

## Examen de thermodynamique

*Uniquement deux fiches de synthèse A4 recto-verso et une calculatrice sont autorisées pendant l'épreuve*

*Porter une attention particulière à la qualité de la rédaction*

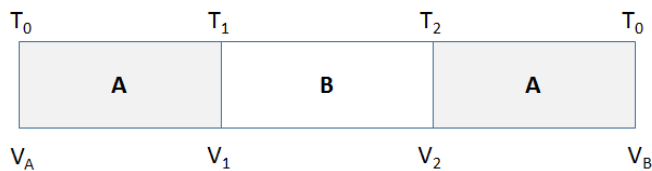
**LIRE ENTIÈREMENT LE SUJET AVANT DE COMMENCER**

*Durée : 3h, l'exercice et les deux problèmes sont indépendants*

### Exercice : questions de cours sur la thermoélectricité (4 points/20)

1. On soumet un cylindre métallique homogène à une différence de température  $\Delta T$ . Le matériau utilisé possède un coefficient Seebeck  $S_A$ . Exprimer la différence de potentiel qui apparaît à ses bornes.

2. On considère maintenant l'assemblage de deux matériaux A et B ayant des coefficients Seebeck respectif notés  $S_A$  et  $S_B$  comme schématisé sur la figure 1.



*Figure 1 : Représentation schématique de l'assemblage de deux matériaux thermoélectriques assemblés en trois éléments.*

- Exprimer la différence de potentiel ( $V_B - V_A$ ) en fonction de  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_1$  et  $V_2$ .
- En déduire l'expression de la chute de potentiel ( $V_A - V_B$ ) en fonction de  $S_A$ ,  $S_B$ ,  $T_2$  et  $T_1$ .
- Que remarquez-vous à partir de l'expression trouvée ?
- Peut-on utiliser ce montage pour effectuer une mesure de température ?

## Problème 1 : Climatisation de voiture (6 points/20)

Un climatiseur de voiture utilise un fluide frigorigène, l'hydrofluorocarbonate HFC (aussi appelé R134a) dont le diagramme enthalpique est donné en annexe.

### 1. Questions de cours (1 point)

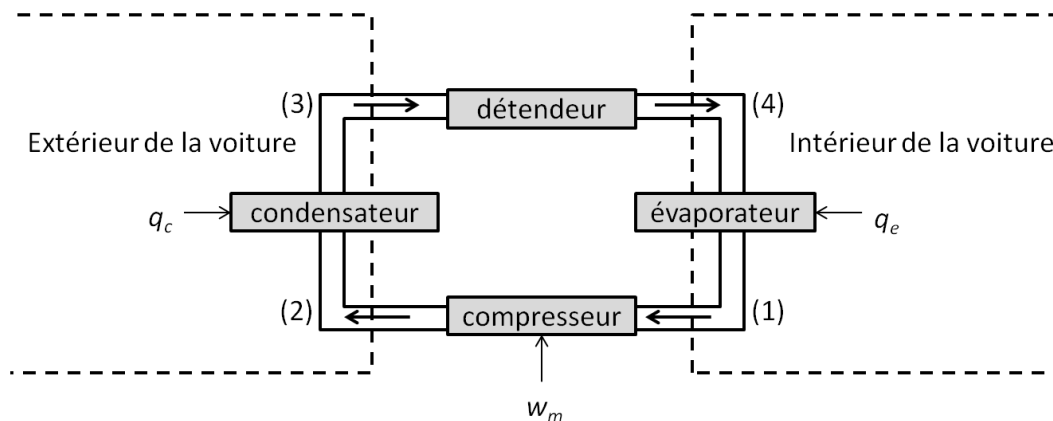
1.1. Faire apparaître la courbe de saturation de l'équilibre liquide-vapeur et les domaines liquide, vapeur et coexistence liquide-vapeur.

1.2. Expliquer quels sont les quatre types de réseaux de courbes représentées sur le diagramme et quelle est la grandeur physique conservée pour chaque courbe. Pour chaque réseau de courbes, indiquer la plage de variation de la grandeur physique et le pas utilisé dans ce diagramme.

1.3. Dans quel domaine du diagramme (pour quelles valeurs de pression et d'enthalpie massique), le fluide à l'état gazeux peut-il être considéré comme un gaz parfait ? Justifier la réponse en évoquant la deuxième loi de Joule.

### 2. Evolution du fluide frigorigène au cours d'un cycle (5 points)

Pour refroidir l'air intérieur de la voiture, le fluide frigorigène effectue en continu des transferts énergétiques entre l'intérieur, l'extérieur et le compresseur, suivant le cycle décrit ci-dessous :



- la quantité de chaleur massique  $q_e$  reçue par le fluide dans l'évaporateur permet sa vaporisation isobare complète. En sortie de l'évaporateur, le fluide est à l'état de vapeur (état 1) à une température  $T_1=5^\circ\text{C}$  et une pression  $P_1=3$  bar.

- dans son passage dans le compresseur, la vapeur (à l'état 1) reçoit le travail mécanique massique  $w_m$  et subit une compression isentropique avec un taux de compression  $r=P_2/P_1=6$ . Le fluide se retrouve alors dans l'état 2 à une température  $T_2$  et une pression  $P_2$ .

- le fluide sortant du compresseur entre dans le condensateur dans lequel il reçoit la quantité de chaleur thermique massique  $q_c$  et est refroidi de manière isobare jusqu'à la température  $T_3=60^\circ\text{C}$  (état 3).

- le fluide sortant du condensateur est détendu dans le détendeur supposé adiabatique jusqu'à la pression de l'évaporateur  $P_1$  (état 4).

Pour la suite des questions, les mesures seront faites sur le diagramme enthalpique avec une précision de  $5 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  pour l'enthalpie massique, de  $50 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  pour l'entropie massique, de 0.05 pour le titre en vapeur, de  $5^\circ\text{C}$  pour la température et de 5% pour la pression.

2.1. Placer le point (1) sur le diagramme enthalpique. Donner la valeur de l'enthalpie massique  $h_1$  et de l'entropie massique  $s_1$  du fluide en ce point.

2.2. Caractérisation de l'état du fluide en sortie du compresseur

- Déterminer la pression  $P_2$ , placer le point (2) sur le diagramme et relever les valeurs de  $T_2$  et  $h_2$ .
- Déterminer la valeur du travail mécanique massique  $w_m$  reçu par le fluide lors de son passage dans le compresseur et commenter son signe. Indication : appliquer le premier principe pour un fluide en écoulement stationnaire entre l'entrée et la sortie du compresseur.

2.3. Caractérisation de l'état du fluide en sortie du condensateur

Placer le point (3) sur le diagramme et relever la valeur de  $h_3$  en sortie du condensateur.

2.4. Caractérisation de l'état du fluide en sortie du détendeur

- Montrer que la transformation dans le détendeur est isenthalpique.
- Placer le point (4) sur le diagramme et tracer le cycle complet. Relever la valeur de  $T_4$  et du titre massique en vapeur  $x_4$  en sortie du détendeur.

2.5. Efficacité du climatiseur

- Calculer la quantité de chaleur massique  $q_e$  reçue par le fluide lors de son passage dans l'évaporateur et en déduire si l'air intérieur de la voiture est bien refroidi.
- Définir l'efficacité  $e$  du climatiseur et calculer sa valeur.
- Comparer cette valeur à celle d'un climatiseur de Carnot fonctionnant entre la température de l'évaporateur et la température de liquéfaction du fluide sous la pression  $P_2$ . Commenter le résultat obtenu.
- Le débit massique de fluide est  $D_m=0.1$  kg/s. Calculer la puissance thermique évacuée de l'intérieur de la voiture et la puissance mécanique consommée par le climatiseur.

## Problème 2 : Optimisation du chauffage d'une pièce (10 points/20)

On souhaite maintenir la température d'une pièce à  $T_1=20^\circ\text{C}$  alors que la température extérieure est  $T_2=-2^\circ\text{C}$ . L'apport nécessaire en énergie est de 32MJ par heure. Pour maintenir la pièce à une température constante  $T_1$ , on utilise une pompe à chaleur fonctionnant réversiblement entre la pièce à chauffer et l'extérieur. On notera par  $Q_1$  la quantité de chaleur apportée par la pompe à la pièce,  $Q_2$  la quantité de chaleur échangée entre la source froide et la pompe et  $W$  l'énergie mécanique servant à entrainer la pompe.

Les deux dispositifs, décrits en partie 2 de ce problème, comportent un moteur thermique, en plus de la pompe à chaleur. Pour étudier ces dispositifs, il sera donc plus commode de raisonner avec des grandeurs  $Q_i$  et  $W$  **positives**, plutôt qu'avec des grandeurs algébriques. Pour faire les bilans énergétiques, il faudra donc au préalable déterminer les sens effectifs des échanges de chaleur entre les différents systèmes thermodynamiques de chacun des dispositifs. Par exemple,  $W$  est le travail reçu par le fluide au cours d'un cycle dans la pompe à chaleur. Ce travail  $W$  est fourni par le fluide du moteur. On notera donc  $+W$  le travail reçu par le fluide lors du bilan énergétique sur le fluide de la pompe, et on notera  $-W$  le travail reçu par le fluide du moteur lors du bilan énergétique sur le fluide du moteur.

### 1. Questions de cours (3 points)

1.1. Calculer analytiquement et numériquement, au Watt près, la puissance instantanée  $P$  nécessaire pour maintenir la température de la pièce.

1.2. On exprime l'efficacité de la pompe à chaleur comme le rapport entre l'énergie utile et l'énergie dépensée pour le fonctionnement de cette dernière.

a)- Proposer un schéma clair du système et préciser le sens des quantités de chaleur échangées  $Q_1$ ,  $Q_2$  et de  $W$  (avec  $Q_i$  et  $W$  **positives**).

b)- Déterminer l'expression littérale de l'efficacité  $e$  de la pompe à chaleur en fonction des quantités de chaleur échangées.

c)- Etablir à partir du second principe une expression reliant  $e$ ,  $T_1$  et  $T_2$  par application de l'inégalité de Clausius.

1.3. On considère maintenant le fonctionnement de la pompe **réversible**. Calculer l'efficacité  $e$  de la pompe à chaleur au centième et en déduire la puissance  $P_m$  consommée par le moteur de cette pompe au Watt près.

### 2. Analyse de deux solutions (7 points)

On se propose d'analyser deux solutions pour mettre en application cette pompe à chaleur. Pour cela deux dispositifs différents sont envisagés. Dans les deux cas, on suppose que toute l'énergie thermique  $Q$  obtenue par combustion de  $n$  litres de fuel est fournie par une chaudière auxiliaire au fluide de travail d'un moteur thermique.

- **Dispositif 1** : les  $n$  litres de fuel sont brûlés et toute la quantité de chaleur  $Q$  récupérée permet de vaporiser l'eau d'une chaudière auxiliaire à la température  $T_3=210^\circ\text{C}$  qui sert de source chaude à un moteur ditherme réversible dont la source froide est la pièce. Le travail  $W$  fourni par le moteur sert alors à faire fonctionner la pompe à chaleur étudiée à la question 1.

- **Dispositif 2** : le principe est le même mais la chaudière auxiliaire est à la température  $T_4=260^\circ\text{C}$  et le moteur fonctionne entre cette chaudière et l'air extérieur. Le travail  $W$  fourni par le moteur sert là aussi à faire fonctionner la pompe à chaleur étudiée à la question 1.

2.1. Donner un exemple de moteur ditherme réversible. Argumenter votre réponse.

2.2. Schématiser le principe des deux dispositifs proposés en notant P la pompe à chaleur, M le moteur et en faisant apparaître la quantité de chaleur Q, le travail W et le **sens** des différents échanges de chaleur  $Q_i$  avec la chaudière, l'extérieur et la pièce. On rappelle que l'ensemble des grandeurs  $Q_i$  et W sont comptées **positivement**.

Que pouvez-vous dire de Q et  $Q_3$  dans le premier dispositif et de Q et  $Q_4$  dans le deuxième dispositif?

2.3. Quel semble être l'avantage de chaque système ?

2.4. Pour le premier dispositif, appliquer le premier principe et l'inégalité de Clausius pour le système constitué de la pompe. En faire de même pour le système constitué du moteur. En considérant le système comme parfaitement **réversible**, exprimer la chaleur reçue  $Q_{P1}$  dans la pièce en fonction de Q,  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$ .

2.5 Effectuer la même analyse pour le second dispositif et exprimer la chaleur reçue  $Q_{P2}$  dans la pièce en fonction de Q,  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_4$ .

2.6 En absence de pompe à chaleur, Q est la quantité d'énergie nécessaire pour chauffer la pièce pendant une journée complète. Pendant combien de jours est-il possible de chauffer la pièce à partir du dispositif 1 ou du dispositif 2 ?

2.7 Quel est le dispositif le plus intéressant ? Cet avantage est-il conservé lorsque  $T_3=T_4$  ?