Thermodynamique – chapitre 2

Échanges d'énergie des transformations thermodynamiques

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

Hiromu Arakawa, *Fullmetal Alchemist*

Sommaire

I Introduction **3**
I/A Nécessité de la thermodynamique 3
I/B Transformations thermodynamiques 3
I/C Types de transformations 3
I/D Influence du choix du système 6
II Travail des forces de pression **7**
II/A Expression générale 7
II/B Transformations isochore et isobare 8
II/C Transformation quasi-statique ou mécaniquement réversible 9
III Transfert thermique **12**
III/A Définition 12
III/B Types de transferts thermiques 13
III/C Cas particuliers 13
III/D Bien comprendre les transferts 14
III/E Loi de Laplace 16

Capacités exigibles

- ☐ 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.
- ☐ 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

- Transformations thermodynamique 3
- Transformation isochore 3
- Transformation iso- ou monobare 4
- Transformation iso- ou monotherme 5
- Transforma° quasi-statique 9
- Transfert thermique 12
- Thermostat 13
- Transformation adiabatique . . . 14

Propriétés

- Équation d'état et transformation 6
- Travail des forces de pression . . . 7
- W_p isochore, monobare 8
- W_p quasi-statique 9
- W_p sur un cycle (P,V) 10
- Loi de Laplace 16

Démonstrations

- Travail des forces de pression . . . 7
- W_p isochore, monobare 8
- W_p sur un cycle (P,V) 10

Interprétations

- W_p quasi-statique en (P,V) 9

Applications

- Choix d'un système 6
- W_p quasi-statique et isotherme . . 10
- Cycle de Lenoir 11

Points importants

- Résumé des transformations . . . 6
- Sens de calcul des variations . . . 7
- W_p en (P,V) 10
- Transferts thermiques particuliers 15
- Adia. vs. isoT. en (P,V) 17

Erreurs communes

- Transformation quasi-statique . . 9
- Adiabatique vs. isotherme 15
- Loi de Laplace 17

I Introduction

I/A Nécessité de la thermodynamique

En mécanique, on pouvait écrire une équation de conservation d'énergie :

$$\Delta\mathcal{E}_m = W_{\text{NC}}$$

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

$$\begin{cases} W_{NC} > 0 \\ \Delta\mathcal{E}_m = 0 \end{cases} \Rightarrow \text{impossible ?}$$

C'est évidemment, comme discuté au chapitre précédent, qu'il ne gagne pas d'énergie **macroscopique** mais **microscopique**, c'est-à-dire de l'énergie interne.

L'objectif de ce chapitre est de mettre en place des outils d'analyse et de descriptions de transformations d'un système thermodynamique et traduire son évolution en terme d'énergie.

I/B Transformations thermodynamiques

♥ Définition 2.1 : 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*, celui d'arrivée *l'état final* ; ce sont des **états d'équilibre** du système, c'est-à-dire que les paramètres d'état y sont définis, homogènes et constants.

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

Pour provoquer la transformation d'un système Σ il faut imposer à Σ une modification d'une de ses variables d'état ou bien changer les conditions extérieures. On met ainsi le système **hors d'équilibre** et il évolue vers un **nouvel état d'équilibre**. On connaît toujours l'état d'équilibre initial, et on s'intéresse à l'état final ; pour ça, on 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**.

I/C Types de transformations

I/C) 1 Sur le volume : transformation isochore

♥ Définition 2.2 : Transformation isochore

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

Avec V_i, V_f et V les volumes dans l'état initial, final et courant, si la transformation est isochore alors $V_i = V = V_f$. Un système fermé dans un récipient rigide indéformable subit forcément des transformations isochores.

Exemple 2.1 : Transformation isochore

Figure 2.1 – Schéma

I/C) 2 Sur la pression : transformations isobare ou monobare

Définition 2.3 : Transformation iso- ou monobare

Isobare

Une transformation est dite **isobare** quand la **pression** du système est définie et **constante** au cours de la transformation :

Monobare

Une transformation **monobare** est une transformation au cours de laquelle la **pression extérieure** sur les parois mobiles est **constante** :

Avec P_i, P_f et P les pressions dans l'état initial, final et courant, si la transformation est isobare alors $P_i = P = P_f$. En pratique une transformation isobare est une transformation assez lente, dans laquelle on impose de l'extérieur sa pression au système.

Corollaire 2.1 : Isobare et monobare

Une transformation **isobare** est forcément **monobare** si le système a une **paroi mobile**.

Exemple 2.2 : Transformation isobare

Figure 2.2 – Schéma

I/C) 3 Sur la température : transformations isotherme ou monotherme

♥ Définition 2.4 : Transformation iso- ou monotherme

Isotherme

Une transformation est dite **isotherme** quand la **température** du système est définie et **constante** au cours de la transformation :

Monotherme

Une transformation **monotherme** est une transformation au cours de laquelle la **température extérieure** lors d'un transfert thermique est **constante** :

Avec T_i, T_f et T les températures dans l'état initial, final et courant, si la transformation est isotherme alors $T_i = T = T_f$. Ces conditions sont très contraignantes et difficilement réalisables en pratique. La transformation isotherme est une transformation théorique idéale. On reviendra sur ce point plus tard.

Corollaire 2.2 : Isotherme et monotherme

Une transformation **isotherme** est obligatoirement **monotherme** s'il y a un **transfert thermique**.

Exemple 2.3 : Transformation monotherme

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

I/C) 4 Sur le transfert thermique : transformation adiabatique

Nous définirons dans la partie III– Transfert thermique les notions associées, mais il est crucial d'introduire nettement la différence entre **température** et **transfert thermique**. Notamment, on aura la définition suivante :

Définition 2.5 : Transformation adiabatique

Une transformation est dite **adiabatique** s'il n'y a **pas de transfert thermique** :

Nous détaillerons plus loin les implications, et l'erreur classique d'une personne n'ayant pas pris la peine de faire une fiche de vocabulaire, malgré l'insistance de san professeurx de physique (qui est quand même de bon conseils !)...

I/C) 5 Utilisation des informations

♥ Propriété 2.1 : Équation d'état et transformation

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.

♥ Important 2.1 : Résumé des transformations

IsoV	IsoP	MonoP	IsoT	MonoT	Adia

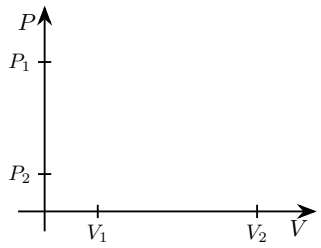


Figure 2.3 – Représenta° en (P,V)

I/D Influence du choix du système

On aura souvent plusieurs choix de système d'étude. Or, selon le système choisi, la transformation n'aura pas les mêmes propriétés. Il faudra être particulièrement vigilant-e à l'établissement du système et de ses propriétés !

♥ Application 2.1 : 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 2.4 – 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) ◇ **Température** :

◇ **Pression** :

◇ **Volume** :

▷

▷

▷

D'où

2) On a systèmes :

◇

◇

Important 2.2 : Sens de calcul des variations

Au cours d'une transformation, un système échange généralement de l'énergie avec l'extérieur. Il faut choisir un sens de comptage.

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

II Travail des forces de pression

La force exercée par un fluide sous pression peut être utilisée pour propulser le piston d'un cylindre, et indirectement le rotor d'un moteur. Le but de cette partie est de quantifier le travail mécanique fourni lors d'une transformation thermodynamique.

II/A Expression générale

Propriété 2.2 : Travail des forces de pression

Le travail **reçu** des forces de pression extérieures lors d'une variation infinitésimale de volume dP est :

Démonstration 2.1 : Travail des forces de pression

Prenons le cas extrêmement simple d'une seringue de section S avec un piston imperméable, pouvant glisser sans frottements et bouchée à son autre extrémité. Notons x la longueur de la cavité contenant de l'air.

◇ **Système** :

◇ **Référentiel** :

◇ **Repère** :

◇ **Force** :

◇ **Travail** :

Remarque 2.1 : Travail des forces de pression

◇ Le résultat se généralise pour un système général à pression extérieure **uniforme**.

◇ Sachant que les énergie sont algébriques, on a :

▷ $W_p > 0 \Rightarrow$

▷ $W_p < 0 \Rightarrow$

▷ Compression :

II/B Transformations isochore et isobare

Propriété 2.3 : W_p isochore, monobare

Pour les transformations isochore ou monobare, on peut simplifier cette expression :

Isochore | **Monobare**

Démonstration 2.2 : W_p isochore, monobare

Isochore | **Monobare**

Remarque 2.2 : Autres travaux

Celui des forces de pression est **toujours présent**, mais il existe d'autres travaux, par exemple l'effet Joule :

$$W =$$

II/C Transformation quasi-statique ou mécaniquement réversible

II/C) 1 Expression générale

Définition 2.6 : Transforma° quasi-statique

Une transformation **quasi-statique** ou **mécaniquement réversible** est une transformation au cours de laquelle l'équilibre mécanique est **réalisé à chaque instant**, soit

Remarque 2.3 : Condition

Il faut que les parties mobiles soient bien plus lentes que la **vitesse du son** dans le gaz, porteur des ondes de pression.

Attention 2.1 : Transformation quasi-statique

Il faut différencier **mécaniquement réversible** et **isobare** : l'équilibre peut être réalisé mais **la pression peut changer** [1] !

Propriété 2.4 : W_p quasi-statique

Pour une transformation quasi-statique, on remplace la pression extérieure par la pression du système :

II/C) 2 Interprétation géométrique

Interprétation 2.1 : W_p quasi-statique en (P,V)

Puisque la pression est alors bien définie à chaque instant on peut la tracer entre les états. Le travail des forces de pression dans le cas mécaniquement réversible dans un diagramme de Watt (P,V) est _____, et on a :

- ◇ $W > 0 \Leftrightarrow$
- ◇ $W < 0 \Leftrightarrow$

W_p quasi-statique en (P,V)

Exemple 2.4 : Quelques travaux en (P,V)

Détente : $W_{p,1}$ 0

Détente : $W_{p,2}$ $W_{p,1}$

Compression : $W_{p,3}$ 0

1. D'où l'importance de faire des fiches de vocabulaire.

Important 2.3 : W_p en (P,V)

◇

◇

◇

Application 2.2 : W_p quasi-statique et isotherme

Déterminer le travail reçu par un gaz parfait lors d'une transformation mécaniquement réversible et isotherme, avec $T_{\text{ext}} = T_0$, en fonction de V_i et V_f d'abord, puis en fonction de P_f et P_i en suite. Vérifier qu'il est bien négatif si $\mathrm{d}V > 0$.

II/C)3 Travail reçu sur un cycle

On s'intéresse à une transformation cyclique du système, au cours de laquelle il passe d'un état A à un état B, puis revient à l'état A par un autre chemin : $A \leftrightarrow B \leftrightarrow A$.

Propriété 2.5 : W_p sur un cycle (P,V)

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** :

◇ **Sens direct** $\Rightarrow W_{p,\text{cycle}}$ 0 et le cycle est _____

◇ **Sens horaire** $\Rightarrow W_{p,\text{cycle}}$ 0 et le cycle est _____

Démonstration 2.3 : W_p sur un cycle (P,V)

On suppose pour fixer les idées que $V_B > V_A$.

◇ **De A à B :**

avec $\mathcal{A}$ l'aire sous la courbe.

◇ **De B à A :**

avec $\mathcal{A}'$ l'aire sous la courbe.

◇ **Sur le cycle** :

Figure 2.5 – Schémas.

Remarque 2.4 : Travail et paramètre d'état

Ces résultats montrent bien que le travail n'est pas la variation d'une fonction d'état X entre l'état initial et l'état final puisque :

- ◇ Toute variation $\Delta X = X_f - X_i$ d'un **paramètre d'état** ne **dépend pas du chemin suivi**, à l'inverse du travail ;
- ◇ Lors d'un **cycle**, $\Delta X_{\text{cycle}} = 0$, à l'inverse du travail.

♥ Application 2.3 : Cycle de Lenoir

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

Ⓐ $P_A = 2 \times 10^5$ Pa et $V_A = 14$ L ;

Ⓑ Chauffage isochore, $P_B = 2P_A = 4 \times 10^5$ Pa ;

Ⓒ Détente isotherme quasi-statique, $V_C = 2V_B = 28$ L ;

Ⓐ Refroidissement isobare, on retourne à l'état initial.

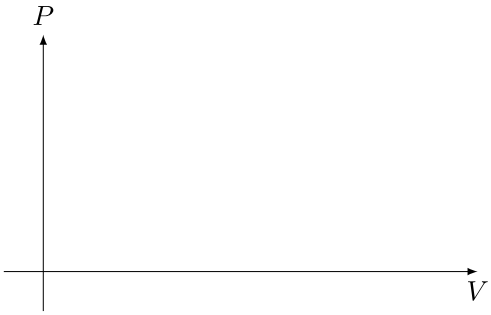


Figure 2.6 – Cycle de Lenoir.

1 Tracer ce cycle dans le diagramme de Watt. Déterminer la nature du cycle (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. Pour la nature, on voit que

.

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

Ⓑ On connaît P_B et transformation isochore donc $\boxed{}$, on cherche T_B :

Ⓒ On connaît $V_C = 2V_B$ et transformation isotherme donc $\boxed{}$, on cherche P_C :

3 On a déjà démontré les formules utiles, mais **il faudrait les redémontrer** pour ne pas se tromper de signe.

◇

◇

◇

◇

III Transfert thermique

III/A Définition

Définition 2.7 : Transfert thermique

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

Remarque 2.5 : Q

Comme le travail, c'est une **énergie**, et comme le travail, il **dépend du chemin suivi**.

III/B Types de transferts thermiques

Définition 2.8 : Convection, conduction et rayonnement

Les transferts thermiques peuvent se faire selon trop modes de transport :

◇ **Convection** :

◇ **Conduction** :

◇ **Rayonnement** :

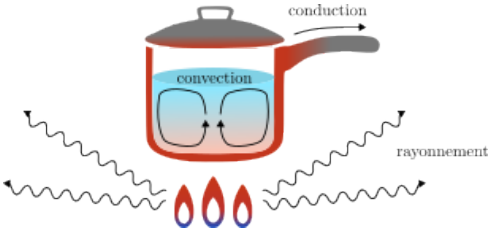
Exemple 2.5 : Modes de transfert thermique

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

◇ **Convection** :

◇ **Conduction** :

◇ **Rayonnement** :



D'autres exemples :

Convection	Conduction	Rayonnet
◇	◇	◇
◇	◇	◇
◇	◇	◇

[2]

III/C Cas particuliers

III/C) 1 Thermostat

♥ Définition 2.9 : Thermostat

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

2. Dû à leur grande conductivité thermique.

Interprétation 2.2 : 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 d'un degré : il peut transmettre de la chaleur mais on ne peut pas changer sa température !

Exemple 2.6 : Thermostats

◇

◇

◇

III/C) 2 Transformations adiabatiques

♥ Définition 2.10 : Transformation adiabatique

Une transformation est dite **adiabatique** s'il n'y a **pas de transfert thermique** :

Dans ce cas, le système est dit _____

Exemple 2.7 : Transformation adiabatique

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

◇

◇

Implication 2.1 : Transformation adiabatique

Dans le cas d'une transformation adiabatique, la température du système dans l'état final n'est **pas déterminée par une condition d'équilibre** thermique, puisque le système n'est en contact thermique avec aucun autre système.

L'efficacité d'un tel dispositif est limitée dans le temps et le système finit toujours par être en équilibre thermique avec l'extérieur. Le rôle de l'isolation thermique est d'augmenter fortement le temps caractéristique d'établissement de l'équilibre thermique. Celui-ci peut facilement devenir très long.

III/D Bien comprendre les transferts

III/D) 1 Retour sur mono- et isotherme

♥ Corollaire 2.3 : Reformulation de monotherme

Une transformation est **monotherme** si le système n'échange de la chaleur qu'**avec un seul thermostat**.

Pour qu'une transformation soit **isotherme** il faut que la **température** du système ne **varie pas**. Or dans la plupart des cas[3], 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 faut que les échanges thermiques entre le système et le thermostat soient faciles. Ceux-ci doivent donc être séparés par une paroi diathermane :

Définition 2.11 : Diathermane

Est **diathermane** une paroi laissant **passer la chaleur**.

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 même valeur que la température T_0 du thermostat.

Important 2.4 : Transferts thermiques particuliers

◇

◇

◇

III/D) 2 Adiabatique ou isotherme ?

Attention 2.2 : Adiabatique vs. isotherme

Il est commun de confondre adiabatique et isotherme. Pourtant, les transformations isotherme et adiabatique sont deux transformations idéales aux caractères **diamétralement opposés** :

◇ **Isotherme** veut dire que la température est définie et constante à tout instant de la transformation, **grâce** aux échanges thermiques avec un thermostat ;

◇ **Adiabatique** suppose une **absence** d'échanges thermiques.

Une transformation réelle pourra se rapprocher de l'une ou l'autre des ces deux transformations limites, et il importe de savoir choisir la bonne modélisation.

Exemple 2.8 : 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, par la condition d'équilibre mécanique du piston, une pression $P = \frac{F}{S}$ au gaz.

Isotherme

3. L'exception est l'équilibre diphasé, sujet d'un prochain chapitre.

Le récipient a des parois fines, **diathermanes** dans un milieu extérieur **thermostaté** à $T_{ext} = T_0$. On augmente **lentement** la force $\vec{F}$, provoquant une descente progressive du pistant et laissant le gaz s'**équilibrer thermiquement** à chaque instant : c'est une **compression isotherme**.

On obtient alors tous 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.

Transition

Dans l'exemple précédent, on peut cependant supposer qu'elle soit à la fois *adiabatique* et *mécaniquement réversible*, c'est-à-dire suffisamment rapide pour qu'il n'y ait pas de transfert thermique, mais suffisamment lente pour qu'il y ait équilibre mécanique à chaque instant. On pourra dans ce cas utiliser une autre équation d'état, la LOI DE LAPLACE.

III/E Loi de LAPLACE

♥ Propriété 2.6 : 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.

Remarque 2.6 :

◇ Elle sera démontrée dans un chapitre ultérieur. On introduit γ dans le chapitre suivant.

◇ Il ne suffit d'en apprendre qu'une seule, par exemple $PV^\gamma = \text{cte}$ pour retrouver les autres :

▷ Pour $TV^{\gamma-1}$:

▷ Pour $P^{1-\gamma}T^\gamma$:

Application 2.4 : Loi de Laplace

On prend $V_i = 20\,\text{L}$ de gaz à $T_i = 293\,\text{K}$ et sous $P_i = 1\,\text{bar}$. On comprime ce gaz de façon adiabatique et mécaniquement réversible jusqu'au volume $V_f = 10\,\text{L}$. On donne $\gamma = 1{,}4$: calculer la pression et la température.

◇ Pression :

◇ Température :

Attention 2.3 : Loi de Laplace

Il est nécessaire de **connaître** et **citer** les conditions d'applications :

◇

◇

◇

Important 2.5 : Adiabatique et isotherme en (P,V)

Il faut savoir distinguer une isotherme d'une adiabatique en diagramme de Watt ou Clapeyron (quand la transformation est mécaniquement réversible) :

◇ **Isotherme** $\Rightarrow P \propto 1/V$;

◇ **Adiabatique** $\Rightarrow P \propto 1/V^\gamma$ donc **plus raide**

On peut aussi les retrouver par l'intuition :

◇ Compression isotherme $\Rightarrow V \searrow$ et $T = \text{cte}$ donc ____ ;

◇ Compression adiabatique $\Rightarrow V \searrow$, mais $T \nearrow$ donc _____.

Figure 2.7 – IsoT. vs. adiabatique en (P,V)