

DE LA CHIMIE FOSSILE À LA CHIMIE DURABLE



Sandrine Rup-Jacques
Éric Jacques

ellipses

**DE LA
CHIMIE
FOSSILE
À LA CHIMIE
DURABLE**

**DE LA
CHIMIE
FOSSILE
À LA CHIMIE
DURABLE**

Sandrine Rup-Jacques
Éric Jacques



Du même auteur chez le même éditeur :

Les Savants-Aventuriers. La face cachée des grands inventeurs, 384 p., 2015.

ISBN 9782340-016750

©Ellipses Édition Marketing S.A., 2017

32, rue Bargue 75740 Paris cedex 15



Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5.2° et 3°a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

www.editions-ellipses.fr

Avant-propos

Ce livre s'adresse à tous ceux qui veulent en apprendre davantage sur la chimie durable, la chimie du XXI^e siècle. Née récemment (à la fin des années 90), souvent mal interprétée (la chimie verte n'est pas la chimie du bois ou des végétaux), la chimie durable est une chimie d'avenir, innovante, abordable et très enrichissante que ce soit pour le citoyen, l'enseignant, l'étudiant, le chercheur voire le philosophe et le théoricien. Dans ce livre, les auteurs ont décidé d'aborder différents aspects de la chimie depuis ses origines jusqu'à son association avec la filière fossile du pétrole mais aussi avec la chimie de l'uranium, des métaux lourds, des pesticides, de tous ces domaines qui sont responsables de sa mauvaise image et des grandes catastrophes majeures ayant pollué durablement notre environnement.

Cette situation, ce constat étaient-ils inévitables ? Et la chimie, science fondamentale et appliquée, incontournable, peut-elle être considérée autrement que comme néfaste, nocive, dangereuse ou explosive ?

Dans une première partie nous tenterons de montrer comment la chimie qui n'est devenue pétrochimique que bien tardivement (le mot date des années 60) s'est retrouvée associée aux activités de l'Homme et pas forcément, avec le progrès, de la meilleure manière qui soit. Dans une seconde partie, ce sont les ressources et les stratégies mises en place pour transformer cette chimie ancienne et polluante, pour en faire une chimie durable que nous évoquerons avant de montrer comment chacun d'entre nous peut devenir un acteur de la chimie durable.

Ce livre qui se veut attractif et abordable tout comme la chimie qu'il présente peut donc être visité par le lecteur à n'importe quel chapitre et il pourra alors passer aisément de l'un à l'autre. Comme celle-ci ne pouvait être qu'expérimentale, un chapitre de manipulations que l'on peut (presque) réaliser chez soi se trouve également présent et permettra de se faire une idée simple et claire de la chimie verte et durable.

Espérons qu'à la lecture de ce livre, le lecteur aura réussi à se forger une opinion, à développer plus encore son sens critique voire à être devenu un chimiste durable dans l'âme !

Table des matières

Avant-propos	3
Première partie. La chimie sort de l'ombre	7
Chapitre 1. Une chimie ancienne et nouvelle	9
Chapitre 2. Développement de la chimie industrielle	25
Chapitre 3. Vers une chimie du pétrole	45
Chapitre 4. Le développement des matières plastiques	53
Chapitre 5. La chimie des ordinateurs	65
Chapitre 6. Recharger les batteries...	73
Chapitre 7. L'ultime réussite ?	93
Seconde partie. La chimie passe au vert	105
Chapitre 1. Naissance de la chimie durable	107
Chapitre 2. La recherche passe au vert	131
Chapitre 3. Vers une industrie verte et durable	157
Chapitre 4. Une chimie durable jusque dans vos assiettes	183
Chapitre 5. Enseigner et apprendre de la chimie durable	193
Chapitre 6. Manipulations en chimie durable	203
Chapitre 7. Une chimie abordable par tous	229
Annexe I. L'art simple et efficace de la chimie durable	239
Annexe II. Glossaire des termes nouveaux et anciens liés à la chimie durable	247
Bibliographie	253

Première partie

La chimie sort de l'ombre



Chapitre 1

Une chimie ancienne et nouvelle

Un bref commencement

La chimie moderne est née des travaux novateurs et révolutionnaires d'un groupe de chercheurs français, médecin, avocat, dessinateur, mathématicien, industriel de formation qui, une fois initiés à la chimie et « montés » à Paris pour y faire une carrière d'académicien, ont suivi les intuitions remarquables d'un riche collecteur d'impôts et directeur de la Manufacture Royale des Poudres, Antoine-Laurent de Lavoisier. Lavoisier a un plan. Il sait comment et il sait pourquoi il faut faire de la chimie ancienne, cet art alchimique presque ésotérique, une science raisonnée et réfléchie, un savoir ordonné qui va révolutionner le monde.

Certes la chimie n'est pas nouvelle, ses théories sont en mutation et ses techniques, de décennie en décennie, en constante amélioration. C'est d'ailleurs en Suède, en Allemagne et en Angleterre, vers 1750, que l'on peut croiser des chimistes métallurgistes, des pharmaciens alchimistes, des philosophes pneumatiques. À Uppsala, à la Forge Noire, au Bergskollegium et à l'Université royale de Suède, Wallerius, Bergman, Rinman et Brandt fondent les techniques d'analyse, de séparation et de purification des métaux et découvrent de nouveaux éléments chimiques. La chimie, jusque-là principalement d'application médicale, devient liée aux métaux, précieux ou moins précieux. À Berlin, à l'Académie et à l'Université, Martin Heinrich Klaproth, Johann Friedrich Gmelin et Andreas Sigismond Margraff, seront les mousquetaires de la chimie prussienne, développant là aussi des protocoles pour extraire de nouveaux éléments chimiques mais aussi discuter de théories chimiques comme celle des affinités et du phlogistique. Cette dernière a le vent en poupe. Poussée par Stahl en Allemagne et Becher en Angleterre, elle ravit notamment les chimistes qui travaillent les airs, tentent de les séparer et de les identifier. En Angleterre, Black, Cavendish et Priestley pensent de cette manière. Leurs expériences sont remarquables mais leurs interprétations manquent de clarté. Dans tous ces résultats, il faut discerner le « vrai » que l'on pressent douteux, du « faux » vraisemblable. Et voilà toute la difficulté, le seuil à franchir pour quitter la pensée alchimique et gagner les territoires de la science chimique. Mais pourquoi est-ce si compliqué ?

En 1675, dans son *Cours de Chymie*, Nicolas Lémery explique que « le nom de chimie vient du grec « chûmos » qui veut dire suc ou de « cheein », qui veut dire fondre. Les Arabes lui ont ajouté la particule al. La chymie est un art dont le but est de séparer les substances des mixtes » c'est-à-dire les corps purs des mélanges. C'est parce qu'elle est ancienne, qu'elle fut née et supportée par des courants d'idées très différents, que la chimie semble être

une science de peu de clarté, un ensemble de concepts sans unité, bien loin de la physique qui, appuyée sur les mathématiques, semble posséder une véritable cohérence. En fait, c'est parce qu'elle porte en elle ses six mille ans d'histoire que la chimie fut autrefois un art et que depuis Lavoisier, elle est devenue une science¹.

Chimie ancienne et chimie ésotérique

La philosophie est l'art ancien érigé en partie par Thalès et Pythagore, qui permet de s'interroger sur la finalité de l'être et du monde qui l'entoure. Avec l'école de Milet (celle de Thalès), avec celle de Crotona (fondée par Pythagore), avec l'école d'Élée (celle de Parménide), les philosophes pas encore chimistes vont tenter de comprendre le monde et de relier sa nature à un élément primordial, l'eau, avant d'envisager l'air, le feu ou encore la terre. Voici donc qu'apparaissent des philosophes théoriciens, riches d'idées, de concepts dont ils basent la validité sur la perception des phénomènes qu'ils jugent corrects.

Héraclite d'Ephèse, Anaxagore de Clazomènes, Empédocle d'Agrigente puis Leucippe et Démocrite mais aussi les continuateurs pythagoriciens, Philolaos, Architas de Tarente, Eudoxe de Cnide tout comme Socrate, Platon et Aristote vont participer à la fondation de la chimie, proposer différents concepts, différentes théories qui vont entrer soit en adéquation les uns avec les autres et se compléter (Empédocle rassemble les théories des éléments air, terre, feu, eau en une seule ; Aristote la complète en y ajoutant des qualités, sec, chaud, humide, froid) soit s'opposer et posséder partisans et détracteurs. Les grands sages passent leur vie à débattre, réfléchir, instruire, transmettre.

Avec le règne et les conquêtes d'Alexandre de Macédoine, élève d'Aristote, un empire militaire mais également culturel aborde toutes les côtes de la Méditerranée. Le grand roi, établit sa capitale à Alexandrie et c'est ici que vont se concentrer les sciences grecques qui vont être confrontées à leurs ancestrales ascendances, la science égyptienne et celle de Babylone avec lesquelles elles furent en contact et en interaction.

Il est assez connu que Pythagore et Thalès revinrent d'Égypte avec des connaissances qui contribuèrent à leur renommée. À Alexandrie, où l'on rencontrera Euclide et Ératosthène, vont donc s'entrechoquer et s'agglutiner les savoirs.

1. Lavoisier ne fut pas le seul chimiste à vouloir séparer la chimie de son ancêtre, l'alchimie. En 1660, Robert Boyle revendiquait déjà cette position. Mais ce ne fut qu'à la Révolution française, après trente ans d'efforts que cela put enfin devenir possible.

Avant d'être une science à part entière et véritablement définie sous sa forme moderne, la chimie était étudiée et appliquée par les hommes à travers les arts protohistoriques (peinture, glyptique, pharmacopée, magie) et antiques (teinturerie, médecine, forge, verrerie, miroiterie, orfèvrerie, cosmétique, savonnerie, parfumerie, alchimie). Un peu plus tard, elle existe au travers du développement de la métallurgie, de la plomberie, de la pyrotechnie et de la médecine.

À Alexandrie, les chimistes grecs pratiquent l'art de la distillation dans le but de récupérer et d'extraire toutes sortes de « jus » désignés par le mot grec « khumos ». Leur appareil à distiller est un « ambix », un mot que l'on retrouvera plus tard dans le vocabulaire des alchimistes arabes à qui l'on doit la préservation, le développement et le perfectionnement de cet art et sa dénomination fidèle, malheureusement tronquée par les mauvais traducteurs du Moyen-Âge¹ (Alchimie pour al-chimie et alambic pour al-ambix).

C'est aussi ici, sous les intuitions de Zosime le Panapolitain, que naît la chimie ésotérique, presque religieuse, que l'on associera, jusqu'à la naissance de la chimie moderne, à la chimie antique. Zosime est un chimiste des idées. Sa pratique mélange l'art physique et l'art religieux, le zoroastrisme et la transformation physique des métaux pour opérer des transmutations. La chimie ésotérique va donc se développer autour de plusieurs idées : un mélange entre des opérations expérimentales, la distillation, le chauffage, le refroidissement, l'ajout d'espèces dans les mélanges et des actes religieux (incantations, formules). Or dès cette époque, les cérémonies sont immanquablement liées à des moments particuliers du jour ou de la nuit mais surtout de l'année et à des conjonctions astrales et zodiacales. C'est ainsi que l'astrologie ou encore l'association mystique des 7 astres et métaux connus drapent la chimie d'un obscurantisme propre à masquer l'art véritable et la science qu'elle est en train de devenir pour en faire une forme de magie liturgique².

Avec la chute de l'empire grec puis l'avènement de celui des Romains et plus tard des Ottomans, la tradition chimique grecque passe donc chez les Arabes. Recueillant ce savoir, les Arabes traduisent préservent mais aussi expérimentent à leur tour. Ils améliorent la distillation, la fabrication et la purification des métaux, la fabrication des verres (ajout de fondant comme le borax,

-
1. Il reste des traces dans les mots du chimiste de son passage par la préservation arabe, là où le déterminant al s'est retrouvé collé au nom qu'il désignait. Al-chimie, al-ambic, al-cool.
 2. Faut-il dire qu'il existe confusément plusieurs chimies à cette époque ? Celle des artisans qui la pratiquent sans le savoir mais qui, grâce à elle, sont capables de travailler les métaux, le verre, à produire du vin, de la bière, etc. Et à l'opposé, la chimie religieuse, d'opérations mystique et magique, liée au secret et au mystère, qui cherche et qui expérimente afin d'accéder à la réussite du Grand Œuvre.

l'alun), l'extraction, la synthèse des parfums, des savons et des teintures. Pour certains médecins alchimistes, la chimie reste le moyen de transformer les métaux en or. Il devient nécessaire d'avoir un élixir capable de « soigner les métaux » et donc de les rendre meilleurs. Apparaît alors l'existence d'un dualisme mâle/femelle en opposant les propriétés du soufre (sec et dur) à celles du mercure (chaud et humide). L'origine de cette théorie est la distillation ou la décomposition thermique de composés spécifiques comme le cinabre (HgS), l'orpiment (As₂S₃, jaune) ou le réalgar (As₄S₄). Le cinabre était additionné à l'or pour fabriquer un amalgame. En se décomposant, il fournissait le soufre solide et le mercure liquide que l'on évaporait ensuite par chauffage. Les alchimistes mettaient ainsi en évidence les trois états de la matière même si ceux-ci ne possédaient pas encore de définition chimique. Pour les liquides, l'alchimie sépare les esprits qui sont volatils (al-kûhl) des huiles (qui ne le sont pas) et les acides (chlorhydrique, sulfurique, nitrique, éthanoïque) des alcalis (soude carbonatée et potasse) avec encore à part, le sel ammoniac (chlorure d'ammonium). On voit dès lors les espèces chimiques commencer à être identifiées et le vocabulaire se forger, donnant des termes que l'on garde et que l'on utilise encore aujourd'hui.

Cependant, chez les alchimistes arabes de plus haute renommée, il existe des doutes quant à la vocation de l'art chimique : pour Rhazès, « l'alchimie a pour objet la transmutation des métaux en or et argent, du quartz ou du verre en pierres précieuses » mais Avicenne, peut-être plus sage et moins cupide, pense quant à lui que « l'alchimie ne peut prétendre transformer les métaux l'un en l'autre. » Déjà se dégagent non seulement une pensée critique mais aussi deux écoles. Ceux qui aspirent à faire fortune en mettant la science à leur service et ceux qui pensent qu'ils sont au service de la science.

Après le développement de la chrétienté dans l'empire romain et la chute de la domination arabe en Espagne, l'alchimie passée en Europe s'est occidentalisée. L'alchimie tente toujours de transformer le plomb en or (chrysopée) ou en argent (argyropée). Elle cherche l'élixir de longue vie, mais aussi le dissolvant universel (alkahest). Elle mêle métallurgie, langage ésotérique, incantation ou rituel, astrologie, astronomie, zodiaque, symbolisme. De ce fait l'alchimie associe chimie et magie. Basile Valentin, Raymond Lulle, Albert le Grand représentent les alchimistes légendaires. Dans certains cas, il est facile de les reconnaître. Dans d'autres, le chimiste ésotérique et le chimiste scientifique sont présents chez la même personne ! C'est le cas par exemple du médecin hollandais Jean-Baptiste van Helmont, qui prétendit avoir réussi le Grand Œuvre et obtenu de l'or grâce à la fabrication d'une pierre philosophale. Van Helmont fut également

chimiste et s'intéressa à la respiration des plantes, à la chimie des airs avec une interprétation correcte de la combustion et de ce que devait être l'état gazeux qu'il nomma « gas », un mot qui finira bien plus tard par s'imposer¹.

On comprendra ainsi pourquoi cette chimie ancienne semble si confuse². Difficile dans le mélange des connaissances et savoirs du médecin, pharmacien, apothicaire, alchimiste, de faire le tri entre le vrai du faux. Et la Renaissance, époque de résurgence des savoirs antiques en plus d'une profusion d'idées nouvelles, ne va pas arranger les choses.

Renaissance de la chimie

La première chaire universitaire de chimie est créée à Bale en 1527. C'est le médecin-chimiste Théophraste Bombastus von Hohenheim plus connu sous le nom de Paracelse qui en est titulaire. À cette époque, où la médecine est emprunte des travaux de Galien, la physique et l'astronomie sont quant à elles très influencées par l'œuvre redécouverte des travaux d'Aristote qui devient le grand maître à penser de la philosophie naturelle. Les universités sont alors remplies de philosophes plein de certitudes et de peu d'esprit critique, ce que soulèveront avec embarras et fracas des sages comme Copernic, Kepler ou encore Galilée.

En chymie, Théophraste cherche à secouer les dogmes et à faire autrement. Il s'intéresse à la posologie, à tenter de guérir le mal par le mal et à prodiguer des soins médicamenteux à base de sels métalliques à prendre avec précaution. En se rapprochant, la chimie et la médecine vont ainsi donner naissance à l'iatrochimie. Paracelse s'intéresse aussi à la chimie théorique à une époque où les idées ne vont pas manquer d'originalité et de nouveauté. Si Paracelse le clame haut et fort, « il faut séparer l'alchimie de la véritable chimie », le voici qui rajoute un troisième principe à la chimie médiévale et mélange de fait et

1. On remarquera comment avec le recul de l'histoire, il est aisé de séparer les travaux d'alchimiste de Van Helmont de ceux du chimiste. Mais peut-on dire si Van Helmont faisait lui-même cette différence ? La théorie du gas de Van Helmont est issue de ses observations sur la fermentation. Voyant une agitation dans le bocal où il fait ses expériences, il observe des mouvements chaotiques et désordonnés des particules solides à l'intérieur de celui-ci. Voici comment naquit le mot gas prenant ses origines dans le hollandais *gaesen*, fermenter et le grec *chaos*.

2. Cette séparation des savoirs erronés par rapport à ceux que l'on sait aujourd'hui être juste n'est pas évidente à l'époque de nos protagonistes. De son temps, Newton est alchimiste, théologien, philosophe, astronome, mathématicien. Sa vision physique du monde, celle qui va rester, est sa philosophie naturelle basée sur des principes mathématiques. Elle fut décriée, expérimentée, défendue, supportée avant de s'imposer sous une forme moderne et modifiée. Mais Newton quant à lui ? Était-il athée ou bien convaincu que Dieu était au centre de l'univers dont il venait de décrire les lois par le biais des mathématiques ?

de nouveau la chimie et l'alchimie. Après le soufre et le mercure (devenus philosophiques pour ne pas les confondre avec les éléments du même nom), Paracelse rajoute donc un sel. Nous voici donc avec trois principes au lieu de deux, un dissolvant universel et un cinquième principe, la quinte essence, qu'il se propose d'utiliser mieux que les éléments d'Aristote et ses successeurs.

Il faut dire qu'à cette époque, les sels sont à l'honneur et il y va de chaque médecin alchimiste de proposer une préparation miraculeuse ou curative à l'aide d'un sel de son invention¹.

C'est à présent que les chimistes et les alchimistes véritables vont se côtoyer, être parfois la même personne mais surtout montrer que se dégagent effectivement deux voies pour faire de la chimie. Si Glauber produit un sel pour la digestion, c'est aussi un chimiste remarquable, capable de synthétiser de l'acide chlorhydrique et de l'acide nitrique à l'aide de l'acide sulfurique et de produire ces espèces à l'échelle industrielle depuis celle de son laboratoire. On considère ainsi aujourd'hui Glauber comme l'un des fondateurs du génie chimique et industriel. Glauber s'occupa d'améliorer les fourneaux et les distillateurs avec lesquels il travaillait et développa l'art de la précipitation des sels métalliques, les fameux jardins chimiques qui consistent à obtenir un solide métallique dans une solution par réaction d'oxydoréduction. On pourrait donc penser qu'après 1648, date des grandes découvertes de Glauber, professeur qui va contribuer à la fondation de la chimie allemande et anglaise, la chimie va enfin prendre son essor et suivre la physique qui, à la suite des idées de Galilée, va devenir une science.

La Révolution chimique est encore lointaine. Commençons par dire qu'entre 1648 et 1750, les choses vont rester indistinctes par la difficulté de percevoir la véritable nature de la matière, donc de ses transformations et de pouvoir, à l'aide de mesures et d'expérimentations rigoureuses, élaborer des théories vérifiables par l'expérience. La perception même de la chimie reste confuse. S'agit-il d'une branche de la médecine chargée de prodiguer onguents et cataplasmes ? De préparer des emplâtres, des liqueurs, des sels, des décoctions ? Avec l'apparition de l'iatrochimie dont nous avons évoqué l'existence un peu plus haut et pour laquelle se créent des chaires universitaires en Hollande et

1. Citons par exemple le sel polychreste de Pierre de Seignette, qui a vertu de tout guérir (ce que veut dire son nom) ou encore le sel sédatif de Guillaume Homberg sans parler du sel merveilleux de Rudolph Glauber. Le sel de Seignette est un tartrate double de potassium et de sodium qui entre dans la composition de la liqueur de Fehling. Le sel de Homberg était du chlorure de calcium, CaCl_2 . La liqueur fumante de Libavius, était du chlorure d'étain fondu. La liqueur des quatre Hollandais, hommage aux chimistes qui l'ont étudiée, n'était autre que l'éthylène. On leur doit aussi une étude sur le gaz dit oléfiant, le 1,2-dichloroéthane, surnommé l'huile des Hollandais. Enfin, le sel de Glauber, n'est autre que le sulfate de sodium, Na_2SO_4 .

en Suède notamment, il devient aisé de le penser. La chimie pratique associée à la médecine et la pharmacologie vont quant à elles étudier les principes actifs des médicaments, leur préparation et leur action thérapeutique sur l'organisme (lui-même encore difficilement compris). Mais les chimistes s'intéressent aussi aux transformations qu'est capable de faire la Nature. La fermentation, la production de gaz, l'assimilation des plantes sont des domaines où vont se mêler les futurs agrochimistes et les chimistes pneumatiques, spécialisés dans l'étude des airs, de leur obtention et de leur combustion. Enfin, raison économique oblige, outre les métallurgistes et les minéralogistes, une caste intermédiaire de chimistes spécialisés dans l'analyse, la reconnaissance, la purification des métaux que ce soit pour l'élaboration d'alliages métalliques ou la composition de la monnaie, vont voir le jour.

1750, premières fondations de la chimie moderne

Grâce à sa spécialisation dans des domaines professionnalisés, le chimiste utilise de plus en plus la démarche rationnelle (on dirait aujourd'hui d'investigation) afin de progresser dans ses recherches ou de répondre aux demandes spécifiques qui lui sont faites (améliorer un procédé de fabrication, une transformation chimique, développer un enseignement particulier).

Le premier de ces chimistes à citer est l'écossais Joseph Black. Black est le fils d'un négociant en vins établi à Bordeaux. Il étudiera cependant en Angleterre, à Glasgow principalement. En 1750, Black conçoit une balance analytique de précision puis réussit à fixer une partie de l'air dégagé par une expérience de combustion à l'aide de chaux. « L'air fixe » qu'il obtient, celui qui a été absorbé par la chaux, s'appellera bien plus tard dioxyde de carbone. Outre l'usage de la balance et de l'expérience pour prouver son analyse, Black s'intéresse également aux chaleurs latente et spécifique qu'il définit grâce à une fine observation des changements d'état (1757). Chaque corps a donc besoin d'une quantité de chaleur pour passer d'un état à un autre (chaleur latente) et emmagasine cette chaleur en fonction de sa nature (chaleur spécifique). Les travaux de Black seront d'un précieux secours. Tout d'abord à un fabricant d'instruments qui travaille lui aussi à Glasgow à l'université et qui tente de mettre au point une machine atmosphérique capable d'être plus performante que celle d'un inventeur qui s'est spécialisé dans le domaine, Thomas Newcomen. En utilisant les mesures de chaleur latente de l'eau sous forme vapeur, la machine de celui qui n'est autre que James Watt, va lui permettre de faire sa fortune.