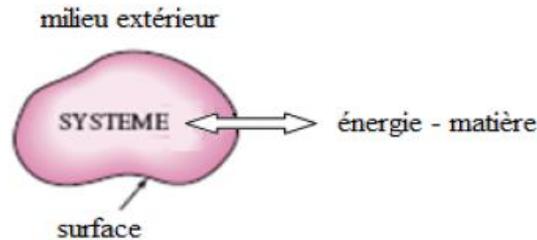


Chapitre V : Machines hydrauliques et pneumatiques axiales et radiales

V.1 Rappel bref de la thermodynamique

Définition du système

Un système est une quantité de matière (solide, liquide ou gaz) séparée du milieu extérieur par une surface appelée frontière à travers laquelle se fait un échange d'énergie (chaleur Q , travail W) et de matière.



Etat du système

L'état d'un système est défini par les valeurs d'un certain nombre de grandeurs physiques mesurables dites variables (ou paramètres) d'état. Exp : volume, pression, température, viscosité,...etc.

1.3.1 Variables d'état

Les variables qui définissent l'état d'un système peuvent être classées en deux catégories :

- Variables intensives : ce sont des grandeurs indépendantes de la quantité de matière (ne sont pas additives) et définies ponctuellement, exp : la pression (P , [kPa]), la température (T , [K]), la masse volumique (ρ , [kg/m³]), potentiel chimique (μ , [kJ/kmol]),...etc.
- Variables extensives : ce sont des grandeurs proportionnelles à la quantité de matière (sont additives), exp : la masse (m , [kg]), le volume (V , [m³]), le nombre de mole (n , [kmol]),...etc.

Par exemple, supposons deux systèmes identiques placés ensemble. Il est clair que les variables extensives (m , V et n) vont doubler alors que les variables intensives (P , T et ρ) ne vont pas changer.

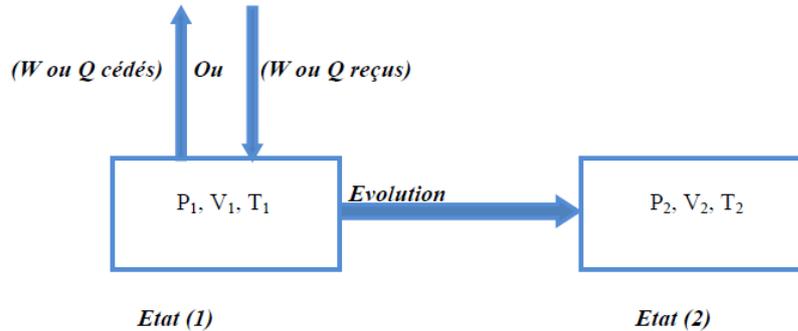
1.3.2 Fonctions d'état

Ce sont des relations mathématiques qui lient les variables d'état (intensives ou extensives) d'un système thermodynamique, exp : l'énergie interne (U , [kJ]), l'enthalpie (H , [kJ]), l'entropie (S , [kJ/K]),...etc. Les fonctions d'état sont extensives et leurs variations, au cours d'une transformation, dépendent uniquement de l'état initial et final du système et non du chemin suivi (la manière dont le système passe de l'état initial à l'état final).

Remarque : une fonction d'état (extensive) rapportée à l'unité de matière (masse, volume, ... etc) devient intensive. Par exemple, l'énergie interne (U , [kJ]) est extensive mais l'énergie interne massique ($u=U/m$, [kJ/kg]) est intensive.

Evolution ou transformation du système

Sous l'influence d'échanges ou transfert d'énergie entre le système et le milieu extérieur, le système évolue et les variables d'état du système sont modifiées. On dit que le système se transforme ou change d'état en passant d'un état d'équilibre initial (1) à un autre état d'équilibre final (2).



Transformation du système par échange d'énergie (Q ou W) avec le milieu extérieur

Au cours d'une transformation, les variables d'état du système varient pour atteindre un autre état d'équilibre. Le passage de l'état d'équilibre (1) à l'état d'équilibre (2) se déroule en général hors équilibre. On distingue alors entre :

- Transformations réversibles ou (idéales) : ce sont les transformations infiniment lentes d'une succession d'états d'équilibres.
- Transformations irréversibles (réelles) : ce sont des transformations rapides et brutales hors équilibre.

La réversibilité d'une transformation exige que le système passe par une infinité d'états intermédiaires peu différents d'états d'équilibre (états quasi-statiques). Les transformations naturelles spontanées sont irréversibles; elles ne peuvent évoluer que dans un seul sens.

Equations d'état du système

Les variables d'état ne sont *pas toutes indépendantes*, mais liées entre elles par des équations dites *équations d'état* du type

$$f(P, V, T) = 0$$

Exemple :

L'équation qui décrit le comportement d'un gaz considéré comme parfait :

$$P V = n R T$$

Où :

P : Pression du gaz

V : volume du gaz

n : nombre de moles du gaz

R : constante des gaz parfaits

T : température du gaz

Représentations graphiques des évolutions du système

Les variations d'état du système à la suite d'une transformation sont représentées dans divers diagrammes permettant ainsi de suivre l'évolution du système. On utilise ainsi les diagrammes suivants : diagramme de Clapeyron (P,V), les diagrammes isentropiques (T, S), le diagramme (H,S) et de Mollier (P, H).

Dans la figure ci-dessous, on représente le diagramme le plus utilisé Clapeyron.

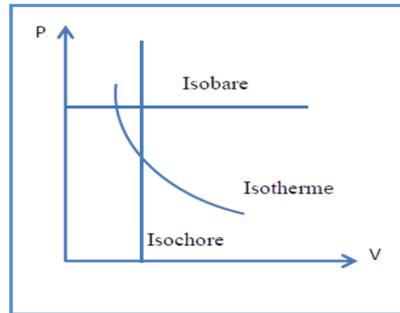


Diagramme de Clapeyron

On distingue différents types de transformations ou évolutions suite à un échange d'énergie du système avec le milieu extérieur. Ces évolutions sont facilement représentées dans ces diagrammes par des droites verticales ou horizontales, à savoir :

- Une transformation isochore ($V = \text{constante}$)
- Une transformation isobare ($P = \text{constante}$)
- Une transformation isotherme ($T = \text{constante}$)
- Une transformation isentropique (adiabatique) ($S = \text{constante}$) ou ($Q = 0$)

Echanges d'énergie: Travail, Chaleur, Energie interne

Le but de la thermodynamique est l'étude des propriétés des systèmes et leurs évolutions en fonction des échanges d'énergie avec le milieu extérieur.

Un système peut échanger de la masse et de l'énergie avec le milieu extérieur, alors son état thermodynamique change par gain ou par perte de masse ou d'énergie. On dit que le système subit une transformation qui entraîne une variation des variables d'état. Chaque système a un certain **contenu en énergie** sous forme d'énergie mécanique (cinétique ou potentielle) à l'échelle microscopique.

Energie interne (U)

L'énergie interne d'un système est son contenu en énergie pour ce système. Chaque système (solide, liquide ou gazeux) est une collection d'objets tels des atomes, des molécules,...etc. Ces particules à l'échelle microscopique sont toujours animées de mouvements incessants et aléatoires (agitation moléculaire); dite vibration pour les solides et agitation thermique pour les liquides et les gaz. A ces mouvements microscopiques est associé de l'énergie cinétique E_{ci} pour chaque particule. De plus, entre ces atomes peuvent exister des forces d'interaction (attraction et répulsion) aux quelles on associe une énergie potentielle E_{pi} pour chaque particule.

A l'échelle microscopique, l'énergie interne (U) du système est définie comme la somme algébriques des énergies cinétiques E_{ci} et potentielles E_{pi} , de toutes les particules formant le système.

$$U = \sum_{i=1}^n E_{ci} + \sum_{i=1}^n E_{pi}$$

La Chaleur (Q)

La chaleur est une forme spéciale de l'énergie : C'est une énergie exprimée en [J] ou en k[cal]. Elle est échangée à l'échelle microscopique sous forme désordonnée par agitation moléculaire (c'est-à-dire par choc entre les molécules en mouvement. Elle s'écoule toujours d'une source chaude vers une source froide. La chaleur n'est pas une fonction d'état, c'est-à-dire dépend du chemin suivi. Elle est liée à une variation de température (ΔT) du système à la suite d'un réchauffement ou d'un refroidissement de ce dernier. Elle est proportionnelle à la quantité de la matière (masse ou nombre de moles) et à la différence de température (ΔT).

- Pour une transformation infinitésimale:

$$dQ = m C dT \quad \text{ou} \quad dQ = n C dT$$

Où :

m : La masse de la matière du système.

n : Le nombre de moles du système.

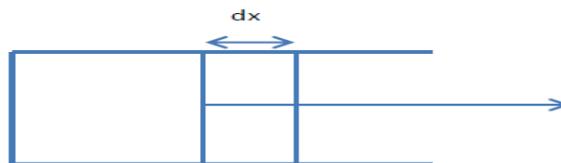
C : La capacité calorifique massique ou molaire de la matière exprimée respectivement en

[J. Kg⁻¹. K⁻¹] ou [J. mol⁻¹. K⁻¹]. Elle peut être à pression constante (C_p) ou à volume constant (C_v)

Le travail (W)

Le travail est une autre forme d'énergie (énergie mécanique) : C'est une énergie exprimé en [J] ou en [cal]. A l'échelle microscopique; c'est une énergie échangée de façon ordonnée (grâce au déplacement par exemple d'un piston qui imprime une certaine direction aux atomes.

- Ce n'est pas une fonction d'état. Le travail résulte le plus souvent d'une variation de volume d'un système **déformable** (non rigide), par exemple le cas du déplacement d'un piston. On parle alors de travail défini par :



Un travail résultant d'un déplacement de piston

D'où le travail élémentaire est défini par la relation :

$$dW = -P \cdot dV$$

Enthalpie (H)

La fonction enthalpie désignée par la lettre (H) correspond à l'énergie totale d'un système thermodynamique. Elle comprend l'énergie interne (U) du système, à laquelle est additionné le travail

que ce système doit exercer contre la pression extérieure pour occuper son volume. L'enthalpie est un potentiel thermodynamique. Il s'agit d'une fonction d'état qui est une grandeur extensive.

L'enthalpie (H) est définie par la relation suivante:

$$H = U + PV$$

V.2 Compresseurs

V.1 Définition des compresseurs

Les compresseurs sont des appareils qui transforment l'énergie mécanique fournie par une machine motrice en énergie de pression; en réalisant un accroissement de pression d'un fluide à l'état gazeux.

V.2 Classification des compresseurs

Les compresseurs peuvent être classés selon les caractéristiques suivantes :
figure 1

- le principe de fonctionnement (volumétrique, dynamique);
- mouvement des pièces mobiles (mouvement linéaire, rotatif);
- les compresseurs d'air
- les compresseurs des gaz

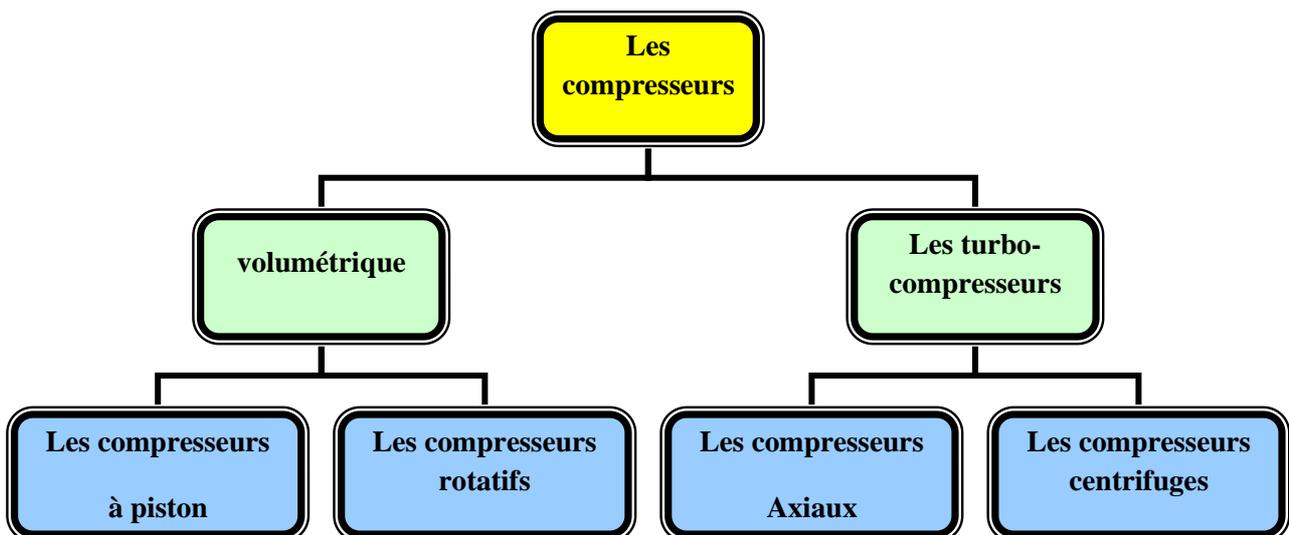


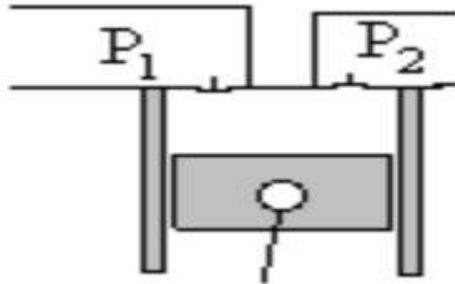
Figure I.1 Classification des compresseurs

V.2.1 Compresseurs volumétrique

Les compresseurs volumétriques sont l'élévation de pression est obtenue on réduisant un certain volume de gaz par action mécanique.

a. Principe de fonctionnement

Leur principe de fonctionnement est le suivant figure, une masse fixe de gaz à la pression d'aspiration P_1 est emprisonnée dans une enceinte de volume variable. Pour augmenter la pression, ce volume est progressivement réduit.



b. Différents types de compresseurs volumétriques

Les compresseurs volumétrique peuvent être choisissés suivant les caractéristique cité au-dessus figure I.1.

- Compresseurs alternatif à piston

Dans un compresseur à piston, l'enceinte est le volume délimité par un cylindre, l'une de ses bases qui est fixe, et l'autre qui est un piston mobile dans l'alésage du cylindre, entraîné par un système bielle-manivelle.

En fin de compression, l'enceinte est mise en communication avec le circuit de refoulement, pour que le gaz comprimé à la pression P_2 puisse sortir. Une nouvelle masse de gaz à la pression P_1 est alors aspirée dans les canalisations amont, et ainsi de suite, le fonctionnement de la machine étant cyclique.

- Compresseur rotatif

Ces compresseurs tels que les compresseurs à piston compriment les gaz par réduction du volume. Parmi les compresseurs relatifs on distingue :

- Compresseur à palette
- Compresseur à vis

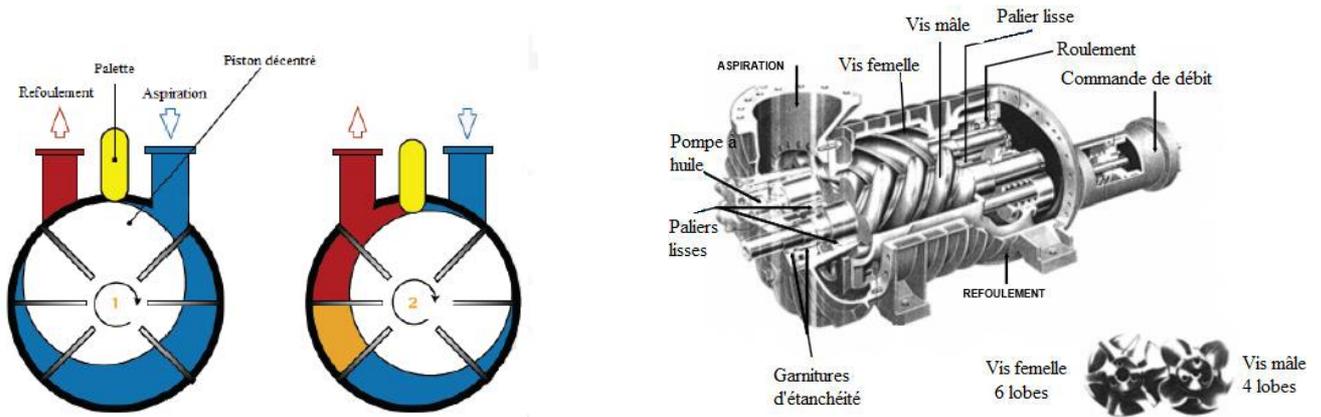


Schéma du compresseur à palette et du compresseur à vis

V.2.2 Compresseurs dynamiques

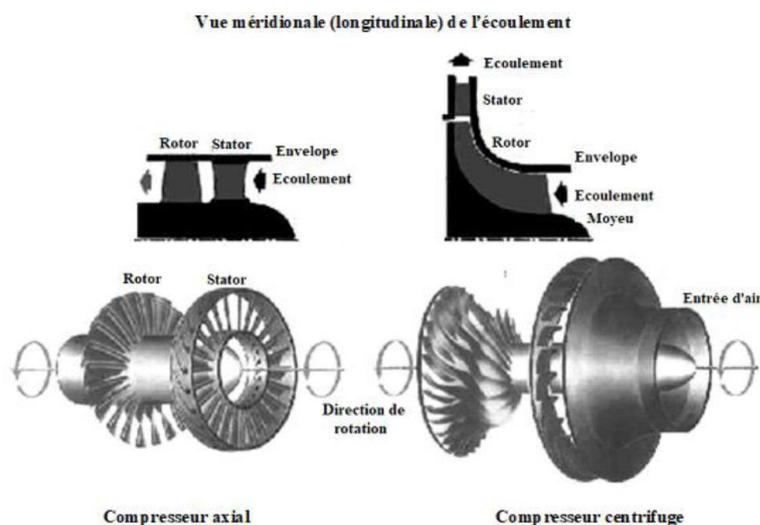
Au point de vue de l'écoulement du fluide, les compresseurs dynamiques se divisent en machines axiaux et centrifuges.

- Compresseurs axiaux

Les compresseurs axiaux sont des machines réceptrices à écoulement axial du compressible, ils sont utilisés dans les turbines à grande puissance et dans les turboréacteurs d'aviation, ils sont caractérisés par le nombre d'étage important et le taux de compression n'est pas élevé.

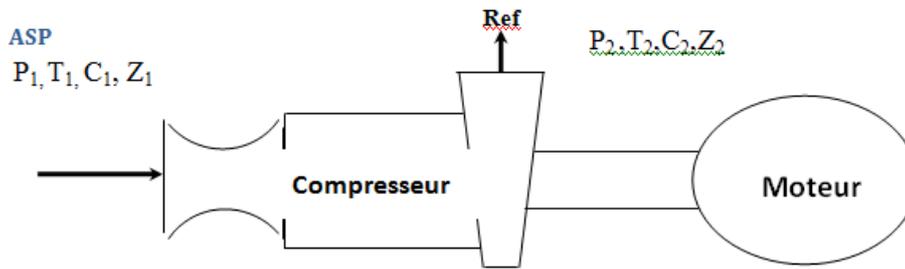
- Compresseurs centrifuges

Les compresseurs centrifuges augmentent l'énergie du gaz comprimé grâce à la force centrifuge qui est provoquée par le mouvement de rotation des roues à aube.



a. Cycle thermodynamique

Les gaz étant des fluides compressibles [3], il est nécessaire et important d'abord de connaître et définir les principes et modes de compression d'un gaz



Les données à l'entrée

P_1 - pression atmosphérique [N/m^2];

T_1 - température [K];

C_1 - vitesse [m/s];

Z_1 - hauteur [m].

Considérons un compresseur de gaz, d'un type non précis. Les lois générale de l'écoulement permanent de ce fluide compressible, appliquée entre les points (1-2) d'entrée et de sortie du compresseur sont données par la relation :

$$(Q + W)_{1-2} = (H_2 - H_1) + \frac{1}{2}(C_2^2 - C_1^2) + g(Z_2 - Z_1)$$

Où :

Q - La chaleur échangée avec le milieu extérieur [J / Kg];

W - Le travail échangé avec l'extérieur et le fluide [J / Kg];

H - L'enthalpie du gaz [J / Kg];

C - La vitesse de l'écoulement du gaz [m/s];

Z - L'élévation géométrique [m].

III.4.1 paramètres thermodynamiques:

Un étage= un rotor+un stator

Dans le diagramme isentropique (T-S), on peut

Exprimer un étage comme suit :

Entrée : P_1 T_1 v_{1s}

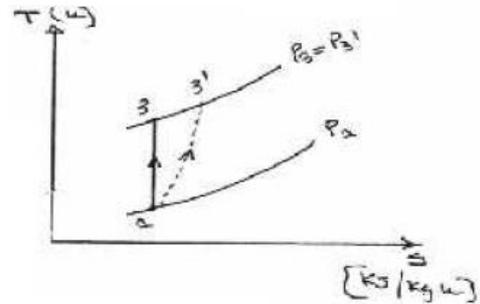
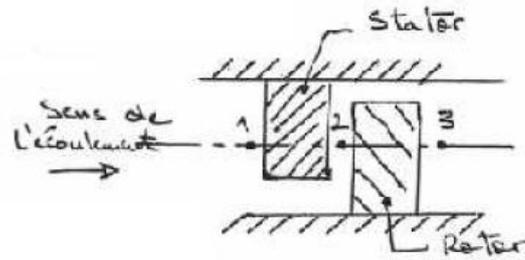
Sortie : P_3 T_3 v_{3s}

v_{1s} v_{3s} (sont les volumes spécifiques)

$$v_s = \frac{1}{\rho}$$

1-3 : compression isentropique (sans frottement)

1-3' : compression réelle (avec frottement)



- Le taux de compression d'un compresseur est défini par :

$$r_c = \frac{P_3}{P_1}$$

- Pour une transformation isentropique (adiabatique réversible) :

$$T_1 P_1^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = T_3 P_3^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \rightarrow \left(\frac{T_3}{T_1}\right) = \left(\frac{P_1}{P_3}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = \left(\frac{P_3}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

III.4.2 Rendement isentropique du compresseur:

$$\eta_c = \frac{\Delta h_{1-3}}{\Delta h_{1-3'}} = \frac{C (T_3 - T_1)}{C (T_{3'} - T_1)} = \frac{T_3 - T_1}{T_{3'} - T_1}$$

Généralement, $\eta_c = 0.8$ à 0.85 $\longrightarrow T_{3'} = T_1 + \frac{T_3 - T_1}{\eta_c}$

b. Travail absorbé par le compresseur

D'après l'équation d'énergie :

$$W_{1-2} + \cancel{Q_{1-2}^0} = \Delta h_{1-2} + \cancel{\Delta E_{c1-2}^0} + \cancel{\Delta E_p^0}$$
$$W_{1-2} = \Delta h_{1-2} = C (T_2 - T_1)$$

Donc le travail du compresseur devient :

$$W_c = \frac{W_{1-2}}{\eta_m} = \frac{C (T_2 - T_1)}{\eta_m}$$

Sachant que η_m : est le rendement mécanique du compresseur.

III.4.5 Puissance du Compresseur :

$$P_c = \frac{\dot{m} C (T_2 - T_1)}{\eta_m}$$

V.3 Applications

Application 1

De l'air est comprimé dans un compresseur centrifuge de 110 Kpa (P_{01}) et 300 K (T_{01}) à 330 Kpa (P_{03}). Le rendement isentropique total de la compression est de 90%.

- Déterminer le travail réel du compresseur par unité de masse.

On donne pour l'air : $\gamma = 1.4$, $C_p = 1.0047$ KJ/kg K.

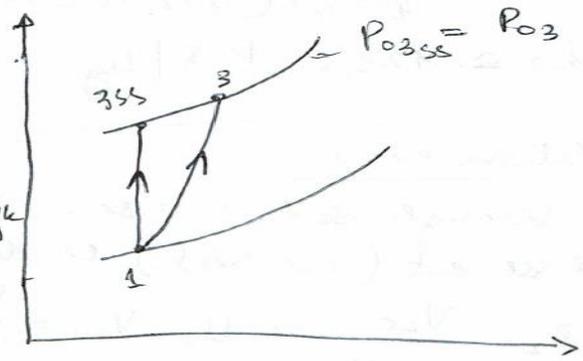
Solution TD N° 2 Compresseurs Centrifuge

Exo 1:

$$P_{01} = 10 \text{ kPa}, T_{01} = 300 \text{ K}$$

$$P_{03} = 330 \text{ kPa}$$

$$\eta_c = 0,9, \gamma = 1,4, C_p = 1004,7 \text{ J/kgK}$$



En appliquant l'équation d'énergie entre ① et ③ (Transf. réelle).

$$Q_{1-3} + W_{1-3} = \Delta E_{c,1-3} + \Delta E_{i,1-3} + \Delta h_{1-3} \quad [\text{J/kg}]$$

Q_{1-3} (compression adiabatique) \rightarrow 0
 $\Delta E_{i,1-3}$ (négligeable ds le calcul des compresseurs) \rightarrow 0

$$W_{1-3} = \frac{1}{2} V_3^2 - \frac{1}{2} V_1^2 + h_3 - h_1 = \underbrace{\left(h_3 + \frac{1}{2} V_3^2 \right)}_{h_{03}} - \underbrace{\left(h_1 + \frac{1}{2} V_1^2 \right)}_{h_{01}}$$

h_{03} : c'est l'enthalpie totale à la sortie du diffuseur

h_{01} : c'est l'enthalpie totale à l'entrée de la roue.

$$W_{1-3} = h_{03} - h_{01} = C_p (T_{03} - T_{01})$$

T_{01} et T_{03} : sont les températures totales

Pour une compression isentropique entre 1 - 3SS \rightarrow

$$\left(\frac{P_{03SS}}{P_{01}} \right) = \left(\frac{T_{03SS}}{T_{01}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \rightarrow T_{03SS} = \left(\frac{330}{10} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \times 300 = 410,62$$

$$\eta_c = \frac{T_{03SS} - T_{01}}{T_{03} - T_{01}} \rightarrow T_{03} - T_{01} = \frac{T_{03SS} - T_{01}}{\eta_c}$$

$$T_{03} = \frac{T_{03SS} - T_{01}}{\eta_c} + T_{01} = \frac{410,62 - 300}{0,9} + 300 = 422,9 \text{ K}$$

$$W_{1-3} = C_p (T_{03} - T_{01}) = 1004,7 (422,9 - 300)$$

$$W_{1-3} \approx 123,5 \text{ kJ/kg}$$

Application 2

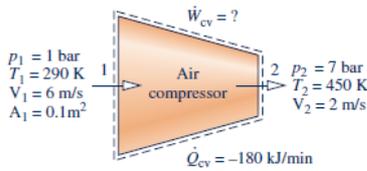
L'air entre dans un compresseur en régime permanent à une pression 1 bar et une température 290 K et une vitesse d'entrée de 6 m/s. A la sortie, la pression est de 7 bar, une température de 450 K et une vitesse de 2 m/s. le transfert de chaleur du compresseur à l'extérieur est de l'ordre de 180 kJ/kg. Calculer la puissance du compresseur en J/kg. On donne $C_p=1.005$ kJ/kg

SOLUTION

Known: An air compressor operates at steady state with known inlet and exit states and a known heat transfer rate.

Find: Calculate the power required by the compressor.

Schematic and Given Data:



Engineering Model:

1. The control volume shown on the accompanying figure is at steady state.
2. The change in potential energy from inlet to exit can be neglected.
3. The ideal gas model applies for the air.

Analysis: To calculate the power input to the compressor, begin with the one-inlet, one-exit form of the energy rate balance for a control volume at steady state, Eq. 4.20a. That is,

$$0 = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \dot{m} \left[(h_1 - h_2) + \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} + g(z_1 - z_2) \right]$$

Solving

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

The change in potential energy from inlet to exit drops out by assumption 2.

The mass flow rate \dot{m} can be evaluated with given data at the inlet and the ideal gas equation of state.

$$\dot{m} = \frac{A_1 V_1}{v_1} = \frac{A_1 V_1 p_1}{(R/M)T_1} = \frac{(0.1 \text{ m}^2)(6 \text{ m/s})(10^5 \text{ N/m}^2)}{\left(\frac{8314 \text{ N} \cdot \text{m}}{28.97 \text{ kg} \cdot \text{K}} \right)(290 \text{ K})} = 0.72 \text{ kg/s}$$

The specific enthalpies h_1 and h_2 can be found from Table A-22. At 290 K, $h_1 = 290.16$ kJ/kg. At 450 K, $h_2 = 451.8$ kJ/kg. Substituting values into the expression for \dot{W}_{cv} , and applying appropriate unit conversion factors, we get

$$\begin{aligned} \dot{W}_{cv} &= \left(-180 \frac{\text{kJ}}{\text{min}} \right) \left| \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right| + 0.72 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left[(290.16 - 451.8) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{(6)^2 - (2)^2}{2} \right) \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right) \left| \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right| \left| \frac{1 \text{ kJ}}{10^3 \text{ N} \cdot \text{m}} \right| \right] \\ &= -3 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} + 0.72 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (-161.64 + 0.02) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ &= -119.4 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \left| \frac{1 \text{ kW}}{1 \text{ kJ/s}} \right| = -119.4 \text{ kW} \end{aligned}$$

2

