

Thermodynamique industrielle

Extrait du programme

La partie 6 permet un approfondissement du cours de première année, par l'étude de cycles industriels. On se limite à des calculs relatifs au modèle du gaz parfait ou à l'utilisation des diagrammes d'état si le fluide est réel. Aucune connaissance relative à la technologie des installations ou aux différents types de cycles n'est exigible.

Notions et contenus	Capacités exigibles
6. Thermodynamique industrielle.	
Moteurs, réfrigérateurs, pompes à chaleur.	<p>Pour une machine dont les éléments constitutifs sont donnés, repérer les sources thermiques, le sens des échanges thermiques et mécaniques. Relier le fonctionnement d'une machine au sens de parcours du cycle dans un diagramme thermodynamique.</p> <p>Exploiter des diagrammes et des tables thermodynamiques pour déterminer les grandeurs thermodynamiques intéressantes. Définir et exprimer le rendement, l'efficacité ou le coefficient de performance de la machine. Citer des ordres de grandeur de puissances thermique et mécanique mises en jeu pour différentes tailles de dispositifs.</p>

Sommaire

- 1 Machines thermiques**
- 2 Moteurs thermiques**
 - 2.1 Description des échanges d'énergie**
 - 2.2 Exemple de cycle moteur : Turbomachine avec changement d'état**
- 3 Réfrigérateurs et pompes à chaleur**
 - 3.1 Description des échanges d'énergie**
 - 3.2 Réfrigérateur**
 - 3.3 Pompe à chaleur**

2 Moteurs thermiques

2.2 Exemple de cycle moteur : Turbomachine avec changement d'état

2.2.2 Etude

On considère une installation de production d'énergie électrique comportant une chaudière C, une turbine T, un condenseur C', et une pompe A.

Le fluide utilisé est l'eau, il décrit le cycle suivant :

- La pompe alimentaire amène le **fluide saturant**, pris à la sortie du condenseur (état A), 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 B) pratiquement à la température T_2 du condenseur. On admet que le travail massique mis en jeu dans la pompe, $w_{i,pompe}$

est négligeable devant celui fourni par la turbine, $w_{i,turbine}$.

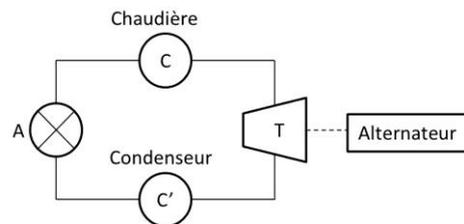
- L'eau est alors injectée dans la chaudière où elle se vaporise de façon **isobare** (P_1). A la sortie de la chaudière, la **vapeur est saturante sèche** à T_1 (état C).

- 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 D), où il achève de se liquéfier de façon **isobare** (point A).

Données : - Enthalpie de vaporisation à 523 K : $l_1 = 1714 \text{ kJ.kg}^{-1}$

- Chaleur massique du liquide : $c_{liq} = 4180 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

- masse volumique du liquide : $\mu = 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$



Température	Pression	Enthalpie massique du liquide saturant	Enthalpie massique de la vapeur saturante sèche
$T_1 = 523 \text{ K}$	$P_1 = 39,7.10^5 \text{ Pa}$		$h_c = 2800 \text{ kJ.kg}^{-1}$
$T_2 = 293 \text{ K}$	$P_2 = 2300 \text{ Pa}$	$h_l(293) = 84 \text{ kJ.kg}^{-1}$	$h_v(293) = 2538 \text{ kJ.kg}^{-1}$

Questions :

- 1) Repérer les étapes au cours desquelles ont lieu les échanges thermiques. Représenter le sens des échanges thermiques et mécaniques sur un schéma.
- 2) A quel type de machine thermique a-t-on affaire ? Quel sera alors le sens du cycle sur un diagramme de Clapeyron ou un diagramme entropique ?
- 3) Tracer le cycle dans un diagramme de Clapeyron. On fera notamment apparaître les isothermes T_1 et T_2 . On expliquera le tracé des courbes représentatives de chaque étape.
- 4) Tracer le cycle dans le diagramme entropique de l'eau fourni.
- 5) Compléter le tableau de donnée avec l'enthalpie massique du liquide saturant, $h_l(523)$, à la température T_1 .
- 6) Exprimer la variation d'enthalpie massique pour chacune des étapes en fonction des données de l'énoncé et du titre massique au point D, x_D , si besoin. Commenter le signe.
- 7) Que peut-on dire de la variation d'entropie massique dans la turbine ? En utilisant un cycle fictif que l'on précisera, retrouver la valeur du titre massique au point D, x_D . Comparer à la valeur lue sur le diagramme entropique fourni.

- 8) En déduire la valeur de l'enthalpie massique au point D, h_D .
- 9) Définir, puis exprimer le coefficient de performance ou rendement, η , de cette turbomachine en termes enthalpiques. Faire l'application numérique.
- 10) Retrouver la formule donnant le rendement de Carnot. Comparer au rendement de la turbomachine.
- 11) La puissance typique fournie par ce genre d'installation est d'une centaine de kW. Quel est le débit massique d'eau nécessaire pour atteindre cette puissance ?

3 Réfrigérateurs et pompes à chaleur

3.2 Réfrigérateur

3.2.2 Exemple de cycle

On peut résumer cette description par le cycle suivant :

- de (1) à (2) : le fluide (R134a) est à l'état de **vapeur saturante sèche** à la température T_4 . Il subit une compression **adiabatique réversible** le menant à la pression P_3 . Cette transformation est donc isentropique et mène à un état de **vapeur sèche**.
- de (2) à (3) : l'évolution est **isobare**. Un transfert thermique a lieu entre le fluide et une source chaude. Dans l'état (3), le **liquide** est **saturant** à la pression P_3 .
- de (3) à (4) : le fluide subit une détente **isenthalpique** (adiabatique). L'état (4) ramène à la même pression que l'état (1). On notera x_4 le taux de vapeur correspondant.
- de (4) à (1) : l'évolution est **isobare**. Un transfert thermique a lieu entre le fluide et la source froide (enceinte réfrigérée).

Données : à l'état (2) : $h_2 = 425 \text{kJ.kg}^{-1}$

Température	Pression	Enthalpie massique du liquide saturant	Enthalpie massique de la vapeur saturante sèche
$T_3 = 313 \text{ K}$	$P_3 = 10 \text{ bar}$	$h_l(T_3) = 256 \text{kJ.kg}^{-1}$	$h_v(T_3) = 418 \text{kJ.kg}^{-1}$
$T_4 = 263 \text{ K}$	$P_4 = 2 \text{ bar}$	$h_l(T_4) = 187 \text{kJ.kg}^{-1}$	$h_v(T_4) = 391 \text{kJ.kg}^{-1}$

Questions :

- 1) Identifier les températures T_3 et T_4 aux températures T_{vap} ou T_{liq} .
- 2) A quel type de machine thermique a-t-on affaire ? Quel sera alors le sens du cycle sur un diagramme de Clapeyron ou un diagramme entropique ?
- 3) Tracer le cycle dans un diagramme de Clapeyron. On fera notamment apparaître les isothermes T_3 et T_4 . On expliquera le tracé des courbes représentatives de chaque étape.
- 4) Tracer le cycle dans le diagramme entropique du fluide R134a fourni.
- 5) Exprimer la variation d'enthalpie massique pour chacune des étapes en fonction des données de l'énoncé et du titre massique au point 4, x_4 , si besoin. Commenter le signe.
- 6) Quelle est la valeur de l'enthalpie massique au point 4, h_4 ?
- 7) Définir, puis exprimer le coefficient de performance ou efficacité, ε_f , de ce réfrigérateur en termes enthalpiques. Faire l'application numérique.

8) Retrouver la formule donnant l'efficacité de Carnot. Comparer à l'efficacité du réfrigérateur. Pour un cycle réversible, comment régler les températures T_f et T_c pour obtenir une efficacité maximale ? Commenter.

9) Calculer l'entropie créée au cours du cycle.

3.3 Pompe à chaleur

3.3.2 Exemple de cycle

On reprend le cycle du réfrigérateur donné précédemment, mais on souhaite utiliser sa fonctionnalité de pompe à chaleur.

1) Définir, puis exprimer le coefficient de performance ou efficacité, ε_c , de cette pompe à chaleur en termes enthalpiques. Faire l'application numérique.

Cette efficacité exprime le fait qu'utiliser une pompe à chaleur permet de donner ε_c fois plus d'énergie à la source que l'on cherche à réchauffer qu'un radiateur électrique (récepteur monotherme) pour une consommation électrique donnée.

2) Retrouver la formule donnant l'efficacité de Carnot. Comparer à l'efficacité de la pompe à chaleur.

3) Ce mode de chauffage est très séduisant si l'on dispose d'une source de chaleur gratuite à un niveau de température suffisant. Si la température extérieure décroît, comment varie le COP ? Commenter.

4) Comparer le COP d'une pompe à chaleur à celui d'un réfrigérateur avec le même écart de température.

5) On a maintenant une pompe à chaleur fonctionnant entre l'air extérieur de température fixe $T_a = 283K$ et la pièce à chauffer de température T . Initialement, la pièce est à la température T_a et on désire la chauffer jusqu'à la température $T_{fin} = 293K$. La pièce possède une capacité thermique $C = 6.10^6 J.K^{-1}$ et est supposée bien calorifugée. Quel est le transfert thermique que l'on doit fournir à la pièce ?

6) Quelle est alors son COP maximal ? Commenter sachant que le COP typique est environ de 4.

7) Quel est alors le travail fourni au fluide ? La pompe à chaleur consomme environ 1kW par heure. Quel est le temps nécessaire au chauffage de la pièce ?

8) Combien de temps faudrait-il pour chauffer la pièce si l'on utilisait un radiateur électrique de même puissance ?

