

DS 4 de physique

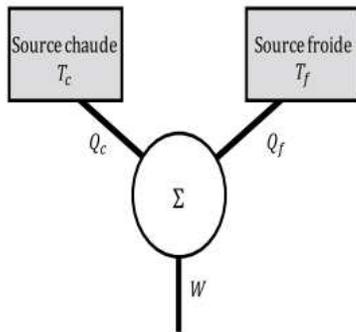
Le sujet comprend trois problèmes à traiter dans l'ordre de votre choix. Il est demandé de numéroter les pages au format i/N où i est le numéro de la page et N le nombre de pages.

Tous les résultats doivent être encadrés et justifiés. Quand vous utilisez une loi il faut donner le nom de la loi et préciser les hypothèses d'application.

I. Etude d'un réfrigérateur

Modélisation d'une machine ditherme

On représente schématiquement une machine ditherme ci-après:



On note:

Σ : le fluide thermodynamique caloporteur ou frigorigène

Q_c : le transfert thermique échangé par Σ avec la source chaude de température T_c , au cours d'un cycle

Q_f : le transfert thermique échangé par Σ avec la source froide de température T_f , au cours d'un cycle

W : le travail échangé par Σ avec l'extérieur au cours d'un cycle

Ces grandeurs sont algébriques, leur signe est positif lorsqu'elles sont effectivement reçues par le système Σ .

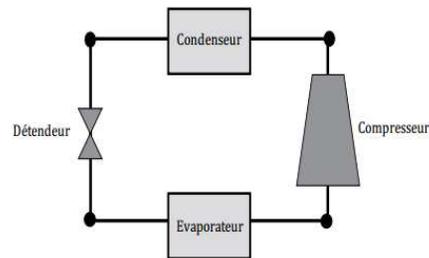
1. Indiquer les signes de W , Q_c et Q_f lorsque la machine fonctionne en réfrigérateur en justifiant votre réponse.
2. Définir l'efficacité de ce réfrigérateur notée e_f et montrer qu'elle est majorée par une efficacité maximale notée $e_{f,max}$ dont on établira l'expression en fonction de T_c et T_f .

Etude d'un cycle réfrigérant à compression de vapeur

1 ci-contre:

Nous nous proposons d'étudier un cycle à compression de vapeur utilisé dans un réfrigérateur. La source chaude est la cuisine de température T_c , la source froide est l'armoire du réfrigérateur et on contenu de température T_f .

Le fluide frigorigène décrit le cycle donné sur la figure



Il y subit les transformations suivantes:

- De l'état 4 à l'état 1 : évaporation à $T_{evap} = 0^\circ\text{C}$ puis surchauffe isobare jusqu'à 10°C .
- De l'état 1 à l'état 2 : compression adiabatique dans le compresseur.
- De l'état 2 à l'état 3 : refroidissement isobare, liquéfaction isobare à $T_{cond} = 40^\circ\text{C}$ puis sous-refroidissement du liquide jusqu'à 30°C
- De l'état 3 à l'état 4 : détente isenthalpique du fluide.

On note respectivement h_i , s_i , P_i , T_i , l'enthalpie massique, l'entropie massique, la pression et la température dans l'état i .

Entre les états i et j , on note respectivement Δh_{ij} , q_{ij} et $w_{u,ij}$, la variation d'enthalpie massique, le transfert thermique massique et le travail utile massique échangés par le fluide avec le milieu extérieur.

3. Compléter l'annexe 1 en ajoutant les points correspondants aux états 1 à 4. Positionner les source chaude et froide. Indiquer par une flèche le sens du transfert thermique entre les sources et le fluide à la traversée de l'évaporateur et du condenseur.

Dans un premier temps on suppose que la compression est **adiabatique et réversible**. Elle conduit alors le fluide de l'état 1 à un état noté 2s.

4. Placer les points correspondants aux états 1, 2s, 3 et 4 dans les diagrammes $P(h)$ et $T(s)$ du fluide R134a en annexe (figures 2a et 2b). Remarque: le point 2' déjà placé sur le diagramme sert plus tard, il n'est pas utile pour cette question. Compléter le tableau en annexe 2 pour les colonnes concernant les points 1, 2s, 3 et 4.

5. Justifier que l'on ait choisi $T_{evap} \leq T_f$ et $T_{cond} \geq T_c$.

6. Rappeler la deuxième loi de Joule et déduire du diagramme (P, h) si la vapeur entre les états 1 et 2s peut être assimilée à un gaz parfait.

Cycle avec compression non réversible

La compression n'est pas réversible. Le compresseur est caractérisé par son rendement défini par $\eta = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$ avec $\eta = 0,75$.

Le cycle étudié est désormais $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1$.

7. Déduire de η , la valeur numérique de h_2 , placer le point 2 sur les diagrammes $P(h)$ et $T(s)$ et compléter la colonne 2 du tableau en annexe 2. Tracer le cycle $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1$ dans les diagrammes $P(h)$ et $T(s)$.

8. On observe graphiquement que $s_2 > s_{2s}$. Justifier physiquement.

9. Rappeler l'expression du premier principe industriel exprimé en $J.kg^{-1}$. Justifier que l'on puisse négliger les variations d'énergie potentielle de pesanteur devant les variations d'enthalpie dans un réfrigérateur domestique (l'altitude ne varie que de 1 mètre).

10. Par une analyse dimensionnelle, exprimer le débit massique en fonction de la section S de la canalisation, de la vitesse c du fluide et de son volumique massique v . En quel point du cycle, le volume massique est-il maximal? Données: $S = 1 \text{ cm}^2$, $v_{max} = 7.10^{-2} \text{ m}^3.kg^{-1}$ et $D = 1.10^{-2} \text{ kh.s}^{-1}$, calculer c_{max} , la vitesse maximale du fluide dans le cycle. Justifier que l'on puisse négliger les variations d'énergie cinétique massique du fluide devant ses variations d'enthalpie.

11. Montrer que l'on peut exprimer l'efficacité du réfrigérateur en fonction des enthalpies massiques aux différents points du cycle $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1$. Calculer l'efficacité.

12. Déterminer la puissance thermique P_{th} extraite de la source froide et la puissance P du compresseur pour $D = 1.10^{-2} \text{ kh.s}^{-1}$.

13. Montrer que le sous refroidissement du liquide après liquéfaction permet d'augmenter l'efficacité.

Association réfrigérateur-congélateur

La plupart des réfrigérateurs domestiques sont associés à un congélateur. Pour réaliser ce dispositif on peut modifier le cycle à compression précédent en faisant passer le fluide dans deux évaporateurs successifs. Le cycle modifié est décrit ci-dessous. L'état 4 est celui de la partie précédente.

De l'état 4 à l'état 4' : vaporisation isobare partielle dans le premier évaporateur (étape 4→4') au contact de l'intérieur du réfrigérateur

De l'état 4' à l'état 4'' : détente isenthalpique jusqu'à -20°C

De l'état 4'' à l'état 1' : évaporation à -20°C dans le second évaporateur puis surchauffe isobare jusqu'à 0°C . Ces étapes se font au contact de l'intérieur du congélateur.

De l'état 1' à l'état 2' : compression

De l'état 2' à l'état 3 : refroidissement, liquéfaction et sous-refroidissement isobares.

De l'état 3 à l'état 4 : détente isenthalpique

14. On souhaite que la puissance thermique extraite au cours de l'étape $4 \rightarrow 4'$ soit la même que celle extraite au cours de l'étape $4'' \rightarrow 1$. Montrer que $h_{4'} = 325 \text{ kJ.kg}^{-1}$.

15. Sur le diagramme $P(h)$ placer les points 1', 4' et 4''. En utilisant le point 2' déjà placé, tracer d'une autre couleur que précédemment, le cycle $3 \rightarrow 4 \rightarrow 4' \rightarrow 4'' \rightarrow 1' \rightarrow 2' \rightarrow 3$.

16. Calculer les fractions massiques en vapeur $x_{4'}$ et $x_{4''}$. Comment évolue la proportion de vapeur au cours de l'étape $4' \rightarrow 4''$?

17. Calculer l'efficacité globale de l'ensemble réfrigérateur congélateur.

Utilisation du réfrigérateur

On s'intéresse dans cette partie à l'évolution de la température $T(t)$ au cours du temps dans le réfrigérateur. La source chaude est la cuisine de température T_c dans laquelle est installée le réfrigérateur.

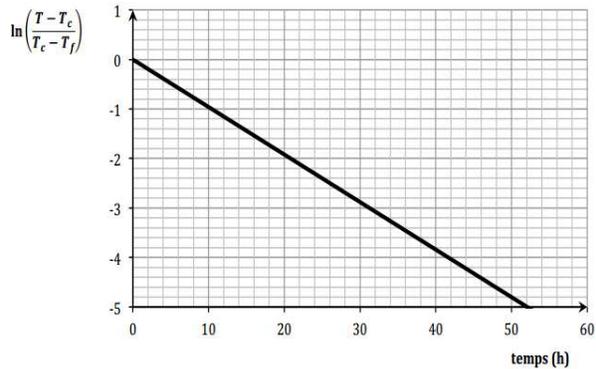
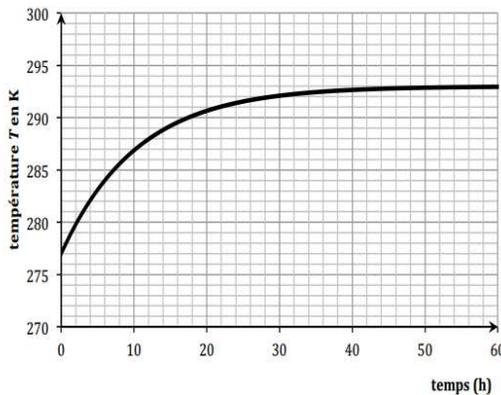
La capacité thermique de l'intérieur du réfrigérateur est $C = 3.10^5 \text{ J.K}^{-1}$.

18. Pour évaluer les pertes thermiques du réfrigérateur, on le débranche à l'instant $t = 0$. La température initiale du réfrigérateur est T_f . La puissance thermique reçue par l'intérieur du réfrigérateur à travers ses parois est modélisée par $P_{th} = \lambda(T_c - T)$ où λ est une constante.

18.a. Préciser le signe de λ et son unité.

18.b. Montrer par application du premier principe de la thermodynamique au système fermé constitué de l'intérieur du réfrigérateur entre les instants t et $t + dt$, que $T(t)$ vérifie l'équation différentielle: $\frac{dT}{dt} + \frac{\lambda}{C}T = \frac{\lambda}{C}T_c$. En déduire $T(t)$.

18.c. On donne les courbes $T(t)$ et $\ln\left(\frac{T - T_c}{T_f - T_c}\right)$ en fonction du temps. Déduire de ces courbes les valeurs numériques de T_c , T_f et λ .



19. Le rapport K entre l'efficacité réelle du réfrigérateur et son efficacité maximale est supposé constant au cours du temps et égal à 0,25. On étudie dans cette question le régime stationnaire. Le réfrigérateur est branché depuis longtemps et sa température est constante, égale à T_f .

19.a. Calculer l'efficacité réelle du réfrigérateur.

19.b. Calculer la puissance thermique P_{th} des fuites.

19.c. Calculer la puissance P_c nécessaire pour compenser les fuites.

II. Etude d'un turboréacteur

Le turboréacteur fonctionne selon le cycle théorique ouvert de Brayton. Les conditions d'étude de ce cycle sont les suivantes :

- l'air est considéré comme un gaz parfait. Sa capacité thermique massique à pression constante c_p est supposée constante, comme le rapport γ entre les capacités thermiques isobare et isochore. On prendra $\gamma = 1,35$ et $c_p = 1,1 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

- les variations d'énergie potentielle sont négligeables

- l'énergie cinétique est supposée négligeable entre l'entrée du compresseur et la sortie de la turbine soit dans les états 2,3,4 et 5.

En entrée du diffuseur, l'air est à l'état (1) : ($P_1 = 34,5 \text{ kPa}$, $T_1 = 233 \text{ K}$) avec une vitesse $v_1 = 260 \text{ m.s}^{-1}$. On considère que le diffuseur est idéal, ce qui revient à dire que l'énergie cinétique du gaz après traversée du diffuseur est négligeable devant les autres termes énergétiques et que la traversée du diffuseur est adiabatique et réversible.

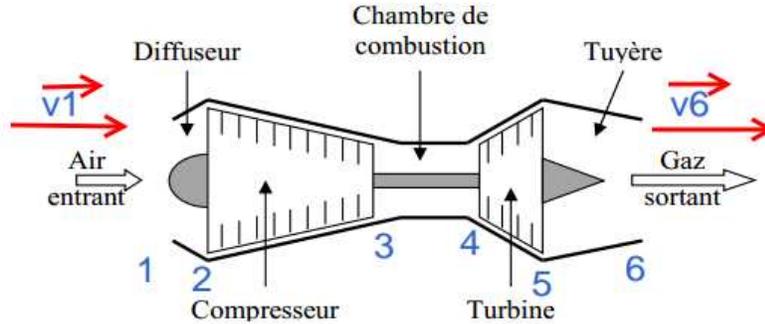
En entrée du compresseur, l'air se trouve à l'état (2) : (P_2, T_2) et est amené à l'état (3) : $(P_3 = 10P_2, T_3)$ par une compression adiabatique réversible.

Dans la chambre de combustion, l'air, mélangé au carburant, subit un échauffement isobare réversible jusqu'à l'état (4) : $(P_4, T_4 = 1400 K)$. Bien que les compositions du gaz à l'entrée et à la sortie de la chambre de combustion soient différentes, pour simplifier la modélisation, on suppose que celle-ci sert uniquement à réchauffer l'air et que les propriétés de l'air ne sont pas modifiées par ce changement de composition.

L'air parvient alors dans la turbine où il subit une détente adiabatique réversible jusqu'à l'état (5) : (P_5, T_5) .

Enfin, il se détend de façon adiabatique et réversible dans la tuyère et arrive dans l'état (6) : (P_6, T_6) .

L'air entre dans le compresseur avec un débit massique $D_m = 45 \text{ kg.s}^{-1}$.



On rappelle que l'expression du premier principe pour une masse $m = 1 \text{ kg}$ de fluide en écoulement au travers d'une machine est : $\Delta h + \frac{\Delta v^2}{2} + g\Delta z = w_u + q$.

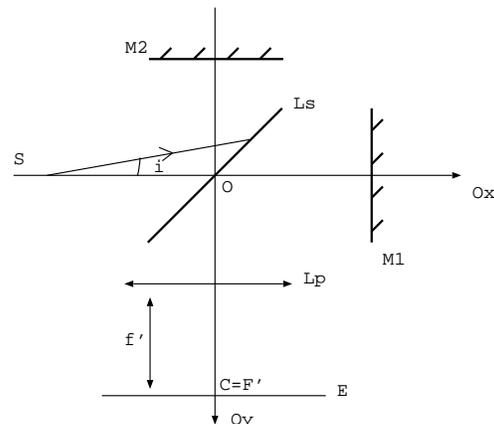
1. Donner la signification de chaque terme de cette équation.
2. Donner l'expression de la température T_2 en fonction de T_1 , v_1 et c_p . Effectuer l'application numérique.
3. Donner l'expression de la pression P_2 en fonction de P_1 , T_1 , T_2 et γ . Effectuer l'application numérique.
4. Établir l'expression du travail massique utile w_{comp} fourni à l'air par le compresseur. En prenant $T_3 = 480 K$, calculer la puissance P_{comp} de ce dernier.
5. Sachant que le travail fourni par la détente du gaz dans la turbine est intégralement reçu par le compresseur, déterminer l'expression de la température T_5 en fonction de T_2 , T_3 et T_4 . Calculer la valeur de T_5 . En déduire la valeur de la pression P_5 .
6. Donner l'expression de la vitesse v_6 de sortie du gaz en sortie de tuyère en fonction de T_5 , T_6 et c_p . Calculer la valeur de v_6 sachant que $T_6 = 680 K$.

On admet que la puissance liée à la force propulsive est $P_{prop} = D_m(v_6 - v_1)v_1$.

7. Définir et calculer le rendement r du turboréacteur. Donnée: la puissance qui sert à chauffer le gaz dans la chambre de combustion est $P_{chamb} = 45,5 \text{ MW}$.

III. Interféromètre de Michelson

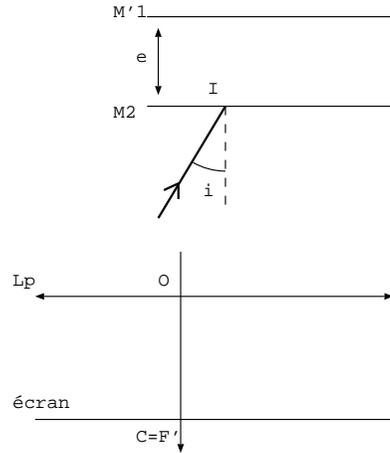
On donne le schéma de principe d'un interféromètre de Michelson réglé en lame d'air. On note Ox et Oy deux axes perpendiculaires définissant les directions des deux bras de l'interféromètre. S est une source lumineuse ponctuelle située sur Ox . $M1$ et $M2$ sont deux miroirs plans parfaitement réfléchissants, disposés perpendiculairement à Ox et Oy . Le trait incliné à 45° , noté Ls , schématise la lame séparatrice et la compensatrice. Lp désigne une lentille mince convergente placée à la sortie de l'interféromètre de manière à ce que son axe optique soit confondu avec l'axe Oy . Un écran E est placé dans le plan focal image de Lp de focale f' . On note C le centre de l'écran confondu avec le foyer image de Lp .



Dans un premier temps l'interféromètre de Michelson est réglé en lame d'air.

1. On note M'_1 l'image du miroir M_1 par la séparatrice et e l'épaisseur de la lame d'air formée par les miroirs M'_1 et M_2 . Reproduire sur votre copie le schéma suivant et le compléter en traçant les rayons réfléchis sur M_2 et M'_1 et leur trajet jusqu'au point M de l'écran. Montrer que la différence de marche entre les deux rayons s'écrit $\delta_{1/2}(M) = (IM)_1 - (IM)_2 = 2e \cos i$ (on désigne par l'indice 1 le rayon réfléchi sur M'_1 et par l'indice 2 le rayon réfléchi sur M_2).

Donnée: $\cos(2i) + 1 = 2 \cos^2 i$.



On place un détecteur en C , au centre de l'écran. Ce détecteur délivre un signal proportionnel à l'intensité lumineuse. A partir de l'instant $t = 0$ où le Michelson est au contact optique, on chariote le miroir mobile M_1 à la vitesse $v = 250 \text{ nm.s}^{-1}$ selon $+Ox$.

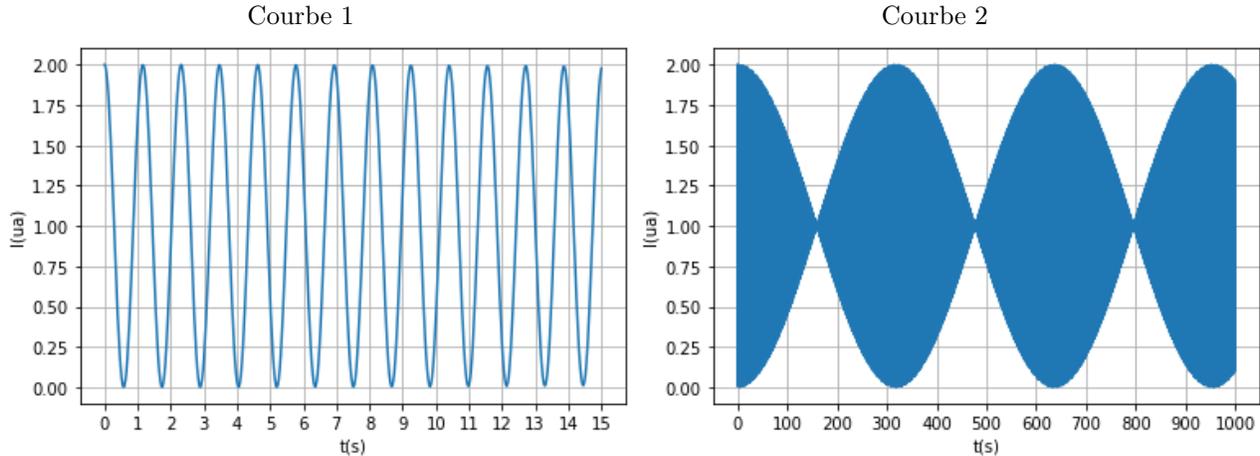
2. Dans cette question la source est monochromatique de longueur d'onde $\lambda = 632 \text{ nm}$. On se place à l'instant $t_1 = 5 \text{ minutes}$. Calculer l'épaisseur de la lame d'air. L'écran est un carré de côté a . Combien voit-on d'anneaux brillants? Calculer le rayon du 3 ième anneau brillant. Données: $f' = 50 \text{ cm}$, $a = 20 \text{ cm}$ et on se place dans l'approximation des petits angles.

3. On place maintenant un détecteur en C , au centre de l'écran. Le Michelson est éclairé par le doublet du mercure de longueurs d'onde très proches notées λ_1 et $\lambda_2 > \lambda_1$. On note λ_m la longueur d'onde moyenne associée à ce doublet et $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$.

3.a. On définit p_m comme étant l'ordre d'interférences au centre de l'écran pour la longueur d'onde moyenne λ_m . Exprimer p_m en fonction de λ_m , v et le temps t . En déduire les instants pour lesquels le centre de l'écran est sur une frange brillante.

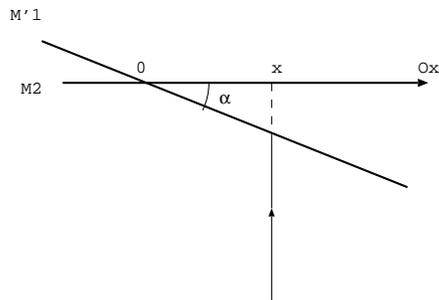
3.b. En présence du doublet, quand on chariote le miroir, on observe le phénomène de brouillage. Expliquer ce phénomène et montrer que les temps pour lesquels on observe un brouillage sont de la forme $t_k = (k + \frac{1}{2}) \frac{\lambda_m^2}{2v\Delta\lambda}$ où k est un entier.

3.c. On donne les courbes intensité (en unité arbitraire notée ua) en fonction du temps sur deux échelles de temps différentes (la courbe 1 est un zoom de la courbe 2 sur un intervalle de temps très court). Commenter les courbes et en déduire, les valeurs numériques de λ_m et de $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$.



4. Dans cette question l'interféromètre de Michelson est réglé en coin d'air. On note M'_1 l'image de M_1 par la séparatrice et on donne le schéma du coin d'air.

4.a. Reproduire le schéma ci-contre, et représenter les deux rayons qui interfèrent, montrer que la différence de marche s'écrit $\delta_{2/1}(M) = 2\alpha x$ (dans l'approximation des petits angles) et en déduire l'interfrange.



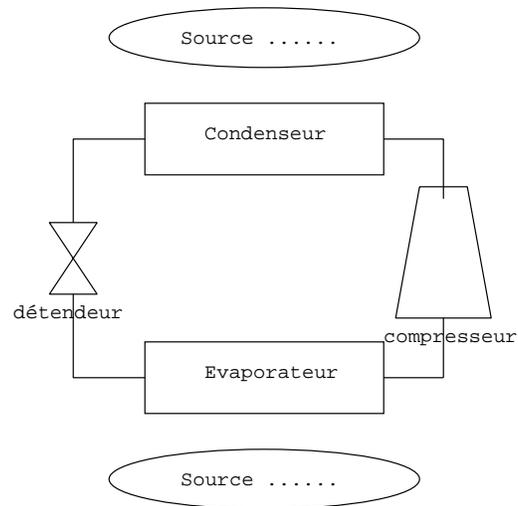
4.b. La source est monochromatique de longueur d'onde λ . On observe les franges d'interférences sur un écran à l'aide d'une lentille de focale image $f' = 30 \text{ cm}$ placée à 40 cm du miroir M_2 . On mesure sur l'écran un interfrange $i_e = 1,5 \text{ cm}$. Calculer la distance entre la lentille et l'écran. Calculer l'angle α du coin d'air. Donnée: $\lambda = 632 \text{ nm}$.

On rappelle: $\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f'}$ et $\gamma = \frac{OA'}{OA}$.

4.c. On observe les interférences en lumière blanche ($\lambda_{min} = 400 \text{ nm}$ et $\lambda_{max} = 800 \text{ nm}$). On observe le spectre en un point M de l'écran qui correspond au point d'abscisse $x = 2,3 \text{ cm}$ sur le miroir (schéma ci-dessus). Ce spectre présente des cannelures. Expliquer le phénomène et calculer le nombre de cannelures présentes. Donnée: $\alpha = 6,32 \cdot 10^{-5} \text{ rad}$.

NOM:

Annexe 1:



Annexe 2:

| Point | 1 | 2s | 2 | 3 | 4 | 1' | 2' |
|-----------------------|---|----|---|---|---|----|--------------|
| $P(\text{bar})$ | | | | | | | 10 |
| $T(^{\circ}\text{C})$ | | | | | | | 80 |
| Etat du fluide | | | | | | | Vapeur sèche |
| (kJ.kg^{-1}) | | | | | | | 465 |