

Composition et transformations de la matière

Plan du cours

I	La matière à l'échelle nucléaire	3
I.1	Nucléons	3
I.2	Noyaux	3
I.3	Transformation nucléaire	4
II	La matière à l'échelle atomique et moléculaire	6
II.1	Atome et élément chimique	6
II.2	Entité chimique et espèce chimique	8
II.3	Transformation chimique	8
III	Vers l'échelle macroscopique	10
III.1	Corps pur, mélange et solution	10
III.2	États physiques de la matière	10
III.3	Transitions de phase	11

Ce que vous devez savoir et savoir faire

- ▷ Distinguer les échelles microscopique et macroscopique.
- ▷ Reconnaître la nature d'une transformation physique, chimique ou nucléaire.
- ▷ Équilibrer l'équation bilan d'une réaction de transformation en utilisant les lois de conservation appropriées.
- ▷ Utiliser à bon escient un vocabulaire précis (isotope, atome, élément chimique, entité chimique, espèce chimique), adapté à l'échelle de description utilisée.
- ▷ Connaître les ordres de grandeur de la taille, de la masse et de la charge de l'atome et de ses constituants.
- ▷ Calculer une masse atomique ou une masse molaire en utilisant des abondances isotopiques fournies.
- ▷ Connaître l'ordre de grandeur de la constante d'Avogadro.
- ▷ Distinguer un corps pur d'un mélange.
- ▷ Connaître les différents états de la matière et le nom des changements d'état d'agrégation.
- ▷ Connaître la notion de variété allotropique.

Questions de cours pour les colles

- ▷ Rappeler la constitution d'un atome et de son noyau. Donner l'ordre de grandeur de leur taille, de leur masse et de leur charge. Même question pour leurs constituants.
- ▷ Rappeler l'ordre de grandeur de la constante d'Avogadro. Un chiffre significatif suffit ... et il est rappelé que le plus important est la puissance de 10!
- ▷ Définir les termes isotope, élément chimique, entité chimique, espèce chimique.
- ▷ Exercices de cours C1 et C3 appliqués à n'importe quel exemple.

Remarque : L'équation d'état des gaz parfaits et les diagrammes d'état (P, T) ne font pas (plus) partie de ce chapitre et seront abordés ultérieurement.

Ce mini-chapitre est une introduction faite de rappels du lycée. Il propose de refaire un tour d'horizon des constituants de la matière et des différentes transformations possibles. L'accent est mis sur les différentes échelles auxquelles ces transformations se modélisent.

Les propriétés de la matière à notre échelle, dite **échelle macroscopique**, sont déterminées par les propriétés et l'arrangement des nucléons, atomes et molécules constitutifs de cette matière à l'**échelle microscopique**.

C'est sans doute le principe le plus fondamental de la chimie ! Mener des raisonnements rigoureux à des échelles différentes demande un vocabulaire physico-chimique précis. Le rappeler est également un objectif important de ce chapitre.

I - La matière à l'échelle nucléaire

I.1 - Nucléons

Les nucléons sont de deux types, les **protons** et les **neutrons**.

Propriétés du proton :

- ▷ masse $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27}$ kg ;
- ▷ taille de l'ordre de 10^{-15} m ;
- ▷ charge $+e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C.

Propriétés du neutron :

- ▷ masse $m_n = 1,675 \cdot 10^{-27}$ kg ;
- ▷ taille de l'ordre de 10^{-15} m ;
- ▷ charge nulle.

Proton et neutron ont pratiquement la même masse. Leur masse moyenne est parfois appelée (improprement) unité de masse atomique.

Remarque culturelle : Les protons et les neutrons ne sont pas des particules élémentaires, mais ils sont formés de quarks. Il existe six « saveurs » de quarks, qui se regroupent en trois « générations ». Les quarks sont porteurs d'une charge électrique fractionnaire, en tiers de la charge élémentaire, mais cela n'est pas en contradiction avec le principe de quantification de la charge électrique car ils ne peuvent pas être observés seuls.

Génération	Quark de charge $-e/3$	Quark de charge $+2e/3$
1	Down (<i>d</i>)	Up (<i>u</i>)
2	Strange (<i>s</i>)	Charm (<i>c</i>)
3	Bottom (<i>b</i>)	Top (<i>t</i>)

Un proton est composé de deux quarks *u* et un quark *d*, un neutron de deux quarks *d* et un quark *u*.

I.2 - Noyaux

Un noyau est formé de nucléons liés entre eux par **interaction forte**.

- **Notation symbolique**

Espace 1

Exercice C1 : Notation symbolique des noyaux

- 1 - Préciser la composition du noyau de symbole $^{16}_8\text{O}$.
- 2 - Écrire le symbole d'un noyau de chlore comptant 17 protons et 18 neutrons.

Espace 2

- **Propriétés du noyau**

- ▷ masse de l'ordre de 10^{-25} kg ;
- ▷ taille de l'ordre de 10^{-14} m ;
- ▷ densité de l'ordre de 10^{17} kg · m⁻³.

Si la Terre avait la même densité que le noyau atomique, elle ne serait pas plus grosse qu'une orange.

Remarque : La masse m du noyau A_ZX n'est pas égale à la somme des masses des nucléons le constituant $Zm_p + (A - Z)m_n$ mais lui est inférieure. La différence Δm est appelée défaut de masse. Elle se retrouve sous forme d'une énergie $\varepsilon = \Delta m c^2$, appelée énergie de liaison du noyau. Pour calculer le défaut de masse, on utilise des tables répertoriant la masse réelle des différents noyaux.

- **Isotopes**

Espace 3

Dans la nature, les différents isotopes coexistent dans des proportions appelées **abondances isotopiques**. Certains isotopes sont stables, d'autres se désintègrent spontanément.

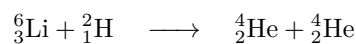
Exemple : Le carbone possède 15 isotopes connus, allant de ${}^8_6\text{C}$ à ${}^{22}_6\text{C}$. Deux seulement sont stables : ${}^{12}_6\text{C}$ (abondance isotopique 98,93 %) et ${}^{13}_6\text{C}$ (abondance isotopique 1,07 %). Le célèbre ${}^{14}_6\text{C}$ est instable et n'existe qu'à l'état de traces.

1.3 - Transformation nucléaire

- **Définition**

Espace 4

Exemple : Un noyau de lithium 6 et un noyau de deutérium (hydrogène 2) se transforment en deux noyaux d'hélium 4.



Si un seul noyau est impliqué du côté des réactifs, la transformation est appelée **désintégration radioactive**. Le noyau réactif est appelé **noyau père** et les noyaux produits de réaction sont les **noyaux fils**.

Exemple : ${}^{87}_{37}\text{Rb} \longrightarrow {}^{87}_{38}\text{Sr} + {}^0_{-1}e$

De la définition découlent immédiatement deux règles de conservation :

Une transformation nucléaire conserve le nombre total de protons et de neutrons.

Remarque culturelle : La conservation du nombre de protons est une conséquence du principe de conservation de la charge électrique. En physique des particules, on interprète aussi la conservation du nombre total de nucléons comme la conservation d'une « charge » appelée charge baryonique.

Une transformation nucléaire requiert ou libère de grandes quantités d'énergie, de l'ordre de 10^6 à 10^7 J · mol⁻¹ : faire réagir 1 mol de noyaux libère (ou requiert) 10^7 J.

- **Modélisation par une réaction nucléaire**

Une **réaction nucléaire** est un modèle de transformation nucléaire qui ne s'intéresse qu'au bilan de matière sans tenir compte des mécanismes microscopiques conduisant à ce bilan.

Une réaction nucléaire se décrit par une **équation bilan**, qui ne dit rien sur ce qui se passe pendant la transformation. Usuellement, cette équation bilan s'écrit avec une flèche.

Conséquence des règles de conservation : dans une équation bilan de transformation nucléaire, la somme des Z et des A doit être la même de part et d'autre de la flèche. Ces deux règles de conservation permettent d'équilibrer sans ambiguïté les équations bilan nucléaires.

- **Non-conservation de la masse**

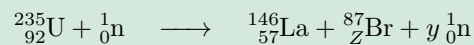
La masse n'est pas conservée au cours d'une transformation nucléaire.

Dans une transformation nucléaire spontanée, de la masse est perdue au cours de la transformation. Cette masse provient de l'énergie de liaison des noyaux réactifs et elle est libérée sous forme d'énergie.

- **Application**

Exercice C2 : Fission nucléaire

On étudie la réaction de fission en chaîne décrite ci-dessous ayant lieu dans un réacteur nucléaire,



Données :

- ▷ masses atomiques ${}^{235}\text{U}$: 235,044 uma, ${}^{146}\text{La}$: 145,943 uma, ${}^{87}\text{Br}$: 86,912 uma ;
- ▷ masse d'un neutron : 1,0087 uma ;
- ▷ masse molaire de l'uranium : $238,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$;
- ▷ abondance isotopique de l'uranium 235 : 0,720 % ;
- ▷ facteurs de conversion : $1 \text{ uma} \times c^2 = 931,5 \text{ MeV}$, $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

- 1 - En utilisant les lois de conservation, déterminer le numéro atomique du brome Br.
- 2 - Déterminer de même le nombre de neutrons émis. Pourquoi la réaction est elle qualifiée de réaction « en chaîne » ? Comment empêcher l'emballement d'un réacteur nucléaire ?
- 3 - Calculer la perte de masse Δm lors de la fission d'un noyau d'uranium 235. Cette masse perdue est directement reliée à un dégagement d'énergie ε lors du processus de fission via $\varepsilon = \Delta m c^2$. En déduire l'énergie dégagée lors de la fission de ce noyau puis d'un kilogramme d'uranium.

Espace 5

Espace 6

Espace 7

Remarque : En pratique, une centrale nucléaire ne permet de récupérer qu'environ le quart ou le tiers de cette valeur. Cette énergie n'en demeure pas moins colossale : une tonne de pétrole ne libère « que » $4,4 \cdot 10^{10} \text{ J}$.

II - La matière à l'échelle atomique et moléculaire

II.1 - Atome et élément chimique

a) À l'échelle microscopique : les atomes

Un atome est constitué d'un noyau autour duquel se trouve un cortège d'électrons.

Propriétés d'un électron :

- ▷ masse $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$;
- ▷ charge $-e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

La charge d'un électron est exactement opposée à celle d'un proton.

Un atome est neutre : il compte autant de protons que d'électrons.

Conséquence :

Espace 8

La cohésion d'un atome est assurée grâce à l'**interaction électromagnétique**. Cela n'est cependant pas suffisant : comme le noyau est chargé positivement et les électrons négativement, alors le cortège d'électrons devrait être attiré par le noyau, et donc la matière s'effondrer sur elle-même. Cet effondrement n'a pas lieu grâce à la **mécanique quantique**, qui est à l'origine de la stabilité de la matière via le principe d'indétermination d'Heisenberg. Nous en reparlerons au prochain chapitre.

Propriétés d'un atome :

- ▷ taille de l'ordre de 10^{-10} m , soit 1 \AA ;
- ▷ la plupart du volume de l'atome est vide : on parle de structure lacunaire ;
- ▷ plus de 99 % de la masse de l'atome se trouve dans le noyau.

b) À l'échelle macroscopique : les éléments chimiques

Espace 9

Cette définition est justifiée par le fait que le noyau ne joue pas sur les propriétés chimiques, seul compte le nombre d'électrons (donc indirectement de protons). Aujourd'hui, 118 éléments ont été observés dont 94 sont naturels et 80 ont au moins un isotope stable. Les symboles chimiques sont répertoriés dans la **classification périodique des éléments**, dont nous expliquerons la construction au chapitre AM2.

Un schéma récapitulatif est représenté figure 1.

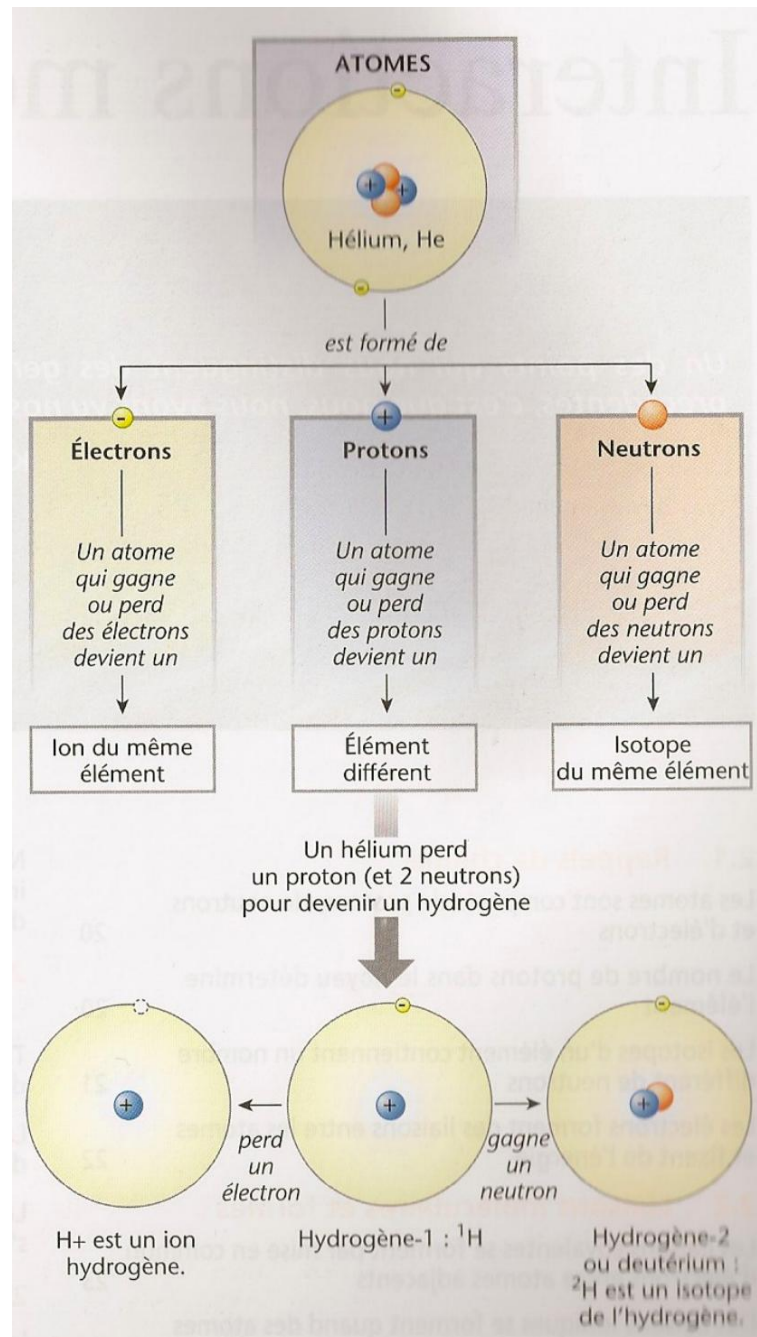


Figure 1 – Schéma récapitulatif des liens entre les notions d'élément chimique, atome, ion et isotope. Figure extraite du cours en ligne de Rémy Duperray.

c) Masse moyenne d'un élément chimique

La **masse atomique d'un élément chimique** est la moyenne des masses atomiques de ses isotopes pondérées par leur abondance isotopique.

Remarque : Le nom de « masse atomique » peut prêter à confusion, car un élément chimique est un « atome moyen » et pas un véritable atome formé d'un noyau à la composition bien définie.

Plutôt que la masse atomique, on utilise généralement la masse molaire d'un élément chimique.

Une **mole** est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 12 g de carbone 12 isotopiquement pur $^{12}_6\text{C}$.

Ce nombre est donné par la constante d'Avogadro,

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

*** **Attention !** La constante d'Avogadro a une unité.

La constante d'Avogadro permet de relier la masse atomique et la masse molaire d'un élément chimique,

$$M = m_{\text{at}} \mathcal{N}_A$$

Remarque : Compte tenu des définitions, la masse molaire exprimée en grammes par mole est numériquement identique au nombre moyen de nucléons A contenu dans les différents isotopes de l'élément.

II.2 - Entité chimique et espèce chimique

Les atomes restent rarement seuls : pour gagner en stabilité, ils réorganisent leur cortège électronique et/ou s'associent pour former des molécules (p.ex. H_2O), des ions (p.ex. Fe^{2+}) ou des ions moléculaires (p.ex. SO_4^{2-}).

a) À l'échelle microscopique : les entités chimiques

On appelle **entité chimique** tout atome, molécule, ion, etc., bien défini chimiquement et isotopiquement et pouvant être identifié individuellement. Une entité chimique est caractérisée par sa formule chimique et sa structure géométrique.

Sauf (très) rare exception, les formules chimiques s'écrivent en termes d'éléments chimiques plutôt qu'avec un isotope particulier. Il est donc sous-entendu que la composition des noyaux est celle des abondances isotopiques naturelles.

Rappel sur les ions :

- ▷ Un **cation** est un ion chargé positivement, il compte moins d'électrons que les atomes neutres.
- ▷ Un **anion** est un ion chargé négativement, il compte plus d'électrons que les atomes neutres.

Exercice C3 : Constitution des ions

Donner la constitution des ions ${}_{26}\text{Fe}^{2+}$ et ${}_{17}\text{Cl}^-$.

Espace 10

b) À l'échelle macroscopique : les espèces chimiques

Une entité chimique est un objet microscopique : on ne manipule pas d'entité chimique individuelle. La notion correspondante au niveau macroscopique est celle d'espèce chimique.

On appelle **espèce chimique** un ensemble d'entités chimiques structuralement et chimiquement identiques.

Une espèce chimique se caractérise par sa formule chimique, mais aussi ses propriétés de réactivité, de comportement physique, son aspect, etc.

II.3 - Transformation chimique

a) Définition

Espace 11

De cette définition découlent deux règles de conservation immédiates :

Une transformation chimique conserve les éléments chimiques et la charge électrique totale.

Ainsi, si l'élément fer intervient parmi les réactifs il apparaîtra nécessairement parmi les produits.

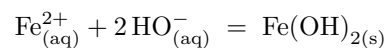
Une transformation chimique requiert ou libère des quantités d'énergie que l'on peut qualifier d'intermédiaires, de l'ordre de 10^4 à $10^5 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$: augmenter de 1 mol l'avancement de la réaction (voir paragraphe 4 pour les rappels) libère (ou requiert) 10^5 J . Elles sont 100 à 1000 fois plus faibles que pour une transformation nucléaire.

b) Modélisation par une réaction chimique

• Définition

Espace 12

Une réaction chimique se modélise par une **équation bilan** qui traduit le bilan de matière, par exemple

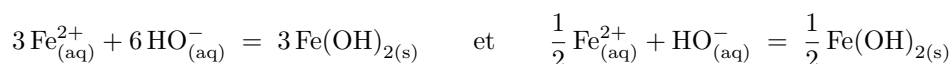


Remarques importantes :

- ▷ Une équation bilan tient compte de l'état physique ou physico-chimique des espèces chimiques impliquées, voir le paragraphe suivant ;
- ▷ Une équation bilan peut toujours s'écrire avec un signe « = », les symboles \longrightarrow ou \rightleftharpoons sont réservées à des transformations possédant certaines propriétés, abordées dans le thème « transformations chimiques » ;
- ▷ Une équation bilan traduit une réalité macroscopique : il faut donc comprendre qu'elle implique des *espèces* chimiques plutôt que des *entités*.

• Nombres stœchiométriques

Les deux règles de conservation se traduisent par la présence de **nombres stœchiométriques**, indispensable pour que le bilan soit équilibré. Les nombres stœchiométriques ne font que décrire un bilan, on peut donc librement les multiplier par une même constante tant que le bilan global est préservé. Les équations bilans



décrivent exactement la même réaction que celle donnée en exemple plus haut.

Outre ces multiplications, deux conventions d'écriture sont utilisables pour les nombres stœchiométriques :

- ▷ celle que vous connaissez déjà consiste à écrire les réactifs à *gauche* et les produits à *droite* de l'équation et à n'utiliser que des nombres stœchiométriques positifs ;
- ▷ on peut également écrire à la fois les réactifs et les produits à *droite* avec un 0 à gauche et utiliser des nombres stœchiométriques algébriques, *négatifs* pour les réactifs et *positifs* pour les produits.

Exemple :

Espace 13

💣💣💣 **Attention !** La convention de signe des nombres stœchiométriques est plus naturelle si la réaction est écrite sous la forme « $0 = \dots$ » et pas « $\dots = 0$ ».

III - Vers l'échelle macroscopique

III.1 - Corps pur, mélange et solution

Un échantillon macroscopique de matière est qualifié de **corps pur** s'il contient une seule espèce chimique et de **mélange** s'il en contient plusieurs.

La distinction se fait donc sur la composition et pas sur le mode de fabrication.

Exemples :

Espace 14

On appelle **solution** un mélange dans lequel l'un des constituants, appelé **solvant**, est en très large excès par rapport à tous les autres, appelés **solutés**.

Une équation bilan en solution distingue le solvant des solutés dans l'écriture de l'état physico-chimique des solutés : par exemple, (aq) pour un soluté en solution aqueuse.

III.2 - États physiques de la matière

En fonction des conditions de température, de pression, et éventuellement de composition dans le cas d'un mélange, la matière peut se présenter sous trois états physiques, appelés aussi **états d'agrégation** : gaz (synonyme de vapeur), liquide et solide. Les états solide et liquide sont appelés **états condensés**, alors que les états liquide et gaz sont appelés **états fluides**.

a) État gazeux

- **Description macroscopique**

Espace 15

Deux gaz sont toujours miscibles. La masse volumique d'un gaz est de l'ordre de $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

- **Description microscopique**

Les entités chimiques constituant un gaz sont éloignées les unes des autres et quasiment libres : les forces d'interaction entre elles sont très faibles. Elles ont un mouvement aléatoire et désordonné : on parle d'**agitation thermique**.

b) État liquide

- **Description macroscopique**

Espace 16

Deux liquides ne sont pas nécessairement miscibles, un exemple évident étant l'eau et l'huile. La masse volumique d'un liquide est de l'ordre de $10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

- **Description microscopique**

Les entités chimiques constituant un liquide sont proches les unes des autres. Les forces d'interaction entre elles sont relativement intenses, mais suffisamment faibles pour qu'elles puissent se déplacer de façon aléatoire et désordonnée les unes par rapport aux autres : c'est également l'agitation thermique.

c) État solide

- **Description macroscopique**

À l'état solide, la matière a une forme propre et ne s'écoule pas. La masse volumique d'un solide est de l'ordre de 10^3 à $10^4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

- **Description microscopique**

Les entités chimiques constituant un solide sont très proches les unes des autres. Les interactions entre elles sont tellement intenses qu'elles ne peuvent (presque) pas se déplacer les unes par rapport aux autres.

- **Différents types de solides**

En fonction du degré d'organisation des entités microscopiques, on distingue :

- ▷ les **solides cristallins**, qui correspondent à un état parfaitement ordonné et sont constitués d'un arrangement périodique des entités dans l'espace (voir chapitre AM5) ;
- ▷ les **solides amorphes**, dans lesquels l'arrangement des entités est totalement désordonné ;
- ▷ les **solides semi-cristallins**, dans lesquels seules certaines zones sont cristallisées.

Exemples :

Espace 17

Une même espèce chimique peut exister dans différentes structures cristallines, en fonction du mode de cristallisation (rapide ou lente) et des conditions extérieures de température et de pression. Ces différentes structures sont appelées **variétés allotropiques**. En général, les différentes variétés allotropiques ont des propriétés différentes (couleur, dureté, conductivité électrique, etc.).

Exemples : L'eau solide possède sept variétés allotropiques. Le diamant et le graphite sont deux variétés allotropiques différentes du carbone.

💣💣💣 **Attention !** Les variétés allotropiques sont les différentes formes *solides* d'une espèce chimique. Ainsi, l'eau liquide n'est pas une variété allotropique de l'eau.

III.3 - Transitions de phase

a) Changements d'état d'un corps pur

Attention, les changements d'état d'un mélange donnent lieu à des phénomènes plus complexes que ceux d'un corps pur.

solide

liquide

gaz

b) Généralisation

Dans le cas d'un mélange, la notion d'état d'agrégation n'est plus suffisante : penser par exemple à deux liquides non miscibles. On la précise par la notion de **phase**.

Espace 18

Sur le plan microscopique, une phase est associée à une seule organisation des entités chimiques.

Espace 19

Les transformations physiques sont parfois appelées **transitions de phase**.

Une transition de phase requiert ou libère des quantités d'énergie sensiblement plus faible qu'une transformation chimique, de l'ordre de 10^2 à $10^3 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$: faire changer de phase une mole d'une espèce chimique requiert une énergie de 100 à 1000 J.

Exemples :

Espace 20