Échanges d'énergie des transformations thermodynamiques

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

Hiromu Arakawa, Fullmetal Alchemist

Sommaire I Introduction 3 3 6 7 II/A Expression générale III/B Types de transferts thermiques III/D Bien comprendre les transferts III/E Loi de LAPLACE **%** Capacités exigibles Définir un système adapté à une probléma-☐ Interpréter géométriquement le travail des tique donnée. forces de pression dans un diagramme de Watt. Exploiter les conditions imposées par le milieu extérieur pour déterminer l'état d'équi-Distinguer qualitativement les trois types de libre final. transferts thermiques: conduction, convection et rayonnement. Évaluer un travail par découpage en travaux élémentaires et sommation sur un chemin O Identifier dans une situation expérimentale donné dans le cas d'une seule variable. le ou les systèmes modélisables par un thermostat.

	L'esse	ntiel
☐ Définitions ☐ Transformations thermodynamique ☐ Transformation iso- ou monobare ☐ Transformation iso- ou monotherme ☐ Transforma° quasi-statique ☐ Transfert thermique ☐ Thermostat ☐ Transformation adiabatique	3 3 4 5 9 12 13 14	
	6 7 8 9 10 16	

I. Introduction

I | Introduction

I/A Nécessité de la thermodynamique

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

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

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.

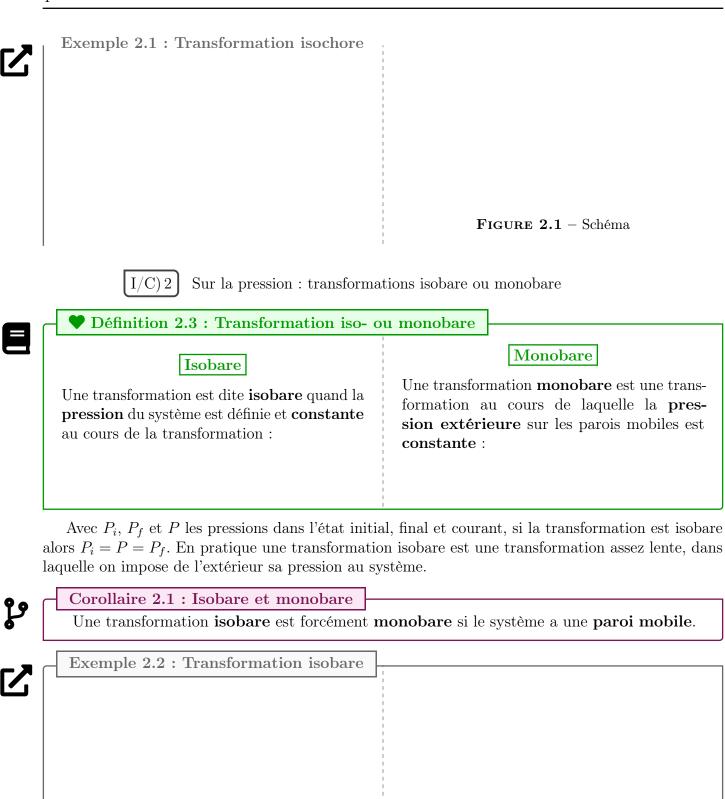


FIGURE 2.2 – Schéma

I. Introduction 5

 $\left[
m I/C
ight)3\left]$ 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!)...

Lycée Pothier 5/17 MPSI3 – 2023/2024

I/C) 5 Utilisation des informations



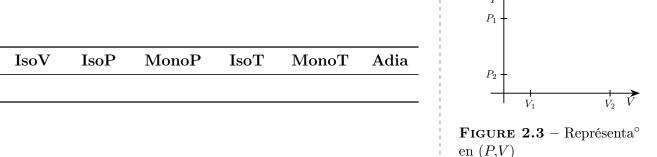
♥ Propriété 2.1 : Équation d'état et transformation

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.







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 :

 \triangleright

 \triangleright

 \triangleright

D'où

2) On a systèmes :

 \Diamond

 \Diamond



▼ 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.

${ m II}\ ert$ 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 \mathbf{regu} des forces de pression extérieures lors d'une variation infinitésimale de volume $\mathrm{d}P$ 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 :

\Diamond	Repère	
\sim	repere	

♦ Force:

♦ Travail :



Remarque 2.1: Travail des forces de pression

- \diamond Le résultat se généralise pour un système général à pression extérieure **uniforme**.
- ♦ Sachant que les énergie sont algébriques, on a :

$$\triangleright W_p > 0 \Rightarrow$$

$$\triangleright W_p < 0 \Rightarrow$$

 \triangleright Compression :

II/B Transformations isochore et isobare



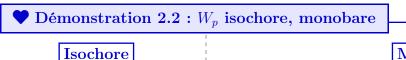
 \mathbf{v} Propriété 2.3 : W_p isochore, monobare

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

Isochore

Monobare





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 =

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

des ondes de pression.

Il faut que les parties mobiles soient bien plus lentes que la vitesse du son dans le gaz, porteur





Attention 2.1: Transformation quasi-statique

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



lackbracklet Propriété 2.4 : W_p quasi-statique

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

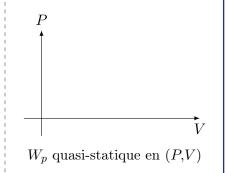
> II/C)2Interprétation géométrique



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

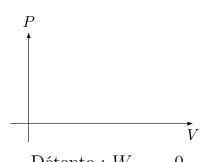
Puisque la pression est alors bien définie à chaque instant on peut la tracer entre les états. Le travail des forces de pression dans le cas mécaniquement réversible dans un diagramme de Watt (P,V) est

- $\diamondsuit W > 0 \Leftrightarrow$
- $\Diamond W < 0 \Leftrightarrow$

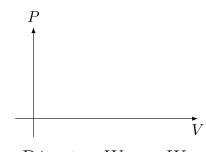




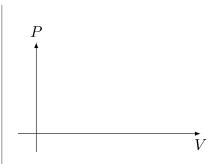
Exemple 2.4 : Quelques travaux en (P,V)



Détente : $W_{p,1}$



Détente : $W_{p,2}$ $W_{p,1}$



Compression: $W_{p,3}$ 0

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



lacktriangle Important 2.3 : W_p en (P,V)

>

 \Diamond

 \Diamond



lacktriangledown 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 $\mathrm{d}V > 0$.

 $\overline{\mathrm{II/C}}$ 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 : $A \leftrightarrow B \leftrightarrow A$.



$lackbox{ Propriété 2.5}: W_p \text{ sur un cycle } (P,V)$

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 :

- \diamond Sens direct $\Rightarrow W_{p,\text{cycle}}$ 0 et le cycle est _____
- \diamond Sens horaire $\Rightarrow W_{p,\text{cycle}}$ 0 et le cycle est _____



\heartsuit 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* :

 \diamond **De** B **à** A:

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

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;
- \diamond Lors d'un **cycle**, $\Delta X_{\text{cycle}} = 0$, à l'inverse du travail.



♥ Application 2.3 : Cycle de Lenoir

On fait subir à $1\,\mathrm{mol}$ de gaz parfait le cycle suivant :

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

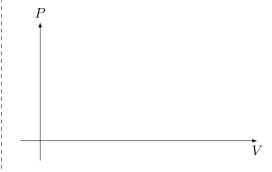


FIGURE 2.6 – Cycle de LENOIR.

- 1 Tracer ce cycle dans le diagramme de WATT. Déterminer la nature du cycle (moteur ou récepteur).
- $\boxed{2}$ 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
- $\fbox{2}$ A On a déjà P_A et V_A , on cherche T_A :

$oxed{\mathbb{B}}$ On connaît P_B et transformation isochore donc $oxed{\mathbb{B}}$, on cherche T_B :
\bigcirc On connaît $V_C=2V_B$ et transformation isotherme donc \bigcirc , 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

1/2

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

III/B Types de transferts thermiques

	3
	-
С	7

Définition 2.8 : Convection, conduction et rayonnement

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

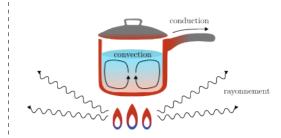
- ♦ Convection :
- ♦ Conduction :
- ♦ Rayonnement :



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 :



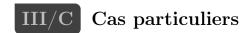
D'autres exemples :

 \Diamond

 \Diamond

 \Diamond

Convection		Conduction		$ m Rayonne^{t}$
	\Diamond		\Diamond	
	\Diamond	2	\Diamond	
	\Diamond		\Diamond	



[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

- \Diamond
- \Diamond
- \Diamond

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 :

 \Diamond

 \Diamond



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.

$[\mathrm{III/D}]$

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 cas³, 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

•

 \Diamond

 \Diamond

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 \overrightarrow{F} variable, avec \overrightarrow{F}_i et \overrightarrow{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 $T_{\text{ext}} = T_0$. 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.



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:

- \diamondsuit Elle sera démontrée dans un chapitre ultérieur. On introduit γ dans le chapitre suivant.
- \diamondsuit Il ne suffit d'en apprendre qu'une seule, par exemple $PV^{\gamma}=$ cte pour retrouver les autres :

 \triangleright Pour $TV^{\gamma-1}$:

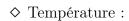
 \triangleright Pour $P^{1-\gamma}T^{\gamma}$:



Application 2.4 : Loi de Laplace

On prend $V_i = 20 \,\mathrm{L}$ de gaz à $T_i = 293 \,\mathrm{K}$ et sous $P_i = 1 \,\mathrm{bar}$. On comprime ce gaz de façon adiabatique et mécaniquement réversible jusqu'au volume $V_f = 10 \,\mathrm{L}$. On donne $\gamma = 1.4$: calculer la pression et la température.

♦ Pression:





💙 Attention 2.3 : Loi de Laplace

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

- \Diamond
- \Diamond
- \Diamond



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

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

- \diamond Isotherme $\Rightarrow P \propto 1/V$;
- \diamond Adiabatique $\Rightarrow P \propto 1/V^{\gamma}$ donc plus raide

On peut aussi les retrouver par l'intuition :

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

 \diamond Compression adiabatique $\Rightarrow V \searrow$, mais $T \nearrow$ donc . FIGURE 2.7 - IsoT. vs. adiabatique en (P,V)