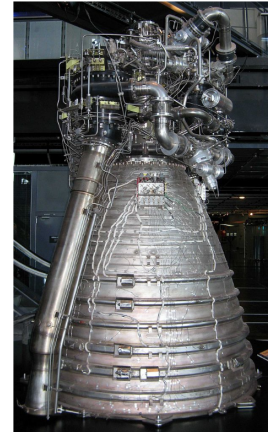
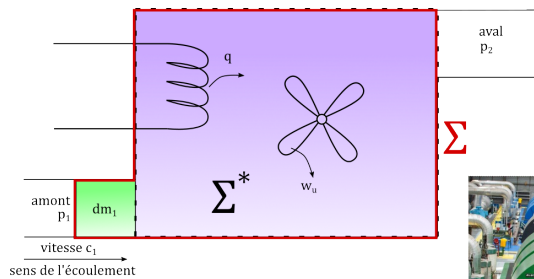


THERMO2 - Rappels et compléments de thermodynamique

Document ressource



• Introduction et plan du cours

En première année, l'étude du premier principe est réservé à des systèmes fermés bien identifiés. La réalité industrielle de la thermodynamique est que les fluides qui échangent de l'énergie avec les divers éléments de la machine afin de garantir son fonctionnement sont **en écoulement** dans des éléments comme des tuyaux, des échangeurs, des compresseurs... nous verrons dans ce chapitre que dans ce cadre, les principes de la thermodynamique se réécrivent d'une manière plus pratique pour l'étude énergétique de ces machines.

Plan du cours

I) Rappels et compléments de thermodynamique

- 1) Énoncé du premier principe de la thermodynamique et cas particuliers
- 2) Énoncé du second principe et cas particuliers
- 3) Transformations élémentaires
- 4) Gaz parfait et transformations modèles
 - a) *Modèle du gaz parfait et équation d'état*
 - b) *Transformation isochore*
 - c) *Transformation isobare*
 - d) *Transformation isotherme*
 - e) *Transformation adiabatique réversible*

5) Phases condensées sans changement de phase

6) Changement de phase d'un corps pur

II) Rappels sur les machines thermiques

- 1) Machines dithermes
- 2) Étude d'un cas particulier : la pompe à chaleur

III) Principes de la thermodynamique pour un fluide en écoulement

- 1) Expression du premier principe
- 2) Expression du second principe
- 3) Application à divers éléments d'une machine - hypothèses
- 4) Application à l'étude d'une machine réelle. Diagramme (P, h) .

• Au concours...

CCINP : MP23-Ph-Q45-Q50 ;

CCS : MPI23-PhCh2-Q33-Q36 ; MP23-PhCh1-Q36-Q41

• Quelques scientifiques remarquables du domaine

• **James Prescott Joule**, né le 24 décembre 1818 à Salford, près de Manchester (Angleterre) et mort le 11 octobre 1889 à Sale (Angleterre), est un physicien anglais. Son étude sur la nature de la chaleur et sa découverte de la relation avec le travail mécanique l'ont conduit à la théorie de la conservation de l'énergie (la première loi de la thermodynamique). Il a également énoncé une relation entre le courant électrique traversant une résistance et la chaleur dissipée par celle-ci, et donné son nom à l'effet correspondant (effet Joule). Enfin il a travaillé avec Lord Kelvin pour développer l'échelle absolue de température et a étudié la magnétostriktion. Dans le Système international, l'unité de l'énergie et de la quantité de chaleur porte son nom.

• **Sadi Carnot** est un physicien et ingénieur français, né le 1er juin 1796 à Paris et mort le 24 août 1832 à Ivry-sur-Seine ou à Paris.

Durant sa courte carrière (il meurt du choléra à l'âge de 36 ans), Sadi Carnot ne publia qu'un seul livre (comme Copernic) : *réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, en 1824, dans lequel il exprima, à l'âge de 27 ans, ce qui s'avéra être un livre important dans l'histoire de la physique. Dans cet ouvrage il posa les bases d'une discipline entièrement nouvelle, la thermodynamique.

Sadi Carnot formula l'exposé raisonné du moteur thermique et les principes de base selon lesquels toute centrale énergétique, tout moteur à explosion ou à réaction est aujourd'hui conçu. Cette genèse se fit alors qu'aucun prédécesseur n'avait encore défini la nature et l'étendue du sujet. En s'appuyant sur des préoccupations purement techniques, comme l'amélioration des performances de la machine à vapeur, le cheminement intellectuel de Sadi Carnot est original et annonce des évolutions importantes qui intervinrent à cette époque charnière pour la science moderne.



• Capacités exigibles du programme officiel

- Utiliser avec rigueur les notations d et δ en leur attachant une signification.
- Établir les relations $\Delta h + \Delta e = w_u + q$ et $\Delta s = s_e + s_c$ et les utiliser pour étudier des machines thermiques réelles à l'aide du diagramme (P,h).

• Exercices de cours

Exercice 1

On admet que l'entropie d'un gaz parfait est donné par la formule : $S(T, V) = \frac{nR}{\gamma - 1} \ln T + nR \ln V$

1. Montrer que cela permet de retrouver l'une des lois de Laplace.
2. En déduire les deux autres.
3. Dans un compresseur, un gaz parfait diatomique ($\gamma = 1,4$) est aspiré à la pression atmosphérique P_1 et la température $T_1 = 285 \text{ K}$ et refoulé à la pression $P_2 = 7,4 \text{ bar}$. La compression est supposée adiabatique et réversible. Déterminer littéralement et numériquement la température du gaz refoulé.

Exercice 2

Un petit cube de métal, d'arête $a = 4 \text{ cm}$, est porté à la température de $T_1 = 500^\circ \text{C}$. Il est ensuite plongé dans un calorimètre idéal dans lequel on a placé 1,0L d'eau à $T_0 = 20^\circ \text{C}$, jusqu'à ce que l'équilibre thermique soit établi. Calculer la température finale de l'eau.

Données : capacité thermique massique du fer : $c_{\text{Fe}} = 440 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, capacité thermique massique de l'eau liquide : $c_{\text{H}_2\text{O},\ell} = 4,18 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, masse volumique du fer : $\rho_{\text{Fe}} = 7,87 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$

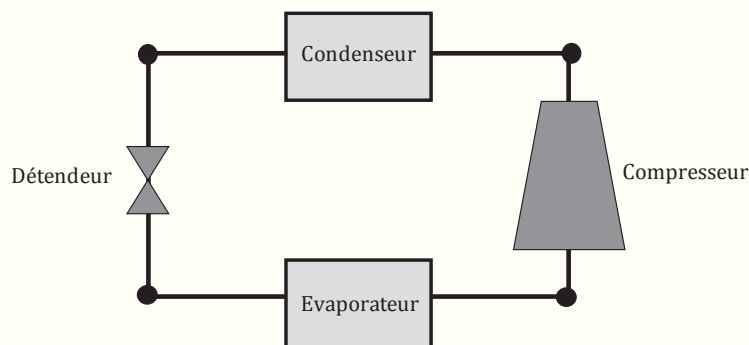
Exercice 3

On considère le cycle-modèle de Carnot, au cours duquel un gaz parfait subit :

- Une détente isotherme à T_F qui fait passer son volume de V_1 à $V_2 > V_1$
 - Une compression adiabatique réversible qui fait passer son volume de V_2 à $V_3 < V_2$ et sa température de T_F à T_C ,
 - Une compression isotherme à T_C , qui fait passer son volume de V_3 à $V_4 < V_3$
 - Une détente adiabatique réversible qui ramène le gaz à son état initial.
1. Tracer l'allure de ce cycle dans un diagramme $P = f(V)$ (diagramme de Clapeyron). Ce cycle est-il moteur ou récepteur ?
 2. Calculer W_{tot} , travail reçu par le gaz sur un cycle en fonction des températures et volumes.
 3. En supposant que ce cycle est utilisé dans une climatisation, identifier l'énergie utile et l'exprimer en fonction des températures et volumes.
 4. Montrer que l'efficacité de ce cycle peut alors s'écrire $\eta = \frac{T_F}{T_C - T_F}$. Commenter.

Exercice 4

Nous nous proposons d'étudier un cycle à compression de vapeur utilisé dans un réfrigérateur. La source chaude est la cuisine, de température T_c , la source froide est l'armoire du réfrigérateur et son contenu de température homogène T_f . Un fluide frigorigène décrit le cycle schématisé ci-dessous.



Il y subit les transformations suivantes :

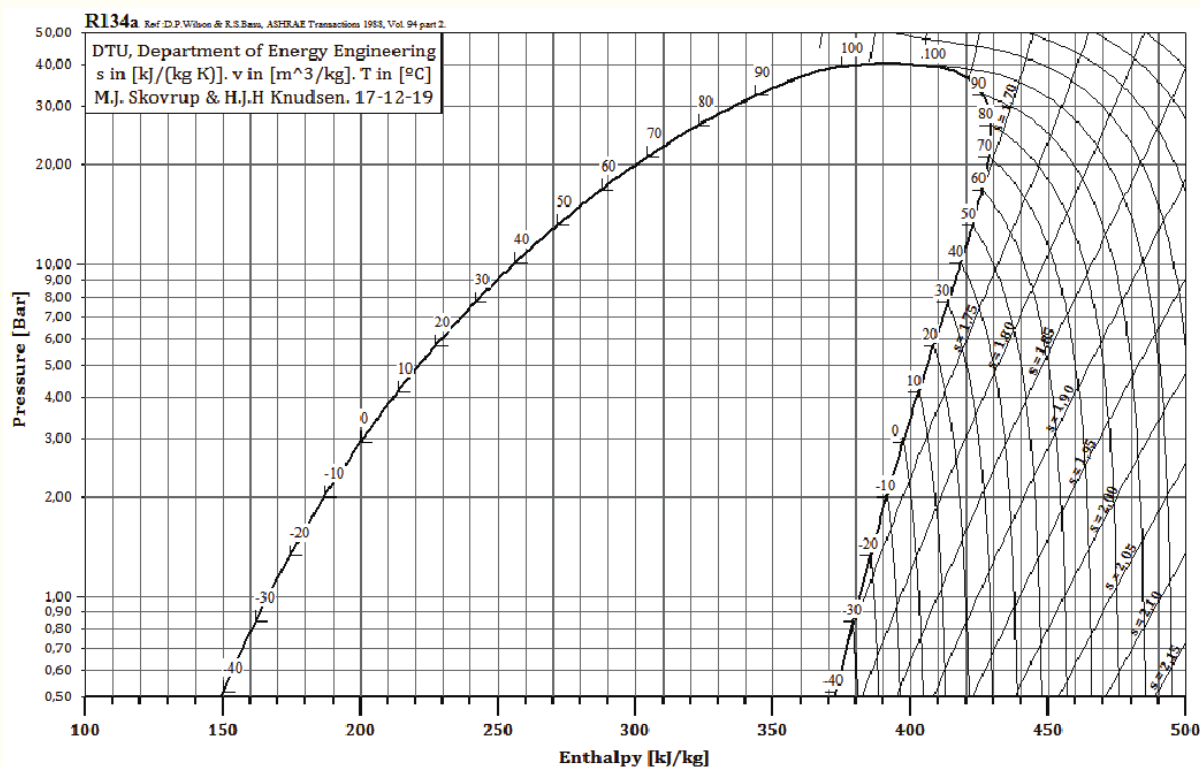
- De l'état 4 à l'état 1 : évaporation à $T_{\text{evap}} = 0^\circ\text{C}$ puis surchauffe isobare jusqu'à 10°C ;
- de l'état 1 à l'état 2 : compression adiabatique supposée réversible dans le compresseur ;
- de l'état 2 à l'état 3 : refroidissement isobare, liquéfaction isobare à $T_{\text{cond}} = 40^\circ\text{C}$ puis sous-refroidissement du liquide jusqu'à 30°C ;
- de l'état 3 à l'état 4 : détente isenthalpique du fluide.

On note h_i , s_i et v_i respectivement l'enthalpie, l'entropie et le volume massiques du fluide dans l'état i . On note P_i et T_i respectivement la pression et la température du fluide dans l'état i .

Entre les états i et j , on note :

- $\Delta_{ij}h$ la variation d'enthalpie massique du fluide, (les notations utilisées pour d'autres variations de grandeurs d'état s'en déduisent) ;
- q_{ij} le transfert thermique massique reçu par le fluide ;
- w_{ij} le travail massique utile (ou indiqué) reçu par le fluide.

1. Placer les points correspondant aux états 1, 2, 3 et 4 dans le diagramme (P, h) du fluide R134a.



2. Remplir les colonnes représentant les états 1, 2, 3 et 4 du tableau représenté :

Figure 1

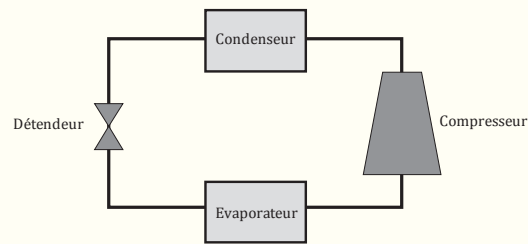


Tableau 3

point	1	2s	2	3	4
$P(\text{bar})$					
$T(^{\circ}\text{C})$					
État du fluide					
$h(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$					

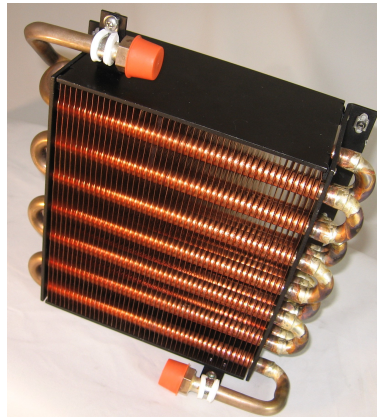
3. Justifier que l'on ait choisi $T_{\text{evap}} \leq T_f$ et $T_{\text{cond}} \geq T_c$.
4. Pour un gaz parfait, que peut-on dire de la dépendance entre l'enthalpie et la température ? Que peut-on alors dire sur les courbes isenthalpes et isothermes ? En analysant la figure 2a, indiquer à quelle(s) condition(s) la vapeur sèche de R134a peut être assimilée à un gaz parfait.
5. Définir et déterminer l'efficacité de cette machine frigorifique.

• Documents de cours

Document 1 : Quelques éléments importants des machines thermodynamiques réelles. Expression des principes.

- Un **échangeur** a pour but d'optimiser un transfert thermique entre deux fluides (le plus souvent des fluides en écoulement, ou bien un fluide statique et l'autre en écoulement).

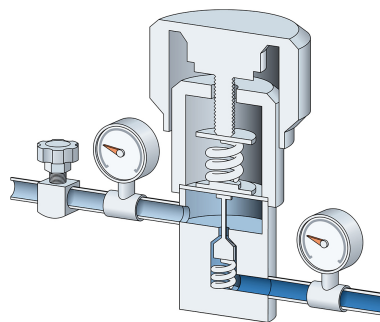
Si l'échangeur est isobare (perte de charges négligées), alors le premier principe s'écrit simplement :



- Un **compresseur** a pour but d'aspirer un fluide à basse pression et basse température, et de le refouler à haute pression et haute température. Il en existe de nombreux types (à piston, centrifuge...).

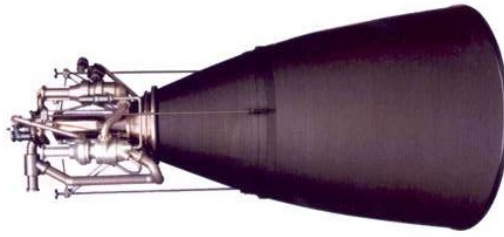
On fait souvent l'hypothèse que la compression est adiabatique réversible. Dans ce cas, le premier principe s'écrit :

- Un **détendeur** a pour but d'abaisser la pression et la température d'un fluide qui s'écoule à travers lui. Ceci est fait par l'intermédiaire d'un conduit étroit de largeur réglable, par simple effet d'écoulement (mécanique des fluides). Il n'y a pas de travail utile fourni au fluide dans un détendeur.



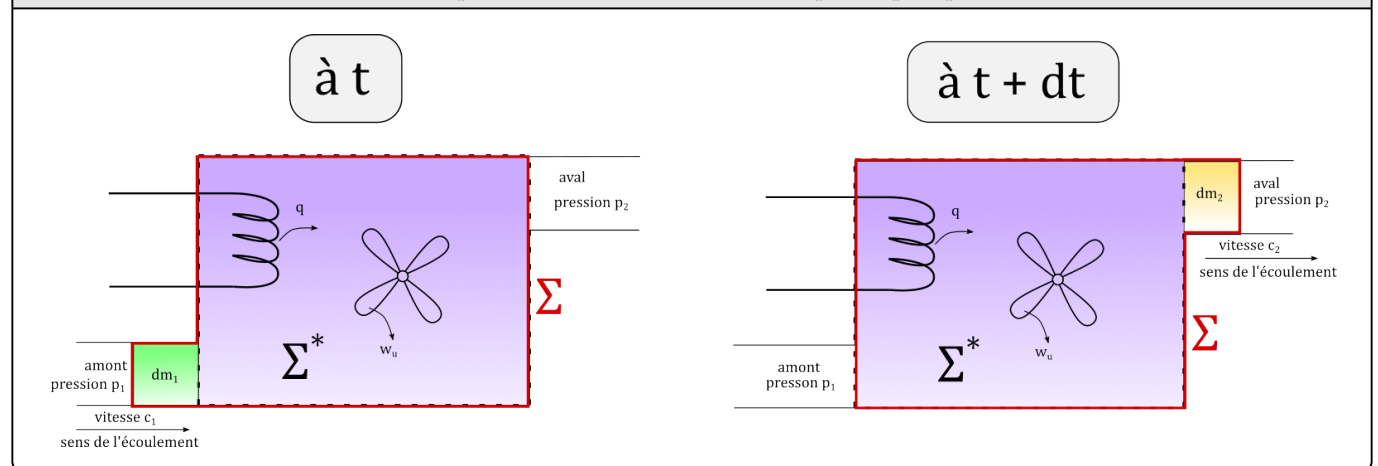
Si de plus on néglige tout échange d'énergie thermique avec l'extérieur lors de la détente, le premier principe s'écrit :

- Une tuyère est un dispositif ayant pour but d'accélérer un fluide en sortie. Dans le modèle le plus simple, le fluide le écoulement unidimensionnel subit une évolution adiabatique réversible dans un conduit de section variable.



Il n'y a aucune partie mobile dans une tuyère. Le premier principe s'écrit alors :

Document 2 : Schéma de base pour la démonstration des principes pour un fluide en écoulement



Document 3 : Diagramme (P-h) pour le R134A

Le R134A est un fluide frigorigène particulièrement répandu, notamment dans les réfrigérateurs domestiques. Son diagramme (P, h) est donné par :

