

LP14 MACHINES THERMIQUES RÉELLES

30 mai 2020

MONNET Benjamin &

Niveau : L3

Commentaires du jury

Bibliographie

✦ *Physique PCSI, Sanz*

→ Base du cours + frigo/frigo réel

✦ *Thermodynamique première année, Hprepa*

→ Moteur à combustion réel

Prérequis

Expériences

- Premier et second principe de la thermodynamique ☞
- Diagramme de Clapeyron

Table des matières

1	Description d'une machine thermique	2
1.1	Inégalité de Clausius Carnot	2
1.2	Machines dithermes : Diagramme de Raveau	2
1.3	Rendement et efficacité idéals	3
2	Étude du moteur à combustion	4
2.1	Description du cycle de Beau de Rochas	4
2.2	Etude théorique	5
2.3	Limite du modèle : moteur réel	6
3	Réfrigérateur	6
3.1	Principe de fonctionnement	7
3.2	Diagramme de Mollier	7
3.3	Démo de la loi de Laplace	8

Introduction

Dans le XIX^{ème} siècle, la thermodynamique connaît un essor avec la naissance des moteurs et des machines thermiques en général. Elles sont aujourd'hui encore très présentes et très utiles. On va donc essayer de comprendre le fonctionnement ainsi que les limitations des machines thermiques qui nous entourent.

1 Description d'une machine thermique

Une **machine thermique** est un système thermodynamique effectuant une transformation cyclique après contact et échange avec le milieu extérieur. Ce cycle peut être répété indéfiniment.

1.1 Inégalité de Clausius Carnot

Ce qui assure les échanges thermodynamiques dans une machine thermique, c'est un fluide. On le prendra donc comme système thermodynamique. Comme d'habitude, pour étudier la thermodynamique d'un système, on applique les 2 principes de la thermo (**Important : on travaille avec tout en reçu, contact avec des thermostats**) :

$$\begin{aligned}\Delta U &= W + \sum_i Q_i \\ \Delta S &= \sum_i \frac{Q_i}{T_i} + S_c\end{aligned}$$

Comme dans la machine, le fluide fait des tours, U et S étant des fonctions d'états, on a :

$$\begin{aligned}W + \sum_i Q_i &= 0 \\ \sum_i \frac{Q_i}{T_i} &\leq 0\end{aligned}$$

La deuxième égalité est appelée **inégalité de Carnot-Clausius**. On distingue deux types de machines :

- **Les moteurs thermiques** qui fournissent du travail ($W < 0$)
- **Les machines frigorifiques** qui utilisent du travail pour effectuer des échanges thermiques

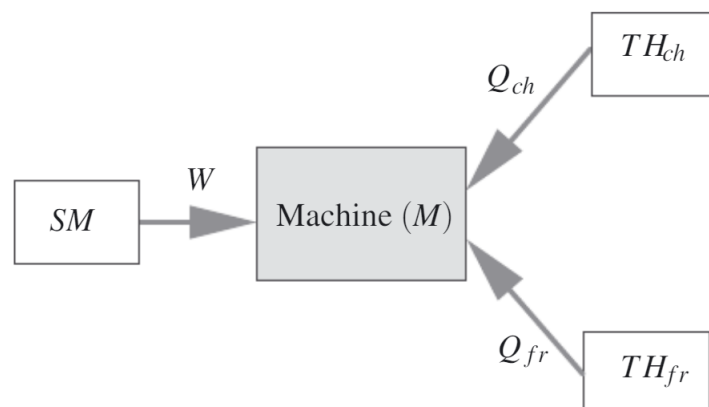
On va particulièrement s'intéresser dans le cadre de cette leçon aux machines dithermes. Néanmoins, jetons un coup d'œil rapide à la machine monotherme :

$$\begin{aligned}\frac{Q}{T} &\leq 0 \\ W + Q &= 0 \Leftrightarrow W > 0\end{aligned}$$

Autrement dit, il est pas possible d'avoir un moteur monotherme. On retrouve ici un énoncé historique du second principe de la thermodynamique.

↓ Penchons-nous maintenant sur ce qui va nous servir dans la suite : les machines dithermes.

1.2 Machines dithermes : Diagramme de Raveau



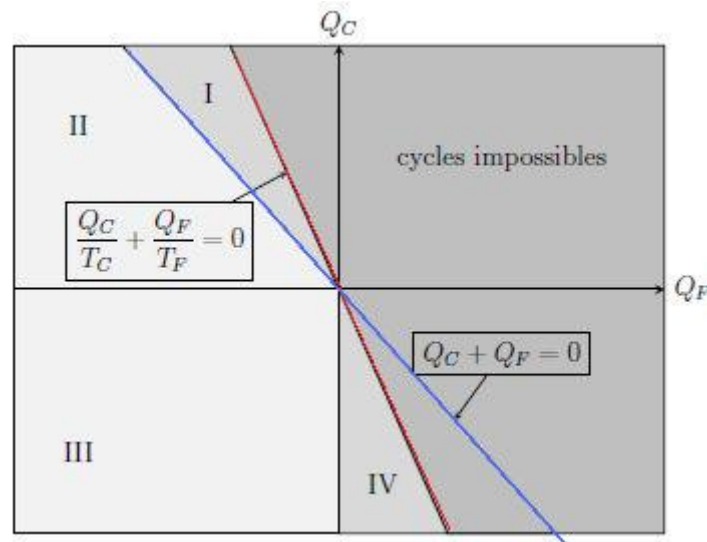
(SM=système mécanique). Les deux principes de la thermodynamiques donnent donc :

$$\begin{cases} \Delta U = W + Q_{ch} + Q_{fr} = 0 \\ \Delta S = \frac{Q_{ch}}{T_{ch}} + \frac{Q_{fr}}{T_{fr}} + S_c = 0 \end{cases}$$

Ce que l'on peut aussi écrire :

$$\begin{cases} \Delta U = W + Q_{ch} + Q_{fr} = 0 \\ \Delta S = \frac{Q_{ch}}{T_{ch}} + \frac{Q_{fr}}{T_{fr}} \leq 0 \end{cases}$$

Avec ces deux équation, on peut catégoriser les différentes machines dithermes qui existent à l'aide d'un **diagramme de Raveau** :



Outre les machines impossibles (par le second principe), on distingue quatres types de machines :

- **I** ($W>0, Q_C <0, Q_F >0$) : la machine reçoit du travail mais réalise des échanges non spontanés de chaleur car il fournit de la chaleur à la source chaude et en prend de la source froide. C'est une **machine frigorifique** (genre un frigo).
- **II** ($W>0, Q_C >0, Q_F <0$) : La machine reçoit du travail du système mécanique, fournit de la chaleur à la source chaude et en reçoit de la source froide. Il y a donc simplement contact thermique.
- **III** ($W>0, Q_C <0, Q_F >0$) : la machine reçoit du travail, restitue de la chaleur à la source chaude et à la source froide. En gros, c'est un radiateur.
- **IV** ($W<0, Q_C >0, Q_F <0$) : la machine restitue du travail en recevant de la chaleur de la source chaude et restitue à la source froide. C'est un **moteur thermique**.

On va s'intéresser particulièrement aux domaines I et IV dans la suite de la leçon, car ils réalisent ce que l'on souhaite.

1.3 Rendement et efficacité idéals

✍ Sanz p969E

Nous nous placerons ici dans un cadre idéal : il n'y a aucune source d'irréversibilité. Dans ce cas-là, les deux équations qui vont nous servir sont :

$$\begin{cases} \Delta U = W + Q_{ch} + Q_{fr} = 0 \\ \frac{Q_{ch}}{T_{ch}} + \frac{Q_{fr}}{T_{fr}} = 0 \end{cases}$$

On souhaiterait déterminer à quel point la machine thermique que l'on a est performante, c'est à dire à quel point elle produit ce que l'on veut à moindre cout. De manière générale on étudie donc la grandeur :

$$\rho = \left| \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie couteuse}} \right|$$

Selon la machine que l'on étudie, il n'y aura donc pas les mêmes grandeurs au numérateur et au dénominateur. Regardons ce qu'il en est pour les deux types de machines qui nous intéressent :

- **Pour les moteurs**, on parle alors de rendement. La grandeur qui nous intéresse est le travail alors que la source chaude est onéreuse. Autrement dit :

$$r = -\frac{W}{Q_{ch}} = 1 + \frac{Q_{fr}}{Q_{ch}} = 1 - \frac{T_{fr}}{T_{ch}}$$

Il s'agit ici du rendement de Carnot qui est le rendement **maximal** d'un moteur ditherme, qui ne peut être atteint que dans le cadre idéal d'une machine sans irréversibilité.

Exemple : Pour une centrale nucléaire, on a $T_{fr} = 300$ K et $T_{ch} = 600$ K, ce qui donne un rendement de Carnot égal à 0.5. En pratique, le rendement est compris entre 0.3 et 0.4 à cause des irréversibilité et des pertes.

- **Pour les machines frigorifiques**, on parle d'efficacité. Le but d'une machine frigorifique est de refroidir la source froide, au prix d'un travail. L'efficacité est donc définie comme :

$$e_{frigo} = \left| \frac{Q_{fr}}{W} \right| = \frac{Q_{fr}}{W}$$

Ce qui donne dans le cas idéal :

$$e_{frigo,rev} = \frac{T_{fr}}{T_{ch} - T_{fr}}$$

Il s'agit cette fois de l'efficacité maximale atteignable pour une machine frigorifique ditherme.

Exemple : à l'intérieur d'un congélateur, la température est de 255 K et la pièce extérieure est à environ 300 K. Cela donne $e_{frigo,rev} = 5.7$. En réalité, le coefficient d'efficacité est au mieux voisin de 2.

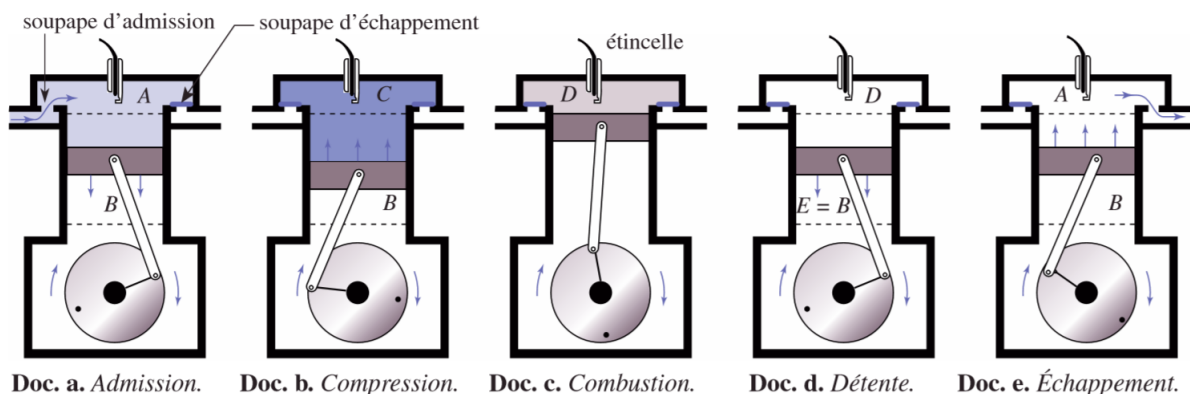
Je ne pense pas qu'il y ait le temps de traiter le cycle de Carnot si on veut traiter proprement les machines réelles. On s'en passera donc (malheureusement). Néanmoins, une petite annexe dessus peut être pas mal.

Maintenant que l'on a défini les machines qui nous intéressaient et les grandeurs qui les caractérisent, intéressons nous à des machines de la vie de tous les jours, à commencer par le moteur à combustion.

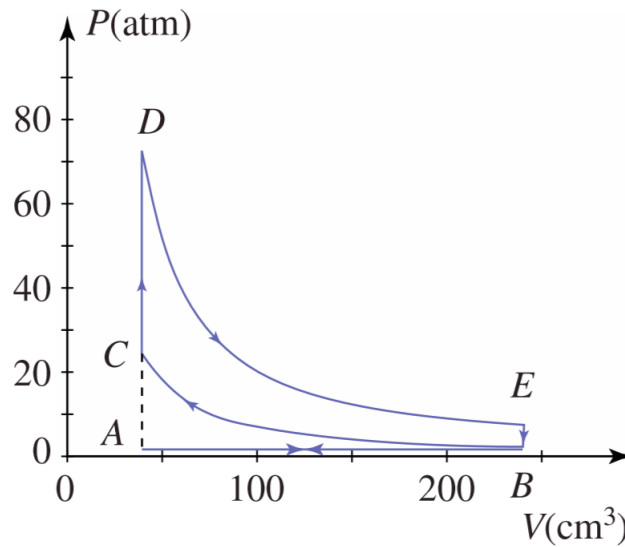
2 Étude du moteur à combustion

2.1 Description du cycle de Beau de Rochas

Le cycle d'un moteur à combustion est composé de plusieurs étapes :



Afin de pouvoir étudier quantitativement le cycle, on le présente sur un diagramme de Watt. Pour le tracer, on suppose que la gaz est un gaz parfait :



- **L'admission** : la soupape d'admission s'ouvre et le piston descend. Le tout se fait à pression constante. (AB)
- **La compression et combustion** : les soupapes sont fermées et l'air est alors fortement comprimée. On suppose que cette étape est adiabatique (BC sur la diagramme). Une fois l'air comprimé, une étincelle est produite, provoquant une augmentation brutale de température (900 à 1000°C) et de pression (60 à 80 bar) à volume constant.
- **La détente** : Suite à l'augmentation de la pression, le piston est poussé violemment vers le bas et le gaz se détend adiabatiquement (DE) (partie moteur du cycle)
- **L'échappement** : La soupape d'échappement s'ouvre, la pression chute à volume constant jusqu'à 1 bar (EB). Le piston remonte en éjectant les gazs brûlés. Le cycle peut recommencer.

2.2 Etude théorique

Afin d'étudier théoriquement le cycle de Beau de Rochas, il nous faut des hypothèses. Nous en avons déjà énuméré plusieurs dans la sous-partie précédente. On considèrera que le gaz que l'on considère est quasiment uniquement formé d'azote donc le coefficient γ vaut 1,4. Les étapes adiabatiques seront assimilées à des isentropiques.

Le rendement vaut :

$$r = \frac{-W}{Q_{CD}} = \frac{Q_{CD} + Q_{EB}}{Q_{CD}}$$

Or :

$$\begin{aligned} Q_{CD} &= \delta U_{CD} = nC_V(T_D - T_C) \\ Q_{EB} &= \delta U_{EB} = nC_V(T_B - T_E) \end{aligned}$$

Donc :

$$r = 1 + \frac{T_B - T_E}{T_D - T_C}$$

L'hypothèses adiabatiques des transformations BC et DE permet d'écrire, en introduisant le taux de compression volumétrique $a = \frac{V_B}{V_C} = \frac{V_E}{V_D}$:

$$T_D = T_E \left(\frac{V_E}{V_D} \right)^{\gamma-1} = T_E a^{\gamma-1} \quad \text{et} \quad T_C = T_B \left(\frac{V_B}{V_C} \right)^{\gamma-1} = T_B a^{\gamma-1}$$

On trouve donc :

$$r = 1 - \frac{1}{a^{\gamma-1}}$$

Plus le taux de compression volumétrique est grand, plus le rendement est élevé.

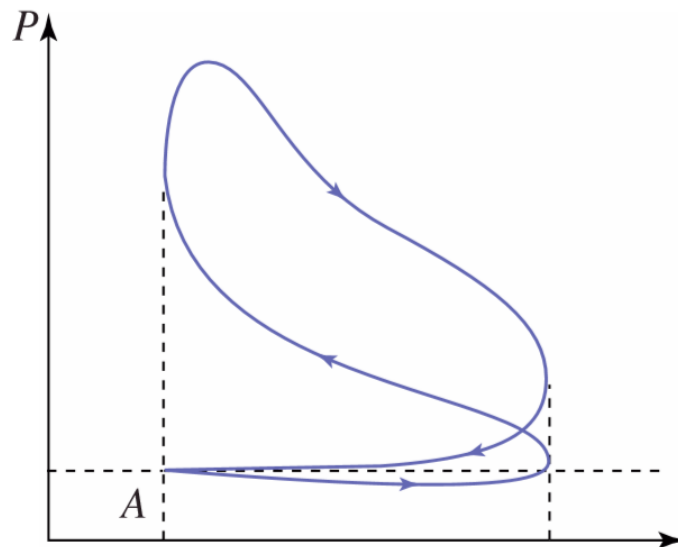
Résumé :

- CD isochore : $Q_{CD} = \int_{T_C}^{T_D} C_V dT = C_V (T_D - T_C)$, où C_V est la capacité calorifique.
- EB isochore : $Q_{EB} = \int_{T_E}^{T_B} C_V dT = C_V (T_B - T_E)$
- CB isentropique : $P_C V_C^\gamma = P_B V_B^\gamma$ ou encore $T_C V_C^{\gamma-1} = T_B V_B^{\gamma-1}$
- CB isentropique : $P_E V_E^\gamma = P_D V_D^\gamma$ ou encore $T_E V_E^{\gamma-1} = T_D V_D^{\gamma-1}$
- $V_C = V_D = V_A$ et $V_B = V_E$. On définit ici le taux de compression $\alpha = V_B/V_A$.

ODG : pour un moteur avec $\alpha=9$, le rendement théorique est $r=0.58$

2.3 Limite du modèle : moteur réel

Dans la réalité, le cycle du moteur à combustion ressemble plutôt à ça :



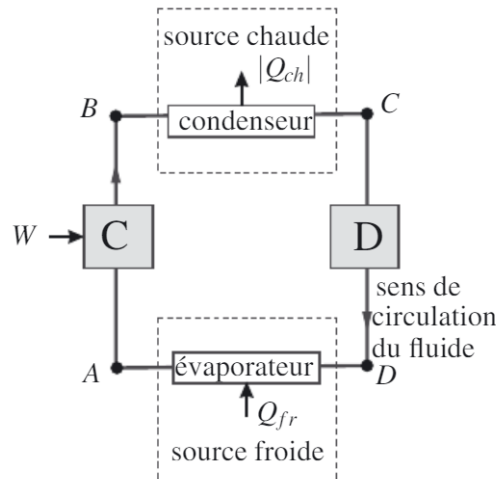
- Lors de l'admission, la viscosité du mélange gazeux crée une légère dépression
- L'explosion a lieu avec que le piston ne parvienne tout en haut car il y a un décalage entre l'étincelle et la combustion à prendre en compte
- La soupape d'échappement s'ouvre avant que le piston n'atteigne le bas
- Bien évidemment, il y a aussi des pertes dues aux frottements

Pour un moteur réel de taux de compression $\alpha=9$, le rendement réel du moteur est de l'ordre de $r=0,35$.

3 Réfrigérateur

✉ Sanz p979

3.1 Principe de fonctionnement



Les machines frigorifiques utilisent les changements d'état, dont les valeurs importantes de chaleur latente permet de maximiser les échanges thermiques. Il y a :

- Un compresseur C dans lequel le fluide caloporteur reçoit du travail mais pas d'énergie thermique. La température du fluide augmente.
- Un condenseur dans lequel il est en contact avec un thermostat chaud auquel il cède de la chaleur
- Un détendeur, diminuant la température du fluide, n'échangeant ni travail ni chaleur.
- Un évaporateur, où le fluide est en contact avec une source froide de laquelle il reçoit de l'énergie thermique

Et là la question qui se pose, c'est : est-ce qu'on suppose connu le premier principe en écoulement permanent ou pas ?

3.2 Diagramme de Mollier

On rappelle que pour un fluide en écoulement stationnaire, le premier principe donne :

$$\Delta h = w_u + q$$

On peut donc tout ré-exprimer avec ce principe :

- **Compresseur** : $\Delta h_{AB} = w_c$
- **Condenseur** : $\Delta h_{BC} = q_{ch}$
- **Détendeur** : $\Delta h_{CD} = 0$
- **Evaporateur** : $\Delta h_{DA} = q_{fr}$

L'efficacité du réfrigérateur peut donc être exprimé directement avec des valeur d'enthalpie :

$$e = \frac{q_{fr}}{w_c} = \frac{h_A - h_D}{h_B - h_A}$$

Un moyen commode d'étudier les réfrigérateurs est donc l'utilisation de **diagramme des frigorisites** ou **diagrammes de Mollier** (P,h). Néanmoins, pour couvrir un plus grand intervalle de pression, on utilise plutôt des diagrammes (logP,h).

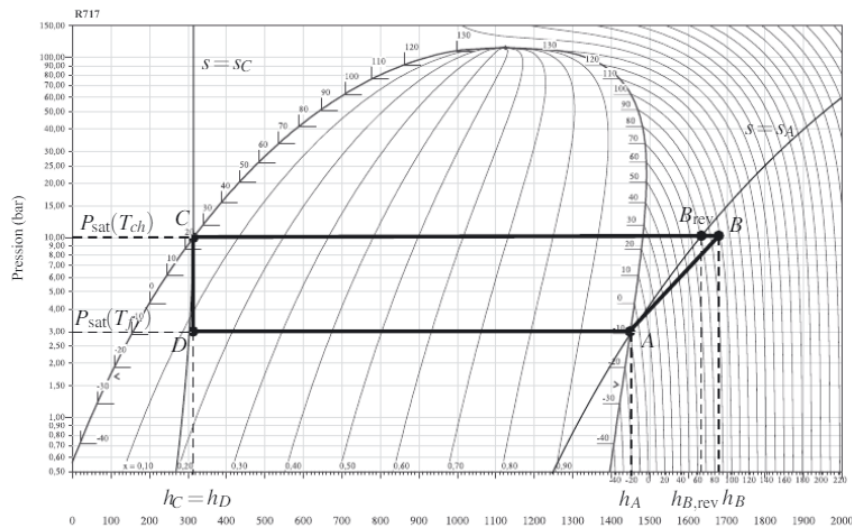
Ici y'a moyen de meubler (s'il le faut) avec des exemples de tracés d'isenthalpique, s'isentropique, ect...

Dans un modèle idéal, le cycle décrit par le fluide est le suivant :

- Compression isentropique
- Condensation à pression constante
- Détente isenthalpique

- Evaporation pression constante

En reportant sur un diagramme de Mollier :



On voit sur ce diagramme le cycle idéal et le cycle réel. Pour le cycle idéal, le point B est sur l'isentrope du point A. Néanmoins, on a $s_B > s_A$ donc la réaction n'était pas irréversible. On trouve alors :

$$e_{\text{frigo, rev}} = \frac{T_{fr}}{T_{ch} - T_{fr}} = \frac{263}{298 - 263} = 7,51$$

et

$$e_{\text{frigo}} = \frac{1452 - 313}{1680 - 1452} = 5,00 \pm 0,09$$

Annexes

Premier principe en système ouvert, écoulement permanent

↗ Sanz p.980

$$\begin{aligned}\Delta U &= mu_s - mu_e \\ \Delta E_c &\approx 0 \\ W_p &= P_e mv_e - P_s mv_s \quad v \text{ sont les volumes massiques} \\ mu_s - mu_e &= P_e mv_e - P_s mv_s + mw_u + mq \\ \Delta h &= w_u + q\end{aligned}$$

3.3 Démo de la loi de Laplace

<https://www.youtube.com/watch?v=HvSvR8fvySI>

Questions

Causes d'irréversibilité : s'agit-il de frottements mécaniques ou de problèmes de diffusion thermique ?

Les moteurs réversibles ont forcément un fonctionnement lent : comment peut-on alors récupérer de la puissance avec une telle machine thermique ?

Pourquoi certaines machines utilisent-elles des fluides subissant des changements d'état ?

Vous avez dit qu'une machine thermique est un modèle thermodynamique de transformations cycliques. Est-ce que c'est toujours le cas ?

Comment on peut faire en pratique pour s'approcher d'un cycle réversible ?

Expliquer le principe d'un réfrigérateur. Pourquoi il y a besoin de fournir du travail ?

Écrire le 1er principe en écoulement permanent.

Comment fonctionnent les moteurs électriques ? Connaissez-vous des modèles ?

Le rendement est-il le seul moyen d'étudier l'intérêt d'une machine thermique ? Quels sont autres moyens ?

Est-il vraiment intéressant pédagogiquement de parler des cycles réels par rapport aux théoriques ? Vaut-il mieux commencer par les cycles réels pour amener ou théoriques ou l'inverse ?

Dans le diagramme de Raveau, détailler le cas $W < 0$, $Q < 0$ (ni moteur, ni réfrigérateur). Est-ce vraiment inutile ? Dans quel cas ça peut être intéressant ?

Pourquoi le rendement maximal est-il inférieur à 1 ? Quels autres moteurs n'ont pas cette limitation ?

Industriellement, préfère-t-on des cycles rapides ou lents ?

La durée des transferts thermiques est-elle à minimiser ou bien maximiser ?

Peut-on faire une machine frigorifique en l'absence d'un travail extérieur : $W = 0$? Quel doit être le signe de l'échange avec la troisième source ? C'est possible en pratique ou ça n'existe que sur le papier ? oui, il suffit de remplacer par une troisième source de chaleur

Comment définit-on un thermostat idéal ? comment, en pratique, le réaliser ? Qu'est-ce qui change si la température des sources varie lentement ? (notion de pseudo sources) Système en contact avec le système étudié, beaucoup plus grand et avec une énergie plus grande.

Est-ce qu'il y a des sources d'irréversibilité au niveau du thermostat ? Oui, c'est en fait une des sources d'irréversibilité les plus importantes, car le système n'est jamais à la même température que le thermostat, donc échanges d'énergie, visible sur le cycle de Mollier.

définition du rendement/efficacité : pour les récepteurs, comment se fait-il qu'elle soit supérieure à 1 ? rapport de 2 grandeurs effectivement reçues (Q_f et W pour le frigo), et non une grandeur fournie et une grandeur reçue comme on en a l'habitude.

Comment définit-on la température thermodynamique ? y en a-t'il d'autres ?

Définition de la chaleur ? Quantité d'énergie thermique échangée entre une source chaude et une source froide ;

Discuter de l'importance du nombre de tour/min pour un fonctionnement périodique des machines ?

Pourquoi emploie-t-on des échelles log pour la pression dans le diagramme de Mollier ?

A l'aide de ce diagramme peut-on fixer une limite de validité du modèle gaz parfait pour la vapeur sèche ?

Les courbes iso-titres sont-elles indispensables ?

Sur les cycles réels donner la signification des transformations de « déchauffe », « surchauffe »...

Tu as mis des points sur Q et W : qu'est-ce que ça veut dire ? Mais tu n'as jamais parlé de débit, est-ce que c'est une notion importante ? Massiques

On fait des raisonnements sur des systèmes ouverts, comment se ramener à des systèmes fermés ?

Est-ce que les machines monothermes sont utiles ? Différence radiateur/pompe à chaleur ? Oui, radiateur.

Bilan d'entropie et d'énergie : est-ce que ça change quelque chose si le thermostat n'est pas idéal ? s'il y a changement d'état ? Thermostat idéal : il faut intégrer l'entropie d'échange sur tout les thermostat. Changement d'état : il faut prendre en compte la chaleur latente.

Rendement, efficacité, COP : c'est tout pareil ? Nope, efficacité et COP comparent deux quantités récupérées (peuvent être plus grand que 1), alors que rendement = rapport récupérée/fournie.

Pédagogie : pourquoi avoir choisi de présenter en détail le réfrigérateur ? Tout le monde en a un, cycle relativement simple, permet d'illustrer pas mal de notions (échanges d'énergie mis en jeu, COP), et d'introduire le diagramme de Mollier, qui est un diagramme important..

Diagramme de Mollier : que donne l'aire du cycle ? Est-ce que c'est intéressant ? Pas très simple ici, mais un autre diagramme qui est beaucoup utilisé : (T,S), permet de discuter plus finement les variations d'entropie.

Diagramme de Mollier : est-ce que tu peux commenter la forme des isothermes ? Phase gazeuse : quasi des isenthalpiques (verticales)
Gaz réel, à pression faible, on tend vers un gaz parfait, or la loi de Joule dit que l'enthalpie ne dépend que de la température (pour un gaz parfait).

Diagramme de Mollier : détente isenthalpe, quelle information peut-on en tirer ? Exploitation du théorème des moments pour déterminer le titre.

Comment améliorer l'efficacité d'un réfrigérateur ?

Culture gé : pourquoi on appelle l'enthalpie H ? Vient de l'allemand ("température")

Culture gé : qu'est-ce qui est apparu en premier, thermo ou machines thermiques ? Machines thermiques

Culture gé : qui en a parlé en premier ? Carnot (Feynman : un des seul cas où les techniques de l'ingénieur ont dépassé la physique).

Autres cycles ? Rendements associés ? Rankine (centrales thermiques), Brayton (projection par jet), Erikson, Stirling...

Machines avec rendements supérieurs ? Machines électriques, avec effet Peltier/Seebeck.

Moteur à essence ou diesel : lequel est le plus intéressants ? Moteur à essence plus puissant mais plus polluant (deux temps : tondeuse à gazon, quatre temps : voiture), limité par rapport de compression.
Diesel : rapport de compression plus faible donc rendement plus élevé, moins besoin de raffiné, mieux de faire des longs trajets pour éviter l'encrassement

Conversion chevaux/kJ (écrit en chevaux sur la carte grise) ?

A quoi correspond la cylindrée ?

Nombre de tour/min pour une voiture ? A quoi ça correspond ? Tour/min : nombre de cycles.

Comment fait-on l'étincelle dans les moteurs ? Bobine, induction

Comment fonctionne les moteurs électriques ?

Si tu fais en sorte que toutes tes transformations soient réversibles, est-ce que t'es content de ton moteur ? Non car trop lent.

Remarques

- Pour faire arriver les cycles réels rapidement, on peut présenter le vrai cycle, puis dire qu'on le modélise d'une certaine manière
- BUP 824 partie 2