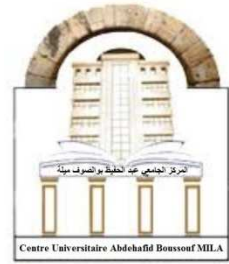




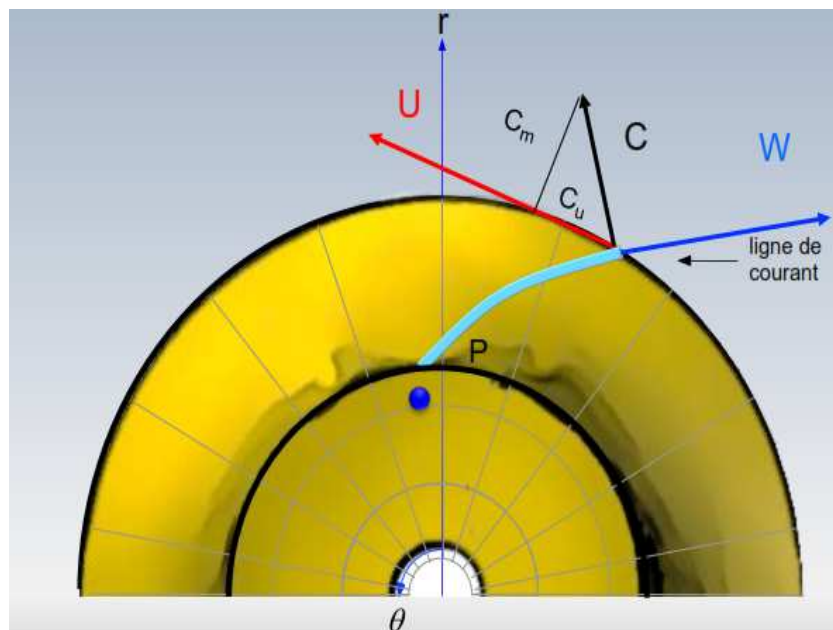
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique
Centre Universitaire Abdel Hafid Boussouf
Mila



Cours de Turbomachines

Chapitre II : Turbomachines à fluides incompressible

Présenté par : Dr. ZEGHBID Ilhem



Année universitaire 2019-2020

Objectif :

Au cours de ce chapitre nous avons présenté des généralités sur les turbomachines en détaillant les divers éléments techniques des pompes et des ventilateurs, nous avons explicité le fonctionnement de ces machines en fonction de leurs angles caractéristiques de construction, et nous avons également détaillé leurs caractéristiques de fonctionnement en fonction du débit et pour une vitesse de rotation de l'arbre de la machine constante.

A la fin du cours, l'étudiant doit être capable de :

- Décrire et expliquer le principe de fonctionnement des pompes, et comment faire le bon choix de cette dernière à travers le calcul d'une pompe dans une installation donnée.

Description du Chapitre II :

**Turbomachines à fluides incompressible
(Pompes et Ventilateurs)**

- **Généralités sur les turbomachines à fluides incompressible**
 - Description
 - Classification des turbomachines
- **Généralités sur les pompes**
 - Classification des pompes
 - Principe de fonctionnement des turbopompes
 - Eléments de base pour le calcul et le choix des pompes
- **Ventilateurs**
 - Ventilateurs centrifuges
 - Ventilateurs axiaux

I. Généralités sur les Turbomachines :

On appelle turbomachine un appareil dont le rôle est d'assurer un échange d'énergie mécanique entre un débit permanent de fluide et un rotor tournant à vitesse constante autour d'un axe. Selon le sens de l'échange d'énergie, la turbomachine sera dite **génératrice** lorsqu'elle communique de l'énergie au fluide et **réceptrice** lorsqu'elle en reçoit de celui-ci. Puisqu'elle consomme ou recueille de l'énergie mécanique sur son arbre, elle doit nécessairement être accouplée à une autre machine jouant un rôle de moteur dans le premier cas (moteur électrique, moteur diesel, turbomachine réceptrice) ou de machine entraînée dans le second (dynamo, alternateur, turbomachine génératrice).

Le fluide utilisé est généralement de l'eau (d'où le nom de machines hydrauliques), mais il peut être un liquide quelconque : pétrole, huile, ou un gaz comme l'air, pourvu que les variations de pression mises en jeu soient faibles devant la valeur absolue de la pression.

I.1. Description

Une turbomachine comprend, outre la roue (ou rotor), organe spécifiquement moteur ou récepteur, des éléments situés en amont ou en aval de celle-ci, destinés à amener et à évacuer le fluide.

Pour une turbine hydraulique on trouve, par exemple :

- à l'amont une bêche spirale (ou volute) aboutissant à un distributeur, formé d'aubes généralement orientables, destiné à donner aux filets fluides une direction adéquate avant leur introduction dans la roue.
- à l'aval on trouve un diffuseur destiné à transformer en pression l'énergie cinétique et l'énergie piézométrique de l'eau.

Pour une pompe on trouve :

- à l'amont un tube d'aspiration,
- à l'aval un diffuseur et une volute munis ou non d'aubages.

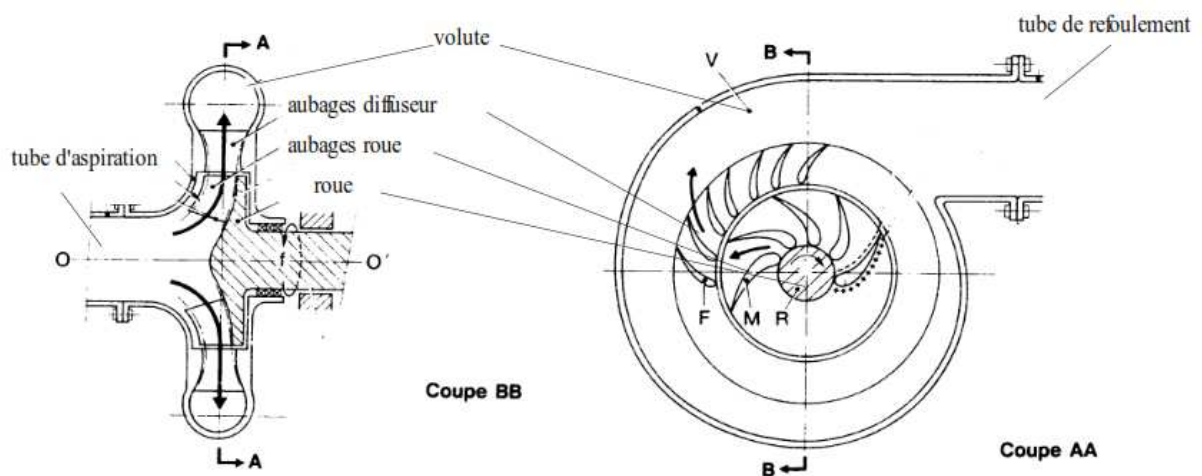


Figure 1: Description des Turbomachines

I.2. Classification des turbomachines

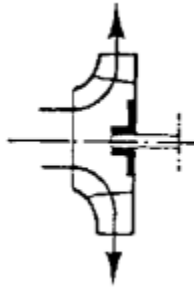
Il existe de nombreuses manières différentes de classer les turbomachines.

a- Suivant la forme du rotor

On distingue principalement trois grands types de machines suivant la manière dont la particule fluide traverse le *rotor de la machine* :

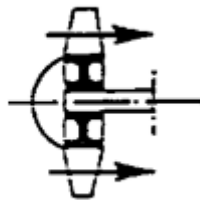
Machines radiales :

L'écoulement s'effectue dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation. On parle de machines centrifuges dans le cas de machines génératrices, et de machines centripètes dans le cas de machines réceptrices.



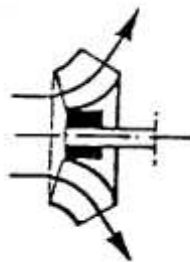
Machines axiales :

L'écoulement s'effectue dans un plan parallèle à l'axe de rotation.



Machines hélicoïdes :

Il s'agit de machines intermédiaires dans lesquelles l'écoulement s'effectue dans des surfaces de révolutions dont la méridienne est inclinée par rapport à l'axe de rotation.



b- Sens du transfert d'énergie

C'est-à-dire suivant s'il faut transformer l'énergie d'un fluide en énergie mécanique ou inversement. Comme nous l'avons déjà précisé, dans le premier cas il s'agit des machines réceptrices telles que les turbines hydrauliques ; dans le second cas il s'agit de machines génératrices comme les pompes, ventilateurs, etc. Les hélices aériennes et marines rentrent dans cette catégorie. Enfin il existe des machines, les turbines-pompes qui peuvent jouer les deux rôles.

II. Généralités sur les Pompes

Définition

Une pompe est une machine hydraulique qui aspire et refoule un liquide (l'eau, l'huile, l'essence,etc) d'un point à un endroit voulu.

La pompe est destinée à élever la charge du liquide pompé.

La charge ou l'énergie est la somme de trois catégories d'énergie :

- Energie cinétique $V^2/2g$
- Energie potentielle H ou Z
- Energie de pression $P/\rho g$

II.1. Classification des pompes

Il existe deux grands types de pompes :

- Les turbopompes, qui agissent sur l'énergie cinétique
- Les pompes volumétriques qui agissent sur l'énergie de pression

Pour les turbopompes, on utilise essentiellement les pompes centrifuges qui sont aujourd'hui les pompes les plus utilisés, elles peuvent être radiales, axiales ou mixte.

II.2. Principe de fonctionnement des Turbopompes

Les turbopompes sont actuellement parmi les plus employées des pompes. Les principales raisons de ce choix sont les suivantes ;

Ces appareils étant rotatifs et ne comportant aucune liaison articulée, leur entraînement par un moteur électrique, ne présente aucune difficulté. Selon le type du rotor et son mode d'action, on distingue dans la catégorie des turbopompes, les trois principaux types suivants :

- Les pompes centrifuges ;
- Les pompes hélices ou radiale ;
- Les pompes hélico-centrifuge ou semi-axiales.

Les pompes centrifuges sont les plus utilisées et elles couvrent 80% des pompes utilisées et présentent les avantages suivants :

- Machine de construction simple et nécessitant peu d'entretien
- Prix d'achat modéré, coût de maintenance faible
- Bon rendement (70% à 80%)
- Adaptées à toute sorte de liquide



Figure 2: Rotor d'une pompe centrifuge

Le principe de fonctionnement repose sur la variation de vitesse de l'eau pompée. Pratiquement, leur fonctionnement se résume en trois étapes :

- L'aspiration : assurée et facilitée par le distributeur ; la vitesse du fluide entrant augmente alors que la pression diminue
- L'accélération : assurée par le rotor ; la rotation de la roue augmente la vitesse du liquide et les forces centrifuges augmentent la pression.
- Le refoulement : assuré par le diffuseur, la vitesse diminue et la pression augmente. L'énergie cinétique est donc convertie en énergie de pression.

Les pompes centrifuges sont utilisées pour les hauteurs d'élévation relativement importantes et les pompes hélices pour les débits importants.

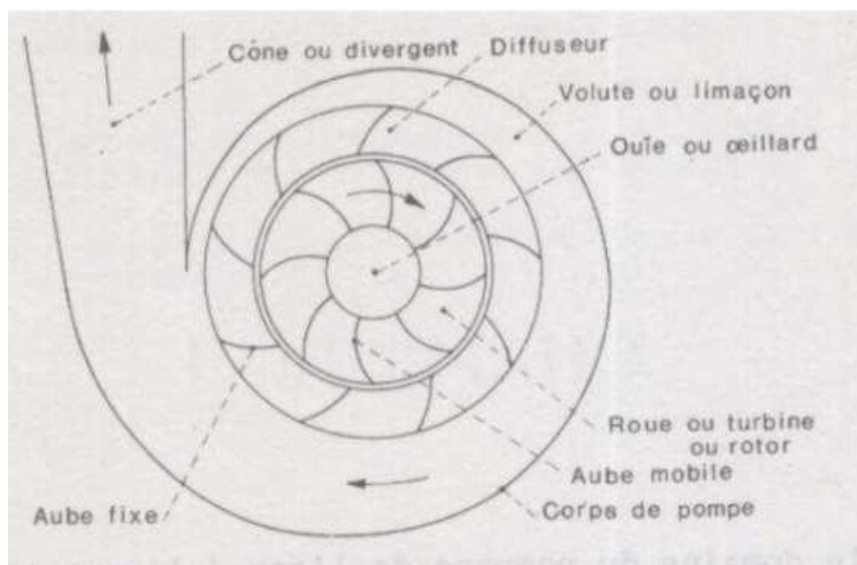


Figure 3: Constitution d'une pompe centrifuge

II.3. Eléments de base pour le calcul et le choix des Pompes

Nous présentons tout d'abord quelques définitions utiles à partir du schéma d'installation d'une pompe.

1. Débit d'une pompe Q

C'est le volume de liquide recueilli au refoulement de la pompe pendant l'unité de temps. Il s'exprime en (m^3/h) ou en litres par seconde (l/s).

2. Hauteur géométrique d'aspiration h_a

Lorsque la pompe est située au-dessus du plan d'eau, la hauteur géométrique d'aspiration h_a est la distance verticale séparant le niveau d'eau dans le puits et le niveau de l'axe de la pompe centrifuge.

3. Hauteur géométrique de charge h_c

Lorsque la pompe reçoit l'eau d'un réservoir en charge, la hauteur géométrique de charge est la distance verticale qui sépare le niveau d'eau dans ce réservoir et l'axe de la pompe centrifuge.

4. Hauteur géométrique de refoulement h_r

C'est la distance verticale séparant le niveau dans le réservoir de refoulement et l'axe de la pompe centrifuge.

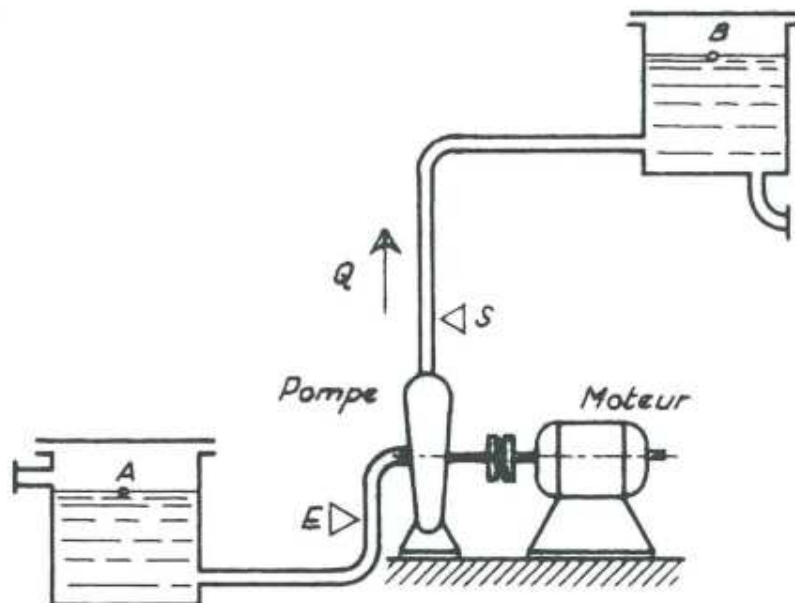


Figure 4: installation d'une pompe

5. Pertes de charge

Les auteurs ci-dessus ne correspondent pas exactement aux hauteurs manométriques auxquelles la pompe doit faire face ; il faut ajouter aux hauteurs géométriques d'aspiration et de refoulement la valeur des résistances que le liquide éprouve dans son déplacement et qu'il faut compenser, c'est-à-dire les **pertes de charges**.

Ces pertes qui sont en fait de réelles pertes d'énergie, sont produites non seulement par le frottement du liquide le long des parois, mais également par les multiples obstacles que ce liquide est appelé à rencontrer : coudes, tés, raccords, élargissement ou rétrécissement de section, accessoires de robinetterie,.... etc.

6. Hauteur manométrique d'aspiration H_{ma}

C'est la somme de la hauteur géométrique d'aspiration h_a , des pertes de charge J_a correspondantes au débit Q dans la tuyauterie,

$$H_{ma}=h_a+J_a+v^2/2g$$

7. Hauteur manométrique de refoulement H_{mr}

C'est la somme de la hauteur géométrique de refoulement h_r , des pertes de charge J_r correspondantes au débit Q dans la tuyauterie de refoulement et, éventuellement de la pression, exprimée en mètres de colonnes de liquide, régnant dans le réservoir ou refoule la pompe, et de la hauteur due à la vitesse du liquide, soit :

$$H_{mr}=h_r+J_r+v^2/2g$$

En pratique, $v^2/2g=0$

8. Hauteur manométrique totale d'élévation H_{mT}

La hauteur manométrique totale H_{mT} d'une pompe est la différence de pression en mètres de colonnes de liquide entre les orifices d'aspiration et de refoulement.

$$H_{mT}=H_{g\acute{e}om}+J_{asp}+J_{ref}$$

II.4. Choix d'une pompe pour une application donnée

Le choix d'une pompe peut se faire connaissant les 3 principaux paramètres :

- Le débit volume Q en m^3/s
- La hauteur manométrique totale H_{mT} (en m)
- Le rendement global de l'installation η .

1. Débit volume Q

Le débit volume Q est fonction de la vitesse V de l'écoulement et du diamètre de la canalisation. Il se calcul par la formule :

$$Q=V \cdot S= V \cdot \pi d^2/4$$

Avec : S : section (m²), V : vitesse (m/s)

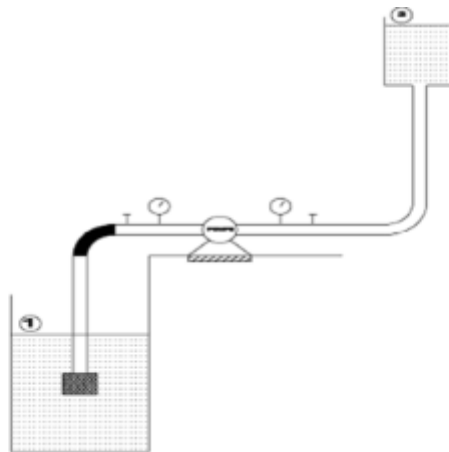
Pour une conduite de diamètre D, on a :

$$S= \pi d^2/4$$

2. Calcul de la HMT

La hauteur manométrique totale d'une pompe est la différence de pression en mètre de colonne de liquide entre les orifices d'aspiration et de refoulement.

Considérons l'installation de pompage ci-après



L'équation généralisée de Bernoulli entre les points 1 et 2 donne :

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z1 + H_{mT} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z2 + J_{asp} + J_{ref}$$

$$H_{mT} = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + (Z2 - Z1) + J_{asp} + J_{ref}$$

Pour le cas de cette installation $P_2 = P_1 = P_{atm} \Rightarrow P_2 - P_1 = 0$ d'où

$$H_{mT} = (Z2 - Z1) + J_{asp} + J_{ref}$$

Tout le problème réside donc dans l'évaluation des pertes de charge.

3. Calcul des pertes de charge

Lorsqu'on considère un fluide réel les pertes d'énergie spécifiques appelées pertes de charge dépendent de la forme, des dimensions et de la rugosité de la canalisation, de la vitesse d'écoulement et de la viscosité du liquide. La différence de pression $\Delta P = P_1 - P_2$ entre les points 1 et 2 d'un circuit hydraulique a pour origine :

- Les frottements du fluide sur la paroi interne de la tuyauterie, on les appelle perte de charge linéaire ou régulière.
- La résistance à l'écoulement provoquée par les accidents de parcours (coudes, élargissement ou rétrécissement de section, organe de réglage, ...) est les pertes singulières.

3.1. Pertes de charge singulière

Ces pertes de charge sont proportionnelles au carré de la vitesse. On a :

$$J = K \cdot \frac{V^2}{2g}$$

Ou :

K : est le coefficient de pertes de charge singulière sans unité

V : vitesse moyenne ou vitesse débitante

J : perte de charge en mètre de colonne de fluide ou liquide

On peut écrire :

$$\Delta P = K \cdot \rho \frac{V^2}{2}$$

ΔP : est une différence de pression (Pa).

3.2. Pertes de charge linéaires

Ce genre de perte est causé par le frottement intérieur qui se produit dans le liquide. Il se rencontre dans les tuyaux lisses aussi bien que dans les tuyaux rugueux. Entre deux points séparés par une longueur L dans un tuyau de diamètre D apparait :

- Une perte de charge exprimée en mètre de colonne de liquide :

$$J = \lambda \cdot \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

Ou λ : le coefficient de perte de charge linéaire

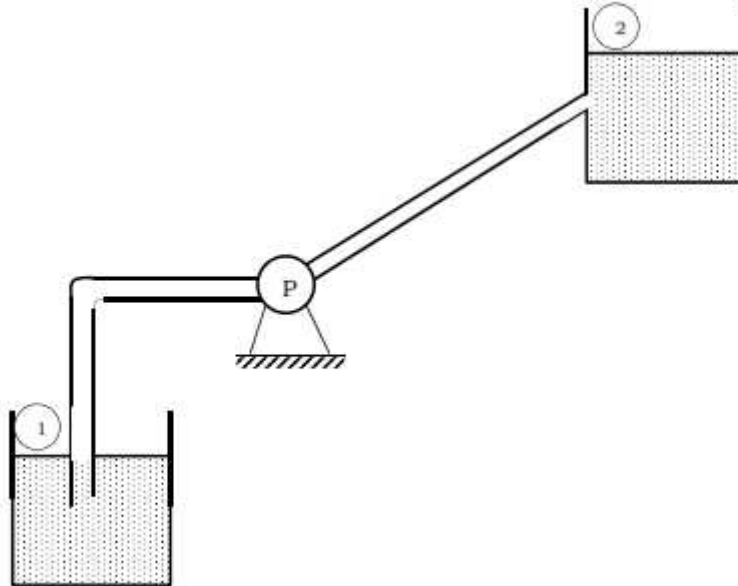
L : la longueur (m)

D : le diamètre (m)

V : la vitesse moyenne (m/s)

Différence de pression (Pa)

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \rho \cdot \frac{V^2}{2} \text{ en Pa}$$



Le choix d'une pompe se fait souvent sur la base de la puissance électrique P_e qui se calcule par la formule suivante :

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

Où η est le rendement global de l'installation.

On a :

$$\eta = \eta_m \times \eta_p$$

η_m : est le rendement du moteur

η_p : est le rendement de la pompe

En pratique, on prend $\eta=80\%$.

III. Ventilateurs

Le rôle des ventilateurs (comme toute turbomachine génératrice) est de transférer au fluide la plus grande part de l'énergie qui leur est fourni au rotor. Cette élévation d'énergie mécanique s'accompagne d'une élévation de pression totale. Pour les ventilateurs on définira cette élévation d'énergie entre l'entrée et la sortie de la machine par la charge nette (équivalent de la hauteur nette pour les pompes véhiculant un liquide).

$$X_n = P_{t2} - P_{t1} = \rho \cdot g \cdot h_{\text{nette}}$$

Ces machines peuvent ne comporter qu'une roue brassant l'air d'un grand espace comme pour les ventilateurs de table ou certains ventilateurs de four. Elles peuvent être placées dans une ouverture ménagée dans une cloison afin d'assurer le renouvellement d'air d'une pièce. Le plus fréquemment le rotor tourne dans une enveloppe munie d'un orifice d'aspiration et de refoulement, l'un d'entre eux étant relié à une conduite dans laquelle la machine fait circuler un fluide.

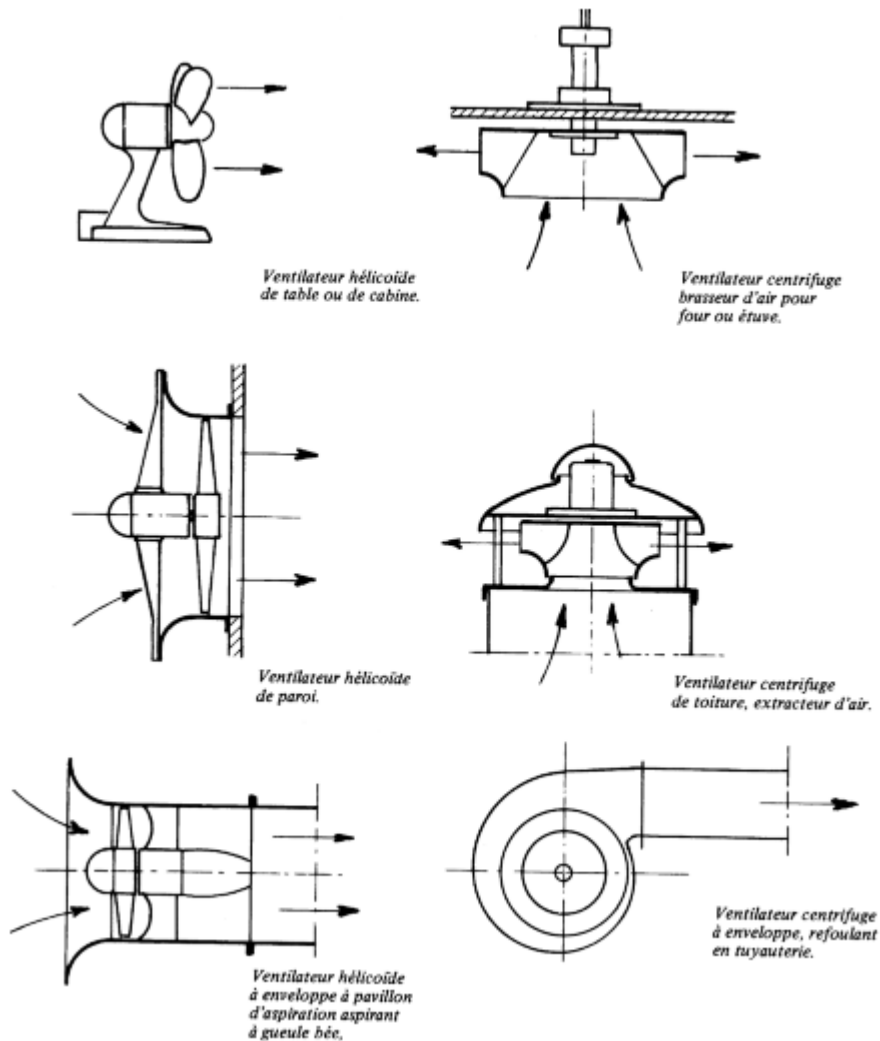


Figure 5: différents types de ventilateurs

III.1. Ventilateurs centrifuges

On distingue deux types de construction des ventilateurs centrifuges :

- les ventilateurs possédant une roue à réaction. Pour ce type de ventilateur les aubages sont couchés vers l'arrière ce qui permet de mieux contrôler l'écoulement relatif dans la roue (éviter les décollements). Ce type de ventilateur possède en général un rendement plus élevé et produit moins de bruit que celui possédant une roue à action. En outre ce type de ventilateur est utilisé pour des applications nécessitant une grande différence de pression entre la sortie et l'entrée du ventilateur (circuit avec de grandes pertes de charge)

- les ventilateurs à action (aubages courbés vers l'avant) sont intéressants car fournissant également une grande variation de pression entrée-sortie, sur une plus grande gamme de variation de débit, pour un encombrement moindre. En revanche leur rendement est beaucoup plus faible (décollements dans la roue) et le bruit généré plus important.

Les ventilateurs centrifuges possèdent des caractéristiques intéressantes (encombrement, variation de pression pour les applications de climatisation.

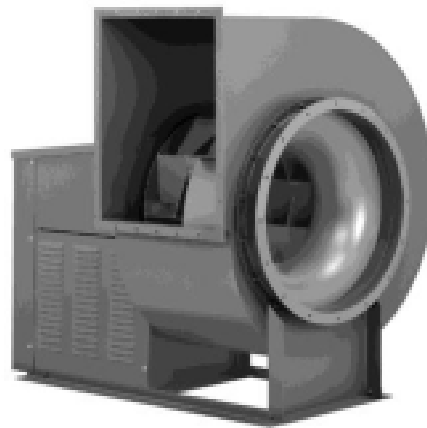


Figure 6: ventilateurs centrifuges

III.2. Ventilateur axiaux ou hélicoïdes

Dans un ventilateur axial l'aspiration et le refoulement de l'air ont lieu suivant l'axe de rotation de la machine. L'hélice du ventilateur est composée de pales (entre 4 et 20) fixées sur un moyeu. Le rapport de moyeu est défini comme étant le rapport du diamètre du moyeu d divisé par celui de l'hélice D .

- les ventilateurs hélicoïdes de rapport de moyeu faible ($0,25 < R_{\text{moyeu}} < 0,4$) sont utilisés pour faire circuler des débits importants avec une élévation de pression faible

- les ventilateurs hélicoïdes de rapport de moyeu important ($0,5 < R_{\text{moyeu}} < 0,7$) sont utilisés pour faire circuler des débits modérés avec une élévation de pression moyenne

Ce type de ventilateur est utilisé en ventilation, désenfumage, ventilateur de batterie ailette (échangeur)

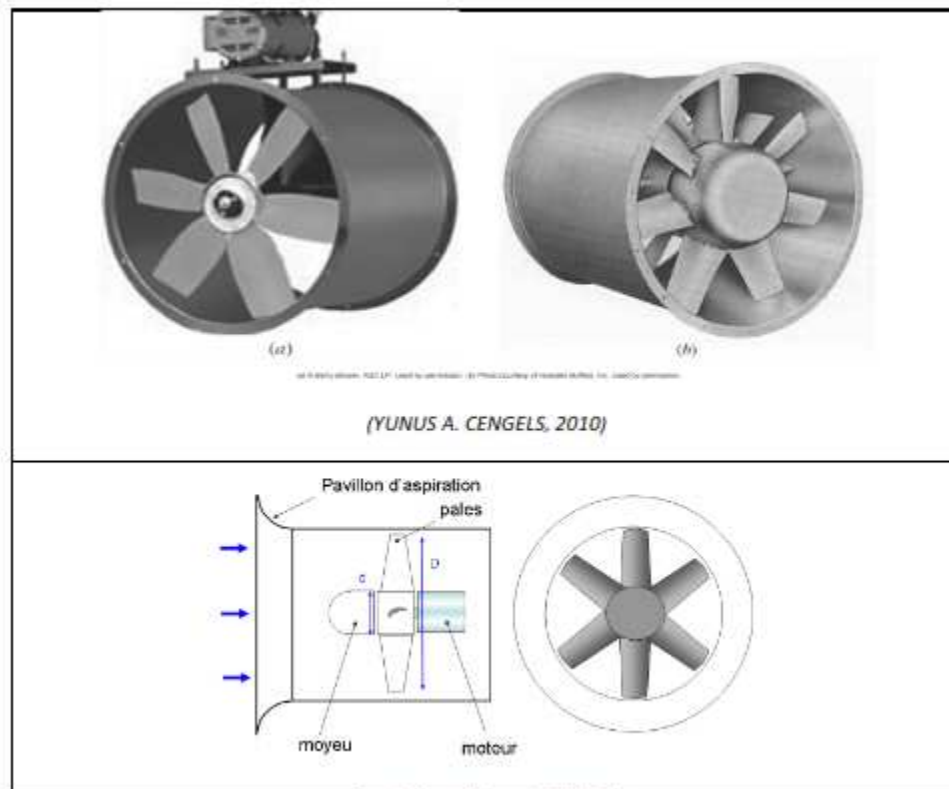


Figure 7: ventilateur axial ou hélicoïdale

Références Bibliographiques

- Les pompes et les stations de pompage, 3^{ème} édition de André Savatier et François Gadelle (SOGREAH)
- Turbomachinery Design and Theory, Rama Gorla, A. Khan, 2003
- Théorie des turbomachines, école polytechnique Montréal, M. Reggio et J-Y. Trépanier.