

Thermodynamique – Chapitre 3 : Transformations thermodynamiques d'un système et transferts associés

- I. Compléments sur la description d'un système thermodynamique et la notion d'équilibre thermodynamique**
 1. Grandeurs du système et grandeurs de transfert ou d'échange
 2. Types de systèmes
 3. Compléments sur l'équilibre thermodynamique : équilibres mécanique et thermique
- II. Transformation d'un système**
 1. État hors équilibre : transformation
 2. Transformations finies et infinitésimales
 3. Transformations brutales
 4. Transformations lentes (quasi-statique) : succession d'états d'équilibre internes
 5. Noms des transformations usuelles
- III. Transferts d'énergie sous forme de travail mécanique**
 1. Travail élémentaire des forces pressantes extérieures
 2. Travail des forces pressantes extérieures pour une transformation finie
 3. Quelques exemples de calculs
 4. Visualisation graphique
 5. Puissance mécanique
- IV. Transferts d'énergie sous forme de transfert thermique**
 1. Notion de transfert thermique
 2. Flux ou puissance thermique
 3. Les trois modes de transfert thermique
 4. Flux thermique conductif en géométrie unidimensionnelle : notion de résistance thermique
 5. Flux thermique conducto-convectif : loi de Newton
 6. Flux thermique par rayonnement : modèle du corps noir

Extrait du programme de BCPST 1

Notions	Capacités exigibles
<p>Transformations thermodynamiques Transformation thermodynamique d'un système. Transformations isochore, isobare et monobare. Thermostat, transformations monotherme et isotherme.</p> <p>Travail Travail des forces de pression</p> <p>Transferts thermiques Modes de transferts thermiques. Transformation adiabatique. Flux thermique conductif en géométrie unidimensionnelle ; résistance thermique. Flux thermique conducto-convectif : loi de Newton. Approche descriptive du rayonnement du corps noir. Loi du déplacement de Wien, loi de Stefan-Boltzmann.</p>	<p>Identifier et définir un système ouvert, fermé, isolé. Exploiter les conditions imposées par le milieu extérieur au système pour déterminer l'état d'équilibre final.</p> <p>Évaluer un travail par découpage en travaux élémentaires et sommation sur un chemin donné dans le cas d'une seule variable. Interpréter géométriquement le travail des forces de pression dans un diagramme de Clapeyron ou de Watt.</p> <p>Caractériser qualitativement les trois modes de transfert thermique : conduction, convection et rayonnement. Exploiter la relation entre flux thermique, résistance thermique et écart de température, l'expression de la résistance thermique étant fournie.</p>

Ce qu'il faut retenir de ce chapitre

Savoirs

Définitions : type de système, équilibre thermodynamique, équilibre thermique, équilibre mécanique, transformation.

Notion de transformation brutale ou quasistatique

Maîtriser le vocabulaire usuel : isotherme, isobare, isochore, monobare, monotherme, adiabatique, thermostat

Expression du travail élémentaire des forces pressantes.

Connaître les trois types de transferts thermiques : conduction, convection et rayonnement.

Flux thermique conductif en géométrie unidimensionnelle : relation entre flux et ΔT , notion de résistance thermique.

Flux thermique conducto-convectif : loi de Newton.

Approche descriptive du rayonnement du corps noir. Loi du déplacement de Wien, loi de Stefan-Boltzmann.

Définitions des puissances mécaniques et thermiques.

Savoir-faire

Identifier et définir un système ouvert, fermé, isolé.

Déterminer l'état d'équilibre final à partir des contraintes imposées par le milieu extérieur.

Évaluer un travail par découpage en travaux élémentaires et sommation sur un chemin donné dans le cas d'une seule variable.

Calculer un transfert d'énergie à partir de la puissance/du flux reçu(e) (mécanique ou thermique)

Caractériser qualitativement les trois modes de transfert thermique : conduction, convection et rayonnement.

Exploiter la relation entre flux thermique, résistance thermique et écart de température, l'expression de la résistance thermique étant fournie.

Exploiter les lois de Newton, du déplacement de Wien, de Stefan-Boltzmann (pour ces dernières une application à l'effet de serre sera vue plus tard).

I. Compléments sur la description d'un système thermodynamique et la notion d'équilibre thermodynamique

1. Grandeurs du système et grandeurs de transfert ou d'échange

Convention de notation concernant les paramètres :

Par convention toute grandeur utilisée en thermodynamique est une **grandeur du système**. Pour parler d'une grandeur du milieu extérieur il faut le préciser en indice.

Exemple :

p : pression du système
 p_{ext} : pression du milieu extérieur

Grandeurs de transfert :

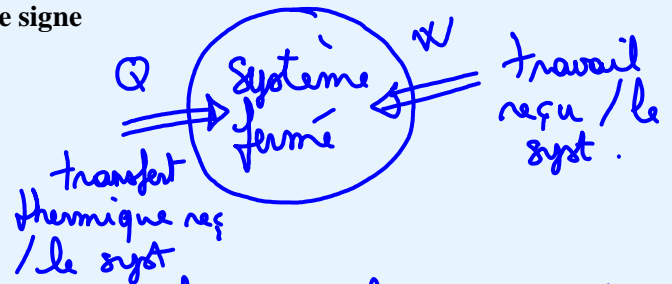
Le système peut subir des transferts (grandeurs qui traversent la surface S) de différents types :

Transferts d'énergie : \oplus transferts thermiques : Q
 \otimes transferts d'énergie sous forme de travail : W

Transferts de matière : ΔN (ng absents si le syst est fermé)

Conventions de signe

Par convention, une grandeur de transfert est une **grandeur reçue** par le système (W signifie implicitement W_{rec}). Si vous voulez parler d'une grandeur de transfert fournie par le système au milieu extérieur, il faut le préciser en indice.



La convention de signe s'en déduit :

- \oplus si la grandeur de transfert est > 0 , cela signifie que le syst reçoit réellement ce transfert de la part de l'extérieur
- \otimes réellement un transfert à l'ext. < 0 , $W_{fourni} = -W_{rec}$ | cède fournit

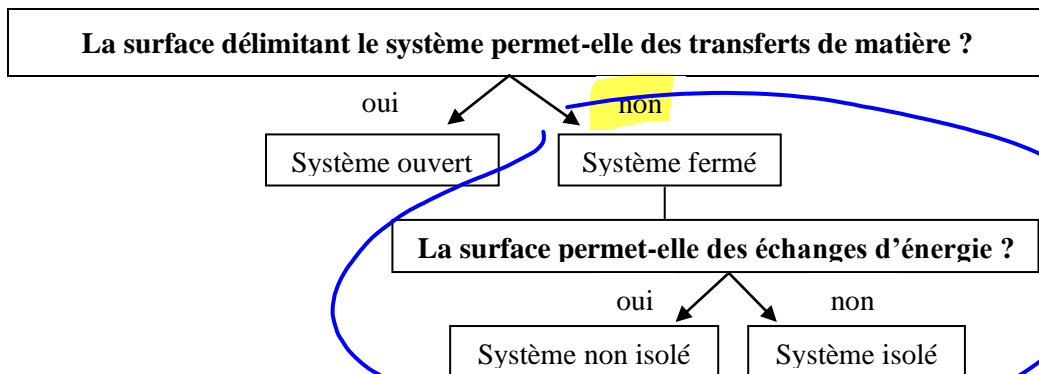
2. Types de systèmes

Définitions : suivant la présence ou l'absence de ces transferts, on donne un qualificatif au type de système étudié

Système ouvert : peut subir des transferts de matière et d'énergie (ex: organisme vivant)

Système fermé : ne peut subir que des transferts d'énergie (ex: l'eau d'un circuit de chauffage)

Système isolé : ne peut subir aucun transfert (ex: café ds une bouteille "thermos")



Remarque : on distinguera aussi la thermodynamique physique : les molécules du système ne subissant pas de transformation chimique et la thermodynamique chimique : les molécules du système subissant des transformations chimiques.

3. Compléments sur l'équilibre thermodynamique : équilibres mécanique et thermique

On rappelle les notions vues dans le chapitre 1.

Equilibre interne : un système est dans un état d'équilibre interne quand tous ces paramètres d'état intensifs (p , T , concentrations, etc.) sont uniformes (même valeur en tout point du système). Dans ce cas, chaque paramètre intensif du système peut être défini par une valeur précise et unique puisque non fonction du point de mesure au sein du système.

Equation d'état : lorsqu'un système est à l'état d'équilibre interne, il existe une relation entre les paramètres d'état du système, appelée équation d'état.

L'équation d'état d'un gaz dans le modèle du gaz parfait s'écrit : $pV = nRT$. L'équation d'état d'une phase condensée dans le modèle de la phase incompressible et indilatable s'écrit : $V = \text{cste}$.

Equilibre thermodynamique : un système est en équilibre thermodynamique, s'il est en état d'équilibre interne (paramètres d'état intensifs uniformes) et si les paramètres d'état sont constants (aucune évolution au cours du temps). Cela implique qu'il n'y ait aucun échange, ni de matière, ni d'énergie au sein du système, ni avec le milieu extérieur.

Conditions de l'équilibre thermodynamique

- ⊕ l'eq. thermodynamique d'un système impose l'équilibre thermique (pas de transfert thermique) et l'eq. mécanique (pas de travail mécanique)
- ⊕ si le syst est en "contact mécanique" avec l'ext l'eq. mécanique impose des conditions particulières
- "contact thermique" ——— l'eq. thermique

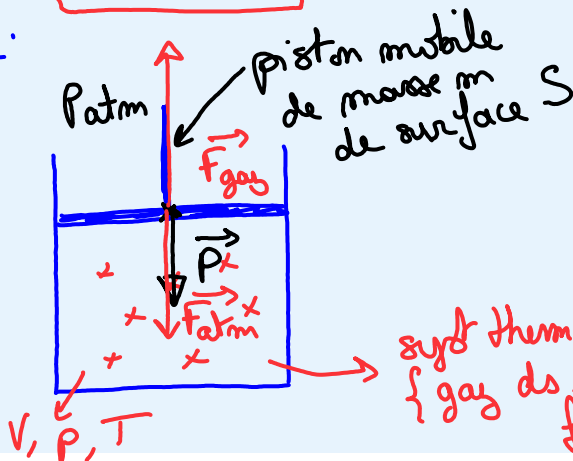
a. En cas de contact mécanique avec l'extérieur

le syst. est en "contact mécanique" avec l'extérieur si les parois qui le délimitent sont déformables ou mobiles.

⇒ l'eq. mécanique du syst impose un eq. mécanique avec l'ext :

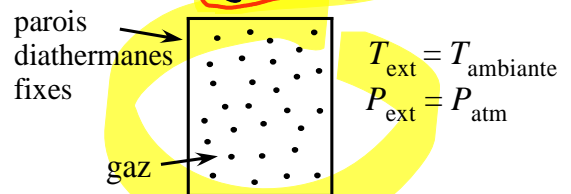
$$p = P_{\text{ext}}$$

ex :



syst mécanique piston
 bdf : poids du piston $\vec{P} = m\vec{g} \Rightarrow \|\vec{P}\| = mg$
 force pressante de l'atm : $\|\vec{F}_{\text{atm}}\| = p_{\text{atm}} S$
 force pressante du gaz : $\|\vec{F}_{\text{gas}}\| = p S$
 condit° d'eq. mécanique $\sum \vec{F} = \vec{0}$
 $\Rightarrow mg + P_{\text{atm}} S = p S$
 $\Leftrightarrow p = \frac{mg}{S} + P_{\text{atm}} \rightarrow P_{\text{ext}}$

Si les parois sont fixes alors l'équilibre thermodynamique peut être atteint sans réalisation de l'équilibre mécanique avec l'extérieur : le système n'est pas en contact mécanique avec l'extérieur, il est dit isolé mécaniquement.



équilibre thermique : $T = T_{\text{ambiante}}$

absence d'équilibre mécanique avec l'extérieur : $P \neq P_{\text{atm}}$

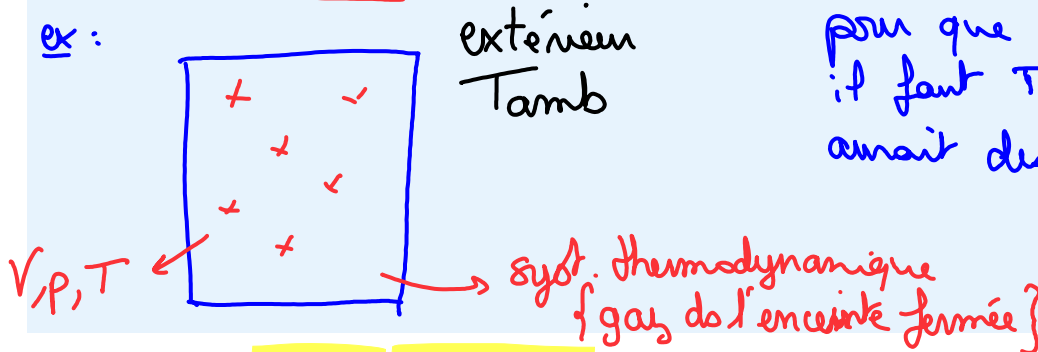
b. En cas de contact thermique avec l'extérieur

Le syst. est en "contact thermique" avec l'extérieur si les parois qui le délimitent laissent passer les transferts thermiques (Les parois sont dites diathermanes \neq athermanes)

\Rightarrow l'éq. thermique du syst impose un éq. thermique avec l'ext.

$$T = T_{\text{ext}}$$

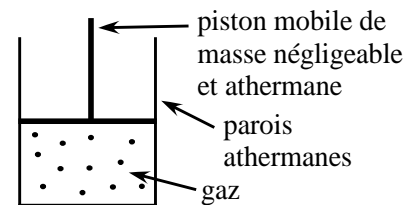
ex :



pour que le syst soit à l'éq. il faut $T = T_{\text{amb}}$ sinon il y aurait des échanges thermiques $\rightarrow T_{\text{ext}}$

Si les parois sont athermanes (ne laissent pas passer les transferts thermiques) alors l'équilibre thermodynamique peut être atteint sans réalisation de l'équilibre thermique : le système n'est pas en contact thermique avec l'extérieur, il est isolé thermiquement.

$$\begin{aligned} T_{\text{ext}} &= T_{\text{ambiante}} \\ P_{\text{ext}} &= P_{\text{atm}} \end{aligned}$$



absence d'équilibre thermique

avec l'extérieur : $T \neq T_{\text{ambiante}}$

équilibre mécanique : $P = P_{\text{atm}}$

Remarque : dans le cas de systèmes physicochimiques sièges de réactions chimiques pour lesquelles un équilibre chimique peut exister, il faut aussi que l'équilibre chimique soit établi.

c. Un état stationnaire n'est pas forcément un état d'équilibre

Les paramètres d'état d'un système stationnaire sont constants, mais **il peut y avoir transfert de matière et/ou d'énergie**.

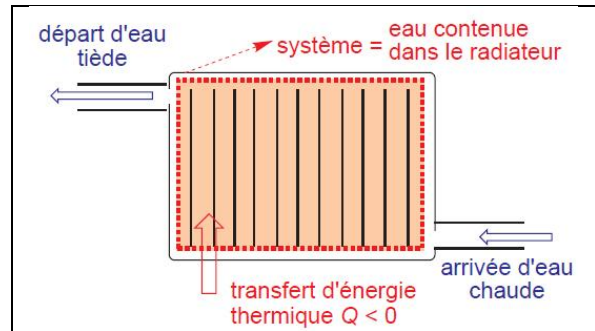


Figure 1 : L'eau contenue dans le radiateur est un système ouvert en état stationnaire

Prenons l'exemple d'un radiateur de chauffage collectif (figure 1). Le fluide considéré est l'eau contenue dans le radiateur. Cette eau a une température constante. Mais il y a transfert de matière : le fluide de l'ensemble du système de distribution est en mouvement, et de l'eau entre et sort sans arrêt du radiateur. D'autre part, cette eau effectue un transfert thermique afin de réchauffer la pièce.

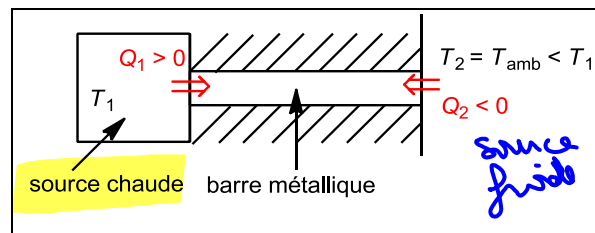


Figure 2 : Barre métallique à l'état stationnaire

Prenons l'exemple d'une barre métallique dont les extrémités sont maintenues à des températures constantes différentes (figure 2) : l'extrémité gauche est en contact avec un système chauffant maintenant la température à T_1 , et l'extrémité droite est en contact avec l'air ambiant à la température T_2 . La température dans la barre ne sera pas uniforme mais la distribution de température restera constante au cours du temps. Pourtant la barre n'est pas à l'état d'équilibre thermodynamique : la barre reçoit de l'énergie thermique de la source chaude et en cède à l'air ambiant.

II. Transformation d'un système

1. État hors équilibre : transformation

Si au moins un des paramètres d'état intensif du système n'est plus uniforme alors le système n'est plus à l'équilibre et il subit une transformation.

Définition :

On appelle transformation d'un syst. toute opération modifiant l'état du syst., par une modif. d'un ou de plusieurs paramètres d'état et/ou apport extérieur d'énergie (et/ou apport de matière pour les syst. ouverts)

2. Transformations finies et infinitésimales

Définition : transformation finie

Une transform. est dite finie si elle permet le passage du syst. d'un état d'équilibre A vers un état d'éq. B avec une modif. macroscopique des paramètres d'état (modif. que l'on peut quantifier)

Ces **variations macroscopiques** sont notées par le symbole **delta majuscule** :

$$Pa \rightsquigarrow \Delta p_{A \rightarrow B} = p_B - p_A$$

$$K \rightsquigarrow \Delta T_{A \rightarrow B} = T_B - T_A$$

$$m^3 \rightsquigarrow \Delta V_{A \rightarrow B} = V_B - V_A$$



~~delta~~ m'at'o qui m'a pas de sens
W m'est pas une variation

Les **transferts** énergétiques reçus par le système au cours de cette transformation finie seront notés :

$W_{A \rightarrow B}$: travail reçu par le syst au cours de la transfo de A vers B
 $Q_{A \rightarrow B}$: transfert thermique reçu par le syst

Définition : transformation élémentaire ou infinitésimale

Une transform. est dite élémentaire (ou infinitésimale) si les variations des paramètres d'état sont infiniment petites (non quantifiables)

Ces **variations élémentaires** seront notées par le symbole mathématique **d** de la différentielle :

$$dp = p(t+dt) - p(t)$$

$$dT = T(t+dt) - T(t)$$

$$dV = V(t+dt) - V(t) \rightarrow \neq \text{ce de } V \text{ entre 2 instants est proches}$$

dt : variat'o élémentaire ou infinitésimale de temps

Les **transferts** énergétiques reçus par le système au cours de cette transformation élémentaire seront notés à l'aide du symbole δ :

δW : travail élémentaire reçu par le syst entre les instants t et $t+dt$
 δQ : transfert thermique élémentaire reçu

Remarque : une transformation élémentaire peut s'effectuer entre deux états hors équilibre infiniment proches, mais dans ce cas, on ne peut pas définir les variations élémentaires des paramètres d'état intensifs. En effet, il faudrait que les paramètres d'état puissent être définis pour l'ensemble du système, ce qui n'est possible que si le système est au moins en équilibre interne.

Bilan sur les notations utilisées :

Variation infinitésimale ou élémentaire d'une grandeur G : dG avec $G : T, V, p \dots$

Variation macroscopique d'une grandeur G : ΔG

Quantité infinitésimale ou élémentaire d'une grandeur échangée X : δX avec $X : W, Q$

Quantité macroscopique d'une grandeur échangée X : X

) param.
d'état

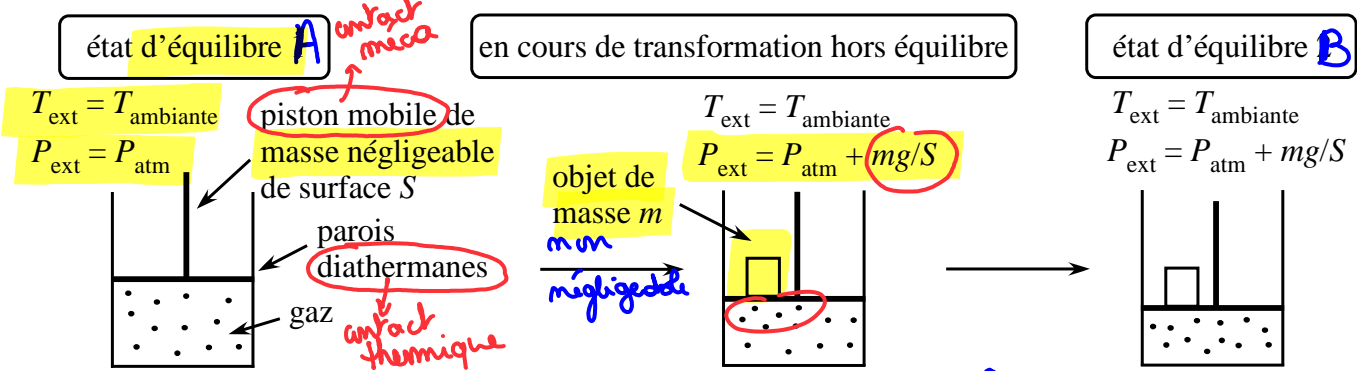
) gdeurs
de
transfert

3. Transformations brutales et ~~réversibles~~

→ brutale monobare monotherme "isotherme"

Exemple de transformation brutale :

Un gaz contenu dans une enceinte aux parois diathermanes est confiné grâce à un piston mobile, de masse négligeable et de surface S . À $t = 0$ on pose un objet de masse m sur le piston. Sous le poids de l'objet, le piston descend brutalement et comprime le gaz contenu dans l'enceinte. Au cours de la transformation, la pression extérieure au système est égale à la somme de la pression atmosphérique et de la pression due à la masse mg/S (poids/surface de contact avec le gaz).



systr. { n moles de gaz ds l'enceinte fermée }
 état A : $P_A = P_{ext,A} = P_{atm}$
 $T_A = T_{ext,A} = T_{amb}$
 $V_A = \frac{nRT_A}{P_A} = \frac{nRT_{amb}}{P_{atm}}$
contact mécanique
contact thermique

absence d'équilibre thermodyn⁹
 $P_{transformation} \neq P_{ext}$
absence d'éq. interne à chaque instant
↳ on ne peut pas définir la pression du syst.
(idem pour la T)

systr. { n moles de gaz ds l'enceinte fermée }
 état B : $P_B = P_{ext,B} = P_{atm} + \frac{mg}{S}$
 $T_B = T_{ext,B} = T_{amb}$
 $V_B = \frac{nRT_B}{P_B} = \dots$
mg : $P_B > P_A, V_B < V_A$

Propriétés des transformations brutales :

- au cours d'une transfo brutale, l'éq. interne du syst n'est jms atteint : les paramètres d'état intensifs ne sont pas définis pour l'ensemble du système*
- on ne peut définir que les variations finies des paramètres d'état intensif entre A et B*
↳ les variations élémentaires ne peuvent pas être définies

Ainsi, si on désire traduire graphiquement la transformation dans un diagramme des paramètres d'état, nous ne pourrions placer que deux points : l'état initial et l'état final (figure 3).

$$W_{A \rightarrow B}^{monobare} = - \int_{V_A}^{V_B} P_{ext} dV$$

$$= - \left(P_{atm} + \frac{mg}{S} \right) \times (V_B - V_A)$$

$$= - \left(P_{atm} + \frac{mg}{S} \right) \times \left(\frac{nRT_{amb}}{P_{atm} + \frac{mg}{S}} - \frac{nRT_{amb}}{P_{atm}} \right)$$

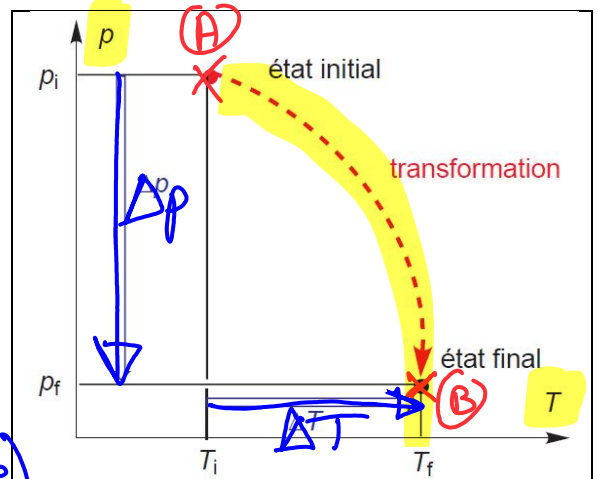


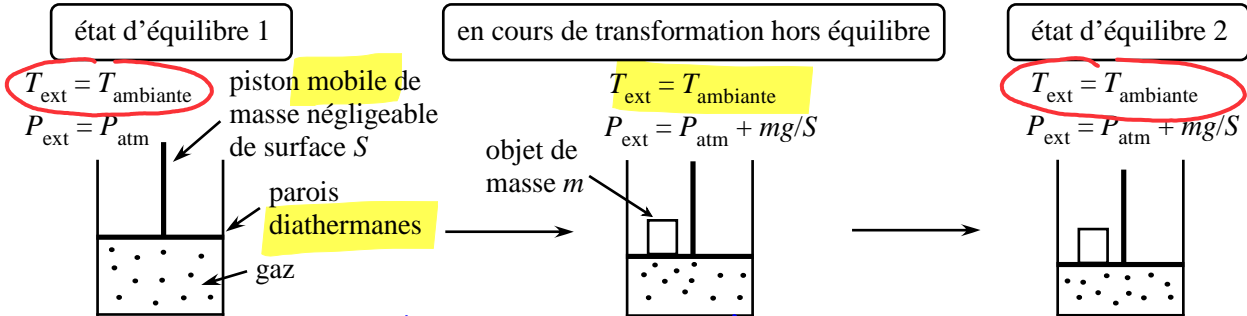
Figure 3 : Paramètres d'état lors d'une transformation brutale

4. Transformations lentes (quasi-statiques) : succession d'états d'équilibre internes

Exemple 1 : quasi-statique, monobare, monotherme, "isotherme"

Un gaz contenu dans une enceinte aux parois diathermanes est confiné grâce à un piston difficilement mobile à cause de **frottement très importants**, de masse négligeable et de surface S . À $t = 0$ on pose un objet de masse m sur le piston.

Sous le poids de l'objet, le piston descend très lentement et comprime le gaz contenu dans l'enceinte. Au cours de la transformation la pression extérieure au système est égale à la somme de la pression atmosphérique et de la pression due à la masse mg/S (poids/surface de contact avec le gaz).



sys : { n moles de gaz }
 état A : $P_A = P_{atm}$
 $T_A = T_{amb}$
 $V_A = \frac{nRT_A}{P_A}$

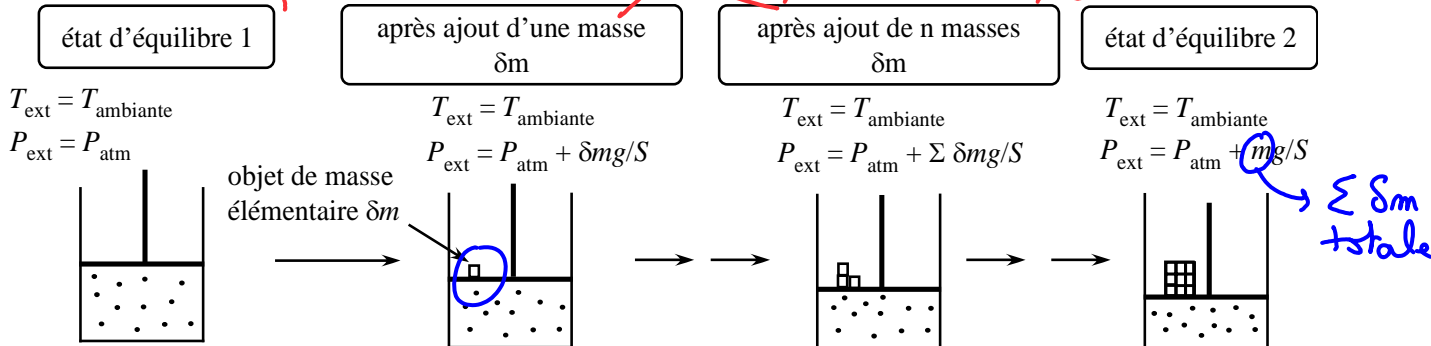
transformat lente à cause des frottements
 ⇒ approx : T et p ont le tps de s'uniformiser ⇒ à chq instant le syst. est à l'éq. interne
 MAIS pas à l'éq. thermodyn avec l'ext car
 $T(t) \neq T_{ext}$ car frottements ⇒ échauffement
 $P(t) \neq P_{ext} \rightarrow P_{atm} + \frac{mg}{S} = cste$
 ↑ progressivement

sys : { n moles de gaz }
 état B : $P_B = P_{atm} + \frac{mg}{S}$
 $T_B = T_{amb}$
 $P_B = \frac{nRT_B}{V_B}$

Exemple 2 :

Un gaz contenu dans une enceinte aux parois diathermanes est confiné grâce à un piston mobile, se déplaçant **sans frottement**, de masse négligeable et de surface S . On pose successivement sur le piston des masses δm jusqu'à atteindre la valeur m des exemples précédents, avec $\delta m \ll m$. On attend, après chaque ajout, que le piston s'immobilise. Chaque ajout de masse permet au système de subir une transformation élémentaire vers un état d'équilibre infiniment proche du précédent.

quasi-statique, monobare, monotherme, isotherme



transformat lente car on modifie lentement les conditions extérieures
 ⇒ succession d'éq. interne : $T(t)$ et $P(t)$ sont définies à chq instant (uniformisées)
 ⇒ succession d'éq. thermodynamique avec l'ext
 $P(t) = P_{ext}(t) \rightarrow P_{atm} + \frac{\sum \delta m(t) g}{S}$
 $T(t) = T_{amb} = cste$

idem

idem

$$W_{A \rightarrow B} = - \int P dV$$

$$= - \int_{V_A}^{V_B} \frac{nRT}{V} dV \rightarrow cste$$

Propriétés des transformations lentes : modèle quasi-statique :

⊕ Si la transformation est suffisamment lente, on pourra la considérer comme une succession de transfo. élémentaires entre des états d'éq. internes infiniment proches les uns des autres.

↳ les paramètres d'état internes ont le tps de s'uniformiser à chaque instant \Rightarrow éq. d'état du syst. valable à chq instant
 GP. $P(t) V(t) = n R T(t)$

↳ on parle de transformation quasi-statique.

↳ on peut donc définir les variat° élémentaires dp et dT

⊕ on n'a, en revanche, pas tjs une succession d'état d'éq. thermod. avec l'ext.

ex 1 : $P(t) \neq \overbrace{P_{ext}}^{= \text{cste}}$ à cause des forces de frottement non prise en compte dans P_{ext}

ex 2 : $P(t) = \overbrace{P_{ext}(t)}^{= \text{cste}}$ varie progressivement

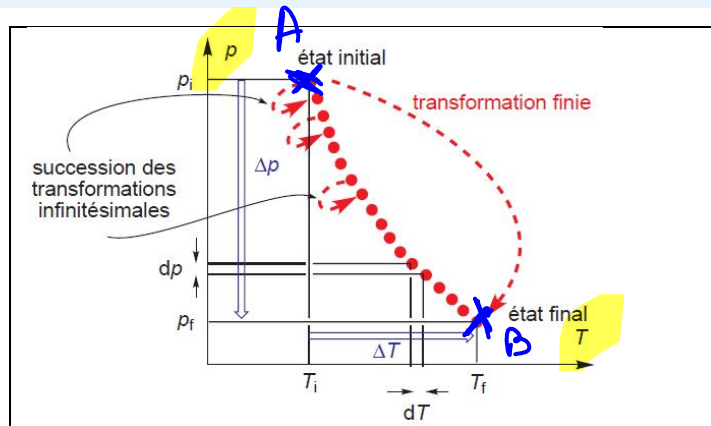


Figure 4 : Paramètres d'état lors d'une transformation lente (quasi-statique)

La représentation de la transformation dans un diagramme de paramètres d'état est alors une fonction continue. Le calcul différentiel utilisant les variations élémentaires dp , dT ou dV pourra être utilisé.

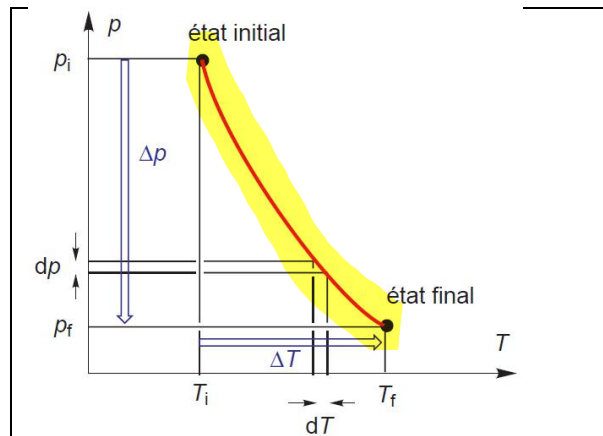


Figure 5 : Paramètres d'état lors d'une transformation infiniment lente

5. Noms des transformations usuelles

Comme nous allons rapidement le voir, il est très difficile de mettre en équation une transformation pour laquelle tous les paramètres d'état varient simultanément. Nous allons travailler sur des transformations particulières dont la mise en équation est possible.

Pour les transformations se réalisant avec une **grandeur du système constante**, on utilise le préfixe **iso** :

- isobare : transformation qui se déroule à pression du syst. cste
- isotherme : _____ température du syst cste
- isochore : _____ volume du syst cste

Pour les transformations se réalisant avec une **grandeur du milieu extérieur constante**, on utilise le préfixe **mono** :

- monobare : _____ pression extérieure cste
(m'a de sens que si le syst. est en contact mécanique avec l'ext.)
- monotherme : _____ température extérieure cste
(m'a de sens que si le syst. est en contact thermique avec l'ext.)

thermostat

Enfin,

- adiabatique : transformation n'autorisant pas les transferts thermiques avec l'ext. (récipient aux parois adiabatiques sur la durée de la transfo)

Remarques :

- ⊕ si $m \searrow V$: compression
- si $m \nearrow V$: détente

- ⊕ transfo monotherme et quasi-statique tq à chaque instant

$$T(t) = T_{ext}$$

$$T_{ext} = cste$$

$$T(t) = cste$$

⇒ isotherme

- ⊕ _____ monobare _____

$$P(t) = P_{ext}$$

$$P_{ext} = cste$$

$$P(t) = cste$$

⇒ isobare

~~Rapport demain mt de thermostat~~

III. Transferts d'énergie sous forme de travail mécanique

Les transformations des systèmes peuvent se faire par transfert d'énergie et/ou de matière. Pour l'instant nous ne considérerons que l'évolution de systèmes fermés qui ne subiront que des transferts d'énergie :

- Transfert d'énergie forme de travail noté W
- Transfert d'énergie thermique noté Q

Un travail correspond à un transfert d'énergie mécanique ou d'autre forme d'énergie comme le travail électrique par exemple. Nous nous intéresserons ici au **travail mécanique** : un travail mécanique a lieu lorsqu'une force extérieure s'exerce sur le système et permet le déplacement d'une paroi mobile du système sans mouvement d'ensemble macroscopique du système : on dit que la force « travaille » sur le système et on définit le travail de cette force. Plus précisément nous détaillerons comment calculer le travail dû aux forces pressantes extérieures qui peuvent s'exercer sur un système.

1. Travail élémentaire des forces pressantes extérieures

Travail élémentaire des forces pressantes extérieures au système :

On considère un système en contact avec la pression extérieure uniforme notée p_{ext} . Le volume du système thermodynamique au cours d'une transformation élémentaire subit une variation (algébrique) de volume notée dV . Le travail qu'exerce la force pressante sur le système vaut :

$$\delta W_{F_{\text{ext}}} = - p_{\text{ext}} dV$$

avec dV variation élémentaire de volume du syst

Remarque : cette relation se démontre en repartant de la définition du travail élémentaire d'une force, définition au programme de deuxième année

A retenir :

- ⊕ le syst. reçoit (au sens algébrique du terme) du travail mécanique de la part des forces pressantes ext. s'il subit une variation du volume sous l'action de ces forces \Rightarrow une paroi qui sépare le syst. de l'ext. doit être mobile ou déformable
- ⊕ si le volume du syst. \downarrow ($dV < 0$), le travail reçu par le syst. de la part des F_{ext} est $> 0 \Rightarrow$ qd le syst. subit une compression il reçoit réellement du W de la part de l'ext.
- ⊖ \uparrow ($dV > 0$), $\underline{\hspace{10em}}$
 $\underline{\hspace{10em}}$ $< 0 \Rightarrow$ qd le syst. subit une détente il fournit en réalité du W à l'ext

2. Travail mécanique pour une transformation finie

Une transformation finie se décompose comme la succession de transformations élémentaires de l'état initial à l'état final.

Ainsi pour calculer le travail reçu par le système au cours d'une transformation finie il faut effectuer la somme de tous les travaux élémentaires tout au long de la transformation. C'est une somme continue d'une infinité de termes : mathématiquement l'opérateur permettant ce type de calcul est l'intégrale (à admettre) :

$$W_{\text{état } i \rightarrow \text{état } f} = \int_{\text{état } i}^{\text{état } f} \delta W = \int_{V_i}^{V_f} -P_{\text{ext}} dV \rightsquigarrow \text{on intègre } (-P_{\text{ext}}) \text{ en fct de } V \rightarrow f(V)?$$

3. Quelques exemples de calculs

a. Calcul du travail dans le cas d'une transformation isochore

Le système subit une transformation pour laquelle son volume reste constant.

isochore · $V = \text{cte} \Rightarrow dV = 0$ et $\Delta V = 0$

$$W_{i \rightarrow f} = - \int_{V_i}^{V_f} P_{\text{ext}} dV = 0 \Rightarrow \text{on retiendra } W_{\text{transfo}} = 0 \text{ isochore}$$

b. Calcul du travail dans le cas d'une transformation monobare (quasi-statique ou brutale)

Le système est un fluide initialement au volume V_1 et à la pression p_1 . Il est amené au volume V_2 et à la pression p_2 par une transformation au cours de laquelle il est en contact avec le milieu extérieur dont la pression p_{ext} reste constante.

$\begin{array}{c} \text{état } i \\ \hline V_i \\ P_i \\ T_i \end{array} \xrightarrow[\text{monobare}]{P_{\text{ext}} = \text{cte}} \begin{array}{c} \text{état } f \\ \hline V_f \\ P_f \\ T_f \end{array}$	$W_{i \rightarrow f} = - \int_{V_i}^{V_f} P_{\text{ext}} dV = - P_{\text{ext}} \times (V_f - V_i)$	<p>rappel :</p> $\int_{x_1}^{x_2} A dx = [A x]_{x_1}^{x_2} = A x_2 - A x_1$
$W_{\text{monobare}} = - P_{\text{ext}} \Delta V$		

c. Calcul du travail dans le cas d'une transformation quasi-statique avec $p(t) = p_{\text{ext}}(t)$

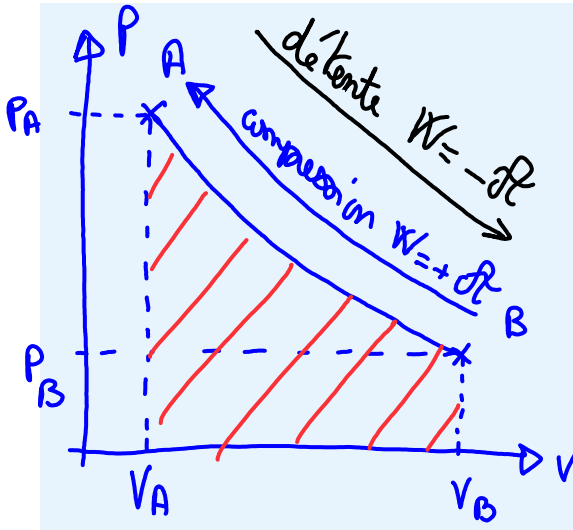
qd on modifie progressivement P_{ext}

Le système est un fluide initialement au volume V_1 et à la pression p_1 . Il est amené au volume V_2 et à la pression p_2 par une transformation quasi-statique au cours de laquelle p_{ext} évolue. On suppose que la pression du système à chaque instant $p(t)$ s'homogénéise à la valeur de la pression $p_{\text{ext}}(t)$.

$\begin{array}{c} \text{état } i \\ \hline V_i \\ P_i \\ T_i \end{array} \xrightarrow[\text{quasi-statique}]{P(t) = P_{\text{ext}}(t)} \begin{array}{c} \text{état } f \\ \hline V_f \\ P_f \\ T_f \end{array}$	$W_{i \rightarrow f} = - \int_{V_i}^{V_f} P_{\text{ext}} dV$ <p>\Rightarrow a priori $P_{\text{ext}} \neq \text{cte}$ \Rightarrow il faut connaître son expression en fct de V</p>	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ or la transfo est quasi-statique $\Rightarrow P(t)$ est définie et ég interne $\forall t$ \Rightarrow ég d'état des GP $\forall t$ ⊙ et $P_{\text{ext}}(t) = P(t)$
<p>pour les syst gazeux respectant le modèle des GP</p>		$\Rightarrow W_{i \rightarrow f} = - \int_{V_i}^{V_f} P(t) dV = - \int_{V_i}^{V_f} \frac{nRT}{V} dV$ <p>\rightarrow il faudra une info sur l'évolution de T au cours de la transfo</p>

4. Visualisation graphique

Représentons dans le diagramme de Clapeyron (p en fonction de V) une transformation pour laquelle la pression du système est définie à chaque instant (transformation quasi-statique, succession d'état d'équilibre interne). Un tel diagramme permet de déterminer le travail reçu par le système graphiquement.



travail élémentaire : $\delta W = -P_{ext} dV$
 transfo quasi-statique avec $P(t) = P_{ext}(t) \forall t$
 $\Rightarrow W_{i \rightarrow j} = - \int_{V_i}^{V_j} P_{ext} dV = \ominus \int_{V_i}^{V_j} P dV$

ainsi $|W_{i \rightarrow j}| = P \Delta V$

si $V_j < V_i$ (compression) $\Rightarrow W_{i \rightarrow j} > 0 \Rightarrow W_{i \rightarrow j} = +P \Delta V$
 si $V_j > V_i$ (détente) $\Rightarrow W_{i \rightarrow j} < 0 \Rightarrow W_{i \rightarrow j} = \ominus P \Delta V$

5. Puissance mécanique

Dans certain cas on ne peut avoir accès qu'à la puissance de la force (dans l'étude de certaines machines thermiques).

Définition :

La puissance mécanique reçue par un syst, $P_{méca}$, est l'énergie mécanique reçue par le syst par unité de tps. Elle se définit pour une transfo élémentaire (car elle peut ne pas être coté au cours de la transfo)

$$P_{méca} = \frac{\delta W_{méca}}{dt} \rightarrow \begin{matrix} \text{J} \\ \text{s}^{-1} \text{ ou W (watt)} \end{matrix}$$

Ainsi le travail au cours d'une transformation finie se calcule de la manière suivante :

⊕ si $P_{méca}$ est connue (puissance d'un moteur par ex.), on peut calculer le travail sur la transfo finie :

$$P_{méca} = \frac{\delta W_{méca}}{dt} \Leftrightarrow \delta W_{méca} = P_{méca} dt \Rightarrow W_{i \rightarrow j} = \int_{t_i}^{t_f} P_{méca} dt$$

⊕ si la $P_{méca}$ est coté : $W_{i \rightarrow j} = P_{méca} \times (t_f - t_i) = P_{méca} \Delta t$ → durée de la transfo

Remarque : s'il existe un transfert d'énergie sous forme de travail autre que mécanique (noté souvent W'), on pourra en général le calculer connaissant la puissance reçue \mathcal{P}' par le système $\mathcal{P}' = \frac{\delta W'}{dt}$.

IV. Transferts d'énergie sous forme de transfert thermique

Le deuxième type de transfert d'énergie est le transfert sous forme d'énergie thermique. Un transfert thermique se manifeste en général par une variation de température (mais ce n'est pas une obligation) ou par un changement d'état du système, mais il peut aussi avoir pour conséquence de modifier la pression ou le volume du système.

Remarque : le terme de « chaleur, terme obsolète, est parfois utilisé. On l'évitera car il prête à confusion : il ne faut pas confondre transfert thermique et température.

1. Notion de transfert thermique

a. Origines possibles des transferts thermiques

Un transfert thermique peut avoir lieu quand :

- Le système soumis à des forces de frottement voit son énergie mécanique diminuer, mais son agitation moléculaire augmenter.
- Une réaction chimique libère ou prélève de l'énergie au système.
- Le système est en contact avec une source thermique.

C'est à ce troisième cas que nous serons le plus confronté. La source thermique pourra transférer de l'énergie de trois manières différentes (cf. III.3)

b. Notion de source thermique idéale : thermostat

Définition :

Si la source thermique n'est pas perturbée par les transferts d'énergie qu'elle effectue avec le syst, sa température reste cste, on parle de source thermique idéale ou thermostat (plaque chauffante thermostatée - atm. ou une durée cste) - etc

c. Attention aux confusions entre transfert thermique et température

À retenir : \neq

Un système peut recevoir (de manière algébrique) un transfert thermique sans pour autant que sa température ne soit modifiée.

Exemples :

- Lors d'un changement d'état à pression constante, le système reçoit un transfert thermique mais sa température reste constante.
- Lorsqu'un système est en contact avec un thermostat : sa température est fixée par le thermostat, mais des transferts thermiques ont lieu en permanence avec le thermostat pour justement permettre une température constante (température qui serait susceptible de varier pour une autre raison, la compression d'un gaz a tendance à faire augmenter la température par exemple)
- La transformation d'un système peut être adiabatique (sans transfert thermique), mais accompagné d'une variation de température (par transfert mécanique, la détente d'un gaz a tendance à faire diminuer la température par exemple).



isotherme
pas adiabatique

adiabatique
pas isotherme

par ex. pour casser des interact° internes

$T_{(t)}$
=
 $T_{\text{thermostat}}$
=
cste

2. Puissance ou flux thermique

Il n'existe pas de formule donnant l'expression d'un transfert thermique connaissant le type de transformation, comme c'était le cas pour le travail mécanique des forces pressantes.

En revanche si nous connaissons la puissance thermique (ou flux thermique) reçue par le système à chaque instant, qui s'assimile à la puissance reçue par le système, on peut calculer le transfert thermique.

Définition :

La puissance ou flux thermique (en W ou $J \cdot s^{-1}$) est le transfert thermique reçu par le système, par unité de temps. Elle se définit pour une transformation élémentaire car elle peut varier au cours d'une transformation finie :

$$P_{th} \text{ ou } \Phi_{th} = \frac{\delta Q}{dt}$$

J.s⁻¹ ou W (watt)

Remarque : on peut observer des flux d'énergie thermique lorsqu'on met, par exemple, en contact thermique deux corps de températures différentes. On observe un transfert d'énergie sous forme thermique (noté Q) du corps chaud vers le corps froid (le corps chaud se refroidit, le corps froid se réchauffe, pour atteindre une température commune)

Ainsi le transfert thermique au cours d'une transformation finie se calcule de la manière suivante :

$$\Leftrightarrow \delta Q = \begin{cases} P_{th} dt \\ \Phi_{th} \end{cases} \Rightarrow Q_{i \rightarrow f} = \int_{t_i}^{t_f} \begin{cases} P_{th} dt \\ \Phi_{th} \end{cases}$$

$$\text{si } \begin{cases} P_{th} = \text{cst} \forall t \\ \Phi_{th} \end{cases} \Rightarrow Q_{i \rightarrow f} = \begin{cases} P_{th} \times (t_f - t_i) \\ \Phi_{th} \end{cases} = \begin{cases} P_{th} \times \Delta t \\ \Phi_{th} \end{cases}$$

3. Les trois modes de transfert thermique

Il existe différents modes de transports thermiques, illustrés sur le schéma ci-contre.

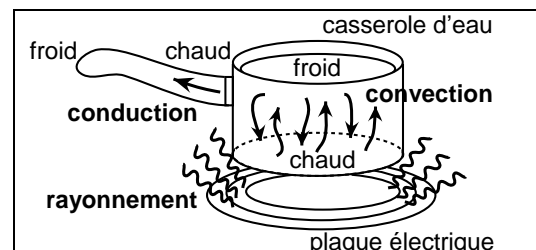


Figure 6 : Différents modes de transports thermiques

Définitions :

La **conduction thermique** correspond à un transfert d'énergie thermique au sein d'un support matériel, sans déplacement macroscopique de matière.

La **convection thermique** au sein d'un fluide, correspond à un transfert d'énergie thermique par un mouvement macroscopique des particules du fluide. Chaque particule de fluide transporte de l'énergie.

Le **rayonnement thermique** correspond à un transfert d'énergie par onde électromagnétique, sans nécessité de support matériel.

La convection peut être naturelle : la différence de température provoque le déplacement de matière. Dans un feu de cheminée, l'air chaud moins dense que l'air froid, monte.

La convection peut être forcée : on peut mettre en mouvement le fluide de manière artificielle pour accélérer les échanges thermiques. L'agitation, à l'aide d'un barreau aimanté en chimie, permet d'améliorer le chauffage en plus d'homogénéiser la solution.

liq
sol.
gaz
liq

4. Flux thermique conductif en géométrie unidimensionnelle : notion de résistance thermique

Définition de la résistance thermique

Considérons un matériau séparant deux milieux à travers laquelle s'effectue un transfert thermique reçu par le milieu B de la part du milieu A donc orienté du milieu A vers le milieu B.

Dans le cas des transferts conductifs linéaires, en géométrie unidimensionnelle, il existe une relation linéaire entre le flux thermique $\Phi_{th,A \rightarrow B}$ (ou puissance thermique $\mathcal{P}_{th,A \rightarrow B}$ en W) orienté du milieu A de température T_A vers le milieu B de température T_B et la différence de température T_A et T_B (en K) :

$$\Phi_{th,A \rightarrow B} = \frac{T_A - T_B}{R_{th}}$$

$\frac{SQ}{dt}$ en $J s^{-1}$ ou W
 en K (en °C)
 $K W^{-1}$
 milieu A à T_A milieu B à T_B
 $\Phi_{th,A \rightarrow B}$

Propriétés :

- Il y a une forte analogie entre les résistances électriques et les résistances thermiques
- Deux matériaux de résistances R_1 et R_2 soumis au même flux thermique et possédant une surface de température commune sont dits en série. Dans ce cas on peut définir la résistance de l'ensemble des deux matériaux : $R_{eq} = R_1 + R_2$.
- Deux matériaux de résistances R_1 et R_2 qui sont en contacts à leurs extrémités avec les mêmes milieux A et B sont dits en dérivation. Dans ce cas on peut définir la résistance de l'ensemble des deux matériaux telle que : $1/R_{eq} = 1/R_1 + 1/R_2$.
- La relation proposée est valable en régime stationnaire (grandeurs constantes) ou en régime lentement variable au cours du temps à un instant t donné (cf. chapitre ultérieur).
- La valeur de la résistance thermique unidimensionnelle, dans un matériau de longueur l (en m), de section constante S (en m^2) et de conductivité thermique, λ (en $W.K^{-1}.m^{-1}$), l'expression de la résistance thermique est :

$$R_{th} = \frac{l}{\lambda S}$$

l en m
 λ en $W.K^{-1}.m^{-1}$
 S en m^2
 $K.W^{-1}$
 $\frac{m}{m^2.W.K^{-1}.m^{-1}} = \frac{m}{W.K^{-1}} = W^{-1}.K$

ex: électrique $U = RI \Leftrightarrow I = \frac{U}{R}$ analogie $I \rightsquigarrow \Phi_{th}$
 $U \rightsquigarrow \Delta T$
 $R \rightsquigarrow R_{th}$

5. Flux thermique conducto-convectif : loi de Newton

→ fluide

Ce type de transfert est présent lorsqu'un solide est en contact avec un fluide. Pour présenter ce phénomène, on considère un modèle unidirectionnel, la surface du solide en contact avec le fluide est plane et perpendiculaire à l'axe (Ox), tel que représenté sur la figure 7.

Le fluide est animé de mouvements de convection qui provoquent une homogénéisation de la température à partir d'une certaine distance de la surface du solide en contact avec le fluide. Cette température du fluide est supposée uniforme et égale à T_{fluide} .

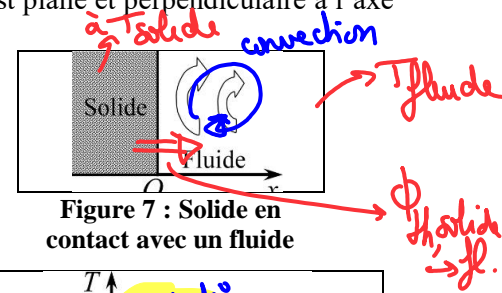


Figure 7 : Solide en contact avec un fluide

Cependant, la température du solide T_{solide} à l'interface solide-liquide est différente de la température du fluide. Il existe une couche limite de faible épaisseur e (de l'ordre de quelques mm) dans laquelle le fluide est pratiquement immobile et où le transfert thermique dirigé suivant l'axe (Ox), se fait de manière conductive.

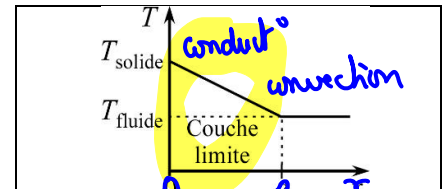


Figure 8 : Evolution de la température à proximité du solide

Loi de Newton :

Le flux thermique conducto-convectif $\Phi_{CV,solide \rightarrow fluide}$ entre un fluide en contact avec un solide suit la loi de Newton. Dans le cas où le transfert est orienté du solide vers le fluide, la loi de Newton s'exprime ainsi :

$$\Phi_{CV,solide \rightarrow fluide} = h S \times (T_{sl} - T_{fl})$$

avec S surf. de contact entre le sol et le fluide
 h coef d'échange

si $\Phi_{CV,sol \rightarrow fl} > 0$
 $\Rightarrow T_{sl} > T_{fl}$

Unités: W or $J s^{-1}$, m^2 , $W K^{-1} m^{-2}$

Remarques :

- Le coefficient d'échange augmente avec la vitesse de déplacement du fluide à la surface du solide et est plus élevé pour un liquide que pour un gaz à vitesse de déplacement du fluide, identique.
- L'expression du flux thermique conducto-convectif s'applique quelle que soit la forme de la surface.

ng :

$$\Phi_{CV,s \rightarrow fl} = \frac{T_s - T_{fl}}{R_{th, cv}} \quad \text{avec} \quad R_{th, cv} = \frac{1}{h S}$$

6. Flux thermique par rayonnement : modèle du corps noir

L'expérience montre que **tout corps suffisamment condensé**, porté à **une température T** , émet un **rayonnement électromagnétique**, généré par l'**agitation thermique** au sein de ce corps et dont le **spectre est continu**. Ce rayonnement électromagnétique est qualifié de « **rayonnement thermique** ».

a. Approche descriptive du corps noir

Définition :

Un **corps noir** est un corps modèle capable d'**absorber intégralement tout rayonnement incident**, quelle que soit sa fréquence.

Propriétés :

Un corps noir absorbe tous les rayonnements qu'il reçoit mais est aussi capable d'émettre un rayonnement thermique. Le spectre du rayonnement thermique du corps noir ne dépend que de sa température T . La forme, la nature du matériau, le constituant n'ont pas d'influence sur son rayonnement, il présente un maximum d'émission λ_m qui vérifie les propriétés suivantes :

⊕ + la T du corps est élevée, + la longueur d'onde du max d'émission est faible)
 ⊕ + la T _____, + le flux thermique émis à λ_m est grand) *cf. loi de Wien*

On représente la densité spectrale B_λ , c'est-à-dire le flux radiatif émis par unité de surface et par unité de longueur d'onde et pour une direction d'émission du corps noir (l'unité sr qui intervient dans l'unité de B_λ est le stéradian, unité relative au caractère directionnel de la densité spectrale d'émission).

Remarques :

- De nombreuses sources primaires de lumière satisfont à la théorie du corps noir comme le soleil, une ampoule à incandescence.
- La quasi-totalité de l'énergie rayonnée par un corps noir correspond à celle dont le domaine de longueurs d'onde est compris entre $0,5\lambda_m$ et $4,5\lambda_m$.

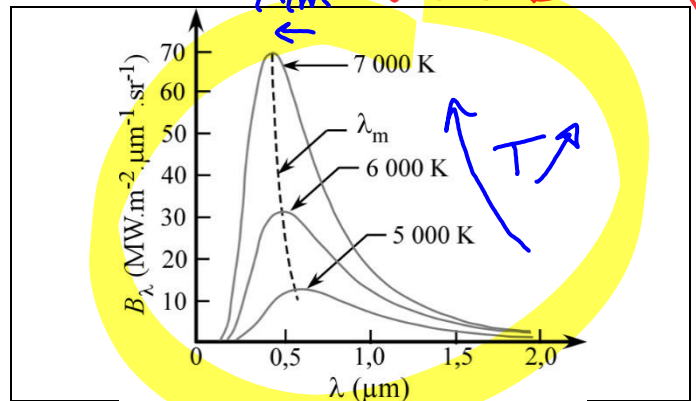


Figure 9 : Spectre d'émission d'un corps noir à différentes températures

b. Loi de Wien

Loi de Wien :

La loi de Wien exprime la relation entre la longueur d'onde du maximum d'émission (λ_m en m) et la température du corps noir (T en K) :

$$\lambda_m = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{T} \rightarrow \text{m.K}$$

Remarque : l'application de la loi de Wien à la Terre avec une température de surface de 15 °C montre que son λ_m en tant que corps noir se situe dans l'IR est de 10 μm : $\lambda_m = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{273,15+15} = 10 \mu\text{m}$. L'application au soleil de température de surface égale à 5 778 K, donne $\lambda_m = 0,5 \mu\text{m} = 500 \text{ nm}$, longueur d'onde qui se situe dans le domaine du visible.

c. Loi de Stefan-Boltzmann

Loi de Stefan-Boltzmann :

La loi de Stefan exprime le flux radiatif émis $\Phi_{\text{rad,S}}$, par unité de surface du corps noir (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) en fonction de sa température (T en K) et σ la constante de Stefan-Boltzmann :

$$\Phi_{\text{th,rad,S}} = \sigma T^4 \rightarrow \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \quad \text{avec } \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

Une application fondamentale de ces lois est l'étude de l'effet de serre terrestre (elle sera vue en DM après avoir vu le chapitre suivant).

$$\Phi_{\text{th,rad,tout le corps}} = \Phi_{\text{th,rad,S}} \times S_{\text{corps}}$$