

## Chimie et nature<sup>(1)</sup>

par **Robert WOLF**

Directeur de recherche au CNRS  
Université Paul Sabatier - 31062 Toulouse Cedex 4

### RÉSUMÉ

*Cet article tente de broser en un récit unique l'histoire de la chimie et du vivant qui en émerge. Le tableau périodique sert à la fois d'outil de description et de fil directeur à une évocation de la découverte des principaux éléments chimiques, chaque fois mis en relation avec les phénomènes du vivant qui leur sont associés. Quelques points forts comme la découverte du phosphore, la compréhension de la combustion, l'utilisation de la spectroscopie permettent de comprendre comment on a pu aboutir à l'idée de la périodicité de la chimie et à la conception d'une même chimie pour tout l'Univers. Le dernier thème abordé dans l'article est la superbe aventure du vivant où sont évoqués l'unité du monde vivant qu'est la cellule et son incroyable degré de complexité ainsi que certains phénomènes à la frange de la chimie et du vivant comme les phénomènes d'auto assemblage.*

### D'EMPÉDOCLE À DÉMOCRITE

Les sociétés humaines ont un regard sur la nature qui dépend de leurs racines culturelles. Les nôtres se rattachent pour beaucoup au monde méditerranéen. Même si cette référence s'estompe sous nos yeux, des idées venues de loin, du monde grec en particulier, influencent encore notre manière d'appréhender notre environnement et la démarche scientifique en particulier.

Pour le philosophe grec EMPÉDOCLE (490-435 avant J.-C.) la Nature est formée de quatre éléments « le feu, l'eau, la terre et la hauteur infinie de l'air ». Le mélange de ces éléments, inspiré par les Dieux Polémos (la haine) et Eros (l'amour), donne tous les corps. Notre point de vue actuel est très différent, même si, par une curieuse intuition cette vision du monde rend bien compte des trois états de la matière : solide, liquide et gazeux, le feu apportant la notion d'énergie qui permet de passer d'un état à l'autre. Cette façon de lire la pensée grecque évoque assez bien la thermochimie [1]. Partant de cette définition de la nature, des alchimistes ont tenté de la démontrer par l'expérience. Ainsi Jean-Baptiste VON HELMONT (1579-1644), un médecin flamand de Bruxelles, fit

(1) **NDLR** : Cet article a été publié dans la revue de l'École Nationale Supérieure de Chimie de Toulouse (devenue actuellement l'ENSIACET).

bouillir de l'eau dans un alambic pendant des semaines pour obtenir finalement une poudre blanche dans son appareil. Il pensa avoir démontré le passage de l'eau à la terre. Bien plus tard, LAVOISIER (1743-1794) put réfuter cette affirmation par des pesées assez précises pour démontrer que la poudre blanche au fond du ballon, un silicate, se formait au détriment du poids de l'alambic. L'approche de VON HELMONT était scientifique en ce sens qu'elle mettait une théorie à l'épreuve de l'expérience. Trois anecdotes au sujet de ce protochimiste : nous lui devons le mot gaz, forgé à partir de *chaos* (en grec et en latin). Il choisit judicieusement les repères du thermomètre, la glace et l'eau bouillante ; enfin il eut l'idée généreuse mais un peu philosophale, de rechercher le médicament universel capable de guérir tous les maux.

Notre savoir augmentant, la science n'a pas retenu les dires d'EMPÉDOCLE.

De la même source culturelle, mais plus ancien, PYTHAGORE pense que les nombres « sont les éléments de toutes choses et le monde entier n'est qu'harmonie et arithmétique ». Ce point de vue se révélera fructueux pour concevoir la structure des atomes.

Enfin les deux intuitions de DÉMOCRITE (né vers 460 avant J.-C.) suggérant qu'à petite échelle il existe à la limite des grains de matière insécables, les atomes, et aussi que nous ne pouvons appréhender les choses que par des images, font partie intégrante de notre savoir actuel.

Présenter en un seul récit l'histoire de la chimie et du vivant qui en émerge, chaque progrès dans la connaissance de l'une modifiant le regard que nous avons sur l'autre, est une approche captivante qui correspond bien au thème proposé « Chimie et nature ». Bien des auteurs ont tenté de raconter ce fabuleux scénario qui va de l'explosion primordiale au foisonnement des êtres. Dans cette optique nous avons puisé dans quelques livres captivants qui font la part belle à la chimie (1, 2, 3). Cependant il faudrait être astrophysicien, astrochimiste, géologue et biologiste pour saisir toutes les facettes de cette approche. En tant que chimiste nous allons suivre un parcours abrégé entre ces spécialités qui ne nous sont pas familières.

## LE TABLEAU PÉRIODIQUE

Le chimiste est un pratiquant du tableau périodique, la charte fondatrice de notre science, la liste ordonnée de 90 types d'atomes tous présents dans la croûte terrestre. Nous savons que ce sont les composants ultimes de tout ce qui nous entoure. En d'autres termes, les analyses élémentaires de n'importe quoi : « une pierre, deux maisons, trois ruines, quatre fossoyeurs, un jardin, des fleurs, un raton laveur... », poussées jusqu'à l'ultime précision des méthodes actuelles, ne donneront jamais **que** les éléments figurant dans ce tableau. Cette classification des éléments s'est imposée en moins d'un siècle et demi (1790-1920). C'est en fouillant la mince pellicule de notre modeste planète, objet insignifiant dans un univers géant, que l'espèce humaine a su réaliser ce tour de force.

La nature et l'abondance des éléments de la croûte terrestre, continentale et mari-

time, pondérée suivant les lieux et les profondeurs, permet de proposer une composition chimique moyenne dans laquelle les 90 éléments chimiques sont présents (cf. tableau 1). Neuf d'entre eux représentent déjà plus de 99 % de l'abondance totale. C'est dire que les 81 éléments qui restent sont rares et leur pourcentage s'étend sur une dizaine d'ordres de grandeur de 0,1 % pour l'Hydrogène à  $3.10^{-10}$  % pour l'Iridium. Groupons les pourcentages de trois éléments associés au vivant l'hydrogène (0,15 %), le carbone (0,03 %) et l'azote (0,000025 %).

<b>Oxygène</b>	<b>Silicium</b>	<b>Aluminium</b>	<b>Fer</b>	<b>Calcium</b>
46,6 %	27,7 %	8,13 %	5,0 %	3,63 %
<b>Sodium</b>	<b>Potassium</b>	<b>Magnésium</b>	<b>Titane</b>	
2,83 %	2,59 %	2,09 %	0,44 %	

**Tableau 1 :** Analyse des éléments chimiques de la croûte terrestre.

En fait le tableau périodique comporte 92 éléments, mais deux d'entre eux : le technétium (n° 43) et le prométhium (n° 61, un lanthanide), sont instables, et absents de l'écorce terrestre. Ils sont seulement accessibles en utilisant les énormes machines construites par les physiciens, qui permettent aussi d'atteindre la longue famille des transuraniens. La croûte terrestre avec une densité moyenne de 2,8 t/m<sup>3</sup>, n'est pas typique de la constitution de la Terre qui est beaucoup plus dense (5,5 t/m<sup>3</sup>). Un noyau de fer d'un rayon de 3300 km, solide en son centre est au cœur de notre planète, dont le rayon est de 6700 km, laquelle planète est née il y a environ 4,6 milliards d'années. Si nous rapprochons ces analyses de celles d'un être vivant : un humain ou un raton laveur (cf. tableau 2), on constate que le vivant sélectionne les éléments chimiques de la croûte terrestre pour se bâtir. L'hydrogène y est 60 fois plus abondant, le carbone 600 fois, tandis que pour l'azote le facteur est supérieur à 100 000. À l'inverse, le silicium et l'aluminium qui représentent plus du tiers de la croûte terrestre interviennent modestement dans la biochimie des êtres (un peu pour Si, pas du tout pour Al). Pour être complet avec les analyses, celle des océans est sans surprise, essentiellement de l'eau et du chlorure de sodium et, au moins à l'état de traces, tous les éléments de la classification périodique (O : 85,8 % ; H : 10,7 % ; Cl : 2,07 % ; Na : 1,9 % et Fe :  $10^{-6}$  %).

<b>Oxygène</b>	<b>Carbone</b>	<b>Hydrogène</b>	<b>Azote</b>	<b>Calcium</b>	<b>Phosphore</b>
65,0 %	18,5 %	9,5 %	3,3 %	1,5 %	1,0 %
<b>Potassium</b>	<b>Soufre</b>	<b>Chlore</b>	<b>Sodium</b>	<b>Magnésium</b>	
0,4 %	0,3 %	0,2 %	0,2 %	0,1 %	

**Tableau 2 :** Analyse des éléments chimiques d'un humain ou d'un raton laveur.

L'atmosphère contient 78,08 % d'azote, 20,95 % d'oxygène, 0,93 % d'argon et 0,03 % de dioxyde de carbone. Ce dernier, malgré son faible pourcentage constitue la source du carbone utilisé par les organismes photosynthétiques.

## AVANT LA « CHYMIE »...

Cette orthographe nous permet de désigner la longue marche qui commence pour l'humanité avec la maîtrise du feu jusqu'au milieu du XVII<sup>e</sup> siècle. Pendant cette longue période, de 300 000 ans au moins, des individus proches de nous, les ancêtres de l'homme contemporain, ont collecté et utilisé des matériaux et objets remarquables par leur dureté, leur brillant, leur beauté, leur densité... du silex à l'or en passant par les coquillages. Un oiseau ne fait pas autrement quand il ramasse près d'une écurie le crin de cheval pour tresser son nid. La grande différence est que nous avons fini par en prendre conscience et accumuler les fruits de notre démarche. Quelques-uns des matériaux collectés furent, par hasard, pratiquement constitués d'une même espèce d'atomes. Quel fut le premier élément découvert ? Les chimistes restent souvent perplexes devant cette question, puis « bon sang, mais c'est bien sûr » constatent que la réponse est évidente. À l'occasion nous avons dû surveiller une cuisson alimentaire. Plongé dans la lecture, c'est une odeur de brûlé nous a rappelé la consigne. Par négligence, nous venions de redécouvrir le carbone, intimement lié à la maîtrise du feu. La découverte du carbone est donc très lointaine. Le charbon de bois ne fut certainement pas considéré comme un élément chimique mais comme un matériau utile pour réaliser d'autres découvertes au moyen du feu : terre cuite, vitrification du sable, métallurgie du fer... puisque l'affinité du carbone pour l'oxygène est plus grande que celle du fer contenu dans la limonite (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) qui, fortuitement, se trouvait présente. Vers 1600, les matériaux connus qui se révéleront être des éléments chimiques sont près d'une quinzaine. Cette liste de onze métaux et deux métalloïdes (d'après [4]), reflète assez bien la classification périodique qui compte 67 métaux et métalloïdes. Aucun élément gazeux n'est connu : azote, oxygène... et encore moins les gaz rares.

C'est encore la pratique du feu qui a permis de découvrir les métallurgies du plomb et du cuivre qui furent développées à grande échelle pour le plomb à l'époque romaine, pour le cuivre en Chine au tournant des années 1000. La pollution de l'atmosphère qui en résulta est attestée par l'analyse des carottes de glace du Groenland.

Préhistoire		Vers 5000 av. J.-C.	Vers 3000 av. J.-C.		Vers 2500 av. J.-C.	Vers 2100 av. J.-C.
Carbone	Soufre	Cuivre	Or	Argent	Fer	Étain
Vers 1600 av. J.-C.	Vers 1500 av. J.-C.	Vers 1000 av. J.-C.	Vers 1250	Avant 1500	Vers 1500	
Antimoine	Mercure	Plomb	Arsenic	Zinc	Bismuth	

**Tableau 3 :** Les premiers « éléments chimiques ».

C'est la fluorescence atomique par excitation laser qui permet de déceler jusqu'à 10<sup>-13</sup> mg de Pb dans 1 gramme de glace ! Le plomb ne semble avoir aucun rôle biologique, cependant chacun de nous en contient une centaine de mg principalement dans les os. Ce doit être un seuil inévitable et supportable : au-delà, les sels de plomb sont toxiques et conduisent au saturnisme. Nous dirons davantage sur le fer et le cuivre après la découverte de la combustion.

## UNE LUMINESCENCE EN 1669

À la fin des années 1600 les alchimistes sont si actifs (cf. figure 1, [5]) que le hasard ne pouvait que les récompenser, et c'est ce qu'il fit avec la découverte du phosphore : en 1669, au départ d'un projet alchimique relevant de la pierre philosophale, un commerçant ruiné de Hambourg, Henning BRANDT, pyrolyse de l'urine concentrée à la température la plus haute possible, espérant se rapprocher de l'or. Ce faisant, il réalise sans le savoir la réduction des phosphates de l'urine par le charbon provenant des matières organiques de celle-ci, conjointement sans doute à la poudre de corne et autres matières ajoutées à dessein. Il obtient ainsi le phosphore moléculaire  $P_4$ , qui en s'oxydant dans l'air raréfié de l'alambic donne une surprenante luminescence. Le nom de l'élément, phosphore (qui porte la lumière) lui est attribué. La chimie de l'événement ne pouvait être comprise mais l'étonnement fut général et les Cours d'Europe invitèrent les protochimistes à répéter en public cette fascinante expérience. La découverte aiguïsa les curiosités et suggéra des initiatives intéressées, jusqu'à proposer le phosphore « miraculeux » comme médicament. L'élément étant toxique, le remède fut pour quelques malades une pilule sans lendemain. Pour la même raison, les prestidigitateurs aux mains illuminées abandonnèrent vite leur effet de scène. Le nom de H. BRANDT nous est resté, et cela deviendra une habitude : pour chaque élément, on retiendra le nom du découvreur, quelquefois plusieurs, associés ou en compétition.

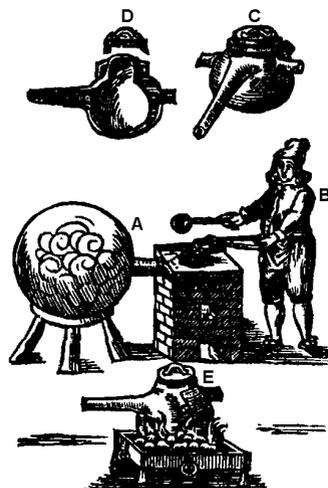


Figure 1 : J. R. Glauber  
« Philosophische Öfen » - 1652.

Dans le siècle qui suit, la curiosité des protochimistes désirant retrouver cette extraordinaire lumière, leur permet d'entrevoir le fait que le phosphore est présent chez les êtres vivants. Dans l'un des tous premiers dictionnaires de chimie en français [6], sinon le premier (celui de P. MACQUER (1718-1784), édition de 1766) on lit au sujet de l'acide phosphorique : « *M. Margraf s'est assuré que beaucoup de matières végétales, et particulièrement les graines contiennent assez de cet acide pour produire du phosphore...* Ainsi il y a tout lieu de croire que cet acide se forme dans les règnes végétal & animal, & qu'il passe du premier dans le second ».

Nous savons maintenant que cette remarque est judicieuse. Les esters et anhydrides de l'acide phosphorique,  $H_3PO_4$ , sont essentiels dans le monde vivant. Dans l'enchaînement des nucléosides, l'acide est présent sous forme de **diesters phosphoriques** (cf. figure 2), comme dans l'ADN (Acide desoxyribonucléique) ou l'ARN (Acide ribonucléique). Au pH physiologique, les fonctions esters

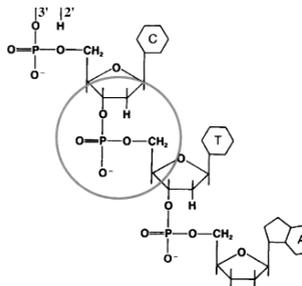


Figure 2

sont protégées de l'hydrolyse par la charge anionique résiduelle conservée sur le motif phosphorique. Les réservoirs principaux de l'énergie biochimique sont aussi des dérivés phosphorés : l'adénosine triphosphate ou ATP, le phosphate de créatine, le phosphoénol pyruvate... Les phosphates contrôlent l'activité enzymatique et l'adénosine mono phosphate cyclique (AMPC) joue un rôle essentiel de communication chimique à l'intérieur de la cellule, prenant le relais de stimuli reçus sur la surface membranaire (second messenger). **En bref, le vivant n'a pas trouvé de remplaçants aux esters et anhydrides phosphoriques.**

Les organismes les plus simples apparus dans les conditions primitives ont exigé pour se développer six éléments essentiels : C, H, N, O, P, S, accompagnés d'une dizaine d'autres dits « inorganiques » (adjectif qui ne convient pas dans ce cas particulier) : Na, K, Mg, Ca, Fe, Mo, W, Se, Cl, Ni, Co... Le vivant ne peut pas remplacer, au moins sur le court terme, un élément par un autre ou suppléer à la carence de quelques-uns. Ceci implique que le développement s'arrête quand l'un ou plusieurs de ceux-ci manquent ; le phosphore avec l'azote et le potassium sont les trois éléments limitants, le premier plus fréquemment que les deux autres.

On peut illustrer cette remarque. Dans les océans la concentration des phosphates en surface est de l'ordre de 0,2 à 0,5 micromole par litre et augmente avec la profondeur jusqu'à atteindre des valeurs de 20 à 50 fois plus grandes. La partie de la mer qui reçoit le plus de lumière, les quelques centaines de premiers mètres est la moins riche en phosphore. La biosphère océane est moins prolifique que celle des zones continentales. Une particularité existe cependant : des courants ascendants remontent en surface les eaux profondes riches en phosphates, particulièrement dans les zones des plateaux continentaux qui en conséquence deviennent riches en poissons (Centre et Côtes du Pacifique, Groenland, Antarctique...). On estime que la moitié des pêches mondiales est réalisée sur 0,1 % de la surface des mers. Même s'il faut lire ces chiffres avec prudence tant le nombre de facteurs est grand, il est certain que l'une des causes essentielles de la faible productivité en biomasse de grandes zones océaniques vient de la mauvaise circulation des phosphates dans la biosphère.

Chimiquement, le « goulet phosphore » qui limite le développement de la vie se comprend bien. Contrairement au carbone, à l'hydrogène, à l'azote et à l'oxygène, qui circulent facilement dans l'atmosphère et l'hydrosphère terrestres sous forme gazeuse ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ), le phosphore n'a pas de dérivé gazeux non toxique ; il circule donc mal tout en étant irremplaçable. À ce sujet un correspondant (R. J. P. WILLIAMS [1]) m'a fait remarquer que les requins ont des dents en phosphates... mais un squelette en collagène !

L'agriculture géante de notre temps, qui couple la mécanisation à l'utilisation d'engrais à une échelle jamais atteinte, illustre inversement le fait que la connaissance des éléments manquants, les phosphates en particulier, apportés massivement, a permis sur une centaine d'années, de diminuer de beaucoup la population attachée à la terre pour assurer la nourriture des hommes. Or, le nombre de ceux-ci, qui s'est situé pendant mille ans sur un palier entre 500 millions et un milliard d'individus, vient de tripler en moins d'un siècle (vers 6 milliards actuellement).

## ...ET PENDANT LE SIÈCLE QUI A SUIVI 1669

De la découverte du phosphore à 1770, cinq éléments nouveaux sont découverts : le platine, le cobalt et le nickel, le magnésium et l'hydrogène, tous importants, fruits d'une inlassable curiosité et d'expériences innombrables, mais sans disposer vraiment d'un fil conducteur pour les isoler.

Le platine, le petit argent, est découvert à l'état natif dans l'Amérique espagnole, en particulier dans les mines de Santa Fé et celles du baillage de Choco au Pérou. Il est assez facilement caractérisé par sa densité, plus élevée que celle de l'or (21,45 t/m<sup>3</sup>) et surtout son étonnant point de fusion (2045 K), température difficilement accessible avec les techniques du temps.

Autre progrès, la découverte du cobalt. Nous savons notre fascination pour les couleurs, le bleu des vitraux fait notre admiration. En savoir plus sur les « terres de Cobalt » utilisées dans la vitrification a conduit à caractériser ce métal avant d'autres. La suite des connaissances scientifiques sur le vivant, nous apprendra que le cobalt joue un rôle essentiel. Ce sont les maladies de carence des moutons australiens vers 1930 qui nous ont mis sur la piste de l'importance de ce métal. Il est présent dans la vitamine B12 laquelle est synthétisée par les bactéries de l'intestin et intervient dans une quinzaine de réactions biochimiques. En alimentation animale il a été nécessaire d'apporter des compléments de cobalt directement sous la forme de la vitamine. Celle-ci se prépare dans des fermenteurs géants pour lesquels la sélection des bactéries à utiliser et le choix des nourritures posent des problèmes de recherche industrielle difficiles et intéressants. La faible abondance du cobalt dans les nourritures accessibles oblige les animaux à l'économiser, par exemple en le recyclant. Pour cette raison le lapin est coprophage (il mange ses crottes). Un ami du CNRS (Centre national de la recherche scientifique), « Titi » LESTEL, ingénieur en audiovisuel, a été chargé de cinématographier les lapins, la nuit et à leur insu, dans leur activité de récupération. En fait ceux qui furent étudiés étaient délicats et ne consommaient que les crottes prises directement à l'anus, et non pas celles tombées dans la paille.

## PHLOGISTIQUE, COMBUSTION ET GLOBULES ROUGES

Les protochimistes ont eu de grandes difficultés pour comprendre la combustion. Dans celle-ci l'oxygène gazeux n'est pas visible, la matière qui brûle semble disparaître, la flamme est observée : autant de facteurs déroutants pour saisir la chimie qui intervient. Pour en sortir, un concept original est proposé, le phlogistique : « *le principe inflammable le plus pur & le plus simple* ». Il est basé sur l'observation suivante : « *certains corps exposés à l'action du feu avec le concours de l'air prennent feu eux-mêmes, **produisent de la flamme**, augmentent par conséquent le feu, lui servent d'aliment, alors que d'autres dans les mêmes conditions deviennent rouges et lumineux mais **sans produire de flamme** par eux même, cessent d'être chauds et lumineux quand on cesse de leur appliquer un feu extérieur : les premiers sont des corps combustibles les autres incombustibles* » [6].

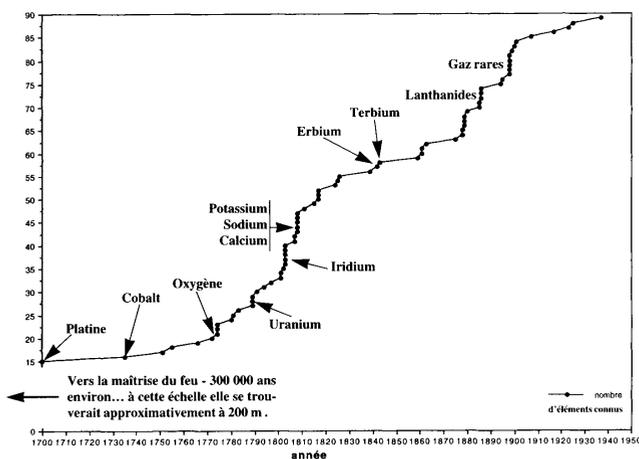


Figure 3 : Quelques-uns des éléments évoqués dans le texte.

Produire de la flamme étant pris comme un critère le phlogistique ne pouvait pas permettre de comprendre l'oxydation. Dans la tradition de l'humour anglais, ce fut un pasteur, PRIESTLEY (1733-1804), ardent défenseur du phlogistique et admirateur de la révolution française, qui découvrit en 1774, l'air « déphlogistiqué », qui deviendra l'oxygène (indépendamment avec C. W. SCHELLE à Uppsala en Suède).

La même année, Antoine Laurent de LAVOISIER fit progresser de façon décisive notre compréhension de la combustion. La disparition apparente de la matière dans la flamme n'est qu'une illusion. La flamme, visible certes, ne représente que la combustion incandescente de produits gazeux, mais non pas les réactions chimiques complexes qui interviennent avec le composant invisible de l'air, qu'il appellera plus tard l'oxygène, générateur d'acide. L'oxygène réagit chimiquement avec la matière pour donner de la chaleur (réaction exothermique) et les divers produits résultant de l'oxydation. Les combustions entretenues de l'hydrogène ou du graphite pourront donner chacune une flamme, pourtant les réactions chimiques qui interviennent n'ont rien de commun. Cette définition portait en elle la compréhension de la combustion sans flamme dans le vivant. Des mesures calorimétriques effectuées sur le cochon d'Inde par LAPLACE (1749-1827) et LAVOISIER permirent à ce dernier d'affirmer : « *La respiration est aussi une combustion, très lente il est vrai, mais parfaitement similaire à celle du charbon. Elle s'effectue à l'intérieur des poumons sans dégagement visible de lumière car la matière du feu qui se libère est immédiatement absorbée par l'humidité de ces organes.* »

Un autre progrès remarquable apporté par LAVOISIER concerne la définition de ce que devrait être un élément chimique : « *Toute substance que nous n'avons encore pu décomposer par aucun moyen est pour nous un élément.* ». La découverte de nouveaux éléments chimiques reçoit alors une étonnante impulsion : le tiers de la classification périodique est construit en un demi-siècle (1789-1843).

L'histoire du phlogistique est exemplaire, elle montre que le langage est amené à désigner tout phénomène « naturel » bien avant d'en comprendre la signification. Le monde contemporain, en ce sens, contient des phlogistiques : donnons en un seul exemple entre chimie et nature. Pour les messieurs surtout, la conduite de la mante religieuse qui mange son dernier mari n'a pas bonne presse, pas plus que le cannibalisme des têtards de certains batraciens. Aujourd'hui, les biologistes nous apprennent que ces observations sont à corrélérer aux manques de ressources alimentaires. Ils ont même pu montrer que les têtards ne se mangent pas statistiquement les uns les autres, mais que les lignées frères et cousines, reconnues par communication chimique, sont dans une certaine mesure préservées ! Plus encore, la conduite cannibale des espèces d'oiseaux étudiées apparaît avec le manque de certaines nourritures. Le phénomène serait donc naturel et lié à des carences empêchant un développement normal. Des historiens associés aux biologistes nous diront un jour si les carnages dans les sociétés humaines, du monde précolombien à l'Afrique contemporaine, contiennent des commandes qui mènent à la « férocité » en débordant celles qui nous en préservent. Une approche pour que ces drames ne soient pas sans remède ?



Figure 4 : Du monde précolombien...

Laissons le phlogistique pour revenir à Lavoisier. Celui-ci eut été certainement intéressé d'apprendre comment, chez un animal, l'oxygène est véhiculé vers son site d'utilisation. Les biologistes nous apportent des réponses détaillées : venant des poumons par la respiration le dioxygène est associé à un atome de fer dans l'hème de l'hémoglobine, transporté par le flux sanguin vers les cellules consommatrices.

Pour un chimiste, il y a un plaisir insolite à associer la découverte du fer par les humains (vers 5000 ans avant J.-C.) aux 3 g du même métal, sélectionnés par le vivant, et qui véhiculent chez un humain le comburant qui permet de brûler les aliments et de réaliser la synthèse de l'adénosine triphosphate, source d'énergie de nos machines. Ce procédé s'est mis en place sur quelques dizaines de millions d'années. Dans un stade de cent mille spectateurs, 300 kg de fer remplissent ce rôle avec une fiabilité quasi parfaite, telle qu'aucun spectateur ne s'en soucie, tout occupé qu'il est par un désir : celui de voir un but marqué. La foule se divise alors en deux parts (le signataire dans l'une d'elles), et laisse exploser sa joie ou retient sa tristesse sous la commande de quelque(s) molécule(s) spécifiques appartenant à la biologie des passions. La même remarque vaut pour les 500 millions de téléspectateurs qui, nous dit-on, regarderont la finale du Mondial de 1998. Mais comme la Nature est riche en diversité, elle fonctionne aussi pour le rêveur qui préfère Henri MICHAUX : « *Je mets une pomme sur ma table, Puis je me mets dans cette pomme, Quelle tranquillité !* ». La collecte du fer par les organismes n'est pas

immédiate et après environ quatre mois de bons et loyaux services les hématies meurent et le fer est recyclé, transporté par des protéines spécifiques, les ferritines, qui véhiculent jusqu'à 4500 atomes de fer chacune vers des sites présents dans la moelle. Le politique et ses instances de santé publique ne se désintéressent pas du fer. Ils estiment qu'il y a carence de cet élément et annuellement on ajoute dans l'alimentation collective, par exemple aux États-Unis, 700 tonnes de fer dans les farines, une bonne part sous forme de sulfate ferreux.

Le cuivre figure aussi dans le tableau des éléments découverts depuis longtemps par les humains et possède sa place dans la circulation du dioxygène chez de nombreux arthropodes. Dans ce cas, la structure porteuse est bien différente, la molécule de dioxygène étant coincée entre deux atomes de cuivre. Comme la nature réalise ses constructions selon des règles d'économie on doit noter que les arthropodes très petits, disons en dessous du millimètre, n'ont pas de système particulier pour transporter l'oxygène qui diffuse à travers le revêtement extérieur, la cuticule. Ce constat peut être formulé autrement : dans l'évolution des êtres multicellulaires ce n'est qu'à partir d'une certaine taille qu'il a été nécessaire de construire un système de transport particulier.

## UN TIERS DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES DÉCOUVERTS EN 50 ANS

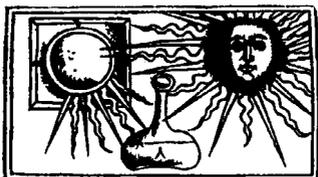
À l'orée du XIX<sup>e</sup> siècle la compréhension de l'oxydation fut un événement décisif pour le développement de la chimie. La classification périodique n'est alors qu'une liste d'éléments sans ordonnance, et plusieurs facteurs vont s'ajouter pour l'enrichir. D'abord la définition plus claire de l'élément chimique que nous avons évoquée. Aussi les progrès récents en électricité : c'est l'électrolyse de la soude et de la potasse qui permet à DAVY de découvrir le sodium et le potassium, et trois autres éléments en deux ans. Peut-être aussi un facteur qui ne relève pas directement de la science : la population de l'Europe vient pratiquement de doubler en un siècle, un événement qui doit jouer sur le nombre d'hommes qui ont le privilège de développer le savoir. Une chose est sûre, la communauté savante découvre en un demi-siècle le tiers des éléments, une liste qui va de l'uranium (U) isolé par KLAPROTH à Berlin (1789, numéro atomique 92) au terbium (Tb) dû à MOSANDER à Stockholm (1843, n° 65) (d'après [4]). Dans cette moisson plusieurs éléments font partie de la quinzaine absolument nécessaire à l'émergence de la vie : sodium, potassium et calcium. Mais le plus remarquable, c'est que tous, aussi rares qu'ils soient, ont trouvé usage dans le monde contemporain. Le terbium (Tb, n° 65) est présent dans les lampes fluorescentes, l'erbium (Er, n° 68) est utilisé dans les fibres optiques véhiculant de la lumière infrarouge, le très rare iridium, est présent dans le mètre étalon, mais aussi dans les bougies d'hélicoptères. Nous devons donner à cette remarque une importance particulière : si une quinzaine d'éléments ont suffi pour permettre le commencement de la vie, au cours de l'évolution, celle du vivant et celle de l'écorce terrestre qui la supporte, une quinzaine d'autres ont été sélectionnés jusqu'à devenir indispensables pour certaines espèces. En somme une moitié de la classification périodique n'a pas été utilisée dans les processus biologiques. Par le détour d'une espèce particulière, l'humain,

accompagnée dans sa démarche de quelques centaines d'autres, associées, domestiquées, parasites, c'est toute la classification périodique qui se trouve maintenant utilisée. Ce constat peut être vu comme un exploit qui a mis quelque 3,5 milliards d'années pour aboutir une jolie manière de voir [1-2].

## UNE SEULE CHIMIE...

Quelques dictionnaires consciencieux citent avec le même soin l'invention d'un bec de gaz performant par BUNSEN (1811-1899) et un événement majeur de l'histoire des sciences dû à BUNSEN (le même) et KIRCHOFF (1824-1887) qui inventent en 1859 l'analyse spectrale. Après avoir été un obstacle pour comprendre la combustion, la flamme à haute température, aussi incolore que possible, permet de porter les atomes d'un élément chimique dans un état excité ; en revenant dans leur état fondamental ils émettent une lumière spécifique de l'élément qui permet de le caractériser. L'analyse au spectroscopie étonne d'abord par sa sensibilité. Le « Magasin Pittoresque » de 1874 relève que la lumière jaune que l'on aperçoit en jetant quelques grains de chlorure de sodium dans une flamme permet de doser 0,000000300 mg de sodium, nous disons maintenant 300 picogrammes ! Très vite l'étude de nombreux minerais va permettre de découvrir des éléments nouveaux qui seront baptisés à partir de la couleur de la raie la plus intense de leur spectre : le rubidium (rubis), l'indium (indigo), le thallium (vert, du grec *thallos*, branche verte).

La méthode est d'une richesse sans limite : elle permet d'étudier la croûte terrestre mais aussi le Soleil (ci-dessous [5]) et autres objets lumineux de notre Univers, se révélant aussi fructueuse pour les chimistes que pour les astronomes. Un élément chimique est même découvert sur le Soleil (l'hélium) alors que les chimistes « terrestres » n'avaient que soupçonné sa présence dans l'atmosphère. Avec le temps, on saura exploiter la méthode sur toute l'étendue du spectre électromagnétique. L'application de la spectroscopie à l'étude de l'Univers conduit à la plus étonnante découverte, résumée dans une note de William HUGGINS (1824-1910), un astronome amateur anglais qui avait construit son propre observatoire : « *Un but important de cette recherche spectroscopique origi-*



*Destillatio solis (durch Sonnenwärme)  
Verstärkung der Sonnenstrahlen  
durch einen Brennspiegel  
Brunschwig, 1512*

Figure 5

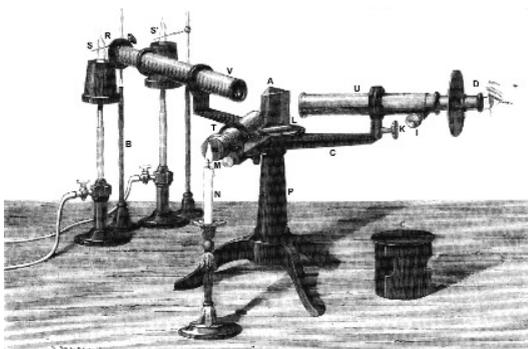


Figure 6 : Page 360 du magasin pittoresque de 1874.

*nale sur la lumière des étoiles et autres corps célestes, c'est-à-dire découvrir si les éléments chimiques de notre Terre sont présents dans tout l'Univers, est atteint de manière satisfaisante, la réponse est positive, une même chimie existe pour tout l'Univers » (1864).*

Cette connaissance fondamentale est proposée alors que le tableau périodique n'est pas encore établi, mais l'on commence à soupçonner que l'inventaire des éléments connus n'est pas un bazar hétéroclite sans ordre ni classement. Dans la même décennie, en 1869, Dimitri MENDÉLÉÏEV (1834-1907), à partir d'analogies et de ressemblances fondées sur les données expérimentales des chimistes, propose un classement, un ordre, qui ne peut être que le reflet de structures fondamentalement régulières, relevant des nombres aurait dit PYTHAGORE. Avec les 67 éléments alors connus, il découvre des périodes qui regroupent les éléments ayant des propriétés analogues. Quand l'ordre attendu n'est pas au rendez-vous, l'apport le plus original de MENDÉLÉÏEV est d'affirmer tout simplement que l'élément n'est pas encore connu. C'est ainsi que naissent : l'Eka bore, l'Eka aluminium, l'Eka silicium. Ils ont leur place dans un tableau périodique futur avant d'être découverts. La prévision se révèle juste, et l'histoire leur trouvera et des découvreurs et d'autres noms de baptême. Ce sont respectivement le scandium (Sc, 1879, NILSON en Suède, numéro atomique 21), le gallium, (Ga, 1875, DE BOISBAUDRAN à Paris, n° 31), le germanium (Ge, 1886, WINKLER en Allemagne, n° 32).

La périodicité en chimie va être mise en évidence d'une toute autre manière, en utilisant les nombres d'onde des raies du spectre de l'hydrogène. Si l'on demande à un calculateur de trouver une formule simple et élégante reliant entre eux quatre nombres comme : 15233, 20565, 23032 et 24373, l'informatique le permettra aisément. C'est ce qu'a su faire « à la main » en 1885 Johann Jacob BALMER, professeur de mathématiques au lycée de Jeunes Filles de Bâle. La simple et élégante formule qu'il découvrit aurait

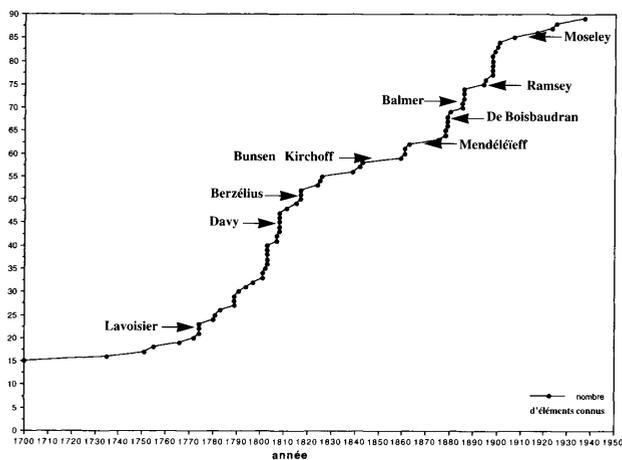


Figure 7 : Quelques bâtisseurs de la classification périodique des éléments.

pu rester sans importance. Cependant, les progrès de l'optique aidant, le spectre de l'hydrogène passe de 4 à 16 raies, la formule s'applique encore aux douze nouveaux nombres d'onde découverts. La périodicité en chimie apparaît relever d'une loi naturelle liée à la structure profonde des atomes. On dispose alors de tous les outils pour compléter à 92 éléments le tableau périodique. Les événements majeurs consisteront à compléter la longue famille des lanthanides (14 éléments), des actinides et situer la famille des 6 gaz rares commencée avec l'argon (1894) et complète avec le radon (1900). En 1913, vint la démonstration expérimentale de la périodicité en chimie. Henry Gwyn-Jeffreys MOSELEY (1887-1915), mort avant 30 ans à Gallipoli, à l'ouest des Dardanelles, établit le classement des éléments chimiques en fonction de la fréquence des rayons X émis (encore PYTHAGORE !). Il corrigea deux inversions (Co/Ni) et (Te/I) et démontra que 6 éléments restent à découvrir entre l'aluminium et l'uranium.

Alors commence la captivante histoire de la structure des atomes dans un tableau périodique construit pour l'essentiel. La découverte de l'électron et des radioisotopes, ouvre encore des perspectives nouvelles. On apprend à dater : l'âge de la terre, les roches les plus anciennes, l'émergence de la vie, le passage d'une atmosphère réductrice à oxydante...

## COMMENT SE FORGE LA CHIMIE ?

Dès 1915 les chercheurs en astronomie disposent des spectres de 225 300 étoiles, ils vont pouvoir ébaucher une histoire de l'Univers. Le chimiste est admiratif devant le scénario qui raconte comment le tableau périodique s'est forgé.

D'abord, il fallut un temps pour décider que l'énergie du Soleil ne pouvait être de nature chimique et découvrir que l'énergie d'une étoile est surtout produite par fusion de quatre atomes d'hydrogène conduisant à l'hélium.

L'Univers est formé pour 87 % d'hydrogène et 12 % d'hélium, à cette échelle, la place des 90 autres éléments du tableau périodique est bien modeste.

L'Univers résulte d'une explosion primordiale intervenue il y a seize milliards d'années et il est en expansion. Ce big bang a produit des particules : protons, électrons, neutrons... En quelques minutes environ 25 % en poids de l'hélium s'est formé, accompagné de très petites quantités de deutérium et de  ${}^7\text{Li}$ . Tous les autres éléments à l'exception du beryllium et du bore proviennent de réactions nucléaires dans les étoiles. Le bore et le beryllium ainsi que  ${}^6\text{Li}$  résultent de collision hautement énergétiques, dans les rayons cosmiques.

Le savoir concernant les réactions nucléaires permet de comprendre l'origine et les abondances relatives des différents éléments, en offrant des schémas plausibles du passage d'un élément à l'autre. Au cœur des étoiles les noyaux se forment à très haute température, l'interaction électrostatique entre protons est répulsive et compensée par une attraction forte à courte distance entre protons et neutrons.

Lors des dernières étapes de la vie d'une étoile, des processus particuliers de fusion interviennent, chaque étape fournissant des éléments plus lourds en utilisant les « cendres » des nucléosynthèses précédentes. Les éléments relativement abondants comme le carbone et l'oxygène sont produits par fusion de l'hélium, et les éléments jusqu'au fer résultent de ces mécanismes. Au-delà du fer les éléments plus lourds se forment par captures successives de neutrons, rarement de protons. L'équilibre qui en résulte permet d'expliquer pourquoi le  $^{56}\text{Fe}$  est le plus stable de tous les noyaux. Pour les noyaux légers, il est énergétiquement favorable de fusionner pour former des noyaux plus lourds se rapprochant du fer. Les éléments lourds, en émettant un rayonnement alpha, retournent vers des éléments plus légers et finalement vers le fer. Pour finir, les étoiles massives terminent leur vie dans de gigantesques explosions - les supernovae - en projetant dans l'espace les produits de leurs réactions nucléaires : les éléments du système périodique, avec l'hydrogène et l'hélium n'ayant pas réagi. Compte tenu des températures en jeu, les noyaux qui interviennent sont déshabillés de leurs électrons, gardent le nom de l'élément, mais il ne s'agit pas de l'atome familier au chimiste avec son cortège électronique. L'interprétation de ces événements a été longtemps difficile et du seul domaine de la spectroscopie. Dans le passé le spectre du nébulium que l'on a cru être un nouvel élément était en fait celui d'un atome d'oxygène ionisé et nous imaginons la tristesse des chercheurs déçus.

## LA CHIMIE COMMENCE OÙ ?

La chimie commence quand l'existence de liaison(s) chimique(s) entre atomes devient possible. Le tableau 4 ci-contre permet de proposer une réponse raisonnable à la question posée.

Ce dernier été 1997, la presse a fait grand cas de la découverte de molécules d'eau à la surface du Soleil. Cette surface ayant une température de l'ordre de 6000 K on peut admettre que, dans des zones relativement « froides » subsistent des liaisons covalentes H-O. Dans l'Univers, c'est-à-dire pour la centaine de milliards de galaxies observables, la chimie serait donc présente à partir de 5000 K jusqu'aux zones les plus froides correspondant au rayonnement fossile à 2,7 K. Sur une telle échelle, l'intervalle de température à l'intérieur duquel évolue le vivant est plus que modeste.

Avec l'explosion gigantesque des étoiles massives, des nuages géants de gaz et de poussières interstellaires sont éjectés et forment un réservoir d'éléments à partir duquel d'autres étoiles et systèmes planétaires peuvent naître. Par nuages gigantesques nous devons entendre de grosses bulles de plusieurs centaines d'années lumière de diamètre, hétérogènes sous trois aspects : la température, la densité des molécules présentes et la nature de celles-ci. Ces nuages sont plus fréquents dans les bras spiraux de notre galaxie, où ils jouent le rôle de « pouponnières d'étoiles ». Dans les zones relevant de la chimie, beaucoup de molécules et d'ions contiennent C, H, N, O, P, S... comme éléments accompagnés de grains solides riches en carbone mais contenant aussi des métaux et des silicates. Comme ordre de grandeur dans les zones froides, vers 80 K, qui sont les plus faciles à détecter et à étudier, les concentrations moléculaires sont estimées à 40 objets

Températures (K)	Environnement	Forme de la matière	Réactions possibles	Énergie thermique (eV) / particule
$10^{12}$	Première seconde de l'Univers	Particules élémentaires	Réactions entre particules élémentaires	$10^8$
$10^{10}$	Explosion d'étoiles	Noyau et électrons	Réactions nucléaires	$10^6$
$10^8$	Intérieur de l'étoile Étoiles stables			$10^4$
$10^8$		Atomes ionisés		$10^2$
$10^4$	Surface d'étoile			1
$10^2$		Atomes neutres	Réactions chimiques	
	Planètes et espace interstellaire	Molécules stables, solides		$10^{-2}$

Tableau 4 : D'après Cox [7].

moléculaires par  $\text{cm}^3$ . Dans la liste des molécules de l'espace interstellaire, quelques-unes sont intrigantes : la plus longue est penta-acétylénique, la plus « prébiotique » est la glycine  $\text{H}_2\text{NCH}_2\text{COOH}$ . L'alcool éthylique ne manque pas, mais dans des conditions originales. La dilution est très grande (quelques molécules au  $\text{cm}^3$ ), et l'alcool est accompagné de beaucoup d'eau (dommage !). Cependant, compte tenu de la taille du nuage, le volume de cet alcool condensé serait quand même des centaines de fois celui de la Terre. Rappelons que la concentration en molécules de notre atmosphère est de l'ordre de  $3.10^{19}$  par  $\text{cm}^3$ . Compte tenu des conditions particulières de l'espace intersidéral (température, faible pression), les objets chimiques qui s'y trouvent ont souvent des structures originales et pratiquement inaccessibles sur Terre.

L'astrochimie peut paraître bien éloignée de nos préoccupations, cependant elle peut être source d'idées originales. Le prix Nobel 1996 de chimie a été attribué à H.W. KROTO, R.F. CURL et R.E. SMALLEY pour avoir caractérisé le fullerène  $\text{C}_{60}$  en spectrographie de masse (1985) et ouvert la voie à un filon très riche de la chimie organique et de celle des matériaux.

Harold KROTO avait pour direction de recherche « les molécules semi-stables au laboratoire et dans l'espace ». En bref, l'espace interstellaire convient pour découvrir des thèmes de recherche nouveaux, mais c'est notre Terre qui est idéale pour faire de la chimie, preuve en est la superbe aventure du vivant, le dernier thème que nous abordons...

## LA CELLULE, COMPLEXITÉ ET AUTO-ASSEMBLAGE

Le sous-titre de ce passage pourrait être : trois étonnements d'un chimiste essayant d'avoir quelque idée sur une cellule de bactérie. La cellule est l'unité du monde vivant, analogue à l'élément chimique dans le tableau périodique, à la seule différence que les complexités respectives ne sont pas du tout du même ordre. À la Bibliothèque Universitaire, les livres destinés aux étudiants portant le simple titre : « La cellule » dépassent souvent les mille pages [8].

L'une des plus « simples » et la plus étudiée est *Escherichia Coli*. C'est une bactérie procaryote (sans noyau cellulaire ni compartiments), un organisme très présent qui occupe de nombreuses niches écologiques, en particulier l'intestin des mammifères (c'est peu dire qu'elle nous rend quotidiennement service !). La revue Science a publié en septembre 1997 un article, signé de dix-sept auteurs, qui présente la séquence complète du génome d'*Escherichia Coli* K 12. Il comporte 4 639 221 paires de bases et 4 288 gènes codant des protéines. Dans leur grande majorité, les chimistes manipulent une vie durant des molécules un million de fois plus petites, et déjà ce n'est pas toujours facile ! Devant ces chiffres, l'étonnement tourne au découragement quand on apprend que les cellules humaines contiennent un génome mille fois plus complexe ! Le volume cellulaire de la bactérie est de l'ordre de quelques microns cube et le génome n'est qu'un objet moléculaire, unique en son espèce, se trouvant à l'intérieur de la membrane. Il contient toute l'information nécessaire pour construire, diriger, contrôler toutes les machines de la cellule formées essentiellement de protéines. Ces dernières sont construites par environ 15 000 ribosomes, ateliers destinés à les synthétiser. Pour ce faire 1000 ARN de types différents sont utilisés. Les liaisons peptidiques entre alpha-aminoacides sont formées au rythme de cinq à sept soudures par seconde et par ribosome. *Escherichia Coli* sait aussi (se) construire des moteurs qui assurent le mouvement des flagelles. Ceux-ci, asservis à des récepteurs, dirigent la cellule vers des nutriments ou l'éloignent de produits toxiques. Les moteurs fonctionnent avec un flux de 5 à 600 protons par seconde. Toutes ces machines fonctionnelles « tournent » dans une solution à 70 % d'eau et nécessitent environ 500 intermédiaires (coenzymes, acides dicarboxyliques...).

Quand nous essayons de découvrir quelque simplicité dans cet édifice chimique, nous remarquons que toutes les grandes molécules du système : protéines, nucléotides, lipides, polysaccharides sont construites avec six éléments seulement : C, H, N, O, P et S et surtout que la bactérie sait se dupliquer dans des conditions quasiment primitives, à partir d'un menu frugal. Il suffit d'une solution aqueuse, vivement aérée, contenant du glucose, pour le carbone et l'énergie, et une dizaine d'ions inorganiques, phosphates, chlorures, sulfates, sel d'ammonium, sodium, potassium, Mg, Cu, Co, Zn, Mo, la plupart

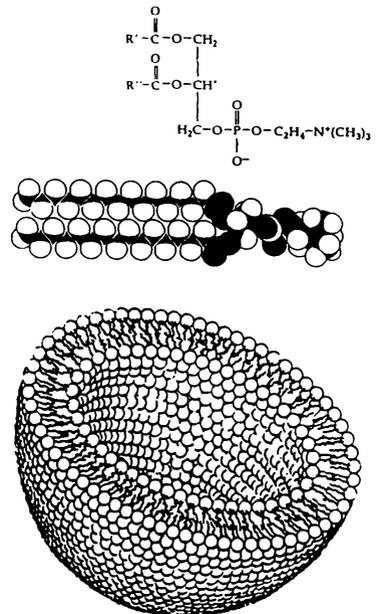
à l'état de trace. Ces quantités sont si petites que le microbiologiste plaisante en disant que l'eau du robinet convient : en pratique seule l'eau distillée inhibe le développement. Le premier étonnement du chimiste est de constater que la bactérie conserve la possibilité de tout synthétiser à partir d'éléments très simples. Pourtant, dans l'intestin humain, toutes sortes d'architectures moléculaires déjà construites sont accessibles et auraient pu servir de point de départ en rendant la multiplication des bactéries plus économique. Un bactériologiste donne un éclairage sur cet étonnement : « *les organismes les plus simples et les plus anciens sont non seulement les ancêtres et le substrat actuel de l'ensemble des êtres vivants sur la Terre, mais ils sont aussi prêts à s'étendre et à se modifier, eux et les autres, au cas où nous, les hommes, les organismes les plus "élevés", aurions la folie de nous annihiler* » (Lynn Margulis, L'Univers Bactériel, 1986).

Sous cet aspect le vivant donne l'impression d'avoir multiplié les précautions. Dans quelques réserves, à 2000 mètres au fond de la mer (Galapagos) ou dans une grotte de Roumanie (Movilé) se trouvent des bactéries qui savent synthétiser, à partir de  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{S}$  le glucose nécessaire à une autonomie encore plus grande ; ils sont dits chimio-autotrophes. Leurs exigences frustes les rendent peu vulnérables. Mais les microbiologistes écrivent qu'ils sont moins archaïques qu'il n'y paraît.

Avant de quitter *Escherichia Coli*, remarquons qu'elle sait construire la vitamine B 12, pour laquelle la première synthèse totale a nécessité soixante-dix étapes.

L'activité chimique d'une bactérie se déroule dans un petit sac de faible volume limité par une **membrane**. Le volume doit être petit pour répondre à une exigence : disposer d'une surface relativement grande permettant les échanges d'ions et de molécules. Nous savons que mille sphères identiques offrent une surface d'échange dix fois plus grande qu'une seule sphère ayant le même volume total. C'est sur un compromis favorable que la cellule est donc construite. Les membranes sont essentiellement formées de lipides qui délimitent le milieu aqueux, le cytoplasme et l'extérieur. Au cours de l'évolution, la nature des lipides membranaires a évolué mais tous possèdent les mêmes caractéristiques moléculaires : une des extrémités de la molécule est soluble dans l'eau, elle est hydrophile, l'autre est une longue chaîne formée de nombreux atomes de carbone, insoluble dans l'eau, elle est hydrophobe.

La figure 8 donne la structure d'un lipide membranaire avec une tête hydrophile formée par un groupe phosphate, ponté entre un glycérol di-



**Figure 8 :** Auto-association de molécules amphiphiles.

térifié par deux acides gras d'une part et d'autre part la choline. Si le chimiste devait être l'architecte, molécule à molécule, d'une bicouche membranaire sphérique représentée pour moitié sur la figure 8, la tâche serait insurmontable. En effet pour chaque phospholipide à placer, il devrait choisir entre des milliers de conformations possibles et seules quelques-unes pourraient convenir. Or, l'expérience montre que ces molécules amphiphiles **s'assemblent spontanément** dans l'eau en donnant des structures diverses dont certaines, **d'emblée**, sont des vésicules bicouches fermées, les têtes hydrophiles alignées dehors et dedans ; quelques-unes atteignent même le micromètre, la taille d'une cellule, et sont visibles au microscope optique. Ces structures sont des objets que l'on peut étudier : propriétés mécaniques, perméabilité, changement de forme... Cette observation illustre un des étonnants raccourcis utilisé par le vivant. Les seules forces qui interviennent en chimie dans la construction des molécules et leurs interactions réciproques, liaisons covalentes, ioniques, forces de Van der Waals, interactions supramoléculaires de toutes sortes fournissent parfois des architectures complexes prêtes à l'emploi. Les organiciens connaissent ce genre d'exploit, eux qui souvent peinent des années à construire une molécule infaisable, alors que l'inattendu leur offre parfois d'extraordinaires structures en chauffant deux produits dans un seul pot.

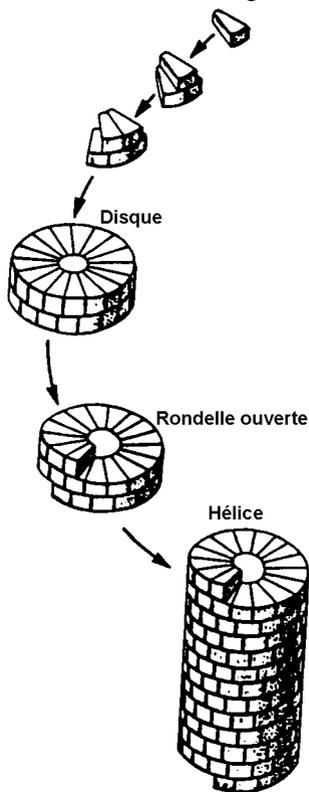


Figure 9 : Auto assemblage d'un virus, d'après [8].

L'autoassociation n'est pas la limite de ce que la chimie « inerte » peut apporter à la structuration du vivant. L'exemple d'un virus, désassocié en ses parties et qui s'auto-reconstruit en restant fonctionnel, nous étonne encore davantage.

Le virus de la mosaïque du tabac est une particule cylindrique en tonne de bâtonnet de 3000 Å de long et 180 Å de diamètre. Elle renferme un ARN monocaténaire d'environ 6 400 bases ainsi que 2 130 copies d'une même protéine constituée de 158 aminoacides. Quand on mélange en solution les éléments du virus « démonté », on constate une reconstruction spontanée. La figure 9 donne une idée du phénomène. D'abord les unités protéiques forment un petit cylindre qui se « clique » pour passer d'un disque à une rondelle ouverte, ressemblant à la rondelle auto-bloquante des garagistes. Ce sera l'élément d'une construction hélicoïdale, chaque tour d'hélice contenant 16,33 unités protéiques. L'ARN s'enroule à travers ces unités sur un rayon de 40 Å, trois nucléotides étant reliés à chacune des sous-unités. Cet auto-assemblage pourrait n'être qu'un exemple de plus d'auto-association. En fait le virus, reconstruit avec son ARN, est **fonctionnel**. Ces exemples montrent que la « chimie des chimistes », par sa nature même, possède d'immenses

possibilités qui ont permis l'émergence du vivant, la chimie des biologistes. Devant la complexité de celle-ci, le chimiste ne peut retenir son admiration et ses désirs d'imitation. Pour le moment, la qualité de ses réussites est très très loin des performances du vivant. Cependant, les molécules qui « savent faire quelque chose », analyser, assembler, capter, choisir, fermer, mémoriser, ouvrir, rejeter, sélectionner... commencent à se multiplier dans la littérature. Vraisemblablement cette démarche conduira, par talent et imprévu, à des étapes effacées de la construction primitive du vivant. Pour la beauté de l'histoire, nous remarquerons qu'à trois reprises des signaux lumineux : la luminescence du phosphore, la flamme et la combustion, encore la flamme pour l'universalité des éléments chimiques, ont joué un rôle décisif pour étendre notre savoir.

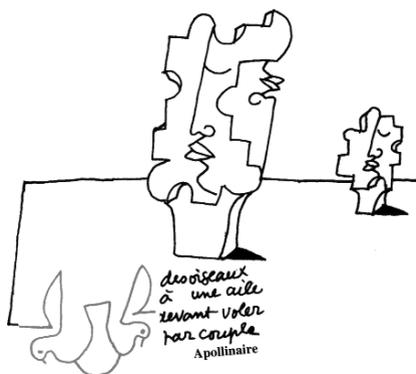


Figure 10

## REMERCIEMENTS

Des ami(e)s m'ont aidé à corriger des erreurs, combler des ignorances, embellir le texte... Je les remercie cordialement.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] WILLIAMS R.J.P. et FRAUSTO DA SILVA J.J.R. *The Natural sélection of the Chemical Elements*. Oxford : Clarendon Press, 1997, 646 pages.
- [2] FRAUSTO DA SILVA J.J.R. et WILLIAMS R.J.P. *Biological Chemistry of the Elements*. Oxford : Clarendon Press, 1991, 561 pages.
- [3] MASON S.F. *Chemical Evolution, Origins of the Elements, Molecules and Living systems*. Oxford : Clarendon Press, 1991, 317 pages.
- [4] EMSLEY J. *Les éléments chimiques*. Ed. française, Polytechnica, 1992, 253 pages.
- [5] PRINZLER H.W. *Summa Destillationis*. Leipzig : VEB Deutscher Verlag, 983, 308 pages.
- [6] *Dictionnaire de Chymie* (1766). L'auteur, P. MACQUER (1718-1784) n'est pas mentionné, ce qui était la règle à cette époque, pour des raisons de censure. Son nom se trouve dans les catalogues spécialisés connus des libraires. À Paris chez Lacombe, Quai de Conti, en deux volumes, 616 et 688 pages.
- [7] COX P.A. *The Elements*. Oxford : University Press, 1990, 207 pages.
- [8] DAMELL J., LODISH H. et BALTIMORE D. *La cellule, biologie moléculaire*. Paris : Ed. Vigot, 1988, 1189 pages.