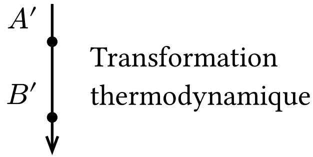
Anki

q: Définition: Transformation thermodynamique
a: C’est le passage d’un état d’équilibre thermodynamique à un autre état d’équilibre thermodynamique

$\longrightarrow$ 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)

Figure 1: Aux états A' ou B', le système n’est pas à l’équilibre

Anki

q: Définition: Transformation (thermodynamique) élémentaire
a: On parle de **transformation élémentaire** si entre deux instants proches (séparés par un intervalle de temps arbitrairement petit $\mathrm{d}t$), les variables d'états du système vont être très proche.

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

Remarque:
$\longrightarrow$ On peut la penser comme une transformation continue.

Anki

q: Définition: Transformation (thermodynamique) quasi-statique
a: 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**.

Exemple:
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.

Anki

q:

Types de transformations thermodynamiques

- Transformation **monobare**
- Transformation **isobare**
- Transformation **monotherme**
- Transformation **isotherme**
- Transformation **isochore**

a:

Types de transformations thermodynamiques

- Transformation **monobare**: pression extérieure P_{ext} reste constante
- Transformation **isobare**: quasistatique et la pression P à l'intérieur du système reste constante
- Transformation **monotherme**: température extérieure T_{ext} reste constante
- Transformation **isotherme**: quasistatique et la température T du système reste constante
- Transformation **isochore**: quasistatique et le volume V du système reste constant

Éléments de méthode:

- 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.

Anki

q: Définition: Transformation polytropique d'ordre k

a: Une transformation est **polytropique d'ordre k** si elle est quasistatique et que PV^k reste constant.

Exemple:
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).

Anki

q: Définition Thermodynamique: énergie interne, énergie totale

a: On sépare:

- 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).
  $\longrightarrow$ Sera toujours liée aux variables d'état du système

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

$$E = E_m + U$$

Remarque:
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 inclus donc l'énergie perdu dans les frottements dans l'énergie interne d'un système (*on parle de transfert de l'énergie mécanique vers l'énergie interne*)

Anki

q: Définition Thermodynamique:

- Transfert d’énergie
- Travail
- Transfert thermique

a:

- **Transfert d’énergie**: déplacement d’énergie d’un endroit vers un autre ou la transformation d’une énergie en un autre type
- **Travail**: transfert d’énergie mécanique en énergie mécanique
- **Transfert thermique**: transfert d’énergie sans qu’il y ait de travail.

Anki

q: Notation: Transfert d'énergie vs variation d'énergie

a: On différentie:

- 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)

Anki

q: De quelle pression parle-t-on quand on parle de pression *pendant un travail*?
a: 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**.

Anki

q:

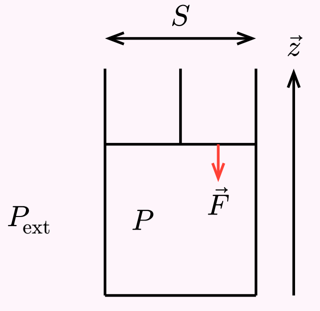
Travail des forces de pression au cours d'une transformation

a:

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

$$W = -\int_{\text{initial}}^{\text{final}} P_{\text{ext}}\, \mathrm{d}V$$

Éléments de preuve:
On prend un exemple assez simple:

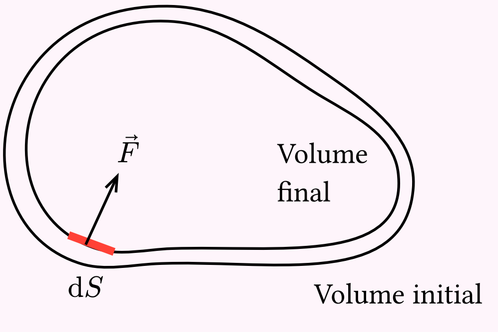


On appelle $\vec{F}$ la force exercée par la pression extérieur sur le système (à travers le piston).

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

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

En prenant une situation un peu plus générale:



On peut généraliser la relation vue précédemment:

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

Donc le travail au cours d'une transformation est:

$$W = -\int_{\text{initial}}^{\text{final}} P_{\text{ext}}\, \mathrm{d}V$$

Anki

q: Thermodynamique: Travail Reçu ou Fourni
a: Volume V diminue pendant la transformation $\Longrightarrow \mathrm{d}V$, le changement élémentaire du volume sera négatif $\Longrightarrow \delta W > 0$, travail **reçu**

Sinon, si le volume V augmente, le travail est **fourni**

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

Exemple:
Il faut fournir du travail pour gonfler un ballon (luter contre la pression extérieur), et le ballon se dégonfle "tout seul" par le travail de la pression extérieur.

Anki

q:

Travail des forces de pression pour des transformations quasistatiques

a: $\longrightarrow$ À chaque instant, on est infiniment proche d'un état d'équilibre et donc notamment d'un équilibre mécanique
$\longrightarrow$ équilibre mécanique $\Longrightarrow P_{\text{ext}} = P$

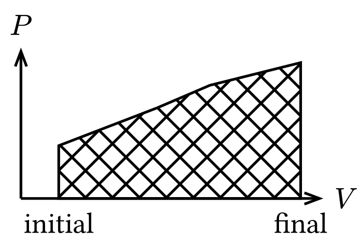
Donc, en supposant $P_{\text{ext}} \approx P$, on a:

$$\delta W = -P_{\text{ext}} \, \mathrm{d}V \approx -P \, \mathrm{d}V$$

On a donc

$$W = -\int_{\text{initial}}^{\text{final}} P \, \mathrm{d}V$$

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



Anki

q:

Calculs de travaux de forces de pression

Pour différents types de transformations:
- Isochore
- Monobare
- Isobare
- Isotherme (dans le cadre d'un gaz parfait)

a: Pour différents types de transformations:
- Isochore: le volume reste constant, donc $\boldsymbol{W = 0}$ par définition
- Monobare: la pression extérieur reste constante, donc:

$$W = -\int_{\text{initial}}^{\text{final}} P_{\text{ext}} \,\mathrm{d}V = \boldsymbol{-P_{\text{ext}} \Delta V}$$

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

$$W = -\int_{\text{initial}}^{\text{final}} P_{\text{ext}} \,\mathrm{d}V \approx -\int_{\text{initial}}^{\text{final}} P \,\mathrm{d}V = \boldsymbol{-P \Delta V}$$

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

$$\boldsymbol{W = nRT \ln\left(\frac{V_{\text{initial}}}{V_{\text{final}}}\right)}$$

Éléments de preuve:
Pour Isotherme: nRT reste constant:

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

Anki

q:

Travail de la force de pression
Lors d'une transformation polytropique d'ordre k
a:

$$W = -\boldsymbol{PV^k} \int_{\textbf{init}}^{\textbf{final}} \boldsymbol{V^{-k}\, \mathrm{d}V}$$

Éléments de preuve:
PV^k est constant, donc:

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

On pose $C = PV^k$, la valeur qui reste constante. On a donc

$$C = P_{\text{init}} V_{\text{init}}^k = P_{\text{fin}} V_{\text{fin}}^k$$

$\boxed{\textbf{Si } \boldsymbol{k = 1}}$

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

$\boxed{\textbf{Si } \boldsymbol{k > 1}}$

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

Anki

q: Définition: Origine microscopique des transferts thermiques
a:

- traduisent la non-conservation des transferts mécaniques: se manifestent donc dans le cadre des forces *non-conservatives*
- De meme qu'on exprime l'*agitation thermique* microscopique avec la *température* macroscopique, les transferts thermiques expriment de manière macroscopique le déplacement de cette agitation

Anki

q: Définition: Puissance thermique
a: On pose $\mathcal{P}_{\mathrm{th}}$ (en W) la puissance thermique, définie par:

$$\mathcal{P}_{\mathrm{th}} = \frac{\delta Q}{\mathrm{d}t} \text{ ou } \delta Q = \mathcal{P}_{\mathrm{th}} \, \mathrm{d}t$$

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

Anki

q:

Types de transferts thermiques

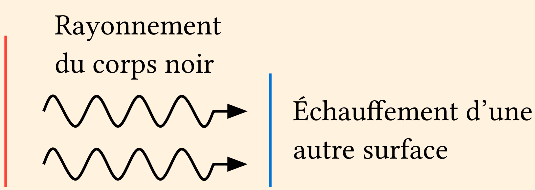
a: On répertorie trois types de transferts thermiques différents:

- 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:
Exemple: Rayonnement solaire



Anki

q:

Régime stationnaire - Notion de résistance thermique
Analogie entre Électricité et transferts thermiques:

Concept	Électricité	Thermique
Différence de potentiel	Notion de tension: $$V_1 - V_2 = U \ \text{(volts)}$$ Énergie potentielle associée: $$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}\, V$$ Et on verra $\vec{\jmath}$, la densité volumique de courant: $$\vec{\jmath} = \underbrace{\sigma}_{\text{conductivité}} \vec{E}$$	Différentiel thermique: ? Énergie potentielle associée: ? Loi de Fourier, avec $\overrightarrow{j_{\text{th}}}$ la densité volumique thermique: ?
Flux	En intégrant la densité de courant: on obtient le flux total (l'intensité) $$I = \iint \vec{\jmath} \cdot \mathrm{d}\vec{S} \ \text{(ampères)}$$ (On intègre sur une surface, typiquement un câble)	En intégrant la densité volumique thermique, on obtient le flux thermique: ?
Résistance	On définit la résistance electrique par: $$R = \frac{U}{I} \ \text{(ohms)}$$ Si on se place sur un cable de section S, et de longueur l, et de conductivité σ: $$R = \frac{1}{\sigma}\frac{l}{S} = \underbrace{\rho}_{\text{résistivité}} \frac{l}{S}$$	Si on se place sur un objet de longueur l, de surface S et de conductivité thermique constant λ, on obtient de même la résistivité thermique: ?

a:

Concept	Électricité	Thermique
Différence de potentiel	Notion de tension: $$V_1 - V_2 = U \ \text{(volts)}$$ Énergie potentielle associée: $$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}\, V$$ Et on verra $\vec{\jmath}$, la densité volumique de courant: $$\vec{\jmath} = \underbrace{\sigma}_{\text{conductivité}} \vec{E}$$	Différentiel thermique: $$\boldsymbol{T_1 - T_2} \ \textbf{(kelvins)}$$ Énergie potentielle associée: $$-\overrightarrow{\textbf{grad}}\, \boldsymbol{T}$$ Loi de Fourier, avec $\overrightarrow{j_{\text{th}}}$ la densité volumique thermique: $$\overrightarrow{\boldsymbol{j}_{\textbf{th}}} = -\underbrace{\boldsymbol{\lambda}}_{\textbf{conductivité thermique}} \overrightarrow{\textbf{grad}}\, \boldsymbol{T}$$
Flux	En intégrant la densité de courant: on obtient le flux total (l'intensité) $$I = \iint \vec{\jmath} \cdot \mathrm{d}\vec{S} \ \text{(ampères)}$$ (On intègre sur une surface, typiquement un câble)	En intégrant la densité volumique thermique, on obtient le flux thermique: $$\boldsymbol{\phi}_{\textbf{th}} = \iint \overrightarrow{\boldsymbol{j}_{\textbf{th}}}\, \mathbf{d}\vec{\boldsymbol{S}} \ \textbf{(watts)}$$
Résistance	On définit la résistance electrique par: $$R = \frac{U}{I} \ \text{(ohms)}$$ Si on se place sur un cable de section S, et de longueur l, et de conductivité σ: $$R = \frac{1}{\sigma}\frac{l}{S} = \underbrace{\rho}_{\text{résistivité}} \frac{l}{S}$$	Si on se place sur un objet de longueur l, de surface S et de conductivité thermique constant λ, on obtient de même la résistivité thermique: $$\boldsymbol{R}_{\textbf{th}} = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{\lambda}}\frac{\boldsymbol{l}}{\boldsymbol{S}} \ (\mathbf{K \cdot W^{-1}})$$

Anki

q:

Association en série ou en parallèle de résistances thermiques

a: De la même manière qu’on peut associer des résistance 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:

$$\phi_{\text{th}} \text{ constante et les } \Delta T \text{ s'ajoutent.}$$
$$\text{On prouve de la même manière qu'en électricité que:}$$
$$R_{\text{th}} = \sum_i R_{\text{th},i}$$

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

$$\phi_{\text{th}} \text{ s'ajoutent et les } \Delta T \text{ restent constante}$$

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

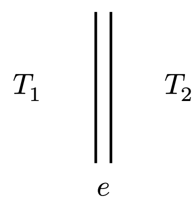
Anki

q:

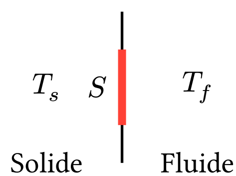
Transfert surfacique entre solide et fluide - Loi de Newton

a: 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 précedemment)



Si un fluide est posé contre un solide, on suppose qu'il est en contact direct:



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

$$\boxed{\mathcal{P}_{\text{th},s\to f} = \underbrace{h}_{\substack{\text{constante de}\\ \text{proportionalité}}} (T_s - T_f) S}$$

Anki

q: Définition: Transformation adiabatique
a: Une transformation dans laquelle **aucun transfert thermique** ne s'opère.

Remarque:

⚠️ 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.

Anki

q: Conditions où l'on peut se ramener à une transformation adiabatique
a: **On ne dira pas toujours explicitement qu'il n'y a une absence de transferts thermique.**

On peut s'y ramener:

- 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 considèreque les transferts thermiques n'ont pas le temps de s'opérer.

Anki

q:

Lien Transformation adiabatique $\leftrightarrow$ transformation monothermes et isothermes

a: $\boxed{\textbf{Transformation monotherme}}$

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

$\longrightarrow$ Souvent non adiabatique

$\boxed{\textbf{Transformation isotherme}}$

extérieur reste à température constante, et en plus on est quasistatique, ce qui implique une réaction plutot lente

$\longrightarrow$ Souvent non adiabatique