

Chapitre 1 : Les turbomachines

1. Introduction

Tout processus énergétique consiste à organiser des **transferts** de **travail** et de **chaleur** et à les réaliser dans des **appareils appropriés**. Dans les machines volumétriques^{*}, cet échange d'énergie a lieu par déformations de capacités à l'intérieur desquelles le fluide est provisoirement prisonnier. **Les turbomachines** qui manipulent des débits de fluide plus grands que les machines volumétriques, jouent dans ces conversions d'énergie un rôle important d'échangeur de travail entre le fluide et un organe mécanique dont la partie en mouvement est constituée d'un rotor muni d'ailettes (aubes, aubages).

A cet effet, **les turbomachines** sont considérées comme des systèmes thermodynamiques ouverts (volumes de contrôle) c'est-à-dire des systèmes traversés par des écoulements, dont la prédiction de leurs comportements nécessite l'utilisation des principes de conservation de la masse et de l'énergie.

Dans ce chapitre, nous allons développer le principe de conservation de la masse, définir le travail d'écoulement, définir l'énergie d'écoulement, comprendre le transfert d'énergie par un écoulement sous la forme d'énergie interne, d'énergie cinétique, d'énergie potentielle et d'énergie d'écoulement, maîtriser les principes de conservation de la masse et de l'énergie et, enfin, utiliser les principes de conservation en vue de prédire le comportement de quelques **turbomachines** qui opèrent en régime permanent.

2. Définitions

Une **machine** est un produit fini mécanique (mécanisme) capable d'utiliser une source d'énergie communément disponible pour effectuer par elle-même, sous la conduite ou non d'un opérateur, une ou plusieurs tâches spécifiques.

Une **turbomachine** est une machine dont le rôle est d'assurer un échange d'énergie entre un fluide en écoulement et un rotor animé d'un mouvement de rotation généralement uniforme autour de son axe (partie tournante).

3. Classification des turbomachines

Il est possible d'identifier et de classer les turbomachines à partir de caractères spécifiques (On supposera que l'écoulement est permanent^{**}).

* Une machine volumétrique est une machine où le transfert d'énergie entre elle et le fluide se fait sous l'effet d'une modification de volume produite par un plongeur.

** Un écoulement est permanent ou stationnaire lorsque les champs scalaires et vectoriels de masse volumique, de vitesse, de température, etc. sont constants dans le temps.

3.1. Selon le sens de l'échange d'énergie

- Une turbomachine est **génératrice** lorsqu'elle communique de l'énergie au fluide.

Puisqu'elle consomme de l'énergie mécanique sur son arbre, elle doit être nécessairement accouplée à une autre machine jouant un rôle de moteur (moteur électrique, moteur Diesel, turbomachine réceptrice).

L'apport d'énergie au fluide s'accompagne d'une augmentation de sa pression, on parle alors de **turbomachine génératrice** ou **de compression**.

Ces **turbomachines de compression** se subdivisent en :

- **Pompes** : dans lesquelles le fluide en mouvement est liquide → incompressible.
- **Ventilateurs** : dans lesquels le fluide gazeux se comporte de manière incompressible sa variation de volume massique au cours de la traversée de la machine est négligeable.
- **Compresseurs** : dans lesquelles la compressibilité du fluide gazeux intervient.

- Une turbomachine est **réceptrice** lorsqu'elle en reçoit de celui-ci.

Puisqu'elle recueille de l'énergie mécanique sur son arbre, elle doit être nécessairement accouplée à une autre machine jouant un rôle de machine entraînée (dynamo, alternateur, turbomachine génératrice).

L'emprunt d'énergie est associé à une diminution de pression, on parle alors de **turbomachine réceptrice** ou **de détente**

Ces **turbomachines de détente** portent le nom de **turbines**.

Les turbomachines sont largement utilisées pour réaliser des cycles thermodynamiques :

- Cas des compresseurs axiaux et des turbines axiales accouplés dans les réacteurs aéronautiques ou les turbines à gaz industrielles.
- Cas des centrales thermiques qui comportent une pompe à eau et une turbine à vapeur (Figure 1).

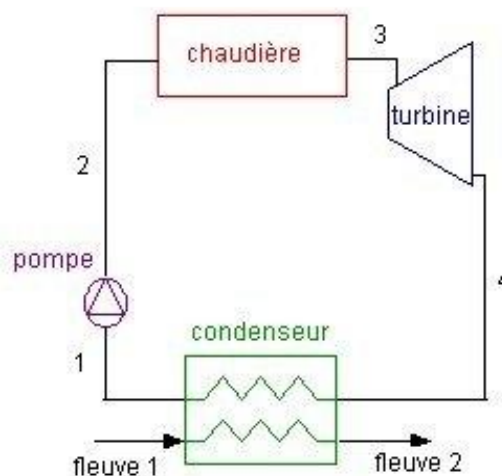


Figure 1. Schéma d'une centrale à vapeur

(Source : <https://dirrens.mines-paristech.fr/Sites/Thoip/fr/co/centrales-vapeur.html>)

Parmi les différentes familles de turbomachines : les **hélices marines** et **aériennes**, les **éoliennes**.Elles empruntent et rejettent le fluide dans un même milieu illimité.

3.2. Selon l'état du fluide : Liquide ou gazeux

3.3. Selon le comportement du fluide : **Compressible*** ou **incompressible**

3.4. Selon le nombre d'étages : Machines mono ou multicellulaires

3.5. Selon le trajet du fluide par rapport à l'axe : qui conduit à distinguer les machines axiales, les machines centrifuges ou centripètes et les machines hélicocentrifuges ou hélicocentripètes, moins nombreuses en pratique, mais qui correspondent au cas général où la veine de fluide est contenue entre deux surfaces de révolution quelconques.

3.6. Selon la nature de l'énergie échangée par le fluide dans le rotor

Comme l'énergie échangée avec le fluide transite entièrement par le rotor, elle se distribue à la traversée des canaux mobiles, entre une variation d'énergie piézométrique et une autre d'énergie cinétique. On appelle **degré de réaction** le rapport exprimé en pour-cent de cette variation d'énergie piézométrique dans le rotor à l'énergie totale échangée dans l'étage. Lorsque le degré de réaction est nul et que les canaux mobiles ne sont donc le siège que d'une variation d'énergie cinétique, la cellule est dite à action ; dans le cas contraire, plus général, elle est dite à réaction.

3.7. Selon le degré d'injection : Injection totale ou partielle.

4. Principes de bases utilisés dans l'étude des turbomachines

On a besoin de se rappeler des principes fondamentaux de mécanique, de mécanique des fluides et de thermodynamique nécessaires pour l'étude des machines transformatrices d'énergie véhiculant des fluides. On s'attachera essentiellement à rappeler les notions utiles dans le cas des écoulements permanents.

En effet, l'écoulement des fluides gazeux est gouverné par quatre principes de base :

- Principe de conservation de la masse.
- Principe fondamental de la mécanique.
- Premier principe de la thermodynamique.
- Second principe de la thermodynamique.

Ces quatre principes de base et le théorème de l'énergie cinétique constituent les outils principaux permettant l'étude des turbomachines.

Les **turbopompes** et les **turbocompresseurs** associent deux turbomachines montées sur le même arbre : l'une réceptrice (une turbine) et l'autre génératrice (une pompe ou un compresseur), la turbine servant à entraîner l'autre machine.

* Si le fluide est incompressible alors sa masse volumique est constante ($\rho = \text{cte}$).

5. Les compresseurs

5.1. Définition d'un compresseur

Un **compresseur** est une turbomachine c'est-à-dire un organe mécanique destiné à augmenter la pression d'un gaz, et donc son énergie (voir début de ce chapitre).

Pour exercer la même fonction sur un liquide, quasi incompressible, on utilise une **pompe**.

Les **compresseurs centrifuges** agissent principalement par accélération centrifuge d'un flux de fluide, on les retrouve également dans les turbines à gaz, turboréacteurs, turbocompresseurs.

Le terme **compresseur centrifuge** (ou **compresseur radial**) désigne un type de turbomachines à circulation radiale et à absorption de travail qui comprend des ventilateurs (soufflantes et extracteurs), et des compresseurs.

Les **pompes centrifuges**, qui sont aussi des turbomachines, désignent des machines circulant des liquides, fluides généralement incompressibles, et ne sont donc pas des compresseurs (qui eux compriment des gaz compressibles avec changement de volume du gaz).

Les **pompes centrifuges** utilisent, comme les compresseurs centrifuges, des roues à circulation radiale et ont donc mécaniquement une certaine ressemblance avec les compresseurs centrifuges.

Le **compresseur**, la **pompe** et le **ventilateur** sont des machines sur lesquelles du travail est fait. Ces machines consomment de l'électricité pour entraîner leurs arbres. Elles sont utilisées pour accroître la pression dans un fluide.

Le **ventilateur** augmente légèrement la pression d'un gaz dans le but de la déplacer.

Le **compresseur** augmente sensiblement la pression dans un gaz.

Quant à la **pompe**, elle est conçue pour accroître la pression dans les liquides.

A moins d'être refroidies, la puissance thermique entre ces machines et le milieu extérieur est, en général, négligeable : $\dot{Q} \approx 0$

Les variations d'énergies cinétique et potentielle sont aussi négligeables par rapport aux termes de l'équation d'énergie : $\Delta E_c = \Delta E_p \approx 0$

5.2. Schéma de principe d'un compresseur

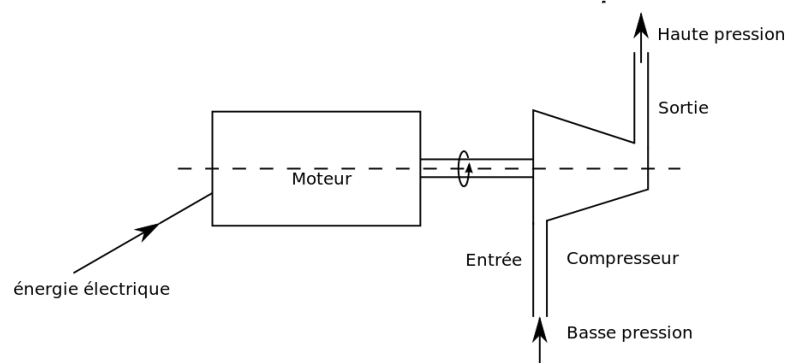


Figure 2a. Schéma de principe d'un compresseur (compresseur à turbine)

(Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Compresseur_m%C3%A9canique)

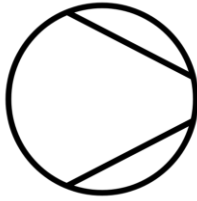


Figure 2b. Symbole du compresseur sur un schéma tuyauterie et instrumentation*

(Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Compresseur_m%C3%A9canique)

6. Les turbines

6.1. Définition d'une turbine

La **turbine** est une turbomachine c'est-à-dire une machine qui transforme partiellement l'énergie totale de l'écoulement d'un fluide en travail mécanique afin d'entraîner l'arbre d'un alternateur qui produit à son tour de l'électricité (voir début de ce chapitre).

Le fluide peut être :

- de la vapeur d'eau qui s'écoule dans la turbine d'une centrale thermique ou nucléaire (TAV).
- un gaz qui s'écoule dans une turbine à gaz (TAG).
- de l'eau qui s'écoule dans la turbine d'une centrale hydraulique (TAE).

L'énergie entrante du fluide est caractérisée par sa **vitesse**, sa **pression**, son **enthalpie**.

L'énergie mécanique sortante de la turbine entraîne un autre mécanisme rotatif comme un alternateur, un compresseur, une pompe, etc.

L'ensemble est alors respectivement appelé turbo-alternateur, turbocompresseur, turbopompe, etc. (Figure 3).

6.2. Schéma de principe d'une turbine

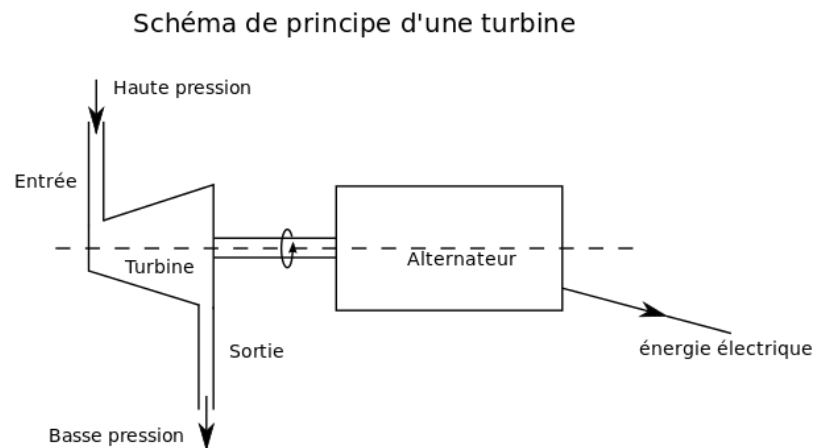


Figure 3. Schéma de principe d'une turbine (groupe turbine-alternateur)

(Source : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Turbine>)

* Un schéma tuyauterie et instrumentation (TI) est un diagramme qui définit tous les éléments d'un procédé industriel. Il est le schéma le plus précis et le plus complet utilisé par les ingénieurs pour la description d'un procédé.

6.3. Turbines à gaz (TAG)

Les turbines à gaz sont séparées en deux catégories selon la nature de la puissance récupérée du fluide en sortie de la turbine :

Les **turbomoteurs** et **turbopropulseurs** : La turbine à gaz génère de la puissance mécanique extraite d'un arbre. Cet arbre peut entraîner un rotor d'hélicoptère, une hélice d'avion (turbopropulseur), un alternateur (groupe électrogène).

Les **turboréacteurs** : La turbine à gaz génère de l'énergie cinétique sous forme d'un jet à haute vitesse qui sert à la propulsion des avions.

Les turbines à gaz fonctionnent habituellement selon un cycle ouvert (Figure 4) :

- L'air atmosphérique s'engage dans le compresseur où il est comprimé à haute pression et à haute température.
- Il est ensuite admis dans la chambre de combustion.
- Les gaz chauds résultant de la combustion se détendent alors dans une turbine qui produit du travail mécanique.
- A la sortie de la turbine, les gaz sont évacués dans l'atmosphère.

Le cycle ouvert est complété !

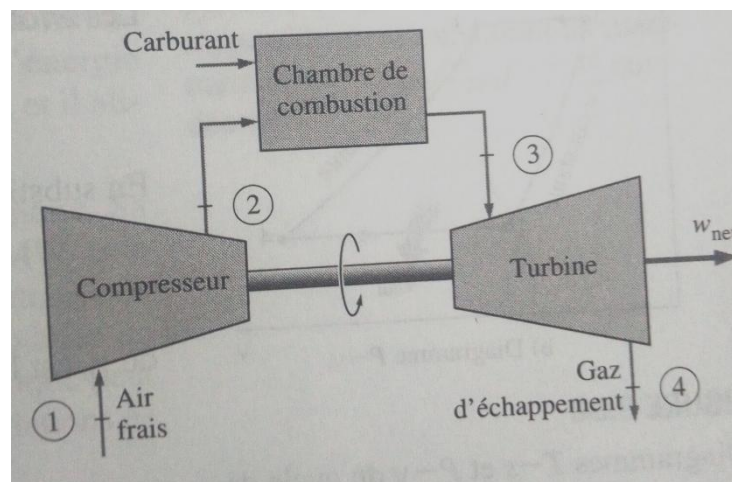


Figure 4. Cycle ouvert d'une turbine à gaz

(Source : Yunus A. Çengel ; Michael A. Boles & Marcel Lacroix. Thermodynamique : Une approche pragmatique. Chenelière McGraw-Hill)

Le cycle ouvert de la turbine à gaz peut néanmoins être modélisé comme un cycle fermé si on admet les hypothèses d'air standard (Figure 5).

Les évolutions de compression et de détente demeurent inchangées. Toutefois, le phénomène de combustion est remplacé par une évolution de transmission de chaleur à pression constante d'une source externe au système, et l'évacuation des gaz à la sortie de la turbine est remplacée par une évolution de transmission de chaleur à pression constante du système au milieu extérieur.

Ce cycle idéal est connu sous le nom de **cycle de Brayton**.

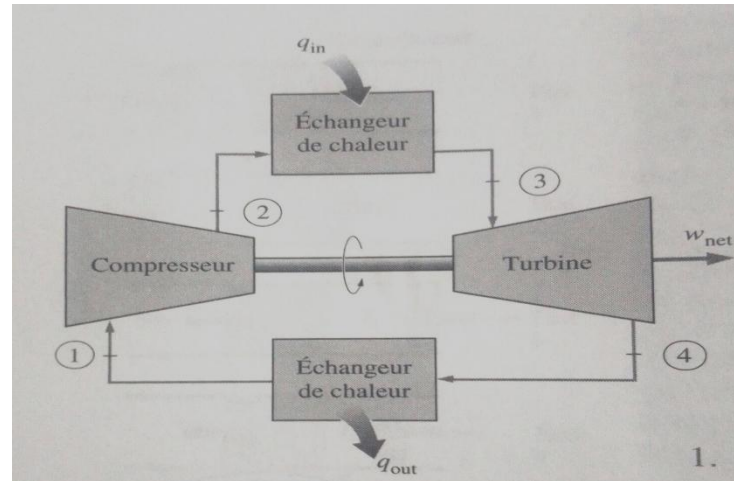


Figure 5. Cycle fermé d'une turbine à gaz

(Source : Yunus A. Çengel ; Michael A. Boles & Marcel Lacroix. Thermodynamique : Une approche pragmatique. Chenelière McGraw-Hill)

Le cycle de Brayton :

Comprend quatre évolutions réversibles intérieurement :

- Une compression isentropique (dans le compresseur).
- Un apport de chaleur à pression constante.
- Une détente isentropique (dans la turbine).
- Une évacuation de chaleur à pression constante.

Se déroule dans des machines avec écoulement en régime permanent dont la variation des énergies cinétique et potentielle est négligeable.

6.4. Turbines à vapeur (TAV)

Un alternateur, une turbine et un fluide pour entraîner cette turbine sont les éléments principaux pour produire de l'électricité. Ce principe simple peut ensuite être décliné suivant le fluide utilisé, de l'eau pour les centrales hydrauliques, de la vapeur pour les centrales thermiques.

Dans le cas de la vapeur, il reste à choisir le moyen qui permet de chauffer l'eau, en utilisant soit des combustibles fossiles (centrales thermiques), soit des réactions nucléaires (centrales nucléaires).

Toute la complexité technologique mise en œuvre pour réaliser concrètement ces principes découle de la nécessité d'optimiser le cycle thermique et de construire des installations sûres.

Le fluide : vapeur d'eau, considérée comme un gaz réel.

Le cycle idéal correspondant à une centrale thermique élémentaire à vapeur d'eau est le **cycle Rankine**. Aucune irréversibilité intérieure n'intervient dans le **cycle Rankine idéal**. Quatre évolutions le composent (Figure 6) :

- Une compression isentropique (dans la pompe).
- Un apport de chaleur à pression constante (dans la chaudière).
- Une détente isentropique (dans la turbine).
- Une évacuation de chaleur à pression constante (dans le condenseur).

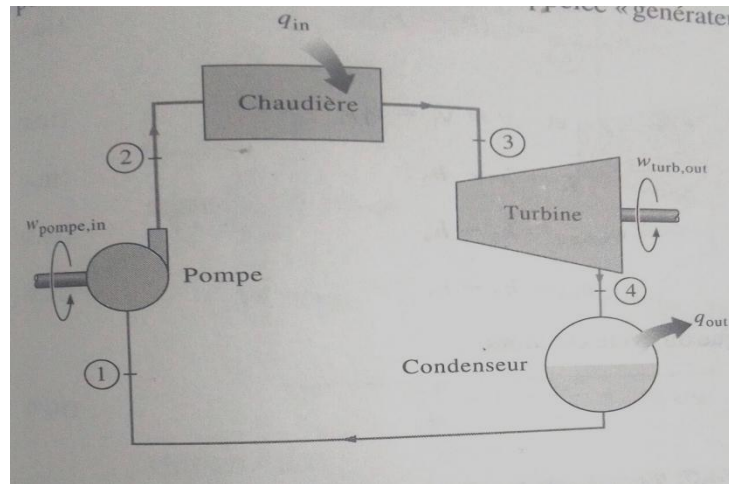


Figure 6. Cycle d'une turbine à vapeur

(Source : Yunus A. Çengel ; Michael A. Boles & Marcel Lacroix. Thermodynamique : Une approche pragmatique. Chenelière McGraw-Hill)

7. Machines fonctionnant avec des écoulements en régime permanent

Des machines comme les turbines, les compresseurs et les pompes sont conçues pour fonctionner sans interruption et en déviant peu de leur régime pendant de longues périodes de temps. Ces systèmes sont étudiés à l'aide des équations de bilans de masse et d'énergie propres aux écoulements en régime permanent.

Les turbomachines peuvent être considérées comme des systèmes thermodynamiques ouverts à deux écoulements (une entrée et une sortie) opérant en régime permanent (stationnaire).

7.1. Analyse énergétique de systèmes thermodynamiques ouverts avec écoulement en régime permanent

7.1.1. Conservation de masse pour un système ouvert

Un **système ouvert** (volume de contrôle) est une région définie de l'espace :

- Elle peut bouger.
- Sa forme peut changer.
- Son volume peut changer.
- Des énergies et des masses peuvent s'écouler à travers sa limite.
- Un transfert d'énergie peut avoir lieu par la chaleur (Q) et le travail (W) (Comme dans le cas d'un système fermé).

La variation de masse d'un système ouvert durant un intervalle de temps Δt est égale à la quantité de masse entrant dans le système moins la quantité de masse sortant du système (figure 7) :

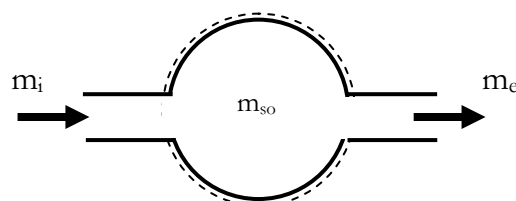


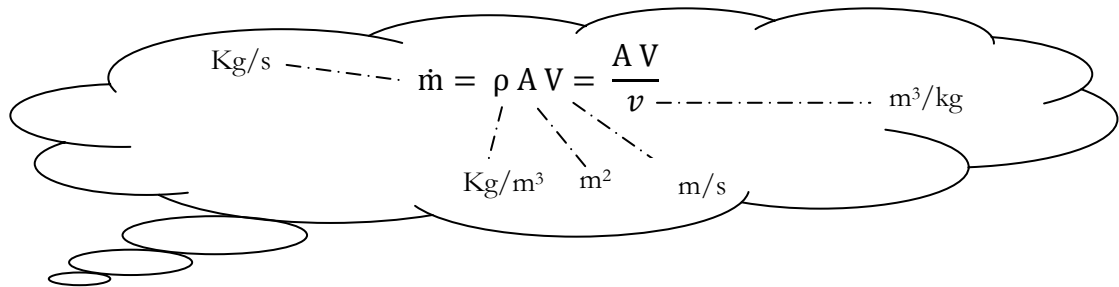
Figure 7. Principe de la conservation de masse au niveau d'un système ouvert

$$\Delta m_{so} = m_{so}(t + \Delta t) - m_{so}(t) = m_i - m_e \quad \dots \dots \dots \quad [\text{kg}]$$

Cette équation peut être décrite par unité de temps :

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left[\frac{m_{so}(t + \Delta t) - m_{so}(t)}{\Delta t} \right] = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{m_i}{\Delta t} - \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{m_e}{\Delta t}$$

$$\frac{dm_{so}}{dt} = \dot{m}_i - \dot{m}_e \quad \dots \dots \dots \quad [\text{kg/s}]$$



7.2.2. Conservation d'énergie pour un système ouvert

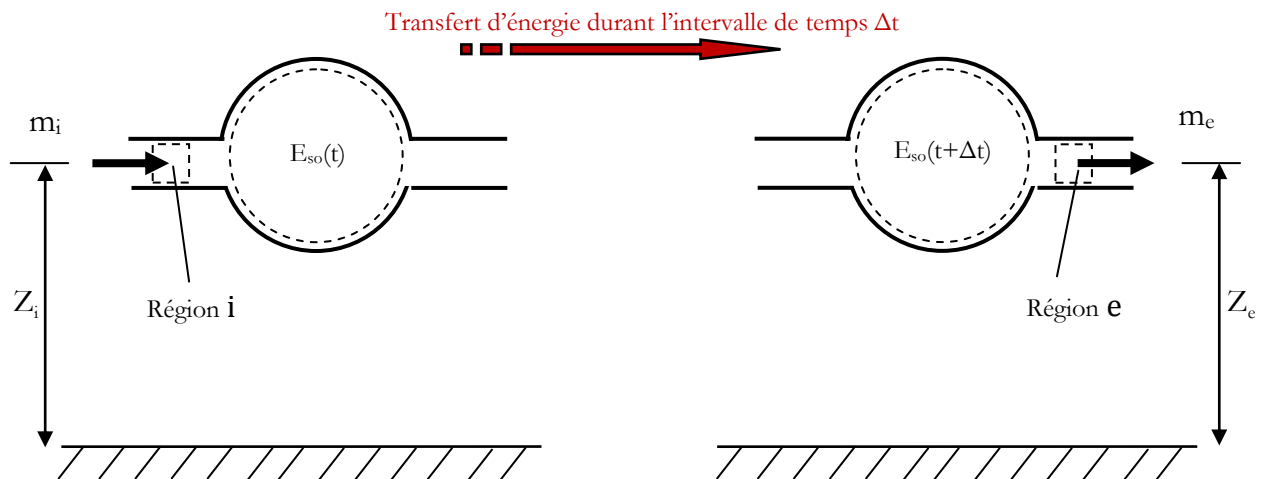


Figure 8. Principe de la conservation d'énergie au niveau d'un système ouvert

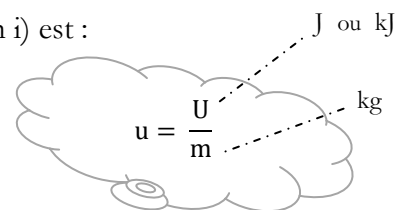
Le principe de la conservation d'énergie peut être développé en utilisant la démonstration ci-dessous.

La figure 8 montre un système consistant en une quantité fixe m de matière qui occupe une région différente aux temps t et $t+\Delta t$: $m = m_{so}(t) + m_i$

Au temps t , l'énergie du système total (système ouvert + région i) est :

$$E(t) = E_{so}(t) + U_i + \frac{1}{2} m_i V_i^2 + m_i g Z_i$$

$$E(t) = E_{so}(t) + m_i \left(u_i + \frac{V_i^2}{2} + g Z_i \right)$$



Dans un intervalle de temps Δt , toute la masse de la région i traverse la limite du système ouvert pendant qu'une quantité de masse m_e (contenue auparavant dans le système ouvert) sort pour remplir la région e .

$$m = m_{so}(t + \Delta t) + m_e$$

$$E(t + \Delta t) = E_{so}(t + \Delta t) + U_e + \frac{1}{2} m_e V_e^2 + m_e g Z_e$$

$$E(t + \Delta t) = E_{so}(t + \Delta t) + m_e \left(u_e + \frac{V_e^2}{2} + g Z_e \right)$$

Selon la 1^{ère} loi de la thermodynamique, on a :

$$\Delta E = Q - W$$

$$E(t + \Delta t) - E(t) = Q - W$$

$$\left[E_{so}(t + \Delta t) + m_e \left(u_e + \frac{V_e^2}{2} + g Z_e \right) \right] - \left[E_{so}(t) + m_i \left(u_i + \frac{V_i^2}{2} + g Z_i \right) \right] = Q - W$$

$$E_{so}(t + \Delta t) - E_{so}(t) = \left[m_i \left(u_i + \frac{V_i^2}{2} + g Z_i \right) - m_e \left(u_e + \frac{V_e^2}{2} + g Z_e \right) \right] + Q - W$$

$$\Delta E_{so} = m_i \left(u_i + \frac{V_i^2}{2} + g Z_i \right) - m_e \left(u_e + \frac{V_e^2}{2} + g Z_e \right) + Q - W$$

Et par unité de temps, on a :

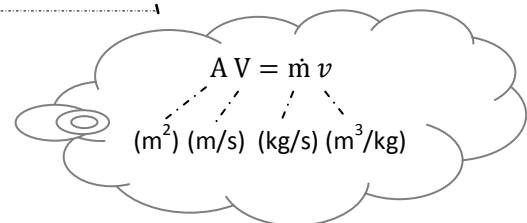
$$\frac{dE_{so}}{dt} = \dot{m}_i \left(u_i + \frac{V_i^2}{2} + g Z_i \right) - \dot{m}_e \left(u_e + \frac{V_e^2}{2} + g Z_e \right) + \dot{Q} - \dot{W}$$

Généralement, il est plus convenient de séparer le terme de travail \dot{W} en deux contributions :

- La 1^{ère} est le travail associé à la pression du fluide quand une masse s'écoule.
- La 2^{ème} est toute autre forme de travail (mécanique, électrique, magnétique, etc.).

$$\dot{W} = [(P_e A_e) V_e - (P_i A_i) V_i] + \dot{W}_{so}$$

$$\dot{W} = [\dot{m}_e (P_e v_e) - \dot{m}_i (P_i v_i)] + \dot{W}_{so}$$



D'où :

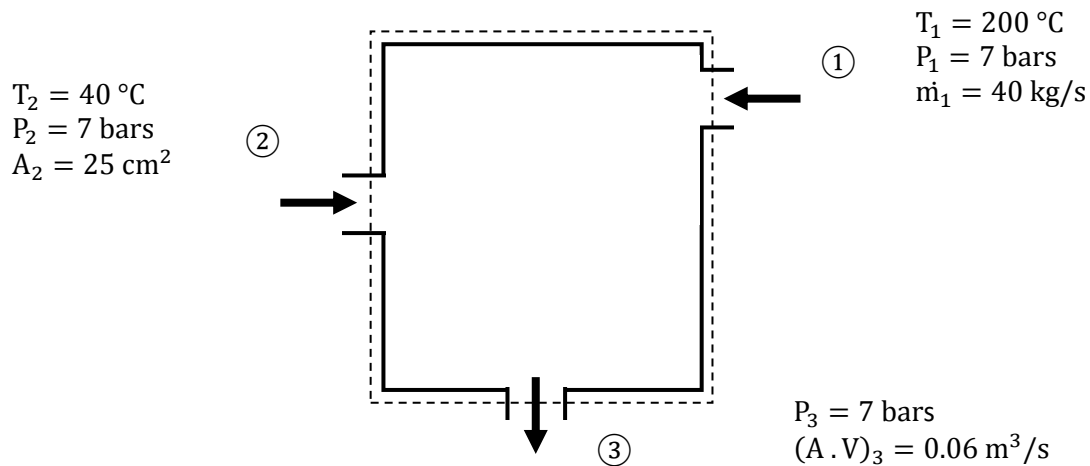
$$\frac{dE_{so}}{dt} = \dot{m}_i \left(u_i + P_i v_i + \frac{V_i^2}{2} + g Z_i \right) - \dot{m}_e \left(u_e + P_e v_e + \frac{V_e^2}{2} + g Z_e \right) + \dot{Q}_{so} - \dot{W}_{so}$$

$$\frac{dE_{so}}{dt} = \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + g Z_i \right) - \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + g Z_e \right) + \dot{Q}_{so} - \dot{W}_{so}$$

8. Exercices

Exercice 1

Un écoulement de vapeur d'eau (Etat ①) se mélange à un écoulement d'eau liquide (Etat ②) pour produire un écoulement d'eau saturée (Etat ③).



- Déterminer les taux (débits) d'écoulement de masse à l'entrée ② et à la sortie ③.
- Calculer la vitesse à l'entrée ②.

On donne, d'après les tables de l'eau saturée : $v = 1108 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$

Pour l'eau à 7 bars et 40 °C : $v = 1007.8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$

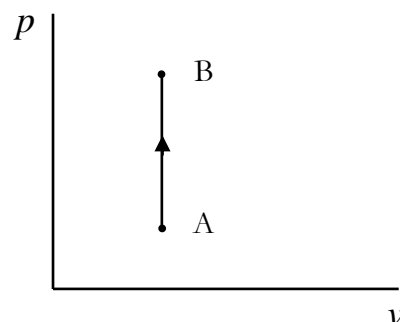
On suppose que l'écoulement est unidimensionnel et que le système est en régime stationnaire.

Exercice 2

Une pompe à liquide comprime lentement un débit d'eau de 2 kg/s depuis 1 bar jusqu'à 20 bar. Pendant la compression, le volume spécifique de l'eau reste constant à $v_L = 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$.

- Quelle est la puissance consommée sous forme de travail ?

Sur un diagramme pression-volume et de façon qualitative (c'est-à-dire sans représenter les valeurs numériques), l'évolution peut être représentée ainsi :

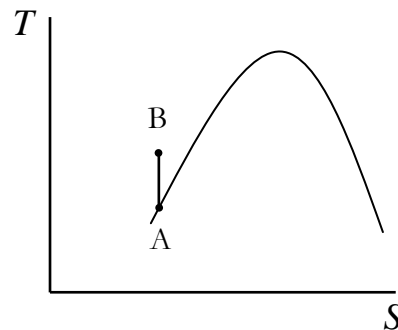


Exercice 3

Dans une centrale, une pompe est alimentée par un débit de $35 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ d'eau liquide saturée à 0.5 bar. L'eau est comprimée de façon approximativement isentropique jusqu'à 40 bar.

- Quelle est la puissance consommée ?

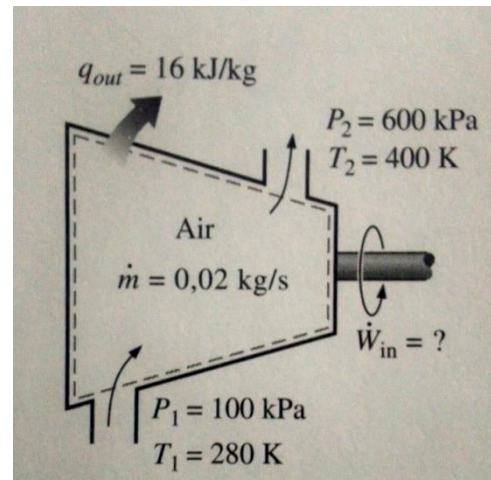
L'évolution peut être représentée de façon qualitative sur un diagramme température-entropie ainsi :

**Exercice 4**

De l'air à 100 kPa et 280 K est comprimé à 600 kPa et 400 K. Le débit massique d'air est de 0.02 kg/s et le compresseur perd 16 kJ/kg de chaleur pendant l'évolution.

On suppose que la variation des énergies cinétique et potentielle de l'écoulement est négligeable.

- Déterminer la puissance requise du compresseur.

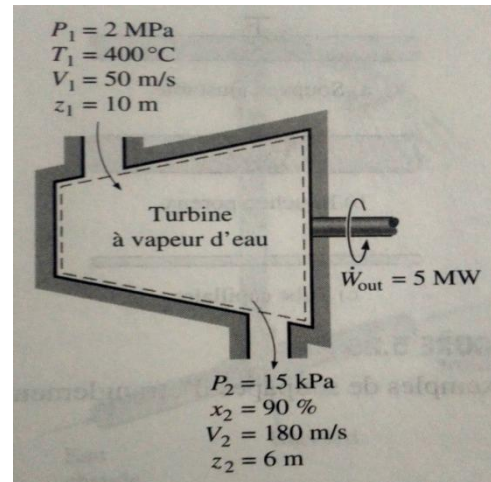


(Source : Yunus A. Çengel ; Michael A. Boles & Marcel Lacroix. Thermodynamique : Une approche pragmatique. Chenelière McGraw-Hill)

Exercice 5

Une turbine à vapeur d'eau dont les conditions d'exploitation sont rapportées à la figure ci-dessous produit 5MW.

1. Comparer les grandeurs de Δh , de ΔE_c et de ΔE_p .
2. Déterminer le travail produit par unité de masse de vapeur.
3. Calculer le débit massique de la vapeur.



(Source : Yunus A. Çengel ; Michael A. Boles & Marcel Lacroix. Thermodynamique : Une approche pragmatique. Chenelière McGraw-Hill)

Fin du chapitre 1