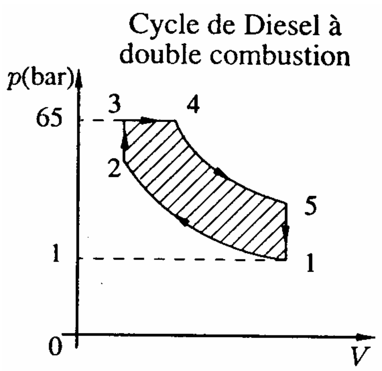
37. Cycle de l'air dans un moteur Diesel à double combustion.

Dans les moteurs Diesel actuels, le cycle décrit par l'air est celui représenté sur la figure dans le diagramme de Clapeyron (p, V) : la pression en 1 est 1 bar et la température 293 K. La pression maximale est 65 bar et la température maximale (en 4) 2 173 K.

1⇨2 et 4⇨5 sont adiabatiques. On suppose que l'air est un gaz parfait diatomique, de masse molaire M = 29 $g.mol^{-1}$. On donne le taux de compression : $\alpha_v = V_1 / V_2 = 19$.



1) En quoi ce cycle diffère-t-il du cycle Diesel classique ?

2) Exprimer, en fonction de $\gamma = C_p/C_v$, et des températures T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 des points correspondants sur le diagramme, l'efficacité η_m du moteur Diesel à double combustion.

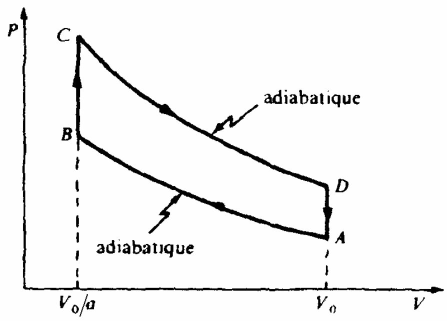
3) Calculer T_2, T_3 et T_5. En déduire la valeur de η_m.

4) Quelle est, en kJ, la chaleur échangée par 1 kg d'air au cours de l'évolution entre les points 2 et 4 ? Quelle est la chaleur échangée entre les points 5 et 1 ? En déduire le travail fourni par 1 kg d'air au milieu extérieur au cours d'un cycle.

Rép : η_m = 63,4 % ; 145,7 kJ ; -53,4 kJ ; 93,3 kJ

38. Cycle Beau de Rochas.

En ce qui concerne les échanges énergétiques, le cycle du moteur à quatre temps peut être ramené théoriquement au cycle suivant :



1°) Une compression quasistatique AB de $\{V_0, T_A\}$ à $\{V_0/a, T_B\}$.

2°) Un échauffement isochore BC au cours duquel le gaz échange la quantité de chaleur Q_1. Il atteint en C la température T_C.

3°) Une détente quasistatique CD jusqu'au volume V_D (la température est alors T_D).

4°) Un refroidissement isochore DA au cours duquel le gaz échange la quantité de chaleur Q_2.

1) Déterminer le rendement du cycle en fonction de a et du rapport γ supposé constant.

2) En admettant pour le mélange combustible un pouvoir calorifique K_m = 2759 kJ par kilogramme de mélange, et en assimilant ce dernier à l'air ($c_V = 0{,}71\ J.K^{-1}.g^{-1}$, $\gamma = 1{,}4$) déterminer la température en fin d'explosion (point C du cycle), sachant que T_A = 300 K. On prendra pour rapport volumétrique a = 9

3) Calculer le rendement théorique optimal de ce cycle (rendement de Carnot), et le comparer au rendement théorique du cycle Beau de Rochas.

Rép : $1 - a^{1-\gamma}$; 4605 K ; 93,5 % ; 58,5 %

39. Climatiseur.

Un local, de capacité thermique C = 4.10^3 kJ/K, est initialement à la température de l'air extérieur T_0 = 305 K. Un climatiseur, fonctionnant de façon cyclique réversible ditherme entre l'air extérieur comme source chaude et le local comme source froide, ramène la température du local à 293 K en 1 h. Quelle est la puissance électrique moyenne $\mathscr{P}$ reçue par le climatiseur?

Rép : 269 W

40. Pompe à chaleur.

On désire maintenir dans un appartement une température constante T_1 = 290 K grâce à une pompe à chaleur utilisant comme source froide un lac de température T_0 = 280 K. La température extérieure est uniformément égale à T_0. Il faut évidemment pour cela dépenser la puissance juste nécessaire pour compenser les pertes de chaleur.

1) Dans le but d'évaluer ces pertes, on arrête le chauffage, la température de l'appartement étant initialement T_1. Au bout de Δt = 2 heures, la température n'est plus que T_2 = 285 K. En admettant que la quantité de chaleur perdue pendant le temps dt s'écrit : dQ = aC(T - T_0).dt, C désignant la capacité thermique de l'appartement, T sa température à l'instant t et a une constante, calculer a.

2) Sachant que le coefficient d'efficacité réel de la machine n'est que la fraction x = 20 % de l'efficacité théorique optimale, quelle est la puissance $\mathscr{P}$ à fournir pour maintenir une température T_1 constante dans l'appartement ? On donne $C = 10^7$ J.K^{-1}.

Rép : 9,63.10^{-5} s^{-1} ; 1,66 kW

41. Efficacité d'un réfrigérateur, d'une pompe à chaleur.

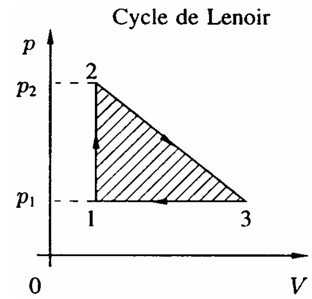
Définir et calculer les efficacités théoriques optimales (efficacités de Carnot) :

1) d'un réfrigérateur. *Application numérique : T_{Fr} = 4 °C, T_{Ch} = 20 °C.*

2) d'une pompe à chaleur. *Application numérique : T_{Fr} = 10 °C, T_{Ch} = 20 °C.*

Rép : 17,3 ; 29,3

43. Cycle de Lenoir



Le premier moteur à combustion interne à 2 temps a fonctionné suivant un cycle de Lenoir :

1er temps : entrée du mélange air-combustible et allumage avec explosion en 1.

2ème temps : entre 1 et 2, combustion fournissent de la chaleur, puis entre 2 et 3, détente adiabatique réversible et enfin échappement isobare entre 3 et 1.

Pour un tel cycle décrit par de l'air, supposé parfait et diatomique, exprimer l'efficacité η_m du cycle moteur en fonction du rapport de compression $\alpha_p = p_2/p_1$, p_2 étant la pression au point 2 et p_1 celle au point 1.

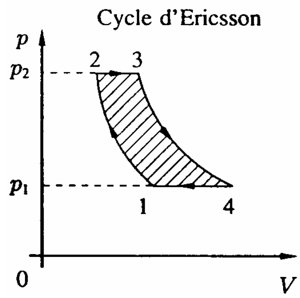
Application numérique : Calculer η_m pour $\alpha_p = 5$.

44. Source froide d'une machine thermique.

Une centrale nucléaire fournissant une puissance thermique de 1300 MW est installée au bord d'un fleuve dont la température est T_{Fr} = 13 °C, et le débit q_V = 400 m^3/s. La température de la source chaude est T_{Ch} = 300 °C. En admettant que le rendement réel soit seulement la fraction x = 60 % du rendement de Carnot réversible, calculer l'élévation de température du fleuve qui résulte du fonctionnement. On donne c_p = 4185 J.K^{-1}.kg^{-1}.

Rép : 1,8 K

45. Cycle d'Ericsson.

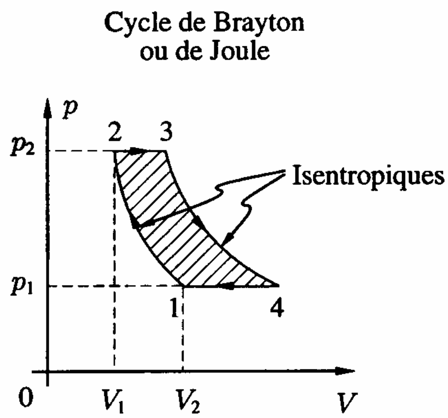


De l'air supposé parfait parcourt, dans le sens 1 - 2 - 3 - 4, un cycle d'Ericsson constitué de deux isothermes, de températures respectives T_1 et $T_3 > T_1$ et deux isobares de pressions respectives p_1 et $p_2 > p_1$. Ce cycle fut appliqué par J. Ericsson à des moteurs à air destinés à la propulsion navale.

1) Exprimer le travail ainsi que les quantités de chaleur reçus par le fluide au cours des quatre étapes du cycle, en fonction de T_1, T_3, p_1 et p_2.

2) En déduire l'efficacité du cycle moteur en fonction de T_1, T_3, p_1 et p_2.

46. Turbine à gaz à cycle de Brayton



Dans une centrale thermique, de l'air, supposé parfait, décrit de façon réversible un cycle moteur de Brayton dans le sens 1⇨2⇨3⇨4. Il entre dans la turbine, à la pression de 7 bar et à la température de 1 227 K, et sort à la pression de 1 bar. Un compresseur comprime l'air qu'il reçoit, à la température 288 K, de 1 à 7 bar.

1) Calculer le rendement de la machine.

2) Comparer le travail $W_{f,t}$ fourni par la turbine au milieu extérieur au travail W_f fourni par la machine au milieu extérieur.

37 1) Dans le cycle Diesel classique, la phase 2-3 n'existe pas

2) $\eta_m = \frac{|W|}{Q_{ch}} = 1 + \frac{Q_{fr}}{Q_{ch}}$ $\qquad Q_{fr} = Q_{51} = \Delta U_{51} = C_v (T_1 - T_5)$

$$Q_{ch} = Q_{23} + Q_{34} = \Delta U_{23} + \Delta H_{34} = C_v (T_3 - T_2) + C_p (T_4 - T_3)$$

$$\eta_m = 1 + \frac{C_v (T_1 - T_5)}{C_v(T_3 - T_2) + C_p (T_4 - T_3)} \Rightarrow \boxed{\eta_m = 1 + \frac{T_1 - T_5}{T_3 - T_2 + \gamma (T_4 - T_3)}}$$

3) $T_1 = 293\,K \qquad T_4 = 2173\,K$

T_2 ? 12 adiab : $p_1 V_1^{\gamma} = p_2 V_2^{\gamma}$ $\qquad p = \frac{nRT}{V}$

d'où $T_1 V_1^{\gamma - 1} = T_2 V_2^{\gamma - 1}$

$T_2 = T_1 (\alpha_v)^{\gamma - 1}$ $\qquad$ GP diato $\Rightarrow \gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{7/2}{5/2} = 1{,}4$

d'où $T_2 = 293 \times 19^{0{,}4} = 951{,}413\,K$ $\qquad \boxed{T_2 = 951\,K}$

T_3 ? $\qquad p_2 V_2 = nRT_2$ $\qquad V_2 = V_3$

$p_3 V_3 = nRT_3$

$\Rightarrow \frac{T_3}{T_2} = \frac{p_3}{p_2}$ cad $T_3 = T_2 \times \frac{p_3}{p_2}$ $\qquad p_3 = 65\,bar$

$p_1 V_1^{\gamma} = p_2 V_2^{\gamma} \Rightarrow p_2 = p_1 \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma} = p_1 (\alpha_v)^{\gamma}$

d'où $T_3 = T_2 \frac{p_3}{p_1 \alpha_v^{\gamma}} = 951{,}413 \times \frac{65}{1 \times 19^{1{,}4}} = 1002{,}368\,K$

$\boxed{T_3 = 1002\,K}$

T_5 ? $\qquad p_4 V_4^{\gamma} = p_5 V_5^{\gamma} \Rightarrow p_4^{1-\gamma} T_4^{\gamma} = p_5^{1-\gamma} T_5^{\gamma}$

$p_5 = \frac{nRT_5}{V_5} = \frac{nRT_5}{V_1}$ d'où $p_4^{1-\gamma} T_4^{\gamma} = \left(\frac{nR}{V_1}\right)^{1-\gamma} T_5^{1-\gamma} T_5^{\gamma}$

cad $T_5 = \frac{p_4^{1-\gamma} T_4^{\gamma} V_1^{1-\gamma}}{(nR)^{1-\gamma}}$ soit avec $nR = \frac{p_1 V_1}{T_1}$ et $p_4 = p_3$

et après simplification $\boxed{T_5 = \frac{p_3^{1-\gamma} T_4^{\gamma} T_1^{1-\gamma}}{p_1^{1-\gamma}} = 911{,}95\,K \approx 912\,K}$

d'où $\boxed{\eta_m = 0,633723 \quad \approx 63,4\ \%}$

4) $Q_{24} = Q_{ch} = C_V(T_3 - T_2) + C_P(T_4 - T_3)$

$C_V = n\,C_{Vm} = \frac{m}{M} C_{Vm}$

de même $C_P = \frac{m}{M} C_{Pm}$ avec $C_{Vm} = \frac{5}{2}$ $C_{Pm} = \frac{7}{2}$

$Q_{24} = \frac{m}{M}\left[C_{Vm}(T_3 - T_2) + C_{Pm}(T_4 - T_3) \right]$

$= \frac{1000}{29}\left[2,5\,(1002,368 - 951,413) + 3,5\,(2173 - 1002,368) \right]$

$= 145\,675,8$ J

$\boxed{Q_{24} \approx 145,7 \text{ kJ}}$

$Q_{51} = C_V(T_1 - T_5) = \frac{1000}{29} \times 2,5\,(293 - 911,95) = -53357,8$ J

$\boxed{Q_{51} \approx -53,4 \text{ kJ}}$

$\Delta U = W + Q_{fr} + Q_{ch} = 0 \quad \Rightarrow \quad W = -Q_{24} - Q_{51} = -93\,318$ J

d'où $\boxed{|W| = 93,3 \text{ kJ}}$

---

38 1) 1er ppe $\rightarrow W + Q_1 + Q_2 = 0$

d'où $\eta = -\frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = 1 + \frac{Q_2}{Q_1}$

$Q_1 = Q_{BC}$. isochore $\rightarrow Q = \Delta U$ et $\Delta U = C_V \Delta T$

$\rightarrow Q_1 = C_V(T_C - T_B)$

de m̂ $Q_2 = Q_{DA} = C_V(T_A - T_D) = -C_V(T_D - T_A)$

d'où $\eta = 1 - \frac{T_D - T_A}{T_C - T_B}$

Or la loi de Laplace sur AB et CD conduit à

$p_A v_A^{\gamma} = p_B v_B^{\gamma}$ cad $T_A v_A^{\gamma-1} = T_B v_B^{\gamma-1}$

$T_A V_0^{\gamma-1} = T_B \frac{V_0^{\gamma-1}}{a^{\gamma-1}}$

$\Rightarrow T_B = T_A\, a^{\gamma-1}$ de m̂ $T_C = a^{\gamma-1} T_D$

Finalement, $\eta = 1 - \frac{T_D - T_A}{a^{\gamma-1}(T_D - T_A)}$ $\boxed{\eta = 1 - a^{1-\gamma}}$

2) La température initiale du mélange (en A) est T_A.
Sous l'effet de la compression adiabatique AB, il s'échauffe jusqu'à $T_B = a^{\gamma-1} T_A$
On provoque alors l'explosion BC au cours de laquelle il reçoit $Q_1 = C_v(T_C - T_B) = C_v(T_C - a^{+\gamma-1} T_A)$
Or $Q_1 = mK_m$
donc $T_C - a^{\gamma-1} T_A = \frac{mK_m}{C_v} = \frac{mK_m}{mc_v} = \frac{K_m}{c_v}$

$\Rightarrow$ $\boxed{T_C = \frac{K_m}{c_v} + a^{\gamma-1} T_A}$ A.N. $\boxed{T_C = 4605\ K}$ (4332°C)

3) rendement : $\eta = 1 - a^{1-\gamma}$ $\boxed{\eta = 58,5\ \%}$

rendement de Carnot $\eta_C = 1 - \frac{T_{fr}}{T_{ch}} = 1 - \frac{T_A}{T_C}$

$\boxed{\eta_C = 93,5\ \%}$

Rq : cycle de Carnot apparemment très avantageux mais irréalisable avec ces températures : détente isotherme à 4600 K $\rightarrow$ t° >> à celle de fusion des métaux. Dans le cycle de Beau de Rochas cette température n'est pas maintenue.

40 1°) Pendant dt le bilan thermique s'écrit

$$C\,dT + aC(T-T_0)\,dt = 0$$

(à rapprocher de $-\frac{dQ}{dt} = \Phi \Rightarrow dQ + \Phi\,dt = 0$ cf transferts thermiques)

$$\Rightarrow \quad dT = -a(T-T_0)\,dt$$

$$\frac{dT}{T-T_0} = -a\,dt \quad \Rightarrow \quad \ln\frac{T_2-T_0}{T_1-T_0} = -a\,\Delta t$$

$$\boxed{a = \frac{1}{\Delta t}\ln\frac{T_1-T_0}{T_2-T_0}} \qquad \text{A.N.} \quad \boxed{a = 9{,}63.10^{-5}\ s^{-1}}$$

(9,627)

2°) On doit fournir une chaleur $|Q_{ch}|$ permettant de compenser les pertes. Ces pertes sont pendant Δt puisque $T = cste = T_1$: $aC(T_1-T_0)\Delta t$

on doit donc avoir $|Q_{ch}| = aC(T_1-T_0)\Delta t$

$|Q_{ch}|$ est reliée à P par $(e_T) = \frac{|Q_{ch}|}{W} = \frac{|Q_{ch}|}{P\Delta t}$

Or $(e_T) = \frac{Q_{ch}}{Q_{ch}+Q_{Fr}} = \left(\frac{Q_{ch}+Q_{Fr}}{Q_{ch}}\right)^{-1} = \left(1+\frac{Q_{Fr}}{Q_{ch}}\right)^{-1}$

et $(e_T)_{rev} = \left(1-\frac{T_{Fr}}{T_{ch}}\right)^{-1} = \left(\frac{T_{ch}-T_{Fr}}{T_{ch}}\right)^{-1} = \frac{T_{ch}}{T_{ch}-T_{Fr}} = \frac{T_1}{T_1-T_0}$

d'où $(e_T) = \frac{x T_1}{T_1-T_0} = \frac{|Q_{ch}|}{P\Delta t} = \frac{aC(T_1-T_0)\Delta t}{P\Delta t}$

Finalement $$\boxed{P = \frac{aC(T_1-T_0)^2}{x T_1}} \qquad \text{A.N.} \quad \boxed{P = 1{,}66\ \text{kW}}$$

Rq : cette valeur est à comparer au flux thermique

$$\Phi = \left|\frac{dQ}{dt}\right| = aC(T_1-T_0) = 9627\,W$$

41 (voir le cours pour les justifications)

$$(e_F)_{rev} = \frac{T_{Fr}}{T_{Ch} - T_{Fr}} \qquad (e_F)_{rev} = 17{,}31 \approx 17{,}3$$

$$(e_T)_{rev} = \frac{T_{Ch}}{T_{Ch} - T_{Fr}} \qquad (e_T)_{rev} = 29{,}3$$

44 Le travail $-W$ fourni par la machine pendant Δt est $-W = P\Delta t$

L'indication de l'énoncé concernant le rendement s'écrit

$$\eta = -\frac{W}{Q_1} = x\,\eta_{rev} = x\left(1-\frac{T_2}{T_1}\right) = x\,\frac{T_1-T_2}{T_1}$$

d'où $\quad Q_1 = \dfrac{P\,\Delta t\,T_1}{x\,(T_1-T_2)}$

on obtient la chaleur $-Q_2$ cédée à la source froide par le 1er ppe : $\quad W + Q_1 + Q_2 = 0 \quad \Rightarrow -Q_2 = W + Q_1$

d'où $\quad -Q_2 = -P\,\Delta t + \dfrac{P\,\Delta t\,T_1}{x\,(T_1-T_2)}$

$$= \frac{P\,\Delta t\,\left(-x\,(T_1-T_2)+T_1\right)}{x\,(T_1-T_2)}$$

$$= \frac{P\,\Delta t\,\left(x\,T_2 + (1-x)\,T_1\right)}{x\,(T_1-T_2)}$$

Enfin, $-Q_2$ échauffe la source froide selon

$$-Q_2 = C_p\,\Delta T = \Delta m\,c_p\,\Delta T = \mu\,\Delta V\,c_p\,\Delta T = \mu\,q_v\,\Delta t\,c_p\,\Delta T$$

d'où $\quad \Delta T = -\dfrac{Q_2}{\mu\,q_v\,\Delta t\,c_p} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\Delta T = \dfrac{P\,\left(x\,T_2 + (1-x)\,T_1\right)}{\mu\,q_v\,c_p\,x\,(T_1-T_2)}}$

A.N $\quad \boxed{\Delta T = 1{,}8\ \text{K}}$