

---

**Examen de Physique/Thermodynamique (Phys205) - Mai 2018**

**Durée de l'épreuve : 2 heures**

---

- Ce texte comporte trois pages et deux parties (A,B) indépendantes.
- L'usage des documents, des téléphones portables, tablettes ou ordinateurs n'est pas autorisé.
- L'usage des calculatrices non programmables est autorisé.

**A - Chauffage lors d'une chute** (*durée conseillée 30 min*)

Dans un but de simplification, on admettra que les chaleurs spécifiques à pression constante et à volume constant de l'eau liquide sont égales. On notera  $C_e$  la chaleur spécifique molaire de l'eau, qu'on supposera constante, et  $M_e$  la masse molaire.

1) Calculer la quantité de chaleur  $Q_{mole}$  nécessaire pour chauffer une mole d'eau, portant sa température de  $T_i$  à  $T_f$ . Calculer également la quantité de chaleur  $Q$  nécessaire faire passer la température d'une masse  $m$  d'eau de  $T_i$  à  $T_f$ .

2) A.N : Calculer  $Q_{mole}$  et  $Q$  pour un litre d'eau ( $m = 1$  kg)  $T_i = 300$  K,  $T_f = 360$  K  
 $M_e = 18 \cdot 10^{-3}$  kg/mol  $C_e \simeq 75$  J/K/mol

On considère une goutte d'eau de masse  $m$ , de température initiale  $T_0$ , en chute libre, tombant d'une hauteur  $H$ , sous l'effet de son propre poids  $\mathbf{P} = m\mathbf{g} = -mg\vec{u}_z$ . La vitesse initiale est nulle et la goutte touche une surface dure à la fin de la chute.

3) Calculer l'énergie cinétique de la goutte, juste avant que celle-ci ne touche la surface. On négligera les effets de frottements et de pression de l'air.

4) Calculer la variation de température  $\Delta T = T_1 - T_0$  de la goutte d'eau lors du choc, en supposant que toute l'énergie cinétique est transformée en chaleur absorbée par la goutte ( $T_1$  est la température de l'eau après le choc).

5) Calculer la variation d'entropie  $\Delta S$  de la goutte d'eau suite au choc, en fonction de  $m, M_e, C_e, T_0, T_1$ .

6) A.N. Calculer la température  $T_1$  de la goutte d'eau après le choc pour une chute de  $H_a = 5$  m, et pour une chute de  $H_b = 100$  m. On prendra  $g = 10$  m/s<sup>2</sup> pour l'accélération de la pesanteur terrestre, et  $T_0 = 300$  K.

**B - Machine à vapeur** (*durée conseillée 80 min*)

Dans une machine à vapeur, de l'eau est chauffée et transformée en vapeur sous pression. La vapeur d'eau sera assimilée à un gaz parfait, caractérisé par le rapport des chaleurs spécifiques  $\gamma_e = C_p/C_v$ . On va étudier dans cet exercice un modèle simplifié de fonctionnement thermodynamique d'une machine à vapeur et on déterminera le rendement thermodynamique du moteur.

On s'intéresse dans un premier temps à une machine à vapeur fonctionnant en cycle ouvert.  $n$  moles d'eau liquide à la température  $T_0$  et la pression atmosphérique  $p_0$  sont introduites dans une chaudière, grâce à une pompe qui comprime l'eau jusqu'à la pression  $p_1 > p_0$ . On admettra que le travail nécessaire au pompage est négligeable, compte tenu du faible volume de l'eau liquide, et que le chauffage de l'eau et son évaporation dans la chaudière s'effectue à la pression constante  $p_1$ . L'eau en phase liquide ou vapeur subit les transformations suivantes :

(a) : Chauffage isobare des  $n$  moles d'eau, jusqu'à la température  $T_1$ , correspondant à la température d'équilibre liquide-gaz à la pression  $p_1$ . On note  $C_l$  la capacité calorifique molaire à pression constante de l'eau en phase liquide.

(b) : Évaporation des  $n$  moles d'eau, qui se transforment en vapeur à la température  $T_1$  dans la chaudière. On note  $\Delta h_{l-g}$  l'enthalpie molaire de changement de phase liquide-gaz de l'eau.

(c) : Chauffage isobare des  $n$  moles de vapeur d'eau jusqu'à la température  $T_2$ , dans un deuxième échangeur de chaleur au niveau de la chaudière. Les  $n$  moles d'eau sont alors dans un état de vapeur surchauffée.

(d) : Détente adiabatique réversible de la vapeur d'eau jusqu'à la pression atmosphérique  $p_3 = p_0$  et la température  $T_3$  dans la turbine. C'est dans cette phase que le fluide fournit du travail à l'extérieur. On suppose que la température de la vapeur reste au dessus de la température d'équilibre liquide-gaz durant toute la détente.

(e) : Les  $n$  moles de vapeur d'eau sont rejetées à l'extérieur. Elle subissent alors un refroidissement isobare dans l'atmosphère, jusqu'à la température  $T_4$  d'équilibre vapeur-liquide à la pression  $p_0$ , suivi d'une condensation, (passage de la phase gaz à la phase liquide) et d'un refroidissement isobare en phase liquide jusqu'à la température  $T_0$ .

1) Écrire la relation de Mayer et montrer que la chaleur spécifique molaire à volume constant d'un gaz parfait s'écrit  $C_V = R/(\gamma - 1)$  où  $R$  est la constante des gaz parfaits.

2) On rappelle l'expression de la fonction thermodynamique Enthalpie  $H = U + pV$  pour un système caractérisé par les trois variables d'état  $(T, V, p)$ , température, volume, pression. Utiliser le premier principe pour montrer que  $\Delta H = Q$  lors d'une transformation isobare réversible, où  $Q$  est la quantité de chaleur reçue par le système.

3) On note  $V_1, V_2, V_3, V_4$  les volumes de la vapeur d'eau dans les quatre états suivants :  $V_1$  juste après l'évaporation (état final de (b)),  $V_2$  après chauffage (état final de (c)),  $V_3$  à la fin de la détente (état final de (d)), et  $V_4$  à la fin du refroidissement isobare de la vapeur. Calculer  $V_1, V_2, V_3, V_4$  en fonction de  $n, R, T_1, T_2, T_3, T_4$  et  $p_0, p_1$ . Représenter l'évolution des  $n$  moles de vapeur d'eau à travers ces quatre états dans le diagramme de Clapeyron.

4) Calculer les quantités de chaleur  $Q_a, Q_b, Q_c$  reçues par les  $n$  moles d'eau, en phase liquide ou gaz, durant les trois transformations (a),(b),(c) dans la chaudière. On exprimera  $Q_a, Q_b, Q_c$  en fonction de  $n, C_l, R, \gamma_e, \Delta h_{l-g}$  et  $T_0, T_1, T_2$ .

5) Calculer les variations d'entropies  $\Delta S_a, \Delta S_b, \Delta S_c$  pour ces trois transformations. Représenter l'évolution des  $n$  moles d'eau ou de vapeur lors des évolutions (a,b,c,d) dans le diagramme  $(S, T)$ , avec l'entropie  $S$  selon l'axe  $Ox$  et la température  $T$  selon  $Oy$ .

6) On rappelle la relation de Laplace  $pV^\gamma = \text{Cte}$  entre la pression et le volume lors d'une évolution isentropique (adiabatique réversible) d'un gaz parfait. Établir la relation entre la température et la pression pour une évolution isentropique et exprimer la température  $T_2$  à la fin de la phase de chauffage de la vapeur en fonction de  $p_0, p_1, T_3$  et  $\gamma_e$ .

7) Montrer que le travail échangé  $W$  lors de la phase de détente dans la turbine s'écrit  $W = nC_V(T_3 - T_2)$ .

Les paramètres de fonctionnement de la machine et les valeurs de constantes sont :

- On fixe la température  $T_3 = 390\text{K}$ , au dessus de la température d'équilibre liquide-vapeur ( $T_4 = 373\text{K}$ ) de l'eau à la pression atmosphérique ( $p_0 \simeq 1\text{bar} = 10^5\text{Pa}$ ), afin d'assurer l'absence de condensation dans la turbine.

- La chaudière fonctionne à une pression  $p_1 \simeq 20\text{ bar}$ , correspondant à une température d'équilibre liquide-vapeur  $T_1 = 485\text{K}$ .

- Autres paramètres :  $R = 8,31\text{ J/K/mol}$ ,  $\gamma_e = 1,3$ ,  $C_l = 75\text{ J/K/mol}$ ,  $\Delta h_{l-g} \simeq 34\text{ kJ/mol}$  et  $n = 10$ ,  $T_0 = 300\text{K}$

8) App. Num. Calculer la température  $T_2$  à la fin de la phase de chauffage de la vapeur (c) et le travail  $W$  échangé.

9) Donner l'expression du rendement thermodynamique  $\eta$  d'un moteur et calculer  $\eta$  pour cette machine avec les paramètres ci-dessus.

10) Calculer la puissance de chauffage et le débit d'eau (en mol/s) pour une machine développant une puissance mécanique  $P_W = 250\text{ kW}$ .

---

### Questions facultatives (bonus)

---

On améliore cette machine à vapeur en ajoutant un condenseur en sortie de turbine. La vapeur d'eau à la température  $T_3$  est refroidie jusqu'à la température  $T_4 = 373\text{K}$ , correspondant à la température d'équilibre liquide-vapeur à la pression atmosphérique, liquéfiée à cette même température et l'eau réinjectée dans la chaudière.

11) Calculer la nouvelle quantité de chaleur fournie au niveau de la chaudière, ainsi que la quantité de chaleur  $Q_f$  cédée par la vapeur et l'eau au niveau du condenseur, pour  $n = 10$  moles d'eau.

12) Calculer le rendement thermique de la machine ainsi modifiée, et la comparer au rendement de Carnot, dont on donnera l'expression en fonction des températures de la source chaude et de la source froide.