

Chapitre 5: Le Second Principe, Entropie & Machines Thermiques

Cours de Thermodynamique

Subsection 1

Le Second Principe

Limitation du Premier Principe

Le **1er principe** est un **bilan d'énergie** - Ne prévoit **en aucun cas le sens** d'une transformation - L'énergie peut se convertir de mille façons

Nécessité d'un Critère

Besoin de préciser le **sens d'évolution spontanée** d'une transformation

Rôle du 2nd Principe

Le 2nd principe donne **la flèche du temps** - Du **passé** vers le **futur** - Permet définir principe d'évolution - Introduit le concept d'**entropie**

Subsection 2

Phénomènes Irréversibles

Exemple 1 : Détente de Joule-Gay-Lussac

Dispositif - Récipient C volume V - Gaz à température T - Récipient C initialement vide

Processus Communication via robinet Gaz se détend Remplit tout le volume

Observation - Transformation **irréversible** - On **jamais** la transformation inverse - Gaz ne revient pas spontanément dans C

Importance Test de la loi de Joule pour vérifier si gaz suit modèle GP

Subsection 3

Phénomènes Irréversibles (suite)

Exemple 2 : Transfert Thermique

État Initial - Solide 1 à température T_1 - Solide 2 à température T_2 - $T_1 < T_2$ - Isolés thermiquement

Processus Contact thermique établi Chaleur s'échange

État Final - Les deux à température T_f - $T_1 < T_f < T_2$ - Équilibre thermique atteint

Sens Naturel - La chaleur s'écoule du **chaud vers le froid** - **Jamais** l'inverse spontanément - Phénomène **irréversible**

Subsection 4

Irréversibilité et Flèche du Temps

Observation Générale

De nombreux phénomènes sont **irréversibles** : - Mélange de gaz - Dissipation d'énergie mécanique - Réactions chimiques - Transfert thermique

Tous ces phénomènes : - Se produisent **spontanément** dans un sens - Ne se produisent **jamais** dans l'autre sens - Crètent une **asymétrie temporelle**

Flèche du Temps

Cette asymétrie définit la **direction du temps** : passé → présent → futur

Subsection 5

Concept d'Entropie

Définition Thermodynamique

L'**entropie** S est une fonction d'état qui mesure : - Le **désordre** d'un système - L'**irréversibilité** des transformations - La **dégradation** de l'énergie

Propriétés

- **Fonction d'état** : dépend de P, V, T
- **Grandeur extensive** : S quantité matière
- **Unité SI** : J/K (Joule par Kelvin)

Introduite par **Rudolf Clausius** en 1850

Subsection 6

Variation d'Entropie

Transformation Réversible

Pour une transformation **réversible**, la variation d'entropie est :

$$dS_{\text{rev}} = \frac{dQ_{\text{rev}}}{T}$$

où T est la température absolue pendant l'échange

Transformation Irréversible

Pour une transformation **irréversible**, il y a **création d'entropie** :

$$dS_{\text{irr}} = \frac{dQ_{\text{irr}}}{T} + dS_{\text{créée}}$$

où $dS_{\text{créée}} > 0$

Subsection 7

Inégalité de Clausius

Énoncé Du Second Principe

Pour toute transformation d'un système fermé :

$$dS \geq \frac{dQ}{T}$$

où l'égalité s'applique aux transformations **réversibles**

$$\Delta S \geq \int \frac{dQ}{T}$$

Interprétation

- Transformation réversible : $\Delta S = Q/T$
- Transformation irréversible : $\Delta S > Q/T$
- L'entropie **croît toujours**

Subsection 8

Entropie d'un Système Isolé

Pour un Système Isolé

Pas d'échange de chaleur : $Q = 0$

$$\Delta S_{\text{isolé}} \geq 0$$

Énoncé Fondamental

L'entropie d'un système isolé **croît toujours** ou reste **constante**

$$\Delta S_{\text{isolé}} > 0 \quad (\text{irréversible})$$

$$\Delta S_{\text{isolé}} = 0 \quad (\text{réversible})$$

Conséquence

L'univers entier (système isolé) tend vers l'**équilibre thermique** : entropie maximale

Subsection 9

Thermostats (Sources de Chaleur)

Définition

Un **thermostat** est un système qui peut **échanger de la chaleur** tout en conservant une **température constante**

Caractéristiques

- Capacité thermique **immense**
- Temperat. invariante même avec échange
- Exemple : océan, atmosphère

Variation d'Entropie du Thermostat

Pour un thermostat à température T qui reçoit chaleur Q :

$$\Delta S_{\text{thermostat}} = -\frac{Q}{T}$$

(négatif car Q sort du thermostat)

Subsection 10

Machines Thermiques : Définition

Qu'est-ce qu'une Machine Thermique ?

Système qui opère en **cycles successifs** transformant : - **Chaleur en travail** (moteur) - **Travail en chaleur** (pompe à chaleur, climatiseur)

Variables Caractéristiques

- Q_c : chaleur captée à la source chaude
- Q_f : chaleur cédée à la source froide
- $W = |Q_c| - |Q_f|$: travail net produit

Subsection 11

Machines Thermiques : Classification

Machines Monothermes

- **Une seule source** de chaleur
- Interaction aussi avec l'**extérieur** (pour travail)
- Exemple : résistance électrique

Machines Dithermes

- **Deux sources** de chaleur
- Source **chaude** (température T_c)
- Source **froide** (température T_f)
- Plus courantes : moteurs, réfrigérateurs

Cycles

- **Moteur** : $W > 0$ (produit du travail)
- **Récepteur** : $W < 0$ (reçoit du travail)

Subsection 12

Énoncé de Kelvin (Machines Monothermes)

Impossible de Transformer Entièrement la Chaleur en Travail

Il est **impossible** de construire une machine qui opère en cycle et transforme **entièrement en travail** la chaleur fournie par une **seule source thermique**

Implication

Avec une seule source (monotherme) : - Impossible d'avoir $Q = W$ - Il y a toujours dégradation d'énergie - Conversion partielle seulement

Conséquence

Tout moteur réel doit avoir au moins **deux sources** thermiques

Subsection 13

Machines Dithermes : Moteur

Cycle Moteur

Processus 1. Absorbe Q_c de source chaude 2. **Rendement**

Cède Q_f à source froide 3. Produit travail : W

$$= Q_c - Q_f$$

Convention - $Q_c > 0$: reçue - $Q_f > 0$: cédée

- $W > 0$: produit

$$\eta = \frac{W}{Q_c} = 1 - \frac{Q_f}{Q_c}$$

Premier Principe

$$W = Q_c - Q_f$$

Réalité Toujours $\eta < 1$ car $Q_f > 0$

Subsection 14

Machines Dithermes : Récepteur

Cycle Récepteur (Pompe à Chaleur)

Processus 1. Reçoit travail W du milieu
Absorbe Q_f de source froide
3. Cède Q_c à source chaude

Convention - $W > 0$: reçu - Q_f : absorbée source froide - Q_c : cédée source chaude

Coefficient Performance (COP)

$$COP = \frac{Q_c}{W}$$

Premier Principe

$$Q_c = Q_f + W$$

Utilité Pompe à chaleur : transfère chaleur source froide → source chaude

Subsection 15

Cycle de Carnot (1824)

Moteur Idéal de Sadi Carnot

Le cycle de Carnot est composé de **4 transformations réversibles** :

- ① **Détente isotherme** à T_c (reçoit Q_c)
- ② **Expansion adiabatique** (température baisse $T_c \rightarrow T_f$)
- ③ **Compression isotherme** à T_f (cède Q_f)
- ④ **Compression adiabatique** (température augmente $T_f \rightarrow T_c$)

Propriété Unique

C'est le **seul cycle réversible** fonctionnant entre deux sources à T_c et T_f

Subsection 16

Rendement du Cycle de Carnot

Formule Célèbre

Le rendement du cycle de Carnot est :

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

où T_c et T_f sont les **températures absolues**

Points Importants

- Ne dépend que des **températures** des sources
- **Maximum possible** entre deux sources
- **Indépendant du fluide de travail**

Cas Limites

- Si $T_f = 0$: $\eta = 1$ (impossible à réaliser)
- Si $T_f = T_c$: $\eta = 0$ (pas de travail possible)
- $T_f < T_c$: $0 < \eta < 1$

Subsection 17

Théorème de Carnot

Énoncé

Toute machine ditherme réversible fonctionnant entre deux source de chaleur aux températures T_c et T_f a le **même rendement** que le cycle de Carnot

$$\eta_{\text{réversible}} = \eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

Conséquence

Toute machine irréversible a un rendement **inférieur** :

$$\eta_{\text{irréversible}} < \eta_{\text{Carnot}}$$

Importance Pratique

Le cycle de Carnot établit la **limite supérieure** du rendement

Subsection 18

Application aux Gaz Parfaits

Variation d'Entropie

Pour un gaz parfait :

$$dS = n c_V \frac{dT}{T} + n R \frac{dV}{V}$$

Cas Particuliers

Isotherme ($T = \text{cste}$) :

$$\Delta S = nR \ln \frac{V_f}{V_i}$$

Adiabatique réversible :

$$\Delta S = 0$$

Isobare ($P = \text{cste}$) :

$$\Delta S = nc_P \ln \frac{T_f}{T_i}$$

Subsection 19

Résumé : Second Principe

Concepts Clés

- **Entropie** : mesure du désordre et de l'irréversibilité
- **Loi de Clausius** : $\Delta S = dQ/T$
- **Flèche du temps** : entropie de l'univers croît

- **Moteur** : transforme chaleur en travail
- **Récepteur** : transfert chaleur source froide → chaude
- **Rendement Carnot** : $\eta = 1 - T_f/T_c$

Conséquences

- Pas de moteur 100% efficace
- Tous les processus réels sont irréversibles
- L'univers tend vers l'équilibre (entropie max)

Subsection 20

Exemples d'Applications

Moteurs Thermiques Réels

- Moteur à essence : 30% rendement
- Moteur Diesel : 40% rendement
- Centrale électrique : 35% rendement

Pompes à Chaleur

- Chauffage maison (COP 3-4)
- Climatisation (même principe)
- Chauffage de l'eau

Interprétation

Cycle de Carnot établit limite théorique Machines réelles toujours moins efficaces

