

Exercices : Thermodynamique

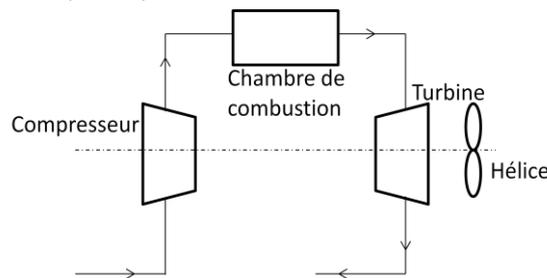
2.4 Exercices de cours

2.4.1 Turbopropulseur (cycle de Joule)

Un turbopropulseur est un moteur à réaction dont l'organe essentiel est constitué par une turbine à gaz dont le rôle est d'entraîner, outre le compresseur, l'hélice propulsive.

Le cycle du turbopropulseur est assimilable à un cycle de Joule ; le gaz utilisé est assimilé à un gaz parfait, de capacité thermique massique isobare c_p constante.

On donne $\gamma = 1,4$, $M = 29 \text{ g.mol}^{-1}$, $R = 8,32 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$



Première phase : l'air, à température $T_0 = 280 \text{ K}$ et à la pression $P_0 = 1 \text{ bar}$ est aspiré dans le compresseur qui le porte aux conditions $P_1 = 10 \text{ bar}$ et T_1 par une évolution supposée adiabatique et réversible. On appellera w_1' le travail fourni par le compresseur à l'unité de masse d'air. Les vitesses d'écoulement seront négligées.

Deuxième phase : à la sortie du compresseur, l'air pénètre dans le chambre de combustion où, sous pression constante P_1 , sa température est portée à la valeur de $T_1' = 1000 \text{ K}$. On appellera q l'énergie thermique fournie à l'unité de masse d'air dans cette transformation.

Troisième phase : l'air parvient alors à la turbine où il subit une détente adiabatique et réversible. On négligera les vitesses d'écoulement aussi bien à l'entrée qu'à la sortie de la turbine. A la fin de cette détente, la pression de l'air est $P_2 = P_0$ et sa température T_2 . On appellera w_2' le travail que l'unité de masse d'air fournit à la turbine pendant la détente.

Quatrième phase : l'air est rejeté dans l'atmosphère extérieure où il se refroidit à pression constante P_0 , de la température T_2 à la température T_0 .

- 1) Donner l'allure du cycle dans le diagramme de Clapeyron. Ce cycle est dit cycle de Joule.
- 2) Donner les expressions littérales de T_1 et w_1' . Calculer T_1 .
- 3) Exprimer littéralement q .
- 4) Donner les expressions littérales de T_2 et w_2' . Calculer T_2 .
- 5) Quel est le travail massique disponible à l'hélice ? Le calculer, ainsi que q .
- 6) Définir le rendement du turbopropulseur, en fonction du taux de compression $a = P_1/P_0$. Le calculer.

2.4.2 Turbomachine avec changement d'état

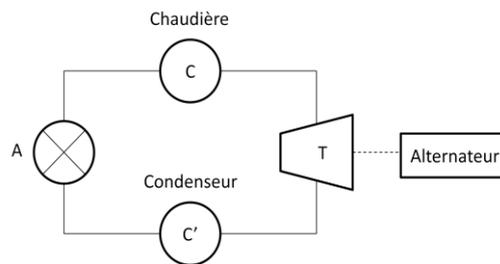
On considère une installation comportant une chaudière C, une turbine T, un condenseur C', et une pompe A.

Le fluide utilisé est l'eau, il décrit les cycles suivants :

- La pompe alimentaire amène le fluide saturant, pris à la sortie du condenseur (état F), jusqu'à la pression P_1 de la chaudière. Cette opération est pratiquement adiabatique et on peut considérer qu'à la sortie de la pompe le fluide est liquide (état G) pratiquement à la température T_2 du condenseur. On admet que le travail massique mis en jeu dans la pompe est négligeable devant celui fourni par la turbine.

- L'eau est alors injectée dans la chaudière où elle se vaporise de façon isobare (P_1). A la sortie de la chaudière, la vapeur est saturante sèche à T_1 (état D).

- Elle subit ensuite une détente adiabatique et réversible dans une turbine T (partie active du cycle). A la sortie de la turbine, le fluide est à la température T_2 et à la pression P_2 du condenseur (point E), où il achève de se liquéfier de façon isobare (point F).



Données :

- $T_1 = 523 \text{ K}$
- $T_2 = 293 \text{ K}$
- Enthalpie de vaporisation à 523 K : $l_1 = 1714 \text{ kJ.kg}^{-1}$
- Pression de vapeur saturante à 523 K : $P_1 = 39,7 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
- Pression de vapeur saturante à 293 K : $P_2 = 2300 \text{ Pa}$
- Enthalpie massique du liquide saturant à 293 K : $h_l = 84 \text{ kJ.kg}^{-1}$
- Enthalpie massique de la vapeur saturante sèche à 293 K : $h_v = 2538 \text{ kJ.kg}^{-1}$
- Chaleur massique du liquide : $c_{liq} = 4180 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- Volume massique du liquide : $v_{liq} = 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

- 1) Quelle est l'enthalpie massique de vaporisation du fluide à 293 K ?
- 2) Déterminer le titre en vapeur du fluide à la sortie de la turbine.
- 3) Déterminer l'enthalpie massique au point E.
- 4) Au point D, l'enthalpie massique vaut 2800 kJ.kg^{-1} , quelle est le travail massique fourni par la turbine à l'alternateur ?
- 5) Déterminer le rendement de l'installation et le comparer à celui du cycle réversible fonctionnant entre les mêmes températures extrêmes. D'où provient cet écart ?
- 6) Quel débit massique de fluide est nécessaire pour obtenir une puissance convertie par l'alternateur de 100 kW ?

2.5 Exercices d'application

2.5.1 Puissance disponible dans une chute d'eau

Un site montagneux présente un cours d'eau de masse volumique, μ , de débit volumique connu, D_v . On constate qu'il est possible d'installer une retenue d'eau, permettant de créer une chute de hauteur H . Quelle puissance maximale est-il théoriquement possible d'obtenir ?

Application numérique : $D_v = 0,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $H = 30 \text{ m}$, $\mu = 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

2.5.2 Détente d'un gaz parfait dans une turbine

Un gaz parfait diatomique, pour lequel on donne la capacité thermique massique ($c_p = 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), traverse une turbine calorifugée. Le débit massique est égal à $1,5 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ et on connaît les conditions à l'entrée : pression $P_e = 10 \text{ bar}$, température $T_e = 700^\circ\text{C}$. En sortie, la pression est $P_s = 1 \text{ bar}$ et la température $T_s = 280^\circ\text{C}$.

- 1) Déterminer la puissance indiquée. Commenter le signe.
- 2) Exprimer la variation d'entropie, l'évolution est-elle réversible ?
- 3) Quelle serait la température de sortie dans le cas isentropique ? En déduire le rendement de la turbine par rapport à l'isentropique.

2.5.3 Détente d'un gaz parfait dans une tuyère

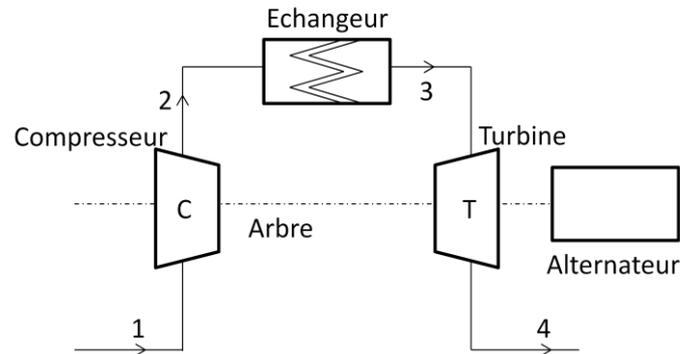
Déterminer la vitesse maximale d'éjection d'un gaz parfait diatomique dans une tuyère adiabatique, lorsque les conditions d'entrée sont : $1,5 \text{ bar}$ et 900 K . La pression de sortie est égale à 1 bar .

On donne : $c_p = 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

2.6 Exercices

2.6.1 Irréversibilité dans une turbine à gaz

On étudie une installation dont le fluide est un gaz parfait de capacité thermique massique $c_p = 1 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et de coefficient $\gamma = 1,40$. Dans le compresseur et la turbine, les évolutions sont adiabatiques mais irréversibles. On désire étudier le fonctionnement en prenant en compte ces irréversibilités : pour ce faire, on modélise chaque transformation comme une polytropique.



1) Lorsqu'un gaz parfait décrit une évolution polytropique, on définit la capacité thermique massique vraie c par la relation : $Tds = cdT$. Montrer qu'au cours d'une telle évolution la grandeur pv^k reste constante, où le coefficient k peut être relié à c , c_p et γ . Quelles valeurs de k correspondent à une évolution isentropique ou à une isobare ?

2) Dans l'installation, on a mesuré les paramètres suivants, aux différents points notés sur le schéma :

$$P_1 = P_4 = 1 \text{ bar} ; P_2 = 8,3 \text{ bar} ; P_3 = 8 \text{ bar} \text{ et } T_1 = 293 \text{ K} ; T_2 = 576 \text{ K} ; T_3 = 1260 \text{ K} ; T_4 = 760 \text{ K}.$$

Déterminer le travail indiqué massique de compression et détente, ainsi que la chaleur massique reçue par le fluide dans l'échangeur. Le travail récupéré dans la turbine sert à entraîner le compresseur, ainsi que l'alternateur. En déduire le rendement thermique de l'installation (rapport de la puissance électrique fournie par l'alternateur à la puissance thermique apportée au fluide au niveau de l'échangeur). Comparer ce rendement à celui d'un cycle de Carnot fonctionnant entre les mêmes températures extrêmes.

3) Pour chaque évolution, déterminer la production d'entropie due à l'irréversibilité et calculer k , commenter les valeurs.