DS 4 de physique

I. Correction : réfrigérateur

1. Le fluide reçoit du travail $W > 0$, l prend de la chaleur à la source froide pour la maintenir froide soit $Q_f > 0$ et il donne de la chaleur à la source chaude soit $Q_c < 0$.

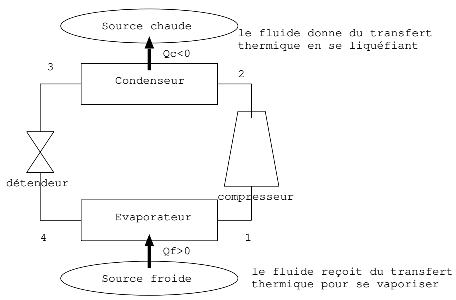
2. L'énoncé demande de montrer le théorème de Carnot. L'efficacité est le rapport entre l'énergie produite sur l'énergie coûteuse soit $e_f = \dfrac{Q_f}{W}$.

On applique le premier principe à Σ sur un cycle: $\Delta U_{cycle} = W + Q_c + Q_f = 0$

On applique le second principe à Σ sur un cycle: $\Delta S_{cycle} = S_e + S_c = 0$ avec $S_c \leq 0$ soit $S_e = \dfrac{Q_c}{T_c} + \dfrac{Q_f}{T_f} \geq 0$.

On a donc $e_f = \dfrac{-Q_f}{Q_f + Q_c} = \dfrac{-1}{1 + \frac{Q_c}{Q_f}} \geq \dfrac{T_f}{T_c - T_f} = e_{f,max}$.

3.



Dans un premier temps on suppose que la compression est **adiabatique et réversible**, elle est donc isentropique.

4.

Point	1	2s	2	3	4	1'	2'
$P(bar)$	3	10	10	10	3	1,3	10
$T(^0C)$	10	50	60	30	0	0	80
Etat du fluide	V	V	V	L	L+V	V	Vapeur sèche
$(kJ.kg^{-1})$	410	432	440	242	242	405	465

5. Dans l'évaporateur, le fluide doit recevoir du transfert thermique de la part de la source froide. Or le transfert thermique est dirigé des fortes vers les faibles températures donc la température du fluide (T_{evap}) doit être inférieure à la température de la source froide.

Dans le condenseur, le fluide donne du transfert thermique à la source chaude. Or le transfert thermique est dirigé des fortes vers les faibles températures donc la température du fluide (T_{cond}) doit être supérieure à la température de la source chaude.

6. La deuxième loi de Joule pour un GP dit que l'enthalpie d'un GP ne dépend que de sa température. Donc lorsque la température est constante, l'enthalpie doit être constante aussi. Or les isenthalpiques sont des droites verticales et entre 1 et 2', les isothermes ne sont pas des droites verticales donc la vapeur sèche dans ce domaine ne se comporte pas comme un GP.

7. On a $\eta = \dfrac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} = 0,75$ soit $h_2 = h_1 + \dfrac{h_{2s} - h_1}{0,75} = 440\ kJ.kg^{-1}$. Le point 2 est à l'intersection de l'isobare 10 bars et de l'isenthalpique 440 $kJ.kg^{-1}$.

8. On applique le second principe au fluide entre les états 1 et 2. On a $\Delta s_{12} = s_{e,12} + s_{c,12}$ avec $s_{e,12} = 0$ car la transformation est adiabatique et $s_{c,12} > 0$ car la transformation est irréversible. On a donc $\Delta s_{12} > 0$ soit $s_2 > s_1 = s_{2s}$ (la transformation $1 \rightarrow 2s$ est isentropique).

9. Dans le cours on a deux formulations du premier principe industriel:

$\Delta h + \Delta e_c + \Delta e_p = w_u + q$ en $J.kg^{-1}$

$D_m(\Delta h + \Delta e_c + \Delta e_p) = P_u + P_{th}$ en W

C'est la première formulation qui est demandée.

L'énergie potentielle de pesanteur s'écrit $E_p = mgz$ (pour Oz vertical ascendant) donc l'énergie potentielle massique de pesanteur s'écrit $e_p = gz$ d'où la variation d'énergie potentielle massique $\Delta e_p = \pm g\Delta z =^{\pm} 10\ J$ pour $\Delta z = \pm 1\ m$. Or les enthalpies massiques sur le diagramme sont de l'ordre de 100 $kJ.kg^{-1}$ donc les variations d'énergie potentielle sont bien négligeables.

10. $[S] = m^2$

$[c] = m.s^{-1}$

$[v] = m^3.kg^{-1}$

Le débit massique est en $kg.s^{-1}$.

On doit donc avoir $D = \dfrac{Sc}{v}$.

Le volume massique est maximal pour la vapeur sèche (pour une même masse le volume occupé par la vapeur est beaucoup plus grand que celui occupé par le liquide). Ensuite plus la température est élevée et plus le volume occupé par le gaz est grand donc le volume massique est maximal au point 2.

On déduit la vitesse maximale: $c_{max} = \dfrac{Dv}{S} = \dfrac{10^{-2}.7.10^{-2}}{0,01^2} = 7\ m.s^{-1}$. L'énergie cinétique est $E_c = \frac{mc^2}{2}$ donc l'énergie cinétique massique est $e_c = \dfrac{c^2}{2} = 25\ J$ pour la vitesse maximale. Cette énergie est très petite devant les enthalpies massiques donc on peut négliger les variations d'énergie cinétique devant les variations d'enthalpie.

Le premier principe industriel s'écrit: $\Delta h = w_u + q$

11. L'efficacité du réfrigérateur est $e_f = \dfrac{Q_f}{W} = \dfrac{q_{41}}{w_{u,12}}$.

On applique le premier principe industriel à la transformation 12: $h_2 - h_1 = w_{u,12} + q_{12} = w_{u,12}$ (la transformation est adiabatique).

On applique le premier principe industriel à la transformation 41: $h_1 - h_4 = w_{u,41} + q_{41} = q_{41}$ (il n'y a pas de travail utile car pas de pièce mobile dans l'évaporateur).

On a donc $e_f = \dfrac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = 5,6$.

12. On applique le premier principe industriel à la transformation 12: $D_m(h_2 - h_1) = P + 0$ (la transformation est adiabatique dans le compresseur) soit $P = 300\ W$.

On applique le premier principe industriel à la transformation 41: $D_m(h_1 - h_4) = 0 + P_{th}$ (il n'y a pas de travail utile car pas de pièce mobile dans l'évaporateur) soit $P_{th} = 1,7\ kW$.

13. Le sous refroidissement diminue l'enthalpie du point 3 et donc diminue l'enthalpie du point 4 (la détente 34 est isenthalpique). Et lorsque h_4 diminue, l'efficacité $e_f = \dfrac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$ augmente. En effet, l'énergie coûteuse (dans le compresseur) n'est pas modifiée et l'énergie prélevée à la source froide augmente.

14. On applique le premier principe industriel aux étapes $44'$ et $4''1$ (il n'y a pas de parties mobiles) soit $q_{44'} = h_{4'} - h_4$ et $q_{4''1} = h_1 - h_{4''}$.

On veut avoir $q_{44'} = q_{4''1}$ soit $h_{4'} - h_4 = h_1 - h_{4''}$.

De plus la transformation $4'4''$ est isenthalpique donc $h_{4'} = h_{4''}$ soit $h_{4'} = h_{4''} = \dfrac{h_1 + h_4}{2} = 325\ kJ.kg^{-1}$.

15. Voir diagramme.

16. J'applique le théorème des moments au point 4' avec $h_l = 200\ kJ.kg^{-1}$ et $h_v = 397\ kJ.kg^{-1}$ soit $x_{4'} = \dfrac{LM}{LV} = \dfrac{h_{4'} - h_l}{h_v - h_l} = 0,63$

J'applique le théorème des moments au point 4" avec $h_l = 173\ kJ.kg^{-1}$ et $h_v = 385\ kJ.kg^{-1}$ soit $x_{4''} = \dfrac{LM}{LV} = \dfrac{h_{4''} - h_l}{h_v - h_l} = 0,71$.

La proportion de vapeur augmente en passant de 4' à 4".

17. L'efficacité de l'ensemble réfrigérateur congélateur est $e_f = \dfrac{Q_f}{W} = \dfrac{q_{41'}}{w_{1'2'}}$.

On applique le premier principe industriel entre 4 et 1' (pas de pièce mobile) soit $h_{1'} - h_4 = q_{41'} + 0 = 163\ kJ.kg^{-1}$.

On applique le premier principe industriel entre 1' et 2' (transformation adiabatique) soit $h_{2'} - h_{1'} = w_{1'2'} + 0 = 60\ kJ.kg^{-1}$.

L'efficacité est donc $e_f = 2,7$. Elle est plus faible que l'efficacité du réfrigérateur seul.

18.

18.a. $\lambda > 0$ car la puissance thermique est reçue par le fluide.

$[\lambda] = [\frac{P}{T}] = W.K^{-1}$.

18.b. J'applique le premier principe de la thermodynamique au système fermé constitué de l'intérieur du réfrigérateur entre les instants t et $t+dt$ soit: $dU = CdT = \delta W + \delta Q = 0 + P_{th}dt = \lambda(T_c - T)dt$ d'où l'équation différentielle: $\frac{dT}{dt} + \frac{\lambda}{C}T = \frac{\lambda}{C}T_c$.

La solution particulière est $T_p = T_c$

La solution générale est $T_g = Ae^{-\lambda t/C}$

On a donc $T(t) = T_c + Ae^{-\lambda t/C}$, on trouve A avec la condition initiale $T(t=0) = T_f = T_c + A$, d'où $T(t) = T_c + (T_f - T_c)e^{-\lambda t/C}$.

18.c. $T(t=0) = T_f = 277\ K$ et $T(t \to \infty) = T_c = 293\ K$.

D'après l'expression de $T(t)$ on a $\ln(\frac{T - T_c}{T_f - T_c}) = -\frac{\lambda t}{C}$: c'est bien l'équation d'une droite passant par l'origine, de pente négative égale à $-\frac{\lambda}{C}$. On mesure pour la pente de la droite: $p = \frac{-4,8}{50.3600} = 2,67.10^{-5}\ s^{-1} = -\frac{\lambda}{C}$ d'où $\lambda = pC = 8,01\ W.K^{-1}$.

19.

19.a. L'efficacité réelle du réfrigérateur est $e = Ke_{max} = K\frac{T_f}{T_c - T_f} = 0,25\frac{277}{293 - 277} = 4,3$.

19.b. La puissance thermique P_{th} des fuites est $P_{th} = \lambda(T_c - T_f) = 8,01(293 - 277) = 128\ W$.

19.c. La source froide gagne de la puissance thermique grâce aux fuites thermiques par les parois et perd de la puissance thermique grâce au réfrigérateur. En régime stationnaire, la puissance perdue est égale à la puissance gagnée soit $P_f = P_{th}$ et $e = \frac{P_f}{P_c} = \frac{P_{th}}{P_c}$ soit $P_c = \frac{P_{th}}{e} = 30\ W$.

II. Correction: turboréacteur

1. $\Delta h = h_s - h_e$ est la variation d'enthalpie massique entre la sortie et l'entrée.

$\frac{\Delta v^2}{2} = \frac{v_s^2 - v_e^2}{2}$ est la variation d'énergie cinétique massique entre la sortie et l'entrée

$+g\Delta z = g(z_s - z_e)$ est la variation d'énergie potentielle massique (pour Oz vertical ascendant).

w_u désigne le travail utile massique mis en jeu par les pièces mobiles.

q désigne le transfert thermique massique échangé.

2. On applique le premier principe industriel à la transformation dans le diffuseur: $\Delta h_{12} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} = w_{u,12} + q_{12}$.

Dans un diffuseur, il n'y a pas de partie mobile donc pas de travail utile, et le diffuseur est adiabatique donc il n'y a pas de transfert thermique.

D'après l'énoncé $v_2 = 0$.

On a donc $c_p(T_2 - T_1) + \frac{-v_1^2}{2} = 0$ soit $T_2 = T_1 + \frac{v_1^2}{2c_p} = 264\ K$.

3. On applique les lois de Laplace dans le diffuseur car le gaz est parfait en transformation adiabatique et réversible. On a donc $P_1^{1-\gamma}T_1^{\gamma} = P_2^{1-\gamma}T_2^{\gamma}$ soit $P_2 = P_1(\frac{T_1}{T_2})^{\gamma/(1-\gamma)} = 55,8\ kPa$.

4. On applique le premier principe industriel à la transformation dans le compresseur: $\Delta h_{23} = w_{u,23} + q_{23}$. On néglige les variations d'énergie cinétique et il n'y a pas de transfert thermique car le compresseur est adiabatique.

On a donc $w_{comp} = w_{u,23} = h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2) = 34,1\ kJ.kg^{-1}$.

La puissance P_{comp} du compresseur est $P_{comp} = D_m w_{comp} = 1,53\ MW$.

5. On applique le premier principe industriel à la transformation adiabatique dans le compresseur: $\Delta h_{23} = w_{u,23} + q_{23} = c_p(T_3 - T_2)$ donne $w_{u,23} = c_p(T_3 - T_2) > 0$: dans un compresseur le fluide reçoit du travail utile.

On applique le premier principe industriel à la transformation adiabatique dans la turbine: $\Delta h_{45} = w_{u,45} + q_{45} = c_p(T_5 - T_4)$ donne $w_{u,45} = c_p(T_5 - T_4) < 0$: dans la turbine le fluide cède du travail au milieu extérieur pour faire tourner la turbine.

Sachant que le travail fourni par la détente du gaz dans la turbine est intégralement reçu par le compresseur, on a $w_{u,23} = -w_{u,45}$ et donc $T_3 - T_2 = -(T_5 - T_4)$ soit $T_5 = T_4 + T_2 - T_3 = 1184\ K$.

On applique les lois de Laplace dans la turbine car le gaz est parfait en transformation adiabatique et réversible. On a donc $P_4^{1-\gamma} T_4^{\gamma} = P_5^{1-\gamma} T_5^{\gamma}$ soit $P_5 = P_4 (\frac{T_4}{T_5})^{\gamma/(1-\gamma)} = 292\ kPa$.

6. On applique le premier principe industriel à la transformation adiabatique dans la tuyère: $\Delta h_{56} + \frac{v_6^2}{2} = w_{u,56} + q_{56} = c_p(T_6 - T_5)$ donne $\Delta h_{56} + \frac{v_6^2}{2} = c_p(T_6 - T_5) + \frac{v_6^2}{2} = 0$ car il n'y a pas de pièce mobile dans la tuyère. On a donc $v_6 = \sqrt{2c_p(T_5 - T_6)} = 1052\ m.s^{-1}$.

7. Le rendement est le rapport de la puissance produite sur la puissance couteuse. La puissance produite est la puissance de propulsion $P_{prop} = D_m(v_6 - v_1)v_1 = 9,3\ MW$ et la puissance coûteuse est la puissance qui sert à chauffer le gaz dans la chambre de combustion (la machine est un moteur et l'énergie coûteuse est celle liée à la source chaude) d'où $r = \frac{P_{prop}}{P_{chamb}} = \frac{9,3}{45,5} = 0,20$.

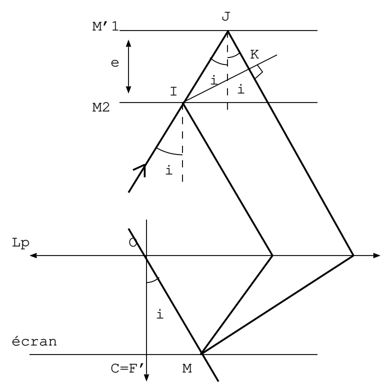
III. **Correction: Michelson**

1. Par principe de retour inverse de la lumière, M se comporte comme une source. Entre la source M et la surface d'onde IK, le chemin optique est constant donc $(IM) = (KM)$.

$\delta_{1/2}(M) = (IM)_1 - (IM)_2 = (IJ) + (JK) + (KM) - (IM) = JK + KM$

avec $\cos i = \frac{e}{IJ}$ et $\cos(2i) = \frac{JK}{IJ}$ soit $IJ = \frac{e}{\cos i}$ et $JK = IJ \cos(2i)$

d'où $\delta_{1/2}(M) = \frac{e}{\cos i}(1 + \cos(2i)) = 2e \cos i$.

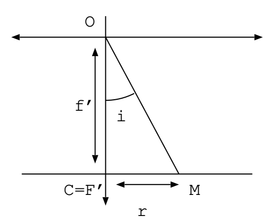


2. L'épaisseur de la lame d'air s'écrit $e = vt$ car à $t = 0$ on est au contact optique donc $e = 0$. A l'instant t_1: $e = vt_1 = 75\ \mu m$. On calcule l'ordre d'interférences au centre de l'écran: $p_0 = \frac{2e}{\lambda} = 237,3$.

On calcule l'ordre d'interférences au bord de l'écran pour $r = \frac{a}{2} = 10\ cm$.

$$p = p_0 \cos i = p_0 \frac{f'}{\sqrt{r^2 + f_2'}} = 232,7.$$

Les anneaux brillants correspondent à des valeurs de p entières, on voit 5 anneaux brillants qui correspondent à $p = 237, 236, ..., 233$.



Le 3ième anneau brillant a pour ordre d'interférences $p_3 = 235$. On a $\tan i = \frac{r}{f'} \approx i$ et $p = p_0 \cos i \approx p_0(1 - \frac{i^2}{2})$ d'où $r = f' \sqrt{2(1 - \frac{p}{p_0}}$. AN: pour $p = p_3 = 235$: $r_3 = 6,96\ cm$.

3.

3.a. L'ordre d'interférences moyen au centre s'écrit $p_m = \frac{2e}{\lambda_m} = \frac{2vt}{\lambda_m}$. Les franges brillantes correspondent à des valeurs de p_m entières soit $p_m = k = \frac{2vt_k}{\lambda_m}$ d'où $t_k = \frac{k\lambda_m}{2v}$.

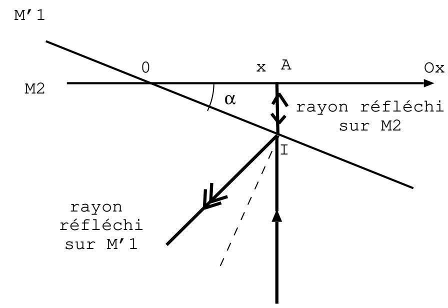
3.b. Les longueurs d'onde différentes de la source constituent des sources non cohérentes qui donnent chacune leur propre système de franges et on observe à l'écran la superposition des deux systèmes de franges. Il y a brouillage lorsque les franges brillantes pour λ_1 ($p_1 = \dfrac{2e}{\lambda_1}$ est un entier) se superposent aux franges sombres de λ_2 ($p_2 = \dfrac{2e}{\lambda_2}$ est un demi entier).

On a donc $p_1 - p_2 = k + \dfrac{1}{2} = 2e(\dfrac{1}{\lambda_1} - \dfrac{1}{\lambda_2}) = \dfrac{2e_k(\lambda_2 - \lambda_1)}{\lambda_1 \lambda_2} \approx \dfrac{2vt_k\Delta\lambda}{\lambda_m^2}$ soit $t_k = (k + \dfrac{1}{2})\dfrac{\lambda_m^2}{2\Delta\lambda}$.

3.c. Sur de petites échelles de temps (courbe 1) on observe un phénomène périodique de période $T = \dfrac{13,8}{12} = 1,15\ s$. Les maxima d'intensité correspondent aux instants où le centre C des anneaux est sur une frange brillants et les minima nuls correspondent aux instants où C est sur une frange noire. La période du phénomène est $T = t_{k+1} - t_k = \dfrac{\lambda_m}{2v}$ (question 3a) soit $\lambda_m = 2vT = 575\ nm$.

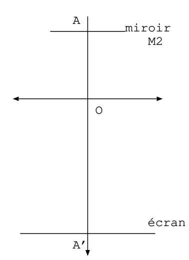
Sur de grandes échelles de temps (courbe 2), on observe le phénomène de brouillage aux instants $t_1 = 160\ s$, $t_2 = 480\ s$, $t_3 = 800\ s$. Or d'après la question 3b, le temps entre deux brouillages est $T_b = t_{k+1} - t_k = \dfrac{\lambda_m^2}{2v\Delta\lambda}$ soit $\Delta\lambda = \dfrac{\lambda_m^2}{2vT_b} = 2,1\ nm$ avec $T_b = 320\ s$.

4.



4.a. Le rayon incident donne naissance à un rayon réfléchi sur M_1 et un rayon réfléchi sur M_2'. Les rayons interfèrent en I, le rayon réfléchi sur M_1 parcourt la distance $2AI = 2x\tan\alpha$ en plus. La différence de marche est donc $\delta(x) = 2x\tan\alpha \approx 2\alpha x$.

L'interfrange s'écrit $i = x_{k+1} - x_k$ où x_k est la position de la frange brillante d'ordre k définie par $p(x) = \dfrac{2\alpha x_k}{\lambda} = k$ d'où $x_k = \dfrac{k\lambda}{2\alpha}$. On en déduit donc $i = \dfrac{\lambda}{2\alpha}$.



4.b. La lentille réalise l'image du miroir sur l'écran car les franges sont localisées sur les miroirs, on cherche à les observer avec un interfrange plus grand sur l'écran. Sur l'écran on voit les mêmes franges rectilignes que sur les miroirs mais $|\gamma|$ fois plus grand, où γ est le grandissement de la lentille.

On a $\overline{OA} = -40\ cm$ et on applique la relation de conjugaison pour trouver $\overline{OA'}$ soit $\overline{OA'} = \dfrac{\overline{OA}.f'}{\overline{OA} + f'} = 120\ cm$. On en déduit le grandissement $\gamma = \dfrac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = -3$ soit l'interfrange sur les miroirs est 3 fois plus petit que l'interfrange sur l'écran.

$i_m = \dfrac{\lambda}{2\alpha} = \dfrac{i_e}{3} = 0,50\ cm$ d'où $\alpha = \dfrac{\lambda}{2i_m} = 6,32.10^{-5}\ rad$.

4.c. En lumière blanche, chaque longueur d'onde de la source donne son propre système de franges et les sources de longueurs d'onde différentes étant non cohérentes, on observe à l'écran la superposition de tous les systèmes de franges. En un point des miroirs certaines longueurs d'onde donnent des franges sombres qui donnent des cannelures dans le spectre soit à résoudre $p(x) = \dfrac{2\alpha x}{\lambda} = k$ demi entier.

Pour résoudre on fait un encadrement de p: $\dfrac{2\alpha x}{\lambda_{max}} = 3,6 < p < \dfrac{2\alpha x}{\lambda_{min}} = 7,3$ en prenant $\lambda_{min} = 400\ nm$ (pour le bleu) et $\lambda_{max} = 800\ nm$ (pour le rouge). Il y a donc 3 cannelures qui correspondent à $p = 4,5 - 5,5 - 6,5$.