

Travaux dirigés du chapitre : 3.3 Thermodynamique industrielle.

Partie : 3 Thermodynamique des fluides appliquée aux machines thermodynamique

1 Dispositifs d'une installation industrielle

Dans cette première partie nous allons étudier des parties usuelles d'un dispositif industriel.

1.1 Compresseur et turbine calorifugés

Définition : un compresseur ou une turbine sont deux dispositifs traversés par un fluide dont les pressions d'entrée et de sortie sont différentes et qui échange de l'énergie sous forme de travail indiqué.

- Un compresseur consomme un travail indiqué pour augmenter la pression d'un fluide donc pour le fluide en écoulement :

$$P_e < P_s \text{ et } w_i > 0$$

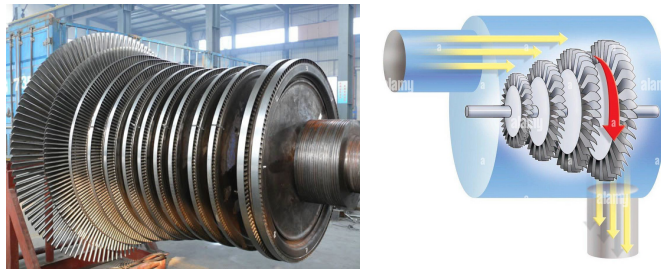
Lorsque le fluide à compresser est un liquide on parle de pompe.

- Une turbine récupère un travail indiqué en utilisant l'écoulement d'un fluide et provoque ainsi la diminution de la pression du fluide qui la traverse. On peut donc en déduire pour une turbine :

$$P_e > P_s \text{ et } w_i < 0$$

Exemples : en pratique selon les fluides et les paramètres souhaités les réalisations de compresseurs ou de turbines sont variés :

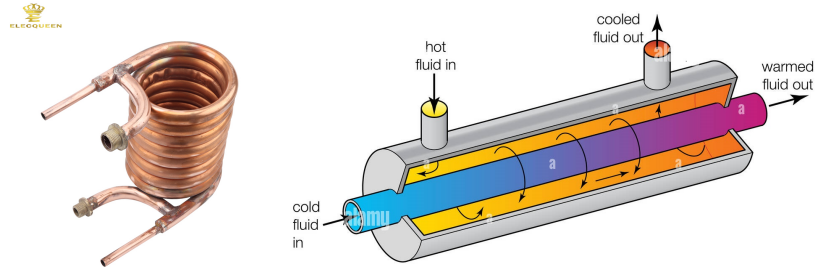
- par exemple un fluide peut mettre en rotation une roue à aubes solidaire d'un arbre mécanique qui transmet un couple et une vitesse de rotation :



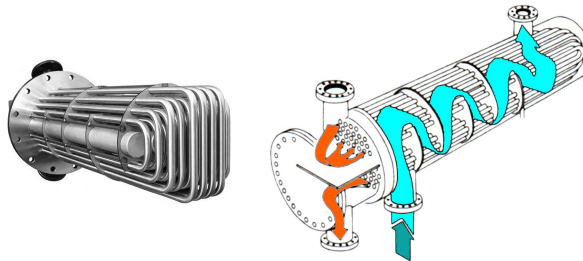
- un arbre mécanique peut mettre en rotation une pièce mécanique comme une spirale afin de compresser progressivement le fluide jusqu'à la sortie du compresseur :

Exemples : on retrouve ces échangeurs dans de nombreux dispositifs tels que les chaudières, les radiateurs, les machines frigorifiques, les ventilations ... avec différents types d'échangeur :

- échangeur à tubes concentriques



- échangeur à faisceau tubulaire



- échangeur à plaque et joint

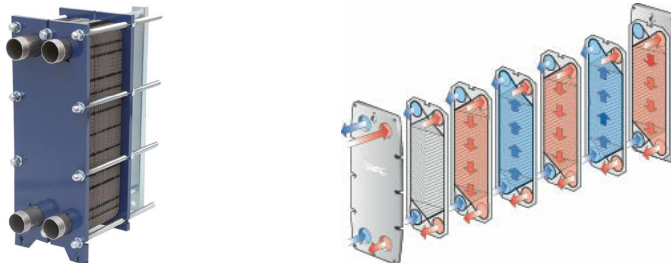
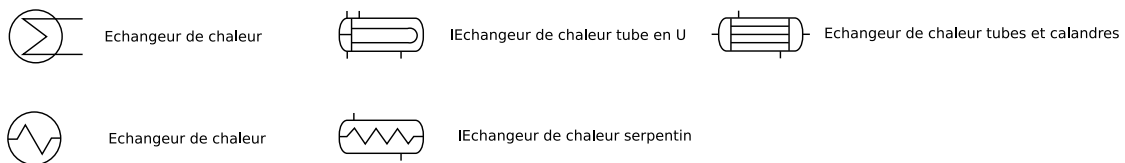


Schéma : les dispositifs échangeurs thermiques sont schématisés pour la description des installations industrielles par des symboles comme :



Modélisation : Nous modéliserons dans les cas idéalisés ces dispositifs comme :

- calorifugés vers l'extérieur,
- sans pièces mécaniques ni pertes de charges,

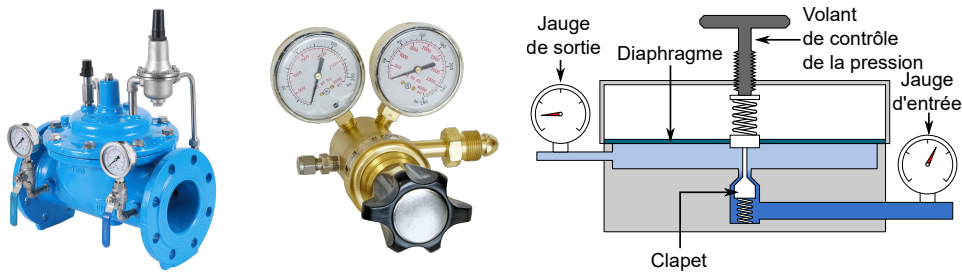
- où la variation de vitesse et d'altitude du fluide est négligeable entre l'entrée et la sortie.
- 7. Écrivez le premier principe industriel appliqué à chacun des deux écoulements qui traverse les échangeurs séparément.
- 8. En déduire une relation entre les débits massiques et les enthalpies massiques d'entrée et de sortie des deux écoulements.
- 9. On suppose que les variations d'enthalpie massiques peuvent s'exprimer en fonction de la variation de température via la capacité calorifique massique c tel que $\Delta h = c\Delta T$.
Reliez les variations de température des deux fluides en fonction de leurs capacités calorifiques c_1 et c_2 et les débits massiques des deux écoulements $D_{m,1}$ et $D_{m,2}$.

1.3 Détendeur calorifugé (laminage)

Définition : Un détendeur est une vanne qui permet de contrôler la pression d'un fluide en la faisant passer d'une pression élevée à une pression plus faible de manière contrôlée.

Ce système est réalisé en contrôlant l'ouverture de la vanne selon la chute de pression voulue, plus la vanne est fermée plus la chute de pression sera grande. On dit alors que le fluide suit un écoulement appelé laminage, il s'écoule à travers une conduite présentant un obstacle fixe.

Exemples : On retrouve ce type de détendeur autant sur des circuits hydraulique (par exemple : système d'arrosage, arrivée d'eau dans un immeuble ...) que sur des systèmes à gaz (par exemple : en sortie de bouteilles de gaz sous pression).



Sur l'illustration ci-dessous, nous pouvons observer de gauche à droite : un détendeur hydraulique, un détendeur à gaz haute pression, un schéma de principe de fonctionnement où la chute de pression est régulée par la compression d'un ressort sur un clapet.

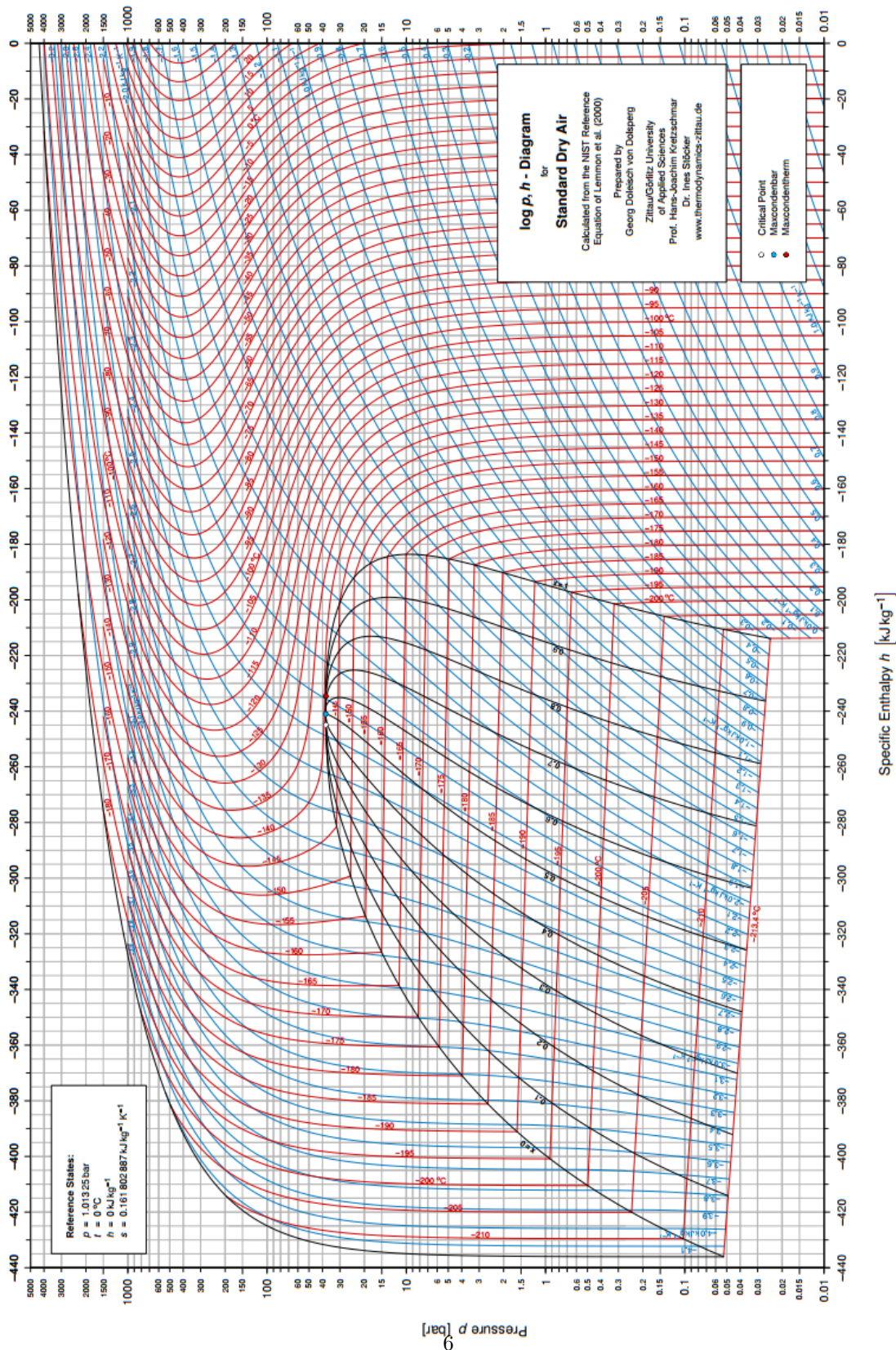
Schéma : les détendeurs calorifugés peuvent être schématisés comme des vannes dans la description d'installations industrielles :



Modélisation : Nous modéliserons dans les cas idéalisés ces dispositifs comme :

- calorifugés,
 - sans pièces mécaniques mobiles,
 - où la variation de vitesse et d'altitude du fluide est négligeable entre l'entrée et la sortie.
10. Écrivez le premier principe industriel appliqué à cette modélisation.

11. Écrivez le second principe industriel appliqué à cette modélisation.
12. Soit un gaz parfait que nous faisons circuler dans un détendeur calorifugé,
à partir du premier principe industriel montrez que la détente d'un gaz parfait est isotherme,
à partir du second principe industriel montrez qu'il s'agit nécessairement d'une détente.
13. Sur un diagramme des frigoristes, tracez l'allure de la transformation suivie par un gaz et
par un liquide.
14. Dans quel cas pouvons-nous considérer le gaz comme un gaz parfait ? Que peut-il se passer
pour un liquide ? pour un gaz réel ?



Pressure p [bar]

2 Cycles industriels

Dans cette seconde partie nous allons étudier une machine industrielle cyclique comportant des dispositifs étudiés précédemment.

2.1 Moteurs

Rappels - Cycle de Carnot

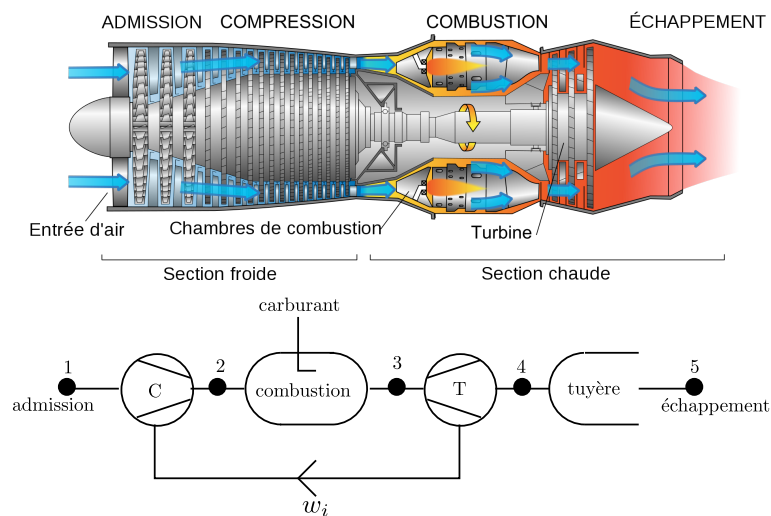
1. Rappelez le fonctionnement d'une machine ditherme cyclique et réversible en moteur.

Turbo-réacteur

On observe la machine thermique exposée dans la photo de gauche ci-dessous



Voici le schéma de principe du fonctionnement du turbo-réacteur



On donne les données techniques :

- lors de l'admission, on supposera l'air au décollage dans des conditions normales de température et de pression,
- le compresseur calorifugé a une pression de sortie de 10 bar,
- la combustion est isobare avec une température de flamme de 1200 K,

- le travail indiqué nécessaire à la compression provient de la turbine,
 -
1. Tracer sur un diagramme $(\ln(p), h)$ de l'air (ou diagramme des frigoristes) l'allure des transformations du fluide s'écoulant à travers le turbo-réacteur avec les numéros 1, 2, 3, 4 et 5.
 2. A l'entrée du turbo-réacteur (état 1) :
 - Donner la pression p_1 et la température T_1 de l'air en unité S.I.
 3. De l'état 1 à l'état 2 : l'air subit une compression adiabatique réversible jusqu'à une pression $p_2 = 10 \text{ atm}$.
 - Calculer la variation d'entropie de la transformation.
 - En faisant l'hypothèse que l'air est un gaz parfait diatomique, utilisez les lois de Laplace pour calculer sa température T_2 à l'état 2
 - A l'aide du premier principe industriel relier la variation d'enthalpie au travail utile.
 - En utilisant la définition de la capacité thermique massique à pression constante $\delta q = c_p dT$ avec pour l'air $c_p = 1 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$, et que h ne dépend que de T pour un gaz parfait, calculer le travail indiqué de cette transformation.
 4. De l'état 2 à l'état 3 : l'air subit une combustion isobare jusqu'à une température $T_3 = 1200 \text{ K}$.
 - A l'aide du premier principe industriel relier la variation d'enthalpie au transfert thermique.
 - Calculer le transfert thermique de cette transformation.
 5. De l'état 3 à l'état 4 : l'air subit une détente adiabatique réversible de manière à récupérer le travail indiqué pour effectuer la compression.
 - A l'aide du premier principe industriel relier la variation d'enthalpie au travail indiqué.
 - A l'aide de la capacité thermique massique à pression constante, calculer la température de l'air T_4 dans l'état 4.
 - Calculez la pression de l'air p_4 dans l'état 4.
 6. De l'état 4 à l'état 5 : l'air subit une détente adiabatique réversible sans travail utile jusqu'à qu'il soit à l'extérieur.
 - Calculer la variation d'entropie de la transformation
 - Trouver la pression p_5 de l'air dans l'état 5.
 - Calculer la température T_5 de l'air dans l'état 5.
 - Calculer la variation d'enthalpie de la transformation.
 - A l'aide du premier principe industriel dire à quoi sert cette transformation.
 7. Calculer numériquement le rendement r d'un tel réacteur.
 8. Sachant que sa puissance est de 15 MW, calculer le débit massique d'air qui traverse le réacteur.
 9. Sachant que l'enthalpie massique de combustion du kérosène est d'environ $\Delta h_{\text{comb.}} = 40 \text{ MJ.kg}^{-1}$, calculer le débit massique de kérosène consommé. Justifier pourquoi les vols commerciaux les plus longs ne dépassent pas les 20 h.

2.2 Réfrigérateurs

Rappels - Cycle de Carnot

1. Rappelez le fonctionnement d'une machine ditherme cyclique et réversible en réfrigérateur.

Liquéfaction de l'air

On étudie ici le processus de Linde-Hampson de liquéfaction du diazote. Le principe de la machine est représenté en figure ci-dessous.

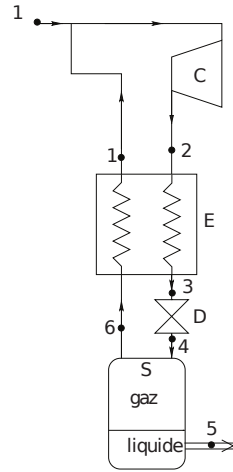


Fig. 1 – Cycle de Linde-Hampson

- Au repère 1, le diazote entre dans le compresseur, noté C, dans l'état 1 à la pression $P_1 = 1$ bar et à la température $T_1 = 290$ K.
- Dans le compresseur, le diazote subit une compression isotherme réversible qui l'amène au repère 2 à la pression $P_2 = 200$ bar.
- Le diazote sortant du compresseur passe dans l'échangeur thermique E (repère 3) où il y est refroidi à pression constante.
- Le détendeur D détend le gaz jusqu'à la pression atmosphérique P_1 . Le détendeur est un simple robinet et ne comporte donc pas de parties mobiles. À sa sortie, le diazote est un mélange de gaz et de liquide.
- Le liquide formé est extrait au niveau du séparateur S et la vapeur saturée (repère 6) est renvoyée dans l'échangeur thermique E. Le repère 5 ne fait pas partie du cycle. Le diazote gazeux est ramené à l'état 1 à la sortie de l'échangeur E.
- Le détendeur D, le séparateur S, l'échangeur E et tous les circuits de liaison sont supposés parfaitement calorifugés. Lors du passage dans le séparateur et l'échangeur thermique, les transformations sont considérées comme isobares.

Étude du cycle

Le diagramme enthalpique (P, h) est donné dans le document page suivante.

1. En se servant des isothermes et isobares, placer les points 1 et 2 sur le diagramme (P, h) du document page suivante. De même en se servant des isobares et des courbes de changement d'état placer les points 5 et 6.
2. Par lecture graphique, déterminer pour ces points leurs enthalpies et entropies massiques.

On s'intéresse à la validité du modèle du gaz parfait.

3. Pour un gaz parfait, on sait que l'enthalpie ne dépend que de la température, comparer alors les isothermes et les isenthalpes dans un diagramme (P, h) de gaz parfait.

Puis pour le diagramme donné page suivante en déduire à partir du diagramme, dans quel domaine de pression on peut considérer le diazote comme un gaz parfait.

On étudie maintenant la transformation $1 \rightarrow 2$ dans le compresseur.

4. Comment se simplifie le deuxième principe pour une transformation isotherme réversible ? En déduire l'expression du transfert thermique massique $q_{1 \rightarrow 2}$. Faire l'application numérique.
5. En écrivant le premier principe pour cette transformation en déduire le travail massique $w_{1 \rightarrow 2}$ fourni par le compresseur au système. Faire l'application numérique.

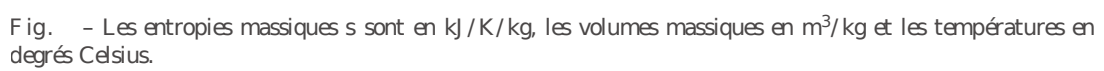
On s'intéresse à l'étude du détendeur (transformation $3 \rightarrow 4$) et du séparateur (transformation $4 \rightarrow 6$). On rappelle que l'étape 5 ne fait pas partie du cycle.

6. Déterminer w_i et q de la transformation $3 \rightarrow 4$ et en déduire sa nature.
7. On note y la fraction massique en diazote liquide. À partir du point 4, le diazote est séparé en deux : le liquide d'enthalpie massique h_5 est extrait et le gaz d'enthalpie massique h_6 est envoyé dans l'échangeur thermique. Déterminer l'expression de h_4 en fonction de y , de l'enthalpie massique du liquide h_5 et celle du gaz h_6 .

On regarde maintenant l'échangeur thermique E (transformation $2 \rightarrow 3$ et $6 \rightarrow 1$). On peut montrer en utilisant le premier principe que

$$h_3 - h_2 + (1 - y)(h_1 - h_6) = 0$$

8. En déduire l'expression de y en fonction des enthalpies massiques h_1 , h_2 et h_5 . Faire l'application numérique.
- y représente la fraction de diazote liquéfié à chaque cycle dans la machine. On est donc capable de déterminer l'efficacité de la machine en fonction de ses températures et pressions de fonctionnement.

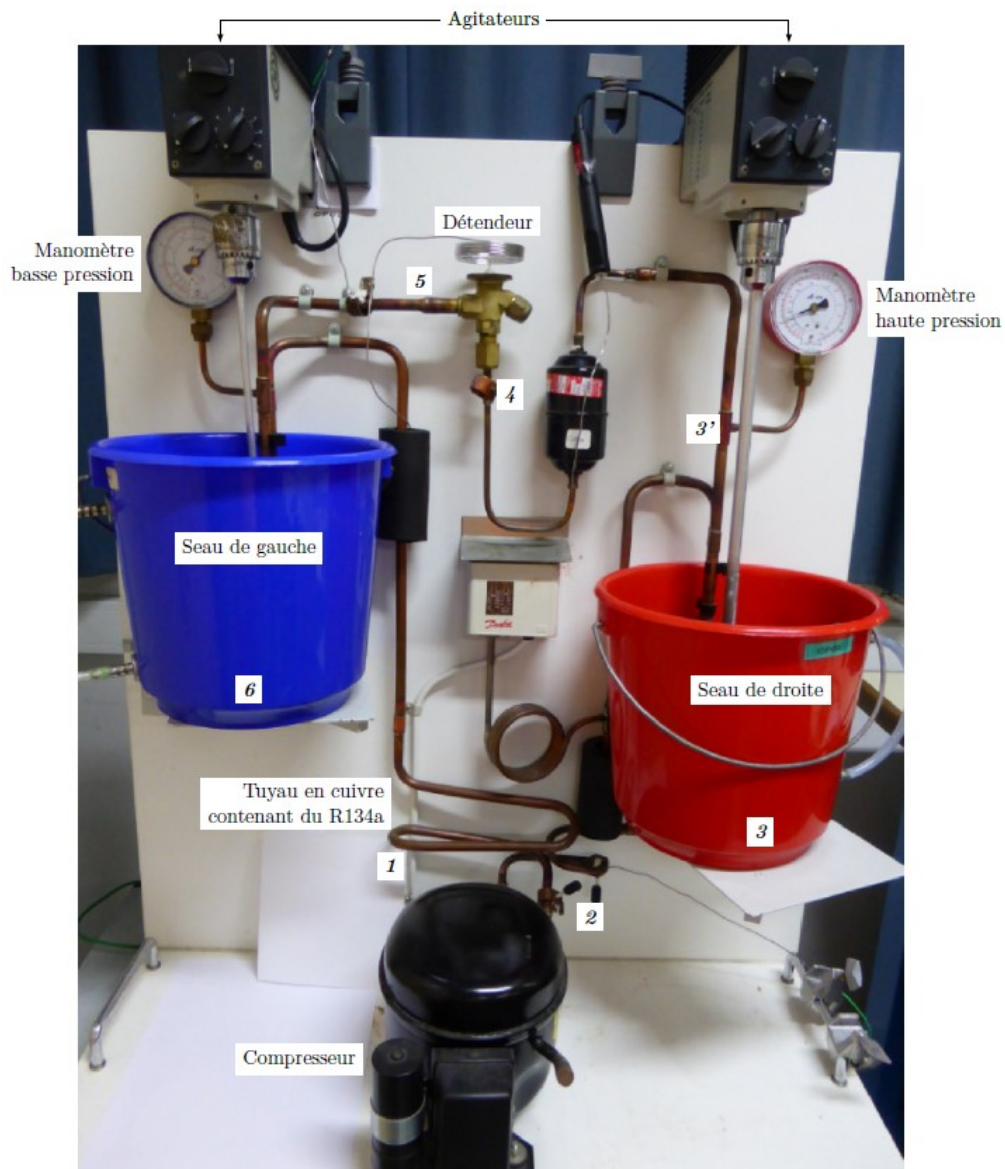


2.3 Pompes à chaleur

Rappels - Cycle de Carnot

1. Rappelez le fonctionnement d'une machine ditherme cyclique et réversible en pompe à chaleur.

Pompe à chaleur de démonstration



Vue d'ensemble de la pompe à chaleur

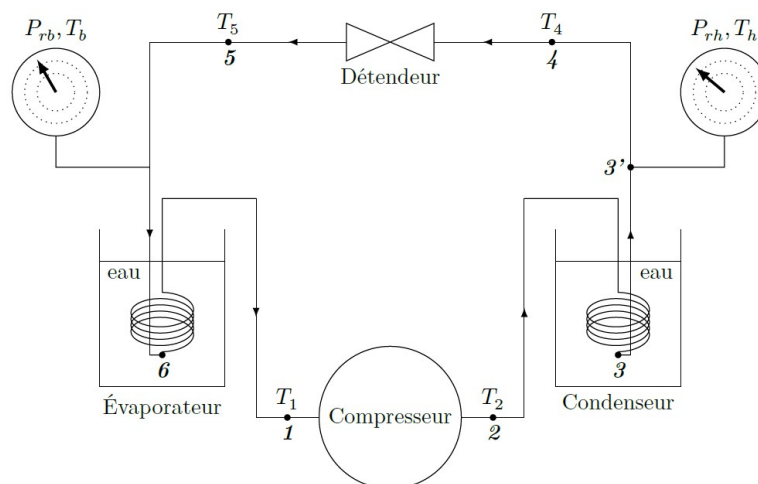


Schéma d'ensemble de la pompe à chaleur

Étude thermodynamique de l'écoulement stationnaire

Écoulements stationnaires à travers les différents composants Dans cette sous-partie, on considère cette fois que le fluide est en écoulement stationnaire à travers les différentes machines qui composent la pompe à chaleur (compresseur, condenseur, détendeur, évaporateur, tuyau). De plus, on réalise un écoulement d'eau dans le seau de droite : le seau de droite est alimenté en eau par un robinet et l'eau du seau s'évacue ensuite dans un évier.



Figure : Pompe à chaleur avec dispositif de refroidissement

Au bout d'une vingtaine de minutes, la température de l'eau du seau de droite (notée θ_3) est constante. Il en va de même pour celle du seau de gauche. Les températures et pressions se stabilisent alors dans l'ensemble du dispositif comme le montre le relevé donné :

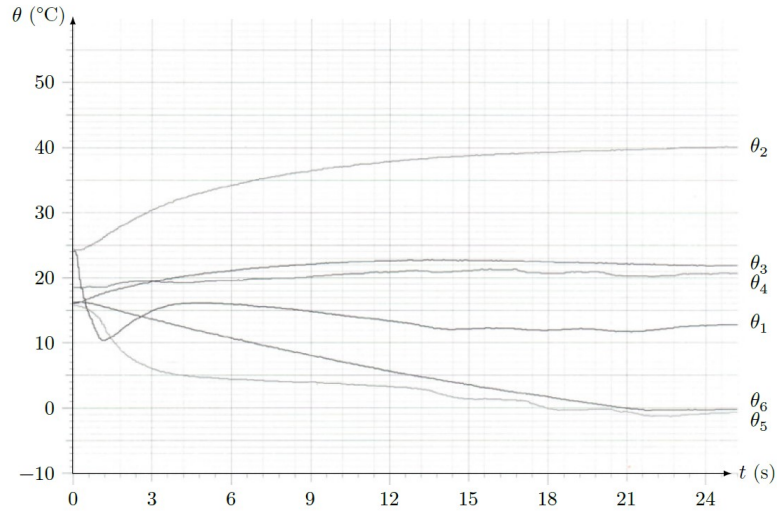


Figure : Relevé de températures

	1	2	3	3'	4	5	6
P_r (bar)	1,9	5,8	5,8	5,8	5,8	1,9	1,9
P (bar)	2,9	6,8	6,8	6,8	6,8	2,9	2,9
θ (°C)	12	44	26	26	19	0	0

Tableau : Relevé de températures

Le régime permanent atteint, on effectue alors les mesures de température θ_i et de pression P_i reportées dans le tableau.

1. Pour quelle raison obtient-on une température constante dans le seau de gauche ?

En régime permanent d'écoulement, le fluide R134a subit les transformations suivantes (on peut se reporter au schéma de principe)

- $1 \rightarrow 2$: le fluide à l'état gazeux sous la pression P_b est comprimé dans un compresseur à piston. Il ressort à la pression P_h . On considère que cette compression est isentropique ;
- $2 \rightarrow 3$: le gaz se refroidit de façon isobare jusqu'au condenseur (seau de droite contenant une masse d'eau m_e). On parle de désurchauffe. Au point 3 le gaz est assimilé à de la vapeur saturante sèche ;
- $3 \rightarrow 3'$: le gaz se condense au contact thermique de l'eau du condenseur (seau de droite) jusqu'au liquide saturé ;
- $3' \rightarrow 4$: dans le tuyau de cuivre, le liquide se refroidit de façon isobare jusqu'au détendeur. On parle de sous-refroidissement ;
- $4 \rightarrow 5$: le liquide subit une détente dans le détendeur ; il commence à se vaporiser ; la pression de sortie est P_b (manomètre de gauche). Cette détente peut être considérée comme adiabatique ;
- $5 \rightarrow 6$: le fluide poursuit sa vaporisation à la pression P_h notamment dans le serpentin évaporateur baignant dans de l'eau (seau de gauche contenant une masse d'eau m_e) ;
- $6 \rightarrow 1$: dans le tuyau de cuivre, le gaz se réchauffe de façon isobare jusqu'à l'entrée du compresseur. On parle de surchauffe. Elle permet de s'assurer qu'aucune goutte de liquide ne pénètre dans le compresseur.

On obtient tableau :

	1	2	3	3'	4	5	6
P (bar)	2,9	6,8	6,8	6,8	6,8	2,9	2,9
θ (°C)	12	44	26	26	19	0	0
T (K)	285	317	299	299	292	273	273
x	vapeur sèche	vapeur sèche	1	0	Liquide	x_5	1
v (m ³ .kg ⁻¹)	0,073	0,033	0,030	$8,3 \times 10^{-4}$	$8,1 \times 10^{-4}$	0,012	0,070
h (kJ.kg ⁻¹)	408	430	412	233	226	h_5	396
s (kJ.K ⁻¹ .kg ⁻¹)	1,76	s_2	1,72	1,13	1,09	1,08	1,72

On considère une machine (M), présentant une entrée et une sortie, dans laquelle un fluide est en écoulement permanent unidimensionnel.

Dans toute la suite du problème, on négligera les variations d'énergies cinétique et potentielle massiques devant les variations d'enthalpie massique.

On s'intéresse au détenteur. Il s'agit d'un organe sans pièce mobile. La détente est supposée adiabatique.

2. Quel(s) argument(s) permet(tent) de justifier l'adiabaticité de la transformation ($4 \rightarrow 5$) dans le détenteur ?
3. Montrer qu'une fonction d'état massique se conserve au cours de la transformation.

On s'intéresse au compresseur. L'évolution du fluide peut être considérée comme isentropique.

4. Quels arguments permettent de justifier l'isentropie de la transformation ($1 \rightarrow 2$) dans le compresseur ?
5. Calculer le travail massique indiqué w_{i12} reçu par le fluide de la part du compresseur. Commenter.

Diagramme enthalpique On considère le diagramme enthalpique (ou diagramme des frigorigènes) fourni sur le document réponse. Sur ce diagramme, on peut identifier la courbe de saturation composée de la courbe d'ébullition (liquide saturé, $x = 0$, courbe de gauche) et de la courbe de rosée (vapeur saturante sèche, $x = 1$, courbe de droite). On peut également identifier les isotitres, les isothermes, les isentropiques et les isochores.

6. Commenter l'allure des isothermes dans chaque domaine (vapeur sèche, état diphasé, phase liquide).
7. Placer les points 1, 2, 3, 3', 4, 5 et 6 sur le diagramme des frigorigènes et tracer le cycle parcouru par le fluide.
8. Lors du changement d'état $A \rightarrow B$ d'un corps pur à la température T , quelle relation a-t-on entre $\Delta s_{AB}(T)$ et $\Delta h_{AB}(T)$?
9. Vérifier numériquement cette relation pour $T = 299$ K.
10. Déterminer graphiquement la valeur de l'enthalpie massique de vaporisation du fluide R134a pour $T = 273$ K. Commenter l'ordre de grandeur en comparant à des ordres de grandeur connus.
11. Déterminer la valeur de la fraction massique $x = m_g/m$ au point 5.

Efficacité de la pompe à chaleur Dans toute la suite du problème, on prendra comme valeur du débit massique en R134a : $D_m = 2,12 \cdot 10^{-3} \text{ kg.s}^{-1}$.

12. Le wattmètre mesurant la puissance électrique consommée par le compresseur affiche une valeur moyenne $\mathcal{P} = 110 \text{ W}$. Déterminer le rendement r du compresseur. Commenter.
13. La pompe à chaleur est utilisée comme chauffage en hiver.
14. Donner le sens de tous les transferts énergétiques ; on s'aidera pour cela d'un schéma.
15. Définir l'efficacité η_c de la pompe à chaleur en tenant compte de la désurchauffe et du sous-refroidissement mais sans tenir compte du rendement r du compresseur.
16. Faire l'application numérique et comparer-la à l'efficacité η_{cc} de Carnot.
17. Quel est l'intérêt de la désurchauffe ($2 \rightarrow 3$) et du sous-refroidissement ($3' \rightarrow 4$) ?
18. Que valent les efficacités calculées précédemment si l'on tient compte du rendement du compresseur ?
19. La pompe à chaleur est utilisée comme système de réfrigération en été.
Reprendre l'étude précédente : sens des échanges, efficacité η_f , application numérique, intérêt de la surchauffe ($6 \rightarrow 1$) et prise en compte du rendement du compresseur.
20. Le compresseur serait endommagé par une entrée de liquide ("liquid shock"). Quel nouvel avantage a-t-on en réalisant la surchauffe ($6 \rightarrow 1$) ?
21. Évaluer la puissance thermique reçue par le fluide lors de la surchauffe. Commenter le résultat.

