

Introduction : différentes formes de transfert d'énergie vont permettre l'évolution de l'état d'un système, c'est à dire la modification de ses variables d'état ... (travaux, transferts thermiques...). On dressera des bilans de ces termes de variation entre un état initial et un état final du système.

Les trois premiers chapitres posent les définitions essentielles portant sur ces notions. Chacun des termes écrit en caractères *gras italiques* doit pouvoir être défini sans ambiguïté.

### **1. Transformation thermodynamique d'un système :**

#### **1.0 Convention thermodynamique.**

dite aussi convention « égoïste ».

Par convention thermodynamique, on comptera comme positifs les termes d'énergie effectivement reçus par le système et comme négatifs les quantités énergétiques effectivement fournies par le système à l'extérieur.

#### **1.1 Définitions.**

On a **transformation** lorsqu'il y a évolution des variables d'état. Une transformation a lieu d'un **état initial** (EI) à un **état final** (EF), ces états étant définis par les valeurs des variables d'état.

Ces états peuvent être des **états d'équilibre** (ce sera généralement le cas dans nos études).

Fondamentalement, une transformation réelle sera provoquée par un déséquilibre. En pratique, partant d'un état initial donné, état d'équilibre, la modification d'un paramètre va enclencher la transformation qui se poursuivra jusqu'à ce que le système atteigne un état d'équilibre final.

Une transformation entre deux états donnés peut s'effectuer selon plusieurs **chemins thermodynamiques**, c'est à dire qu'il existe plusieurs façons différentes de faire évoluer les variables d'état pour mener le système de l'état initial (EI) à l'état final (EF).

La transformation d'un système mettra en jeu des échanges énergétiques au sein du système ou par interaction avec l'extérieur.

Les différentes formes d'échanges énergétiques seront :

- les échanges par interaction thermique, ou transferts thermiques
- les échanges par interaction mécanique, ou travaux de forces mécaniques
- les travaux des forces pressantes...

#### **1.2 Transformations et chemins particuliers :**

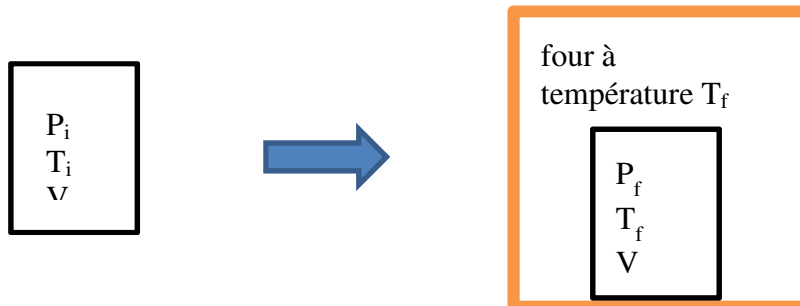
• Transformation **cyclique** : telle que l'état initial (EI) et l'état final (EF) soient identiques (variables d'état de mêmes valeurs). Cela ne pose aucune condition sur le chemin suivi, c'est à dire la façon dont on aura fait évoluer les variables d'état durant le processus.

Transformations selon des **chemins particuliers** :

- Transformation **isochore** : le volume du système doit rester invariant :  $V = \text{cste}$ . Réalisé concrètement par des systèmes délimités par des parois rigides.

exemple : un échantillon de  $n$  moles de gaz est enfermé dans un récipient dont les parois sont rigides. La pression initiale  $P_i$  et la température initiale  $T_i$  décrivent son état initial.

Le récipient est ensuite placé dans un four maintenu à la température  $T_f$ . Le gaz répond au modèle du gaz parfait. Quelle sera la pression finale dans le récipient ?



$$nR = P_i V_0 / T_i = P_f V_0 / T_f \text{ amène : } P_f = (T_f / T_i) \cdot P_i$$

- Transformation **isotherme** :

la température du système reste constante durant la transformation ( $T = \text{cste}$ ). Ce processus sera réalisé en maintenant le système en **équilibre thermique** avec un **thermostat** de température  $T_{th}$ , ce qui suppose une évolution suffisamment lente pour que les échanges thermiques maintiennent l'équilibre thermique  $T = T_{th}$  à tout instant.

- **Thermostat** : entité physique capable d'échanger de l'énergie avec le système par interaction thermique, sans autre forme de transfert énergétique, sans que cela ne fasse varier sa propre température. (exemple : atmosphère, bain thermostaté...).

En pratique, un thermostat sera réalisé au moyen de corps de très grande capacité thermique, suffisamment grande pour que les échanges énergétiques avec le système modifient la température du thermostat de façon négligeable.

Une autre solution est d'avoir un dispositif annexe qui va réguler la température du thermostat par des apports d'énergie régulier (bain thermostaté).

- Transformation **monotherme** : La température  $T$  du système peut évoluer durant la transformation, mais la température extérieure  $T_{ext}$  sera invariante :  $T_{ext} = \text{Cste}$ .

En général ce type de transformation sera réalisé par un processus où le système n'a de contact thermique qu'avec un seul thermostat, mais sans que l'on ait équilibre thermique avec le système.  $T \neq T_{ext}$  durant la transformation.

C'est par exemple le cas pour la situation étudiée précédemment, où un échantillon de gaz était mis en contact thermique avec un four de température  $T_f$ . La température du gaz va évoluer depuis sa valeur initiale  $T_i$  jusqu'à atteindre celle du four, qui reste invariante durant la transformation.

- Transformation **adiabatique** :

Transformation ayant lieu sans transfert thermique, c'est à dire sans transfert d'énergie par interaction thermique (pas d'échange de chaleur). Réalisé en pratique en isolant

thermiquement, en calorifugeant, le système, ou dans le cas de transformations rapides (les échanges de chaleur sont lents ; ils n'auront pas le temps de se faire de façon notable si le processus est très bref).

*exemples :*

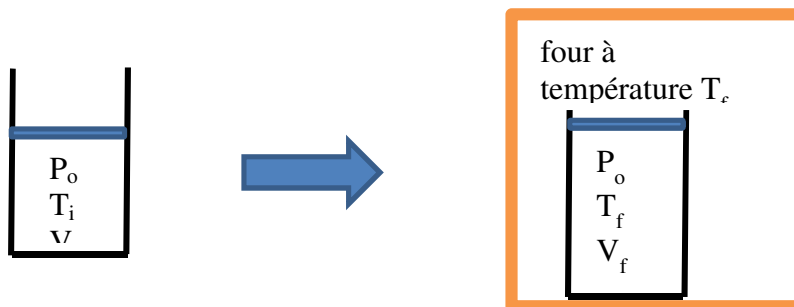
Le mélange d'eau chaude et d'eau froide dans un calorimètre (ou dans une bouteille « thermos »), donnant finalement de l'eau tiède, est un processus adiabatique.

Mais la compression brutale du mélange air-carburant dans le cylindre d'un moteur thermique l'est aussi : les parois du cylindre, formées d'acier, ne sont pas calorifugées, mais le processus est tellement rapide que le transfert thermique échangé est négligeable.

● Transformation **isobare** : la pression du système est définie à tout instant et ne varie pas pendant la transformation:  $P = \text{cste}$ .

On maintient le système en équilibre mécanique avec l'extérieur ; la pression extérieure  $P_{\text{ext}}$  (qui représente la pression résultant des contraintes externes au système) étant elle-même invariante. Là aussi l'évolution ne doit pas être trop rapide pour que l'équilibre mécanique soit assuré.

exemple :



Un échantillon de  $n$  moles de gaz est enfermé dans un récipient fermé par un piston mobile. La pression initiale  $P_i$  et la température initiale  $T_i$  décrivent son état initial.

Le récipient est ensuite placé dans un four maintenu à la température  $T_f$ . Quelle sera le volume final du récipient ?

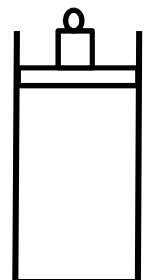
Le processus est lent. Le piston est à tout moment en état d'équilibre : la force pressante exercée par le gaz du cylindre équilibre la force pressante imposée par l'atmosphère extérieure et le poids du piston :  $P = P_{\text{ext}} = P_{\text{atm}} + mg/S = \text{cste} = P_o$

$$nR = P_o V_i / T_i = P_o V_f / T_f \text{ amène : } V_f = (T_f / T_i) V_i$$

● Transformation **monobare** : Le système reste en contact mécanique avec une pression extérieure invariante  $P_{\text{ext}} = \text{Cste}$  (atmosphère par exemple), mais sans que l'on ait forcément équilibre mécanique durant la transformation. La pression  $P \neq P_{\text{ext}}$  du système pourra évoluer durant cette transformation. La pression  $P$  du système n'est a priori pas définie durant la transformation.

*exemple :*

Lorsque l'on pose directement une masse  $M$  sur un piston de masse  $m$  fermant un cylindre de section  $S$ , la « pression extérieure »  $P_{\text{ext}}$  passe brutalement d'une valeur initiale :



$$P_{\text{ext}} = P_{\text{atm}} + mg/S$$

à une valeur qui restera valide durant toute la transformation, jusqu'à l'état final inclus :

$$P_{\text{ext}} = P_{\text{atm}} + mg/S + Mg/S$$

Elle vaut donc  $P_{\text{ext}} = P_{\text{atm}} + mg/S + Mg/S$  pendant toute la transformation, qui s'avère donc monobare.

Insistons sur le fait que cette « pression extérieure » n'est pas la pression qui règne à l'extérieur du piston, mais traduit les contraintes mécaniques imposées par l'extérieur à l'interface mobile du système.  $P_{\text{ext}}$  correspond donc à la force par unité de surface s'exerçant sur la paroi mobile du système.

## 2. Transferts thermiques :

Il existe des processus de transfert d'énergie par **interaction thermique**. Le sens spontané de ce flux d'énergie est du corps de température la plus élevée vers le corps de température la plus faible.

Trois phénomènes peuvent intervenir dans **l'interaction thermique** :

- la **conduction thermique** (ou diffusion thermique). A l'échelle microscopique, l'énergie se propage en se transférant entre particules par chocs intermoléculaires (cas des gaz, des liquides) ou vibrations microscopiques (cas des solides).

- la **convection thermique**. L'énergie est transportée par le mouvement macroscopique d'un fluide support. Par exemple, on aura une convection de l'air au contact d'un radiateur chauffant une pièce d'habitation.

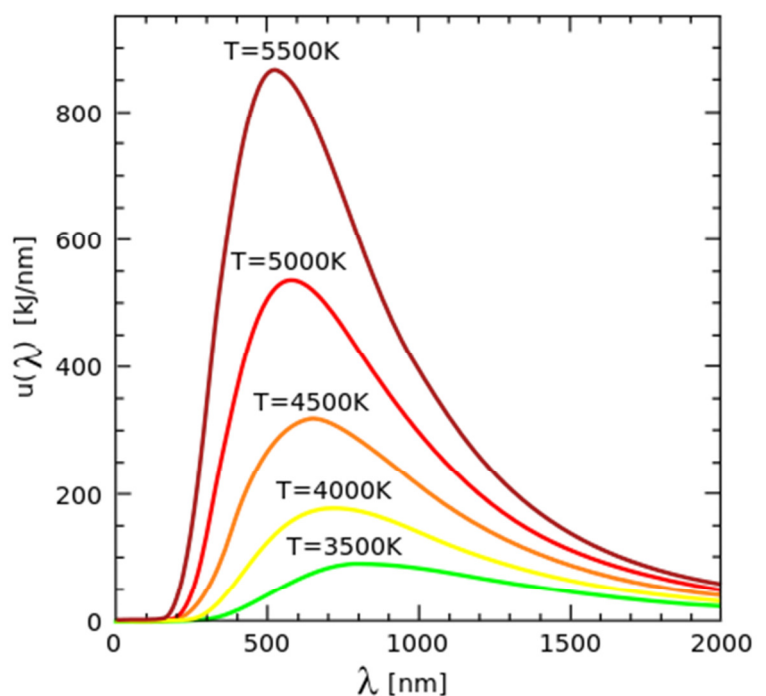
- le **rayonnement thermique**. L'énergie est rayonnée sous forme d'ondes électromagnétiques dont la composition est liée à la température absolue du corps considéré.

D'après la théorie dite du corps noir, (évoquée ici uniquement à titre culturel), le corps à température  $T$  émettra un rayonnement thermique distribué selon un spectre continu, présentant une longueur d'onde  $\lambda_{\text{max}}$  à son maximum d'intensité qui sera proportionnelle à l'inverse de sa température (Loi de Wien) :

$$\lambda_{\text{max}} = \sigma_w / T$$

avec  $\sigma_w = 2,898.10^{-3} \text{ m.K}$

*Densité spectrale d'énergie émise par un corps noir en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs températures.*



Un corps recevant l'énergie de ces ondes va s'échauffer en convertissant et accumulant cette énergie sous forme d'énergie interne. Par exemple, on se chauffe les mains en présentant les paumes devant un brasero.

La puissance émise par rayonnement du corps noir, par unité de surface, répond à la loi de Stefan :  $P_s = \sigma \cdot T^4$  où  $\sigma$  est une constante physique ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ) et  $T$  est la température absolue, en Kelvin.

Ainsi, un corps noir (ou un objet pouvant s'y identifier) de température 773 K (500°C) émet une puissance surfacique  $P_s = 20,2 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$  à une température de 323 K (50°C), cette puissance surfacique vaut alors  $P_s = 0,617 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$

***Le transfert thermique, noté  $Q$ , est la quantité d'énergie échangée par interaction thermique entre le système et l'extérieur, en rassemblant toutes les formes de transfert thermique.***

***Par convention thermodynamique,  $Q$  sera positif si l'énergie est transférée de l'extérieur vers le système et  $Q$  sera négatif dans le cas contraire.***

Le flux d'énergie s'annulera à l'équilibre entre le système considéré et l'extérieur avec lequel il y a interaction thermique quand la température du système sera égale à la température extérieure : c'est l'équilibre thermique. C'est le « principe zéro » de la thermodynamique : ***deux corps en équilibre thermique sont à même température.***

Le terme de chaleur était employé pour désigner le transfert thermique  $Q$ , mais il est à proscrire car il induit des contresens.

Dans le sens commun, la chaleur renvoie à l'état de température plus ou moins élevée d'un corps (corps chaud ou corps froid). Or l'état de température est à relier à l'énergie interne contenue dans le corps. On fait donc une confusion entre énergie contenue et énergie transférée.

Cette confusion vient du fait que notre perception de la température (sensation de chaud ou de froid) est fondée en réalité sur la perception des échanges thermiques avec notre peau. Quand nous identifions un corps comme chaud, c'est que nous percevons un flux d'énergie allant de ce corps vers notre main.

L'interaction thermique est plus ou moins intense selon les caractéristiques de l'interface système / extérieur, dans le cas des transferts thermiques conducto-convectifs (cas courant où les transferts sont assurés par conduction et convection).

Les critères intervenants seront :

- la nature des matériaux : les métaux sont de très bons conducteurs thermiques, le bois, la laine de verre, l'air sont au contraire des isolants. Pour une cloison donnée, l'épaisseur de matériau isolant va limiter la conduction.

- la surface d'échange, de contact thermique : plus elle sera grande plus fort sera le transfert thermique.

- l'écart de température entre système et extérieur à l'interface  $T_{\text{ext}} - T_{\text{syst}}$ . Un écart plus élevée va accroître le transfert thermique.

- l'existence de convection forcée : un mouvement macroscopique du fluide situé à l'interface va favoriser les échanges thermiques (vent, fluide caloporteur en écoulement...).

La **loi de Newton** va rendre compte de ces aspects pour les transferts conducto-convectifs :

le transfert thermique reçu par le système, à travers une portion d'interface d'aire S, pendant une durée infinitésimale dt s'exprime par :

$$\boxed{\delta Q = aS(T_{ext} - T_{syst})dt} \quad \text{Loi de Newton}$$

a est un coefficient (en  $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ) dépendant des caractéristiques de l'interface.

On peut aussi exprimer la puissance thermique :

$$\boxed{P_{th} = \frac{\delta Q}{dt} = aS(T_{ext} - T_{syst})}$$

Rappelons qu'un transfert énergétique s'exprime en Joule (J) tandis qu'une puissance s'exprime en Watt (W).  $1 \text{ W} = 1 \text{ J.s}^{-1}$ .

Cette loi n'est pas exigible au programme de Sup PCSI mais elle est souvent fournie dans les sujets, et l'on s'y réfère implicitement dans certaines questions "qualitatives" sur les critères permettant d'optimiser un transfert thermique. Il est donc chaudement conseillé de la mémoriser.

### **Vocabulaire :**

Une cloison parfaitement perméable aux transferts thermiques est dite **diatherme**.

Une cloison parfaitement imperméable à ces transferts, thermiquement isolée, est dite **athermane**.

Une transformation ayant lieu sans échange d'énergie par transfert thermique ( $Q = 0$ ) est qualifiée d'**adiabatique**.

*Remarque : en toute rigueur, le terme adiabatique concerne une transformation sans transfert thermique alors que le terme **athermane** qualifie un récipient, une paroi, empêchant les transferts thermiques. Mais l'abus de langage est fréquent : on parle de « paroi adiabatique ».*

En première analyse, un système séparé de l'extérieur par des parois thermiquement isolantes, athermanes, va subir des transformations adiabatiques. Ce sera le cas pour les expériences de calorimétrie, où l'on emploie un calorimètre, récipient doté de parois calorifugées.

Remarquons cependant que l'interaction thermique est un processus assez lent. Les transferts thermiques mis en jeu dans des transformations rapides sont souvent faibles relativement à l'énergie échangée par d'autres voies (travail, réaction chimique...).

Pour être adiabatique, une transformation ne nécessite donc pas forcément que le système soit isolé de l'extérieur par des cloisons athermanes.

Par exemple, la détente des gaz brûlés dans le cylindre d'un moteur à explosion peut être considérée comme adiabatique. Pourtant les parois du cylindre sont en acier, très bon conducteur thermique.

Mais la transformation a lieu en une fraction de seconde (environ  $1/100^{\circ}$  de seconde). Sur cette durée, le transfert thermique sera négligeable au regard des autres énergies mises en jeu, en particulier les travaux des forces pressantes : la transformation sera alors considérée comme adiabatique.

**Une transformation brutale, rapide, soudaine, sera généralement modélisable comme adiabatique.**

### 3. Transfert d'énergie sous forme électrique.

La puissance instantanée reçue par un système électrique répond à :  $\mathcal{P}_{el}(t) = u(t).i(t)$   
les tension  $u(t)$  et intensité  $i(t)$  étant orientées en convention générateur.

L'énergie ainsi reçue durant  $dt$  sera :  $\delta W = \mathcal{P}_{el}(t).dt = u(t).i(t).dt$

Soit sur un intervalle de temps  $[t_1 ; t_2]$  :

$$W = \int_{t_1}^{t_2} P_{el}(t).dt$$

et pour une puissance  $\mathcal{P}_{el} = \text{cste}$  :

$$W = \mathcal{P}_{el} \cdot \Delta t$$

En particulier pour le cas d'un composant résistif, de résistance  $R$ , pour lequel la relation courant-tension s'écrit  $u(t) = R.i(t)$ , on aura :

$$W = \int_{t_1}^{t_2} P_{el}(t).dt = \int_{t_1}^{t_2} R. i^2(t).dt$$

Attention à ne pas faire de confusion de notation entre la pression  $P$  et la puissance  $\mathcal{P}_{el}$ .

Cette énergie pourra être transmise au sein même du système par différents dispositifs de conversion :

- résistances, amenant un transfert thermique par effet Joule
- moteur, amenant un travail mécanique
- électrolyseur, déclenchant une réaction chimique...

Le rendement en puissance est par définition un rapport sans dimension :

$$\rho = \frac{P_{utile}}{P_{consommée}}$$

Ce rendement est compris entre 0 et 1.

Par exemple pour le chauffage d'un liquide dans un récipient posé sur une plaque électrique, on aura  $\rho \approx 0,8$  à  $0,9$ , ce qui signifie que la puissance thermique  $P_{th}$  effectivement fournie au corps que l'on souhaite chauffer n'est qu'une partie de la puissance électrique  $P_{elec}$  consommée par le dispositif :  $P_{th} = \rho.P_{elec}$ .

Le transfert d'énergie sous forme électrique, en tant que terme d'énergie doit s'exprimer en Joule (unité légale). Néanmoins, une unité très employée, en particulier par les distributeurs d'énergie électrique est le **kilowatt-heure (kW.h)**.

1 kilowatt-heure correspond à l'énergie transférée par une puissance de  $1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W}$  pendant une durée de 1 heure = 3600 s. Il vient donc  $1 \text{ kW.h} = 3,6.10^6 \text{ J}$ .