

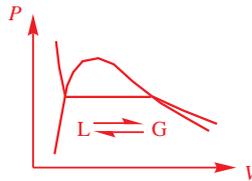
# THERMODYNAMIQUE

## chapitre 4

### Transferts d'énergie Travail et chaleur

Ce chapitre traite principalement des échanges énergétiques entre le système étudié et le monde extérieur. Ces échanges peuvent revêtir deux formes : une forme ordonnée et utilisable, appelée le *travail*, et une forme désordonnée et difficilement utilisable, la *chaleur*. Ces deux notions sont en réalité deux facettes du même phénomène, celui des échanges énergétiques, mais ce n'est que vers 1850 que l'équivalence entre travail et chaleur a été établie expérimentalement. Auparavant, une unité spécifique pour la chaleur avait été définie : la *calorie* ; il n'y a maintenant plus aucune raison de l'utiliser, puisque la chaleur n'est autre qu'une énergie, dont l'unité est le *joule*.

Comme on le verra, les échanges énergétiques dépendent fondamentalement de la transformation réalisée, c'est-à-dire évidemment des états initial et final, mais aussi de la façon de faire évoluer le système entre ces deux états. Il est donc indispensable de présenter les différentes manières possibles de faire subir une transformation au système.



Plan du chapitre.

1. Transformations thermodynamiques
  - 1.1 Échange et création
  - 1.2 Variation d'un paramètre d'état extensif au cours d'une transformation
  - 1.3 Différents types de transformations
  - 1.4 Compression (ou détente) brutale et infiniment lente
2. Travail et chaleur
  - 2.1 Forme ordonnée des échanges d'énergie : le travail  $W$
  - 2.2 Forme désordonnée des échanges d'énergie : la chaleur  $Q$
3. Échanges d'énergie sous forme de travail
  - 3.1 Le travail des forces pressantes
  - 3.2 Calcul du travail des forces pressantes dans quelques cas particuliers
  - 3.3 Autres travaux ; travail électrique
4. Échanges d'énergie sous forme de chaleur
  - 4.1 Différentes formes de transfert thermique
  - 4.2 La conduction thermique ; résistance thermique
  - 4.3 Notion de thermostat

certains droits réservés  
ne peut pas être vendu

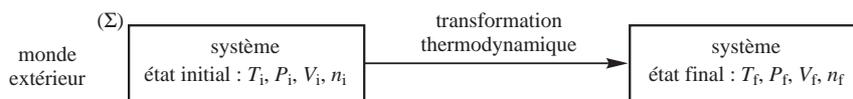
# 1 Transformations thermodynamiques.

Dans tout ce chapitre, on considère un système, séparé du monde extérieur par une surface ( $\Sigma$ ), et passant d'un état initial à un état final, au cours d'une *transformation thermodynamique*.

## 1.1 Échange et création.

Au cours de la transformation thermodynamique, dans le cas général, les modifications du système peuvent avoir deux causes.

D'une part, il peut y avoir des **échanges** de matière et d'énergie entre le système et le monde extérieur, **à travers la paroi** ( $\Sigma$ ). De la matière peut sortir ou entrer dans le système; de même de l'énergie peut entrer ou sortir du système.

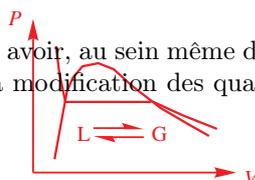


Par exemple, si le système est en contact avec une *source de chaleur*, comme un appareil de chauffage, de l'énergie est transférée du milieu extérieur vers le système. Inversement, si le système est le siège d'une réaction chimique exothermique, de l'énergie est transférée du système vers le monde extérieur.

BCPST1 Fenelon  
Nicolas Clatin 2007

En première année, on ne travaillera que sur les systèmes fermés; c'est-à-dire sans échange de matière à travers ( $\Sigma$ ). Les systèmes ouverts seront abordés en seconde année.

Au cours de la transformation, il peut aussi y avoir, au sein même du système, des phénomènes de **création**. Ainsi, si une réaction chimique se déroule, il y a modification des quantités de matière des différentes espèces, alors même que le système est fermé..



## 1.2 Variation d'un paramètre d'état extensif au cours d'une transformation.

Soit  $Z$  un paramètre d'état extensif. Il varie au cours de la transformation entre l'état initial (noté avec l'indice  $i$ ) et l'état final (noté avec l'indice  $f$ ), d'une quantité :

$$\Delta Z = Z_f - Z_i \quad (1)$$

Dans le cas général, la variation  $\Delta Z$  de  $Z$  est due à des phénomènes d'échanges et de création. En appelant  $Z_e$  la quantité de  $Z$  échangée avec l'extérieur et  $Z_{cr}$  la quantité de  $Z$  créée au sein du système, on a :

$$\Delta Z = Z_e + Z_{cr} \quad (2)$$

Par exemple, si  $n_j$  est le nombre de moles de l'espèce  $A_j$ , on a :  $\Delta n_j = n_{j_e} + n_{j_{cr}}$ , où  $n_{j_e}$  est le nombre de moles échangées à travers ( $\Sigma$ ) et  $n_{j_{cr}}$  le nombre de moles créées au sein du système.

S'il n'y a pas de terme de création durant la transformation, alors :  $\Delta Z = Z_e$ . On dit que  $Z$  est *conservative*.

Il est commode d'algrébriser les termes d'échange et de création, afin de n'avoir pas à préciser si l'énergie ou la matière entre ou sort, est formée ou consommée. D'après (2), la convention de signe est la suivante :

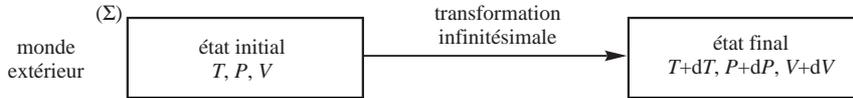
- $Z_e > 0$  correspond à un transfert du monde extérieur vers le système,
- $Z_e < 0$  correspond à un transfert du système vers le monde extérieur.

De même, pour ce qui concerne les termes de création :

- $Z_{cr} > 0$  correspond à une apparition de  $Z$  au sein du système,
- $Z_{cr} < 0$  correspond à une disparition de  $Z$  au sein du système.

Par exemple,  $n_{j_e} = 1$  mol signifie qu'une mole de l'espèce  $A_j$  est entrée dans le système à travers ( $\Sigma$ ). De même  $q_e = -12$  C signifie qu'une charge de 12 C est sortie du système.

Il est souvent commode de raisonner sur une très petite variation du système entre deux états très voisins.



Entre ces deux états,  $Z$  a subi une variation infinitésimale  $dZ$ . Il y a eu échange et/ou création de quantités infinitésimales de  $Z$ . On note :

$$dZ = \delta Z_e + \delta Z_{cr} \quad (3)$$

où  $\delta Z_e$  représente une très petite quantité de  $Z$  échangée, et  $\delta Z_{cr}$  une très petite quantité de  $Z$  créée.

Il faut ici souligner un point fondamental. La variation de  $Z$ , soit  $\Delta Z = Z_f - Z_i$  ne dépend que des valeurs de  $Z$  à l'état initial et à l'état final. En revanche, les quantités  $Z_e$  et  $Z_{cr}$  dépendent de la manière de réaliser la transformation, autrement dit **dépendent du chemin suivi** pour aller de l'état initial à l'état final.

Le paramètre  $Z$  est une **fonction d'état**, dont la variation ne dépend que des états extrêmes. La variation infinitésimale  $dZ$  est une différentielle au sens mathématique, objet qui possède certaines propriétés qu'on verra par la suite. Par contre, les quantités  $Z_e$  et  $Z_{cr}$  ne sont pas des fonctions d'état; leurs valeurs dépendent du chemin suivi, et les grandeurs  $\delta Z_e$  et  $\delta Z_{cr}$  ne sont pas des différentielles, d'où la notation  $\delta$ .

On peut se convaincre de cela aisément en remarquant qu'il existe une infinité de façons de passer d'un état initial dans lequel  $n_{j_i} = 1$  mol à un état final dans lequel  $n_{j_f} = 2$  mol, soit  $\Delta n_j = +1$  mol. On peut avoir :

- $n_{j_e} = 1$  mol et  $n_{j_{cr}} = 0$ ,
- $n_{j_e} = 2$  mol et  $n_{j_{cr}} = -1$  mol,
- $n_{j_e} = -195$  mol et  $n_{j_{cr}} = +196$  mol,
- etc.

certains droits réservés  
ne peut pas être vendu

### 1.3 Différents types de transformations.

#### 1.3.1 Les états extrêmes.

En thermodynamique classique, les transformations considérées ont lieu **d'un état d'équilibre à un autre état d'équilibre**. On pourra raisonner également si les états extrêmes sont quasiment des états d'équilibre, c'est-à-dire si leur évolution est lente à l'échelle de l'expérience. La définition d'un état d'équilibre a déjà été donnée.

Un état d'équilibre est un état dans lequel les variables du système sont définies et constantes au cours du temps en chaque point, et qui n'est le siège d'aucun transfert et d'aucune création.

Un des cas les plus importants en thermodynamique classique est celui des fluides de faible volume, en particulier les gaz. Pour ces systèmes, l'équilibre est caractérisé par :

- une température uniforme et constante,
- une pression uniforme et constante (ou obéissant à l'équation de la statique des fluides pour les liquides),
- des concentrations de toutes les espèces chimiques uniformes et constantes,

Si l'état initial et l'état final sont différents, on parle d'une **transformation ouverte**. On peut également réaliser une suite de transformations qui ramène le système à son état initial; on parle alors de **transformation cyclique**.

### 1.3.2 Le système au cours de la transformation.

Il existe des transformations particulières, liées au maintien d'un paramètre d'état du système constant tout au long de la transformation :

- si le **volume** du système est **constant**, la transformation est **isochore**,
- si la **pression** du système est **constante**, la transformation est **isobare**,
- si la **température** du système est **constante**, la transformation est **isotherme**.

### 1.3.3 Le monde extérieur au cours de la transformation.

Si, au cours de la transformation le système est en contact avec un **milieu extérieur** :

- de **température constante**, la transformation est **monotherme**,
- de **pression constante**, la transformation est **monobare**.

On veillera à bien faire attention à ne pas confondre monotherme et isotherme, monobare et isobare. Les qualificatifs ne s'appliquent pas à la même chose : le système pour isotherme et isobare, le monde extérieur pour monotherme et monobare.

## 1.4 Compression (ou détente) brutale et à l'équilibre de pression.

Deux cas particuliers très importants de compression ou de détente d'un gaz doivent être étudiés soigneusement. Considérons un gaz contenu dans un cylindre fermé par un piston de masse négligeable et de section  $S$ , et effectuons une compression de deux manières différentes.

### 1.4.1 Compression brutale.

Initialement, le gaz contenu dans le cylindre est à l'équilibre : sa température est égale à la température extérieure (température atmosphérique) et sa pression est la pression extérieure (pression atmosphérique). Pour réaliser une transformation brutale, il suffit que l'opérateur applique sur le piston une force  $\vec{F}_{op}$  vers le bas. Celle-ci peut être exercée par exemple en posant d'un coup une masse  $M$  sur le piston ; dans ce cas la force exercée par l'opérateur est constante :  $\vec{F}_{op} = M\vec{g}$ . La pression extérieure est maintenant :

$$P_{ext} = P_{atm} + \frac{F_{op}}{S} = P_{atm} + \frac{Mg}{S} \quad (4)$$

La pression extérieure reste constante durant toute la transformation : la compression est monobare.



D'autre part, l'augmentation de la pression extérieure a pour effet de faire descendre le piston. Comme la masse  $M$  a été déposée d'un coup, le piston descend brusquement, oscille, puis s'immobilise dans une nouvelle position d'équilibre, telle que la pression du gaz à l'état final soit égale à la pression extérieure. Après un certain temps, la température du gaz s'équilibre également avec la température extérieure.

Durant toute cette transformation, on ne sait pas trop ce qui se passe : la mise en mouvement brutale du piston crée une onde de choc dans le gaz intérieur : le piston pousse les couches de gaz à son contact, ce qui entraîne une surpression locale, qui se propage vers le bas du cylindre. Autrement dit, la pression n'est pas clairement définie en chaque point du gaz, et encore moins uniforme dans le cylindre. De même, il n'y a aucune raison que la température reste uniforme et constante au cours de la transformation. Autrement dit, **les états intermédiaires ne sont pas des états d'équilibre**.

Si le piston a une masse non négligeable, les choses sont plus complexes. Les forces exercées sur le piston au cours de la transformation sont la force pressante du gaz intérieur au cylindre  $\vec{F}_{p1}$ , la force pressante du gaz atmosphérique  $\vec{F}_{p2}$ , le poids du piston  $m\vec{g}$  si celui-ci est de masse  $m$ , et la force exercée par l'opérateur  $\vec{F}_{op}$ . Durant la transformation, on peut écrire la loi de Newton, d'où on tire la force exercée par le gaz intérieur sur le cylindre :

$$m\vec{a} = \vec{F}_{p1} + \vec{F}_{p2} + m\vec{g} + \vec{F}_{op} \Rightarrow \vec{F}_{p1} = m\vec{a} - \vec{F}_{p2} - m\vec{g} - \vec{F}_{op} \quad (5)$$

D'après le principe des actions réciproques, la force exercée par le piston sur le gaz intérieur est alors opposée à  $\vec{F}_{p1}$ . En projetant sur l'axe vertical orienté vers le bas, on obtient :

$$\vec{F}_{ext} = -\vec{F}_{p1} = \vec{F}_{p2} + \vec{F}_{op} + m\vec{g} - m\vec{a} \Rightarrow F_{ext} = P_{atm}S + F_{op} + mg - ma_z \quad (6)$$

Ceci revient à considérer qu'il s'exerce sur le gaz intérieur au cylindre une pression :

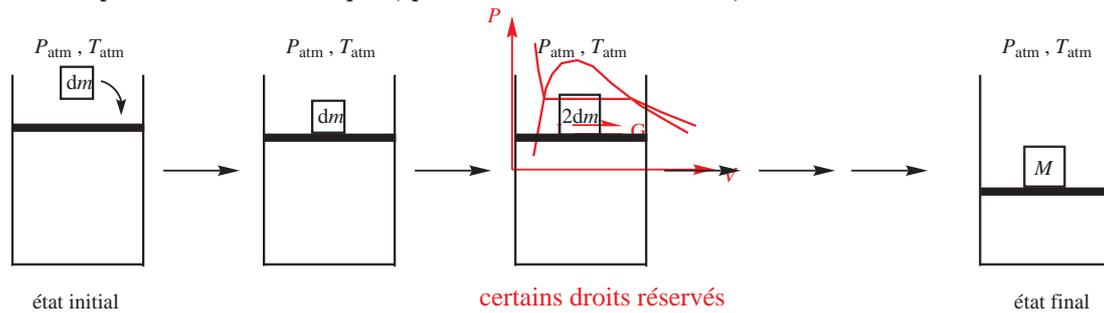
$$P_{ext} = \frac{F_{ext}}{S} = P_{atm} + \frac{F_{op}}{S} + \frac{mg - ma_z}{S} \quad (7)$$

On retrouve l'expression (4) à condition que le piston soit de masse négligeable  $m \approx 0$ , ou si on a simultanément  $mg \ll F_{op}$  et une accélération très faible  $a_z \approx 0$  à tout instant. En pratique, ce sera quasiment toujours le cas.

#### 1.4.2 Compression « infiniment lente ».

BCPST1 Fenelon  
Nicolas Clatin 2007

On peut maintenant effectuer la compression en posant la même masse  $M$ , mais de façon progressive : d'abord une toute petite masse  $dm$  qui fait descendre très légèrement le piston jusqu'à une nouvelle position d'équilibre très proche de celle du départ, puis une seconde masse  $dm$ , etc.



certains droits réservés  
ne peut pas être vendu

Dans ce cas, la transformation n'est pas monobare, puisque la pression extérieure ne cesse d'évoluer au cours de la transformation (la masse posée sur le piston ne cesse de changer). En revanche, le piston se déplaçant très lentement, on peut considérer qu'on est quasiment toujours à l'équilibre :

- le piston est quasiment immobile,
- la pression du gaz intérieur reste uniforme (pas d'onde de compression),
- la température a le temps de s'équilibrer avec la température extérieure à chaque instant.

En d'autres termes, la transformation n'est pas monobare, mais est constituée d'une succession d'états d'équilibre, de sorte qu'à chaque instant la pression intérieure soit égale à la pression extérieure.

Durant une **transformation à l'équilibre de pression à tout instant** :

$$P = P_{ext} \quad (8)$$

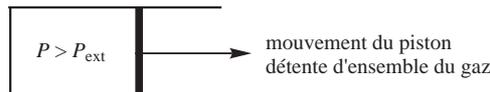
Une telle transformation est qualifiée d'*infiniment lente* ou de *quasistatique* (ce dernier terme est dorénavant proscrit). Cela ne doit pas faire supposer que tous les systèmes subissant une transformation très lente sont à l'équilibre de pression à chaque instant.

## 2 Travail et chaleur.

Au cours d'une transformation, l'énergie d'un système subit *a priori* une variation. À cette variation est associée un terme d'échange. Il apparaît que l'échange d'énergie entre un système et le monde extérieur peut revêtir deux formes différentes, appelée le travail et la chaleur.

### 2.1 Forme ordonnée des échanges d'énergie : le travail $W$ .

Le **travail** consiste en un échange d'énergie **associé à des modifications macroscopiques** du système, qui déplacent en bloc l'édifice moléculaire. L'exemple historique est celui d'un gaz en surpression qui déplace un piston, par augmentation du volume macroscopique du gaz.

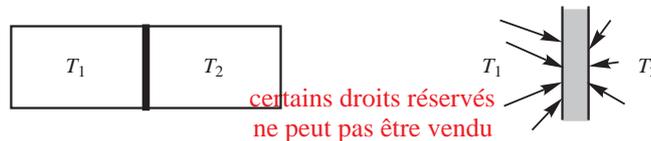


Il s'agit d'un **échange ordonné d'énergie**; l'énergie libérée par un système sous forme de travail est utilisable. Le travail est qualifié de **forme utile de l'énergie**.

### 2.2 Forme désordonnée des échanges d'énergie : la chaleur $Q$ .

Prenons le cas de deux compartiments remplis par deux gaz de températures différentes  $T_1$  et  $T_2 < T_1$ , et séparés par une paroi métallique. Au bout d'un temps assez long, la température est identique dans les deux compartiments, à une valeur intermédiaire entre  $T_1$  et  $T_2$ .

La température est une mesure de l'énergie cinétique d'agitation des molécules. Les molécules du compartiment chaud ont vu diminuer leur énergie cinétique d'agitation, pendant que les molécules du compartiment froid l'ont vu augmenter. Il y a eu un transfert d'énergie entre les deux compartiments. Celui-ci s'est produit à travers la paroi, par l'intermédiaire des chocs entre les molécules de gaz et les atomes de la paroi.



L'énergie transférée au cours de **mouvements désordonnés à l'échelle moléculaire** est appelée la **chaleur** ou **énergie thermique**. Elle est généralement inutilisable, et on parle de **forme dégradée de l'énergie**.

Une paroi qui permet les échanges d'énergie thermique est dite **diathermane**; c'est le cas des parois métalliques par exemple.

Au contraire, une paroi **imperméable à la chaleur** est dite **athermane**; c'est un objet difficile à réaliser en pratique. Comme les échanges thermiques se font par l'intermédiaires de chocs entre les particules, la meilleure façon de réaliser une paroi athermane est d'emprisonner entre deux parois une épaisseur de vide (cas des bouteilles thermos) ou un gaz peu dense (cas des doubles vitrages).

Une transformation telle qu'aucun échange de chaleur n'ait lieu entre le système et le milieu extérieur est qualifiée de **transformation adiabatique**.

### 3 Échanges d'énergie sous forme de travail.

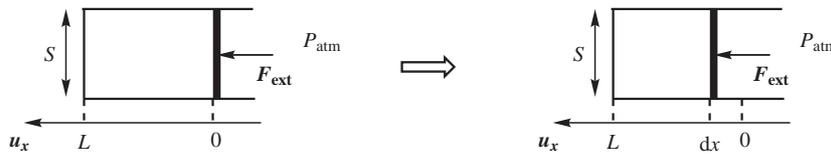
#### 3.1 Le travail des forces pressantes.

Il est nécessaire de considérer le travail des forces pressantes pour deux raisons :

- dès qu'on manipule dans l'atmosphère, les forces pressantes dues à l'air sont présentes,
- dans énormément de cas, le système est un gaz, dont l'équation d'état fait explicitement apparaître la pression.

Considérons un système constitué d'un gaz enfermé dans un cylindre de longueur  $L$ , fermé par un piston de surface  $S$ , mobile selon la direction  $\vec{u}_x$ . Soit  $P_{\text{ext}}$  la pression extérieure (au sens de la relation 4) ; la force exercée par le milieu extérieur sur le gaz est la force pressante :

$$\vec{F}_{\text{ext}} = P_{\text{ext}} S \vec{u}_x \quad (9)$$



Le piston effectue un déplacement élémentaire  $dx \vec{u}_x$ , par exemple dans le sens de la compression (mais le raisonnement est identique dans l'autre sens). Comme on le verra en mécanique, le travail de la force pressante lors de ce déplacement élémentaire est :

$$\delta W = \vec{F}_{\text{ext}} \cdot dx \vec{u}_x = P_{\text{ext}} S \vec{u}_x \cdot dx \vec{u}_x = P_{\text{ext}} S dx \quad (10)$$

Le travail est effectué par la force extérieure qui s'applique sur le gaz (par l'intermédiaire du piston). C'est donc un travail **reçu par le système gazeux**. Ce travail est cependant une grandeur algébrique ; en effet, son signe dépend de celui de  $dx$  donc du sens de déplacement du piston.

- Si  $dx > 0$ , le système est modifié sous l'action de la force  $\vec{F}_{\text{ext}}$ . Il y a alors transfert d'énergie du monde extérieur vers le système, qui reçoit donc réellement un travail ; le travail reçu est positif.
- Si  $dx < 0$ , ce n'est clairement pas la force  $\vec{F}_{\text{ext}}$  qui est responsable de la transformation. Au contraire,  $\vec{F}_{\text{ext}}$  s'oppose à la transformation. Le système doit donc fournir de l'énergie pour vaincre  $\vec{F}_{\text{ext}}$  ; ce qui correspond à un travail reçu négatif.

Le terme  $S dx$  dans l'expression du travail reçu par le système est relié à la variation élémentaire de volume au cours de la transformation. Celle-ci vaut en effet :

$$dV = V_f - V_i = S(L - dx) - SL = -S dx \quad (11)$$

En définitive, le travail élémentaire reçu par le système sous l'action des forces pressantes extérieures lors d'une variation de son volume  $dV$  est :

$$\delta W_{\text{reçu}} = -P_{\text{ext}} dV \quad (12)$$

Bien que démontrée dans un cas particulier (volume qui n'évolue que selon une direction), cette formule est totalement générale, et s'applique quelle que soit la forme du volume du système. Bien évidemment, pour un volume très grand, il se peut que la force  $\vec{F}_{\text{ext}}$  ne soit pas la même en tout point de la surface du système ; ce problème a déjà été évoqué lors du cours sur la statique des fluides.

Deux points sont très importants à noter. D'une part, dans la formule, la pression est celle exercée par le monde extérieur sur le système, mais la variation de volume est bien celle du système. D'autre part, le travail est une grandeur d'échange ; c'est une énergie échangée entre le monde extérieur et le système lors d'une transformation. Cela implique que le travail élémentaire soit noté  $\delta W$  qui correspond à une petite quantité d'énergie échangée et non  $dW$ . On reviendra sur ce point dans le chapitre suivant.

Le travail total reçu lors d'une transformation macroscopique menant le système d'un volume  $V_i$  à un volume  $V_f$  est obtenu par intégration :

$$W_{\text{recu}} = - \int_{V_i}^{V_f} P_{\text{ext}} dV \quad (13)$$

Le travail étant une grandeur d'échange, le travail total reçu par le système au cours d'une transformation menant d'un volume  $V_i$  à un volume  $V_f$  dépend du chemin suivi, c'est-à-dire de la façon de réaliser la transformation.

### 3.2 Calcul du travail des forces pressantes dans quelques cas particuliers.

#### 3.2.1 Transformation isochore.

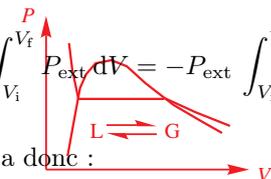
Si la transformation est isochore, le volume du système ne varie pas. Il s'agit d'un système entouré de parois rigides et indéformables. Tout au long de la transformation, on a donc  $dV = 0$ . En conséquence, pour une **transformation isochore**,

$$W_{\text{recu}} = 0 \quad (14)$$

#### 3.2.2 Transformation monobare.

BCPST1 Fenelon  
Nicolas Clatin 2007

Dans une transformation monobare, la pression extérieure reste constante durant toute la transformation. L'intégration de la formule (13) devient alors triviale :

$$W_{\text{recu}} = - \int_{V_i}^{V_f} P_{\text{ext}} dV = -P_{\text{ext}} \int_{V_i}^{V_f} dV \quad (15)$$


Pour une **transformation monobare**, on a donc :

$$W_{\text{recu}} = -P_{\text{ext}} (V_f - V_i) \quad (16)$$

certains droits réservés  
ne peut pas être vendu

#### 3.2.3 Transformation à l'équilibre de pression à tout instant.

Soit un gaz enfermé dans un cylindre séparé du monde extérieure par un piston, et tel que la pression du gaz soit différente de la pression atmosphérique. Le piston va bouger jusqu'à atteindre l'équilibre mécanique, lorsque la pression intérieure devient égale à  $P_{\text{atm}}$ . Supposons qu'on s'arrange pour que la transformation soit « infiniment lente », c'est-à-dire que le piston ne se déplace que d'une quantité assez petite à chaque intervalle de temps, de sorte qu'on soit quasiment à l'équilibre de pression à chaque instant. Ceci n'est possible que si un opérateur empêche le piston de bouger trop vite :

- si  $P > P_{\text{atm}}$ , l'opérateur doit pousser sur le piston pour empêcher le volume du gaz d'augmenter trop vite;
- si  $P < P_{\text{atm}}$ , l'opérateur doit retenir le piston pour empêcher le volume du gaz de diminuer trop vite.



Dans tous les cas, le piston est quasiment immobile à chaque instant, autrement dit, il reste quasiment à l'équilibre durant toute la transformation. Cela implique qu'à chaque instant la pression soit la même de part et d'autre du piston, soit :

$$P = P_{\text{ext}} \quad (17)$$

En conséquence, lors de cette **transformation à l'équilibre de pression à chaque instant**, on a :

$$W_{\text{recu}} = - \int_{V_i}^{V_f} P dV \quad (18)$$

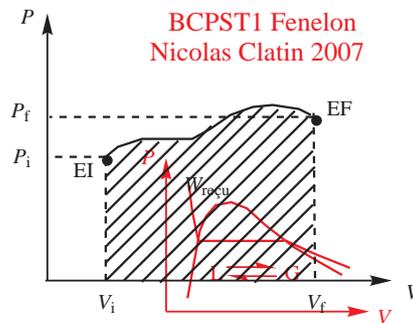
où  $P$  est la **pression du système**. Cela simplifie le calcul, si on connaît l'équation d'état du gaz, qui permet de relier  $P$  à  $V$ .

Prenons le cas d'une variation de volume isotherme de  $n_0$  moles d'un gaz parfait à la température  $T_0$ . Le travail reçu est alors :

$$W_{\text{recu}} = - \int_{V_i}^{V_f} \frac{n_0 R T_0}{V} dV = -n_0 R T_0 \int_{V_i}^{V_f} \frac{dV}{V} = -n_0 R T_0 \ln \frac{V_f}{V_i} \quad (19)$$

La comparaison de cette formule avec (16) montre bien que le travail reçu par le système dépend de la façon de réaliser la transformation.

On peut faire une représentation graphique du travail des forces pressantes. D'après (18),  $|W_{\text{recu}}|$  est l'aire sous la courbe représentative de la pression  $P$  en fonction du volume  $V$ . Le signe est positif si le sens de parcours est tel que  $V$  diminue, il est négatif dans le cas contraire.



### 3.3 Autres travaux ; travail électrique certains droits réservés ne peut pas être vendu

#### 3.3.1 Expression générale d'un travail.

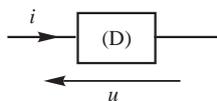
D'une façon générale, le travail élémentaire reçu par un système s'écrit sous la forme :

$$\delta W_{\text{recu}} = \pm y \cdot dX \quad (20)$$

où  $y$  est la grandeur intensive responsable de la transformation et  $X$  la grandeur extensive qui varie sous l'effet de  $y$ .

#### 3.3.2 Travail électrique.

Considérons un dipôle (D), soumis à une tension  $u$ . Cette tension, paramètre intensif, est responsable de la circulation d'une charge  $dq$ , paramètre extensif, pendant le temps  $dt$ .



Le travail reçu par le dipôle est :

$$\delta W_{\text{recu}} = u \cdot dq = u \cdot i dt \quad (21)$$

### 3.3.3 Travail utile.

Dans un certain nombre de cas, le travail des forces pressantes dues à l'atmosphère n'est pas intéressant (il n'est pas contrôlable par l'expérimentateur). On décompose alors le travail en deux parties :

- le travail reçu du fait des forces pressantes  $W_p$ ,
- le travail reçu du fait d'autres causes, appelé le travail utile  $W^*$ .

$$W_{\text{recu}} = W_p + W^* \quad (22)$$

### 3.3.4 Puissance.

On appelle puissance reçue par le système la grandeur :

$$\mathcal{P}_{\text{recue}} = \frac{\delta W_{\text{recu}}}{dt} \quad (23)$$

Cette notion est différente de celle de travail, et n'a pas du tout la même signification. En effet, il est très différent de fournir un même travail en 1 h ou en 1 s. Ainsi, pour soulever un objet lourd, on fournit un travail important pendant un temps très court ; fournir le même travail pendant un temps plus long ne permet pas de soulever l'objet. De même, gagner le 100 m nécessite de fournir un travail important pendant 10 s ; un athlète qui ne consent à fournir ce même travail qu'étalé sur 1 min se ridiculise.

BCPST1 Fenelon  
 Nicolas Clatin 2007

Dans le cas des forces pressantes, la puissance mécanique associée est :

$$\mathcal{P} = -P_{\text{ext}} \frac{dV}{dt} \quad (24)$$

Pour ce qui est de la puissance électrique, on a :

$$\mathcal{P} = \frac{uidt}{dt} = ui \quad (25)$$

certains droits réservés  
 ne peut pas être vendu

## 4 Échanges d'énergie sous forme de chaleur.

### 4.1 Différentes formes de transfert thermique.

La chaleur peut être échangée de trois manières différentes.

Lorsque la chaleur se propage à travers un milieu matériel séparant deux milieux de températures différentes, on parle de *conduction thermique*. C'est le cas de la chaleur qui se propage à travers une tige métallique dont une extrémité est au contact d'une flamme et l'autre tenue par un opérateur... qui finit par se brûler.

La chaleur peut être transférée au cours d'un mouvement d'ensemble de matière. Ainsi, au cours d'une montée de lave, la chaleur est transférée de l'intérieur de la Terre vers l'extérieur, parce que la lave chaude monte. C'est le phénomène de *convection thermique*.

Enfin, la chaleur peut être transférée par *rayonnement*. En effet, les corps chauffés émettent des photons, dans le domaine de l'infra-rouge si les températures ne sont pas trop élevées (être vivant, radiateur), ou dans le domaine visible si la température est plus importante (Soleil). Chacun peut faire l'expérience de chaleur transférée lorsqu'on se met dans un rayon de Soleil plutôt qu'à l'ombre.

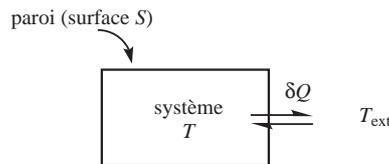
Le phénomène de rayonnement est un mode de transfert propre à la chaleur ; il ne peut être étudié qu'en relation avec l'électromagnétisme. La convection thermique étant un transfert de matière, c'est-à-dire à un phénomène de conduction ou de convection de matière, ne peut pas être étudié dans le cadre des systèmes fermés. Elle sera abordée en seconde année.

### 4.2 La conduction thermique ; résistance thermique.

#### 4.2.1 Puissance thermique reçue en régime permanent.

Considérons un système à la température  $T$ , séparé du milieu extérieur à la température  $T_{\text{ext}}$  par une paroi de surface  $S$ . Il existe alors des transferts thermiques entre l'intérieur et l'extérieur. La puissance thermique reçue par le système pendant le temps  $dt$  est reliée à la quantité de chaleur reçue pendant cet intervalle de temps :

$$P_{\text{recue}} = \frac{\delta Q_{\text{recue}}}{dt} \quad (26)$$



En seconde année, on montrera qu'en régime permanent ou quasi-permanent, soit lorsque la puissance reçue est constante ou quasiment constante au cours du temps, celle-ci a la forme suivante :

$$\frac{\delta Q_{\text{recue}}}{dt} = \frac{T_{\text{ext}} - T}{R_{\text{th}}} \quad (27)$$

La quantité de chaleur échangée entre le système et le monde extérieure est reliée à la différence de température entre les deux côtés de la paroi et à la **résistance thermique**  $R_{\text{th}}$  de la paroi.

#### 4.2.2 Importance de la durée des échanges.

La formule précédente montre que les échanges thermiques sont d'autant plus importants que le temps durant lequel on les laisse se dérouler est grand. En effet, la quantité de chaleur reçue pour une différence de température  $T_{\text{ext}} - T$  constante, est directement proportionnelle au temps :

$$\delta Q_{\text{recue}} = \frac{T_{\text{ext}} - T}{R_{\text{th}}} dt \Rightarrow Q_{\text{recue}} = \frac{T_{\text{ext}} - T}{R_{\text{th}}} \times t \quad (28)$$

Ceci implique que réaliser des échanges thermiques demande du temps ; ceux-ci ne sont pas instantanés. On peut le constater tous les jours lorsqu'on attend que l'eau des nouilles arrive à ébullition ! Une conséquence très importante est la suivante.

Atteindre l'équilibre thermique demande du temps, alors que l'équilibre mécanique est atteint très rapidement.

#### 4.2.3 La résistance thermique.

La résistance thermique est une grandeur caractéristique de la paroi à travers laquelle les échanges thermiques ont lieu. Elle dépend de deux paramètres.

BCPST1 Fenelon

Nicolas Clatin 2007

Le premier paramètre est intrinsèque à la paroi, et dépend de sa nature physico-chimique. Certains matériaux conduisent mieux la chaleur que d'autres. D'une façon générale, les milieux condensés sont de meilleurs conducteurs thermiques que les gaz, ce qui est attendu puisque les transferts thermiques par conduction se font par l'intermédiaire de chocs entre les particules. Cependant, les situations sont très variées : les métaux sont de très bons conducteurs thermiques, mais le diamant par exemple est un isolant. Un matériau massif est plus conducteur qu'un matériau lacunaire (qui comporte des trous remplis d'air, comme le polystyrène expansé).

Le second paramètre est géométrique : plus la surface de contact entre le système et le milieu extérieur augmente, plus la résistance thermique diminue. Ceci est encore logique puisque les transferts thermiques se font par des chocs entre les molécules et la paroi. Ainsi, pour refroidir un milieu, une méthode est d'y placer un serpentín dans lequel circule un fluide froid.

certains droits réservés

ne peut pas être vendu

#### 4.2.4 Réalisation d'une transformation adiabatique.

Lors d'une transformation adiabatique, il n'y a pas d'échange thermique entre le système et le monde extérieur. Pour une différence de température  $T_{\text{ext}} - T$  donnée, on a deux solutions pour que  $\delta Q_{\text{recue}} = 0$  :

- on peut prendre des parois de très grande résistance thermique  $R_{\text{th}} \rightarrow \infty$  (parois calorifugées),
- on peut opérer très vite  $dt = 0$ , de sorte que les échanges thermiques n'aient pas le temps de se faire.

Il est possible de réaliser une transformation adiabatique soit en travaillant dans une enceinte calorifugée, soit en opérant très rapidement.

### 4.3 Notion de thermostat.

On appelle **thermostat** un dispositif capable en théorie de céder ou absorber une quantité infinie d'énergie, sans que sa température ne soit modifiée. Un thermostat peut jouer deux rôles :

- maintenir constante la température du système si ses parois sont diathermanes et s'il ne subit pas de transformation trop rapide,
- servir de source quasiment inépuisable d'énergie.

En pratique, un dispositif très grand devant la taille du système peut servir de thermostat : l'atmosphère ou l'océan pour un moteur par exemple. Il peut aussi s'agir d'un fluide constamment renouvelé, comme un circuit de refroidissement alimenté constamment par une rivière ou l'air.