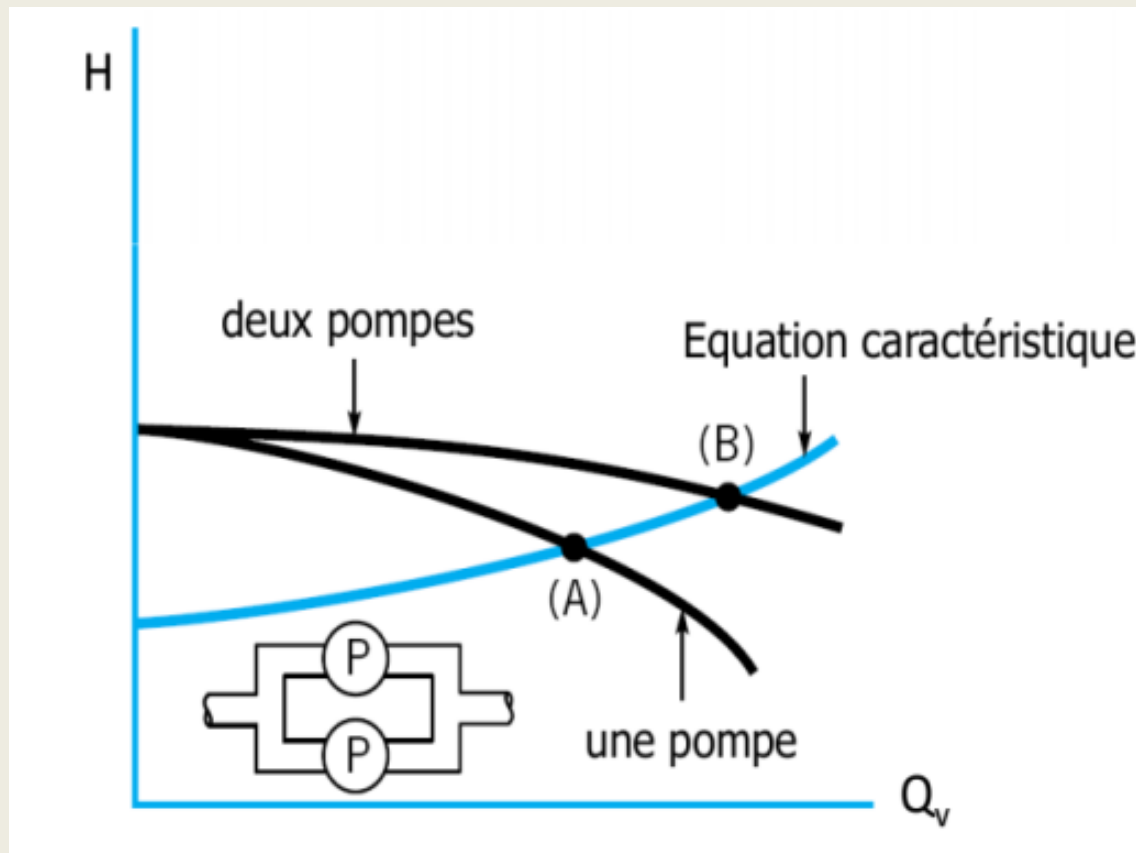
Le groupement en série est caractérisé par le même débit total traversant les 2 machines. Si les deux pompes sont strictement identiques, la courbe caractéristique de l'ensemble s'obtient en faisant la somme des ordonnées (des charges) des 2 courbes caractéristiques pour une abscisse (ou un débit) donnée.



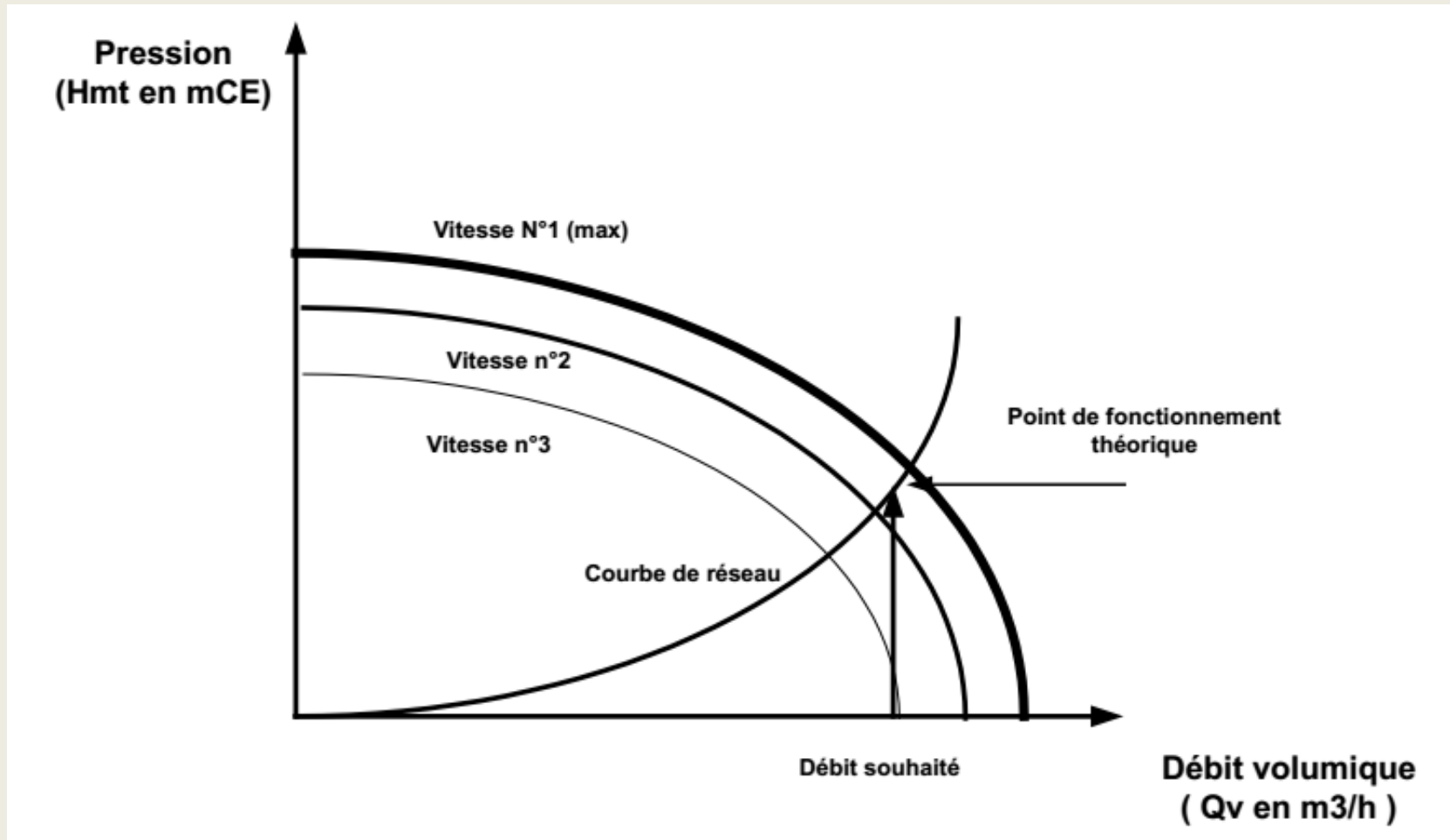
Pompes en parallèles

On utilisera des pompes en parallèle lorsqu'on cherchera à augmenter le débit du réseau

Le groupement en parallèle est caractérisé par la même charge totale. Si les deux pompes sont strictement identiques, la courbe caractéristique de l'ensemble s'obtient en faisant la somme des abscisses (ou des débits) des 2 courbes caractéristiques pour une ordonnée (ou charge) donnée.

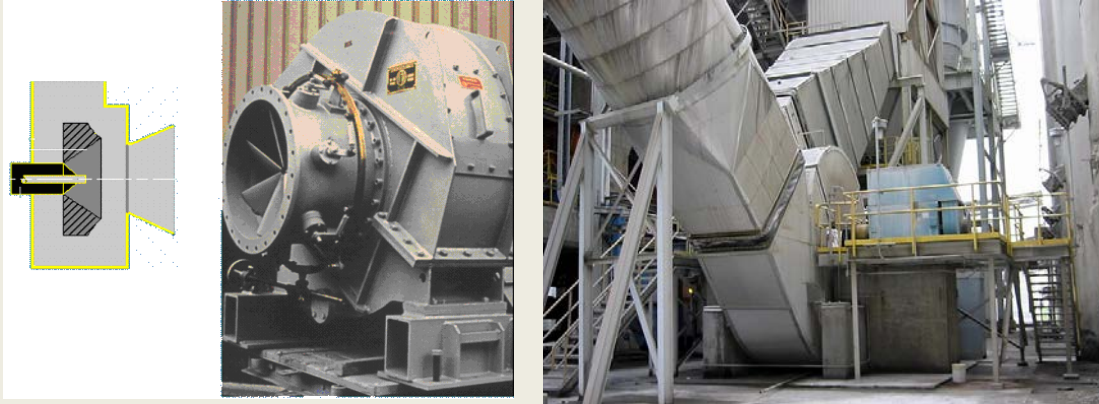


Pompe commandée par un variateur de vitesse



LES VENTILATEURS

La Fonction d'un Ventilateur est de déplacer l'air d'un emplacement à un autre en créant une pression différentielle qui crée un courant d'air.



Les Composants d'un Ventilateur

Le Moteur de Commande

Le Point d'Entrée du Ventilateur

Les Lames Guides de l'entrée

Le Pavillon d'Aspiration

L'Enveloppe du Ventilateur

La Volute

Les Tôles de Côté

La Turbine

Les Pales

Le Moyeu

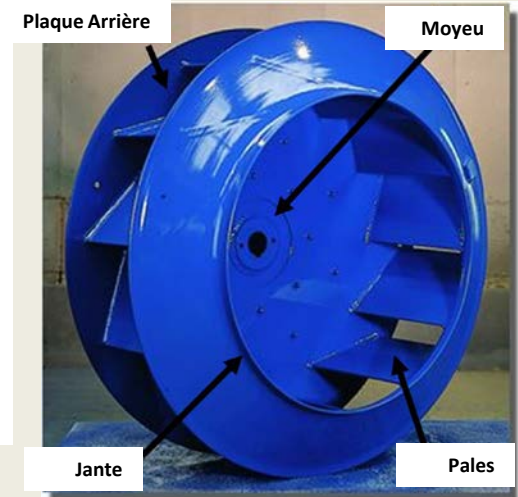
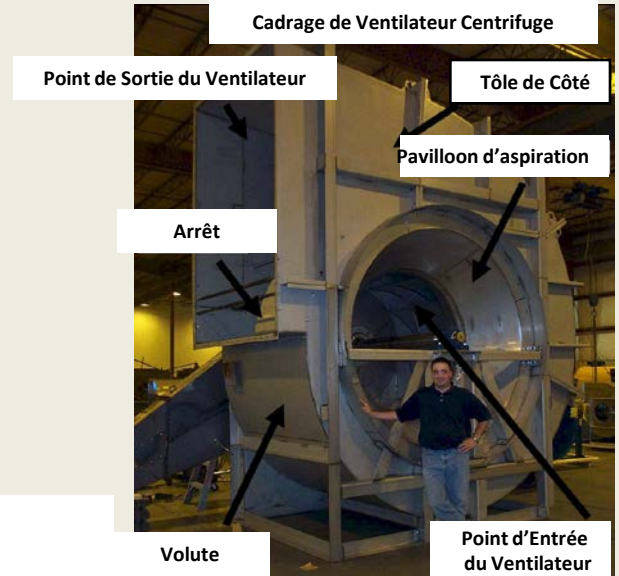
La Jante

La Plaque Arrière

L'Arbre du Rotor

Les Roulements de l'Arbre

Le Point de Sortie du Ventilateur



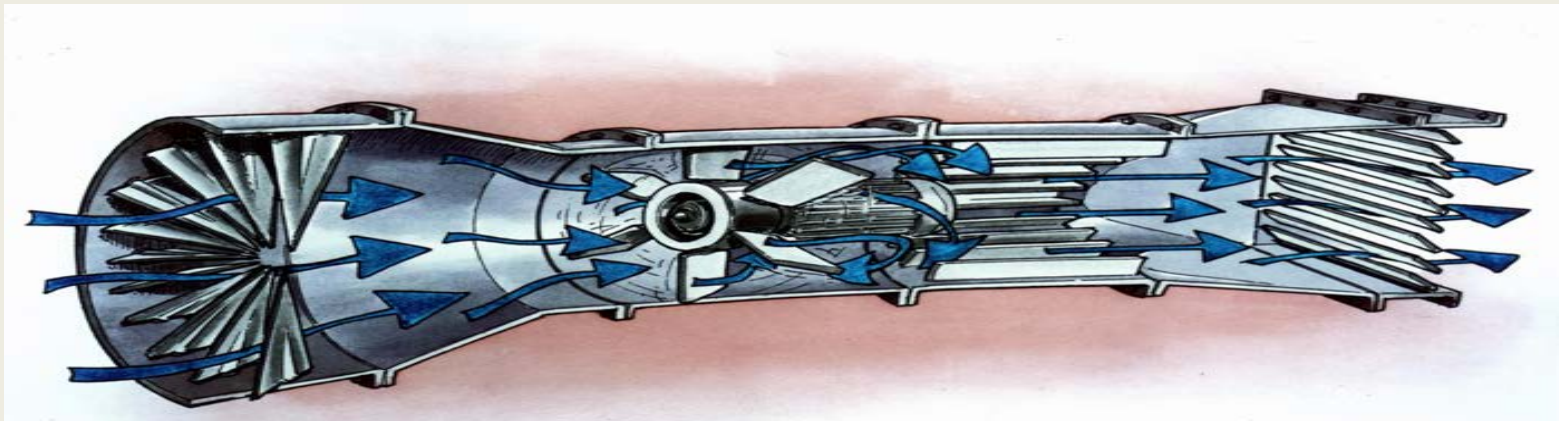
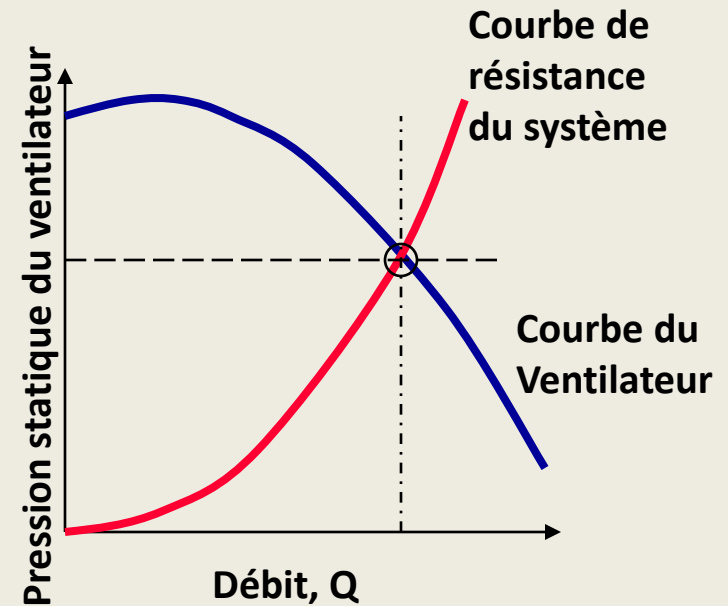
Le Principe de Fonctionnement d'un Ventilateur

- Le moteur de commande entraîne le rotor du Ventilateur
- Le ventilateur renvoie l'air vers l'extérieur grâce à la force centrifuge
- Cela crée une pression statique négative (P_s) à l'entrée du ventilateur
- La pression atmosphérique (P_a) force l'air dans l'entrée
- L'air qui quitte le ventilateur a une pression positive.
- La Pression totale = Pression dynamique + Pression Statique ($P_t = P_s + P_d$)

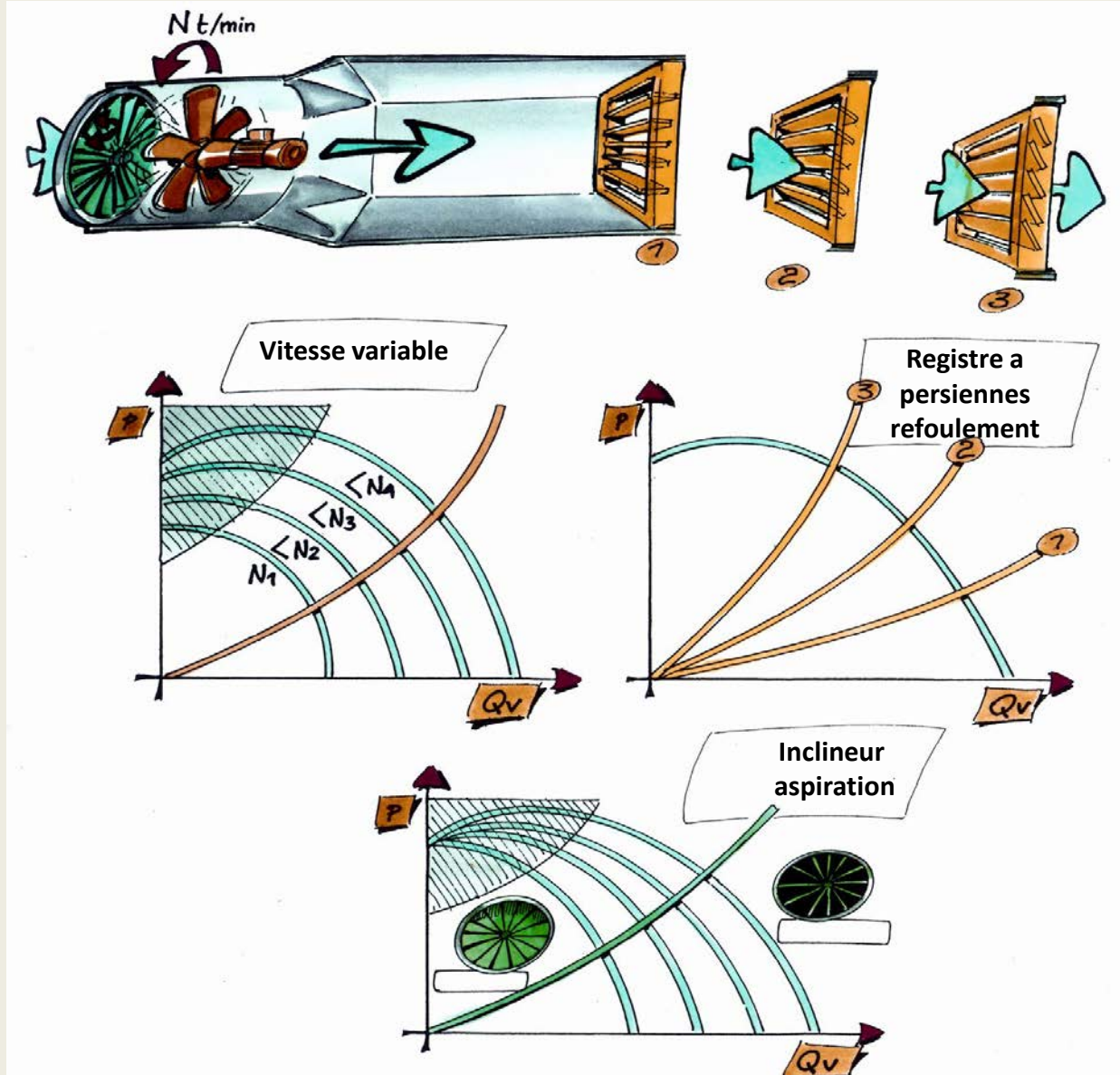


Courbes du ventilateur

- $P.S.V. = X * Q^2$
- Courbe de "performance" du ventilateur basée sur le design du ventilateur
- Utiliser les lois de ventilateurs pour ajuster à une densité commune
- La puissance est mesurée à l'arbre du ventilateur - ajouter les pertes moteur et les pertes de transmission
- On prend la mesure à l'intersection de la courbe réelle du ventilateur et la courbe de résistance réelle du système



Choix des éléments réglants le ventilateur

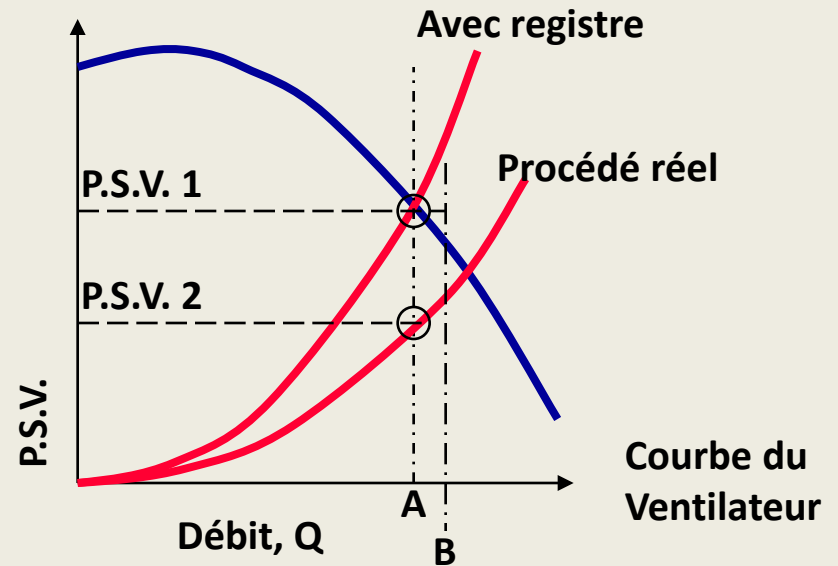
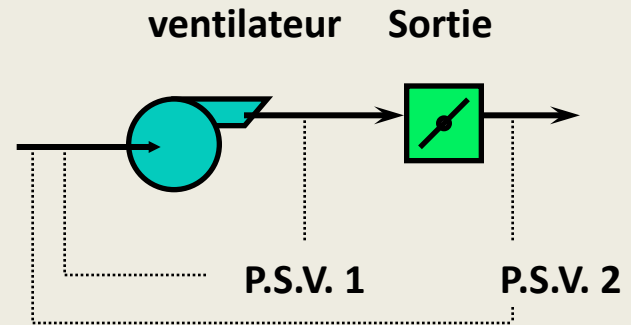


Choix des éléments réglants le ventilateur

	Vitesse variable	inclineur	registre
Consommation d'énergie	+	++	+++
Coût investissement	\$\$\$	\$\$	\$

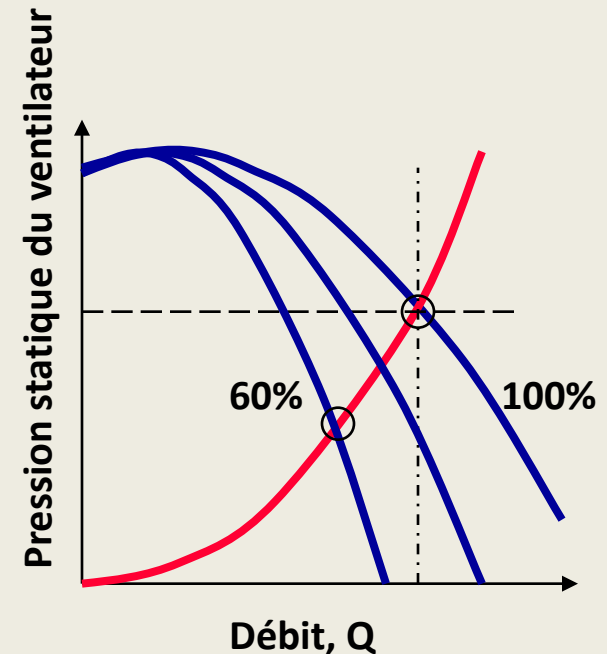
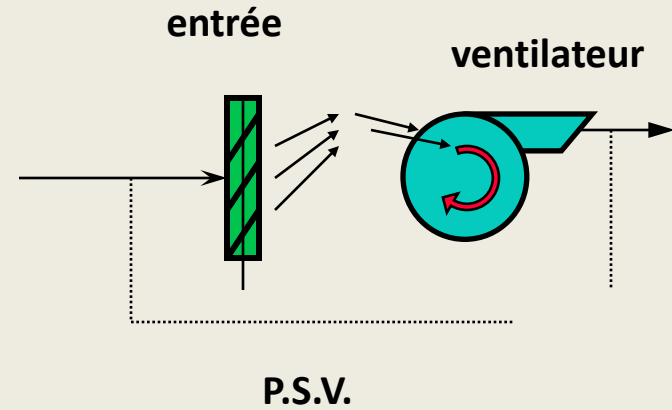
Réglage du Registre de Sortie

- Le registre régule le débit
- Pour trouver la courbe réelle du système, déduire la perte à travers le registre
- Installation la moins économique du point de vue énergie
- Le registre ajuste la courbe de résistance du système pour suivre la courbe du ventilateur



Les registres d'entrée

- Le registre donne un effet de giration au gaz à l'entrée pour délibérément créer un effet de système. (les ILD et VIV font la même chose)
- Le registre force la courbe du ventilateur à suivre la courbe de résistance du système
- Consommation énergétique modérée



Vitesse variable

- La courbe du ventilateur est modifiée pour suivre la courbe de résistance du système
- Meilleure Consommation énergétique
- Solution préférée avec des gaz sales
- Le prix des VDF diminue

