

Changements d'état et transferts thermiques

L'eau, composée d'atomes d'hydrogène et d'oxygène, est une substance essentielle à la vie sur Terre. Elle se présente sous trois états d'agrégation distincts : solide (glace), liquide (eau) et gazeux (vapeur d'eau). Ces différents états jouent un rôle crucial dans notre vie quotidienne et dans de nombreux phénomènes naturels. Comprendre les transitions entre ces états est essentiel pour appréhender les propriétés uniques de l'eau et son impact sur notre environnement.

Sommaire

I	États d'agrégation de la matière	2
1	Caractéristiques	2
2	Cas particulier de l'eau	3
II	Transformations physiques	3
1	Définition	3
2	Diagramme d'état (p, T)	4
3	Exemple particulier de l'eau	4
III	Quantification d'un transfert thermique	5

I États d'agrégation de la matière

1 Caractéristiques

On rencontre l'eau (H_2O) est une substance que nous rencontrons fréquemment sous trois états d'agrégation distincts : solide (glace), liquide (eau) et gazeux (vapeur d'eau). Une transitions entre ces états peut être aisément observée. Par exemple en prenant un échantillon d'eau pure, la glace fond à $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ et l'eau liquide est en ébullition à $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (à pression standard).

Dans un solide cristallisé, il y a un ordre de position et d'orientation à grande distance. Par exemple, dans la glace, les molécules d'eau occupent des positions bien définies et s'orientent de manière prévisible sur de longues distances. En revanche, à l'état fluide, il n'y a pas d'ordre à grande distance : connaître la position d'une molécule ne permet pas d'en déduire les positions d'autres molécules voisines. La différence entre l'état liquide et gazeux peut être évaluée en comparant la distance caractéristique d'une molécule (dit autrement : sa taille) avec la distance moyenne entre deux molécules.

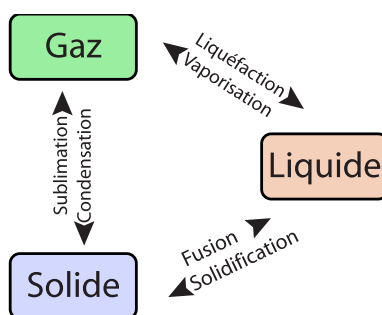


FIGURE 1 – Changement d'état d'agrégation de la matière

♥ Connaitre 1

Un **gaz** est une substance fluide qui se répartit de manière homogène dans tout volume qui la contient. Les entités constitutifs sont dispersées et désordonnées.

♥ Connaitre 2

Un **liquide** est une substance fluide condensée avec une faible compressibilité et désordonnée sur une grande distance.

Exemple : augmenter la pression de 1 bar à 2 bar ne permet pas de diminuer le volume de l'eau liquide de façon perceptible (moins de 0,1 %).

💡 Remarque

On peut associer aux liquides trois caractéristiques qui leur sont propres, une tension superficielle, une capillarité et une viscosité.

♥ Connaitre 3

Un **solide cristallin** a ses entités constitutifs rapprochées et ordonnées.

💡 Remarque

On peut citer d'autres types de solides tels que les solides amorphes.

2 Cas particulier de l'eau

La molécule d'eau est électriquement neutre. Cependant, l'atome d'oxygène est plus électronégatif que l'atome d'hydrogène, ce qui entraîne une attraction des électrons de la liaison covalente vers l'oxygène. L'atome d'hydrogène porte ainsi une charge partielle positive, notée δ^+ , et l'atome d'oxygène une charge partielle négative, notée δ^- .



FIGURE 2 – Représentations de la molécule d'eau illustrant la présence de doublet non liant sur l'atome d'oxygène et de charges partielles sur les atomes d'hydrogène et d'oxygène

♥ Connaitre 4

La **liaison hydrogène** est l'interaction électrostatique entre un atome portant un **doublet non liant** (généralement l'atome d'oxygène, l'azote ou le fluor) et un atome d'hydrogène portant une **charge partielle positive**.

💡 Remarques

- Une molécule d'eau peut former jusqu'à quatre liaisons hydrogène.
- L'énergie d'une liaison H est de l'ordre de 10 kJ/mol (entre 10 et 40 kJ/mol). En comparaison, pour une liaison covalente, les énergies sont de l'ordre de 100 voire 1000 kJ/mol.

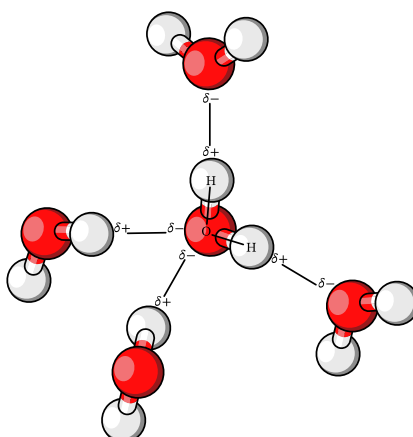


FIGURE 3 – Quatre liaisons hydrogènes formées par une molécule d'eau
(d'après nagwa.com)

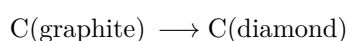
II Transformations physiques

1 Définition

♥ Connaitre 5

Une **transformation physique** est une transformation de l'état physique d'un système sans modification de sa structure moléculaire ou nucléaire.

Exemple : La synthèse du diamant artificiel repose sur la transformation physique du graphite en diamant, réalisée sous haute température et haute pression. Cette conversion est rendue possible grâce à l'utilisation d'une énorme presse hydraulique capable d'atteindre des pressions de l'ordre de 60 kbar, avec une température d'environ 1400 °C.



2 Diagramme d'état (p, T)

♥ Connaitre 6

Le diagramme d'état d'un corps pur montre les conditions de température T et de pression p où les états d'agrégation sont thermodynamiquement stables.

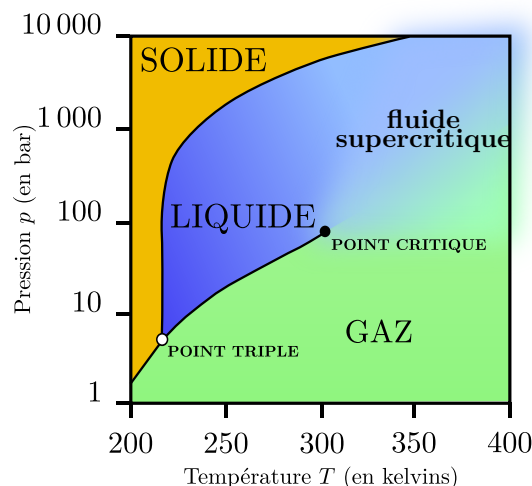


FIGURE 4 – Diagramme d'état (p, T) d'une substance

♥ Connaitre 7

Le point triple représente les conditions de pression et de température pour lesquelles les trois phases (solide, liquide, gaz) coexistent.

💡 Remarque

Toutes les substances pures ont un point triple, mais les valeurs spécifiques de pression et de température du point triple varient en fonction des propriétés uniques de chaque substance.

3 Exemple particulier de l'eau

Solide : L'eau sous forme solide (glace) a une structure cristalline, où chaque molécule est liée à quatre autres par des liaisons hydrogène. Elle a un réseau régulier. En chauffant, les liaisons hydrogène se brisent partiellement, ce qui entraîne une diminution de l'ordre à l'état liquide.

Liquide : À l'état liquide, l'eau conserve des liaisons hydrogène, mais elles sont moins structurées qu'à l'état solide. Les liaisons sont plus dynamiques et se forment et se brisent continuellement. En chauffant, l'énergie thermique augmente, brisant davantage de liaisons et conduisant à l'évaporation.

Gaz : À l'état gazeux, l'eau est constituée de molécules libres avec des liaisons hydrogène très faibles. En chauffant, l'énergie cinétique augmente, les liaisons hydrogène sont rompues en grande partie, conduisant à l'état gazeux avec une plus grande liberté moléculaire.

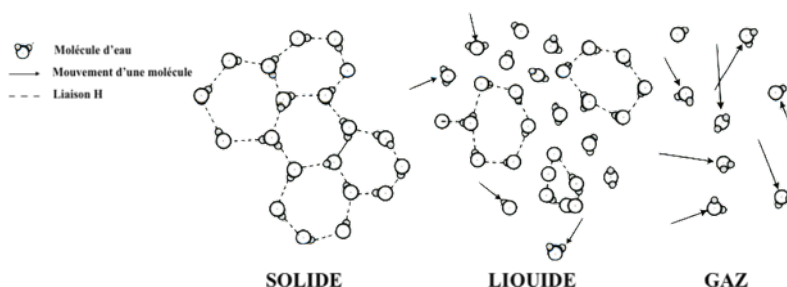
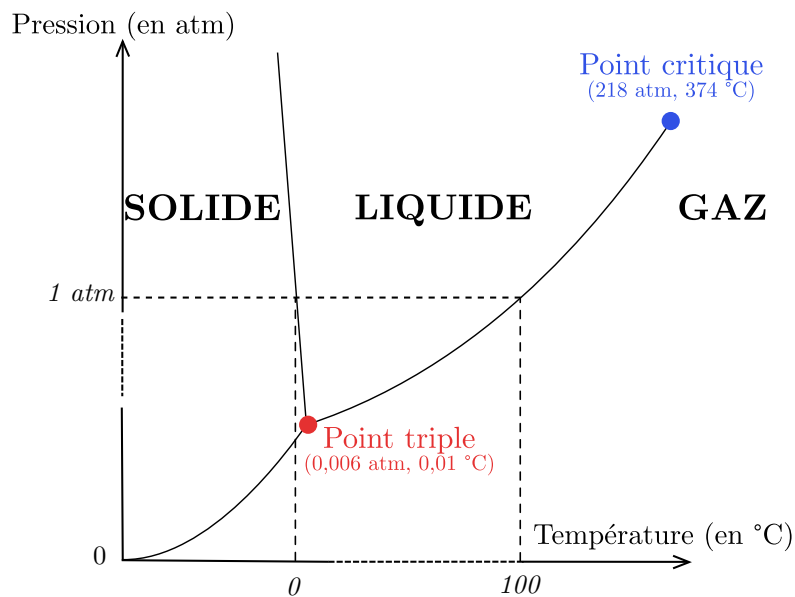


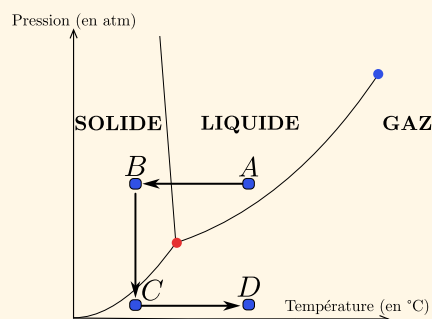
FIGURE 5 – Évolution de l'agitation moléculaire suivant l'état d'agrégation de l'eau

La caractéristique principale du diagramme d'état de l'eau est marquée par la courbe de fusion, qui représente la frontière entre les domaines où le solide et le liquide de l'eau existent. Cette courbe de fusion a une pente négative, indiquant que la température de fusion de l'eau diminue à mesure que la pression augmente.

FIGURE 6 – Diagramme d'état (p,T) de l'eau

Exercice d'application 1

Le procédé de lyophilisation permet d'extraire l'eau contenu dans un aliment pour une meilleure conservation. Un aliment est pris dans les conditions données par le point A . On réalise ensuite successivement les étapes allant de B à D . Expliquer ce principe en exploitant le diagramme (p,T) fourni ci-dessous.

FIGURE 7 – Diagramme d'état (p,T) de l'eau

III Quantification d'un transfert thermique

♥ Connaître 8

Un **transfert thermique** est un transfert d'énergie thermique d'un système à un autre se produisant suivant trois modes principaux : la conduction (ou diffusion), la convection et le rayonnement.

💡 Remarque

Dans la suite, on s'intéresse uniquement à la **diffusion thermique** où l'énergie se déplace des zones de forte température vers celles de faible température, dans un milieu macroscopiquement immobile.

♥ Connaître 9

La **capacité thermique** d'un système \mathcal{S} traduit l'aptitude de ce système à stocker de l'énergie reçue.

💡 Remarques

- D'un point de vue microscopique, l'énergie peut être stockée sous forme d'énergie cinétique de translation, de rotation ou de vibration ;
- Un système \mathcal{S} a une capacité thermique totale notée avec la lettre C en majuscule. Aussi, on lui associe une capacité thermique massique (par unité de masse) notée avec la lettre c en minuscule ;
- c et C sont reliées : $C = mc$ où m la masse de \mathcal{S} .

♥ Connaître 10

Dans le cas d'une transformation isobare et **sans changement d'état**, un **transfert thermique** Q reçu ou cédé par un système \mathcal{S} se détermine par la relation :

$$Q = mc(T_f - T_i) \quad \begin{cases} Q \text{ en joules (J)} \\ m \text{ en kilogrammes (kg)} \\ c \text{ en JK}^{-1}\text{kg}^{-1} \\ T_f \text{ et } T_i \text{ en kelvins (K)} \end{cases}$$

avec :

- m : la masse de \mathcal{S} ;
- c : capacité calorifique massique de \mathcal{S} ;
- T_f et T_i : températures finale et initiale de \mathcal{S} en kelvins (K).

Lors d'un changement d'état, la température d'un système est constante (présence d'un palier de température). Donc, le transfert thermique ne peut plus s'écrire comment dans **Connaître 10**.

♥ Connaître 11

Dans le cas d'un changement d'un état A vers un état B d'un système \mathcal{S} , le transfert thermique Q s'écrit :

$$Q = mL_{A \rightarrow B}$$

où $L_{A \rightarrow B}$ est l'énergie massique de changement d'état.

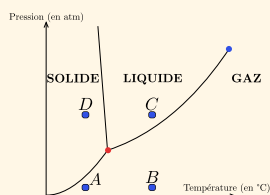
💡 Remarque

$L_{A \rightarrow B}$ traduit la quantité d'énergie pour qu'un 1 kg de \mathcal{S} se transforme d'un état A vers un état B.

Exemple : $L_{\text{liq} \rightarrow \text{vap}}(\text{eau}) = 2\,257 \text{ kJ/kg}$. Il faut donc fournir 2 257 kJ pour vaporiser 1 kg d'eau à la température de 373 K.

Exercice d'application 2

Déterminer les expressions des transferts thermiques pour chacune des transformations suivantes.



- Transformation $A \rightarrow B$;
- Transformation $A \rightarrow B \rightarrow C$;
- Transformation $A \rightarrow D$;
- Transformation $A \rightarrow D \rightarrow C$.

FIGURE 8 – Diagramme d'état (p, T) avec quatre états d'un système