

Échange d'énergie
1^{er} principe de la thermodynamique

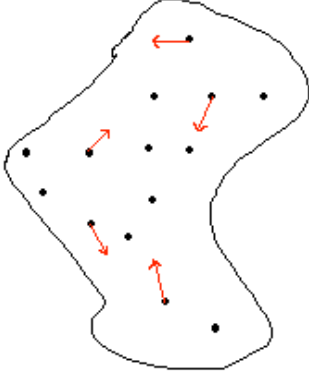
Table des matières

1) MISE EN PLACE DU PREMIER PRINCIPE	2
1.1) ENERGIE INTERNE D'UN SYSTEME	2
1.2) CADRE DU PROGRAMME	2
1.3) ENONCE DU PREMIER PRINCIPE	2
1.4) CAS PARTICULIERS	3
2) TRAVAIL DES FORCES DE PRESSION REÇU PAR LE SYSTEME	3
2.1) EXPRESSION DU TRAVAIL ELEMENTAIRE	3
2.2) CAS DES TRANSFORMATIONS QUASI-STATIQUES	3
2.3) INTERPRETATION GRAPHIQUE : DIAGRAMME DE CLAPEYRON	4
3) CHALEUR REÇU PAR LE FLUIDE	4
3.1) RAPPELS	4
3.2) TRANSFORMATION ISOCHORE	4
3.3) TRANSFORMATION ISOBARE : FONCTION ENTHALPIE	4
4) CAS DES GAZ PARFAITS	4
4.1) TRANSFORMATION ISOCHORE : 1 ^{ERE} LOI DE JOULE	4
4.2) TRANSFORMATION ISOBARE : 2 ^E LOI DE JOULE :	5
4.3) RELATION DE MAYER :	5
4.4) EXPRESSION DE CP ET CV :	5
5) LES TRANSFORMATIONS ELEMENTAIRES	5
5.1) TRANSFORMATION ISOTHERME DU GAZ PARFAIT	5
5.2) TRANSFORMATION ISOBARE DU GAZ PARFAIT :	6
5.3) TRANSFORMATION ISOCHORE DU GAZ PARFAIT	6
5.4) TRANSFORMATION ADIABATIQUE DU GAZ PARFAIT :	6

Échange d'énergie
1^{er} principe de la thermodynamique

1) Mise en place du premier principe

1.1) Energie interne d'un système



Pour caractériser l'énergie d'un système, dans un état donné, on définit :

- E_g : énergie cinétique macroscopique : elle correspond au mouvement d'ensemble du système entier
- E_p : énergie potentielle macroscopique : elle correspond aux interactions entre le système et le milieu extérieur
- E_c : énergie cinétique microscopique : elle est essentiellement due à l'agitation thermique
- E_i : énergie potentielle d'interaction microscopique : elle correspond aux interactions entre les différents éléments du système
- E : énergie totale du système :

$$E = E_g + E_p + E_c + E_i$$

↓
U: Energie interne du système

1.2) Cadre du programme

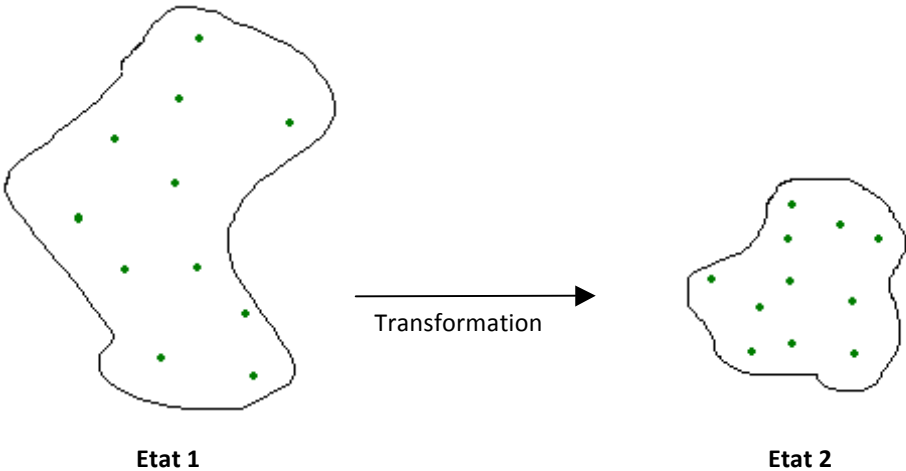
- Pas de variation de E_g : $\Delta E_g = 0$
- Pas de variation de E_p : $\Delta E_p = 0$

Et donc : $\Delta E = \Delta U$

La variation d'énergie totale du système se limite à sa variation d'énergie interne.

1.3) Enoncé du premier principe

Considérons un système fluide qui subit une transformation entre deux états d'équilibre :



La variation d'énergie interne du système est due aux échanges avec le milieu extérieur, sous forme de travail et sous forme de chaleur.

$$\Delta U_{12} = W + Q$$

$\Delta U_{12} = U_2 - U_1$: variation d'énergie interne du système.

W : travail fourni par le milieu extérieur donc reçu par le système (W est une grandeur algébrique).

Q : chaleur fournie par le milieu extérieur donc reçue par le système (Q est une grandeur algébrique).

Propriété :

U est une fonction d'état. Cela veut dire que sa variation ne dépend que de l'état initial et de l'état final, et donc est indépendante de la nature de la transformation.

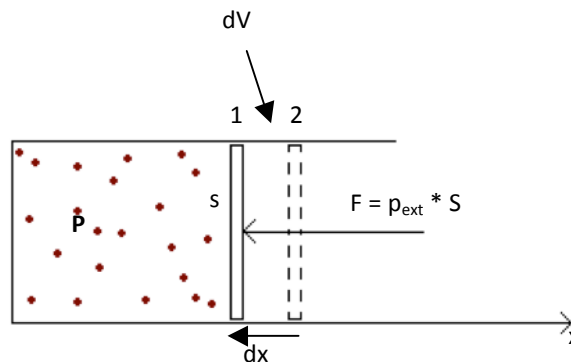
1.4) Cas particuliers

- Système isolé : $W = 0$ et $Q = 0$ donc $\Delta U_{12} = 0$
- **Transformation cyclique** : $\Delta U_{\text{cycle}} = 0 \rightarrow W_{\text{cycle}} + Q_{\text{cycle}} = 0 \rightarrow W_{\text{cycle}} = - Q_{\text{cycle}}$

2) Travail des forces de pression reçu par le système

2.1) Expression du travail élémentaire

Considérons un fluide enfermé dans un cylindre fermé par un piston mobile :



$\delta W = - F dx$: travail élémentaire reçu par le fluide, de la part du milieu extérieur

$\Rightarrow \delta W = - p_{\text{ext}} S dx$ car $F = p_{\text{ext}} S$

$\Rightarrow \delta W = - p_{\text{ext}} dV$ avec dV : variation du volume de fluide : $dV = V_2 - V_1 =$ volume balayé par le piston

2.2) Cas des transformations quasi-statiques

Une transformation est dite quasi-statique si l'équilibre mécanique est réalisé tout au long de la transformation.

On a alors, à chaque instant :

$p = p_{\text{ext}}$

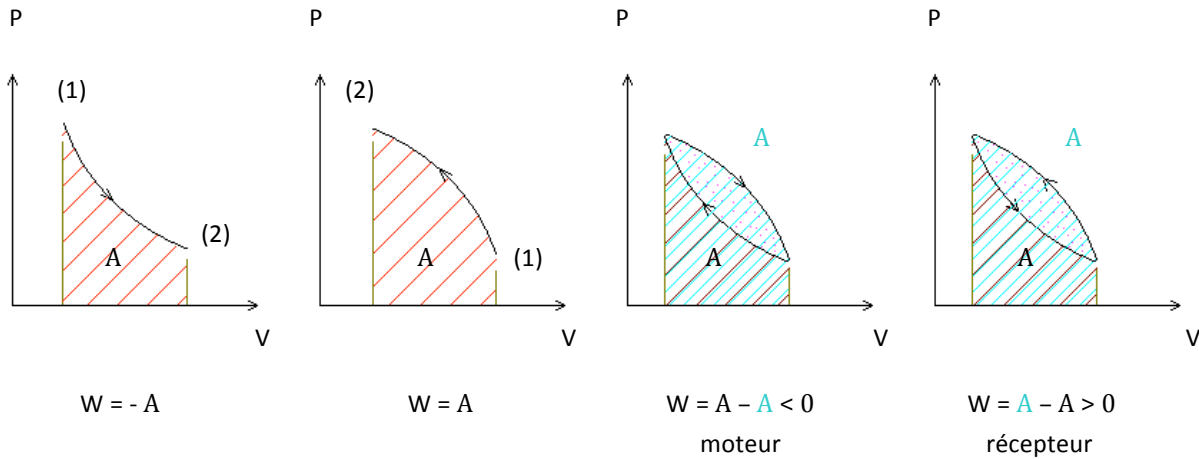
et donc $\delta W = - p dV$ avec p : pression du système

et par intégration

$$W = - \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

Conséquence : Pour une transformation isochore, $W = 0$

2.3) Interprétation graphique : diagramme de Clapeyron



3) Chaleur reçu par le fluide

3.1) Rappels

- Cas des liquides : $\delta Q = m c dT \Rightarrow Q = m c \Delta T$
- Cas des gaz :
 - transfo isochore : $\delta Q = n C_v dT \Rightarrow Q = n C_v \Delta T$
 - transfo isobare : $\delta Q = n C_p dT \Rightarrow Q = n C_p \Delta T$

3.2) Transformation isochore

1^{er} principe $dU = \delta W + \delta Q$
 $\Rightarrow dU = -pdV + \delta Q$
 $\Rightarrow dU = \delta Q$ car $dV = 0$
 et donc $\Delta U = Q$

La quantité de chaleur reçue par un gaz parfait au cours d'une transformation isochore est égale à sa variation d'énergie interne.

3.3) Transformation isobare : fonction enthalpie

1^{er} principe $dU = \delta W + \delta Q$
 $\Rightarrow dU = -pdV + \delta Q$
 $\Rightarrow dU + pdV = \delta Q$
 $\Rightarrow d(U + pV) = \delta Q$ car $p = \text{cste}$

On appelle enthalpie la fonction H définie par : $H = U + pV$

et donc $\Delta H = Q$

La quantité de chaleur reçue par un gaz parfait au cours d'une transformation isobare est égale à sa variation d'enthalpie.

4) Cas des gaz parfaits

4.1) Transformation isochore : 1^{ère} loi de Joule

$dU = \delta Q_v$
 or $\delta Q_v = n C_v dT$
 et donc $dU = n C_v dT$
 $\Delta U = n C_v \Delta T$

Or U est une fonction d'état, sa variation est donc indépendante de la nature de la transformation.

Conclusion : quelle que soit la transformation subie par le gaz, $\Delta U = n C_v \Delta T$. C'est la 1^{ère} loi de Joule

4.2) Transformation isobare : 2^e loi de Joule

$$dH = \delta Q_p$$

$$\text{or } \delta Q_p = n C_p dT$$

$$\text{et donc } dH = n C_p dT$$

$$\Delta H = n C_p \Delta T$$

Or H est une fonction d'état, sa variation est donc indépendante de la nature de la transformation.

Conclusion : quelle que soit la transformation subie par le gaz, $\Delta H = n C_p \Delta T$. C'est la 2^{ème} loi de Joule

4.3) Relation de Mayer

$$H = U + pV$$

$$H = U + n RT$$

$$dH = dU + nR dT$$

$$n C_p dT = n C_v dT + n R dT$$

$$C_p = C_v + R$$

Et donc $C_p - C_v = R$ relation de Mayer

4.4) Expression de C_p et C_v

On note $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$: constante pour un gaz donné

$$\text{On montre, pour les capacités molaires, que : } \begin{cases} C_v = \frac{R}{\gamma - 1} \\ C_p = \frac{\gamma R}{\gamma - 1} \end{cases} \text{ en J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$\text{De même, pour les capacités massiques : } \begin{cases} c_v = \frac{r}{\gamma - 1} \\ c_p = \frac{\gamma r}{\gamma - 1} \end{cases} \text{ en J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

5) Les transformations élémentaires

5.1) Transformation isotherme du gaz parfait : $T = T_0$

$$\delta W = -pdV$$

$$W = - \int_{V_1}^{V_2} pdV$$

$$W = - \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT_0}{V} dV$$

$$W = -nRT_0 \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V}$$

$$W = -nRT_0 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

* 1^{er} principe : $\Delta U = W + Q$ et $\Delta U = n C_v \Delta T = 0$ car $\Delta T = 0$ sur isotherme

et donc $Q = -W$

Résumé :

$$W = -nRT_0 \ln \frac{V_2}{V_1} = -nRT_0 \ln \frac{p_1}{p_2}$$

et $Q = -W$

5.2) Transformation isobare du gaz parfait : $p = p_0$

$$\delta W = -p dV = -p_0 dV$$

$$W = - \int_{V_1}^{V_2} p_0 dV$$

$$W = -p_0 \int_{V_1}^{V_2} dV \quad \text{et donc} \quad W = -p_0(V_2 - V_1)$$

* 1^{er} principe : $\Delta U = W + Q$ et $Q = \Delta H = n C_p \Delta T$ (cf § 3.3))

Résumé :

$$W = -p_0(V_2 - V_1) = -nR(T_2 - T_1)$$

et $Q = nC_p(T_2 - T_1) = n \frac{\gamma R}{\gamma - 1} (T_2 - T_1)$

5.3) Transformation isochore du gaz parfait : $V = V_0$

$$\delta W = -p dV = 0$$

$$W = 0$$

* 1^{er} principe : $\Delta U = W + Q = Q$

Résumé :

$$W = 0$$

et $Q = nC_v(T_2 - T_1) = n \frac{R}{\gamma - 1} (T_2 - T_1)$

5.4) Transformation adiabatique du gaz parfait : $Q = 0$

$$dU = \delta W$$

$$\Rightarrow n C_v dT = -p dV$$

$$\Rightarrow n \frac{R}{\gamma - 1} dT = -p dV$$

$$\Rightarrow \frac{dT}{T} = -\frac{p}{V} dV$$

$$\frac{dT}{T} = -(\gamma - 1) \frac{dV}{V}$$

$$\int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} = -(\gamma - 1) \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V}$$

$$\ln \frac{T_2}{T_1} = -(\gamma - 1) \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$\ln \frac{T_2}{T_1} + (\gamma - 1) \ln \frac{V_2}{V_1} = 0$$

$$\ln \frac{T_2}{T_1} + \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma - 1} = 0$$

$$\ln \frac{T_2}{T_1} \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma - 1} = 0$$

$$\frac{T_2}{T_1} \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1} = 1$$

$$T_2 V_2^{\gamma-1} = T_1 V_1^{\gamma-1}$$

C'est la loi de Laplace

ou encore :

$$TV^{\gamma-1} = \text{constante}$$

De même

$$\frac{p_2 V_2}{nR} V_2^{\gamma-1} = \frac{p_1 V_1}{nR} V_1^{\gamma-1}$$

$$p_2 V_2^\gamma = p_1 V_1^\gamma$$

C'est une autre expression de la loi de Laplace

* 1^{er} principe : $W = \Delta U$ car $Q = 0$

et donc

$$W = nC_v(T_2 - T_1) = n \frac{R}{\gamma-1} (T_2 - T_1)$$

et $Q = 0$