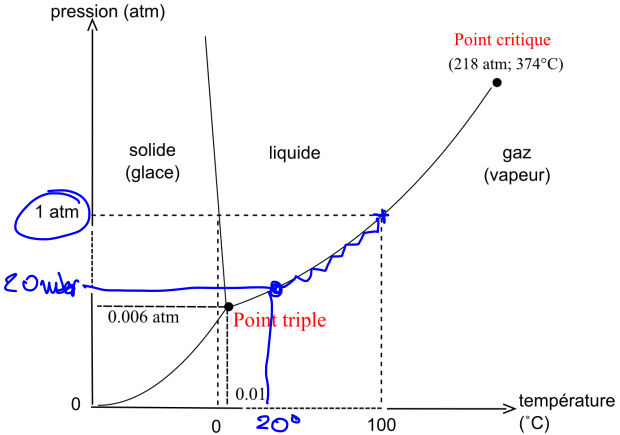
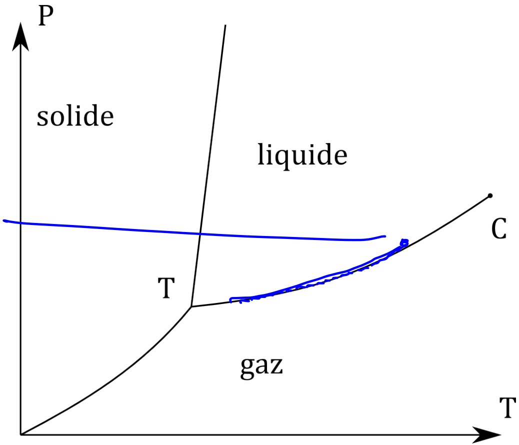
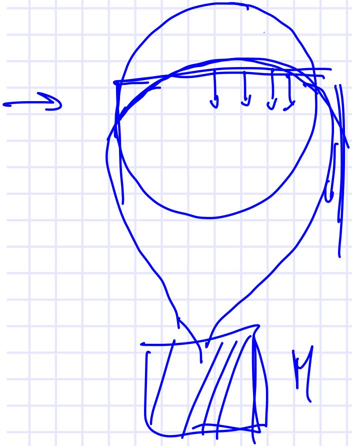
Expérience : bouillant de Franklin

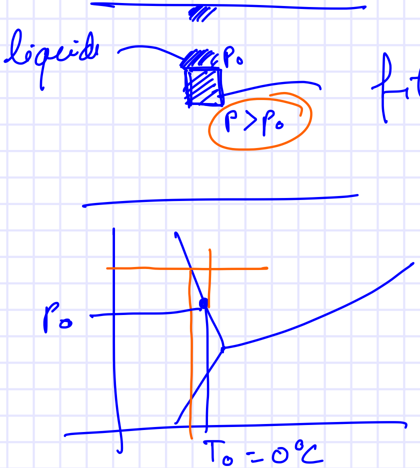


Expérience : point triple de l'azote



Expérience : passage du fil à travers le bloc de glace





VII - Machines thermiques

Prof. Cécile Hébert

20 avril 2024

Plan du cours

1. Introduction, définition
2. Efficacité, rendement
3. Cycle idéal de Carnot
4. Clausius, Kelvin et rendement max.
5. Machine ditherme réelle
6. Cas du cycle pompe à chaleur/ frigo
7. Cycle de Stirling
8. Machines thermiques "exotiques"

1. Introduction, définition

Système thermodynamique qui permet de convertir de la chaleur en travail ou d'utiliser du travail par transfert de la chaleur et qui fonctionne selon une succession de cycles

$T = cte$; GP $\quad \Delta U = 0$ (car $T = cte$)

$\Delta U = Q + W \qquad W = -Q < 0$

on convertit Q en W $\Rightarrow$ Pas une ~~cycle~~ machine thermique

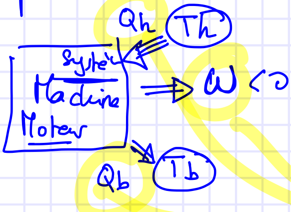
Doit échanger avec l'extérieur $\Rightarrow$ échanges avec des thermostats

thermostat : réservoir de chaleur reste à $T = cte$

machines dithermes : échangent avec 2 thermostats $T_h > T_b$

" monotherme : 1 thermostat

Représentation schématique



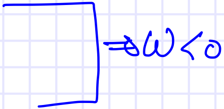
machine ditherme

Échanges avec l'extérieur au cours d'un cycle

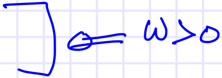
Q_h Q_b W algébriques peuvent être >0 ou <0 ou $=0$

2 type de fonctionnement

Moteur



pompe à chaleur / frigo



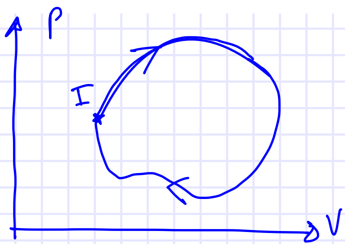
↳ influence des signes de Q_h et Q_b

Une machine thermique est un dispositif qui comprend un système thermodynamique opérant selon une succession de cycles. Ce dispositif a la propriété d'échanger avec son environement et peut soit convertir de l'énergie thermique en travail, soit utiliser du travail (~~ou autre forme d'énergie~~) pour réaliser un transfert thermique d'un corps froid *vers* un corps chaud.

Une machine thermique doit être en contact avec un ou plusieurs réservoirs de chaleur appelés thermostats ou bains thermiques. On appelle une machine ditherme une machine qui durant son cycle échange avec deux bains thermique de température différentes.

Représentation symbolique, diagrammes (p, V) et (T, S)

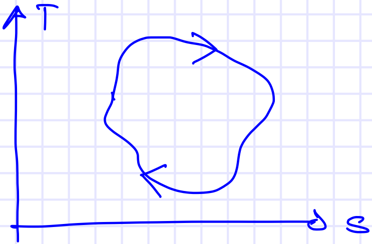
systèmes fermés

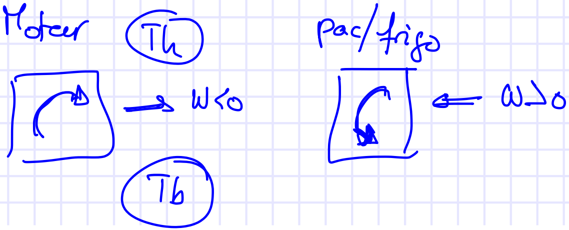


Moteur $W < 0$ échanges réversibles $W = \int_{cycle} -p\,dV$

$$\Delta U_{cycle} = 0 = \int_{cycle} T\,dS - p\,dV$$

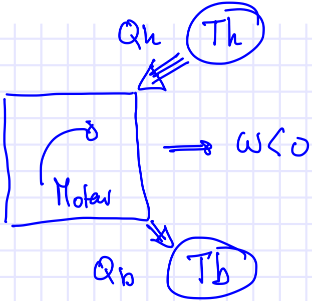
$$= \int_{cycle} T\,dS - \int_{cycle} p\,dV = 0 \Rightarrow \int_{cycle} T\,dS = \int_{cycle} p\,dV$$





Sens de fonctionnement d'une machine thermique

Moteur



$$\Delta U = Q_{cycle} + W_{cycle} = 0$$

$$= Q_h + Q_b + W = 0$$

$W < 0$ $\quad Q_h + Q_b > 0$

$Q_h > 0$ et $|Q_h| > |Q_b|$

en exercices → analyse des ≠ fonctionnements possibles

2. Efficacité

η eta

Définition générale

$$\eta = \left| \frac{\text{Energie obtenue sous la forme désirée}}{\text{Energie fournie pour l'obtenir}} \right|$$

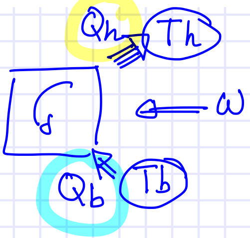
↳ "payée"

<u>Moteur</u> $\eta = \left| \dfrac{W}{Q_h} \right|$ on veut W on paye Q_h

$Q_h > 0$ $W < 0$

$$\eta_{moteur} = \frac{-W}{Q_h} = \frac{-(-Q_h - Q_b)}{Q_h} = 1 + \frac{Q_b}{Q_h}$$

Moteur, pompe à chaleur, frigo



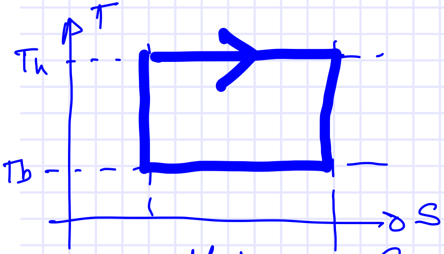
frigo : Qb est la grandeur intéressante $\eta_f = \left| \frac{Q_b}{W} \right|$

pompe à chaleur Qh est la grandeur intéressante $\eta_{pac} = \left| \frac{Q_h}{W} \right|$

3. Cycle idéal de Carnot

(T_h et T_b)

Un cycle idéal de Carnot (ou machine idéale de Carnot) est une machine ditherme dont le cycle est réversible et composé de deux adiabatiques et deux isothermes.



Moteur de Carnot

2 adiabatiques = pas d'échanges de chaleur

2 isothermes une à T_h et une à T_b

adiabatique $Q = 0$ $\Delta S = 0 \Rightarrow S_{adi} = cte$

isothermes $\Delta S_{isotherme} = \int_{isoth} \frac{\delta Q}{T} = \frac{Q}{T}$

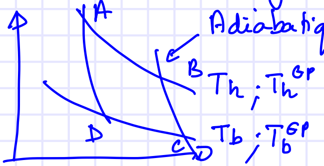
$$\Delta S_h = \frac{Q_h}{T_h} \qquad \Delta S_b = \frac{Q_b}{T_b}$$

$$\Delta S_{cycle} = \boxed{0 = \frac{Q_h}{T_h} + \frac{Q_b}{T_b}}$$

Cycle de Carnot et température absolue versus température thermodynamique

Définition de T ? $\left.\frac{\partial U}{\partial S}\right)_{V,N_A} = T$ $\quad pV = NRT^{GP}$ $\quad T^{GP}$ température de la loi des GP

Faisons un cycle idéal de Carnot avec un GP



$\Rightarrow$ Exercice 2 série 4

$Q_h = Q_{AB} = NRT_h^{GP} \ln \frac{V_B}{V_A}$; $Q_{CD} = Q_b = NRT_b^{GP} \ln \frac{V_B}{V_A}$

$$\frac{Q_h}{Q_b} = \frac{\cancel{NR}T_h^{GP} \cancel{\ln V_B/V_A}}{-\cancel{NR}T_b^{GP} \cancel{\ln \frac{V_B}{V_A}}} = -\frac{T_h^{GP}}{T_b^{GP}}.$$

or Carnot $\frac{Q_h}{T_h} + \frac{Q_b}{T_b} = 0$ (1)

$$(1) : \frac{Q_h}{T_h} = -\frac{Q_b}{T_b} \Rightarrow \frac{Q_h}{Q_b} = -\frac{T_h}{T_b} = -\frac{T_h^{GP}}{T_b^{GP}} \Rightarrow \frac{T_h}{T_b} = \frac{T_h^{GP}}{T_b^{GP}} \; ; \; \frac{T_h}{T_h^{GP}} = \frac{T_b}{T_b^{GP}}$$

$T_h \propto T_h^{GP}$; avec la bonne constante $\Rightarrow T = T^{GP}$

Pour un cycle idéal de Carnot, la définition de l'entropie et son application à des transformations réversibles (2. principe) implique

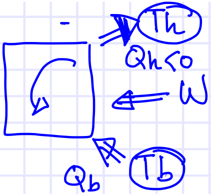
$$\boxed{\frac{Q_h}{T_h} + \frac{Q_b}{T_b} = 0}$$

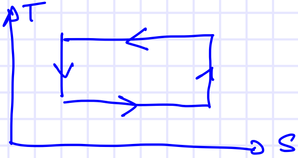
$$\eta_m^{rev} = 1 + \frac{Q_b}{Q_h} = 1 - \frac{T_b}{T_h}$$

L'efficacité du moteur de Carnot réversible est

$$\boxed{\eta_m = 1 - \frac{T_b}{T_h}}$$

Cycle de Carnot en fonctionnement pac/frigo





même raisonnement que écrire $\frac{Q_h}{T_h} + \frac{Q_b}{T_b} = 0$

car $\Delta S = 0$

$$M_{pac}^{rev} = \left|\frac{Q_h}{W}\right| = \frac{-Q_h}{W} = \frac{-Q_h}{-Q_h - Q_b} = \frac{1}{1 + \frac{Q_b}{Q_h}} = \boxed{\frac{1}{1 - \frac{T_b}{T_h}}}$$

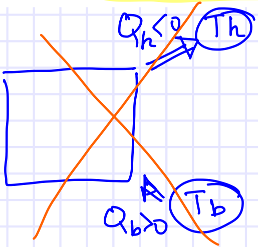
$$M_{f}^{rev} = \left|\frac{Q_b}{W}\right| = \frac{Q_b}{W} = \frac{Q_b}{-Q_h - Q_b} = \frac{1}{-\frac{Q_h}{Q_b} - 1} = \boxed{\frac{1}{\frac{T_h}{T_b} - 1}}$$

4. Interdit de Clausius, interdit de Kelvin et théorème du rendement maximum

Nous avons vu (chapitre 3) que notre formulation du 2. principe implique que la chaleur va spontanément d'un corps chaud à un corps froid.

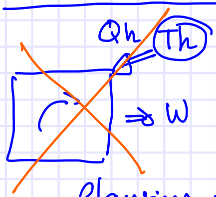
Ceci a été formulé par Clausius sour la forme de "l'interdit de Clausius".

Il n'existe pas de processus dont l'unique action est de tranférer de la chaleur d'un corps froid vers un corps chaud.



← Interdit par Clausius.

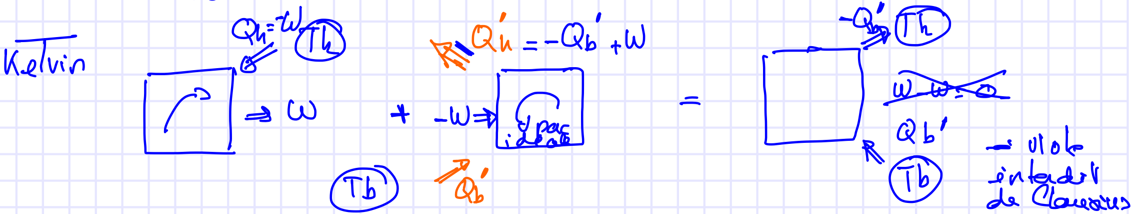
Interdit de Kelvin : il n'existe pas de moteur monotherme



interdit par Kelvin

Clausius $\Rightarrow$ Kelvin

$\overline{\text{Kelvin}} \Rightarrow \overline{\text{Clausius}}$

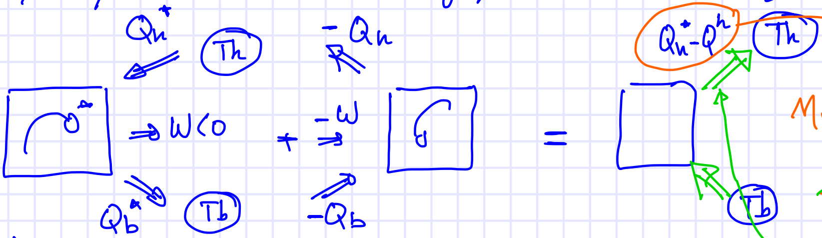


$\overline{\text{Kelvin}} \Rightarrow \overline{\text{Clausius}}$ donc Clausius $\Rightarrow$ Kelvin

Théorème du rendement maximum l'efficacité maximale qu'on peut obtenir d'une machine thermique est l'efficacité de Carnot réversible

$\boxed{\text{Clausius} \Rightarrow \text{Th R}^d \text{ Max}}$; montrons $\overline{\text{Th R}^d \text{ Mx}} \Rightarrow \overline{\text{Clausius}}$

On fabrique une machine magique au rendement $\eta_m^* > \eta_m^{carnot,rev}$



machine "magique"

moteur réversible W, Q_b, Q_h $\quad \eta_m^{carnot} = \frac{-W}{Q_h}$

inversé $\Rightarrow$ pac/frigo

$\Rightarrow$ inversé

signe de $Q_h^* - Q_h$?

$\eta_m^* = -\frac{W}{Q_h^*} > \eta_m^{carnot} = \frac{-W}{Q_h}$

$\frac{-W}{Q_h^*} > \frac{-W}{Q_h}$ $\quad (-W>0)$

$\frac{1}{Q_h^*} > \frac{1}{Q_h}$ $\quad Q_h^* < Q_h$

$Q_h^* - Q_h < 0$

Résumé :

Clausius (1822-1888)
Il n'existe pas de processus, dont l'unique action est de transporter de la chaleur d'un thermostat de basse température à un thermostat de haute température.

Kelvin (1824-1907) ou Carnot (1796-1832)
Il n'existe pas de moteur en contact avec un seul thermostat, dont l'unique action serait de transformer de la chaleur en travail

Théorème du rendement maximum
L'efficacité maximum d'un moteur thermique ditherme est celle d'une machine de Carnot réversible, $1 - T_b / T_h$.

sont des formulations historiques du 2. principe. Nous les avons démontrées à partir de notre formulation du 2. principe qui inclut la définition de l'entropie. Il est aussi possible de construire la fonction entropie à partie de ces formulation historiques.

Résumé 2

Clausius ⇒ Kelvin

Clausius ⇒ R^d Max

en exo Kelvin ⇒ Clausius

R^d Max ⇒ Clausius

Clausius ⇔ Kelvin ⇔ R^d Max

Chapitre 8 : 2^d principe avec S ⇒ Clausius

↳ lien vidéos cours GC + SIE (Prof Houdré)

Clausius ⇒ formulation avec S

2^d principe avec S ⇔ Clausius ⇔ Kelvin ⇔ Th du R^d Max

Corrolaire au théorème du rendement maximal

Un moteur ditherme et réversible a forcément l'efficacité de Carnot idéal, $\eta_{\text{Carnot}} = 1 - T_b / T_h$.

↳ demonstration en exercice.

5. Machine ditherme réelle

Pour une machine ditherme réelle (irréversible)

$$\frac{Q_h}{T_h} + \frac{Q_b}{T_b} < 0$$

$S^{\text{créée}} > 0$

$\underbrace{\Delta S}_{\Delta S = 0} = S^{\text{créée}} + S^{\text{éch}} = \underbrace{S^{\text{créée}}}_{>0} + \underbrace{\frac{Q_h}{T_h} + \frac{Q_b}{T_b}}_{<0} = 0$

Machine ditherme

$$\boxed{\frac{Q_h}{T_h} + \frac{Q_b}{T_b} \leq 0}$$

$=$ si réversible

$<$ – irréversible

Inégalité de Clausius

Conséquence sur l'efficacité d'un moteur réel η_m

$\eta_m^{réel} = \frac{-W}{Q_h} = \frac{Q_b + Q_h}{Q_h} = 1 + \frac{Q_b}{Q_h}$ si irréversible $\frac{Q_b}{T_b} + \frac{Q_h}{T_h} < 0$

$\frac{Q_b}{T_b} < -\frac{Q_h}{T_h}$ moteur $Q_h > 0$ $\frac{Q_b}{Q_h} < -\frac{T_b}{T_h}$

$\eta_m^{réel} < 1 - \frac{T_b}{T_h} = \eta_m^{carnot, réel}$

$$\eta_m \leq 1 - \frac{T_b}{T_h}$$

= réversible

< si irréversible

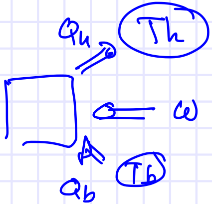
6. Cas du cycle pompe à chaleur/ frigo

$$\eta_{pac}^{réelle} \leq \underbrace{\frac{1}{1-\frac{T_b}{T_h}}}_{\eta_{pac}^{carnot}}$$

→ $=$ si rév

→ $<$ si irréversible

ex 2 série 8



frigo

$$\eta_{frigo} \leq \underbrace{\frac{1}{-1 + \frac{T_h}{T_b}}}_{\eta_{frigo}^{carnot,rév}}$$

= si rév

< si irr

Série 8 ex 2.

Résumé

Dans tous les cas (moteur, frigo, p.a.c.) : inégalité de Clausius

$$\boxed{\frac{Q_b}{T_b} + \frac{Q_h}{T_h} \leq 0}$$

Efficacité moteur :

$$\eta_m = 1 + \frac{Q_b}{Q_h} \leq 1 - \frac{T_b}{T_h} = \eta_m^{\text{rev}}$$

Efficacité pompe à chaleur :

$$\eta_{\text{pac}} = \frac{1}{1 + \frac{Q_b}{Q_h}} \leq \frac{1}{1 - \frac{T_b}{T_h}} = \eta_{\text{pac}}^{\text{rev}}$$

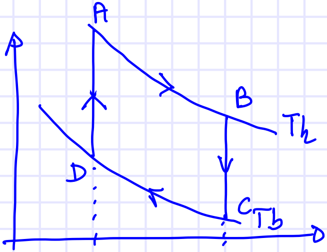
Efficacité frigo :

$$\eta_{\text{f}} = \frac{1}{-\frac{Q_h}{Q_b} - 1} \leq \frac{1}{\frac{T_h}{T_b} - 1} = \eta_{\text{f}}^{\text{rev}}$$

7. Cycle de Stirling

Cycle de Stirling moteur avec régénérateur : échanges et efficacité

2 isothermes (T_h T_b) ; $\underbrace{\text{2 isochores}}_{BC \text{ et } DA}$. ici gaz parfait



AB : $Q_{AB} = nRT_h \ln \frac{V_B}{V_A}$

$Q_{CD} = nRT_b \ln \frac{V_D}{V_C} = nRT_b \ln \frac{V_A}{V_B} = -nRT_b \ln \frac{V_B}{V_A}$

$Q_{AB} > 0$ $Q_{CD} < 0$

Q_{BC} ? $\Delta U_{BC} = C_v \Delta T = C_v (T_b - T_h) = \cancel{W_{BC}} + Q_{BC} \Rightarrow Q_{BC} = C_v (T_b - T_h) < 0$

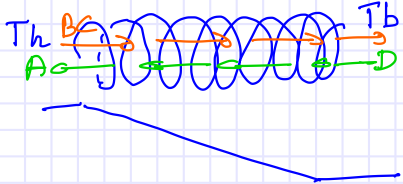
$Q_{DA} = C_v (T_h - T_b) = -Q_{BC}$

Seuls échanges extérieurs se font avec les thermostats T_h et T_b

cycle $\Delta U_{cycle} = 0 = W + Q = W + Q_{AB} + \cancel{\underline{Q_{BC}}} + Q_{CD} + \cancel{\underline{Q_{DA}}}_{= -Q_{BC}}$

$$W = -Q_{AB} - Q_{CD}.$$

Régénérateur :



$\Rightarrow$ recycler Q_{BC} pour récupérer Q_{DA}

$Q_{AB} = Q_h$ et $Q_{BC} = Q_b$

$$\eta = \frac{-W}{Q_h} = \frac{Q_{AB} + Q_{CD}}{Q_{AB}} = \frac{\cancel{nR} T_h \cancel{\ln \frac{V_B}{V_A}} - \cancel{nR} T_b \cancel{\ln \frac{V_B}{V_A}}}{\cancel{nR} T_h \cancel{\ln \frac{V_B}{V_A}}} = \frac{T_h - T_b}{T_h} = 1 - \frac{T_b}{T_h} = \eta_m^{rév}$$

Cycle de Stirling moteur sans régénérateur.

$T_h \to T_b$ on doit évacuer Q_{BC} vers le thermostat froid $Q_{BC} \in Q_b$

$T_b \to T_h$ on doit récupérer Q_{DA} depuis le th. chaud Q_{DA} appartient à Q_h

$$Q_h = Q_{AB} + Q_{DA} = NRT_h \ln \frac{V_B}{V_A} + C_V (T_h - T_b)$$

$$\eta_{m\,\text{sans}} = \frac{-W}{Q_h} = \frac{Q_{AB} + Q_{CD}}{Q_{AB} + Q_{DA}} = \frac{NR \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right) [T_h - T_b]}{NRT_h \ln \frac{V_B}{V_A} + C_V (T_h - T_b)} < \eta_m^{rev}$$