

## Physique-chimie – DS 3

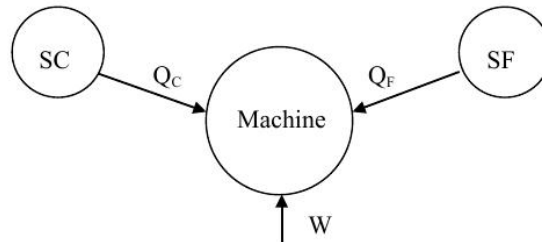
- Les parties I et II ne sont pas indépendantes.
- Les parties III et IV sont indépendantes du reste du sujet.
- Poids relatif des différentes parties dans le barème : I (15%), II (25%), III (40%), IV (20%).

## Introduction

Au quotidien, nous utilisons l'énergie sous différentes formes et avec différents appareils. Dans ce problème, nous allons nous intéresser au fonctionnement de machines motrices et réceptrices dont le rôle est de transformer une forme d'énergie en une autre, notamment mécanique et thermique, et bien sûr électrique. La machine thermique imaginée par Carnot en 1824 fonctionne, de façon cyclique, au contact de deux thermostats appelés aussi sources de chaleur dont la température est considérée comme constante. L'objectif de Carnot fut d'optimiser le rendement et l'efficacité de ces machines. Les notations utilisées sont les suivantes :

- $W$  : transfert mécanique ou travail échangé entre la machine et l'extérieur.
- $Q$  : transfert thermique ou chaleur échangée entre la machine et l'extérieur.
- $S_C$  : source chaude à la température  $T_C$ . Elle échange la chaleur  $Q_C$  avec la machine.
- $S_F$  : source froide à la température  $T_F$ . Elle échange la chaleur  $Q_F$  avec la machine.

Par convention  $T_C > T_F$ .



$W$ ,  $Q_C$  et  $Q_F$  seront donc positifs lorsque la machine reçoit de l'énergie et négatifs lorsqu'elle cède de l'énergie à l'extérieur.

## I Machines thermiques et principes de la thermodynamique

- 1 - Préciser les signes de  $W$ ,  $Q_C$ ,  $Q_F$  pour le fonctionnement de trois types de machines : moteur (M), réfrigérateur (RF) et pompe à chaleur (PAC).
- 2 - Définir, en fonction de  $Q_C$ ,  $Q_F$  et  $W$ , le rendement  $\eta$  du moteur, ainsi que les efficacités  $e_{RF}$  et  $e_{PAC}$  du réfrigérateur et de la pompe à chaleur.
- 3 -
  - a - Si l'évolution des machines est réversible, exprimer les relations données par les deux principes de la thermodynamique. On rappelle que chaque machine fonctionne de façon cyclique.
  - b - En déduire, dans cette évolution réversible, le rendement de Carnot  $\eta_C$  et les efficacités  $e_{RF}$  et  $e_{PAC}$  en fonction des températures.
- 4 - On suppose maintenant un fonctionnement irréversible du moteur. On note  $\sigma$  l'entropie créée.
  - a - Que devient l'expression du second principe écrite précédemment ?

- b - Montrer que la nouvelle expression du rendement du moteur s'écrit :  $\eta = \eta_C - \sigma T_F / Q_C$ .  
Ce rendement est il plus grand ou plus petit que  $\eta_C$  ?
- c - Au cours d'un cycle moteur, une masse donnée de gaz échange le travail  $W = -15 \text{ kJ/cycle}$ .  
Le degré d'irréversibilité, défini par  $r = \eta / \eta_C$ , vaut 0.94. On donne  $T_C = 1450 \text{ K}$  et  $T_F = 290 \text{ K}$ .  
Calculer les transferts thermiques  $Q_C$  et  $Q_F$  échangés au cours d'un cycle ainsi que la valeur de  $\sigma$ .

## II Chauffage d'une habitation

On souhaite maintenir la température d'une habitation (H) à la température  $T_H = 20^\circ\text{C}$ , alors que la température de l'extérieur (E) est égale à  $T_E = 0.0^\circ\text{C}$ . Pour cela on doit fournir à la maison la puissance thermique  $\Phi = 12 \text{ kW}$  qui correspond aux pertes thermiques.

On propose dans cette partie de comparer différents procédés de chauffage.

- 5 - On chauffe directement la maison en utilisant du bois comme combustible. Déterminer la masse  $m_B$  de bois consommée par heure sachant que le pouvoir calorifique du bois est :  $q_B = 18 \text{ MJ/kg}$ .
- 6 - On utilise maintenant une PAC fonctionnant réversiblement.
- a - Calculer l'efficacité  $e_1$  de la PAC.
- b - En déduire la puissance électrique du moteur alimentant la PAC.
- 7 - On imagine maintenant que le bois est utilisé pour maintenir la température  $T = 573 \text{ K}$  d'un réservoir (R) qui sert de source chaude à un moteur dont la source froide est constituée par l'habitation (H).

Le travail fourni par le moteur est intégralement transformé en énergie électrique. Celle-ci sert à alimenter une PAC fonctionnant réversiblement entre (H) qui sert de source chaude et (E) qui sert de source froide.

Le schéma de fonctionnement est celui de la figure 1.

On note  $Q$  la quantité de chaleur fournie par le bois et transmise au moteur par l'intermédiaire du réservoir.

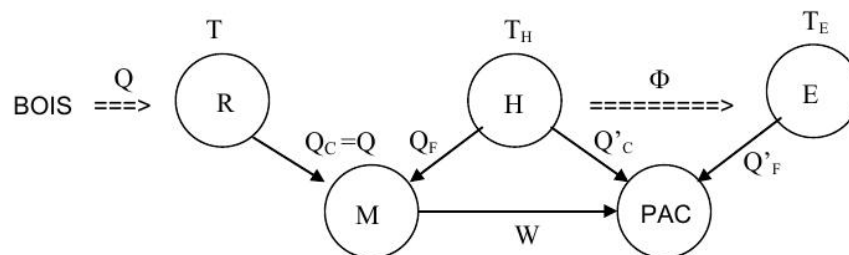


Figure 1

- a - Préciser les signes de  $Q_C$ ,  $Q'_C$ ,  $Q_F$ ,  $Q'_F$  et de  $W$ .
- b - Exprimer, en fonction de  $Q$  et des températures, la chaleur  $Q_H$  reçue par l'habitation de la part des deux machines (M et PAC), qui fonctionnent de façon réversible.
- c - En déduire la masse  $m'_B$  de bois consommée par heure. Comparer  $m'_B$  et  $m_B$ .
- 8 - Le fluide utilisé à l'intérieur de la PAC est de l'air assimilé à un gaz parfait. On ne lui fait pas décrire un cycle de Carnot (deux isentropiques et deux isothermes), car les échanges de chaleur effectués à l'aide d'isothermes sont extrêmement lents.

On remplace donc les deux isothermes par deux échanges de chaleur isobares. L'inconvénient est que pour un tel échange de chaleur, la température du gaz et du thermostat ne sont pas identiques, ce qui induit une irréversibilité.

Le cycle comporte donc deux isentropiques (AB et CD) et deux isobares (BC et DA).

- a** - Tracer l'allure du cycle dans un diagramme  $p$  en fonction de  $V$ . On indiquera le sens de parcours.
- b** - On donne  $p_A = 10$  bars,  $T_A = 293$  K,  $p_C = 1.0$  bar,  $T_C = 273$  K. Calculer  $T_B$  et  $T_D$  si  $\gamma = 1,4$ .
- c** - Sur quelle portion du cycle a lieu l'échange de chaleur avec la source chaude (donc avec l'intérieur de la maison) ? Et avec la source froide (donc l'extérieur) ?
- d** - Les deux échanges de chaleur ont lieu dans des échangeurs thermiques qui ne comportent aucune partie mobile. Il s'agit donc de systèmes en écoulement, pour lesquels on néglige toute énergie cinétique ou potentielle de pesanteur.  
 En appliquant le premier principe pour un système ouvert, donner la relation entre le transfert thermique massique reçu de la part de la source chaude  $q_c = Q_c/m$  et  $T_A$ ,  $T_D$ , et la capacité thermique massique à pression constante de l'air  $c_p$ .  
 Faire de même pour celui reçu de la part de la source froide  $q_f$ .
- e** - Exprimer l'efficacité  $e_2$  de la PAC en fonction des quatre températures, puis calculer cette efficacité. La comparer à  $e_1$ .

### III Étude d'un congélateur

On s'intéresse maintenant au fonctionnement d'un congélateur domestique placé dans une cuisine où la température ambiante  $T_c = 298\text{ K}$  est constante.

- 9 - Pour étudier les échanges de chaleur entre l'extérieur et l'intérieur du congélateur, on débranche ce dernier. La température intérieure initiale est  $T_f = 268\text{ K}$ . Au bout d'une durée  $\Delta t = 6.0\text{ h}$ , cette température passe à la valeur  $T'_f = 273\text{ K}$ .

La puissance reçue de l'extérieur est de la forme :  $\Phi(t) = -aC[T(t) - T_c]$  où  $T(t)$  est la température dans le congélateur à l'instant  $t$ ,  $C = 500\text{ kJ/K}$  la capacité thermique du congélateur et  $a$  une constante. On pourra supposer que le congélateur et ce qu'il contient se comporte comme une phase condensée incompressible indilatable de capacité thermique  $C$ .

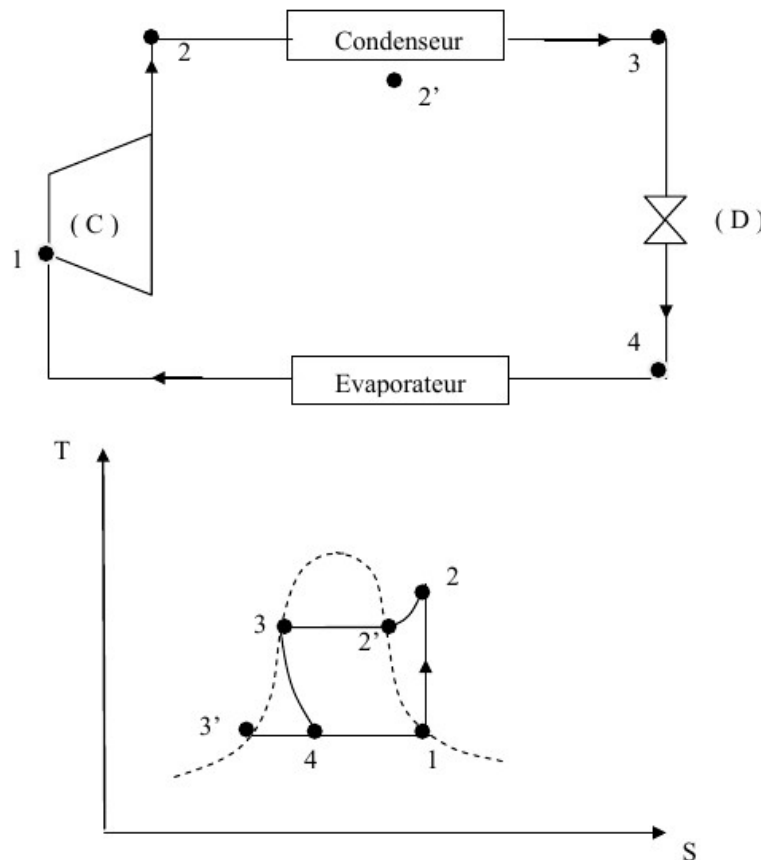
- Préciser le signe et l'unité S.I. de la constante  $a$ .
- Établir l'équation différentielle vérifiée par  $T(t)$ .
- En déduire la loi  $T(t)$ .
- Compte tenu de la valeur de  $T'_f$ , déterminer la valeur numérique de  $a$ .
- Le congélateur a une efficacité  $e = 3$ .

Exprimer, en fonction de  $a$ ,  $C$ ,  $e$ ,  $T_c$  et  $T_f$ , la puissance à fournir au moteur pour maintenir la température dans le congélateur constante et égale à  $T_f$ . La calculer.

Pour conserver les produits de la mer dans une chambre froide, un mareyeur utilise un congélateur qui fonctionne réversiblement avec de l'ammoniac.

La figure ci-dessous présente le cycle décrit ; la courbe correspondante est représentée en coordonnées  $(T, s)$ .

L'ammoniac est tantôt sous forme vapeur assimilée à un gaz parfait, tantôt sous forme liquide ; la courbe de saturation est représentée en pointillés.



Le compresseur (C), alimenté électriquement, aspire la vapeur sèche d'ammoniac dans l'état (1) et l'amène à l'état (2).

La vapeur passe par un état (2') dans le condenseur qui l'amène ensuite jusqu'à l'état (3), liquide saturant, puis elle subit une détente isenthalpique à travers le détendeur (D) jusqu'à l'état (4).

A l'état (4), le liquide est partiellement liquéfié et on note  $x$  le titre massique en vapeur.

Enfin, l'évaporateur ramène l'ammoniac à l'état de vapeur sèche.

Les transformations 2'3 et 41 sont isothermes et isobares. La transformation 22' est isobare.

On donne :  $T_1 = 265 \text{ K}$ ,  $T_3 = 300 \text{ K}$ ,  $p_1 = 3.0 \text{ bars}$ ,  $p_2 = 10 \text{ bars}$ ,  $r = R/M = 489 \text{ S.I.}$  avec  $R$  la constante des gaz parfaits et  $M$  la masse molaire de l'ammoniac, et  $\gamma = 1.3$  le coefficient adiabatique.

On rappelle que pour un gaz parfait la capacité thermique massique à volume constant s'écrit

$$c_v = \frac{r}{\gamma - 1},$$

et celle à pression constante  $c_p = \gamma c_v$ .

On négligera toute différence d'énergie cinétique ou d'altitude. Il n'y a pas de parties mobiles dans l'évaporateur ou le condenseur.

**10 - a -** Calculer  $T_2$ .

**b -** Exprimer la variation d'enthalpie lors de la transformation 33'4 et en déduire la valeur de  $x$ .

On donne la capacité thermique massique de l'ammoniac liquide saturant :  $c_L = 5.5 \text{ kJ/kg/K}$  et son enthalpie massique de vaporisation à 265 K sous 3.0 bars :  $l_v = 1.3 \text{ MJ/kg}$ .

**c -** Déterminer le transfert thermique massique  $q$  reçu par le fluide de la part du milieu extérieur au niveau de l'évaporateur.

**d -** Déterminer le travail massique  $w_C$  reçu par le fluide de la part du compresseur.

**e -** En déduire l'efficacité de ce congélateur.

**11 -** Une grande partie de cette question peut être traitée indépendamment du reste.

Jusqu'ici, pour étudier le fonctionnement du congélateur nous avons supposé que l'ammoniac en phase vapeur se comporte comme un gaz parfait. Il s'agit d'une hypothèse qui nous a permis de faire les calculs et d'estimer en particulier  $T_2$  et le titre en vapeur dans l'état 4  $x_4$ .

Nous allons maintenant déterminer ces deux grandeurs à l'aide du diagramme  $T$ - $s$  expérimental disponible en dernière page du sujet (à rendre avec la copie), et voir à quel point si ces valeurs diffèrent de celles calculées dans le cadre du modèle du gaz parfait.

**a -** Quelle est l'équation des courbes isenthalpes pour un gaz parfait ?

Dans quelle partie du diagramme  $T$ - $s$  de l'ammoniac (en fin de sujet) ceci commence-t-il à être vérifié ?

**b -** On suppose que le changement d'état  $4 \rightarrow 1$  se fait toujours à  $T_1 = 265 \text{ K}$  ( $-8^\circ\text{C}$ ), et que le point 1 est sur la courbe de rosée.

On suppose encore que l'évolution isobare  $2 \rightarrow 3$  se termine en 3 sur la courbe d'ébullition à  $T_3 = 300 \text{ K}$  ( $27^\circ\text{C}$ ).

Enfin,  $3 \rightarrow 4$  est encore supposée isenthalpique, et  $1 \rightarrow 2$  isentropique.

Avec ces informations, tracer le cycle suivi par le fluide dans le diagramme  $T$ - $s$  fourni à la fin du sujet.

**c -** Déterminer graphiquement la température  $T_2$ .

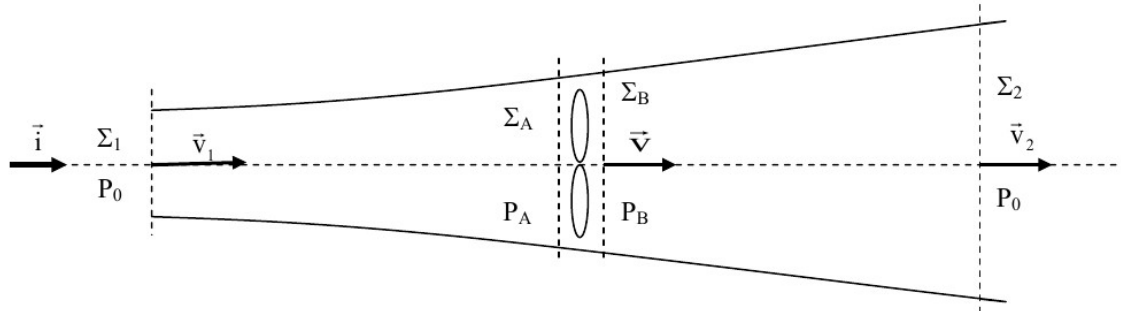
La comparer au résultat trouvé précédemment à l'aide du modèle du gaz parfait.

**d -** À l'aide de la règle des moments, déterminer graphiquement le titre  $x_4$  en vapeur dans l'état 4. On détaillera la démarche.

Le comparer au résultat trouvé précédemment à l'aide du modèle du gaz parfait.

## IV Étude d'une éolienne

Avant de parvenir dans les habitations, l'énergie électrique doit être produite. Le vent apparaît comme une source d'énergie à exploiter. Depuis l'Antiquité, des moulins à vent convertissent l'énergie éolienne en énergie mécanique pour, par exemple moudre le grain ou battre le cuivre. En 1888, Charles F. Brush construit une grande éolienne pour alimenter sa maison en électricité, avec un stockage par batterie d'accumulateurs, et de nos jours, les centrales éoliennes de production d'électricité sont en pleine expansion. On s'intéresse dans cette partie au fonctionnement d'une éolienne constituée d'une hélice à deux pâles et schématisée sur la figure ci-dessous. On représente sur ce schéma un tube de courant.



Pour l'étude, on se place dans le référentiel terrestre supposé galiléen et on néglige la pesanteur. On suppose un régime permanent établi.

L'air est considéré comme un fluide parfait et incompressible, de masse volumique  $\mu$ . Le débit massique est noté  $D_m$ , le débit volumique  $D_v$ . La figure fait apparaître un tube de courant d'air traversant l'hélice. La pression à grande distance de l'hélice, à savoir au niveau des surfaces d'entrée  $\Sigma_1$  et de sortie  $\Sigma_2$  de sections respectives  $S_1$  et  $S_2$ , est égale à la pression atmosphérique  $p_0$ .

La pression est uniforme sur une section droite du tube de courant.

On note  $p_A$  et  $p_B$  les pressions au niveau des surfaces  $\Sigma_A$  et  $\Sigma_B$  de sections  $S_A$  et  $S_B$ .

On suppose  $S_A = S_B = S$  et on admet que  $v_A = v_B = v$ .

**12** - Pourquoi peut-on affirmer que le débit volumique se conserve ?

En déduire une relation entre  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $v_1$  et  $v_2$ .

**13** - En utilisant la relation de Bernoulli, écrire une relation entre  $v_1$ ,  $v_2$ , et le travail massique indiqué  $w_i$  fourni par l'hélice au fluide.

**14** - Pour la suite, on admettra que l'on peut montrer que  $v = \frac{v_1 + v_2}{2}$ .

Donner l'expression de la puissance  $\Phi$  fournie par le fluide à l'hélice en fonction de  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $\mu$  et  $S$ .

**15** - Montrer que  $\Phi$  se met sous la forme  $\Phi = \frac{\mu S}{4} v_1^3 (1+x)(1-x^2)$ , avec  $x = \frac{v_2}{v_1}$ .

**16** - Il est intéressant de noter la dépendance en la vitesse du vent au cube. La valeur de  $x$  est ensuite en partie déterminée par la conception de l'hélice.

Pour quelle valeur de  $x$  cette puissance est-elle maximale ?

Donnez l'expression de la puissance maximale  $\Phi_{\max}$ .

**17** - Le rendement théorique est défini par  $\eta = \frac{\Phi}{\Phi_{\text{ec}}}$ , où  $\Phi_{\text{ec}}$  est la puissance cinétique en amont de l'hélice.

Rappeler le lien qui existe entre travail massique indiqué et puissance indiquée.

Par analogie, donner le lien qui existe entre énergie cinétique massique  $e_c$  et puissance cinétique  $\Phi_{\text{ec}}$ .

Exprimer la puissance cinétique  $\Phi_{\text{ec}}$  sur la surface  $\Sigma_1$  en fonction de  $v_1$ ,  $x$ ,  $\mu$  et  $S$ .

**18** - En déduire l'expression du rendement en fonction de  $x$ .

Quelle est sa valeur maximale et à quelle valeur de  $v_2$  cela correspond-il ?

**19** - Calculer  $\Phi_{\max}$  pour une éolienne avec  $S = 4.0 \text{ m}^2$ ,  $\mu = 1.2 \text{ kg/m}^3$ ,  $v_1 = 10 \text{ m/s}$ .

