

# CHAPITRE ECT2

## Bilan d'énergie lors d'une transformation d'un système thermodynamique

## ➤ Problématique

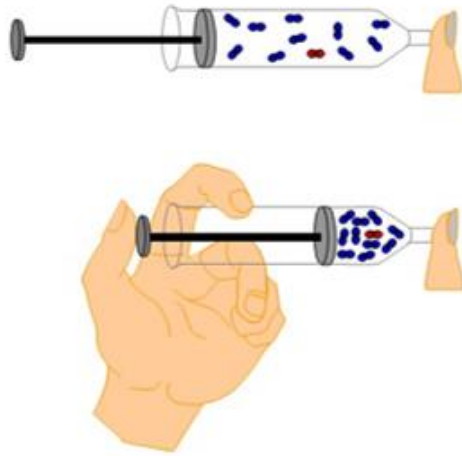


FIGURE 1 : Deux exemples de transformations thermodynamiques

Questions : Comment **décrire la transformation** subie par le système thermodynamique ? Que se passe-t-il en termes **d'échanges d'énergies** ?

# 1 Transformations d'un système thermodynamique

## 1.1 Qu'est-ce qu'une transformation ?

### ➤ Définition

État d'équilibre initial (EI) → état d'équilibre final (EF)

### ➤ Variables à l'équilibre

- Variables externes :

température  $T_{ext}$ , pression  $P_{ext}$

- Variables internes :

$P, V, T, n^*$

## 1.2 Déplacement de l'équilibre

### ➤ Action mécanique

Modification  $V$ ,  $P$  du système : paroi mobile

Échange d'énergie mécanique : **travail**

- $P \nearrow$ ,  $V \searrow$  : compression ( $\delta W > 0$ )

- $P \searrow$ ,  $V \nearrow$  : détente ( $\delta W < 0$ )



### ➤ Action thermique

Modification de  $T$  du système : échange de **chaleur**,  
paroi diatherme

- Syst. reçoit chaleur ( $\delta Q > 0$ ) : chauffage

- Syst. fournit chaleur ( $\delta Q < 0$ ) : refroidissement



➤ Action sur la quantité de matière

Modification  $n$  : **échange de matière**, paroi fictive

- Syst. **reçoit matière** ( $\delta n > 0$ ) : **admission**
- Syst. **fournit matière** ( $\delta n < 0$ ) : **éjection**



**Nécessité systèmes ouverts**

Cadre du programme :

**essentiellement systèmes fermés**

## 1.3 Différentes transformations

### ➤ Caractéristiques des transformations **Syst. fermé**

| Transformation | Variables internes<br>(système) | Variables externes<br>(milieu extérieur) |
|----------------|---------------------------------|--|
| Isochore       | $V = cste$                      |  |
| Isobare        | $P = cste$                      |  |
| Isotherme      | $T = cste$                      |  |
| Monobare       |                                 | $P_{ext} = cste$                         |
| Monotherme     |                                 | $T_{ext} = cste$                         |

FIGURE 2 : Nature des transformations thermodynamiques



- Caractérisation d'une transformation : **nom+adjectif**
- Retour à la problématique
- Représentation des transf. ds le diag de Clapeyron

## 1.4 Évolution temporelle

### ➤ Temps de relaxation

Propriété :

Équilibre mécanique + rapide

qu'équilibre thermique et équilibre de diffusion

### ➤ Transformation quasi-stationnaire ou quasi-statique (TQS)

Définition : TQS

succession continue d'états d'équilibre infiniment  
voisins : transformation infiniment lente

## 1.5 Détermination de l'état d'équilibre final

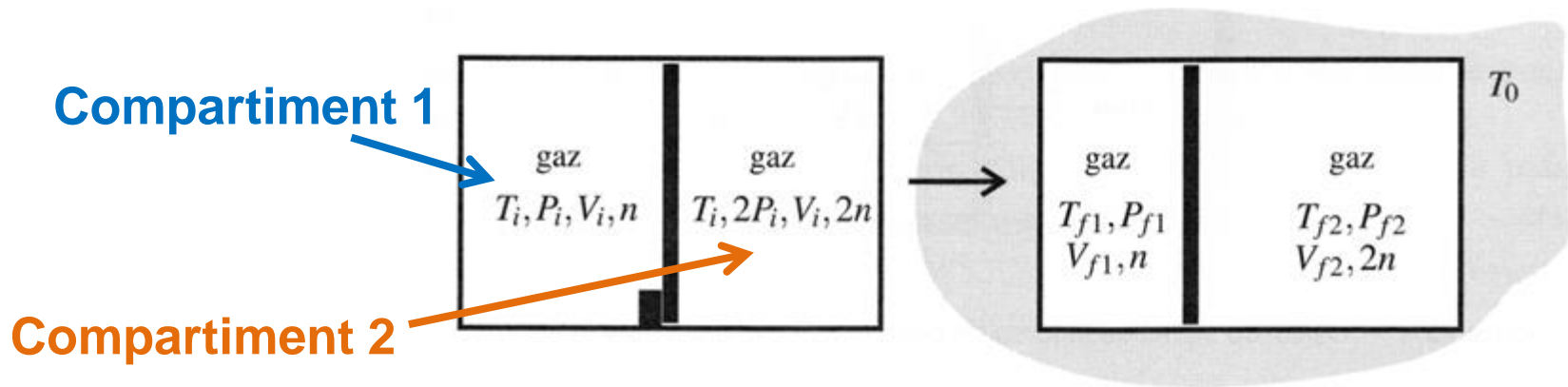
### ➤ Méthode

- ❖ Syst. thermodynamique (fermé), E.I. + E.F.
- ❖ Équilibre mécanique
- ❖ Équilibre thermique
- ❖ Équilibre de diffusion (système diphasé)
- ❖ Caractérisa° de la transformation
- ❖ Équations d'état



➤ Exercice d'application 1

On considère une enceinte indéformable composée de deux compartiments séparés par une cloison étanche et mobile, contenant du gaz. Une cale bloque la cloison mobile. Toutes les parois sont diathermes. À partir de l'état d'équilibre initial, représenté à gauche sur la figure, on enlève la cale et on place l'enceinte dans un environnement à la température  $T_0$ . Déterminer l'état d'équilibre final (à droite sur la figure).



## 2 Premier principe thermodynamique

### 2.1 Variation de l'énergie totale

- Énergie totale  $E = E_m + U$
- Variation d'énergie du système

$$\Delta E_{AB} = E_B - E_A = E_{éch,A \rightarrow B}$$

Variation d'énergie

Quantité d'énergie  
échangée

- Système isolé

Propriété :

$$\Delta E_{AB} = E_B - E_A = 0$$

**l'énergie totale est conservative**

## 2.2 Expression du 1<sup>er</sup> principe

### ➤ Énergie échangée

Pour un système fermé, échanges d'énergie  $E_{éch}$  :

$W_{A \rightarrow B, c}$  travail des forces ext. non conservatives

$Q_{A \rightarrow B, c}$  transfert d'énergie thermique

### ➤ Convention de signe



### ➤ Énoncé du 1<sup>er</sup> principe (cas général)

$$\Delta E_{AB} = E_B - E_A = W_{A \rightarrow B, c} + Q_{A \rightarrow B, c}$$

### ➤ Énoncé du 1<sup>er</sup> principe (forme usuelle)

$$\Delta U_{AB} + \Delta E_{C, AB}^{macro} = U_B - U_A + E_{C, B}^{macro} - E_{C, A}^{macro} = W_{A \rightarrow B, c} + Q_{A \rightarrow B, c}$$



➤ Système isolé  
Propriété

$$\Delta U_{AB} = 0$$

1<sup>er</sup> principe = principe de conservation

➤ Notations

➤ Transformation cyclique

Énoncé du 1<sup>er</sup> ppe pour une transf. cyclique :

$$W_{A \rightarrow A,e} + Q_{A \rightarrow A,e} = 0 \text{ avec } W_{A \rightarrow A,e} = -Q_{A \rightarrow A,e} \neq 0$$



➤ Premier principe en présence de travail utile

$$\Delta U_{AB} = W_{P,A \rightarrow B} + W_{u,A \rightarrow B} + Q_{A \rightarrow B}$$



### 3 Échange d'énergie mécanique avec le milieu extérieur : travail des forces de pression

travail  $W$  des forces extérieures non conservatives se limite à celui des forces de pression

#### 3.1 Pression extérieure

- Expression de la pression extérieure  $P_{ext}$   
Force pressante  $F$  tq :

$$F = P_{ext} S$$



- Exemples

## 3.2 Expression générale du travail des forces de pression

➤ Transformation élémentaire

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



➤ Interprétation

- $\delta W > 0$  : fluide **comprimé** : fonctionnement **récepteur**
- $\delta W < 0$  : fluide **se détend** : fonctionnement **moteur**

➤ Transformation finie

Entre EI A et EF B

$$W_{A \rightarrow B, \mathcal{C}} = - \int_{V_A, \mathcal{C}}^{V_B} P_{ext} dV$$



### 3.3 Cas de transformations finies simples

➤ Transformation isochore  $W = 0$

➤ Transformation monobare

### 3.4 Cas d'une transformation quasi-statique (TQS)

équilibre mécanique tout au long de l'évolution  $P_{ext} = P$

Propriété :

TQS : mécaniquement réversible

Travail élémentaire :  $\delta W = -PdV$

Travail pour une transf. finie :  $W_{A \rightarrow B, e} = -\int_{V_{A, e}}^{V_B} PdV$



### 3.5 Lien avec le diagramme de Clapeyron

➤ Diagramme de Clapeyron  $P = f(V)$  ou  $P = g(v)$

➤ Représentation graphique du travail

Courbe = chemin suivi par une **transformation  
mécaniquement réversible ou quasi-statique**

$$W_{A \rightarrow B, e} = - \int_{V_{A, e}}^{V_B} P dV = -\mathcal{A}$$



➤ Interprétation du signe du travail

▪ sens  $A \rightarrow B$  : **détente** ( $V \nearrow$ ) = **moteur**

▪ le sens  $B \rightarrow A$  : **compression** ( $V \searrow$ ) = **récepteur**





➤ Exercice d'application 2

Deux moles de dioxygène, supposées parfaites, passent réversiblement d'un état d'équilibre  $A$  de paramètres thermodynamiques  $(P_A, V_A, T_A)$  à un état d'équilibre  $B$  de paramètres  $(P_B = 3P_A, V_B, T_B = T_A)$ .

1. Déterminer le volume final  $V_B$ .
2. Dans un diagramme de Clapeyron, tracer la trajectoire suivie lors des deux transformations suivantes, puis calculer le travail des forces pressantes en fonction de la température  $T_A$ :
  - (1) : transformation isotherme de  $A$  à  $B$
  - (2) : transformation composée d'une isochore ( $A$  à  $C$ ) puis d'une isobare ( $C$  à  $B$ ).

## 3.6 Cas des transformations cycliques

$$W_{A \rightarrow A, e} = - \oint_e P dV$$

### ➤ Exercice d'application 3

Reprendre l'exercice d'application 2 et calculer le travail total sur le cycle *ACBA* puis sur le cycle *ABCA*.

### ➤ Nature du cycle

- Cycle dans le **sens horaire** :  $W < 0$  : cycle /syst. **moteur**
- Cycle dans le **sens trigonométrique** :  $W > 0$  : cycle /syst. **récepteur**



## 3.7 Travail utile

- Définition : travail utile  $W_u$
- Travail utile d'origine électrique

$$W_u = \int_{t_I}^{t_F} \mathcal{P}_{elec} dt = \int_{t_I}^{t_F} u(t)i(t)dt$$



- Exercice d'application 4

Soit une mole de gaz parfait de température initiale  $T_0$  et de capacités thermiques à volume constant  $C_V$  et à pression constante  $C_P$ . On chauffe le gaz grâce à une résistance  $R$ , parcourue par un courant  $I$ , pendant  $\tau$  secondes.

1. Dans une première expérience, le gaz, de pression  $P_0$ , est placé dans une enceinte adiabatique et rigide de volume  $V_0$ . Déterminer la température finale  $T_f$  du gaz.
2. Dans une deuxième expérience, le gaz est placé dans une enceinte adiabatique horizontale de volume  $V_0$ , fermée par un piston pouvant coulisser sans frottement. La pression de l'atmosphère est  $P_0$ . Déterminer la température finale  $T_f$  du gaz.

## 4 Échange d'énergie thermique avec le milieu extérieur : transfert thermique

### 4.1 Transfert thermique

#### ➤ Échanges énergétiques

**Travail** des forces de pression : échange d'énergie au niveau **macroscopique**

Travail au niveau **microscopique** : transferts **thermiques**

#### ➤ Définition : **transfert thermique $Q$**

## 4.2 Modes de transfert thermique

### ➤ Perception du transfert thermique

2 systèmes en contact avec  $T$  différentes

À l'échelle **macro** : **transformation** du système :

- variation de température
- changement d'état...

### ➤ 3 modes de transfert thermique

- Conduction (diffusion thermique)
- Convection
- Rayonnement

### ➤ Conséquences

## 4.3 Modélisation des transferts thermiques

### 4.3.1 Transfert par conduction

- Retour à la problématique
- Flux ou puissance thermique

Définition : **flux thermique  $\phi$**

$$\delta Q = \phi dt$$

- Résistance thermique

Définition :

**Loi d'Ohm :**

$$T_1 - T_2 = R_{th} \phi_{1 \rightarrow 2}$$



$R_{th} > 0$  **résistance thermique en  $K.W^{-1}$**

$G_{th} = \frac{1}{R_{th}}$  **conductance thermique en  $W.K^{-1}$**

## 4.3.2 Transfert conducto-convectif : loi de Newton

### ➤ Exemple

Transferts thermiques à l'interface entre 2 fluides :  
conductifs et convectifs : **indissociables**

### ➤ Loi de Newton

Énoncé :

$$\phi_{1 \rightarrow 2} = hS(T_1 - T_2)$$



$h > 0$  : **coeff. de transfert thermique** en  $\text{W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$

### ➤ Résistance thermique de Newton

$$R_N = \frac{T_1 - T_2}{\phi_{1 \rightarrow 2}} = \frac{1}{hS} > 0$$

## ➤ Ordres de grandeur

$h$  dépend de:

- **nature** des corps
- **état** de l'interface
- **vitesse** des fluides

|  | Solide / gaz  | Solide / eau liquide |
|--|---------------|----------------------|
| $h \text{ (W.K}^{-1}\text{.m}^{-2}\text{) sans convection forcée}$ | 5 à 30        | $4.10^2$ à $10^3$    |
| $h \text{ (W.K}^{-1}\text{.m}^{-2}\text{) avec convection forcée}$ | 10 à $3.10^2$ | $3.10^2$ à $12.10^3$ |

FIGURE 3 : Ordres de grandeur du coefficient de transfert thermique  $h$



## 4.4 Transformation adiabatique

➤ Définition : transf. adiabatique

$$Q = 0$$



➤ Système isolé

➤ Nature des parois

Toutes les parois sont **athermanes ou adiabatiques**  
**ou calorifugées** : idéalisation de la réalité

## 4.5 Thermostat

### ➤ Définition :

**thermostat (source d'énergie thermique)**

### ➤ Conséquence

### ➤ Réalisation pratique

### ➤ Interface avec un thermostat

**Parois diathermes ou diathermanes**

### ➤ Transformation monotherme

### Définition :

### ➤ Transformation isotherme

## 4.6 Modélisation d'une transformation : adiabatique ou isotherme ?

### ➤ Transformations idéales



- Isotherme :  $T = \text{cste}$ , éch. d'énergie therm ( $Q \neq 0$ )
- Adiabatique :  $Q = 0$  et  $T \neq \text{cste}$

### ➤ Modélisation

#### Critères de choix du modèle :



- Si transf **rapide** ou si parois très **épaisses** :  
**adiabatique**
- Si transf **lente** et que système en contact avec un  
**thermostat : isotherme**

## 4.7 Détermination du transfert thermique au cours d'une transformation

### ➤ Méthode

❖ Variation d'énergie cinétique macro.  $\Delta E_{C,AB}^{macro}$

❖ Travail des forces de pression  $W_{A \rightarrow B, \mathcal{C}}$

❖ Variation d'énergie interne  $\Delta U_{AB}$

❖ 1<sup>er</sup> principe  $Q_{A \rightarrow B, \mathcal{C}} = \Delta U_{AB} + \Delta E_{C,AB}^{macro} - W_{A \rightarrow B, \mathcal{C}}$

➤ Transformation adiabatique

$$Q_{A \rightarrow B, c} = 0$$



➤ Transformation isochore

$$Q_{A \rightarrow B, c} = \Delta U = U_B - U_A = Q_{A \rightarrow B}$$



Propriété



➤ Exercice d'application 5 : retour à la problématique

Une brique, initialement chauffée à la température  $T_0$ , est placée dans une atmosphère plus fraîche, à la température constante  $T_{air}$ . On suppose qu'elle est posée sur le sol adiabatique et on note  $S$  la surface totale de la brique en contact avec l'air. On note  $R_{th}$  sa résistance thermique et  $C$  sa capacité thermique. Déterminer la loi d'évolution de la température  $T(t)$ , supposée uniforme dans toute la brique.

➤ Analogie thermoélectrique

|                       | Électricité                 | Thermique                        |
|-----------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Loi d'ohm             | $u_0 - u(t) = Ri(t)$        | $T_{air} - T(t) = R_{th}\phi(t)$ |
| Dérivation temporelle | $i(t) = C \frac{du(t)}{dt}$ | $\phi(t) = C \frac{dT(t)}{dt}$   |

FIGURE 4 : Analogie thermoélectrique

## 5 Enthalpie d'un système

### 5.1 Transfert thermique pour une transformation monobare

#### ➤ Transformation monobare

$$P_A = P_{ext} \quad P_B = P_{ext}$$

#### ➤ Utilisation du 1<sup>er</sup> principe

#### ➤ Expression du transfert thermique

## 5.2 Enthalpie et capacité thermique à pression constante

### 5.2.1 Enthalpie

➤ Définition :

$$H = U + PV \quad (\text{J})$$

➤ Extensivité

➤ 2<sup>nde</sup> loi de Joule

Propriété

Systeme obéit à la 2<sup>nde</sup> loi de Joule  
si  $H$  ne dépend que de la température  $T$





## 5.2.2 Capacité thermique à pression constante

➤ Définition :

$$C_P = \frac{dH}{dT} \quad (\text{J.K}^{-1})$$

➤ Grandeurs intensives associées

▪ Capacité thermique molaire

$$C_{P,m} = \frac{dH_m}{dT} = \frac{C_P}{n} \quad (\text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1})$$

▪ Capacité thermique massique

$$c_P = \frac{dh}{dT} = \frac{C_P}{m} \quad (\text{J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1})$$

➤ Variation d'enthalpie


$$\Delta H_{AB} = \int_{T_A}^{T_B} C_P(T) dT$$

Si  $C_P$  indpdte de  $T$  :  $\Delta H_{AB} = C_P \Delta T = C_P (T_B - T_A)$



## 5.3 Expression du premier principe pour une transformation monobare

### ➤ Propriété :

$$Q_{A \rightarrow B, c} = H_B - H_A = \Delta H_{AB} = Q_{A \rightarrow B}$$


### ➤ Premier principe en présence de travail utile



$$\Delta H = W_u + Q$$

### ➤ Suite exercice d'application 4

2. Dans une deuxième expérience, le gaz est placé dans une enceinte adiabatique horizontale de volume  $V_0$ , fermée par un piston pouvant coulisser sans frottement. La pression de l'atmosphère est  $P_0$ . Déterminer la température finale  $T_f$  du gaz.

## 5.4 Cas du gaz parfait

### ➤ Enthalpie molaire

Propriété :

**GP obéit à la 2<sup>de</sup> loi de Joule**

### ➤ Capacité thermique à pression constante

Relation de Mayer: Pour GP:  $C_P - C_V = nR$

Conséquence  $C_P - C_V > 0$  et  $C_P > C_V$



### ➤ Coefficient $\gamma$ du gaz parfait

Définition

$$\gamma = \frac{C_P(T)}{C_V(T)} = \frac{C_{Pm}(T)}{C_{Vm}(T)} = \frac{c_P(T)}{c_V(T)} > 1$$

➤ Expressions et valeurs des capacités thermiques pour un GP

$$C_V = \frac{nR}{\gamma - 1} \quad \text{et} \quad C_P = \frac{\gamma nR}{\gamma - 1}$$



| Gaz parfait | $C_{Vm}$       | $C_{Pm}$       | $\gamma$             | Conditions  |
|-------------|----------------|----------------|----------------------|-------------|
| GPM         | $\frac{3}{2}R$ | $\frac{5}{2}R$ | $\frac{5}{3} = 1,67$ | $\forall T$ |
| GPP         | $\frac{5}{2}R$ | $\frac{7}{2}R$ | $\frac{7}{5} = 1,40$ | $T$ usuelle |

FIGURE 5 : Capacités thermiques et coefficient  $\gamma$  d'un gaz parfait

## 5.5 Cas d'une phase condensée indilatable et incompressible

### ➤ Enthalpie molaire

Propriété :

$$H_m(T) \approx U_m(T)$$

### ➤ Capacité thermique à pression constante

Propriété

$$C_{Pm} = C_{Vm} = C_m$$

### ➤ Cas de l'eau liquide

Définition

capacité thermique massique de l'eau liquide:

$$c_{\text{eau liq}} = 4,18.10^3 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$$

## 5.6 Calorimétrie

### ➤ Définition :

**Calorimétrie** : art de mesurer les transferts thermiques reçus ou cédés par un système

### ➤ Application

mesurer les capacités thermiques

## ➤ Calorimètre



### Définition :

➤ Capacité thermique du calorimètre  $C_{cal}$

Définition : **masse équivalente en eau  $m_{eq}$**

$$C_{cal} = m_{eq} c_{eau}$$