PC/PC*

PHYSIQUE

1 DEVOIR CORRIGÉ PAR SEMAINE



avec annales
& corrigés commentés

Zakarya Ouzit

ellipses

PC/PC*

PHYSIQUE

PC/PC*

PHYSIQUE



1 DEVOIR CORRIGÉ PAR SEMAINE

Zakarya OUZIT

Docteur en physique et professeur agrégé de physique
en CPGE scientifique à Paris

ellipses

Conception graphique couverture : Nathalie FOULLOY

ISBN 9782340-118157

Dépôt légal : août 2026

©Ellipses Édition Marketing S.A.
8/10 rue la Quintinie 75015 Paris



Le Code de la propriété intellectuelle et artistique n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article L. 122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (alinéa 1er de l'article L. 122-4).
Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

www.editions-ellipses.fr

Avant-propos

Cet ouvrage s'adresse en premier lieu aux étudiants de CPGE scientifique en filière PC/PC*. Il regroupe des énoncés de problèmes pouvant être posés en devoir sur table au cours de l'année de PC/PC*. Ces énoncés sont librement inspirés de sujets posés aux épreuves écrites des concours d'entrée aux grandes écoles d'ingénieur et se veulent progressifs : les premières questions sont de l'ordre de la question de cours tandis que les suivantes peuvent demande plus de technicité et permettent de mettre en situation les notions étudiées en cours dans des exemples concrets. Les énoncés sont au nombre de 24, répartis par domaine de la physique : optique, thermodynamique, mécanique du point et des fluides, électromagnétisme, physique des ondes, mécanique quantique. Les objectifs de cette organisation sont les suivants :

— avoir accès à une base de problèmes écrits pour s'entraîner au cours de l'année ;

— être régulier dans ses entraînements en prévoyant de travailler un devoir par semaine.

Chaque énoncé est accompagné d'un corrigé rédigé et commenté afin de faire au mieux le lien avec son cours et repérer les erreurs les plus fréquentes. Pour cela, les commentaires sont répartis en trois catégories :

— Rappel - des rappels synthétiques des notions vues en cours ;

— Méthode - les méthodes de résolution classiques à maîtriser ;

— Erreurs à éviter - les erreurs que l'on retrouve le plus sur les copies d'élèves.

Enfin, cet ouvrage est complété par :

— deux sujets d'annales corrigés qui constituent une transition entre la fin des cours et la préparation aux écrits ;

— quelques conseils pour tirer profit au maximum de ses années en CPGE et mettre toutes les chances de son côté pour réussir ;

— un index thématique répartissant les principales notions au programme selon le(s) devoir(s) permettant de les travailler ;

— un formulaire regroupant les constantes fondamentales de la physique ainsi que les principales formules d'analyse vectorielle utilisées en physique.

Cet ouvrage pourra également servir à tout étudiant en physique, issu d'autres filières de CPGE ou d'autres parcours, qui souhaite s'exercer sur des problèmes de physique aux sujets variés. Dans ce cas, il faut revenir aux programmes officiels afin de se rendre compte de ce qui est traité ou non dans le cadre de cet ouvrage.

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes, collègues et étudiants, ayant participé, de près ou de loin, à la confection de ce recueil. J'espère qu'il sera utile aux étudiants dans leur apprentissage et leur organisation au cours de leur deuxième année de CPGE et qu'il agira en bon tremplin vers les épreuves écrites.

L'auteur

Table des matières

Devoirs

Optique

- Devoir 1 Optique ondulatoire....12
- Devoir 2 Interférences à division du front d'onde 15
- Devoir 3 Interférences à division d'amplitude 18

Thermodynamique

- Devoir 4 Thermodynamique en système ouvert....24
- Devoir 5 Diffusion de particule 28
- Devoir 6 Diffusion thermique 31
- Devoir 7 Rayonnement thermique....33

Mécanique du point

- Devoir 8 Dynamique en référentiel non galiléen 38
- Devoir 9 Champ de pesanteur dans le référentiel terrestre 41

Mécanique des fluides

- Devoir 10 Description d'un fluide en mouvement 46
- Devoir 11 Actions mécaniques dans un fluide 49
- Devoir 12 Écoulement de fluides parfaits 52
- Devoir 10 Bilans macroscopiques....56

Électromagnétisme

- Devoir 14 Électrostatique....60
- Devoir 15 Dipôle électrostatique 62
- Devoir 16 Magnétostatique....65
- Devoir 17 Induction électromagnétique 67

Physique des ondes

- Devoir 18 Ondes mécaniques unidimensionnelles 70
- Devoir 19 Ondes acoustiques 74
- Devoir 20 OEM dans le vide 77
- Devoir 21 OEM dans les milieux conducteurs 79
- Devoir 22 OEM dans un plasma 83

Mécanique quantique

- Devoir 23 Particule quantique en présence d'un potentiel 88
- Devoir 24 Physique des lasers 92

Corrigés

- Devoir 1 98
- Devoir 2 104
- Devoir 3 109
- Devoir 4 118
- Devoir 5 123
- Devoir 6 127
- Devoir 7 133
- Devoir 8 138
- Devoir 9 143
- Devoir 10 152
- Devoir 11 157
- Devoir 12 164
- Devoir 13 169
- Devoir 14 174
- Devoir 15 179
- Devoir 16 185
- Devoir 17 191
- Devoir 18 198
- Devoir 19 207
- Devoir 20 212
- Devoir 21 218
- Devoir 22 225
- Devoir 23 232
- Devoir 24 240

Annales de concours

- Concours 1 Centrale Supélec PC Physique 1 – 2024
  Énoncé 247
  Corrigé 259
- Concours 2 Mines-Ponts PC Physique 2 – 2024
  Énoncé 269
  Corrigé 280

Annexes

Comment réussir en prépa ! **303**

Index thématique **307**

Formulaire **311**

DEVOIRS

OPTIQUE

Devoir 1

Optique ondulatoire

☞ Avant de commencer

Temps de résolution : 1h30

Thèmes abordés :

- ✓ Modèle scalaire de la lumière
- ✓ Chemin optique
- ✓ Théorème de Malus

Ce problème a pour but de retrouver quelques résultats de l'optique géométrique dans le cadre du modèle scalaire de la lumière.

1.1 Loi de la réfraction

Une onde plane arrive avec une incidence θ sur un dioptre plan séparant deux milieux d'indices n et n'. L'onde transmise est plane également et réfractée selon un angle θ'. On suppose $n' > n$.

1. Faire un schéma représentant deux rayons incidents, les rayons réfractés associés, et des surfaces d'onde dans chacun des milieux.

On note I_1 et I_2 les points d'incidence des rayons sur le dioptre. On note M_2 le point d'intersection de la surface d'onde passant par I_1 avec le rayon 2, et M_1 le point d'intersection de la surface d'onde passant par I_2 avec le rayon 1.

2. Que dire des chemins optiques (I_1M_1) et (M_2I_2) ?
3. En déduire la loi de Snell-Descartes pour la réfraction.

1.2 Déviation par une lame d'air

Une lame de verre à face parallèles, d'épaisseur e et d'indice n est interposée entre une source S située à l'infini dans l'air, d'indice n_{air} , et un point A situé aussi dans l'air.

4. Reproduire la situation et tracer soigneusement le rayon lumineux, issu de S, qui arriverait en A en l'absence de la lame, ainsi que le rayon qui arrive en A en présence de celle-ci.

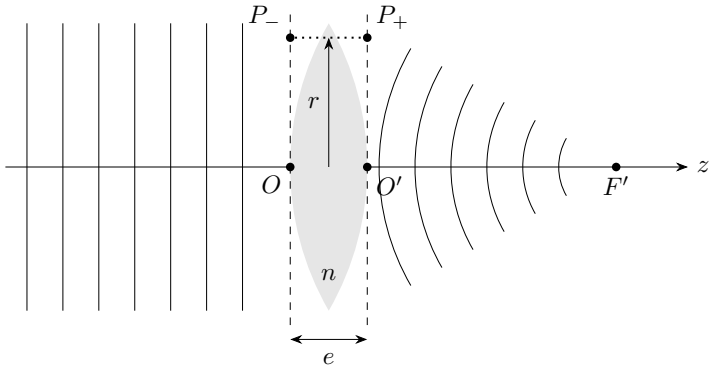
On s'intéresse à la grandeur $\delta_{\text{lame}} = (SA)_{\text{avec lame}} - (SA)_{\text{sans lame}}$, différence des chemins optiques entre S et A en présence et en l'absence de la lame (ces chemins optiques sont infinis).

5. Montrer que $\delta = e\,(n\cos r - n_{\text{air}}\cos i)$ où i est l'angle d'incidence des rayons lumineux sur la lame et r l'angle de réfraction. Vérifier le résultat dans le cas où $i = 0$.

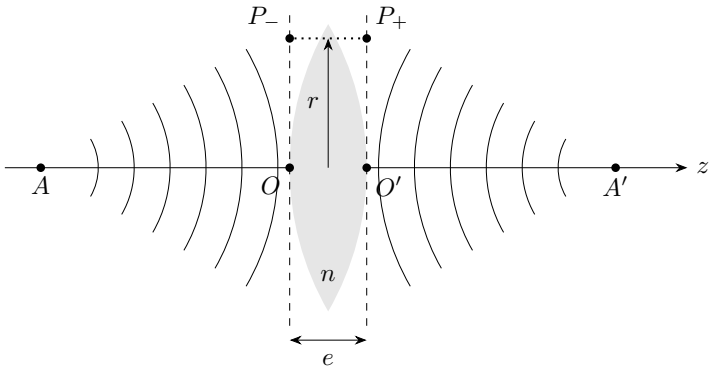
1.3 Lentille mince et relation de conjugaison

On s'intéresse maintenant aux relations de conjugaison décrivant le comportement d'une lentille mince d'épaisseur e taillée dans un milieu d'indice n.

6. On considère dans un premier temps un faisceau incident parallèle issu de l'infini. Exprimer les chemins optiques (OF') et (P^-P^+F').
7. Comment se manifeste le stigmatisme de la lentille ?



8. On considère désormais qu'un point objet A de l'axe l'optique est conjugué à un point image A' de l'axe optique. Calculer le chemin optique (AA') en passant par deux chemins différents.



9. En déduire la relation de conjugaison de Descartes.

Ce qu'il faut maîtriser

- ✍ Utiliser la notion de vibration lumineuse
- ✍ Exprimer un chemin optique
- ✍ Appliquer le théorème de Malus

Voir le corrigé n°1 page 98.

Interférences à division du front d'onde

☞ Avant de commencer

Temps de résolution : 1h15

Thèmes abordés :

- ✓ Superposition d'ondes lumineuses
- ✓ Dispositifs à division du front d'onde
- ✓ Élargissement spatial

Le but de ce problème est d'étudier deux dispositifs d'interférences à division du front d'onde.

2.1 Trous d'Young

On considère dans un premier temps le dispositif historique des trous d'Young, constitué de deux trous circulaires horizontaux séparés d'une distance a. Les interférences sont observées à l'aide du montage de Fraunhofer constitué d'une source ponctuelle monochromatique de longueur d'onde λ et de deux lentilles convergentes, chacune placée entre la source et le trous d'une part et entre les trous et l'écran d'observation d'autre part. Les lentilles sont utilisées dans les conditions de Gauss. On considèrera que $n_{air} \approx 1$.

1. Proposer un schéma du dispositif ainsi constitué. Où se trouvent la source et l'écran par rapport à chaque lentille ?
2. Représenter sur le même schéma la marche de deux rayons issus de la source ponctuelle et qui interfèrent en un point M de l'écran d'observation.
3. Notant x la position du point M sur l'écran dans la direction des trous, montrer que l'ordre d'interférence calculé au point M s'exprime par la relation :

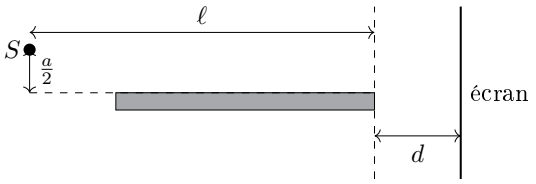
$$p(M) = \frac{ax}{\lambda f'}$$

avec f' la distance focale de la lentille faisant converger les rayons sur l'écran.

2.2 Miroir de Lloyd

On considère une dispositif interférentiel constitué d'une lame de verre plane utilisée comme miroir plan, éclairée sous incidence rasante. Un point source S émet une lumière

monochromatique de longueur d'onde λ_0. On admettra que la réflexion sur un miroir s'accompagne d'un retard de phase égal à π. Ce dispositif est connu sous le nom de « Miroir de Lloyd ».



4. Les interférences sont obtenues par superposition de l'onde issue directement de S et de celle réfléchie par le miroir. En déduire quelles sont les deux sources qui produisent des interférences. Sont-elles cohérentes ?
5. Représenter la marche des deux rayons lumineux qui interfèrent en un point M de l'écran. Vérifier que le dispositif fonctionne bien par division du front d'onde.
6. Décrire le champ d'interférences. Les interférences sont-elles localisées ?
7. L'écran est placé à la distance d du bord droit du miroir. La source est à la distance $a/2$ du miroir et la distance entre la source et le bord droit du miroir est notée ℓ. Déterminer l'ordre d'interférences $p(M)$, la différence de marche $\delta(M)$ et la différence de phase $\Delta\varphi(M)$ en un point M de l'écran.
8. En déduire l'expression de l'intensité vibratoire sur l'écran. Quelle est la forme géométrique des franges d'interférences ?
9. Peut-on remplacer la source ponctuelle par une fente lumineuse allongée dans la direction orthogonale au plan de la figure sans dégrader la visibilité des franges ?

On élargit maintenant la fente source dans la direction parallèle à l'écran. Sa largeur b est répartie également de part et d'autre de la position $a/2$.

10. En utilisant le critère semi-quantitatif de visibilité des franges, estimer l'extension spatiale de la figure d'interférences où les franges restent visibles. On l'exprimera en fonction de l'interfrange i, de a et b.

Ce qu'il faut maîtriser

- ✍ Identifier un dispositif à division du front d'onde
- ✍ Exprimer une différence de chemin optique
- ✍ Appliquer la formule de Fresnel
- ✍ Utiliser le critère semi-quantitatif de visibilité des franges

Voir le corrigé n°2 page 104.

Devoir 3

Interférences à division d'amplitude

☞ Avant de commencer

Temps de résolution : 1h45

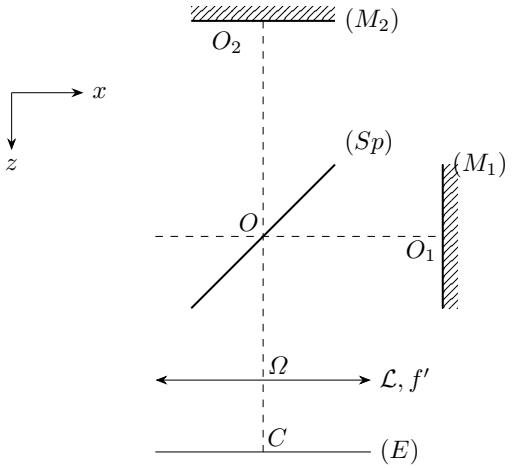
Thèmes abordés :

- ✓ Superposition d'ondes lumineuses
- ✓ Interféromètre de Michelson
- ✓ Franges d'égale inclinaison
- ✓ Franges d'égale épaisseur
- ✓ Sources spectrales, cohérence

Ce problème s'intéresse aux figures d'interférences en forme d'anneaux.

3.1 Introduction

On donne le schéma d'un interféromètre de Michelson :



On admettra que l'ensemble constitué par la séparatrice et la compensatrice se comporte comme une lame séparatrice idéale sans absorption et d'épaisseur nulle, notée (Sp).

On note $OO_1 = \ell_1$ et $OO_2 = \ell_2$. On observe les franges sur un écran (E) à l'aide d'une lentille convergente $\mathscr{L}$, de distance focale f'.

1. Pour les deux configurations typiques de l'interféromètre de Michelson (lame d'air, coin d'air), donner :
   - la forme des franges d'interférences ;
   - leur localisation ;
   - la méthode de projection ;
   - la méthode d'éclairage.

   On pourra présenter le résultat sous forme d'un tableau.

3.2 Anneaux d'égale inclinaison

L'interféromètre est réglé en lame d'air.

Anneaux d'égale inclinaison

2. On considère un rayon provenant de la source incliné d'un angle θ par rapport à l'axe (Ox). Montrer que dans ce cas la différence de marche entre les deux rayons réfléchis par M_1 et M_2 se propageant de la source jusqu'à un point P du plan focal image de la lentille convergente de focale f' est donné par :

$$\delta(P) = 2\,(\ell_2 - \ell_1)\cos\theta$$

3. Justifier que l'on observe sur l'écran disposé dans le plan focal des anneaux concentriques. Pourquoi dit-on que ces anneaux sont d'égale inclinaison ?

On veut maintenant déterminer les rayons des anneaux d'intensité maximale dans le plan focal image de la lentille.

4. Montrer que pour avoir une intensité maximale dans la direction $\theta = 0$, il est nécessaire d'imposer que la grandeur $p_0 = \frac{2(\ell_2 - \ell_1)}{\lambda}$ soit un entier.
5. Montrer que le rayon r_n du $n^{\text{ième}}$ anneau brillant est donné approximativement par la formule :

$$r_n = f'\sqrt{\frac{n\lambda}{|\ell_2 - \ell_1|}} \quad n \in \mathbb{N}$$

Influence de la largeur spectrale de la source

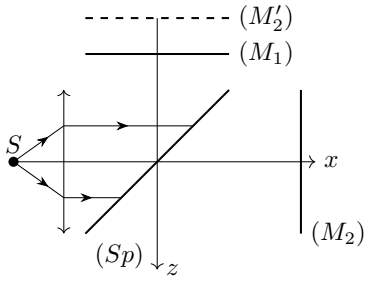
6. En utilisant le critère semi-quantitatif de brouillage des franges, établir l'expression de la valeur maximale de $e = |\ell_2 - \ell_1|$ qui permet d'observer des franges au

voisinage du centre de la figure d'interférence, en fonction de la longueur d'onde moyenne λ et le la largeur spectrale $\Delta\lambda$ de la source quasi-monochromatique.

7. Effectuer l'application numérique pour la raie verte du mercure (on prendra $\lambda = 546\,\text{nm}$) dont la largeur spectrale est $0{,}05\,\text{nm}$. Quelle la longueur de cohérence de cette raie spectrale ? Est-il pertinent de travailler avec une épaisseur de lame d'air $e = 1{,}27\,\text{mm}$?

3.3 Défaut de planéité d'un des miroirs de l'interféromètre de Michellson

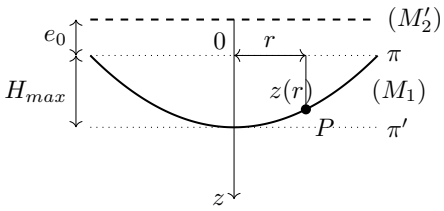
On considère un interféromètre de Michelson dont le schéma simplifié est donné par la figure ci-après. La source (S), peu étendue, est monochromatique de longueur d'onde $\lambda = 633\,\text{nm}$. Elle est placée dans le plan focal objet d'une lentille convergente de telle sorte que le miroir (M_2) est éclairé sur toute sa surface sous une incidence quasi-normale. On recueille les faisceaux émergents sur un écran plan parallèle au miroir (M_1). On notera $\mathscr{E}_0$ l'éclairement maximal de la figure.



Initialement l'interféromètre est réglé en lame d'air. (M_1) est parallèle à Ox et (M_2) est parallèle à Oz. Soit (M_2') le symétrique du miroir (M_2) par la séparatrice et e la distance entre (M_1) et (M_2').

8. Exprimer l'éclairement $\mathscr{E}$ en fonction de e. Quel est l'aspect de ce plan pour une distance e donnée ? Comment varie l'éclairement $\mathscr{E}$ si e varie ?
9. Proposer un protocole expérimental pour repérer la position $e = 0$, appelé contact optique.
10. On admet que la condition $e = 0$ est réalisée. On incline alors (M_1) d'un angle α faible : l'interféromètre est réglé en coin d'air. Décrire la figure d'interférences. On précisera en particulier la localisation de la figure d'interférences, la forme de la figure et on donnera l'expression de l'interfrange i en fonction de λ et α.

Le miroir (M_1) initialement plan s'est déformé et est devenu sphérique (cf . figure 8). On admettra que le centre de la sphère (M_1), de rayon R, se trouve sur l'axe Oz, qui est donc axe de symétrie de (M_1). Les conditions d'observations sont les mêmes qu'à la question 10.



11. Soit e_0 la distance entre (M_2') et le plan Π correspondant au cas où (M_1) est plan, et $H_{\max}$ l'épaisseur maximale du miroir (M_1) une fois courbé. Exprimer l'épaisseur d'air $z(r)$ entre (M_1) et (M_2'), pour un point P de (M_1), en fonction de $e_0, H_{\max}, r$ et R (figure 8). On remarquera que les conditions d'observation impliquent les approximations : $r \ll R, e_0 \ll R$ et $H_{\max} \ll R$.

12. Avec les approximations précédentes, montrer que la différence de marche δ en un point P situé à la distance r de l'axe Oz est :

$$\delta(r) = 2\,(e_0 + H_{\max}) - \frac{r^2}{R}$$

Montrer que, dans les mêmes conditions d'observation que les franges du coin d'air, on observe des anneaux localisés au voisinage de (M_1).

13. Déterminer l'ordre p_0 au centre des anneaux en fonction de $e_0, H_{\max}$ et λ. On utilise l'indice k pour repérer les anneaux brillants, sachant que $k = 1$ correspond au premier anneau brillant à partir du centre de la figure d'interférences, de rayon ρ_1 sur la surface de localisation. Calculer le rayon ρ_k du kième anneau brillant en fonction de ρ_1, k, λ et R.

Ce qu'il faut maîtriser

- ✍ Citer et commenter les conditions d'observation des interférences, la localisation des franges
- ✍ Exprimer une différence de chemin optique
- ✍ Étudier le comportement d'un interféromètre de Michelson en configuration lame d'air
- ✍ Étudier le comportement d'un interféromètre de Michelson en configuration coin d'air
- ✍ Appliquer la formule de Fresnel
- ✍ Appliquer le critère semi-quantitatif de brouillage des interférences
- ✍ Estimer une longueur de cohérence spectrale

Voir le corrigé n°3 page 109.

THERMODYNAMIQUE

Devoir 4

Thermodynamique en système ouvert

☞ Avant de commencer

Temps de résolution : 1h30

Thèmes abordés :

- ✓ Principes de la thermodynamique en système ouvert
- ✓ Machines thermiques
- ✓ Diagrammes thermodynamiques

La pompe à chaleur est un dispositif qui, en mode « chauffage » puise l'énergie thermique dans l'air, dans le sol ou dans l'eau des nappes phréatiques, pour la transférer vers le local à réchauffer. Elle est constituée d'un circuit fermé dans lequel circule un fluide caloporteur à l'état liquide, gazeux ou biphasé selon les éléments qu'il traverse. La circulation se fait en régime permanent ; on néglige les variations d'énergies cinétique et de pesanteur.

1. On note h_e et h_s les enthalpies massiques du fluide à l'entrée et à la sortie d'un des composant du circuit (compresseur, condenseur, évaporateur ou détendeur). À la traversée de ce composant, l'unité de masse du fluide reçoit d'une part le travail massique utile w_u et l'énergie thermique q.

   Montrer soigneusement que :

$$h_s - h_e = w_u + q.$$

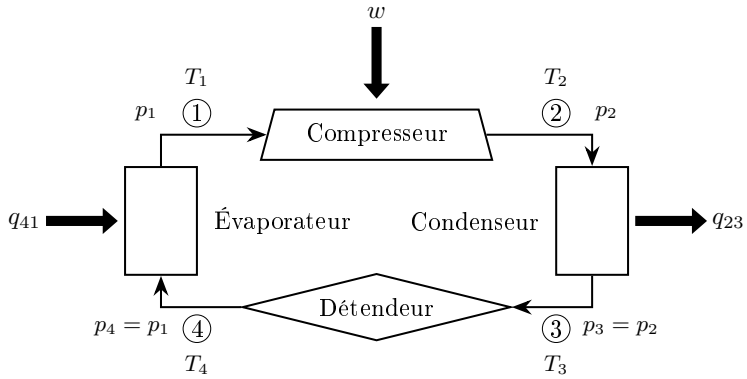
Le cycle de la pompe à chaleur se compose de quatre étapes (figure 4), en dehors desquelles les échanges thermiques ou mécaniques sont supposés nuls :

— Compression : le gaz subit une compression adiabiatique et réversible qui l'amène de l'état 1 (p_1, T_1) à l'état 2 (p_2, T_2). On note w le travail massique reçu par le fluide.

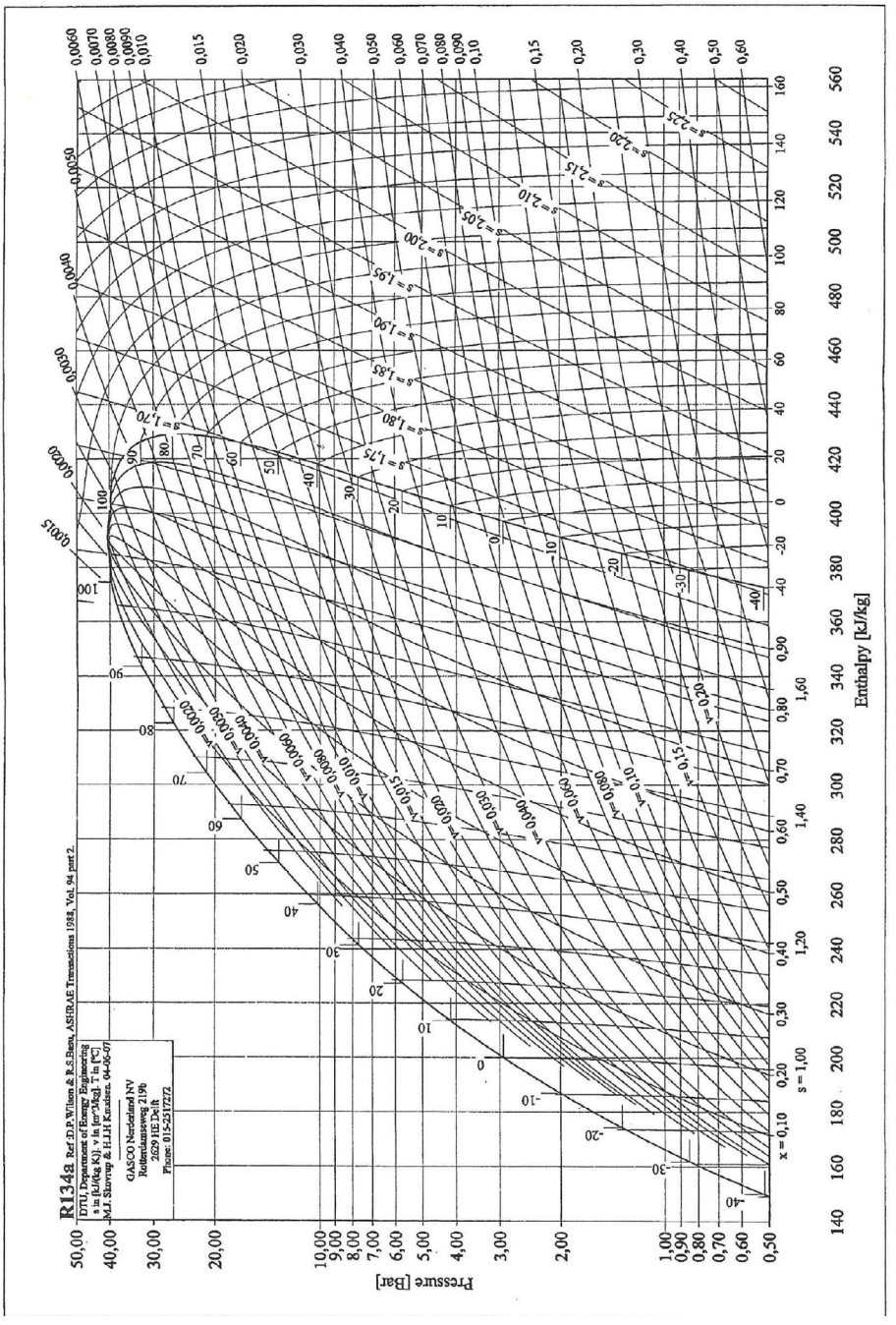
— Condensation : le gaz se liquéfie totalement à pression constante p_2 jusqu'à la température T_3. Il cède de l'énergie à la source chaude, et l'on note $q_{23} < 0$ l'énergie massique échangée.

— Détente : le fluide traverse un tuyau indéformable et ne permettant pas les échanges thermiques. La pression du fluide redescend jusqu'à p_1 et sa température vaut alors T_4.

— Évaporation : le liquide s'évapore totalement à pression constante p_1 jusqu'à la température T_1. Il reçoit l'énergie massique $q_{41} > 0$ de la source froide.



2. Montrer que la phase de détente est isenthalpique.
3. Reproduire sur votre copie l'allure du diagramme enthalpique ($\ln(P)$ en fonction de H) et représenter sur ce diagramme les quatre étapes du cycle, ainsi que les quantités q_{23}, q_{41} et w.
4. Quelle relation lie les quantités q_{23}, q_{41} et w ?
5. Justifier la définition de l'efficacité de la pompe à chaleur $\eta = -\frac{q_{23}}{w}$ et montrer que $\eta > 1$.
6. Le document-réponse présent en fin d'énoncé représente le diagramme de Mollier d'un fluide caloporteur courant. La phase liquide y apparaît-elle incompressible et indilatable ? La phase gazeuse y apparaît-elle comme un gaz parfait ?
7. Représenter le cycle correspondant sur le diagramme de Mollier. Pour chacun des points 1 à 4 du cycle, indiquer dans un tableau les valeurs numériques respectives de l'enthalpie massique, la pression et la température. Indiquer aussi l'état du fluide en chacun de ces points. S'il s'agit d'un mélange liquide-vapeur, préciser la proportion de vapeur.
8. À partir du diagramme de Mollier, estimer numériquement l'efficacité de la pompe à chaleur. Comparer la valeur trouvée à celle qui correspondrait à un cycle de Carnot fonctionnant entre les mêmes températures.
9. Calculer le débit massique du fluide permettant d'assurer une puissance de chauffage de 4 kW.


R134a
Ref: D.P. Wilson & R.S. Basu, ASHRAE Transactions 1988, Vol. 94 part 2.
DTU, Department of Energy Engineering
s in [kJ/(kg K)] v in [m^3/kg], T in [°C]
M.J. Skovrup & H.J.H. Knudsen, 04-06-07
GASCO Nederland NV
Rotterdamseweg 2196
2629 HG Delft
Phone: 015-2517272
Pressure [Bar]
Enthalpy [kJ/kg]

Ce qu'il faut maîtriser

- ✍ Appliquer les principes de la thermodynamique à un système ouvert
- ✍ Réaliser des mesures sur un diagramme enthalpique (P, h)

Voir le corrigé n°4 page 118.