

Examen de thermodynamique

Uniquement une fiche 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, toutes les parties sont indépendantes

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

1. On soumet un cylindre métallique homogène à une différence de température ΔT . 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.

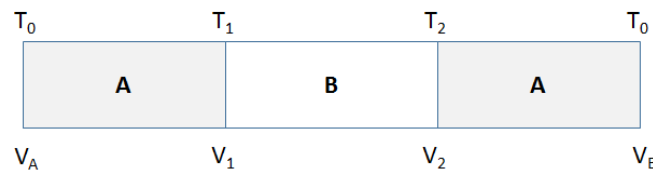


Figure 1 : Représentation schématique de l'assemblage de deux matériaux thermoélectriques assemblés en trois éléments.

- 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 (barème provisoire 6 pts/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)

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

-Réseau d'isothermes entre -60°C et 240°C avec un pas de 10°C

-Réseau d'isotropiques avec des entropies massiques comprises entre 0.65 et 2.55kJ/kg.K par pas de 0.05kJ/kg.K.

-Réseau d'isotitres en vapeur sous la courbe de saturation pour des titres massiques en vapeur x_G variant de 0 à 1 par pas de 0.1.

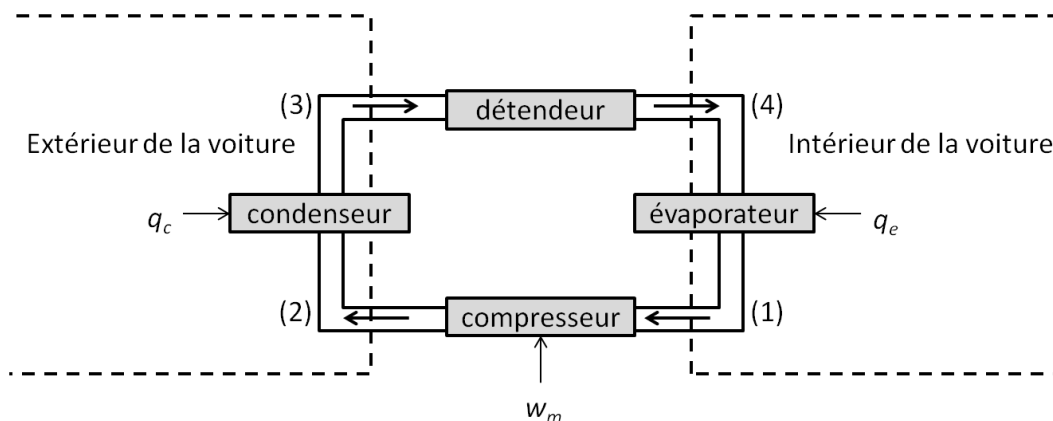
-Réseau d'isochores avec des volumes massiques compris entre 0.00070 et 2 m³/kg avec un pas variable : jusqu'à 0.0014 (par pas de 0.0001), 0.0014 et 0.0020 (par pas de 0.0002), 0.0020 et 0.0040 (pas de 0.0010), 0.004 et 0.01 (par pas de 0.002), 0.010 et 0.020 (pas de 0.005), etc

c) 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.

Un gaz parfait suit la deuxième loi de Joule : son enthalpie massique ne dépend que de la température. Pour un gaz parfait, si $T=\text{constante}$, $h=\text{constante}$ donc les isothermes sont des isenthalpes (des droites verticales). Sur le diagramme, c'est le cas en bas à droite (pour $P < 0.8\text{bar}$ et $h > 500\text{kJ/kg}$).

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 :



- le transfert thermique massique q_e reçu 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 $P_1=3\text{ bar}$.

- 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 le transfert 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°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.

On trouve $h_1=405\text{kJ/kg}$ et $s_1=1.75\text{kJ}/(\text{K}\cdot\text{kg})$ (étant donné la précision demandée)

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 .

$P_2=6P_1=18\text{ bar}$. La compression étant isentropique, le point (2) se trouve à l'intersection de l'isobare 18 bar, droite horizontale, et de l'isentrope $1.75\text{kJ}/(\text{K}\cdot\text{kg})$.

On lit : $h_2=440\text{kJ/kg}$ et $T_2\sim 70^\circ\text{C}$ (à la précision demandée).

- 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.

$\Delta h=h_2-h_1=w_m+0$ car la compression est adiabatique

$w_m=440-405=35\text{ kJ/kg}$

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

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

Le point (3) se trouve à l'intersection de l'isobare 18 bar et de l'isotherme 60°C , dans la zone du liquide. On trouve $h_3=285\text{kJ/kg}$

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

- Dans le détendeur, le fluide ne reçoit pas de transfert thermique, ni de travail autre que celui des forces de pression. Le premier principe pour un fluide en écoulement stationnaire s'écrit donc : $\Delta h=h_4-h_3=q+w_m=0$, donc $h_4=h_3$ et la transformation est isenthalpique.

- le point (4) se trouve à l'intersection de l'isenthalpe (verticale) passant par le point (3) et de l'isobare 3 bar. Le point (4) est pratiquement sur l'isotherme 0°C donc $T_4=0^\circ\text{C}$. On trouve $x_4=0.45$

2.5 Efficacité du climatiseur

- Calculer le transfert thermique massique q_e reçu 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 $D_m=0.1\text{ kg/s}$. Calculer la puissance thermique évacuée de l'intérieur de la voiture et la puissance mécanique consommée par le climatiseur.

- En appliquant le premier principe entre l'entrée et la sortie de l'évaporateur : $h_1-h_4=q_e=405-285=120\text{kJ/kg}$. $q_e>0$ donc l'air de la voiture est bien refroidi

- l'efficacité du climatiseur est le rapport de l'énergie utile q_e divisée par l'énergie coûteuse w_m soit $e=q_e/w_m=120/35\sim 3$

- l'efficacité d'un climatiseur réversible fonctionnant entre la température de l'évaporateur T_4 et la température d'équilibre liquide-vapeur pour 18 bar (soit environ T_3) serait : $e_{rev}=T_4/(T_3-T_4)=273/(60-0)=4.6$. Elle est plus grande que l'efficacité de la machine réelle. C'est le signe

que la machine réelle n'est pas réversible. La transformation dans le détendeur est en effet irréversible.

-Pendant une durée Δt , une masse de fluide $D_m \Delta t$ passe dans l'évaporateur. L'énergie thermique prise à l'intérieur de la voiture est donc $Q_e = m q_e = D_m \Delta t q_e$. La puissance thermique évacuée de l'intérieur de la voiture est donc : $P_e = D_m q_e = 12 \text{ kW}$

Problème 2 : Optimisation du chauffage d'une pièce (10 pts/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. 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.

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.

L'ensemble des grandeurs Q_i et W sont comptées **positivement** dans ce problème. Par exemple, W étant le travail reçu par le fluide au cours d'un cycle dans la pompe à chaleur, le travail fourni par le fluide du moteur est $-W$.

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 .

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

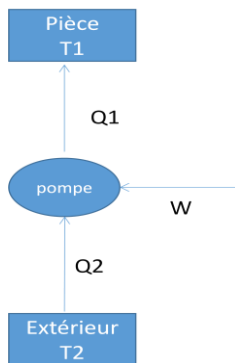
c)- Etablir à partir du second principe une expression reliant e , T_1 et T_2 par application de l'inégalité de Clausius.

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.

Correction :

1.1. $P = 32 \cdot 10^6 / 3600 = 8889 \text{ W}$

1.2.a)



Avec Q_1 , Q_2 et W positifs.

b) e = énergie utile/énergie dépensée pour le fonctionnement de la pompe

$$e = Q_1/W$$

Premier principe : $W + Q_2 - Q_1 = 0$, donc $W = Q_1 - Q_2$

$$e = Q_1 / (Q_1 - Q_2) = 1 / (1 - Q_2/Q_1)$$

c) inégalité de Clausius :

$$-Q_1/T_1 + Q_2/T_2 \leq 0, \text{ donc } 1 - Q_2/Q_1 \geq 1 - T_2/T_1, \text{ soit } e \leq 1 / (1 - T_2/T_1)$$

1.3. Fonctionnement réversible : $e = 1 / (1 - T_2/T_1) = 1 / (1 - 271.15/293.15) = 13.32$

$$P_m = 8889 / 13.3 = 667 \text{ W}$$

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 l'énergie thermique 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.

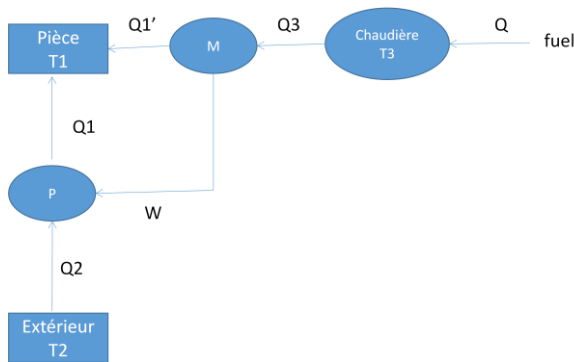
2.1 Donner un exemple de moteur ditherme réversible. Argumenter votre réponse.

Moteur de Stirling

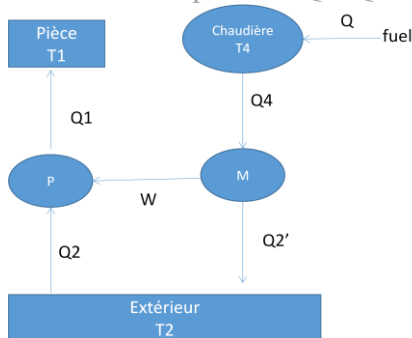
2.2 Schématiser le principe des deux dispositifs proposés en notant P la pompe à chaleur, M le moteur et en faisant apparaître l'énergie thermique Q , le travail W et le sens des différents échanges thermiques Q_i avec la chaudière, l'extérieur et la pièce. On rappelle que l'ensemble des grandeurs Q_i 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?

-Premier dispositif : $Q_3 = Q$



-Deuxième dispositif : $Q_4=Q$



2.3 Quel semble être l'avantage de chaque système ?

1^{er} système : la chaleur produite par le moteur est utilisée pour chauffer la pièce

2^{ème} système : le moteur fonctionne entre la source la plus froide et la source la plus chaude (meilleur rendement)

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 .

Pompe : $W+Q_2-Q_1=0$ et $-Q_1/T_1+Q_2/T_2=0$

Moteur : $Q-Q_1'-W=0$ et $Q/T_3-Q_1'/T_1=0$

On a : $Q_{P1}=Q_1+Q_1'$

On trouve : $Q_1=(T_3-T_1)T_1 Q / [(T_1-T_2)T_3]$ et $Q_1'=Q T_1/T_3$

Donc $Q_{P1}=(T_3-T_1)T_1 Q / [(T_1-T_2)T_3] + Q T_1/T_3=[(T_3-T_2)T_1]/[(T_1-T_2)T_3]Q$

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 .

Pompe : $W+Q_2-Q_1=0$ et $-Q_1/T_1+Q_2/T_2=0$

Moteur : $Q-W-Q_2'=0$ et $Q/T_4-Q_2'/T_2=0$

On a $Q_{P2}=Q_1$

On trouve $Q_{P2}=Q_1=[(T_4-T_2)T_1]/[(T_1-T_2)T_4]Q$

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 jour est-il possible de chauffer la pièce à partir du dispositif 1 ou du dispositif 2 ?

$Q_P/Q =$ nombre de jours

On trouve 5.8 et 6.5 jours

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

Deuxième dispositif plus économique (parce que $T_4 > T_3$). Si $T_4 = T_3$, les deux dispositifs sont équivalents.