ATOME, MOLECULE, ETAT PHYSIQUE ET TRANSFORMATION

« La planète ne nous appartient pas, c'est nous qui lui appartenons. Nous passons, elle demeure. »

Pierre Rabhi

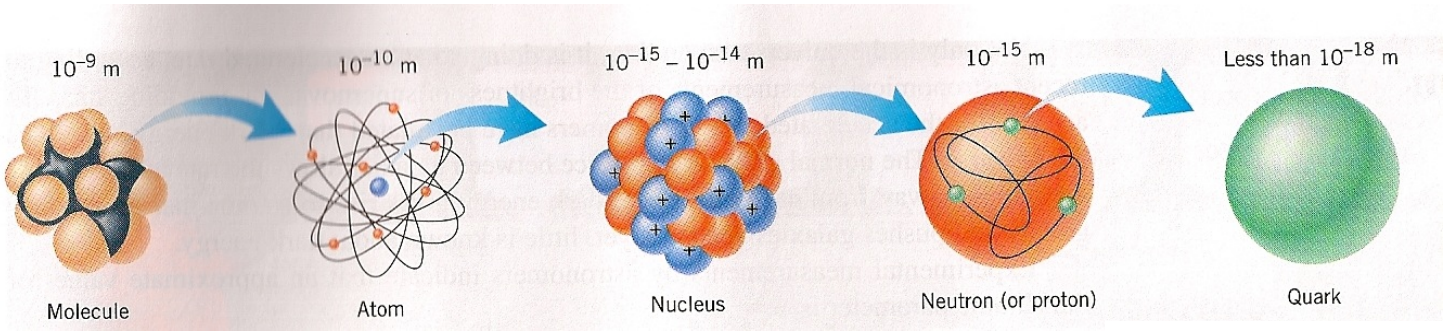
I – Atome et élément chimique

1-1 L'atome

La matière qui nous entoure est constituée **d'atomes** et de **molécules**, association de plusieurs atomes, (cf. figure ci-contre). Les propriétés physico-chimiques de la matière à notre échelle (échelle macroscopique) sont déterminées par les propriétés et l'arrangement des atomes et des molécules (échelle moléculaire) constitutifs de cette matière.

La structure de la matière est rappelée sur la figure ci-dessous. Un atome est constitué **d'électrons** $\left(m_e = 9{,}109\times10^{-31}\ \text{kg}\right)$, de **protons** $\left(m_p = 1{,}673\times10^{-27}\ \text{kg}\right)$ et de **neutrons** $\left(m_n = 1{,}675\times10^{-27}\ \text{kg}\right)$.

Ces deux dernières particules constituent le **noyau** de l'atome.



Il est remarquable que l'électron et le proton possèdent une charge électrique opposée en signe mais de même valeur $e = 1{,}602\times10^{-19}$ C (charge positive pour le proton et négative pour l'électron). Le neutron n'est pas chargé.

La **charge électrique est une propriété intrinsèque des particules** au même titre que la masse. Par contre, il existe des **charges positives** et des **charges négatives** (une masse est une grandeur toujours positive).

Dans les années 1970, on s'est rendu compte que le proton et le neutron n'étaient pas des particules élémentaires. Ils sont constitués chacun de trois particules plus fondamentales ; **les quarks** (voir figure ci-dessus). Ces derniers ont des charges de $-\frac{1}{3}e$ ou $+\frac{2}{3}e$. Mais nous n'avons jamais observé expérimentalement de quarks à l'état libre et il y a de bonnes raisons théoriques de croire qu'ils doivent rester confinés à l'intérieur du proton et du neutron.

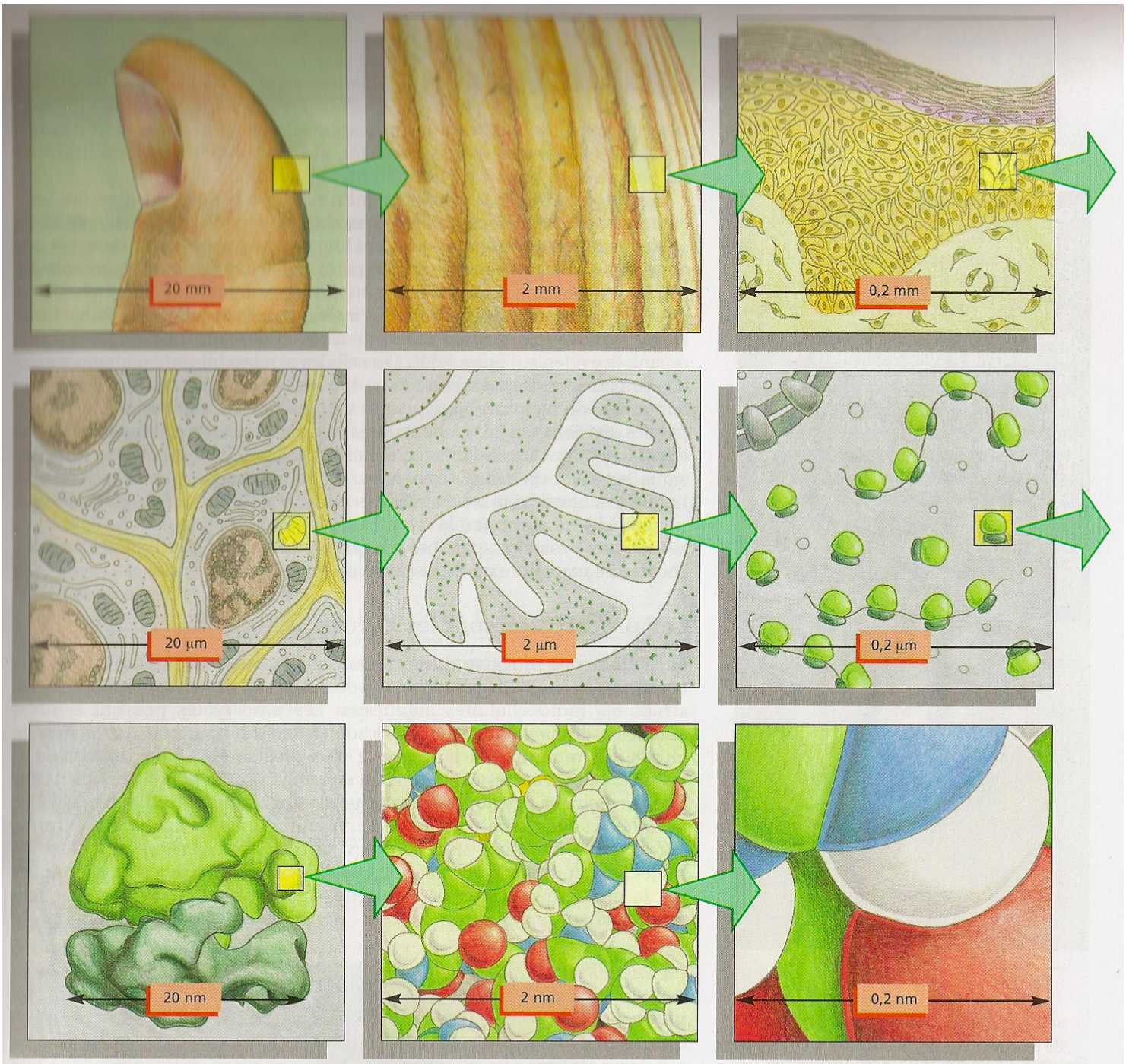


Figure 1-9 **Quelles sont les tailles d'une cellule et de ses constituants ?** Ce schéma donne une idée de l'échelle de taille entre les cellules vivantes et les atomes. Chaque dessin montre une image qui est ensuite agrandie d'un facteur 10 dans une progression imaginaire qui va du pouce à la peau, aux cellules de la peau, à une mitochondrie, à un ribosome, pour aboutir à un groupe d'atomes participant à la composition d'une des nombreuses protéines de notre corps. Les détails de la structure moléculaires, tels qu'ils sont montrés dans les deux derniers dessins, sont au-delà de la puissance du microscope électronique.

Un atome est noté symboliquement de la façon suivante :

$$^{A}_{Z}X$$

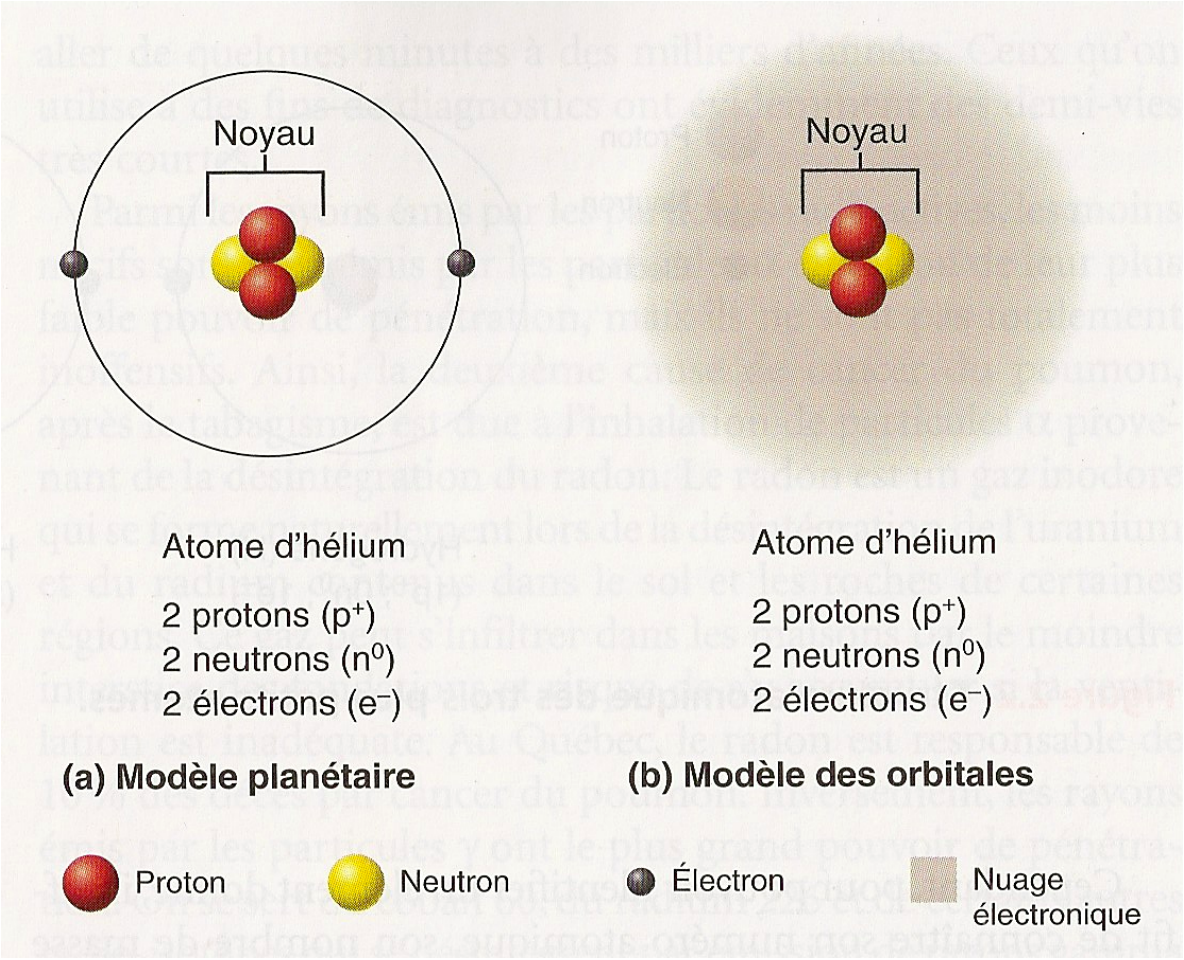
X est le symbole chimique de l'atome.

A est le **nombre de masse** , il correspond à la somme du nombre de protons et du nombre de neutrons de l'atome.

Z est le **numéro atomique**, il correspond au nombre de protons de l'atome.

Le nombre de neutrons, noté en général N, vaut $A-Z$.

Par exemple, l'atome de chlore 35 s'écrit $^{35}_{17}Cl$. Un atome de chlore a toujours 17 protons, les notations 17 et N sont donc redondantes. Par contre, un atome de chlore peut avoir différents nombres de masse, donc un nombre de neutrons différent, nous allons en reparler. La figure ci-dessous représente deux modèles (dont on reparlera) de l'atome d'hélium.



Remarques

• 99 % de la masse de l'atome est contenue dans le noyau. Pour fixer les ordres de grandeur, si le proton (ou le neutron) avait la masse d'une balle de baseball, l'électron aurait la masse d'un grain de riz. La densité du noyau est énorme et vaut 10^{14}. Si la terre avait cette densité, toute sa masse serait contenue dans la taille d'une orange !

• La plupart du volume de l'atome est vide.

• L'atome est **électriquement neutre** ce qui fait que le **nombre de protons est identique au nombre d'électrons.** Z représente donc aussi le nombre d'électrons.

• La cohésion de l'atome fait intervenir des forces ou interactions. Les électrons sont liés au noyau grâce à **l'interaction électromagnétique** (nous en reparlerons) qui est à longue portée comme l'interaction gravitationnelle. La cohésion proton-proton, proton-neutron et neutron-neutron est assurée par **l'interaction forte** qui est de très courte portée (de l'ordre de la taille du noyau).

1-2 Unités fondamentales

⇒ **UNITE DE MASSE ATOMIQUE (UMA OU U)**

Par définition, $1\,\text{uma} = \frac{1}{12}$ de la masse d'un atome de carbone avec 6 protons et 6 neutrons.

En uma, la masse du proton vaut 1,00727, celle du neutron 1,00866 et celle de l'électron 0,00055.

⇒ **LA MOLE**

Etant donné la taille et la masse des atomes, il est plus facile de les manipuler en grand nombre ce qui conduit à la définition de la mole.

Définition 1 : Une mole de « quelque chose » contient exactement $N_A = 6{,}0221421 \times 10^{23}$ de ce quelque chose. N_A est le nombre d'Avogadro.

Définition 2 (historique) : La valeur numérique de la mole $\left(N_A = 6{,}0221421 \times 10^{23}\right)$ correspond par définition au nombre d'atomes de carbone 12 $\left({}^{12}_{6}C\right)$ contenus dans 12 g.

⇒ **LA MASSE MOLAIRE**

La valeur de la masse molaire d'un atome (et d'un élément chimique, voir plus loin) en g.mol^{-1} est numériquement identique à celle de la masse de l'atome en uma.

En effet, $1\ \text{uma} = \frac{1}{12}\left(\text{masse de } {}^{12}_{6}C\right) = \frac{1}{12}\frac{0{,}012}{N_A} = \frac{10^{-3}\ \text{kg}}{N_A}$ donc $1\ \text{uma} = 1\ \text{g.mol}^{-1}$.

1-3 L'élément chimique

⇒ **ISOTOPE**

Définition : Deux atomes avec le même numéro atomique Z mais avec un nombre de masse A différent sont deux **isotopes**.

Ainsi deux isotopes ont le même nombre de protons (donc d'électrons) mais pas le même nombre de neutrons.

Par exemple le carbone 12 $\left({}^{12}_{6}C\right)$ et le carbone 14 $\left({}^{14}_{6}C\right)$ sont deux isotopes.

Le carbone 14 n'est pas stable, il est radioactif. Le symbole C est lié uniquement au nombre de protons. La figure ci-dessous montre les isotopes de l'hydrogène.

La figure ci-contre résume la situation.

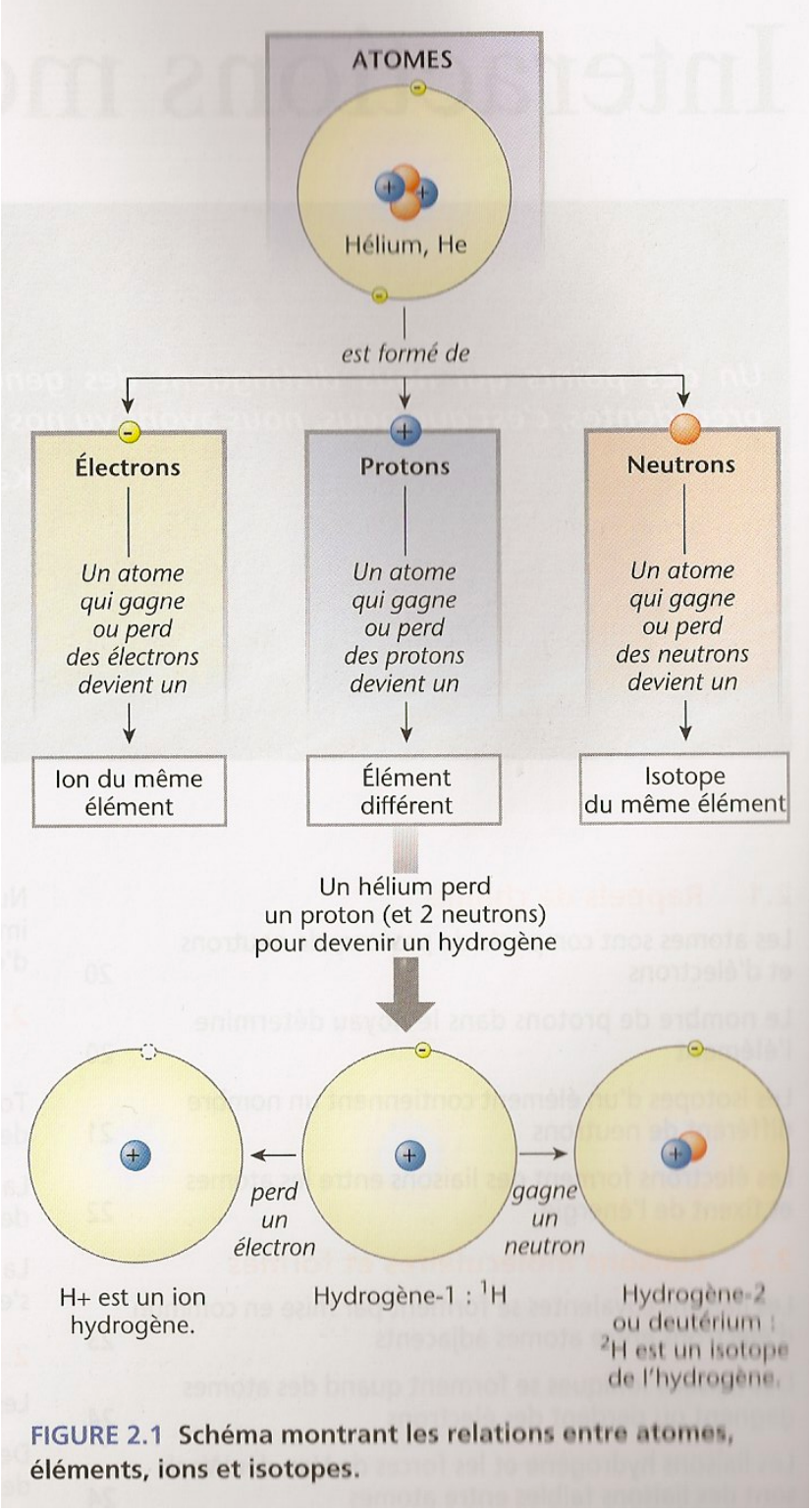


FIGURE 2.1 Schéma montrant les relations entre atomes, éléments, ions et isotopes.

Un **élément chimique** est caractérisé uniquement par le nombre de protons d'un atome: symbole ${}_{Z}X$ ou simplement X.

En effet, les propriétés chimiques d'un atome ne dépendent que de son cortège électronique (voir cours sur la structure électronique des atomes) c'est-à-dire de son nombre d'électrons qui est identique au nombre de protons.

Si on reprend l'exemple du carbone, le carbone 12 $\left({}^{12}_{6}C\right)$ et le carbone 14 $\left({}^{14}_{6}C\right)$ sont deux isotopes donc deux atomes différents mais il s'agit du **même élément chimique**. Pour les chimistes, le nombre de neutrons n'a pas d'importance, c'est simplement le numéro atomique Z qui compte. Bien sûr, pour les physiciens nucléaires, le nombre de masse A joue un rôle fondamental.

⇒ *MASSE MOLAIRE D'UN ELEMENT CHIMIQUE*

A l'état naturel, les éléments sont souvent des mélanges d'isotopes dont les proportions restent constantes. On souhaite calculer la masse molaire M d'un élément chimique qui possède plusieurs isotopes. On a simplement :

$$M\left(\text{g.mol}^{-1}\right) = \sum_i M_i \frac{x_i}{100}$$

x_i = pourcentage massique de l'isotope *i*.

M_i = masse molaire de l'isotope *i* en g.mol^{-1}.

On considère par exemple l'élément chlore que l'on suppose constitué de deux isotopes : ${}^{35}_{17}Cl$ et ${}^{37}_{17}Cl$.

${}^{37}_{17}Cl \begin{cases} x_i = 24{,}2\ \% \\ M_i = 36{,}97\ \text{g.mol}^{-1} \end{cases}$ ${}^{35}_{17}Cl \begin{cases} x_i = 75{,}8\ \% \\ M_i = 34{,}97\ \text{g.mol}^{-1} \end{cases}$ On obtient $M\left(Cl\right) = 35{,}45\ \text{g.mol}^{-1}$.

II – Molécule et composé chimique

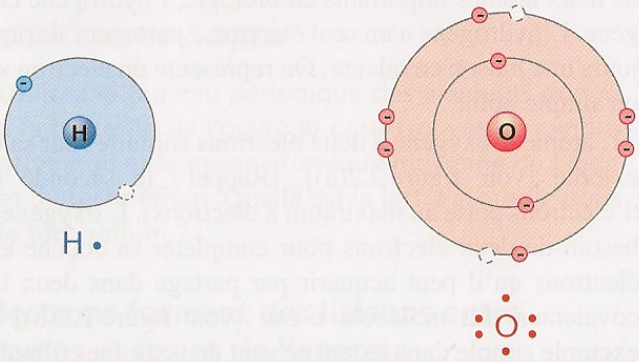
Les principes fondamentaux de la thermodynamique (cf. cours sur le sujet) font que les atomes ont tendance naturellement à s'associer pour acquérir une plus grande stabilité énergétique. Pour cela, ils échangent des électrons de leur couche externe comme nous l'étudierons en détail plus loin dans le cours. Il y a alors formation d'une **liaison chimique**. On rencontre principalement deux types de liaison chimique (cf. figure suivante).

⇒ *LA LIAISON COVALENTE*

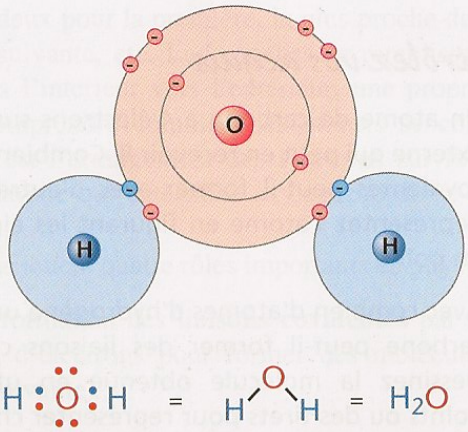
La partage d'électrons entre les atomes pour former **une molécule** comme la molécule d'eau H_2O.

⇒ *LA LIAISON IONIQUE*

La transfert d'électrons d'un atome à un autre. Il y a formation **d'un composé ionique** comme le chlorure de sodium, $NaCl_{(s)}$,le sel de cuisine.



(a) **L'hydrogène** possède un proton dans son noyau et un électron solitaire. Un élément peut être représenté schématiquement avec un point par électron sur l'orbite externe. **L'oxygène** possède 8 protons et 8 neutrons dans le noyau, avec deux paires d'électrons et deux électrons solitaires sur cette orbite.



(b) Quand un atome d'oxygène est relié à deux atomes d'hydrogène par des liaisons covalentes, il y a formation d'une molécule d'eau : les liaisons créent des paires d'électrons sur les orbites externes des atomes. On voit ici trois représentations schématiques de la molécule d'eau. Au milieu, un tiret représente une paire d'électrons partagés.

FIGURE 2.2 **La mise en commun d'électrons situés sur l'orbite externe des atomes forme des liaisons covalentes.**

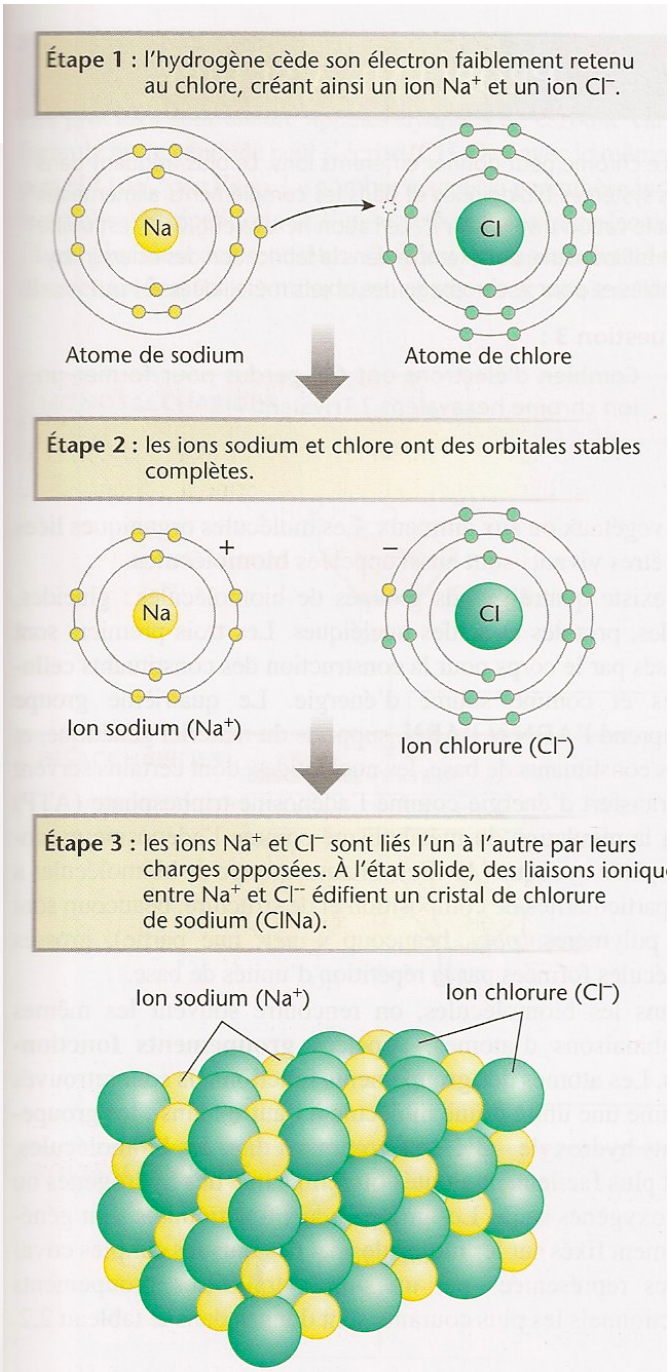


FIGURE 2.4 **Ions et liaisons ioniques.**

III –Les différents états de la matière

3-1 Classification de la matière par état physique

Les substances pures peuvent, suivant les conditions de pression et de température, exister sous trois formes physiques (cf figure ci-dessous) : ***SOLIDE, LIQUIDE et GAZ*** **(cf. Figure suivante)**

Remarque : En physique des particules et en astrophysique, on peut rencontrer un quatrième état de la matière : **le plasma**. Le noyau des atomes et les électrons sont dissociés.

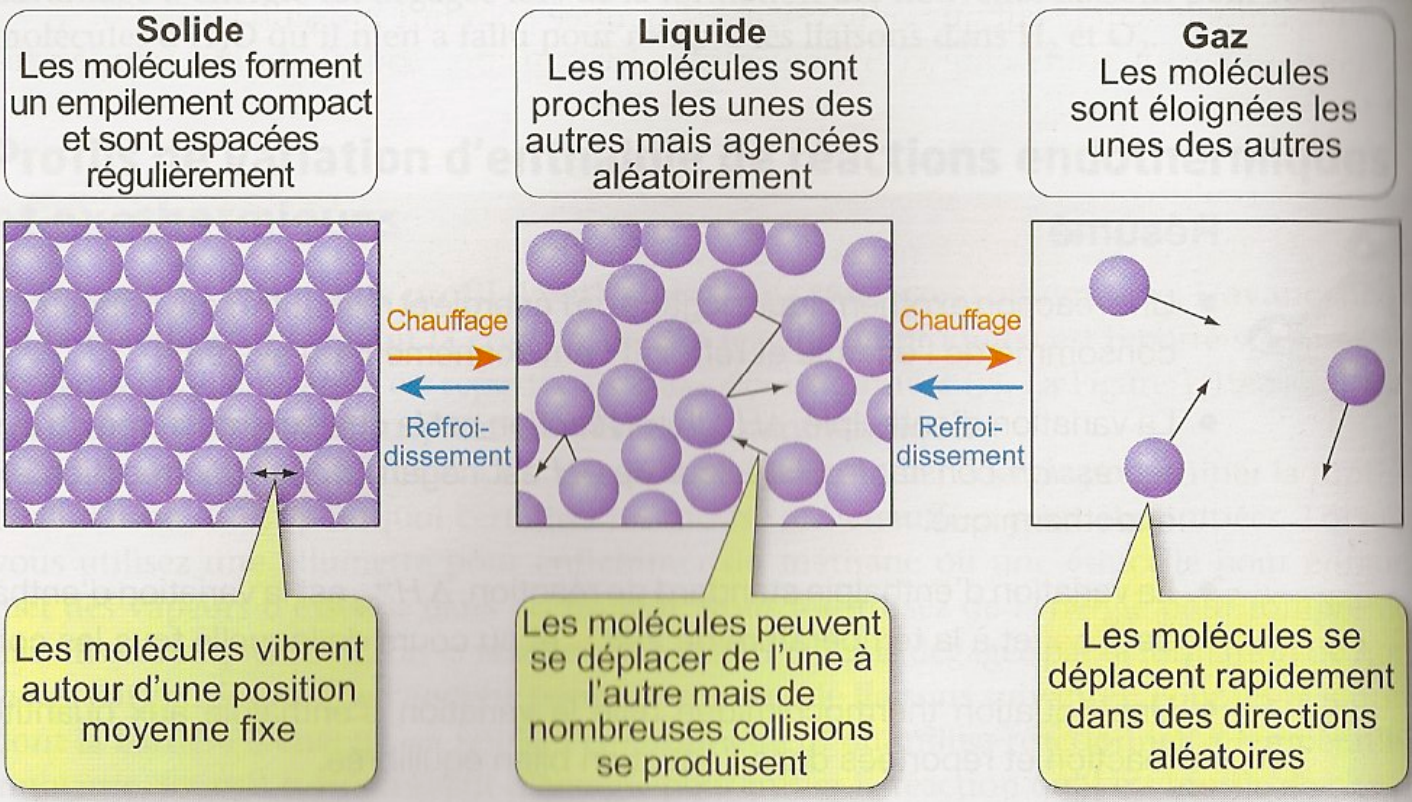


Figure 1.20 Modèle moléculaire cinétique pour la structure de la matière.

⇒ ***L'ETAT SOLIDE***

Il s'agit d'un état **compact** dont les éléments constitutifs (des atomes métalliques ou non, des ions, des molécules) sont distribués de façon régulière dans l'espace selon une géométrie tridimensionnelle périodique que l'on appelle un **cristal** (voir cours de chimie sur l'architecture de la matière). Il s'agit d'un état de la matière **ordonné**.

Remarque : Il existe des solides amorphes (le verre par exemple) à mi-chemin entre un solide et un liquide extrêmement visqueux. Les éléments constitutifs ne sont pas ordonnés dans l'espace.

Pour un solide, on a aussi les caractéristiques suivantes:

⇒ Distance intermoléculaire faible.

⇒ Forces d'interactions intenses (d'origine électrostatique).

⇒ Grande cohésion et rigidité.

⇒ Les solides ont un volume (une forme) propre et ne s'écoulent pas.

Il s'agit d'un **état de la matière quasi incompressible**, c'est-à-dire que le volume ne varie pas ou peu avec la pression et/ou la température.

⇒ L'ETAT LIQUIDE

Les particules constituant le liquide sont très proches et souvent en contact, l'état est **compact**, mais il ne présente pas d'ordre à grande distance, l'état est **désordonné**.

Pour un liquide, on a aussi les caractéristiques suivantes:

⇒ Forces d'interactions encore importantes.

⇒ Volume limité.

⇒ Pas de forme propre, les liquides prennent la forme du récipient qui les contient.

Là encore, il s'agit d'un **état de la matière quasi incompressible**, c'est-à-dire que le volume ne varie pas ou peu avec la pression et/ou la température.

⇒ L'ETAT GAZEUX

Les particules qui constituent le gaz sont quasiment libres, l'état est **dispersé** et **désordonné**. Sous l'effet de la température, les particules se déplacent de façon erratique, on parle d'agitation thermique (voir la suite du cours de thermodynamique).

Pour un gaz, on a aussi les caractéristiques suivantes:

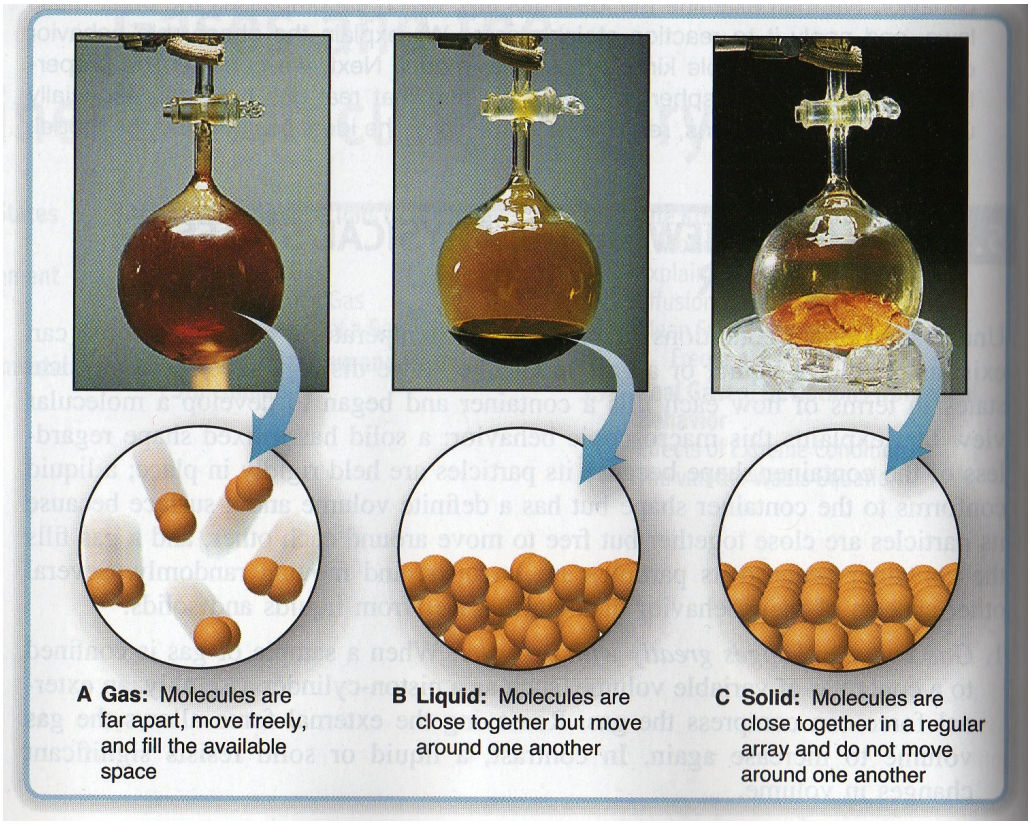
⇒ Forces d'interactions faibles.

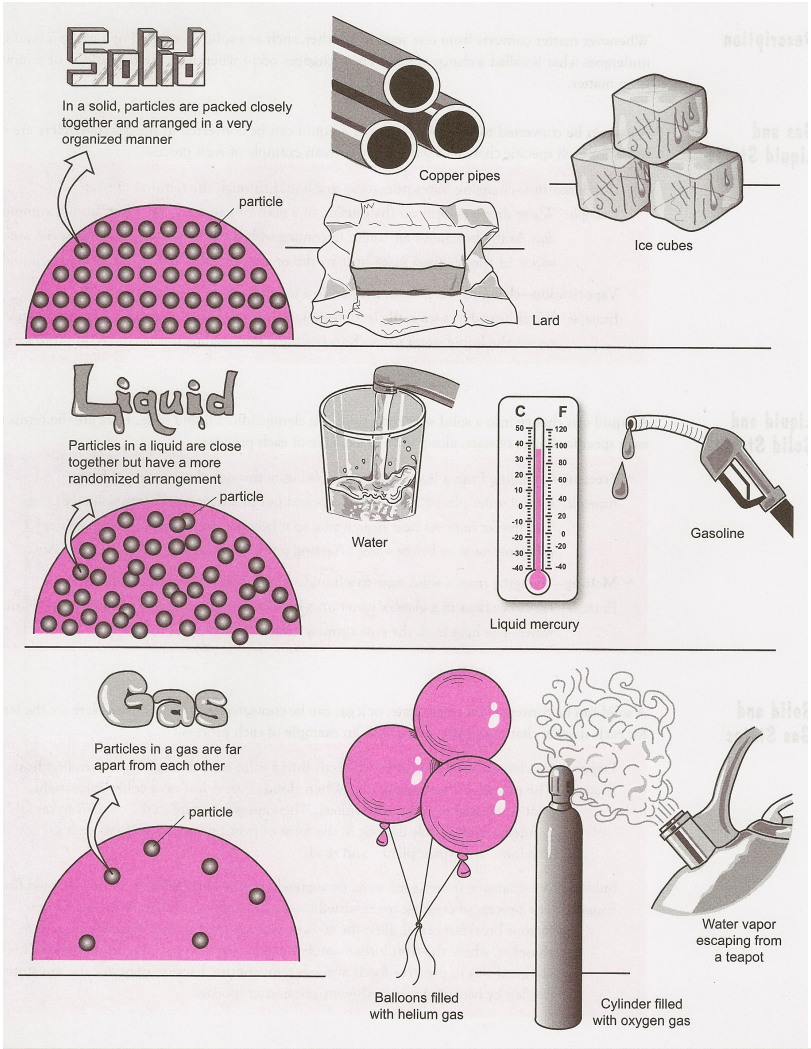
⇒ Ils peuvent diffuser, un gaz occupe tout le volume qui lui est offert.

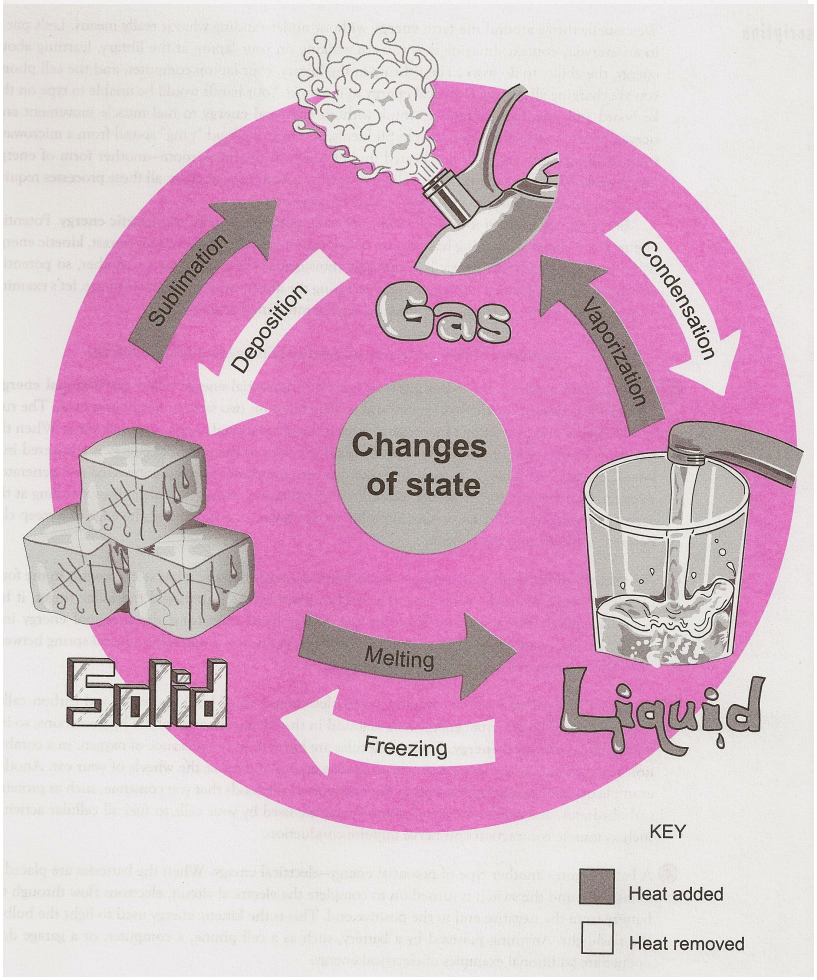
⇒ Un gaz est fortement compressible.

Cette fois, il s'agit d'un **état de la matière hautement compressible**, c'est-à-dire que le volume varie beaucoup avec la pression et/ou la température.

La figure ci-dessous illustre les trois états physique du diiode (I_2).

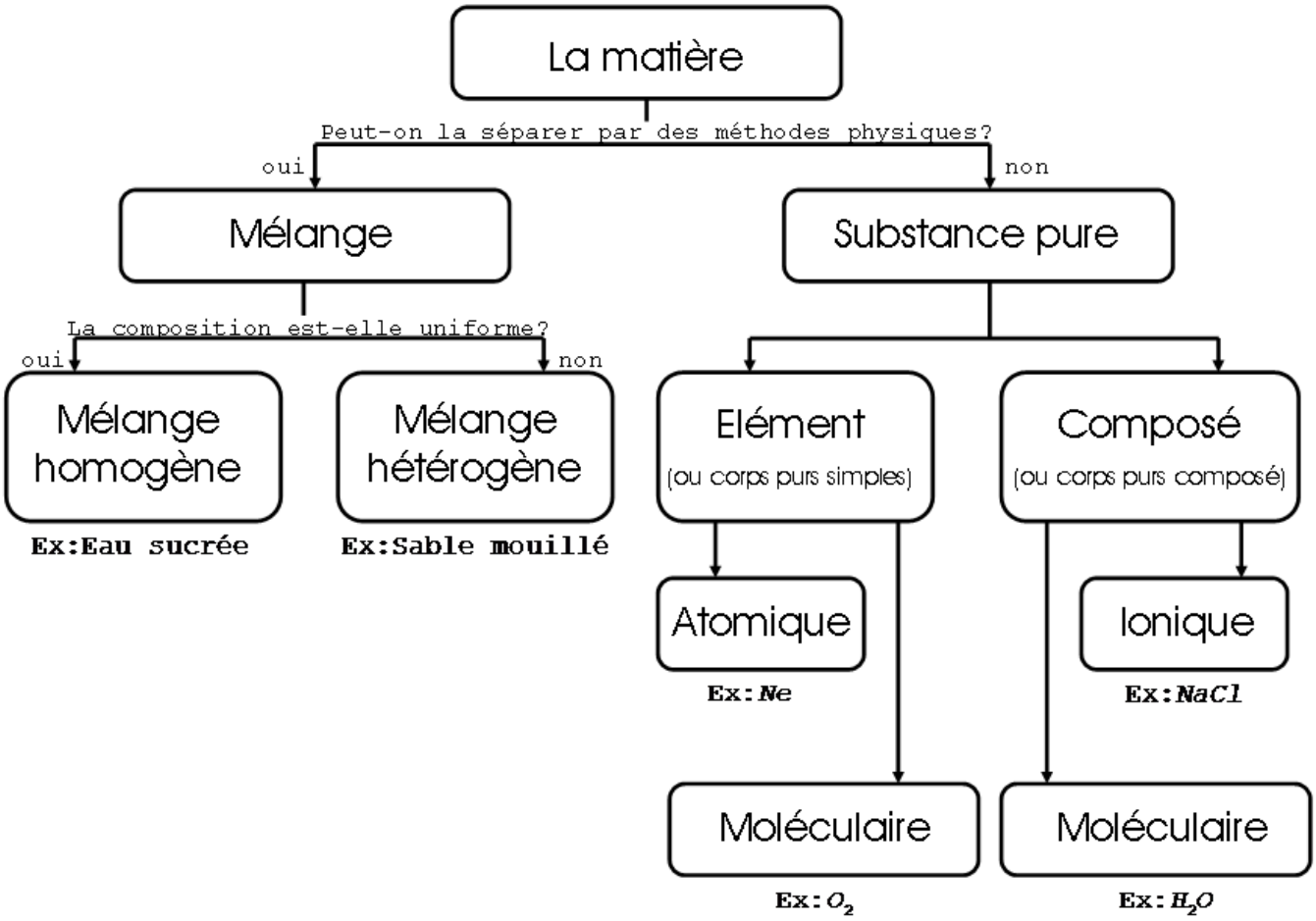


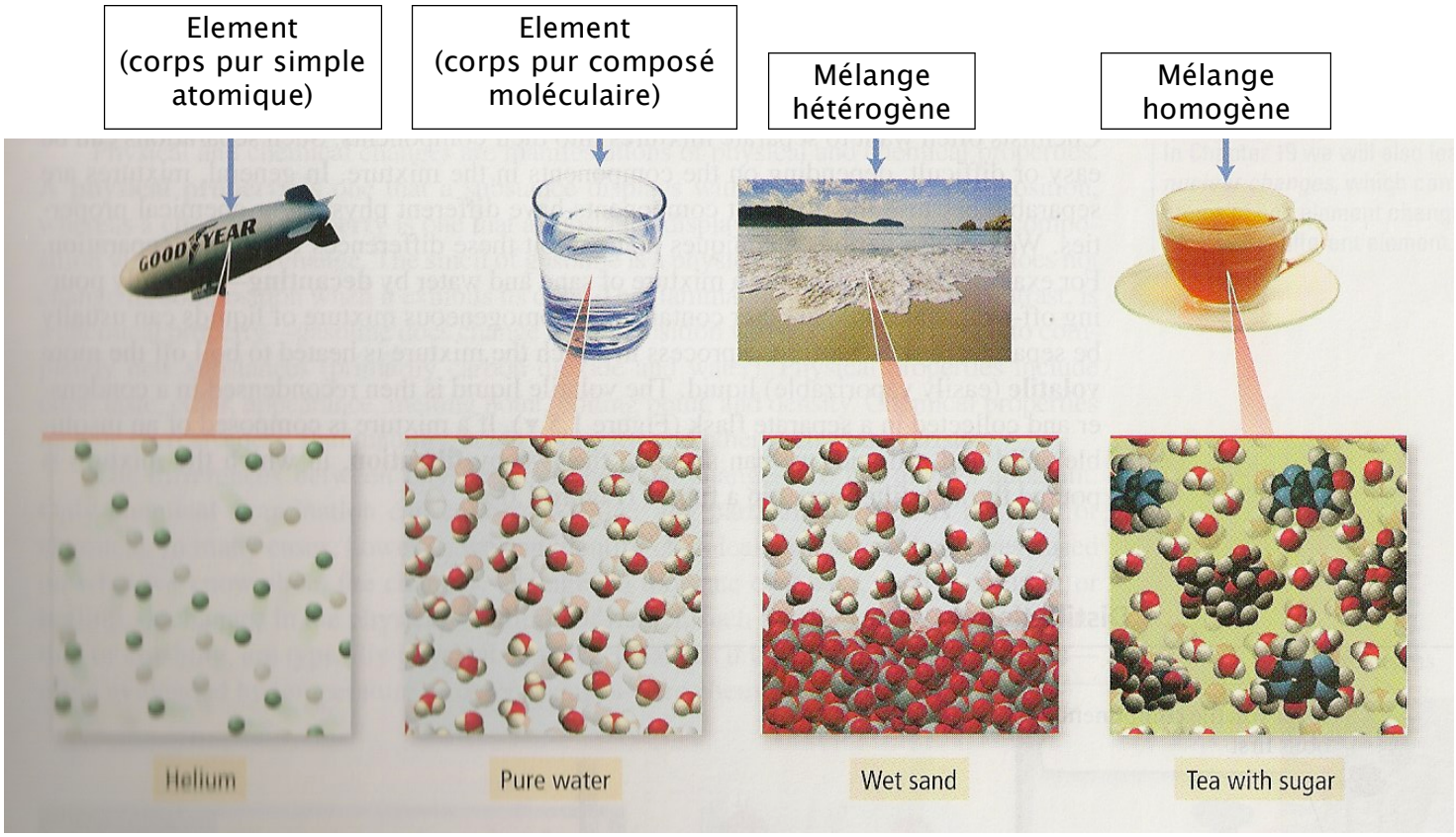

Solid
In a solid, particles are packed closely together and arranged in a very organized manner
particle
Copper pipes
Ice cubes
Lard
Liquid
Particles in a liquid are close together but have a more randomized arrangement
particle
Water
C
F
Liquid mercury
Gasoline
Gas
Particles in a gas are far apart from each other
particle
Balloons filled with helium gas
Cylinder filled with oxygen gas
Water vapor escaping from a teapot


Sublimation
Deposition
Gas
Vaporization
Condensation
Changes of state
Melting
Solid
Freezing
Liquid
KEY
Heat added
Heat removed

3-2 Classification de la matière par composition

La matière que l'on rencontre est en général constituée d'un mélange de **substances pures** comme cela est indiqué sur le schéma ci-dessous.





3-3 Le concept de phase

• Chaque phase est caractérisée par des propriétés physico-chimiques spécifiques (masse volumique, conductivité électrique etc…). Une phase est décrite par des **paramètres intensifs** (qui ne dépendent pas de la quantité de matière, cf. chapitre suivant) comme la pression, la température, la masse volumique etc… Dans une phase, ces paramètres intensifs **varient toujours de façon continue** d'un point à l'autre de la phase. Par exemple dans de l'eau liquide, la température peut varier d'un point à l'autre, mais toujours de façon continue, il ne peut pas y avoir une variation brutale, un saut de température.

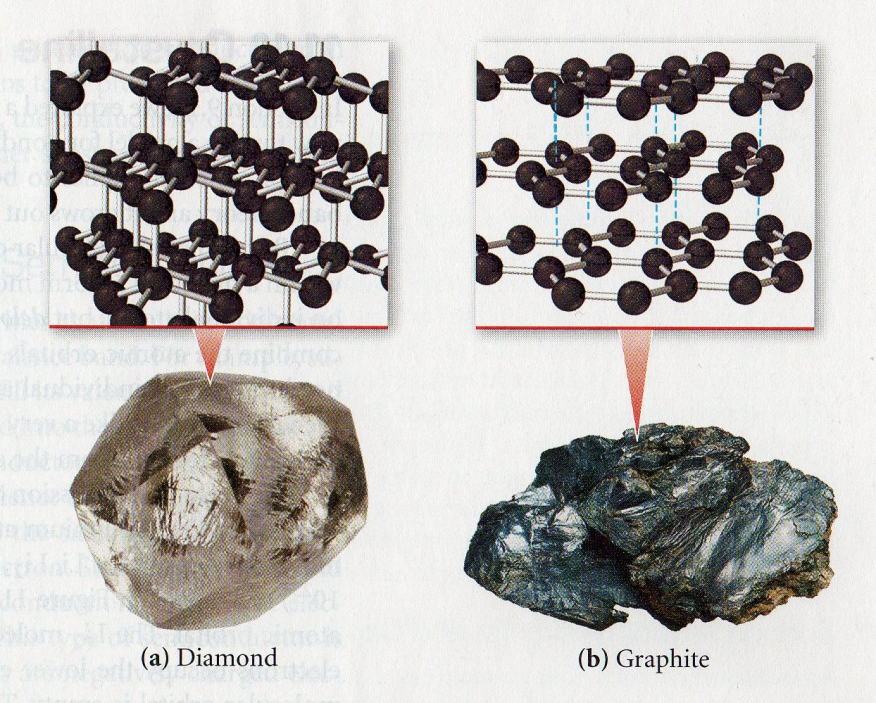
• En PTSI-PT, vous étudierez essentiellement **des phases uniformes** ; les paramètres intensifs auront des valeurs constantes dans toute la phase, on parle donc aussi de **phase homogène**.

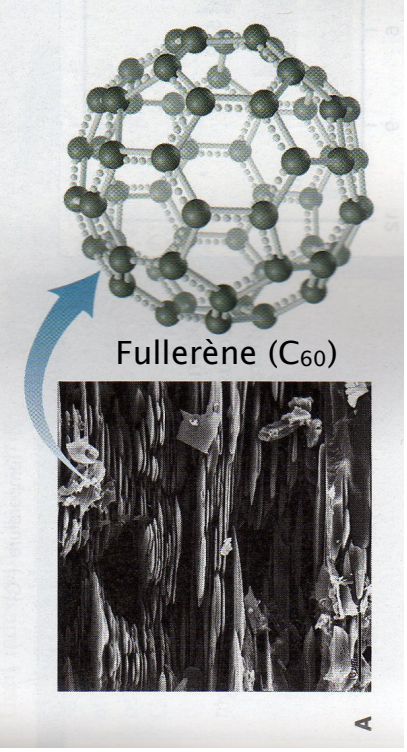
• Dans ce cours, pour décrire une phase, nous allons utiliser **la pression et la température**. En effet, ces deux paramètres intensifs sont facilement mesurables et nous allons voir dans le paragraphe suivant qu'une transition de phase (passage de la phase liquide à la phase gaz par exemple) se déroule à **température constante si la pression est fixée (par l'expérimentateur par exemple). Inversement, une transition de phase se déroule à pression constante si on fixe la température.**

3-4 Variétés allotropiques

Un corps pur à l'état gazeux ne constitue qu'une seule phase de même qu'à l'état liquide (à l'exception de l'hélium). Par contre, un corps pur à l'état solide peut exister sous différentes phases ou **VARIETES ALLOTROPIQUES** avec des propriétés physico-chimiques différentes.

Par exemple, il existe sept types de glaces solides. Le fer solide peut exister sous trois phases différentes (suivant les valeurs de température et de pression) : le fer α, le fer β et le fer γ. Chacune de ces variétés allotropiques présente une structure cristalline différente (cf. cours sur l'architecture de la matière condensée). Autre exemple, (voir figures ci-dessous) le carbone solide existe sous forme de diamant, de graphite mais aussi (plus rarement) de fullerène (découvert en 1980), sphère de 60 atomes de carbone. Il existe aussi des nanotubes de carbone. Le souffre solide possède aussi différentes variétés allotropiques solides (cf. figure page suivante).





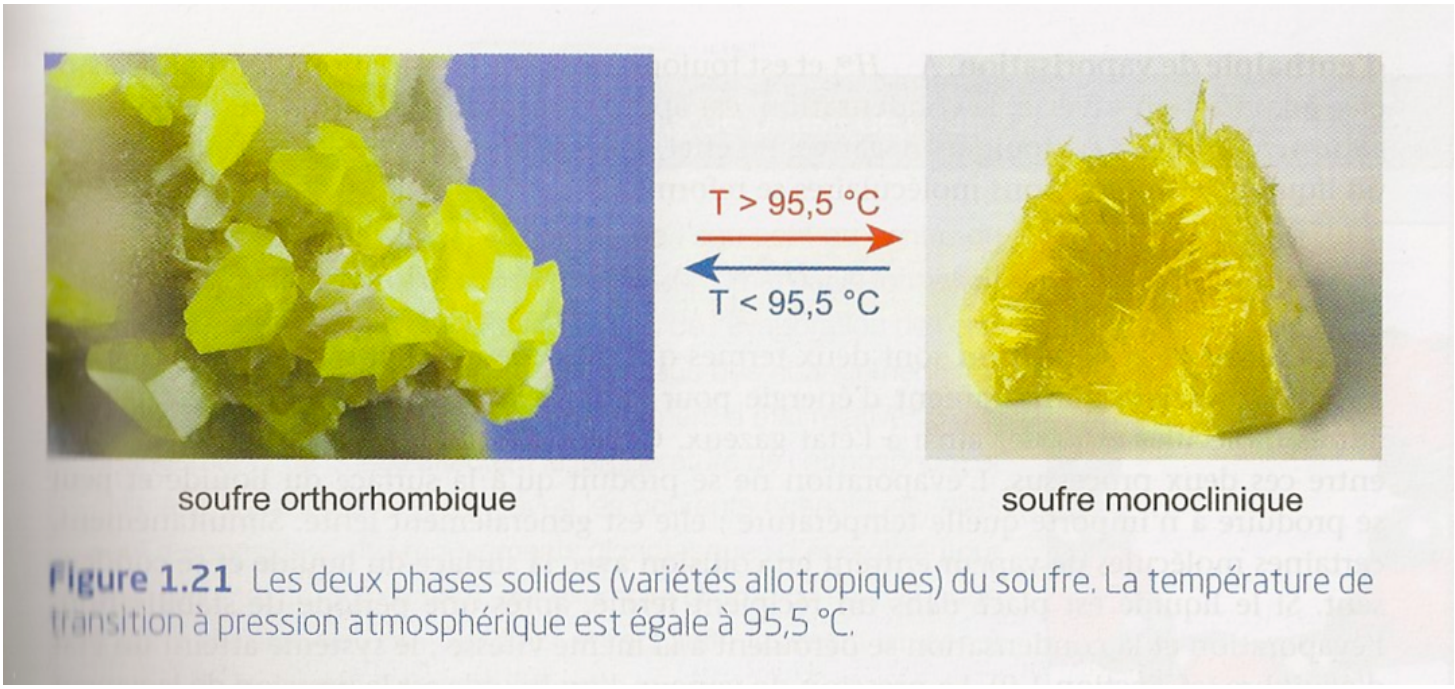


Figure 1.21 Les deux phases solides (variétés allotropiques) du soufre. La température de transition à pression atmosphérique est égale à 95,5 °C.

IV-Diagramme d'équilibre Pression-Température des corps purs

4-1 Diagramme usuel

Pour décrire une phase, nous utilisons le couple de variables intensives (P,T). Suivant la valeur de T et de P, un corps pur sera dans tel ou tel état physique. Le diagramme de la page suivante montre le domaine d'existence de chacune des trois phases **à l'équilibre** (cas du dioxyde de carbone).

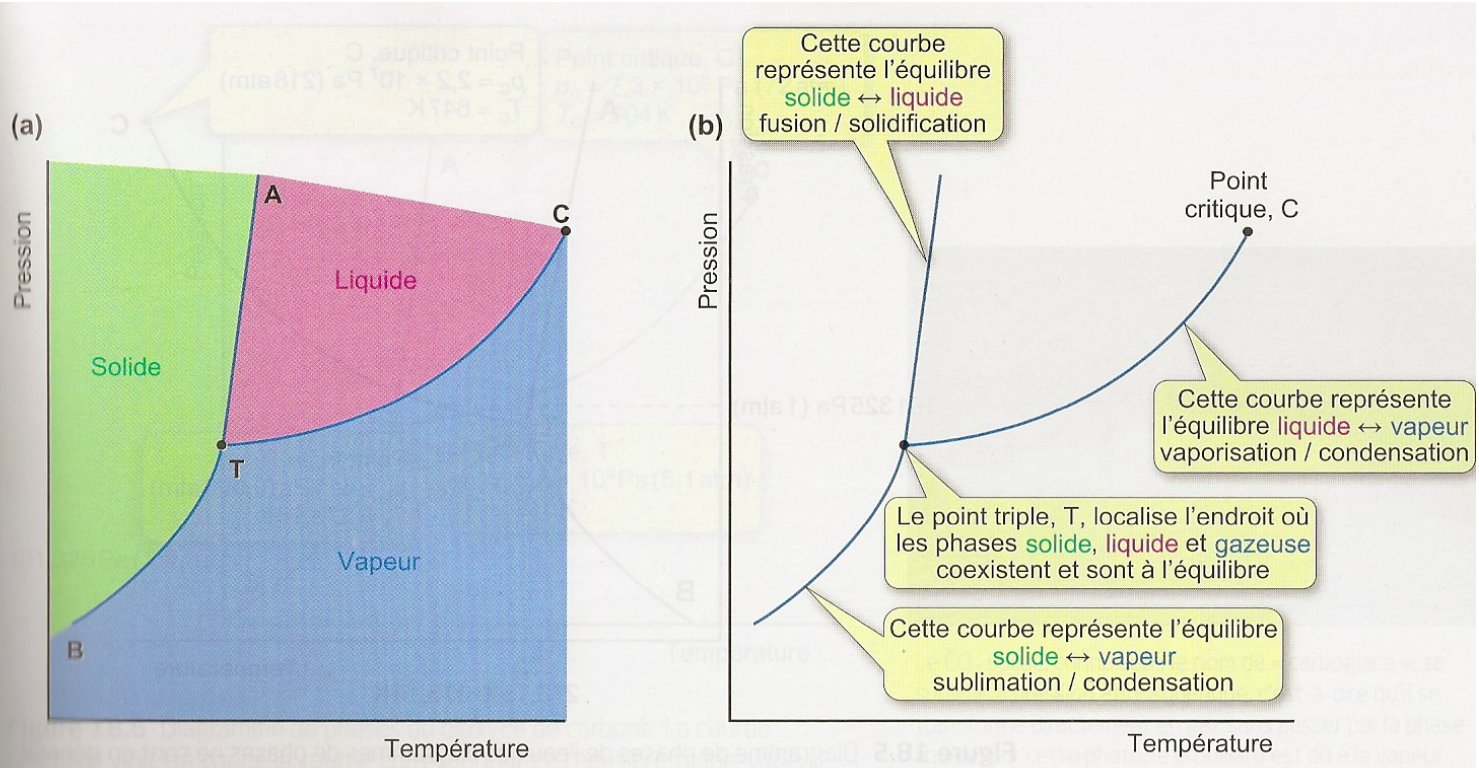


Figure 18.4 Diagramme de phase typique pour un seul constituant. Il montre l'influence de la pression sur les températures de fusion, ébullition et sublimation : (a) montre quelle phase est stable à une température et à une pression donnée ; (b) indique la position du point triple (T), du point critique (C) et des équilibres représentés par chaque courbe.

Les domaines

Pour chacun des trois domaines principaux – solide, liquide, gaz – le diagramme représente les conditions de pression et de température pour lesquelles une **phase particulière est stable**.

Les frontières

A la frontière entre deux domaines, il y a **coexistence de deux phases** pour une température et une pression données. Par exemple, sur le diagramme ci-dessous, à une pression de 1 atm (1,013 bar), le dioxyde de carbone solide (la neige carbonique) ne peut coexister avec le dioxyde de carbone gazeux uniquement à -78,5°C.

Le point triple

Il s'agit de **l'unique point pour lequel les trois phases coexistent**. Ainsi pour chaque corps pur, il existe un unique couple (P,T) pour la coexistence des trois phases, pour le dioxyde de carbone, il s'agit du couple $(5{,}1\text{ atm};-57{,}7°\text{C})$.

Le point critique

Au-delà de ce point, la phase liquide et la phase gazeuse ne forment plus **qu'une unique phase** pour former ce qui est appelé **un fluide supercritique**. Dans notre exemple, ce point a pour coordonnées $(72{,}9\text{ atm};31°\text{C})$.

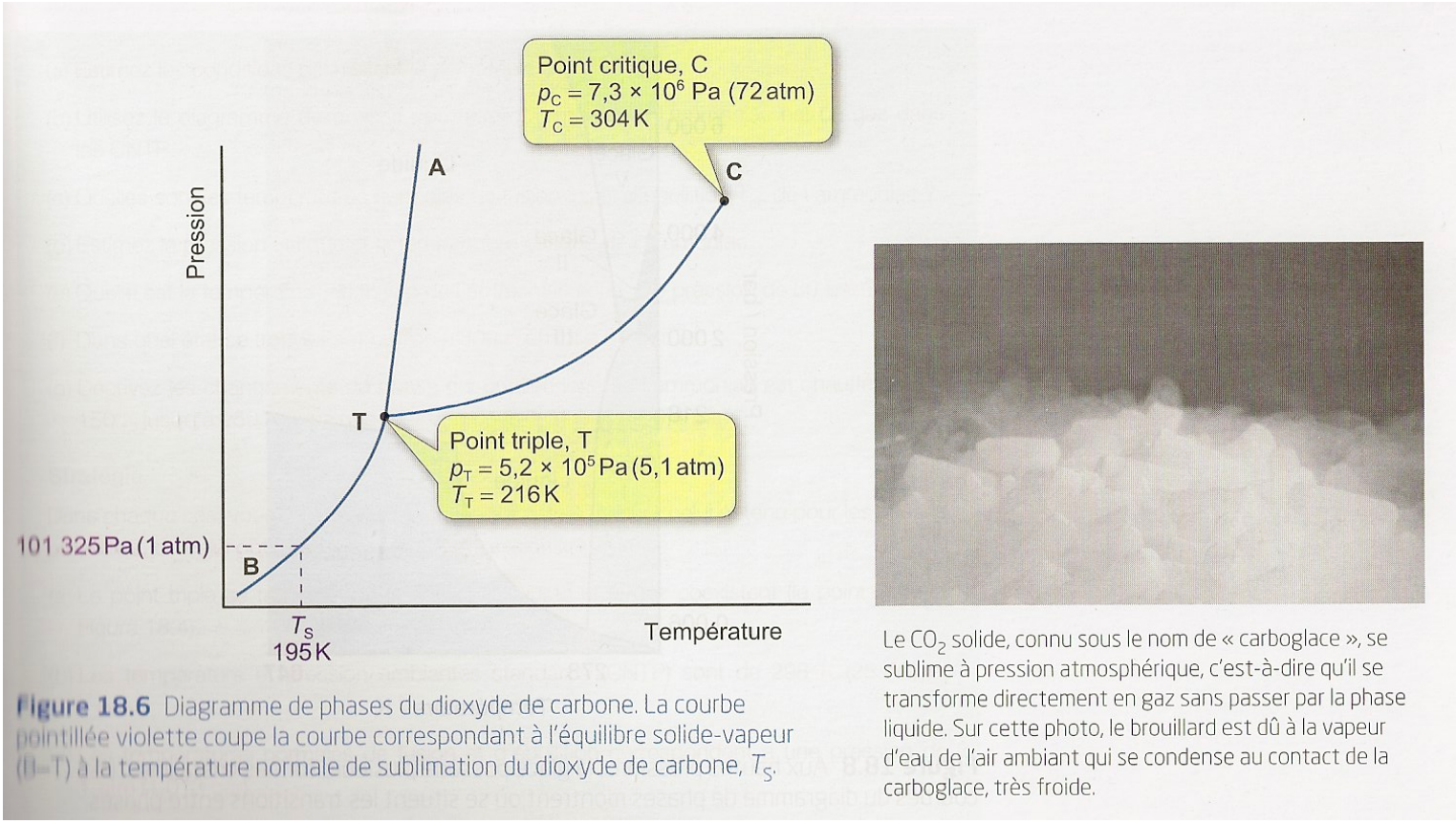
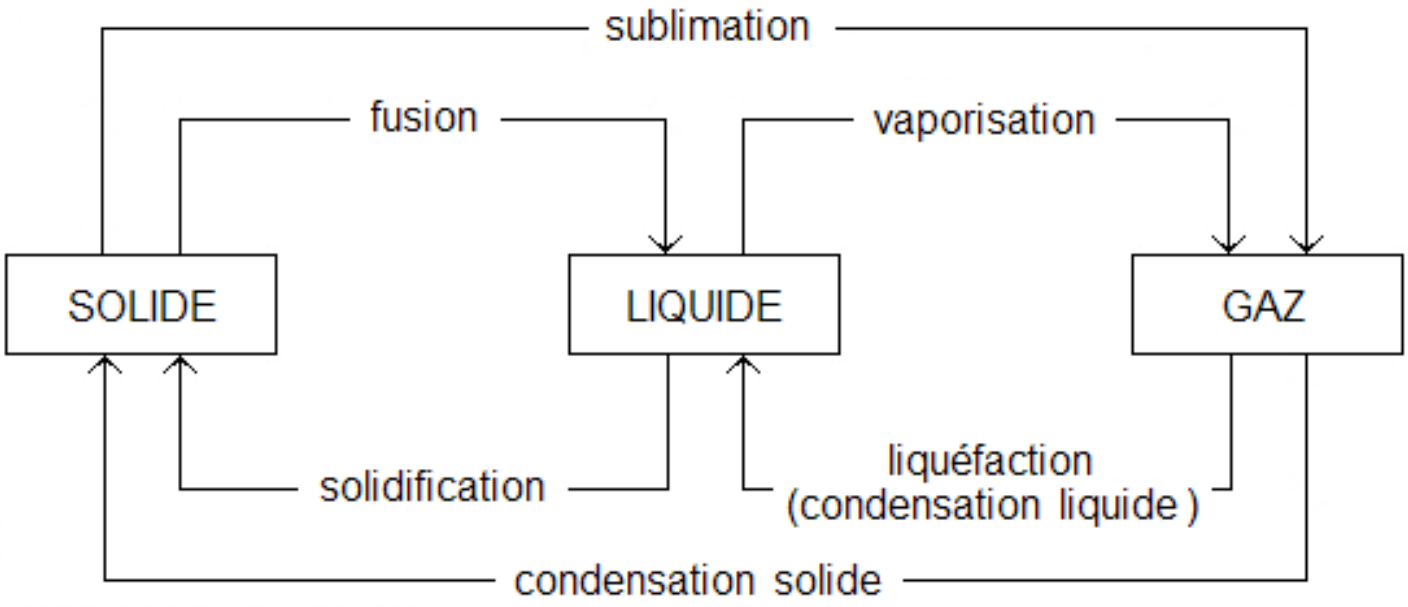


Figure 18.6 Diagramme de phases du dioxyde de carbone. La courbe pointillée violette coupe la courbe correspondant à l'équilibre solide-vapeur (B–T) à la température normale de sublimation du dioxyde de carbone, T_S.

Le CO_2 solide, connu sous le nom de « carboglace », se sublime à pression atmosphérique, c'est-à-dire qu'il se transforme directement en gaz sans passer par la phase liquide. Sur cette photo, le brouillard est dû à la vapeur d'eau de l'air ambiant qui se condense au contact de la carboglace, très froide.

On peut suivre l'évolution d'un corps pur sur le diagramme d'équilibre quand on change la température et la pression. Prenons l'exemple du dioxyde de carbone que l'on va chauffer sous pression constante de 1 atm (voir le diagramme ci-dessus). La température du solide va progressivement augmenter jusqu'à -78,5°C. A partir de là, il y a une **transition de phase** solide-gaz (sublimation). La température reste constante jusqu'à ce que tout le solide se soit transformé en gaz. Ensuite, la température du gaz va pouvoir augmenter.

La figure ci-dessous donne le nom des différentes transitions de phase pour un corps pur.



4-2 Diagramme de l'eau

L'eau est un cas très particulier. Par rapport aux autres corps purs, la frontière entre la phase solide et la phase liquide a une pente négative. Cela se traduit par le fait que la masse volumique de l'eau solide (la glace) est plus faible que celle de l'eau liquide, les icebergs flottent sur les océans. En général, un corps solide est plus dense que le corps liquide correspondant.

Avec l'eau, seul le bismuth a une phase solide moins dense que sa phase liquide, il a donc un diagramme d'équilibre (P,T) similaire à celui de l'eau.

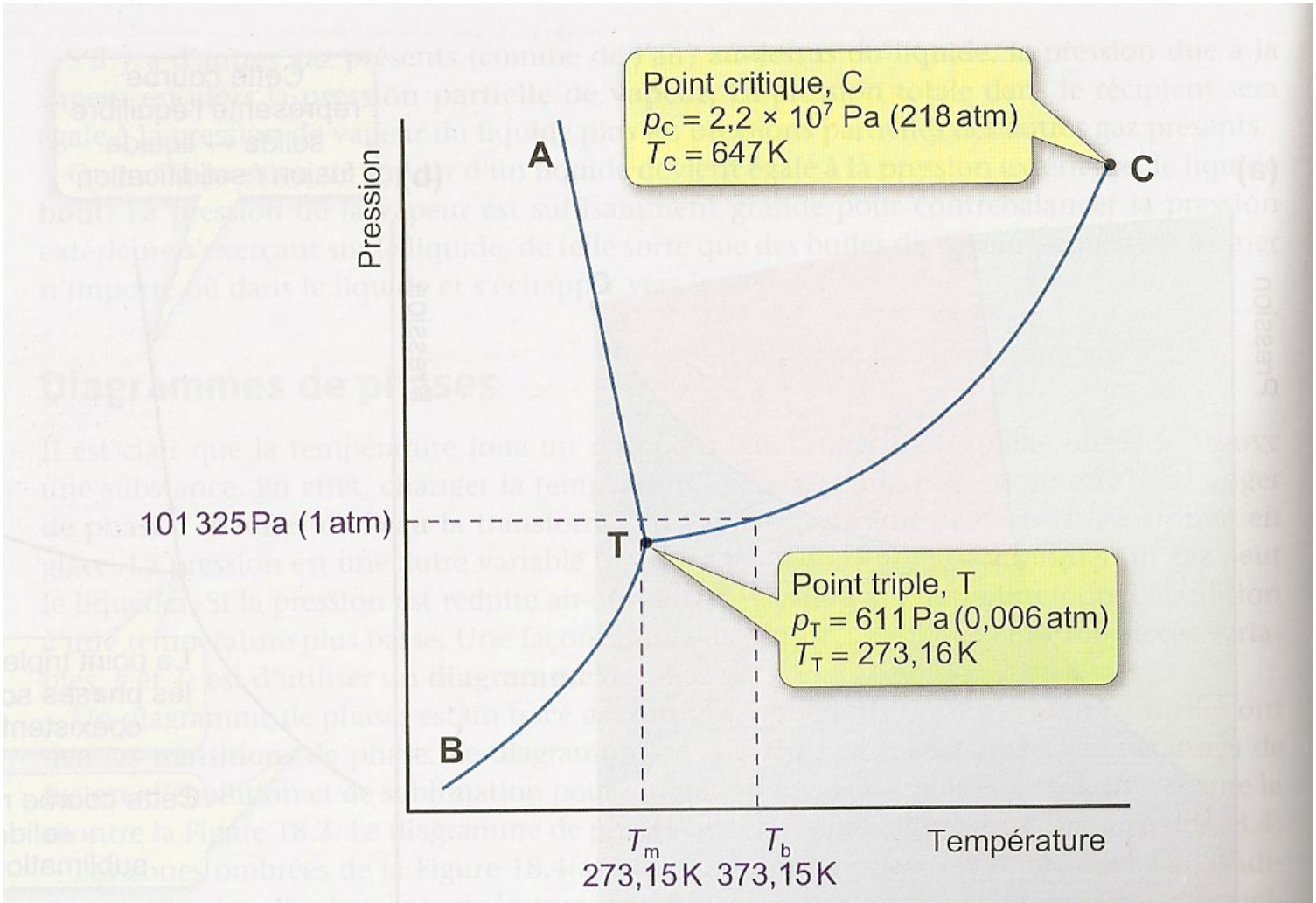


Figure 18.5 Diagramme de phases de l'eau (les diagrammes de phases ne sont en général pas tracés à l'échelle). La ligne horizontale pointillée violette, à 1 atm, coupe la ligne A–T de l'équilibre solide-liquide à la température normale de fusion de l'eau, et coupe la ligne C–T de l'équilibre liquide – vapeur à la température normale d'ébullition de l'eau.

4-3 Autre exemple, le soufre

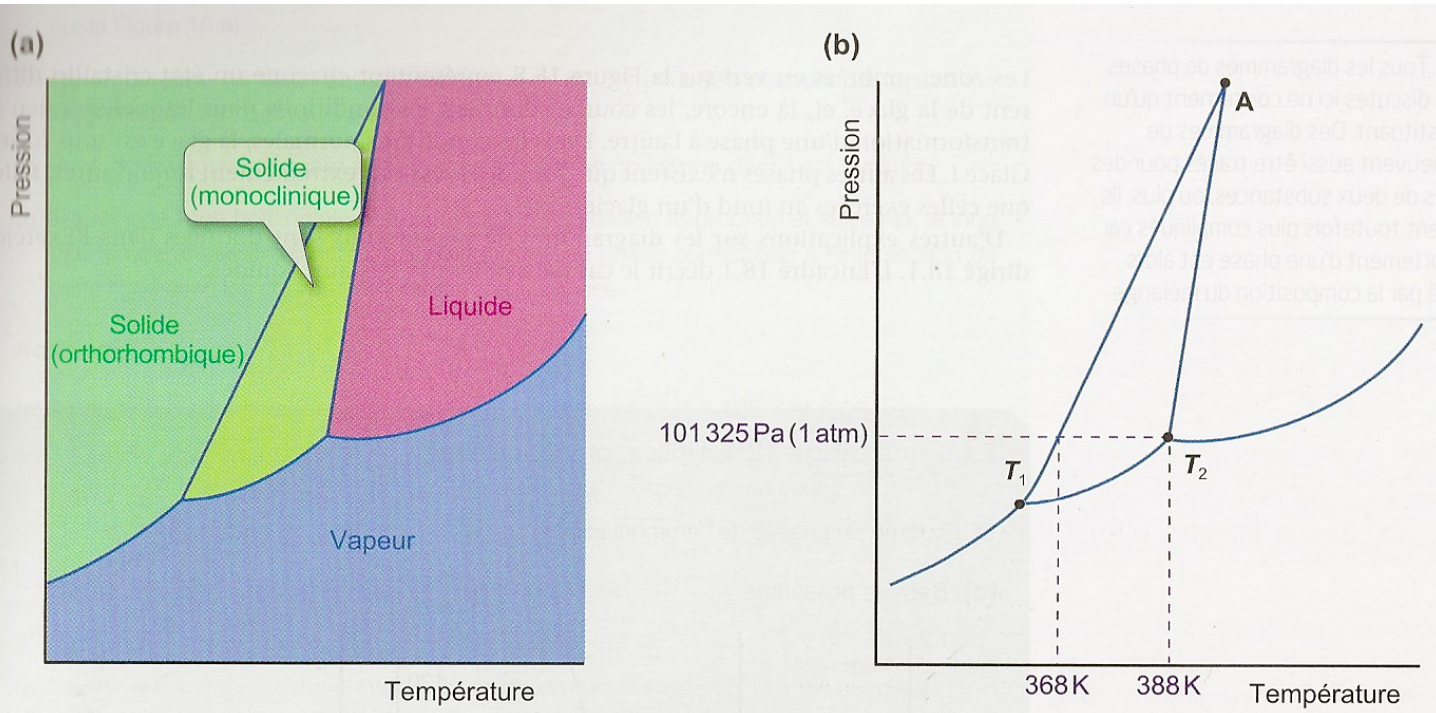


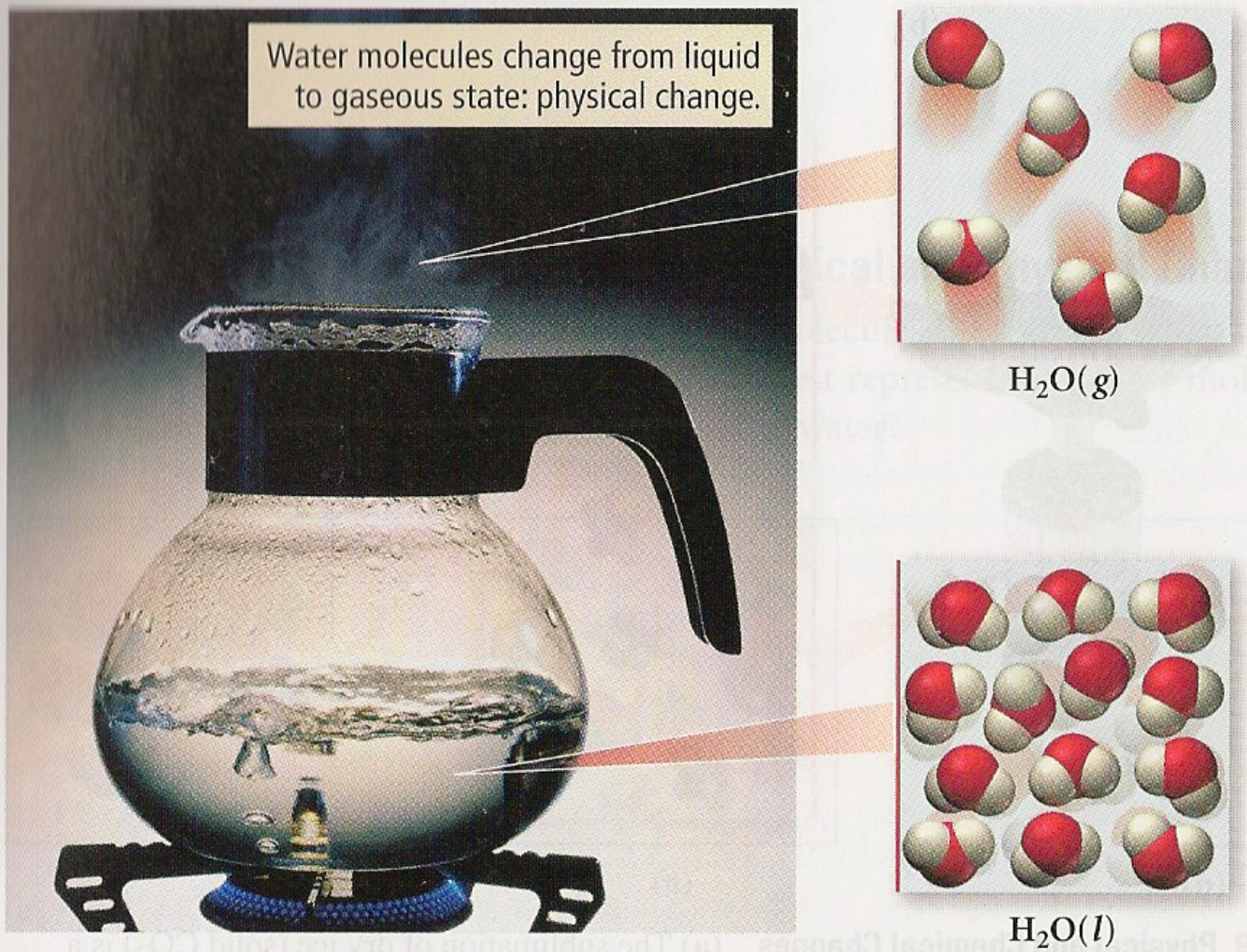
Figure 18.7 Diagramme de phases du soufre. Le soufre possède deux formes solides stables, orthorombique et monoclinique. Le diagramme de phases montre : (a) quelle forme est stable sous certaines conditions ; (b) le détail des conditions pour lesquelles les transitions ont lieu. Notez que le diagramme n'est pas à l'échelle, et les pentes des courbes et des droites sont exagérées.

V – Transformation physique, chimique et nucléaire

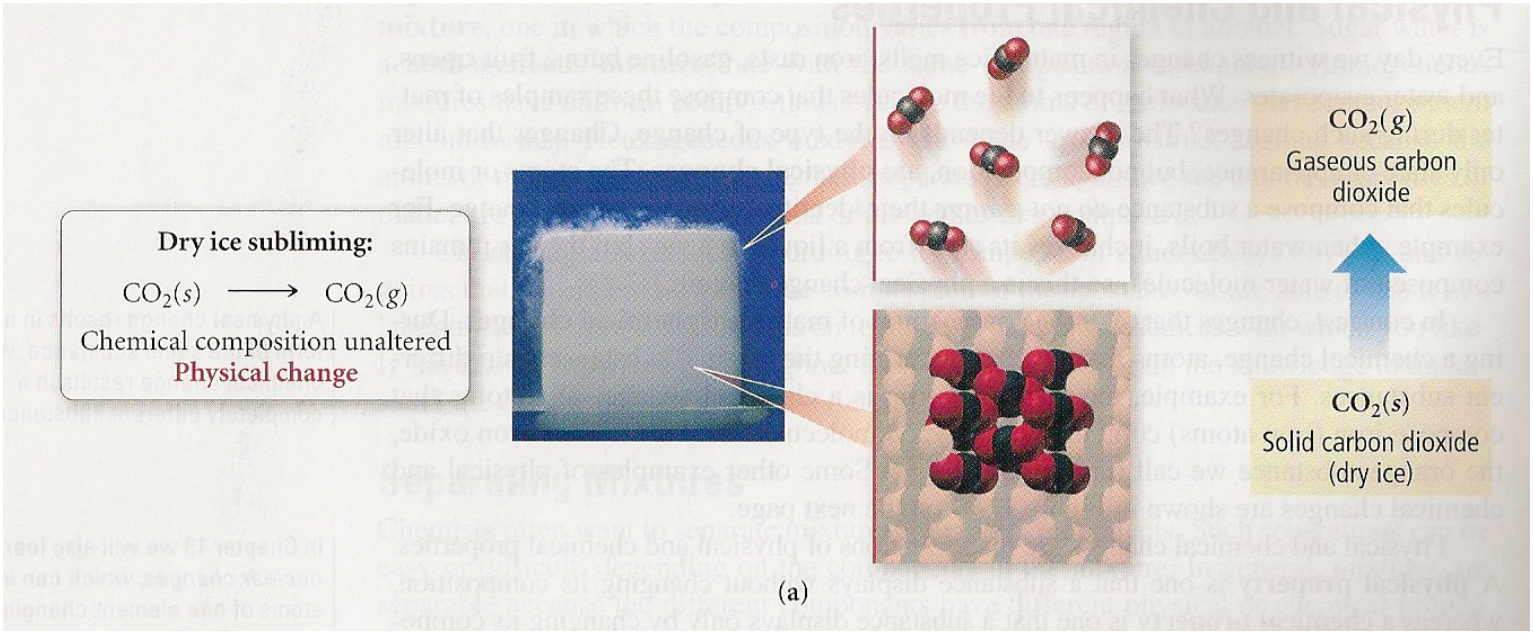
On observe quotidiennement que la matière qui nous entoure subit de multiples transformations. Il est d'usage de distinguer trois types de transformations: ***PHYSIQUE, CHIMIQUE et NUCLEAIRE***. Notons que ces distinctions sont un peu arbitraires, la nature se moque des noms que l'on donne aux différentes transformations de la matière !

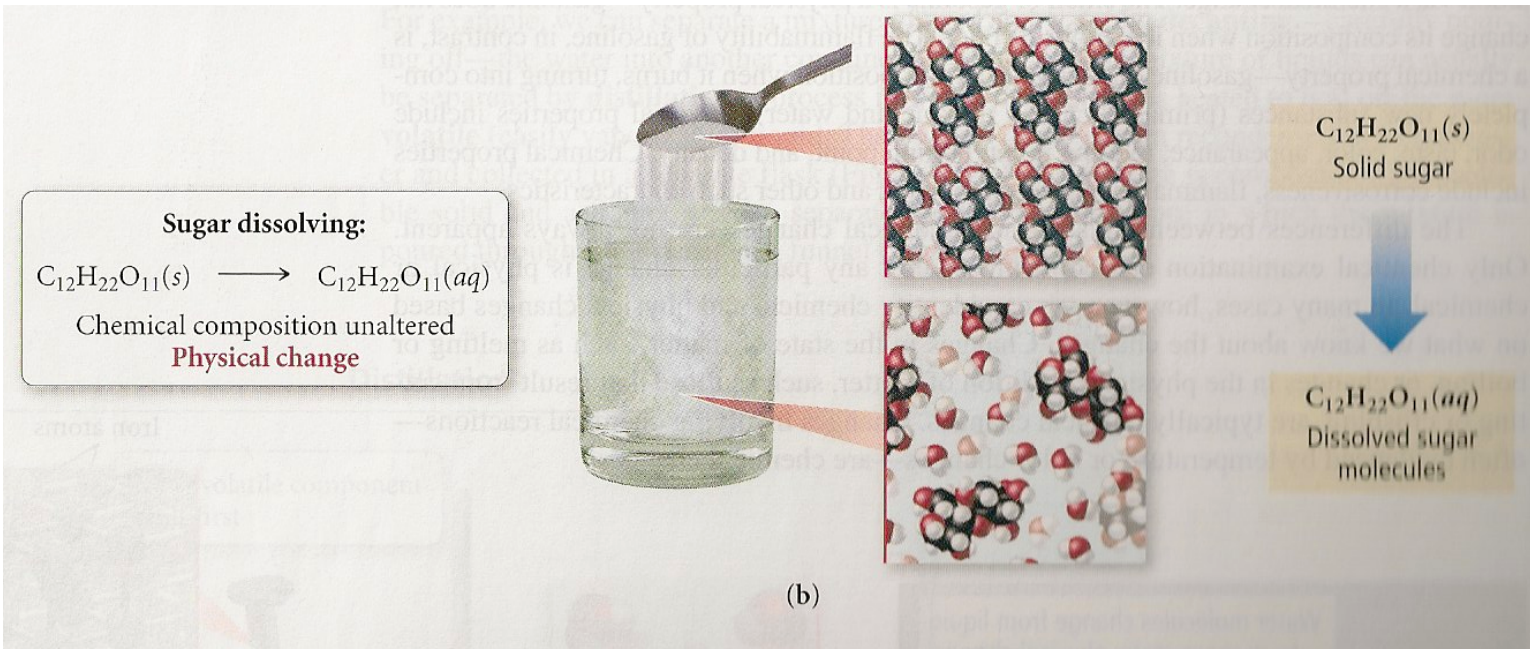
5-1 Transformation physique

Dans une transformation physique, la composition chimique de la substance en question n'est pas modifiée, seul l'état, l'apparence de la substance, est modifié mais pas sa composition. La transition de phase d'un corps pur (solide, liquide, gaz) sont des transformations chimiques, de même que la dissolution du sucre dans l'eau, la molécule de sucre n'est pas altérée (cf. figures suivantes).



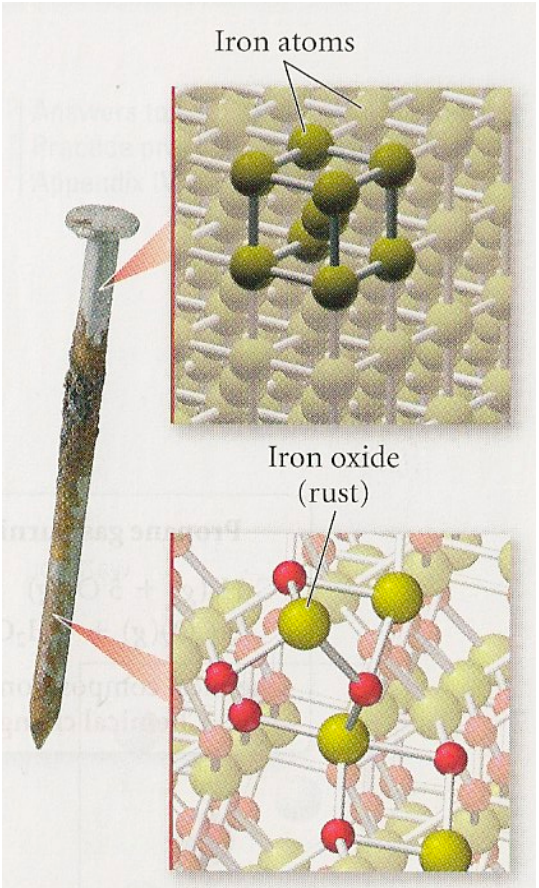
▲ **FIGURE 1.7 Boiling, a Physical Change** When water boils, it turns into a gas but does not alter its chemical identity—the water molecules are the same in both the liquid and gaseous states. Boiling is thus a physical change, and the boiling point of water is a physical property.





5-2 Transformation chimique

Dans une transformation chimique, **la composition chimique de la substance en question est modifiée**. La nature des molécules et/ou des composés composant la substance sont modifiés. Dans une transformation chimique, les atomes se réarrangent transformant la substance d'origine en une autre substance. Les figures suivantes donnent des exemples de transformations chimiques. Ce type de transformation va occuper une place centrale dans notre cours de chimie.



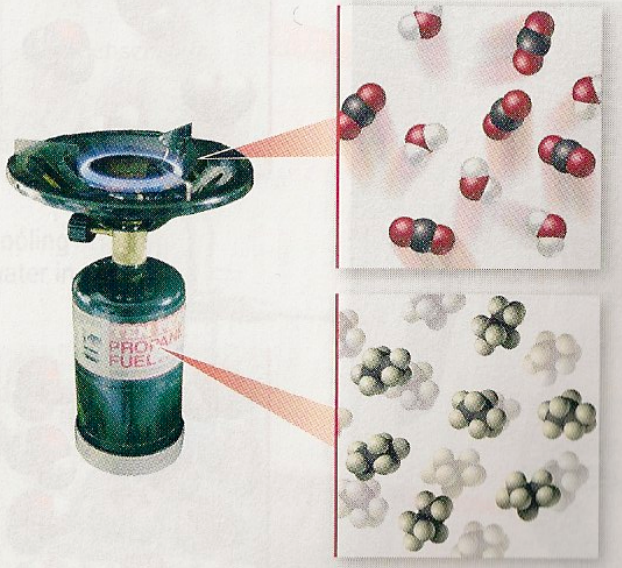
▲ **FIGURE 1.8 Rusting, a Chemical Change** When iron rusts, the iron atoms combine with oxygen atoms to form a different chemical substance, the compound iron oxide. Rusting is therefore a chemical change, and the tendency of iron to rust is a chemical property.

Propane gas burning:

$C_3H_8(g) + 5\ O_2(g) \longrightarrow 3\ CO_2(g) + 4\ H_2O(g)$

Chemical composition altered

Chemical change

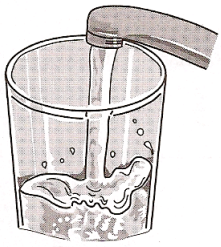


$CO_2(g), H_2O(g)$
Carbon dioxide and water molecules

$C_3H_8(g)$
Propane molecules

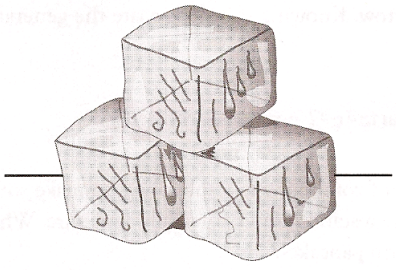
(c)

Physical change
Example: **freezing of water**



H_2O

(water - liquid)



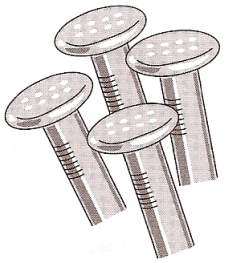
H_2O

(water - solid)

SUMMARY:

H_2O remains as H_2O

Chemical change
Example: **nails rusting**

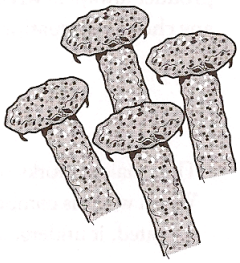


new nails

4 Fe

(iron)

+ 3 O_2
(oxygen)



rusted nails

2 Fe_2O_3

(iron oxide)

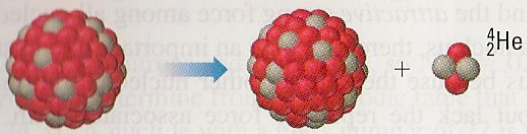
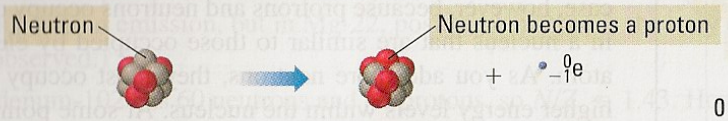
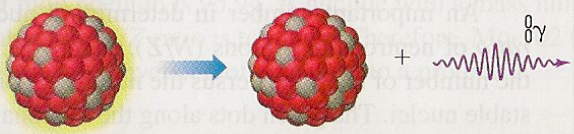
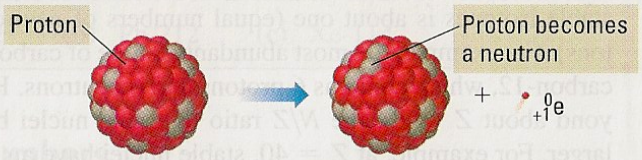
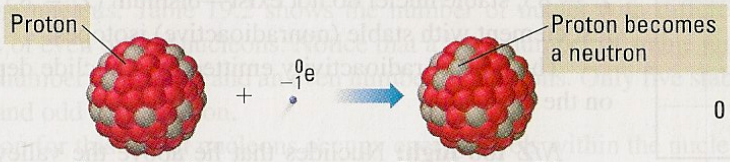
SUMMARY:

Fe changes to Fe^{+3} to form Fe_2O_3

5-3 Transformation nucléaire

Dans une transformation nucléaire, c'est la nature même des atomes constituant les éléments chimiques qui est modifié, le noyau de l'atome est modifié. Un atome radioactif, dit père, va se transformer en un autre type d'atome, dit fils, suivant différentes réactions nucléaires qui sont résumé dans la tableau suivant. Ce tableau n'est pas à connaître dans le cadre de votre programme et nous n'en dirons pas plus en ce qui concerne la physique et la chimie nucléaires. Par contre, vous devez être capable de faire la distinction entre les transformations physiques, chimiques et nucléaires.

TABLE 19.1 Modes of Radioactive Decay

Decay Mode	Process	Change in: *A*	*Z*	*N/Z**	Example
α	 Parent nuclide — Daughter nuclide — α particle	−4	−2	Increase	$^{238}_{92}U \longrightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^4_2He$
β	 Parent nuclide — Daughter nuclide — β particle	0	+1	Decrease	$^{228}_{88}Ra \longrightarrow {}^{228}_{89}Ac + {}^0_{-1}e$
γ	 Excited nuclide — Stable nuclide — Photon	0	0	None	$^{234}_{90}Th \longrightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^0_0\gamma$
Positron emission	 Parent nuclide — Daughter nuclide — Positron	0	−1	Increase	$^{30}_{15}P \longrightarrow {}^{30}_{14}Si + {}^0_{+1}e$
Electron capture	 Parent nuclide — Daughter nuclide	0	−1	Increase	$^{92}_{44}Ru + {}^0_{-1}e \longrightarrow {}^{92}_{43}Tc$

*Neutron-to-proton ratio