

SEMESTRE 5 – UE FONDEMENTS DE LA MÉCANIQUE

THERMODYNAMIQUE - CM N°2

Gilles PERNOT

gilles.pernot@univ-lorraine.fr

Bureau 404.1 (4^{ème} étage ENSEM)



UE FONDEMENTS DE LA MÉCANIQUE

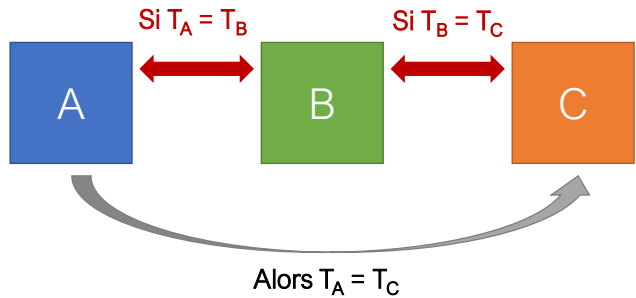
THERMODYNAMIQUE

- ❖ PARTIE N°1: PRÉSENTATION SYNTHÉTIQUE DES PRINCIPES
 - ❖ PARTIE N°2: ÉCHANGES D'ÉNERGIE – TRAVAIL ET CHALEUR
 - ❖ PARTIE N°3: APPLICATIONS DU 1^{ER} PRINCIPE
 - ❖ PARTIE N°4: SECOND PRINCIPE ET NOTION D'IRRÉVERSIBILITÉ
-



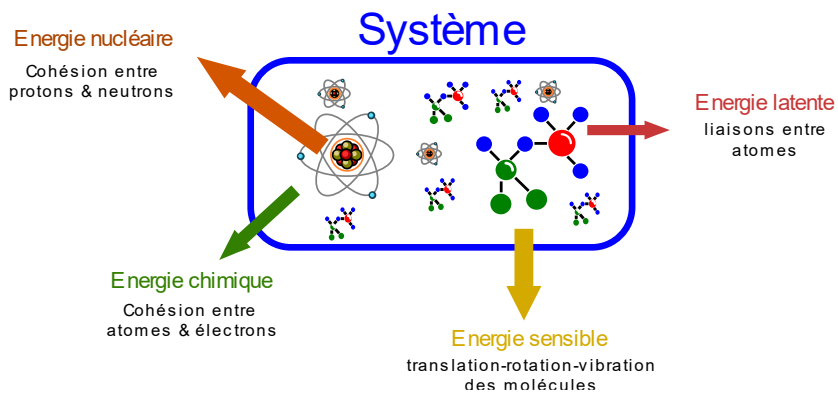
PARTIE N°1 – SYNTHÈSE DES PRINCIPES

Le Principe Zéro définit la température



PARTIE N°1 – SYNTHÈSE DES PRINCIPES

Le Premier Principe définit l'énergie



PARTIE N°1 – SYNTHÈSE DES PRINCIPES

Un énoncé du premier principe

❖ Un énoncé du 1^{er} principe pour un système fermé:

Variation
d'énergie interne
en Joules (J)

$$\Delta U = Q + W$$

Chaleur échangée
(reçue ou cédée) en
Joules (J)

Travail échangé
(reçu ou fourni) en
Joules (J)

PARTIE N°1 – SYNTHÈSE DES PRINCIPES

Un énoncé du premier principe

❖ Un énoncé du 1^{er} principe pour un système fermé:

Formulation infinitésimale:

Variation infinitésimale
d'énergie interne en
Joules (J)

$$dU = \delta Q + \delta W$$

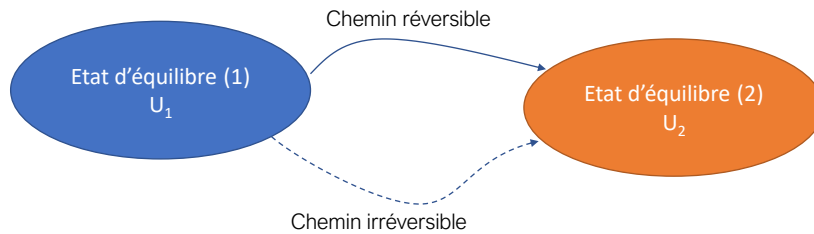
Chaleur infinitésimale
échangée
en Joules

Travail infinitésimal
échangé
en Joules

(Conseil: partez toujours des formes infinitésimales)

PARTIE N°1 – SYNTHÈSE DES PRINCIPES

Variation d'énergie interne au cours d'une transformation



$$dU^{rev} = dU^{irr} = dU$$

PARTIE N°1 – SYNTHÈSE DES PRINCIPES

Variation d'énergie interne au cours d'un cycle

❖ Autre énoncé du 1^{er} principe:

$$\oint (\delta Q + \delta W) = 0$$

Chemin fermé

PARTIE N°1 – SYNTHÈSE DES PRINCIPES

Le second principe définit l'entropie

❖ Enoncé de Clausius du second principe:

$$dS = \frac{\delta Q}{T} + \delta S^{\text{créé}}$$

↗ Variation infinitésimale d'entropie en J.K⁻¹
↖ Création d'entropie en J.K⁻¹ (irréversibilité)

↑ Echange d'entropie en J.K⁻¹

❖ On reviendra plus en détail dans la dernière partie de ce cours.

PARTIE N°1 – SYNTHÈSE DES PRINCIPES

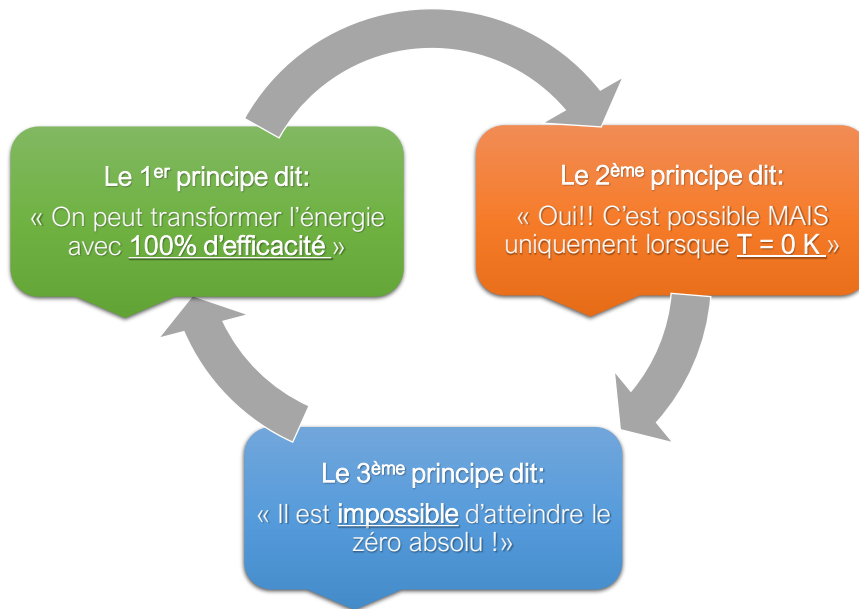
Le 3^{ème} principe définit le zéro absolu

❖ Le troisième principe donne une valeur numérique à l'entropie:

$$S(T = 0\text{K}) = 0$$

SYNTHÈSE

Synthèse des 3 principes de la Thermodynamique

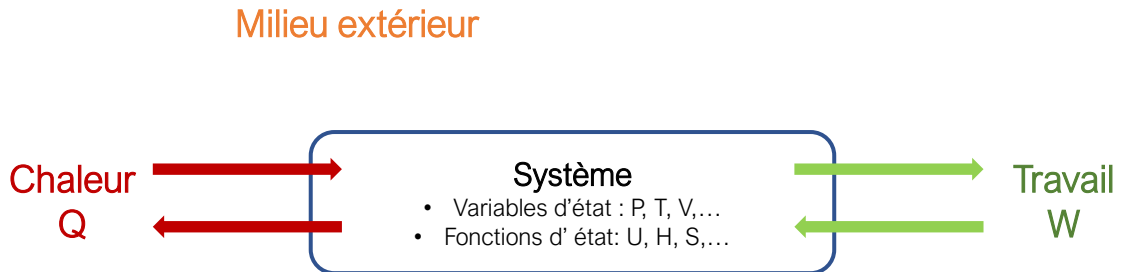


UE FONDEMENTS DE LA MÉCANIQUE

THERMODYNAMIQUE

PARTIE N°2: ÉCHANGES D'ÉNERGIE — TRAVAIL ET CHALEUR

Echanges d'énergie



15

Attention!!

Le travail W et la chaleur Q sont des grandeurs d'échange

16

PARTIE N°2: ECHANGES D'ÉNERGIE

Les écritures correctes

❖ Forme infinitésimale:

- Chaleur infinitésimale échangée δQ
- Travail infinitésimale échangé δW

❖ Forme totale:

- Chaleur échangée Q
- Travail échangé W

~~C'est faux d'écrire:~~

- ~~▪ Chaleur infinitésimale échangée dQ~~
- ~~▪ Travail infinitésimale échangé dW~~

~~C'est faux d'écrire:~~

- ~~▪ Variation de chaleur ΔQ~~
- ~~▪ Variation de travail ΔW~~

17

PARTIE N°2: ECHANGES D'ÉNERGIE

Le travail mécanique W

- ❖ Forme infinitésimale du travail mécanique:
(si seules les forces de pression échantent du travail)

Convention internationale

$$\delta W = -P_{ext} \cdot dV$$

Travail infinitésimal échangé en Joules

Pression extérieure en Pa
($P_{ext} = P_{système}$ ou $P_{ext} \neq P_{système}$)

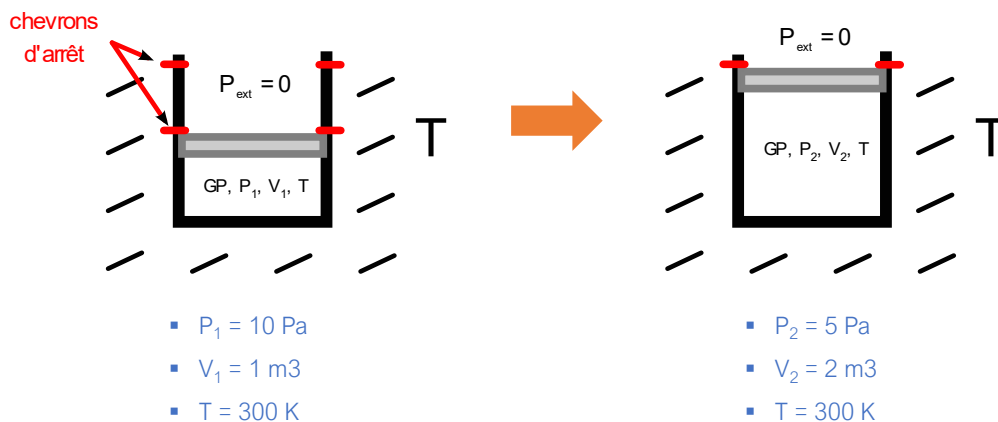
Variation infinitésimale de volume en m^3

18

PARTIE N°2: ECHANGES D'ÉNERGIE

Détentes isothermes d'un gaz parfait (1/3)

❖ Expérience n°1: détente isotherme d'un GP dans du vide $P_{\text{ext}} = 0$



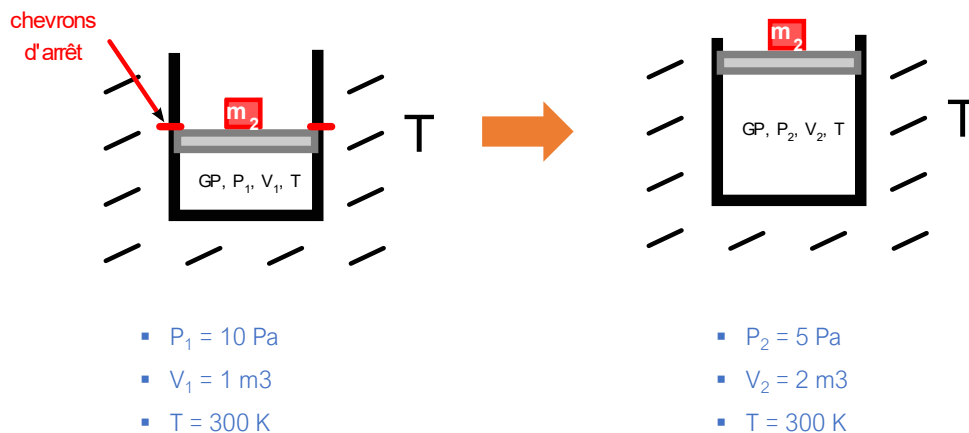
❑ Calculer le travail fourni par le gaz

19

PARTIE N°2: ECHANGES D'ÉNERGIE

Détentes isothermes d'un gaz parfait (2/3)

❖ Expérience n°2:



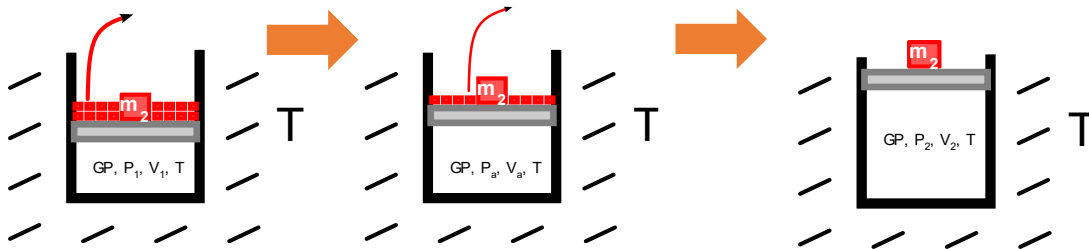
❑ Calculer le travail fourni par le gaz

20

PARTIE N°2: ECHANGES D'ÉNERGIE

Détentes isothermes d'un gaz parfait (3/3)

❖ Expérience n°3:



- $P_1 = 10 \text{ Pa}$
- $V_1 = 1 \text{ m}^3$
- $T = 300 \text{ K}$

- $P_2 = 5 \text{ Pa}$
- $V_2 = 2 \text{ m}^3$
- $T = 300 \text{ K}$

□ Calculer le travail fourni par le gaz

21

PARTIE N°2: ECHANGES D'ÉNERGIE

A retenir sur la notion de Travail

- ❖ Le travail est une grandeur d'échange $\Rightarrow$ ce n'est pas une DTE
- ❖ Le travail échangé dépend du chemin parcouru
- ❖ Besoin de distinguer une transformation réversible et irréversible δW^{rev} ou δW^{irr}
- ❖ Résultat important dans le cadre des machines thermiques:

$$|W^{\text{rev}}| > |W^{\text{irr}}|$$

22

PARTIE N°2: ECHANGES D'ÉNERGIE

Le travail utile W^*

$$W_T = W^* + W_P$$

Travail total fourni par le système en Joules

Travail utile fourni par le système en Joule
« Travail récupérable »

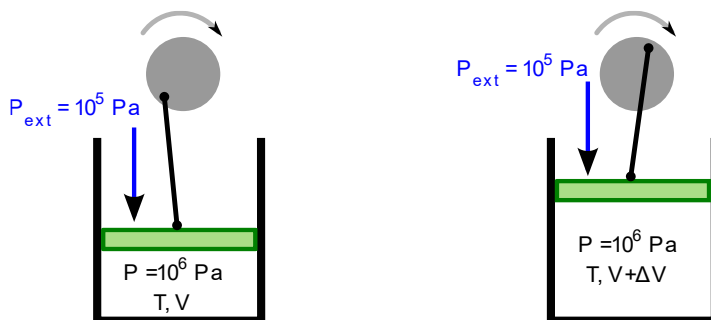
Travail « perdu » en Joule
(écoulement, pression extérieure)

23

PARTIE N°2: ECHANGES D'ÉNERGIE

Exemple de travail utile #01

- ❖ On imagine le système suivant subissant une suite de transformations quasi-statiques. La pression du système est constante et la variation de volume ΔV vaut $0,1 \text{ m}^3$.



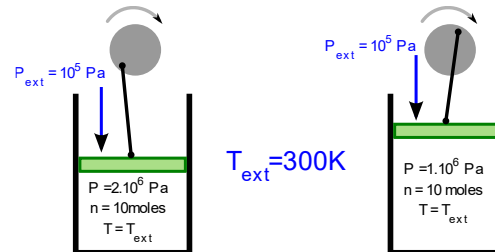
- ❖ Quel est le travail utile W^* fournit par le système ?

24

PARTIE N°2: ECHANGES D'ÉNERGIE

Exemple de travail utile #02

- ❖ La transformation réversible fait passer 10 moles de gaz parfait d'une pression initiale de $2 \cdot 10^6$ Pa (20 bars) à $1 \cdot 10^6$ Pa (10 bars) à la température constante $T = T_{\text{ext}} = 300\text{K}$. On rappelle que $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.



- ❖ Quel est le travail utile W^* fourni par le système ?

26

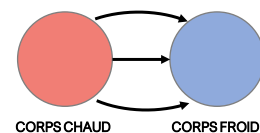
PARTIE N°2: ECHANGES D'ÉNERGIE

La chaleur Q – les transferts de chaleur

- ❖ un transfert de chaleur (transfert thermique) s'effectue du corps chaud vers le corps froid si il y a CONTACT

THERMIQUE

- ❖ Le contact thermique ne nécessite pas forcément de contact physique.
- ❖ Les transferts de chaleur (transferts thermiques) s'effectuent selon trois modes:
 - CONDUCTION: transfert thermique par contact physique (solides).
 - CONVECTION: liée à un déplacement de matière / utilisée dans les convecteurs électriques par déplacement de l'air.
 - RAYONNEMENT: rayonnement solaire qui chauffe la terre.



27

PARTIE N°2: ECHANGES D'ÉNERGIE

Les relations calorimétriques

❖ Les relations calorimétriques pour des transformations réversibles:

$$\delta Q^{rev} = TdS = n \cdot (C_V dT + l dV)$$

$$\delta Q^{rev} = TdS = n \cdot (C_P dT + h dP)$$

$$\delta Q^{rev} = TdS = n \cdot (\mu dP + \lambda dV)$$

28

PARTIE N°2: ECHANGES D'ÉNERGIE

Chaleur échangée lors d'un changement de phase

Chaleur infinitésimale échangée en Joules

Quantité infinitésimale de matière ayant changée de phase en kg

$$\delta Q = L_m \cdot dm$$

Chaleur latente de changement de phase en $J \cdot kg^{-1}$

29

PARTIE N°2: ECHANGES D'ÉNERGIE

Relations de Mayer pour un gaz parfait

Capacité thermique
isobare en $\text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$

Constante des gaz parfaits
 $8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$



$$C_P - C_V = R$$

Capacité thermique
isochore en $\text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$

□ Gaz parfait monoatomique:

- $C_P = \frac{5R}{2}$
- $C_V = \frac{3R}{2}$
- $\gamma = \frac{5}{3}$



$$\frac{C_P}{C_V} = \gamma$$

□ Gaz parfait diatomique:

- $C_P = \frac{7R}{2}$
- $C_V = \frac{5R}{2}$
- $\gamma = \frac{7}{5}$

30

UE FONDEMENTS DE LA MÉCANIQUE

THERMODYNAMIQUE

PARTIE N°3: APPLICATIONS DU 1^{ER} PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE

PARTIE N°3: APPLICATIONS DU 1^{ER} PRINCIPE

La 1^{ère} loi de Joule d'un gaz parfait

❖ Pour un **gaz parfait**, la variation d'énergie interne NE DÉPEND QUE de la température

Variation infinitésimale
d'énergie interne en J

Variation (infinitésimale) de
température en K

$$dU = (n)C_V \cdot dT$$

Capacité thermique isochore

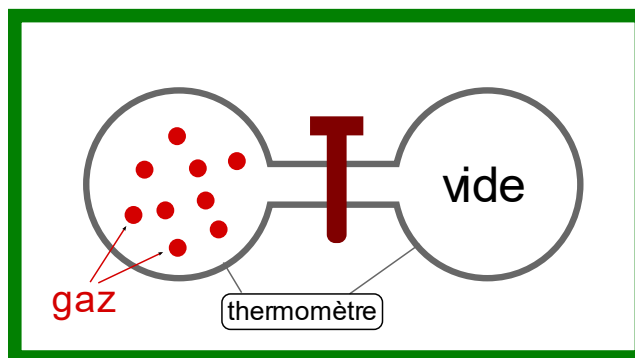
- molaire en $\text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$
- massique en $\text{J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$
- volumique en $\text{J.K}^{-1}.\text{m}^{-3}$
- (...) en J.K^{-1}

32

PARTIE N°3: APPLICATIONS DU 1^{ER} PRINCIPE

Expérience de la détente libre de Joule / Gay-Lussac

Compartiment isolé



33

PARTIE N°3: APPLICATIONS DU 1^{ER} PRINCIPE

L'enthalpie

$$H = U + P \cdot V$$

Enthalpie en Joule

Energie interne en Joule

Pression en Pa

Volume en m³

34

PARTIE N°3: APPLICATIONS DU 1^{ER} PRINCIPE

La 2^{ème} loi de Joule d'un gaz parfait

❖ Pour un **gaz parfait**, la variation d'enthalpie NE DÉPEND QUE de la température

$$dH = (n)C_P \cdot dT$$

Variation infinitésimale d'enthalpie interne en J

Variation (infinitésimale) de température en K

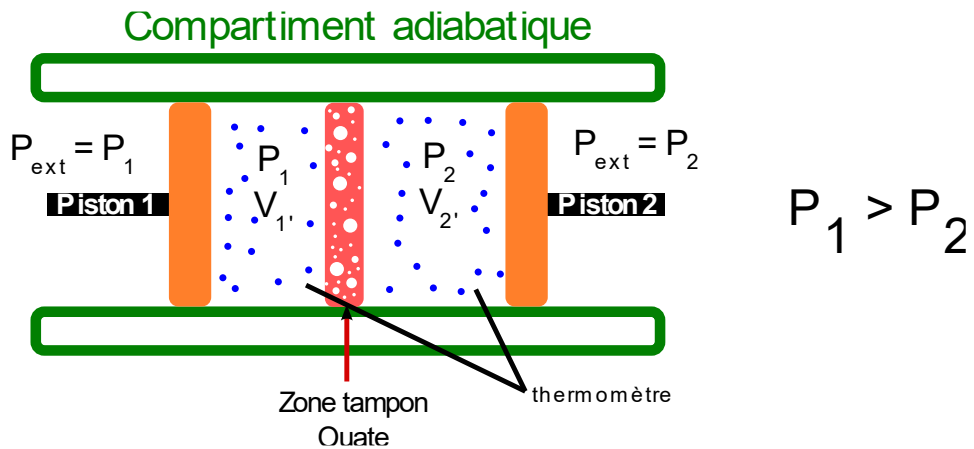
Capacité thermique isobare

- molaire en J.K⁻¹.mol⁻¹
- massique en J.K⁻¹.kg⁻¹
- volumique en J.K⁻¹.m⁻³
- (...) en J.K⁻¹

35

PARTIE N°3: APPLICATIONS DU 1^{ER} PRINCIPE

L'expérience de la détente de Joule-Thomson



36

PARTIE N°3: APPLICATIONS DU 1^{ER} PRINCIPE

L'expérience de la détente de Joule-Thomson

- ❖ Exercice: montrer que l'expérience de Joule-Thomson est isenthalpique $\Delta H = 0$.
 - ☐ Evaluer la chaleur échangée avec le milieu extérieur.
 - ☐ Evaluer le travail (W_G et W_D) échangé dans chacun des compartiments. Déduire le travail total.
 - ☐ Evaluer la variation d'énergie interne ΔU

38

UE FONDEMENTS DE LA MÉCANIQUE

THERMODYNAMIQUE

PARTIE N°4: SECOND PRINCIPE ET NOTION D'IRRÉVERSIBILITÉ



PARTIE N°4: SECOND PRINCIPE ET NOTION D'IRRÉVERSIBILITÉ

Définition de l'entropie S

❖ Enoncé de Clausius sous sa forme infinitésimale:

$$dS = \frac{\delta Q}{T} + \delta S^{\text{créé}}$$

Variation infinitésimale d'entropie en J.K⁻¹

Echange d'entropie en J.K⁻¹

Création d'entropie en J.K⁻¹ (irrégularité)

PARTIE N°4: SECOND PRINCIPE ET NOTION D'IRRÉVERSIBILITÉ

Inégalité de Clausius

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

Intégration sur un chemin
fermé (cycle)

41

PARTIE N°4: SECOND PRINCIPE ET NOTION D'IRRÉVERSIBILITÉ

Variation d'entropie de transformations particulières

❖ Transformation réversible:

$$dS = \frac{\delta Q^{rev}}{T} \text{ et } \delta S^{créé} = 0$$

❖ Transformation adiabatique irréversible:

$$dS = \delta S^{créé} > 0 \text{ et } \delta Q^{irr} = 0$$

❖ Transformation adiabatique réversible ($\Leftrightarrow$ isentropique):

$$dS = 0 \text{ et } \delta Q^{rev} = 0 \text{ et } \delta S^{créé} = 0$$

❖ Transformation isotherme réversible à $T = T_{ext}$ (thermostat):

$$dS = \frac{\delta Q^{rev}}{T_{ext}} \text{ et la forme intégrale } \Delta S = \frac{Q^{rev}}{T_{ext}}$$

42

PARTIE N°4: SECOND PRINCIPE ET NOTION D'IRRÉVERSIBILITÉ

Exercice issu du test de Novembre 2024

- ❖ Etablir l'expression de la variation d'entropie $\Delta S_{0 \rightarrow 1}$ de n moles de gaz parfait entre en état d'équilibre (0) (T_0, P_0, V_0) et un état final (1) (T_1, P_1, V_1) . Donner l'expression en fonction de T_0, V_0, T_1, V_1 .

$$\Delta S_{0 \rightarrow 1} = nC_V \cdot \ln\left(\frac{T_1}{T_0}\right) + nR \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_0}\right)$$

$$\Delta S_{0 \rightarrow 1} = nR \left(\frac{\gamma}{\gamma - 1} \ln\left(\frac{T_1}{T_0}\right) - \ln\left(\frac{P_1}{P_0}\right) \right)$$

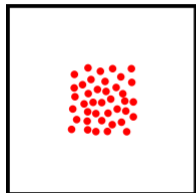
43

PARTIE N°4: SECOND PRINCIPE ET NOTION D'IRRÉVERSIBILITÉ

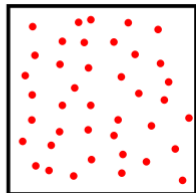
Origine microscopique de l'irréversibilité

- ❖ Les deux boîtes ont le même nombre de particules (40), laquelle possède la plus grande entropie ?

A



B

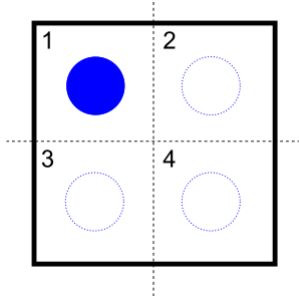


44

PARTIE N°4: SECOND PRINCIPE ET NOTION D'IRRÉVERSIBILITÉ

Notions de micro-états

- ❖ Combien de d'états statistiques ou micro-états le système peut-il prendre ?

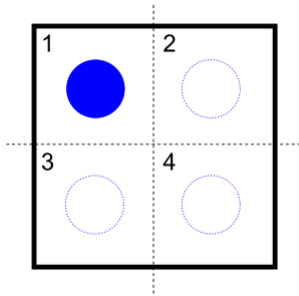


45

PARTIE N°4: SECOND PRINCIPE ET NOTION D'IRRÉVERSIBILITÉ

Notions de micro-états

- ❖ Combien de d'états statistiques ou micro-états le système peut-il prendre ?
- ❖ Et si le système possède 2 particules indiscernables ?



$$\Omega = ?$$

$$\Omega = 4$$

46

PARTIE N°4: SECOND PRINCIPE ET NOTION D'IRRÉVERSIBILITÉ

Nombre de micro-états d'un système

Nombre de micro-états
d'un système

Nombre de site

$$\Omega = \frac{n_f!}{(n_f - N)! \cdot N!}$$

Nombre de particules
indiscernables

Hypothèse : $n_f \gg N$

47

PARTIE N°4: SECOND PRINCIPE ET NOTION D'IRRÉVERSIBILITÉ

Définition statistique de l'entropie

❖ Définition de Ludwig Van Boltzmann

Entropie en J.K^{-1}

$$S = k_B \cdot \ln(\Omega)$$

Constante de Boltzmann
 $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$

Nombre de micro-états
d'un système

48

PARTIE N°4: SECOND PRINCIPE ET NOTION D'IRRÉVERSIBILITÉ

Le 3^{ème} principe de la thermodynamique

❖ Quelle est l'entropie de ce système ?

