

PHYSIQUE INDUSTRIELLE

C. Voyant

2023/2024

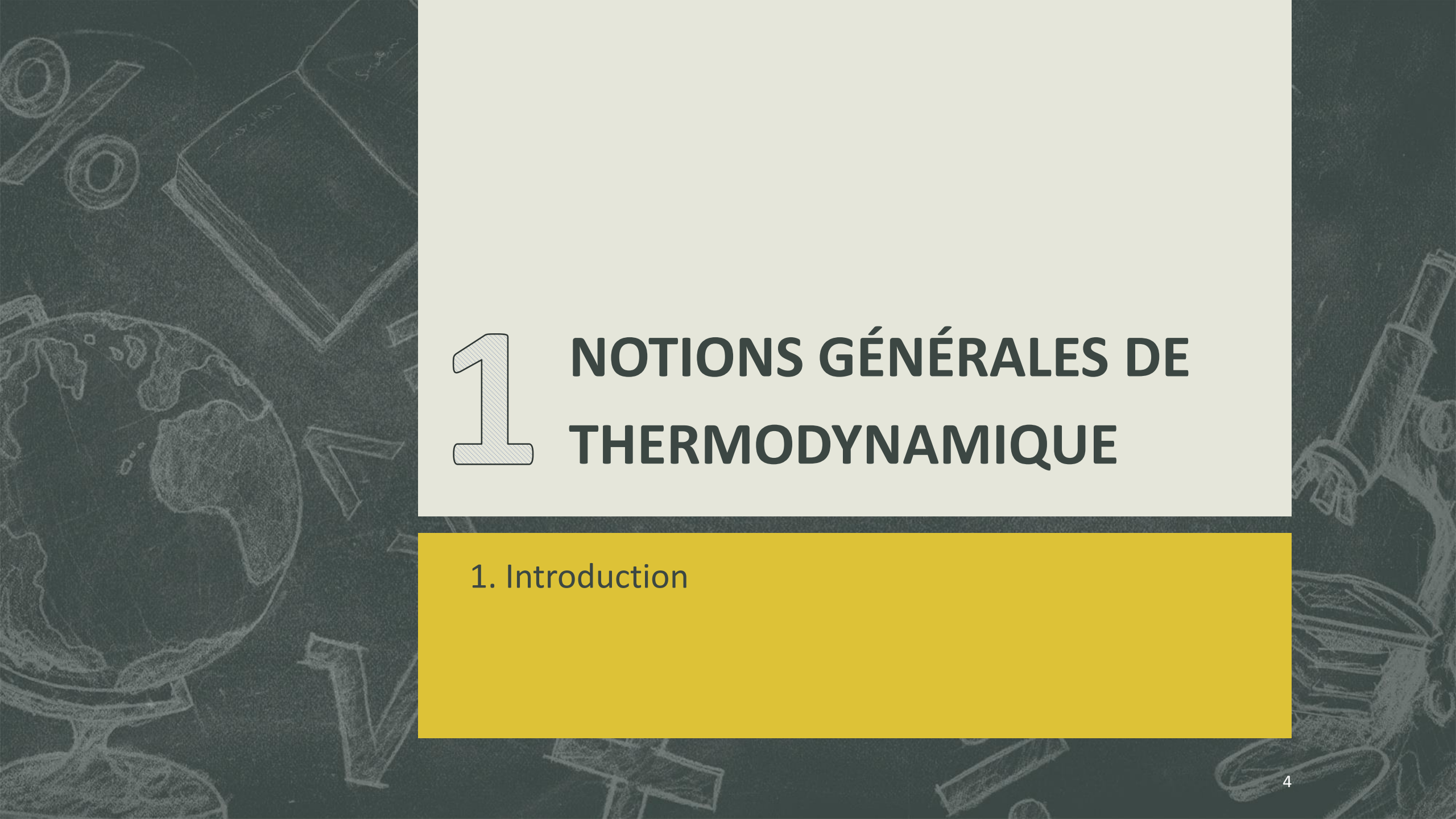
Contexte

- Identifier les phénomènes physiques impliqués dans les installations industrielles en lien avec la sécurité (Circuits froids, vapeur...)
- Maîtriser le vocabulaire technique en rapport avec les équipements et la sécurité des installations
- Dimensionner ces installations et vérifier leur bon fonctionnement



Sommaire

- **CHAPITRE 1** : Notions générales de thermodynamique
- **CHAPITRE 2** : Gaz parfaits et réels
- **CHAPITRE 3** : La vapeur d'eau
- **CHAPITRE 4** : Les cycles thermodynamiques moteurs
- **CHAPITRE 5** : Froid industriel et cycles frigorifiques



1 NOTIONS GÉNÉRALES DE THERMODYNAMIQUE

1. Introduction

1. Pourquoi ?

Thermodynamique

- Étude du **fonctionnement** et du **bilan énergétique** des machines thermiques
- Étude des **transferts de chaleur** dans un système ou entre deux systèmes

Machines thermodynamiques

- Moteurs thermiques,
- Centrales thermiques,
- Centrales nucléaires ...



Machines dynamo-thermiques

- Machines frigorifiques,
- Pompes à chaleur,
- Liquéfacteurs ...



1. Echelles spatiales

Thermodynamique

- **Aspect Macroscopique :**

Propriétés de la matière ou du système à l'échelle globale ou macroscopique, alors les propriétés sont décrites par des variables d'état macroscopiques (p , V , T , m ...)

- **Aspect Microscopique :**

Propriétés de la matière à l'échelle microscopique ou atomique en utilisant comme variables les grandeurs cinétiques des atomes ou molécules individuelles (p_i , v_i , E_i ...)

Thermodynamique Classique  Thermodynamique Statistique

1. Les termes

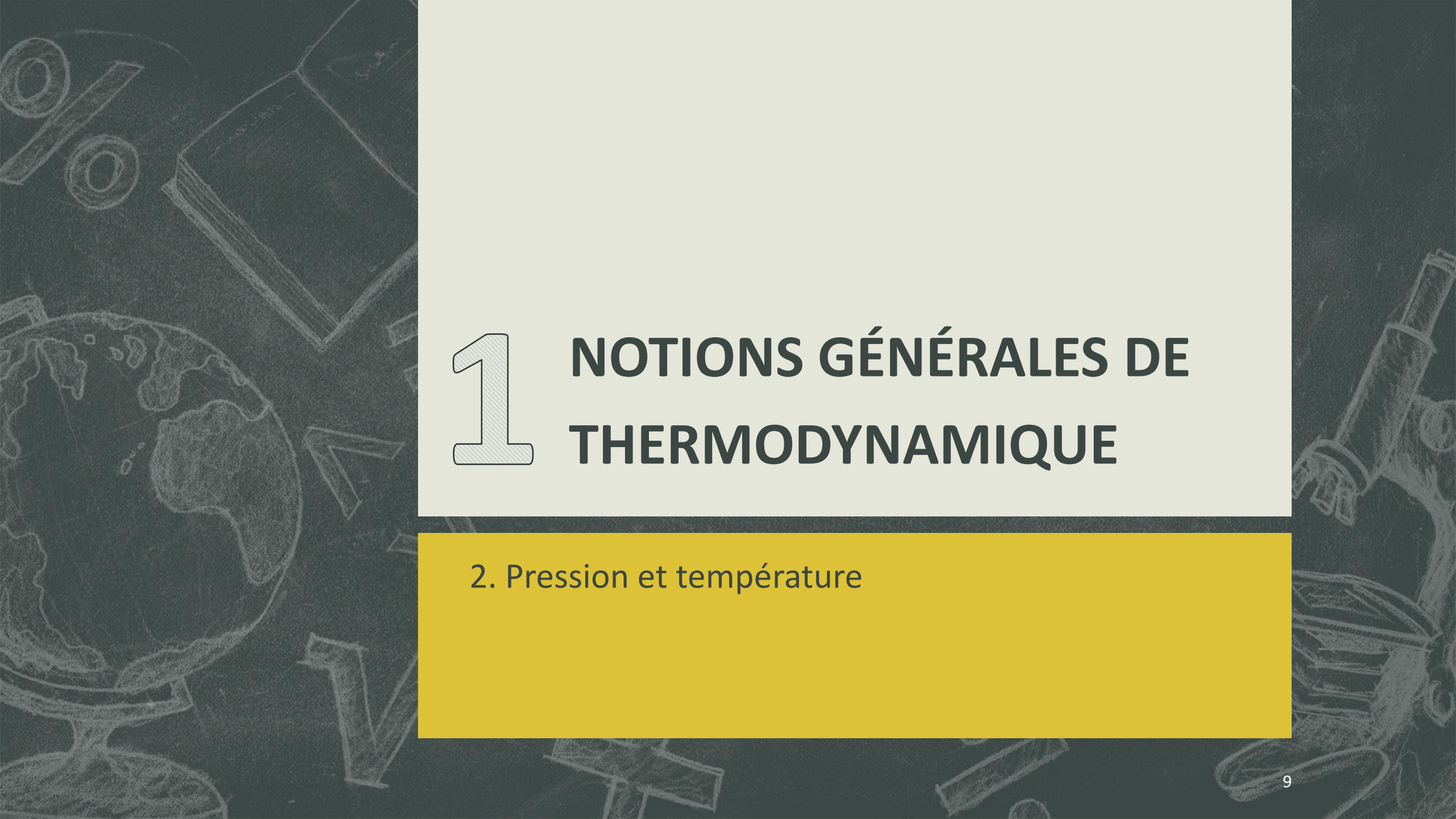
2.3. Echanges de chaleur et d'énergie

- Cycle ?
- Système *fermé* ?
- Système *calorifugé* ?
- Système *isolé* ?
- Transformation *adiabatique* ?
- Transformation *isotherme* ?
- Transformation *isochore* ?
- Transformation *isobare* ?

1. Les termes

2.3. Echanges de chaleur et d'énergie

- Cycle :
- Système *fermé* :
- Système *calorifugé* :
- Système *isolé* :
- Transformation *adiabatique* :
- Transformation *isotherme* :
- Transformation *isochore* :
- Transformation *isobare* :



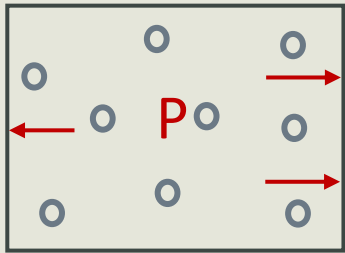
1 NOTIONS GÉNÉRALES DE THERMODYNAMIQUE

2. Pression et température

2. La pression

Une force surfacique mais aussi une énergie volumique

Résulte des nombreux chocs des atomes ou molécules sur les parois du récipient.



N molécules

$$n' = \frac{N}{V}$$



$$p = \frac{1}{3} n' m v^2$$

$$p = \frac{F}{S} = \frac{E}{v}$$



$$[p] = N \cdot m^{-2} = Pa$$

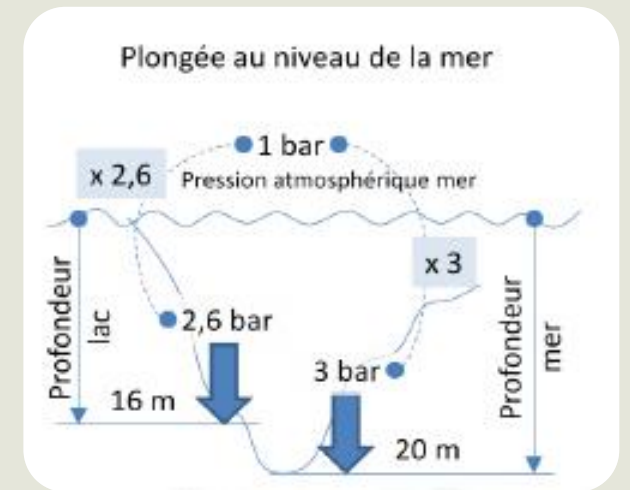
Unités :

$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$	$1 \text{ atm} = 1,013 \text{ bar}$	$1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg}$
-----------------------------------	-------------------------------------	------------------------------------

2. La pression

Différentes grandeurs

- **Pression atmosphérique** : Pression exercée sur la surface de tout corps par la couche gazeuse de l'atmosphère.
- **Pression relative** : Mesurée à partir de la pression atmosphérique.
- **Pression absolue** : Pression absolue = Pression relative + Pression atmosphérique
- **Vide** : Pression inférieure à la pression atmosphérique

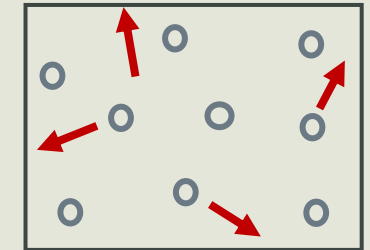


2. La température

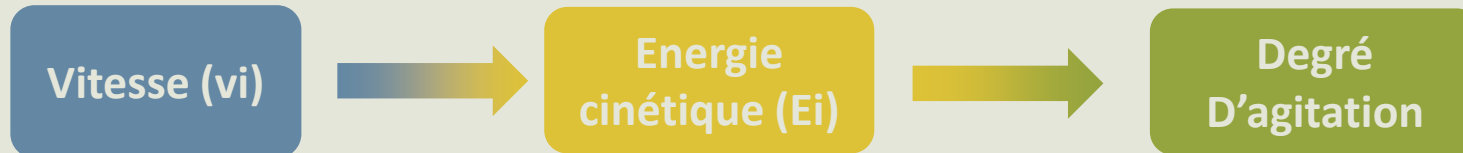
L'agitation et la vitesse des molécules

Température $\longleftrightarrow$ Degré d'agitation des molécules

À $T = 0 \text{ K} = -273^\circ\text{C}$ $\longleftrightarrow$ Les atomes ou molécules sont figés



Gaz dans une enceinte



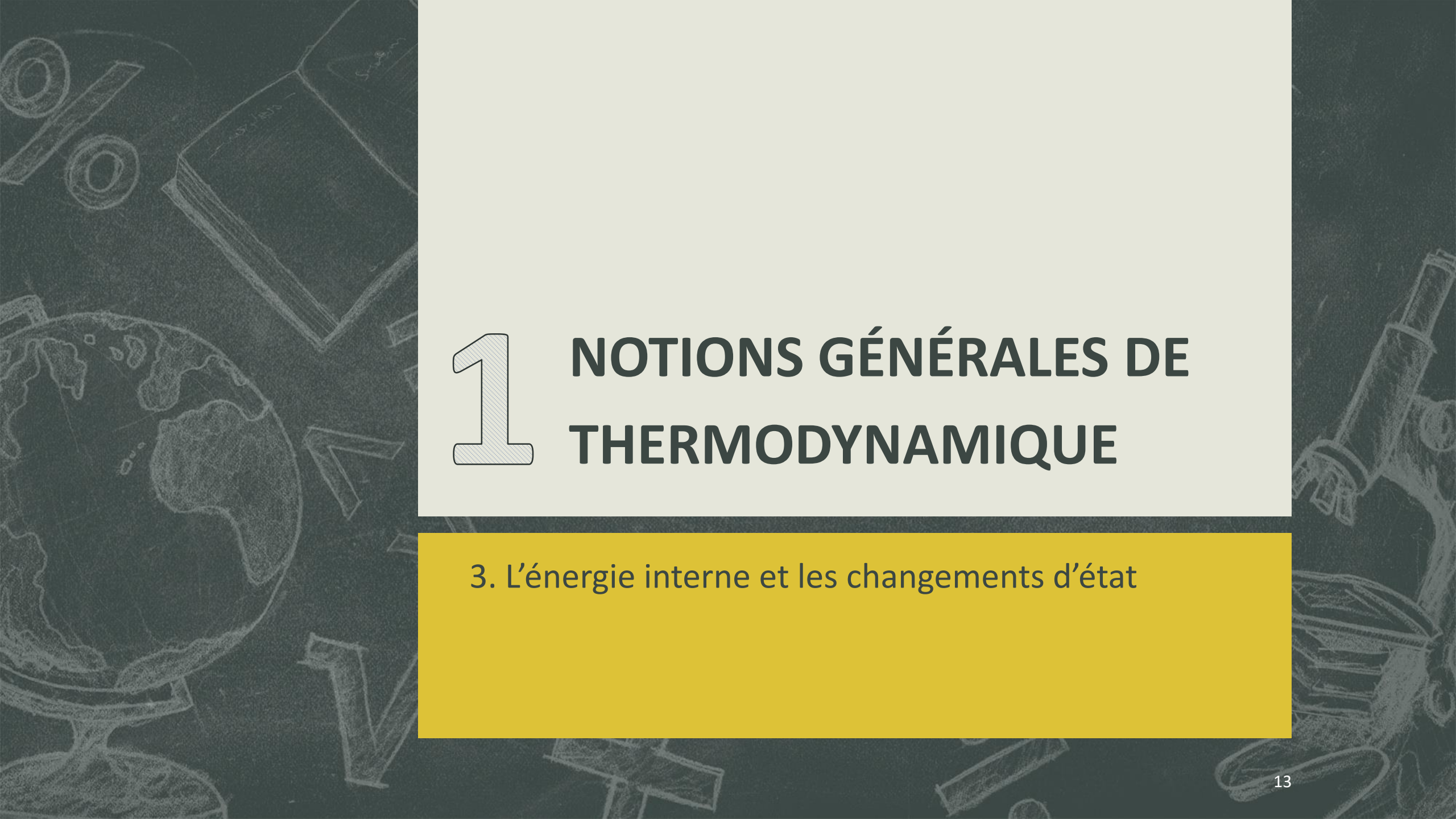
Echelle de température T en degré K

$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{3}{2} k T$$

k : Constante de Boltzmann

$$k = 1,3805 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$$

Ex : Pour un gaz parfait d'électrons quel est le gain en termes de vitesse lors du passage de 0°C à 100°C / $m_p = 2000 m_e$ / $m(\text{uma}) = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ m(g)} / ^A X \Rightarrow m_X = A (\text{uma}) M_X = A(\text{g})$



1 NOTIONS GÉNÉRALES DE THERMODYNAMIQUE

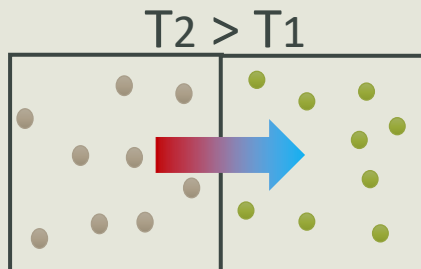
3. L'énergie interne et les changements d'état

3. Les composantes de l'énergie interne ($\Delta U = Q + W$)

Echanges de chaleur et d'énergie

Q

- L'énergie thermique correspond à l'énergie cinétique de molécules se déplaçant et subissant des chocs de manière aléatoire.
- L'énergie transférée est dite **désordonnée** au niveau microscopique

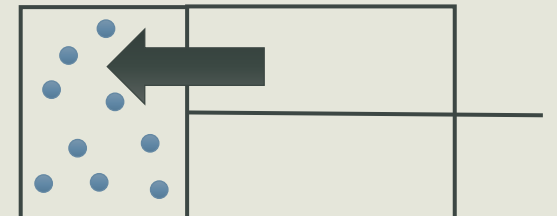


Transfert de chaleur Q

W

- Le **travail d'une force** est l'énergie fournie lorsque son point d'application se déplace.
- Il est responsable de la variation de l'énergie cinétique du système qui subit cette force.
- L'énergie transférée est dite **ordonnée** au niveau microscopique

$$W = -F\Delta l = -\frac{F}{S} \cdot S \cdot \Delta l = -P\Delta V$$

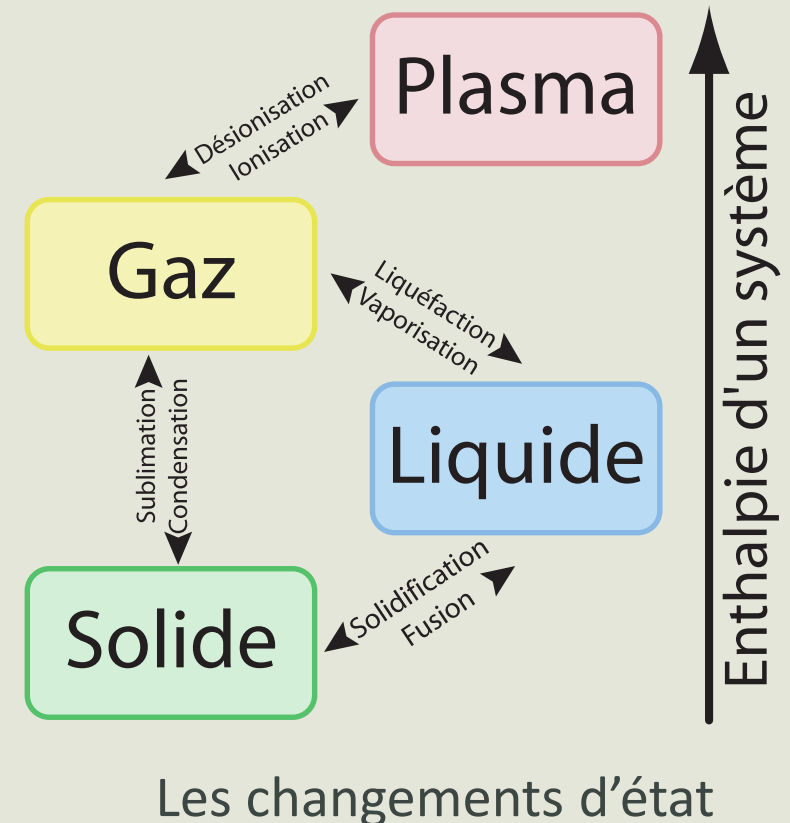


Transfert de travail W

3. Les quantités de chaleur

Chaleur et changement d'état physique

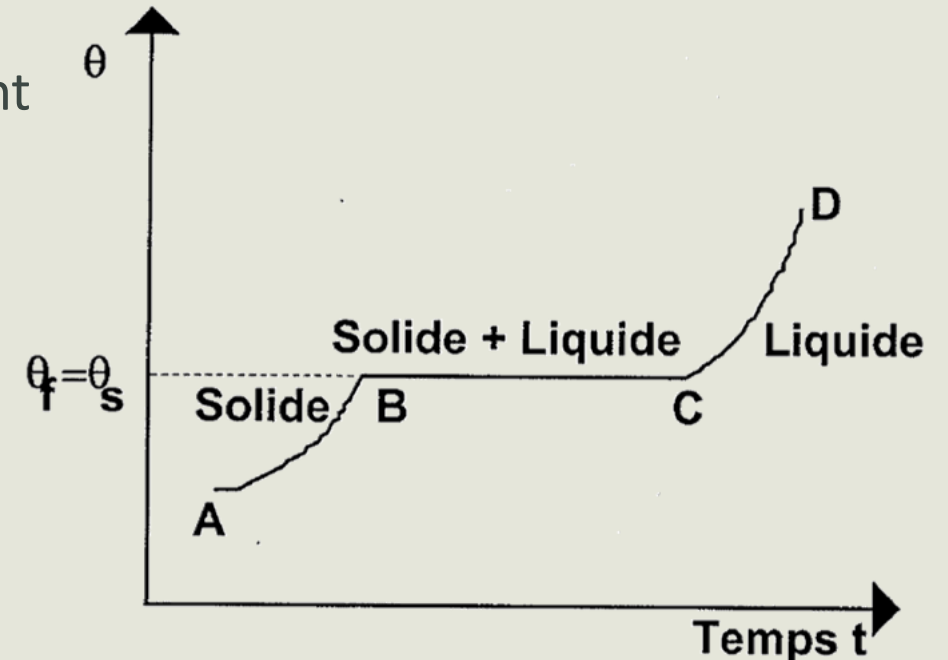
- **Chaleur sensible** -> variation de température mais pas de changement d'état physique.
- **Chaleur latente** -> constance de température avec changement d'état physique.
- **Chaleur massique** -> quantité de chaleur qu'il faut fournir pour élever de 1°C, 1 kg du corps sans changer d'état (exemple: $C_{p_{\text{eau}}} = 4186 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$)



3. Liquide $\Leftrightarrow$ Solide

Chaleur et changement d'état physique

- **AB** : Elévation de température du solide sans changement d'état
- **BC** : Changement d'état à température constante
 $\theta_f \rightarrow$ température de fusion
 $\theta_s \rightarrow$ température de solidification
- **CD** : Echauffement du liquide
- **DC** : Refroidissement du liquide
- **CB** : Solidification
- **BA** : Refroidissement du solide.

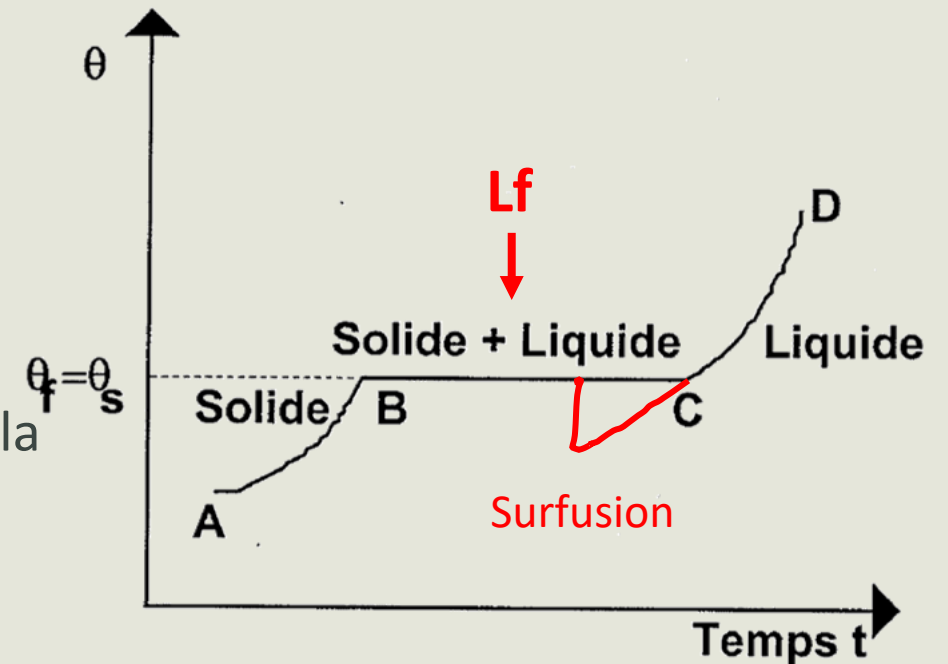


Transformation solide-
liquide

3. Réversibilité

Chaleur et changement d'état physique

- En pratique, l'état liquide peut se maintenir même au dessous de la température de solidification, c'est ce que l'on appelle la surfusion que l'on peut faire cesser par simple agitation.
- La chaleur latente de fusion, L_f est le nombre de Joules nécessaires pour transformer 1 Kg de solide en liquide à la température de fusion.
- Pour la glace, $L_f = 333 \text{ kJ/kg} \Rightarrow 333 \text{ kJ}$ sont libérées lorsque 1 Kg d'eau se congèle.
- Sous une même pression, la température de fusion et de solidification sont identiques.



Transformation solide-
liquide

3. Liquide => gaz a T° faible

Chaleur et changement d'état physique

L'évaporation

C'est la formation de vapeur à la surface libre d'un liquide. Elle est d'autant plus rapide que:

- la température est élevée ;
- la surface libre du liquide est grande ;
- l'atmosphère est sèche et renouvelée ;
- la pression est basse ;
- la pression de vapeur saturante est élevée.

3. Liquide => gaz a T° élevée ou ...

■ 2.4. Chaleur et changement d'état physique

L'ébullition

C'est la vaporisation rapide d'un liquide avec formation de bulles de vapeur au sein du liquide.

Pour un fluide pur:

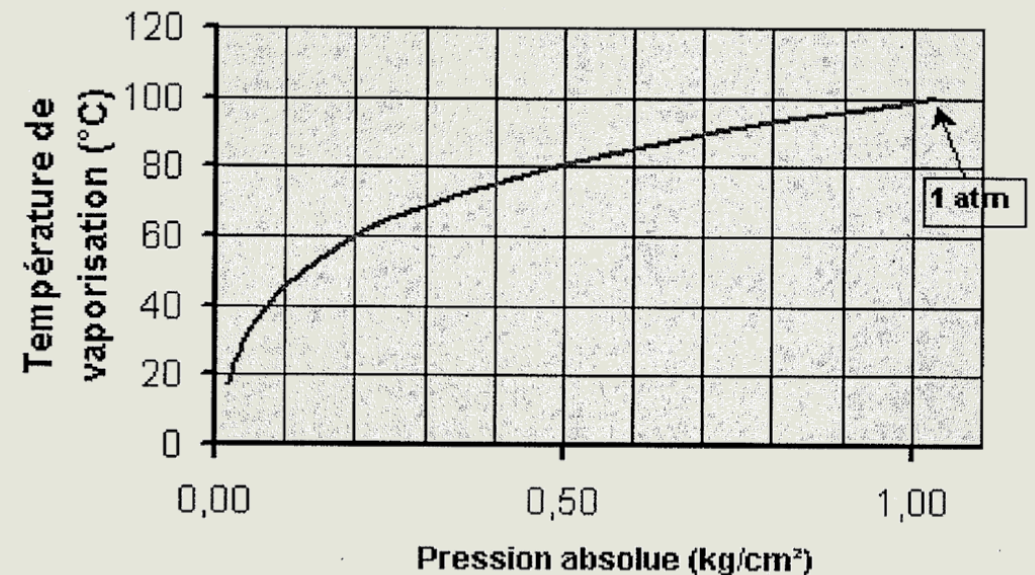
- sous une même pression, le liquide commence à bouillir toujours à la même température ;
- la température reste constante si la pression est constante.

3. Température d'ébullition

Chaleur et changement d'état physique

Point normal d'ébullition : la température d'ébullition à la pression atmosphérique.

- Pour l'eau elle est de 100°C, pour le R12 de -30°C et le R22 de - 40,8°C.
- Si on veut abaisser la température d'ébullition, il faut diminuer la pression et inversement.
- L'eau bout à 100°C au niveau de la mer, à ? au sommet de l'Everest (8850 mètres, 0.3 atm), à 20°C dans l'espace.

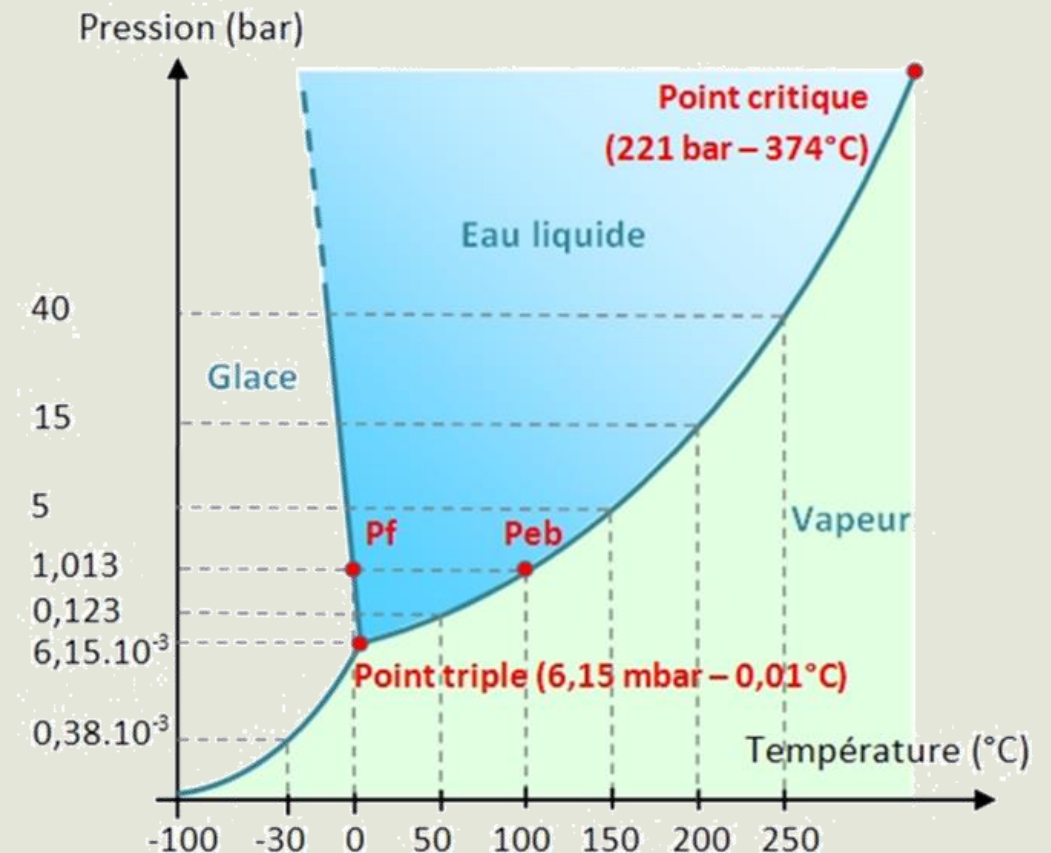


3. Les 3 états en un point : exercice

Chaleur et changement d'état physique

Point triple

1. Que peut-on dire de l'état de l'eau au point triple ?
2. Que se passe-t-il à partir du point critique ?
3. A une pression de 40 bar, quelle est la température de fusion de l'eau ? Quelle est sa température d'ébullition ?
4. A la température de -10°C , dans quel intervalle de pression l'eau est-elle solide ? Liquide ? Gazeuse ?
5. Quel est l'état de l'eau à une température de 200°C , sous une pression de 30 bar ?

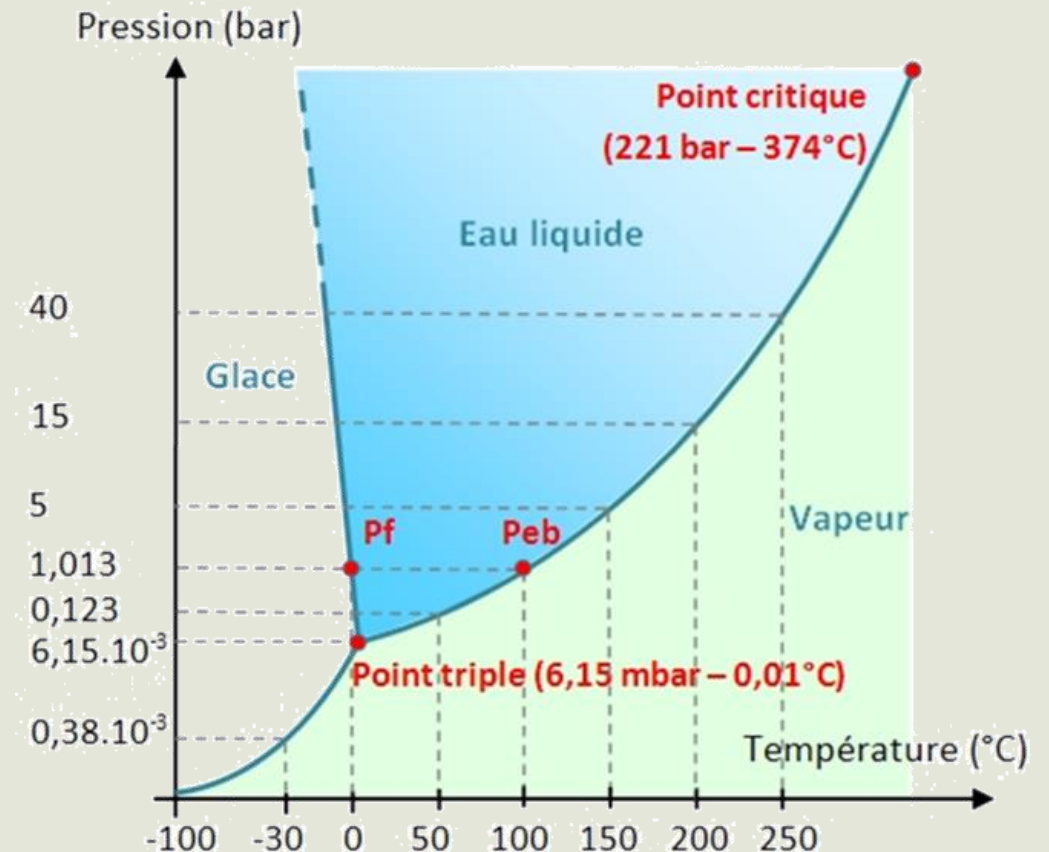


3. Les 3 états en un point : correction

Chaleur et changement d'état physique

Point triple

1. Au point triple l'eau coexiste à l'état solide, liquide et gazeux.
2. A partir du point critique l'eau passe dans l'état supercritique.
3. Pour $P = 40 \text{ bar}$, $T_{\text{fusion}}(\text{eau}) = -10^\circ\text{C}$ et $T_{\text{eb}}(\text{eau}) = 250^\circ\text{C}$
4. Pour $T = -10^\circ\text{C}$, l'eau est à l'état gazeux de $P = 0$ à 10^{-3} bar .
Puis elle est à l'état solide de $P \sim 10^{-3} \text{ bar}$ à $P = 40 \text{ bar}$.
Elle passe ensuite à l'état liquide.
5. Pour $P = 30 \text{ bar}$ et $T = 200^\circ\text{C}$, l'eau est à l'état liquide.



3. Aspect énergétique

Chaleur et changement d'état physique

Pour se faire une idée voici quelques chiffres :

- 1 kg de glace à 0°C : passage de solide à liquide — chaleur latente : 334 kJ
- 1 kg d'eau liquide : passage de 0°C à 100°C — chaleur sensible : 421,2 kJ
- 1 kg d'eau à 100°C : passage du liquide à la vapeur — chaleur latente : 2250 kJ

	θ_T (°C)	P_T (N/m ²)	P_T (atm)
Oxygène	-218	257	$2,53 \cdot 10^{-3}$
Azote	-210	12800	0,126
Gaz Carbonique	-57	518000	5,11
Eau	-0,08	610	$6,01 \cdot 10^{-3}$

3. Du gaz au liquide

■ 2.4. Chaleur et changement d'état physique

La condensation peut être obtenue :

- Par compression jusqu'à une pression égale à la pression de vapeur saturante du fluide à la température considérée ;
- Par refroidissement jusqu'à la température correspondante à la pression de vapeur saturante du fluide considéré.

La loi de la condensation est identique à celle de l'ébullition.