

CTE – Chapitre B

Bilans d'énergie – Premier principe

I - Transformation thermodynamique

I.1 - Généralités

Définition : Transformation thermodynamique

Évolution d'un système lorsqu'on libère une contrainte entre un état initial et un état final, qui sont tous deux des états d'équilibre.

Pendant une transformation thermodynamique,

- le système échange de l'énergie et de la matière,
- voit ses paramètres d'état évoluer.

Dans toute la suite du chapitre on se restreindra à l'étude de l'évolution de systèmes fermés (pas d'échange de matière).

Vocabulaire

Définition : transformation quasi-statique

C'est une évolution lente du système : le système est en permanence voisin d'un état d'équilibre.

- ⇒ succession d'états d'équilibre
- ⇒ les paramètres d'état sont définis pendant toute la transformation

Définition : transformation réversible

C'est une évolution quasi-statique que l'on peut inverser.

- ⇒ le système est en permanence à l'équilibre mécanique avec l'extérieur

Échanges d'énergie

Lors d'une transformation thermodynamique, le système échange de l'énergie avec l'extérieur. Ce transfert d'énergie peut se retrouver sous deux formes :

- **Travail** : il s'agit d'un transfert d'énergie mécanique au niveau macroscopique, de façon ordonnée, modélisable par une force. Noté W .
- **Chaleur** ou transfert thermique : il s'agit d'un transfert d'énergie mécanique au niveau microscopique, de façon désordonnée. Noté Q .

On respecte les conventions vues au chapitre précédent :

- si $W, Q > 0$, le système reçoit de l'énergie,
- si $W, Q < 0$, le système fournit ou cède de l'énergie.

Ces grandeurs correspondent à des transferts d'énergie lors d'une transformation, **ce ne sont pas des fonctions d'état**.

Notation

On réserve les symboles d et Δ pour des variations respectivement infinitésimale et finie d'un paramètre d'état. On n'écrira donc jamais ΔW et ΔQ .

	Évolution finie	Évolution infinitésimale	
fonction d'état	$\Delta X = X_f - X_i$	dX	indépendant du chemin suivi
transfert	W, Q	$\delta W, \delta Q$	dépend du chemin suivi

Pour une transformation cyclique (où l'état final est identique à l'état initial), on a évidemment pour tout paramètre d'état $\Delta X = X_f - X_i = 0$, mais a priori $Q \neq 0$ et $W \neq 0$.

II - Transferts thermiques

Un transfert thermique est toujours un échange d'énergie thermique. On distingue trois types de transfert thermique, selon la façon dont cette énergie est échangée.

II.1 - Types de transferts

Conduction thermique

- L'énergie thermique est échangée de proche en proche, par l'intermédiaire de chocs entre entités microscopiques, donc à l'échelle microscopique.
- Ce mode de transfert nécessite un milieu matériel mais il n'y a pas de transfert de matière : la matière ne se déplace pas à l'échelle macroscopique.
- Spontanément le flux thermique est orienté des lieux température élevée vers ceux de température faible.
- C'est un mode de transfert thermique qualifié de « lent »¹.

Convection thermique

- L'énergie thermique est échangée par transfert de matière à l'échelle macroscopique.
- Ce mode de transfert nécessite un milieu matériel qui se déplace à l'échelle macroscopique :
 - soit par l'effet de la poussée d'Archimède, on parle alors de convection spontanée (ou convection naturelle)².
 - soit par une action mécanique extérieure, on parle alors de convection forcée³.
- C'est un mode de transfert thermique plus rapide que la conduction.

Rayonnement thermique

- L'énergie thermique est échangée par des photons (émission ou absorption), c'est-à-dire par une onde électromagnétique. Le spectre du rayonnement émis dépend de la température du corps émetteur⁴.
- Ce mode de transfert ne nécessite pas de milieu matériel : le rayonnement étant une onde électromagnétique, elle peut se déplacer dans le vide.
- C'est un mode de transfert thermique qualifié de « rapide ».

II.2 - Thermostat

Définition : Thermostat

Système qui échange de l'énergie thermique tout en conservant sa température constante.

$$Q \neq 0 \quad \text{mais} \quad \Delta T = 0$$

1. Le cours de deuxième année permettra de définir un temps caractéristique du transfert thermique par conduction et donc de mener des comparaisons entre sa durée et d'autres durées. On retient juste que cette « lenteur » mènera à une approximation utile lors de l'étude des moteurs cycliques thermiques.

2. Exemple : dans une pièce chauffée par le sol, l'air chaud (moins dense) monte et l'air froid (plus dense) descend, ce qui assure un transfert de matière et un flux thermique orienté des lieux de température élevée vers ceux de température faible.

3. Exemples : remuer de l'eau en train de chauffer, utiliser un ventilateur.

4. Voir Cours OS-A. Exemple : un corps humain (310 K) émet majoritairement dans l'infrarouge.

Un thermostat peut être

- monophasé : il est caractérisé par sa capacité thermique à volume constant $C = \frac{dU}{dT}$ qui doit donc tendre vers l'infini. En pratique, il suffit que la capacité thermique du thermostat soit très grande devant les capacités thermiques des autres systèmes avec lesquels il interagit ;
- diphasé : il s'agit d'un corps pur diphasé, pour lequel la variance vaut 1. À pression fixée, tant que les 2 phases coexistent, la température est également fixe, quels que soient les transferts de chaleur mis en jeu.

II.3 - Vocabulaire

Définition : transformation isotherme

La température du système reste constante pendant toute la transformation : $T_{\text{int}} = \text{cste}$.

Définition : transformation monotherme

Le système est en contact thermique avec l'extérieur qui reste lui à température constante pendant toute la transformation : $T_{\text{ext}} = \text{cste}$.

Définition : paroi athermane/calorifugée

C'est une paroi qui empêche tout transfert de chaleur à travers elle. À l'inverse une paroi qui les permet est une paroi diathermane.

Définition : transformation adiabatique

Il n'y a aucun échange de chaleur avec l'extérieur pendant la transformation : $Q = 0 \quad \delta q = 0$.

Cela implique en général que le système est entouré d'une paroi athermane et que la transformation est assez rapide, ce qui ne permet pas d'atteindre l'équilibre thermique avec l'extérieur.

VI - Principes de calorimétrie

VI.1 - Exemple 1 : détermination d'une température finale d'équilibre dans un calorimètre

Soient deux corps 1 et 2, aux températures initiales T_{I1} et T_{I2} , mis en contact à l'intérieur d'un calorimètre (voir figure 1.1) rigide, dont les parois sont entièrement calorifugées et munies d'une petite ouverture permettant un contact uniquement mécanique entre l'intérieur et l'extérieur (pas d'échange thermique ou de matière par cette ouverture). L'extérieur du calorimètre est l'atmosphère à la pression $p_0 = \text{Cste}$. L'ensemble est à l'équilibre macroscopique dans le référentiel du laboratoire.

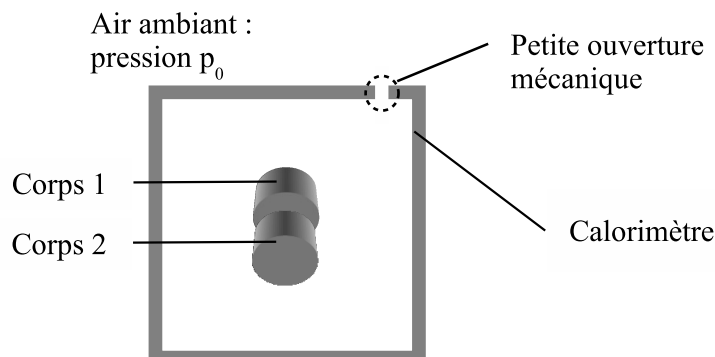


FIGURE 1.1 – Schéma de principe.

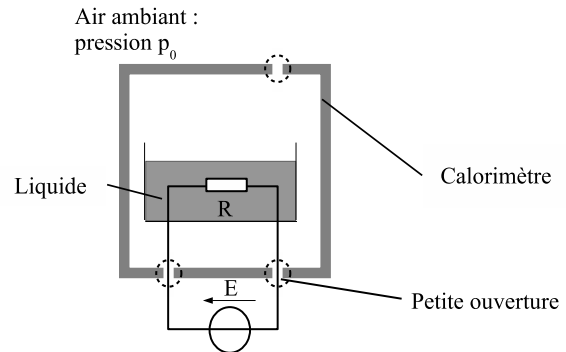
On considère que la capacité thermique du calorimètre⁵ est négligeable devant celles des deux corps. On considère que les capacités thermiques des deux corps sont indépendantes de la température. On souhaite déterminer les températures finales des deux corps à l'équilibre.

⁵. Entendu comme l'enceinte du calorimètre et éventuellement le matériel intérieur ou les instruments utilisés (thermomètres, etc.).

VI.2 - Exemple 2 : détermination de la capacité thermique d'un liquide par la méthode de Joule

Soit un corps liquide à la température initiale T_I . On plonge dans ce liquide un résistor de résistance R . Un récipient contenant le liquide, le résistor et un thermomètre est placé dans un calorimètre rigide, dont les parois sont entièrement calorifugées. Le calorimètre est muni de petites ouvertures permettant un contact mécanique avec l'atmosphère (pas d'échange thermique ou de matière par cette ouverture) et permettant de faire passer des fils électriques pour brancher le résistor à un générateur de tension de fem E , placé à l'extérieur du calorimètre (voir figure ci-contre). L'atmosphère à la pression $p_0 = Cste$.

L'ensemble est à l'équilibre macroscopique dans le référentiel du laboratoire.



On allume le générateur de tension pendant une durée Δt . À la fin de cette durée, on mesure la température du liquide qui est T_F .

On considère que les capacités thermiques du calorimètre, du récipient, du thermomètre, des fils et du résistor négligeables devant celle du liquide. On considère que la capacité thermique du liquide, notée C , est indépendante de la température.

On souhaite déterminer la capacité thermique du liquide.

VI.3 - Exemple 3 : modélisation d'une transformation avec changement d'état

On place 300 g d'eau liquide à 20°C dans un congélateur (considéré comme un thermostat) à -18°C et à la pression atmosphérique considérée constante.

Quel transfert thermique sera échangé par l'eau avec le congélateur si on y laisse l'eau très longtemps ?

Données :

- chaleur latente de fusion de l'eau à 0°C : 333 kJ kg^{-1} ;
- capacité thermique massique de la glace : $2,1\text{ kJ K}^{-1}\text{ kg}^{-1}$;
- capacité thermique massique de l'eau liquide : $4,2\text{ kJ K}^{-1}\text{ kg}^{-1}$.

On supposera les capacités thermiques massiques indépendantes de la température.

Notations utiles à la lecture de l'énoncé :

- m la masse d'eau ;
- $T_I = 20^\circ\text{C}$;
- $T_{ext} = -18^\circ\text{C}$;
- p la pression ;
- Q le transfert thermique réponse à la question ;
- l_f la chaleur latente de fusion de l'eau ;
- c_{liq} capacité thermique massique de l'eau liquide ;
- c_g capacité thermique massique de la glace.

Notations sans doute utiles compte tenu du problème étudié :

- T^* la température de solidification de l'eau à la pression atmosphérique ;
- T_F la température finale du système étudié.