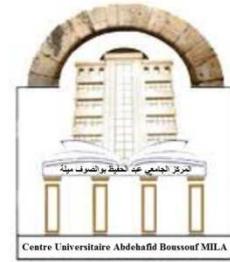




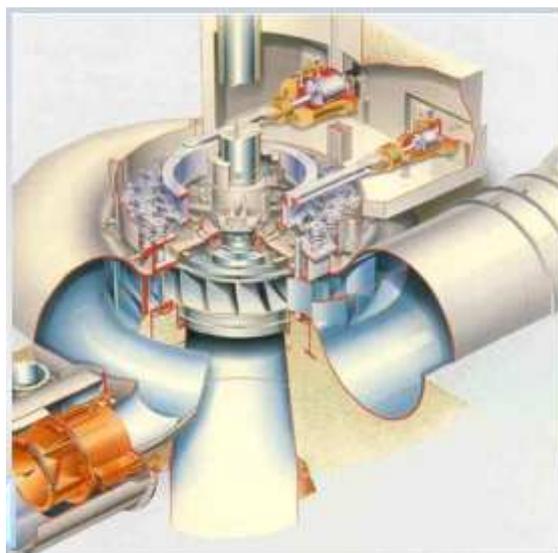
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique
Centre Universitaire Abdel Hafid Boussouf
Mila



Cours de Turbomachines

Chapitre I : Principes d'une turbomachine

Présenté par : Dr. **ZEGHBID Ilhem**



Année universitaire 2019-2020

Objectif :

Dans ce chapitre, nous discutons les principes de bases d'une importante application de la mécanique des fluides, Turbomachines. Le cours a pour but de faire connaître aux étudiants les différents types de turbomachines telles que les pompes, les ventilateurs, les compresseurs et les turbines.

Description du Chapitre I : (03 Semaines)

Principes d'une Turbomachine

(Définition et Théorie générale des Turbomachines)

- Définition et Généralités sur le fonctionnement d'une Turbomachine
- Classification des Turbomachines et fluides véhiculés
- Théorie Générale sur les Turbomachines : Equation d'Euler
- Composantes de vitesse et Puissance des Turbomachines
- Définition du rendement des Turbomachines
- Domaine d'utilisation

Introduction :

Définition d'une machine Turbo

Une turbomachine est un dispositif dans lequel le transfert d'énergie se produit entre un fluide en circulation et un élément rotatif en raison d'une action dynamique. Cela entraîne un changement de la pression et de l'impulsion du fluide.

Classification des Turbomachines :

Si le fluide transfère de l'énergie pour la rotation de la roue à aubes, fixée sur l'arbre, elle est appelée Turbomachine génératrice d'énergie. Si la machine transfère de l'énergie sous la forme d'un moment angulaire alimenté au fluide à partir de la turbine rotative, fixée sur l'arbre elle est connue sous le nom de Turbomachine à absorption de puissance.

Partie d'une Turbomachine :

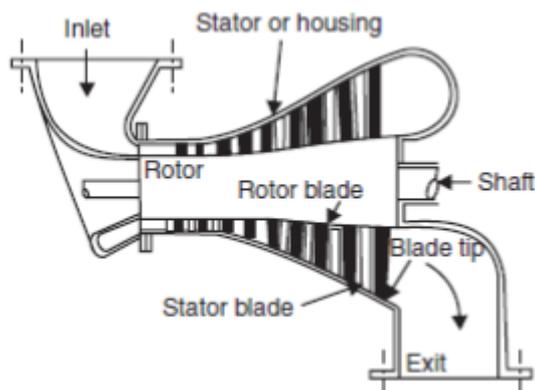


Figure 1: vue schématique d'une turbine montrant les principales parties de la turbomachine

Les principaux composants d'une machine turbo sont :

1. Élément rotatif (aubes) fonctionnent dans un flux de fluide.
2. Les éléments stationnaires qui guide généralement le fluide dans la bonne direction pour une énergie efficace.

Processus de conversion :

3. Arbre : il fournit la puissance d'entrée ou prend la puissance de sortie du fluide dans les conditions dynamiques et fonctionne à la vitesse requise.

La classification d'une turbomachine est basée sur :

- **le transfert d'énergie :**

1. L'énergie est fourni par le fluide au rotor, machine turbo génératrice d'énergie (ex : Turbines).
2. L'énergie fournie par le rotor au fluide, turbomachine absorbant la puissance (ex : pompe, ventilateur, compresseurs)

- **Le fluide circulant dans la machine turbo de :**

1. L'eau
2. Air
3. Vapeur
4. Les gaz chauds
5. Liquides comme l'essence, etc.

- **La direction d'écoulement à travers la roue ou les aubes ou les lames, en référence à l'axe de rotation de l'arbre :**

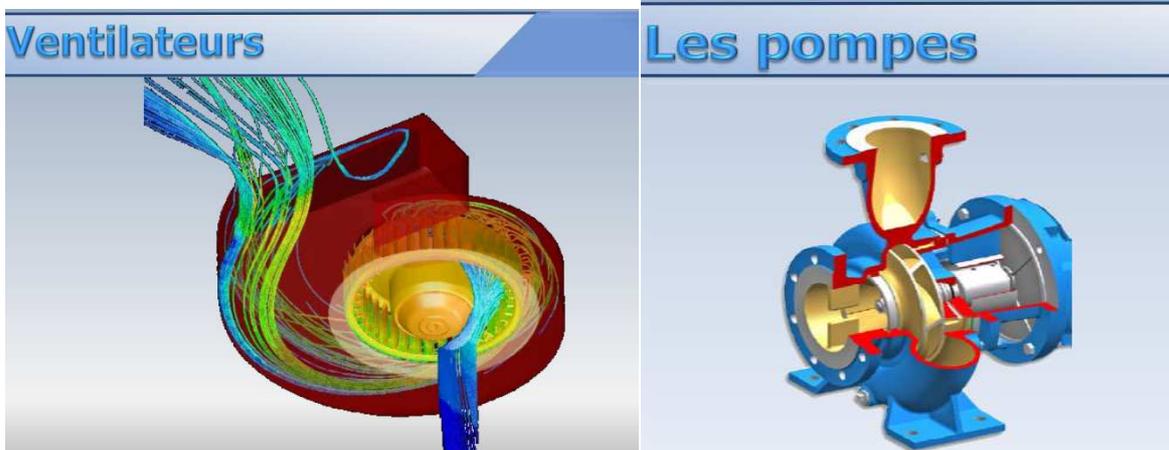
1. Flux axial- pompe axiale, compresseur ou turbine.
2. Flux radial- pompe centrifuge ou compresseur.
3. Flux tangentiel- turbine à eau Pelton.

- **L'état du fluide dans la machine Turbo:**

1. Type d'impulsion (pression constante) ex : turbine à eau Pelton.
2. Type de réaction (pression variable) ex : turbine Francis à réaction.

- **La position de l'arbre tournant:**

1. Arbre horizontal- turbines à vapeur.
2. Arbre vertical- turbines à eau, Kaplan.



Théorie générale sur les Turbomachines : Equation d'Euler

Dynamique des fluides et Turbomachines

Les principes fondamentaux de la conservation de la masse, de la conservation de la quantité de mouvement sont les éléments clés pour les applications dans le domaine des turbomachines.

Conservation de masse

La conservation de la masse exprime que l'accumulation de matière dans un volume de contrôle est égale à la somme des flux massiques qui traversent les frontières du volume.

L'expression mathématique du principe est :

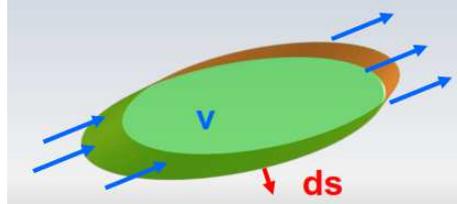
$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV + \int_S \rho \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S} = 0$$


Figure 2: conservation de la masse

Conservation de quantité de mouvement

Le principe de conservation de la quantité de mouvement indique que la sommation des forces est égale à l'accumulation de la quantité de mouvement dans un volume de contrôle plus la somme des flux de quantité de mouvement qui traversent les frontières du volume.

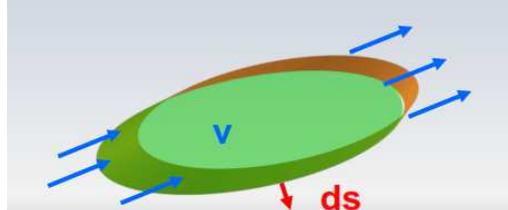
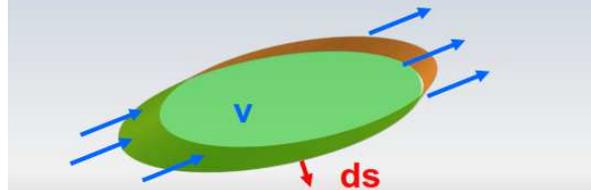
$$F = \frac{d}{dt} \int_V \rho \mathbf{v} dV + \int_S \rho \mathbf{v} \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S}$$


Figure 3: conservation de quantité de mouvement

La conservation du moment de la quantité de mouvement est couramment exprimée par la formule :

$$M = \frac{d}{dt} \int_V r \times \rho v dV + \int_S r \times \rho v v \cdot dS$$


The diagram shows a green, elongated control volume labeled 'V'. Blue arrows represent velocity vectors 'v' entering and leaving the volume. A red arrow labeled 'ds' points outwards from the surface of the volume.

Figure 4: conservation du moment de la QM

Equation d'Euler

Le point départ pour l'étude des turbomachines est l'équation d'Euler, celle-ci peut être déduite du principe de conservation du moment de la quantité de mouvement.

On considère un écoulement unidimensionnel en régime stationnaire dans le rotor d'une turbomachine ayant des conditions uniformes à l'entrée et à la sortie.

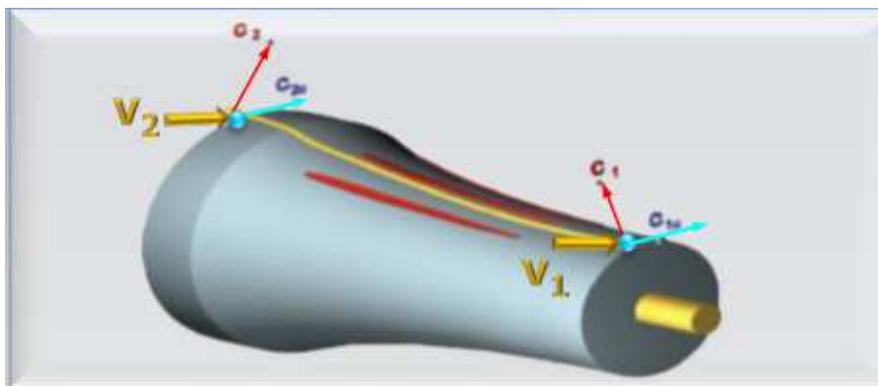


Figure 5: schématisation du rotor et Equation d'Euler

$$M = \int_S (r \times \rho v) v \cdot dS = (r_2 \times v_2) \rho_2 v_2 A_2 - (r_1 \times v_1) \rho_1 v_1 A_1$$

$$\dot{m} = \rho_2 v_2 A_2 = \rho_1 v_1 A_1$$

D'où la forme mathématique de l'équation d'Euler est sous la forme suivante :

$$M = \dot{m}(r_2 \times v_2 - r_1 \times v_1)$$

Composantes de vitesses

Dans une turbomachine, l'élément qui produit les changements importants dans le fluide est le rotor est un paramètre très important pour l'analyse et la variation de la vitesse. Les vecteurs de vitesse à considérer sont la vitesse périphérique U au rayon r par rapport au centre de rotation, la vitesse absolue C du fluide mesurée dans le système et la vitesse relative W . ces trois vitesses sont reliées par l'équation : $C=U+W$. on appel C_u la composante tangentielle de la vitesse absolue projetée dans la direction de U , C_x la composante dans la direction axiale et C_m la composante méridionale de la vitesse C selon la direction normale à U . (fig.06). L'introduction de ces définitions dans l'équation mathématique d'Euler conduit à l'équation fondamentale des turbomachines.

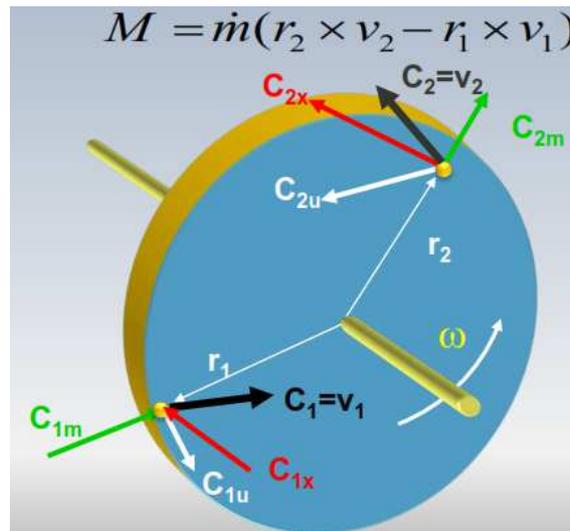
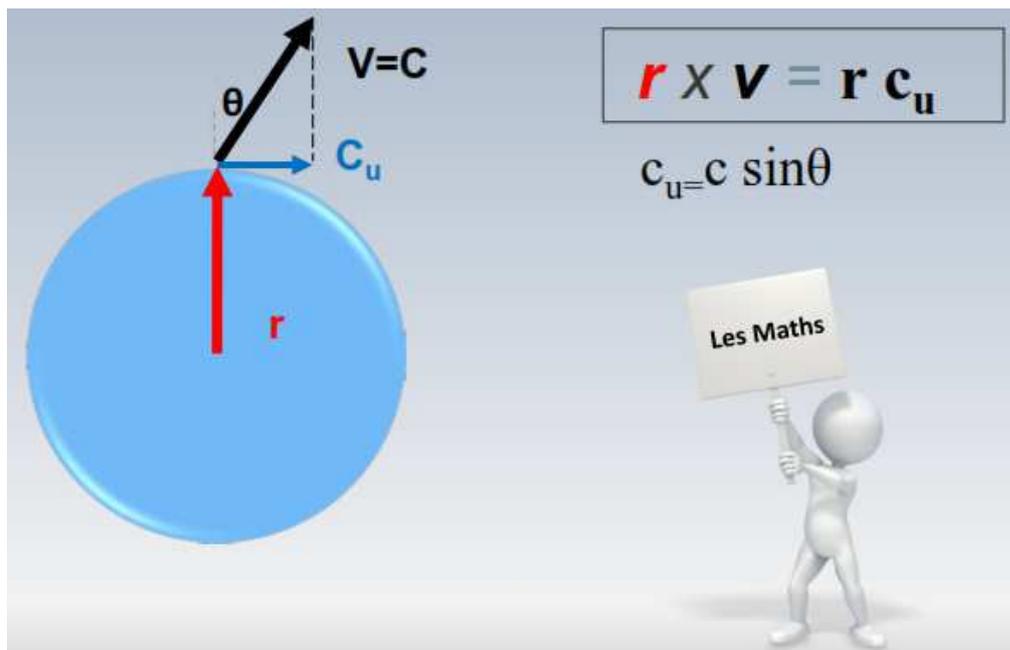


Figure 6: Rotor élémentaire



C_u : composante *tangentielle* de la vitesse absolue C projetée dans la direction de U

C_x : composante *axiale* de la vitesse

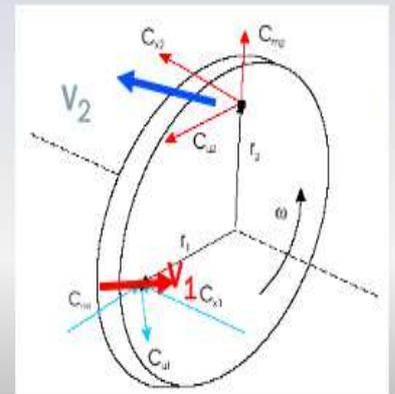
C_m : composante *méridionale* de la vitesse absolue C projetée dans la direction normale à U

$$r \times V = r c_u$$

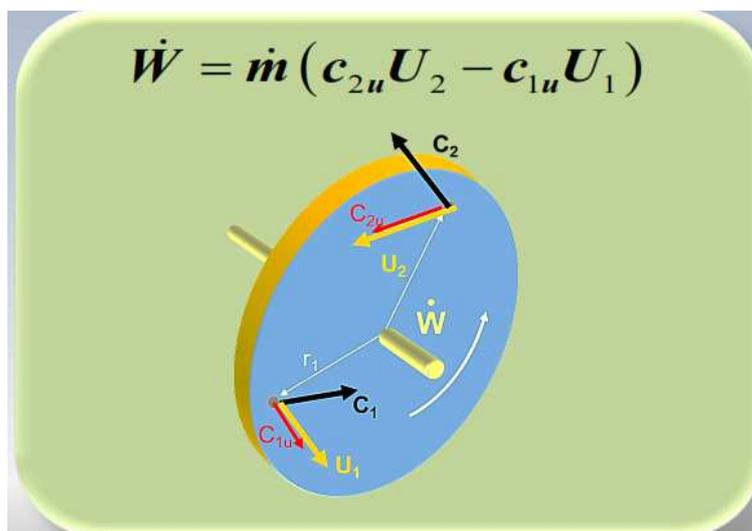
$$M = \dot{m}(r_2 \times V_2 - r_1 \times V_1) \Rightarrow M = \dot{m}(c_{2u} r_2 - c_{1u} r_1)$$

$$U = r \omega$$

U : vitesse *tangentielle* de la roue



Pour un rotor ayant une vitesse de rotation ω , la puissance W est donnée par :



Le travail spécifique (l'énergie transmise par unité de masse) entre le rotor et le fluide est donné comme suit :

$$E = \frac{\dot{W}}{\dot{m}} = (C_{2u}U_2 - C_{1u}U_1)$$

$$H = \frac{(C_{2u}U_2 - C_{1u}U_1)}{g}$$

Equation d'Euler et l'équation de conservation de l'énergie

Pour un volume de contrôle V, on peut écrire le principe de conservation de l'énergie s'écrit :

Accumulation + Flux de l'énergie totale = Chaleur - Travail

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho e dV + \int_S (\rho e + p) v \cdot dS = \dot{Q} - \dot{W}$$

$e = (u + v^2/2 + gz)$

Q : taux de transfert de chaleur au volume de contrôle

W : taux de travail extrait du volume de contrôle

e : énergie totale par unité de masse

Dans l'étude des turbomachines, on utilise les hypothèses suivantes :

- Ecoulement permanent
- Ecoulement unidimensionnel (débit constant)
- Transfert de chaleur est négligeable

Alors l'équation d'énergie devient :

$$e = (u + v^2/2 + gz) \quad \frac{d}{dt} \int_V \rho e dV + \int_S (\rho e + p) v \cdot dS = \dot{Q} - \dot{W}$$

0 1-D 0

$$\int_1^2 (\rho e + p) v \cdot dS = (\rho v A e + p v A \rho / \rho)_2 - (\rho v A e + p v A \rho / \rho)_1 = -\dot{W}$$

1-D ← ↑

$$\dot{m} = \rho_2 v_2 A_2 = \rho_1 v_1 A_1$$

$$(\rho v A e + p v A \rho / \rho)_2 - (\rho v A e + p v A \rho / \rho)_1 = -\dot{W}$$

$$\dot{m} \left(e_2 + \frac{p_2}{\rho_2} \right) - \dot{m} \left(e_1 + \frac{p_1}{\rho_1} \right) = -\dot{W}$$

$$\dot{m} \left[\left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} \right) - \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} \right) \right] = -\dot{W}$$

$$\dot{m} = \rho_2 v_2 A_2 = \rho_1 v_1 A_1$$

$$e = \left(u + v^2/2 + gz \right)$$

$$h = \left(u + p/\rho \right)$$

$$h_0 = h + \frac{V^2}{2}$$

$$\dot{m} (h_{02} - h_{01}) = \dot{W}$$

Énergie

Euler

$$(h_{02} - h_{01}) = (C_{2u} U_2 - C_{1u} U_1)$$

Rendement des Turbomachines

Rappel de notions de thermodynamique pour les écoulements compressibles

Équations des gaz parfaits

$$p = \rho R T$$

R est le rapport entre la constante universelle $R_u = 8314.3 \text{ J/(kmol K)}$ et la masse moléculaire du gaz :

$$R = \frac{R_u}{M}$$

Énergie interne u

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v = \frac{du}{dT}$$

$$u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT$$

Équations des gaz parfaits

Enthalpie h

$$h = u + \frac{p}{\rho}$$

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p = \frac{dh}{dT}$$

$$h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT$$

Relations utiles

$$c_p - c_v = R; \quad c_p = \frac{\gamma R}{\gamma - 1}; \quad c_v = \frac{R}{\gamma - 1}; \quad \gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

Gaz parfait, $c_p = \text{cnste}$

$$\left(\frac{T_2}{T_1} \right)_{s=\text{const.}} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

Processus isentropique

État de stagnation, d'arrêt ou total

Enthalpie de stagnation

$$h_0 = h + \frac{v^2}{2}$$



La valeur atteinte par l'enthalpie h lorsque le fluide est emmené au repos selon un processus adiabatique réversible.

Température totale

$$\int_h^{h_0} dh = \int_T^{T_0} c_p dT \quad \longrightarrow \quad h_0 - h = c_p(T_0 - T) = \frac{v^2}{2}$$

$$T_0 = T + \frac{v^2}{2c_p}$$

Remarque: Quantité Totale = Quantité de Stagnation = Quantité d'Arrêt

Température

Température totale

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{v}{a} \\ a &= \sqrt{\gamma RT} \\ c_p &= \frac{\gamma R}{\gamma - 1} \end{aligned} \right\} \longrightarrow T_0 = T + \frac{v^2}{2c_p} \longrightarrow \boxed{\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2}$$

Remarque: Quantité Totale = Quantité de Stagnation = Quantité d'Arrêt

État de stagnation: indice 0

La valeur atteinte par les variables T , p et ρ lorsque le fluide est emmené au repos par un **processus isentropique**

$$\frac{p_0}{p} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{\gamma/(\gamma-1)}$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{1/(\gamma-1)}$$

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2$$



A. Rendement isentropique

Le rendement isentropique est défini comme le rapport entre le travail possible théorique et l'énergie disponible.

➤ Turbine

$$\eta_s = \frac{\text{travail disponible dans l'arbre}}{\text{énergie théorique du fluide}} = \frac{W_r}{W_s} = \frac{h_{02} - h_{01}}{h_{2s} - h_1} = \frac{T_{02} - T_{01}}{T_{2s} - T_1}$$

$$\eta_s = \frac{1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\gamma-1/\gamma}}{1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\gamma-1/\gamma\eta_p}}$$

➤ Compresseur

$$\eta_s = \frac{\text{énergie du fluide}}{\text{énergie fournie par l'arbre}} = \frac{W_s}{W_r} = \frac{h_{2s} - h_{01}}{h_{02} - h_{01}} = \frac{T_{2s} - T_{01}}{T_{02} - T_{01}}$$

B. Rendement polytropique

$$\frac{P_{02}}{P_{01}} = \left(\frac{T_{02}}{T_{01}}\right)^{\frac{\eta p C_p}{R}}$$

Domaine d'utilisation

Les turbomachines sont utilisées dans un grand nombre de domaines d'application citons en quelques-uns.

La production d'énergie électrique, fait en partie appel à des turbines utilisées isolément : éoliennes pour l'énergie du vent, hydroliennes pour celle des courants marins ou de l'écoulement des rivières, turbines Kaplan dans les usines marées, turbine Francis et Pelton (eau issue de barrages ou de lacs d'altitude), participent au fonctionnement d'un cycle thermodynamique : ce sont les turbines à gaz et turbines à vapeur.

Dans le transport terrestre, on trouve les ventilateurs pour l'aération des tunnels routiers et la climatisation des véhicules. Dans l'aéronautique, les turbomachines sont présentes dans tous les systèmes de propulsion : hélices et rotors, turbomoteurs pour les entraîner, turbosoufflantes et turboréacteurs pour assurer la propulsion à réaction. Dans l'aérospatial ce sont des turbopompes qui alimentent les moteurs cryogéniques.



Références Bibliographiques

- Fluids Mechanics and thermodynamics of turbomachinery de S.L. Dixon,
- Polytechnique Montréal (Turbomachines Mec 8250) (ancien MEC 4270)
- Laboratoire de Mécanique des fluides et d'acoustique UMR5509
- Turbomachine, B. K. Venkanna PMI, New Delhi 2009.
- Text Book of Turbomachines, M. S. Govindgoud and A. Nagaraj, M. M. Publications, 4th Ed, 2008
- Fluid Mechanics Fundamentals and applications, Yunus A. Cengel, John M. Cimbala, Mc Graw Hill 2004.