

## Feuille d'exercices n°3 : Systèmes ouverts

### Révisions sur les machines thermiques

#### Exercice 1 : Machine frigorifique

On considère un réfrigérateur supposé fonctionner réversiblement, d'efficacité  $\eta = 6$ , dont la température intérieure vaut  $-18^\circ\text{C}$ .

1) Qu'est-ce qu'un réfrigérateur ?

2) Que vaut la température extérieure ?

3) On veut transformer de l'eau à  $20^\circ\text{C}$  en glace à  $-18^\circ\text{C}$ . Calculer pour une masse de 1kg d'eau transformée, le transfert mécanique  $W$  reçu par le réfrigérateur.

Données :

- capacité thermique massique de l'eau liquide :  $c_{\text{liq}} = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- capacité thermique massique de la glace :  $c_g = 2,05 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- enthalpie de fusion de la glace :  $L_f = 335 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

#### Exercice 2 : Représentation géométrique du rendement d'une machine de Carnot

L'agent thermique d'une machine de Carnot décrit le cycle du diagramme 1.

- Le cycle est-il moteur ? A quoi sert cette machine ?

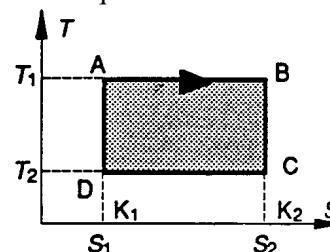


Figure 1 : Diagramme d'une machine de Carnot

- Montrer qu'on peut donner une évaluation géométrique du rendement ou de l'efficacité de la machine en fonction des aires algébriques des rectangles du diagramme.

#### Exercice 3 : Association d'un moteur de Carnot et d'une pompe à chaleur

Un moteur de Carnot échange de la chaleur avec une source chaude  $S_1$  de température  $T_1$  et une source froide  $S_3$  de température  $T_3$ . Le travail  $W$  fourni par ce moteur sert à faire fonctionner une pompe à chaleur réversible dont la source froide est  $S_3$  et dont la source chaude  $S_2$  est à la température  $T_2$ .

Représenter schématiquement l'installation et les échanges d'énergie.

Définir l'efficacité de l'ensemble et la calculer dans le cas où les températures sont  $T_1 = 600 \text{ K}$ ,  $T_2 = 300 \text{ K}$  et  $T_3 = 270 \text{ K}$ .

### Systèmes ouverts

#### Exercice 4 : Bilan sur un système ouvert

On pompe de l'eau d'un bassin, à la température  $T_b = 363 \text{ K}$ , avec un débit volumique de  $q_v = 180 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ , vers un réservoir placé  $z = 20 \text{ m}$  plus haut. Avant de pénétrer dans le réservoir, l'eau est refroidie dans un échangeur en cédant :  $45 \text{ MJ} \cdot \text{min}^{-1}$ . Le régime est stationnaire et son énergie cinétique macroscopique est négligeable. La puissance mécanique fournie par la pompe est  $P_m = 2 \text{ kW}$ . On donne la capacité thermique massique de l'eau liquide  $c = 4,2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Trouver la température  $T_r$  de l'eau qui entre dans le réservoir.

#### Exercice 5 : Écoulement d'air dans une conduite de section variable

On considère l'écoulement stationnaire d'air dans une conduite cylindrique horizontale adiabatique de section variable. Les données techniques sont les suivantes : le flux de masse est  $D_m = 3 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  ; à l'entrée, la vitesse est  $V_e = 300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , la masse volumique  $\rho_e = 5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , la pression  $P_e = 5,4 \text{ bar}$  et la température  $T_e = 573 \text{ K}$  ; à la sortie, la vitesse est  $V_s = 500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , la masse volumique  $\rho_s = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , la pression  $P_s = 1 \text{ bar}$  et la température  $T_s$ . On rappelle la masse molaire de l'air :  $M = 29 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ .  $C_{p,m} = 7R/2$

- 1) Relier la variation d'enthalpie d'une masse d'air de 1 kg, entre l'entrée de la conduite et la sortie, à la variation d'énergie cinétique correspondante.
- 2) En déduire la température de l'air à la sortie. Comparer cette détente à la détente de Joule-Kelvin.
- 3) Quelle est la variation d'entropie de cette masse d'air ? L'évolution est-elle réversible ou irréversible ? Justifier.
- 4) Calculer les aires des sections droites de la conduite à l'entrée et à la sortie.

### Exercice 6 : Détente de diazote dans une turbine

Du diazote, assimilé à un gaz parfait diatomique (masse molaire  $28 \text{ g.mol}^{-1}$ ), s'écoule avec un débit massique de  $4 \text{ kg.s}^{-1}$  dans une conduite horizontale ; il se détend isothermiquement de la pression  $P_1 = 6 \text{ bar}$  jusqu'à la pression  $P_2 = 2 \text{ bar}$ . En régime stationnaire, la détente fournit au milieu ambiant, à la température  $T_0 = 298 \text{ K}$ , une puissance de  $50 \text{ kW}$ . Les vitesses à l'entrée et à la sortie sont respectivement :  $50 \text{ m.s}^{-1}$  et  $150 \text{ m.s}^{-1}$ .

- 1) Quel est le transfert thermique reçu par le gaz pendant une seconde ?
- 2) Calculer la variation d'entropie d'une masse de  $4 \text{ kg}$  de diazote. Effectuer le bilan entropique de cette détente.

### Exercice 7 : Compresseur adiabatique

Un compresseur amène de l'air de l'état 1 atmosphérique ( $P_1 = 1 \text{ bar}$ ,  $T_1 = 300 \text{ K}$ ) jusqu'à l'état 2 ( $P_2 = 6 \text{ bar}$ ,  $T_2$ ).

La puissance  $P$  du moteur qui l'entraîne est de  $1,5 \text{ kW}$  et le débit massique est de  $6,5 \text{ g.s}^{-1}$ .

Pour l'air, assimilé à un gaz parfait :  $C_p = 1,0 \text{ kJ.kg}^{-1}.K^{-1}$  et  $\gamma = 1,4$ .

- 1) Calculer la température  $T_2$ .
- 2) Calculer l'entropie créée par unité de temps.
- 3) Quel serait le débit si l'évolution de l'air était isentropique ?

### Exercice 8 : Détermination d'une capacité thermique massique

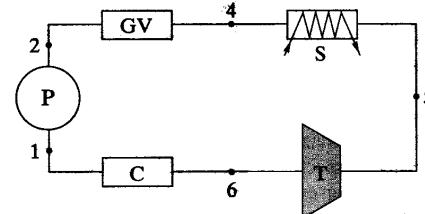
On établit, à pression constante, un courant gazeux dans un serpentin métallique de débit massique  $D_m$  ( $D_m$  représente la masse de gaz qui traverse une section de serpentin par unité de temps).

Le serpentin est plongé dans un calorimètre rempli d'eau, de capacité thermique totale  $C$  (cette capacité inclut l'eau, le calorimètre et ses accessoires). Le gaz, initialement chauffé dans un four, arrive dans le calorimètre à une température  $T_1$ . En régime stationnaire, le gaz sort du calorimètre à la température  $T_2$ .

- 1) Lorsqu'on interrompt le courant gazeux, on constate que la température  $T$  du calorimètre diminue, ce qui indique l'existence de « fuites thermiques ». En admettant que les pertes thermiques par unité de temps sont proportionnelles à l'écart de température  $(T - T_0)$  entre la température  $T$  du calorimètre et celle  $T_0$  (supposée constante) du milieu extérieur (on désignera par  $k$  la constante de proportionnalité), déterminer la loi d'évolution de la température  $T$  du calorimètre en fonction du temps  $t$ , de  $C$ ,  $k$ ,  $T_0$  et  $T_2$ .
- 2) Calculer la valeur de la capacité thermique massique à pression constante  $C_p$  du gaz en fonction de  $k$ ,  $D_m$ ,  $T_0$ ,  $T_1$  et  $T_2$ .
- 3) Données :  $C = 4 \text{ kJ.K}^{-1}$  et  $D_m = 0,47 \text{ g.s}^{-1}$ .  
On a mesuré les températures  $T_0 = 293 \text{ K}$ ,  $T_1 = 373 \text{ K}$  et  $T_2 = 310 \text{ K}$ .  
Déterminer la valeur numérique du coefficient  $k$  sachant que dix minutes après avoir coupé le courant gazeux, la température  $T$  du calorimètre a diminué de  $2 \text{ K}$ .  
En déduire la capacité  $C_p$  du gaz (dioxyde de carbone).

### Exercice 9 : Machine à vapeur

Dans une machine à vapeur, de l'eau circule en circuit fermé entre différents éléments et (parcourt le cycle schématisé ci-dessous).



L'installation se compose des éléments suivants :

- une pompe P qui réalise une compression supposée isentropique du liquide ;
- un générateur de vapeur (GV) qui réalise un échauffement 2→3, et une évaporation 3→4. Le fluide est à l'état de liquide saturant en 3, et à l'état de vapeur saturante en 4 ;
- un surchauffeur (S), qui échauffe la vapeur à pression constante. Cet échauffement est réalisé par échange thermique avec les gaz issus de la combustion ;
- une turbine (T) où le fluide subit une détente adiabatique réversible, sans variation notable d'énergie cinétique, en fournissant du travail mécanique ;
- un condenseur (C) dans lequel le fluide se condense de façon isobare.

- 1) Déterminer la température  $T_5$  (à la sortie du surchauffeur) telle, que le fluide, en fin de détente, soit constitué de vapeur saturante, sans liquide.
- 2) La condition précédente étant vérifiée, tracer l'allure du cycle sur un diagramme ( $T$ ,  $s$ ). Pourquoi, sur ce diagramme, les points 1 et 2 sont-ils confondus ?
- 3) Déterminer l'énergie échangée par 1 kg de fluide dans chaque partie de la machine. Calculer le rendement du moteur.

Données :

- volume massique de l'eau liquide :  $v_l = 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  ;

- pressions de changement d'état : 1 bar et 50 bars ;

- chaleur latente de vaporisation de l'eau :  $2256 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  à 1 bar et  $1641 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  à 50 bars ;

- capacité thermique massique moyenne de l'eau liquide dans le domaine de température utilisé :  $4,45 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

On utilisera le diagramme de Mollier simplifié ci-contre.

