

Chapitre 10. Quelques notions de chimie quantitative et thermochimie

1 Un peu d'histoire... De l'alchimie à la chimie moderne

L'origine de l'alchimie se situe dans l'Antiquité : les premiers alchimistes sont des métallurgistes et des teinturiers égyptiens.

Au cours des siècles, de nombreuses techniques de transformations des substances (alliage, polissage, dissolution, purification, distillation, condensation, ...) sont accumulées; elles seront très utiles au démarrage de la chimie expérimentale.

Cependant, un très fort courant mystique empêche l'alchimie de devenir une science. Dans les croyances des alchimistes du Moyen-Age se mêlent magie et religion; ils croyaient pouvoir trouver et purifier une substance dont la perfection pourrait, entre autres, rendre à l'homme l'éternelle jeunesse du paradis perdu et transformer les métaux corruptibles (qui s'oxydent) en or.

Le passage de l'alchimie (constituée de recettes et de croyances mystiques) à la chimie moderne (une véritable science expérimentale) a nécessité d'une part qu'on abandonne les croyances irrationnelles et d'autre part qu'on utilise de manière systématique des outils précis pour mesurer les phénomènes. Ces outils sont principalement la balance pour mesurer les masses ainsi que des thermomètres et des récipients pour mesurer des températures et des volumes.



Laboratoire d'alchimie.



La balance, instrument de base du chimiste.

NO_2 , dioxyde d'azote, contient 30,4 g d'azote et 69,6 g d'oxygène.

$$\left(\frac{30,4}{69,6} = \frac{109}{228} = \frac{1}{2} \right)$$

N_2O_5 , pentoxyde de diazote, contient 25,9 g d'azote et 74,1 g d'oxygène.

$$\left(\frac{25,9}{74,1} = \frac{285}{100} \right)$$

On constate que les proportions d'azote sont dans les rapports simples : 1; 2; 3; 4 et 5 ($114 = 2 \times 57$; $171 = 3 \times 57$; $228 = 4 \times 57$; etc.).

Les substances à l'état gazeux réagissent en respectant des lois analogues.

En 1805, Gay-Lussac remarqua que les volumes des gaz entrant en réaction, de même que ceux produits, étaient toujours dans un rapport simple, en général inférieur à 10.

Pour obtenir de l'eau, on peut faire réagir de l'oxygène avec de l'hydrogène, tous deux à l'état gazeux, on observe qu'il faut un volume d'hydrogène double de celui d'oxygène.

Le volume de vapeur d'eau obtenu est aussi double de celui d'oxygène, tous ces gaz devant se trouver dans les mêmes conditions de température et de pression (Loi des gaz parfaits).

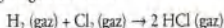
En pratique, on va considérer la plupart des gaz réels utilisés comme étant des gaz presque parfaits.

Dans une réaction chimique, en phase gazeuse, il y a toujours un rapport simple entre les volumes des gaz qui réagissent.

Un peu plus tard, en 1811, Avogadro proposa une hypothèse très simple pour expliquer la loi de Gay-Lussac:

Dans les mêmes conditions de température et de pression, des volumes égaux de gaz contiennent le même nombre de molécules.

Exemple: la réaction, en phase gazeuse, de formation du chlorure d'hydrogène (gaz chlorhydrique) à partir de chlore et d'hydrogène gazeux s'écrit:



Cela signifie qu'un volume d'hydrogène réagit avec un volume de chlore pour donner deux volumes de chlorure d'hydrogène.

Cette hypothèse, actuellement considérée comme une loi, peut facilement être déduite de la loi des gaz parfaits:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$



Gay-Lussac (1778-1850) énonça les lois de la combinaison des gaz en volume.



L'acide chlorhydrique est du chlorure d'hydrogène dissous dans l'eau.

Loi de Lavoisier

Lavoisier énonça le principe de la conservation de la matière de la façon suivante:

« Rien ne se crée, rien ne se perd, ni dans les opérations de l'art, ni dans celles de la nature. »

Cette formule signifie que lors d'une réaction chimique effectuée dans un système isolé («opérations de l'art»), la quantité de matière mise en jeu ne diminue ni n'augmente de masse, quelles que soient les transformations subies.



Antoine Lavoisier (1743-1794) et sa femme.

Loi de Proust

Cette loi, dite aussi «Loi des proportions définies», indique que **pour former un composé, les éléments chimiques se combinent toujours dans des proportions invariables.**

Par exemple, le cuivre forme avec l'oxygène un oxyde noir dont l'analyse indique la composition: 80% de cuivre et 20% d'oxygène (% en masse). C'est l'oxyde de cuivre II (CuO).

Une autre combinaison est possible: 89% de cuivre et 11% d'oxygène (% en masse).

Cela conduit à un oxyde rouge de cuivre I (Cu_2O).

Loi de Dalton

C'est la loi des proportions multiples.

Lors d'une combinaison de deux éléments, le rapport des masses de ces éléments est toujours un rapport simple.

L'azote forme cinq composés avec l'oxygène:

N_2O , monoxyde de diazote, contient, pour 100 g de composé, 63,6 g d'azote et 36,4 g d'oxygène.

$$\left(\frac{36,4}{63,6} = \frac{57}{100} \right)$$

NO , monoxyde d'azote, contient 46,7 g d'azote et 53,3 g d'oxygène.

$$\left(\frac{46,7}{53,3} = \frac{114}{100} \right)$$

N_2O_3 , trioxyde de diazote, contient 36,9 g d'azote et 63,1 g d'oxygène.

$$\left(\frac{36,9}{63,1} = \frac{171}{100} \right)$$


Proust, un des pionniers de la chimie (1754-1826).

2 Notion de mole

Une réaction chimique dépend du nombre d'atomes ou de molécules mais pas directement de la masse des substances réagissantes.

Pour rendre compte du nombre de molécules, on a défini une unité: la mole (abrégiée mol).

La masse d'une mole de substance s'obtient en faisant la somme des masses atomiques des éléments constituant la molécule.

La masse d'une mole s'exprime en grammes.

Exemples:

Calcul de la masse d'une mole d'eau (H_2O)

2 atomes d'hydrogène (H):	$2 \cdot 1 = 2$
1 atome d'oxygène (O):	$1 \cdot 16 = 16$
Masse d'une mole d'eau (H_2O):	18 g

Calcul de la masse d'une mole de sulfate de sodium (Na_2SO_4)

2 atomes de sodium (Na):	$2 \cdot 23 = 46$
1 atome de soufre (S):	$1 \cdot 32 = 32$
4 atomes d'oxygène (O):	$4 \cdot 16 = 64$
Masse d'une mole de sulfate de sodium (Na_2SO_4):	142 g

NB: on a utilisé, dans ces exemples, des valeurs de masses atomiques arrondies.



Une mole de sucre ou saccharose ($\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$) et une mole de sel (NaCl): 342 g pour le sucre et 58,5 g pour le sel.

3 Concentration

Pour donner la mesure de la quantité de substance dissoute, on utilise la notion de concentration. Le solvant le plus courant est l'eau (H_2O).

En souvenir d'Amadeo Avogadro, on appelle «Nombre d'Avogadro» le nombre de molécules contenues dans une mole de n'importe quelle substance pure ou dans 22,4 litres de n'importe quel gaz ramené aux «conditions normales» (conditions normales: 1013 hPa de pression et 0° C de température).



Le comte Amadeo Avogadro (1776-1856), chimiste italien.

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$$

La concentration s'exprime dans différentes unités. La plus utilisée, en chimie, est la concentration molaire. C'est la quantité, exprimée en moles, de substance dissoute dans un litre de solution. La concentration molaire s'abrége **mol·l⁻¹** (ou **M**).

La concentration d'une substance est notée en écrivant la formule brute entre crochets.

Exemple: [NaCl] = 1 mol·l⁻¹ (ou 1M) signifie que la concentration de chlorure de sodium vaut une mole par litre de solution.

4 Etude quantitative d'une réaction chimique

EXPERIENCE Mélanger soigneusement 2 grammes de fer en poudre avec 2 grammes de soufre en poudre. Mettre le mélange dans une éprouvette et chauffer. Dès que la réaction s'amorce, éloigner l'éprouvette de la flamme.

Qu'observe-t-on dans l'éprouvette? Le fer et le soufre ont-ils intégralement réagi? Les masses étaient-elles judicieusement choisies?

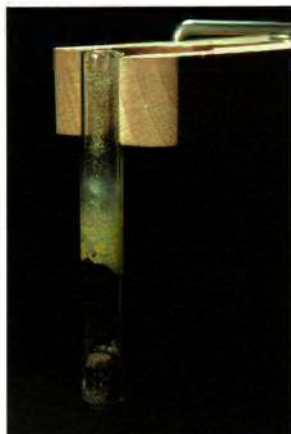
Ce que nous apprend cette expérience

On peut observer sur la photo ci-contre que du soufre s'est déposé sur les parois de l'éprouvette. Tout le soufre n'a donc pas réagi avec le fer pour donner du sulfure de fer II selon la réaction :



Une étude quantitative de cette réaction permet de prévoir les masses de fer et de soufre à mélanger: l'équation de réaction chimique indique que chaque atome de fer réagit avec un atome de soufre.

Au niveau macroscopique, cela veut dire qu'il faut faire réagir une mole de fer (56 grammes) avec une mole de soufre (32 grammes) pour obtenir une mole de sulfure de



Aspect après réaction.

fer II (88 grammes). Un calcul de proportions permet de déterminer la quantité de fer et de soufre à utiliser selon la quantité de substance désirée.

Par exemple, pour obtenir 1 gramme de sulfure de fer, il faut 56/88 grammes de fer et 32/88 grammes de soufre. (En effet: 56/88 + 32/88 = 88/88 = 1)

Pour obtenir 4 grammes de sulfure de fer, il aurait fallu mettre en présence:

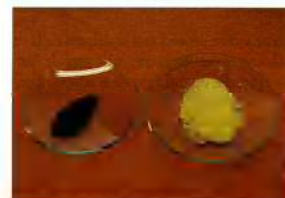
$$4 \cdot \frac{56}{88} = 2,5 \text{ grammes de fer}$$

$$4 \cdot \frac{32}{88} = 1,5 \text{ grammes de soufre}$$

Ce calcul montre que dans l'expérience, il y avait un excès de soufre, ce que confirme l'observation. En effet, 1,5 grammes de soufre suffisent pour faire réagir 2,5 grammes de fer.

Dans la pratique, les calculs quantitatifs de produits à faire réagir donnent une indication importante quant aux mélanges à effectuer. Cependant, comme la totalité des atomes ne réagissent pas, les chimistes mettent souvent un excès d'une des substances afin de s'assurer que l'autre élément ait complètement réagi. Une fois la réaction terminée, il est alors nécessaire de séparer le produit de réaction de la substance en excès, ce qui peut toutefois être long et coûteux.

Dans l'expérience, après la réaction, il faudrait séparer le soufre restant du sulfure de fer (par combustion ou sublimation par exemple).



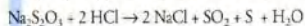
Quantités de soufre et de fer choisies dans les bonnes proportions.

5 Vitesse de réaction

EXPERIENCE La réaction de l'acide chlorhydrique (HCl) sur le thiosulfate de sodium (Na₂S₂O₃), en solution aqueuse, produit du soufre; cela se remarque par un trouble de la solution.

Dans cinq tubes à essais, on introduit le même volume d'une solution de thiosulfate de concentration 0,1 mol·l⁻¹. On ajoute alors, aussi rapidement que possible, un même volume d'acide chlorhydrique HCl, de concentration croissante: 0,01 mol·l⁻¹; 0,02 mol·l⁻¹; 0,1 mol·l⁻¹; 0,2 mol·l⁻¹; 1 mol·l⁻¹ dans chacun des tubes. On observe

la disparition d'un repère (disposé derrière les tubes à essais) à mesure qu'il y a apparition de soufre. La réaction s'écrit :



Cette expérience met en évidence l'influence de la concentration des réactifs sur la vitesse de cette réaction: plus la concentration des réactifs est élevée, plus la vitesse de réaction sera grande.

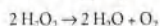
L'observation de la Nature conduit à la conclusion que les réactions chimiques qui s'y passent n'ont pas toutes lieu à la même vitesse. Certaines sont très rapides (explosion, neutralisation d'un acide par une base), d'autres par contre sont relativement lentes (oxydation des aliments), voire extrêmement lentes (formation de la rouille sur du fer ou de «vert de gris» sur du cuivre).

Les facteurs qui déterminent la vitesse d'une réaction sont nombreux.

Cette vitesse dépend non seulement de la composition des substances qui réagissent, mais aussi de leur état physique, de l'intimité du mélange, de la température, de la pression, des concentrations des réactifs, de conditions physiques spéciales telles que l'irradiation (lumière visible, les rayons UV, les rayons X, les neutrons, etc.) ou la présence d'autres substances qui influencent la réaction (catalyseurs).

Exemple

L'eau oxygénée (H₂O₂) se décompose (en présence de traces d'iode) en eau (H₂O) et en oxygène gazeux (O₂).



Pour des concentrations d'eau oxygénée de 0,1; 0,2; 0,4; 0,6 mol·l⁻¹, on a mesuré des vitesses de réaction respectives de 1,01 · 10⁻³; 2,02 · 10⁻³; 4,04 · 10⁻³ et 6,06 · 10⁻³ mol·l⁻¹·min⁻¹.

Si v est la vitesse de réaction en mol·l⁻¹·min⁻¹, on remarque que la vitesse de la réaction est proportionnelle à [H₂O₂], ce que l'on exprime mathématiquement par :

$$v = k [\text{H}_2\text{O}_2]$$

k, appelée constante de vitesse, vaut, dans ce cas, 1,01 · 10⁻² min⁻¹. Cette valeur de k est spécifique de cette réaction à une température donnée.

La vitesse de la plupart des réactions chimiques est approximativement doublée pour chaque accroissement de température de 10 °C.



La réaction dans les diverses éprouvettes ne se fait pas à la même vitesse.



Une réaction chimique rapide.



Le brunissement d'une banane est une réaction chimique relativement lente.



La rouille, une réaction chimique très lente.

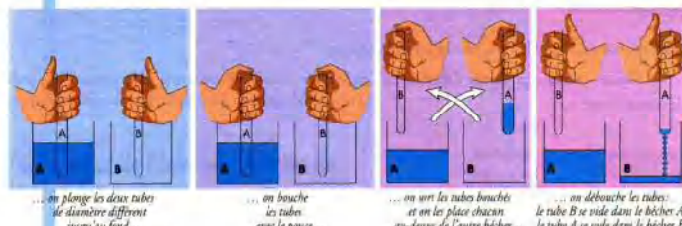
6 Equilibre chimique

EXPERIENCE La réaction de l'ion cuivre II (ou cuivrique) sur l'ammoniaque en solution aqueuse conduit à l'obtention d'un ion complexe bleu foncé (Cu(NH₃)₄²⁺). Si l'on ajoute alors un peu de solution d'ammoniaque, on observe que la couleur s'intensifie. Il en va de même si l'on ajoute une solution contenant l'ion cuivrique (Cu(H₂O)₄²⁺). Cela signifie que ni l'ion cuivre II, ni l'ammoniaque n'ont été totalement consommés lors de la première phase de l'opération. En ajoutant alors de l'eau, on observe que la couleur bleue intense pâlit. Cette réaction est réversible, elle s'écrit :



Un grand nombre de réactions chimiques semblent s'arrêter avant que tous les réactifs aient été transformés en produits de réaction. La réaction aboutit à un équilibre.

EXPERIENCE Une expérience permet d'introduire et d'illustrer le concept d'équilibre chimique. On prend deux béchers identiques A et B. Le bécher A contient une solution colorée alors que le bécher B est vide. On place deux tubes à essai (de sections différentes, troués dans leur partie inférieure) dans les béchers...



On recommence la même opération plusieurs fois. Au bout de quelques cycles, les niveaux dans les béchers ne changent plus. Le volume de liquide prélevé dans le tube A représente la vitesse de réaction du bécher A vers le bécher B (sens direct →) et le volume de liquide prélevé dans le tube B représente la vitesse de réaction du bécher B vers le bécher A (sens inverse ←).



Une autre expérience illustre ce principe d'équilibre. On propose aux élèves d'une classe le jeu suivant:

A chaque signal du maître (toutes les minutes, par exemple), le quart des élèves qui se trouvent dans la classe, sortent dans le couloir tandis que la moitié de ceux qui sont dans le couloir reviennent en classe (on arrondit le nombre d'élèves: 2,5 donne 3).

Si l'on démarre le jeu avec une classe de 20 élèves (tous en classe), on peut construire le tableau suivant:

temps	nombre d'élèves en classe	nombre d'élèves dans le couloir
départ t = 0	20	0
t = 1 min	15	5
t = 2 min	14	6
t = 3 min	13	7
t = 4 min	14	6
t = 5 min	13	7

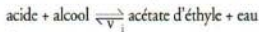
L'équilibre chimique est défini par l'égalité des vitesses de réaction dans les deux sens. On dit souvent «sens direct» pour la réaction lue de gauche à droite et «sens inverse» pour celle lue de droite à gauche.

Soit, par exemple, la réaction de l'acide acétique (CH₃COOH) sur l'éthanol (C₂H₅OH) qui produit de l'acétate d'éthyle (C₂H₅COOC₂H₅) et de l'eau (H₂O)



de vitesse directe v_d

Cette réaction est réversible, on symbolise cette réaction par:



de vitesse inverse v_i

Expérimentalement, on détermine:

$$v_d = k_d \cdot [\text{acide}] \cdot [\text{alcool}] \text{ et } v_i = k_i \cdot [\text{acétate d'éthyle}] \cdot [\text{eau}]$$

k_d et k_i sont les constantes de vitesse dans les sens direct et inverse.

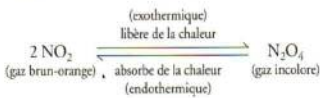
A l'équilibre, les concentrations de toutes les substances en présence sont stables, donc:

$$v_d = v_i \quad k_d \cdot [\text{acide}] \cdot [\text{alcool}] = k_i \cdot [\text{acétate d'éthyle}] \cdot [\text{eau}]$$

Le principe de Le Chatelier s'énonce ainsi:

Si l'on tente de modifier l'état d'équilibre d'un système, il réagit de façon à annuler l'effet de cette variation. La réaction se déplace dans le sens capable d'absorber (de compenser) la variation imposée.

Par exemple, la réaction en phase gazeuse:



Si l'on augmente la température, la réaction se déplacera vers la gauche: la couleur brun-vert se renforce.

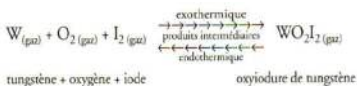
Si l'on refroidit le mélange, la réaction se déplacera vers la droite: le mélange devient incolore.



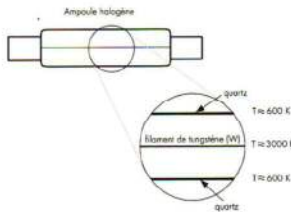
Une application intéressante de ce phénomène est le fonctionnement des lampes halogènes.

Le filament est en tungstène (W) et l'ampoule contient de l'iode gazeux (I₂) à faible pression et de l'oxygène (O₂).

L'intérieur de l'ampoule est le siège de plusieurs réactions chimiques que l'on peut résumer ainsi:



La présence d'iode (gaz halogène) et d'oxygène autour du filament permet, lorsque la lampe est allumée, d'augmenter fortement la tension de vapeur du tungstène (pression de tungstène gazeux) puisque l'équilibre est déplacé vers la gauche; cela diminue «l'usure» du filament par sublimation (la sublimation diminue si la tension de vapeur augmente), permet une utilisation de l'ampoule à plus haute température et augmente ainsi sa luminosité.



Les phares à iode, une application technologique du déplacement d'un équilibre chimique.

On définit la constante d'équilibre K de cette réaction avec la relation suivante:

$$K = \frac{k_d}{k_i} = \frac{[\text{acétate d'éthyle}] \cdot [\text{eau}]}{[\text{acide}] \cdot [\text{alcool}]}$$

La valeur de K dépend de la température.

EXPÉRIENCE Une expérience réalisée à température ambiante a donné, à l'équilibre, les valeurs suivantes: 15 g d'alcool, 20 g d'acide acétique, 58 g d'acétate d'éthyle et 12 g d'eau dans un certain volume V.

On calcule les concentrations des substances en présence à l'équilibre et la constante d'équilibre K de cette réaction:

$$[\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}] = \frac{15}{46 \cdot V} = \frac{0,326}{V} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$$

$$[\text{CH}_3\text{COOH}] = \frac{20}{60 \cdot V} = \frac{0,333}{V} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$$

$$[\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5] = \frac{58}{88 \cdot V} = \frac{0,659}{V} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$$

$$[\text{H}_2\text{O}] = \frac{12}{18 \cdot V} = \frac{0,667}{V} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$$

$$\text{d'où } K = \frac{0,659 \cdot 0,667}{0,333 \cdot 0,326} = 4,05$$

Remarque: dans ce cas, le volume de solution n'intervient pas (se simplifie) dans le calcul de la constante d'équilibre K.

Déplacement de l'équilibre; principe de Le Chatelier

Lorsque l'état d'équilibre est atteint, les concentrations des différentes substances en présence sont stables.

Que se passe-t-il si l'on modifie, par exemple, la concentration des solutions ou la pression des gaz ou la température?

L'équilibre va être perturbé. La Nature réagit, selon une loi découverte par Le Chatelier, de façon à établir un nouvel état d'équilibre.

7 Thermochimie

D'une manière générale, pour briser des liaisons chimiques, il faut de l'énergie qui peut être fournie sous différentes formes: thermique, rayonnante, électrique, travail mécanique. Par contre, la formation de nouvelles liaisons s'accompagne généralement d'un dégagement d'énergie. Pour une réaction donnée, la quantité globale d'énergie mise en jeu est toujours la même, mais la part d'énergie thermique dépend de la manière dont la réaction se produit.

La plupart des réactions libèrent de l'énergie thermique: ce sont les réactions **exothermiques**. D'autres, moins fréquentes dans la Nature, en absorbent: ce sont les réactions **endothermiques**.

EXPÉRIENCE Dans un bécher, placé sur un agitateur magnétique, verser 100 ml d'eau dont on mesure la température, ajouter rapidement environ 40 g de sel de cuisine (NaCl): Mesurer la température lorsque le sel est totalement dissous. On observe une baisse de température d'environ 2 °C.

La dissolution de sel dans l'eau s'accompagne d'une absorption de chaleur; cette énergie est utilisée pour dissoudre le sel (démontrer sa structure cristalline) puis le dissocier en ions Na⁺ et Cl⁻.

La combustion d'une allumette s'accompagne d'un dégagement de chaleur et de lumière (flamme). Les réactions de combustion sont toujours exothermiques.

La plupart des réactions chimiques ont lieu dans des récipients ouverts, c'est-à-dire, sur le plan physique, à pression constante. A cette condition, l'énergie thermique absorbée ou libérée par la réaction est appelée variation d'enthalpie (ΔH).

Si une réaction est **exothermique**, sa variation d'enthalpie est négative; le système perd de l'énergie thermique: ΔH < 0.

Si la réaction est **endothermique**, sa variation d'enthalpie est positive; le système gagne de l'énergie thermique: ΔH > 0.

Cette variation d'enthalpie dépend des conditions d'expérience; dans les conditions standards de température et de pression (CSTP: 298 K et 1013 hPa), on la note H° ou ΔH°.

Par convention, l'enthalpie standard des éléments, dans leur forme la plus stable, est nulle aux conditions standards de température et de pression. Cette valeur est notée H_f° .

Exemples

- O_2, N_2, H_2, \dots sous forme gazeuse: $H_f^\circ = 0$ kJ/mole
- C, sous forme de graphite: $H_f^\circ = 0$ kJ/mole
C, sous forme de diamant: $H_f^\circ = 1,98$ kJ/mole.
Le cristal de diamant, même s'il est plus dur, est chimiquement moins stable que celui du graphite; cela explique qu'on trouve moins de diamant que de graphite dans la nature.

L'enthalpie standard de formation d'un corps composé est l'enthalpie de la réaction par laquelle il s'en forme une mole à l'état standard, à partir des corps simples uniquement, pris eux aussi à l'état standard. On tient compte de l'état: gazeux (g), liquide (l) ou solide (s).

Même si la réaction ne peut pas être effectivement réalisée, on peut néanmoins calculer son enthalpie de formation.

Loi de Hess

L'application du premier principe de thermodynamique aux réactions chimiques conduit à la loi de Hess:

La chaleur produite ou absorbée par une réaction chimique ne dépend que de l'état initial et de l'état final, et non des étapes intermédiaires, à condition que celle-ci soit effectuée soit à pression constante (récepteur ouvert), soit à volume constant (récepteur fermé).

On se limitera au calcul d'enthalpies de formation de diverses substances à pression constante.

En vertu du principe de conservation de l'énergie, l'enthalpie d'une réaction est déterminée par la relation:

$$\Delta H_r = \sum \nu_i \Delta H_f^\circ (\text{produits}) - \sum \nu_j \Delta H_f^\circ (\text{réactifs})$$

ν_i et ν_j sont respectivement les coefficients stoechiométriques des produits et des réactifs, c'est-à-dire le coefficient qui précède la formule du produit dans une réaction équilibrée, ΔH_f° étant les enthalpies de formation des produits et des réactifs respectivement.

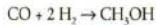
On obtient:

$$\Delta H_r^\circ = 2(-393) + (-285) - (-1300) = 227 \text{ kJ/mole.}$$

Il est aussi possible de combiner algébriquement les équations dont on connaît l'enthalpie, de façon à retrouver l'équation de celle dont l'enthalpie est inconnue.

Exemple

On désire calculer l'enthalpie standard ΔH_r° de la réaction de synthèse du méthanol (CH_3OH) selon la réaction:



On détermine expérimentalement les enthalpies de combustion:

- du méthanol: $\Delta H_c^\circ = -638$ kJ/mole
- de l'hydrogène: $\Delta H_c^\circ = -286$ kJ/mole
- et du monoxyde de carbone: $\Delta H_c^\circ = -283$ kJ/mole.

On retrouve l'équation de synthèse en additionnant « membre à membre » trois équations de combustion:

Ci-dessous, on a « inversé » l'équation de combustion du méthanol et on a multiplié par 2 l'équation de combustion de l'hydrogène. Ceci ne constitue qu'un artifice de calcul permettant, en additionnant des réactions astucieusement choisies, d'obtenir la réaction voulue.

$$CO_2(g) + 2 H_2O(l) \rightarrow CH_3OH(l) + \frac{3}{2} O_2(g) - \Delta H_c^\circ$$

$$2[H_2(g) + \frac{1}{2} O_2(g) \rightarrow H_2O(l)] \quad 2\Delta H_c^\circ$$

$$CO(g) + \frac{1}{2} O_2(g) \rightarrow CO_2(g) \quad \Delta H_c^\circ$$

$$2 H_2(g) + CO(g) \rightarrow CH_3OH(l) \quad \Delta H_r^\circ = -\Delta H_c^\circ + 2\Delta H_c^\circ + \Delta H_c^\circ$$

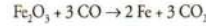
$\Delta H_r^\circ = -217 \text{ kJ/mole}$

Influence de la température

Les enthalpies sont dépendantes de la température à laquelle la réaction envisagée a lieu. Les tables donnent les valeurs d'enthalpies à 298 K (valeur standard). Il peut être intéressant de connaître l'enthalpie d'une réaction à une autre température T.

Exemple

Calcul de l'enthalpie de la réaction suivante (réduction du fer dans un haut fourneau, voir le chapitre « Les réactions chimiques »:



Rappel: $\Delta H_f^\circ(Fe) = 0$ par convention.

$$\Delta H_r = [3 \cdot \Delta H_f^\circ(CO_2) + 2 \cdot \Delta H_f^\circ(Fe)] - [\Delta H_f^\circ(Fe_2O_3) + 3 \cdot \Delta H_f^\circ(CO)]$$

$$\Delta H_r = 3(-394) + 3(0) - (-822) - 3(-111)$$

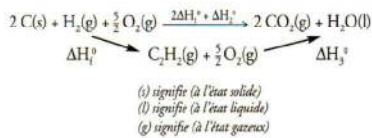
$$\Delta H_r = -27 \text{ kJ/mole}$$

On remarque que cette réaction est exothermique.

Dans certains cas, après avoir mesuré des chaleurs de combustion, on peut calculer l'enthalpie standard de formation.

Exemple

On veut déterminer l'enthalpie de formation de l'acétylène C_2H_2 connaissant les chaleurs de combustion (mesurables) de C (-393 kJ/mole), de H_2 (-285 kJ/mole) et de C_2H_2 (-1300 kJ/mole). On met en parallèle la combustion de 2 moles de carbone C et une mole d'hydrogène H_2 , et une transformation indirecte comportant en préalable la formation d'une mole d'acétylène C_2H_2 , ensuite soumise à combustion:



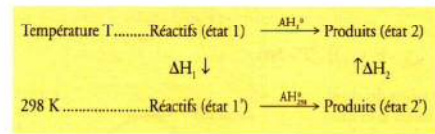
Remarque: Dans la relation ci-dessus, ne pas confondre ΔH_3° qui est l'enthalpie de formation avec $H_2(g)$ qui est du gaz hydrogène!

On peut écrire: $2 \Delta H_1^\circ + \Delta H_2^\circ = \Delta H_1^\circ + \Delta H_3^\circ$

d'où $\Delta H_1^\circ = 2 \Delta H_1^\circ + \Delta H_2^\circ - \Delta H_3^\circ$

- avec $\Delta H_1^\circ = -393$ kJ/mole
 $\Delta H_2^\circ = -285$ kJ/mole,
 $\Delta H_3^\circ = -1300$ kJ/mole

Les enthalpies étant additives, on peut écrire, pour une réaction à la température T, par rapport à la même réaction à 298 K le diagramme de Hess:



Pour passer de l'état 1 à l'état 2, il y a deux possibilités:

- Effectuer la réaction à la température T, la variation d'enthalpie de réaction est ΔH_1° .
- Décrire un parcours en 3 étapes: faire passer les réactifs de la température T à 298 K (étape 1 à 1' avec ΔH_1), puis effectuer la réaction à 298 K (étape 1' à 2') avec ΔH_{298}° et enfin, ramener la température des produits à la valeur T (étape 2' à 2 avec ΔH_2).

La variation totale d'enthalpie est la même dans les deux cas (loi de Hess), donc:

$$\Delta H_1^\circ = \Delta H_{298}^\circ + \Delta H_1 + \Delta H_2$$

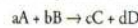
Les quantités de chaleur ΔH_1 et ΔH_2 sont égales à une somme de termes du type:

$$n \cdot C \cdot \Delta T$$

- n = nombre de moles
- C = chaleur molaire (J/mole · K)
- C = c · M/1000 (c = chaleur massique et M = masse molaire en gramme de la substance en question)
- ΔT = variation de température, pour chacun des constituants du système, dans l'état initial ou dans l'état final.

En général, $|\Delta H_1| \neq |\Delta H_2|$ car les chaleurs molaires des réactifs ne sont pas égales à celles des produits (il ne faut pas la même quantité de chaleur pour faire varier de ΔT la température des réactifs et celle des produits).

Supposons une réaction à pression constante du type:



où a, b, c et d sont les coefficients stoechiométriques des substances A, B, C et D, $C_{p(A)}$ et $C_{p(B)}$ les chaleurs molaires à pression constante de A et B.

On peut écrire:

$$\Delta H_1 = a \cdot C_{p(A)}(298 - T) + b \cdot C_{p(B)}(298 - T)$$

$$\Delta H_2 = c \cdot C_{p(C)}(298 - T) + d \cdot C_{p(D)}(298 - T)$$

Donc, après calculs:

$$\Delta H_T^0 = \Delta H_{298}^0 + [(c \cdot C_{p(C)} + d \cdot C_{p(D)}) - (a \cdot C_{p(A)} + b \cdot C_{p(B)})] \cdot (T - 298)$$

Au cours des étapes 1 à 1' et 2' à 2, il peut exister des changements d'état des réactifs ou produits. Il faudra alors tenir compte, avec le signe adéquat, des chaleurs latentes de changement d'état des substances.

Finalement, on a fait l'hypothèse que les chaleurs molaires ne dépendaient pas de la température, ce qui n'est vrai que pour de faibles variations de température. Dans le cas contraire, il faudra faire appel au calcul intégral.

8 Enthalpie de liaison

L'enthalpie de liaison ou énergie de liaison est définie comme la variation d'enthalpie accompagnant la formation d'une liaison à partir des atomes isolés, à l'état gazeux, sous une pression de 1 atmosphère. Elle s'exprime aussi en joules; elle est toujours négative car la formation d'une liaison est toujours exothermique.

Exemple

L'énergie de la liaison H-Cl est l'enthalpie de la réaction:



Représentation graphique de l'enthalpie d'une réaction

Chaque réaction chimique est accompagnée d'une transformation d'énergie. On observe souvent qu'une réaction exothermique démarre spontanément mais parfois, elle doit être tout d'abord activée, de même pour une réaction endothermique.

Par exemple, un mélange gazeux d'hydrogène et d'oxygène est dit « figé » dans des conditions normales mais explose

Chapitre 11. Introduction à la chimie organique

A l'origine, la chimie organique s'intéressait aux substances extraites des êtres vivants. A ce titre, c'est une science ancienne; à partir d'organismes du règne végétal ou animal, les peuples de l'Antiquité comme les Egyptiens savaient déjà extraire de nombreuses substances telles que remèdes, teintures, fards, poisons, parfums...

Aujourd'hui, les molécules de la chimie organique sont synthétisées dans des laboratoires. Cependant, la matière première de l'industrie de la chimie organique reste essentiellement le pétrole, lui-même issu d'êtres vivants ayant vécu il y a des centaines de millions d'années.

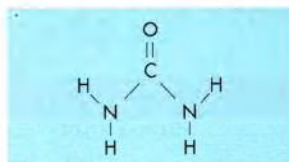
1 Introduction

Ce n'est qu'au début du XIX^e siècle, en 1828, que Woehler montra que l'on pouvait obtenir de l'urée par synthèse alors qu'on pensait que les produits extraits de la nature n'étaient fabriqués que par les cellules vivantes à l'aide d'une énergie vitale particulière: *Vis vitalis*.

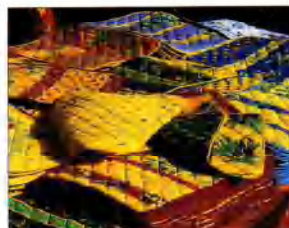
Dès lors, les chimistes se passionnèrent pour ces produits et leurs propriétés. Le nom de « chimie organique » vient à l'origine de la parenté des produits étudiés avec ceux des organismes vivants.

Il existe aujourd'hui de nombreuses appellations pour les différentes branches de la chimie. La chimie du carbone est actuellement divisée en trois grandes catégories dont les domaines d'étude et d'application se recoupent souvent:

- La **chimie organique** est la plus ancienne et la plus vaste. Aujourd'hui, elle s'occupe surtout des substances qu'on peut synthétiser à partir des produits pétroliers. Exemples d'application: matières plastiques et composés, tissus synthétiques, colles, peintures, ...



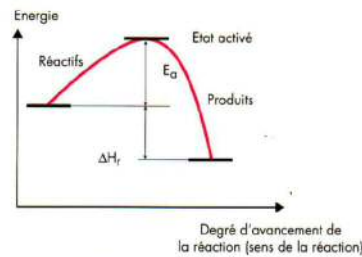
Molécule d'urée: CO(NH₂)₂.



Certains tissus et la plupart des teintures sont issus de la chimie organique.

lorsqu'on l'allume à l'aide d'une étincelle, d'une flamme ou tout simplement en le soumettant à une forte chaleur. De tels systèmes, pour réagir, demandent l'apport d'une **énergie d'activation E_a**.

On peut donc représenter, dans un diagramme d'énergie, les diverses enthalpies:

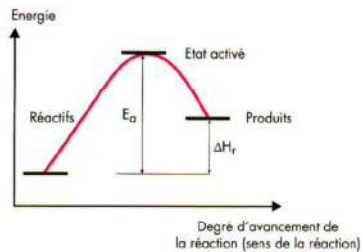


Réaction exothermique.

Lorsqu'on chauffe, dans une éprouvette, de la poudre de calcaire (carbonate de calcium CaCO₃), il se dégage du CO₂ selon la réaction:



La réaction est endothermique, une partie de la chaleur a été « piégée » dans les produits sous forme d'énergie chimique.



Réaction endothermique.

- La **biochimie** étudie les substances et les réactions chimiques qu'on trouve dans les organismes vivants.

Exemples: protéides, glucides, lipides, vitamines, hormones, anticorps, médicaments, étude sur le métabolisme, les maladies, les effets des médicaments, les régulations hormonales et nerveuses, ...



La « pilule » est un contraceptif hormonal issu de la biochimie.

- La **biochimie moléculaire** se concentre sur l'étude d'une molécule très importante pour les êtres vivants puisqu'elle est le support du code génétique et de l'hérédité: l'ADN ou acide désoxyribonucléique (DNA pour les anglophones).

Domaines d'application: génie génétique, police scientifique, recherche en médecine pour lutter contre les maladies héréditaires, le cancer, le SIDA, ...



L'ADN est constitué de très longues molécules en forme de double hélice.

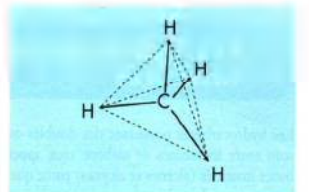
2 Structure des composés organiques

En 1880, près de 12 000 composés du carbone étaient connus; ce nombre a passé à 600 000 en 1954, 3 millions en 1974, 7 millions en 1984 et il ne cesse d'augmenter. Actuellement, plus de 12 millions de composés sont répertoriés.

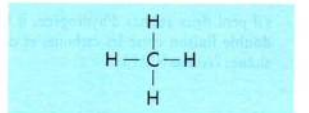
Cela est dû à la **propriété particulière du carbone de pouvoir se combiner avec lui-même et former des chaînes droites, ramifiées ou cycliques qui permettent la « construction » d'un immense nombre de molécules diverses.**

Les composés organiques contiennent des atomes de carbone qui se lient principalement à des atomes d'hydrogène, d'oxygène et d'azote, mais aussi à d'autres éléments comme le soufre ou des halogènes (F, Cl, Br et I). Les organométalliques contiennent, dans leurs molécules, des atomes métalliques et, par là, jouissent de propriétés spécifiques. L'hémoglobine, par exemple, contient des atomes de fer; elle donne leur couleur aux globules rouges et permet la fixation des molécules d'oxygène.

Les liaisons, dans les substances organiques, sont essentiellement covalentes. Dans certains composés, les liaisons entre atomes de carbone, sont doubles ou triples.



Une molécule de méthane (CH₄) montre la disposition spatiale en tétraèdre des quatre liaisons du carbone (tétravalence), ici avec des atomes d'hydrogène.



La molécule de méthane se dessine généralement « à plat » pour des raisons pratiques évidentes. Il ne faut cependant jamais oublier que ces liaisons se développent dans l'espace.

3 Les alcanes (ou hydrocarbures saturés)

La matière organique issue de la photosynthèse des plantes et du métabolisme des cellules végétales et animales est dégradée par les décomposeurs du sol (vers, insectes, bactéries, ...) pour donner ce qu'on nomme habituellement de la terre; c'est ce qui se passe dans le phénomène du compostage.

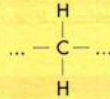
Des animaux et des végétaux ayant vécu il y a quelques centaines de millions d'années ont été piégés dans des couches géologiques (roches sédimentaires) où ils ont subi une lente dégradation chimique en absence d'oxygène qui a produit les combustibles fossiles: gaz naturel, pétrole et charbon. Ces trois termes recouvrent une grande variété de produits essentiellement constitués de carbone et d'hydrogène.

Le gaz et le pétrole sont constitués en grande partie de chaînes d'atomes de carbone liés par des liaisons simples, toutes les autres liaisons étant « occupées » par des atomes d'hydrogène; ce sont les **alcanes** ou **hydrocarbures saturés** (voir le chapitre « Éléments de nomenclature »).

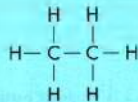
Les carburants les plus utilisés sont des alcanes.

A température ambiante et à la pression atmosphérique, les 4 premiers alcanes (ceux qui contiennent 1, 2, 3 et 4 atomes de carbone) sont gazeux. Le gaz naturel, par exemple, est essentiellement constitué de méthane (CH₄). L'essence (super, sans plomb, ...) contient des chaînes de 6 à 12 atomes de carbone, 12 à 18 pour le kérosène (carburant des avions de ligne) et plus de 18 pour le mazout et l'essence diesel.

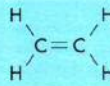
Les alcanes dont les chaînes sont encore plus longues forment des substances pâteuses ou solides (asphaltes). En général insolubles dans l'eau, les hydrocarbures liquides ont une densité inférieure à 1 et flottent sur l'eau (marée noire).



Structure de base d'une molécule d'hydrocarbure saturé (alcane).



Un alcane: l'éthane.



Un alcène: l'éthène ou éthylène.



Un alcynes: l'éthyne ou acétylène.

4 Les hydrocarbures insaturés

Les hydrocarbures possédant des doubles ou triples liaisons entre les atomes de carbone sont appelés hydrocarbures insaturés (alcènes et alcynes) parce que plusieurs de leurs atomes de carbone ont « perdu » chacun un ou deux atomes d'hydrogène.

Prenons l'exemple de l'éthane (C₂H₆):

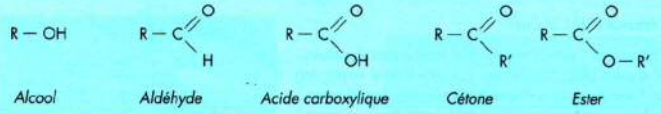
- s'il perd deux atomes d'hydrogène, il formera une **double liaison** entre les carbones et deviendra un **alcène**: l'éthène (C₂H₄);

- s'il perd quatre atomes d'hydrogène, il formera une **triple liaison** entre les carbones et deviendra un **alcynes**: l'éthyne (C₂H₂), produit plus connu sous le nom d'**acétylène**.

Les groupes fonctionnels

Les atomes ou groupe d'atomes liés au carbone dans une molécule organique confèrent à cette molécule des propriétés particulières. Toutes les molécules organiques possédant un même groupe d'atomes auront des propriétés chimiques semblables; ces groupes d'atomes sont appelés « groupes fonctionnels ».

Principaux groupes fonctionnels:



5 La fonction alcool

Reste de la molécule — OH ou R — OH

Remarque: le « reste de la molécule » est nommé « radical »; on le symbolise par la lettre **R**.

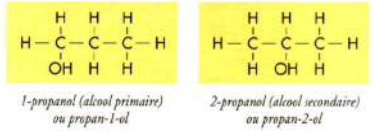
Par substitution d'un atome d'hydrogène par un groupe hydroxyle -OH, on obtient un alcool.

Le suffixe **-ol** permet d'identifier la fonction alcool.

Lorsque le groupe hydroxyle -OH est porté par un carbone lié à:

- un seul autre carbone, on parle d'alcool primaire (exception: le méthanol est quand même un alcool primaire);
- deux autres carbones, on parle d'alcool secondaire;
- trois autres carbones, on parle d'alcool tertiaire.

Le propanol, par exemple, se présente sous deux formes:



Exemples d'alcools

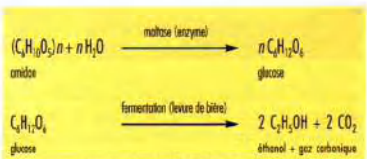
Le méthanol (CH₃OH)

Il s'obtient à partir du bois ou par synthèse en faisant réagir du monoxyde de carbone avec de l'hydrogène à haute pression et haute température à l'aide d'un catalyseur. C'est un liquide incolore, très toxique, soluble dans l'eau et utilisé comme solvant; il sert à préparer le formaldéhyde ou formol (HCHO).

L'éthanol (CH₃CH₂OH)

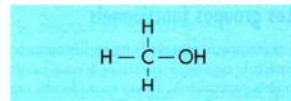
L'éthanol est l'alcool contenu dans les boissons alcoolisées (vin, cidre, bière, alcools forts, ...); appelé aussi « esprit de vin », il était autrefois obtenu par distillation. Actuellement, on le prépare par fermentation de jus sucrés obtenus à partir de substances riches en amidon (pomme de terre par exemple) ou de fruits (pomme).

En Suisse, l'alcool à brûler ou alcool dénaturé est constitué à plus de 95% d'éthanol; on y ajoute 1 pour mille de méthyl-éthyl-cétone (MEK), un produit difficile à séparer, afin de le rendre impropre à la consommation. D'autres additifs peuvent être utilisés pour dénaturer l'éthanol (exemples: 1 pour mille de camphre pour l'usage pharmaceutique, 1 pour mille d'essence de romarin pour les usages cosmétiques).

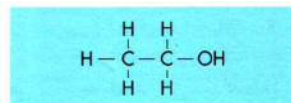


Lorsqu'on laisse macérer, dans certaines conditions, des végétaux contenant du glucose, d'autres sucres ou de l'amidon, on peut obtenir une fermentation alcoolique.

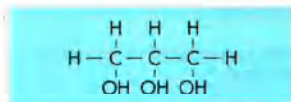
Le jus obtenu (8% d'éthanol environ) est distillé pour extraire l'alcool éthylique; le reste contient surtout de l'eau.



Le méthanol est un alcool obtenu, principalement, par distillation du bois. Sa consommation est dangereuse car il rend aveugle.



L'éthanol est aussi appelé alcool éthylique ou simplement alcool. L'alcool à brûler est essentiellement constitué d'éthanol mélangé avec d'autres substances qui le rendent impropre à la consommation.

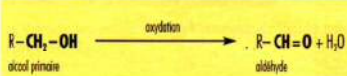


Le glycérol (ou glycérine) est aussi un alcool.

6 La fonction aldéhyde

Reste de la molécule — C=O ou R — C=O

Par oxydation (déshydrogénation), un alcool primaire donne un aldéhyde:



Le nom aldéhyde provient d'**alcool déshydrogéné**.

Le suffixe **-al** permet d'identifier la fonction aldéhyde. Le méthanal ou formaldéhyde (HCHO) est l'aldéhyde du méthanol; l'éthanal (CH₃CHO) est l'aldéhyde de l'éthanol.

Le formol (antiseptique et désinfectant autrefois largement utilisé) est un mélange d'eau, de méthanol et de méthanal; il est toxique si on l'avale.

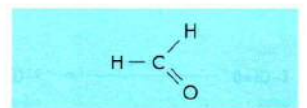
La plus grande partie de l'aldéhyde issu du méthanol (formaldéhyde) est utilisée dans la fabrication de matières plastiques.

Les aldéhydes sont des substances réductrices; lors de la réduction, ils sont transformés en acides carboxyliques.

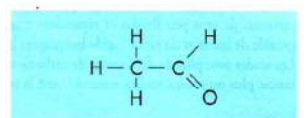
Les aldéhydes sont facilement polymérisables: on peut les lier entre eux en très grand nombre (poly) pour former des molécules géantes (macromolécules).

Deux applications intéressantes du pouvoir réducteur des aldéhydes:

- la liqueur de Fehling autrefois utilisée pour détecter le glucose dans l'urine;
- la formation d'un miroir d'argent par réduction du nitrate d'argent ammoniacal (anciennes boules de Noël).

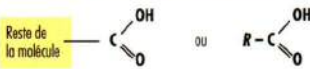


Le méthanal (appelé aussi formaldéhyde) est l'aldéhyde du méthanol.

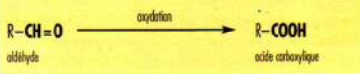


L'éthanal est l'aldéhyde de l'éthanol.

7 La fonction acide carboxylique



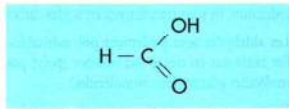
Par oxydation, les aldéhydes donnent des acides carboxyliques caractérisés par le groupe —COOH:



Les acides carboxyliques sont des acides faibles. Le suffixe **-oïque** permet d'identifier les acides carboxyliques. Seuls les quatre premiers acides carboxyliques (1 à 4 atomes de carbone) sont solubles dans l'eau; de quatre à huit atomes de carbone, ils sont peu fluides et répandent une odeur désagréable de sueur et de rance (acide butyrique: beurre rance). Les acides avec plus de dix atomes de carbone sont des substances plus ou moins molles ressemblant à la paraffine.

Exemples d'acides carboxyliques

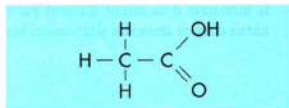
L'acide méthanoïque ou acide formique (HCOOH):
C'est le plus fort des acides carboxylés. On le trouve dans les liquides vésicants produits par certains fourmis (d'où son nom commun), dans les poils urticants des orties, dans le venin des guêpes et abeilles.



L'acide méthanoïque ou acide formique est le plus petit acide carboxylique (1 atome de carbone).

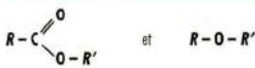
L'acide éthanoïque ou acide acétique (CH₃COOH):

Liquide incolore à forte odeur de vinaigre dont c'est un des constituants. On l'obtient par fermentation de liquides alcooliques, en particulier du vin. Le vinaigre du commerce contient de 35 g à 100 g d'acide acétique par litre.



L'acide éthanoïque ou acide acétique est l'acide du vinaigre.

9 Les fonctions ester et éther



Les alcools ont des propriétés semblables aux hydroxydes minéraux (ou bases); ils réagissent avec les acides carboxyliques pour former des esters et de l'eau:

acide	+	alcool	→	ester	+	eau
CH ₃ COOH	+	CH ₃ OH	→	CH ₃ CO-O-CH ₃	+	H ₂ O
acide acétique	+	méthanol	→	acétate de méthyle	+	eau
H ₂ SO ₄	+	CH ₃ ...CH ₂ OH	→	CH ₃ ...CH ₂ -O-SO ₃ H	+	H ₂ O
acide sulfurique	+	alcool à longue chaîne	→	sulfonate (détergent)	+	eau

Cette réaction ressemble à la formation d'un sel à partir d'un acide et d'un hydroxyde (ou base):

acide	+	hydroxyde	→	sel	+	eau
H ₂ SO ₄	+	Cu(OH) ₂	→	CuSO ₄	+	2 H ₂ O
acide sulfurique	+	hydroxyde de cuivre II	→	sulfate de cuivre	+	eau

La réaction d'estérification est réversible, l'inverse de la réaction d'estérification est l'hydrolyse.

Le suffixe **-ate** permet d'identifier un ester. La réaction d'estérification est lente (plusieurs jours) mais peut être catalysée par adjonction d'une faible quantité d'acide minéral.

Les esters sont des substances très répandues dans la nature. Les premiers esters des acides carboxyliques (de 1 à 5 atomes de carbone) sont très volatils et caractérisés par une odeur de fruits.

Les cires sont des esters obtenus à partir de molécules assez grandes; la cire d'abeille contient, en majeure partie, des esters comptant 26 à 28 atomes de carbone.

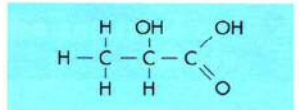
Les esters glycériques des acides gras (lipides, voir le chapitre « Introduction à la biochimie ») donnent des savons par lessivage (hydrolyse) avec une base forte comme la soude (NaOH) ou la potasse (KOH).



La cire d'abeilles contient des esters à longues chaînes de carbone.

Acide lactique (CH₃CHOHCOOH)

Composant du lait acidifié et présent dans la choucroute, il est obtenu par l'action de bactéries spécifiques sur des sucres (fermentation lactique); c'est aussi un des produits intermédiaires de la « combustion » des sucres dans les muscles.



L'acide lactique ou lactate est responsable des courbatures lorsqu'il s'accumule dans les muscles non entraînés pendant un effort prolongé.

Les acides gras (voir aussi le chapitre « Introduction à la biochimie »)

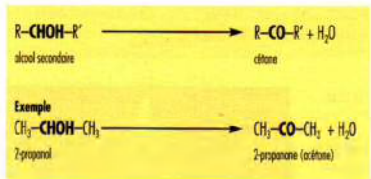
L'acide laurique (C₁₁H₂₃COOH), l'acide palmitique (C₁₅H₃₁COOH) et l'acide stéarique (C₁₇H₃₅COOH) sont les constituants essentiels des graisses animales et végétales.

La stéarine technique (bougie) contient de l'acide palmitique et stéarique.

8 La fonction cétone

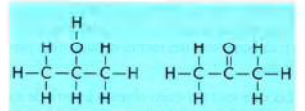


Par oxydation, un alcool secondaire donne une cétone:



Le suffixe **-one** permet d'identifier une cétone.

Les cétones sont moins réactives que les aldéhydes; elles ne peuvent être oxydées en acides.



2-propanol ou propan-2-ol 2-propanone (cétone) ou propanone

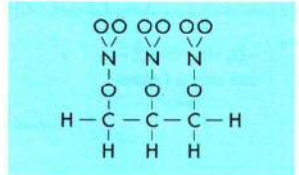
L'acétone (CH₃-CO-CH₃)

Cette substance liquide dont l'odeur est caractéristique, soluble dans l'eau en toutes proportions, est la plus importante des cétones. On l'utilise comme solvant pour les laques (vernis à ongles), les résines synthétiques, les colles, la soie artificielle, ...

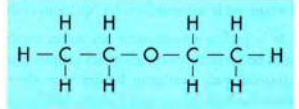
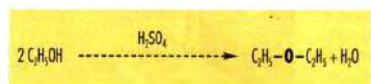
Les esters obtenus à partir d'acide sulfurique (H₂SO₄) et d'alcools à longues chaînes de carbones donnent des détergents (voir l'équation dans les exemples donnés au début du paragraphe).

Les esters de l'acide nitrique (HNO₃) sont explosifs. La nitroglycérine ou trinitrate de glycérol est obtenue par estérification du glycérol (un trialcool) par l'acide nitrique.

Le diéthyléther ou simplement éther, employé comme solvant (autrefois comme anesthésique) est obtenu par ébullition prolongée de l'éthanol avec l'acide sulfurique; pour cette raison, on le nomme aussi éther sulfurique; dans cette réaction, l'acide sulfurique agit comme catalyseur.



La nitroglycérine est un explosif puissant et instable.



Ether sulfurique ou diéthyl-éther ou éther.

10 La combustion des molécules organiques

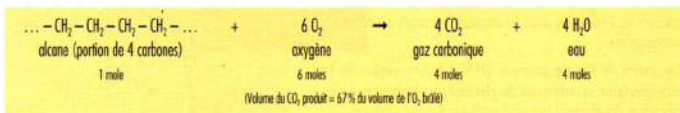
Les alcanes sont combustibles; leur combustion est fortement exothermique. Ils sont, à ce titre, largement utilisés comme source d'énergie pour les installations de chauffage et les moteurs thermiques.

La combustion du méthane (CH₄):

CH ₄	+	2 O ₂	→	CO ₂	+	2 H ₂ O	+	environ 0,9·10 ⁴ J
méthane		oxygène		gaz carbonique		eau		
1 mole		2 moles		1 mole		2 moles		
(Volume du CO ₂ produit = 50% du volume de l'O ₂ brûlé)								
(environ 1,1 mole de CO ₂ produit pour 10 ⁴ J d'énergie thermique)								

La combustion du propane (C₃H₈):

C ₃ H ₈	+	5 O ₂	→	3 CO ₂	+	4 H ₂ O	+	environ 2,2·10 ⁴ J
propane		oxygène		gaz carbonique		eau		
1 mole		5 moles		3 moles		4 moles		
(Volume du CO ₂ produit = 60% du volume de l'O ₂ brûlé)								
(environ 1,4 mole de CO ₂ produit pour 10 ⁴ J d'énergie thermique)								



A production de chaleur égale, la combustion du méthane (ou gaz naturel) produit moins de gaz carbonique que les chaînes d'alcane plus longues comme le butane ou le mazout (voir les équations ci-dessus).

On le préfère actuellement aux autres combustibles fossiles non seulement en raison des grandes réserves qu'on a trouvées mais aussi pour limiter la production de CO₂ dont l'accumulation dans l'atmosphère favorise l'effet de serre et par conséquent un réchauffement de la planète accompagné d'importants changements de climat.



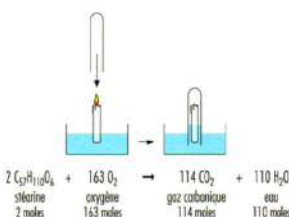
La flamme de combustion du gaz naturel (méthane) produit aussi de l'eau.

EXPERIENCE Une bougie est constituée en grande partie de stéarine (C₂₇H₅₄O₂: triester glycérique de l'acide stéarique; voir le chapitre « Introduction à la biochimie »).

Une bougie brûle dans un récipient rempli d'eau; on la couvre avec un tube renversé.

On observe, après un certain temps, que la bougie s'éteint; elle a « consommé » l'oxygène de l'air emprisonné sous l'éprouvette.

Le niveau de l'eau est monté dans le tube; la bougie, en brûlant, a consommé plus d'oxygène (O₂) qu'elle n'a produit de gaz carbonique (CO₂).



Remarque

Il est difficile de procéder à une vérification quantitative (calcul et mesure des volumes) car d'une part le gaz carbonique est soluble dans l'eau et d'autre part les conditions de température et de pression varient pendant l'expérience...

Chapitre 12. Introduction à la biochimie

La biochimie étudie les êtres vivants, leur composition et les réactions chimiques de leurs constituants; si les atomes dont ils sont formés sont les mêmes que ceux de la matière inerte, les molécules et surtout les réactions qu'elles ont entre elles sont fort différentes de celles qu'on peut observer dans le monde minéral.

1 Les éléments

Les éléments qui entrent dans la composition des êtres vivants sont les mêmes que ceux qui constituent l'Univers. Il n'existe donc aucun élément qui soit propre aux êtres vivants.

Toutefois, l'abondance relative de chaque élément chez les êtres vivants est tout à fait différente de celle dans la matière minérale de la croûte terrestre. Le tableau ci-dessous donne les proportions des éléments les plus abondants de l'écorce terrestre d'une part, et du corps humain d'autre part.

Les valeurs sont exprimées en pourcentage de la masse totale; elles sont arrondies à 1 ou 2 chiffres significatifs, il est donc normal que la somme de ces valeurs soit différente de 100.

Ecorce terrestre (loges en ppb)		Corps humain	
oxygène	environ 49%	oxygène	environ 65%
silicium	environ 26%		
aluminium	environ 8%		
fer	environ 5%		
calcium	environ 3%	calcium	environ 2%
sodium	environ 3%		
potassium	environ 2%		
magnésium	environ 2%		
hydrogène	environ 1%	hydrogène	environ 10%
phosphore	environ 0,1%	phosphore	environ 1%
carbone	environ 0,08%	carbone	environ 20%
azote	environ 0,03%	azote	environ 3%
autres éléments	moins de 1% chacun	autres éléments	moins de 1% chacun



Les abondances relatives des éléments constitutifs du monde vivant et du monde minéral sont fort différentes.

Les **oligo-éléments**, au nombre d'une trentaine, constituent environ le 0,01% de la matière vivante et ont surtout un rôle catalytique (un catalyseur est une substance qui déclenche, permet ou accélère une réaction chimique sans être elle-même modifiée lors de la réaction). Parmi les principaux oligo-éléments, on trouve le fer (Fe), le zinc (Zn), le cuivre (Cu), l'étain (Sn), le manganèse (Mn), l'iode (I), ...

2 Les corps composés minéraux

- **L'eau**: elle représente en général entre 60% et 85% de la masse totale des organismes vivants, parfois moins, parfois plus: **moins de 20%** dans les graines, environ **70%** d'un corps humain, **80%** d'un escargot, **85%** d'une pomme et **plus de 90%** d'une méduse, d'une aubergine ou d'une salade.

- **Les sels minéraux**: ils forment rarement plus de 5% de la masse totale des organismes vivants et peuvent se présenter soit à l'état solide (dans les os, les dents, les coquilles, ...), soit à l'état dissous (dans le sang, dans le cytoplasme des cellules, ...). Les principaux sels minéraux de la matière vivante sont des chlorures, des sulfates, des phosphates et des carbonates de divers métaux (sodium, potassium, magnésium, calcium, fer, ...).



Les êtres vivants sont essentiellement constitués d'eau.

3 Les corps composés organiques

Si l'on exclut l'industrie chimique humaine, les corps composés organiques sont presque exclusivement synthétisés dans des organismes vivants et sont, de ce fait, tout à fait caractéristiques de la matière vivante. Ce sont toujours des substances complexes, de masse moléculaire relativement élevée et contenant nécessairement du CARBONE.

On les classe en trois grandes catégories: - les lipides - les glucides - les protides.

Les glucides et les lipides sont des composés ternaires parce qu'ils sont formés essentiellement de trois éléments: le carbone (C), l'hydrogène (H) et l'oxygène (O).

Les protides sont des composés quaternaires parce qu'ils contiennent en plus un quatrième élément: l'azote (N).

En général, les divers constituants de la matière vivante présentent les proportions suivantes:

Constituants minéraux	Eau	60 - 85%
	Sels minéraux	1 - 10%
Constituants organiques	Glucides	5 - 35%
	Lipides	
	Protides	

Structure de la matière vivante

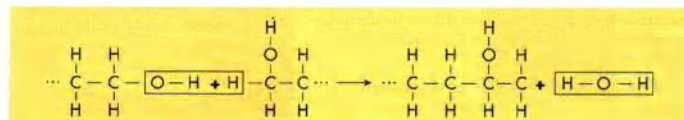
Du point de vue chimique, la matière vivante n'est pas une « solution », en effet, ses constituants ne sont généralement pas à l'état dissous, mais à l'état colloïdal: suspension de particules solides ou liquides dans l'eau.

Les particules des colloïdes de la matière vivante sont relativement volumineuses: 0,001 µm à 0,1 µm (limite de la microscopie). Ce sont soit de très grosses molécules isolées (macromolécules), soit, le plus souvent, des agrégats de molécules nommés **micelles**.

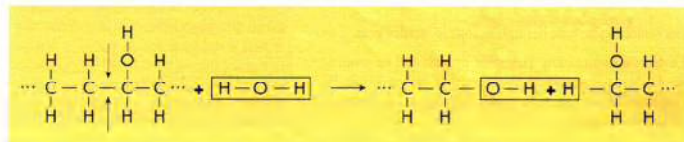
4 Une réaction biochimique très fréquente

Une partie importante de l'activité d'une cellule vivante consiste à transformer constamment les substances qu'elle contient.

La cellule fabrique souvent des molécules de grande taille en liant entre elles des molécules de petite taille et en libérant une molécule d'eau.



La réaction inverse qui consiste à « démonter » les grandes molécules est tout aussi fréquente, on la nomme **hydrolyse** (littéralement « la cassure avec de l'eau »):



Avertissement

Les réactions biochimiques qui se font dans les cellules des êtres vivants sont infiniment plus complexes que les réactions globales présentées ci-dessus. Elles peuvent aussi bien concerner des lipides, des glucides ou des protides. Quelques exemples sont décrits dans les chapitres suivants.

Des milliers de molécules de glucose sont liées pour former de l'amidon dans les plantes; les molécules d'acide aminé seront « démontées » pour récupérer les molécules de glucose lors de la digestion.

Des centaines d'acides aminés sont liés pour former des protéines (voir la suite du chapitre) aussi bien chez les plantes que chez les animaux; ces protéines seront « démontées » pour récupérer les acides aminés lors de la digestion.

Dans ces deux exemples, les cellules vivantes ont synthétisé des **polymères** (grandes molécules formées de l'addition de plus petits « morceaux » qui se répètent) à partir de **monomères** (petites molécules qui sont les « morceaux » de base du polymère).

5 Les lipides

Les substances de cette famille sont désignées communément sous le nom de **corps gras**. Ils sont composés de carbone, d'hydrogène et de peu d'oxygène.

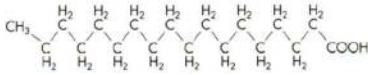
Les lipides présentent les propriétés suivantes: leur point de fusion est très bas; ils sont presque tous insolubles dans l'eau; toutefois, ils peuvent former avec l'eau des émulsions (c'est-à-dire des suspensions de très fines gouttelettes dispersées dans l'eau). Les lipides sont formés dans l'organisme et sont souvent mis en réserve pour servir de ressource énergétique de secours. En effet, quand l'alimentation normale de l'organisme devient insuffisante, les cellules de notre corps libèrent l'énergie nécessaire en oxydant des lipides.

En outre, certains lipides jouent le rôle d'isolants pour contrôler les déplacements de substances aqueuses (par exemple, au niveau de la membrane cellulaire) ou comme isolant thermique ou électrique (le système nerveux véhicule des signaux de nature électrique). La densité des graisses étant inférieure à celle de l'eau, certains organismes aquatiques (unicellulaires ou pluricellulaires) les utilisent comme flotteurs.

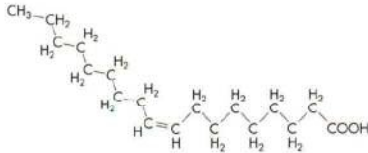
Les molécules de base des lipides sont les **acides gras**.

Le degré d'insaturation d'un acide gras est égal au nombre de doubles liaisons entre les atomes de carbone (voir les chapitres « Introduction à la chimie organique » et « Eléments de nomenclature »).

Un exemple d'acide gras saturé: l'**acide stéarique** (C₁₈H₃₆O₂)



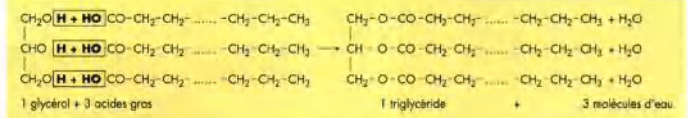
Un exemple d'acide gras monoinsaturé: l'**acide oléique** (C₁₈H₃₄O₂)



L'huile et le lard sont constitués essentiellement de lipides.

Plusieurs recherches en cours montrent que l'addition d'acide gras polyinsaturés dans notre alimentation empêche le stockage excessif des graisses par le corps. On a envisagé, pour le traitement de l'obésité, d'ajouter au régime alimentaire des patients des rations d'huile de poisson (contenant des acides gras polyinsaturés).

Généralement, les lipides sont stockés dans les cellules des êtres vivants sous forme de **triglycérides** formés en combinant trois acides gras et un glycérol:

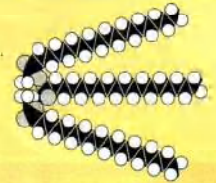
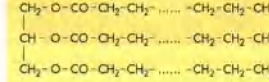


Lors de la digestion, les triglycérides contenus dans nos aliments sont scindés en acides gras dans l'intestin grâce au suc pancréatique. Ils passent ensuite dans la circulation sanguine après avoir traversé la paroi intestinale. Enfin, au niveau de nos cellules, ils seront recombinés en triglycérides propres à notre corps.

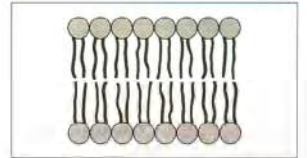
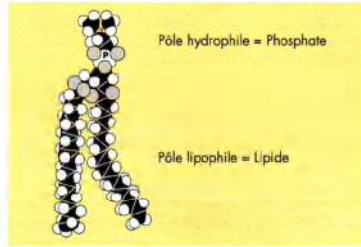
La **stéarine** (C₃₇H₇₆O₂) est un triglycéride qui contient trois molécules d'acide stéarique:



La stéarine est un des constituants principaux des bougies.



Les lipides sont, entre autres, utilisés pour la constitution de la membrane de toutes les cellules sous forme de molécules appelées **phospholipides**:



Les membranes sont formées essentiellement d'une double couche de phospholipides; les pôles hydrophiles sont à l'extérieur (phosphates en contact avec l'eau) et les deux «jambes» lipophiles sont tournées les unes contre les autres. La membrane ressemble à un sandwich formé d'une épaisse couche lipophile prise entre deux fines couches hydrophiles.

Ces molécules possèdent deux extrémités (pôles) qui diffèrent par leur comportement dans l'eau: l'une est hydrophile et l'autre lipophile (hydrophobe).

Si ces molécules se trouvent en contact avec de l'eau, elles s'orientent toutes de la même manière: le pôle hydrophile (phosphate) se place dans l'eau et le pôle lipophile (lipide) à l'opposé de l'eau, dans l'huile ou l'air par exemple.

6 Les glucides

Les corps de cette catégorie comportent les **sucres** et les substances qui leur sont apparentées. Leur analyse montre qu'ils sont composés de carbone, d'hydrogène et d'oxygène; ces deux derniers éléments sont combinés dans les mêmes proportions que dans l'eau (deux atomes d'hydrogène pour un atome d'oxygène). Pour cette raison, on les appelle aussi **hydrates de carbone**.

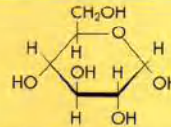
La formule chimique brute (par exemple C₆H₁₂O₆) ne suffit pas à préciser la nature d'un glucide, en effet, un même nombre d'atomes pouvant se disposer dans l'espace selon différentes architectures, plusieurs corps aux propriétés différentes possèdent la même formule brute comme on le constate dans le tableau ci-dessous.



Quelques aliments qui contiennent beaucoup d'hydrates de carbone.

Quelques exemples de glucides

— Le **glucose** (C₆H₁₂O₆)



Le glucose est le sucre du raisin.

Dans ce type de représentation, chaque intersection est occupée par un atome de carbone; dans le glucose représenté ci-dessus, il y en a six en tout, c'est un hexose.

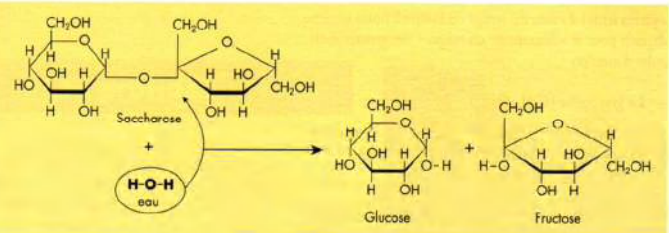
Ce sucre joue un rôle très important dans les réactions qu'effectuent les cellules pour se procurer l'énergie nécessaire à leur fonctionnement. C'est donc le « carburant » principal des réactions de respiration (combustion) cellulaire. Lors de ce processus l'énergie chimique est transformée en énergie thermique, en travail mécanique ou directement utilisée pour la fabrication d'autres substances.



Le sucre « de ménage » est constitué de saccharose extrait de la betterave.

— Le **saccharose** (C₁₂H₂₂O₁₁)

Ce sucre est extrait de la canne à sucre ou de la betterave.

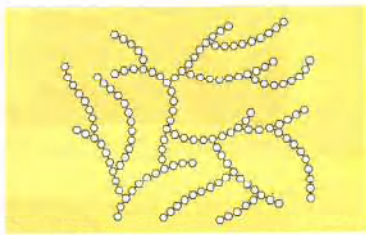


Cette molécule est la combinaison de deux sucres: le glucose et le fructose. Lorsque nous mangeons du sucre de canne, notre organisme va d'abord séparer les molécules de saccharose en glucose et fructose, puis transformer le fructose en glucose car nos cellules ne peuvent tirer leur énergie que du glucose.

Principaux groupes	Exemples	Masse moléculaire	Formules
MONOSACCHARIDES ou OSES (glucides non hydrolysables)	HEXOSES (oses à 6 carbones) fructose glucose levulose galactose	180	C ₆ H ₁₂ O ₆
	PENTOSES (oses à 5 carbones) ribose désoribose	150 134	C ₅ H ₁₀ O ₅ C ₅ H ₁₀ O ₄
MONOSACCHARIDES ou OSES (glucides non hydrolysables)	DISACCHARIDES (issus de la combinaison de 2 oses) maltose lactose saccharose	342	C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁
	POLYSACCHARIDES (issus de la combinaison de nombreux oses) amidon cellulose glycogène	4 · 10 ⁴ à 2 · 10 ⁵ environ 2 · 10 ⁴ 5 · 10 ⁴ à 15 · 10 ⁴	(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n

- L'amidon (C₆H₁₀O₅)_n

Pour éviter les problèmes de mise en solution d'une grande quantité de glucose, les plantes le stockent sous forme d'amidon.



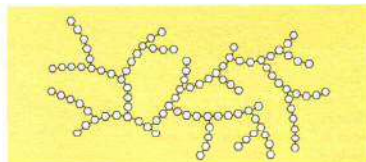
Chaque petit hexagone représente une molécule de glucose.

On le trouve, chez les plantes, sous forme de grains accumulés dans les feuilles, les graines, les fruits, les racines où il joue le rôle de réserve de nourriture. Par photosynthèse, une plante fabrique du glucose; lorsqu'elle doit le stocker, elle est capable de lier entre elles un très grand nombre de molécules de glucose pour former une molécule « géante »: l'amidon.

L'amidon, très ramifié, n'est pas soluble dans l'eau, mais peut être facilement digéré. Les céréales (farine, pain, pâtes), les pommes de terre ou les haricots sont essentiellement constitués d'amidon. On nomme ces aliments des « sucres lents » à cause du temps nécessaire à notre système digestif pour le « démontage chimique » des grosses molécules d'amidon.

- Le glycogène (C₆H₁₀O₅)_n

Pour éviter les problèmes de mise en solution d'une grande quantité de glucose, les plantes le stockent sous forme d'amidon.



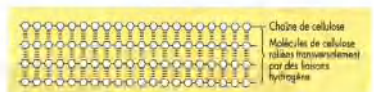
Chaque petit hexagone représente une molécule de glucose.



Le pain est essentiellement constitué d'eau et d'amidon.

Certains animaux ont aussi besoin de stocker le glucose. Lors de la digestion d'un repas, une grande quantité de glucose peut être présente dans le sang. Pour éviter que ce taux ne soit trop élevé, notre organisme transforme le glucose (en liant des milliers de molécules de glucose entre elles) en glycogène qui sera stocké dans le foie. Cette molécule ressemble beaucoup à celle de l'amidon. Lorsque le besoin de glucose se fait sentir, l'organisme décompose (hydrolyse) les molécules de glycogène en molécules de glucose.

- La cellulose (C₆H₁₀O₅)_n



Chaque petit hexagone représente une molécule de glucose.

La cellulose est caractéristique des végétaux; c'est un glucide complexe insoluble dans l'eau. Sa structure linéaire est très solide, les cellules végétales l'utilisent pour construire leurs parois cellulaires afin de les renforcer.

La cellulose est le principal constituant du bois et des fibres végétales. Le système digestif humain est incapable de digérer (« démonter chimiquement ») la cellulose, mais la présence de ces fibres dans nos aliments est essentielle pour permettre aux intestins de fonctionner normalement.



Le bois, le carton et le papier sont essentiellement constitués de cellulose.

7 Les protéines

Communément appelés corps azotés ou encore albuminoïdes (l'albumine ou protéine du blanc d'œuf en étant l'exemple type), les protéines sont toujours formés essentiellement de quatre éléments: C, H, O et N. Accessoirement, ils peuvent comporter du soufre (S), du phosphore (P), du fer (Fe), ...

On divise les protéines en trois catégories:

- les acides aminés,
- les polypeptides,
- les protéines.



Le blanc d'œuf contient essentiellement de l'eau et de l'albumine.

Principaux groupes	Composition	Exemples	Masse moléculaires
Acides aminés	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{NH}_2 - \text{C} - \text{COOH} \\ \\ \text{R} \end{array}$	Alanine Valine ...	100 à 400
Polypeptides	Quelques dizaines d'acides aminés	Sécrétine Insuline ...	environ 5000
Protéines	Holoprotéines	Très nombreux acides aminés	Albumines 40 000 à 70 000
	Hétéroprotéines	Très nombreux acides aminés + groupements non protéiques	Hémoglobine Nudoprotéines environ 68 000 Plusieurs millions

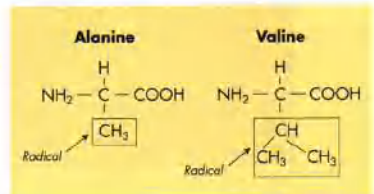
- Les acides aminés sont les protéines les plus simples. Leur molécule est caractérisée à la fois par un groupement « acide » (-COOH) et par un groupement « basique » ou « amine » (-NH₂).



Schéma général d'un acide aminé.

Les acides aminés sont au nombre d'une vingtaine dans la matière vivante; tous ont une masse moléculaire inférieure à 400. Ce sont les protéines élémentaires avec lesquels sont constitués tous les autres corps protéiques.

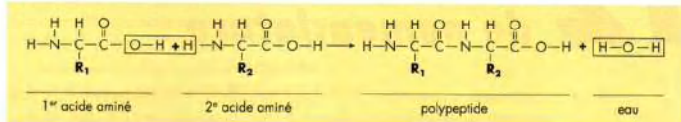
Deux exemples d'acides aminés parmi les vingt utilisés par les êtres vivants:



Le venin des champignons vénéreux et de certains serpents contient des polypeptides toxiques à l'origine des empoisonnements.

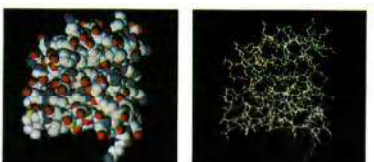
Certaines hormones, qui assurent la régulation du fonctionnement de l'organisme, sont des polypeptides; l'insuline, par exemple, qui permet le passage du glucose du sang dans les cellules, a une masse moléculaire un peu inférieure à 6000. Certains polypeptides, produits par des moisissures, ont un rôle antibiotique, c'est le cas de pénicillines; d'autres sont très toxiques comme la phalloïdine (présente dans certains champignons) ou les neurotoxines du venin des serpents, responsables de troubles nerveux et de paralysies.

- Les polypeptides résultent de l'union de plusieurs acides aminés. Ces derniers se lient entre eux, avec une réaction semblable à celle des lipides et des glucides:



- Les protéines sont d'énormes édifices moléculaires (macromolécules) formés par la réunion d'un très grand nombre d'acides aminés; leur masse moléculaire peut atteindre plusieurs millions.

Certaines protéines sont formées d'une ou de plusieurs chaînes d'acides aminés plus ou moins repliées sur elles-mêmes, soit en zigzag, soit en hélice, soit en un réseau évoquant une sorte de grillage, soit encore en une suite de boucles apparemment désordonnées et enchevêtrées, entre lesquelles se forment des liaisons qui consolident l'ensemble.



Deux représentations différentes de la structure compliquée d'une même protéine; ces images de synthèse sont obtenues avec des logiciels informatiques. A gauche, chaque sphère colorée représente un atome, le modèle donne une idée de la forme externe de la molécule. A droite, chaque segment représente la liaison chimique entre deux atomes, ce modèle donne une idée de la structure interne de la protéine.

La forme des protéines est déterminée par la séquence (l'ordre) des acides aminés qui la constituent. Cette séquence est elle-même inscrite dans l'ADN (acide désoxyribonucléique) contenu dans le noyau des cellules. La biochimie moléculaire est la branche de la biochimie qui étudie plus particulièrement les molécules d'ADN.



Une molécule d'ADN se reconnaît à sa structure caractéristique en double hélice.

Chapitre 13. Eléments de nomenclature

Communiquer le nom d'un produit peut être difficile, voire dangereux, entre deux personnes qui n'ont pas les mêmes habitudes ou qui ne vivent pas dans la même région, même si elles parlent la même langue. La nomenclature chimique est l'ensemble des règles qui, dans une langue, devraient permettre de se communiquer le nom des produits sans en écrire la formule. La formule chimique reste cependant le moyen le plus sûr et le plus universel (le tableau périodique est international) pour communiquer sans erreur la composition d'une molécule.

Les règles de nomenclature sont basées sur un vocabulaire d'usage, parfois très ancien et totalement ignorant de la chimie, sur les propriétés des produits et, plus récemment, sur la connaissance de la structure des molécules; cela suppose un effort non négligeable de mémorisation et de pratique pour maîtriser la nomenclature en chimie.

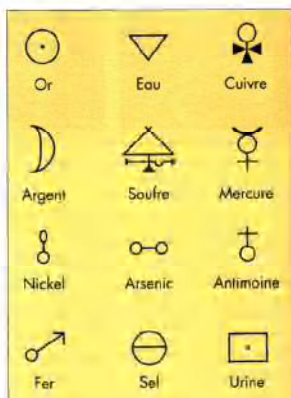
Relevons enfin que si la maîtrise de la nomenclature témoigne en général d'une bonne compréhension des bases de la chimie, il demeure possible de comprendre ces bases sans faire beaucoup de nomenclature. L'étude de l'une ou l'autre partie de ce chapitre devrait donc davantage répondre à des besoins ponctuels et circonstanciés qu'être un but en soi.

1 Introduction

Le français était une langue dominante dans la recherche en chimie au moment de l'adoption du tableau périodique. Ceci explique en partie pourquoi les symboles chimiques ressemblent souvent à une abréviation du français.

Si ces symboles sont les mêmes dans tous les pays et pour toutes les branches des sciences, ce n'est pas le cas pour les noms des substances. En effet, ils existent dans toutes les langues et ont parfois plusieurs synonymes dont certains sont très anciens; le vitriol est par exemple le synonyme d'acide sulfurique.

Plusieurs systèmes ont été proposés par les chimistes pour donner une cohérence aux noms des produits chimiques; il y a par conséquent plusieurs règles de nomenclature et malheureusement, elles ont de nombreuses exceptions et ne sont pas toujours cohérentes entre elles. Les noms des produits les plus courants comme l'eau, l'ammoniac, la soude doivent être appris comme un vocabulaire de base.



Quelques-uns des symboles utilisés par certains alchimistes au Moyen-Âge.

2 Les composés binaires

Il s'agit des molécules ne contenant que deux éléments chimiques différents (chacun représenté par un ou plusieurs atomes).

- L'ordre dans lequel les atomes sont écrits dans la formule dépend de leur position relative dans le tableau périodique:
 - à gauche les donneurs d'électrons (réducteurs),
 - à droite les preneurs d'électrons (oxydants).
- Si **A** et **B** représentent chacun un élément chimique quelconque, la formule **AB** se lit: *B* ure de *A*

Exemples

- NaCl chlorure de sodium
- KBr bromure de potassium
- NI₃ iodure d'azote

Contre-exemples

- MgO oxyde de magnésium (au lieu de «oxygène de magnésium»)

On dit *oxyde* et non pas *oxygénure*.

- MgO magnésie (au lieu de «oxyde de magnésium»)
- H₂O eau (au lieu de «oxyde d'hydrogène»)

Certains produits ont un nom courant dont l'usage s'impose.

- CH₄ méthane ou gaz naturel (au lieu de «hydrogène de carbone»)

Les composés du carbone (chimie organique) ont des règles particulières de nomenclature (voir la fin de ce chapitre).

Lorsque plusieurs types de liaisons, donc plusieurs molécules, sont possibles avec deux atomes, la règle des noms en *...ure* ne suffit pas et il faut préciser de quelle molécule il s'agit.

Les préfixes

Utilisée principalement pour les composés des **non-métaux**, cette règle ancienne, désuète et de moins en moins utilisée ne demande aucune connaissance en chimie; on précise le nombre de chaque atome dans la molécule en utilisant des préfixes qui indiquent le rapport B/A où **A** et **B** représentent chacun un élément chimique quelconque.

Préfixe	Type de formule	Exemple(s)
mono...	AB (B/A = 1)	CO monoxyde de carbone
di...	AB ₂ (B/A = 2)	CO ₂ dioxyde de carbone (gaz carbonique)
tri...	AB ₃ (B/A = 3)	SO ₃ trioxyde de soufre
tetra...	AB ₄ (B/A = 4)	SiCl ₄ tétrachlorure de silicium
penta...	AB ₅ (B/A = 5)	PCl ₅ pentachlorure de phosphore
hémi...	A ₂ B (B/A = 0,5)	Cl ₂ O hémioxyde de chlore
sesqui...	A ₃ B ₂ (B/A = 1,5)	N ₂ O ₃ sesquioxyde d'azote
		Sb ₂ S ₃ sesquisulfure d'antimoine
hémipenta...	A ₂ B ₅ (B/A = 2,5)	N ₂ O ₅ hémipent(o)xyde d'azote
hémihépta...	A ₂ B ₇ (B/A = 3,5)	Cl ₂ O ₇ hémihépt(o)xyde de chlore

Le nombre d'oxydation absolu

Utilisée principalement pour les composés des **métaux**, cette règle indique le nombre d'oxydation du donneur d'électrons (le réducteur) à l'aide d'un chiffre romain après le nom du produit.

Exemples

- AuCl chlorure d'or I
- Sb₂S₃ sulfure d'antimoine III
- HgO oxyde de mercure II
- Fe₂O₃ oxyde de fer III
- CuO oxyde de cuivre II
- SiCl₄ chlorure de silicium IV

Le nombre d'oxydation relatif

Cette règle, peu commode, est cependant très utilisée, surtout pour les acides. Elle est basée sur le rang du nombre d'oxydation du réducteur par rapport aux nombres d'oxydation possibles, lorsqu'il y en a plusieurs. S'il n'y en a qu'un, on forme un nom en *Bure de A*, comme pour une

formule de type **AB** où **A** et **B** représentent chacun un élément chimique quelconque (exemple: chlorure de magnésium pour MgCl₂).

Si les valeurs possibles du nombre d'oxydation du réducteur sont au nombre de deux, le nom du réducteur sera suivi de...

- ...eux pour le plus petit nombre d'oxydation possible
- ou ...ique pour le plus grand nombre d'oxydation possible

Exemples

- FeO oxyde ferr*eux*
- Fe₂O₃ oxyde ferr*ique*

Si les valeurs possibles du nombre d'oxydation du réducteur sont au nombre de trois, le nom du réducteur sera précédé et/ou suivi de...

- hypo...eux pour le plus petit nombre d'oxydation possible
- ...eux pour le deuxième nombre d'oxydation possible
- et ...ique pour le plus grand nombre d'oxydation possible

Exemples

- CrO oxyde hypo*chrom*eux
- Cr₂O₃ oxyde chrom*eux*
- CrO₃ oxyde chrom*ique*

Si les valeurs possibles du nombre d'oxydation du réducteur sont au nombre de quatre, le nom du réducteur sera précédé et/ou suivi de...

- hypo...eux pour le plus petit nombre d'oxydation possible
- ...eux pour le deuxième nombre d'oxydation possible
- ...ique pour le troisième nombre d'oxydation possible
- et per...ique pour le plus grand nombre d'oxydation possible

Exemples

- VCl chlorure hypo*vanad*eux
- V₂Cl₃ chlorure vanad*eux*
- VCl₂ chlorure vanad*ique*
- V₂Cl₅ chlorure per*vanad*ique

26	Fe
55,85	Fer
2,3	
1535	1,83
2750	7,86

Il y a deux valeurs possibles pour le nombre d'oxydation du fer.

24	Cr
52,00	Chrome
2,3,6	
1857	1,66
2672	7,20

Il y a trois valeurs possibles pour le nombre d'oxydation du chrome.

23	V
50,94	Vanadium
2,3,4,5	
1890	1,63
3380	5,96

Il y a quatre valeurs possibles pour le nombre d'oxydation du vanadium.

S'il y a plus de quatre valeurs possibles pour le nombre d'oxydation du réducteur, « per...ique » est en tout cas utilisé pour le produit où le nombre d'oxydation du réducteur est le plus grand.

Exemple

Mn₂O₇ oxyde **permanganique**

Pour les nombres d'oxydation intermédiaires (MnO₃, MnO₂), ce type de notation n'est pas utilisable.

25	Mn
54,94	Manganèse
2,3,4,6,7	
1244	1,55
1962	7,2

Il y a plus de quatre valeurs possibles pour le nombre d'oxydation du manganèse.

3 Acides, hydroxydes et sels

Quelques acides

Le nom des acides suit la règle des nombres d'oxydation relatifs des non-métaux (sauf l'oxygène) de la molécule d'acide. Les noms des sels sont dérivés des noms des acides dont ils sont issus comme indiqué dans la liste ci-dessous.

Formule	Nom	Sel issu de cet acide
HF	fluorure d'hydrogène (en solution : acide fluorhydrique)	fluorure de ...
H ₂ S	sulfure d'hydrogène (en solution : acide sulfhydrique)	sulfure de ...
HCl	chlorure d'hydrogène (en solution : acide chlorhydrique)	chlorure de ...
HBr	bromure d'hydrogène (en solution : acide bromhydrique)	bromure de ...
H ₂ CO ₃	acide carbonique	carbonate de ...
H ₃ BO ₃	acide borique	borate de ...
HNO ₂	acide nitreux	nitrite de ...
HNO ₃	acide nitrique	nitrate de ...
H ₃ PO ₃	acide phosphoreux	phosphite de ...
H ₃ PO ₄	acide phosphorique	phosphate de ...
H ₂ S ₂ O ₃	acide hyposulfureux	hyposulfite (ou thiosulfate) de ...
H ₂ SO ₃	acide sulfureux	sulfite de ...
H ₂ SO ₄	acide sulfurique ou vitriol	sulfate de ...
HClO	acide hypochloreux	hypochlorite de ...
HClO ₂	acide chlorieux	chlorite de ...
HClO ₃	acide chlorique	chlorate de ...
HClO ₄	acide perchlorique	perchlorate de ...

ACIDE	+ HYDROXYDE	→	SEL	+ EAU
HClO acide hypochloreux	+ LiOH hydroxyde de lithium	→	LiClO hypochlorite de lithium	+ H ₂ O
H ₂ SO ₃ acide sulfureux	+ 2 NaOH hydroxyde de sodium (soude caustique)	→	Na ₂ SO ₃ sulfite de sodium	+ 2 H ₂ O
2 HNO ₃ acide nitrique	+ Ca(OH) ₂ hydroxyde de calcium	→	Ca(NO ₃) ₂ nitrate de calcium	+ 2 H ₂ O
H ₂ SO ₄ acide sulfurique	+ 2 KOH hydroxyde de potassium (potasse caustique)	→	K ₂ SO ₄ sulfate de potassium	+ 2 H ₂ O
2 H ₃ PO ₄ acide phosphorique	+ 3 Ca(OH) ₂ hydroxyde de calcium	→	Ca ₃ (PO ₄) ₂ phosphate de calcium	+ 6 H ₂ O
2 HClO ₄ acide perchlorique	+ Mg(OH) ₂ hydroxyde de magnésium	→	Mg(ClO ₄) ₂ perchlorate de magnésium	+ 2 H ₂ O

Lors de la neutralisation d'un acide comportant plusieurs atomes d'hydrogène ionisables (polyacide) par une quantité insuffisante d'hydroxyde, la réaction est incomplète et il se forme des sels particuliers.

Voici quelques exemples de ces sels particuliers :

Formule	Nom
K ₂ HPO ₄	hydrogéné phosphate de potassium
KH ₂ PO ₄	dihydrogéné phosphate de potassium
NaHCO ₃	hydrogéné carbonate de sodium ou bicarbonate de soude
LiHSO ₃	hydrogéné sulfite de lithium

Pour les acides organiques, on se reportera au chapitre « Introduction à la chimie organique ».

Exemple

Formule	CH ₃ COOH
Nom	acide éthan oi que ou acide ac éti que
Sel issu de cet acide	ac é tate

Quelques hydroxydes ou bases

Le nom des hydroxydes (ou bases) suit la règle simple des composés binaires avec pour unique oxydant le groupe « hydroxyde » (OH) dont le nombre d'oxydation vaut globalement « -1 ».

Formule	Nom
LiOH	hydroxyde de lithium
NaOH	hydroxyde de sodium ou soude caustique ou soude
KOH	hydroxyde de potassium ou potasse caustique ou potasse
Mg(OH) ₂	hydroxyde de magnésium
Ca(OH) ₂	hydroxyde de calcium ou chaux éteinte ; en solution : eau de chaux
NH ₃	L'ammoniac est un gaz soluble dans l'eau. Une solution aqueuse d'ammoniac se nomme « ammoniacale » ou « hydroxyde d'ammonium ». L'hydroxyde d'ammonium n'existe qu'en solution aqueuse ; on ne peut pas l'obtenir sous forme cristallisée (poudre).

Les sels

Si nous mélangeons un acide et un hydroxyde (ou base), ils vont se **neutraliser** en formant un sel et de l'eau. Le nom des sels est formé à partir du nom des acides comme dans la liste ci-dessous :

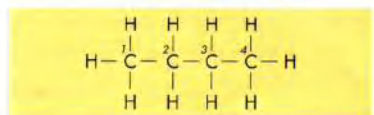
ACIDE	+ HYDROXYDE	→	SEL	+ EAU
HCl acide chlorhydrique	+ NaOH hydroxyde de sodium (soude caustique)	→	NaCl chlorure de sodium	+ H ₂ O eau

4 Les molécules organiques

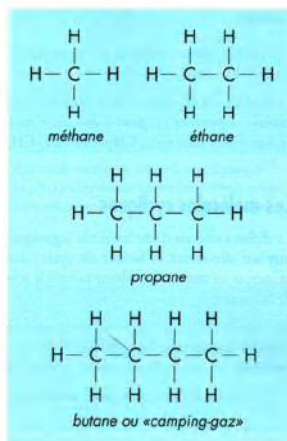
Les alcanes

Le nom d'un alcane dépend de plusieurs facteurs comme la longueur et la saturation de la chaîne de carbones, la présence et la position d'un ou plusieurs groupes chimiques particuliers, l'appartenance à une famille de produits (les hydrocarbures, par exemple), l'aspect linéaire ou cyclique de la molécule, ...

On numérote les atomes de carbone de la chaîne principale (la plus longue) :



Numérotation des carbones dans une molécule de butane.



Les alcanes gazeux.

Le nom de base est donné par la chaîne de carbones principale (nombre d'atomes de carbone et degré d'insaturation).

Nombre d'atomes de carbone	Préfixe	Degré d'insaturation		
		(C-C)	(C=C)	(C≡C)
1	méth-	-ane	-ène	-yne
2	éth-	-ane	-ène	-yne
3	prop-	-ane	-ène	-yne
4	but-	-ane	-ène	-yne
5	pent-	-ane	-ène	-yne
6	hex-	-ane	-ène	-yne
7	hept-	-ane	-ène	-yne

Exemple

La molécule CH₃-CH=CH-CH₃ se nomme **2-butène** ou **but-2-ène** ; le numéro indique la position de l'atome de carbone porteur de la double liaison.

Remarque

On choisit généralement la numérotation la plus petite lorsqu'il y a plusieurs possibilités.

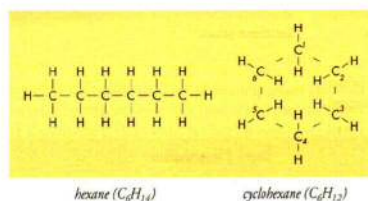
La molécule $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH=CH}_2$, par exemple, se nomme **1-pentène** ou **pent-1-ène** parce qu'on peut aussi l'écrire dans l'autre sens: $\text{CH}_2=\text{CH-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_3$.

Les molécules cycliques

La chaîne carbonée d'une molécule organique peut se refermer sur elle-même et former un cycle; dans ce cas, on numérote les atomes de carbone suivant le sens des aiguilles de la montre.

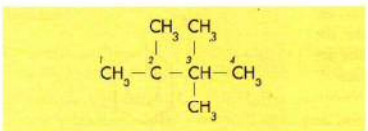
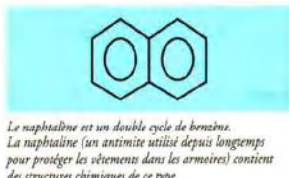
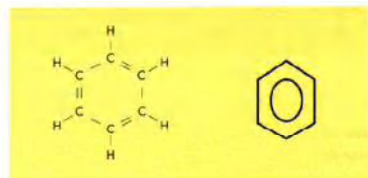
Lorsque la molécule forme un cycle de carbones saturés (liaisons simples entre les carbones), ils forment la **série alicyclique**; on ajoute dans ce cas le préfixe **cyclo**.

Le cyclohexane est un exemple de cette série:



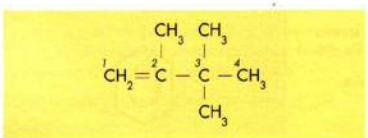
Lorsque la molécule forme un cycle de carbones insaturés, elle appartient à la **série aromatique**; ces molécules portent des noms particuliers.

Le benzène (C₆H₆) est la molécule la plus connue de cette série:



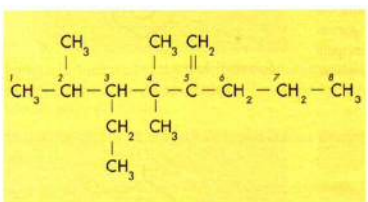
Cette molécule contient une chaîne principale de quatre carbones unis par des liaisons simples (butane); sur cette chaîne sont attachés trois radicaux méthyle (triméthyl) dans les positions 2, 2 et 3. Le nom de cette molécule est donc:

2,2,3-triméthyl - butane



Cette molécule contient une chaîne principale de quatre carbones unis par deux liaisons simples et une double en position 1 (1-butène); sur cette chaîne sont attachés trois radicaux méthyle (triméthyl) dans les positions 2, 3 et 3. Le nom de cette molécule est donc:

2,3,3-triméthyl - 1-butène ou **2,3,3-triméthyl -but-1-ène**



Cette molécule contient une chaîne principale de huit carbones; sur cette chaîne sont attachés trois radicaux méthyle (triméthyl) dans les positions 2, 4 et 4, un radical éthyle en position 3 et un radical méthényle en position 5. Le nom de cette molécule est donc:

2,4,4-triméthyl - 3-éthyl - 5-méthényl - octane

Cette substance très toxique (fortement cancérigène) est cependant très utile pour la synthèse d'autres produits; elle entre dans la composition de nombreuses molécules des cellules vivantes ou de médicaments; sa toxicité disparaît lorsqu'elle est intégrée dans une molécule plus grande.

La molécule de benzène est dessinée avec la notation de Lewis (à gauche) et avec une notation plus simple dérivée de la notation de Kékulé (à droite). Dans la notation de Kékulé, le cercle représente la migration constante des électrons formant les doubles liaisons (phénomène de résonance).



A partir du benzène, on obtient le radical **phényle** (C₆H₅) présent dans de nombreuses molécules comme la phénylalanine, un des acides aminés de nos protéines.

Les radicaux

On obtient un radical en enlevant un atome d'hydrogène d'une molécule organique.

Le squelette comporte alors un électron célibataire, le nom de ce radical s'obtient en ajoutant le suffixe **-yle**.

Cette règle est valable pour toutes sortes de molécules.

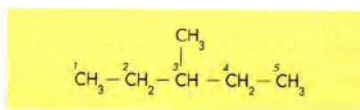
Exemples

-CH₃ est un radical issu du méthane; il se nomme **méthyle**.

-CH₂CH₃ est un radical issu de l'éthane; il se nomme **éthyle**.

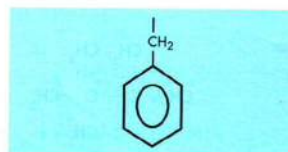
-CH₂CH₂CH₃ est un radical issu du propane; il se nomme **propyle**.

Le nom d'une molécule dont les carbones ne sont pas tous sur une même chaîne se construit à partir de la chaîne la plus longue qu'on nomme chaîne principale et dont on numérote les atomes de carbone. Les différentes parties qui sont attachées de part et d'autre de la chaîne principale sont des radicaux dont on précise la position et le nombre comme dans les exemples suivants:

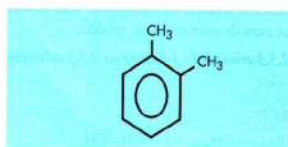


Cette molécule contient une chaîne principale de cinq carbones unis par des liaisons simples (pentane); sur cette chaîne est attaché un radical méthyle dans la position 3. Le nom de cette molécule est donc:

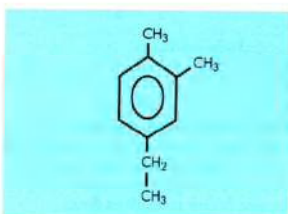
3-méthyl - pentane



Le benzyle est un radical formé à partir d'une molécule de méthylbenzène.



1,2-diméthyl - benzène.

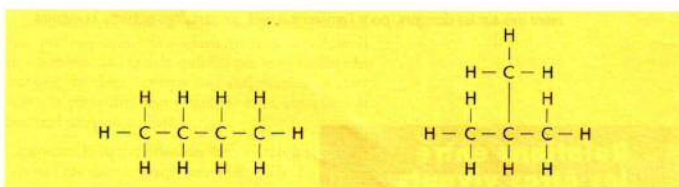


1,2-diméthyl - 4-éthyl - benzène.

On peut ainsi nommer des molécules très complexes mais la communication de noms tels que les exemples ci-dessus n'est guère confortable, surtout pour le profane. Il paraît très sage, dans toute la mesure du possible, de dessiner la formule plutôt que de donner seulement son nom.

Les isomères

A partir de quatre atomes de carbone, il est possible d'obtenir différentes dispositions pour une même formule moléculaire; ces diverses structures sont appelées isomères. Par exemple, le butane (C₄H₁₀) possède deux isomères:



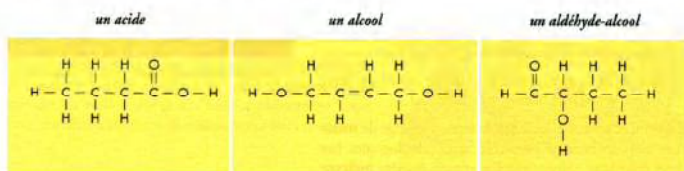
n-butane (butane normal)
point de fusion: -135 °C
point d'ébullition: -0,5 °C

iso-butane ou 2-méthyl - propane
point de fusion: -145 °C
point d'ébullition: -12 °C

A côté des isoméries de position, on trouve aussi des isoméries de constitution: ils ne possèdent pas les mêmes fonctions chimiques (voir le chapitre «Introduction à la chimie organique»).

La formule brute C₄H₈O₂, par exemple, donne différents isomères de constitution; elle ne suffit donc pas pour indiquer de quel produit il s'agit.

Voici trois isomères de la formule brute «C₄H₈O₂»:



acide butanoïque

1,4-dihydroxy - 2-butène
ou **1,4-dihydroxy - but-2-ène**

2-hydroxyle - butanal

Chapitre 14. Chimie et environnement

Tous les êtres vivants sur la Terre dépendent des conditions dans lesquelles ils sont placés. L'étude des relations entre les organismes vivants et leur environnement constitue la branche de la biologie appelée « écologie ». L'objet de ce chapitre est de décrire les principaux processus qui régissent les équilibres biologiques et de relier les diverses pollutions qui peuvent les modifier ; l'accent est tout particulièrement mis sur les dangers, pour l'environnement, de certaines activités humaines.

1 Relations entre les êtres vivants et leur environnement

La couche de notre planète où la vie s'est développée s'appelle la biosphère. Cette biosphère est très mince (quelques kilomètres). Elle comprend la couche inférieure de l'atmosphère, les eaux et les premiers mètres de profondeur du sol. Ce système biologique global qu'est la biosphère est en général divisé en systèmes plus petits, telle une mare, une forêt ou une rivière. On parle d'écosystème lorsqu'on prend en compte tous les éléments vivants ou non vivants d'un milieu interagissant entre eux. Ces interactions existent :

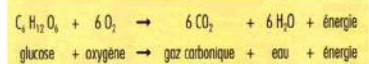
- entre les espèces vivantes elles-mêmes (chaîne alimentaire, compétition, ...),
- entre les espèces vivantes et l'environnement physique (photosynthèse, échange d'énergie, respiration, ...)
- au sein de l'environnement physique (cycle de l'eau, orages, vents, tremblements de terre, ...).

Dans un écosystème équilibré, la matière change de structure selon des cycles physico-chimiques et biologiques. Les êtres vivants se constituent à partir de matière prélevée dans leur environnement ; à leur mort, cette matière est recyclée.



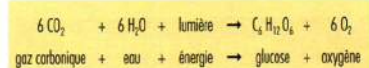
La biosphère est la mince couche de la Terre où la vie est possible.

Pour le glucose, la réaction chimique de respiration s'écrit :



Les plantes et les animaux auraient rapidement épuisé les réserves d'oxygène et d'aliments de notre planète si aucun processus ne permettait d'en produire ; ce processus est la photosynthèse.

Au cours de la **photosynthèse**, les plantes vertes prélèvent de l'eau par les racines et du gaz carbonique par les feuilles. La plante transforme ces substances pour former des aliments (par exemple du glucose) et de l'oxygène. L'énergie nécessaire à la photosynthèse est apportée par la lumière (rayonnement solaire). La réaction s'écrit :



Cette réaction est l'inverse de la respiration.

Les organismes vivants prélèvent l'oxygène et le gaz carbonique directement dans leur environnement (dans l'atmosphère ou dissous dans l'eau).

L'atmosphère est constituée d'environ 21 % d'oxygène et 0,03 % de gaz carbonique ; cette répartition reste constante au cours du temps. Les êtres vivants sont le facteur d'équilibre qui conserve cette proportion dans la biosphère.

Les organismes vivants sont constitués essentiellement d'eau et de composés carbonés (voir le chapitre « introduction à la biochimie »). Après la mort des organismes vivants, le carbone est généralement restitué à l'atmosphère au cours de la décomposition (aérobie) des déchets organiques.

Une autre forme de décomposition des déchets organiques (anaérobie) conduit à la formation du charbon, du gaz naturel et du pétrole. Pour constituer des réserves de ces combustibles comparables à celles actuellement connues, il faudrait des centaines de millions d'années ; depuis la révolution industrielle, l'Homme utilise ces réserves à un rythme tel qu'elles seront épuisées en quelques centaines d'années. Pour cette raison, on considère ces sources d'énergie comme non renouvelables.



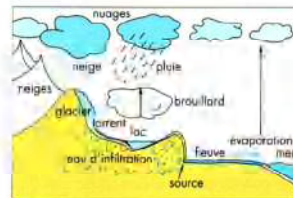
Un exemple d'échanges : oxygène (plante) contre gaz carbonique (femme) et eau (arrosoir).

Le cycle de l'eau

La consommation mondiale d'eau environ des 6 milliards d'habitants de la Terre a décuplé au cours des cent dernières années. Cependant, la répartition géographique de l'eau potable n'est pas homogène ; moins de 20 % de la population mondiale dispose de quantités d'eau potable considérables alors que 20 % à 40 % d'habitants en manquent cruellement. Les nombreuses maladies liées aux eaux impropres à la consommation (hépatite, choléra, poliomyélite, typhoïde, dysenterie) ainsi que les famines causées par le manque d'eau provoquent chaque jour la mort d'environ 25000 personnes, dont la moitié sont des enfants.

L'eau que nous buvons a déjà été bue par nos ancêtres ; nos descendants boiront la même ! Les plantes absorbent l'eau par leurs racines, la stockent dans leur organisme et en transpirent une grande quantité par leurs feuilles ; les animaux absorbent l'eau par leur alimentation, en stockent une partie dans leur organisme et en transpirent et excrètent une grande quantité.

Cependant, la contribution des êtres vivants à la circulation de l'eau dans la biosphère est très faible. En effet, le moteur principal des mouvements de l'eau est l'énergie solaire. L'énergie solaire qui atteint la surface de la Terre permettrait d'assécher par évaporation les océans en 40 ans ; cependant l'eau retourne dans les mers sous la forme de précipitations (pluie, neige). La majeure partie de ces précipitations ruisselle (torrent, rivière, fleuve) pour se retrouver finalement dans un étang, un lac, une mer ou un océan. Une autre partie des eaux s'infiltre dans le sol jusqu'aux nappes phréatiques (poches d'eau souterraines). Une grande partie de l'eau des nappes phréatiques est absorbée par les plantes ou resurgit directement à la surface sous forme de sources... ou de forages.

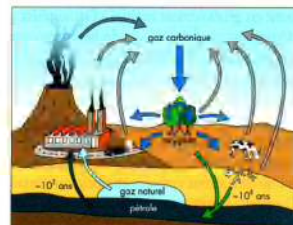


Les différentes étapes du cycle de l'eau.

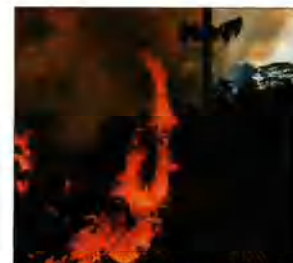
Le cycle « carbone – oxygène »

Le processus du cycle « carbone – oxygène » relève de deux phénomènes vitaux : la **respiration** et la **photosynthèse**.

Durant la **respiration** (aussi bien pour les plantes que pour les animaux), les aliments réagissent avec l'oxygène pour former du gaz carbonique et de l'eau ; ce phénomène libère l'énergie nécessaire au fonctionnement des êtres vivants.



La combustion par l'Homme des produits à base de carbone génère une surproduction de gaz carbonique. Ce gaz (entre autres) a la particularité de favoriser le réchauffement global de l'atmosphère. Ce phénomène va modifier la biosphère. Les scientifiques essaient d'élaborer des modèles permettant de prévoir les conséquences de ce réchauffement. Même s'il est impossible d'affirmer quoi que ce soit dans ce domaine, les simulations actuelles (en 2000) décrivent des changements climatiques fort différents d'un endroit à l'autre de la planète. Par exemple, certaines régions verraient une augmentation des précipitations, d'autres connaîtraient la sécheresse et certaines se retrouveraient sous le niveau de la mer.



La déforestation par le feu en Amazonie contribue à l'augmentation de gaz carbonique dans la biosphère.

Le cycle de l'azote



L'atmosphère est constituée d'environ 78 % d'azote, gaz qui n'est pas directement assimilable par les êtres vivants. Des bactéries se trouvant dans le sol synthétisent des nitrates (généralement de sodium ou de potassium) à partir de l'azote de l'air. Par leurs racines, les plantes absorbent ces nitrates, du soufre et du phosphore pour fabriquer les protéines nécessaires à leur vie.

Lorsqu'un animal mange un végétal, il digère ces protéines, les fragmente en acides aminés et les recombine pour former ses propres protéines. Il en va de même pour l'Homme lorsqu'il mange un steak-frites-salade.

Lors de l'excrétion ou au moment de la mort des organismes vivants, les produits azotés retournent dans le sol. Les bactéries de la putréfaction détruisent les protéines; l'ammoniac ainsi libéré est transformé en nitrates par d'autres bactéries. Cependant, il existe aussi dans le sol des bactéries capables de décomposer les produits azotés (cette décomposition est appelée dénitrification); elles libèrent de l'azote gazeux (N₂) dans l'atmosphère.

2 L'eau

Environ 99% de l'eau de notre planète est salée. Sous nos latitudes, l'eau potable est puisée dans les nappes phréatiques, les lacs et les rivières. Cependant, les ressources en eau potable sont loin d'être inépuisables et il est important de les protéger contre les diverses pollutions. Le corps humain consomme environ 3 litres d'eau par jour qu'il trouve dans sa nourriture; cependant, un Européen (par exemple) utilise en moyenne plus de 200 litres d'eau par jour; dans cette valeur sont inclus les besoins d'ordre ménager et industriel. A titre d'exemple, la fabrication du papier pour ce livre a nécessité près de 2000 litres d'eau.

L'eau et l'agriculture

L'agriculture est le moyen de production principal de nos aliments. Dans les pays industrialisés, on n'a pas cessé d'augmenter le rendement des surfaces agraires. Les plantes absorbent par leurs racines de l'eau et des sels minéraux (engrais). Ces sels minéraux doivent être remplacés par des apports d'origine naturelle (fumier, purin) ou synthétique. L'inconvénient de ce système est qu'en cas de pluie, la surabondance de sels minéraux (produits nitrés, phosphates, ...) se trouve entraînée dans la nappe phréatique, donc dans l'eau potable.

Une autre source de pollution par l'agriculture provient de l'utilisation de produits destinés à éliminer les parasites qui ravagent les cultures. Toutefois, ils éliminent également des organismes utiles.

Avec le temps, les parasites s'adaptent à ces toxiques. Cela nécessite l'emploi de produits plus concentrés ou plus puissants. On tente actuellement d'utiliser des produits spécifiques à certains parasites, en développant des cultures capables de leur résister (biogénétique) ou en introduisant



Les ressources en eau potable sont loin d'être inépuisables.



Un agriculteur engraine le sol.



L'insecticide est un pesticide qui sert à nous débarrasser des insectes.

des prédateurs dans les cultures (lutte biologique). Une autre solution consiste à alterner les types de culture pour priver les ravageurs de leur nourriture favorite.

L'eau et les industries

L'eau est le principal solvant utilisé par les industries. Après utilisation, cette eau a une forte concentration en substances polluantes. Il est donc nécessaire de l'épurer avant de la rejeter dans la nature. La plupart des industries possèdent des stations d'épuration adaptées à l'élimination de leur production polluante. Une législation très stricte sur les rejets des eaux polluantes est en place.

On peut citer quelques exemples de production de déchets industriels qui affectent l'eau:

- **brasseries et distilleries:** détergents pour laver les bouteilles, résidus du houblon, sulfates, substances organiques putrescibles;
- **industries laitières:** hydrates de carbone, détergents;
- **abattoirs:** sang, poils, morceaux de chair;
- **industrie métallurgique:** cyanures, phénols, huiles, acides forts, oxydes métalliques;
- **tanneries:** tissus d'animaux, sulfures de sodium, composés du chrome, chaux, graisses, colorants, détergents, etc.



Les industries utilisent beaucoup d'eau pour la fabrication de leurs produits; elles traitent leurs eaux polluées avant de les rejeter dans la nature.

Citons à titre d'exemples, la quantité d'eau propre utilisée pour produire 1 kg de quelques produits finis:

1 kg de produit	quantité d'eau
essence	10 litres
sucré	100 litres
aluminium	1000 litres
coton	10000 litres

L'activité industrielle produit des déchets qui s'intègrent à de nombreux cycles. Des métaux (fer, cuivre, zinc, manganèse, cobalt, cadmium, mercure, ...) apparaissent dans la chaîne alimentaire à des concentrations très faibles. A partir d'une certaine concentration, ces éléments sont toxiques. Il en va de même pour d'autres substances.

Exemples

- l'enrichissement en mercure de l'eau d'un lac peut provoquer une concentration de cet élément dans les poissons et ainsi dans la chaîne alimentaire. Le mercure provoque des dommages aux reins et aux nerfs.
- les PCB (biphényles polychlorés) se trouvent dans les plastifiants, le liquide de refroidissement des transformateurs, les laques et servent également d'huile hydraulique. L'enrichissement de l'eau en PCB affecte la chaîne alimentaire car ils se fixent dans les graisses des poissons, des oiseaux marins et des mammifères marins. Ils provoquent probablement des cancers, des malformations et une certaine augmentation de la sensibilité aux maladies.

Lacs malades

Le déversement des eaux ménagères, contenant des produits de nettoyage à base de phosphate (interdit dans les lessives depuis 1986), ainsi que le déversement des égouts (riches en nitrates) dans les cours d'eau a accru considérablement la quantité de substances nutritives dans les lacs. Ces substances minérales stimulent la vie aquatique, tout particulièrement celle des plantes. Ces dernières se multiplient, le plancton et les poissons prolifèrent. Cependant, l'équilibre entre les organismes vivants est perturbé selon le processus suivant:

- la multiplication des bactéries et des poissons provoque une grande consommation d'oxygène;
- la surabondance d'algues empêche la lumière de pénétrer dans les couches profondes des lacs;
- par manque de lumière, les plantes vivant en profondeur périsent et ne dégagent plus d'oxygène;
- cette diminution de la concentration en oxygène des eaux entraîne la mort des daphnies, des cyclopes et par conséquent la mort des poissons;
- le fond du lac se couvre alors de cadavres qui en se décomposant pourrissent et dégagent des gaz toxiques;
- avec le temps, la vase putride devient de plus en plus importante, l'eau est désoxygénée et le lac meurt.

Ce phénomène est nommé *eutrophisation*.

Un autre phénomène est aussi la cause de la mort de certains lacs: les pluies acides. Les pluies acides sont produites



Marée verte en baie de Lannion (Bretagne).

par la réaction chimique d'oxydes de non-métaux (principalement le soufre et l'azote) avec l'humidité de l'air. Les eaux se trouvant dans des bassins de type argileux ou granitique ont tendance à s'acidifier. Ce type de terrain se trouve tout particulièrement en montagne. A la suite de précipitations, l'eau ruisselle jusque dans les lacs où la diminution du pH de l'eau provoque la disparition de toute vie. Cependant, les eaux acides tombant sur un terrain de type calcaire réagissent et se neutralisent partiellement. D'autre part, lorsque les sols sont solubilisés sous l'action des pluies acides, les métaux qui s'y trouvaient sont libérés et se retrouvent dans les organismes aquatiques et dans la chaîne alimentaire avec les risques d'empoisonnement qui en découlent.

La modification du paysage

La construction d'un barrage, d'un canal, d'une centrale hydraulique au fil de l'eau ainsi que la modification du cours d'une rivière modifient le paysage. Ces aménagements modifient l'équilibre du régime des eaux et par là même les écosystèmes.



La construction du barrage d'Aouanan a modifié l'écosystème de la région.

L'épuration des eaux usées

L'épuration des eaux domestiques ou industrielles a pour objectif de réduire le plus possible les concentrations de substances dissoutes ou en suspension qui s'y trouvent.

Sans décrire les détails de fonctionnement d'une station d'épuration des eaux (STEP), on peut comprendre les différentes phases qui permettent d'améliorer la qualité de l'eau en cours de traitement.

1^{re} phase: épuration physique

Pour retenir les corps de grande taille, on procède à un dégrillage. L'eau s'écoule à travers une grille qui retient tous les objets dont la taille est supérieure à 1 cm.

Cette eau traverse ensuite une installation de déshuilage-dessablage fonctionnant par décantation. Dans les bassins prévus pour cette opération, il faut que l'eau soit retenue assez longtemps pour permettre aux huiles de flotter et aux sables de sédimenter. Des racloirs installés au fond et à la surface des bassins permettent d'éliminer ces déchets.

Notons que lors de gros orages, la quantité d'eau à traiter par la station d'épuration est parfois trop importante: il est alors prévu un système nommé «déviateur d'orage» à la

sortie de l'installation de déshuilage-dessablage. Ce déversoir court-circuite les phases suivantes de l'épuration ; l'eau est alors rejetée dans l'environnement et accroît les risques de pollution des bassins aquatiques naturels.

2^e phase : épuration biologique

L'eau transite ensuite dans les bassins biologiques (ou d'aération) qui reproduisent les conditions régnant dans le milieu aquatique naturel, tout particulièrement les cycles du carbone et de l'azote.

Cependant, une STEP ne dispose ni du volume ni du temps dont la nature dispose. On pallie à ces inconvénients en augmentant la concentration en oxygène et en micro-organismes de l'eau.

Pour augmenter la teneur en oxygène de l'eau, on installe des « soufflantes » très puissantes qui pulsent de l'air à haute pression dans les bassins. L'oxygène favorise le développement des bactéries qui décomposent les déchets organiques (glucides et lipides) en gaz carbonique. Les protéines sont dégradées en ammoniac.

L'eau est ensuite acheminée vers un bassin de décantation où les bactéries sédimentent. Des racliers permettent de les récupérer et de les réinjecter dans les bassins biologiques.

Un équilibre chimique et biologique est atteint lorsque la vitesse d'apport de matières organiques est égale à sa vitesse de dégradation par les bactéries.

3^e phase : épuration chimique

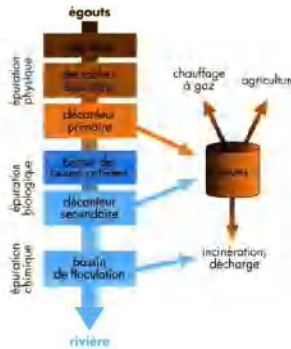
L'élimination des phosphates et des nitrates par les processus biologiques est faible (en raison des petites surfaces des bassins par rapport au volume d'eau à traiter). Le déversement de ces substances minérales dans la nature risque de provoquer l'eutrophisation du milieu. Aussi, un processus chimique est introduit dans la chaîne d'épuration, parfois dans le même bassin que celui où les processus biologiques se déroulent.

Les phosphates sont précipités par l'adjonction de chlorure de fer (FeCl₃) ou de sulfate d'aluminium (Al₂(SO₄)₃). La réaction chimique produit une masse floconneuse qui sédimente et peut être ainsi séparée.

A la suite de ces diverses épurations et lorsque les concentrations en phosphore ou en métaux lourds sont élevées, on installe parfois un système de floculation-filtration qui s'accomplit dans un bassin supplémentaire dans lequel des agents floculants sont injectés. Les substances nuisibles sont



Sur cette vue aérienne, on distingue les différents bassins permettant l'épuration des eaux usées.



Le traitement des eaux usées utilise différents principes de séparation physiques, biologiques et chimiques.

Table with 2 columns: Process (Dessablage, Floculation, etc.) and Capacity (débit max. in m³/h).

Quelques valeurs sur la capacité maximum de la station d'épuration de Vidy qui traite l'essentiel des eaux usées de Lausanne.

éliminées avec le floc en suspension. Les eaux sont ensuite transportées à travers un lit de sable où les matières en suspension sont retenues. Ce principe est du reste couramment utilisé dans les installations de production d'eau potable.

L'ensemble de ces phases produit des déchets (boues). Divers traitements (épaississement, digestion, pasteurisation) de ces boues produisent du méthane (utilisé pour chauffer la STEP) et des fertilisants (utilisés comme engrais). Si les boues contiennent des taux élevés en métaux lourds, elles sont incinérées ou déposées dans des décharges stabilisées.

L'auto-épuration

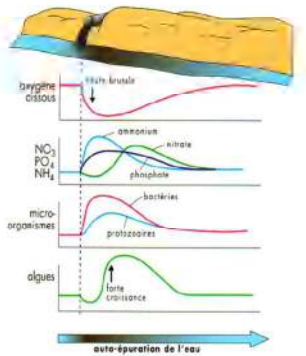
L'eau des rivières, des ruisseaux et des torrents est susceptible de s'épurer par elle-même. Cette auto-épuration ne peut se produire que si le cours d'eau contient suffisamment d'oxygène. En effet, la symbiose existant entre les différents micro-organismes aquatiques, les échanges gazeux (oxygène et gaz carbonique) entre l'atmosphère et l'eau et les échanges nutritifs (matières organiques et minérales) déterminent la capacité d'auto-épuration de l'eau. Un cours d'eau propre contient beaucoup d'oxygène et relativement peu de déchets organiques, de sels dissous, de bactéries et d'algues.

Cependant, un apport excessif en substances nutritives, en composés organiques faiblement biodégradables rompt l'équilibre biologique et chimique. L'oxygène dissout tend à diminuer et la capacité d'auto-épuration de l'eau est épuisée. Le problème est beaucoup plus important pour les lacs que pour les cours d'eau car les masses d'eau s'y déplacent lentement ; l'oxygénation y est moins bonne que pour un torrent par exemple.

Il n'existe pas d'épuration naturelle pour les métaux lourds ni pour certaines substances chimiques de synthèse.



L'oxygénation de l'eau d'un torrent favorise son auto-épuration.



Représentation de divers paramètres déterminant la qualité de l'eau d'un cours d'eau en fonction de l'éloignement d'un déversement d'eaux usées.

3 L'air

L'histoire de la pollution de l'air commence avec la domestication du feu par l'homme des cavernes. En effet, les fumées dégagées l'ont très certainement incommodé ! D'une manière générale, on peut définir la pollution de l'air comme étant l'introduction dans l'atmosphère d'éléments qui produisent un effet nocif sur la santé des organismes vivants, et sur celle de l'Homme plus particulièrement.

Le problème essentiel de la pollution de l'air est que la majeure partie de ses effets ne sont pas directement observables. Les seuls effets directs sont les productions de particules (neige sale et édifices noircis), les fumées et les odeurs.

Toutes les autres conséquences des diverses pollutions de l'air proviennent de processus parfois complexes et difficiles à déterminer. Les effets des polluants sont souvent fonction de la concentration et de la durée de l'exposition. Pour cette raison, les théories sur les conséquences de la pollution sont parfois discutables, même pour les scientifiques.

Les polluants de l'air peuvent se diviser en deux groupes distincts : les particules et les gaz.

La pollution par des particules

En général, les particules solides dégagées par un quelconque processus se déposent sur le sol non loin de leur point d'émission. Une usine fonctionnant avec du charbon comme source d'énergie dégage dans ses fumées des suies qui noircissent le paysage ; une cimenterie dégage de fines poussières grises qui se déposent sur les bâtiments et la végétation ; les pollens, source de pollution naturelle, se déposent un peu partout autour de leur zone de production. Ces particules observables ont un effet nocif sur le bien-être de l'Homme et doivent donc être considérées comme des polluants.

Quand les particules sont très fines, elles sont transportées dans l'air sur de grandes distances et peuvent s'infiltrer dans tous les interstices (construction, habits, sol). Le danger le plus insidieux est leur absorption par les voies respiratoires. L'amiante par exemple dégage des particules qui peuvent être toxiques. Mais, l'exemple le plus frappant de ce genre de pollution est celui des poussières radioactives. Au cours d'une explosion atomique ou d'un accident nucléaire, de très fines poussières radioactives sont libérées



Les débuts de la pollution de l'air par l'Homme.



La concentration d'usines dans une même région génère souvent un brouillard permanent.

dans l'atmosphère. Le strontium-90, par exemple, s'intègre à la chaîne alimentaire car il est absorbé par les plantes. Comme il réagit chimiquement de façon semblable au calcium, il s'accumule dans notre osature et peut induire le développement de cancers. Cependant, on pense que la quantité de strontium-90 en circulation dans la biosphère n'a pas actuellement atteint le seuil critique.

La pollution par des gaz

Les émanations gazeuses à l'inverse des particules se mélangent intimement à l'air. Comme on l'a vu, les cycles du carbone-oxygène et de l'azote sont des processus de la vie qui dégagent des gaz. Cependant, l'atmosphère est enrichie en différents gaz en raison de l'activité humaine ; elle repose en effet essentiellement sur la consommation de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel). Leur combustion dégage des gaz qui ne sont pas à proprement parler toxiques (gaz carbonique, méthane) et d'autres qui le sont (oxydes de soufre, oxydes d'azote, monoxyde de carbone, hydrocarbures imbrûlés). De plus, cette combustion produit également des particules poussiéreuses.

Les gaz non toxiques

Ces gaz ne produisent pas d'effet nocif sur la santé de l'Homme ou sur son bien-être, du moins pas à court terme.

La production mondiale de gaz carbonique, issu de la combustion de combustibles fossiles, est d'environ 22 milliards de tonnes par an. D'autres activités humaines, tels le défrichage des forêts et la production de ciment dégage également du gaz carbonique. Les volcans sont aussi une source naturelle de gaz carbonique. Ce gaz a la particularité de retenir la chaleur irradiée par la Terre (rayonnement infrarouge), ce qui contribue à son réchauffement ; on nomme ce phénomène « l'effet de serre ».

La production de méthane (par les « pets » de vaches par exemple) renforce également l'effet de serre.

Les gaz toxiques

Ces gaz produisent des effets nocifs sur la santé de l'Homme ou sur son bien-être en agissant comme des poisons.

Divers composants comme les oxydes de soufre ou les oxydes d'azote réagissent avec l'humidité de l'air pour former des



Une partie des poussières radioactives dégagées lors de l'accident de Tchernobyl est aujourd'hui intégrée à la chaîne alimentaire.



L'air paie un lourd tribut à l'utilisation de combustibles pour les transports.

acides. Il ne faut que quelques heures aux oxydes d'azote pour se transformer en acide nitrique et quelques jours aux oxydes de soufre pour devenir de l'acide sulfurique. Le brouillard et les nuages transportent ces substances sur de longues distances et se déversent sous la forme de pluies acides, nocives pour l'environnement ainsi que pour les constructions qu'elles corrodent lentement. Le pH des pluies acides varie de 4 à 5. Au sud de la Norvège, 80% des lacs et des rivières sont menacés de mort; au centre de la Suisse, plus de 40% des conifères sont gravement endommagés ou morts. Le problème des pluies acides est international, car les vents ne respectent pas les frontières des Etats!

Certains gaz réagissent lors d'une exposition au rayonnement solaire. C'est le cas des oxydes d'azote et des hydrocarbures qui se transforment en ozone et autres photo-oxydants. Ces substances sont de violents poisons pour la vie végétale. Si l'ozone situé dans les couches élevées de l'atmosphère protège les plantes du rayonnement ultraviolet, l'ozone près du sol les détruit.

Les grandes villes sont parfois baignées dans un voile d'aspect grisâtre ou brunâtre. Vues de loin, elles semblent être enfermées dans une bulle de gaz. Ce phénomène est connu sous le nom de « smog » ou « brouillard fumeux ». Il s'agit en fait d'un mélange complexe de fumée, de particules, d'oxydes de soufre et de vapeur d'eau.

Lorsque le smog sévit de façon chronique, les plantes présentent des taches sur leurs feuilles ou périssent. Pour les êtres humains, le simple fait de respirer présente des risques de maladies respiratoires.



Le smog, un brouillard nocif.

Provenance des polluants			
	véhicules à moteur	chauffage, combustion industrielle	industries incinération des déchets
monoxyde de carbone CO	90-95%	5-10%	—
hydrocarbures C _x H _x	42%	16%	42%
oxydes d'azote NO _x	75%	25%	—
oxydes de soufre SO _x	5%	95%	—
poussières	34%	33%	33%
autres toxiques	5%	—	95%

Les effets de la pollution de l'air	
Polluant	Effets
monoxyde de carbone	<ul style="list-style-type: none"> peut entraîner la mort par une intoxication aiguë; entrave l'apport d'oxygène aux organes; provoque des maux de tête, vertiges, troubles de la vision; favorise l'accumulation des graisses dans le sang et augmente les risques de maladie cardio-vasculaires. Heureusement instable, il se transforme rapidement en gaz carbonique.
oxydes de soufre	<ul style="list-style-type: none"> provoquent des maladies des voies respiratoires (bronchite); stimulent les crises d'asthme; entravent le métabolisme et détruisent les tissus des plantes, ralentissent leur croissance; produisent des pluies acides.
oxydes d'azote	<ul style="list-style-type: none"> provoquent ou aggravent des maladies des voies respiratoires (bronchite chronique, asthme, faux croup); se transforment en nitrates dans le sol; provoquent la disparition de nombreuses plantes rares; produisent des pluies acides; favorisent la formation d'ozone à basse altitude.
hydrocarbures	<ul style="list-style-type: none"> irritent les muqueuses; provoquent des nausées et des vertiges; certain hydrocarbures provoquent des cancers des voies respiratoires et digestives; augmentent les risques de mutation (modification de patrimoine génétique).
poussières en suspension	<ul style="list-style-type: none"> stimulent l'action d'autres substances toxiques; favorisent diverses allergies; endommagent les voies respiratoires; irradient l'organisme si les poussières sont radioactives; empêchent la lumière d'atteindre les chloroplastes des feuilles.
chlore	<ul style="list-style-type: none"> irrite les yeux et les muqueuses; contribue à la destruction de l'ozone stratosphérique.
fluor	<ul style="list-style-type: none"> irrite les yeux et les muqueuses; provoque des maladies respiratoires; entrave le métabolisme et détruit les tissus des plantes.
ozone (au sol)	<ul style="list-style-type: none"> irrite les voies respiratoires et les yeux.
amiante	<ul style="list-style-type: none"> est cancérigène si elle se dépose dans les poumons.
mercure	<ul style="list-style-type: none"> provoque des lésions aux nerfs et aux reins.
plomb	<ul style="list-style-type: none"> entrave la formation d'hémoglobine; cause des perturbations dans le système nerveux.
cadmium	<ul style="list-style-type: none"> entrave le fonctionnement des reins; les os peuvent être endommagés si les concentrations sont fortes.

La protection de l'air

L'introduction de l'essence sans plomb a permis de réduire la pollution par ce métal. D'autre part, des pots catalytiques (catalyseurs) installés sur le système d'échappement des véhicules transforment les gaz toxiques de la combustion. Ce processus se déroule à haute température, et les pots catalytiques sont inefficaces pendant les dix premières minutes d'utilisation du moteur. Ces pots sont fabriqués en général à base de platine irridié. Si on a trouvé une solution relativement efficace au problème de la pollution par les gaz d'échappement, on se trouve dès lors en présence d'un problème de pollution par le platine... qu'on espère pouvoir traiter efficacement!

Les automobilistes doivent en Suisse s'astreindre tous les deux ans à un contrôle antipollution de leur véhicule. Ce contrôle impose des taux limite d'émissions d'hydrocarbure et de monoxyde de carbone.

Les pouvoirs politiques, conscients des problèmes liés aux pollutions de l'air, imposent aux industriels l'installation de systèmes d'épuration de l'air. Si les grandes industries respectent bien ces lois, le contrôle des petites industries et de l'artisanat s'avère plus délicat et leur contribution à la pollution de l'air n'est pas négligeable.

Si, dans les pays riches, la lutte contre la pollution de l'air commence à être efficace, il n'en va pas de même dans bon nombre de pays plus pauvres; en effet, l'installation de systèmes d'épuration est coûteuse. Le problème de la protection de l'air est donc loin d'être réglé!

Au XVI^e siècle déjà, Paracelse avait émis une sentence qui résume bien les problèmes des effets des polluants sur l'Homme et l'environnement: « Qu'est-ce qui n'est pas du poison? Toute chose est poison et rien n'est sans poison. Seule la dose fait qu'une chose n'est pas du poison. »

Il est de la responsabilité de l'Homme de faire en sorte que la dose de poisons reste supportable... pour l'humanité!



Coupe d'un pot catalytique.

Contrôle des émissions de gaz / Contrôle des polluants	
CO	12,74
HC	850,15
CO2	200,5
NOx	100
CO2 (cycle des gaz)	12
avec catalyseur	
CO	14,88
HC	200,5
CO2	200,5
NOx	100
CO2 (cycle des gaz)	12

Contrôle des émissions de gaz / Contrôle des polluants	
CO	200,5
HC	550
CO2	5-15
sans catalyseur	
CO	29,3,86
HC	850,15
CO2	200,5
NOx	100
CO2 (cycle des gaz)	12

Les taux d'émission admis sont différents s'il s'agit d'une voiture avec ou sans catalyseur.

4 Les déchets

D'après l'Office fédéral de l'environnement: « Tout ce qui passe entre nos mains doit tôt ou tard être éliminé ». Cette affirmation est cependant incomplète et peut prêter à confusion; en effet, les déchets ne peuvent pas être éliminés, mais seulement transformés! La plupart des substances toxiques issues des déchets qui parviennent aux organismes vivants par des voies détournées et complexes.

La production de déchets

La production mondiale de déchets s'élève à environ 1 milliard de tonnes par an (1990). A titre d'exemple, on peut citer la ville de Genève qui d'une production de 90 000 tonnes en 1970 a passé en 1989 à environ 300 000 tonnes de déchets! Notons que pendant que la production de déchets augmentait de 230%, la population n'augmentait que de 16%!

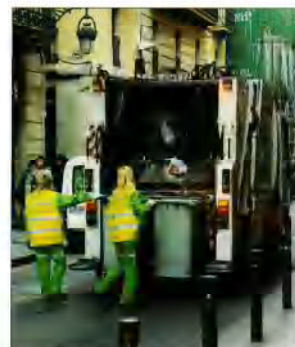
La nature des déchets rejetés varie considérablement selon le niveau de vie. Les pays riches produisent principalement du verre, du papier, du métal et d'autres matières peu dégradables alors que dans les pays pauvres on trouve surtout des matières organiques.

Cette différence est importante du point de vue de leur traitement: en effet, les matières organiques peuvent être transformées en compost (engrais) alors que les autres déchets sont soit entassés dans des décharges, jetés de façon sauvage (dans la mer par exemple), incinérés ou recyclés.

Les activités industrielles produisent chaque année environ 300 millions de tonnes de déchets toxiques. Des moyens efficaces pour les rendre inoffensifs existent, mais ils ne sont pas suffisamment répandus à travers le monde pour traiter la totalité de la production; les moyens utilisés sont le stockage dans des décharges, leur incinération ou... leur exportation. A titre d'exemple, dans les années 85, la Suisse a exporté septante mille tonnes de déchets toxiques.

L'incinération des déchets

La plupart des déchets ménagers sont combustibles. Leur pouvoir calorifique est d'environ 6000 kJ par kilogramme. L'incinération est considérée actuellement comme le moyen privilégié de traitement des ordures; l'incinération réduit de deux tiers la masse des déchets et de neuf-



Un réseau de camions s'occupe de nos déchets domestiques.



Les déchets d'un jardin familial trouvent un « compost » utilisé comme engrais.

dièmes leur volume. Après une combustion d'une heure à des températures proches de 1000 °C, 77 % des déchets se transforment en fumées, 21 % en résidus solides (mâchefers) et 2 % en cendres volantes. Certains objets métalliques cependant ne sont pas brûlés; ils sont récupérés et revendus aux ferrailleurs.

Les mâchefers, après avoir été lessivés (par la pluie), sont réutilisables par les entreprises de génie civil pour former le revêtement de fond des routes; ils sont en général stabilisés dans du ciment.

Les fumées peuvent être chargées de produits toxiques. L'installation de systèmes de lavage des fumées permet de réduire cette charge. Le tableau ci-contre donne un exemple des rejets de produits toxiques dans l'air pour une usine d'incinération traitant 30 000 tonnes de déchets (un dixième de la production annuelle d'une ville comme Genève).

Les cendres volantes ont une haute teneur en métaux lourds. Si certaines d'entre elles parviennent à s'échapper dans les fumées, la plupart des cendres sont récupérées dans les filtres. Elles sont ensuite mélangées aux mâchefers et se retrouvent donc dans nos routes.

La chaleur produite par l'incinération des ordures peut servir à produire de l'électricité ou à chauffer des habitations.

Les déchets spéciaux (médicaments, produits chimiques, diluants, pesticides, produits photographiques, batteries, ...) sont traités séparément des ordures, dans la mesure où ils ont été correctement identifiés, donc triés. Par exemple, les 18 000 tonnes de déchets spéciaux traités annuellement (8 % du tonnage total) par l'usine des Cheneviers à Genève sont brûlés dans un four spécial (rotatif et à haute température) ou traités chimiquement. D'autres déchets ne font que transiter; les 9 tonnes annuelles de tubes fluorescents (néons) sont envoyées en Allemagne et les 6 tonnes de piles sont envoyées vers une entreprise de récupération, récemment ouverte. Les piles sont responsables de la quasi totalité du mercure de nos déchets ainsi que dans une large mesure du cadmium.

Les déchets nucléaires sont des résidus radioactifs que l'on ne peut pas neutraliser par voie d'incinération. Le problème essentiel est que leur durée de vie est longue et qu'il faut les isoler. La solution actuelle consiste en leur conditionnement dans des fûts spéciaux, qui sont eux-mêmes stockés et surveillés.

Masse relâchée dans l'atmosphère par une usine traitant 30 000 tonnes de déchets par an et équipée:		
Produit toxique	de litres électriques	d'un système complémentaire de lavage des fumées
acides chlorhydrique	180 000 kg	3 000 kg
oxydes de soufre	45 000 kg	45 000 kg
oxydes d'azote	45 000 kg	8 000 kg
poussières	17 000 kg	5 000 kg
acide fluorhydrique	2 000 kg	160 kg
plomb et zinc	2 000 kg	600 kg
mercure	120 kg	16 kg
cadmium	17 kg	12 kg
TOTAL	290 tonnes	62 tonnes



Les tubes fluorescents (néons) nécessitent un traitement particulier quant à leur élimination.

Le recyclage des déchets

Le principe même du recyclage se base sur un réseau organisé de récupération des déchets et de leur tri par les consommateurs et l'industrie. Ce principe permet principalement de diminuer la charge globale d'ordures à incinérer (diminution de la pollution), d'économiser les ressources naturelles ainsi que de diminuer les importations de matières premières. Les collectivités mettent progressivement des systèmes performants en place, mais il y a encore beaucoup à faire tant du point de vue de ces systèmes que de la discipline des consommateurs. La liste qui suit donne des exemples de réseau de récupération existant aujourd'hui en Suisse.



La plupart des dispositifs de récupération sont de couleur verte.

	Matière	Traitement et produit final	Pourquoi ?
	ferraille (cuisinière, vélo, joints, casseroles, moteurs, sommiers, ordinateurs...)	• tri, fonte et production d'acier pour le béton armé	• en Suisse, la production annuelle est de 1,2 million de tonnes. L'utilisation de ferraille récupérée pour produire de l'acier nécessite deux fois moins d'énergie et diminue les importations d'acier.
	huiles végétales (huile de friture, ...)	• filtration, traitement chimique et production de savon et d'aliments à destination animale	• jetées dans l'évier, les huiles végétales obstruent les canalisations et surchargent les stations d'épuration.
	huiles minérales (huile de vidange, ...)	• raffinage et production d'huile de moteur et de combustible	• un litre d'huile peut polluer à lui seul 1 million de litres d'eau. Ces huiles sont extrêmement toxiques pour l'Homme. Elles colmatent les égouts.
	papier (journal, magazines, cartons, emballages, ...)	• tri et fabrication de pâte à papier permettant de produire du papier recyclé, du carton et des journaux	• nous consommons près de 200 kg de papier par an et par habitant. Les 3/4 de ce papier sont cependant encore jetés, soit le tiers de nos poubelles. La fabrication du papier à partir de vieux papier nécessite 2 fois moins d'énergie et 5 à 10 fois moins d'eau.
	verre (bouteilles, bocaux, ...)	• tri et refonte des débris de verre pour produire des bouteilles et des bocaux	• le verre représente encore 9% de nos poubelles, bien que les Suisses soient les champions du monde dans sa récupération. La fabrication de verre à partir de débris de verre permet d'économiser 1/3 d'énergie.
	P.E.T. : téréphtalate de polyéthylène (bouteilles)	• tri et formation d'un granulé permettant de produire des bouteilles, des habits, des fibres de polyester ou des tapis	• le granulé issu du processus de recyclage est utilisé pour la fabrication de nouvelles bouteilles.
	aluminium (boîtes, feuilles d'emballage, cadre de tableau, ...)	• tri et refonte pour fabriquer des boîtes, des feuilles d'emballage, ...	• pour fabriquer de l'aluminium de seconde fonte, il ne faut que 5% de l'énergie qu'il aurait fallu pour le fabriquer à partir du minerai.

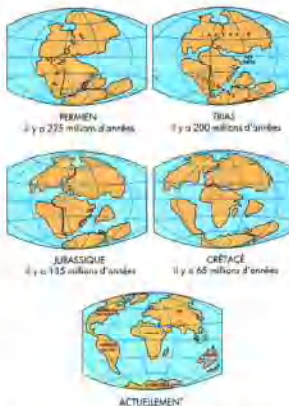
	Matière	Traitement et produit final	Pourquoi ?
	déchets organiques (feuilles, herbes, épluchures, restes de repas, thé, coquilles d'œufs, litiers d'animaux, ...)	• compostage et formation d'engrais	• ces déchets représentent plus du quart de nos poubelles. Une fois compostés, ils améliorent la qualité du sol.
	mercure et cadmium (piles, accumulateurs, piles bouton, ...)	• tri et traitement spécial qui permettent de récupérer le mercure et le cadmium	• 60 millions de piles par an sont consommées en Suisse. Plus de la moitié sont encore jetées à la poubelle. Ces substances sont très toxiques.
	caoutchouc (pneus, bottes, imperméables, élastiques, ...)	• broyage mécanique pour fabriquer des pneus remaniés et des matériaux de construction	• le caoutchouc produit beaucoup de saies lors de son incinération. Sa récupération permet d'économiser la matière première permettant sa fabrication (pétrole)
	matières synthétiques (plastiques, tuyaux, jouets, ...)	• tri, refonte et traitement chimique permettent de fabriquer des sacs à ordures, des bâches et des tuyaux	• économie de la matière première (pétrole)

5 Les menaces sur la biosphère

Différentes menaces pèsent sur la biosphère. Ces menaces peuvent être naturelles ou liées aux activités humaines, à l'échelle planétaire ou locale. Certaines d'entre elles sont prévisibles, d'autres pas; certaines sont maîtrisables par l'Homme, d'autres pas. Ce chapitre relate différents scénarios possibles ainsi que des catastrophes ou accidents s'étant déjà produits. En 1995, les sinistres liés aux catastrophes naturelles ou technologiques ont coûté 180 milliards de francs de dommages dans le monde et ont provoqué la mort d'environ 28 000 personnes!

Les menaces géophysiques

Le découpage des continents tel que nous le connaissons aujourd'hui résulte de lents mouvements à l'échelle planétaire. La surface du globe n'a rien de rigide et est composée d'une mosaïque de plaques d'une centaine de kilomètres d'épaisseur qui s'écartent, se frottent, s'enfoncent les unes sous les autres. La théorie décrivant ces mouvements est appelée « la tectonique des plaques ». Elle permet de comprendre et aussi de prévoir bon nombre de phénomènes. A titre



La croûte terrestre est constituée d'une multitude de plaques en mouvement.

d'exemples, l'Inde migre vers le Nord à la vitesse de 5 cm par an, l'Afrique et l'Arabie se séparent d'ici 10 millions d'années. Ce mouvement de plaques est à l'origine de l'activité sismique et du volcanisme. L'Homme essaie de prévoir les différents tremblements de terre et l'éruption des volcans pour mieux s'en protéger. Il est cependant incapable de modifier le cours des événements!

Citons quelques exemples célèbres:

- En 79 av. J.-C., le Vésuve détruit Pompéi et Herculaneum, tuant 2000 personnes.
- Le volcan Tambora en 1815 et le Krakatoa en 1883 firent en Indonésie respectivement 92 000 et 36 000 victimes.
- En 1902, l'éruption de la Montagne Pelée en Martinique fit 28 000 victimes.
- Le tremblement de terre dévastateur de San Francisco en 1906, qui ravagea la ville.
- Le séisme de San Fernando au nord de Los Angeles en 1971, qui détruisit même des hôpitaux et ébranla un barrage.
- Le mont Saint-Helen dans l'état de Washington explosa en 1980 et pulvérisa son sommet, qui perdit 400 mètres de hauteur. En quelques minutes, de colossales masses de gaz et de magma furent projetées dans l'atmosphère.
- En Californie, 7300 tremblements de terre d'importance ont été enregistrés au cours de ces 40 dernières années.
- La chaîne de l'Himalaya est la manifestation d'une gigantesque collision entre les plaques indienne et eurasiatique. Elle aurait commencé il y a 45 millions d'années... et se poursuit encore actuellement.
- Une faille sépare progressivement l'Afrique de l'Arabie. Elle permet à des colonnes de magma chaud de remonter du manteau de la Terre à sa surface.

Les séismes détruisent l'architecture de la Terre. Les atteintes à l'environnement sont évidentes. Lorsque les séismes se produisent sous l'océan, ils sont souvent accompagnés de raz de marée dévastateurs.

Les atteintes de l'activité volcanique à la biosphère sont considérables; outre le souffle et la chaleur, une éruption volcanique produit des nuages de cendres qui sont capables de modifier sur de grandes étendues certaines données climatiques telles que la température au sol et les



Le Vésuve détruisit presque instantanément la ville de Pompéi.



L'activité des volcans est corrélée aux tremblements de terre.

précipitations. Certaines théories rendent les volcans responsables du refroidissement de la Terre. Séismes et éruptions sont étroitement corrélés et leur nombre se compte par milliers chaque année.

L'histoire de la vie est rythmée par une autre menace géophysique : les glaciations. L'époque actuelle n'est pas à l'abri de catastrophes propres aux rythmes des glaciations. Le mouvement des glaciers et la fonte de leurs glaces constituent les véritables dangers actuels. Suivant les années, les siècles ou les millénaires, le front et les côtés des glaciers avancent ou reculent.

Voici quelques exemples de dégâts dus aux glaciers :

- En 1776, un éboulement du glacier Devdarak, au sud de la Russie, barra le fleuve Terek pendant trois jours ; de nombreux villages furent engloutis en raison d'une hausse de 24 mètres du niveau des eaux.
- En 1892, Saint-Gervais fut dévasté par un torrent de boue résultant de la brusque vidange d'une poche d'eau accumulée à l'intérieur du glacier de la Tête Rousse ; le village du Fayet fut rasé et on déplora 200 victimes.



Les mouvements des glaciers sont une menace permanente pour l'environnement.

Les menaces célestes

De tout temps, les dangers venus de l'espace ont hanté la culture populaire ; le passage d'une comète est souvent synonyme de mauvais présage. En 1910, des revues à sensation décrivaient les conséquences d'une collision avec la comète de Halley dans un but commercial, et les gens s'affolaient. On vendit du reste à cette occasion des pilules destinées à se protéger des substances toxiques que cette collision aurait libérées. Plus près de nous, en 1974 et en 1983, des calamités étaient prédites avec le passage de la comète Kohoutek et le retour de la comète de Halley. L'impact d'informations alarmistes sur la population est considérable, surtout lorsqu'elles se couvrent d'autorités dites scientifiques. Cependant, la probabilité que de telles catastrophes se produisent est extrêmement faible.

Le Soleil est une étoile qui a une activité phénoménale. Elle se traduit par des éruptions gigantesques dans son atmosphère. Ces éruptions projettent dans l'espace des protons, des électrons et des noyaux d'hélium qui, aux alentours de la Terre, sont piégés par le champ magnétique terrestre (ceinture de Van Allen). Le danger consiste en la production d'une éruption géante qui produirait des particules suffisamment énergétiques pour passer au travers de notre magnétosphère, entraînant la destruction d'une partie de la couche d'ozone.



Une éruption solaire géante dégraderait la couche d'ozone.

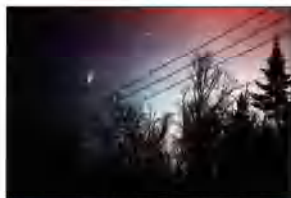
Le cataclysme stellaire qui consiste en l'explosion d'une étoile en supernova représente également une menace pour les êtres vivants et la couche d'ozone. Ce phénomène dégage des flux de rayonnements ultraviolets, X et gamma dont l'énergie équivaut à celle dépensée par le Soleil pendant des millions d'années. Cependant, pour être vraiment dangereuse, cette explosion devrait se produire à une distance inférieure à 30 années-lumière ; la plus proche étoile candidate se nomme *Éta Carinae* et se trouve à 9000 années lumière et elle ne devrait pas exploser avant quelques centaines de millions d'années!

Une autre menace est l'existence de nuages de poussières interstellaires. Si la Terre était enveloppée par un tel nuage, le rayonnement solaire intercepté par la Terre s'en trouverait diminué, provoquant probablement des changements de climat. On estime que ce phénomène s'est déjà produit plus de 150 fois sur Terre. Un nuage se trouve actuellement à 4 mois lumière du Soleil et pourrait nous envelopper dans 5000 ans.

La menace d'une collision entre la Terre et une météorite n'est pas à exclure. Une météorite est un objet céleste qui atteint l'atmosphère de la Terre. L'importance des dégâts provoqués par une telle collision est corrélée aux dimensions de l'objet, donc à son énergie. L'espace est peuplé d'objets de toute taille et des collisions avec la Terre sont fréquentes ; en effet, le phénomène « d'étoile filante » n'est rien d'autre que la combustion d'un objet dans l'atmosphère de la Terre. Cependant, il existe des corps beaucoup plus grands, allant de quelques mètres à des dizaines de kilomètres de diamètre. La collision avec une météorite d'un kilomètre de diamètre équivaudrait au dégagement d'une énergie équivalente à l'explosion de 150 milliards de tonnes de TNT. Le choc dû à une météorite de plusieurs kilomètres perforerait la croûte terrestre et le magma remonterait à la surface ; un raz de marée (si la collision a lieu dans l'océan) dévasterait les terres avoisinantes et la matière dispersée dans l'atmosphère obscurcirait le ciel pendant des mois, voire des années. Une telle théorie est souvent avancée pour expliquer la disparition des dinosaures. Mais le cratère de 150 km de diamètre qu'aurait dû former cet impact n'a jamais été retrouvé! Les impacts avec des météorites sont rares. On calcule que la probabilité de rencontre d'une comète croisant l'orbite terrestre est d'une « chance » sur un milliard et que celle avec un astéroïde de 600 m de diamètre se produit en moyenne une fois sur une période de quelques dizaines de milliers d'années. Il faut aussi relativiser les menaces dues à des collisions célestes ; en effet, une éruption volcanique ou un



Les cratères que l'on voit à la surface de la Lune sont dus à des collisions avec des astéroïdes.



La collision entre la Terre et une comète produirait des dégâts équivalents à l'éruption d'un volcan.

treblement de Terre a une importance équivalente à l'impact d'une météorite de quelques centaines de mètres de diamètre.

Les menaces climatiques

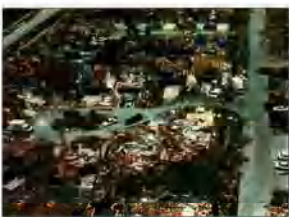
Les menaces de ce type n'ont que peu d'influence du point de vue planétaire. Cependant, localement, elles représentent des dangers qu'il ne faut pas négliger et modifient les conditions de vie des organismes vivants et de l'Homme en particulier. A ce titre, elles peuvent être considérées comme des pollutions.

Le cyclone est une menace naturelle majeure avec ses vents violents (environ 250 km/h), ses pluies diluviennes et les énormes vagues qui l'accompagnent. Ce phénomène se produit une cinquantaine de fois par année et balaye lentement des zones de 100 km à 400 km de diamètre sur un parcours de quelques milliers de kilomètres. Il devient particulièrement redoutable lorsqu'il aborde des zones habitées. Seules les régions tropicales situées entre les 8° et les 35° parallèles nord ou sud sont affectées par ce phénomène. Le cyclone est le phénomène naturel qui occasionne le plus de pertes en vie humaine. En voici quelques exemples frappants :

- Le 13 novembre 1970, le littoral du Pakistan a été ravagé par un cyclone qui occasionna la mort de 400 000 personnes en raison principalement d'une élévation de 6 mètres du niveau des eaux sur plusieurs milliers de km².
- En août 1982, deux cyclones successifs au Japon firent 145 000 personnes sans abri, 66 disparus et 369 tués.
- En septembre 1982, on dénombra plus de 1000 décès suite au passage d'un cyclone sur les côtes du San Salvador.

A l'heure actuelle, il est possible de réduire le nombre de décès occasionnés par les cyclones par des méthodes de prévention. En effet, les prévisions de cyclone sont de plus en plus fiables et la mise sur pied de plan d'information et de prévention en cas d'alerte est possible. La plus importante mesure consiste à inviter les populations menacées à rejoindre un abri aussi sûr que possible et à renoncer à circuler.

Tous les cours d'eau du monde passent par des périodes de basses et de hautes eaux. Les crues trouvent leur origine dans les pluies ou dans la fonte des neiges. Lorsque ces crues sont trop importantes, les cours d'eau débordent et



Les dégâts occasionnés par le passage d'un cyclone sont considérables (après le passage d'Andrew, Floride, 1992).



L'ouragan Lothar a causé des dégâts considérables sur les rives du Léman (fin 1999).



La crue des cours d'eau donne aux villes un aspect inhabituel.

les eaux inondent les terrains avoisinants. Ces inondations peuvent parfois prendre des allures de catastrophes et constituent une menace pour l'environnement.

- En 1843, les inondations dues au fleuve Jaune en Chine firent plusieurs centaines de milliers de victimes.
- En 1879, vers Murcies, en Espagne, le débordement du Guadalentín occasionna le décès de près de 1000 personnes.

Plus que des pertes en vies humaines, les inondations occasionnent surtout des dégâts aux biens et aux cultures se chiffrant en centaines de millions de francs. Dans l'histoire, les Chinois et les Egyptiens sont les premiers peuples à avoir essayé de se protéger contre les inondations en bâtissant des structures permettant de contrôler l'écoulement des masses d'eau.

Les glissements de terrain, les avalanches, les coulées de boues, les écroulements de masses rocheuses, les affaissements sont des catastrophes locales dues à des mouvements plus ou moins rapides du terrain.

- En 1963, un glissement de terrain au-dessus du barrage du Vaiont, en Italie, fut responsable de la mort de 1900 personnes.
- En 1970, une coulée de boue emporta une partie d'un sanatorium sur le plateau d'Assy en France ; 72 personnes trouvèrent la mort.

Ces mouvements de terrain occasionnent des dégâts considérables. Leur prédiction s'avère relativement difficile et il est donc difficile de s'en protéger. La meilleure protection est la prudence, tant du point de vue de l'endroit où l'on choisit de vivre que de son comportement en montagne pour prévenir les avalanches.

La sécheresse est un phénomène lent et insidieux. Il est dans le monde l'un des pires fléaux naturels. Elle peut se manifester sur des étendues considérables et y provoquer famine, désertification et la mort de nombreuses personnes. La disparition de terres arables (désertification) reste aujourd'hui un des problèmes mondiaux qu'il est urgent de résoudre. L'usure des sols par l'action des vents ou de l'eau (érosion) est un processus naturel que l'activité humaine fait progresser par la suppression de la végétation. Certaines prévisions prévoient que d'ici à l'an 2000, le tiers des terres agricoles mondiales sera réduit en poussière.

- En Ethiopie, la sécheresse de l'hiver 1982-1983 a occasionné le décès de dizaines de milliers de personnes mortes de faim et de soif.



Les avalanches occasionnent la mort de centaines de personnes chaque année.



Le désert gagne chaque année des surfaces considérables.

Sous nos latitudes, la sécheresse se manifeste essentiellement par des pertes de production au niveau de l'agriculture ainsi que par des mesures de rationnement de l'eau. Un autre phénomène plus dramatique lié à la sécheresse est les incendies de forêt. Ces incendies provoquent la disparition d'espaces verts, la destruction de la matière organique du sol en raison de l'élévation de température et la mort de nombreuses personnes. On assiste donc aussi à un phénomène de désertification. Chaque année, près de 40 000 hectares sont la proie des flammes sur la côte méditerranéenne de la France. La seule prévention efficace contre les incendies de forêt est leur débroussaillage.



Les incendies de forêt sont parfois la conséquence d'une période de sécheresse.

Les menaces technologiques

Les menaces au quotidien liées aux activités humaines telles que les pollutions de l'eau, de l'air et des sols ont déjà été relatées plus haut. Cependant, la maîtrise des technologies actuelles et les concentrations industrielles engendrent des menaces locales et des accidents parfois catastrophiques. L'Homme cherche à lutter contre les risques de sa propre civilisation; il en va de la responsabilité de chacun, mais plus particulièrement d'une volonté politique.

Citons quelques accidents liés aux avancées technologiques de l'Homme:

- Les marées noires liées aux accidents de superpétroliers: Torrey Canyon (1967), Amoco Cadiz (1978) et Erika (1999).
- Les accidents nucléaires de Three Mile Island (1979) et de Tchernobyl (1986).
- A Seveso (1976), Bhopal (1984) et Bâle-Schweizerhalle (1986), des accidents aux conséquences considérables eurent lieu. A chaque fois, des produits chimiques extrêmement toxiques furent relâchés dans l'environnement, mettant en péril les organismes vivants. Notons que l'accident de Bâle a permis de mettre en place un plan d'assainissement du Rhin, qui est plus propre aujourd'hui qu'avant l'accident.
- L'explosion d'un camion plein de propylène à Los Alfaques (Espagne) fit 216 morts en 1978.
- En 2000, la pollution des eaux d'un affluent du Danube par des cyanures a tué des tonnes de poissons et privé des milliers de personnes d'eau potable.



On distingue sur ce cliché les fumées issues de des puits de pétrole en feu ainsi qu'une marée noire: ces catastrophes ont été causées à l'occasion de la guerre du Golfe (photo Gamma).

Il faut souligner que les avancées techno-scientifiques sont aussi, dans bon nombre de cas, le seul espoir de lutte contre certaines pollutions.

Parmi les menaces les plus inquiétantes, on peut en mettre trois en évidence:

- les pollutions par les pluies acides, par les métaux lourds et par les produits chimiques dans les nappes phréatiques;
- la raréfaction de l'ozone atmosphérique et l'augmentation des gaz à effet de serre;
- le déboisement dans les pays tropicaux et la désertification.

La race humaine pourra-t-elle maintenir, voire améliorer son niveau de vie dans de telles conditions, alors qu'une bonne partie des nations ont déjà épuisé leurs ressources naturelles et dégradé leur environnement? Le défi n'est pas mince et l'adaptabilité humaine permettra peut-être de le relever, en créant de nouvelles institutions, de nouvelles techniques et surtout de nouvelles idées. La question du développement des pays pauvres est cruciale; en effet, pour élever leur niveau de vie, ils ont besoin de matières premières et de beaucoup d'énergie. A terme, le renoncement au développement de nouvelles énergies signifie probablement le ralentissement ou l'arrêt du développement des pays pauvres et par conséquent la régression de notre propre niveau de vie, notamment à cause des tensions politiques ou de guerres qui pourraient en résulter.

Un autre espoir est que le pouvoir d'autorégénération de la nature soit plus efficace que ce que l'on admet habituellement. En effet, de récentes études montrent que les forêts européennes s'étendent malgré la pollution et les pluies acides. Les polluants chimiques qui sont à l'origine des dégradations agissent aussi comme fertilisants. La Nature nous réserve sans doute encore d'autres surprises, bien difficiles à prévoir!

En 1993, un institut de sondage a comparé les opinions sur l'environnement dans une vingtaine de pays industrialisés ou en développement. Unanimentement, la surpopulation et la consommation des ressources naturelles par les pays industrialisés sont citées comme les menaces les plus sérieuses sur l'environnement. La prise de conscience s'opère et ses effets seront déterminants sur l'avenir de la vie de l'Homme sur Terre. L'espoir est une nécessité et la recherche fondamentale et appliquée est une des voies qui permettra de trouver des solutions à nos problèmes actuels. Elle se fera dans la plupart des domaines que vous avez pu découvrir jusqu'ici, plus particulièrement dans le domaine de la chimie tant il est vrai que la plupart des processus du vivant sont des réactions chimiques.



L'humanité peut garder l'assurance de voir le Soleil se coucher encore longtemps.

La folie des Hommes conduit trop souvent les populations à se faire la guerre. Avec l'évolution des armements, les guerres sont devenues extrêmement préjudiciables à l'environnement; il constitue souvent en lui-même un objectif militaire.

- Pendant la guerre du Vietnam, une partie de la jungle côtière du Sud (mangroves) a été détruite par les bombardements, les défoliants, le napalm et les bulldozers.

6 L'avenir de la vie

La vie a-t-elle un avenir sur Terre? D'un point de vue biologique, la réponse est très certainement oui, du moins jusqu'à la mort du Soleil. Cependant, pour la survie de l'Homme, la réponse se doit d'être plus nuancée. Comme on l'a vu, de multiples menaces pèsent sur la biosphère et celles qui sont dues aux activités humaines sont loin d'être négligeables. En effet, la Terre a subi plus de transformations au cours de ces 100 dernières années qu'au cours des 10 millénaires précédents. L'Homme impose une pression croissante sur l'environnement et il n'évitera des dégâts irréversibles que s'il modifie les institutions, les techniques et les mentalités.

Depuis l'âge des cavernes, la population mondiale a progressé par à-coups. La première forte augmentation de la population mondiale (de 150 000 personnes à 5 millions) a coïncidé avec l'invention des outils. La deuxième, de 5 millions à 500 millions d'êtres humains, est associée à l'apparition de l'agriculture. La dernière explosion démographique, de 500 millions à plus de 6 milliards d'habitants, est une conséquence de la révolution industrielle; cette dernière croissance se poursuit encore aujourd'hui et les prévisions envisagent que la population doublera encore d'ici le milieu du siècle prochain. Le problème consiste donc à savoir quelles seront les conséquences écologiques de cette augmentation de population, de l'accroissement permanent de la consommation, de la production et de l'épuisement des ressources énergétiques.

Des études ont été faites pour évaluer les conséquences de l'activité humaine sur la Terre durant ces 10 000 dernières années, c'est-à-dire depuis l'avènement de l'agriculture. Certains constats sont inquiétants, par exemple:

- une surface équivalente à l'Europe a été déboisée pour les besoins de l'agriculture;
- la moitié des écosystèmes terrestres non recouverts de glace ont été modifiés.



L'humanité saura-t-elle conserver des conditions permettant la survie?

Chapitre 15. La chimie, aujourd'hui et demain

Comme nous avons pu le voir, les domaines de la chimie sont multiples. Nous allons dans ce chapitre passer brièvement en revue quelques domaines de pointe de la chimie ainsi que son avenir et ses implications.

1 Chimie et biologie

La biochimie est la science qui étudie le comportement chimique et les constituants de la **matière vivante**.

La cellule, élément constitutif fondamental de tout être vivant, est une véritable usine chimique qui travaille dans des conditions constantes de pH et de température. Le biochimiste, en faisant varier ces facteurs, active les réactions chimiques au sein de la cellule. La cellule, elle, utilise des **enzymes** pour favoriser ces réactions. Il n'y a pas de vertu particulière dans ces véritables molécules de la vie que sont les enzymes; toutes leurs réactions peuvent être étudiées en termes de liaisons chimiques. Certes, les réactions permettant à un système de reproduire un système identique à lui-même sont d'une extrême complexité, mais il n'y a pas de « molécule vivante ».

Les performances chimiques exceptionnelles des enzymes sont prises en exemple par les chercheurs en vue d'une utilisation industrielle. Certaines sont utilisées depuis longtemps, par exemple dans la fermentation des boissons alcoolisées, du fromage ou du pain. Les biotechnologues recherchent des enzymes ou des cellules modifiées qui permettent la synthèse de substances élaborées afin de révolutionner des domaines comme la pharmacie, l'agriculture ou la pétrochimie. L'enjeu est important, les débouchés prometteurs; **la santé publique et l'alimentation** sont en effet des domaines essentiels pour l'humanité.



Modèle de la molécule d'acide désoxyribonucléique (ADN) (Photo ISREC)

2 Les matériaux composites

Certains oiseaux construisent leur nid avec un mélange de brindilles et de boue. Ils associent donc **des fibres et un liant**. Les matériaux composites sont basés sur le même principe. On noie dans une résine, en général de nature organique (à base de carbone), des fibres. Celles-ci sont produites par l'industrie chimique, principalement sous la forme de fibres de verre ou de carbone.

Ces fibres résistent aux efforts et assurent la rigidité d'une pièce. En règle générale, plus un matériau composite est riche en fibres, plus il est résistant. L'aéronautique utilise des matériaux contenant 60% de fibres de carbone alors que les autres utilisations sont en général faites de 30% de fibres de verre.

Ces matériaux sont particulièrement intéressants quant à leurs caractéristiques. Ils sont **trois à cinq fois plus légers que l'acier**, insensibles à la corrosion et se prêtent en une seule opération à la fabrication d'objets de grandes tailles et de formes complexes. On les utilise aujourd'hui pour fabriquer des carrosseries d'automobile, des skis, des coques et des mâts de bateau, des raquettes de tennis, des tuyauteries et des tronçons d'ailes d'avion.

Dans une Formule 1, où les contraintes sont très fortes, outre la carrosserie, le châssis, les suspensions et même les freins sont en matériaux composites.

On recherche actuellement des composites qui supportent des températures supérieures à 1500°C pour équiper la navette spatiale européenne Hermiss. Dans les projets de l'an 2000, des matériaux composites à base de céramique sont envisagés.



L'empennage d'un A-310.

3 La photochimie

Cette partie de la chimie s'intéresse aux conséquences chimiques de l'absorption de rayonnements lumineux.

Une molécule irradiée est excitée et revient à son état normal en émettant un rayonnement. C'est le principe de la **phosphorescence ou fluorescence**. Il arrive cependant que l'excitation d'une molécule produise des réactions

Diverses applications ont été trouvées : déploiement d'antennes de satellite, bagues de raccordement en micro-électronique, sculptures.

Il existe aussi des fluides à base de fer qui ont un comportement étrange pour un liquide : sous l'action d'un aimant, le liquide se hérisse de pointes ou forme des labyrinthes. Bien que ces propriétés soient encore loin d'être expliquées, on a déjà réalisé à partir de ce phénomène une imprimante à encre magnétique aussi performante que les imprimantes laser.

Terminons ce tour d'horizon par les fibres optiques de l'avenir qui devront transmettre des signaux à grandes distances sans pertes trop importantes. On envisage soit de purifier le verre à l'extrême, soit de le remplacer par des sels comme le fluorure de zirconium ou le sulfure d'arsenic.

Comme la compétition dans ce domaine est permanente, les découvertes de nouveaux matériaux et de nouvelles applications sont sans cesse d'actualité.

5 Des saveurs et des odeurs

Les sens du goût et de l'odorat permettent de détecter la présence de molécules dans notre vie de tous les jours. De tout temps, les hommes ont recherché ces plaisirs. La compréhension des interactions moléculaires qui engendrent ces sensations est une recherche récente.

Les saveurs

Pour les saveurs, ce sont les molécules qui, au contact de récepteurs chimiques sur la langue (les papilles gustatives), provoquent les sensations. Ces récepteurs, au nombre de quatre, correspondent aux **goûts salé, sucré, acide et amer**. L'acidité est provoquée par la présence des **ions H⁺**. Cependant, la concentration des ions semble ne pas avoir d'influence sur le goût. Bien que le vinaigre possède une faible concentration, on le détecte comme très acide.

Le goût salé est bien représenté par l'impression obtenue en suçant du sel de cuisine. Il en est de même pour de nombreuses combinaisons **anion/cation**. L'anion et le cation contribuent simultanément au goût. Par exemple



chimiques ou des modifications de la géométrie de la molécule que l'on ne peut obtenir autrement. C'est ce qui se passe au niveau de la vision et de la photosynthèse.

Il existe aussi des substances qui changent de couleur sous l'effet de la lumière. Lorsque le processus est réversible, on envisage de les utiliser pour la fabrication de nouveaux types de mémoires d'ordinateur à stockage optique.

La compréhension des phénomènes photochimiques a permis d'obtenir de la **lumière chimique**, analogue à celle qu'émettent les lucioles et certains poissons des grandes profondeurs. Les bâtonnets lumineux « Cyalume », source de lumière froide et portable, sont une application des réactions photochimiques. Il s'agit d'une oxydation entre deux produits ; l'énergie dégagée par cette réaction est captée par un produit (fluoresceur) qui la renvoie sous forme de lumière.



Bâton de cyalume.

4 Les nouveaux matériaux

Le besoin de réaliser un objet aux caractéristiques précises a amené les chercheurs à **inventer des matériaux** à partir de la fonction à remplir. La démarche inverse reste cependant valable, c'est-à-dire celle qui consiste à trouver des applications à des matériaux aux propriétés étonnantes.

Pour les recherches, les **polymères** semblent être le matériau de prédilection, car ils bénéficient des énormes possibilités de la chimie organique. On arrive à rendre certains plastiques conducteurs lorsqu'on y ajoute des impuretés, d'autres pouvant servir de prothèses aux humains, de la hanche au cœur artificiel. Certains, biodégradables, sont envisagés pour remplacer les plaques et vis métalliques que l'on installe lors de fractures et sont déjà utilisés pour favoriser la croissance de la peau chez les grands brûlés.

Faut-il pour autant laisser tomber le **verre, l'acier et le plastique** ? Non, car la connaissance des phénomènes métallurgiques à l'échelle microscopique permet d'obtenir des alliages aux propriétés originales ; certains alliages résistent mieux lorsque la température croît (nickel, aluminium), les alliages au titane sont très légers par exemple. Des alliages de titane/nickel ou de cuivre/zinc ont la bizarre propriété de retrouver leur forme originale par simple réchauffement. Cet effet est appelé **mémoire de forme**.



Plusieurs matériaux synthétiques entrent dans la composition d'une prothèse.

pour les chlorures (Cl⁻), les sels d'ammonium (NH₄⁺) paraissent plus salés que ceux de potassium (K⁺), eux-mêmes plus salés que ceux du calcium (Ca²⁺), du sodium (Na⁺), du lithium (Li⁺) et du magnésium (Mg²⁺).

Le goût sucré est provoqué par les **saccharides** ou par les **alcools**. Le glucose (C₆H₁₂O₆) est le plus connu.

La **caféine** et la **quinine** sont les représentants typiques des goûts amers. Certains sels (ammonium à longue chaîne) provoquent la même sensation.

Pourtant, des molécules relativement voisines peuvent avoir des goûts très différents. Les habitudes alimentaires ont tendance à diminuer la sensibilité. Les effets de contraste modifient certains goûts. Par exemple, de l'eau distillée paraît sucrée si on la goûte après un acide. L'absorption de liquide très chaud ou très froid avant une dégustation affecte également le goût.

Les odeurs

Lorsqu'un **corps volatil** parvient dans notre cavité nasale, elle entre en contact avec 2 à 3 cm² de la membrane olfactive composée de cils. On a identifié sept types de récepteurs auxquels on attribue une odeur fondamentale. Ces odeurs sont : camphrée, mentholée, éthérée, florale, musquée, âcre et puante. L'interaction d'une molécule avec ces récepteurs conduit à des combinaisons de sensations si complexes qu'elles ne sont pas décomposables en odeurs fondamentales. Les parfumeurs font toujours appel à des nez (personnes dont le métier est de sentir) pour composer de subtils mélanges.

Bien entendu, seules les substances volatiles ont une odeur. La plupart d'entre elles sont organiques. Par un phénomène inconnu, le cerveau mémorise les odeurs bien après que la molécule ait quitté le nez. Il semblerait que la **géométrie des molécules** ait une importance pour la détection de l'odeur. Des molécules quasi sphériques sembleraient produire une odeur camphrée.

Si la chimie a réussi à synthétiser certaines molécules odorantes simples, la majorité des parfums naturels est si complexe qu'on n'a pas réussi à le faire. Par exemple un extrait de la mousse de chêne contient 199 composants dont 80 participent à son odeur. Pour une quarantaine, leur nature et leur abondance ont été analysées par chromatographie, mais ce n'est toujours pas suffisant pour reproduire l'odeur. Une autre démarche consiste à synthétiser de nouvelles molécules odorantes, le plus souvent par hasard en



Parfumeur.



Chien de chasse.

raison du manque de théorie permettant de relier une molécule à son odeur.

Pour pallier les insuffisances de l'odorat de l'homme, on utilise le flair des animaux, bien plus sensible que le nôtre. Des chiens détectent l'odeur de la drogue, traquent le gibier, sauvent des vies humaines lors d'avalanches ou lors de recherches de personnes disparues. On utilise des porcs pour rechercher les truffes. Les insectes eux-mêmes perçoivent par leurs antennes la présence de molécules que l'homme appelle odeur. Ainsi, les fourmis se suivent à la trace grâce à l'odeur laissée derrière elles. Une intense communication chimique existe entre les espèces animales et peut-être végétales. Son étude ne fait que commencer.

6 Médicaments

Un médicament est une substance qui possède des propriétés curatives ou préventives à l'égard des maladies. Les médicaments d'origine naturelle sont des drogues au premier sens du terme (à opposer avec la drogue absorbée par les toxicomanes et occasionnant une dépendance). La majeure partie des médicaments que nous utilisons sont issus de laboratoires. Les médicaments peuvent être regroupés en neuf familles:

Anti-infectieux (antibiotiques), contre la douleur (analgésiques), anti-inflammatoires, anti-allergiques, contre les troubles neuropsychiques (hypnotiques), contre les troubles cardiaques (cardiotoniques), contre les troubles vasculaires et respiratoires (anticoagulants), pour l'appareil digestif (antiulcéreux), correcteur de troubles métaboliques (vitamines).

Le secret d'un médicament réside dans sa structure moléculaire et son interaction avec les récepteurs de l'organisme. Certains ont plusieurs fonctions et soulagent plusieurs types de maux. La recherche de médicaments couvrant plusieurs fonctions est éminemment importante. L'inconvénient des médicaments est leurs effets secondaires. Par exemple, un médicament pour le mal de tête peut provoquer des brûlures d'estomac; un pansement gastrique peut être laxatif. L'homme, comme l'alchimiste de l'époque, est toujours en train de rechercher la panacée.



Médicaments.



Droguerie.

Chapitre 16. Vers l'infiniment petit

L'idée intuitive selon laquelle la matière n'est pas répartie de façon uniforme et continue dans les corps, mais qu'elle est constituée de petites particules indivisibles, les atomes, est due, dès le V^e siècle avant J.-C., aux philosophes de la Grèce Antique dont Empédocle, Démocrite, Leucippe. L'existence des atomes est devenue actuellement une évidence scientifique. Le mot atome a même perdu son sens étymologique puisqu'on sait maintenant qu'il est lui-même composé de particules plus petites: les protons, les neutrons et les électrons. Ces particules sont-elles indivisibles ou possèdent-elles une structure interne? En existe-t-il d'autres? Ces questions nous entraînent vers l'infiniment petit et le domaine des particules élémentaires.

1 L'hypothèse atomique

Malgré l'opposition que rencontrait l'hypothèse atomique, les scientifiques commencèrent, au début du XIX^e siècle, à l'introduire dans leurs théories pour expliquer certaines observations. L'analyse des réactions chimiques en est le premier exemple. Par des mesures soignées, Lavoisier (1743-1794) constate que la masse totale des produits qu'on fait réagir est la même que la masse totale des produits issus de la réaction; il y a conservation de la masse. D'autre part, William Prout (1785-1850) établit que les produits réagissent toujours dans des proportions simples et identiques pour une réaction donnée. Ces faits expérimentaux trouvent une explication simple si on considère que la matière est constituée d'atomes: ceci conduisit John Dalton (1766-1844) à publier en 1808 sa théorie atomique de la matière. Dans cette conception, un corps simple (comme l'hydrogène) est constitué de «grains de matière» identiques alors que les «grains de matière» de deux corps simples différents (par exemple l'hydrogène et l'oxygène) se distinguent par des masses différentes. En faisant réagir deux corps simples (de l'hydrogène avec de l'oxygène), il se forme un corps composé (de l'eau) qui résulte de l'assemblage de «grains de matière» différents sans qu'ils soient modifiés par la réaction. Dalton peut

La synthèse de l'eau L'interprétation de Dalton

Dalton mesure qu'il faut faire réagir 5,5 g d'oxygène avec 1 g d'hydrogène pour obtenir 6,5 g de vapeur d'eau.

Une mesure soignée montre qu'en fait il faut faire réagir 8 g d'oxygène avec 1 g d'hydrogène pour obtenir 9 g d'eau. Par commodité, c'est cette proportion qui sera utilisée dans les raisonnements suivants.

Dalton suppose qu'un atome d'hydrogène se combine avec un atome d'oxygène pour former une molécule d'eau dont la formule serait HO.

Il y aurait par conséquent autant d'atomes dans 8 g d'oxygène que dans 1 g d'hydrogène. La masse d'un atome d'oxygène vaudrait 8 fois la masse d'un atome d'hydrogène.

7 La chimie de demain

La recherche fondamentale et appliquée est la voie qui permettra de trouver des solutions à nos problèmes actuels. Elle se fera dans la plupart des domaines que vous avez pu découvrir jusqu'ici. La chimie de demain sera préoccupée par les questions d'environnement en fournissant des produits non toxiques et biodégradables. Ces recherches permettront de mieux connaître la nature et le fonctionnement de la vie, tant il est vrai que tous les processus du vivant sont des réactions chimiques.

alors comparer les masses des différents «grains de matière» ou atomes en se basant sur le raisonnement décrit dans l'encadré. Ses conclusions ne sont pas correctes car, d'une part, ses mesures de masse sont imprécises et d'autre part, il raisonne comme si tous les corps simples étaient monoatomiques.

Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850) constate, à partir d'expériences sur les gaz, qu'ils réagissent dans des proportions simples de leurs volumes. Ainsi, 1 litre d'oxygène gazeux réagit avec 2 litres d'hydrogène gazeux pour former 2 litres de vapeur d'eau.

Amedeo Avogadro (1776-1856) donna en 1811 une explication de cette propriété en formulant l'hypothèse que dans un volume donné de n'importe quel gaz (à la même pression et à la même température) se trouvent le même nombre de «grains de matière» (auxquels il donna le nom de molécules). On put en déduire dans quelle proportion devaient se combiner les «grains de matière» lors d'une réaction chimique et améliorer les valeurs comparatives de leurs masses.

A l'époque, on ne pouvait pas mesurer la masse d'un atome d'hydrogène mais, étant le plus léger, on lui a attribué la valeur 1. Par comparaison, l'atome d'oxygène étant 16 fois plus lourd, on lui a attribué la valeur 16. Ces nombres, caractéristiques de chaque élément, sont par définition leur masse atomique. Par extension, pour une molécule constituée de plusieurs atomes, sa masse moléculaire est la somme des masses atomiques des atomes dont elle est constituée. Ainsi, la masse moléculaire de l'eau (H₂O) vaut 18 (1 + 1 + 16), celle de l'hydrogène gazeux (H₂) vaut 2 (1 + 1) et celle de l'oxygène gazeux (O₂) vaut 32 (16 + 16). En prenant des quantités de substances dont la masse exprimée en grammes est égale à leur masse atomique ou à leur masse moléculaire, on a le même nombre de «grains de matière» (atomes ou molécules) de chacune de ces substances. La mole est ainsi, par définition, le nombre de grammes égal à la masse atomique. Il résulte de cette définition que dans une mole de n'importe quelle substance se trouve le même nombre d'atomes ou de molécules. Ce nombre est appelé nombre d'Avogadro et la première détermination de sa valeur fut effectuée en 1908 par Jean Perrin (1870-1942); des mesures plus précises furent effectuées, notamment par Millikan, et la valeur admise actuellement est de 6,022 · 10²³ atomes par mole.

La synthèse de l'eau L'interprétation d'Avogadro

Avogadro admet que les atomes sont déjà groupés par paires dans le gaz hydrogène (H₂) ou le gaz oxygène (O₂) et que dans un même volume de ces deux gaz, il y a le même nombre de molécules.

En faisant réagir deux litres d'hydrogène avec un litre d'oxygène, il y a deux fois plus de molécules d'hydrogène que de molécules d'oxygène et on obtient deux litres de vapeur d'eau. Une molécule d'eau doit par conséquent être formée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène: sa formule est H₂O.

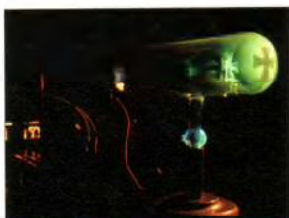
En introduisant cette information dans le raisonnement de Dalton, la masse d'un atome d'oxygène ne vaut pas 8 fois, mais 16 fois celle d'un atome d'hydrogène.

La *théorie cinétique des gaz* à laquelle Clausius (1822-1888), Maxwell (1831-1879) et Boltzmann (1844-1906), entre autres, contribuèrent, est un autre exemple de théorie construite sur l'hypothèse de la structure atomique de la matière. Son but est d'expliquer les propriétés macroscopiques observables d'un gaz à partir du mouvement désordonné et permanent des particules qui le composent. Dans cette théorie, la pression du gaz est interprétée comme le résultat des chocs des particules de gaz contre les parois du récipient qui le contient. La température est associée à la vitesse moyenne des molécules: plus l'agitation des particules est grande, plus la température du gaz est élevée. En appliquant les lois de la mécanique et de la statistique au mouvement des particules, il est possible de reconstituer théoriquement toutes les propriétés mesurables du gaz en accord avec les mesures expérimentales.

Si ces théories atomiques permettent d'expliquer avec succès un grand nombre de propriétés observables, elles ne constituent toutefois pas une preuve directe de l'existence des atomes et certains physiciens comme H. von Helmholtz (1821-1894) restent opposés à cette idée. Il faudra attendre la découverte de nouveaux phénomènes comme la radioactivité en 1896 pour considérer les atomes comme une réalité expérimentale et pour réaliser qu'ils sont constitués eux-mêmes de particules encore plus petites.

2 Les rayons cathodiques et l'électron

La première particule qui a été identifiée expérimentalement en tant que telle n'est pas l'atome, mais une particule plus petite: l'électron. Vers la fin du XIX^e siècle, de nombreux chercheurs étudient les rayons cathodiques. Il s'agit du rayonnement observé lorsqu'un gaz à basse pression contenu dans un tube est soumis à une décharge électrique entre deux électrodes (la cathode et l'anode). En 1858, Julius Plücker remarque que les rayons cathodiques sont déviés par un aimant. En 1869, Johann Hittorf observe l'ombre nette d'un objet placé devant la cathode prouvant que le rayonnement est émis par celle-ci et qu'il se propage en ligne droite. Cependant, la nature de ce rayonnement



Ombre d'un objet opaque projetée dans un tube à rayons cathodiques.

3 Les rayons X et la radioactivité

En 1895, le physicien allemand Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) découvrit un nouveau type de rayonnement capable de traverser des corps opaques à la lumière. On leur donna le nom de rayons X. Ils furent rapidement utilisés en médecine pour les radiographies, même si leur nature n'était pas comprise: il fallut attendre 1910 pour que Max von Laue (1879-1960) les assimile à un rayonnement électromagnétique, de même nature que la lumière mais de longueur d'onde plus petite.

En 1896, Henri Becquerel (1852-1908) observa par hasard la radiation émise spontanément par des sels d'uranium.

Deux ans plus tard, Pierre et Marie Curie isolent une substance qui est une source puissante de ce rayonnement: le radium. Ils baptisent ce phénomène «radioactivité».

En étudiant l'absorption de ces rayonnements par la matière, Ernest Rutherford (1871-1937) constata en 1898 que l'uranium émettait deux types de rayonnement différents qu'il appela α (alpha) et β (bêta).

Paul Villard (1860-1934) découvrit en 1900 un troisième type de rayonnement plus pénétrant appelé γ (gamma).

Par une expérience analogue à celle de Thomson, Becquerel établit expérimentalement en 1899 le rapport «charge électrique/masse» des rayons β , et découvrit qu'il s'agit d'électrons.

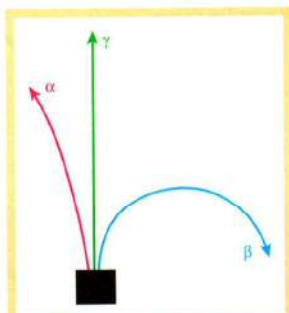
Une telle expérience est plus difficile à effectuer pour les rayons α , car leur déviation est beaucoup plus petite. Rutherford effectua cette détermination en 1906 et le résultat obtenu lui suggéra que les rayons α pouvaient être des ions hélium, c'est-à-dire des atomes d'hélium chargés d'électricité positive. Cette interprétation fut confirmée expérimentalement en 1908.

Par des expériences de diffusion sur des cristaux, Rutherford montra en 1914 que les rayons γ sont, comme la lumière ou les rayons X, un rayonnement électromagnétique.

Parallèlement à l'identification des rayonnements émis par les corps radioactifs, il fallait aussi déterminer la cause du phénomène de la radioactivité. Les expériences que



Radiographie.



La déviation des rayonnements dans un champ magnétique permet de les distinguer: le rayonnement γ n'est pas dévié, le rayonnement α est faiblement dévié dans un sens et le rayonnement β est fortement dévié dans l'autre sens.

était controversée: certains physiciens, comme Heinrich Hertz (1857-1894), pensaient qu'il s'agissait d'une onde et d'autres, comme Joseph John Thomson (1856-1940), pensaient qu'il s'agissait d'un flux de particules.

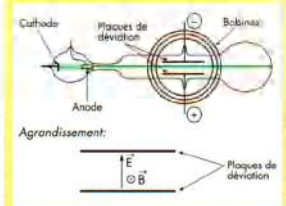
Ce fut en 1895 que Jean Perrin prouva, en envoyant les rayons cathodiques dans une cage de Faraday, qu'ils étaient formés de particules chargées d'électricité négative.

En 1897, J. J. Thomson réalisa des expériences dans lesquelles il envoya les rayons cathodiques dans un champ magnétique et dans un champ électrique. En mesurant la déviation du faisceau, il put calculer, à partir des lois de la mécanique, la valeur numérique du rapport entre la charge électrique des particules et leur masse. De plus, il constata que cette valeur restait la même, quelle que soit la nature des électrodes utilisées et du gaz dans le tube. Les expériences de Thomson indiquent que ces particules, appelées électrons, sont un constituant de toute substance, donc universel.

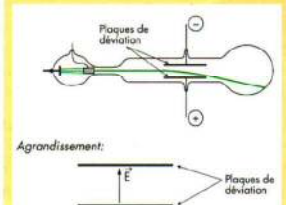
En 1911, Robert Millikan (1868-1953) détermina la valeur de la charge électrique d'un électron à partir de laquelle on peut déduire la valeur de leur masse. Ces valeurs, arrondies à deux chiffres significatifs, sont: $-1,602 \cdot 10^{-19}$ coulomb pour la charge électrique et $9,109 \cdot 10^{-31}$ kg pour la masse d'un électron.

Expérience de Thomson

Les électrons sont accélérés sous l'effet de la haute tension appliquée entre la cathode et l'anode; le champ électrique créé entre les plaques métalliques dévie le faisceau d'électrons vers le bas alors que le champ magnétique créé par les bobines le dévie vers le haut.



Dans un premier temps, on applique simultanément les deux champs en les ajustant pour que leurs effets se compensent et que le faisceau ne soit pas dévié; connaissant la valeur des champs, il est possible de calculer la vitesse des électrons dans le tube.



Dans une seconde phase, on mesure la déviation du faisceau sous le seul effet du champ électrique; il est alors possible, connaissant la vitesse des électrons, de calculer la valeur du rapport charge électrique/masse.

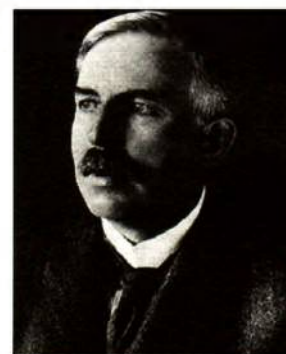
Rutherford effectua avec Frederick Soddy (1877-1956) les amènent à constater qu'au fur et à mesure qu'une substance radioactive émet son rayonnement, elle se transforme en une autre substance chimiquement différente. Cette nouvelle de la transmutation des éléments fit l'effet d'une révolution car elle était en contradiction avec les principes de base de la chimie. De plus, Rutherford et Soddy remarquèrent que l'activité radioactive d'une substance diminuait avec le temps et ils établirent la loi correspondante (voir «L'énergie nucléaire» dans la partie «ÉNERGIE»).

Toutes ces observations confirment de façon convaincante l'hypothèse de la structure corpusculaire de la matière.

4 La découverte du noyau de l'atome

Suite à la découverte de la radioactivité, la réalité des atomes est admise. On sait qu'ils possèdent des électrons et que la matière, et par conséquent les atomes qui la composent, est électriquement neutre. L'atome doit donc posséder un constituant de charge positive pour compenser la charge négative des électrons. On imagina différents modèles de répartition des charges électriques dans la matière, mais ce fut Rutherford par une expérience célèbre qui permit de comprendre la structure de base de l'atome.

Sous la direction de Rutherford, Hans Wilhelm Geiger (1882-1945) et Ernest Marsden (1889-1970) étudient la manière dont les particules α sont absorbées par la matière. En 1911, l'une de ces expériences consiste à bombarder une mince feuille d'or avec des particules α émises à grande vitesse par une source radioactive (voir les documents dans «Structure de l'atome» de la partie «ÉLECTRICITÉ»). On s'attendait à ce que ces particules de grande masse traversent la feuille d'or en n'étant quasiment pas déviées, ce qui était le cas pour la majorité d'entre elles. Toutefois, certaines subissaient de très grandes déviations et pouvaient même «rebondir» sur la feuille d'or. Rutherford interpréta ces déviations par l'action d'une force électrique entre les particules α et les constituants de charge positive de la feuille d'or. Il en déduisit que les atomes sont constitués, en plus des électrons, d'une minuscule partie de charge électrique positive contenant quasiment toute la masse; il proposa un



Ernest Rutherford.

modèle d'atome où les électrons tournent autour d'un noyau central, chargé positivement et contenant l'essentiel de la masse. Ces travaux permettent aussi de calculer un ordre de grandeur de la taille du noyau des atomes : 10^{-14} m, soit 100 000 fois moins que la taille de l'atome.

En 1917, Rutherford reprend des expériences commencées par Marsden et met en évidence que le noyau d'hydrogène, auquel il donne le nom de proton, est présent dans les noyaux de tous les autres atomes.

Ce n'est qu'en 1932, avec la découverte du neutron, que l'on connaît tous les constituants du noyau des atomes.

5 Les isotopes et le neutron

Des expériences sur la radioactivité révèlent que certains éléments chimiques (comme le carbone ci-contre) présentent parfois un caractère radioactif et parfois non ; les atomes de ces éléments existent donc en plusieurs « versions » différentes. L'utilisation des spectromètres de masses, depuis leur invention en 1913 par J. J. Thomson, révèle que ces « versions » d'un même élément chimique sont constituées d'atomes ayant des masses légèrement différentes. L'explication de ces différences de masse fut donnée en 1932 lorsque James Chadwick (1891-1974) montra expérimentalement l'existence dans le noyau de particules neutres de masse à peu près égale à celle du proton ; les neutrons. Si tous les atomes d'un même élément chimique possèdent le même nombre de protons, caractéristique de chaque élément, ils peuvent se distinguer par un nombre différent de neutrons. Deux atomes qui ne diffèrent que par leur nombre de neutrons ont les mêmes propriétés chimiques ; il s'agit donc du même élément chimique. On dit qu'il s'agit d'isotopes de cet élément car ils sont regroupés au même (iso) endroit (topos) dans le tableau périodique des éléments.

Après la découverte du neutron, on considère que l'atome est constitué de trois sortes de particules : les protons et les neutrons dans un minuscule noyau entouré d'électrons très éloignés ; la matière est en ce sens essentiellement constituée de vide.

Carbone 9 : ${}^9_6\text{C}$ 6 protons et 3 neutrons
Carbone 10 : ${}^{10}_6\text{C}$ 6 protons et 4 neutrons
Carbone 11 : ${}^{11}_6\text{C}$ 6 protons et 5 neutrons
Carbone 12 : ${}^{12}_6\text{C}$ 6 protons et 6 neutrons
Carbone 13 : ${}^{13}_6\text{C}$ 6 protons et 7 neutrons
Carbone 14 : ${}^{14}_6\text{C}$ 6 protons et 8 neutrons
Carbone 15 : ${}^{15}_6\text{C}$ 6 protons et 9 neutrons

Les isotopes du carbone. Les isotopes représentés en rouge sont radioactifs.

Bien qu'aucune théorie de l'époque ne permettait d'expliquer ces spectres, un enseignant suisse, Jakob Balmer (1825-1898), remarqua que les longueurs d'onde des raies visibles du spectre de l'hydrogène satisfaisent la relation :

$$\frac{1}{\lambda} = R \cdot \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

où **R** est une constante appelée constante de Rydberg dont la valeur a été déterminée de façon empirique ($R \approx 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$) et **n** est un nombre entier plus grand que 2.

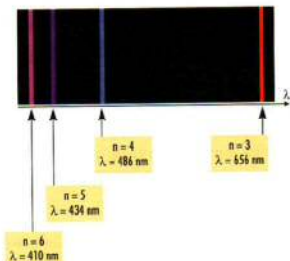
Les valeurs des longueurs d'onde λ calculées avec cette formule sont : 656 nm (pour $n = 3$), 486 nm (pour $n = 4$), 434 nm (pour $n = 5$) et 410 nm (pour $n = 6$) ; elles coïncident exactement avec les longueurs d'onde des raies rouge, bleue et violettes observées.

La formule de Balmer met en évidence une certaine régularité dans les spectres qui, si elle n'en donne pas une explication, servira plus tard de guide à Niels Bohr (1885-1962) dans l'élaboration de son modèle de l'atome.

7 La quantification de l'énergie

Une énigme de la fin du XIX^e siècle est posée par le rayonnement du corps noir qui peut être considéré comme une idéalisation du phénomène observé lorsqu'on chauffe une barre de fer ; on constate que sa couleur varie en passant successivement par le rouge, le jaune, le bleu et finalement le blanc au fur et à mesure que sa température augmente. On connaissait de ce phénomène les courbes expérimentales montrant comment l'énergie rayonnée par le corps noir était distribuée suivant les différentes longueurs d'onde. A chaque température correspond une courbe montrant un maximum d'intensité pour une longueur d'onde donnée. Plus la température est élevée, plus ce maximum se décale vers les petites longueurs d'onde, ce qui traduit les variations de couleur liées à l'augmentation de la température.

Les physiciens essayèrent d'expliquer cette distribution de l'énergie rayonnée à partir des concepts théoriques classiques et d'en déduire une loi en accord avec les observations, mais ils n'y parvinrent pas. Max Planck (1858-1947)



Les longueurs d'onde des raies visibles du spectre de l'hydrogène peuvent être calculées avec la formule de Balmer.

Un forgeron est capable d'estimer la température d'une pièce qu'il est en train de forger par la seule observation de sa couleur.

D'autre part, l'observation attentive du ciel montre que les étoiles n'ont pas toutes la même couleur ; cela révèle que leurs surfaces n'ont pas toutes la même température (les rouges sont les moins chaudes).

6 Les spectres des gaz

Il est possible, avec un prisme de verre, de décomposer la lumière blanche provenant d'une ampoule à incandescence par exemple. On observe alors, sur un écran placé derrière le prisme, une image qui s'étale de façon continue suivant les couleurs de l'arc-en-ciel ; c'est le spectre de la lumière blanche.

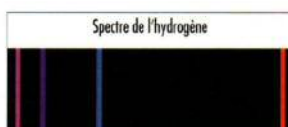
L'explication des couleurs a été, au cours de l'histoire, un sujet controversé et plusieurs modèles ont été proposés. Depuis la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell (1831-1879), on admet que la lumière est une onde électromagnétique se propageant dans le vide à la vitesse $c = 300\,000 \text{ km/s}$ (voir « Les ondes électromagnétiques » dans la partie « ONDES »). Les grandeurs caractéristiques d'une onde sont la longueur d'onde λ (lambda) et la fréquence f , liés par la relation $c = \lambda \cdot f$.

Les ondes électromagnétiques présentent une très grande variété de longueurs d'onde. La lumière est constituée par la plage des longueurs d'onde auxquelles notre œil est sensible : entre 390 nm et 780 nm. A chacune de ces longueurs d'onde correspond une sensation particulière de couleur : par exemple, la lumière de longueur d'onde $\lambda = 630 \text{ nm}$ émise par un laser nous apparaît rouge. L'expérience du prisme décrite ci-dessus montre que la lumière blanche d'une ampoule contient la gamme des longueurs d'onde correspondant à toutes les couleurs de l'arc-en-ciel ; le prisme les sépare en les déviant dans des directions différentes.

Les tubes néon qui sont utilisés pour les enseignes lumineuses contiennent un gaz qui devient lumineux sous l'effet d'une décharge électrique. La couleur dominante de la lumière émise est typique de chaque gaz : rouge pour le néon, jaune pour les lampes au sodium utilisées par exemple pour l'éclairage des autoroutes ou des passages à péage. Dès la seconde moitié du XIX^e siècle, on étudia les spectres de la lumière émise par ces gaz en la décomposant à l'aide d'un prisme ou d'un réseau de diffraction. Les spectres des gaz se distinguent de celui de la lumière blanche ; ils sont constitués d'une série de raies colorées dont la disposition est caractéristique de chaque gaz et dont on peut déterminer expérimentalement la longueur d'onde. La lumière émise par un gaz ne contient donc pas toutes les longueurs d'onde visibles, mais seulement celles qui correspondent aux raies observées.



La lumière blanche décomposée par un prisme s'étale de façon continue selon les couleurs de l'arc-en-ciel.



Le spectre de la lumière émise par l'hydrogène se présente sous la forme d'une série de raies de couleurs et de longueurs d'onde bien déterminées.

On utilise souvent des tubes fluorescents pour l'éclairage des locaux publics (bureaux, magasins, ...). Le spectre de leur lumière n'est pas continu ; cela explique que les objets n'ont pas la même apparence sous un tel éclairage qu'à la lumière du jour.

consacra plusieurs années à cette étude et finit par en trouver la solution en 1900. Il reprit le problème en lui appliquant un traitement mathématique particulier qui revient physiquement à considérer que le rayonnement n'est pas émis de façon continue, mais par petits « paquets » ou quanta d'énergie. De cette hypothèse, Planck déduisit une loi du rayonnement du corps noir en accord avec les résultats expérimentaux, à condition d'attribuer aux « paquets » une énergie proportionnelle à la fréquence f du rayonnement émis :

$$E = h \cdot f$$

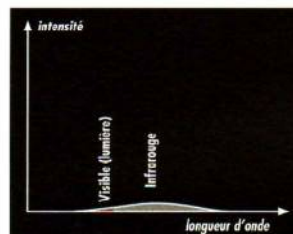
E : énergie d'un « quanta »
f : fréquence du rayonnement ($f = c/\lambda$)
h : constante appelée constante de Planck ($h \approx 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)

Cette conclusion troubla Planck lui-même car elle découle d'une astuce mathématique dont l'interprétation physique semble absurde. En effet, cette idée transposée de façon caricaturale au cas d'une balle de tennis qu'on jette en l'air reviendrait à dire qu'il est possible, suivant l'énergie qu'on lui fournit, de la lancer jusqu'à une altitude de 1 m, qu'il est aussi possible de la lancer à 1,2 m, mais jamais à une altitude intermédiaire ; le bras du lanceur serait « réglé » pour que l'énergie fournie permette à la balle d'atteindre certaines altitudes mais pas n'importe lesquelles. Dans cet exemple, l'énergie fournie à la balle est tellement grande en comparaison des « paquets » de Planck que, même s'ils existent, leur effet est totalement inobservable. Toutefois, la réalité des quanta n'est pas facile à admettre, même lors de processus mettant en jeu de petites quantités d'énergie. Malgré ces doutes, l'idée des quanta va petit à petit s'imposer et conduire la physique à une complète remise en question des idées fondamentales.

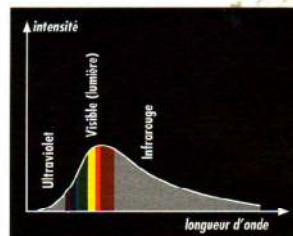
En 1887, Heinrich Hertz (1857-1894) observe que des électrons peuvent être arrachés d'une plaque de métal lorsqu'on l'éclaire avec un faisceau lumineux ; c'est l'effet photoélectrique. Il constate, entre autres, que cet effet dépend de la fréquence du rayonnement utilisé pour éclairer la plaque : pour des fréquences plus petites qu'une certaine valeur minimale, aucun effet n'est observé alors qu'il se manifeste instantanément pour des fréquences plus grandes. Or, il s'avère impossible d'expliquer ce comportement surprenant à partir de la théorie des ondes électromagnétiques de Maxwell. Pour élucider ce mystère, Albert Einstein (1879-1955) poursuivit le raisonnement de Planck en considérant que non seulement la lumière était émise par quanta, mais qu'elle se propageait aussi sous la

Le rayonnement du corps noir

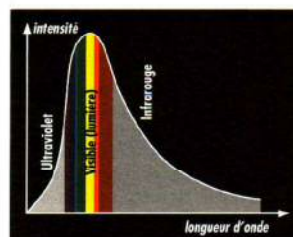
L'interprétation des courbes expérimentales ci-dessous a conduit Planck à formuler l'hypothèse des quanta.



Rayonnement d'un corps noir à 3000 K : le maximum est dans l'infrarouge.



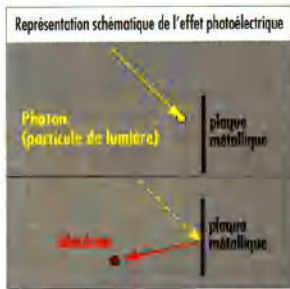
Rayonnement d'un corps noir à 5000 K : le maximum est dans le visible (rouge-orange).



Rayonnement d'un corps noir à 6000 K : le maximum est dans le visible (jaune).

forme de « paquets », autrement dit de particules de lumière. Il élabore une théorie des « quanta » de lumière de laquelle découlent toutes les propriétés de l'effet photoélectrique, en parfait accord avec les résultats expérimentaux. Dans cette théorie, l'effet photoélectrique est décrit en terme de chocs entre les particules de lumière arrivant sur la plaque et les électrons du métal ; l'énergie des particules de lumière dépend de la fréquence du rayonnement selon la relation de Planck $E = h \cdot f$.

A une époque où, après les travaux de Maxwell (1831-1879), on était convaincu que la lumière était une onde, l'hypothèse des particules de lumière parut d'abord comme un retour aux anciennes conceptions de Newton sur la nature corpusculaire de la lumière. Ainsi, l'hypothèse d'Einstein ne déclencha pas l'enthousiasme et il lui fallut du temps pour finalement être admise. Einstein reçut le prix Nobel en 1921 et les particules de lumière furent baptisées « photons ».



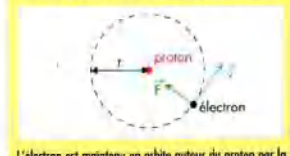
Un électron est éjecté de la plaque métallique suite au choc avec un photon incident.

8 Les modèles théoriques de l'atome

En 1911, après avoir mis en évidence le noyau de l'atome, Rutherford présente ce dernier comme un mini système solaire où les électrons remplacent les planètes et le noyau joue le rôle du Soleil. La cohésion de l'atome est due à la force d'attraction électrique entre le noyau et les électrons alors que c'est la force de gravitation qui maintient les planètes sur leurs orbites. Le mouvement des électrons est décrit par les lois de la mécanique et, comme pour les planètes, à chaque orbite correspond une vitesse de déplacement : plus le rayon de l'orbite est petit, plus la vitesse de l'électron est grande. L'énergie de l'atome résulte de l'énergie potentielle électrique et de l'énergie cinétique des électrons.

Malgré sa simplicité et l'analogie plaisante avec le système solaire, ce modèle est inacceptable car il présente un défaut irrémédiable : d'après les lois de l'électromagnétisme, l'électron, dans son mouvement autour du noyau devrait, à cause de sa charge électrique, rayonner son énergie et finir rapidement par tomber sur le noyau. Un tel atome ne pourrait durer qu'une fraction de seconde.

L'image «classique» de l'atome d'hydrogène



L'électron est maintenu en orbite autour du proton par la force électrique d'intensité :

$$F = k \cdot \frac{e^2}{r^2}$$

k : constante de la loi de Coulomb
 e : charge électrique du proton et de l'électron (en valeur absolue)
 r : rayon de l'orbite
(voir « L'interaction électrique et la structure de l'atome » dans la partie « ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME »)

Par la deuxième loi de Newton :

$$F = \frac{m \cdot v^2}{r}$$

m : masse de l'électron
 v : vitesse de l'électron
(voir « Dynamique » dans la partie « MÉCANIQUE »)

On tire de ces équations :

$$v = \sqrt{\frac{k \cdot e^2}{m \cdot r}}$$

La vitesse v de l'électron est « accordée » au rayon r de l'orbite.

Niels Bohr (1885-1962) reprend la base du modèle de Rutherford et, inspiré par la formule de Balmer lui suggérant un lien entre les spectres des gaz et la structure de l'atome, énonce en 1913 une théorie de l'atome.

Elle repose sur des postulats inédits dont le premier concerne les orbites des électrons : un électron ne peut pas tourner sur n'importe quelle orbite autour du noyau, mais uniquement sur celles dont le rayon r_n (et la vitesse v_n correspondante) satisfait la condition :

$$m \cdot r_n \cdot v_n = n \cdot \hbar$$

m : masse de l'électron
 n : nombre entier positif ($n = 1; n = 2; \dots$)
 \hbar (\hbar barre) : constante dérivée de la constante de Planck ($\hbar = h/2\pi$)
 $m \cdot r_n \cdot v_n$: « moment cinétique » de l'électron.

Ainsi, les orbites permises sont celles pour lesquelles le moment cinétique de l'électron est un multiple de \hbar ; ce sont les « orbites stationnaires ». La « règle de quantification de Bohr » permet de sélectionner les orbites stationnaires et les lois de la mécanique en donnent les caractéristiques (vitesse de l'électron, énergie). Dans le cas de l'atome d'hydrogène, si l'électron se trouve sur la plus petite orbite stationnaire ($n = 1$), l'énergie de l'atome est minimale; il se trouve dans l'état fondamental. Si l'électron se trouve sur une orbite stationnaire plus grande ($n > 1$), l'atome se trouve dans un état excité, dont l'énergie est plus élevée.

Bohr élude le problème de la stabilité de l'atome en postulant qu'un électron sur une orbite stationnaire ne rayonne pas d'énergie, même si cela contredit les lois de l'électromagnétisme. L'émission de rayonnement par un atome d'hydrogène par exemple) résulte du processus suivant : par un apport extérieur d'énergie (décharge électrique, rayonnement, ...), l'électron quitte son orbite fondamentale ($n = 1$) et « saute », suivant la quantité d'énergie reçue, vers l'une ou l'autre des orbites stationnaires d'énergie supérieure ($n > 1$). L'atome ne reste pas dans cet état excité et l'électron retourne à son niveau fondamental, soit en un saut, soit en plusieurs sauts successifs par les niveaux intermédiaires. Lors des « sauts » de retour vers l'état fondamental, l'énergie de l'atome diminue et cette différence ΔE est émise sous la forme d'un rayonnement dont la fréquence f est donnée par $\Delta E = h \cdot f$. A chaque saut d'un niveau vers un autre correspond une fréquence f déterminée.

L'énergie potentielle électrique est donnée par :

$$E_{pot} = -\frac{k \cdot e^2}{r}$$

et l'énergie cinétique de l'électron vaut :

$$E_{cin} = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{k \cdot e^2}{2 \cdot r}$$

L'énergie totale (somme de l'énergie potentielle et de l'énergie cinétique) est égale à :

$$E = -\frac{k \cdot e^2}{2 \cdot r}$$

Les fréquences de l'hydrogène calculées de cette façon coïncident avec les valeurs déterminées par l'observation directe du spectre. Le modèle de Bohr commença par rencontrer un vif succès, d'autant plus que les niveaux d'énergie des états stationnaires furent mis en évidence expérimentalement par James Franck (1882-1964) et Gustav Hertz (1887-1975) à la fin de l'année 1913. Mais ce modèle ne tarda pas à rencontrer des difficultés, notamment par l'observation plus détaillée des spectres et de l'effet d'un champ magnétique sur ces spectres (effet Zeeman). Plusieurs essais d'adaptation du modèle de Bohr furent tentés, mais la nécessité d'une théorie plus générale devint de plus en plus flagrante.

Cette théorie générale est la « mécanique quantique » qui fut élaborée durant les années 1920. Parmi ses fondateurs, on peut citer Louis de Broglie (1892-1987), Erwin Schrödinger (1887-1961), Werner Heisenberg (1901-1976) et Max Born (1882-1970). La mécanique quantique est le cadre théorique actuel de tous les phénomènes du domaine de l'infiniment petit. Elle modifie radicalement l'image de l'atome en lui attribuant des propriétés tout à fait inhabituelles défiant l'intuition car elles n'ont pas d'équivalent classique. Ainsi, d'après L. de Broglie, les électrons présentent à la fois un aspect de particule et un aspect ondulatoire (dualité onde - corpuscule). De plus, George Eugène Uhlenbeck (1900-1988) et Samuel Goudsmit (1902-1978) leur attribuent un « spin », sorte de rotation sur eux-mêmes. La mécanique quantique donne une image floue de l'atome, la notion de trajectoire n'ayant plus de sens : les orbites stationnaires du modèle de Bohr sont remplacées par les « orbitales » représentant la probabilité de trouver un électron dans une région définie autour du noyau. Il existe des orbitales de formes différentes, définies par un « jeu » de trois « nombres quantiques » notés n , ℓ et m . Selon le « principe d'exclusion » de Wolfgang Pauli (1900-1958), deux électrons du même atome ne peuvent pas se trouver dans le même état. Autrement dit, il n'est pas possible d'y trouver deux électrons ayant le même « jeu » des quatre nombres quantiques : n , ℓ , m et s . Si les trois premiers définissent l'orbitale, le nombre s représente le spin de l'électron qui ne peut prendre que deux valeurs ($s = +1/2$ ou $s = -1/2$). Dans une même orbitale ne peuvent donc coexister que deux électrons qui se différencient par leur spin.

Le schéma ci-dessous représente les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène :



Un électron qui se trouve sur l'orbite fondamentale ne rayonne pas d'énergie et l'atome est stable.



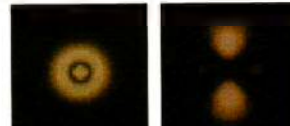
Si il recat de l'énergie, il peut « sauter » sur une orbite d'énergie supérieure (de la première à la deuxième, sur le schéma).



En retournant à son niveau initial, il émet un rayonnement de fréquence f donnée par :

$$E_2 - E_1 = h \cdot f$$

correspondant à l'une des raies du spectre.



Orbitale définie par $n = 1, \ell = 0, m = 0$ Orbitale définie par $n = 3, \ell = 2, m = 0$

Dans les orbitales représentées ci-dessus, la probabilité de trouver un électron est plus grande dans les parties claires que dans les parties sombres.

9 Les interactions

Tous les types de forces qui se manifestent dans la nature découlent de quatre forces ou interactions fondamentales : l'interaction gravitationnelle, l'interaction électromagnétique et les interactions nucléaires forte et faible.

- L'interaction gravitationnelle (voir « La force de pesanteur et l'interaction gravitationnelle » dans la partie « MÉCANIQUE ») désigne l'attraction entre deux corps. Elle dépend de leur masse et son intensité décroît avec le carré de la distance qui les sépare ; sa portée est infinie. Dans notre environnement quotidien, l'interaction gravitationnelle se manifeste par la chute des corps. C'est elle qui est responsable de la cohésion de toutes les grandes structures présentes dans le ciel : elle maintient la Terre et les autres planètes dans le système solaire, les étoiles dans les galaxies et les galaxies dans les amas de galaxies. La gravitation est à l'origine de la naissance des étoiles. A l'échelle des atomes et des particules, son effet est si petit qu'on le néglige. La première théorie de la gravitation est due à Isaac Newton (1642-1727) ; la théorie la plus récente est celle de la « relativité générale » d'Einstein.
- L'interaction électromagnétique (voir « L'interaction électrique » dans la partie « ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME ») désigne notamment l'attraction ou la répulsion entre deux corps chargés électriquement. L'interaction électromagnétique entre les protons et les électrons assure la cohésion de l'atome. Comme l'interaction gravitationnelle, son intensité décroît avec le carré de la distance entre les charges et sa portée est infinie. L'interaction électromagnétique est à l'origine de phénomènes aussi divers que la lumière ou les réactions chimiques ; elle est décrite par la théorie de Maxwell.
- Pour expliquer la cohésion du noyau de l'atome (qui devrait éclater sous le seul effet de la répulsion électromagnétique entre ses protons positifs), il est nécessaire d'introduire une troisième force : l'interaction nucléaire forte, indépendante de la charge électrique, agissant indifféremment sur les protons et sur les neutrons. Cette force d'attraction entre les protons et les neutrons du noyau est à courte portée ; elle agit aussi sur d'autres particules que les nucléons.

– L'interaction nucléaire faible est une force de portée encore plus courte que l'interaction forte; son intensité est moindre. Elle ne joue pas de rôle dans la cohésion de la matière, mais intervient dans certains processus de désintégrations comme la désintégration radioactive β par exemple.

Dans les théories modernes, on interprète l'interaction entre deux particules par l'échange, entre elles, d'une autre particule qui joue le rôle de « messenger ». A chaque type d'interaction correspond une ou plusieurs particules « messagères ». Ainsi, la répulsion électromagnétique entre deux électrons revient à l'échange entre eux d'un photon dit virtuel.

L'interaction gravitationnelle résulterait de l'échange d'une particule hypothétique: le graviton, dont on n'a pas encore trouvé le moindre indice de son existence.

Si, dans l'univers actuel, les quatre interactions fondamentales sont différenciées, les physiciens théoriciens pensent que cela n'a pas toujours été le cas. Ils imaginent qu'à ses tout premiers instants, l'Univers, minuscule, extrêmement dense et extrêmement chaud, était le théâtre d'une seule « superforce ». Sous l'effet de la diminution de température résultant de l'expansion de l'Univers, la « superforce » aurait rapidement pris les formes différenciées que l'on connaît actuellement. Dans ce scénario, l'interaction gravitationnelle a été la première à se distinguer dans sa forme actuelle (dès que la température a passé au-dessous de 10^{32} K). L'interaction forte s'est distinguée ensuite (dès que la température a passé au-dessous de 10^{27} K) et finalement les interactions faible et électromagnétique (dès que la température a passé au-dessous de 10^{16} K).

Un des grands défis de la physique moderne est de réunir dans une même théorie les différentes formes d'interaction: on parle de théories d'unification. Sheldon Glashow, Steven Weinberg et Abdus Salam ont déjà élaboré une théorie d'unification de l'interaction électromagnétique et de l'interaction faible. Cette théorie de l'interaction « électrofaible » a reçu une confirmation expérimentale au CERN en 1983, dans un accélérateur reproduisant les conditions d'énergie régnant dans l'univers, lorsque sa température était de 10^{16} K. L'étape suivante est de réunir l'interaction électrofaible et l'interaction forte dans une théorie de « grande unification ». Quant à l'unification complète de toutes les interactions dans une « théorie du tout », elle n'en est qu'au stade des spéculations.

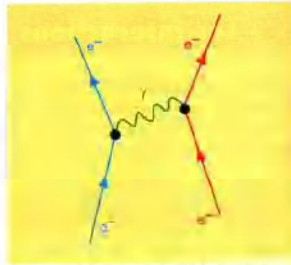
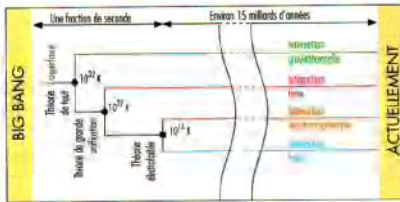


Diagramme de Feynman représentant l'interaction électromagnétique entre deux électrons par échange d'un photon dit « virtuel » noté γ .



Les interactions fondamentales.

10 Les moyens techniques

On étudie expérimentalement le domaine de l'infiniment petit en réalisant des collisions entre des particules utilisées comme projectiles sur d'autres particules utilisées comme cible, comme l'avait fait Rutherford lors de la découverte du noyau de l'atome. Conformément au principe d'équivalence entre la masse et l'énergie établi par Einstein selon l'équation célèbre: $E = m \cdot c^2$, il est possible d'obtenir dans ces collisions de nouvelles particules, à condition de disposer d'une quantité d'énergie suffisante durant le choc. De la matière, sous la forme de nouvelles particules, est ainsi créée à partir de l'énergie mise en jeu lors de la collision. Dans les débuts de la physique des particules, plusieurs découvertes ont été faites par l'observation des rayons cosmiques, essentiellement des protons éjectés à grande vitesse par le Soleil, qui créent des particules secondaires lorsqu'ils entrent en collision avec les particules de l'atmosphère.

Pour créer des chocs de plus d'énergie, on a recouru à des accélérateurs de particules. Dans un accélérateur, des particules chargées sont accélérées par un champ électrique. Dans le cyclotron inventé en 1930 par E. Lawrence (1901–1958), la trajectoire des particules est incurvée par l'application d'un champ magnétique, leur permettant alors de passer plusieurs fois dans le même champ électrique et d'augmenter leur énergie cinétique à chaque passage (voir « Électromagnétisme » dans la partie « ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME »). Dans les accélérateurs actuels, comme ceux du « Centre européen de recherche nucléaire » (CERN), pour disposer d'encore plus d'énergie, on fait tourner en sens inverses deux faisceaux de particules de charges électriques opposées, dans des grands anneaux; lorsqu'ils ont acquis une vitesse suffisante, ces faisceaux sont envoyés l'un contre l'autre.

Les particules créées lors d'une collision sont mises en évidence dans des détecteurs; on peut ainsi observer quelles sont les désintégrations qui se produisent, analyser les caractéristiques des nouvelles particules formées et tester ainsi la validité d'une théorie. Les premiers détecteurs utilisés étaient des chambres à bulle. Dans ces détecteurs, la trajectoire d'une particule est rendue visible par la trace de fines gouttelettes laissées sur son passage. Les détecteurs actuels sont de très grandes machines qui utilisent les performances de l'électronique et de l'informatique pour reconstituer les événements qui s'y produisent.



Traces d'électrons dans une chambre à bulles.



Le détecteur DELPHI du CERN.



Reconstitution d'un événement dans un détecteur.

11 La découverte de nouvelles particules

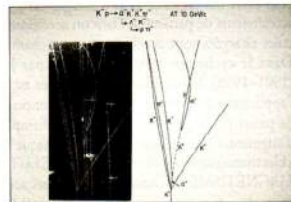
L'idée que défendent les physiciens du XX^e siècle est que la matière est formée à partir d'un petit nombre de constituants: les particules élémentaires. Une particule est dite élémentaire si elle n'est pas, elle-même, formée de constituants plus petits. Ce n'est donc pas le cas de l'atome puisqu'il est formé de protons, de neutrons et d'électrons. La question est de savoir si ces dernières particules sont élémentaires et s'il en existe d'autres.

Durant la seconde moitié du XX^e siècle, on découvrit de nombreuses particules nouvelles. L'histoire de leur découverte est un chassé-croisé permanent entre théorie et expériences: l'existence de certaines d'entre elles fut d'abord prédite théoriquement, puis confirmée ultérieurement par des expériences adéquates, alors que d'autres ont d'abord été observées expérimentalement, puis incluses ensuite dans les théories.

En 1928, Paul Dirac (1902–1984) introduit la relativité dans la mécanique quantique et développe une théorie qui prédit l'existence d'« antiparticules ». Il s'agit de particules de même masse que les particules « ordinaires », mais de charges opposées: l'antiparticule de l'électron, par exemple, est le positron, « version » positive de l'électron; l'antiproton, négatif, ne porte pas de nom particulier. La première observation d'un positron, par Carl Anderson, en 1932, confirma à la fois son existence et la théorie de Dirac.

Lorsqu'une particule rencontre son antiparticule, elles s'annihilent pour se transformer en énergie, émise sous forme de photons. A l'inverse, dans certaines conditions, il arrive que des photons (« paquets » d'énergie) se matérialisent en une paire formée d'un électron et d'un positron. Le monde dans lequel nous vivons est fait de matière « ordinaire », composée de particules et pas d'antiparticules.

L'existence des neutrinos (ν) fut aussi prédite théoriquement; elle fut postulée en 1930 par W. Pauli pour expliquer une énigme posée par la désintégration radioactive β . Lors d'une telle réaction, on observe la désintégration d'un neutron en un proton et un électron. Or, l'analyse brute de cette situation montre que l'énergie n'est pas conservée, remettant en cause l'un des plus solides piliers théoriques de la physique. W. Pauli émit l'hypothèse que l'énergie manquante est emportée par une nouvelle particule, indétectable et créée lors de la désintégration, en plus du



Trace d'une particule Ω^- dans une chambre à bulles du CERN (1975).

Lors de la désintégration β^- , un neutron (n) du noyau de l'atome radioactif se désintègre en un proton (p), un électron (e^-) et un antineutrino ($\bar{\nu}$):



L'antineutrino n'étant pas mis en évidence par le détecteur, l'énergie semblait non conservée par cette désintégration.

proton et de l'électron détectés: le « neutrino » (il s'agit en fait d'un antineutrino).

L'existence des neutrinos fut vérifiée expérimentalement en 1956. Ils ont une charge électrique nulle, une masse infime et ils interagissent très peu avec la matière; ils peuvent traverser la Terre de part en part sans laisser de trace de leur passage, ce qui rend leur détection très difficile bien qu'ils soient très abondants. On est convaincu actuellement qu'il existe trois familles de neutrinos (et autant d'antineutrinos), même si la troisième famille n'a pas encore été détectée.

D'autre part, l'étude des rayons cosmiques permit encore de découvrir d'autres particules comme les muons (μ) en 1937 et les pions (π) en 1946. Puis, l'utilisation d'accélérateurs de plus en plus performants et le perfectionnement des détecteurs, permirent la découverte d'une quantité embarrassante de nouvelles particules qui semblaient contredire l'idée d'un petit nombre de constituants ultimes de la matière.

12 La classification des particules

	PARTICULES			
	BOSONS (Messagères des interactions)		FERMIONS (Sources des interactions)	
	interaction gravitationnelle	interaction électromagnétique	interaction faible	interaction forte
	participe à l'interaction forte (et à d'autres interactions)			ne participe pas à l'interaction forte (mais à d'autres interactions)
composites				Hadrons Baryons neutron: n proton: p ...
élémentaires	graviton?	photon: γ	w^+ , w^- , z^0	gluons quarks: u, d, s, c, b, t électron: e muon: μ tauon: τ 3 neutrinos: ν

Les bosons et les fermions

Dans un premier niveau, les particules sont séparées en deux grandes catégories: les bosons et les fermions.

La catégorie des bosons rassemble les particules « messagères » des interactions fondamentales. A chaque type d'interaction

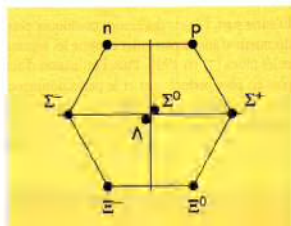
correspondent un ou plusieurs bosons : le photon (γ), « messenger » de l'interaction électromagnétique, est un exemple de boson.

Les autres, qui sont les particules « sources » des interactions, appartiennent à la catégorie des *fermions*; le neutron (n), le proton (p) et l'électron (e), par exemple, sont des fermions.

Les hadrons

Les particules qui participent à l'interaction forte, entre autres, le proton et le neutron, sont rassemblées dans la famille des *hadrons*. Cette famille contient une grande variété de particules. Parmi elles se trouvent des bosons (« messagers ») que l'on désigne sous le terme générique de *mésons* et des fermions (« sources ») que l'on désigne sous le terme de *baryons*. En 1961, Murray Gell-Mann et Yuval Ne'eman mirent de l'ordre dans la grande famille des hadrons: ils établirent une classification appelée « la voie octuple ». Selon cette classification, basée sur des propriétés de symétrie, les hadrons sont groupés par familles soit de 8, soit de 10 particules qui sont identiques du point de vue de l'interaction forte. Cette classification fut un succès car tous les hadrons connus à l'époque y trouvèrent leur place prévue par ce modèle. De plus, la découverte ultérieure (en 1964) d'un nouvel hadron (Ω) prévu par la « voie octuple » lui apporta une confirmation éclatante. En 1964, et indépendamment, Murray Gell-Mann et George Zweig proposent que les hadrons sont constitués de composants internes: les *quarks*. Les baryons sont formés de trois quarks et les mésons d'un quark et d'un antiquark.

Si l'interaction électromagnétique entre particules est due à leurs charges électriques, l'interaction entre quarks est due à un autre type de charge: leur charge de couleur. D'après la théorie actuelle, il existe 6 quarks (on dit 6 saveurs de quarks) en trois versions colorées: bleu, rouge ou vert. Ces couleurs n'ont bien sûr rien à voir avec les couleurs au sens habituel du terme si ce n'est une certaine analogie dans la manière dont elles se combinent. Les quarks n'existent pas à l'état isolé: ils sont toujours confinés par l'interaction forte pour former les hadrons. La théorie de l'interaction entre quarks est nommée « chromodynamique quantique »; selon cette théorie, il existe 8 bosons d'interaction forte entre quarks: les gluons. Les quarks et les gluons sont des particules élémentaires. L'interaction entre baryons résulte de l'interaction entre les quarks qu'ils contiennent.



L'octet de baryons dans lequel figurent le neutron (n) et le proton (p).

Les leptons

Les fermions qui ne participent pas à l'interaction forte constituent la famille des *leptons* comprenant 6 membres: l'électron (e), le muon (μ), le tauon (τ) et trois neutrinos (ν): ce sont des particules élémentaires.

13 Les désintégrations

Si le proton et l'électron sont des exemples de particules stables, la majorité d'entre elles sont instables. Après une très courte durée de vie, elles se désintègrent: leur masse se convertit en énergie selon la célèbre formule d'Einstein: $E = m \cdot c^2$ où m est la masse de la particule et c la vitesse de la lumière dans le vide. Selon le processus inverse, cette énergie est « utilisée » à la création de nouvelles particules, dont certaines sont instables et se désintègrent à leur tour. On assiste alors à une cascade de désintégrations successives dont il ne subsiste que les particules stables créées à chaque étape.

Tout comme il existe une grande variété de réactions chimiques possibles, il existe aussi une grande variété de désintégrations de particules. A partir de l'analyse de ces désintégrations, la tâche des physiciens est d'en établir les règles. De façon générale, elles sont formulées en termes de lois de conservation. Ainsi, on constate que la charge électrique est toujours conservée par une désintégration. Cela signifie que la somme algébrique des charges électriques des particules produites lors de la désintégration est égale à la charge électrique de la particule initiale.

L'énergie est aussi conservée. Comme de nouvelles particules sont produites à partir de l'énergie de la particule initiale ($E = m \cdot c^2$), cela revient à dire que la somme des masses des particules créées est toujours inférieure à la masse de la particule de départ; la différence se retrouve dans l'énergie cinétique des particules créées et l'énergie totale est conservée. Les désintégrations satisfont aussi la conservation de la quantité de mouvement et du moment cinétique.

Les quatre lois classiques de conservation ne sont toutefois pas suffisantes pour rendre compte de toutes les observations.

La conservation de la charge électrique

Considérons la désintégration d'un neutron (n) en un proton (p), un électron (e) et un antineutrino ($\bar{\nu}$):



La charge électrique initiale est celle du neutron; elle est nulle.

Après la désintégration, la charge électrique positive du proton compense la charge négative de l'électron alors que la charge électrique de l'antineutrino est nulle, la charge électrique finale est nulle.

Carte d'identité du proton

Nom:	proton
Abréviation:	p
Masse au repos:	$1,67262 \cdot 10^{-27}$ kg
Nombres quantiques	
Charge électrique:	+1
Spin:	1/2
Etrangeté:	0
Nombre baryonique:	+1
Nombre leptonique:	0
Isospin:	1/2

Pour y parvenir, il est nécessaire d'associer aux particules de nouvelles caractéristiques, sans équivalent classique, comme le « spin », l'« étrangeté », le « nombre baryonique » ou le « nombre leptonique ». Ces caractéristiques s'expriment par des nombres (nombres quantiques) associés à chaque particule et établissent leur « carte d'identité ». Les désintégrations auxquelles participent les particules satisfont (dans la plupart des cas) la conservation de ces quantités.

Carte d'identité du neutron

Nom:	neutron
Abréviation:	n
Masse au repos:	$1,67493 \cdot 10^{-27}$ kg
Nombres quantiques	
Charge électrique:	+0
Spin:	1/2
Etrangeté:	0
Nombre baryonique:	+1
Nombre leptonique:	0
Isospin:	1/2

14 Les particules élémentaires

Selon la théorie actuelle, il existe un petit nombre de particules élémentaires: les bosons « messagers » de forces, 6 quarks et 6 leptons ainsi que leurs antiparticules. Les quarks et les leptons sont groupés en trois générations; toute la matière stable dans l'univers est composée des particules de la première génération.

Carte d'identité de l'électron

Nom:	électron
Abréviation:	e ⁻
Masse au repos:	$9,10939 \cdot 10^{-31}$ kg
Nombres quantiques	
Charge électrique:	-1
Spin:	1/2
Etrangeté:	0
Nombre baryonique:	0
Nombre leptonique:	+1

BOSONS	
Interaction électromagnétique	photon γ
Interaction forte	8 gluons
Interaction faible	W^+, W^-, Z^0

	FERMIONS			
	Leptons		Quarks	
Première génération	Electron	e ⁻	Up	u
	Neutrino de l'électron	ν_e	Down	d
Deuxième génération	Muon	μ	Charm	c
	Neutrino du muon	ν_μ	Strange	s
Troisième génération	Tauon	τ	Top	t
	Neutrino du tauon	ν_τ	Bottom	b