

Examen de Thermodynamique

Module Thermo 2 – Semestre S2*

Mardi 10 janvier 2012 - 2 heures - Barème indicatif

Calculatrices ENIT autorisée

Documents autorisés : tables de variables thermodynamiques de l'eau

La notation prendra en compte la qualité de la rédaction :

- Démarche justifiée ;
- Formulation littérale avec démonstration (relations, expressions utilisées) ;
- Résultats avec les unités cohérentes du système international.

Rappels

☞ Expression générale du principe de conservation de l'énergie pour un volume de contrôle :

$$\frac{dE_{vc}}{dt} + \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) - \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) = \dot{W} + \dot{Q}$$

☞ Expression générale du deuxième principe pour un volume de contrôle :

$$\frac{dS_{vc}}{dt} + \sum_s \dot{m}_s s_s - \sum_e \dot{m}_e s_e \geq \int \frac{\delta \dot{Q}}{T}$$

☞ Le rendement thermique ou le coefficient de performance d'une machine cyclique est le rapport de la grandeur de sortie (l'énergie recherchée) sur la grandeur d'entrée (l'énergie à payer). C'est un nombre positif.

☞ Rendement, η , d'un organe de machine ($\eta \leq 1$) :

- Turbine : $\eta = \frac{\text{travail effectué par unité de masse dans les conditions données}}{\text{travail effectué dans une évolution adiabatique réversible dans les mêmes conditions}}$

- Tuyère : $\eta = \frac{\text{énergie cinétique en sortie obtenue dans les conditions données}}{\text{énergie cinétique en sortie obtenue dans une évolution isentropique}}$

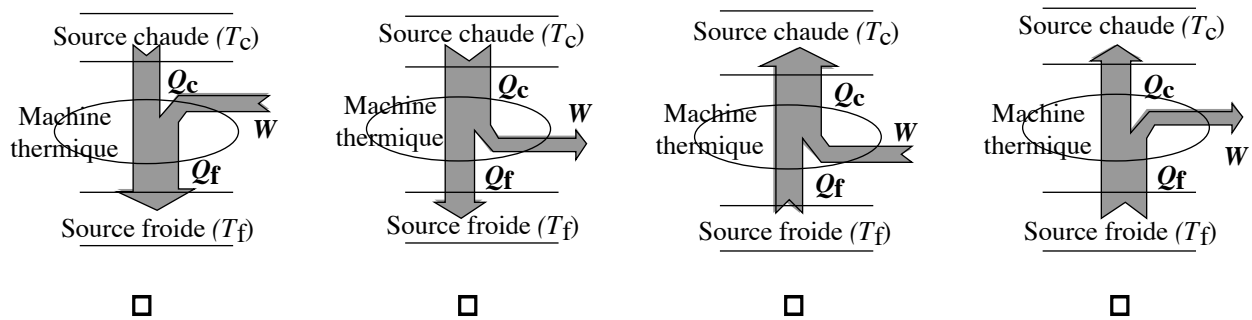
- Compresseur : $\eta = \frac{\text{travail effectué par unité de masse dans les conditions idéales}}{\text{travail effectué dans les conditions données}}$

Exercice 1 : QCM

(3 points)

0,5 point par bonne réponse sachant qu'une seule réponse sera admise pour chaque question. Dans le cas contraire, 0 point pour toute réponse fausse ou multiple.

a) Parmi les schémas suivants, lequel représente les échanges énergétiques mis en jeu dans une machine frigorifique ?



b) Parmi les expressions suivantes, laquelle correspond au coefficient de performance d'une pompe à chaleur ?

$$\beta = -\frac{Q_c}{W} \quad \square$$

$$\beta = \frac{Q_c + Q_f}{W} \quad \square$$

$$\beta = \frac{Q_f}{W} \quad \square$$

$$\beta = -\frac{W}{Q_c} \quad \square$$

c) Dans le cas d'un E.R.P., le bilan de masse global peut s'exprimer sous la forme :

$$\sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s = 0 \quad \square \text{ vrai } \square \text{ faux}$$

d) Le bilan entropique d'un fluide s'écoulant en régime permanent, suivant une évolution adiabatique, conduit au résultat suivant : $s_e = s_s$ \square vrai \square faux

e) Un fluide gazeux pénètre dans un organe de machine avec un débit $\dot{m}_1 = 8,5 \text{ kg/s}$. Une phase liquide et une phase gazeuse sont extraites de cet organe de machine. Sachant que l'écoulement s'effectue en régime permanent et que le débit de la phase liquide est $\dot{m}_2 = 3,5 \text{ kg/s}$, quel sera le débit de la phase gazeuse récupérée ?

$$\dot{m}_3 = 8,5 \text{ kg/s} \quad \square$$

$$\dot{m}_3 = 3,5 \text{ kg/s} \quad \square$$

$$\dot{m}_3 = 12 \text{ kg/s} \quad \square$$

$$\dot{m}_3 = 5 \text{ kg/s} \quad \square$$

f) Un fluide s'écoule en régime permanent dans un organe de machine calorifugé. Son entropie est $s_e = 4,5 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ à l'entrée et $s_s = 6,7 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ à la sortie. L'évolution de ce fluide est-elle :

Réversible ☐

Irréversible ☐

Impossible ☐

Exercice 2 : Les machines thermiques

(3,5 points)

1 - Moteur thermique

Une machine motrice fonctionne de manière réversible avec une source froide de température $\theta_f = 7^\circ\text{C}$ et un rendement thermique de 0,60.

a) Calculez la température de la source chaude.

b) On considère maintenant que la machine reçoit une quantité de chaleur de 2300 J de la source chaude, quelle est la quantité de chaleur évacuée par le fluide vers la source froide ?

2 - Machine frigorifique

Une machine frigorifique maintient une température de -30°C dans une chambre froide alors que la température extérieure est de 17°C . Pour cela, la puissance mécanique \dot{W} s'élève à 55 MJ par heure.

a) Représentez le schéma énergétique de cette installation en situant d'une part la chambre froide et l'atmosphère extérieure et d'autre part les quantités énergétiques échangées (\dot{W} , \dot{Q}_c et \dot{Q}_f).

b) Sachant que cette machine fonctionne de manière réversible, calculez la puissance thermique rejetée à l'extérieur de la chambre froide.

Exercice 3 : Ô Pic du Midi

(4,5 points)

L'observatoire du Pic du Midi est situé à 2877 m d'altitude. Le télescope Bernard Lyot (plus grand télescope de l'observatoire du Pic du Midi) est placé dans une salle équipée d'une coupole qui s'ouvre lorsque des observations doivent être réalisées. Pour que le fonctionnement du télescope soit optimal et les observations de grandes qualités, la salle doit être maintenue à la même température que l'extérieur. Une machine frigorifique assure cette fonction.

Cependant, très sensible aux économies d'énergie, Les concepteurs ont souhaité profiter de l'énergie thermique rejetée par cette machine frigorifique pour chauffer le laboratoire de recherche. La température intérieure est alors maintenue à 22 °C. Cette machine thermique peut donc être considérée également comme une pompe à chaleur lorsque l'on s'intéresse au chauffage du laboratoire.

Dans cet exercice, nous considérerons que le récepteur thermique doit maintenir une température de - 8 °C dans la salle du télescope. La quantité de chaleur cédée par le fluide frigorigène au cours du fonctionnement est alors de 652 MJ.

- 1) Le récepteur thermique est constitué de 4 éléments : deux échangeurs thermiques (un liquéfacteur et un évaporateur) ; un compresseur ; un détendeur.

Représentez le schéma de principe de cette installation. Précisez le sens d'écoulement du fluide frigorigène et au contact de quelle source se trouve respectivement le liquéfacteur et l'évaporateur. Enfin, quel est le rôle tenu par la coupole et le laboratoire (source froide, source chaude) ?

- 2) À l'aide d'un schéma, décrivez les échanges énergétiques (travail et chaleur) réalisés entre le fluide frigorigène, les sources de chaleur et le milieu extérieur.
- 3) Dans le cas d'un fonctionnement réversible, donnez l'expression littérale puis calculez le coefficient de performance, β_{\max} , de la machine thermique lorsqu'elle fonctionne comme une pompe à chaleur.

En réalité, le coefficient de performance, β , est égale à 6,38. Donnez les expressions littérales de W et Q_c , puis leurs valeurs numériques.

- 4) On considère maintenant la machine thermique comme une machine frigorifique. Calculez son efficacité dans le cas d'un fonctionnement réversible, β'_{\max} . Comparez ce coefficient de performance idéal au coefficient de performance réel de cette machine frigorifique, β' . Conclure.

Les résultats seront présentés avec au plus 3 chiffres significatifs et dans les unités du système international.

Exercice 4 : Turbine à vapeur

(9 points)

Une centrale thermique élémentaire est une machine motrice à vapeur constituée d'un générateur de vapeur (GV), d'une turbine (T), d'un condenseur (C) et d'une pompe (P). Le schéma de principe est représenté figure 1.

Dans la suite du problème, nous allons nous intéresser plus particulièrement au fonctionnement de la turbine et du condenseur qui sont parcourus par de l'eau.

L'eau pénètre dans la turbine à une pression $P_1 = 10$ MPa et une température $\theta_1 = 650$ °C. Elle subit alors une détente adiabatique et réversible jusqu'à la pression $P_2 = 15$ kPa. L'eau entre ensuite

dans le condenseur où elle est condensée à la pression P_2 et à la température θ_2 constantes, jusqu'à l'état liquide saturant.

Le condenseur est un échangeur thermique constitué de deux circuits indépendants (figure 2) : le circuit principal dans lequel s'écoule le fluide de l'installation et un deuxième circuit dans lequel circule l'eau de refroidissement. l'eau de refroidissement entre dans le condenseur (repère 5) à 10 °C, sous forme de liquide saturé, et en sort à 25 °C, sous forme de liquide saturé (repère 6). Le condenseur est supposé parfaitement calorifugé.

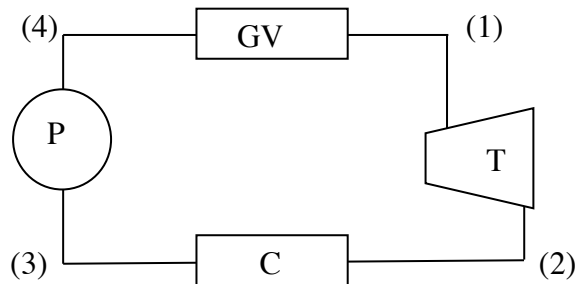


Figure 1

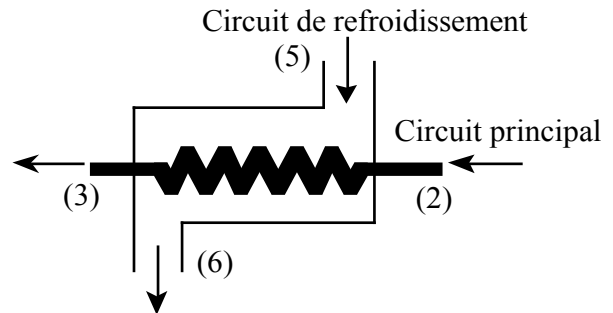


Figure 2

Pour l'ensemble du problème, on pourra négliger les variations d'énergie cinétique et potentielle des deux fluides (eau du circuit principal et eau de refroidissement) qui s'écoulent en régime permanent (dans les deux circuits indépendants). Par ailleurs, l'on pourra négliger les variations d'énergie cinétique et d'énergie potentielle.

1) Étude de la turbine.

- Établissez, en les justifiant, les expressions du bilan massique ainsi que des premier et deuxième principes. En déduire l'expression du travail massique, w_t , délivré par la turbine dans ces conditions.
- Précisez, en le justifiant à l'aide des tables de variables thermodynamiques, l'état du fluide à l'entrée de la turbine (1) et montrez que le fluide est sous forme d'un mélange riche en vapeur à la sortie de la turbine (2). Déterminez les enthalpies du fluide à l'entrée et à la sortie de la turbine.
- Calculez du travail massique, w_t , délivré par la turbine. En réalité, le fonctionnement de la turbine s'éloigne de la réversibilité : la turbine est caractérisée par un rendement isentropique de 85 %. Déterminez le travail massique réellement fourni par la turbine.

2) Étude du condenseur

- Établissez, en les justifiant, les expressions du bilan massique ainsi que du premier principe. En déduire l'expression de la quantité de chaleur massique, q_c , cédée par le fluide à l'eau du circuit de refroidissement.
- Calculez la valeur de q_c .

3) Étude du circuit de refroidissement

- Établissez, en les justifiant, les expressions du bilan massique ainsi que du premier principe. En déduire l'expression du débit de l'eau du circuit de refroidissement, \dot{m}_r .
- Sachant que le débit de l'eau s'écoulant dans le circuit principal (fluide moteur) est $\dot{m}_f = 5 \text{ kg/s}$, calculez le débit de l'eau de refroidissement \dot{m}_r .

Bon courage