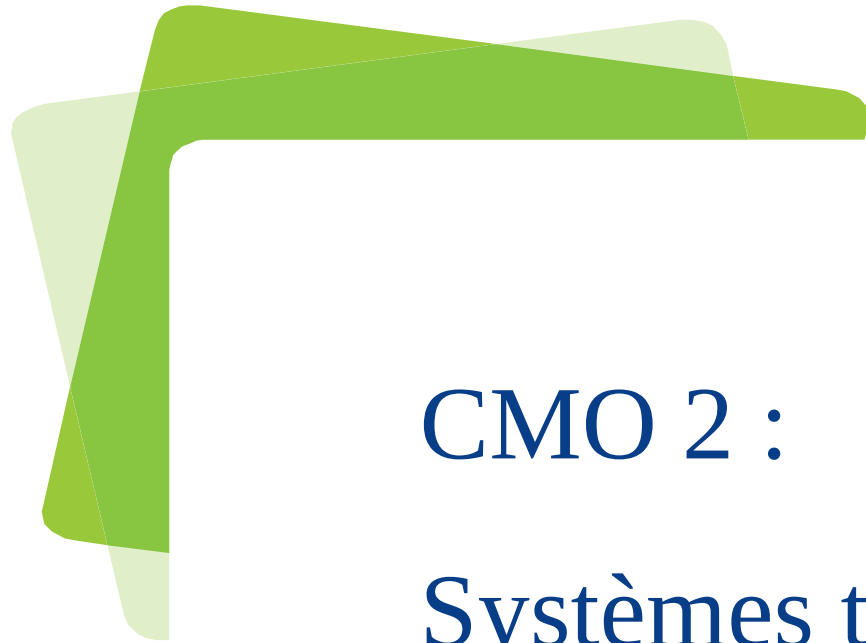




CMO 2 :

Systemes thermodynamiques

Pascal CLAIN

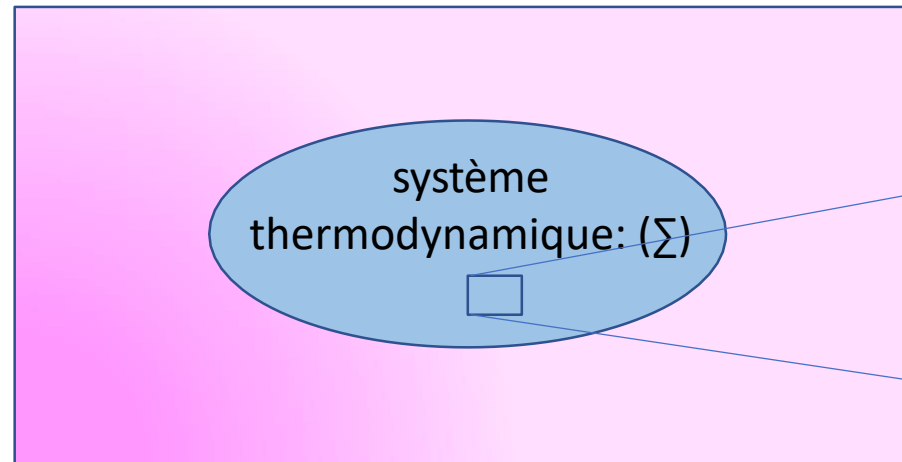
Plan

- ▶ Notions fondamentales, termes et définitions
 - Système thermodynamique
 - Système fermé, système ouvert, système isolé
 - Échange d'énergie entre un système thermodynamique et son environnement
 - Équilibre thermodynamique, variables d'état, fonctions d'état
- ▶ Équations d'état
 - Coefficients thermoélastiques
 - Équations d'état : gaz parfait, gaz réels (de van der Waals), liquide, solide élastique

La thermodynamique

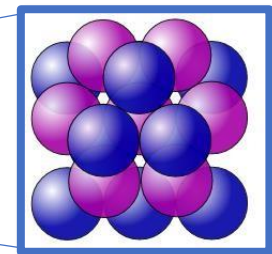
- une science pour décrire les processus de transformation de l'énergie et de changement de propriétés de la matière.
- étude des phénomènes mécaniques couplés aux phénomènes thermiques, tous deux considérés du point de vue macroscopique.
- décrire le comportement de systèmes thermodynamiques

Un système thermodynamique peut être caractérisé/décrit à l'échelle macroscopique par des **variables d'état** (grandeurs statistiques : P, V, T, C, n, m ...)



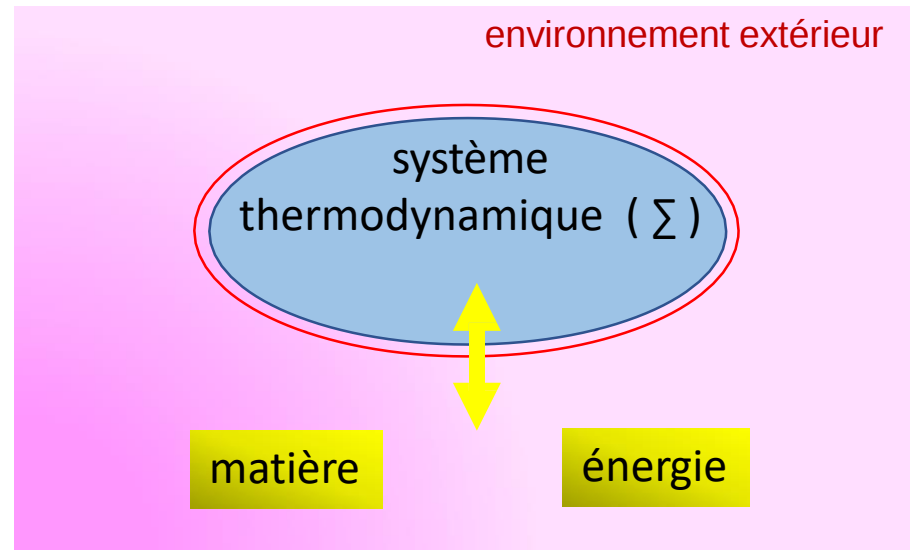
Nombre d'Avogadro

$$N_a = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$



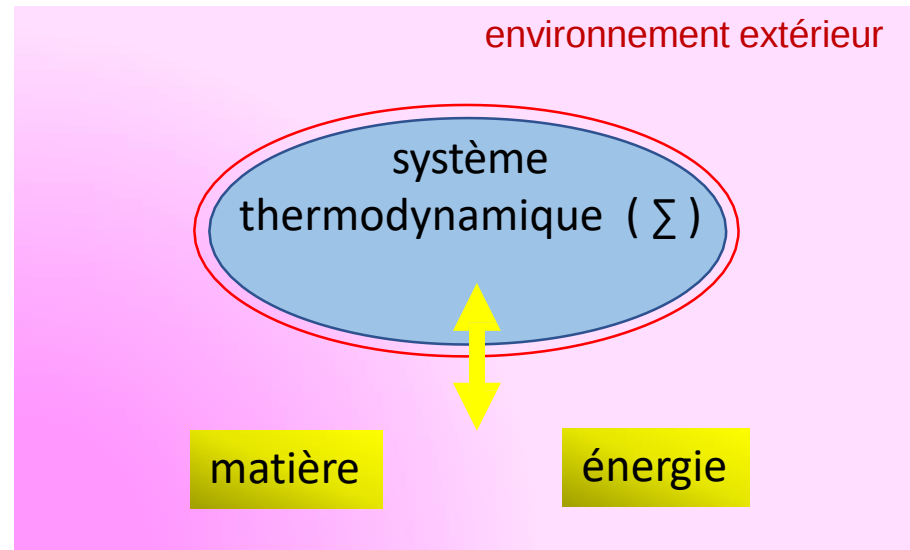
Système thermodynamique

► La résolution de tout problème de thermodynamique commencera donc par la définition précise du système à étudier : il faut pouvoir définir sans ambiguïté **ce qui appartient au système, et ce qui est situé en-dehors de celui-ci**. Ceci nécessite de définir une frontière, séparant la matière (les particules) incluse dans le système, de celle située à l'extérieur.



Système thermodynamique

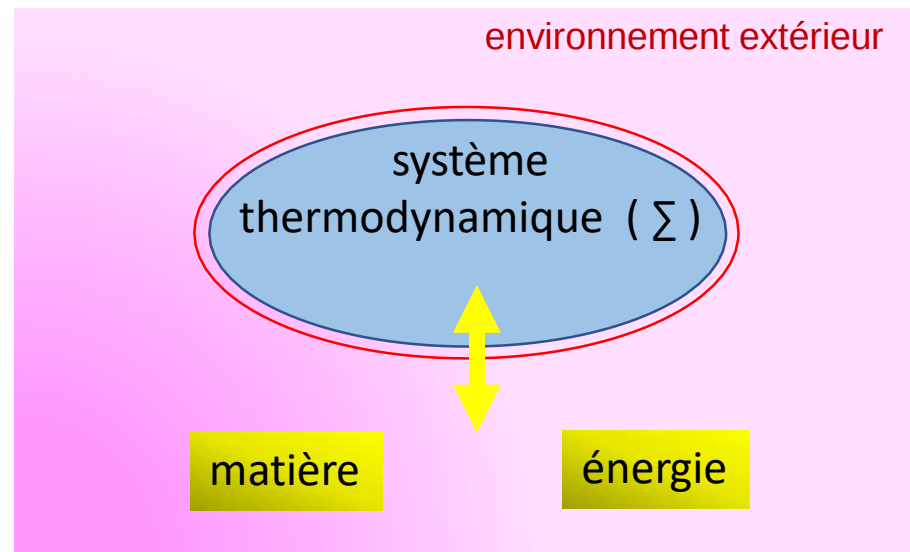
- Un système thermodynamique est une partie de l'espace matériel, séparée du reste de l'univers thermodynamique (c'est-à-dire de l'environnement extérieur) au moyen d'une **surface de contrôle** (ou bord) réelle ou imaginaire, rigide ou déformable, appelée **frontière**.
- Un système thermodynamique peut être le siège de **transformations internes** et d'**échanges de matière** et / ou d'**énergie** avec l'environnement externe



Exemple de la montgolfière
(p16)

Systèmes thermodynamiques : ouvert, fermé, isolé

- **Système thermodynamique ouvert** : permet un transfert de matière (masse) et / ou d'énergie avec l'environnement extérieur, à travers sa frontière.
- **Système thermodynamique fermé** : permet un flux d'énergie avec l'environnement extérieur à travers sa frontière, mais pas de masse.
- **Système thermodynamique isolé** : ne permet pas un flux d'énergie ou de masse avec le milieu extérieur.

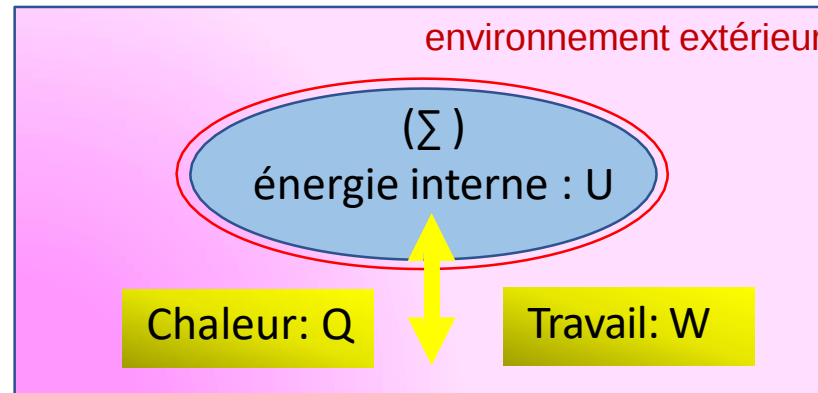


Possibilité de :

- Transformations internes
- Échanges de matière et / ou d'énergie avec l'environnement extérieur

Système thermodynamique **simple** : Échange d'énergie

- Le **travail** est un transfert d'énergie qui provient du déplacement du point d'application d'une force exercée par le milieu extérieur sur le système thermodynamique.
- La **chaleur** est un transfert d'énergie qui ne découle pas du déplacement du point d'application d'une force.



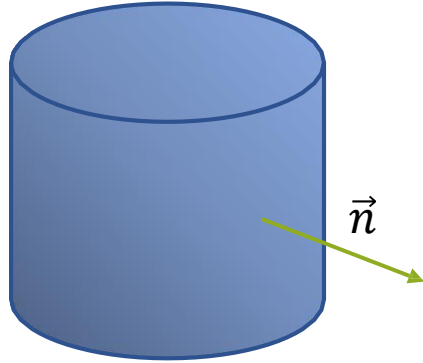
- Une frontière **adiabatique** interdit les échanges de chaleur entre le système et le milieu extérieur
- Une frontière **diatherme** laisse passer la chaleur.

Systemes thermodynamiques : variables d'état

- ▶ Un système thermodynamique peut être caractérisé/décrit à l'échelle macroscopique par des variables d'état (grandeurs statistiques : $P, V, T, C, n, m \dots$)
- ▶ **Variables extensives** : dépendent de l'étendue du système ($V, n, m, q, S \dots$)
- ▶ **Variables intensives** : indépendantes de la taille d'un système ($P, T, C \dots$)
- ▶ Le rapport de deux grandeurs extensives devient indépendant de la taille du système ($\rho = m/V ; v = V/n \dots$)
- ▶ L'état d'un système thermodynamique simple est complètement caractérisé par trois variables d'état : une variable pour indiquer **la taille**, une pour caractériser **l'état mécanique** et une pour **l'état thermique**

Systemes thermodynamiques : variables d'état

La pression



$$d\vec{F} = -p\vec{n} dS$$

- Définit la force qu'exerce un fluide par unité de surface.
- Grandeur physique qui traduit les échanges de quantité de mouvement dans un système thermodynamique.
- Caractérise l'état mécanique du fluide

La pression est une variable d'état intensive.

Unité et conversion

$$1\text{Pa}=1\text{N/m}^2$$

$$1\text{ atm} = 101325\text{ Pa.}$$

$$1\text{ bar} = 10^5\text{ Pa.}$$

$$1\text{ mbar} = 1\text{ hPa} = 100\text{ Pa.}$$

$$1\text{ torr} = 1\text{ mmHg} = 133,3\text{ Pa}$$

$$1\text{ atm} = 760\text{torr.}$$

$$1\text{ mmH}_2\text{O} = 9,81\text{ Pa.}$$

Systemes thermodynamiques : variables d'état

La température

- ▶ Grandeur caractéristique des agitations microscopique d'un système
- ▶ La température d'équilibre thermique est atteinte lorsqu'un corps ayant une température plus élevée transfère de l'énergie thermique à un autre corps ayant une température plus basse.
- ▶ Ce transfert s'effectue jusqu'à ce que les deux corps soient à la même température.

Unité et conversion

$$(^{\circ}F) = \frac{9}{5} * (^{\circ}C) + 32$$

$$(^{\circ}C) = \frac{5}{9} * [(^{\circ}F) - 32]$$

$$(^{\circ}C) = (K) - 273,15$$

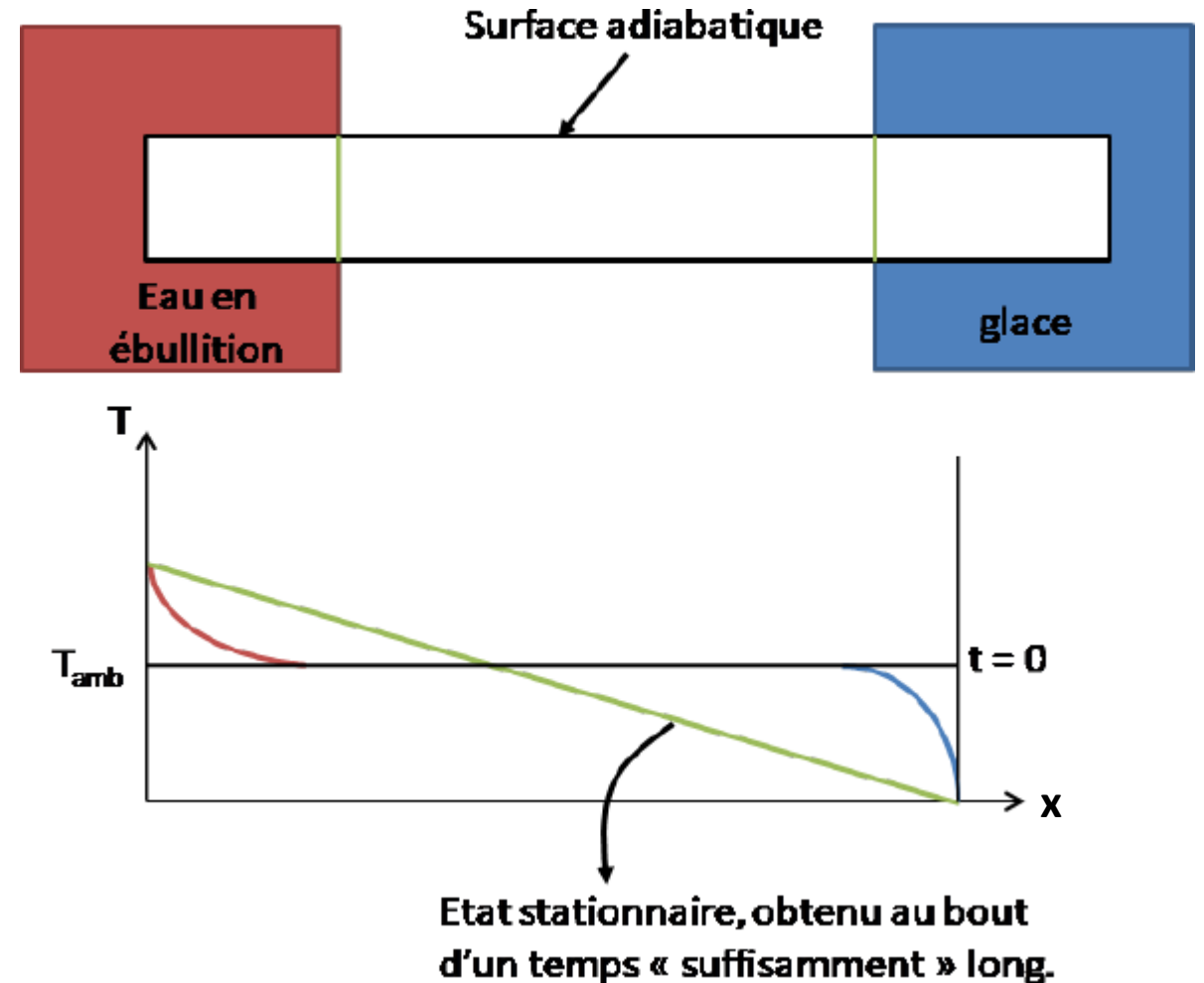
$$(K) = (^{\circ}C) + 273,15$$

$$(^{\circ}F) = \frac{9}{5} * (K) - 459,67$$

État stationnaire
Équilibre thermodynamique
Transformations thermodynamique

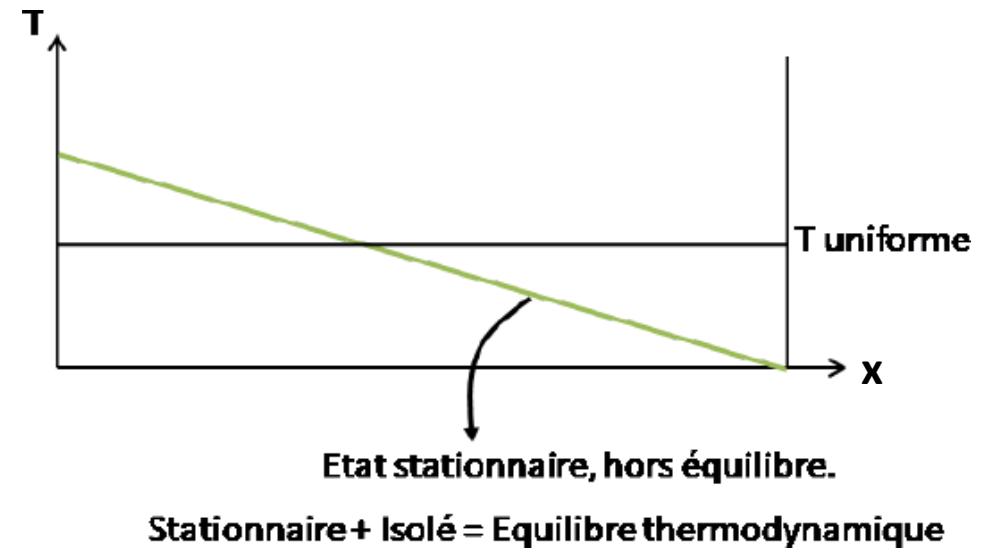
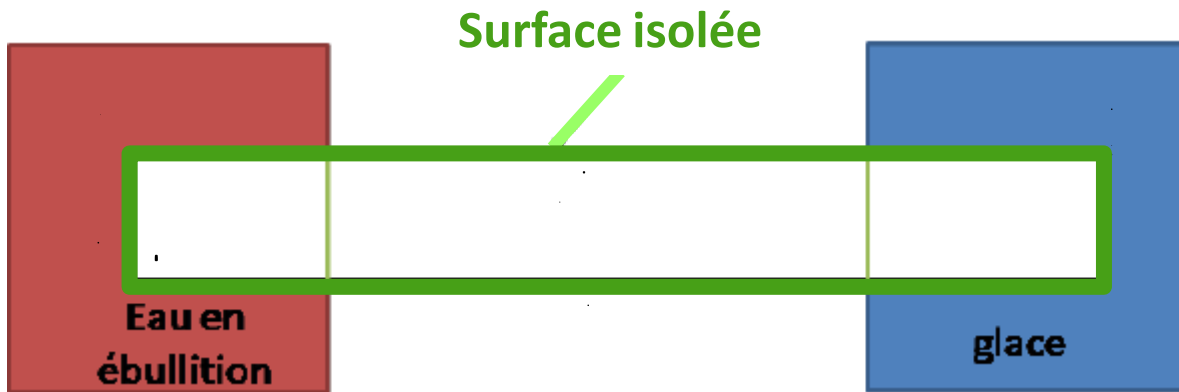
État stationnaire thermodynamique

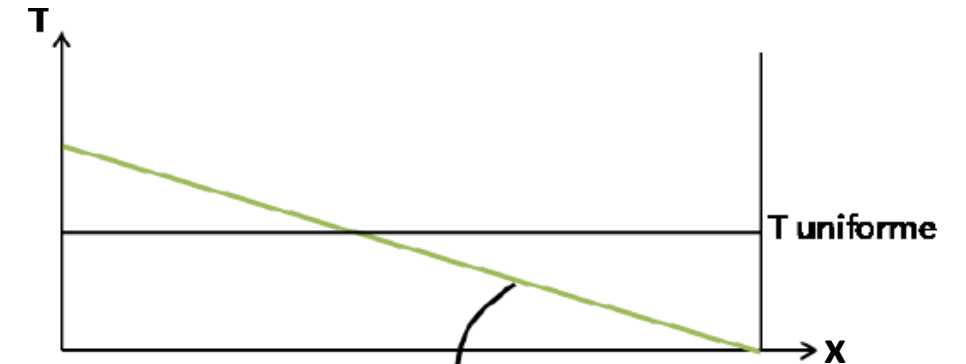
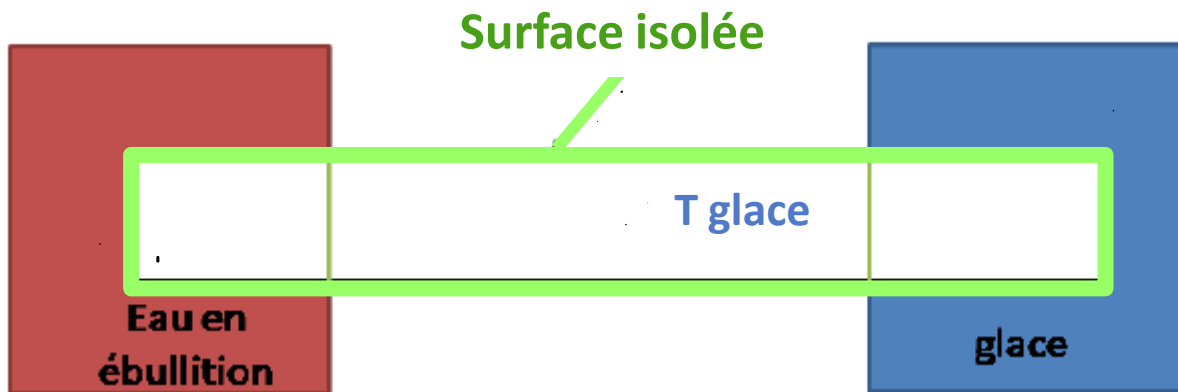
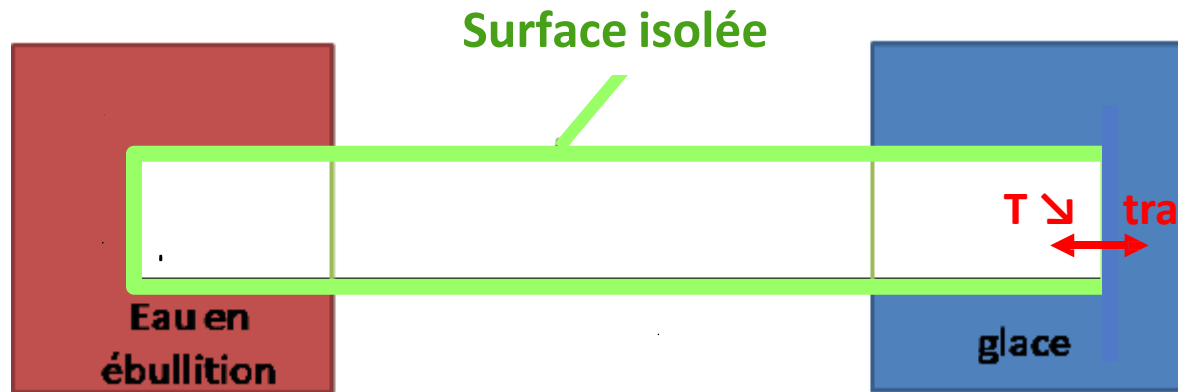
► L'état d'un système est dit **stationnaire** si **toutes les grandeurs** qui le caractérisent demeurent **constantes au cours du temps**. Dans le cas contraire (une ou plusieurs variables d'état évoluent dans le temps), le système subit une transformation (ou évolution).



Équilibre thermodynamique

- ▶ Un système en **équilibre thermodynamique** = système **isolé** + état stationnaire
- ▶ Absence de tout échange avec l'extérieur



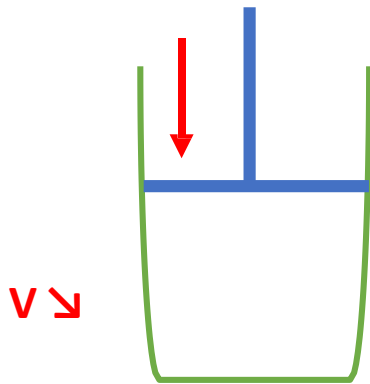


Etat stationnaire, hors équilibre.
Stationnaire + Isolé = Equilibre thermodynamique

Un système en **équilibre thermodynamique** = système **isolé** + état stationnaire

Équilibre thermodynamique

- ▶ Un système en **équilibre thermodynamique** = **système isolé + état stationnaire**
- ▶ A l'équilibre thermodynamique, toutes les variables d'état sont constantes dans le temps



Déplacement du piston

- Fluide en écoulement
- Pression non uniforme

Arrêt du piston

- Système isolé

➡ **État instationnaire**

- ▶ Si une ou plusieurs variables varient dans l'espace et / ou le temps

➡ **Système hors équilibre thermodynamique : en évolution / transformation**

Équilibre thermodynamique

- ❑ Une fois le système isolé, il continue à évoluer ➔ l'uniformisation n'est pas instantanée
- ❑ On ne peut pas définir une valeur fixe à une variable d'état en cours de l'évolution
- ❑ Si certaines variables d'état ne sont pas uniformes à l'intérieur du système ➔ non-réalisation de l'équilibre thermodynamique

⇒ **Les variables d'état d'un système ne sont toutes définies que s'il est à l'équilibre thermodynamique.**

- ❑ La non-uniformité de variables d'état est liée à un transfert d'énergie à l'intérieur même du système (chaleur dans le cas du barreau, travail mécanique dans le cas du fluide comprimé).

⇒ **De façon générale, un système à l'équilibre thermodynamique n'est parcouru par aucun transfert d'énergie.**

Transformations thermodynamiques

- ▶ Si une ou plusieurs variables d'état évoluent dans le temps ▶ le système subit une **transformation** (ou évolution).
- ▶ Transformation **réversible** : suite d'états d'équilibre thermodynamique infiniment proches les uns des autres (continuité). **P22-23**
- ▶ Transformation **irréversible** : ne passe pas par des états d'équilibre.
- ▶ Transformation **quasistatique** : se déroule si lentement que le système peut être considéré comme une succession d'états d'équilibre

Transformations thermodynamiques

- ▶ Transformation **isotherme** : $T=\text{cste}$ à chaque instant de la transformation
- ▶ Transformation **adiabatique** : $Q=0$ pas d'échange pas de chaleur avec l'extérieur
- ▶ Transformation **isobare** : $P=\text{cste}$ à chaque instant de la transformation
- ▶ Transformation **isochore** : $V=\text{cste}$ au cours de la transformation
- ▶ **Cycle thermodynamique** : l'état final est le même que l'état initial

Équations d'état / Coefficients thermoélastiques

⇒ Exemples d'Équations d'état : gaz parfait, gaz réels (de van der Waals), liquide, solide élastique

Coefficients thermoélastiques

- Caractérisent le comportement des différents matériaux

**Coefficient de
dilatation
volumique :**

$$\alpha_V = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_{p=\text{cste}} (K^{-1})$$

- représente la variation relative de volume résultant d'une variation de température. Il est homogène à l'inverse d'une température.

**Coefficient relatif
de pression :**

$$\alpha_p = \frac{1}{p} \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_{V=\text{cste}} (K^{-1})$$

- représente la variation relative de pression résultant d'une variation de température. Il est aussi homogène à l'inverse d'une température.

**Coefficient de
compressibilité
isotherme :**

$$\kappa_T = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_{T=\text{cste}} (Pa^{-1})$$

- représente la variation relative de volume résultant d'une variation de pression. Il est homogène à l'inverse d'une pression.



$$\left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_V \left(\frac{\partial p}{\partial V} \right)_T = -1$$

$$\alpha_V = p \alpha_p \kappa_T$$

Équations d'état : gaz parfait

À l'échelle microscopique, un gaz parfait satisfait aux deux conditions suivantes :

- la taille des molécules de gaz est négligeable devant les distances qui les séparent, ce qui permet de les assimiler à des points matériels;
- les forces d'interaction à distance entre les molécules sont négligeables (les molécules se comportent donc indépendamment les unes des autres). Ces forces d'interaction, de nature électrostatique, sont à très courte portée. Cette hypothèse sera donc valable si les distances moyennes entre molécules sont suffisamment grandes.

Équation des gaz parfaits :

$$P V = n R T$$

$R = 8,3145 \text{ J}/(\text{mol.K})$: constante universelle des gaz parfaits (universelle car elle ne dépend pas de la nature du gaz considéré).