

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.	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. 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.

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**
- 4 Questions de cours**
- 5 Questions à choix multiples**
- 6 Exercices type écrit (A rendre en DM pour le 16/11/2020)**

1 Machines thermiques

Définition :

Une **machine thermique** permet de réaliser des échanges énergétiques grâce à un fluide en contact avec les différentes parties de la machine.

Système :

Le système étudié sera donc toujours le fluide.

Convention :

Vu les conventions thermodynamiques, le travail et les transferts thermiques seront donc toujours compter positivement quand ils sont reçus par le fluide et négativement s'ils sont fournis par le fluide.

Catégories :

Les machines thermiques peuvent être séparées en deux catégories :

- les **moteurs** : ces machines ont pour but de donner un travail mécanique à l'extérieur, le travail reçu par le fluide est donc négatif
- les **récepteurs** : le fluide de ces machines reçoit du travail du milieu extérieur, le travail reçu par le fluide est donc positif. Leur but est de réchauffer (pompe à chaleur) ou refroidir (réfrigérateur) le plus efficacement une source au contact de la machine.

Description :

La plupart des machines thermiques que nous étudierons seront **dithermes**, c'est-à-dire qu'elles fonctionnent avec deux sources, souvent appelées source chaude (de température T_c) et froide (de température T_f). Elles fournissent respectivement les transferts thermiques Q_c et Q_f . L'étude d'une machine thermique commence donc par repérer les sources thermiques, le sens des échanges thermiques et mécaniques.

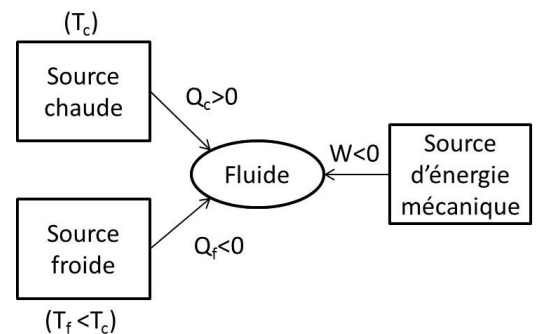


Diagramme :

Ces échanges dans les différentes parties de la machine peuvent être lus ou repérés grâce à un cycle sur un diagramme thermodynamique. Le sens du parcours de ces cycles nous renseignera sur le fonctionnement de la machine : moteur ou récepteur.

Définition :

Quelle que soit l'installation, motrice ou réceptrice, on définit le **coefficient de performance (COP)** comme le rapport de la puissance utile sur la puissance couteuse :

$$COP = \frac{P_{utile}}{P_{couteuse}}$$

Remarque :

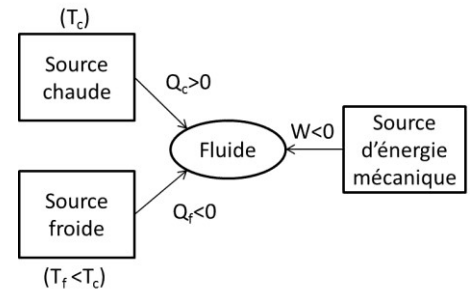
Cela s'appelle aussi le rendement pour les moteurs ou l'efficacité pour les récepteurs.

2 Moteurs thermiques

2.1 Description des échanges d'énergie

Principe :

Le transfert thermique se fait naturellement de la source chaude vers la source froide au travers du fluide circulant dans les tuyaux de la machine. En réalisant ce transfert naturel, le fluide peut entraîner une pièce mécanique mobile et donc engendrer un travail mécanique.



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

2.2.1 Définition

Une turbomachine est une machine tournante qui réalise un transfert d'énergie entre son arbre propre, et un fluide en mouvement. Ce transfert peut s'effectuer dans les deux sens :

- une récupération de l'énergie du fluide sur l'arbre de la machine (fonction réalisée par les machines de type turbine)
- une augmentation de l'énergie du fluide par fourniture d'énergie mécanique sur l'arbre de la machine (fonction réalisée par les machines de type compresseur, ventilateur, pompe ...)

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 **liquide saturant**, pris à la sortie du condenseur (état A), jusqu'à la pression P_1 de la chaudière. Cette opération est pratiquement **adiabatique**

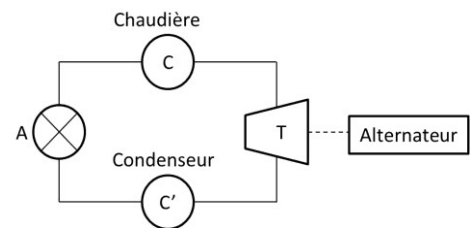
et on peut considérer qu'à la sortie de la pompe le fluide est liquide (état B) pratiquement à la température T_2 du condenseur. On admet que le travail massique mis en jeu dans la pompe, $w_{i,pompe}$ est négligeable devant celui fourni par la turbine, $w_{i,turbine}$.

- 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 : $c_{liq} = 4180 \text{ J.kg}^{-1}.K^{-1}$
- 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 (page 6 suivante).
- 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 ?

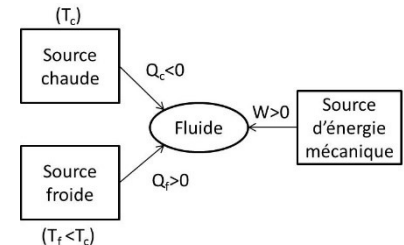
3 Réfrigérateurs et pompes à chaleur

Ces deux machines font partie de ce qu'on appelle des récepteurs thermiques. Les échanges d'énergie en leur sein sont donc les mêmes, mais dans le cas du réfrigérateur, on s'intéressera à la source froide, tandis que dans le cas de la pompe à chaleur, on s'intéressera à la source chaude.

3.1 Description des échanges d'énergie

Principe :

Le fluide reçoit du travail de l'extérieur et un transfert thermique de la source froide pour en céder un à la source chaude. Cette situation est l'inverse de celle des transferts thermiques spontanés entre un corps chaud et un corps froid, d'où la nécessité de fournir un travail.



3.2 Réfrigérateur

3.2.1 Principe de fonctionnement

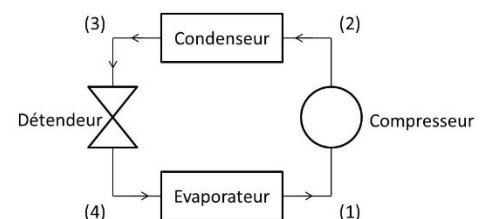
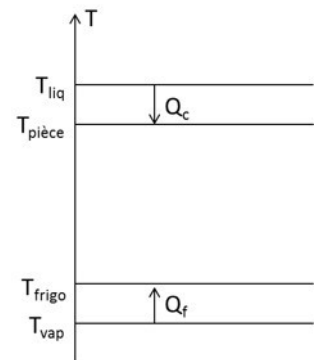
Un réfrigérateur exploite les changements d'état d'un fluide, ce qui permet des transferts thermiques bien plus intenses.

L'évaporateur est au contact de la source froide. Le fluide y est à une température légèrement inférieure au compartiment réfrigéré. Un transfert thermique a donc lieu du compartiment vers le fluide ($Q_f > 0$) ce qui provoque sa vaporisation.

Le condenseur est au contact de l'air ambiant. Le fluide y est à une température légèrement supérieure. Un transfert thermique a donc lieu du fluide vers l'air ambiant ($Q_c < 0$) ce qui provoque sa liquéfaction.

Il faut alors deux composants supplémentaires pour amener le fluide de la température T_{vap} à la température T_{liq} et changer sa pression en conséquence. Ceci est réalisé grâce à un compresseur et un détendeur.

Plaçons-nous en sortie du condenseur. Le fluide est à l'état liquide à la température T_{liq} . Il entre dans le détendeur où il subit une détente qui fait diminuer sa pression et sa température, jusqu'à le transformer partiellement en vapeur à la température T_{vap} . Le fluide pénètre alors dans l'évaporateur et se vaporise à la température T_{vap} . Un compresseur comprime ensuite ce gaz de manière à augmenter sa pression et sa température. Il fournit ainsi un travail au fluide ($W > 0$). Le fluide passe alors dans le condenseur où il se liquéfie à la température T_{liq} .



3.2.2 Exemple de cycle

On peut résumer cette description par le cycle suivant :

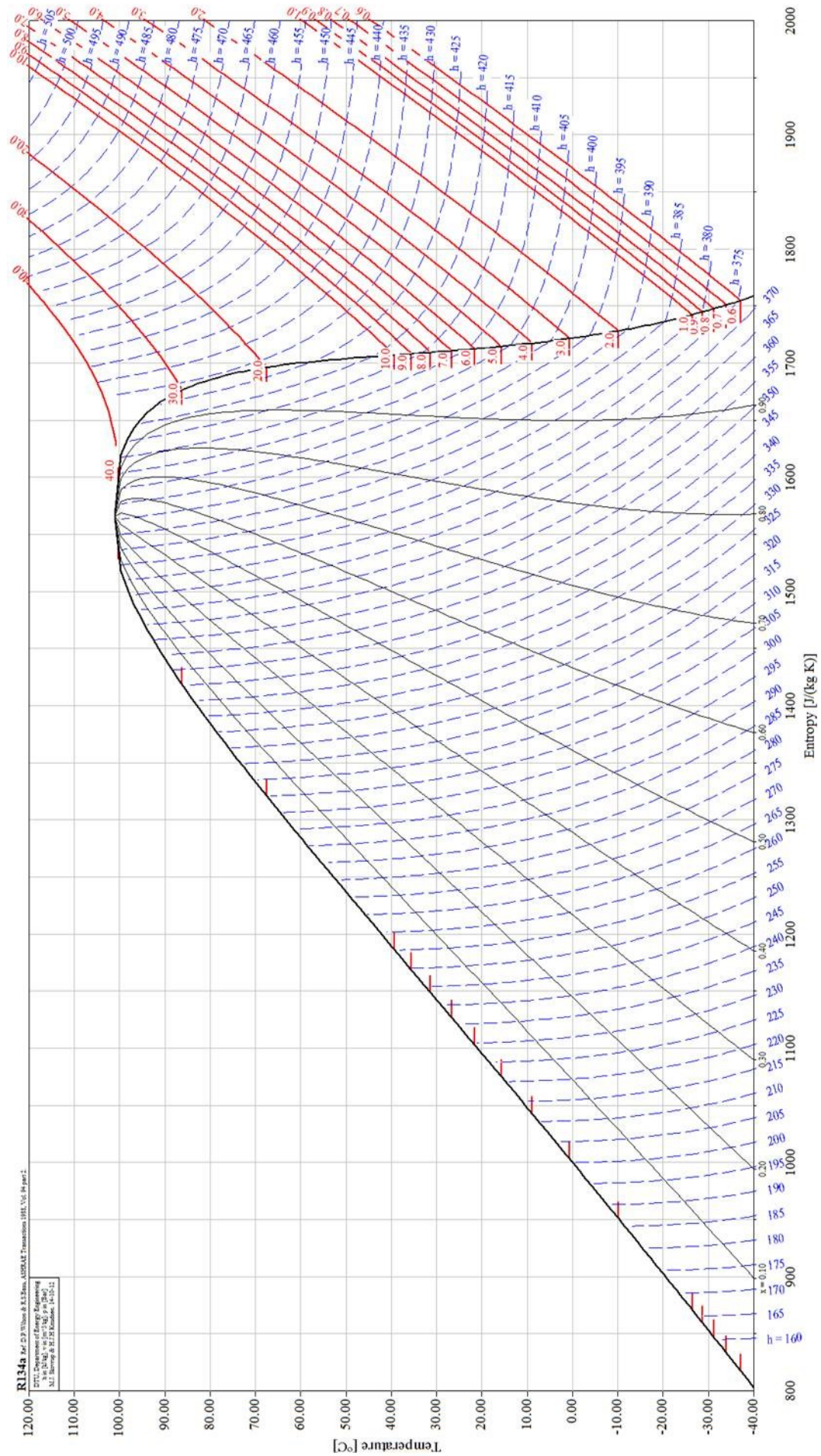
- de (1) à (2) : le fluide (R134a) est à l'état de **vapeur saturante sèche** à la température T_4 . Il subit une compression **adiabatique réversible** le menant à la pression P_3 . Cette transformation est donc isentropique et mène à un état de **vapeur sèche**.
- de (2) à (3) : l'évolution est **isobare**. 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) : $h_2 = 425 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

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

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 (page 9 suivante).
- 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) Définir, puis exprimer le coefficient de performance ou efficacité, ε_f , de ce réfrigérateur en termes enthalpiques. Faire l'application numérique.
- 7) 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.
- 8) Calculer l'entropie créée au cours du cycle.



3.3 Pompe à chaleur

3.3.1 Principe de fonctionnement

Une pompe à chaleur fonctionne exactement sur le même principe qu'un réfrigérateur. Sauf que l'on s'intéresse ici à la source chaude, l'intérieur d'une habitation et que le but est de la réchauffer donc de lui fournir un transfert thermique. La source froide peut être l'extérieur ou le sol.

3.3.2 Exemple de cycle

On reprend le cycle du réfrigérateur précédent, 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 ?

4 Questions de cours

- 1) Qu'appelle-t-on machine thermique ?
- 2) Qu'est-ce que le coefficient de performance d'une machine thermique ?
- 3) Dans le cas d'un moteur, donner le sens des échanges énergétiques. On représentera cela sur un schéma.
- 4) Dans le cas d'un récepteur, donner le sens des échanges énergétiques. On représentera cela sur un schéma.
- 5) Définir le rendement d'un moteur, l'efficacité d'un réfrigérateur et d'une pompe à chaleur.
- 6) Dans quel sens sera parcouru le cycle d'un moteur et d'un récepteur sur le diagramme de Clapeyron ?
- 7) Dans quel sens sera parcouru le cycle d'un moteur et d'un récepteur sur le diagramme entropique ?
- 8) Qu'appelle-t-on rendement de Carnot ? Redémontrer son expression en fonction des températures des sources chaudes et froides.

5 Questions à choix multiples

En ligne sur la plateforme Moodle accessible via Atrium : section « Thermo / Thermodynamique indus... / Test ».

6 Exercices type écrit (à rendre pour le 16/11/2020)

6.1 Centrale TSI 2020

Questions 2 à 7 : plus difficile

Question 8 à 25 : proche du cours, dans le cadre de votre programme

I Machine frigorifique à absorption

De l'avis de l'historien Hugo Obermaier (1877–1946), dès le paléolithique inférieur (100 000 ans avant Jésus-Christ), les hommes ont commencé à utiliser le froid existant dans les grottes pour conserver le gibier. Sans comprendre ces phénomènes, ces hommes utilisaient sans doute l'abaissement de température produit en partie par l'évaporation de l'eau, en partie par la détente de l'air dans les crevasses communiquant avec l'extérieur.

Q 1. À partir de considérations simples, expliquer ces deux hypothèses. On pourra raisonner sur l'humidité de l'air et préciser le modèle de détente.

Au début du XIX^e siècle, des procédés d'obtention de froid artificiel ont vu le jour. La première machine à atteindre une importance industrielle généralisée fut celle du français Ferdinand Carré qui, en 1859, déposa un brevet pour un réfrigérateur à absorption utilisant l'ammoniac comme fluide frigorigène. Son principe est schématisé figure 1.

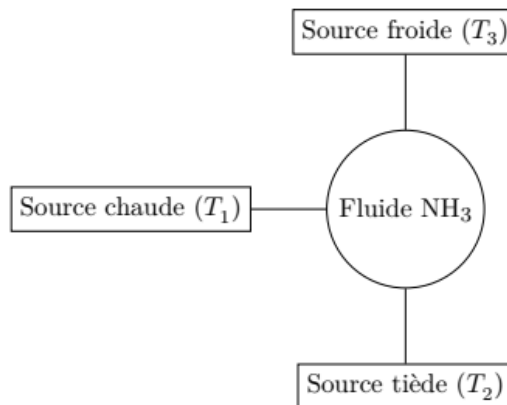


Figure 1

Un réfrigérateur à absorption est un récepteur thermique fonctionnant par contact avec trois « thermostats », sans recevoir de travail mécanique. La source chaude à la température T_1 est constituée par le système de chauffage de la machine (un brûleur par exemple). La source tiède à la température T_2 est constituée par la salle dans laquelle se trouve la machine. La source froide à la température T_3 est constituée par l'enceinte à refroidir. On a $T_1 > T_2 > T_3$.

On désigne par Q_1 , Q_2 et Q_3 les transferts thermiques reçus par le fluide au cours d'un cycle de la machine, respectivement lors des contacts avec les sources chaude, tiède et froide.

Q 2. Déterminer les signes des transferts thermiques Q_1 , Q_2 et Q_3 .

Q 3. Comparer les valeurs absolues $|Q_1|$ et $|Q_2|$. Commenter.

Q 4. Définir le coefficient de performance (noté COP) de cette machine et donner son expression littérale.

Q 5. En utilisant les deux principes de la thermodynamique sur un cycle, montrer que $\text{COP} \leq \text{COP}_{\max}$. On exprimera $\text{COP}_{\max}$ en fonction de T_1 , T_2 et T_3 .

Q 6. Étudier la limite de $\text{COP}_{\max}$ lorsque la température T_1 du système de chauffage de la machine devient très grande. Interpréter l'expression obtenue.

Q 7. Quel avantage de ce type de machine peut-on prévoir par rapport à une machine à compression de fluide ?

À partir de 1885, le système à compression de vapeurs liquéfiables commença à prendre le net avantage qui est devenu éclatant au cours du XX^e siècle.

II Machine frigorifique à compression de vapeur

On considère une machine frigorifique constituée d'un compresseur, d'un condenseur, d'un détendeur et d'un évaporateur, dans lesquels circule un fluide frigorigène R134a.

Q 8. Sur un schéma de principe, identifier les différents transferts énergétiques qui interviennent au sein de la machine entre les différents éléments schématisés figure 2 et donner leur signe.

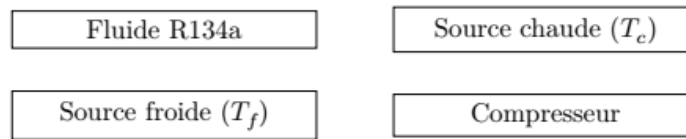


Figure 2

Q 9. Quel est le rôle du condenseur et au contact de quel élément de la figure 2 doit-il être mis ?

Q 10. Quel est le rôle de l'évaporateur et au contact de quel élément doit-il être mis ?

Q 11. Définir le coefficient de performance (COP) de cette machine puis exprimer le coefficient de performance de la machine de Carnot correspondante.

Pour toute la suite, on néglige toute variation d'énergie cinétique massique et d'énergie potentielle massique. De plus, on suppose un régime d'écoulement permanent au débit massique $D_m = 0,2 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$.

Pour simplifier, on considère la compression adiabatique et réversible. Le détendeur D, calorifugé et sans parties mobiles, permet une chute de pression. L'évaporateur EV et le condenseur CD sont des échangeurs thermiques isobares. Les notations des états du fluide sont précisées sur la figure 3.

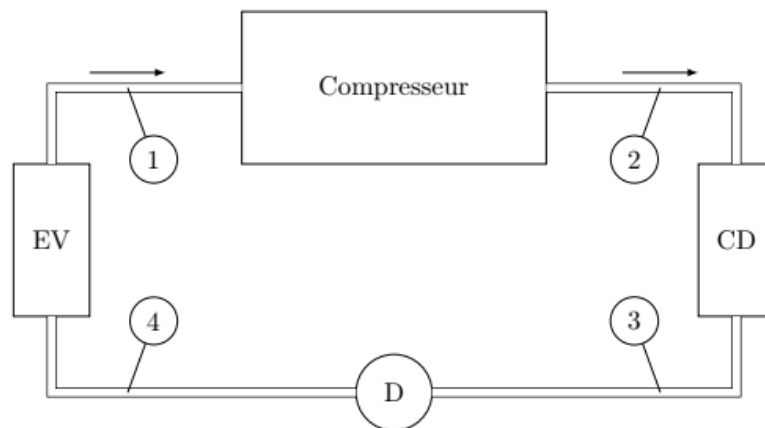


Figure 3

Q 12. Établir le premier principe pour un kilogramme de fluide frigorigène en écoulement stationnaire unidimensionnel dans un système à une entrée et une sortie. On notera h l'enthalpie massique, w_i le travail indiqué massique reçu de la part des parties mobiles de la machine et q le transfert thermique massique reçu.

Q 13. Montrer que le fluide subit une détente isenthalpique dans D.

La figure A du document réponse (à rendre avec la copie) représente l'allure du cycle décrit par le fluide dans le diagramme dit « des frigoristes » enthalpie massique h (en $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) en abscisse, pression P (en bar) en ordonnée, avec échelle logarithmique. Aucune connaissance préalable de ce diagramme n'est requise.

Seul le point 1, à l'entrée du compresseur, est mentionné sur ce diagramme.

Q 14. En repérant la courbe de saturation et les abaques de température, noter sur le diagramme les domaines où le fluide est à l'état liquide, vapeur sèche et vapeur-humide (ou mélange liquide-vapeur)

Q 15. Dans quel sens est parcouru le cycle ? Lorsqu'un cycle est parcouru dans le sens trigonométrique sur un diagramme de Clapeyron, la quantité de chaleur reçue par cycle est négative et donc fournie à l'extérieur. En est-il de même sur ce cycle dans le diagramme des frigoristes ? sur tout cycle ?

Q 16. Quelle est la forme des isothermes à l'intérieur de la courbe de saturation ? Justifier.

Q 17. Quelle est la forme des isothermes dans le domaine de la vapeur sèche ? Justifier lorsque l'on peut assimiler la vapeur sèche à un gaz parfait.

Q 18. Porter le numéro de chaque état du fluide (2, 3 et 4) dans chaque case prévue.

Q 19. Noter sur le diagramme, pour chacune des quatre transformations, la nature de la transformation et l'organe (compresseur, condenseur, détendeur, évaporateur) traversé par le fluide.

Q 20. Compléter le tableau du document réponse en s'aidant du diagramme.

Q 21. Exprimer, puis calculer, le travail massique indiqué w_{ic} reçu par le fluide dans le compresseur.

- Q 22.** Exprimer, puis calculer, le transfert thermique massique q_f reçu par le fluide dans l'évaporateur.
- Q 23.** En utilisant le débit massique, exprimer puis calculer la puissance frigorifique P_f de cette machine.
- Q 24.** Exprimer, puis calculer, le coefficient de performance de cette installation frigorifique. Le comparer au coefficient de performance de la machine de Carnot correspondante et interpréter la différence observée.
- Q 25.** On souhaite améliorer la puissance frigorifique de 5 % en sous-refroidissant jusqu'à T'_3 le fluide lors de la condensation isobare. En déduire h'_3 et placer le point 3' sur le diagramme. En déduire T'_3 et la valeur du sous-refroidissement ΔT .

Les fluides utilisés dans les systèmes précédents sont malheureusement des gaz à effet de serre, qui contribuent au réchauffement climatique. Des recherches sont menées pour tenter de trouver de nouveaux gaz frigorifiques moins polluants. Parallèlement, de nouvelles technologies sont à l'étude, pour réaliser des systèmes à haute efficacité énergétique, tout en ayant un impact environnemental faible.

Document réponse : question 20 (à recopier sur votre copie)

État du fluide	1	2	3	4
Pression (bar)				
Température (°C)				
Enthalpie massique ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)				
Titre en vapeur				

Document réponse : question 14, 18, 19 (voir page 15 suivante)

