

La date : 06/04/2021

TD N° 01

Exercice N°01

Supposant un gaz parfait dans un cylindre sous une pression P et volume V . ce gaz subit une transformation élémentaire dans son volume dv .

1-Montrer que le travail échangé est : $\delta W = - P \cdot dV$

2-Quel est le travail échangé durant les transformations réversibles suivantes :

- a)- transformation **isobare**
- b)- transformation **isochore**
- c)- transformation **isotherme**.

3-Donner l'expression de la quantité de chaleur Q échangée pour chaque transformation.

4-Donner l'expression de W et Q pour une transformation isotherme irréversible.

Exercice N°02

L'état initial d'une mole de gaz parfait est caractérisé par $P_0 = 2.105 \text{ Pa}$, $V_0=14 \text{ L}$. On fait subir successivement à ce gaz:

- une détente isobare, qui double son volume.
- une compression isotherme, qui le ramène à son volume initial,
- un refroidissement isochore, qui le ramène à l'état initial (P_0, V_0).

- a) - A quelle température s'effectue la compression isotherme ? En déduire la pression maximale atteinte.
- b) - Représenter le cycle de transformations dans le diagramme (P, V)
- c) - Calculer le travail, la quantité de chaleur et la variation d'énergie interne échangés par le système au cours de chaque transformation ?.
- d)- Faire le bilan du cycle ?.

On donne : constante des gaz parfaits : $R = 8,314 \text{ J. mol}^{-1}\text{K}^{-1}$.

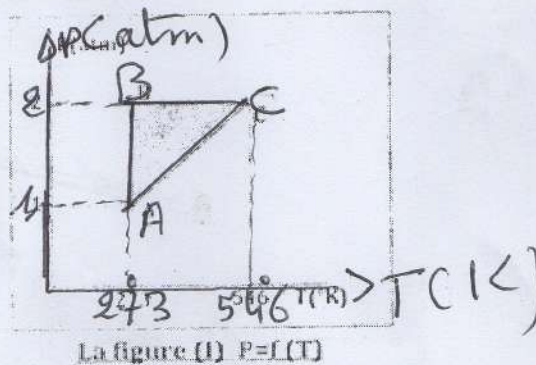
Exercice N°03

On fait subir à une mole de gaz parfait trois transformations réversibles (voir la figure 1).

1- Représenter ces transformations sur le diagramme de Clapeyron (P, V).

2- Compléter le tableau suivant :

Transf/énergie	I	II	III	CYCLE
$W(\text{cal})$				
$Q(\text{cal})$		1352,7		
$\Delta U(\text{cal})$	0		-810	
$\Delta H(\text{cal})$	0			



TD N° 1 Thermodynamique

Rappel :

1. Système : c'est la portion de l'espace qui fait l'objet de l'étude thermodynamique, le reste est appelé milieu extérieur

a. Système ouvert : c'est un système qui échange de l'énergie, travail et de la matière avec le milieu extérieur, exemple : l'air ou cellule vivante,

b. Système fermé : il échange avec le milieu extérieur l'énergie mais pas de matière
ex : télévision, un gaz dans une ampoule scellée
un circuit de refroidissement,

Système isolé : Il n'échange rien avec le milieu extérieur, ni E, ni matière. exemple un calorimètre, thermos

2) Transformation réversible : On dit que la transformation d'un système est réversible si à chaque instant de son évolution, l'état momentané du système peut être défini par des valeurs bien déterminées \Rightarrow la pression du système est variable et égale à P_{ext}

La transformation est infiniment lente.
On peut retourner à l'état initiale par les mêmes étapes.

b. Transformation irréversible :

C'est une transformation rapide, violente, sans détournement de sens. On ne peut pas revenir à l'état initiale par les mêmes étapes.
exemple : explosion, accident ...

La pression du système = $P_{\text{final}} = P_{\text{ext}} = \text{cte}$

3. Fonction d'état :

C'est une grandeur physique qui ne dépend que de l'état du système. Sa variation ne dépend que de l'état initial et l'état final du système.

exemple : La variation d'énergie interne ΔU et la variation d'enthalpie ΔH .

4. Variables d'état

Ce sont les variables qui permettent de définir l'état d'un système. On peut démontrer qu'avec 3 variables d'état, tout système homogène peut être défini. exemple :

L'équation d'état des gaz parfait :

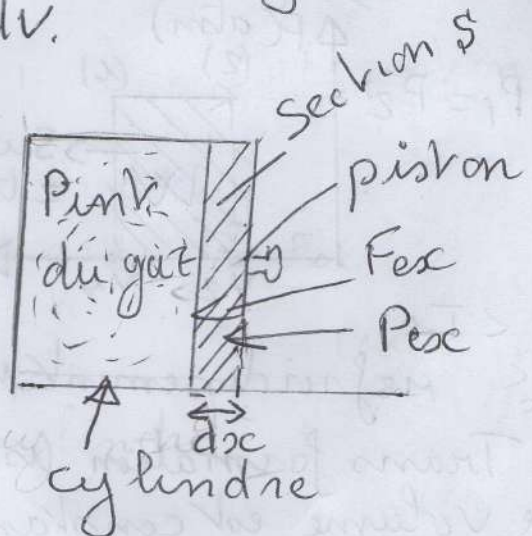
$$PV = nRT$$

On ne peut pas revenir à l'état initial en passant par les mêmes étapes $\Rightarrow P_{ex} = P_{sy} = cte$

Ex 1: Soit un gaz parfait dans un cylindre sous pression P, V_0 . Il subit une transformation élémentaire dans son volume dV .

Le travail fourni ou reçu par un ressort s'exprime:

$$W_{a-b} = \int_a^b F_{ex} dx \quad \dots (1)$$



$$\text{Or } P = \frac{F_{ex}}{S} \Rightarrow F_{ex} = P * S \quad \dots (2)$$

On remplace (2) dans (1) \Rightarrow

$$W_{a-b} = - \int F_{ex} dx = - \int P_{ex} * \frac{S * dx}{dV} = - \int_a^b P_{ex} * dV$$

Soit un cylindre fermé par un piston mobile.

Lors d'un déplacement élémentaire du piston, son W vaut: $\delta W_{ex} = - \int F_{ex} dx = - \int P_{ex} * S * dx = - \int P_{ex} dV$

ou dV : est la variation du volume du gaz lors d'un déplacement du piston $\Rightarrow \delta W_{ex} = - \int P_{ex} dV$

Ainsi: Si $dV < 0$ lors de la compression du gaz car $V_2 < V_1 \Rightarrow \delta W_{ex} = - P_{ex} dV > 0$ car le gaz a reçu de l'énergie sous forme de travail

Si $dV > 0$ lors d'une dilatation car $V_2 > V_1 \Rightarrow \delta W_{ex} = - P_{ex} dV < 0$ car le gaz a fourni du travail pour se dilater $\Rightarrow \delta W_{ex} < 0$

2) Le travail échangé durant les transformations

a. Transformation isobare $\Rightarrow P_f = P_i = cte$

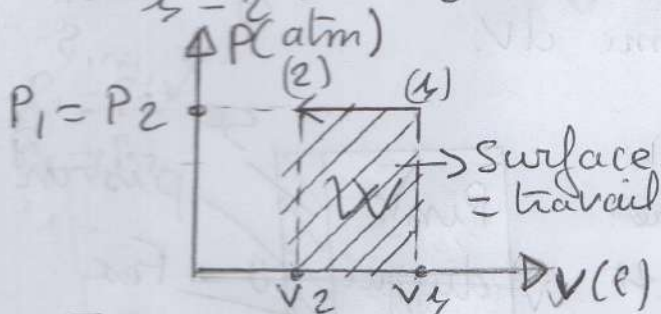
(3)

\Rightarrow transformation isobar et reversible $\Rightarrow P_{esc} = P_f$

pas de changement de pression $P_I = P_F \Rightarrow P_1 = P_2$

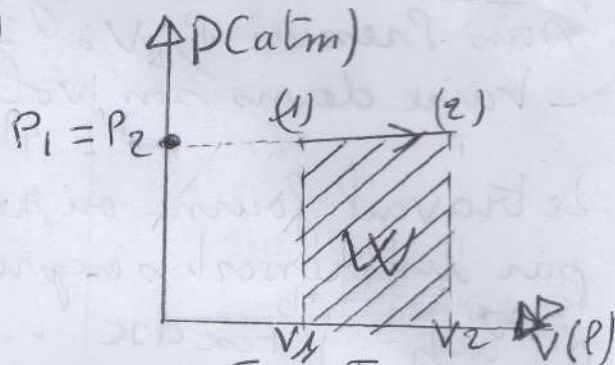
$$\delta W_{esc} = - \int_1^2 P_{esc} dv = - P_F \int_1^2 dv = - P_2 \int_1^2 dv \Rightarrow$$

$$W_{1-2} = - P_2 (V_2 - V_1)$$



$$T_2 < T_1$$

refroidissement isobare



$$T_2 > T_1$$

chauffage isobare

b - Transformation isochore reversible $\Rightarrow V_1 = V_2 = \text{cte}$
le volume est constant $\Rightarrow dv = V_2 - V_1 = 0$

$$\delta W_{esc} = - \int P dv = 0 \Rightarrow W_{1-2} = 0$$

c - Transformation isotherme reversible :

Puisque c'est isotherme $\Rightarrow T_1 = T_2 = \text{cte}$ mais le volume et la pression sont variables

$$\delta W_{esc} = - \int_1^2 P_{esc} dv \quad \text{on ne peut pas intégrer avec } v$$

variable donc on remplace p : On a $Pv = nRT$

Loi des gaz parfait $\Rightarrow P = \frac{nRT}{v}$ et pour $n=1$

$$\Rightarrow P = \frac{RT}{v} \quad (2) \text{ on remplace l'eq (2) dans (1)}$$

$$\Rightarrow \delta W_{esc} = - \int_1^2 \frac{RT}{v} dv = - RT \int_1^2 \frac{dv}{v} \quad \text{car } T = \text{cte et}$$

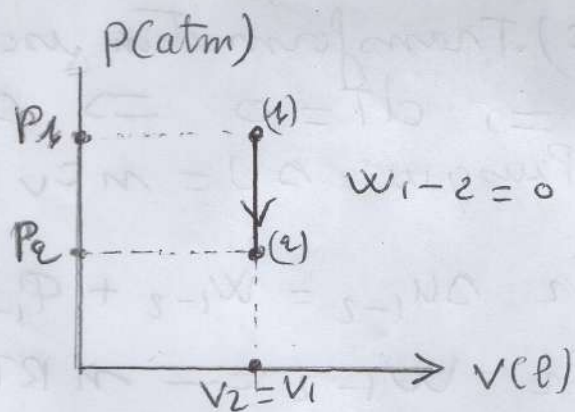
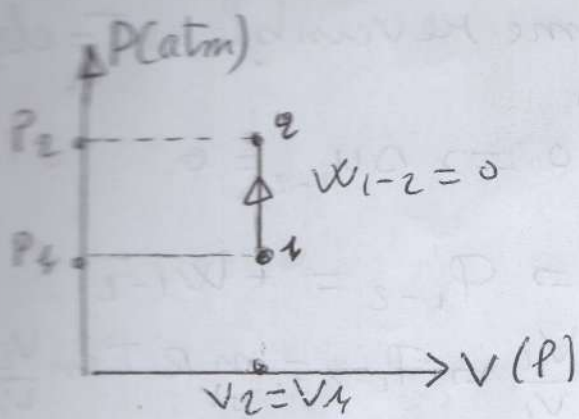
R c'est la constante des gaz parfaits $R = 8,31 \text{ J/mol.K}$

$$\Rightarrow W_{1-2} = - RT \ln \frac{V_2}{V_1} =$$

$$\text{Pour } n \neq 1 \Rightarrow W_{1-2} = - nRT \ln \frac{V_2}{V_1} = - nRT \ln \frac{P_1}{P_2}$$

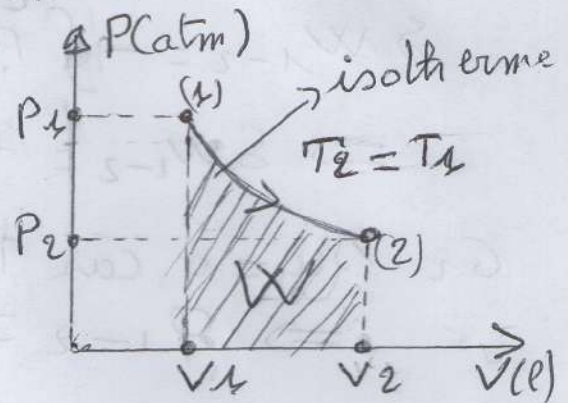
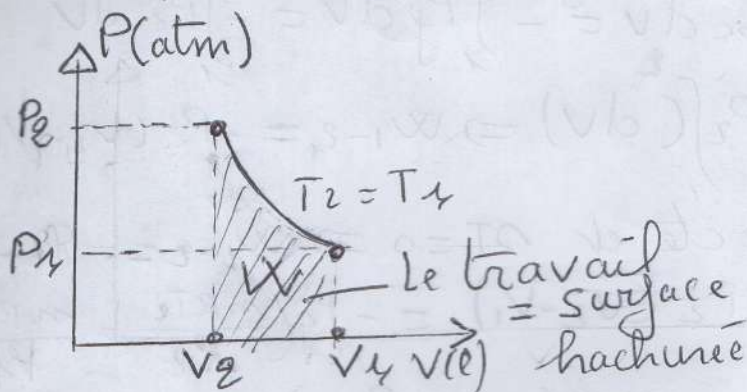
$$\text{car } \frac{V_2}{V_1} = \frac{P_1}{P_2}$$

(4)



chauffage isochore
 $T_2 > T_1 \Rightarrow P_2 > P_1$

refroidissement isochore
 $T_2 < T_1 \Rightarrow P_2 < P_1$



compression isotherme
 $P_2 > P_1 \Rightarrow V_2 < V_1$

detente isotherme
 $P_2 < P_1 \Rightarrow V_2 > V_1$

3) Expression de la quantité de chaleur Q

a. transformation isobare réversible

D'après le 1^{er} principe de la thermodynamique

$$\Delta U = \delta W + \delta Q \text{ et } \Delta U = W + Q$$

$$\Delta U = n c_v dT \text{ et } \Delta H = n c_p dT$$

$$\Delta U = U_2 - U_1 = -P(V_2 - V_1) + Q \Rightarrow Q = \Delta U - W$$

$$Q = U_2 - U_1 + P(V_2 - V_1) = \underbrace{(U_2 + PV_2)}_{H_2} - \underbrace{(U_1 + PV_1)}_{H_1}$$

$$\Rightarrow Q_{1-2} = H_2 - H_1 = \Delta H = n c_p (T_2 - T_1)$$

b. transformation isochore réversible $\Rightarrow W_{1-2} = 0$

$$\Rightarrow Q_{1-2} = \Delta U_{1-2} = n c_v (T_2 - T_1)$$

c) Transformation isotherme réversible $\Rightarrow T = \text{cte}$

$$\Rightarrow dT = 0 \Rightarrow \Delta T = 0$$

Puisque $\Delta U = n c_V \Delta T = 0 \Rightarrow \Delta U_{1-2} = 0$

Or $\Delta U_{1-2} = W_{1-2} + Q_{1-2} = 0 \Rightarrow Q_{1-2} = -W_{1-2}$

Or $W_{1-2} = -nRT \ln \frac{V_2}{V_1} \Rightarrow Q_{1-2} = nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$

4) Transformation isotherme irréversible

irréversible $\Rightarrow P_{\text{ext}} = P_f$

$$\delta W_{1-2} = - \int_1^2 P_{\text{ext}} dV = - \int_1^2 P_f dV = - \int_1^2 P_2 dV$$

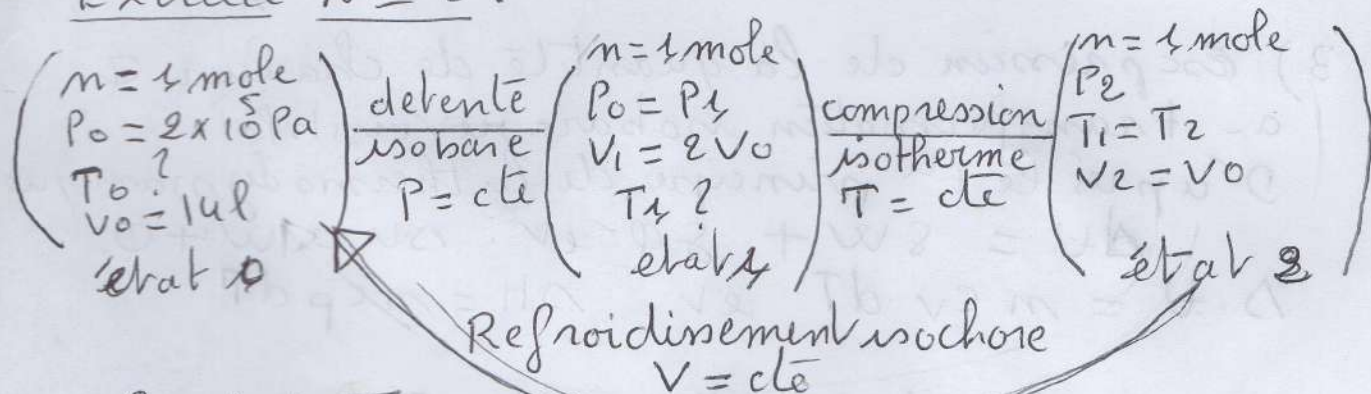
$$\Rightarrow \delta W_{1-2} = -P_2 (dV) \Rightarrow W_{1-2} = -P_2 (V_2 - V_1)$$

Or $\Delta U = 0$ car $T = \text{cte}$ et $\Delta T = 0 \Rightarrow W_{1-2} = -Q_{1-2}$

$$\Rightarrow Q_{1-2} = P_2 (V_2 - V_1) = -P_2 \left(\frac{nRT_2}{P_2} - \frac{nRT_1}{P_1} \right)$$

$$Q_{1-2} = -nRT \left(1 - \frac{P_2}{P_1} \right)$$

Exercice N° 2 :



a) Calcul de T_0

D'après la loi des gaz parfaits : $PV = nRT$
 $\Rightarrow P_0 V_0 = nRT_0 \Rightarrow T_0 = \frac{P_0 V_0}{nR} = \frac{2 \times 10^5 \times 14 \times 10^{-3}}{8,314 \times 1}$

$$T_0 = 336,784 \text{ K}$$

Calcul de la température de la compression isotherme T_1 : Or a $T_1 = T_2$

* Calcul de la chaleur $Q_{0 \rightarrow 1}$

A pression constante, la chaleur est égale à la variation d'enthalpie ΔH_p . $\Delta H_p = n c_p \Delta T$

$$\Rightarrow Q_{0 \rightarrow 1} = \Delta H_p = n c_p \Delta T = n * \frac{7}{2} R (T_1 - T_0)$$

$$Q_{0 \rightarrow 1} = 1 \text{ mole} * \frac{7}{2} * 8,31 \text{ J/mol.K} * (673,56 - 336,78)$$

$$Q_{0 \rightarrow 1} = \Delta H_{0 \rightarrow 1} = 9799,96 \text{ J}$$

* La variation d'énergie $\Delta U_{0 \rightarrow 1}$:

Toujours ΔU à $P = \text{cte}$ ou à $v = \text{cte} \Rightarrow \Delta U = n c_v \Delta T$

$$\Delta U_{0 \rightarrow 1} = n * \frac{5}{2} * R (T_1 - T_0) = 1 * \frac{5}{2} * 8,31 (673,56 - 336,78)$$

$$\Delta U_{0 \rightarrow 1} = 6999,972 \text{ J}$$

Transformation isotherme réversible 1 \rightarrow 2:

$$T = \text{cte} \Rightarrow \Delta T = 0 \Rightarrow \Delta U_{1 \rightarrow 2} = n c_v \Delta T = 0$$

$$\text{Le travail } \int \delta W_{1 \rightarrow 2} = - \int_1^2 P_{\text{ext}} dv = - \int_1^2 \frac{nRT}{v} dv$$

$$\Rightarrow \int_1^2 \delta W_{1 \rightarrow 2} = - nRT \int_1^2 \frac{dv}{v} = - nRT \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$\Rightarrow W_{1 \rightarrow 2} = - nRT \ln \frac{v_2}{v_1} = nRT \ln \frac{P_2}{P_1}$$

$$W_{1 \rightarrow 2} = - 1 * 8,314 * 673,56 \ln \frac{4 * 10^5}{2 * 10^5}$$

$$W_{1 \rightarrow 2} = - 3884,60 \text{ J}$$

La chaleur $Q_{1 \rightarrow 2}$: Puisque $\Delta U = 0 \Rightarrow \Delta U = Q + W = 0$

$$\Rightarrow Q_{1 \rightarrow 2} = - W_{1 \rightarrow 2} \Rightarrow Q_{1 \rightarrow 2} = 3884,60 \text{ J}$$

La transformation isochore 2 \rightarrow 0: $v = \text{cte} \Rightarrow$

$$dv = 0 \Rightarrow \delta W_{2 \rightarrow 0} = - \int_{v_0}^{v_0} P dv = 0$$

(8)

$$\Delta U_{2 \rightarrow 0} = W_{2 \rightarrow 0} + Q_{2 \rightarrow 0} \Rightarrow Q_{2 \rightarrow 0} = \Delta U_{2 \rightarrow 0}$$

$$\Delta U_{2 \rightarrow 0} = Q_{2 \rightarrow 0} = n c_v \Delta T = 1 * \frac{5}{2} * R (T_0 - T_2)$$

$$\Delta U_{2 \rightarrow 0} = Q_{2 \rightarrow 0} = 1 * \frac{5}{2} * 8,314 (336,78 - 673,56)$$

$$Q_{2 \rightarrow 0} = \Delta U_{2 \rightarrow 0} = -6999,972 \text{ J}$$

d) Le bilan du cycle:

$$W_{\text{cycle}} = W_{0 \rightarrow 1} + W_{1 \rightarrow 2} + W_{2 \rightarrow 0} = W_{0 \rightarrow 1} + W_{1 \rightarrow 2}$$

$$W_{\text{cycle}} = -2800 - 3881,60 = -6681,6 \text{ J}$$

$$Q_{\text{cycle}} = Q_{0 \rightarrow 1} + Q_{1 \rightarrow 2} + Q_{2 \rightarrow 0} = 9799,96 + 3881,60 - 6999,972$$

$$Q_{\text{cycle}} = 6681,588 \text{ J}$$

$$\Delta U_{\text{cycle}} = Q_{\text{cycle}} + W_{\text{cycle}} = +6681,588 \text{ J} - 6681,6$$

$\Delta U_{\text{cycle}} = 0$ puisque c'est une fonction d'état.

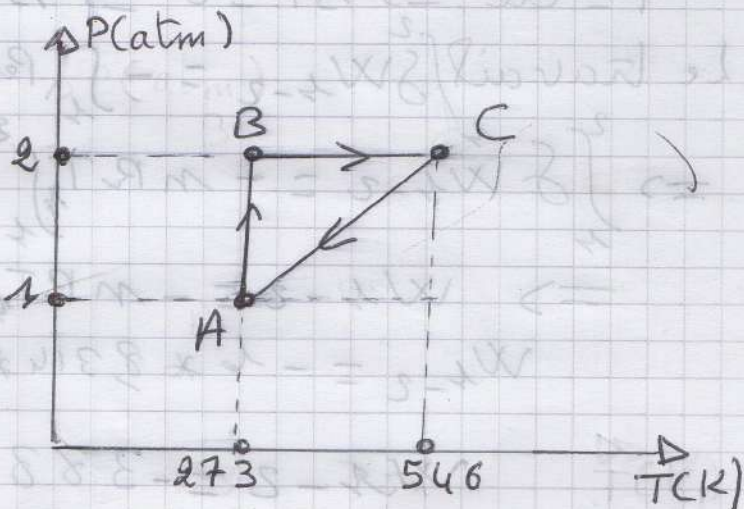
Exercice N°3:

1 mole de gaz parfait a subi 3 transformations

$$P_A = 1 \text{ atm}, T_A = 273 \text{ K}$$

$$P_B = 2 \text{ atm}, T_B = T_A = 273 \text{ K}$$

$$P_C = 2 \text{ atm} = P_B, T_C = 546 \text{ K}$$



On remarque d'après

la figure:

diagramme $P = f(T)$

La transformation A-B est isotherme puisque $T_A = T_B$

" " B-C est isobare car $P_B = P_C$

" " C-A est isochore car $V_A = V_C$

(9)

calcul des paramètre:

a- calcul du volume:

$$P_A V_A = n R T_A \Rightarrow V_A = \frac{n R T_A}{P_A} = \frac{1 \text{ mole} \times 0,082 \times 273}{1 \text{ atm}}$$

$$\Rightarrow V_A = 22,4 \text{ l.}$$

$$P_B V_B = P_A V_A \text{ car } T_A = T_B \Rightarrow V_B = \frac{P_A V_A}{P_B} = \frac{1 \times 22,4}{2}$$

$$\Rightarrow V_B = 11,2 \text{ l.}$$

Pour la transformation C-A: $V_C = \frac{n R T_C}{P_C}$

$$V_C = \frac{1 \text{ mole} \times 0,082 \cdot \text{l} \cdot \text{atm} / \text{mol} \cdot \text{K} \times 546 \text{ K}}{2 \text{ atm}}$$

$$\Rightarrow V_C = 22,4 \text{ l.}$$

On remarque que $V_C = V_A \Rightarrow$ transf C-A est isochore

1- Représentation des 3 transformations dans le diagramme de Clapeyron $P=f(V)$

transf A-B isotherme $T=cte$

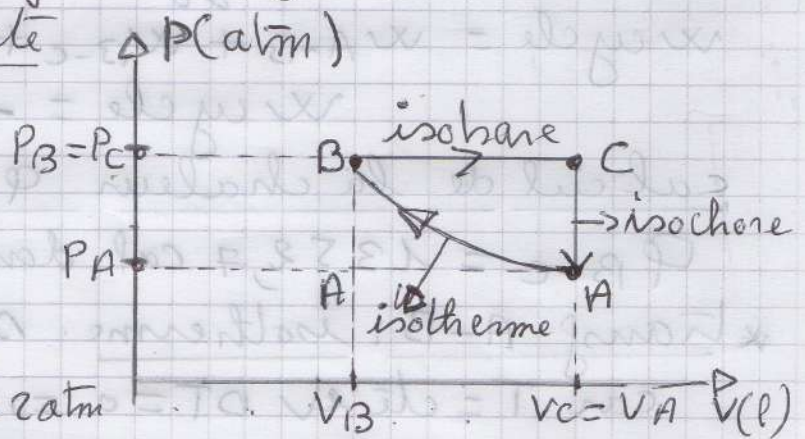
$$P_A = 1 \text{ atm}, V_A = 22,4 \text{ l}$$

transf B-C isobare

$$P_B = P_C = 2 \text{ atm}, V_B = 11,2 \text{ l}$$

transf C-A isochore

$$V = cte \Rightarrow V_C = V_A = 22,4 \text{ l}, P_C = 2 \text{ atm}$$



2- calcul de w , q , ΔU , ΔH

a- transf A-B isotherme $T=cte \Rightarrow \Delta T = 0$

$$\Rightarrow \Delta U_{A-B} = n C_V \Delta T = 0, \quad \Delta H_{A-B} = n C_P \Delta T = 0$$

$$\int \delta W_{A-B} = - \int_{A}^{B} P_{ex} dV = - n R T \int_{A}^{B} \frac{dV}{V} \Rightarrow W_{A-B} = - n R T_A \ln \frac{V_B}{V_A}$$

$$W_{A-B} = 1 \text{ mole} \times 2 \text{ cal} \times 273 \ln \frac{11,2}{22,4}$$

$$\Rightarrow W_{A-B} = 376,74 \text{ cal}$$

(10)

b: Transf B-C : isobare : $P_B = P_C$

$$\int_B^C \delta W_{B-C} = - \int P_{ext} dV = - P_B \int_B^C dV \Rightarrow W_{B-C} = - P_B (V_C - V_B)$$

$$W_{B-C} = - 2 \times 1,01325 \times 10^5 \text{ Pa} (22,4 - 11,2) \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$W_{B \rightarrow C} = - 2269,68 \text{ J}$$

$$\left. \begin{array}{l} 1 \text{ cal} \rightarrow 4,18 \text{ J} \\ x \rightarrow 2269,68 \text{ J} \end{array} \right\} W_{B-C} = \frac{2269,68 \text{ J}}{4,18} = - 542,98 \text{ cal}$$

$$W_{B-C} = - 542,985 \text{ cal}$$

Remarque : $1 \text{ atm} = 101,325 \text{ J}$, joule = Pa \times m³

$$1 \text{ atm} = 24,21 \text{ cal}$$

c - Transformation C-A isochore $\Rightarrow V = \text{cte} \Rightarrow dV = 0$
 $\Rightarrow W_{C-A} = - P dV = 0$

$$W_{\text{cycle}} = W_{A-B} + W_{B-C} + W_{C-A} = 376,74 - 542,98$$

$$W_{\text{cycle}} = - 166,24$$

calcul de la chaleur Q :

$Q_{B-C} = 1352,7 \text{ cal}$ donnée dans le tableau.

* transf A-B : isotherme $\Delta U_{AB} = Q_{A-B} + W_{AB} = 0$
 car $T = \text{cte}$ et $dT = 0 \Rightarrow \Delta U = n c_V dT = 0$

$$\Rightarrow Q_{AB} = - W_{AB} = - 376,74 \text{ cal}$$

* transf B-C : isobare $\Rightarrow Q_{B-C} = \Delta H_{B-C} = n c_p dT$
 $Q_{BC} = \Delta H_{BC} = n \times c_p dT \Rightarrow c_p = \frac{Q_{BC}}{n dT}$

$$c_p = \frac{1352,7 \text{ cal}}{1 \text{ mol} (273 \text{ K})} = 4,955 \text{ cal/mol.K}$$

$$c_p - c_v = R \Rightarrow c_v = c_p - R = 4,955 - 2 = 2,955 \text{ cal}$$

* la transf C-A : isochore $\Rightarrow W_{C-A} = 0 \Rightarrow \Delta U = Q$

~~111~~

$$\Rightarrow \Delta U_{C \rightarrow A} = W_{C \rightarrow A} + Q_{C \rightarrow A} = Q_{C \rightarrow A} = m C_V \Delta T = m C_V (T_A - T_C)$$

$$\Delta U_{C \rightarrow A} = Q_{C \rightarrow A} = 1 \text{ mol} * \frac{2,955 \text{ cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}} (273 - 546) \text{ K}$$

$$\Delta U_{C \rightarrow A} = Q_{C \rightarrow A} = -810 \text{ cal.}$$

$$\Delta H_{C \rightarrow A} = m C_p \Delta T = m * C_p (T_A - T_C) = -1352,7 \text{ cal}$$

Transf E	isotherme A → B	isobare B → C	isochore C → A	cycle
travail W	376,74	-542,985	0	-16
chaleur (Q)	-376,74	+1352,7	-810	+16
ΔU	0	+810	-810	0
ΔH	0	+1352,7	-1352,7	0

Remarque : toujours $\Delta U_{\text{cycle}} = 0$ et $\Delta H_{\text{cycle}} = 0$
 car ce sont des fonctions d'état.
 et $W_{\text{cycle}} = -Q_{\text{cycle}}$

(12)