

Échanges d'énergie des transformations thermodynamiques

« You can't gain something, without giving something in return »

Hiromu ARAKAWA, Fullmetal Alchemist

Sommaire

I Moyens d'échange d'énergie	2
I/A Nécessité de la thermodynamique	2
I/B Travail des forces de pression	2
I/C Transfert thermique	3
II Types de transformations	4
II/A Condition sur l'évolution	4
II/B Conditions sur le milieu extérieur	4
II/C Conditions sur les grandeurs du système	5
III Cas particuliers	7
III/A Transformation cyclique	7
III/B Condition sur les échanges thermiques	8

Capacités exigibles

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ○ Définir un système adapté à une problématique donnée. ○ Exploiter les conditions imposées par le milieu extérieur pour déterminer l'état d'équilibre final. ○ Évaluer un travail par découpage en travaux élémentaires et sommation sur un chemin donné dans le cas d'une seule variable. | <ul style="list-style-type: none"> ○ Interpréter géométriquement le travail des forces de pression dans un diagramme de WATT. ○ Distinguer qualitativement les trois types de transferts thermiques : conduction, convection et rayonnement. ○ Identifier dans une situation expérimentale le ou les systèmes modélisables par un thermostat. |
|---|--|

L'essentiel

Définitions

○ T3.1 : Transformations thermodynamique	2
○ T3.2 : Transfert thermique	3
○ T3.3 : Types de transferts thermiques	3
○ T3.4 : Thermostat	3
○ T3.5 : Notions de réversibilité	4
○ T3.6 : Transformation monobare	4
○ T3.7 : Transformation monotherme	5
○ T3.8 : Transformation isochore	5
○ T3.9 : Transformation isobare	5
○ T3.10 : Transformation isotherme	6
○ T3.11 : Transformation cyclique	7
○ T3.12 : Transformation adiabatique	8

Propriétés

○ T3.1 : Travail des forces de pression	2
○ T3.2 : W_p^{isoP}	5
○ T3.3 : W_p^{isoT}	6
○ T3.4 : W_p^{cycle}	7
○ T3.5 : Loi de LAPLACE	9
○ T3.6 : W_p^{LAP}	10

Implications

○ T3.1 : W_p^{QS}	4
○ T3.2 : W_p^{monoP}	4
○ T3.3 : W_p^{isoV}	5
○ T3.4 : IsoV, isoP pour gaz parfait	6

Démonstrations

○ T3.1 : Travail des forces de pression	2
○ T3.2 : W_p^{isoP}	5
○ T3.3 : W_p^{isoT}	6
○ T3.4 : W_p^{cycle}	7
○ T3.5 : Couples de variables pour LAPLACE	10
○ T3.6 : W_p^{LAP}	10

Interprétations

○ T3.1 : Trouver un état final	2
○ T3.2 : Thermostat	3
○ T3.3 : Comprendre les échanges thermiques	9

Applications

○ T3.1 : Choix d'un système	6
○ T3.2 : Cycle de LENOIR	8

Points importants

○ T3.1 : Sens de calcul des variations	2
○ T3.2 : Adiabatique vs. isotherme	9
○ T3.3 : Pente d'une adiabatique en (P,V)	10
○ T3.4 : Résumé des transformations	10

Erreurs communes

○ T3.1 : Transformation et système	2
○ T3.2 : Quasi-statique vs. isobare	6

I Moyens d'échange d'énergie

I/A Nécessité de la thermodynamique

Exemple T3.1 : Limites du TEM

Le TEM de la mécanique,

ne permet pas de décrire des phénomènes pourtant très simples. Par exemple, en comprimant de l'air dans une seringue on apporte un travail non nul ($F \cdot d \neq 0$). Pourtant, entre l'instant initial et l'instant final le gaz ne gagne ni vitesse ni énergie potentielle :

Comme discuté au chapitre précédent, il ne gagne pas d'énergie **macroscopique** mais **microscopique**, c'est-à-dire de l'**énergie interne**, *via* des transformations thermodynamiques.

Définition T3.1 : Transformations thermodynamique

Une **transformation** est un phénomène physique ou chimique qui produit la **variation** d'au moins un **paramètre d'état** du système. L'état de départ est *l'état initial*, EI, celui d'arrivée *l'état final*, EF ; ce sont des **états d'équilibre** du système (sauf exceptions), c'est-à-dire que les paramètres d'état y sont **définis, homogènes et constants**.

Interprétation T3.1 : Trouver un état final

On connaît toujours l'état initial, et on s'intéresse à l'état final ; pour ça, on appliquera les **conditions d'équilibre** mécanique et thermique (sauf si la transformation est trop rapide, voir plus loin), et les **caractéristiques de la transformations**.

Important T3.1 : Sens de calcul des variations

Les échanges d'énergie d'un système sont toujours exprimés en **valeur algébrique**, et sont **positifs lorsque le système choisi reçoit de l'énergie**, négatifs lorsqu'il en cède.

Attention T3.1 : Transformation et système

Il sera donc d'autant plus important de **spécifier le système d'étude** Σ en thermodynamique, puisque l'on traite des échanges entre systèmes. **Il sera toujours fermé** pour appliquer les théorèmes de conservation.

I/B Travail des forces de pression

♥ Propriété T3.1 : Travail des forces de pression

Le travail **reçu** des forces de pression extérieures pour une variation de volume dV est :

Unité

$$\diamond \mathcal{W}_p > 0 \Rightarrow$$

$$\diamond \mathcal{W}_p < 0 \Rightarrow$$

$$\diamond \text{Compre}^\circ$$

Démonstration T3.1 : Travail des forces de pression

Prenons le cas extrêmement simple de l'air d'une seringue de section S avec un piston imperméable, pouvant glisser sans frottements, et bouchée à son autre extrémité. Notons $x(t)$ la longueur de la cavité contenant de l'air.

◇ Force :

◇ Travail :

I/C Transfert thermique

Définition T3.2 : Transfert thermique

Un système thermodynamique peut recevoir de l'énergie sans l'intervention d'une action mécanique mesurable à l'échelle macroscopique. Ce transfert d'énergie **microscopique**, complémentaire du travail mécanique, s'appelle **transfert thermique**, noté Q .

Unité

♥ Notation T3.1 : Variation des variables

Grandeur d'état

Une **grandeur d'état** ne dépend, par définition, **que des états**, ~~pas du chemin~~. On peut donc parler de sa différentielle dX et de sa variation totale ΔX .

Échange d'énergie

Les **échanges** n'étant **pas des grandeurs d'état**, on utilise la notation de petite variation quelconque δ , puis on intègre pour une grande variation.

TABLEAU T3.1 – Notation de différence selon la grandeur physique

Variation	Grandeur d'état	Échanges entre états
Petite		
Grande		

Définition T3.3 : Types de transferts thermiques

Convection

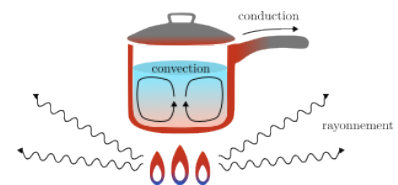
Conduction

Rayonnement

Exemple T3.2 : Modes de transfert thermique

On observe ces trois phénomènes en même temps en faisant bouillir de l'eau sur une gazinière :

- ◇ **Convection :**
- ◇ **Conduction :**
- ◇ **Rayonnement :**



Convection

Conduction

Rayonnement

- | | | |
|---|---|---|
| ◇ | ◇ | ◇ |
| ◇ | ◇ | ◇ |
| ◇ | ◇ | ◇ |

Définition T3.4 : Thermostat

C'est un système dont la **température reste constante**, même s'il échange de l'énergie :

Interprétation T3.2 : Thermostat

On peut voir un thermostat comme un très grand volume, de capacité thermique infinie :

Ainsi, il faut lui apporter une énergie infinie pour élever sa température ne serait-ce que d'un degré : il peut transmettre de la chaleur, mais ne peut pas changer de température !

Exemple T3.3 : Thermostats

- | | | |
|---|---|---|
| ◇ | ◇ | ◇ |
|---|---|---|

II Types de transformations

II/A Condition sur l'évolution

Définition T3.5 : Notions de réversibilité

Transformation quasi-statique

Transformation constituée d'états d'équilibre infiniment voisins ; en pratique, transformations lentes.

Conséquence

Irréversible

Si seuls l'EI et l'EF sont à l'équilibre, alors la transformation est **irréversible**. Ceci est généralement causé par les **frottements** et les **inhomogénéités** d'une grandeur d'état.

et

Réversible

Une transformation est réversible si elle est **quasi-statique** et **sans cause d'irréversibilité** ; on peut alors inverser la transformation par une petite variation.

♥ Implication T3.1 : $\mathcal{W}_p^{\text{QS}}$

Dans ce cas, le travail de la pression extérieure s'écrit :

Alors, \mathcal{W}_p est l'aire sous la courbe (P,V) , et :

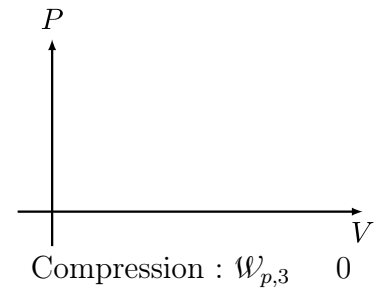
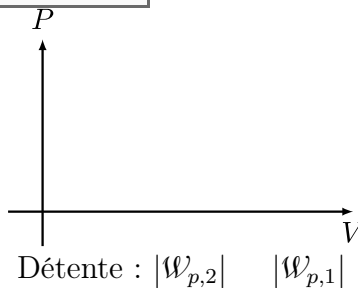
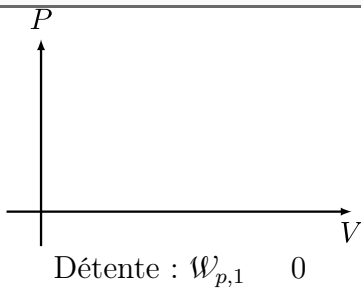
$$\diamond dV > 0 \Leftrightarrow$$

$$\diamond dV < 0 \Leftrightarrow$$



FIGURE T3.1 – \mathcal{W}_p quasi-statique en (P,V)

Exemple T3.4 : Quelques travaux en (P,V)



II/B Conditions sur le milieu extérieur

Définition T3.6 : Transformation monobare

Une transformation est **monobare** quand la **pression extérieure totale** sur les parois mobiles est **constante** :

Elle est *a priori* quelconque, et peut être irréversible, quasi-statique ou même réversible.

Implication T3.2 : $\mathcal{W}_p^{\text{monoP}}$

On a immédiatement

Remarque T3.1 : Monobare avec équilibre IF

Si les états initial et final sont des équilibres, c'est-à-dire $P_i = P_f$, et ce même si $P(t) \neq P_i$, alors on peut rentrer P dans la variation totale :

Définition T3.7 : Transformation monotherme

Elle est **monotherme** s'il y a **échange thermique** et que la **température extérieure est constante** :

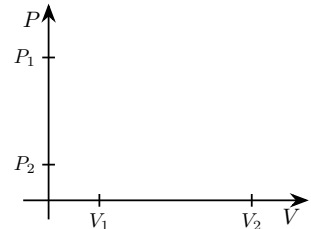
Elle est *a priori* quelconque, et peut être irréversible, quasi-statique ou même réversible.

II/C Conditions sur les grandeurs du système

Définition T3.8 : Transformation isochore

Une transformation est dite **isochore** quand le **volume** du système est **constant** au cours de la transformation :

S'applique aux **phases condensées** et **réipients indéformables**.

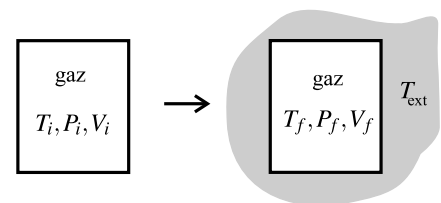


Implication T3.3 : $\mathcal{W}_p^{\text{isoV}}$

On a immédiatement

Exemple T3.5 : Transformation isochore

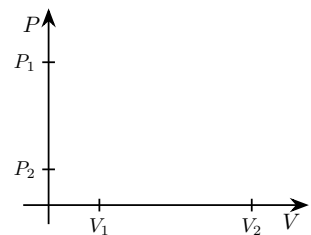
Le gaz d'une capsule à chantilly qu'on sort du frigo : le volume du gaz ne varie pas, mais il est hors équilibre thermique initialement. À l'état final, $V_f = V_0$ et $T_f = T_{\text{ext}}$.



Définition T3.9 : Transformation isobare

Une transformation **monobare** et **quasi-statique** est **isobare** :

Ce sont des transformations **lentes**, avec des parois mobiles.



♥ Propriété T3.2 : $\mathcal{W}_p^{\text{isoP}}$

On a alors

♥ Démonstration T3.2 : $\mathcal{W}_p^{\text{isoP}}$

Exemple T3.6 : Transformation isobare

- ◇ Gaz dans un récipient avec un piston subissant une force constante, d'état initial T_i, P_i, V_i .
- ◇ On le place dans un milieu extérieur à la température T_{ext} .
- ◇ À l'état d'équilibre final, $P_f = P = P_i$ par construction et $T_f = T_{\text{ext}}$ puisque c'est un équilibre.

Attention T3.2 : Quasi-statique vs. isobare

Il faut différencier **quasi-statique** et **isobare**. On peut avoir une transformation quasi-statique qui n'est pas isobare, par exemple en ajoutant progressivement du sable sur la paroi d'un récipient.

Implication T3.4 : IsoV, isoP pour gaz parfait

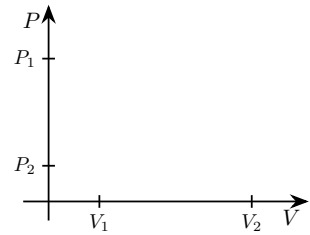
On peut déterminer les paramètres d'état de l'état final d'un gaz parfait subissant une transformation isochore ou isobare grâce à l'équation d'état du gaz parfait :

À partir de l'équilibre thermique par exemple, on détermine la pression finale pour une transformation isochore.

♥ Définition T3.10 : Transformation isotherme

Une transformation **monotherme** et **quasi-statique** est **isotherme** :

Ce sont des transformations **très lentes**, car les **échanges thermiques sont plus lents que les échanges mécaniques**.

**Propriété T3.3 : $\mathcal{W}_p^{\text{isoT}}$**

On trouve alors

♥ Démonstration T3.3 : $\mathcal{W}_p^{\text{isoT}}$

■

Exemple T3.7 : Transformation mono- vs. isotherme

Les deux exemples précédents sont monothermes, mais **pas isothermes** : au cours de ces transformations, la température du système n'est *a priori* pas définie dans les états intermédiaires qui ne sont pas des états d'équilibre, elle est seulement définie dans l'état final.

Application T3.1 : Choix d'un système

Soit une enceinte indéformable, séparée en deux compartiments par une cloison étanche et mobile. Le premier a pour état initial (T_i, P_i, V_i, n) , le second $(T_i, 2P_i, V_i, 2n)$. Une cale bloque initialement la cloison mobile. On enlève la cale et on place l'enceinte dans un environnement à température T_0 .

FIGURE T3.2 – Schéma.

- 1) Quelles sont les variables d'état des gaz dans l'état d'équilibre final?
- 2) Qualifier la transformation selon le système étudié.

1) \diamond **Température :**

\diamond **Pression :**

\diamond **Volume :**

\triangleright

\triangleright

\triangleright

D'où

2) On a _____ systèmes :

\diamond

\diamond

III Cas particuliers

III/A Transformation cyclique

Définition T3.11 : Transformation cyclique

Une transformation **cyclique** passe d'un état A à un autre état B, puis revient à l'état initial par un **autre chemin** : $A \rightarrow B \rightarrow A$. Pour une grandeur d'état X, on a alors :

mais

Propriété T3.4 : $\mathcal{W}_p^{\text{cycle}}$

Lors d'une transformation cyclique, le travail total représente l'**aire encapsulée** par la courbe en diagramme (P,V) , et on a son signe avec la **règle de la main droite** :

\diamond **Sens direct** $\Rightarrow \mathcal{W}_p^{\text{cycle}} > 0$ donc cycle _____ \diamond **Sens horaire** $\Rightarrow \mathcal{W}_p^{\text{cycle}} < 0$ donc cycle _____

Démonstration T3.4 : $\mathcal{W}_p^{\text{cycle}}$

FIGURE T3.3 – Démonstration pour $V_B > V_A$

$A \rightarrow B$:

$B \rightarrow A$:



\diamond **Sur le cycle :**

\diamond **Conclusion :**

Application T3.2 : Cycle de LENOIR

On fait subir à 1 mol de gaz parfait le cycle suivant :

- (A) $P_A = 2 \times 10^5 \text{ Pa}$ et $V_A = 14 \text{ L}$;
- (B) Chauffage isochore, $P_B = 2P_A = 4 \times 10^5 \text{ Pa}$;
- (C) Détente isotherme quasi-statique, $V_C = 2V_B = 28 \text{ L}$;
- (A) Refroidissement isobare, on retourne à l'état initial.



FIGURE T3.4 – Cycle LENOIR.

- 1 Tracer ce cycle en diagramme de WATT. Déterminer sa nature (moteur ou récepteur).
- 2 Calculer la pression, le volume et la température pour chacun des états A , B et C .
- 3 Calculer les travaux associés à chaque transformation puis celui du cycle. Vérifier sa nature.

1 Voir la figure ci-dessus. On voit que

2 (A) On a déjà P_A et V_A , on cherche T_A :

(B) On connaît P_B et transformation isochore donc , on cherche T_B :

(C) On connaît $V_C = 2V_B$ et transformation isotherme donc , on cherche P_C :

3 On a déjà démontré les formules utiles, mais **il faudrait les redémontrer** en DS.

◇

◇

◇

◇

Il reçoit bien un travail , c'est donc un cycle comme prédit.

III/B Condition sur les échanges thermiques

♥ Définition T3.12 : Transformation adiabatique

Condition(s)

- ◇ Parois **athermanes** (opposé = *diathermane*) donc système **calorifugé**, et/ou :
- ◇ Transformation **brusque** : $\Delta t_{\text{transfo}} \ll \Delta t_{\text{éch.Q}}$

Conséquence

Pas de transfert thermique :

C'est une **rupture d'équilibre**, puisqu'il y a absence d'échange avec l'extérieur.

Exemple T3.8 : Transformation adiabatique

C'est le principe des bouteilles thermos et des calorimètres. Ils fonctionnent grâce à :

◇

◇


Important T3.2 : Adiabatique vs. isotherme
Adiabatique
Isotherme

♥ Interprétation T3.3 : Comprendre les échanges thermiques
Isotherme

Pour qu'une transformation soit **isotherme** il faut que la **température** du système ne **varie pas**. Or dans la plupart des cas, tout apport d'énergie au système tend à faire varier sa température.

La réalisation d'une transformation isotherme nécessite donc un **contrôle** de la température que l'on obtient en mettant le système en contact avec un **thermostat**. Il **faudrait des échanges thermiques** entre le système et le thermostat *via* une **paroi diathermane**.

De plus, l'évolution du système doit être **suffisamment lente** pour que les échanges thermiques aient le temps de s'établir et assurent le maintien de la température T du système à la température T_0 du thermostat.

Adiabatique

Pour qu'une transformation soit **adiabatique**, il faut que le système n'**échange pas de chaleur** avec l'extérieur. Typiquement, il doit être séparé d'une **paroi athermane** et que la transformation soit **suffisamment rapide** pour négliger les transferts ; alors, **sa température va forcément varier**, pour finir en rupture d'équilibre.


Exemple T3.9 : Adiabatique vs. isotherme

Un gaz est contenu dans un récipient fermé par un piston de surface S , sur lequel on exerce une force \vec{F} variable, avec \vec{F}_i et \vec{F}_f dans l'état initial et final. On impose donc une pression $P = \frac{F}{S}$ au gaz.

Isotherme

- ◇ Parois fines, **diathermanes** dans un milieu extérieur **thermostaté** à $T_{\text{ext}} = T_0$.
- ◇ On augmente **lentement** la force \vec{F} , laissant le gaz **s'équilibrer thermiquement** à chaque instant : c'est une **compression isotherme**.

D'où les paramètres d'état du gaz dans l'état final :

Adiabatique

Le récipient a des **parois épaisses**. On augmente **rapidement** la force \vec{F} , l'échange **thermique** n'a **pas le temps** de se faire : c'est une **compression adiabatique**.

Dans ce cas, l'équation d'état ne suffit pas pour trouver l'état final, on n'a pas de renseignement sur T_f .


♥ Propriété T3.5 : Loi de LAPLACE

Pour une transformation **adiabatique** et **mécaniquement réversible** d'un **gaz parfait**, les paramètres d'état sont reliés par les relations suivantes :

où $\gamma > 1$ est le coefficient adiabatique du fluide. On la démontrera dans un chapitre ultérieur.

Démonstration T3.5 : Couples de variables pour LAPLACE

Pour $TV^{\gamma-1}$

Pour $P^{1-\gamma}T^\gamma$

♥ Important T3.3 : Pente d'une adiabatique en (P,V)

Propriété T3.6 : $\mathcal{W}_p^{\text{LAP}}$

Avec LAPLACE

♥ Démonstration T3.6 : $\mathcal{W}_p^{\text{LAP}}$

♥ Remarque T3.2 : $\mathcal{W}_p^{\text{Lap}}$

Ce genre de calcul avec $PV^\alpha = \text{cte}$ est à savoir faire, il est très classique. Il se trouve que **pour le cas adiabatique** $\alpha = \gamma$, on pourra faire un lien beaucoup plus direct grâce au premier principe de la thermodynamique, chapitre suivant ($\mathcal{W}_p^{\text{Lap}} = \Delta u = C_V \Delta T$ et $C_V = \frac{nR}{\gamma-1}$ donc résultat immédiat). Il faudra donc choisir l'outil adapté à la situation.

Important T3.4 : Résumé des transformations

Transformation	Condition	Travail
Quasi-statique		
Isochore		
Monotherme		
Isotherme		
Monobare		
Isobare		
Adiabatique QS		

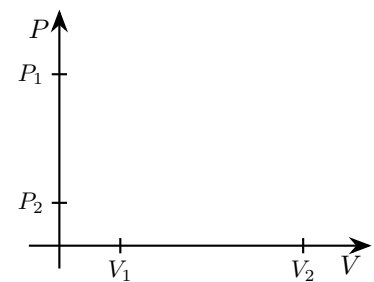


FIGURE T3.5 –
Représenta° en (P,V)