

**PHYS-106(a) Physique générale :**  
**thermodynamique 21/22**  
Examen 2022

1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	3
4	4	4	4	4	4	4
5	5	5	5	5	5	5
6	6	6	6	6	6	6
7	7	7	7	7	7	7
8	8	8	8	8	8	8
9	9	9	9	9	9	9
0	0	0	0	0	0	0

## Cahier de réponses

**Ne pas ouvrir avant le début de l'épreuve**

Instructions :

- Vérifier que votre nom et numéro sciper sont corrects
- Le cahier ne doit pas être dégrafé, les pages ne doivent pas être séparées. Les brouillons ne seront pas ramassés. Seul le cahier de réponses est corrigé
- Ne pas ajouter de feuilles sur papier libre. Elles ne seront pas scannées et donc pas corrigées
- Des cadres libres ont été ajoutés à la fin des exercices et du feuillet, en cas de nécessité
- Le ramassage des copies (cahier et énoncé) se fait uniquement à la table, même pour les départs anticipés

Dans tous les problèmes, sauf indication contraire, les résultats sont à exprimer en fonction des données fournies et des constantes physiques connues. Chaque réponse doit être justifiée dans le cadre prévu à cet effet.

L'énoncé de l'examen comporte 8 pages avec 3 exercices, numérotés de 1 à 3.

Le cahier de réponses comporte 24 pages.

Le nombre de points maximum pour cet examen est de 50 points.

Seul document autorisé: un formulaire manuscrit A4 recto/verso. Pas de calculatrice. Pas de téléphone.

Beaucoup des questions sont conceptuelles ou bien nécessitent très peu de calculs et sont indépendantes les unes des autres. On pourra admettre la solution d'une question donnée dans l'énoncé pour résoudre les questions suivantes.

This page is left blank intentionally



## Art et calorimétrie (14 points)

## 1a Température finale

0,5 On est à  $P = 1 \text{ atm}$  donc la température d'ébullition de l'eau est  $100^\circ\text{C}$

0,5 Pour chauffer l'eau de  $25^\circ\text{C}$  à  $100^\circ\text{C}$  il faut  
 $m_e c_{\text{eau}} \Delta T = 2 \cdot 4000 \cdot (100 - 25) = 600 \text{ kJ}$   
 (2L d'eau  $\rightarrow$  2 kg)

0,5 Pour refroidir le bloc d'aluminium de  $600^\circ\text{C}$  à  $100^\circ\text{C}$  il faut  $m_c c_{\text{Al}} \Delta T = 2 \cdot 900 \cdot (600 - 100) = 900 \text{ kJ}$   
 $> 600 \text{ kJ}$

0,5 Il reste 300 kJ pour évaporer l'eau, mais ce n'est pas assez pour évaporer toute l'eau, il faudrait  $2 \cdot 2000 = 4000 \text{ kJ}$

## 1b Eau évaporée

2 1,5  $m = \frac{-1}{L_{\text{eau}}} (m_c c_{\text{Al}} (T_f - T_A) + m_e c_e (T_f - T_{\text{in}}))$  AN :  $m = 0,15 \text{ kg}$  0,5

On écrit le bilan calorimétrique. Il y a seulement des échanges entre l'eau liquide et le bloc

$$m_c c_{\text{Al}} (T_f - T_A) + m_e c_{\text{eau}} (T_f - T_{\text{in}}) + m L_{\text{eau}} = 0$$

$$\Rightarrow m = \frac{-1}{L_{\text{eau}}} (m_c c_{\text{Al}} (T_f - T_A) + m_e c_{\text{eau}} (T_f - T_{\text{in}}))$$

$$m = \frac{1}{2000 - 1000} (2 \cdot 900 (100 - 600) - 2 \cdot 4000 (100 - 25)) = 0,15 \text{ kg}$$

$\hookrightarrow m_{\text{eau}} = 2 \text{ kg}$

## 1c Entropie

$$\Delta S = m_{\text{eau}} c_{\text{eau}} \ln \frac{T_f}{T_{\text{in}}} + \pi c_{\text{Ar}} \ln \frac{T_f}{T_{\text{Ar}}} + m \frac{L_{\text{eau}}}{T_f}$$

$\Delta S$  est indépendant du chemin - on fait le calculer sur un chemin réversible pour :

- 1 ① Amener l'eau liquide de  $T_{\text{in}}$  à  $T_f = 100^\circ\text{C}$

$$\Delta S_1 = \int_{T_{\text{in}}}^{T_f} m c_{\text{eau}} \frac{dT}{T} = m c_{\text{eau}} \ln \frac{T_f}{T_{\text{in}}}$$

- 1 ② Évaporer cette même  $m$  d'eau à  $T_f = 100^\circ\text{C}$

$$\Delta S_2 = \int_0^m \frac{dm L_{\text{eau}}}{T_f} = \frac{m L_{\text{eau}}}{T_f}$$

- 1 ③ refroidir le cube de  $T_{\text{Ar}}$  à  $T_f$

$$\Delta S_3 = \int_{T_{\text{Ar}}}^{T_f} \frac{\pi c_{\text{Ar}} dT}{T} = \pi c_{\text{Ar}} \ln \frac{T_f}{T_{\text{Ar}}}$$

2

1d T et m

1  $T_f$ : plus petit

1  $m$ : plus grand

A la norme la pression atmosphérique est plus basse ( $< 1 \text{ atm}$ ) donc la température d'ébullition est plus basse  $T_f \downarrow$

Il faut refroidir plus le cube donc évaporer plus d'eau  $m \uparrow$

1e Température finale

2

$$1,5 \quad T'_f = \frac{\frac{7}{2} n R T_{in} + n C_{AE} T_{AE}}{\frac{7}{2} n R + n C_{AE}} \quad \text{AN (ordre de grandeur uniquement): } T'_f \stackrel{0,5}{\approx} 600^\circ\text{C}$$

On est à pression constante d'air est en gaz diatomique rigide  $f=5$  et  $C_p = \frac{7}{2} n R$

Ce bilan calorimétrique permet d'écrire

$$C_p (T'_f - T_{in}) + n C_{AE} (T'_f - T_{AE}) = 0$$

$$\Rightarrow T'_f = \frac{\frac{7}{2} n R T_{in} + n C_{AE} T_{AE}}{\frac{7}{2} n R + n C_{AE}}$$

$$C_p \ll n C_{AE} \quad \text{donc} \quad T'_f \approx 600^\circ\text{C}$$

3

## 1f Etat final

$$1 \quad V_f = V_{in} \frac{T'_A}{T_{in}}$$

$$1 \quad W = -P_{atm} (V_f - V_{in})$$

$$1 \quad Q = 0$$

Selon l'énoncé il n'y a pas d'échange de chaleur donc  $Q=0$

Pour un gaz parfait  $V \propto T$  or  $P = \text{cte}$   
donc  $V_f = V_{in} \frac{T'_A}{T_{in}}$

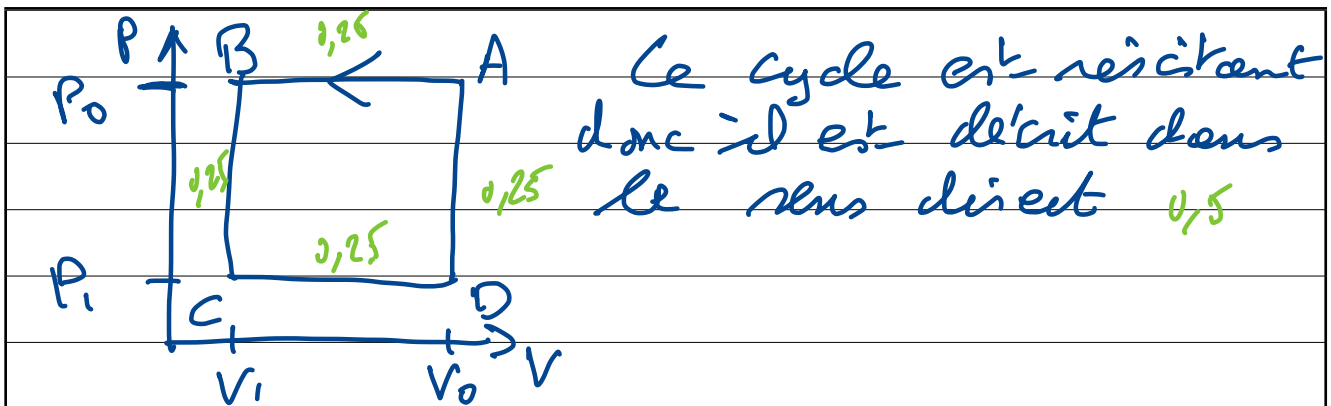
$$W = \int_{V_{in}}^{V_f} -P_{atm} dV = -P_{atm} (V_f - V_{in})$$

1g Case supplémentaire. N'utiliser qu'en cas de nécessité.

[illegible]

## Tentative de conception d'un réfrigérateur (18 points)

## 2a Diagramme p-V



## 2b Pressions, volumes et températures

1

0 $P_A = p_0$	0 $V_A = V_0$	0,1 $T_A = p_0 V_0 / nR$
0,1 $P_B = p_0$	0,1 $V_B = V_1$	0,1 $T_B = p_0 V_1 / nR$
0,1 $P_C = p_1$	0,1 $V_C = V_1$	0,1 $T_C = p_1 V_1 / nR$
0,1 $P_D = p_1$	0,1 $V_D = V_0$	0,1 $T_D = p_1 V_0 / nR$

en A  $p_0 V_0 = nRT_0 \Rightarrow T_A = \frac{p_0 V_0}{nR}$

en B  $p_B = p_0 \quad V_B = V_1 \Rightarrow T_B = \frac{p_B V_B}{nR} = \frac{p_0 V_1}{nR}$

en C  $p_C = p_1 \quad V_C = V_1 \Rightarrow T_C = \frac{p_1 V_1}{nR}$

en D  $p_D = p_1 \quad V_D = V_0 \Rightarrow T_D = \frac{p_1 V_0}{nR}$



0,5 2c  $T_B = T_D$ 

Condition :  $\frac{P_0}{P_1} = \frac{V_0}{V_1} = \frac{T_A}{T_B}$

$$T_B = T_D \Rightarrow P_0 V_1 = P_1 V_0$$

$$\Rightarrow \frac{P_0}{P_1} = \frac{V_0}{V_1}$$

Remarque  $\frac{V_0}{V_1} = \frac{T_A}{T_B}$

1 2d Capacités calorifiques

0,5  $C_v = \frac{3}{2} nR$

0,5  $C_p = \frac{5}{2} nR$

gaz monoatomique  $f = 3$

$$C_v = \frac{3}{2} nR \quad C_p = \frac{5}{2} nR$$

1,2

2e Q et W

$$\frac{1}{2} Q_{AB} = \frac{5}{2} nR(T_B - T_A)$$

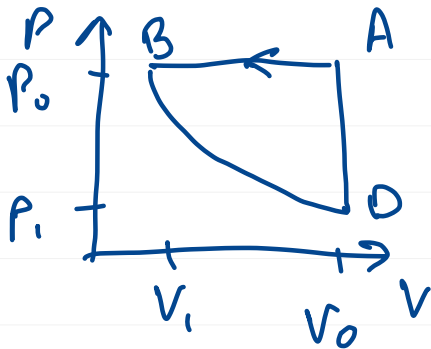
$$\frac{1}{2} W_{AB} = nR(T_A - T_B)$$

$$\frac{1}{2} Q_{BD} = nRT_B \ln T_A/T_B$$

$$\frac{1}{2} W_{BD} = -nRT_B \ln T_A/T_B$$

$$\frac{1}{2} Q_{DA} = \frac{3}{2} nR(T_A - T_B)$$

$$\frac{1}{2} W_{DA} = 0$$



AB: isobaric process  
gas parfait (réversible)

$$Q_{AB} = \Delta H = C_p \Delta T$$

$$= \frac{5}{2} nR(T_B - T_A)$$

$$W_{AB} = -P_0(V_1 - V_0) = nR(T_A - T_B)$$

BD isothermic gas parfait (réversible)

$$\Delta U = 0 \Rightarrow Q_{BD} = -W_{BD}$$

$$W_{BD} = \int_{V_B}^{V_D} -p dV = - \int_{V_B}^{V_D} nRT_B \frac{dV}{V} = -nRT_B \ln \frac{V_D}{V_B} = -nRT_B \ln \frac{T_A}{T_B}$$

DA isochore

$$W_{DA} = 0$$

$$Q_{DA} = \Delta U = C_v \Delta T = \frac{3}{2} nR(T_A - T_B)$$

## 2f Fonctions d'état

$$\begin{array}{lll}
 \Delta U_{AB} = \frac{3}{2} nR (T_B - T_A) & \Delta H_{AB} = \frac{5}{2} nR (T_B - T_A) & \Delta S_{AB} = \frac{5}{2} nR \ln \frac{T_B}{T_A} \\
 \Delta U_{BD} = 0 & \Delta H_{BD} = 0 & \Delta S_{BD} = nR \ln T_A / T_B \\
 \Delta U_{DA} = \frac{3}{2} nR (T_A - T_B) & \Delta H_{DA} = \frac{5}{2} nR (T_A - T_B) & \Delta S_{DA} = \frac{3}{2} nR \ln \frac{T_A}{T_B}
 \end{array}$$

AB gaz parfait  $\Delta U_{AB} = C_V \Delta T = \frac{3}{2} nR (T_B - T_A)$

$$\Delta H_{AB} = C_P \Delta T = \frac{5}{2} nR (T_B - T_A)$$

$$\begin{aligned}
 \Delta S_{AB} &= \int_{T_A}^{T_B} \frac{C_P dT}{T} \\
 &= \int_{T_A}^{T_B} \frac{\frac{5}{2} nR dT}{T} = \frac{5}{2} nR \ln \frac{T_B}{T_A}
 \end{aligned}$$

BD isotherme  $\Delta U = \Delta H = 0$  pour un GP

$$\Delta S_{BD} = \frac{Q_{BD}}{T_B} = nR \ln \frac{T_A}{T_B}$$

DA  $\Delta U_{DA} = C_V \Delta T = \frac{3}{2} nR (T_A - T_B)$

( $T_D = T_B$ )

$$\Delta H_{DA} = C_P \Delta T = \frac{5}{2} nR (T_A - T_B)$$

$$\Delta S_{DA} = \int_{T_D=T_B}^{T_A} \frac{C_V dT}{T} = \frac{3}{2} nR \ln \frac{T_A}{T_B}$$

on vérifie que pour le cycle  $\Delta U = 0$ ,  $\Delta H = 0$ ,  $\Delta S = 0$

## 2g Signe Q et W

$$Q_{AB} : < 0$$

$$W_{AB} : > 0$$

$$Q_{BD} : > 0$$

$$W_{BD} : < 0$$

$$Q_{DA} : > 0$$

$$W_{DA} : 0$$

le signe de W se voit sur le diagramme (p, V)  
 les Q :  $C_{V,p} \Delta T \rightarrow$  signe de  $\Delta T$  sur échelle/boue  
 et -W sur p-V

## 2h Réversibilité transformation 1

La transformation est irréversible, elle a lieu spontanément. C'est la mise en contact de deux corps à des températures différentes.

2i Signe  $Q_1$  transformation 1

$$Q_1 : < 0$$

le système perd de la chaleur

$$\Delta U = Q + W < 0$$

$$W > 0 \text{ (V↓)} \Rightarrow Q < 0$$

## 2j Réversibilité transformation 2

Transformation réversible qui passe continuellement par une série d'états à l'équilibre thermodynamique

## 2k Signe Q transformation 2

$$Q_2: > 0$$

pour un GP sur une isotherme  $\Delta U = 0$

$$Q = -W, \text{ on a une détente } V \uparrow$$

$$\text{donc } W < 0 \Rightarrow Q > 0$$

## 2l Réversibilité transformation 3

La transformation est irréversible, elle a lieu spontanément. C'est la mise en contact de deux corps à des températures différentes.

## 2m Signe Q transformation 3

$$Q_3 : > 0$$

si on chauffe le système n'échange pas de la chaleur et  $T \uparrow \Rightarrow Q > 0$

2n  $Q_c$  et  $Q_f$ 

$$Q_{chaud} = Q_3 > 0$$

$$Q_{froid} = Q_1 + Q_2$$

Ces transformations 1 et 2 doivent échanger avec le thermostat froid et la 3 échanger avec le thermostat chaud

1

20  $Q_{\text{froid}} < 0$ 

On a un cycle résistant donc  $W > 0$

0,5 Sur le cycle  $Q_{\text{tot}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = -W < 0$

0,5 or  $Q_3 > 0$  donc  $Q_1 + Q_2 = Q_4 < 0$

1

2p Réfrigérateur ?

Pour faire un réfrigérateur il faut extraire de la chaleur de la source froide :  $Q_f > 0$  or ici  $Q_f$  est forcément  $< 0$

On ne peut pas fabriquer un réfrigérateur avec ce cycle.

2q  $S_{int}$ 

$$S_{int} = \frac{5}{2} nR \frac{T_A - T_B}{T_B} - \frac{3}{2} nR \frac{T_A - T_B}{T_A} - nR \ln \frac{T_A}{T_B}$$

Sur le cycle  $\Delta S = 0$  donc  $S_{int} = -S_{ech}$

$$0,5 \ S_{AB}^{ech} = C_p \frac{T_B - T_A}{T_B} = \frac{5}{2} nR \frac{T_B - T_A}{T_B}$$

$$0,5 \ S_{BD}^{ech} = \int_{V_B}^{V_D} nR \frac{dV}{V} = nR \ln \frac{V_D}{V_B} = nR \ln \frac{T_A}{T_B}$$

$$0,5 \ S_{DA}^{ech} = \frac{C_v (T_A - T_B)}{T_A} = \frac{3}{2} nR \frac{T_A - T_B}{T_A}$$

$$= \frac{5}{2} nR \frac{T_A}{T_B} + \frac{3}{2} nR \frac{T_B}{T_A} - \frac{8}{2} nR - nR \ln \frac{T_A}{T_B}$$

$$= (T_A - T_B) nR \left[ \frac{5}{2T_B} - \frac{3}{2T_A} \right] - nR \ln \frac{T_A}{T_B}$$



[illegible]

## De l'eau dans le piston (18 points)

## 3a Eau liquide

$$n_l = n - n_g = n - \frac{P_{\text{atm}} V_{\text{in}}}{RT}$$

0,5 à 100°C la pression de vapeur saturante de l'eau est 1 atm (c'est la température d'ébullition)

On fait l'hypothèse qu'il reste de l'eau liquide donc  $P_{\text{H}_2\text{O}} = 1 \text{ atm}$  et le nombre de moles d'eau sous forme liquide est

$$n_g = \frac{P_{\text{H}_2\text{O}} V_{\text{in}}}{RT} = \frac{P_{\text{atm}} V_{\text{in}}}{RT}$$

$$0,5 \quad n_g = \frac{10^5 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{8,314} \approx \frac{1}{30} \approx 0,03 \text{ mol} \text{ car est bien } < 0,1 \text{ mol}$$

## 3b Pressions partielles

$$0,5 \quad P_{\text{H}_2\text{O}} = P_{\text{atm}} = 1 \text{ bar}$$

$$0,5 \quad P_{\text{N}_2} = P_{\text{tot}} - P_{\text{atm}} = 1 \text{ bar}$$

$$P_{\text{tot}} = P_{\text{in}} = P_{\text{H}_2\text{O}} + P_{\text{N}_2}$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = 1 \text{ atm} \quad \text{donc} \quad P_{\text{N}_2} = P_{\text{tot}} - P_{\text{H}_2\text{O}}$$

1

## 3c Humidité

$$0,5 \quad h = 100 \%$$

$$0,5 \quad T_r = 100^\circ\text{C}$$

Ce gaz est saturé en humidité  
(dont 0,25 de 0,25 n'est seulement  
définition de  $h$  et  $T_r$ )

2

## 3d Pression et volume finaux

$$0,5 \quad P'_{H_2O} = P_{\text{atm}}$$

$$0,5 \quad P'_{N_2} = P_{N_2} V_{\text{in}} / V_{\text{fin}}$$

$$0,5 \quad P_{\text{fin}} = P'_{H_2O} + P'_{N_2}$$

$$0,5 \quad V_{\text{fin}} = nRT / P_{\text{atm}}$$

Ce volume nécessaire pour évaporer  
toute l'eau est

$$V_{\text{fin}} = \frac{nRT}{P_{\text{atm}}}$$

$$nT = \text{cte}$$

$$PV = \text{cte} \text{ donc}$$

$$P'_{N_2} = P_{N_2} \frac{V_{\text{in}}}{V_{\text{fin}}}$$

## 3e Enthalpie

0,75 C'est l'enthalpie est une bonne fonction d'état pour les évolutions à pression constante, or l'évaporation de l'eau se fait à  $p = p_{atm} = 1 \text{ bar}$

Egalement la chaleur latente d'évaporation est définie à pression constante

0,25  $L = \Delta H$

## 3f dH

$$dH = \delta Q_{rev} + V dp$$

0,5  $dU = \delta Q_{rev} - p dV$   $H = U + pV$

0,5  $\Rightarrow dH = \delta Q_{rev} + V dp$

2

## 3g Chaleur eau

$$Q_{\text{eau}} = n_e L_{\text{eau}}$$

$$dH = \delta Q_{\text{rev}} + V dp$$

on  $\int$  car la masse d'eau  $\delta$  est constante

$$\Delta H = Q_{\text{eau}} + 0 = n_e L_{\text{eau}}$$

## 3h Enthalpie pour l'azote

$$\Delta H_{N_2} = 0$$

0,5 seconde loi de Joule pour un gaz parfait

$$0,5 T = \text{const} \Rightarrow \Delta H = 0$$

2

3i Chaleur  $Q_A$ 

$$1 \quad Q_{N_2} = -n_2 RT \ln \frac{P'_{N_2}}{P_{N_2}}$$

$$1 \quad Q_A = Q_{N_2} + Q_{H_2O}$$

$$\text{avec } n_{N_2} RT = P_{N_2} V_{in}$$

On intègre  $\delta H$ 

$$0,5 \quad \Delta H = 0 = \int_{P_{N_2}}^{P'_{N_2}} \delta Q + V dp$$

$$= Q_{N_2} + \int_{P_{N_2}}^{P'_{N_2}} n_2 RT \frac{dp}{p} = Q_{N_2} + n_2 RT \ln \frac{P'_{N_2}}{P_{N_2}}$$

$$0,5 \quad Q_{N_2} = -n_2 RT \ln \frac{P'_{N_2}}{P_{N_2}} \quad Q_A = Q_{N_2} + Q_{H_2O} \quad 1$$

3j Travail

2

$$W_A = -P_{atm} (V_{fin} - V_{in}) - n_2 RT \ln \frac{V_{fin}}{V_{in}}$$

$$\text{avec } n_{N_2} RT = P_{N_2} V_{in}$$

$$1 \quad W_A = \int_{V_{in}}^{V_{fin}} -P_{tot} dV = \int_{V_{in}}^{V_{fin}} -P_{H_2O} dV + \int_{V_{in}}^{V_{fin}} -P_{N_2} dV$$

$$= -P_{atm} (V_{fin} - V_{in}) - n_2 RT \int_{V_{in}}^{V_{fin}} \frac{dV}{V}$$

$$1 \quad = -P_{atm} (V_{fin} - V_{in}) - n_2 RT \ln \frac{V_{fin}}{V_{in}}$$

### 3k Energie interne

$$\Delta U = Q_A + W_A$$

On applique le premier principe

### 3l Chaleur $Q_B$

$$Q_B = \Delta U + P_{fin} (V_{fin} - V_{in})$$

1 Ces états initiaux et finaux sont les mêmes donc  $\Delta U$  ne change pas. Par contre  $Q_B$  et  $W_B$  sont différents

$$\Delta U = Q_A + W_A = Q_B + W_B$$

$$0,5 \quad W_B = - P_{fin} (V_{fin} - V_{in})$$

$$0,5 \quad Q_B = \Delta U - W_B$$

[illegible]