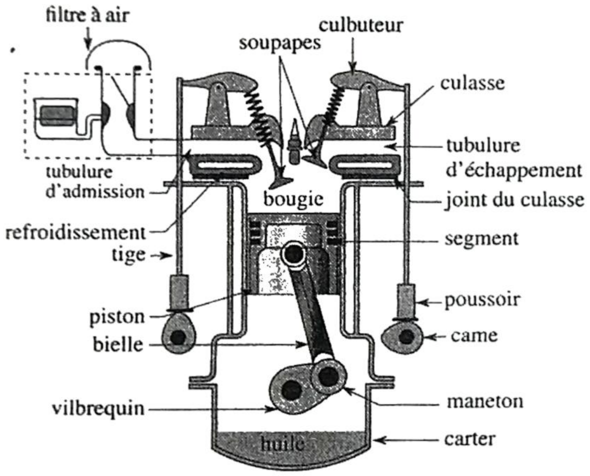
Thermodynamique

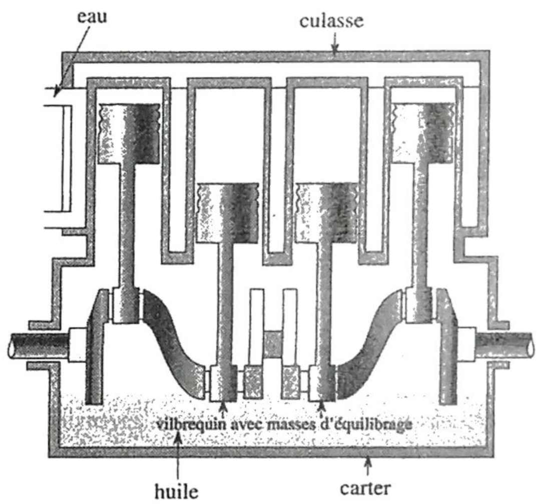
et toi ! vil. brequin !

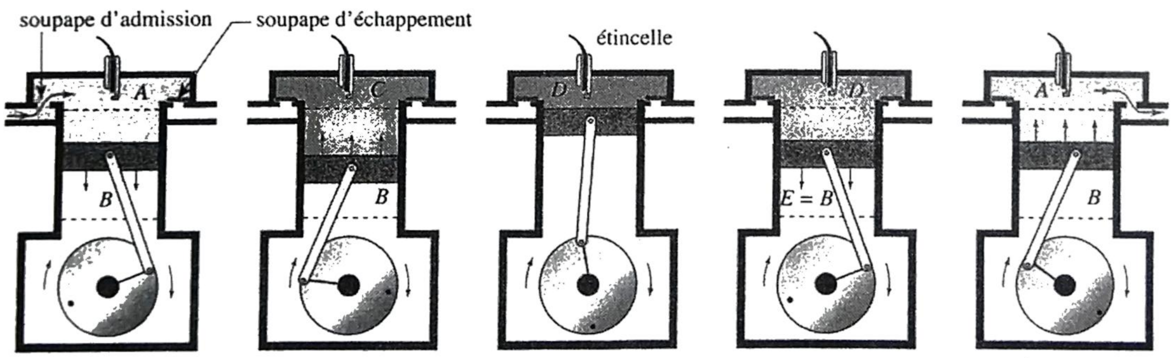
TD 4 Machines thermiques

Ai Ohto

Exercice 1 : Cycle de Beau de Rochas ou d'Otto. Principe du moteur à essence. Etude d'un cylindre (sur les quatre)
Grâce à la forme du vilebrequin, tous les cylindres parcourent le même cycle avec un décalage temporel constant (quatre-temps).Un cycle nécessite 2 tours de vilebrequin.

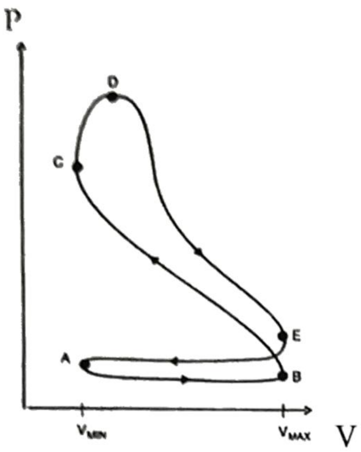




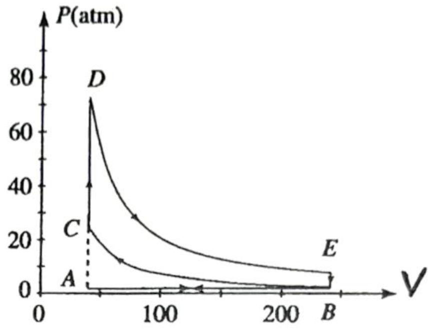


Doc. a. *Admission.* **Doc. b.** *Compression.* **Doc. c.** *Combustion.* **Doc. d.** *Détente.* **Doc. e.** *Échappement.*

- Doc a : 1er temps : admission du mélange ($\approx$ 1 bar) : AB
- Doc b/c : 2ème temps : compression adiabatique (BC) et combustion (CD) grâce à l'étincelle produite par la bougie.
- Doc d : 3ème temps : détente adiabatique DE.
- Doc e : 4ème temps : échappement EB puis BA.



Cycle réel



Cycle modélisé

On appelle taux de compression volumétrique a= $\dfrac{V_B}{V_C}$

On suppose que le mélange gazeux est un gaz parfait (γ=1,4)

Exprimer le rendement γ de ce moteur (cas idéal : transformations réversibles) (uniquement en fonction de a et γ). $\gamma = \gamma + a0$

Exercice 2 : Théorème de Carnot

1) Dans le cas d'une machine frigorifique, retrouver l'efficacité maximale pour le cycle de Carnot vu en cours et parcouru dans le sens inverse.
2) Reprendre la même question dans le cas d'une pompe à chaleur.

Exercice 3 : Diagramme de Raveau

Dans le cas d'une machine ditherme (prendre les notations du cours), trouver 2 lois résultant des deux premiers principes de la Thermodynamique, reliant Q_1 et Q_2.

Tracer le graphe qui donne Q_1 en fonction de Q_2.

Faire apparaître alors sur ce graphe, différentes zones correspondant à des comportements particuliers de la machine.

Exercice 4 : Climatiseur.

Un local de capacité thermique $\mu = 4.10^3$kJ/K est initialement à la température de l'air extérieur T_0=305K. Un climatiseur fonctionnant de façon cyclique réversible entre l'air extérieur et le local, ramène la température du local à T_1=293K en 1h.

Quelle puissance électrique P a reçu le climatiseur ?

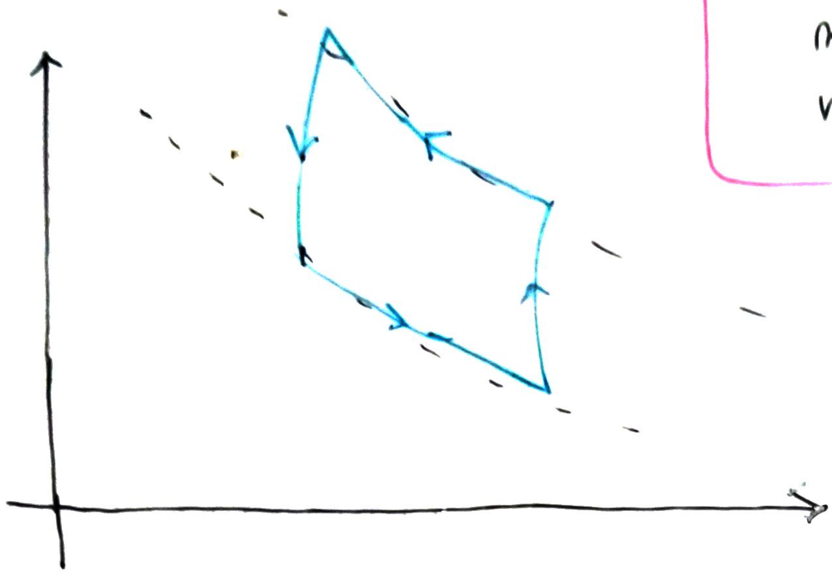
Exercice 5 : Pompe à chaleur

Une pompe à chaleur prélève de la chaleur à un lac à t_2=10°C et échauffe un bungalow de t_0=10°C à t_1=20°C. On appelle μ la capacité thermique du bungalow.

Calculer l'efficacité thermique de cette pompe.

EXPMACHITHERM

$\boxed{2/1}$



rem sens du cycle

moteur ⇔ horaire
récepteur ⇔ trigo

$$\text{ext} \rightarrow \text{fluide} \quad Q_1 < 0 \ S_c \quad Q_2 > 0 \ S_f$$

$$e = \frac{Q_2}{W} = -\frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} \qquad \text{car } W = -Q_1 - Q_2$$

$$Q_{BC} = Q_{DA} = 0$$

$$Q_1 = Q_{AB} = \Delta U - W = -\int -P_{ext}\,dV = \int P\,dV = nRT_1 \ln\frac{V_B}{V_A} \boxed{< 0}$$

$$Q_2 = Q_{CD} = \cdots\cdots = nRT_2 \ln\frac{V_B}{V_C} \boxed{> 0}$$

$$e = -\frac{1}{1 + \frac{Q_1}{Q_2}} = -\frac{1}{1 + \underbrace{\boxed{\frac{T_1 \ln V_B/V_A}{T_2 \ln V_D/V_C}}}_{-1}} = -\frac{1}{1 - \frac{T_1}{T_2}} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = e_c$$

c'est l'eff max pour le cycle idéal de Carnot

2/2

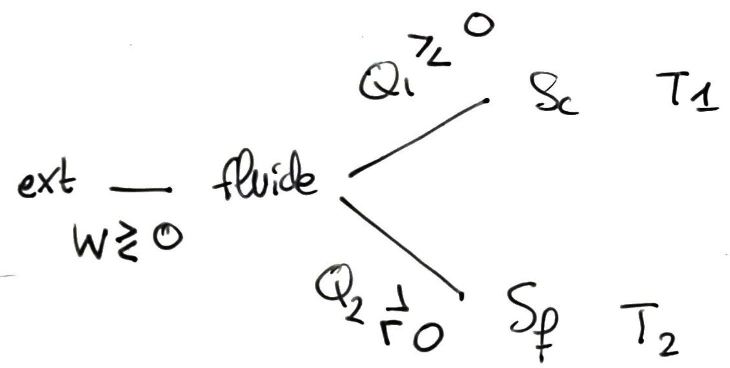
$$e = -\frac{Q_1}{W} = -\frac{Q_1}{-(Q_1+Q_2)}$$

$$= \frac{1}{1+\frac{Q_2}{Q_1}}$$

$$\vdots$$

$$= \boxed{\frac{T_1}{T_1-T_2}}$$ PAC

3

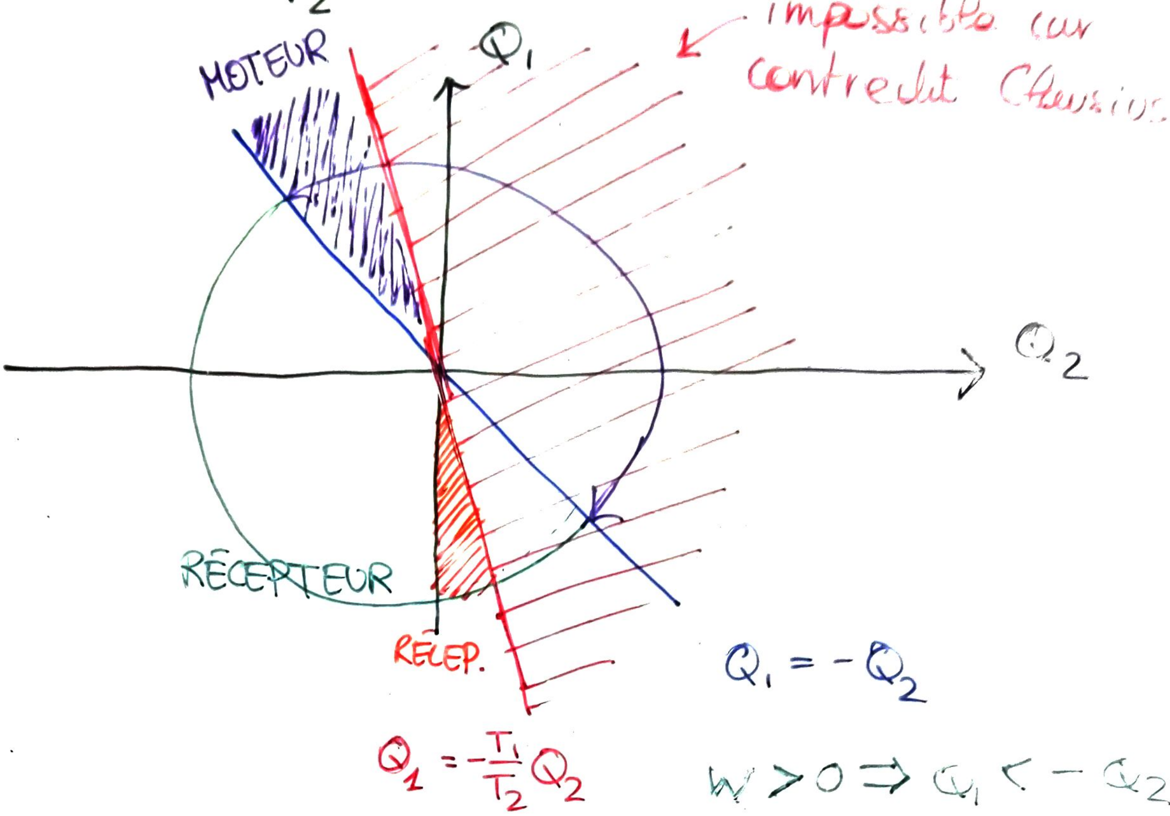


$$\Delta U = W + Q = 0 = W + Q_1 + Q_2$$

$$0 = \Delta S = S_e + S_c = \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} + \underbrace{S_c}_{\geq 0}$$

ie $\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} \leq 0$

$$\begin{cases} Q_1 = -Q_2 - W \\ Q_1 \leq -\dfrac{T_1}{T_2} Q_2 \end{cases}$$



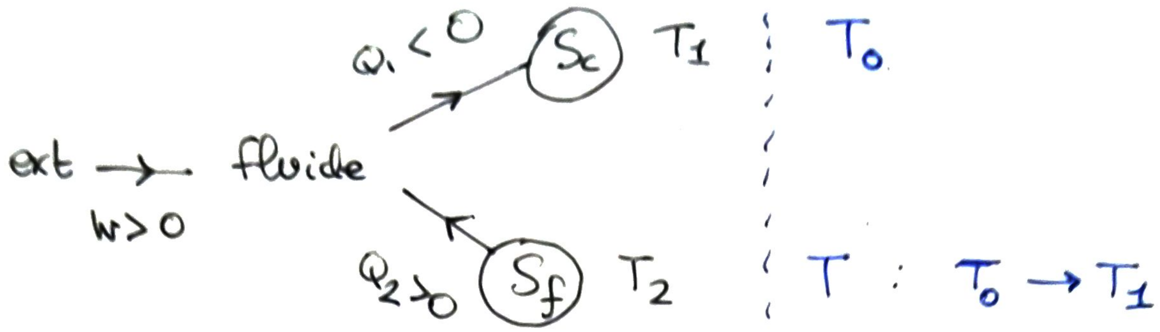
$W > 0 \Rightarrow Q_1 < -Q_2$

$W < 0 \Rightarrow Q_1 > -Q_2$

rmq Récepteur $W > 0$ (énergie ↯ reçue)

$Q_2 < 0$: aucun intérêt
(cela se fera spontanément)
donc  inutile

4 On considère le cycle parfait car aucune indication n'est donnée ici



△ T_2 (source froide) : T varie

$$e = \frac{Q_2}{W} = \frac{\delta Q_2}{\delta W}$$

$$/\!/$$

$$e_c = e_{max} = \frac{T}{T_0 - T}$$

capacité thermique μ : c'est C !

$$\delta Q_{local} = \mu \, dT \qquad \frac{C}{\mu}\,\underbrace{(T_f - T_i)}_{\text{infinitésimal}}$$

$$= -\delta Q_2$$

$$\frac{\delta Q_2}{\delta W} = \frac{T}{T_0 - T} \quad \text{ie} \quad \delta W = \frac{T_0 - T}{T}\,\delta Q_2$$

$$= -\frac{T_0 - T}{T}\,\delta Q_{local}$$

$$= -\frac{T_0 - T}{T}\,\mu\, dT = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)\mu\, dT$$

$$W = \int \delta W = \int_{T_0}^{T_1} \mu\left(1-\frac{T_0}{T}\right) dT$$

$$= \mu\int_{T_0}^{T_1} 1 - T_0\mu\int_{T_0}^{T_1}\frac{1}{T}\,dT$$

$$= \mu\left(T_1 - T_0 - T_0 \ln\frac{T_1}{T_0}\right)$$

$$= 970 \text{ kJ}$$

$$P = \frac{970\cdot 10^3}{3600} = 270 \text{ J}\cdot\text{s}^{-1} = 270 \text{ W}$$

$$W = 270 \text{ W}\cdot\text{h} = 0{,}27 \text{ kW}\cdot\text{h}$$

$$\approx 0{,}05 \text{ €}$$

$\boxed{5}$

$Q_1 < 0$ S_c

ext → fluide

$Q_2 > 0$ S_f

	(cours)
$t :\ t_0 \to t_1$	T_1
t_2	T_2

$$\begin{cases} e = -\dfrac{Q_1}{W} \\ e_{max} = \dfrac{T_1}{T_1 - T_2} = \dfrac{t}{t - t_2} \end{cases}$$

$$\delta Q_1 = -\delta Q_{bungalow} = -\mu \, dT$$

$$\delta W = -\frac{\delta Q_1}{e} = +\frac{\mu \, dT}{\frac{T}{T-T_2}}$$

on pose
$$\begin{cases} T = 273 + t \\ T_2 = 273 + t_2 \end{cases}$$

$$= \left(1 - \frac{T_2}{T}\right) \mu \, dT$$

$$Q_1 = -\mu (T_1 - T_0)$$

$$W = \int_{T_0}^{T_1} \delta W = \mu \left(T_1 - T_0 - T_2 \ln \frac{T_1}{T_0}\right)$$

$$e = -\frac{Q_1}{W} = \frac{T_1 - T_0}{T_1 - T_0 - T_2 \ln \frac{T_1}{T_0}}$$

$$= 58$$

Thermodynamique

TD Machines thermiques + changement d'état – Suite

ie $m = 1\,g$

Ex 1

1) L'unité de masse du fluide d'une machine frigorifique décrit le cycle ABCD représenté sur le diagramme pV de la figure ci-dessous Les points A et D sont définis respectivement par les intersections de l'isotherme d'Andrews T_1 avec les courbes d'ébullition et de rosée. Les points B et C correspondent respectivement aux intersections de l'isotherme d'Andrews T_0 avec les courbes adiabatiques réversibles passant par les points A et D.

On désigne respectivement par x_B et x_C les titres massiques en vapeur du fluide en B et C et par l_0 et l_1 les chaleurs latentes massiques de vaporisation (=enthalpies massiques de vaporisation) aux températures respectives T_0 et T_1.

On considère le point A_0 sur la courbe d'ébullition où le fluide est en totalité à l'état liquide à la température T_0. En supposant que la chaleur massique c_l du liquide $\boxed{\text{saturant}}$ reste constante, calculer la variation d'entropie $S_A - S_{A_0}$ lorsqu'on amène le fluide de A_0 en A le long de la courbe d'ébullition.

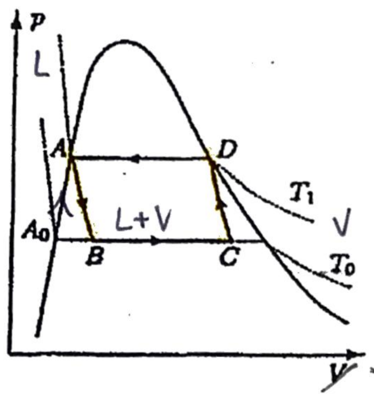
à la fin du pallier d'éb (entre (L) et (V))

$x_V = \frac{m_V}{m}$

$l_0 = \Delta h_{vap}$ @ T_0

$l_1 = \Delta h_{vap}$ @ T_1

c_l : capacité thermique massique du liquide



$v = \frac{V}{m} = \frac{V}{1}$

2) Calculer la variation d'entropie $S_B - S_{A_0}$ lors de l'étape de vaporisation isotherme partielle qui amène le fluide de l'état A_0 à l'état B.

@B, pas totalement (V)

3) En déduire x_B.

4) Calculer la variation d'entropie $S_A - S_D$ lors de l'étape de ~~condensation~~ liquéfaction isotherme totale qui amène le fluide de l'état D à l'état A. En déduire l'expression de x_C.

5) Calculer la quantité de chaleur Q_1 échangée avec le milieu extérieur lors de la condensation isotherme totale qui amène le fluide de l'état D à l'état A.

6) Calculer la quantité de chaleur Q_0 échangée avec le milieu extérieur lors de la vaporisation isotherme partielle qui amène le fluide de l'état B à l'état C.

7) Calculer le travail W échangé au cours du cycle.

8) Calculer l'efficacité η de la machine, sachant que $T_0 = 268$ K et $T_1 = 288$ K.

1/1

$$S_A - S_{A_0} = \Delta S_{A\to A_0} = C \ln \frac{T_f}{T_i} = 1 \cdot C_l \ln \frac{T_1}{T_0}$$

1/2

pas 1 y !

$$S_B - S_{A_0} = \Delta S_{A_0\to B} = \frac{m \Delta h}{T} = \frac{x_B l_0}{T_0}$$

$$x_V = \frac{m_V}{m} \Rightarrow \underbrace{m_{V_B}}_{\text{masse qui change d'état}} = x_B \overbrace{m}^{=1}.$$

1/3

$\underline{A \to B}$: adiab $\wedge$ rev ie isentropique

ie $\Delta S_{A\to B} = 0$

Travaillons sur le cycle hypothétique $A_0 \to A \to B \to A_0$

$$\Delta S = 0 = \Delta S_{A\to B} + \Delta S_{B\to A_0} + \Delta S_{A_0\to A}$$

$$= 0 - \Delta S_{A_0\to B} + C_l \ln \frac{T_1}{T_0}$$

$$= -\frac{x_B l_0}{T_0} + C_l \ln \frac{T_1}{T_0}$$

ie $\boxed{x_B = \frac{T_0}{l_0} \cdot C_l \ln \frac{T_1}{T_0}}$

1/4

$$\Delta S_{D\to A} = \frac{m\,\Delta h}{T} = \frac{1\overbrace{(-\ell_1)}^{\text{car } \ell_1 \text{ pour vap, } -\ell_1 \text{ pour liquéf.}}}{T_1} = -\frac{\ell_1}{T_1}$$

x_c ?

$$\begin{array}{ccc} A & \longrightarrow & A_0 \\ \uparrow & & \downarrow \\ D & \longleftarrow & C \end{array}$$

$$\Delta S = 0 = \Delta S_{A\to A_0} + \Delta S_{A_0\to C} + \Delta S_{C\to D} + \Delta S_{D\to A}$$

$$= \underbrace{-c_\ell \ln\frac{T_1}{T_0}}_{A\to A_0} + \underbrace{\frac{x_c\,\ell_0}{T_0}}_{A_0\to C} + 0 + \frac{-\ell_1}{T_1}$$

ie $\boxed{x_c = \frac{T_0}{\ell_0}\left(\frac{\ell_1}{T_1} + c_\ell \ln\frac{T_1}{T_0}\right)}$

1/5

$$Q_p = \Delta H = m\Delta h$$

$$Q_1 = Q_{D\to A} = 1\cdot\underbrace{(-\ell_1)}_{\text{pareil qu'en } 1/4} \Leftrightarrow Q_1 = -\ell_1$$

1/6

$$Q_0 = Q_{B\to C} = (x_c - x_B)\cdot 1 \cdot \ell_0$$

$$= \frac{T_0}{\ell_0}\,\ell_0\left(\frac{\ell_1}{T_1} \cancel{+ C_\ell \ln\frac{T_1}{T_0} - C_\ell \ln\frac{T_1}{T_0}}\right)$$

ie $\boxed{Q_0 = \frac{T_0\,\ell_1}{T_1}}$

1/7

$$\Delta U = 0 = W + Q_{AB} + Q_{BC} + Q_{CD} + Q_{DA}$$

ic $\boxed{W = -(Q_0 + Q_1) = +\ell_1\left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) > 0}$

cycle récepteur

1/8

$$\text{ext} \xrightarrow[W>0]{} \text{fluide}$$

$\text{fluide} \xrightarrow[Q_1<0]{} S_c$

$S_f \xrightarrow[Q_2>0]{} \text{fluide}$

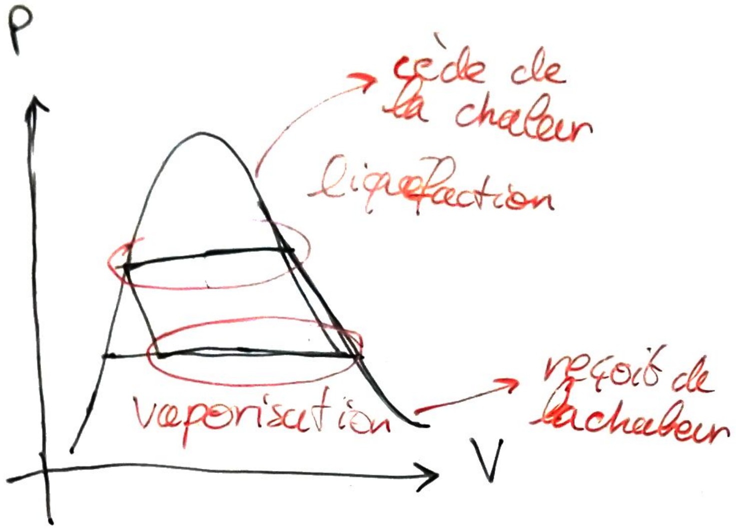
$$\eta = \overbrace{\frac{Q_2}{W}}^{\text{cours}} = \overbrace{\frac{Q_0}{-(Q_0+Q_1)}}^{\text{ici}} = -\frac{\frac{T_0}{T_1}\ell_1}{-\ell_0 + \frac{T_0 \ell_1}{T_1}}$$

$$= \frac{T_0/T_1}{-1 + T_0/T_1}$$

$$= \frac{T_0}{T_1 - T_0}$$

$$\approx 13$$

concl


P
V
cède de la chaleur
liquéfaction
vaporisation
reçoit de la chaleur

Ex 2 Pb. Moteur Diesel (extrait Concours)

L'ingénieur allemand Rudolf Diesel (1858-1913) inventa un moteur à combustion interne par auto-allumage en 1893. Le cycle thermodynamique associé à ce moteur est représenté figure 6 en coordonnées de Watt $P = f(V)$:

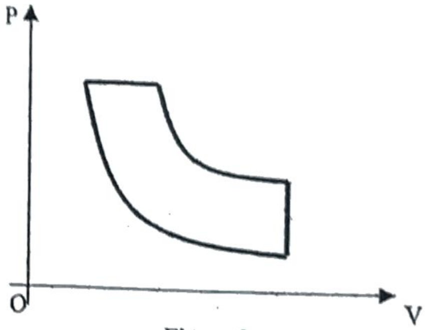


Figure 6

Les moteurs Diesel actuels fonctionnent suivant un cycle théorique modifié appelé cycle de Sabathé : il diffère du précédent par une combustion en deux étapes. Il est constitué des transformations suivantes (figure 7) :

A-B : compression adiabatique réversible
B-C : combustion isochore
C-D : combustion isobare réversible Q_1, Combustion ⇒ reçoit chaleur
D-E : détente adiabatique réversible
E-A : détente isochore

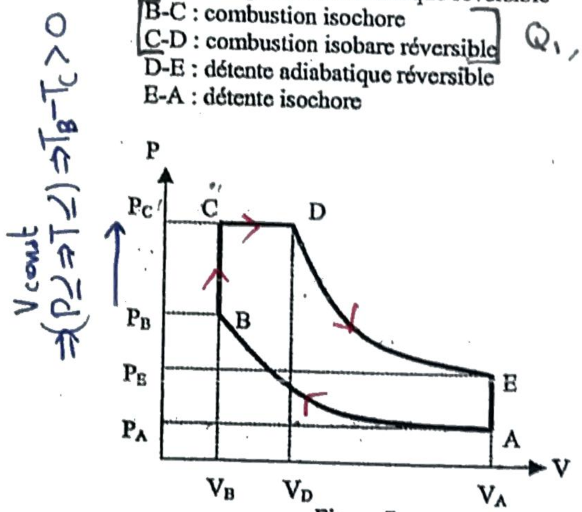


Figure 7

On considère n moles de gaz supposé parfait décrivant le cycle et on pose :

$\gamma = C_{p,m}/C_{v,m}$ avec $C_{p,m}$ et $C_{v,m}$ les capacités thermiques molaires à pression et volume constants
$\alpha = V_A/V_B$: rapport volumétrique de compression
$\beta = V_D/V_C$: rapport volumétrique de combustion
$\delta = P_C/P_B$: rapport de surpression de combustion
Chaque état i sera caractérisé par P_i, V_i et T_i respectivement pression, volume et température.

1 **Q26.** Exprimer P_B et T_B en fonction P_A, T_A, α et γ.

2 **Q27.** Déterminer les transferts thermiques échangés par n moles de gaz au cours de chaque transformation Q_{AB}, Q_{BC}, Q_{CD}, Q_{DE}, Q_{EA} en fonction des températures T_A, T_B, T_C, T_D, T_E, des capacités thermiques molaires $C_{v,m}$, $C_{p,m}$ et de n.

3 **Q28.** Après avoir défini le rendement thermodynamique ~~(ou efficacité thermodynamique)~~ pour un moteur que l'on notera η, l'exprimer en fonction des températures et de γ.

4 **Q29.** Montrer que η peut se mettre sous la forme :

$$\eta = 1 - \frac{\delta.\beta^{\gamma} - 1}{\left[\delta - 1 + \delta.\gamma.(\beta - 1)\right].\alpha^{(\gamma-1)}}.$$

2/1

Ad, rév, GP $\Rightarrow$ Laplace.

$$P_A V_A^{\gamma} = P_B V_B^{\gamma} \quad ; \quad T_A V_A^{\gamma-1} = T_B V_B^{\gamma-1}$$

$$\Rightarrow P_B = \alpha^{\gamma} P_A \quad ; \quad T_B = \alpha^{\gamma-1} T_A$$

2/2

$$Q_{AB} \underset{\substack{ad\\rev}}{=} 0$$

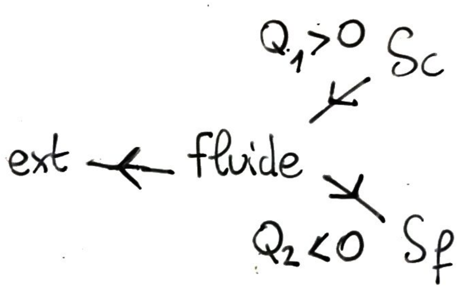
$$Q_{BC} \underset{isoch}{=} \Delta U = C_v (T_C - T_B) = n C_{Vm} (T_C - T_B) > 0$$

$$Q_{CD} \underset{isob.}{=} \Delta H = n C_{Pm} (T_D - T_C) > 0$$

$$Q_{DE} \underset{\substack{ad\\rev}}{=} 0$$

$$Q_{EA} \underset{Isoch}{=} \Delta U = n C_{Vm} (T_A - T_E) < 0$$

2/3



$$\eta = -\frac{W}{Q_1}$$

ici, $Q_1 = Q_{BC} + Q_{CD}$; $Q_2 = Q_{EA}$

$$\eta = - \frac{-(Q_{BC} + Q_{CD} + Q_{EA})}{Q_{BC} + Q_{CD}} = 1 + \frac{Q_{EA}}{Q_{BC}+Q_{CD}}$$

$$= 1 + \frac{\cancel{n} C_{Vm}(T_A - T_E)}{\cancel{n} C_{Vm}(T_C - T_B) + \cancel{n} C_{pm}(T_D - T_C)}$$

$$= 1 + \frac{T_A - T_E}{T_C - T_B + \gamma (T_D - T_C)}$$

λόγω σχέσης Mayer

2/4

$$T_B = T_A \alpha^{\gamma-1}$$

$$T_D V_D^{\gamma-1} = T_E V_E^{\gamma-1}$$

$$\Leftrightarrow T_E = T_D \left(\frac{V_D}{V_E}\right)^{\gamma-1}$$

$$= T_D \left(\frac{V_D}{V_A}\right)^{\gamma-1}$$

$$= T_D \left(\frac{V_D}{\underbrace{V_C}_{=V_B}} \cdot \frac{V_B}{V_A}\right)^{\gamma-1} = T_D \left(\beta \cdot \frac{1}{\alpha}\right)^{\gamma-1} = T_D \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^{\gamma-1}$$

$$\begin{cases} P_C V_C = nRT_C & (1) \\ P_B V_B = nRT_B & (2) \end{cases} \quad \frac{(1)}{(2)} \Rightarrow \delta = \frac{T_C}{T_B}$$

$$\Leftrightarrow T_C = \delta T_B$$

$$\begin{cases} P_C V_C = nRT_C & (1) \\ P_D V_D = nRT_D & (2) \end{cases} \quad \frac{(1)}{(2)} \Rightarrow \frac{V_C}{V_D} = \frac{T_C}{T_D}$$

$$\text{ie } T_D = T_C \frac{V_D}{V_C}$$

$$= T_C \, \beta$$

- $T_B = T_A \, \alpha^{\gamma-1}$
- $T_C = \delta T_B = \delta \alpha^{\gamma-1} T_A$
- $T_D = \beta T_C = \delta \beta \alpha^{\gamma-1} T_A$
- $T_E = T_D \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^{\gamma-1} = \delta \beta \alpha^{\gamma-1} \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^{\gamma-1} T_D$

$$= \delta \beta^{\gamma} T_D$$

En réinjectant dans $1 + \dfrac{T_A - T_E}{T_C - T_B + \gamma(T_D - T_C)}$

on obtient CQFD.

Exercice 2

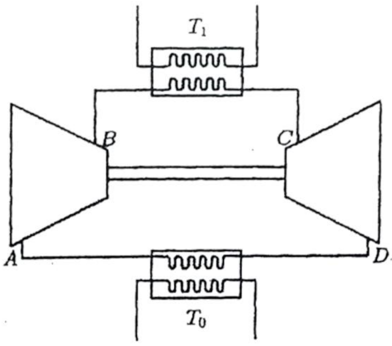
Une pompe à chaleur effectue le cycle de Joule inversé suivant :

* L'air pris dans l'état A de température T_0 et de pression P_0 est comprimé suivant une adiabatique quasi statique (ou réversible) jusqu'au point B où il atteint la pression P_1.

* Le gaz se refroidit à pression constante et atteint la température finale de la source chaude, T_1, correspondant à l'état C.

* L'air est ensuite refroidi dans une turbine suivant une détente adiabatique quasi statique (ou réversible) pour atteindre l'état D de pression P_0.

* Le gaz se réchauffe enfin à pression constante au contact de la source froide et retrouve son état initial A.



On considère l'air comme un gaz parfait de coefficient isentropique $\gamma = 1,4$. On posera $\beta = 1 - \gamma^{-1}$ et $a = P_1/P_0$.

Pour les applications numériques, on prendra :

$T_0 = 283\text{K}(10°\text{C})$, $T_1 = 298\text{K}(25°\text{C})$

$a = 5$, $R = 8,31\ J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$ (constante des gaz parfaits).

1) Représenter le cycle parcouru par le fluide dans un diagramme de Clapeyron (P,V).

2) Exprimer les températures T_B et T_D en fonction de T_0, T_1, a et β.
Calculer leurs valeurs.

2) Définir l'efficacité e de la pompe à chaleur à partir des quantités d'énergie échangées au cours du cycle.
Montrer qu'elle s'exprime seulement en fonction de a et β. Calculer sa valeur.

4) Quelles doivent être les transformations du fluide si on envisage de faire fonctionner la pompe à chaleur suivant un cycle de Carnot réversible entre les températures T_0 et T_1?
Établir l'expression de son efficacité e_r en fonction de T_1 et T_0.
Calculer sa valeur.

5) Comparer les valeurs obtenues pour e et e_c.
Interpréter la différence observée.

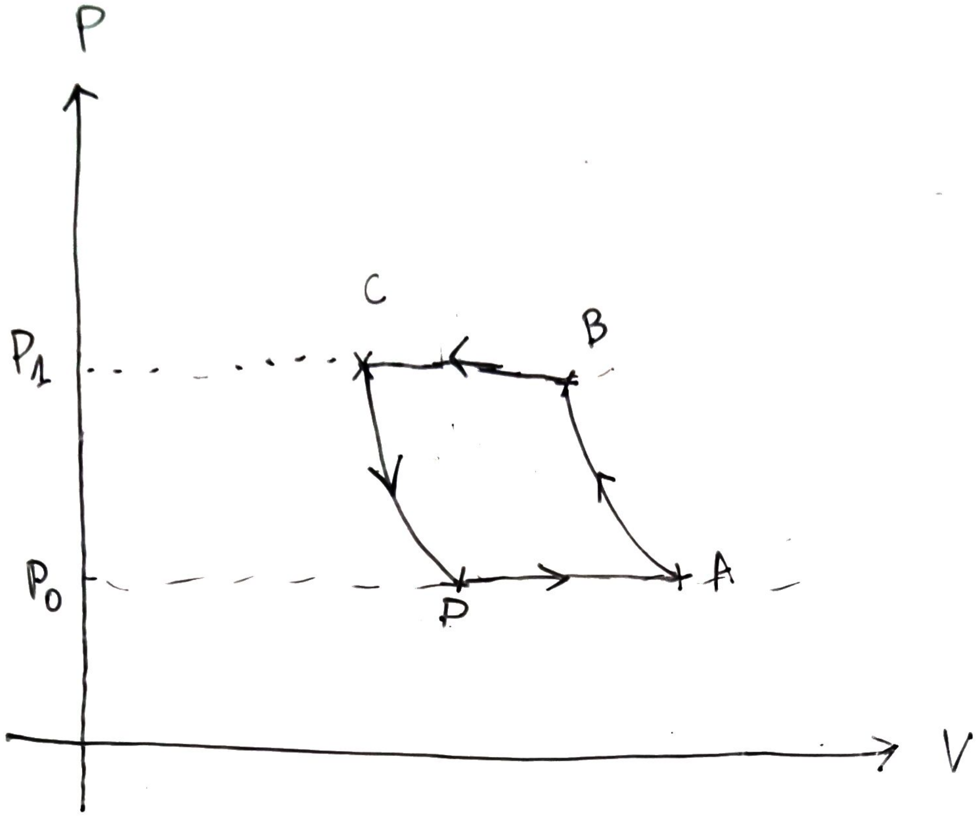
6) Donner l'expression de l'entropie créée, S_i, pour une mole d'air mise en jeu dans le parcours du cycle de Joule inversé, en fonction de $x = T_0 a^\beta / T_1$, R et β.
Etudier le signe de cette expression pour x $\geq$ 0. Calculer sa valeur.

7) La pompe à chaleur envisagée est utilisée pour chauffer une maison.

Sachant qu'en régime permanent les fuites thermiques s'élèvent à $\dot{Q}_f = 20\text{kW}$, calculer la puissance mécanique du couple compresseur-turbine qui permet de maintenir la maison à température constante.

EXP MACH THERM 2

$\boxed{3/1}$



↻ récepteur : c'est cohérent

$\boxed{3/2}$

<u>$A \to B$</u>

$$T_A^{\gamma} P_A^{1-\gamma} = T_B^{\gamma} P_B^{1-\gamma}$$

ie $$T_B = T_A \left(\frac{P_A}{P_B}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = T_0 \left(\frac{1}{a}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = T_0 a^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} = T_0 a^{\beta} = 448\,K$$

<u>$C \to D$</u>

$$T_C^{\gamma} P_C^{1-\gamma} = T_D^{\gamma} P_D^{1-\gamma}$$

ie $$T_D = T_C \left(\frac{P_C}{P_D}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$$

$$= T_1 a^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$$

$$= T_1 a^{\beta^{-1}}$$

$$= T_1 a^{-\beta}$$

$$= 188\,K$$

3/3 **PAC**

$Q_1 < 0$ $\quad S_c$

ext $\xrightarrow[W>0]{}$ fluide

$Q_2 > 0$ $\quad S_f$

$$\boxed{e = -\frac{Q_1}{W}}$$

Identifions Q_1, Q_2 en fonction des signes

$$Q_{A\to B} = 0$$

$$Q_{B\to C} = \Delta H = C_p \Delta T = nC_{p_m}(T_C - T_B) < 0 = Q_1$$

$$Q_{C\to D} = 0$$

$$Q_{D\to A} = nC_{p_m}(T_A - T_D) > 0 = Q_2$$

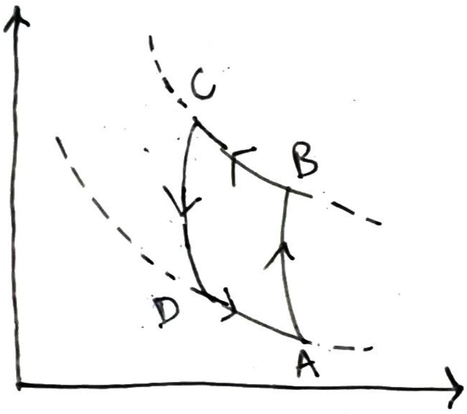
$$e = -\frac{Q_1}{-(Q_{A\to B} + Q_{B\to C} + Q_{C\to D} + Q_{D\to A})} = \frac{1}{1 + \frac{Q_2}{Q_1}} = \frac{1}{1 + \frac{T_A - T_D}{T_C - T_B}}$$

Or $\begin{cases} T_B = T_0 a^{\beta} \\ T_D = T_1 a^{-\beta} \end{cases}$ et $\begin{cases} T_C = T_1 \\ T_A = T_0 \end{cases}$

$$e = \frac{1}{1+\frac{T_0 - T_1 a^{-\beta}}{T_1 - T_0 a^{\beta}}} = \frac{1}{1+\frac{a^{-\beta}(T_0 a^{\beta} - T_1)}{T_1 - T_0 a^{\beta}}}$$

$$= \frac{1}{1 - a^{-\beta}} = 2,7$$

$\boxed{3.4}$



$$e = -\frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2} = \frac{1}{1+\frac{Q_2}{Q_1}} = \frac{1}{1 - \frac{T_0}{T_1}}$$

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_0} = 0 \quad \text{car réversible.}$$

$$\Delta S = 0 = S_e + S_c$$

$$e_c = \frac{T_1}{T_1 - T_0} = 20$$

$\boxed{3/5}$

$$e \ll e_c$$

Notre cycle
n'était pas le cycle idéal.

$\boxed{3/6}$

$$\Delta S = S_e + \overbrace{S_i}^{S_c}$$

$\Delta S = 0$ car cycle

$$S_i = -S_e = -\left(\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_0}\right)$$

$$= -\left(\frac{Q_{BC}}{T_1} + \frac{Q_{DA}}{T_0}\right)$$

$$= -\left(\frac{n C_{pm}(T_C - T_B)}{T_1} + \frac{n C_{pm}(T_A - T_D)}{T_0}\right)$$

ici $n = 1$

$$= \underbrace{\frac{-nR\gamma}{\gamma - 1}}_{nC_{pm} = C_p}\left(\underbrace{\frac{T_1 - T_0 a^{\beta}}{T_1}}_{1-x} + \underbrace{\frac{T_0 - T_1 a^{-\beta}}{T_0}}_{1-\frac{1}{x}}\right)$$

$$= -\frac{R}{\beta}\left(1 - x + 1 - \frac{1}{x}\right)$$

$$= -\frac{R}{\beta}\left(2 - x - \frac{1}{x}\right)$$

$\underline{\forall x}$

$$S_i(x) = -\frac{R}{\beta}\left(-x - \frac{1}{x}\right)$$

$$S_i' = -\frac{R}{\beta}\left(-1 + \frac{1}{id^2}\right)$$

$$= x \mapsto \frac{R}{\beta}\left(1 - \frac{1}{x^2}\right)$$

x	0		1		∞
S_i'	||	$-$	0	$+$	
S_i	||	$\searrow$	0	$\nearrow$	

$\forall x, \ S_i > 0$: <u>réversible</u>

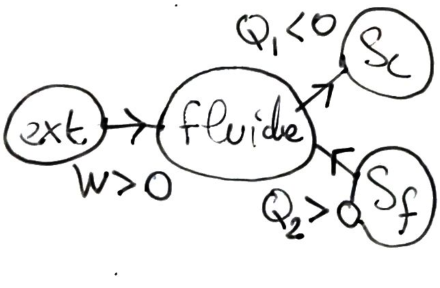
<u>remq</u>

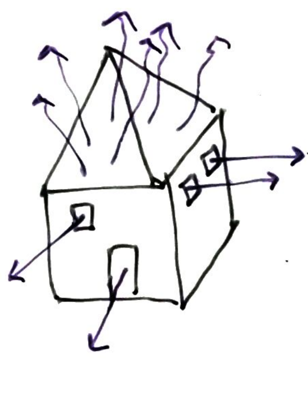
Si $x = 1 \Rightarrow T_1 = T_0\, a^\beta \Rightarrow T_C = T_B$

isotherme et
non isobare
Cycle de Carnot

$\boxed{3/7}$

$$\dot{Q}_{\text{fuites}} = \overbrace{20 \text{ kW}}^{\text{puissance}} =: P_f$$





$$e = -\frac{Q_1}{W}$$

$$\underbrace{Q_1 = -Q_f}_{\text{pour compenser les pertes}}$$

$$W = -\frac{Q_1}{e} = +\frac{Q_f}{e} \qquad (J)$$

donc $\underbrace{\dot{W}}_{P_{elec}} = \frac{\dot{Q}_f}{e} = \frac{P_f}{e} = \frac{20}{2,7} = 7,4 \text{ kW}$

On paie $\underbrace{7,4 \text{ kW}}_{\downarrow \; 1,2€/1h}$, il m'en donne $\underbrace{20 \text{ kW}}_{\downarrow \; 3,2€/1h}$