

# TD physique 9

## Machines thermiques

### Exercice 1

Dans une centrale nucléaire, l'énergie dégagée par la fission des atomes est utilisée pour chauffer l'eau qui constitue l'agent thermique d'une turbine à vapeur ; cette turbine entraîne un alternateur qui produit du courant électrique. Le cœur du réacteur forme donc la source chaude de cette machine thermique, et l'on construit en général la centrale près d'un fleuve pour disposer d'une source froide. Le but de l'exercice est de déterminer l'élévation de température du fleuve qui en résulte.

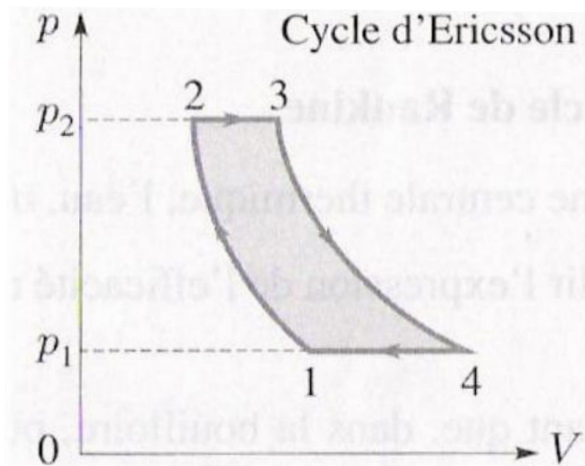
Une centrale nucléaire fournit une puissance de 1000MW. Elle est installée au bord d'un fleuve dont la température est 300 K et de débit  $D = 400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . La température de la source chaude est 700 K. En admettant que le rendement de l'installation est égal à 60% du rendement de Carnot correspondant, quelle est l'élévation de température du fleuve ?

On rappelle la capacité thermique massique de l'eau (liquide) :  $c = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

### Exercice 2

On fait subir à une mole d'air, que l'on considérera comme un gaz parfait, les évolutions représentées ci-contre (deux sont isobares et deux isothermes). On donne  $p_1 = 1\text{bar}$ ;  $p_2 = 50\text{bar}$ ;  $T_1 = 300 \text{ K}$  ( source froide ) et  $T_3 = 1000 \text{ K}$  ( source chaude )

1. Quel est le signe de  $W_{tot}$  ? ( travail total reçu par le système au cours d'un cycle )
2. Préciser sans calcul le signe de  $\Delta U$ ,  $W$  et  $Q$  au cours de chaque évolution
3. Calculer  $Q_C$  (chaleur reçue de la source chaude en un cycle),  $Q_F$  (chaleur reçue de la source froide en un cycle) et  $W_{tot}$
4. Calculer le rendement d'un moteur fonctionnant selon ce cycle
5. Comparer avec le rendement d'un moteur fonctionnant selon le cycle de Carnot ( avec les mêmes  $T_F$  et  $T_C$  ).



### Exercice 3

1. On considère 200g d'eau surfondue à une température de  $-5^{\circ}\text{C}$  et sous une pression de 1 bar. On fait brusquement cesser la surfusion en introduisant un petit morceau de glace. A quelle température se trouve le mélange dans la situation finale? Quelle est la proportion d'eau solidifiée? Calculer la variation d'entropie. On donne :  $c = 4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$  et  $l_{fus} = 333 \text{ kJ.kg}^{-1}$

2. Un kg de fréon initialement sous forme de liquide saturant à la température  $T_1$  passe dans un détendeur parfaitement calorifugé et ne comportant pas de pièces mobiles. Le mélange liquide-gaz qui en ressort est à la température  $T_2$ . On donne :  $T_1 = 300 \text{ K}$ ;  $T_2 = 240 \text{ K}$ ;  $cliq = 0,92 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$  et  $l_{vap}(T_2) = 168 \text{ kJ.kg}^{-1}$ . Calculer le pourcentage de fréon vaporisé au cours de la détente. Calculer la variation d'entropie du fréon lors de cette détente.

### Exercice 4

On s'intéresse à l'écoulement du gaz dans une tuyère. On considère cet écoulement comme permanent, adiabatique, unidimensionnel et isentropique. On cherche à relier la vitesse du gaz  $v(x)$  à la section de la tuyère  $s(x)$ . A l'entrée de la tuyère en  $x = 0$  on note  $s_0$  la section,  $P_0$  la pression,  $T_0$  la température,  $\rho_0$  la masse volumique et  $v_0$  la vitesse. On assimile l'air à un gaz parfait diatomique.

1. Donner l'expression du débit massique du gaz. En déduire une relation entre  $s(x)$ ,  $v(x)$  et  $\rho(x)$ .
2. A partir d'un bilan d'enthalpie entre le gaz en  $x = 0$  et en  $x$ , donner l'expression de la température en  $x$  en fonction de la vitesse en  $x$  ( on néglige l'énergie cinétique en  $x = 0$  )
3. Donner, compte tenu de l'hypothèse d'évolution isentropique, l'expression de la masse volumique en  $x$  en fonction de la température en  $x$ .
4. En déduire l'expression de la masse volumique en fonction de la vitesse :  $\rho(x) = \rho_0 (1 - v(x)^2/2c_p T_0)^{5/2}$
5. En déduire l'expression de  $s$  en fonction de  $v$ .
6. Calculer numériquement le facteur  $2c_p T_0$  pour  $T_0 = 300 \text{ K}$ .

### Exercice 5

Du diazote s'écoule en régime stationnaire dans une conduite horizontale avec un débit massique de  $4 \text{ kg.s}^{-1}$ ; au cours de cet écoulement il reçoit de l'énergie par un transfert thermique (combustion du carburant) et en cède mécaniquement (turbine). On considère qu'il subit une détente isotherme à la température  $T_0 = 600 \text{ K}$  de  $p_1 = 6 \text{ bar}$  à  $p_2 = 3 \text{ bar}$  en fournissant à une turbine une puissance mécanique de  $200 \text{ kW}$ . Les vitesses en entrée et en sortie sont respectivement de  $50$  et  $250 \text{ m.s}^{-1}$ .

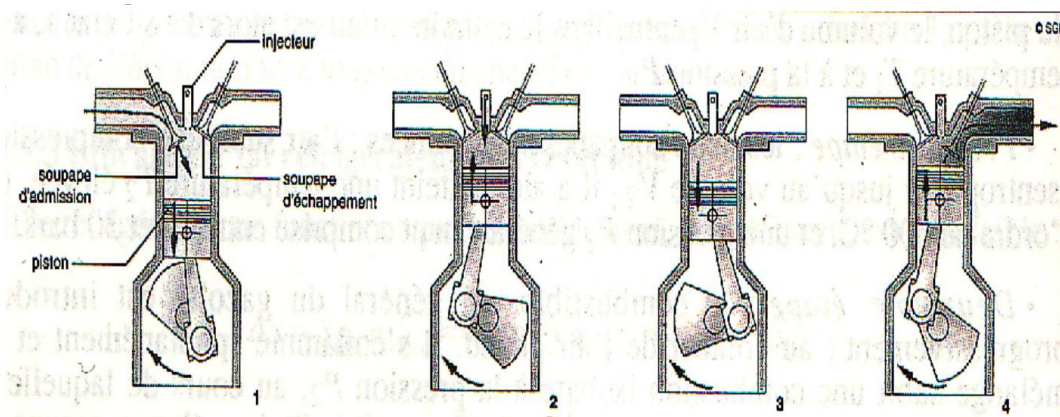
1. Calculer le transfert thermique reçu par le gaz en une seconde.
2. Calculer la variation d'entropie par unité de masse entre l'entrée et la sortie.
3. Calculer l'entropie créée par unité de temps au sein du gaz. On raisonne en considérant que l'échange thermique se fait avec un thermostat à  $600 \text{ K}$ .

## Exercice 6

Un moteur à combustion interne de type Diesel fonctionne selon le principe réalisé suivant :

- 1<sup>er</sup> temps : Soupape d'admission ouverte, soupape d'échappement fermée, de l'air est admis dans le cylindre dans les conditions de température de pression  $T_1, P_1$  correspondant à l'état A. Le volume maximum du cylindre est  $V_1$ .
- 2<sup>eme</sup> temps : soupapes fermées, l'air est comprimé isentropiquement de l'état A ( $P_1, T_1, V_1$ ) à l'état B ( $T_2, P_2, V_2$ ).
- 3<sup>eme</sup> temps : soupapes fermées, le combustible est introduit, il s'enflamme spontanément au contact de l'air chaud, ce qui produit une combustion isobare jusqu'à un volume  $V_{22}$ . L'air est dans l'état C ( $T_{22}, V_{22}, P_2$ ). Cette combustion est suivie d'une détente isentropique jusqu'à l'état D ( $T_3, V_1, P_3$ ).
- 4<sup>eme</sup> temps : soupape d'admission fermée, la soupape d'échappement s'ouvre ce qui provoque une brusque chute de pression jusqu'à l'état A ( $P_1, T_1, V_1$ ), le piston restant immobile.

Pour plus de simplicité, on considèrera un seul cylindre dont le volume offert varie entre  $V_1$ , et  $V_2$ . On peut visualiser les différentes étapes sur le schéma ci-dessous :



On donne :

La cylindrée :  $V_1 - V_2 = 1769 \text{ cm}^3$

Le rapport volumique :  $a = V_1/V_2 = 23$  ( taux de compression )

La consommation :  $c=5,2\text{L}$  pour 100 km à une vitesse de 120 km.h<sup>-1</sup>, correspondant à 4600 tours par minute.

Le carburant est le gazole de masse volumique  $\mu = 800 \text{ kg}^{-3} \text{ m}^{-3}$  et son pouvoir thermique ( énergie libérée lors de la combustion, par u de masse  $K = 45 \text{ kJ.g}^{-1}$ .

On prendra  $P_1 = 10^5 \text{ Pa}$ , on négligera la variation de composition chimique de l'air que l'on assimilera à un gaz parfait de coefficient  $\gamma = 1,4$

- a. Représenter le cycle de transformations subies par l'air dans le diagramme (P, V).
- b. On note  $b = V_1/V'_2$  le rapport de détente. Montrer que le rendement de moteur est égale à :

$$\eta = 1 - \frac{a^{-\gamma} - b^{-\gamma}}{\gamma(a^{-1} - b^{-1})}$$

- c. Soit Q l'énergie dégagée par la combustion, montrer que :  $b = \frac{a}{1 + \frac{\gamma-1}{\gamma} a^{1-\gamma} \frac{Q}{P_1 V_1}}$

d. Calculer Q, b et  $\eta$ . Rep :  $Q = 1,63 \text{ kJ}, b = 13,4, \eta = 0,68$ .

e. Déterminer la puissance du moteur dans les conditions précisées par cette étude. Rep :  $P = 42 \text{ kW}$

## Exercice 7

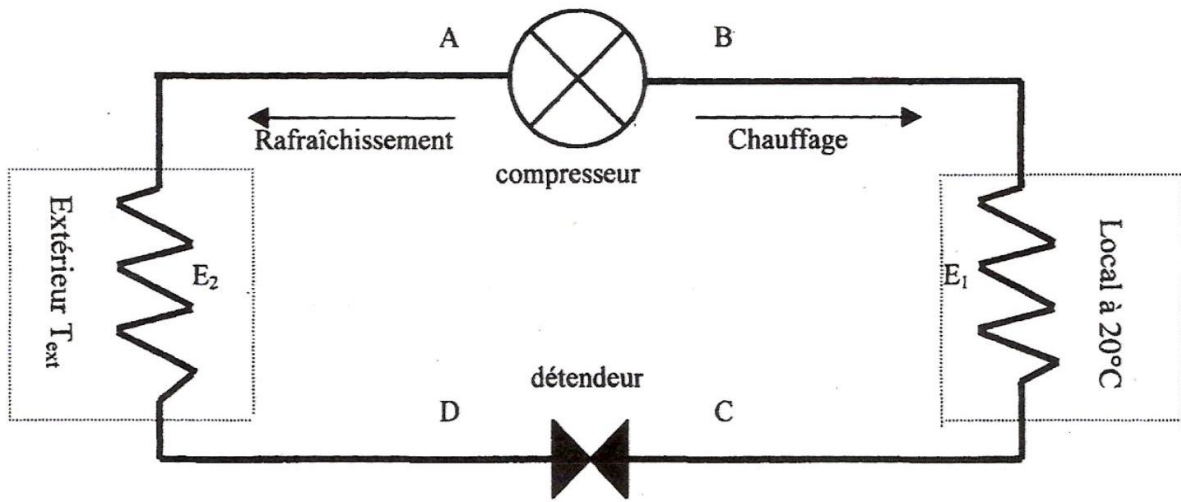
On s'intéresse au fonctionnement d'un appareil de climatisation, dont le but est de maintenir une température constante ( $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ) dans un local été comme hiver. Le climatiseur fonctionne donc en pompe à chaleur l'hiver, en machine frigorifique l'été. Les transferts thermiques du climatiseur se font avec 2 sources :

- L'intérieur de la pièce (à  $T_0$ ).
- L'atmosphère extérieure (on prendra  $T_1 = 0^\circ\text{C}$  en hiver ;  $T_2 = 40^\circ\text{C}$  en été afin de prévoir des conditions « extrêmes »).

Le fluide caloporteur qui effectue des cycles dans l'appareil est l'ammoniac. Ses caractéristiques thermodynamiques sont résumées dans le diagramme entropique  $T(S)$  où sont représentées :

- les isenthalpiques (  $H$  est donné en  $\text{kJ/kg}$  ) ;
- les isobares (représentées par On donne, par ailleurs, les pressions de vapeur saturante  $P_s(T)$  aux trois températures d'étude  $P_s(0^\circ\text{C}) = 4,3$  bars  $P_s(20^\circ\text{C}) = 8,2$  bars  $P_s(40^\circ\text{C}) = 15$  bars

On se limitera à l'étude du climatiseur en régime permanent. Par un jeu de vannes adéquat, le fluide peut circuler dans un sens pour chauffer la pièce ( $A, B, C, D, A$ ) ; dans l'autre sens pour la rafraîchir ( $B, A, D, C, B$ ).



Le circuit comporte 2 parties isobares

- L'une à la pression de vapeur saturante de l'ammoniac à  $20^\circ\text{C}$  (côté local) ;
- L'autre à la pression de vapeur saturante de l'ammoniac à  $T_{ext}$  (côté atmosphère extérieure).

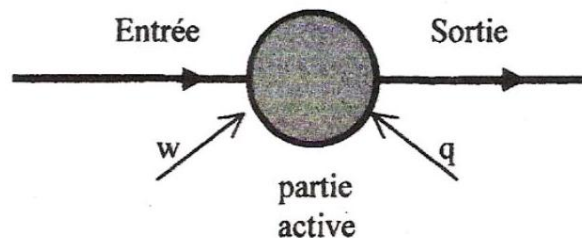
Par ailleurs, on rappelle qu'à la traversée d'une partie active (compresseur, détendeur ou échangeur) l'énergie reçue par le fluide circulant en régime permanent vérifie :

$\Delta h = h_s - h_e = w + q$  si  $h_e$  et  $h_s$  sont les enthalpies massiques du fluide à l'entrée et à la sortie ;  $w$  et  $q$  étant le travail et la chaleur utiles reçus (c'est-à-dire échangés avec l'extérieur du circuit, excluant le travail des forces de pression) par kilogramme de fluide traversant la partie active.

Le fluide subit des échanges de chaleur isobares (sans recevoir de travail utile) dans les échangeurs  $E_1$  et  $E_2$  avec les 2 sources de chaleur (local et atmosphère extérieure). Un système de ventilation permet d'améliorer les échanges thermiques : la température du fluide est celle de la source d'échange à la sortie de chacun d'entre eux.

Le compresseur comprime de manière adiabatique réversible le fluide à l'état gazeux de la plus faible à la plus forte pression. L'unité de masse de fluide traité  $y$  reçoit le travail utile  $w$ .

Le fluide subit une détente adiabatique, sans échange de travail utile, dans le détendeur (la détente est donc isenthalpique).



# 1 Généralités

I-1- Comment réalise-t-on un détendeur (détente isenthalpique d'un fluide)? Quel autre nom porte une telle détente?

I-2- Le premier principe de thermodynamique est bien vérifié dans une partie active; c'est pourtant  $\Delta h$  (et non  $\Delta u$ ) qui est égal à  $(w + q) \dots$  Expliquer qualitativement (sans entrer dans le détail d'une démonstration) cette différence.

I-3- En supposant que l'ammoniac, à l'état gazeux dans le compresseur, est assimilable à un gaz parfait de coefficient  $\gamma$  constant, exprimer le rapport  $T_s/T_e$  (des températures absolues de sortie et d'entrée dans le compresseur) en fonction de  $\gamma$  et  $P_s/P_e$  ( rapport des pressions de sortie et d'entrée du compresseur).

I-4- Expliquer pourquoi dans le diagramme (T, s), lorsque le liquide et la vapeur coexistent, les isobares sont des droites horizontales.

I-5- Justifier le fait que, étant donné les hypothèses ci-dessus, la compression réalisée par le compresseur est isentropique.

I-6- Par lecture du graphe, déduire par deux méthodes les enthalpies massiques de vaporisation de l'ammoniac à 0°C, 20°C et 40°C.

# 2 Fonctionnement hivernal du climatiseur ( chauffage )

Dans ce cas :

- l'échangeur  $E_1$  est un condenseur : l'ammoniac y entre en B sous forme de vapeur sèche; il en ressort sous forme de liquide saturant (i.e à l'extrémité gauche du palier de changement d'état) en C, à la température  $T_0$  du local (20°C)

- l'échangeur  $E_2$  est un évaporateur : le mélange liquide vapeur qui entre en D (à 0°C) se vaporise totalement pour ressortir sous forme de vapeur saturante en A à la température de l'atmosphère extérieure  $T_1 = 0^\circ\text{C}$ .

II-1- Tracer le cycle (en l'orientant) de l'ammoniac sur le diagramme entropique. Trouver graphiquement sa température  $T_B$  à la sortie du compresseur.

II-2- Déterminer (graphiquement), pour 1 kg d'ammoniac traité (on rappelle que  $E_1, E_2$  et le compresseur sont des parties actives) :

- Le travail  $w$  fourni par le compresseur au fluide ;

- La chaleur  $q_c$  reçue par le fluide (de la part du local) lors du passage dans l'échangeur  $E_1$  ;

- La chaleur  $q_f$  reçue par le fluide (de la part de l'extérieur) lors de son passage dans  $E_2$ .

II-3- Définir et calculer l'efficacité  $\eta$  du climatiseur. Quel intérêt présente une telle installation par rapport à un chauffage par chaudière? Quel serait le coefficient si le fluide effectuait des cycles de Carnot en effectuant les échanges thermiques avec les mêmes sources de chaleur?

II-4- Quelle est la fraction massique de vapeur  $X_D$  à la sortie du détendeur ? ( le théorème des moments fonctionne aussi dans le diagramme (T, s)).

II-5- En utilisant le résultat de la question I-3-, évaluer le coefficient  $\gamma$  du gaz ammoniac.

# 3 Fonctionnement estival du climatiseur ( rafraîchissement )

Les rôles des 2 échangeurs sont inversés :

$E_1$  est un évaporateur : le mélange liquide vapeur qui entre se vaporise totalement pour ressortir sous forme de vapeur saturante; alors que  $E_2$  est un condenseur : l'ammoniac y entre sous forme de vapeur sèche; il en ressort sous forme de liquide saturant.

III-1- Tracer le cycle (orienté) de l'ammoniac sur le diagramme entropique (on affectera les points de l'indice '). En déduire sa température  $T_A^A$  à la sortie du compresseur.

III-2- Déterminer (graphiquement), pour 1 kg d'ammoniac traité (même remarque qu'en II-2-)

- Le travail  $w'$  fourni par le compresseur ;

- La chaleur  $q'$  reçue (de la part de la pièce) lors du passage dans l'échangeur  $E_1$  ;

- La chaleur  $q'_2$  reçue (de la part de l'extérieur) lors du passage dans  $E_2$ .

III-3- Définir et calculer l'efficacité  $\eta'$  du climatiseur dans ce fonctionnement.

