

Transformation

1. Caractérisation des transformations	1
2. Formes et transferts d'énergie	2
3. Travail des forces de pression	3
4. Transferts thermiques	6

I. Caractérisation des transformations

1) Système et milieu extérieur

Il faut être capable de définir précisément le **système**, l'ensemble des particules étudiées, et le **milieu extérieur**, tout ce qui n'est pas dans le système.

Le système interagira souvent avec le milieu extérieur.

2) Contraintes et évolution

Généralement, le milieu extérieur va imposer un certain nombre de **contraintes**: des paramètres qu'il impose au système (par exemple, la pression du milieu extérieur).

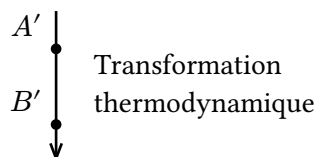
Si l'on modifie les contraintes du milieu extérieur, le système devra nécessairement s'adapter. On étudiera la transformation induite.

3) Définition d'une transformation

On appelle une **transformation thermodynamique** le passage d'un état d'équilibre thermodynamique à un autre état d'équilibre thermodynamique.

Le système passera par une succession d'états où il ne sera pas à l'équilibre.

Variables d'états constantes (État A)



Variables d'états constantes (État B)

Fig. 1. – Aux états A' ou B', le système n'est pas à l'équilibre

4) Transformation élémentaire ou finie

On parle de **transformation élémentaire** si entre deux instants proches (séparés par un intervalle de temps arbitrairement petit dt), les variables d'états du système vont être très proches. On peut la penser comme une transformation continue.

Sinon, on parle de **transformation finie** (transformation discontinue).

5) Transformation quasi-statique

On parle de **transformation quasi-statique** si chaque état par lequel on passe durant la transformation est « infiniment proche » d'un état d'équilibre.

Une transformation quasi-statique est donc très lente par nature.

Φ Note:

La notion de pression dépend du fait que le système est à l'équilibre.

Pour pouvoir mettre une valeur sur la pression pendant une transformation, il faut que cette transformation soit quasi-statique.

6) Différents types de transformation

On définit différents genre de transformation selon les caractéristiques qu'elles vérifient:

- Une transformation est **monobare** si la pression extérieure P_{ext} reste constante pendant la transformation.
- Une transformation est **isobare** si elle est quasistatique et que la pression P à l'intérieur du système reste constante.
(On remarque qu'il faut que la transformation soit quasi-statique pour pouvoir parler de pression)
- Une transformation est **monotherme** si la température extérieure T_{ext} reste constante pendant la transformation.
- Une transformation est **isotherme** si elle est quasistatique et que la température T du système reste constante.
- Une transformation est **isochore** si elle est quasistatique et que le volume V du système reste constant.
- Une transformation est **polytropique d'ordre k** si elle est quasistatique et que PV^k reste constant.

Par exemple, pour $k = 1$, on a PV constant, si on est face à un gaz parfait nRT est constant, donc si on ajoute pas de matière, la température reste constante (et la transformation est isotherme).

✓ Tip:

- Une transformation est « mono— X » si le X *extérieur* reste constant pendant la transformation
- Une transformation est « iso— X » si elle est quasistatique et que le X *intérieur* reste constant.

II. Formes et transferts d'énergie

1) Analyse thermodynamique de la non conservation de l'énergie mécanique

On va s'intéresser de plus près aux frottements. Lorsque des frottements s'appliquent, la conservation de l'énergie mécanique ne s'applique pas (puisque la force de frottement n'est pas conservative).

On va chercher à inclure cette forme d'énergie pour définir une sorte d'énergie « totale » qui elle restera constante.

On observe une dissipation d'énergie sous forme de chaleur (et donc une augmentation de la température) là où il y a des frottements.

On inclut donc l'énergie perdue dans les frottements dans l'**énergie interne** d'un système (on parle de transfert de l'énergie mécanique vers l'énergie interne), et on définit une nouvelle valeur, l'**énergie totale** qui sera conservée.

2) Formes d'énergies

On sépare donc:

- L'énergie mécanique $E_m = E_c + E_p$, qui décrit toutes les énergies **macroscopiques** (qui s'appliquent à un objet dans son ensemble, souvent à notre échelle).
- L'énergie interne $U = E_{c_{\text{micro}}} + E_{p_{\text{micro}}}$ qui décrit toutes les énergies **microscopiques** (somme d'énergies de particules individuelles). L'énergie interne sera toujours liée aux variables d'état du système.

Φ Note:

Dans l'hypothèse des gaz parfaits on considère que $E_{p_{\text{micro}}} = 0$, mais on verra d'autres systèmes thermodynamiques qui eux possèdent une énergie potentielle (par exemple, le modèle de Van der Waals).

On nomme E l'énergie totale, qui se conserve toujours et qui décrit un système dans son ensemble:

$$E = E_m + U$$

3) Transfert d'énergie

On appelle transfert d'énergie le déplacement d'énergie d'un endroit vers un autre ou la transformation d'une énergie en un autre type.

Un **travail** est un transfert d'énergie mécanique en énergie mécanique.

Il peut y avoir transfert d'énergie sans qu'il y ait de travail. On parlera alors toujours de **transfert thermique**.

Φ Note:

Historiquement, on parlait de travail pour les transferts mécaniques, et de chaleur pour les transferts thermiques.

Puis, il fût décidé qu'il fallait banir le terme de chaleur, ce qui a causé la chute de plus d'une copie de concours.

Morale de Badel: c'est con, mais ne jamais dire chaleur.

Φ Note:

On différencie:

- Un **transfert d'énergie**, qu'on notera avec un δ (comme pour le travail élémentaire) (forme différentielle)
- Une **variation d'énergie** avec un d (comme pour l'énergie cinétique) (différentielle totale exacte)

III. Travail des forces de pression

1) Quelle pression?????????

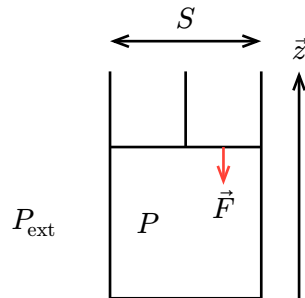
Comme on l'a dit précédemment, on avait défini la pression à l'équilibre.

Si on veut parler de travail des forces de pression, il faut qu'il y ait travail, or si il y a travail il y a transfert d'énergie, et on est plus à l'équilibre.

Pour parler de pression pendant un travail, on utilisera la pression extérieure.

2) Travail des forces de pression au cours d'une transformation

On prend un exemple assez simple:

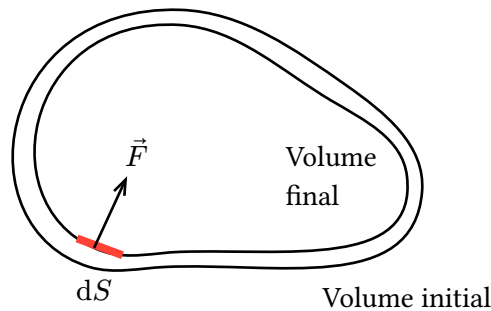


On appelle \vec{F} la force exercée par la pression extérieure sur le système (à travers le piston).

On pose le travail élémentaire de la force \vec{F} :

$$\begin{aligned}\delta W &= \vec{F} \cdot d\vec{OM} \\ &= -(P_{\text{ext}} S) dz \\ &= -P_{\text{ext}} (S dz)\end{aligned}$$

En prenant une situation un peu plus générale:



On peut généraliser la relation vue précédemment:

$$\delta W = -P_{\text{ext}} dV$$

Donc le travail au cours d'une transformation est:

$$W = - \int_{\text{initial}}^{\text{final}} P_{\text{ext}} dV$$

3) Travail reçu ou fourni

Si le volume V diminue pendant la transformation, dV le changement élémentaire du volume sera négatif, et le travail élémentaire δW sera donc positif.

Le travail sera donc **reçu** par le système.

À l'inverse, si le volume V augmente, le travail est fourni par le système.

Note:

Convention: un travail positif est reçu et un travail négatif est fourni.

✓ Tip:

Par exemple: Il faut fournir du travail pour gonfler un ballon (luter contre la pression extérieure), et le ballon se dégonfle « tout seul » par le travail de la pression extérieure.

4) Travail des forces de pression pour des transformations quasistatiques

Dans une transformation quasistatique, à chaque instant, on est infiniment proche d'un état d'équilibre et donc notamment d'un équilibre mécanique.

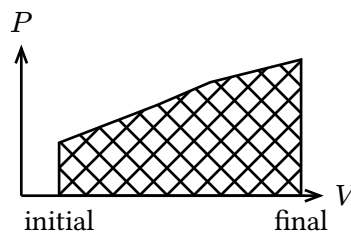
Si on est à l'équilibre mécanique, alors il y a égalité entre la pression extérieure et la pression intérieure.

Donc, en supposant $P_{\text{ext}} \approx P$, on a:

$$\delta W = -P_{\text{ext}} dV \approx -P dV$$

On a donc $W = - \int_{\text{initial}}^{\text{final}} P dV$

C'est juste l'aire (opposée) sous la courbe du diagramme (P, V)!



5) Quelques calculs de travaux de forces de pression

Pour différentes types transformations:

- Isochore: le volume reste constant, donc $W = 0$ par définition
- Monobare: la pression extérieure reste constante, donc:

$$W = - \int_{\text{initial}}^{\text{final}} P_{\text{ext}} dV = -P_{\text{ext}} \Delta V$$

- Isobare: la transformation est quasistatique et la pression interne reste constante, donc:

$$W = - \int_{\text{initial}}^{\text{final}} P_{\text{ext}} dV \approx - \int_{\text{initial}}^{\text{final}} P dV = -P \Delta V$$

- Isotherme: (si on se place dans un gaz parfait) la transformation est quasistatique, et la température reste constante, donc si on ajoute pas de matière, nRT reste constant:

$$\begin{aligned} W &= - \int_{\text{initial}}^{\text{final}} P_{\text{ext}} dV \approx - \int_{\text{initial}}^{\text{final}} P dV \\ &= - \int_{\text{initial}}^{\text{final}} \frac{nRT}{V} dV \\ &= -nRT [\ln V]_{\text{initial}}^{\text{final}} \\ &= nRT \ln \left(\frac{V_{\text{initial}}}{V_{\text{final}}} \right) \end{aligned}$$

- Polytropique d'ordre k : la transformation est quasistatique, et PV^k est constant, donc:

$$\begin{aligned} W &= - \int_{\text{init}}^{\text{final}} P_{\text{ext}} dV \approx - \int_{\text{init}}^{\text{final}} P dV \\ &= - \int_{\text{init}}^{\text{final}} PV^k \frac{1}{V^k} dV \\ &= -PV^k \int_{\text{init}}^{\text{final}} V^{-k} dV \end{aligned}$$

On pose $C = PV^k$, la valeur qui reste constante. On a donc $C = P_{\text{init}} V_{\text{init}}^k = P_{\text{fin}} V_{\text{fin}}^k$

Si $k = 1$

$$\begin{aligned} W &= -C[\ln(V)]_{\text{init}}^{\text{fin}} \\ &= -C \ln\left(\frac{V_{\text{fin}}}{V_{\text{init}}}\right) \\ &= C \ln\left(\frac{V_{\text{init}}}{V_{\text{fin}}}\right) \\ &= PV \ln\left(\frac{V_{\text{init}}}{V_{\text{fin}}}\right) \end{aligned}$$

Si $k > 1$

$$\begin{aligned} W &= -C \left[\frac{1}{k-1} V^{1-k} \right]_{\text{init}}^{\text{fin}} \\ &= -\frac{C}{k-1} \times \left(\frac{1}{V_{\text{fin}}^{k-1}} - \frac{1}{V_{\text{init}}^{k-1}} \right) \\ &= \frac{1}{k-1} \times \left(\frac{C}{V_{\text{init}}^{k-1}} - \frac{C}{V_{\text{fin}}^{k-1}} \right) \\ &= \frac{1}{k-1} \times \left(\frac{P_{\text{init}} V_{\text{init}}^k}{V_{\text{init}}^{k-1}} - \frac{P_{\text{fin}} V_{\text{fin}}^k}{V_{\text{fin}}^{k-1}} \right) \\ &= \frac{P_{\text{init}} V_{\text{init}} - P_{\text{fin}} V_{\text{fin}}}{k-1} \end{aligned}$$

6) Lien avec la puissance

On rappelle la définition de la puissance en fonction du travail: $\mathcal{P} = \frac{\delta W}{dt}$ (ou $\delta W = \mathcal{P} dt$)

On sera parfois amené à parler de puissance des forces de pressions plutôt que de travail, il suffit d'appliquer la définition.

IV. Transferts thermiques

1) Origine microscopique

Les transferts thermiques traduisent la non-conservation des transferts mécaniques.

Ils se manifestent donc dans le cadre des forces *non-conservatives*.

De la même manière qu'on exprime l'*agitation thermique* microscopique avec la *température* macroscopique, les transferts thermiques expriment de manière macroscopique le déplacement de cette agitation.

2) Puissance et transferts thermiques

On pose \mathcal{P}_{th} la puissance thermique, définie par:

$$\mathcal{P}_{\text{th}} = \frac{\delta Q}{dt} \text{ ou } \delta Q = \mathcal{P}_{\text{th}} dt$$

(avec Q la notation pour les transferts thermiques, comme W est la notation pour les travaux)

3) Différents types de transferts thermique

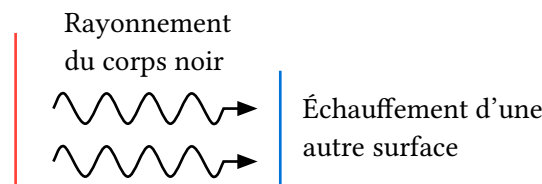
On répertorie trois types de transferts thermiques différents:

- **Convection thermique:** Déplacement de température pour une raison autre que l'agitation thermique.
Par exemple: on déplace physiquement un objet chaud ou un courant d'air chaud monte.
- **Diffusion thermique:** Diffusion microscopique de la température par l'agitation thermique.



- **Rayonnement:** Création d'ondes électromagnétique par agitation thermique, et création d'agitation thermique par l'interaction entre les ondes électromagnétiques et la matière.

Exemple: Rayonnement solaire



4) Régime stationnaire - Notion de résistance thermique

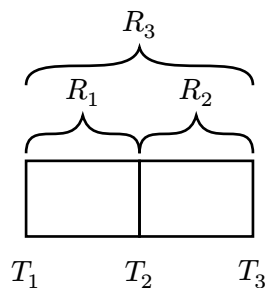
Pour chaque concept en électricité, on a des concepts analogues pour les transferts thermiques:

Concept	Électricité	Thermique
Différence de potentiel	<p>Notion de tension:</p> $V_1 - V_2 = U \text{ (volts)}$ <p>Énergie potentielle associée:</p> $\vec{E} = - \overrightarrow{\text{grad}} V$ <p>Et on verra \vec{j}, la densité volumique de courant:</p> $\vec{j} = \underbrace{\sigma}_{\text{conductivité}} \vec{E}$	<p>Différentiel thermique:</p> $T_1 - T_2 = \Delta T \text{ (kelvins)}$ <p>Énergie potentielle associée:</p> $- \overrightarrow{\text{grad}} T$ <p>Loi de Fourier, avec \vec{j}_{th} la densité volumique thermique:</p> $\vec{j}_{\text{th}} = - \underbrace{\lambda}_{\text{conductivité thermique}} \overrightarrow{\text{grad}} T$
Flux	<p>En intégrant la densité de courant: on obtient le flux d'électricité (l'intensité)</p> $I = \iint \vec{j} \cdot d\vec{S} \text{ (ampères)}$ <p>(On intègre sur une surface, typiquement un câble)</p>	<p>En intégrant la densité volumique thermique, on obtient le flux thermique:</p> $\phi_{\text{th}} = \iint \vec{j}_{\text{th}} \cdot d\vec{S} \text{ (watts)}$

Résistance	<p>On définit la résistance électrique par:</p> $R = \frac{U}{I} \text{ (ohms)}$ <p>Si on se place sur un câble de section S, et de longueur l, et de conductivité σ:</p> $R = \frac{1}{\sigma} \frac{l}{S} = \underbrace{\rho}_{\text{résistivité}} \frac{l}{S}$	<p>On définit la résistance thermique par:</p> $R_{\text{th}} = \frac{\Delta T}{\phi_{\text{th}}} \text{ (kelvins/watts)}$ <p>Si on se place sur un objet de longueur l, de surface S et de conductivité thermique constante λ, on obtient de même la résistivité thermique:</p> $R_{\text{th}} = \frac{1}{\lambda} \frac{l}{S}$
------------	---	---

De la même manière qu'on peut associer des résistances électriques en série ou en parallèle, on peut associer des résistances thermiques:

Si on place des objets les uns après les autres (par exemple: le double vitrage d'une fenêtre), on associe des résistances en série:



ϕ_{th} constant et les ΔT s'ajoutent.

$$R_3 = \frac{T_1 - T_3}{\phi_{\text{th}}} = \frac{T_1 - T_2}{\phi_{\text{th}}} + \frac{T_2 - T_3}{\phi_{\text{th}}} = R_1 + R_2$$

On généralise:

$$R_{\text{th}} = \sum_i R_{\text{th},i}$$

Si on place des objets les uns à cotés des autres (par exemple: différents pans de murs), on associe des résistances en parallèle:



ϕ_{th} s'ajoutent et ΔT reste constant:

$$\frac{1}{R_3} = \frac{\phi_{\text{th}}}{T_1 - T_2} = \frac{\phi_{\text{th}1}}{T_1 - T_2} + \frac{\phi_{\text{th}2}}{T_1 - T_2} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

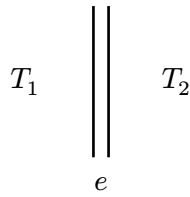
On généralise:

$$\frac{1}{R_{\text{th}}} = \sum_i \frac{1}{R_{\text{th},i}}$$

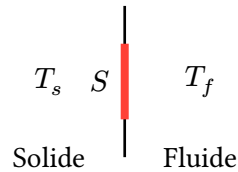
5) Transfert surfacique entre solide et fluide - Loi de Newton

Supposons deux objets de température différente T_1 et T_2 qui sont posés l'un contre l'autre.

En général, il y a une petite épaisseur e entre les deux (et on retrouve alors une association en série comme vu précédemment)



À l'inverse, si un fluide est posé contre un solide, on suppose qu'ils sont en contact direct:



En s'intéressant à la surface de contact S , le transfert thermique sera de la forme:

$$\mathcal{P}_{\text{th},s \rightarrow f} = \underbrace{h}_{\text{constante de proportionnalité}} (T_s - T_f) S$$

6) Transformation adiabatique

On appelle **transformation adiabatique** une transformation dans laquelle aucun transfert thermique ne s'opère.

✓ Tip:

On ne dira pas toujours explicitement qu'il n'y a une absence de transferts thermique. Pour savoir si une transformation est adiabatique, faire très attention aux informations de l'énoncé:

- Si la transformation s'effectue sur des objets avec des **parois calorifugées**, aucun transfert thermique ne s'opère.
- De même sur des objets avec des **parois athermanes**. (À l'inverse, des parois *diathermanes* laissent passer les transferts thermiques)
- Si les transferts s'effectuent **rapidement**, on considère que les transferts thermiques n'ont pas le temps de s'opérer.

7) Lien avec les transformation monothermes et isothermes

!! Caution:

Transformation adiabatique **n'est pas** synonyme de transformation isotherme ou monotherme! Il n'y a *aucune* implication, ni dans un sens, ni dans l'autre.

Dans une transformation monotherme, l'extérieur reste à température constante, ce qui implique très souvent un transfert thermique de l'extérieur vers l'intérieur.

De même pour une transformation isotherme, qui de plus est quasistatique, et qui doit donc être plutôt lente (l'inverse de ce qu'on veut pour observer une transformation adiabatique)