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
2 MOTEURS THERMIQUES 4
2.1 DESCRIPTION DES ECHANGES D'ENERGIE 4
2.2 EXEMPLE DE CYCLE MOTEUR : TURBOMACHINE AVEC CHANGEMENT D'ETAT 4
3 REFRIGERATEURS ET POMPES A CHALEUR 7
3.1 DESCRIPTION DES ECHANGES D'ENERGIE 7
3.2 REFRIGERATEUR 7
3.3 POMPE A CHALEUR 10
4 QUESTIONS DE COURS 11
5 QUESTIONS A CHOIX MULTIPLES 11
6 EXERCICES TYPE ECRIT (A RENDRE POUR LE 22/11/2021) 12

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.

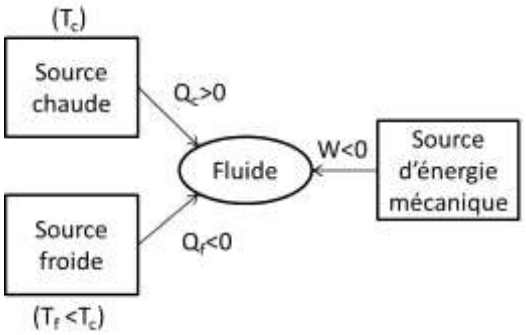


Diagramme :

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 :

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

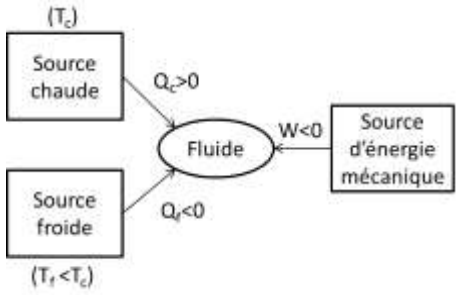
Remarque :

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.



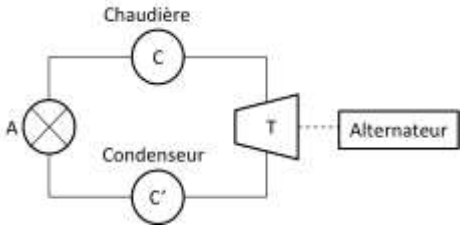
2.2 Exemple de cycle moteur : Turbomachine avec changement d'état

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 : $l_1 = 1714\ kJ.kg^{-1}$
- Chaleur massique du liquide : $c_{liq} = 4180\ J.kg^{-1}.K^{-1}$
- masse volumique du liquide : $\mu = 10^3 kg.m^{-3}$

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

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 Clapeyon. 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.

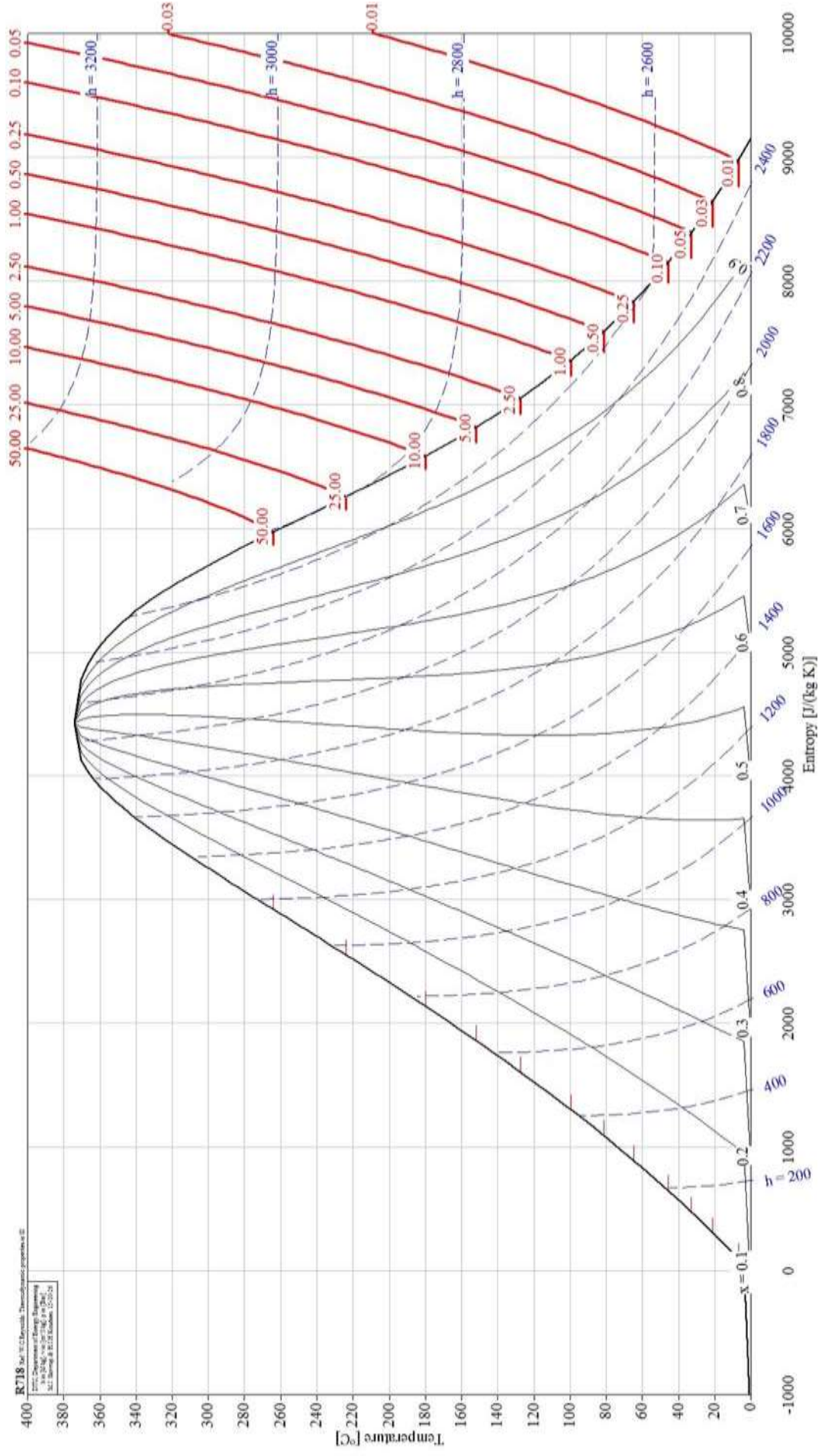
7) Que peut-on dire de la variation d'entropie massique dans la turbine ? En utilisant un cycle fictif que l'on précisera, retrouver la valeur du titre massique au point, D, x_D. Comparer à la valeur lue sur le diagramme entropique fourni.

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 ?


Temperature [°C]
Entropy [J/(kg K)]
h = 3200
h = 3000
h = 2800
h = 2600
h = 200
x = 0.1
R718

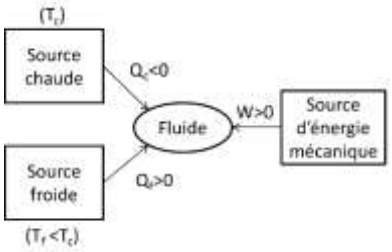
3 Réfrigérateurs et pompes à chaleur

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

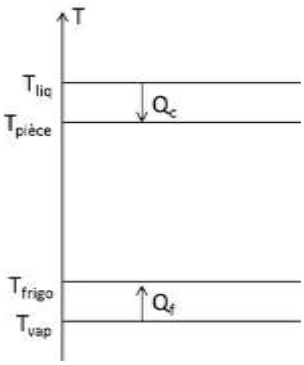
3.2.1 Principe de fonctionnement

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

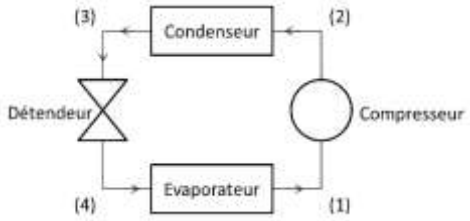
L'évaporateur est au contact de la source froide. Le fluide y est à une température légèrement inférieure au compartiment réfrigéré. Un transfert thermique a donc lieu du compartiment vers le fluide ($Q_f > 0$) ce qui provoque sa vaporisation.

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) : $h_2 = 425kJ.kg^{-1}$

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

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 Clapeyon. On fera notamment apparaître les isothermes T_3 et T_4. On expliquera le tracé des courbes représentatives de chaque étape.

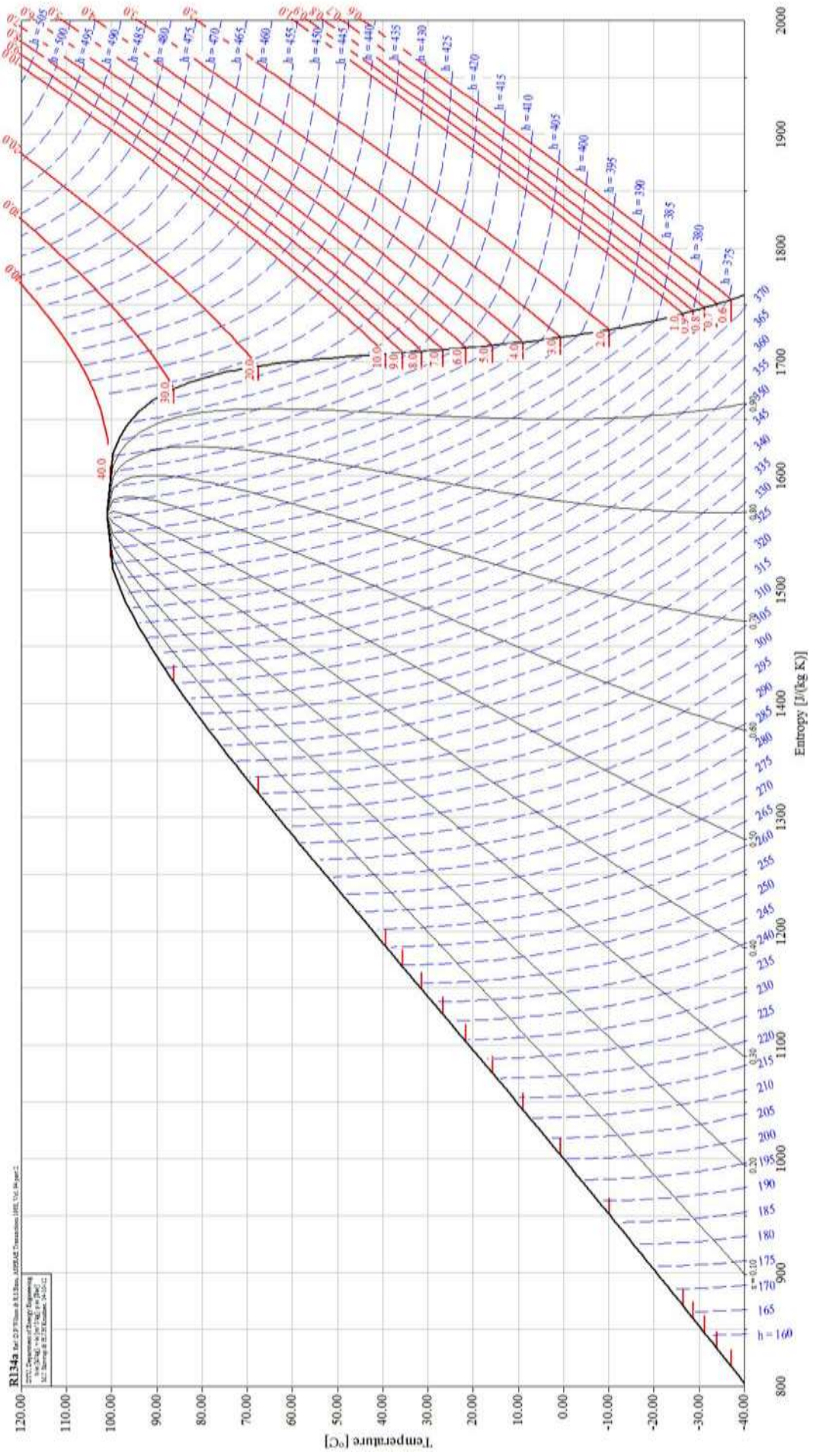
4) Tracer le cycle dans le diagramme entropique du fluide R134a fourni (page 9 suivante).

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 crée au cours du cycle. Que peut-on dire de la réversibilité du cycle ?


R134a
Temperature [°C]
Entropy [J/(kg K)]
120.00
110.00
100.00
90.00
80.00
70.00
60.00
50.00
40.00
30.00
20.00
10.00
0.00
-10.00
-20.00
-30.00
-40.00
800
900
1000
1100
1200
1300
1400
1500
1600
1700
1800
1900
2000

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 chercher 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 décroit, 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.

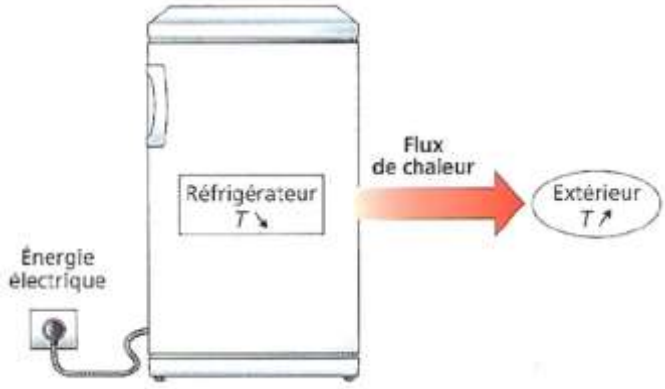
5 Questions à choix multiples

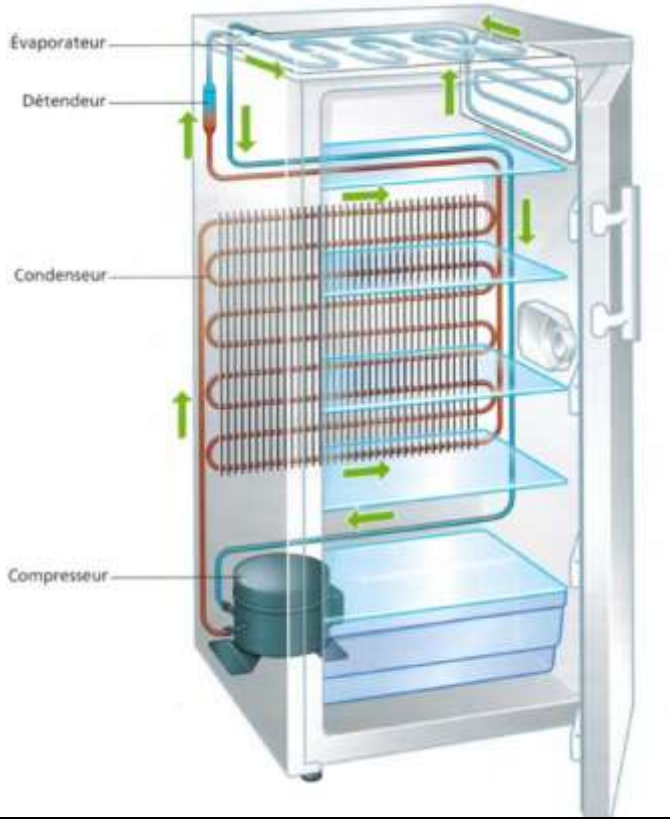
En ligne sur la plateforme Moodle accessible via Atrium : section « Thermo / Thermodynamique indus… / Test ».

6 Exercices type écrit (à rendre pour le 22/11/2021)

Dans cette partie, on souhaite analyser le principe de fonctionnement du réfrigérateur à compresseur en s'appuyant sur le document 1.

Le principe du réfrigérateur est simple : il assure un transfert de chaleur depuis ses compartiments internes, qui se refroidissent, vers la pièce où il se trouve, qui se réchauffe. Ce transfert consomme de l'énergie électrique. […]. Le compresseur comprime le fluide réfrigérant, alors froid et sous forme gazeuse, ce qui augmente sa température et sa pression. A la sortie du compresseur, le fluide est donc chaud et à haute pression. […]. Ce gaz chaud et à haute pression circule ensuite à travers le condenseur, où il cède de la chaleur par diffusion vers l'extérieur et subit un changement d'état : le gaz se transforme en un liquide chaud sous haute pression. La condensation (plus exactement la liquéfaction) peut se produire à température élevée car la pression est importante. […]. En poursuivant son chemin dans le circuit frigorifique, le liquide passe ensuite à travers un détendeur qui abaisse sa pression et sa température, ([…] la détente adiabatique s'effectue dans un fin capillaire). On obtient un mélange liquide-gaz à l'équilibre. Après cette chute de pression, le mélange liquide-gaz froid traverse l'évaporateur où il absorbe la chaleur de l'intérieur du réfrigérateur pour subir un second changement d'état : le liquide se met à bouillir, c'est-à-dire qu'il se vaporise. On obtient alors un gaz froid et à basse pression, qui repart dans le compresseur pour un nouveau cycle.





Document 1. Extrait du livre « La physique par les objets quotidiens » de C. Ray et J.C. Poizat

6.1.1 Principe de fonctionnement du réfrigérateur à compresseur

Le réfrigérateur est supposé être une machine cyclique et ditherme. Pour un cycle complet, on note Q_1 le transfert thermique reçu par le fluide réfrigérant de la part du milieu extérieur, Q_2 le transfert thermique reçu par le fluide réfrigérant de la part de l'intérieur du réfrigérateur et W le travail de compression permettant de faire fonctionner le réfrigérateur.

1) Identifier le nom des organes (compresseur, détendeur, condenseur ou évaporateur) dans lesquels les transferts d'énergie Q_1, Q_2 et W s'opèrent. Préciser si Q_1, Q_2 et W sont positifs ou négatifs.

2) Le compresseur met en jeu une compression rapide que l'on peut supposer adiabatique. Proposer une explication de l'augmentation de la température du gaz supposé parfait à l'issue de cette compression.

3) Dessiner l'allure du diagramme $P(T)$ pour le seul équilibre liquide / vapeur et préciser les phases dans chaque partie du diagramme et sur la courbe $P(T)$. A quelle condition une liquéfaction peut-elle s'observer à «température élevée» ?

4) Définir le coefficient de performance, noté COP, du réfrigérateur puis l'exprimer en fonction de Q_1 et Q_2.
On suppose le régime stationnaire atteint : la température T_{ext} de l'extérieur et la température de consigne T_{int} à l'intérieur du réfrigérateur sont constantes.
5) Déterminer l'expression du coefficient de performance maximal du réfrigérateur, noté COP_c, en fonction de T_{int} et T_{ext}. Calculer ce COP_c si $T_{ext} = 25°C$ et $T_{int} = 5°C$.

6.1.2 Etude du cycle du fluide réfrigérant dans un diagramme entropique $T(s)$

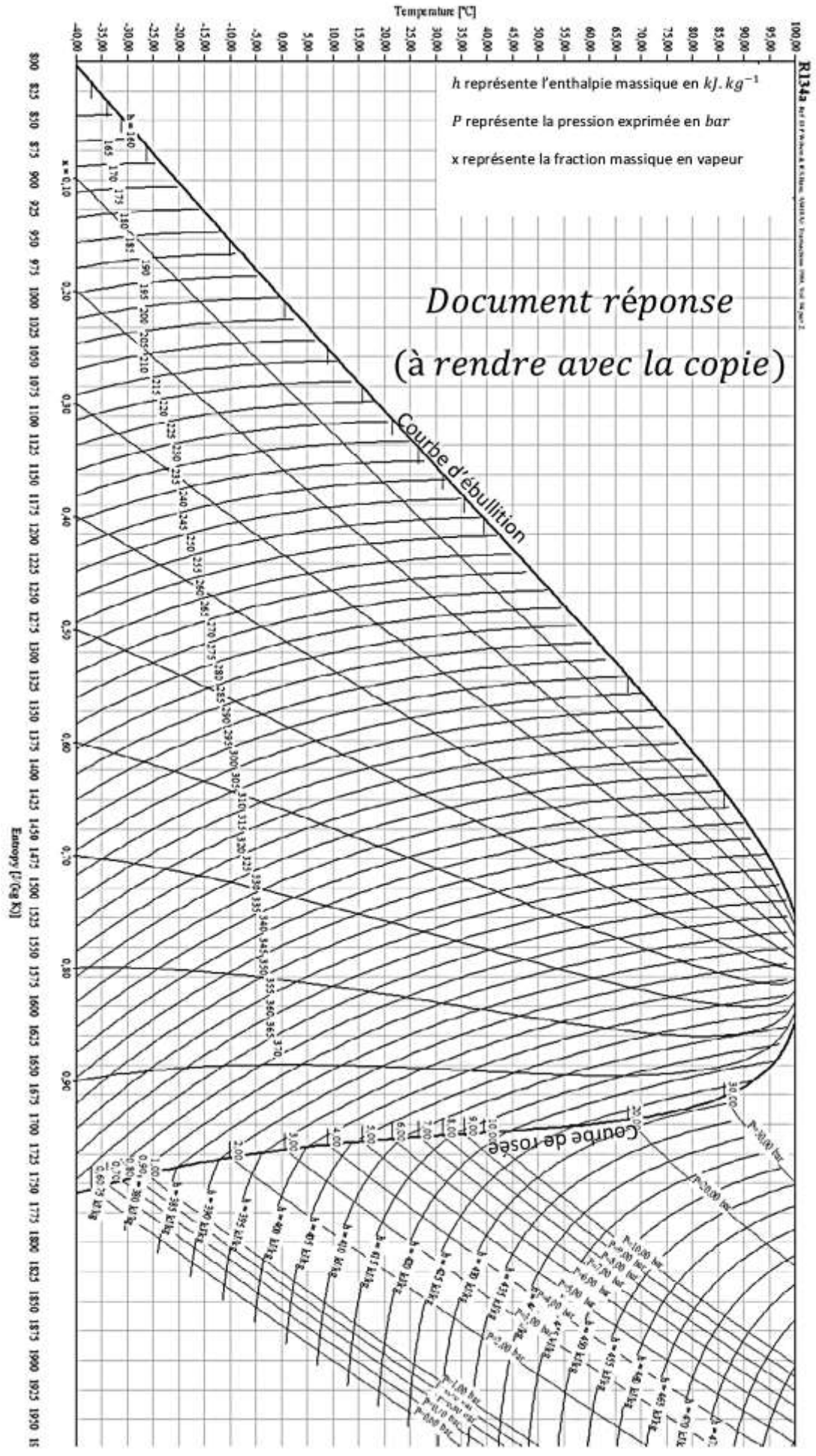
Nous allons étudier plus précisément les différentes transformations que le fluide réfrigérant subit. L'écoulement du fluide réfrigérant est stationnaire, de débit massique D_m. Les variations d'énergies cinétique et potentielle du fluide seront négligées. Nous supposerons également que le fluide réfrigérant décrit le cycle suivant (on note $\{T_i, P_i\}$ le couple température-pression relatif à l'état i du fluide) :
- Avant d'entrer dans le compresseur, le fluide est un gaz surchauffé (état A $\{T_A, P_A\}$). Le compresseur impose une compression adiabatique et irréversible. Le fluide reste à l'état gazeux (état B $\{T_B, P_B\}$).
- Le fluide circule ensuite dans le condenseur où il opère un refroidissement isobare puis une liquéfaction complète isobare à la pression P_B. On obtient un liquide saturant (état C $\{T_C, P_C\}$).
- Le liquide subit une détente isenthalpique (détente de type Joule-Thomson sans travail indiqué et sans transfert thermique) faisant apparaître un mélange diphasé après avoir traversé le détendeur (état D $\{T_D, P_D\}$).
- Le fluide pénètre dans l'évaporateur et évolue de manière isobare jusqu'à l'état A.

On prendra les valeurs suivantes : $P_A = 2bar$, $P_B = 7bar$, $T_A = 5°C$, $T_B = 55°C$ et $D_m = 10^{-2} kg.s^{-1}$. Une tolérance de $\pm 2kJ.kg^{-1}$ sur la lecture de l'enthalpie massique sera acceptée. Une tolérance de $\pm 1°C$ sur la lecture des températures sera acceptée.
On rappelle, en tenant compte de nos hypothèses de travail, le premier principe de la thermodynamique appliqué à un fluide en écoulement dans une conduite, recevant une puissance thermique Φ_{th} et une puissance mécanique $P_{méca}$ (mise en jeu par les éventuelles parties mobiles d'une machine présente dans la conduite) avec h_e et h_s les enthalpies massiques du fluide à l'entrée et à la sortie de la conduite :

$$D_m(h_s - h_e) = \Phi_{th} + P_{méca}$$

6) Repérer sur le diagramme entropique fourni en document-réponse les domaines liquide, vapeur saturante et vapeur sèche. Reporter la position des points A, B, C et D sur le document-réponse fourni en annexe et à rendre avec la copie.
7) Donner, par lecture sur le diagramme entropique, les températures de liquéfaction T_l et de vaporisation T_v du fluide réfrigérant observées pour le cycle étudié.
8) En expliquant votre démarche, donnez la valeur du titre massique x_D au point D de deux manières différentes.
9) Exprimer puis calculer la puissance $\Phi_{th,2}$ reçue par le fluide pendant la transformation menant de l'état D à l'état A.
10) Exprimer puis calculer la puissance $P_{méca}$ reçue par le fluide pendant la transformation menant de l'état A à l'état B.
11) Exprimer puis calculer la puissance $\Phi_{th,1}$ reçue par le fluide pendant la transformation menant de l'état B à l'état C.
12) Les résultats précédents, aux incertitudes de lecture près, permettent d'écrire $P_{méca} \approx -(\Phi_{th,1} + \Phi_{th,2})$. Commenter cette relation.
13) En déduire l'expression puis une estimation de la valeur du coefficient de performance COP_{vrai} (un seul chiffre significatif sera accepté pour la valeur de COP_{vrai}). Interpréter ce résultat.
14) Lors d'un processus adiabatique, on peut déterminer, à l'aide du diagramme entropique, le travail massique w_f des forces de viscosité du fluide car $w_f = -\int_{etat\ initial}^{etat\ final} Tds$. Estimer la puissance P_f associée à ces forces de viscosité lors de la compression (pour ce calcul la représentation de la transformation menant de l'état A à B sera linéarisée et donc assimilée à un simple segment reliant les points A et B). Commenter ce dernier résultat.

15) Si on suppose maintenant la compression adiabatique et réversible, comment est modifié le cycle dans le diagramme entropique ? On pourra mettre un point B' sur le document réponse et tracer le nouveau cycle dans une couleur différente. Recalculer alors $P'_{méca}$, ainsi que la valeur du coefficient de performance COP'_{vrai}. Commenter.


Température [°C]
R134a
h représente l'enthalpie massique en $kJ.kg^{-1}$
P représente la pression exprimée en bar
x représente la fraction massique en vapeur
Document réponse
(à rendre avec la copie)
Courbe d'ébullition
Courbe de rosée
Entropie [J/(g.K)]