

## Machines thermiques

### Exercice 1 POMPE À CHALEUR

On désire maintenir dans un appartement une température constante  $T_1 = 290$  K, grâce à une pompe à chaleur utilisant comme source froide un lac de température  $T_0 = 280$  K. La température extérieure est uniformément égale à  $T_0$ . Il faut évidemment pour cela dépenser la puissance juste nécessaire pour compenser les pertes par transfert thermique.

- Dans le but d'évaluer ces pertes, on arrête le chauffage, la température de l'appartement étant initialement  $T_1$ . Au bout de 2 heures, la température n'est plus que 285 K. On admet que le transfert thermique perdu pendant la durée  $dt$  s'écrit  $\delta Q = aC(T - T_0)dt$ ,  $C$  désignant la capacité thermique de l'appartement,  $T$  sa température à l'instant  $t$  et  $a$  une constante.

Quel est l'unité de  $a$  ?

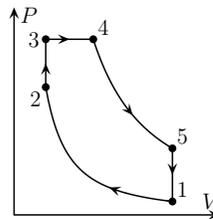
Calculer  $a$  et interpréter.

- Sachant que le coefficient d'efficacité réel de la machine n'est que 40 % de l'efficacité maximale, quelle est la puissance à fournir pour maintenir une température  $T_1$  constante dans l'appartement ?

On donne  $C = 1,0 \cdot 10^7$  J.K<sup>-1</sup>.

### Exercice 2 CYCLE DIESEL

Alors qu'un cycle DIESEL classique est composé de 2 adiabatiques, d'une isobare (pour la combustion) et d'une isochore, dans les moteurs DIESEL actuels (dits à double combustion), le cycle de l'air est celui représenté sur la figure ci-dessous dans le diagramme de WATT. On a  $P_1 = 1,0$  bar,  $T_1 = 293$  K,  $P_{\max} = 65$  bar et  $T_{\max} = T_4 = 2173$  K.



On suppose que l'air est un gaz parfait diatomique, de masse molaire  $M = 29$  g.mol<sup>-1</sup>. On donne le taux de compression :  $\alpha = \frac{V_1}{V_2} = 19$ . Toutes les transformations seront supposées mécaniquement réversibles.

- Représenter le cycle DIESEL classique dans un diagramme de WATT.
- Déterminer les types de transformations pour le cycle DIESEL à double combustion.
- Exprimer, en fonction de  $\gamma$  et des températures  $T_1, T_2, T_3, T_4$  et  $T_5$  des points correspondants sur le diagramme, le rendement  $r$  du moteur DIESEL à double combustion.
- Déterminer numériquement  $T_2, T_3$  et  $T_5$ .  
En déduire la valeur de  $r$  et comparer avec le rendement de CARNOT.
- Quelle est, en kJ, le transfert thermique reçu par 1,0 kg d'air au cours de l'évolution entre les points 2 et 4 ?  
Quel est le transfert thermique reçu entre les points 5 et 1 ?  
En déduire le travail fourni par 1 kg d'air au milieu extérieur au cours d'un cycle.

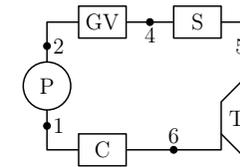
### Exercice 3 CYCLE D'ERICSSON

De l'air, supposé parfait, parcourt un cycle d'ERICSSON constitué de deux isothermes, de températures respectives  $T_1$  et  $T_3 > T_1$  et de deux isobares de pressions  $P_1$  et  $P_3 > P_1$ . Ce cycle fut appliqué à des moteurs à air destinés à la propulsion navale. On supposera que le cycle est mécaniquement réversible.

- Représenter le cycle dans un diagramme de WATT.
- Exprimer les travaux et les transferts thermiques reçus par le fluide au cours des quatre évolutions du cycle, en fonction de  $T_1, T_3, P_1$  et  $P_3$ .
- En déduire le rendement en fonction de  $T_1, T_3, P_1$  et  $P_3$ .

### Exercice 4 MACHINE À VAPEUR

La machine à vapeur de WATT présente l'inconvénient de fournir, après la détente, un mélange de vapeur et de liquide. Il s'en suit des pertes thermiques importantes. Pour pallier cet inconvénient et augmenter le rendement, on a recours à une surchauffe de la vapeur. L'installation se compose des éléments suivants :



- une pompe P qui réalise une compression supposée isentropique du fluide ;
- un générateur de vapeur (GV) qui réalise un échauffement et une évaporation. Le fluide est à l'état de liquide juste saturant en 3 et à l'état de vapeur juste 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 un travail mécanique ;
- un condenseur (C) dans lequel le fluide se condense de façon isobare.

- 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.
- 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 ?
- Déterminer l'énergie échangée par kilogramme de fluide dans chaque partie de la machine.  
Calculer le rendement du moteur.

Les pressions de changement d'état sont 1,0 et 50 bar. Les autres données sont à déterminer sur les diagrammes entropique et de MOLLIER de l'eau.

### Exercice 5 UTILISATION DES DIAGRAMMES

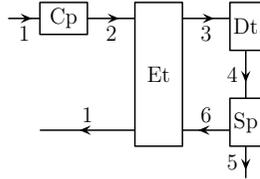
Un récipient fermé et indéformable, de volume  $V = 1,00$  L, contient de la vapeur d'eau juste saturante dans l'état initial  $I$  ( $T_I = 485$  K,  $P_I = P_s(T_I) = 20$  bar,  $x_{v,I} = 1$ ). On le met en contact avec un thermostat à la température  $T_0 = 373$  K.

Déterminer l'état d'équilibre final  $F$ , le transfert thermique échangé par l'eau et l'entropie créée au cours de l'évolution  $I \rightarrow F$  ; commenter.

On déterminera les valeurs utiles à l'aide des diagrammes entropiques et de MOLLIER de la vapeur d'eau.

**Exercice 6**  MACHINE DE LINDE 

La machine de LINDE, représentée ci-dessous, est utilisée pour obtenir du diazote liquide à partir de diazote initialement gazeux à la pression  $P_1 = 1,0$  bar et la température  $T_1 = 290$  K : elle fonctionne en régime stationnaire et les variations d'énergie mécanique sont négligeables.



Le diazote gazeux évolue de manière réversible et isotherme de l'état  $E_1$  ( $P_1 = 1,0$  bar ;  $T_1 = 290$  K) jusqu'à l'état  $E_2$  ( $P_2 = 200$  bar ;  $T_2 = 290$  K) dans le compresseur (Cp).

Puis, toujours sous forme vapeur, il traverse un échangeur thermique calorifugé (Et) où il évolue de manière isobare de l'état  $E_2$  à l'état  $E_3$  ( $P_3 = 200$  bar ;  $T_3$ ) en croisant une autre circulation de diazote gazeux évoluant de l'état  $E_6$  à l'état  $E_1$ .

Puis le diazote subit une détente isenthalpique dans le détendeur (Dt) où il évolue de l'état  $E_3$  à l'état  $E_4$  ( $P_4 = 1,0$  bar ;  $T_4 = 78$  K ;  $x_4$ ) où il est diphasé avec un titre massique en vapeur  $x_4$ .

À la traversée du séparateur (Sp), le liquide est séparé et recueilli quasi-pur dans l'état  $E_5$  (où  $P_5 = 1,0$  bar ;  $T_5 = 78$  K ;  $x_5 = 0$ ). La vapeur est récupérée quasi-pure dans l'état  $E_6$  ( $P_6 = 1,0$  bar ;  $T_6 = 78$  K ;  $x_6 = 1$ ), et traverse ensuite l'échangeur thermique (Et) où elle évolue de l'état  $E_6$  à l'état  $E_1$  en croisant l'autre circulation de diazote gazeux qui évolue de l'état  $E_2$  à l'état  $E_3$ .

Les données concernant les différents stades du diazote sont fournies par le tableau suivant.  $P$  est en bar,  $T$  en K,  $h$  en  $\text{kJ.kg}^{-1}$  et  $s$  en  $\text{kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ .

État	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$	$E_5$	$E_6$
$P$	1,0	200	200	1,0	1,0	1,0
$T$	290	290	160	78	78	78
$h$	451	421	$h_3 = h_4$	34	228	
$s$	4,40	2,68	1,76	$s_4$	0,44	2,96

- Donner l'expression de  $h_4$  en fonction de  $h_5$ ,  $h_6$  et  $x_4$ .
- On considère le système fermé ( $\Sigma$ ) constitué du diazote contenu à l'instant  $t$  dans l'échangeur thermique et des masses  $dm_2$  et  $dm_6$  qui vont y entrer entre les instants  $t$  et  $t + dt$ . En faisant le bilan énergétique pour ( $\Sigma$ ), établir une relation entre  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$ ,  $h_6$  et  $x_4$ .
- En déduire la valeur de  $x_4$ ,  $h_4$  et  $s_4$ .
- Comparer  $s_3$  et  $s_4$ . Commenter.
- En appliquant le premier et le deuxième principe de la thermodynamique à un système fermé bien choisi, calculer le transfert thermique  $Q$  et le travail  $W$  reçu par l'unité de masse du diazote traversant le compresseur.
- En déduire la masse de diazote liquide recueillie par heure pour une machine dont la puissance est égale à  $\mathcal{P} = 100$  kW.