

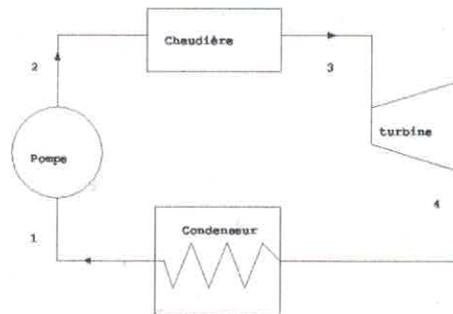
## DS 4 de physique

Le sujet comprend plusieurs 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 total de pages. Le document réponse est à rendre avec la copie. Tout résultat non justifié ne sera pas pris en compte.

### I. Etude d'une centrale vapeur

Le principe de la cogénération au gaz naturel est de produire à la fois de l'électricité et de l'eau chaude. On utilise pour cela une centrale à vapeur et on récupère de l'énergie mécanique dans sa turbine et de l'énergie thermique au niveau du condenseur. On s'intéresse dans un premier temps au fonctionnement général d'une telle centrale sans prendre en compte la valorisation de l'énergie dissipée dans le condenseur. La dernière question étudie la récupération d'énergie thermique.

Le cycle de base d'une centrale à vapeur parcouru par de l'eau est schématisé ci-contre. Il consiste essentiellement en une chaudière où le combustible est brûlé générant ainsi de la vapeur d'eau surchauffée ( $2 \rightarrow 3$ ) qui est ensuite détendue dans une turbine à vapeur dont l'arbre fournit le travail moteur ( $3 \rightarrow 4$ ). La vapeur d'eau sortant de la turbine est totalement liquéfiée dans un condenseur ( $4 \rightarrow 1$ ) avant qu'une pompe ne lui redonne la pression de chaudière ( $1 \rightarrow 2$ ). Le refroidissement du condenseur est assuré par une source froide externe.



On supposera les transformations subies par le système dans la turbine et dans la pompe comme étant adiabatique et réversible. On négligera le travail de la pompe devant le travail de la turbine :  $|W_p| \ll |W_t|$ .

Le fluide est en écoulement stationnaire avec un débit massique  $D_m = 1 \text{ kg.s}^{-1}$ . On négligera les variations de vitesse et d'altitude du fluide.

#### Description du cycle thermodynamique

On considère que le fluide circulant au cours d'un cycle reçoit les transferts thermiques  $Q_c$  et  $Q_f$  respectivement des sources chaude de température  $T_c$  et froide de température  $T_f$  ainsi que le travail mécanique de la turbine  $W_t$ .

1. Préciser, en justifiant, les signes de  $Q_c$ ,  $Q_f$  et  $W_t$ .
2. Définir le rendement  $\tau$  et l'exprimer en fonction de  $T_f$ ,  $T_c$ ,  $Q_c$  et  $S_c$ , l'entropie créée au cours d'un cycle.
3. En déduire l'expression du rendement de Carnot  $\tau_c$ . Effectuer l'application numérique avec  $T_f = 50^\circ\text{C}$  et  $T_c = 230^\circ\text{C}$ .

#### Diagramme des frigoristes

4. Sur le diagramme enthalpique donnant  $\log(P)$  en fonction de  $h$  (document réponse), ajouter les domaines d'existence de la vapeur, du liquide et de l'équilibre liquide-vapeur, ainsi que les courbes de rosée et d'ébullition.

4.a. Mesurer  $l_{vap}(110^\circ\text{C})$  l'enthalpie massique de vaporisation de l'eau à  $110^\circ\text{C}$ .

4.b. L'eau est comprimé de l'état initial ( $P_i = 0,1 \text{ bar}$ ,  $T_i = 190^\circ\text{C}$ ) à l'état final ( $P_f = 1,0 \text{ bar}$ ,  $T_f$ ). La compression est supposée adiabatique réversible. Lire la température  $T_f$ . Vérifier que ce résultat est compatible avec l'hypothèse selon laquelle la vapeur d'eau se comporte comme un gaz parfait de coefficient  $\gamma = 1,3$ .

Le cycle décrit par l'eau dans la centrale vapeur est telle que:

- Au point 1 en sortie de condenseur, l'eau est à l'état liquide saturant, sous une faible pression à la température  $T_f = 50^\circ\text{C}$ .
- La pompe ( $1 \rightarrow 2$ ) comprime l'eau à environ  $30 \text{ bar}$ . La température reste sensiblement constante pendant cette compression. Le point 2 se situe à l'intersection de l'isotherme  $T = 50^\circ\text{C}$  et de l'isobare  $P = 30 \text{ bar}$ .
- Dans la chaudière ( $2 \rightarrow 3$ ), l'eau sous pression est portée à haute température, l'échauffement comportant

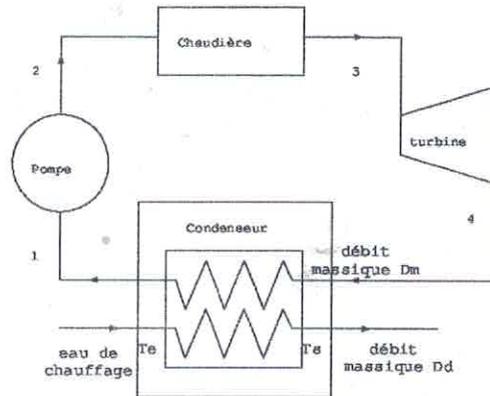
les deux étapes: chauffage du liquide à pression constante puis évaporation de l'eau jusqu'à la dernière goutte de liquide.

- L'évolution dans la turbine (3 → 4) est modélisée par une détente adiabatique réversible.

5. Compléter le diagramme enthalpique donnant  $\log(P)$ , en fonction de  $h$  (document réponse), en représentant le cycle parcouru par le fluide et en indiquant les étapes 1, 2, 3 et 4.
6. Calculer le transfert thermique massique  $q_c$  reçu par le fluide dans la chaudière.
7. Calculer le travail utile massique  $w_t$  reçu de la part de la turbine.
8. Justifier la légitimité de l'hypothèse  $|W_p| \ll |W_t|$ .
9. Préciser la nature de la transformation (4 → 1).
10. Établir l'expression de la fraction massique de vapeur  $x_{v,4}$  au point 4 en fonction de  $h_1$ ,  $h_4$  et  $l_{vap}(T_f)$  (l'enthalpie massique de vaporisation à la température  $T_f$ ). Faire l'application numérique.
11. Calculer la variation d'entropie massique et l'entropie massique créée au cours de la transformation (4 → 1). On suppose que la source froide a pour température  $T_f = 50^\circ\text{C}$ . Conclure.
12. Quelle puissance mécanique  $P_t$  reçoit la turbine ? Faire l'application numérique.

### Récupération de l'énergie thermique

On s'intéresse ici à l'énergie thermique que l'on peut récupérer au niveau du condenseur afin de produire de l'eau chaude pour alimenter une installation de chauffage domestique. Le condenseur est un échangeur thermique que l'on suppose parfaitement calorifugé. On suppose les fluides en écoulement stationnaire. On puise l'eau de chauffage domestique à la température  $T_e = 5^\circ\text{C}$ , avec un débit  $D_d$ . Elle ressort de l'échangeur à la température  $T_s = 50^\circ\text{C}$ .



13. Calculer la puissance thermique reçue par l'eau de chauffage domestique  $P_d$
14. Calculer le débit massique  $D_d$  que doit posséder l'eau de chauffage domestique. On donne la capacité thermique massique de l'eau liquide  $c_{eau} = 4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .
15. Exprimer puis calculer  $\epsilon$ , l'efficacité de la machine utilisant le principe de cogénération. Commenter.

## II Interféromètre de Michelson et épaisseur d'une lame de savon

Le but de cette partie est de quantifier, par l'étude de la figure d'interférence à la surface d'une lame de savon, l'écart que présente celle-ci à un écoulement rigoureusement plan. On procédera par analogie avec la figure d'interférence obtenue à l'aide d'un interféromètre Michelson réglé en coin d'air.

I.A - On considère un interféromètre de Michelson dans lequel l'ensemble {lame séparatrice + compensatrice} est assimilé à une unique lame semi-réfléchissante d'épaisseur négligeable. On la note par la suite lame séparatrice ( $L$ ).

L'interféromètre, éclairé par une source étendue monochromatique de longueur d'onde dans le vide  $\lambda_0$  est réglé comme schématisé sur la figure 2 : les deux bras sont dissymétriques du fait de la position relative des miroirs :  $M_1$  est parallèle à  $(J, x)$  et  $M_2$  est parallèle à  $(J, y)$  mais ils ne sont pas à égale distance de  $J$ . On considère que les deux ondes qui émergent de l'interféromètre vers l'espace d'observation ont le même éclairement  $I_0$ .

Q 1. Sur la figure A du document réponse, à rendre avec la copie, tracer avec soin les deux rayons issus du rayon incident qui émergent de l'interféromètre dans l'espace d'observation. Sur le même schéma, dans l'espace réservé à cet effet, montrer graphiquement que l'on peut considérer que ces deux rayons sont issus d'une « lame d'air » d'épaisseur  $e$  que l'on représentera. On supposera que l'indice de l'air est égal à 1.

Q 2. Établir la différence de marche introduite par le système en fonction de l'angle d'incidence  $\theta$  sur cette lame et de son épaisseur  $e$ .

Donnée :  $\cos 2\theta = 2\cos^2\theta - 1$

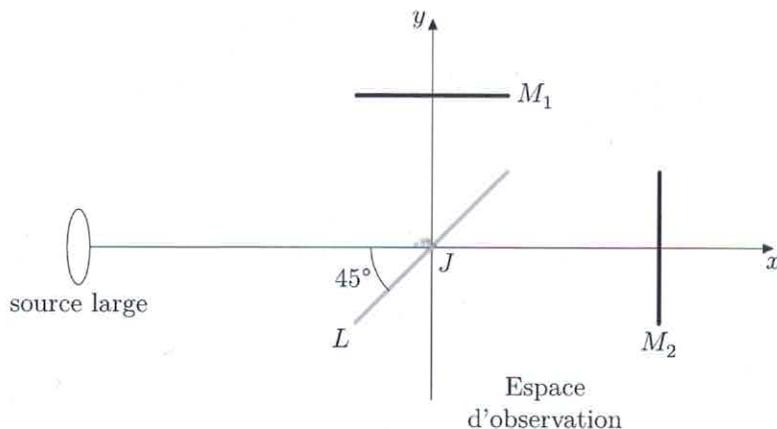


Figure 2 Schéma de l'interféromètre éclairé par une source large

Q 3. Où est localisée la figure d'interférence ? Comment l'observer dans de bonnes conditions si l'on dispose d'un jeu complet de lentilles convergentes de distances focales comprises entre 20 cm et 1 m ? Un schéma clair de la situation expérimentale correspondante est attendu.

Q 4. Montrer que la figure d'interférence est formée d'anneaux d'égale inclinaison (justifier ce terme). On observe sur l'écran la figure d'interférence présentée figure 3.

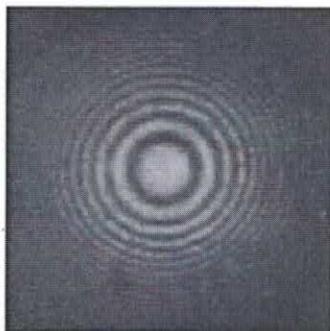


Figure 3 Figure d'interférence : anneaux d'égale inclinaison

On souhaite maintenant régler l'appareil au contact optique.

Q 5. Décrire l'opération : faut-il tourner ou translater un miroir ? Comment savoir dans quel sens ? Décrire l'évolution de la figure d'interférence au cours de l'opération. Quel est l'aspect de l'éclairement sur l'écran une fois ce réglage réalisé ?

Q 6. Partant de cette situation on incline un des miroirs d'un petit angle  $\alpha$  pour former un coin d'air. On éclaire le système en incidence quasi-normale de telle sorte que l'on observe des franges d'interférences rectilignes parallèles entre elles. Où sont-elles localisées ? Préciser les conditions de leur observation.

Q 7. On admet que la différence de marche introduite par le coin d'air en un point  $M$  de la surface de localisation situé à une distance  $x$  de l'arête commune des deux miroirs est  $\delta(M) \approx \pm 2n\alpha x$  avec  $n = 1$ . Déterminer l'interfrange  $i$  sur la surface de localisation, en fonction de  $\alpha$  et  $\lambda_0$ . Comment évolue la figure d'interférence si l'angle  $\alpha$  varie ?

I.B – Une lame de savon est constituée d'une mince couche d'eau entourée de part et d'autre par une couche de savon. Cette configuration est due aux tensio-actifs contenus dans le savon. Ces molécules sont constituées de deux parties distinctes : une tête hydrophile, généralement ionique, et une queue hydrophobe, généralement constituée d'une chaîne carbonée (figure 4).

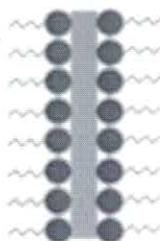


Figure 4

Cette propriété amène ainsi les tensio-actifs à se concentrer et à se fixer les uns aux autres aux interfaces entre l'eau et l'air. En éclairage monochromatique, cette lame fait apparaître des franges d'interférence (figure 5), dont l'interfrange diminue vers le bas de la lame. Ces franges sont liées à un phénomène d'interférence se produisant sur une couche mince. On suppose ici que l'indice de cette fine couche est  $n \approx 1,4$ . L'épaisseur de cette couche est variable de haut en bas sans dépasser une épaisseur maximum d'environ  $1 \mu\text{m}$ . La masse volumique et la viscosité du liquide savonneux sont pris égaux à ceux de l'eau.

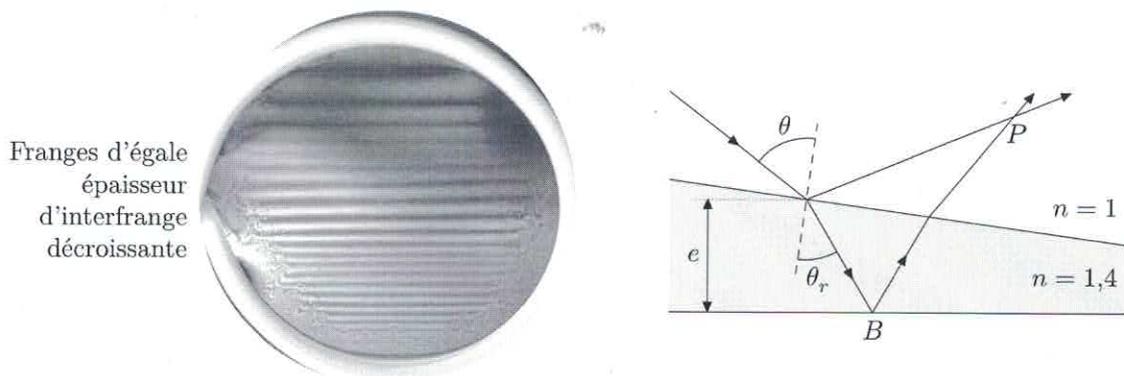


Figure 5 Interférences sur le film (à gauche) et modélisation des rayons lumineux (à droite)

Le trajet d'un rayon lumineux arrivant sous incidence  $\theta$  sur une lame d'indice  $n$  et d'épaisseur locale  $e$ , doit tenir compte du phénomène de réfraction à l'intérieur de la lame. On note  $\theta_r$ , l'angle de réfraction et  $\theta$  l'angle d'incidence. Une division d'amplitude se produit sur la face avant, suivie d'une réflexion sur la face arrière, produisant deux rayons réfléchis par la lame qui interfèrent au point  $P$ . On admet que la réflexion sur un milieu plus réfringent s'accompagne d'un déphasage de  $\pi$ .

Q 8. Justifier qu'en incidence quasi-normale, le déphasage entre les deux ondes qui interfèrent peut s'écrire

$$\Delta\phi = 2 \frac{\pi}{\lambda_0} \left( 2ne + \frac{\lambda_0}{2} \right).$$

En l'absence de perturbation extérieures (telles que celles qui seront abordées par la suite) la lame n'est le siège que de son écoulement gravitaire (du haut vers le bas sous l'effet de la gravité). Dans le cadre d'un modèle simplifié, dit d'interface sans interaction, la pression  $P$  au sein du fluide en écoulement gravitaire entre l'interface de tensioactifs est supposée uniforme. Le phénomène de drainage des tensioactifs est alors négligé. L'axe ( $Oz$ ) sera pris vertical ascendant. La figure 6 présente la figure d'interférence observée sur un film de savon, ainsi que les notations introduites.

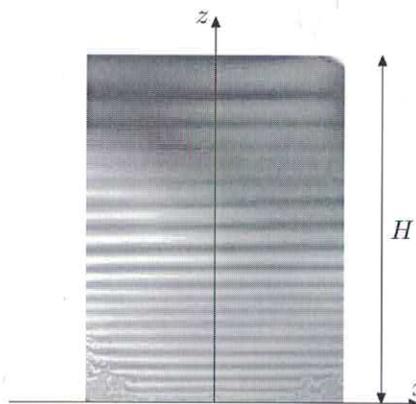


Figure 6 Vue de face de la lame de savon

On note  $H = 5,0 \text{ cm}$  la hauteur de la lame de savon. On note  $e(z, t)$  l'épaisseur de la lame, dans la direction ( $Oy$ ), à l'altitude  $z$  et à l'instant  $t$ . Du fait de l'écoulement de drainage gravitaire, cette épaisseur varie au cours du temps à  $z$  fixé et à  $t$  fixé elle augmente vers le bas.

Q 9. Compte tenu de la topographie des franges observées sur la figure 6, discuter qualitativement l'écart du profil de la lame à une portion de coin d'angle constant, induit par son drainage gravitaire.

Afin d'interpréter ces différences, une modélisation de mécanique des fluides, non détaillée ici, aboutit à l'expression suivante pour l'épaisseur  $e$  de la lame en fonction de  $z$  et du temps :

$$e(z, t) = \sqrt{\frac{2\eta(H-z)}{\rho g t}}.$$

Q 10. Discuter qualitativement la validité de cette expression en regard de la figure 6.

*Discuter le cas  $z \approx H$ , la dépendance en  $z$  à  $t$  fixé et la dépendance en  $t$  à  $z$  fixé*

Pour aller plus loin dans la caractérisation de la variation de l'épaisseur de la lame, on se propose d'effectuer une approche semi-empirique de la loi de variation de l'épaisseur de la lame. On se place à  $t$  fixé et on suppose une loi de puissance semi-empirique de la forme

$$e(z, t) = K(H - z)^\beta$$

où  $\beta$  et  $K$  sont des constantes. On relève pour cela expérimentalement la position des premières franges brillantes. Le tableau 1 présente les résultats obtenus en indiquant la position  $z$  de ces franges, pour un éclairage monochromatique de longueur d'onde  $\lambda_0 = 600 \text{ nm}$  et un film de savon d'indice optique  $n = 1,4$ .

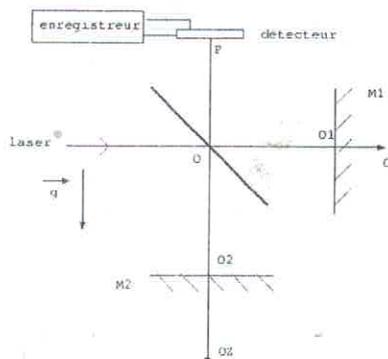
| Numéro de la frange brillante | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   |
|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Position $z$ (cm)             | 4,5 | 4,1 | 3,7 | 3,4 | 3,2 | 3,0 | 2,8 | 2,6 |

Tableau 1

Q 11. Compte tenu de ces valeurs numériques, analyser graphiquement, à l'aide du support fourni en figure B du document réponse, si cette loi semi-empirique est conforme aux observations. Si c'est le cas, donner la valeur numérique de  $\beta$ .

### III. Gravimétrie

Le principe d'un gravimètre absolu est le suivant: le miroir  $M_2$  de l'interféromètre de Michelson est en chute libre dans le champ de pesanteur. Un laser de longueur d'onde  $\lambda = 633 \text{ nm}$  éclaire le Michelson et on enregistre au cours du temps l'intensité des deux rayons qui interfèrent grâce à un détecteur placé en  $P$ . On note  $l_1 = OO_1$  (constant) et  $l_2 = OO_2$  où  $l_2$  dépend du temps. On note  $e = l_2 - l_1$  l'épaisseur de la lame d'air.



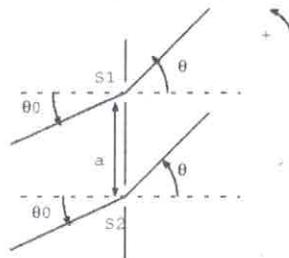
Le miroir  $M_2$  est lâché sans vitesse initiale et tombe sous l'effet du poids, on néglige tout frottement. A l'instant initial  $l_2 = l_1$ .

Exprimer  $e(t)$  et l'ordre d'interférences en  $P$ , au niveau du détecteur.

On donne la courbe intensité en fonction du temps au niveau du détecteur en  $P$ . Déduire de cette courbe la valeur numérique de  $g$ , le champ de pesanteur.

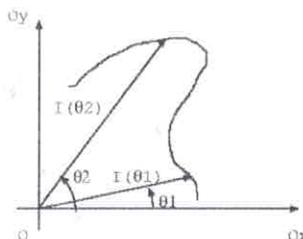
## IV. Le réseau

Soit un système composé de  $N$  fentes fines distantes de  $a$ , éclairé par une onde plane de longueur d'onde  $\lambda$ , selon un angle d'incidence  $\theta_0$ . On observe la lumière diffractée dans la direction  $\theta$ . On note  $\delta(\theta) = \delta_{2/1}$  et  $\phi(\theta) = \phi_{2/1}$ , respectivement la différence de marche et le déphasage, entre deux rayons passant par deux fentes voisines  $S_1$  et  $S_2$  et qui interfèrent sur un écran placé loin des fentes.



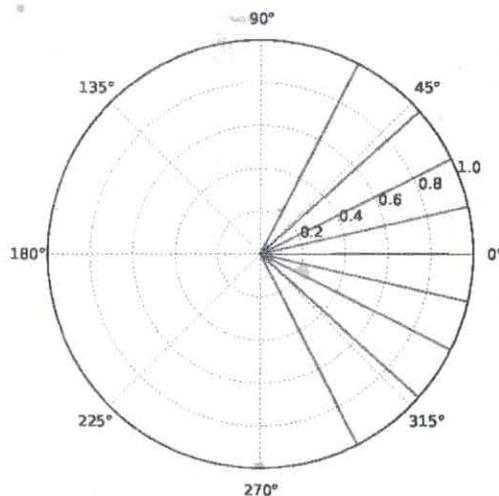
1. Etablir l'expression de  $\delta(\theta)$  en fonction de  $a$ ,  $\theta_0$  et  $\theta$ .
2. On note  $\theta_p$ , l'angle  $\theta$  correspondant à la frange brillante d'ordre d'interférences  $p$ , l'intensité lumineuse pour  $\theta_p$  est maximale. Donner la relation entre  $\theta_p$ ,  $\theta_0$ ,  $p$ ,  $\lambda$  et  $a$ .

L'intensité lumineuse résultant des interférences des  $N$  ondes cohérentes de même intensité issues des  $N$  fentes dépend de l'angle de diffraction  $\theta$ . Dans le plan  $Oxy$ , on peut représenter le diagramme de rayonnement: l'intensité lumineuse diffractée est représentée par un vecteur de norme  $I(\theta)$  orienté selon l'angle polaire  $\theta$  par rapport à  $Ox$ . Un maximum d'intensité correspond à une frange brillante et un minimum à une frange sombre.



3. Soit un réseau de pas  $a$ , éclairé sous incidence normale. Pour  $\lambda = 400 \text{ nm}$  on observe le diagramme de rayonnement suivant:

- 3.a. Quelle propriété du diagramme confirme que le réseau est éclairé sous incidence normale?
- 3.b. Quels sont les ordres observés?
- 3.c. Remplir un tableau donnant les ordres  $p$  observés et les angles  $\theta_p$  correspondants (lus approximativement sur le diagramme) et calculer  $\sin \theta_p$ . Exploiter ces valeurs pour calculer le pas  $a$  du réseau.



On admet pour la suite que  $a = 1,8 \mu\text{m}$ .

4. En déduire  $n$  le nombre de traits par millimètre de ce réseau.
5. Le réseau est encore éclairé sous incidence normale par une onde plane de longueur d'onde  $\lambda = 750 \text{ nm}$ . Prévoir les ordres visibles. Calculer les angles  $\theta_p$  aux différents angles visibles. En déduire le phénomène observé si le réseau est éclairé sous incidence normale par un faisceau de lumière blanche. Expliquer.
6. Pour  $\lambda = 600 \text{ nm}$ , calculer la valeur de  $\theta_0$  pour laquelle la déviation est minimale dans l'ordre 1. Calculer cet angle de déviation.

Document réponse problème I



NUMÉRO DE PROUVÉ

Numéro d'inscription

Signature

66

Nom

Prénom

CONCOURS CENTRALE-SUPÉLEC

Épreuve : Physique-chimie TSI

Ne rien porter sur cette feuille avant d'avoir complètement rempli l'entête

Feuille

Diagramme de la pression en fonction de l'enthalpie massique pour l'eau

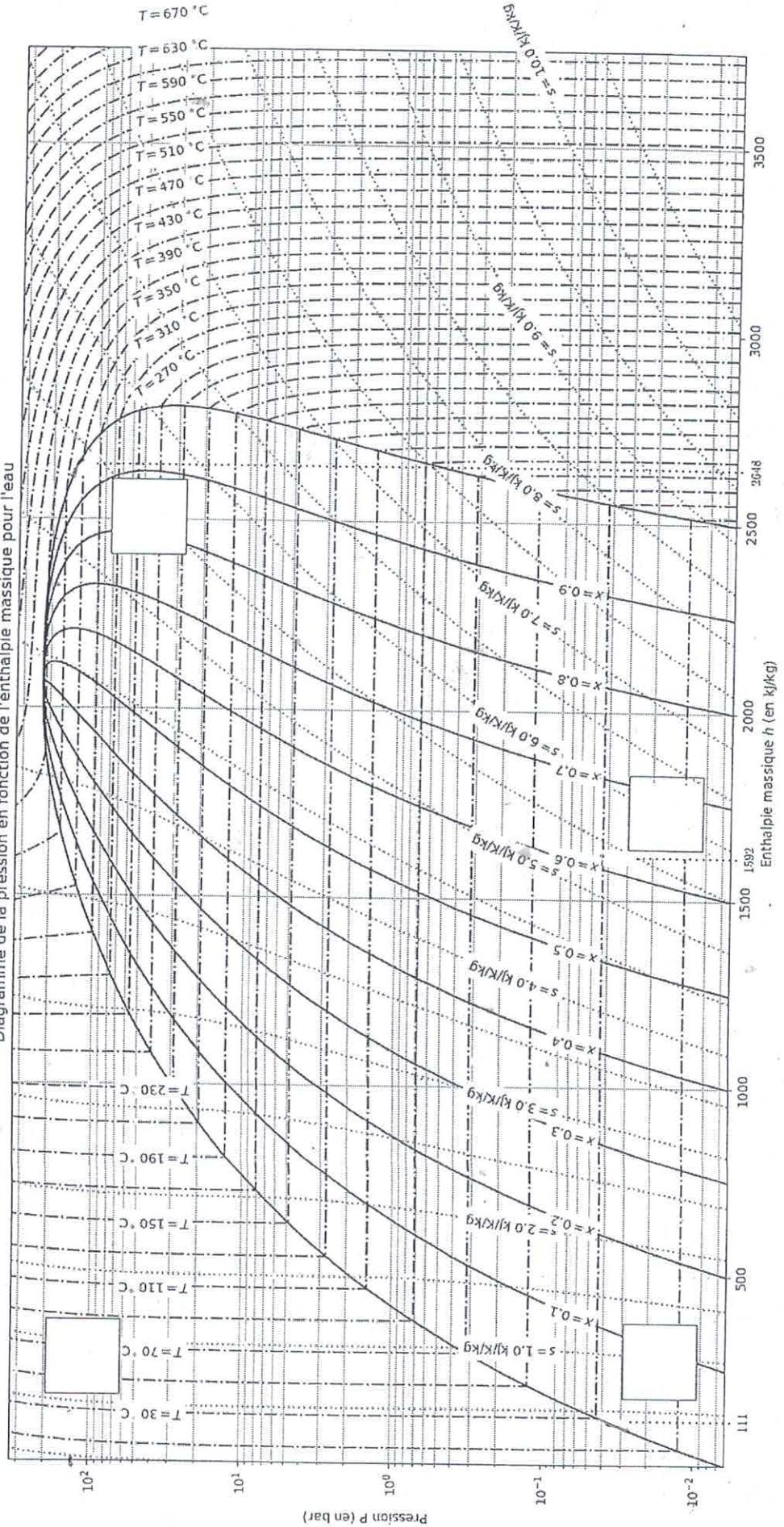
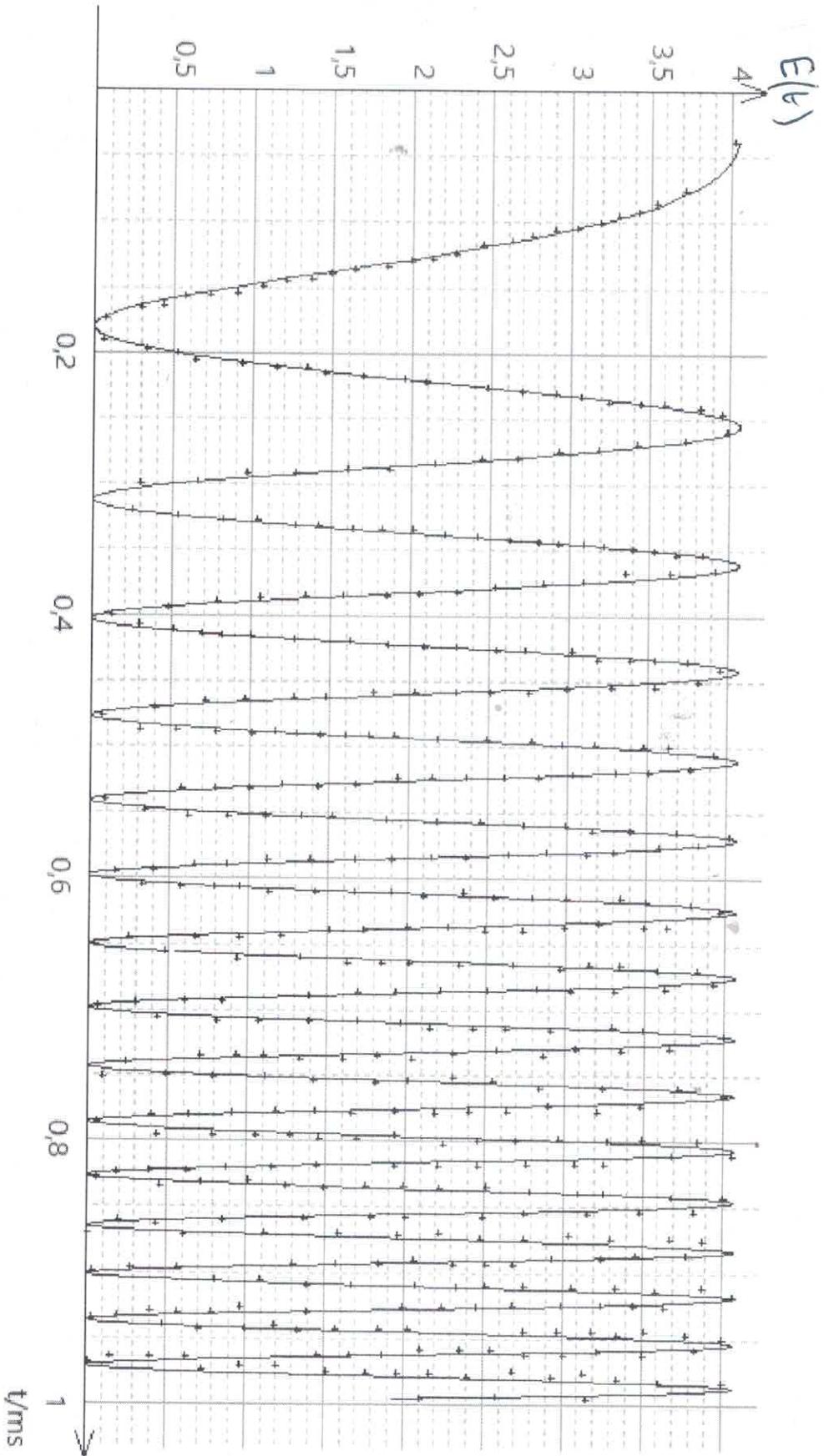


Figure A





Numéro de place

Numéro d'inscription

Signature

Nom

Prénom



CONCOURS CENTRALE-SUPÉLEC

Épreuve : Physique 1 PC

Ne rien porter sur cette feuille avant d'avoir complètement rempli l'entête

Feuille  /

Question 1

Lame d'air équivalente

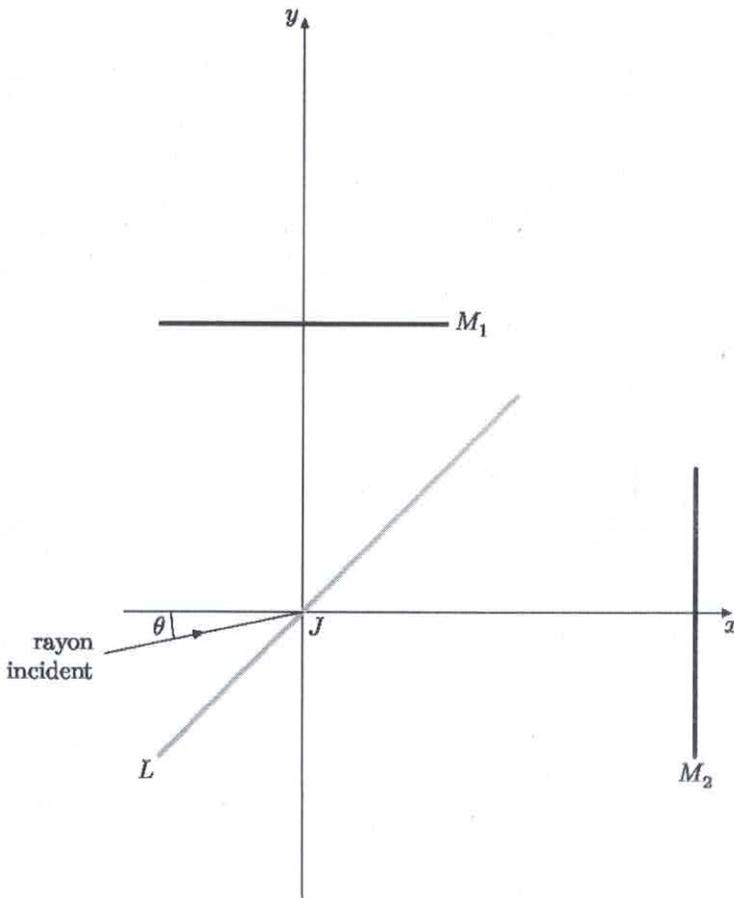


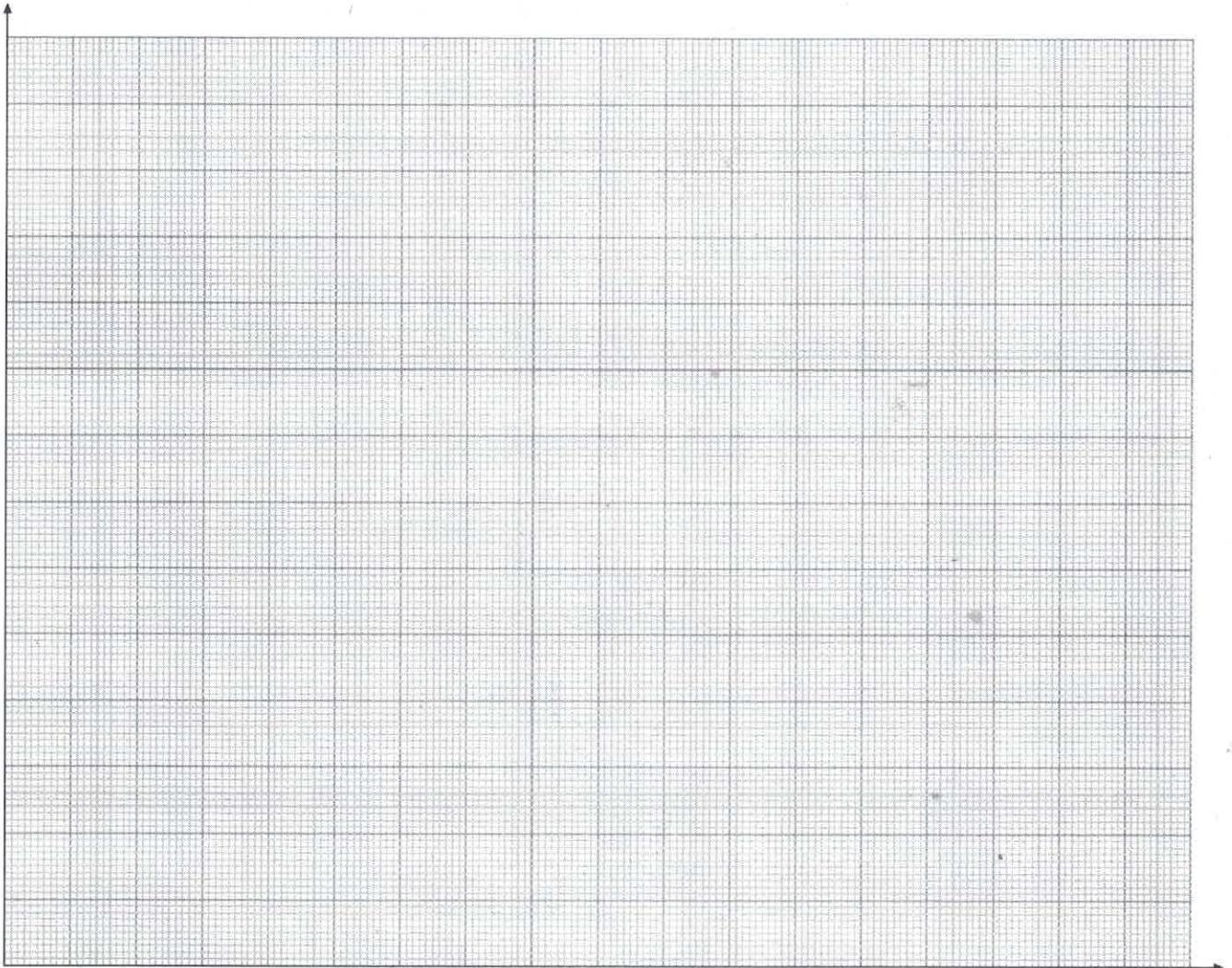
Figure A

**Ne rien écrire**

**dans la partie barrée**

P036-DR/2021-03-13 11:52:04

**Question 11**



**Figure B**