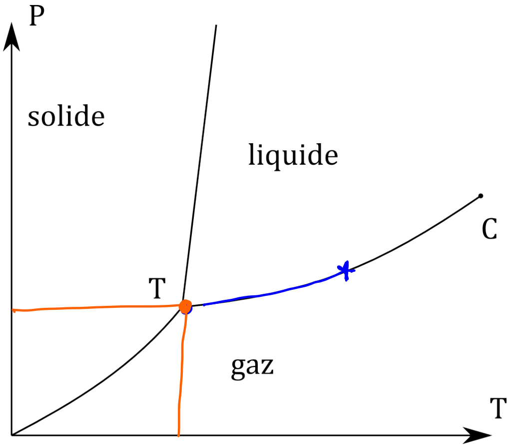
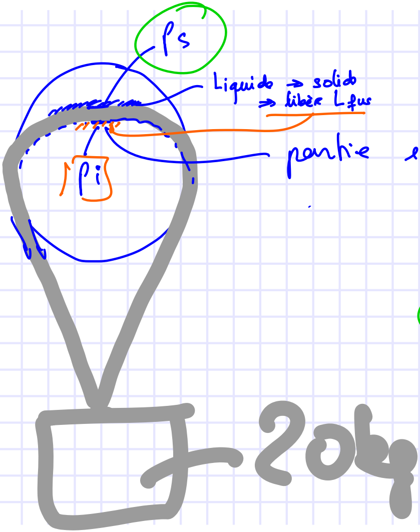
Expérience : point triple de l'azote

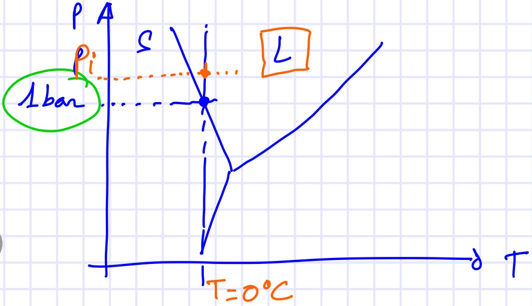


Expérience : passage du fil à travers le bloc de glace

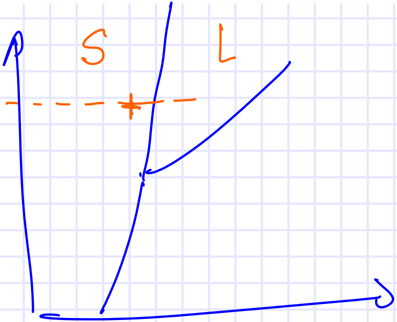


Liquide → solide
→ libère L_{fus}

partie inférieure $P_i > P_s$ dans partie supérieure



11. Etats hors équilibre (surfusion)



VII - Machines thermiques

Prof. Cécile Hébert

5 avril 2025

Plan du cours

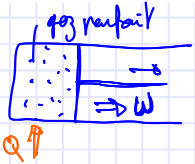
1. Introduction, définition
2. Efficacité, rendement
3. Cycle idéal de Carnot
4. Clausius, Kelvin et rendement max.
5. Machine ditherme réelle
6. Cas du cycle pompe à chaleur/ frigo
7. Cycle de Stirling
8. Machines thermiques "exotiques" → semaine avant Pâques mercredi

(lundi avant pâques → 2 exercices corrigés par Adib et David

1. Introduction, définition

Système thermodynamique qui permet de convertir de la chaleur en travail ou d'utiliser du travail pour transférer de la chaleur d'une source froide vers une source chaude, et qui fonctionne selon une succession de cycles.

Systèmes fermés



$T = \text{cte}$

Q rentre

$\Delta U = 0 = Q + W$

$W = -Q$

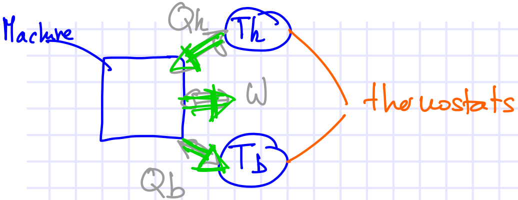
ça n'est pas une machine thermique car pas un cycle

⇒ Doit échanger avec l'extérieur = des thermostats réservoirs de chaleur à $T = \text{cte}$

− machines dithermes ⇒ 2 thermostats à T différentes $T_h > T_b$

− ——— monothermes 1 ———

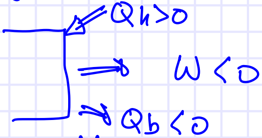
Représentation schématique d'une machine thermique ditherme



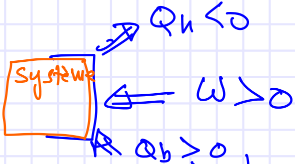
Echanges avec l'extérieur au cours d'un cycle : W ; Q_h avec T_h ; Q_b — T_b

W, Q_h et Q_b peuvent être >0 ou <0 (ou $=0$)

2 types de fonctionnement



Moteur



pompe à chaleur / frigo

⇒ influence les signes de Q_h et Q_b aussi !

Résumé

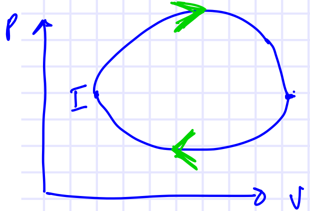
Une machine thermique est un dispositif qui comprend un système thermodynamique opérant selon une succession de cycles. Ce dispositif a la propriété d'échanger avec son environement et peut soit convertir de l'énergie thermique en travail, soit utiliser du travail pour réaliser un transfert thermique 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.

Sens des cycles dans des diagrammes (p, V) et (T, S)

système fermé

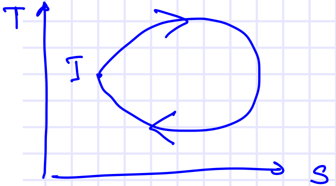
Moteur $W < 0$ $W = \int_{cycle} -p\,dV$ (transfo réversibles)



sens aiguilles d'une montre : Moteur

$$dU = TdS - p\,dV$$

$$\underbrace{\int_{cycle} dU}_{0} = \int_{cycle} TdS - \int_{cycle} p\,dV$$



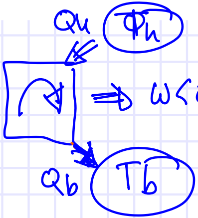
$$\int_{cycle} TdS = \int_{cycle} p\,dV$$

⟳ : Moteur

⟲ : (pompe à chaleur, frigo)

Sens de fonctionnement d'une machine thermique ⇒ idées dans schéma

Moteur



⇒ $W < 0$

$$\Delta U_{cycle} = 0 = W + Q_h + Q_b$$

$$Q_h + Q_b = -W > 0$$

$Q_h > 0$ $Q_b < 0$ (vu plus tard)

$$|Q_b| < |Q_h|$$

diagrammes "possibles"

$$\left.\begin{array}{l} Q_h > 0 \text{ ou } < 0 \\ Q_b > 0 \text{ ou } < 0 \\ W > 0 \text{ ou } < 0 \end{array}\right\} \text{8 possibilités}$$

2. Efficacité

Définition générale ; cas d'un moteur

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

→ "payée"

Moteur ⇒ on veut W

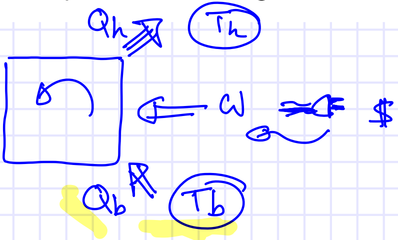
on paye Q_h

$$\eta_m = \left| \frac{W}{Q_h} \right|$$

$W < 0$

$$\eta_m = \frac{-W}{Q_h} = \frac{Q_h + Q_b}{Q_h} = 1 + \frac{Q_b}{Q_h}$$

Pompe à chaleur, frigo



$W > 0 \qquad Q_h < 0 \qquad Q_b > 0$

pompe à chaleur T_h intéressant

$$\eta_{pac} = \left| \frac{Q_h}{W} \right|$$

$$\eta_{pac} = \frac{-Q_h}{W} = \frac{Q_h}{Q_h + Q_b} = \frac{1}{1 + \frac{Q_b}{Q_h}}$$

$$\eta_f = \left| \frac{Q_b}{W} \right| = \frac{Q_b}{W} = -\frac{Q_b}{Q_b + Q_h}$$

3. Cycle idéal de Carnot

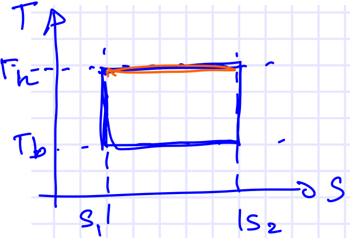
Un cycle idéal de Carnot (ou machine idéale de Carnot) est une machine ditherme dont le cycle est réversible et composé de deux adiabatiques et deux isothermes.

↳ isentropique

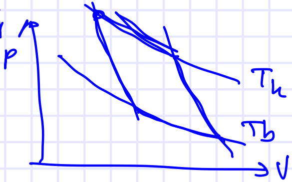
réversible et adiabatique

↳ isentropique

$\Delta S_{ad,rev} = 0$



Si gaz parfait



$$\Delta S_{cycle} = \Delta S_{isoth,T_h} + \Delta S_{isoth,T_b} = 0$$

$$\Delta S_{isoth,T_h} = \int \frac{\delta Q}{T_h} = \frac{1}{T_h} Q_h = \frac{Q_h}{T_h}$$

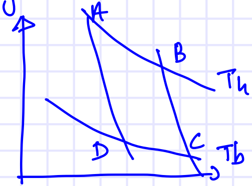
$$\Delta S_{isoth\,T_b} = \frac{Q_b}{T_b}$$

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

Démonstration de l'égalité entre température absolue et température thermodynamique

on a défini $T^{th} = \left.\frac{\partial U}{\partial S}\right|_{V,\{N_A\}}$ GP : $pV = NRT^{GP}$

Cycle de Carnot sur GP



Carnot idéal $\frac{Q_h}{T_h^{th}} = -\frac{Q_b}{T_b^{th}}$ $\Big\}$ $\frac{Q_h}{Q_b} = -\frac{T_h^{th}}{T_b^{th}}$ (1)

$\Rightarrow$ exercice 2 série 4 vous avez montré en utilisant $pV = NRT$ et définition de W et $\Delta U = Q + W$

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

$\frac{Q_h}{Q_b} = -\frac{T_h^{GP}}{T_b^{GP}}$ (2) (1)+(2) $\frac{T_h^{th}}{T_b^{th}} = \frac{T_h^{GP}}{T_b^{GP}}$

$$\frac{T_h^{th}}{T_h^{GP}} = \frac{T_b^{th}}{T_b^{GP}}$$

T^{th} proportionelle à T absolue

avec la bonne constante (R)

$$T^{th} = T$$

Résumé

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

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

$\Rightarrow \frac{Q_h}{T_h} = -\frac{Q_b}{T_b} \Rightarrow \frac{Q_b}{Q_h} = -\frac{T_b}{T_h}$

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

L'efficacité du moteur de Carnot réversible est

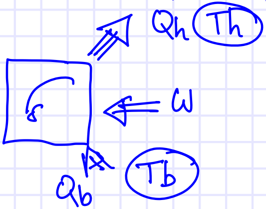
$$\boxed{\eta_m = 1 - \frac{T_b}{T_h}}$$

$\eta_m > 0$

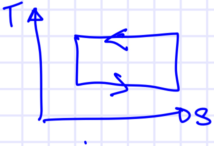
$T_h > T_b \Rightarrow 0 < \frac{T_b}{T_h} < 1 \Rightarrow 0 < 1 - \frac{T_b}{T_h} < 1 \Rightarrow 0 < \eta_m < 1$

Cycle de Carnot en fonctionnement pac/frigo

fonctionnement pac / frigo



de même



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

$$\frac{Q_b}{Q_h} = -\frac{T_b}{T_h}$$

$$\eta_{pac} = \left|\frac{Q_h}{W}\right| = \frac{-Q_h}{-Q_b - Q_h} = \frac{1}{1 + \frac{Q_b}{Q_h}}$$

$$\boxed{\eta_{pac} = \frac{1}{1 - \frac{T_b}{T_h}}} > 0 \qquad \boxed{\eta_{pac} > 1}$$

$$\eta_f = \left|\frac{Q_b}{W}\right| = \frac{Q_b}{W} = -\frac{Q_b}{Q_b + Q_h} = -\frac{1}{1 + \frac{Q_h}{Q_b}} = -\frac{1}{1 - \frac{T_h}{T_b}} = \boxed{\frac{1}{\frac{T_h}{T_b} - 1} = \eta_f} > 0$$

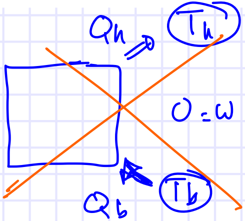
4. Interdit de Clausius, interdit de Kelvin et théorème du rendement maximum

avec S

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.

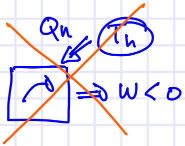


interdite par Clausius

"Clausius"

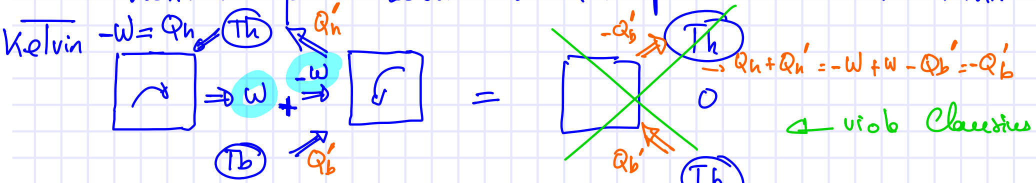
Autre formulation "interdit de Kelvin"

Il n'existe pas de moteur monotherme



interdit par Kelvin

Montrons que Clausius $\Rightarrow$ Kelvin pour cela montrons $\overline{\text{Kelvin}} \Rightarrow \overline{\text{Clausius}}$



↳ couplé à Carnot idéal en pac/frigo

Si Kelvin faux $\Rightarrow$ Clausius faux donc $\boxed{\text{Clausius} \Rightarrow \text{Kelvin}}$

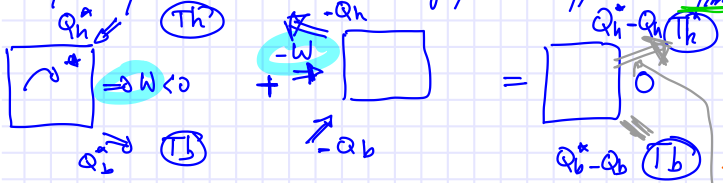
Autre formulation

Th Rdt max

Théorème du rendement maximum. L'efficacité maximum d'une machine thermique ditherme est l'efficacité de Carnot réversible

Montrons Clausius ⇒ Th Rdt Max pour cela montrons $\overline{\text{Th Rd Max}} \Rightarrow \overline{\text{Clausius}}$

On fabrique un moteur "magique" d'efficacité $\eta_m^* > \eta_m^{\text{carnot rév}}$



machine magique

+ Carnot idéal de rendement η_m en fonctionnement pac/frigo

Question signe de $Q_h^* - Q_h$??

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

$$\frac{\cancel{-W}}{Q_h^*} > \frac{\cancel{-W}}{Q_h}$$ avec $W<0 \Rightarrow -W>0$

$$Q_h^* < Q_h$$

$$\boxed{Q_h^* - Q_h < 0}$$

⇒ Viole interdit de Clausius cqfd.

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 On a montré : (2^d principe avec S) ⇒ Clausius ⇒ Kelvin
↳ ⇒ Th Rdt Max

en exo vous montrerez Th Rdt max ⇒ Clausius
Kelvin ⇒ Clausius

Sur le moodle lien vers videos prof Houdré
montre Clausius ⇒ formulation avec S

Les 4 formulations sont équivalentes

Corrolaire au théorème du rendement maximal

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

↳ à démontrer en exercices

5. Machine ditherme réelle

· On a vu pour Carnot idéal $\frac{Q_h}{T_h} + \frac{Q_b}{T_b} = 0$

Pour une machine ditherme réelle (irréversible)

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

$S^{\text{créée}} > 0$ $\Delta S_{\text{sys}} = \underbrace{S^{\text{créée}}}_{>0} + \underbrace{S^{\text{échangée}}}_{<0} = 0$ $S^{\text{éch}}$ $\delta S^{\text{éch}} = \frac{\delta Q}{T^{\text{ext}}}$

T_{ext} : 2 options T_h ou T_b (di therme)

Q_h échangé avec T_h et Q_b échangé avec T_b

$$S^{\text{éch}} = \frac{Q_h}{T_h} + \frac{Q_b}{T_b} < 0$$

OK pour moteur et pac/frigo !

Machine quelconque

Inégalité de Clausius

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

= si réversible

< si irréversible

Conséquence $\eta_m^{réel}$

$$\eta_m^{réel} = \frac{-W}{Q_h} = \frac{Q_b + Q_h}{Q_h} = 1 + \frac{Q_b}{Q_h}$$

si irréversible $\frac{Q_h}{T_h} + \frac{Q_b}{T_b} < 0$ $\quad \frac{Q_b}{T_b} < -\frac{Q_h}{T_h}$ $\quad \frac{Q_b}{Q_h} < -\frac{T_b}{T_h}$

$$1 + \frac{Q_b}{Q_h} < 1 - \frac{T_b}{T_h}$$

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

= si réversible

< si irréversible

6. Cas du cycle pompe à chaleur/ frigo

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

→ = si réversible

→ < si irréversible

⇒ démonstration en série...

frigo

$$\eta_{frigo} \leq \frac{1}{-1 + \frac{T_h}{T_b}}$$

→ = si réversible

→ < si irréversible

→ monté en série ?

Si irréversible soit on paye + soit on a -

Résumé 5 et 6 Machines thermiques dithermes

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

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

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 :

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

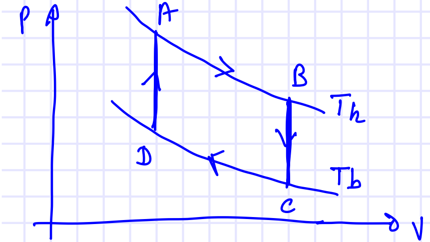
2°h

7. Cycle de Stirling

Cycle de Stirling $\boxed{\text{moteur}}$ avec régénérateur : échanges et efficacité

↳ avec 2 isothermes et 2 isochores.

ici : avec GP



$$\Delta U_{AB} = 0 = Q_{AB} + W_{AB} \Rightarrow Q_{AB} = -W_{AB} = \int_A^B p\,dV = \int_A^B NRT_h \frac{dV}{V}$$

$$Q_{AB} = NRT_h \ln \frac{V_B}{V_A} = -W_{AB}$$

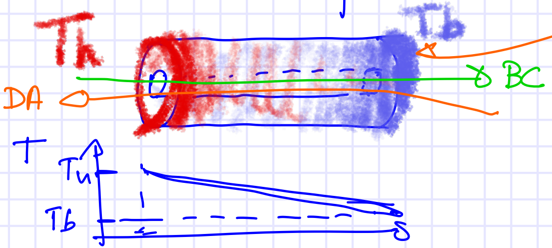
$$Q_{CD} = NRT_b \ln \frac{V_A}{V_B} = -NRT_b \ln \frac{V_B}{V_A} = -W_{CD}$$

$$W_{BC} = W_{DA} = 0 \quad (\text{isochore})$$

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

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

Idée de Stirling = introduire un régénérateur



On recycle Q_{BC} pour récupérer Q_{DA}

↳ ne fait pas partie de l'échange !

échanges avec T_h $\quad Q_{AB} = Q_h \qquad$ échanges avec T_b $\quad Q_{CD} = Q_b$

$$\eta = \frac{-W}{Q_h} = \frac{Q_h + Q_b}{Q_h} = 1 + \frac{Q_b}{Q_h} = 1 + \frac{Q_{CD}}{Q_{AB}} = 1 + \frac{-\cancel{nR}\,T_b \cancel{\ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)}}{\cancel{nR}\,T_h \cancel{\ln\frac{V_B}{V_A}}} = 1 - \frac{T_b}{T_h}$$

$\eta = \eta_m^{\text{carnot, rév}} \Rightarrow$ le cycle est réversible ?

Cycle de Stirling moteur sans régénérateur.

passage $B \to C$ $T_h \to T_b$ système en contact avec T_b

Q_{BC} à évacuer va vers T_b $Q_{BC} \in Q_b$

$$Q_b = Q_{CD} + Q_{BC}$$

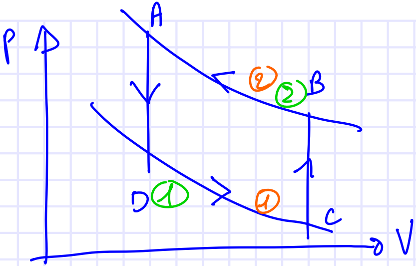
De même $Q_h = Q_{DA} + Q_{AB}$

$$-W = Q_b + Q_h = Q_{CD} + \cancel{Q_{BC}} + \cancel{Q_{DA}} + Q_{AB} = Q_{AB} + Q_{CD}$$

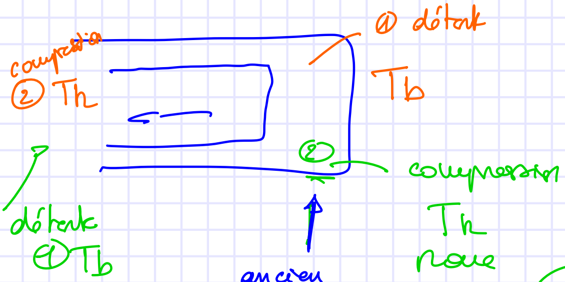
$$\eta_m^{sans} = \frac{-W}{Q_h} = \frac{Q_{AB} + Q_{CD}}{Q_{AB} + Q_{DA}} = \frac{NR \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)[T_h - T_b]}{NRT_h \ln \frac{V_B}{V_A} + C_V(T_h - T_b)} < \eta_m^{rev}$$

isochores irréversibles

Cycle de Stirling pac / frigo.



BADC



sens de la roue
dans le sens moteur

ancien
coté flamme
= "chaud"
dans le moteur