Leçon II. Transformations et transferts d'énergie

On a vu que le travail mécanique et la chaleur entraînait une variation de l'énergie interne d'un système lorsqu'il passait d'un état d'équilibre initial à un état d'équilibre final. Dans cette leçon nous allons nous déterminer l'état final d'un système à partir de la connaissance de son état initial, de sa fonction d'état et des différents types de transformations qu'il peut subir et que nous allons définir. Nous verrons que ces transformations témoignent d'échanges de deux types d'énergie entre le système et le milieu extérieur : le travail et le transfert thermique.

II.1. Transformation thermodynamique

II.1.a Définitions

♥ Définition

On appelle **transformation thermodynamique** le passage d'un système thermodynamique d'un état d'équilibre , appelé état **initial**, à un nouvel état d'équilibre, appelé état **final**.

Un système peut passer d'un état d'équilibre initial précis à un état d'équilibre final précis selon une infinité de transformation. On parlera d'une infinité de **chemins de transformation**.

En général, le système est hors équilibre au cours de la transformation : on ne peut pas le définir à l'aide de variable d'état.

Nous verrons dans la suite de la leçon, qu'à l'instar d'une étude mécanique, le choix du système thermodynamique est crucial. Dans notre cas, on considérera toujours un **système fermé**.

L'état initial du système sera toujours connu et on obtiendra des informations concernant l'état final à partir de la connaissance de **l'équation d'état du système et du type de transformation** et en appliquant **les conditions d'équilibre mécanique et thermique**.

Pour mettre un système hors d'équilibre, on peut modifier ses variables d'état ou bien changer les conditions extérieures. Le système est alors mis hors équilibre et il évolue vers un nouvel état d'équilibre au cours d'une transformation.

II.1.b Différents types de transformations

- **Transformation iso**
  Une transformation est dite **iso-quelque chose** quand une grandeur d'état du système est constante tout au long de la transformation.
  En particulier, on parle de transformation **isotherme** (température du système constante), **isobare** (pression du système constante) ou **isochore** (volume du système constant).

- **Transformation mono**
  Une transformation est dite **mono-quelque chose** quand un paramètre extérieur est constant tout au long de la transformation.
  En particulier, on parle de transformation **monobare** (pression exercée par l'extérieur sur le système constante) ou **monotherme** (température extérieure constante).

- **Transformation quasistatique**
  Ce type de transformation est un modèle théorique permettant de calculer les grandeurs pertinentes de façon beaucoup plus simple qu'à partir de transformation réelle. Une transformation est dite quasistatique lorsqu'elle est suffisamment lente pour que **toutes les variables d'état du système soient définies et connues tout au long de la transformation** : il y assez de temps pour que le système atteigne l'équilibre thermique,

température uniforme, ou mécanique, pression uniforme. Le système n'est pas forcément en équilibre avec le milieu extérieur.

- **Transformation réversible**
  Une transformation est considérée réversible si elle est **quasistatique et en équilibre thermodynamique avec l'extérieur**. Ainsi, si la transformation est quasistatique, elle sera réversible
  - si la paroi du système permet les échanges thermiques et si la transformation est quasistatique, alors le système est équilibre thermique avec le milieu extérieur tout au long de la transformation, et dans ce cas $T = T_{ext}$, on parle de **réversibilité thermique**
  - si la paroi du système peut se déformer et si la transformation est quasistatique, alors le système est équilibre mécanique avec le milieu extérieur tout au long de la transformation, et dans ce cas $P = P_{ext}$, on parle de **réversibilité mécanique**.

Une transformation réversible est **une succession d'états d'équilibres avec l'extérieur**. C'est une transformation purement théorique car si toutes ses conditions étaient réunies, il y aurait équilibre et non transformation. Le terme réversible vient du fait qu'une modification infime des caractéristiques du milieu extérieures permet d'inverser le sens dans lequel se déroule la transformation le long du même chemin de transformation. Dans la pratique, c'est en vérifiant cette propriété qu'on détermine si une transformation est réversible. Les transformations réelles sont en règles générales irréversibles, les transformations réversibles constituent un cas limite idéal.

Nota bene

Si la paroi du système **permet les transferts thermiques**, alors une transformation **isotherme** est forcément **monotherme** avec équilibre thermique dans les états initial et final.
Si la paroi du système **permet les transferts thermiques** et qu'en plus elle est **quasistatique**, alors elle est **thermiquement réversible**.

$$\left.\begin{array}{r}\text{isotherme}\\ \text{paroi avec transferts thermiques}\end{array}\right\}\text{monotherme}$$

$$\left.\begin{array}{r}\text{paroi avec transferts thermiques}\\ \text{quasistatique}\end{array}\right\}\text{réversibilité thermique}$$

Si la paroi du système **peut se déformer**, alors une transformation **isobare** est forcément **monobare** avec équilibre mécanique dans les états initial et final.
Si la paroi du système **peut se déformer** et qu'en plus elle est **quasistatique**, alors elle est **mécaniquement réversible**.

$$\left.\begin{array}{r}\text{isobare}\\ \text{paroi déformable}\end{array}\right\}\text{monobare}$$

$$\left.\begin{array}{r}\text{paroi déformable}\\ \text{quasistatique}\end{array}\right\}\text{réversibilité mécanique}$$

Les transformations isothermes et isobares ne sont pas forcément quasistatiques car **toutes les grandeurs d'états** ne sont forcément définies au cours de telles transformations, contrairement aux transformation quasistatiques.

✎ Application 1

Soit un échantillon de gaz parfait dans un récipient indéformable en contact thermique avec l'extérieur. Il est dans un état initial (T_i, P_i, V_i). On fait passer le récipient d'un milieu extérieur de température T_1 à T_2. **Déterminer** la pression finale du gaz en considérant qu'il subit une transformation isochore.

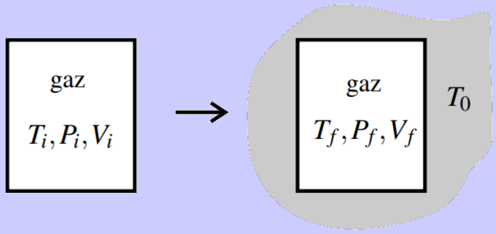

FIGURE 1.1 – Schéma de la transformation.

La transformation isochore que nous venons d'étudier est également **monotherme** : la température du milieu extérieure est constante.

✎ Application 2

Soit un échantillon de gaz parfait dans un récipient fermé par un piston sur lequel s'exerce une force constante $\overrightarrow{F}$ et en contact thermique avec l'extérieur. Il est dans un état initial (T_i, P_i, V_i). On fait passer le récipient d'un milieu extérieur de température T_1 à T_2. **Déterminer** le type de transformation qu'il subit, puis **déterminer** la pression finale du gaz.

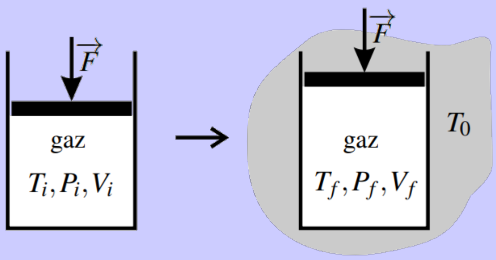

FIGURE 1.2 – Schéma de la transformation.

La transformation isobare que nous venons d'étudier est également **monotherme** : la température du milieu extérieure est constante.

II.1.c Exemple d'étude d'une transformation

Au cours d'un expérience, on a parfois le choix entre plusieurs systèmes d'étude. Selon ce choix, la transformation n'a plus les mêmes propriétés.

Considérons une enceinte indéformable séparée en deux compartiments par une cloison étanche et mobile mais bloquée par une cale. Dans l'état initial les deux compartiments contiennent des échantillons de gaz considérés comme parfaits. Les variables d'états initial du premier et du deuxième compartiments sont respectivement (T_i, P_i, V_i, n) et $(T_i, 2P_i, V_i, 2n)$.

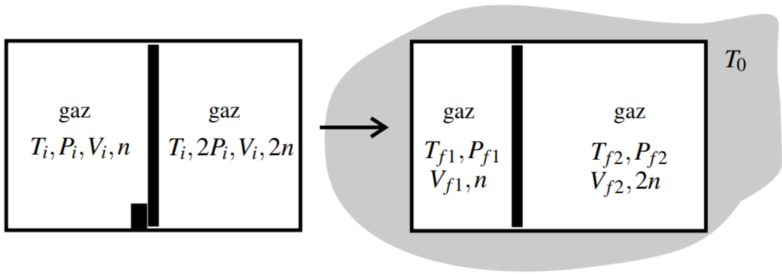

FIGURE 1.3 – Schéma de la transformation.

On enlève la cale qui bloque la cloison mobile et on place l'enceinte dans un milieu extérieur à la température T_0. Déterminons les variables d'états finales des gaz dans les deux compartiments.

Prenons comme système d'étude le système Σ qui représente tout ce qui se trouve dans l'enceinte. La transformation que subit Σ est une transformation isochore et monotherme. Ainsi on peut dire que

$$V_i + V_i = V_{f1} + V_{f2} \qquad 2V_i = V_{f1} + V_{f2}$$

et

$$T_{f1} = T_{f2} = T_0.$$

De plus, à l'état final, on doit avoir équilibre mécanique de la cloison mobile, donc des pressions égales dans les deux compartiments soit

$$P_{f1} = P_{f2} = P_f.$$

À partir de l'équation des gaz parfait appliquer sur les deux compartiments à l'état final et initial, on obtient une relation nous permettant de déterminer les volumes finaux.

	Compartiment 1	Compartiment 2
État initial	$P_iV_i = nRT_i$	$2P_iV_i = 2nRT_i$
État final	$P_fV_{f1} = nRT_0$	$P_fV_{f2} = 2nRT_0$

Il vient que

$$V_{f1} = \frac{nRT_0}{P_f} \qquad \text{et} \qquad V_{f2} = \frac{2nRT_0}{P_f}$$

donc

$$V_{f2} = 2V_{f1}.$$

Or

$$2V_i = V_{f1} + V_{f2} = 3V_{f1}$$

donc

$$V_{f1} = \frac{2}{3}V_i \qquad \text{et} \qquad V_{f2} = \frac{4}{3}V_i.$$

Ainsi

$$P_f = \frac{nRT_0}{\frac{2}{3}V_i} = \frac{3}{2}\frac{nRT_0}{V_i} \quad \text{ou} \quad P_f = \frac{2nRT_0}{\frac{4}{3}V_i} = \frac{3}{2}\frac{nRT_0}{V_i}.$$

L'étude du système Σ_1 constitué seulement du compartiment 1 aurait été plus compliquée car la transformation subie par Σ_1 n'est ni isochore, ni monotherme (la paroi mobile impose un échange thermique avec le compartiment 2 qui n'a pas une température définie tout au long de la transformation). De même pour le système Σ_2 constitué seulement du compartiment 2.

II.2. Travail des forces de pression

On s'intéresse ici à l'énergie reçue par un système grâce aux forces de pression. Cette énergie n'est autre que ce qu'on a définit comme le travail de ces forces en mécanique, qu'on appellera tout simplement **travail** en thermodynamique et qu'on notera W. On supposera tout au long de cette partie que **la pression extérieure est uniforme**.

☛ Nota bene

Les échanges d'énergie entre un système et l'extérieur sont toujours exprimée en valeur algébrique : ils sont positifs quand le système reçoit de l'énergie et négatifs quand il en perd.

II.2.a Expression générale

Considérons un fluide contenu dans un cylindre indéformable fermé par un piston mobile. On prend pour système Σ l'ensemble fluide-piston.

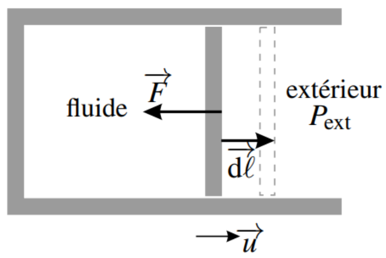

FIGURE 1.4 – Schéma du problème.

La pression extérieure P_{ext} provoque l'apparition d'une force appliquée au piston telle que

$$\overrightarrow{F} = -P_{ext}S\overrightarrow{u}$$

où S est la surface du piston et $\overrightarrow{u}$ un vecteur unitaire perpendiculaire à la surface du piston dirigé de le l'intérieur vers l'extérieur du système.

Si le piston effectue un déplacement élémentaire $\mathrm{d}\overrightarrow{l} = \mathrm{d}l\overrightarrow{u}$ avec $\mathrm{d}l$ la valeur algébrique de ce déplacement, le travail élémentaire de la force est

$$\delta W = \overrightarrow{F} \cdot \mathrm{d}\overrightarrow{l} = -P_{ext}S\overrightarrow{u} \cdot \mathrm{d}l\overrightarrow{u} = -P_{ext}S\mathrm{d}l.$$

Or $S\mathrm{d}l$ n'est autre que le volume balayé par le piston au cours de son déplacement, et aussi la variation algébrique $\mathrm{d}V$ du volume V du système Σ : quand $\mathrm{d}l > 0$, le volume du système varie de $\mathrm{d}V$, lorsque $\mathrm{d}l < 0$, le volume du système varie de $-\mathrm{d}V$. Ainsi

$$\delta W = -P_{ext}\mathrm{d}V.$$

♥ Définition

On peut généraliser cette étude à n'importe quel type géométrie et montrer que lors d'une transformation entre un état initial i et un état final f, **le travail des forces de la pression extérieure sur le système** est

$$W = \int_i^f \delta W \qquad \text{soit} \qquad W = -\int_i^f P_{ext}\mathrm{d}V.$$

☛ Nota bene

Il faut bien noter qu'il s'agit ici du travail **reçu** par le système. Il est positif lorsque le volume du système diminue (on doit fournir du travail pour comprimer un gaz), soit lorsque $dV < 0$, et négatif lorsque le volume du système augmente, soit lorsque $dV > 0$ (on reçoit du travail d'un gaz lorsqu'il se détend).

☛ Nota bene

On a étudié ici un système constitué d'un piston et d'un fluide. Si on avait étudié seulement le fluide nous n'aurions pas pu déterminer le travail reçu par le fluide car nous n'aurions pas pu déterminer la force appliquée par le piston sur le fluide : nous ne pouvons pas savoir si le piston transmet entièrement les actions mécanique.
Il existe un cas particulier, celui d'un piston sans masse. **Un système sans masse transmet les actions mécaniques qu'on lui impose**. On peut, dans ce cas, déterminer la force appliquée par le piston sur le fluide, il s'agit de la force appliquée par la pression du milieu sur le piston.

II.2.b Travail des forces de pression pour une transformation mécaniquement réversible

On a vu que dans le cas d'un transformation quasistatique, la pression du système est définie à tout instant. De plus, si la paroi est déformable alors la pression du système est à tout instant égale à la pression du milieu extérieur, et la transformation est mécaniquement réversible, soit $P = P_{ext}$.

Ainsi dans le cas de transformation **mécaniquement réversible** le travail des forces de pression s'exerçant sur un système s'écrit

$$\boxed{W = -\int_i^f P\mathrm{d}V.}$$

Un outil nous permet de déterminer géométriquement le travail mécanique échangé par le système avec le milieu extérieur, il s'agit du **diagramme de Clapeyron** ou diagramme (P,V) avec la pression du système P en ordonnée et son volume V en abscisse s'il s'agit d'une transformation réversible, ou P_{ext} s'il s'agit d'une transformation quelconque.

On représente ici la courbe suivie par le système dans sa transformation entre le point (P_i,V_i) représentant l'état initial et le point (P_f,V_f) représentant l'état final. Sauf exception, au cours d'une transformation, cette courbe ne passe jamais deux fois par la même valeur de V : c'est donc la représentation d'une fonction $P(V)$.

On peut alors déterminer le travail W échangé par le système, il s'agit, au signe près, à l'aire $\mathscr{A}$ sous la courbe.

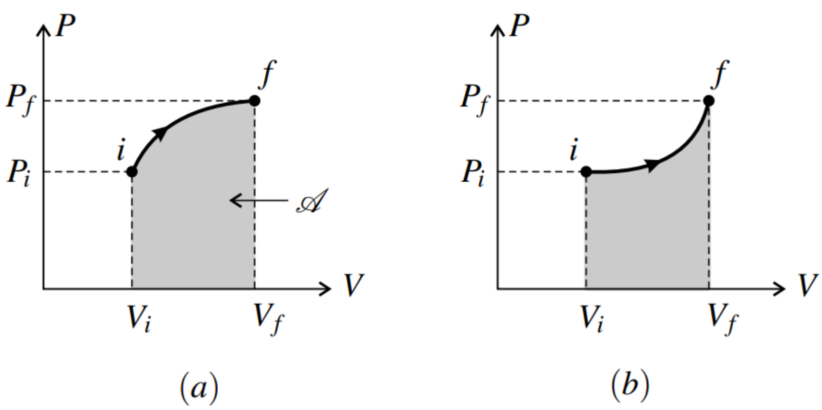

FIGURE 1.5 – Interprétation géométrique du travail des forces de pression.

♥ Définition

La valeur absolue du travail des forces de pression est égale à l'aire $\mathscr{A}$ comprise entre la courbe représentant la transformation du système dans le diagramme de Clapeyron et l'axe des abscisse.
Le travail algébrique est
- positif $W = +\mathscr{A}$ si $V_f < V_i$ car le gaz reçoit du travail si son volume diminue
- négatif $W = -\mathscr{A}$ si $V_f > V_i$ car le gaz cède du travail si son volume augmente.

À l'aide du diagramme de Clapeyron on peut également étudier des **évolutions cycliques** d'un système : le système passe d'un état A à un état B au cours d'une transformation, puis il revient à l'état A au cours d'une autre transformation ce qui achève le cycle.

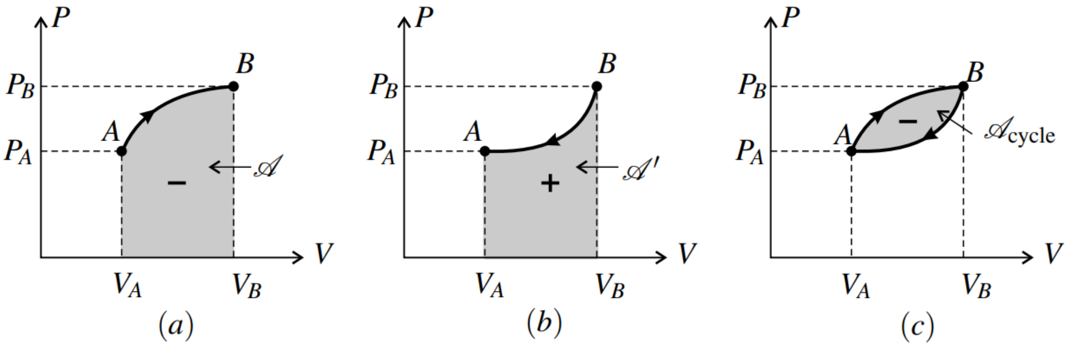

FIGURE 1.6 – Travail des forces de pression reçu par un système au cours d'un cycle.

Étudions un cycle ABA au cours duquel le volume $V_B > V_A$. Ainsi le travail reçu par le système au cours de la transformation $A \to B$, soit $W_{A\to B} = -\mathscr{A}$ avec $\mathscr{A}$ l'aire sous la courbe suivie par le point représentatif du système dans le diagramme de Clapeyron. Le travail au cours de la transformation $B \to A$ est lui positif, soit $W_{B\to A} = \mathscr{A}'$ avec $\mathscr{A}'$ l'aire sous la courbe suivie par le point représentatif du système dans le diagramme de Clapeyron.

Le travail algébrique reçu par le système au cours du cycle est donc

$$W = W_{A\to B} + W_{B\to A} = \mathscr{A}' - \mathscr{A}.$$

On voit qu'il correspond à l'aire $\mathscr{A}_{cycle}$ entouré par le chemin du cycle dans le diagramme de Clapeyron.

On peut remarquer qu'un cycle parcouru dans le sens horaire est négatif, et un cycle parcouru dans le sens trigonométrique est positif.

♥ Définitions

- Lorsque le travail W des forces de pression reçu par un système au cours d'un cycle est négatif, il est décrit dans le sens horaire du diagramme de Claypeyron et on dit que **le cycle est moteur**. Le système cède du travail au milieu extérieur.

- Lorsque le travail W des forces de pression reçu par un système au cours d'un cycle est positif, il est décrit dans le sens trigonométrique du diagramme de Claypeyron et on dit que **le cycle est récepteur**. Le système reçoit du travail du milieu extérieur.

II.2.c Quelques transformations mécaniques

- **Transformation isochore**
  Au cours d'une transformation isochore $\mathrm{d}V = 0$, donc **le travail élémentaire des forces de pression est nul**

$$\delta W = -P\mathrm{d}V = 0.$$

- **Transformation monobare**
  Dans le cas d'une transformation mécaniquement réversible, la pression P du système est définie à chaque instant et toujours égale à la pression extérieur $P_{ext} = P_0$. Comme la transformation est monobare, c'est-à-dire que la pression extérieure est constante, alors la pression du système est constante à tout instant, il s'agit d'une transformation isobare.
  Dans ce cas le travail des forces de pression est

$$W = \int_i^f \delta W = \int_{V_i}^{V_f} -P_{ext}\mathrm{d}V = \int_{V_i}^{V_f} -P\mathrm{d}V = -P_0 \int_{V_i}^{V_f} \mathrm{d}V = -P_0 \left(V_f - V_i\right).$$

- **Transformation isotherme d'un gaz parfait**
  Dans le cas d'une transformation mécaniquement réversible, la pression P du système est définie à chaque instant et toujours égale à la pression extérieur P_{ext}. Dans le cas d'une transformation isotherme, la température du système est défini à tout instant et est constante $T_i = T_f = T_0$. En utilisant l'équation des gaz parfaits il vient que

$$PV = nRT_0 \qquad \text{donc} \qquad P = \frac{nRT_0}{V}.$$

  Le travail des forces de pression dans ce cas est

$$W = \int_i^f \delta W = \int_{V_i}^{V_f} -P\mathrm{d}V = -nRT_0 \int_{V_i}^{V_f} \frac{\mathrm{d}V}{V} = -nRT_0 \left(\ln(V_f) - \ln(V_i)\right) = -nRT_0 \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right).$$

  Par ailleurs, comme $P_iV_i = P_fV_f = nRT_0$ il vient que

$$W = -nRT_0 \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right) = nRT_0 \ln\left(\frac{P_i}{P_f}\right).$$

- **Transformation polytropique d'un gaz parfait**
  On appelle transformation polytropique une transformation au cours de laquelle la pression et le volume vérifient une relation de la forme $PV^k = \text{cst}$ avec k un exposant positif dépendant de la transformation. Comme une transformation mécaniquement réversible est quasistatique, alors la pression et le volume du système sont définis à chaque instant et on peut écrire que pour un gaz parfait la pression au cours d'une transformation polytropique vérifie

$$PV^k = P_iV_i^k \qquad \text{soit} \qquad P = P_i\left(\frac{V_i}{V}\right)^k.$$

  Le travail des forces de pression dans ce cas est

$$W = \int_i^f \delta W = \int_{V_i}^{V_f} -P\mathrm{d}V = -P_iV_i^k \int_{V_i}^{V_f} \frac{\mathrm{d}V}{V^k} = -P_iV_i^k \frac{V_f^{1-k} - V_i^{1-k}}{1-k}.$$

  Par ailleurs, comme $P_iV_i^k = P_fV_f^k$ il vient que

$$W = \frac{1}{k-1}\left(P_iV_i^kV_f^{1-k} - P_iV_i^kV_i^{1-k}\right) = \frac{1}{k-1}\left(P_fV_f^kV_f^{1-k} - P_iV_i^kV_i^{1-k}\right) = \frac{1}{k-1}\left(P_fV_f - P_iV_i^k\right)$$

et comme pour un gaz parfait $PV = nRT$ il vient que

$$W = \frac{nR}{k-1}(T_f - T_i)\,.$$

Application 3

- **Déterminer**, dans le cas du gaz parfait, la transformation particulière qui correspond à une transformation polytropique $PV^k = \text{cst}$ pour laquelle $k = 0$.
- **Déterminer**, dans le cas du gaz parfait, la transformation particulière qui correspond à une transformation polytropique $PV^k = \text{cst}$ pour laquelle $k = 1$.

II.3. Transfert thermique

♥ Définition

Un système thermodynamique peut recevoir de l'énergie sans intervention d'une action mécanique mesurable à l'échelle macroscopique. Ce transfert d'énergie complémentaire du travail mécanique s'appelle **transfert thermique**. Il est noté Q, et on le nomme parfois chaleur.

II.3.a Modes de transfert

Un transfert thermique s'opère entre deux systèmes en contact si leur température sont différentes. Le système avec la température la plus haute cède de l'énergie au système avec la température la plus basse. Ce transfert se passe à l'échelle microscopique et il n'est perceptible à l'échelle macroscopique que par transformation des systèmes : variation de température ou changement d'état.

Il existes trois modes de transfert thermiques.

- **La conduction thermique**
  C'est le mode de transfert entre deux systèmes séparés par un milieu matériel immobile. Le transfert résulte de collisions entre les particules microscopiques constituants les systèmes et la paroi. Les particules du système le plus chaud cèdent de l'énergie cinétique aux particules du système le plus froid.
  Exemple : une casserole en acier permet la conduction thermique entre le feu et les aliments.

- **La convection thermique**
  Ce mode met en jeu un fluide en mouvement. Le fluide passe d'un système à l'autre : il reçoit de l'énergie du sytème chaud et en cède au système froid.
  Exemple : un ventilateur provoque la convection de l'air.

- **Le rayonnement thermique**
  Il s'agit des ondes électromagnétiques émises par un corps. Une charge accélérée émet une onde électromagnétiques. Or les particules chargées d'un système sont soumises à l'agitation thermique, ce qui les accélère et provoque la générations de ces ondes. Comme nous l'avons vu dans la leçon Sources lumineuses, plus un corps est chaud et plus l'énergie du rayonnement thermique est importante.
  Exemple : une résistance d'un four génère un rayonnement thermique.

II.3.b Transformation adiabatique

♥ Définition

Une **transformation est dite adiabatique** si elle ne donne lieu à aucun échange de matière ni aucun échange de chaleur entre le système et le milieu extérieur à aucun moment de la transformation. Soit $Q = 0$.

Dans le cas d'une transformation adiabatique, la température finale du système n'est pas déterminée par une condition d'équilibre thermique, car le système ne peut pas échanger de chaleur.

Encore une fois, la transformation adiabatique est une idéalisation dont on peut se rapprocher. Pour réaliser une transformation adiabatique, on entoure le système d'un matériau appelé **isolant thermique**, à travers lequel la conduction thermique est difficile. On dit alors que les parois du système sont **calorifugées**. Le rôle de l'isolant est d'augmenter fortement le temps caractéristique d'établissement de l'équilibre thermique avec le milieu extérieur.

✎ Application 4

- **Déterminer** le temps caractéristique τ d'établissement du transfert thermique d'un morceau de liège d'épaisseur $d = 2,0$ cm et de diffusivité thermique $a = 3,0.10^{-7}$ m^2.s^{-1}.

- **Déterminer** si on peut modéliser par une transformation adiabatique la transformation subit par un gaz dans un moteur tournant à 1000 tours par minute sachant que les parois du moteur sont en acier d'épaisseur $d = 0,5$ cm et de diffusivité thermique $a = 1,5.10^{-5}$ m^2.s^{-1}.

II.3.c Thermostat

♥ Définition

Un **thermostat** est un système thermodynamique dont la température T_0 ne varie pas, même s'il échange de l'énergie sous forme de chaleur ou de travail.

On peut reformuler la définition d'une transformation monotherme à partir de la définition d'un thermostat.

♥ Définition

Une transformation est monotherme si le système échange de l'énergie par transfert thermique avec un et 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, tout apport d'énergie au système tend à faire varier sa température. Pour réaliser une transformation isotherme on doit donc contrôler la température en mettant le système en contact avec un thermostat. Pour que les échanges thermiques soient faciles entre le système et le thermostat, on utilise une **paroi diathermane** (du grec *dia* signifiant "à travers"), c'est-à-dire perméable à la chaleur. Il faut également que l'évolution du système soit 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.

Synthèse

Connaissances

- Transformation thermodynamique subie par un système. Évolutions isochore, isotherme, isobare, monobare, monotherme.
- Travail des forces de pression. Transformation isochore. Transformation monobare.
- Modes de transfert thermique.

Savoir-faire

- **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 Clapeyron.
- **Caractériser** qualitativement les trois modes de transfert thermique : conduction, convection, rayonnement.