

Série de TD 1 de thermodynamique
Notions de base en thermodynamique

Exercice 1 :

1) Calculer la différentielle de la fonction :

$$f(x, y) = x^2y + xy^2 - 2x^3y^2.$$

2) On considère les formes différentielles suivantes :

$$df = x^2y^2 dx - \frac{2}{3}x^3y^3 dy \text{ et } dg = (x^2y - 2y) dx + \left(\frac{x^3}{3} - 2x\right) dy$$

a) Laquelle de ces deux formes est une différentielle totale?

b) Déterminer alors la fonction correspondante.

3) Montrer que la forme différentielle suivante est exacte :

$$dP = -\frac{RT}{V^2} dV + \frac{R}{V} dT$$

où R est une constante.

dp représente en fait la différentielle de la pression d'un gaz ; en déduire alors l'équation d'état de ce gaz.

Exercice 2:

Écrivez la différentielle de l'énergie interne dU en fonction des variables indépendantes T et V pour un gaz parfait. À partir de dU et $\delta Q = dU - \delta W$, déduisez dS ($dS = \frac{\delta Q}{T}$) en fonction de T, V et des dérivées partielles de U . Montrez que $\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = 0$.

Exercice 3 :

I- On considère les situations suivantes. Pour chacune d'elles, préciser la nature du système (ouvert, fermé ou isolé) et justifier brièvement la réponse.

- a. Une bouteille de gaz parfaitement fermée, placée dans une pièce à température ambiante.
- b. Une casserole ouverte contenant de l'eau en ébullition sur une plaque chauffante.
- c. Un thermos parfaitement isolé contenant du café chaud.
- d. Un cylindre muni d'un piston mobile sans frottement, contenant un gaz, le piston étant diathermique.
- e. Un réacteur chimique continu avec entrée de réactifs et sortie de produits.

II-

1. Classer les grandeurs : Masse m , Volume V , Température T , Pression P , Énergie interne U , Masse volumique ρ , Volume massique v
2. Montrer que le volume massique $v = \frac{V}{m}$ est une grandeur intensive.
3. Un système est divisé en deux sous-systèmes identiques :
 - a) que deviennent les grandeurs extensives ?
 - b) que deviennent les grandeurs intensives ?

Exercice 4 :

I- On considère trois substances à une température de 20°C :

Eau : $\rho_{\text{eau}} = 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, Huile : $\rho_{\text{huile}} = 850 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, Mercure : $\rho_{\text{Hg}} = 13\,600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

1. Calculer la densité de l'huile et du mercure par rapport à l'eau.
2. Un récipient contient 4L d'huile.
 - a) Calculer la masse correspondante.
 - b) Calculer le volume spécifique de l'huile.
3. On verse successivement l'eau, l'huile et le mercure dans un même récipient.
 - a) Classer ces fluides par ordre de densité croissante.

II- On considère un gaz contenu dans un cylindre de volume V et de masse m .

1. Donner la définition du volume spécifique v . Préciser son unité dans le S.I.
2. Un gaz occupe un volume de $2,5 \text{ m}^3$ pour une masse de 5 kg.
 - a) Calculer le volume spécifique v .
 - b) En déduire la masse volumique ρ du gaz.
 - c) Déduire sa densité connaissant la densité de l'air $\rho_{\text{air}} = 1,29 \text{ Kg/m}^3$
3. Le système est divisé en deux parties de même masse.
 - a) Calculer le volume et la masse de chaque sous-système.
 - b) Que devient le volume spécifique ? Commenter.

Exercice 5 :

1. Une masse d'un gaz parfait subit une transformation isotherme de l'état défini par ($P_1 = 1 \text{ atm}$, $V_1 = 2 \text{ l}$, $T_1 = 25^\circ\text{C}$) à l'état ($P_2 = 12 \text{ atm}$), calculer V_2 ?
2. Cette masse subit une transformation isobare de son état initial jusqu'à $T = 267^\circ\text{C}$, calculer

V_3 ?

3. On introduit cette masse dans un cylindre en acier fermé à 27°C et 2 atm. Quelle est sa pression P_f si on chauffe jusqu'à 130°C .

Exercice 6 :

Calculer Q à pression atmosphérique constante nécessaire pour porter la température :

1. De 180 g d'eau de 0°C à 100°C à l'état liquide.
2. De 220g de glace de 0°C à 100°C à l'état vapeur.
3. De 330g de glace de -10°C à 127°C .
4. De 14,5g d'air de 67°C à 830°C . Selon que : a) $V = \text{Cste}$; b) $P = \text{Cste}$.

Données : $C_P(\text{H}_2\text{O}, l) = 2C_P(\text{H}_2\text{O}, s) = 1 \text{ cal/g.K}$; $C_P(\text{H}_2\text{O}, g) = 8,22 \text{ cal/mol.K}$, $L_{\text{fus}}(\text{glace}) = 334,4 \text{ J/g}$ à 0°C et $L_{\text{vap}}(\text{H}_2\text{O}, l) = 540 \text{ cal/g}$ à 100°C $C_v(\text{air}) = 20,9 \text{ J/mol.K}$; $C_p(\text{air}) = 20,9 \text{ J/mol.K}$.

Exercice 7

On effectue, de 3 façons différentes, une compression qui amène du diazote N_2 de l'état 1 ($P_1 = P_0 = 1 \text{ bar}$, $V_1 = 3 V_0$) à l'état 2 ($P_2 = 3 P_0$, $V_2 = V_0 = 1 \text{ litre}$).

La première transformation est isochore puis isobare, la seconde est isobare puis isochore, la troisième est telle que $P \cdot V = \text{Cte}$.

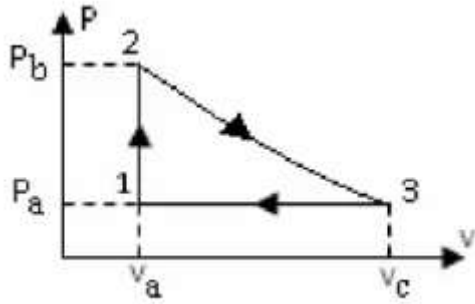
- 1- Quelles sont les travaux échangés dans les 3 cas ?
- 2- Quelle transformation choisira-t-on si l'on veut dépenser le moins d'énergie motrice ?
- 3- Le diazote est maintenant considéré comme un gaz réel obéissant à l'équation de Van der Waals : $(P + a/V^2)(V - b) = RT$.

En supposant une compression quasi statique telle que $P \cdot V = \text{cte}$, calculer l'expression du travail de compression entre V_1 et V_2 .

Exercice 8

On considère une mole de gaz parfait caractérisé par les variables macroscopiques (P, V, T).

On fait subir à ce gaz le cycle des trois transformations réversibles représentées sur le diagramme $P - V$ ci-dessous :



1 → 2 : transformation isochore

2 → 3 : transformation isotherme

3 → 1 : transformation isobare

1. Calculer les énergies chaleur et travail mises en jeu le long de chaque transformation.

2. En déduire les énergies chaleur et travail mises en jeu le long du cycle. Conclure.

Corrige de la série 1 de thermodynamique (25-26)

Exercice 1

1. Différentielle de $f(x,y)$

La fonction est $f(x,y) = x^2y + xy^2 - 2x^3y^2$.

La différentielle totale est $df = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_y dx + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)_x dy$.

Calculs : $\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_y = 2xy + y^2 - 6x^2y^2$, $\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)_x = x^2 + 2xy - 4x^3y$.

Ainsi, $df = (2xy + y^2 - 6x^2y^2)dx + (x^2 + 2xy - 4x^3y)dy$.

2.

a) dg et df DTE ?

Les formes sont : $df = x^2y^2 dx - \frac{2}{3}x^3y^3 dy$ et $dg = (x^2y - 2y) dx + \left(\frac{x^3}{3} - 2x\right) dy$.

Pour vérifier l'exactitude, le critère est $\left(\frac{\partial^2 g}{\partial x \partial y}\right)_{y,x} = \left(\frac{\partial^2 g}{\partial y \partial x}\right)_{x,y}$

- Pour df : $\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_y = x^2y^2$, $\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)_x = -\frac{2}{3}x^3y^3$, $\left(\frac{\partial f}{\partial x \partial y}\right)_{y,x} = 2x^2y \neq -2x^3y^2 =$

$\left(\frac{\partial f}{\partial y \partial x}\right)_{x,y}$ donc df n'est pas totale s exacte.

- Pour dg : $\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)_y = x^2y - 2y$, $\left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)_x = \frac{x^3}{3} - 2x \Rightarrow \left(\frac{\partial g}{\partial x \partial y}\right)_{y,x} = x^2 - 2$, $\left(\frac{\partial g}{\partial y \partial x}\right)_{x,y} =$
 $x^2 - 2$

$$\Rightarrow \left(\frac{\partial^2 g}{\partial x \partial y}\right)_{y,x} = \left(\frac{\partial^2 g}{\partial y \partial x}\right)_{x,y}$$

b) les fonctions pour df et dg

- pour df : $\left(\frac{\partial^2 g}{\partial x \partial y}\right)_{y,x} \neq \left(\frac{\partial^2 g}{\partial y \partial x}\right)_{x,y}$ donc elle n'est pas totale exacte donc pas de fonction simple.

- Pour dg $\left(\frac{\partial^2 g}{\partial x \partial y}\right)_{y,x} = \left(\frac{\partial^2 g}{\partial y \partial x}\right)_{x,y}$ donc elle est totale exacte

$$\Rightarrow g(x, y) = \int \left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)_y dx = \int (x^2 y - 2y) dx = \frac{1}{3} x^3 y - 2xy + c.$$

Vérification : $dg = \frac{\partial g}{\partial x} dx + \frac{\partial g}{\partial y} dy$ reproduit la forme

1. Montrer que la forme différentielle suivante est exacte : $dP = -\frac{RT}{V^2} dV + \frac{R}{V} dT$

$$dP = \left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T dV + \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V dT, \text{ où :}$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T = -\frac{RT}{V^2}$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V = \frac{R}{V}$$

$$\text{Critère de DTE : } \left(\frac{\partial^2 P}{\partial V \partial T}\right)_{T,V} = \left(\frac{\partial^2 P}{\partial T \partial V}\right)_{V,T}.$$

- $\left(\frac{\partial^2 P}{\partial V \partial T}\right)_{T,V} = -\frac{R}{V^2}$
- $\left(\frac{\partial^2 P}{\partial T \partial V}\right)_{V,T} = -\frac{R}{V^2}$

Intégration pour trouver P(V,T)

$$\text{Puisque exacte, } P = \int \left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T dV.$$

$$p = \int \left(-\frac{RT}{V^2}\right) dV = \frac{RT}{V} + cte \quad \text{si } cte = 0$$

$$\Rightarrow \mathbf{p} = \frac{RT}{V}$$

Exercice 2

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V dT + \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T dV.$$

$$\text{Pour un gaz parfait, } \delta W = -PdV = -\frac{nRT}{V} dV$$

$$\text{donc } \delta Q = dU + \frac{nRT}{V} dV = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V dT + \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T dV + nR \frac{dV}{V}.$$

$$\text{Ainsi, } dS = \frac{\delta Q}{T} = \frac{1}{T} \left[\left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V dT + \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T dV + nR \frac{dV}{V} \right].$$

dS étant exacte, les dérivées croisées s'égalisent : $\frac{\partial}{\partial V} \left(\frac{1}{T} \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V \right)_T = \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{1}{T} \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T + \frac{nR}{V} \right)_V$, ce qui implique $\left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T = 0$.

Exercice 3

- I- a. Bouteille de gaz fermée : Système fermé : il n'y a pas d'échange de matière, mais des échanges de chaleur sont possibles avec l'environnement.
- b. Casserole ouverte avec eau en ébullition : Système ouvert : échange de matière (vapeur d'eau) et d'énergie (chaleur et travail).
- c. Thermos parfaitement isolé : Système isolé : aucun échange de matière ni d'énergie avec l'extérieur.
- d. Cylindre avec piston mobile diathermique : Système fermé : pas d'échange de matière, mais échange de travail (piston mobile) et de chaleur (paroi diathermique).
- e. Réacteur chimique continu : Système ouvert : entrée et sortie de matière et échanges énergétiques.

II- 1. Classification des grandeurs :

| Grandeur | Type |
|------------------------|-----------|
| Masse m | Extensive |
| Volume V | Extensive |
| Température T | Intensive |
| Pression P | Intensive |
| Énergie interne U | Extensive |
| Masse volumique ρ | Intensive |
| Volume massique v | Intensive |

$$2. v = \frac{V}{m} = \frac{\text{Extensive}}{\text{Extensive}} = \text{intensive}$$

3. Lorsqu'un système est divisé en deux sous-systèmes identiques : a) les grandeurs extensives sont divisées par deux, b) tandis que les grandeurs intensives restent inchangées.

Exercice 4

Densités de l'huile et de Hg

$$d_{\text{solide, liquide}} = \frac{\rho_{\text{solide, liquide}}}{\rho_{\text{eau}}}$$

1. Pour l'huile : $d_{\text{huile}} = \frac{\rho_{\text{huile}}}{\rho_{\text{eau}}} = \frac{850}{1000} = 0,85.$

Pour le mercure : $d_{\text{Hg}} = \frac{\rho_{\text{Hg}}}{\rho_{\text{eau}}} = \frac{13600}{1000} = 13,6.$

2. Un récipient contient 4 L d'huile, soit $V = 4 \times 10^{-3} \text{ m}^3.$

a) La masse est $\rho = \frac{m}{V} \Rightarrow m = \rho_{\text{huile}} \times V = 850 \times 4 \times 10^{-3} = 3,4 \text{ kg}.$

b) Le volume spécifique v est l'inverse de la masse volumique : $v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}$

$v = \frac{1}{\rho_{\text{huile}}} = \frac{1}{850} = 1,176 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}.$

3. Ordre de densité croissante : huile ($850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), eau ($1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), mercure ($13600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

Ainsi, dans le récipient, l'huile flotte sur l'eau, qui flotte sur le mercure.

II :

1. Le volume spécifique v est défini par $v = \frac{V}{m}$, où V est le volume et m la masse. Dans le S.I., son unité est $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}.$

2. Pour $V = 2,5 \text{ m}^3$ et $m = 5 \text{ kg} :$

a) $v = \frac{V}{m} = \frac{2,5}{5} = 0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}.$

b) La masse volumique $\rho = \frac{1}{v} = \frac{1}{0,5} = 2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}.$

c) $d_{\text{gaz}} = \frac{\rho_{\text{gaz}}}{\rho_{\text{air}}} = \frac{2}{1,29} = 1,55$

3. a) Chaque sous-système a une masse $m' = \frac{5}{2} = 2,5 \text{ kg}.$

Le volume de chaque sous-système est $V' = \frac{2,5}{2} = 1,25 \text{ m}^3.$

b) Le volume spécifique reste $v = 0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, car il est une propriété intensive indépendante de la masse.

Exercice 5

1. Transformation isotherme (T constante)

Température initiale : $T_1 = 25^\circ\text{C} = 298 \text{ K}$ (T reste 298 K).

$$P_1 V_1 = P_2 V_2.$$

$$V_2 = \frac{P_1 V_1}{P_2} = \frac{1 \times 2}{12} = 0,167 \text{ L}.$$

2. Transformation isobare (P constante = 1 atm)

$$\frac{V}{T} = \text{cte.} \Rightarrow \frac{V_3}{T_3} = \frac{V_1}{T_1}$$

$$T_3 = 267^\circ\text{C} = 540 \text{ K.}$$

$$V_3 = V_1 \times \frac{T_3}{T_1} = 2 \times \frac{540}{298} \approx 2 \times 1,812 = 3,624 \text{ L.}$$

3. Transformation isochore (V constante = 2 L)

$$\text{Température initiale : } T_1 = 27^\circ\text{C} = 300 \text{ K.}$$

$$\text{Température finale : } T_2 = 130^\circ\text{C} = 403 \text{ K.}$$

$$\frac{P}{T} = \text{cte.} \frac{P_f}{T_f} = \frac{P_i}{T_i}$$

$$P_f = P_i \times \frac{T_f}{T_i} = 2 \times \frac{403}{300} \approx 2 \times 1,343 = 2,686 \text{ atm.}$$

Exercice 6

1. 180 g d'eau liquide de 0°C à 100°C

$$\text{Chauffage sensible à T : } Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T.$$

$$C_p(\text{H}_2\text{O}, \text{l}) = 1 \text{ cal/g}\cdot\text{K} = 4,18 \text{ J/g}\cdot\text{K}, \text{ J } \Delta T = 100 \text{ K. } 1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$$

$$Q_1 = 180 \times 1 \times 100 = 18\,000 \text{ cal} = 75\,240 \text{ J.}$$

2. 220 g de glace de 0°C à 100°C vapeur

Étapes : Fusion à 0°C → Chauffage eau liquide (0 - 100) $^\circ\text{C}$ → Vaporisation à 100°C

$$\text{- à } 0^\circ\text{C} : Q_{\text{fus}} = 220 \times 334,4 = 73\,568 \text{ J}$$

$$\text{- } 0^\circ\text{C} \rightarrow 100^\circ\text{C} : C_p(\text{H}_2\text{O}, \text{l}) = 1 \text{ cal/g}\cdot\text{K}, Q_{\text{liq}} = 220 \times 1 \times 100 = 22\,000 \text{ cal}$$

$$Q_{\text{liq}} = 91\,960 \text{ J.}$$

$$\text{- } 100^\circ\text{C} : Q_{\text{vap}} = 220 \times 540 = 118\,800 \text{ cal} = 496\,584 \text{ J.}$$

$$Q_2 = 73\,568 + 91\,960 + 496\,584 = 662\,112 \text{ J}$$

3. 330 g de glace de -10°C à 127°C

Étapes : Chauffage glace- -10°C - 0°C → Fusion à 0°C → Chauffage liquide 0°C - 100°C →

Vaporisation à 100°C → Chauffage vapeur 100°C - 127°C

$$\text{- } -10^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C} : Q_1 = 330 \times 0,5 \times 10 = 1\,650 \text{ cal} = 6\,897 \text{ J.}$$

$$\text{- } 0^\circ\text{C} : Q_{\text{fus}} = 330 \times 334,4 = 110\,352 \text{ J.}$$

$$\text{- } 0^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C} : Q_2 = 330 \times 1 \times 100 = 33\,000 \text{ cal} = 137\,940 \text{ J.}$$

$$\text{- } 100^\circ\text{C} : Q_3 = 330 \times 540 = 178\,200 \text{ cal} = 744\,876 \text{ J.}$$

$$\text{- } 100^\circ\text{C} - 127^\circ\text{C} : n = 330/18 = 18,33 \text{ mol,}$$

$$Q_4 = 18,33 \times 8,22 \times 27 = 4\,065 \text{ cal} = 16\,991,7 \text{ J.}$$

$$Q_3 = 6\,897 + 110\,352 + 137\,940 + 744\,876 + 16\,991,7 = 1\,017\,056,7 \text{ J}$$

4. 14,5 g d'air de 67°C à 830°C (molaire, masse molaire ≈ 29 g/mol)

Nombre de moles : $n = 14,5/29 = 0,5$ mol, $\Delta T = 763$ K.

a) Volume constant ($Q_V = n \cdot C_v \cdot \Delta T$) : $Q_V = 0,5 \times 20,9 \times 763 = 7\,984$ J.

b) Pression constante ($Q_p = n \cdot C_p \cdot \Delta T$) : $Q_P = 0,5 \times 29,0 \times 763 = 11\,084$ J.

Exercice 7

1. Calcul du travail pour chaque transformation

a) Transformation isochore puis isobare

- Étape 1 : Isochore ($V = 3V_0$)

Le volume étant constant, on a $dV = 0$, donc :

$$W_1 = 0.$$

- Étape 2 : Isobare ($P = 3P_0$)

$$W_2 = -P (V_2 - V_1) = -3P_0 (V_0 - 3V_0) = 6 P_0 V_0.$$

Travail total :

$$W = W_1 + W_2 = 6 P_0 V_0 = 6 \cdot 10^2 \text{ J.}$$

b) Transformation isobare puis isochore

-Étape 1 : Isobare ($P = P_0$)

$$W_1 = -P_0 (V_2 - V_1) = -P_0 (V_0 - 3V_0) = 2 P_0 V_0.$$

-Étape 2 : Isochore

$$W_2 = 0.$$

Travail total : ($V = V_0$)

$$W = W_1 + W_2 = 2 P_0 V_0 = 2 \cdot 10^2 \text{ J.}$$

c) Transformation telle que $P \cdot V = \text{constante}$

$$\text{On a : } P \cdot V = C = P_1 V_1 = 3P_0 V_0.$$

$$\text{Donc : } P = nRT / V.$$

Le travail est donné par :

$$W = -\int P dV = -\int (nRT/V) dV = -nRT \ln(V_2/V_1).$$

En remplaçant : $nRT = PV$

$$W = -3P_0 V_0 \ln(V_0 / 3V_0) = 3 P_0 V_0 \ln(3) = 3,295 \cdot 10^2 \text{ J.}$$

2. Choix de la transformation la plus économique

La transformation isobare puis isochore est celle qui nécessite le moins d'énergie.

3. Travail de compression d'un gaz réel

$$\delta W = -P dV \Rightarrow W = -\int P dV.$$

$$W = -\int_{V_1}^{V_2} \left(\frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^2} \right) dV = -RT \int_{V_1}^{V_2} \left(\frac{dV}{V-b} \right) + a \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V^2}$$

$$\int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V-b} = \ln(V-b) \text{ et } \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V^2} = -1/V$$

$$\Rightarrow w = -RT \ln \frac{(V_2 - b)}{(V_1 - b)} - a \left(\frac{1}{V_2} - \frac{1}{V_1} \right)$$

Cette expression montre que le travail d'un gaz réel diffère de celui d'un gaz parfait en raison du volume propre des molécules (b) et des interactions attractives (a). Pour a = 0 et b = 0, on retrouve le résultat du gaz parfait (chapitre II).

Exercice 8

1. Les énergies chaleur et travail mises en jeu le long de chaque transformation :

Transformation isochore ($V_1 = V_2 = V_a$) : $W_{1 \rightarrow 2} = -\int P dV = 0$

La transformation est isochore.

- $Q_{1 \rightarrow 2} = \Delta U = nC_v \int dT = nC_v(T_2 - T_1)$

Transformation isotherme ($T_2 = T_3$) :

- $W_{2 \rightarrow 3} = -\int P dV = -nRT_2 \int_{V_a}^{V_c} \frac{dV}{V} = -nRT_2 \ln \frac{V_c}{V_a}$

- $Q_{2 \rightarrow 3} + W_{2 \rightarrow 3} = \Delta U = 0$

la transformation est isotherme, la variation de l'énergie interne est nulle, donc :

$$Q_{2 \rightarrow 3} = -W_{2 \rightarrow 3}$$

Transformation isobare ($P_3 = P_1 = P_a$) :

- $W_{3 \rightarrow 1} = -\int P dV = -P_a(V_a - V_c)$

- $Q_{3 \rightarrow 1} = \Delta U_{3 \rightarrow 1} - W_{3 \rightarrow 1} = nC_v(T_1 - T_3) + P_a(V_a - V_c)$

- 2. Sur tout le cycle :

- $W_{\text{cycle}} = W_{1 \rightarrow 2} + W_{2 \rightarrow 3} + W_{3 \rightarrow 1} = -RT_2 \ln \frac{V_c}{V_a} + -P_a(V_a - V_c)$
 $Q_{\text{cycle}} = Q_{1 \rightarrow 2} + Q_{2 \rightarrow 3} + Q_{3 \rightarrow 1} = nC_v(T_2 - T_1) + nR T_2 \ln \frac{V_c}{V_a} + nC_v(T_1 - T_3) +$
 $P_a(V_a - V_c)$

Avec : $T_2 = T_3$

On a alors : $Q_{\text{cycle}} + W_{\text{cycle}} = 0$

Donc le premier principe de la thermodynamique est vérifié $\Delta U_{\text{cycle}} = 0$