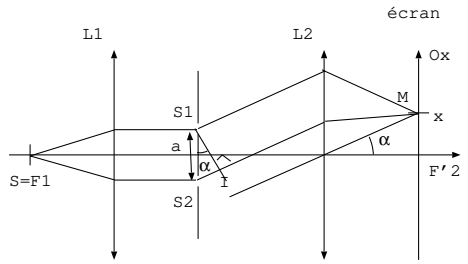
Oraux d'optique

I. Correction : savoir et savoir faire sur le dispositif d'Young

1.



$\delta_{2/1}(x) = (SS_2M) - (SS_1M) = S_2I = a\alpha = \dfrac{ax}{f_2'}$

avec $\sin\alpha = \dfrac{S_2I}{a} \approx \alpha$ et $\tan\alpha = \dfrac{x}{f_2'} \approx \alpha$

M se comporte comme une source par principe de retour inverse de la lumière et entre la source M et la surface d'onde S_1I le chemin optique est constant.

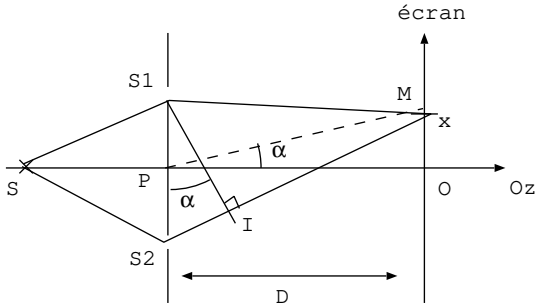
De même entre la source S et la surface d'onde S_1S_2 le chemin optique est constant.

2. Comme dans le cours, pour démontrer l'expression de $\delta_{2/1}(M) = (SS_2M) - (SS_1M)$ il y a deux façons possibles.

2.a. 1ère façon: on trace la surface d'onde passant par S_1. M se comporte comme une source par principe de retour inverse de la lumière et entre la source M et la surface d'onde S_1I, le chemin optique est le même sur les deux rayons soit $(S_1M) = (IM)$.

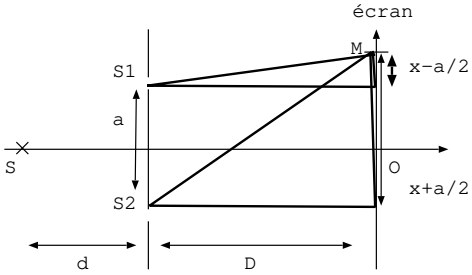
$\delta_{2/1}(M) = (SS_2) + (S_2I) + (IM) - (SS_1) - (S_1M) = (S_2I) = S_2I = a\sin\alpha = a\alpha$.

Ensuite il faut raisonner juste sur un dessin qui est faux: car, dans la réalité, les points S_1, S_2 et P sont quasiment confondus (sur le schéma, regardez bien où se trouve α) on a $\tan\alpha \approx \alpha = \dfrac{x}{D}$ d'où $\delta_{2/1}(M) = \dfrac{ax}{D}$.



2ième façon: par le calcul: $S_1M = \sqrt{D^2 + (x - a/2)^2}$ et $S_1M = \sqrt{D^2 + (x + a/2)^2}$ (an appliquant Pythagore dans les triangles).

$\delta_{2/1}(M) = S_2M - S_1M = (D^2 + (x + a/2)^2)^{1/2} - (D^2 + (x - a/2)^2)^{1/2} = D(1 + \dfrac{(x + a/2)^2}{D^2})^{1/2} - D(1 + \dfrac{(x - a/2)^2}{D^2})^{1/2} \approx D(1 + \dfrac{(x + a/2)^2}{2D^2}) - D(1 + \dfrac{(x - a/2)^2}{2D^2}) \approx \dfrac{(x + a/2)^2 - (x - a/2)^2}{2D} \approx \dfrac{ax}{D}$.



2.b. On définit le contraste par $C = \dfrac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$ où I_{max} est l'intensité des franges brillantes et I_{min} l'intensité des franges sombres.

On applique la formule de Fresnel pour 2 ondes cohérentes d'intensités différentes $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2}\cos\phi$. On a donc $I_{max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2}$ et $I_{min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1I_2}$

D'où le contraste $C = \dfrac{2\sqrt{I_1I_2}}{I_1 + I_2}$ et ici $I_1 = 0,6I_0$ et $I_2 = I_0$ (I_0 est l'intensité de la source principale).

Soit $C = \dfrac{2\sqrt{0,6}}{1,6} = 0,97$: cette valeur est très proche de 1 donc les franges sombres sombres sont quasi noires et les franges sont bien contrastées.

2.c. On cherche la position de la nouvelle frange centrale pour laquelle les deux chemins optiques sont identiques. Le chemin optique derrière S_1 est rallongé à cause de la lame donc pour compenser ce chemin doit être raccourci en distance, soit la frange centrale monte.

On ajoute une lame fictive d'épaisseur e et d'indice 1 derrière S_2 on a donc $\delta_{2/1}(O) = e - ne$ d'où l'ordre d'interférences en O avec la lame $p(O) = \dfrac{e(1-n)}{\lambda} = -13,7 < 0$: les franges sont bien montées et il y a 13 franges brillantes qui ont défilé en O, les franges d'ordre $p = -1, -2, ... - 13$.

2.d. Les sources de longueurs d'onde différentes ne sont pas cohérentes entre elles, donc on observe à l'écran la superposition de tous les systèmes de franges de chaque source. Tous ces systèmes de franges ont une frange brillante en O donc O est lumineux, de la couleur de la source. Au voisinage de O, on observe des franges irisées.

Au point d'abscisse x, certaines longueurs d'onde donnent des franges brillantes et d'autres des franges sombres, dans le spectre, on observe des cannelures qui correspondent aux franges sombres soit $p = \dfrac{ax}{\lambda D}$ est un demi-entier.

On donne un encadrement de p: $\dfrac{ax}{\lambda_2 D} = 4,7 < p < \dfrac{ax}{\lambda_2 D} = 8,9$. On observe donc 4 cannelures qui correspondent aux ordres d'interférence $p = 5,5 - 6,5 - 7,5 - 8,5$.

2.e. Les deux sources S et S' **ne sont pas cohérentes** entre elles, donc **on observe à l'écran la superposition des deux systèmes de franges de chaque source.** Les deux systèmes de franges ont le même interfrange mais n'ont pas la même frange centrale, ils sont donc décalés. Si le décalage est tel que les franges brillantes de l'un tombent sur les franges brillantes de l'autre, on observe des franges à l'écran.

Il y a brouillage lorsque les franges brillantes de S se superposent aux franges sombres de S' soit:

L'ordre d'interférences en M pour S s'écrit: $p_S(M) = \dfrac{ax}{\lambda D}$ est un entier

L'ordre d'interférences en M pour S' s'écrit: $p_{S'}(M) = \dfrac{ax}{\lambda D} + \dfrac{ah}{\lambda d}$ est un demi entier

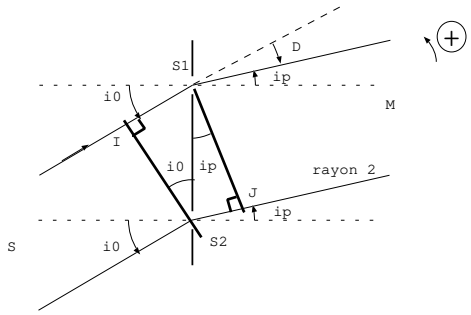
On calcule la différence des ordres d'interférences pour connaître le décalage entre les deux systèmes de franges. Soit $p_{S'}(M) - p_S(M) = \dfrac{a_k h}{\lambda d} = k + \dfrac{1}{2}$ d'où $h_k = (k + \dfrac{1}{2})\dfrac{\lambda d}{a}$.

3.

3.a. $\delta(M) = (SS_2M) - (SS_1M) = (SS_2) + (S_2J) + (JM) - (SI) - (IS_1) - (S_1M) = S_2J - IS_1 = a\sin i_p - a\sin i_0$

M se comporte comme une source par principe de retour inverse de la lumière et entre une source et une surface d'onde le chemin optique est constant soit $(SS_2) = (SI)$ et $(S_1M) = (JM)$.

La frange d'ordre p correspond à $p = \dfrac{\delta}{\lambda}$ soit $\sin i_p - \sin i_0 = \dfrac{p\lambda}{a}$.



3.b. La déviation a pour expression $D = -i_0 + i_p$.

Au minimum de déviation on a $i_p = -i_0$ soit $D_m = 2i_p = -2i_0$ et $2\sin i_p = -2\sin i_0 = \dfrac{p\lambda}{a} = 2\sin(\dfrac{D_m}{2})$.

Pour la raie verte on a donc $i_0 = -\frac{D_{m0}}{2} = -15^0 51'$ ($1^0 = 60'$).

Dans l'ordre 2 pour la raie verte on a $\sin(\dfrac{D_{m0}}{2}) = \dfrac{2\lambda_0}{2a} = \dfrac{\lambda_0}{a}$ et dans l'ordre 1 pour la raie rouge on a $\sin(\dfrac{D_{m1}}{2}) = \dfrac{\lambda_1}{2a}$ soit $\lambda_1 = 2\lambda_0 \dfrac{\sin(\frac{D_{m1}}{2})}{\sin(\frac{D_{m0}}{2})} = 643,8\ nm$.

On a ainsi le pas du réseau $a = \dfrac{2\lambda_0}{2\sin(\frac{D_{m0}}{2})} = 2,0\ \mu m = 2.10^{-3}\ mm$ soit $n = \dfrac{1}{a} = 500\ traits/mm$.

II. **Correction : exercices sur le Michelson**

1. Questions de cours et de TP en source étendue:

Les franges en coin d'air sont localisées sur les miroirs. On les observe en faisant l'image des miroirs sur l'écran avec une lentille convergente. La focale de cette locale de doit pas être trop grande car il y a une distance minimale égale à $4f'$ entre les miroirs et l'écran. Les franges sont rectilignes.

Les franges en lame d'air sont localisées à l'infini.On les observe dans le plan focal image d'une lentille de grande focale pour avoir de gros anneaux.

En lame d'air, lorsque l'épaisseur de la lame d'air augmente, on voit de plus en plus d'anneaux, ils moins en moins d'anneaux, ils semblent s'engloutir vers le centre de l'écran.

Pour voir des anneaux, il faut faire converger les rayons sur les miroirs avec une lentille de petite focale. Pour les franges du coin d'air, il fait éclairer les miroirs en incidence normale.

La compensatrice est une lame de verre de la même épaisseur et du même indice que la séparatrice. Elle sert à ce qu'il n'y ait pas de différence de marche entre les rayons ui interfèrent car ils ne traversent pas le même nombre de fois la séparatrice.

Quand on cherche à atteindre le contact optique, on prend d'abord le laser car la longueur de cohérence du laser est $l_c \approx 1\ m$. Or pour voir des interférences, il faut que la différence de marche soit plus petite que la longueur de cohérence, quand on prend un Michelson en main, la différence de marche est quelconque. On diminue la différence de marche et on peut alors prendre une source de longueur de cohérence plus petite : $l_c = 1\ mm$ pour la lampe à vapeur de mercure et $l_c \approx 1\ \mu m$ pour la lumière blanche.

2. La source est étendue donc chaque point de la source donne son propre système de franges. Les différentes points de la source constituent des sources non cohérentes entre elles donc on observe la superposition des systèmes de franges. La superposition de ces systèmes de franges conduit à un brouillage partout sauf loin du Michelson, on dit que les franges sont localisées à l'infini, on les observe dans le plan focal image d'une lentille convergente.

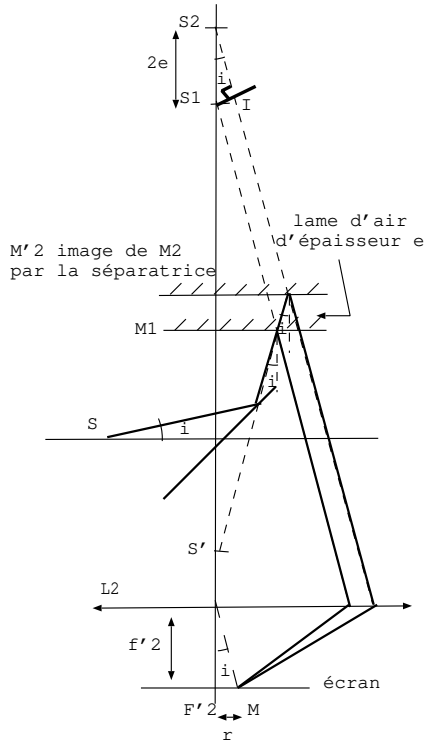
Soit S' image de S par la séparatrice, S_1 image de S' par M_1 et S_2 image de S par M_2.

Les rayons qui interfèrent en M semblent venir de S_1 et S_2 donc la différence de marche en M s'écrit $\delta(M) = (S_2M) - (S_1M) = (S_2I) + (IM) - (S_1M)$

par principe de retour inverse de la lumière, M joue le rôle de source et entre la source M et la surface d'onde S_1I le chemin optique est constant donc $(IM) = (S_1M)$ d'où $\delta(M) = (S_2I) = S_2I$

dans le triangle S_1S_2I: $\cos i = \dfrac{S_1I}{S_1S_2}$ et $S_1I = S_1S_2 \cos i = 2e \cos i$

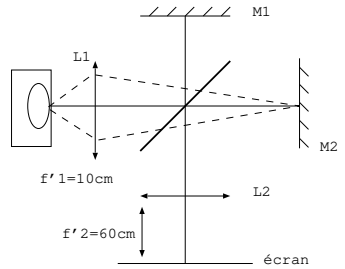
d'où $\delta(M) = 2e \cos i$.

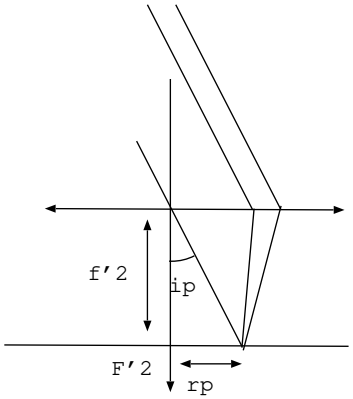


3. On observe des anneaux donc le Michelson est réglé en lame d'air.

La lentille près de la source sert à faire converger les rayons sur les miroirs, il faut pour cela une lentille de courte focale.

Les franges sont localisées à l'infini, on les observe dans le plan focal image d'une lentille de grande focale pour avoir de gros anneaux.





L'ordre d'interférences s'écrit $p(M) = \dfrac{2e\cos i_p}{\lambda} = p_0 \cos i_p \approx p_0(1 - \dfrac{i_p^2}{2})$ d'où $i_p = \sqrt{2(1 - \dfrac{p}{p_0})}$.

On a $\tan i_p = \dfrac{r_p}{f'} \approx i_p$ d'où $r_p = f' i_p = f'\sqrt{2(1 - \dfrac{p}{p_0})}$ avec $p_0 = \dfrac{2e}{\lambda} = 2753,2$: le centre est gris. L'ordre d'interférences est entier sur un anneau brillant et il diminue lorsqu'on s'éloigne du centre donc pour le 1er anneau brillant on a $p_1 = 2753$ et pour le 3ième anneau brillant on a $p_3 = 2751$ d'où: $r_3 = 0,6\sqrt{2(1 - \dfrac{2751}{2753,2})} = 2,4\ cm$.

4. Le Michelson est réglé en lame d'air donc on observe des franges circulaires. Chaque longueur d'onde donne son propre système de franges et on observe à l'écran la superposition des deux systèmes de franges obtenues pour λ_1 et λ_2 car les ondes de longueurs d'onde différentes ne sont pas cohérentes entre elles.

Lorsque les franges brillantes du système de franges correspondant à λ_1 (soit p_{λ_1} entier) se superposent aux franges sombres du système de franges correspondant à λ_2 (soit p_{λ_2} demi entier), l'écran est uniformément éclairé, le contraste est nul on dit qu'il y a brouillage.

Le brouillage s'obtient pour $p_{\lambda_1} - p_{\lambda_2}$ est un demi entier avec $p_\lambda = \dfrac{2e\cos i}{\lambda} \approx \dfrac{2e}{\lambda}$ car i petit donc $\cos i \approx 1$ d'où $p_{\lambda_1} - p_{\lambda_2} = \dfrac{2e_k}{\lambda_1} - \dfrac{2e_k}{\lambda_2} = k + \dfrac{1}{2}$ (k entier positif car $\lambda_1 < \lambda_2$ donc ici $\frac{1}{\lambda_1} > \frac{1}{\lambda_2}$).

Le contact optique correspond à $e = 0$, on lit la position du miroir sur le vernier : $x_0 = 5,78\ mm$ (la graduation est comprise entre $5,5\ mm$ et $6\ mm$, sur la partie droite du vernier, on lit 28 graduations qui correspondent à $0,28\ mm$ d'où la lecture $5,5 + 0,28\ mm$).

Entre deux brouillages, e varie de $e_{k+1} - e_k = \dfrac{\lambda_1\lambda_2}{2(\lambda_2 - \lambda_1)} = 0,29\ mm$. Donc il faut charioter de $0,29\ mm$ de chaque côté du contact optique pour trouver les premiers brouillages, cela correspond aux positions $5,78 + 0,29 = 6,07\ mm$ et $5,78 - 0,29 = 5,49\ mm$ du miroir.

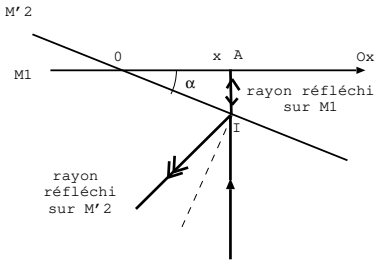
5. On compte le nombre d'anneaux en utilisant l'ordre d'interférences.

L'ordre d'interférences est maximum au centre de l'écran en F' soit $p_0 = \dfrac{2e}{\lambda} = 911,4$. Il est minimum au bord de l'écran $p = p_0 \cos i \approx p_0(1 - \frac{i^2}{2})$ avec $\tan i \approx i = \dfrac{r}{f'}$, ici le rayon du plus gros anneau est $r = \frac{a}{2}$.

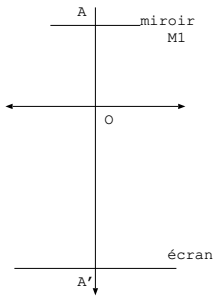
On a donc $p_{min} = p_0(1 - \dfrac{a^2}{8f'^2}) = 903,3$. Les anneaux brillants correspondent aux valeurs de p entières soit $p = 904, 905, ..., 911$, il y a 8 anneaux brillants.

6. 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 $i = \dfrac{\lambda}{2\alpha}$ (d'autant plus grand que l'angle du coin d'air est petit).



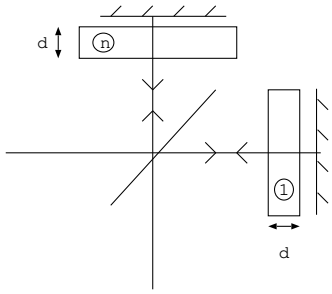
La lentille réalise l'image du miroir sur l'écran car les franges sont localisées sur les miroirs, on cherche à les observer avec un interfrange plus grand sur l'écran. Sur l'écran on voit les mêmes franges rectilignes que sur les miroirs mais $|\gamma|$ fois plus grand, où γ est le grandissement de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



On a $\overline{OA} = -27\ cm$ et on applique la relation de conjugaison pour trouver $\overline{OA'}$ soit $\overline{OA'} = \dfrac{\overline{OA}.f'}{\overline{OA} + f'} = 77\ cm$.

On en déduit le grandissement $\gamma = \dfrac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} = 2,85$ soit l'interfrange sur les miroirs est $i_m = \dfrac{\lambda}{2\alpha} = \dfrac{i_e}{2,85} = 0,46\ cm$ d'où $\alpha = \dfrac{\lambda}{2i_m} = 6,9.10^{-5}\ rad = 6,9.10^{-5}.60.60.180/\pi = 14''$ d'arc.

Quand on ajoute une lame devant l'un des miroirs, c'est comme s'il y avait une lame d'épaisseur d et d'indice $n = 1$ devant l'autre miroir. Les rayons font un aller retour dans les lames car ils sont réfléchis sur les miroirs, les rayons traversent donc deux fois les lames. La différence de marche entre les deux rayons est donc $\delta_{lame} = 2nd - 2d$. L'introduction de la lame modifie la différence de marche donc modifie l'ordre d'interférences.



L'énoncé nous parle d'un déplacement de 18 franges, cela signifie que $\Delta p = |p_{aveclame} - p_{sanslame}| = 18$ or $\Delta p = |p_{aveclame} - p_{sanslame}| = \dfrac{\delta_{lame}}{\lambda}$. On a donc $\Delta p = \dfrac{2d(n-1)}{\lambda} = 18$ donc $d = \dfrac{18\lambda}{2(n-1)} = 11,5\ \mu m$.

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: $\dfrac{2\alpha x}{\lambda_{max}} = 2,9 < p < \dfrac{2\alpha x}{\lambda_{min}} = 5,9$ 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 $p = 3,5 - 4,5 - 5,5$.

III. **Correction: extrait CCINP-TPC 2020**

1. $\lambda = \dfrac{c}{f} = 122\ mm$.

2. M se comporte comme une source par principe de retour inverse de la lumière. Et entre une source et une surface d'onde le chemin optique est constant donc $(SS_1) = (SI)$ et $(S_1M) = (JM)$.

On a $\delta(M) = (SI) + (IS_2) + (S_2J) + (JM) - (SS_1) - (S_1M) = IS_2 + S_2J = a\sin i + a\sin i'$. On observe des interférences constructives pour $p = \dfrac{\delta}{\lambda}$ est un entier d'où la formule des réseaux $\sin i + \sin i' = \dfrac{p\lambda}{a}$.

3. On mesure $5a = 10\ mm$ soit $a = 2\ mm$.

On a $p = \dfrac{a}{\lambda}(\sin i + \sin i')$ avec $\sin i + \sin i'$ compris entre -2 et $+2$ soit p est compris entre $\dfrac{-2a}{\lambda} = -0,033$ et $\dfrac{+2a}{\lambda} = +0,033$. Le seul ordre visible est donc l'ordre 0 pour lequel $i' = -i$ soit la porte sert de miroir.

4. Dans cette question, on s'intéresse aux ondes lumineuses dans le visible pour lesquelles $\lambda \approx 600\ nm$. Dans ce cas p est compris entre $\dfrac{-2a}{\lambda} = -240$ et $\dfrac{-2a}{\lambda} = +240$. Cela signifie qu'il y a plein d'ordres non nuls, donc il n'y a pas que la lumière réfléchie à l'extérieur de la porte.

IV. **Correction : savoir et savoir faire**

1. Lorsque le fluide traverse le condenseur, il passe de l'état vapeur à l'état liquide en fournissant de l'énergie au milieu extérieur. Etant donné que le transfert thermique va du chaud vers le froid, cela veut dire que le fluide a une température plus élevée que le milieu extérieur dans un condenseur.

2. Lorsque le fluide traverse un évaporateur, il passe de l'état liquide à l'état vapeur en prenant de l'énergie au milieu extérieur. Etant donné que le transfert thermique va du chaud vers le froid, cela veut dire que le fluide a une température plus faible que le milieu extérieur dans un évaporateur.

3. L'enthalpie massique de vaporisation est l'énergie qu'il faut fournir à une masse de 1 kg de liquide pour devenir vapeur. Elle s'écrit $h_{vapo}(2\ bar) = h_v - h_l = 160\ kJ.kg^{-1}$.

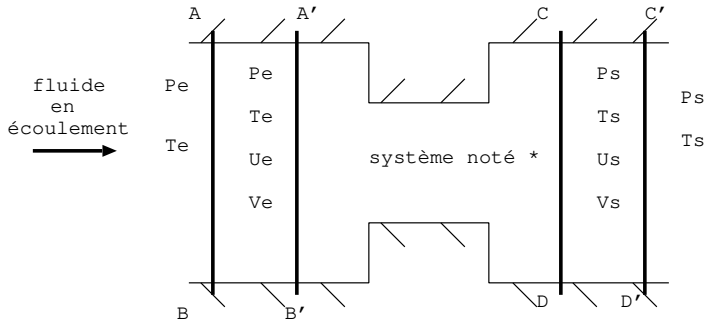
On applique le théorème des moments $x_l = \dfrac{MV}{LV} = \dfrac{h_v - h}{h_v - h_l} = \dfrac{320-250}{320-160} = 0,38$ (L est le point sur la courbe d'ébullition à et V est le point sur la courbe de rosée et M est le point d'enthalpie massique $h = 230\ kJ.kg^{-1}$).

4. On applique le théorème des moments $x_v = \dfrac{LM}{LV} = \dfrac{s - s_l}{s_v - s_l} = \dfrac{1,16-0,32}{1,24-0,32} = 0,91$ (L est le point sur la courbe d'ébullition à 2 bar et V est le point sur la courbe de rosée à 2 bar et M est le point d'entropie massique $s = 1,16\ kJ.kg^{-1}.K^{-1}$).

5. L'enthalpie massique du mélange liquide vapeur s'écrit $h = x_v h_v(3\ bar) + x_l h_l(3\ bar) = x_v h_v(3\ bar) + (1-x_v)h_l(3\ bar) = 0,73.340 + (1-0,73)170 = 311\ kJ.kg^{-1}$.

6. L'entropie massique du fluide est $s = x_l s_l + (1-x_l)s_v = 0,60\ kJ.kg^{-1}.K^{-1}$.

7. La détente de Joule Thomson est une détente qui se produit dans une canalisation adiabatique en présence d'un obstacle (par exemple un rétrécissement) qui fait diminuer la pression.



On se ramène à un système fermé et mobile placé:

- entre AB et $A'B'$ à l'instant t

- entre CD et $C'D'$ à l'instant $t + \Delta t$.

Le système compris entre $A'B'$ et CD a un volume fixe mais c'est un système ouvert, on le note $(*)$.

On applique le premier principe de la thermo au système fermé défini ci-dessus.

$\Delta U + \Delta E_m = W + Q$

avec $\Delta U = U^*(t+\Delta t) + U_s - U^*(t) - U_e = U_s - U_e$ car on est en régime stationnaire

On néglige les variations d'énergie mécanique

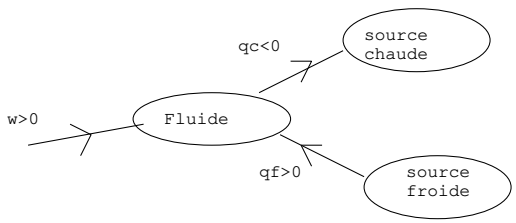
avec $W = -P_e(0 - V_e) - P_s(V_s - 0) = P_eV_e - P_sV_s$: c'est le travail des forces de pression à l'entrée et à la sortie. A l'entrée le fluide extérieur pousse le fluide et l'aide à entrer, le travail $P_eV_e > 0$ est reçu par le fluide. A la sortie, le fluide extérieur empêche le fluide de sortir, le travail $-P_sV_s < 0$ est perdu par le fluide.

avec $Q = 0$ (parois adiabatiques et températures uniformes à l'entrée et à la sortie)

On a donc $U_s - U_s = P_eV_e - P_sV_s$ soit $H_e = H_s$ avec $H = U + PV$ la fonction enthalpie, homogène à une énergie.

8. La puissance utile s'écrit $P_u = D_m w_u$ d'où le travail utile massique $w_u = \dfrac{P_u}{D_m} = 4\ kJ.kg^{-1}$.

9.



Premier principe appliqué au fluide sur un cycle: $\Delta U = 0 = W + Q_c + Q_f$ avec $Q_c < 0$, $Q_f > 0$ et $W > 0$. En utilisant les puissances P_u, P_c et P_f (toutes positives), cette équation s'écrit $P_u - P_c + P_f = 0$ d'où $P_u = P_c - P_f = 500\ W$.

L'efficacité d'une PAC est $e = \dfrac{-Q_c}{W} = \dfrac{P_c}{P_u} = 4$.

10. Le premier principe industriel s'écrit: $h_s - h_e + \dfrac{c_s^2 - c_s^2}{2} + g(z_s - z_e) = w_u + q$: cette équation est en J/kg.

Les indices s désignent les grandeurs de sortie du fluide.

Les indices e désignent les grandeurs d'entrée du fluide.

h est l'enthalpie massique, c est la vitesse du fluide (donc $\dfrac{c^2}{2}$ représente l'énergie cinétique massique) et z est l'altitude du fluide sur un axe vertical ascendant (donc gz représente l'énergie potentielle de pesanteur massique). w_u est appelé travail utile, c'est le travail massique échangé par le fluide avec les pièces mobiles (piston ou hélice d'une machine) et q est le transfert thermique massique échangé avec la machine.

Rq: pour un liquide: $h_s - h_e = c(T_s - T_e)$ où c est la capacité thermique massique.

Rq: pour un gaz: $h_s - h_e = c_p(T_s - T_e)$ où c_p est la capacité thermique massique à pression constante.

Le second principe industriel s'écrit: $s_s - s_e = s_{echange} + s_{cree}$: cette équation est en $J.kg^{-1}.K^{-1}$.

Les indices s désignent les grandeurs de sortie du fluide.

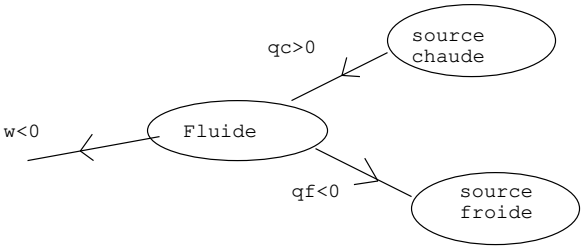
Les indices e désignent les grandeurs d'entrée du fluide.

s est l'entropie massique (dont l'expression doit être donnée dans un énoncé), $s_{echange} = \frac{q}{T_{ext}}$ et s_{cree} est positive pour une transformation irréversible ou nulle pour une transformation réversible.

11. Attention de ne pas confondre les questions : théorème de Carnot et rendement de Carnot. Quand on demande le rendement de Carnot, on cherche le rendement maximal et on sait que le rendement est maximal lorsque les transformations dans le cycle sont réversibles donc on a $S_c = 0$.

Premier principe appliqué au fluide sur un cycle: $\Delta U = 0 = W + Q_c + Q_f$

Second principe appliqué au fluide sur un cycle: $\Delta S = 0 = S_e + S_c$ avec $S_e = \dfrac{Q_c}{T_c} + \dfrac{Q_f}{T_f}$ et $S_c = 0$. On a donc $\dfrac{Q_c}{T_c} + \dfrac{Q_f}{T_f} = 0$.

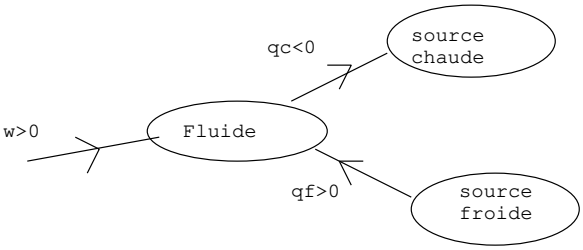


Le rendement d'un moteur est $r = \dfrac{-W}{Q_c} = \dfrac{Q_f + Q_c}{Q_c} = 1 + \dfrac{Q_f}{Q_c} = 1 - \dfrac{T_f}{T_c}$: c'est le rendement de Carnot, rendement maximal du moteur.

12. Quand on demande de démontrer le théorème de Carnot, on part de l'inégalité $S_c \geq 0$.

Premier principe appliqué au fluide sur un cycle: $\Delta U = 0 = W + Q_c + Q_f$

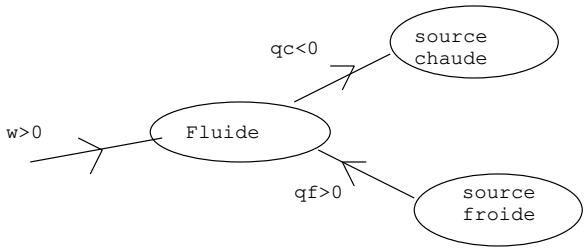
Second principe appliqué au fluide sur un cycle: $\Delta S = 0 = S_e + S_c$ avec $S_e = \dfrac{Q_c}{T_c} + \dfrac{Q_f}{T_f}$ et $S_c \geq 0$. On a donc $\dfrac{Q_c}{T_c} + \dfrac{Q_f}{T_f} \leq 0$.



L'efficacité de la PAC s'écrit $e = \dfrac{-Q_c}{W} = \dfrac{Q_c}{Q_c + Q_f} = \dfrac{1}{1 + \frac{Q_f}{Q_c}}$. L'inégalité de Clausius donne $\dfrac{Q_f}{T_f} \leq -\dfrac{Q_c}{T_c}$ on multiplie par $\dfrac{T_f}{Q_c}$ qui est négatif donc on a $\dfrac{Q_f}{Q_c} \geq -\dfrac{T_f}{T_c}$ d'où $e \leq \dfrac{1}{1 - \frac{T_f}{T_c}} = \dfrac{T_c}{T_c - T_f}$.

La source froide est l'air extérieur et la source chaude est l'intérieur de la maison.

13. La source froide est l'intérieur du réfrigérateur et la source chaude est l'air extérieur. L'efficacité d'une machine frigorifique est $e = \dfrac{Q_f}{W}$.

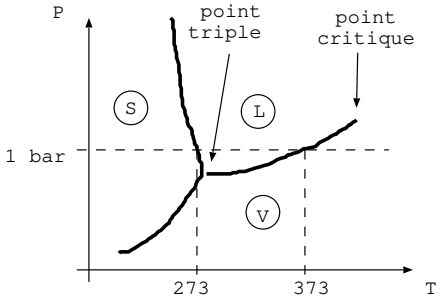


14. La transformation est supposée suffisamment rapide pour que le gaz n'ait pas le temps d'échanger du transfert thermique avec le milieu extérieur d'où l'hypothèse d'une transformation adiabatique.

Le gaz est supposé parfait en transformation adiabatique réversible, on peut appliquer les lois de Laplace: $P_1V_1^\gamma = P_2V_2^\gamma$ avec $V = \dfrac{nRT}{P}$ donne $P_1^{1-\gamma}T_1^\gamma = P_2^{1-\gamma}T_2^\gamma$ d'où $T_2 = T_1(\dfrac{P_1}{P_2})^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = 484\ K$.

On applique le premier principe industriel $D_m\Delta h = P_u + P_{th}$ ici $P_{th} = 0$ (adiabatique) et $\Delta h = c_p(T_2 - T_1)$ d'où $P_u = D_m c_p(T_2 - T_1) = 39,2\ kW$.

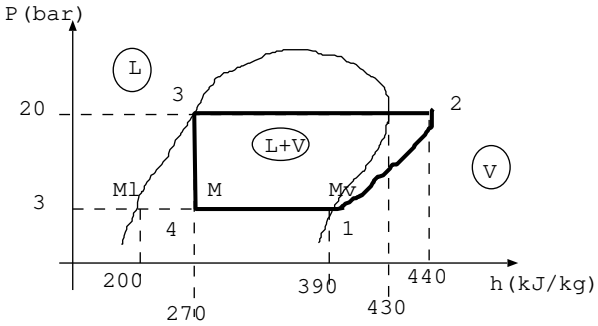
15. Le diagramme d'état du corps pur eau est:



V. **Correction : efficacité d'un réfrigérateur**

1. La détente $3-4$ est isenthalpique car dans le détendeur, il n'y a pas de pièce mobile donc pas de travail utile et le détendeur est adiabatique soit $\Delta h_{3-4} = w_{u,34} + q_{34} = 0$ d'après le premier principe industriel.

Dans le diagramme enthalpique, je commence par tracer la courbe de saturation composée de la courbe de rosée (tout vapeur avec une goutte de liquide, on place les points correspondants à la colonne h_l) et de la courbe d'ébullition (tout liquide avec une bulle de vapeur, on place les points correspondants à la colonne h_v).

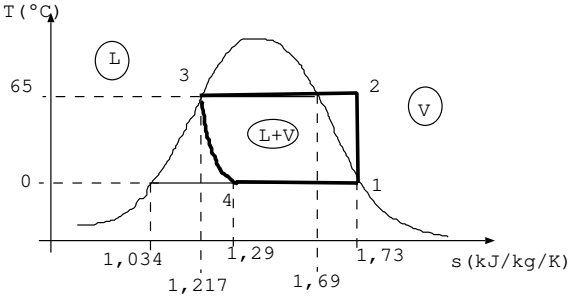


2. On applique les lois de Laplace pour le GP puisque la transformation est adiabatique réversible: $P_1V_1^\gamma = P_2V_2^\gamma$ avec $V = \dfrac{nRT}{P}$ donne $P_1^{1-\gamma}T_1^\gamma = P_2^{1-\gamma}T_2^\gamma$ d'où $T_2 = T_1(\dfrac{P_1}{P_2})^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = 514\ K$.

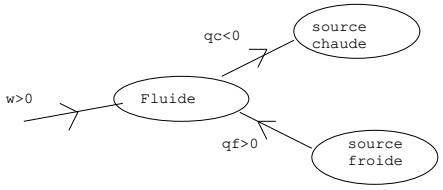
3. La transformation $3-4$ est isenthalpique donc $h_3 = h_4 = h_l(20\ bar)$. On applique le théorème des moments: $x_4 = \dfrac{M_lM}{M_lM_v} = \dfrac{h_l(20\ bar) - h_l(3\ bar)}{h_v(3\ bar) - h_l(3\ bar)} = 0,37$.

L'entropie massique dans l'état 4 s'écrit $s_4 = x_4 s_v(3\ bar) + (1-x_4)s_l(3\ bar) = 1,29\ kJ.kg^{-1}.K^{-1}$. Le second principe appliqué à la transformation $3-4$ donne $\Delta s_{34} = s_4 - s_3 = s_e + s_c$ avec $s_e = 0$ car la transformation est adiabatique et $s_c > 0$ car la détente est irréversible d'où $s_4 - s_3 > 0$.

4. Dans le diagramme entropique, je commence par tracer la courbe de saturation composée de la courbe de rosée (tout vapeur avec une goutte de liquide, on place les points correspondants à la colonne s_l) et de la courbe d'ébullition (tout liquide avec une bulle de vapeur, on place les points correspondants à la colonne s_v).



5. L'efficacité du réfrigérateur est définie par $e = \dfrac{energie\ valorisee}{energie\ couteuse} = \dfrac{q_f}{w} = \dfrac{q_{41}}{w_{u,12}}$ (le contact avec la source froide se fait dans le cycle dans la zone de plus basse température soit entre les états 4 et 1).



On applique le premier principe industriel à la transformation $1-2$ (on néglige les variations d'énergie cinétique et d'énergie potentielle) soit $h_2 - h_1 = w_{u,12} + q_{12} = w_{u,12}$ (car le compresseur est adiabatique). De plus dans l'état 1 le fluide est sur la courbe de rosée à 3 bar donc $h_1 = h_v(3\ bar) = 390\ kJ.kg^{-1}$. Ainsi $w_{u,12} = 440 - 390 = 50\ kJ.kg^{-1} > 0$: le compresseur fournit du travail au fluide pour le comprimer.

On applique le premier principe industriel à la transformation $4-1$ soit $h_1 - h_4 = w_{u,41} + q_{41} = q_{41}$ (il n'y a pas de pièce mobile dans le condenseur) soit $q_{41} = h_1 - h_4 = 390 - 270 = 120\ kJ.kg^{-1} > 0$: le fluide reçoit du transfert thermique de la source froide.

On en déduit l'efficacité $e = \dfrac{120}{50} = 2,4$.

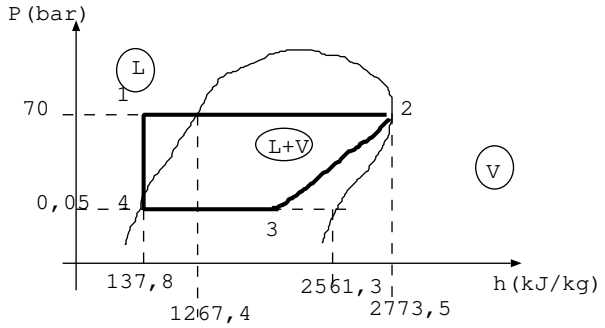
6. La puissance mécanique utile dans le compresseur s'écrit $P_u = D_m w_{u,12}$ soit $D_m = \dfrac{P_u}{w_{u,12}} = 2\ g.s^{-1}$.

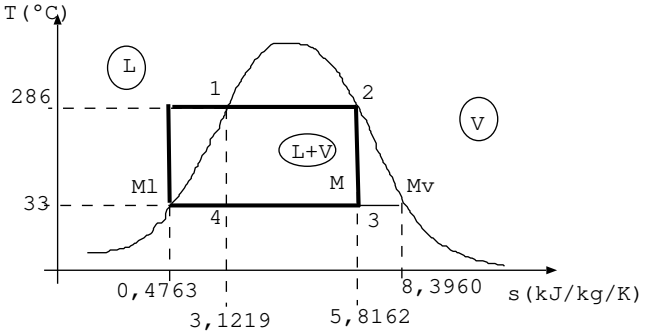
7. La source chaude reçoit du transfert thermique de la part du fluide, puisque le fluide subit une condensation, donc la source chaude doit être à une température inférieure à celle du fluide soit inférieure à 65^0C (la chaleur va du chaud, ici le fluide, vers le froid, ici la source chaude).

La source froide donne du transfert thermique au fluide, puisque le fluide subit une vaporisation lorsqu'il est en contact avec la source froide, donc la source froide doit être à une température supérieure à celle du fluide soit supérieure à 0^0C (la chaleur va du chaud, ici la source froide, vers le froid, ici le fluide).

VI. **Correction : Réacteur nucléaire**

1. Dans les diagrammes enthalpique et entropique, je commence par tracer la courbe de saturation composée de la courbe de rosée (tout vapeur avec une goutte de liquide, on place les points correspondants à la colonne h_l et s_l) et de la courbe d'ébullition (tout liquide avec une bulle de vapeur, on place les points correspondants à la colonne h_v et s_v). Pour le moment on ne connaît pas h_3, mais on voit sur le diagramme entropique que l'état 3 est un état liquide-vapeur, pour le moment je le place au hasard.





2. La transformation $2-3$ est isentropique soit $s_3 = s_2 = s_v(70\ bar)$ et on applique le théorème des moments : $x_3 = \dfrac{M_l M}{M_l M_v} = \dfrac{s_3 - s_l(0,05\ bar)}{s_v(0,05\ bar) - s_l(0,05\ bar)} = \dfrac{5,8162 - 0,4763}{8,3960 - 0,4763} = 0,67$.

On en déduit l'enthalpie $h_3 = x_3 h_v(0,05\ bar) + (1-x_3)h_l(0,05\ bar) = 1761,5\ kJ.kg^{-1}$

3. Cette machine est un moteur (on tourne dans le sens horaire dans les cycles), son rendement s'écrit $r = \dfrac{-w}{q_c} = \dfrac{-w_{u,23}}{q_{12}}$ en effet le fluide et en contact avec la source chaude pour la transformation $1-2$ (c'est au cours de cette transformation que la température du fluide est la plus élevée).

On applique le premier principe industriel pour la transformation adiabatique $2-3$ soit $h_3 - h_2 = w_{u,23} = h_3 - h_2 = 1761,5 - 2773,5 = -1012\ kJ.kg^{-1} < 0$: le fluide cède du travail au milieu extérieur.

On applique le premier principe industriel pour la transformation $1-2$ sans pièces mobiles soit $q_c = q_{12} = h_2 - h_1 = h_2 - h_4 = h_v(70\ bar) - h_l(0,05\ bar) = 2636\ kJ.kg^{-1} > 0$: le fluide reçoit de la chaleur de la part de la source chaude ($h_4 = h_1$ car $4-1$ est quasi isenthalpique).

Le rendement du moteur est $r = \dfrac{-w_u}{q_c} = 0,38$.

4. On a $P_T = 1000\ MW = -D_m w_{u,23}$ soit $D_m = \dfrac{P_T}{-w_{u,23}} = 1000\ kg.s^{-1}$.

5. On applique le premier principe au fluide pour un cycle: $\Delta U = 0 = W + Q_c + Q_f$ et le second principe au fluide pour un cycle: $\Delta S = 0 = \dfrac{Q_c}{T_c} + \dfrac{Q_f}{T_f} + S_c$ avec $S_c \geq 0$ donc $\dfrac{Q_c}{T_c} + \dfrac{Q_f}{T_f} \leq 0$.

On écrit le rendement $r = \dfrac{-W}{Q_c} = \dfrac{Q_c + Q_f}{Q_c} = 1 + \dfrac{Q_f}{Q_c} \leq 1 - \dfrac{T_f}{T_c} = 1 - \dfrac{33+273}{286+273} = 0,45$: le rendement de Carnot est supérieur au rendement du réacteur car dans le réacteur il y a des irréversibilités, par exemple de la diffusion thermique, du chaud vers le froid.