

Michel-Eugène Chevreul : chimiste, et encore chimiste

Hervé THIS

**Les petits livres de l'Académie
d'agriculture de France**



**ACADÉMIE
D'AGRICULTURE
DE FRANCE**

Partageons les savoirs



Michel-Eugène Chevreul
(1786-1889)

Les « petits livres » de l'Académie d'agriculture de France

Les membres de l'Académie d'agriculture de France publient régulièrement des articles et des textes dans les notes académiques, les fiches encyclopédiques, les présentations d'ouvrage, ou des ouvrages entiers, tous étant signalés dans le *Mensuel* de l'Académie d'agriculture de France.

L'idée de produire directement des petits ouvrages accessibles au plus grand nombre répond à la fois à un créneau disponible de publication et à une volonté de diffusion d'un thème dont les connaissances ou les interrogations méritent d'être valorisées. Ces petits ouvrages disponibles directement sur le site de l'académie (<https://www.academie-agriculture.fr/publications/livres-academie-agriculture-de-france>), sont la production d'un auteur ou d'un collectif et n'engagent que ceux-ci. Cependant, si l'Académie d'agriculture de France a décidé de publier leurs travaux, c'est bien qu'elle y reconnaît une large part des compétences de ses membres. Les manuscrits sont relus par plusieurs membres du comité et un spécialiste du sujet extérieur à l'académie.

Les questions soulevées sont toujours partielles, les sujets abordés étant étendus et multidisciplinaires. Les textes proposés ne peuvent donc être considérés comme exhaustifs.

Le comité des livres de l'Académie d'agriculture de France

Noëlle Dorion (*Productions Végétales*), Fabienne Trolard (*Interactions milieux - Êtres vivants*), Anne Brisaboïs (*Sciences de la Vie*), Egizio Valceschini (*Sciences humaines et sociales*), Any Castaings (*Alimentation humaine*), Monique Poulot (*Économie et politique*), Charles Dereix (*Forêts et filières bois*), Georges-Henri Florentin (*Forêts et filières bois*), Jean-Michel Besancenot (*Production animale*), Guilhem Bourrié (*Interactions milieux - êtres vivants*), Philippe Clergeau (*Environnement et territoires*), Christian Saber (*Agrofournitures*) et André Fougeroux (*Bibliothèque*).

Avant-propos

Dans ce petit livre consacré au chimiste Michel-Eugène Chevreul (1786-1889) :

1. On verra que les chimistes doivent ne pas oublier que leur science n'est pas à la portée de tous leurs amis ;
2. On tendra de faire comprendre quels furent les apports de Chevreul à la science, et notamment à la chimie des corps gras, est un hommage qu'il mérite amplement.
3. On verra aussi que les histoires de la chimie doivent éviter d'utiliser sans précaution des termes dont l'acception a changé : c'est la condition pour comprendre vraiment quel fut l'apport de Chevreul en chimie.
4. Plus généralement, pour être clair, la rigueur terminologique la plus grande s'impose : il en va du développement des sciences de la nature, et de la chimie en particulier.
5. Dans toute cette histoire, on ne devra pas oublier que la chimie moderne venait de naître, quand Chevreul commença ses travaux. En conséquence, il ne disposait pas de la notion moderne de molécule : les résultats obtenus par Chevreul doivent en paraître d'autant plus remarquables.
6. Pour bien situer les travaux, on exposera comment Chevreul est venu d'Angers à Paris, et, notamment, comment il a débuté au Muséum national d'histoire naturelle : il faut quelques éléments biographiques pour bien situer tout cela.
7. Il faudra également expliquer comment l'analyse chimique s'est progressivement affinée, de Lavoisier à Chevreul.
8. Et, bien sûr, il sera essentiel de bien montrer ce que l'on savait des savons et des graisses quand Chevreul en a commencé l'étude.
9. Cela permettra de bien comprendre ce qu'il a vraiment fait (et pas fait) à ce propos.
10. On terminera en exposant ce qu'il a ensuite fait à la Manufacture des Gobelins, à propos de couleur.
11. Il y aura un peu plus que cela, mais il ne faudra pas chercher une biographie exhaustive, parce que Chevreul publia des centaines d'articles, sur des sujets très variés, tout au long de sa longue carrière : 85 ans de chimie !

Sommaire

Chapitre 1 : Chevreul, chimiste.....	6
Chapitre 2 : Les triglycérides : au cœur du travail de Chevreul.....	19
Chapitre 3 : Un peu de contexte.....	24
Chapitre 4 : Les graisses et les savons, une histoire millénaire.....	47
Chapitre 5 : Enfin Chevreul.....	52
Chapitre 6 : Avant et après 1824.....	59
Références.....	65
Index.....	70

L'auteur

Hervé This est physico-chimiste à l'Inrae, professeur consultant à AgroParisTech, et directeur de l'*Inrae-AgroParisTech International Centre of Molecular Gastronomy*. Il est le créateur de la discipline scientifique nommée gastronomie moléculaire et physique, et il a également introduit la cuisine moléculaire et la cuisine de synthèse. Il est membre de l'Académie d'agriculture de France, où il est notamment un des quatre secrétaires éditeurs des *Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France*.

Chapitre 1

Chevreul, chimiste

Le titre de ce chapitre paraphrase d'abord la signature que Chevreul utilisait alors qu'il était plus que centenaire, après 1886 : « E. Chevreul, doyen des étudiants de France ». Surtout il annonce ce qui fait l'essentiel de ce texte, en même temps qu'il souligne implicitement la difficulté de l'exercice : parler de Chevreul, certes, mais, surtout, chercher à bien comprendre en quoi les travaux de Chevreul contribuèrent notablement au développement de la chimie.

Il faudra expliquer

L'exercice serait difficile ? Après tout, il y a des cours de chimie au Collège, puis au Lycée pour certains, et il y a des cours de chimie dans les premières années de l'enseignement supérieur scientifique et technologique ; on y rencontre Chevreul et ses travaux... Certes, mais je ne peux pas oublier que, remontant récemment l'avenue des Gobelins (on verra, concernant Chevreul, que ce choix n'était pas au hasard), en plein dans un Paris culturellement favorisé, je n'ai eu que très peu de réponses assurées des passants quand je les arrêtais en leur posant la question : « Pouvez-vous me dire ce qu'est une molécule ? ».

De même, je n'ai eu aucun succès, lors de plusieurs repas avec des amis, quand, ayant mis du sucre en poudre sur la table, puis ayant isolé devant eux un des cristaux, j'ai demandé à ces personnes « cultivées » (médecin spécialiste, infirmier, vigneron, musicien) de m'expliquer comment ils imaginaient la structure interne, la « construction », de ce petit « grain » de sucre que je leur montrais : de quoi était-il fait ? Quelle était sa constitution interne ? comment était-il « construit » ? Et ils n'avaient pas non plus d'idées à propos de la dissolution de ce grain dans l'eau : pourquoi le grain disparaissait-il ?

Je me suis (naïvement) étonné que mes amis ignorent les mécanismes de ce phénomène, et, surtout, qu'ils supportent de les ignorer, car je ne pensais pas demander beaucoup : j'aurais simplement aimé que l'on me réponde que le cristal était constitué d'objets petits, tous identiques, nommés molécules (de saccharose), régulièrement empilés. Et j'aurais été heureux que l'on me dise que, dans l'eau, les molécules d'eau, en incessant mouvement, heurtant les molécules de saccharose de la surface du cristal

(figure 2), viennent les disperser parmi les molécules d'eau (figure 3), jusqu'à ce que le cristal ait disparu, jusqu'à ce que le « sucre soit dissous » (cette description n'est pas parfaitement juste, mais ne finissons pas ici).



Figure 1. Au numéro 42 de l'avenue des Gobelins se trouve la Manufacture des Gobelins, qui fut créée en 1601 sous l'impulsion du roi Henri IV (en bas) (crédit AirForceMoine).

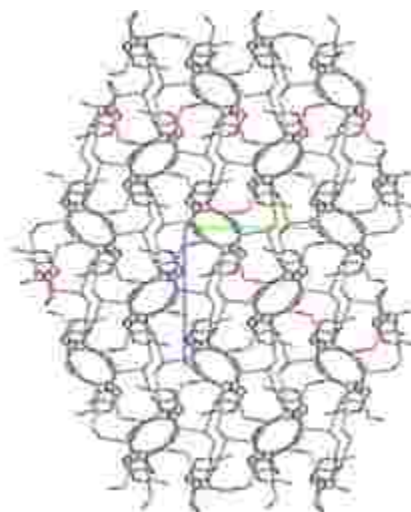


Figure 2. La molécule de saccharose (à gauche), dont le sucre de table est constitué à plus de 99 pour cent, et l'empilement de ces molécules dans un cristal de sucre (à droite). Sur ces représentations, les atomes de carbone sont en gris sombre, les atomes d'oxygène en rouge, et les atomes d'hydrogène en blanc.

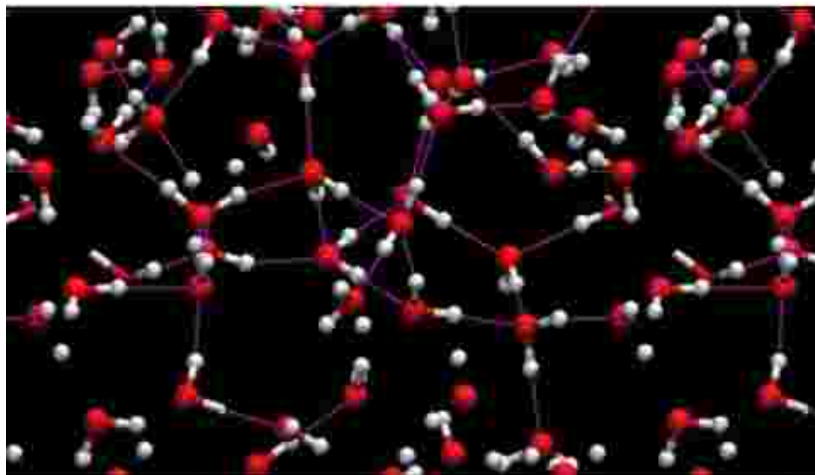
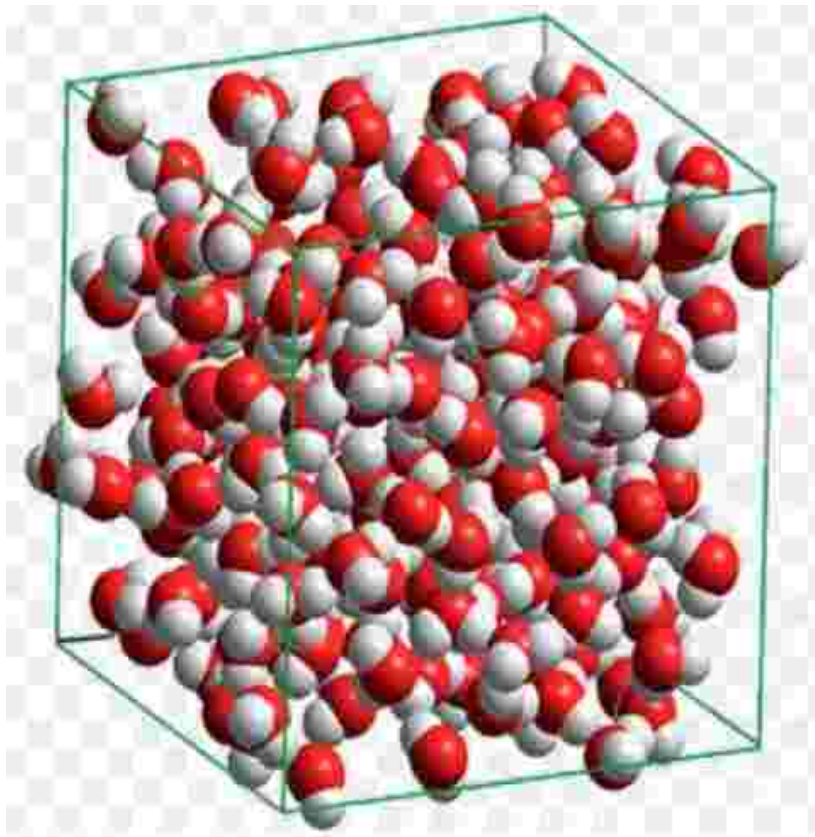


Figure 3. Le liquide que nous nommons eau (en haut) est formé de molécules toutes identiques, faites chacune d'un atome d'oxygène (en rouge) lié chimiquement à deux atomes d'hydrogène (en blanc). Les molécules d'eau sont animées de mouvements incessants, à une vitesse moyenne qui dépend de la température : à 20 °C, cette vitesse moyenne est d'environ 400 mètres par seconde. Évidemment les atomes ne sont pas des boules, et différentes représentations correspondent au même objet (en bas).

Les observations précédentes ne peuvent pas être négligées : ce sont des faits expérimentaux dont la communauté des chimistes doit tenir compte, notamment dans ses relations avec le public qui subventionne ses recherches. Plus généralement, elles doivent rappeler aux chimistes qu'ils ont intérêt à bien s'expliquer s'ils veulent se faire entendre à l'extérieur de leur communauté. D'autant qu'il y a des confusions terminologiques jusque dans les milieux universitaires (Myers, 2012 ; This, 2021a ; Reina *et al.*, 2022) : certains confondent corps, substance, composé, molécule... Et même ceux qui ne confondent pas font des abus de langage qui sont probablement nuisibles d'un point de vue social et politique, en ce qu'ils embrument les discussions collectives et les prises de décision politiques. Par exemple, certains parlent de molécule, objet matériel, pour nommer ce qui est un composé, donc une catégorie, abstraite, de molécules. Ou encore certains continuent de nommer oxygène ce qui est le dioxygène : ils confondent ainsi un élément, c'est-à-dire une catégorie d'atomes, et un composé, c'est-à-dire une catégorie de molécules, faites en l'occurrence de deux atomes de l'élément oxygène.

On pourrait continuer ainsi longtemps, mais nous terminerons temporairement en évoquant deux termes introduits par les chimistes du passé et dont le public conserve l'acception (périmée) d'alors. Tout d'abord, certains désignent par « albumine », au singulier, ce que l'on sait être un mélange d'environ 300 protéines, en solution dans le blanc d'œuf : on n'aurait pas dit différemment avant le 19^e siècle ! D'autre part, on entend encore parler de « la chlorophylle » pour désigner la matière qui serait responsable du vert des plantes vertes, alors que l'on sait que ce vert est dû au mélange de composés jaunes, oranges, rouges, verts et bleus. Dans les deux cas, les acceptions populaires sont largement périmées, les chimistes ayant montré que les intuitifs « principes immédiats » évoqués par certains de nos contemporains sont en réalité des mélanges de composés.

Les principes immédiats ? Il faut les évoquer dès maintenant, parce qu'ils seront centraux dans l'histoire de la chimie des graisses qui va nous occuper largement dans ce livre. Antoine-Laurent de Lavoisier (1743-1794), le père de la chimie moderne (figure 4), considérait comme simple un corps que l'on n'avait pas encore pu décomposer, et Chevreul, peu après lui, tenait pour « principe immédiat » toute substance dont on ne pouvait rien enlever de différent d'elle-même à moins d'en altérer la nature (1824a) :

« L'analyse chimique appliquée aux produits de l'organisation est immédiate lorsqu'elle a pour objet de séparer les composés qui constituent immédiatement les êtres organisés ; elle est « élémentaire », lorsqu'elle a pour objet de déterminer la nature et la proportion des éléments qui constituent ces mêmes composés ».

Il donne des exemples : « *Le gluten frais, trituré avec de l'alcool, se réduit, suivant M. Taddey, en deux substances ; l'une, qui se dissout, est la gliadine ; l'autre, qui ne se dissout pas, est le zimome* ».

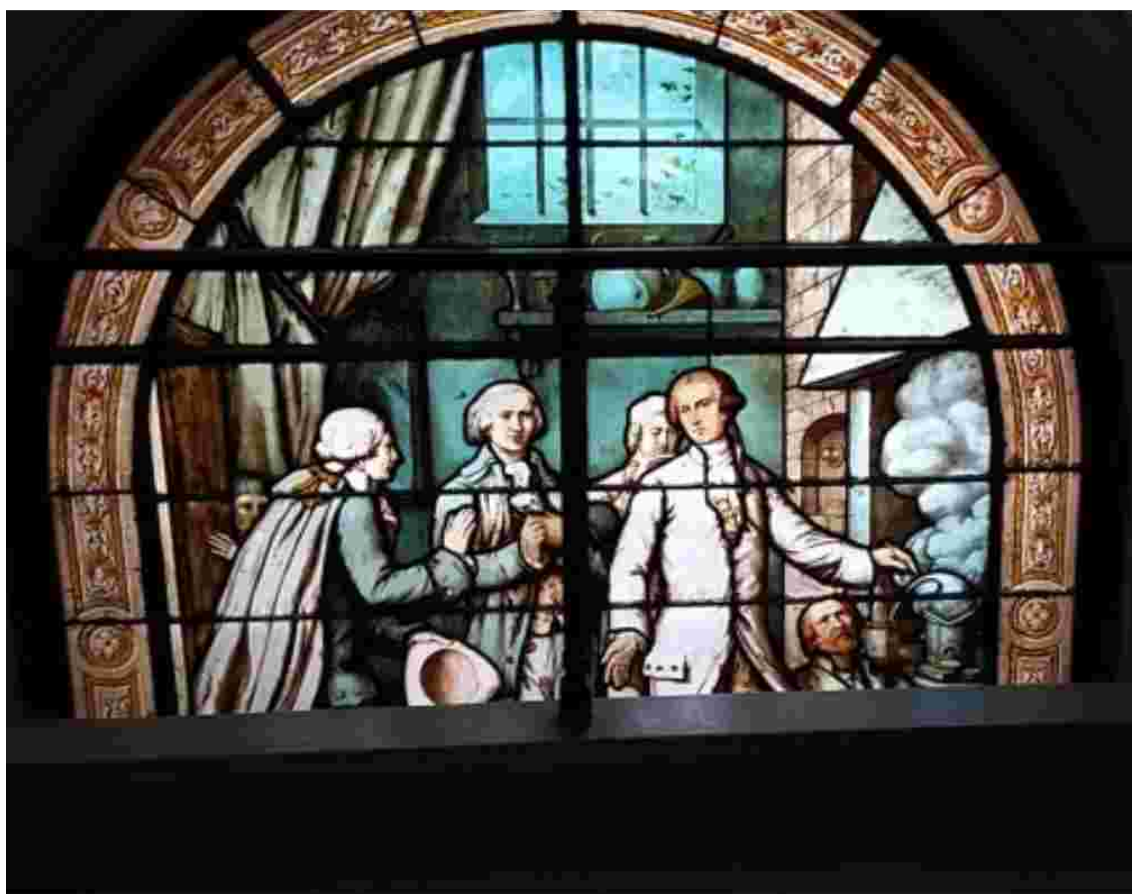


Figure 4. Antoine-Laurent de Lavoisier (1743-1794), dans son laboratoire de l'Arsenal, près de la Bastille. Lavoisier est justement surnommé père de la chimie moderne, parce qu'il sut donner à la « chymie » une rationalité fondée sur l'usage du calcul, lequel était lui-même fondé sur la caractérisation quantitative des phénomènes (crédit H. This).

Interprétons et commentons : Chevreul commence par évoquer le « gluten », masse à la fois visqueuse et élastique que l'on récupère quand on malaxe dans de l'eau une pâte faite de farine et d'eau (figure 5). Il y a donc une première séparation simple de la farine en deux constituants, nommé amidon et gluten, mais il observe que ces derniers ne sont pas des « principes immédiats », puisque l'on pouvait poursuivre la décomposition. Ajoutons que l'histoire ne s'est pas arrêtée à ces « glaiadine » et « zimome », puisque les perfectionnements de l'analyse chimique ont finalement permis de dissocier le gluten en ses composés constitutifs (This, 2021b ; 2023a) : principalement de l'eau et

de nombreuses protéines, dont certaines sont de la catégorie des gliadines, et d'autres de la catégorie des gluténines.



Figure 5. Quand on malaxe de la farine de blé avec de l'eau pour faire une pâte, puis quand on triture cette pâte dans de l'eau, on en fait sortir une poudre blanche (nommée amidon), tandis que reste entre les doigts une matière à la fois élastique et visqueuse, jaunâtre, qui a été nommée gluten au début du 19^e siècle (à gauche). Cette expérience de « lixiviation » fut proposée pour la première fois à Strasbourg par le chimiste alsacien Johannes Kesselmeyer (à droite, la couverture de sa thèse), qui ré-explorait des observations du chimiste italien Jacopo Bartolemeao Beccari (1682-1766) (crédit H. This).

Pour « la chlorophylle », l'histoire est semblable : le terme fut introduit par les chimistes français Joseph Bienaimé Caventou (1795-1877) et Joseph Pelletier (1798-1842) pour désigner ce que les cuisiniers nommaient depuis longtemps le « vert d'épinard », une matière colorante verte que l'on produit en broyant des épinards et en chauffant le broyat (Caventou et Pelletier, 1817) : se sépare une écume d'un beau vert printanier, au-dessus d'un liquide brun. Toutefois, au début du 20^e siècle, il apparut que cette matière est faite de nombreux composés : plusieurs appartiennent à ce que l'on a ensuite nommé la classe des chlorophylles (cette fois, le mot n'est pas entre guillemets), mais, aussi, d'autres de la classe des caroténoïdes.

Ces deux exemples font apparaître une des difficultés que nous aurons dans ce livre, et, plus généralement, chaque fois que l'on examine des œuvres anciennes de chimie : certains mots n'ont pas la même acception pour les chimistes du passé et pour nous. Aujourd'hui, parler de « l'albumine » ou de « la chlorophylle » n'a aucun sens, puisque le mot « albumine » désigne une catégorie de protéines : on peut parler d'une albumine particulière, ou des albumines. De même, on ne peut pas parler de « la » chlorophylle,

mais seulement « des » chlorophylles, puisque ce sont de nombreux composés différents, telles les chlorophylles a, a', b, b', etc.

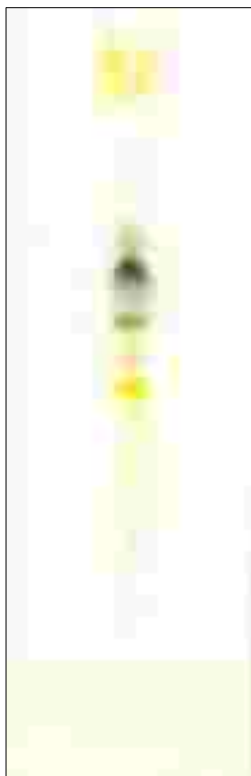


Figure 6. Les chimistes Joseph Bienaimé Caventou (1795-1877) et Joseph Pelletier (1798-1842) ont nommé « chlorophylle » ce que les cuisiniers nomment « jus d'épinard », « vert d'épinard » au moins depuis le Moyen-Âge. La couleur verte résulte du mélange de différentes couleurs, comme on s'en aperçoit quand on broie des épinards et que l'on dépose une goutte du broyat à la base d'un papier filtre, qui est placé dans un solvant organique : la montée de ce dernier dans le papier, par capillarité, entraîne à différentes vitesses les composés constitutifs du broyat. Se séparent ainsi des composés de la classe des caroténoïdes (jaune, orange, rouge) et des composés de la classe des chlorophylles (en vert) ou leurs dérivés (en bleu).

Aussi, pour discuter les apports de Chevreul, pour bien montrer les progrès de la connaissance dont nous lui sommes redevables, nous utiliserons des guillemets pour les termes anciens dont l'acception moderne diffère de l'acception initiale. Par exemple, nous verrons que la « margarine » découverte par Chevreul peu après 1810 fut ultérieurement renommée par lui-même « acide margarique » (Chevreul, 1823a). Et, à ce propos tout particulier, nous devons conserver les guillemets, car si l'on nomme

aujourd'hui acide margarique (acception moderne, sans guillemets) un acide gras à 17 atomes de carbone, nommé acide heptadécanoïque par l'Union internationale de chimie pure et appliquée, l'« acide margarique » qu'isola Chevreul était en réalité composé de deux acides gras, respectivement à 16 et à 18 atomes de carbone.

Enfin, puisqu'il est déjà question ici de produits dont le nom commence par « marga », signalons aussi que la « margarine » de Chevreul n'a pas de rapport avec cette margarine que certains utilisent pour cuisiner et qui est un substitut de beurre, breveté en 1869 par le pharmacien Hippolyte Mège-Mouries (1817-1880) (Klere, 2000).

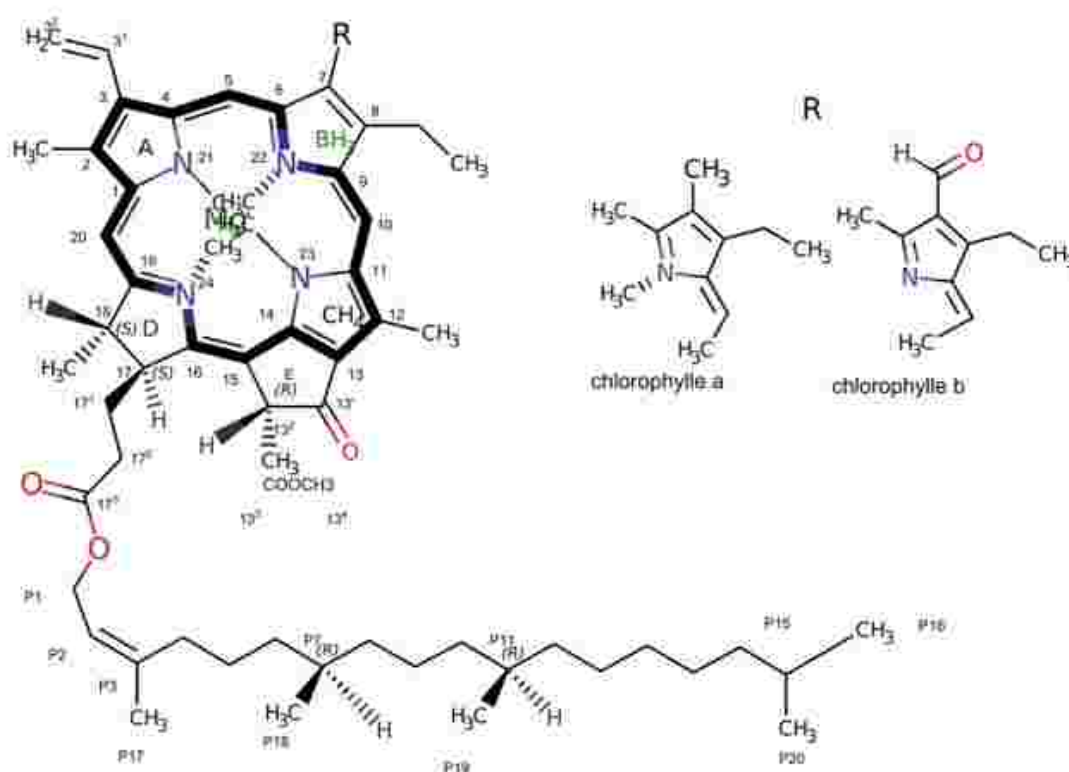


Figure 7. Les molécules de chlorophylles a et b diffèrent par un résidu noté R, qui est explicité à droite.

Toujours pour expliquer ce salutaire choix typographique des guillemets, restons sur un composé au cœur du travail de Chevreul – le glycérol, ou 1,2,3-propanetriol – et signalons que nous parlerons de glycérol là où Chevreul et d'autres parlaient de « principe doux des huiles », puis de « glycérine », terme introduit par Chevreul, du grec glukeros, doux. Stricto sensu, nous pourrions également mettre des guillemets à glycérol, puisque c'est un terme commun de chimie, et que le terme conforme aux recommandations internationales est propane-1,2,3-triol, mais glycérol est toléré par l'Union internationale de chimie, de sorte que nous utiliserons le mot simplement.

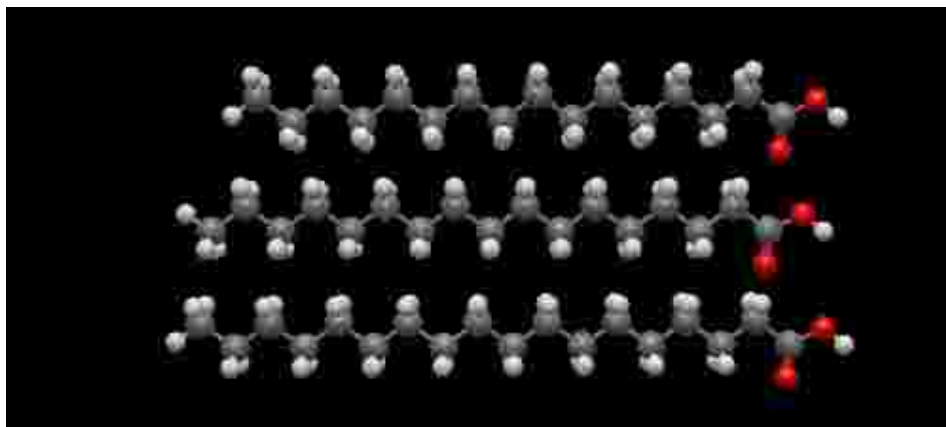


Figure 8. Trois molécules d'acides gras, avec 16 atomes de carbone (acide palmitique, ou hexadécanoïque, en haut), 17 atomes de carbone (acide margarique, ou heptadécanoïque, au milieu) et 18 atomes de carbone (acide stéarique, ou octadécanoïque, en bas). Les acides gras sont caractérisés par la présence, dans leurs molécules, d'un groupe d'atomes dit « acide carboxylique » -COOH (à droite), avec un atome de carbone (C) lié d'une part à un atome d'oxygène (O) par une liaison double, et, d'autre part, à un atome d'oxygène lié à un atome d'hydrogène (H). Sans attendre, signalons qu'il n'y a pas (ou très peu) d'acides gras dans les matières grasses alimentaires : elles sont très majoritairement constituées de composés qui ont pour nom triglycérides. Les molécules de triglycérides contiennent trois parties qui sont analogues à des acides gras : ce sont des résidus d'acides gras.

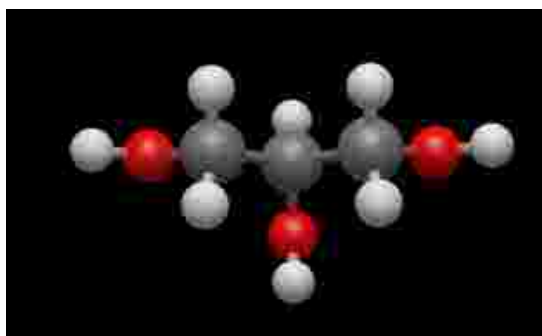


Figure 9. Le glycérol, ou propane-1,2,3-triol, était initialement nommé glycérine. Il fut détecté par le chimiste suédois Carl Wilhelm Scheele, mais caractérisé pour la première fois par Chevreul. La molécule de glycérol est faite de trois atomes de carbone enchaînés (en gris sombre), chaque atome de carbone étant lié à un atome d'oxygène (en rouge) lié lui-même à un atome d'hydrogène (en blanc), et à des atomes d'hydrogène en nombre suffisant (un ou deux) pour que chaque atome de carbone soit tétravalent, c'est-à-dire qu'il ait un total de quatre liaisons chimiques avec des atomes voisins.

Il faudra parler de molécules

Cette convention typographique étant décidée, nous devons maintenant donner des explications supplémentaires, afin de ne pas perdre celles et ceux qui veulent bien comprendre le travail de Chevreul, notamment à propos de la constitution des matières grasses, ce travail qui le rendit universellement - et très justement - célèbre. En effet, le langage de la chimie est souvent malmené dans le langage courant, parce que certains mots désignent des objets matériels, tandis que d'autres désignent des objets abstraits, des catégories.

Pour commencer, partons des objets matériels qui font notre monde. La chimie a longtemps hésité, avant de finir par considérer que de nombreuses matières, ou substances, sont faites de molécules (au sens moderne, pas au sens vague de petit objet qui régnait avant 1860), lesquelles sont des objets matériels, faits d'atomes solidarisés par des liaisons chimiques. Et, pour marcher en terrain ferme, on se propose de commencer par bien distinguer les matières, les substances, les éléments, les composés, les molécules.

Les matières, ou substances, constituent la partie matérielle, concrète, tangible, de notre environnement : l'eau, un objet en fer, du blanc d'œuf, etc. En revanche, les composés sont des catégories - abstraites, donc - de molécules. Par exemple, le mot saccharose désigne cette catégorie - abstraite, j'insiste - de molécules dont l'empilement fait les cristaux de notre sucre de table (le sucre blanc est du saccharose pur à plus de 99 pour cent). Et les molécules, elles, sont des objets matériels faits d'atomes, également matériels. Il y a différentes sortes d'atomes, et les sortes, ou catégories - abstraites, à nouveau - d'atomes, ont pour nom hydrogène, oxygène, carbone, etc. Ces sortes sont les éléments (chimiques).

Par exemple, le liquide incolore, transparent, de goût brûlant, qui était nommé « esprit de vin », ou simplement « alcool », du temps de Chevreul, est une substance, un objet matériel ; il est fait quasi exclusivement (en tout cas pour l'alcool dit absolu) de molécules (objets matériels) d'un unique composé (catégorie abstraite) nommé aujourd'hui éthanol, ou alcool éthylique (figure 10). Plus en détail, les molécules d'éthanol sont faites de deux atomes de carbone (le carbone étant un élément, ou élément chimique diront les non chimistes), d'un atome d'oxygène et de six atomes d'hydrogène.

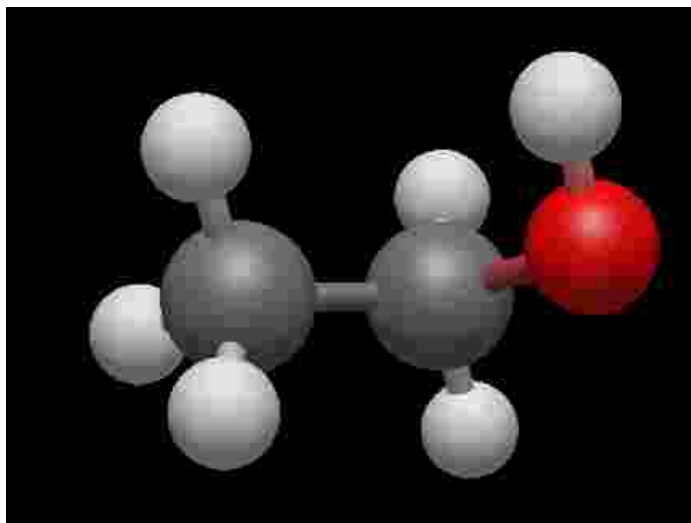


Figure 10. Les molécules d'éthanol sont composées de deux atomes de carbone (en gris sombre), l'un étant lié à trois atomes d'hydrogène (en blanc, à gauche) et l'autre à deux atomes d'hydrogène et à un atome d'oxygène (en rouge) qui est lui-même lié à un atome d'hydrogène.

Autre exemple : l'eau. Dire que l'eau est une molécule est erroné, dans l'acception moderne du mot molécule. La confusion peut naître de ce que le mot eau désigne à la fois une substance matérielle (de l'eau dans un verre) et une catégorie de molécules (un composé, donc) qui sont toutes faites d'un atome d'oxygène et de deux atomes d'hydrogène. L'Union internationale de chimie propose, certes, de nommer oxidane le composé qui forme l'eau, mais aucun chimiste n'utilise ce terme, et tous utilisent le mot eau, qui confond donc la catégorie de molécules et la substance matérielle : le diable s'introduit dans l'affaire ! Et pour revenir à la molécule d'eau, il faut ajouter que la chimie a peiné avant d'arriver à sa description, et il est important d'observer que les trois atomes ne sont pas « assemblés » au sens d'une simple juxtaposition, mais bien groupés par des forces particulières que l'on nomme des liaisons chimiques. Mon insistance, ici, est justifiée par le fait que la question de l'assemblage des atomes en molécules est au cœur du travail de Chevreul sur les graisses.

En tant que substance (matérielle, donc), l'eau peut être en phase vapeur, ou liquide, ou solide, par exemple, selon les conditions de température et de pression (Lide, 2005). Dans tous les cas, cette matière est faite de très nombreuses molécules identiques (des

dizaines de milliers de milliards de milliards par gramme d'eau), toutes du composé nommé communément eau, avec la confusion possible entre le nom du composé et le nom de la substance.

Ce qui est dit de l'éthanol ou de l'eau vaut pour les autres substances, et l'abus de langage (ou impropriété, selon les cas) qui consiste à parler de molécule pour évoquer une espèce chimique, un composé, a des conséquences graves : je peux témoigner avoir rencontré un journaliste scientifique d'une grande chaîne de télévision qui pensait (et se préparait à l'expliquer à son public !) qu'il y avait 450 molécules odorantes dans les vins ; cette personne pensait bien à 450 objets particuliers, à 450 molécules des chimistes, et pas à 450 composés odorants. Or si le vin contient bien quelques centaines de composés odorants différents (selon les vins), chacun de ces composés est présent, dans une bouteille de vin, à raison de centaines de milliers de milliards de molécules (Pons *et al.*, 2017).

La pratique des conférences de vulgarisation, ainsi que des interrogations de passants dans la rue (souvenons-nous de l'avenue des Gobelins), montrent que le cas de ce journaliste est loin d'être isolé : même quand la notion de molécules est déclarée connue, l'idée à laquelle elle correspond est souvent erronée, sans même aller jusqu'à espérer que nos amis sachent tous que les molécules sont en mouvement. Ajoutons que les confusions entre composés et molécules, quand ce ne sont pas des abus de langage, peuvent résulter tout autant de la connaissance insuffisante de la chimie, notamment de son vocabulaire, que de la difficulté de penser les catégories, déjà discutée par Aristote, puis bien d'autres (Van Aubel, 1963), avant d'être un des écueils de l'enseignement, notamment celui des mathématiques modernes (Thom, 1970).

Toute cette discussion préliminaire peut sembler un peu longue, mais l'histoire de la chimie la justifie amplement : l'introduction de la notion moderne de molécule, notamment par les chimistes italiens Amedeo Avogadro (1776-1856) et Stanislao Cannizzaro (1826-1910), fut si révolutionnaire que la notion moderne de molécule resta l'objet de controverses scientifiques violentes. Jusque dans la première moitié du 20^e siècle, de nombreux chimistes français, notamment autour de Marcellin Berthelot (1827-1907), la refusaient énergiquement (Scheidecker-Chevallier, 1997). Tandis que le chimiste néerlandais Jakobus Henricus van 't Hoff (1852-1911) était capable de dessiner la forme de chaise de la molécule de « glucose » en 1871, positionnant les atomes qui composent la molécule (figure 17), les plus réactionnaires des chimistes français, hélas à des postes clés et jusqu'à celui de ministre, refusaient encore l'idée, sous le prétexte qu'elle aurait dépassé les faits, que l'on aurait introduit là une hypothèse terrible. Pis, l'influence politique de Berthelot, notamment en matière d'instruction et de formation universitaire, fit prendre à la chimie française un demi-siècle de retard (Jacques, 1987).

Bref il y a bien des raisons d'être vigilant à propos de ce mot molécule, spécialement quand on s'adresse à des interlocuteurs qui ne sont pas au courant des possibilités de confusion.



Figure 11. Le chimiste italien Amedeo Avogadro (à gauche), de son nom complet Lorenzo Romano Amedeo Carlo Avogadro, naquit à Turin le 9 août 1776 et y mourut le 9 juillet 1856. Il proposa notamment que deux volumes égaux de gaz différents, dans les mêmes conditions de température et de pression, contiennent un nombre identique de molécules. Avogadro utilisait le mot « molécule » pour décrire les atomes (« molécule élémentaire »), les « molécules d'éléments » (« molécule constituante ») et les « molécules de composé » (« molécule intégrante »). L'apport d'Avogadro fut mieux compris par Stanislao Cannizzaro (Palerme, 13 juillet 1826 - Rome, 10 mai 1910), qui déplorait les confusions terminologiques de la chimie d'alors, nuisibles à l'enseignement de la chimie. Et un mémoire qu'il présenta au premier congrès mondial des chimistes, à Karlsruhe, en 1860, fit basculer une partie notable de la communauté internationale vers les terminologies plus claires que nous avons aujourd'hui.

Chapitre 2

Les triglycérides : au cœur du travail de Chevreul

De façon plus focalisée maintenant, et plus proche du sujet qui nous intéresse ici (l'œuvre scientifique de Chevreul), des abus de langage que je crois néfastes, en sciences, technologies et techniques des aliments, concernent les composés qui furent étudiés par Chevreul lors de ses travaux sur les matières grasses : les triglycérides, rapidement évoqués précédemment.

Certaines publicités parlent des « acides gras de l'huile », mais il faut dire et répéter que ni l'huile ni les autres matières grasses ne sont composés d'acide gras : l'huile et les autres matières grasses sont principalement constituées de molécules de triglycérides, et si elles contiennent des acides gras, il y en a très peu. Certains, un peu mieux informés que ces publicitaires qui ont été volontairement ou inconsciemment hâtifs, parlent des « acides gras d'un triglycéride », et cela n'est juste non plus, car il n'y a pas d'acides gras dans un triglycéride, ni de molécules d'acides gras dans une molécule de triglycéride. Il faut plutôt dire que, dans une molécule d'un triglycéride, il y a seulement ce que l'on doit nommer très précisément des résidus de molécules d'acides gras. Cette dernière dénomination est non seulement conforme aux choix internationaux, mais, de surcroît, pour qui écoute les mots et cherche à comprendre ce qu'ils disent, elle est également judicieuse et explicite (IUPAC, 2019). Pourquoi ?

Parce que les acides gras (on est parfois obligé de parler d'acides gras libres pour se faire bien comprendre, mais on verse alors dans la périssologie ou le pléonasme selon les cas) sont des composés bien différents des triglycérides. Ce fut d'ailleurs un apport de Chevreul que d'établir que les corps gras alimentaires sont majoritairement composés de triglycérides, et non d'acides gras, reconnaissant, par des mesures de belle précision, que la réaction chimique par laquelle on peut éventuellement synthétiser un triglycéride à partir d'acides gras ne correspond pas à une juxtaposition, mais à un réarrangement d'atomes qui change la nature des réactifs (Chevreul, 1823a). Nous verrons cela plus loin, mais je propose d'insister, au risque de presque bégayer, et même si nous aurons l'occasion d'y revenir : les molécules de triglycérides ne sont pas de simples réunions, assemblages, juxtapositions, d'une molécule de glycérol et de trois molécules d'acides gras, mais bien des associations chimiques, selon un mode bien particulier, puisqu'il y a l'établissement de liaisons chimiques entre les atomes de

certain – et certains seulement – des atomes des réactifs que peuvent être une molécule de glycérol et trois molécules d'acides gras. D'ailleurs, dans la phrase qui précède, est précisé « que peuvent être », et non pas « que sont », parce que l'on pourrait construire une molécule de triglycéride à l'aide d'autres réactifs qu'une molécule de glycérol et trois molécules d'acide gras.

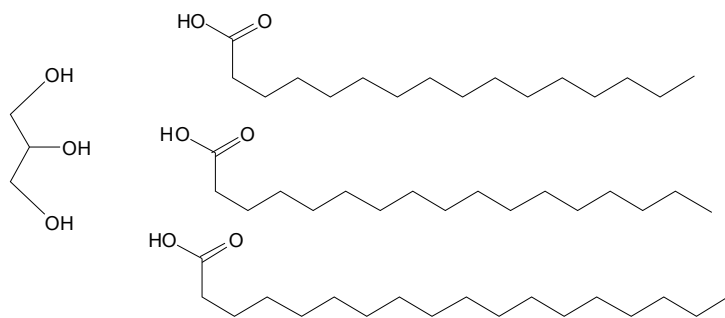


Figure 12. À partir d'une molécule de glycérol (à gauche) et de trois molécules d'acides gras (à droite), on peut synthétiser une molécule de triglycéride, en réarrangeant les atomes des réactifs. Cette idée est au cœur du travail de Chevreul. Sur cette représentation, pour plus de clarté, on a omis de noter par la lettre C les atomes de carbone qui figurent aux sommets et aux extrémités des molécules, et par la lettre H les atomes d'hydrogène qui viennent donner quatre atomes voisins aux atomes de carbone.

Une justification supplémentaire de cette nécessité d'insister ? L'expérience de l'enseignement universitaire montre combien la confusion entre acides gras et triglycérides (c'est la même question pour les acides aminés et les protéines, qui ne sont faites que de résidus d'acides aminés, et non d'acides aminés) reste répandue jusqu'au niveau du mastère, à l'université, et, de même, l'analyse des discussions publiques montre combien les idées sont souvent confuses à ce propos.

Tout cela étant posé, interrogeons-nous : comment expliquer les différences entre triglycérides et acides gras à un public qui entend parler sans cesse « des acides gras des huiles de table » jusque dans des documents d'hygiène alimentaire (PNNS, 2020 ; Olivier *et al.*, 2014) ? Le recours à l'expérience a cette qualité merveilleuse que les faits s'imposent, concrets. Par exemple, on pourrait sans doute commencer par indiquer que certains aliments que l'on broie et que l'on chauffe laissent surnager une matière grasse analogue à l'huile, au-dessus d'un liquide qui contient de l'eau. Cette matière grasse qui surnage, celle qui est au-dessus du petit lait quand on prépare du beurre clarifié, ou celle

que libère le foie gras excessivement chauffé, par exemple, est quasi exclusivement faite de très nombreux objets analogues à des pieuvres à trois bras souples : ces objets sont des molécules de triglycérides. Notons que l'on pourrait également dire triacylglycérols, mais on augmenterait inutilement la complexité (figures 13 et 14).

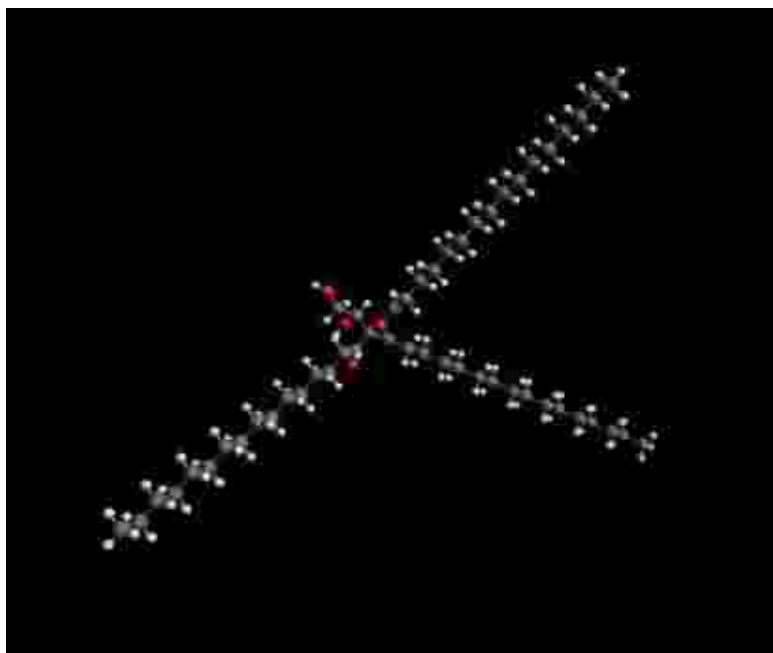


Figure 13. Une représentation d'un triglycéride particulier : le tripalmitoylglycérol. Dans cette représentation, les boules gris sombre représentent des atomes de carbone, les boules gris clair des atomes d'hydrogène, et les boules rouges des atomes d'oxygène.

Bien sûr, les matières grasses contiennent également des molécules d'autres composés que des triglycérides, tels des acides gras ou des tocophérols, sans compter les composés odorants, mais ils sont très minoritaires. Plus précisément, par exemple, au milieu des molécules de triglycérides, les huiles alimentaires contiennent aussi de rares molécules d'acides gras (libres, donc), des molécules de squalène, des molécules d'acides terpéniques, des molécules de stérols, etc., mais le total de toutes ces dernières ne fait que un pour cent en masse.

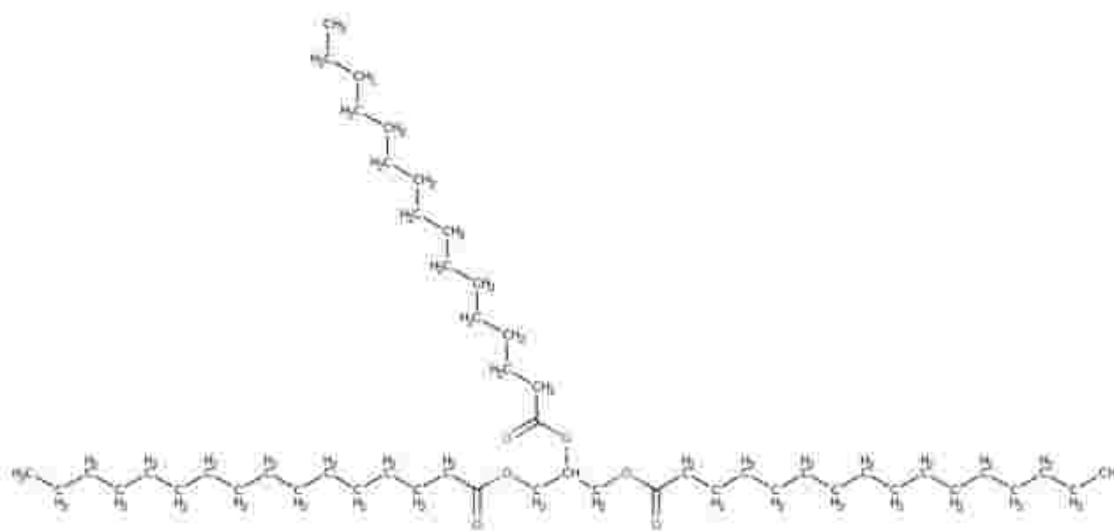


Figure 14. La formule entièrement développée du tripalmitoylglycérol : les lettres C, H, O représentent respectivement les atomes de carbone, d'hydrogène et d'oxygène. La molécule est représentée avec les trois résidus d'acides gras étendus, mais, en réalité, les trois résidus sont souples, et en constant mouvement.

Concentrons-nous donc sur ces triglycérides qui sont très majoritaires et qui, nous l'avons dit, sont le cœur du grand travail de chimie de Chevreul. Les matières grasses en contiennent de très nombreuses sortes différentes (plusieurs milliards pour la matière grasse laitière), dont les noms sont fixés internationalement (IUPAC, 2019) : les règles générales de dénomination chimique conduisent à reconnaître d'abord, au centre des molécules de triglycérides, un motif fait de trois atomes de carbone enchaînés, liés chacun à un atome d'oxygène, ce qui est également le cas dans les molécules du composé nommé glycérol.

Pour autant – on le répète parce que c'est manifestement nécessaire –, il n'y a pas de glycérol (ni le composé, ni la molécule) dans les molécules des triglycérides ; il n'y a qu'un groupe d'atomes qui fait penser au glycérol, et c'est ainsi que l'on doit parler de résidu de glycérol pour cette partie isolée par la pensée dans la molécule de triglycéride (IUPAC, 2019). De même, on reconnaît, liées à ce résidu de glycérol, des chaînes d'atomes de carbone liés à des atomes d'hydrogène et qui sont, à quelques atomes près, des molécules d'acides gras : on dit que les molécules de triglycérides contiennent trois résidus d'acides gras.

Ajoutons, puisque nous en sommes à considérer ces molécules de triglycérides, qu'une molécule d'acide gras n'est pas limitée à une chaîne d'atomes de carbone et d'atomes d'hydrogène ; nous avons vu (figure 8) qu'elle a, à une extrémité, un groupe d'atomes dit acide carboxylique, l'atome de carbone (terminal dans le cas général) étant lié à un atome d'oxygène par une double liaison, et à un groupe dit hydroxyle, fait d'un atome d'oxygène lié lui-même à un atome d'hydrogène. Dans les molécules de triglycérides, il n'y a pas cette structure de la molécule d'acide gras comme telle, mais seulement une partie qui est la même à quelques atomes près.

Bref, un chimiste ne fait que reconnaître, dans les molécules de triglycérides, un résidu de glycérol et trois résidus d'acides gras.

Cela n'était pas connu avant les travaux de Chevreul, et c'est au cœur de son apport.

Chapitre 3

Un peu de contexte

Avec l'introduction précédente, on voit que nous ne nous sommes pas résolus à limiter la présentation de Chevreul à des circonstances de sa vie, avec des dates, des lieux, des positions, sa famille, ses amis... En effet, sous peine d'argument d'autorité, une personnalité ne mérite d'être présentée que si l'on comprend précisément son apport. D'ailleurs, Chevreul fut moins remarquable par les circonstances de sa vie que par ses travaux de chimie. Et, comme indiqué, la difficulté de présenter ces travaux est de taille, car il s'agit de les expliquer en les situant dans une époque où la chimie moderne était toute récente.

Quand Chevreul naît à Angers, le 31 août 1786, ce merveilleux Denis Diderot (1713-1784), qui fut tout aussi bien écrivain que philosophe, et le mathématicien Jean Le Rond d'Alembert (1717-1783) ont déjà publié le quatrième tome de leur *Encyclopédie* (ENCCRE, 2024) : c'est dans ce tome (1754) que l'alchimie, qui était présente dans le premier tome (1751), est supplantée par la « chymie », puis par la chimie. Le changement ne fut pas seulement terminologique, mais correspondit à un bouleversement intellectuel : on abandonnait l'idée alchimique selon laquelle une expérience qui ne donnait pas les résultats attendus aurait révélé une faute du manipulateur, et l'on en venait à penser plutôt que les résultats d'une expérience sont ce qu'ils sont ; s'ils sont contraire à la théorie, c'est que cette dernière est erronée, ou insuffisante (Kahn, 2016). Certes Galilée avait déjà dit, dès le 17^e siècle, la primauté de l'expérience sur toute « autorité » (Galilée, 1640), mais l'étude des transformations chimiques de la matière était si difficile que la fondation de la chimie, avec l'introduction de descriptions quantitatives, se fit attendre ; encore en 1899, le physico-chimiste français Pierre Duhem (1861-1916) décrivait un état de la chimie qui restait critiquée pour ses « recettes » (Duhem, 1899).

N'anticipons pas, et observons que, avant la naissance de Chevreul, Lavoisier, faisant de la chimie de façon quantitative, pesant ses réactifs et ses produits à l'aide de balances précises, mesurant des volumes dans de merveilleuses verreries que l'on peut admirer au Conservatoire national des arts et métiers, avait déjà à son actif une théorie générale de la combustion qui réfutait la théorie héritée de l'alchimie, notamment de l'alchimiste allemand Georg Ernst Stahl (1659-1734), et qui stipulait que les métaux que l'on calcine

« Tout ce qu'on peut dire sur le nombre et la nature des éléments se borne suivant moi à des discussions purement métaphysiques : ce sont des problèmes indéterminés qu'on se propose de résoudre, qui sont susceptibles d'une infinité de solutions, mais dont il est probable qu'aucune en particulier n'est d'accord avec la nature. Je me contenterai donc de dire que si par le nom d'éléments nous entendons désigner les molécules simples et indivisibles qui composent les corps, il est probable que nous ne les connaissons pas : que si au contraire nous attachons au nom d'éléments ou de principe des corps l'idée du dernier terme auquel parvient l'analyse, toutes les substances que nous n'avons encore pu décomposer par aucun moyen, sont pour nous des éléments ; non pas que nous puissions assurer que ces corps que nous regardons comme simples, ne soient pas eux-mêmes composés de deux ou même d'un plus grand nombre de principes... (mais) puisque nous n'avons aucun moyen de les séparer, ils agissent à notre égard à la manière des corps simples, et nous ne devons les supposer composés qu'au moment où l'expérience et l'observation nous en aurons fourni la preuve ».

Dans cet extrait, le terme « élément » n'est donc pas celui de la catégorie, mais désigne un corps simple. En revanche, c'est parce que Lavoisier avait extrait l'oxygène de nombreux composés (acide nitrique, oxydes, etc.) qu'il fut le découvreur de l'élément oxygène, dépassant le chimiste suédois Carl Wilhelm Scheele (1742-1786), dont la découverte était restée ignorée, le chimiste français Pierre Bayen (1725-1798), qui n'avait pas bien perçu l'importance d'une observation qu'il avait faite, ou le chimiste anglais Joseph Priestley (1733-1804), qui avait isolé le dioxygène gazeux sans bien comprendre ce dont il s'agissait (il était de ceux qui croyaient au phlogiston).

Chevreul naît un an après la publication de la *Méthode de nomenclature chimique* (Lavoisier *et al.*, 1787) que Lavoisier avait préparée avec Louis Bernard Guyton-Morveau (1737-1816) (il se nommait Guyton de Morveau avant la Révolution), Claude-Louis Berthollet (1748-1822), Antoine-François Fourcroy (1755-1809) (né de Fourcroy), Jean Henri Hassenfratz (1755-1827) et Pierre Auguste Adet (1763-1834).

Cette nouvelle nomenclature éradiquait les dénominations alchimiques (« liqueur des cailloux », « magistère de soufre », « sucre de Saturne », « teinture spiritueuse », etc.) pour les remplacer par des termes raisonnés, construits sur des particularités chimiques des corps. Et Lavoisier, toujours, était en pleine préparation de ce *Traité élémentaire de chimie* (1789) qui fut le premier manuel de chimie moderne, présentant une vue unifiée des nouvelles théories de chimie, affirmant que la masse des corps (souvenons-nous de l'importance de la balance, en particulier, et de la mesure en général) se conserve dans les réactions, et niant l'existence du phlogiston. Si l'on n'a pas de preuve que Lavoisier ait dit (ni écrit) que « rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme », ce qui est une idée qui date au moins de la Grèce antique, Lavoisier utilisait l'idée pour guider ses travaux.

C'est donc dans ce contexte que naît Chevreul, mais, à l'autre extrémité de sa vie très longue (il meurt à l'âge de 102 ans), il connaîtra l'idée moderne de molécules, ayant effectué ses travaux sur les graisses sans ce support théorique essentiel (This, 2021c) : pendant une bonne partie de la vie de Chevreul (jusqu'en 1860 au moins), les chimistes utilisaient indistinctement les mots « atomes », « corpuscules », « particules », « molécules » pour désigner les petits objets de leurs études. Dans la phrase qui précède, le mot indistinctement n'est pas exagéré : il y a des textes où Louis Pasteur (1822-1895), contemporain de Chevreul, utilise plusieurs de ces mots dans une même phrase pour désigner le même objet ! Et, dans les textes de l'époque, on trouve même l'expression « atome composé », alors que le mot atome vient du grec *atomos*, qui signifie insécable. L'abbé René Just Haüy (1743-1822), qui fonda la cristallographie moderne, avait pour socle intellectuel le fait qu'un cristal de calcite qui s'était brisé devant lui avait laissé apparaître un cristal de même forme, mais plus petit, et il introduisit la terminologie « molécule intégrante ».

Chevreul lui-même, dans un texte sur l'analyse chimique (Chevreul, 1824a), confond « corps simples » et « éléments ». Quand Cannizzaro vint travailler avec Chevreul au Muséum, à partir de 1849, il n'avait pas encore pris la différence non plus, et, on l'a vu, c'est seulement à partir de 1860 que les chimistes commencèrent à avoir les idées plus claires à ce propos.

Terminons sur ce sujet en indiquant que, en 1923, soit un demi-siècle après que van 't Hoff avait publié ses articles où il dessinait les atomes dans les molécules, certains voulurent reconnaître au physicien Jean Perrin (1870-1942) d'avoir « montré les atomes », comme si les chimistes en ignoraient l'existence.

Il nous faudra conserver tout cela à l'esprit, quand nous examinerons les travaux de chimie de Chevreul, dont les travaux sur les graisses sont antérieurs au congrès de Karlsruhe, en 1860.



Figure 16. René Just Haüy (Saint-Just-en-Chaussée, 28 février 1743 - Paris, 1^{er} juin 1822) était le fils d'un tisserand, et le frère de Valentin Haüy, qui consacra sa vie aux aveugles et créa la première école pour aveugles. En 1781, il découvrit la régularité des cristaux, notamment la structure rhomboïde des « molécules constitutantes » des spaths calcaires. Il montra que la forme des cristaux résulte de l'empilement de petits volumes de matière qu'il nomma molécules intégrantes. En 1793, il détermina, en collaboration avec Lavoisier, la valeur de la nouvelle unité de masse, connue ensuite sous le nom de kilogramme, pour la Commission des poids et mesures de l'Académie des sciences.

Les débuts : d'Angers à Paris

En attendant, Michel-Eugène Chevreul naît d'une famille aisée : son certificat de naissance porte la signature de trois chirurgiens : son père, son grand-père maternel et son grand-oncle. Notamment son père Michel Chevreul, praticien de talent, correspondant de l'Académie de médecine, militait pour une réunion de la chirurgie et de la médecine, alors séparées, et, notamment, pour un diplôme commun (Joubert, 1886 ; Costa, 1962 ; Roques, 1998).

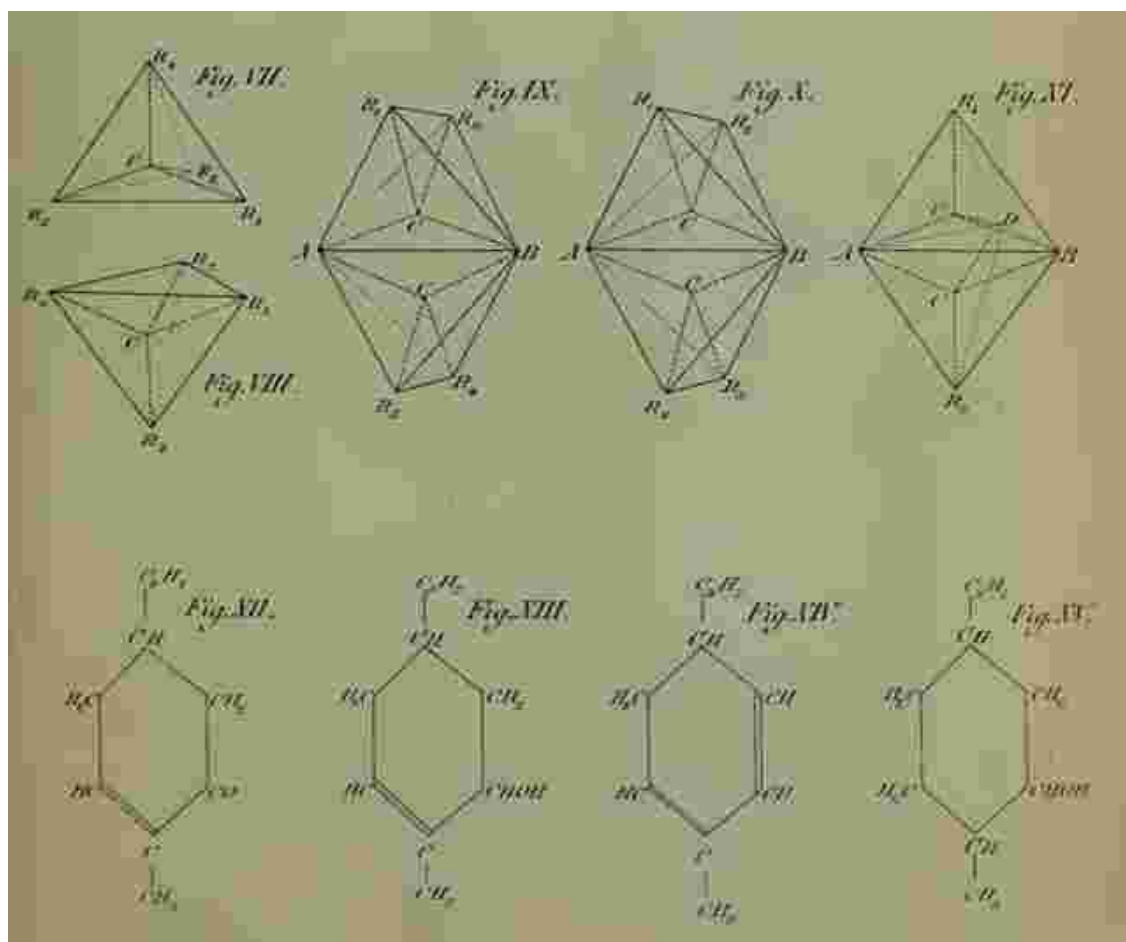


Figure 17. Dès le début des années 1870, soit seulement dix ans après que Cannizzaro avait montré à la communauté internationale l'idée des molécules, le chimiste hollandais Gert van 't Hoff savait placer les atomes des molécules dans l'espace (van 't Hoff, 1874).

Le jeune Michel-Eugène grandit à Angers pendant les temps troublés de la Révolution française, alors que certains révolutionnaires commettaient des crimes terribles, sous la Terreur. En 1793, un membre du comité révolutionnaire d'Angers aurait tiré Chevreul enfant vers une guillotine et lui aurait dit : « Il faut que le petit bougre de patriote s'habitue à voir couler le sang » ; et Chevreul avait vu exécuter deux jeunes filles qui avaient été accusées d'avoir caché des prêtres réfractaires... alors même que ses propres parents hébergeaient une mystérieuse « femme vêtue de gris » (Joubert, 1886 ; Bouchard, 1932). La même année, de la maison de campagne de ses parents, à Mûrs-Érigné, près de la Loire, l'enfant avait assisté à une bataille sanglante entre les Vendéens

et les Républicains. Ces souvenirs, a-t-il dit, l'éloignèrent à jamais de la politique (Lemay et Oesper, 1948).

Quand il eut l'âge d'aller à l'école, les institutions éducatives étaient abattues, et ses parents lui donnèrent d'abord des professeurs privés. Puis, en 1795, la Convention voulut établir un nouveau système d'enseignement technique, afin de former des fonctionnaires, et elle décida la création d'écoles centrales dans les chefs-lieux des départements. De ce fait, en 1796, Chevreul suivit les cours à l'École centrale d'Angers, qui remplaça l'ancienne université d'Angers. L'enseignement était divisé en trois sections, chacune sur deux ans : la première section enseignait la littérature, la science et la technologie ; puis la deuxième section était exclusivement scientifique, et la troisième section, que Chevreul ne suivit pas, était consacrée à la grammaire, l'histoire et le droit.

Les professeurs de l'École centrale semblent avoir été compétents, et les conditions d'enseignements favorables : il y avait un jardin botanique, une bibliothèque, une collection d'histoire naturelle, un musée et un laboratoire pour la physique et la chimie. Pendant quatre ans, Chevreul apprit le grec, l'italien, la botanique, la minéralogie, les mathématiques, la physique et la chimie. Il brilla, avec des premiers prix en grec, latin, physique, chimie et minéralogie. La famille Chevreul allait souvent à la campagne : l'enfant, puis adolescent profitait de ces séjours pour aller à la pêche et faire des excursions naturalistes, passionné par l'histoire naturelle.

Alors que sa famille l'aurait volontiers poussé vers une carrière de chirurgien, il voulut faire de la chimie, une matière que l'École centrale ne proposait pas dans la troisième section (Wisniak, 2002). Aussi, muni d'une lettre de recommandation du chimiste Joseph-Louis Proust (1754-1826), également né à Angers et devenu directeur de l'Ecole de chimie de Madrid, Chevreul partit en 1803 pour étudier à Paris avec Nicolas Vauquelin (1763-1829), au Muséum national d'histoire naturelle : il avait alors 17 ans, et ne se doutait pas qu'il serait encore dans ces murs 86 ans après !

Au Muséum, Vauquelin était l'assistant de Fourcroy. Il prit Chevreul dans son laboratoire, et lui fit d'abord étudier les matières colorantes des plantes : l'indigo, le pastel, le bois de Brésil, le bois de Campêche (Berthelot, 1902a). Et il est amusant d'observer que, dès son premier article de 1806, Chevreul divise son texte en petits paragraphes numérotés (A), (B), etc., séparés par des lignes blanches (Chevreul, 1806). Sa pratique rédactionnelle changera : dans son article suivant, consacré à l'indigo, il numérote avec des nombres en chiffres arabes, et toujours en séparant par des lignes blanches (Chevreul, 1808). Il poursuivra toute sa vie ainsi, avec cette rédaction très idiosyncratique, fortement divisée et numérotée, et même dans des textes moins scientifiques. Selon les cas, ce seront de simples phrases qui seront ainsi séparées des phrases précédentes ou suivantes, ou bien de courts paragraphes, et toujours avec la numérotation par des nombres en chiffres arabes, et des lignes blanches pour séparer ces courts paragraphes.



Figure 18. Nicolas Vauquelin (à gauche) est né à Saint-André-d'Hébertot, 16 mai 1763, et mort dans cette ville le 14 novembre 1829. Il commença comme garçon de laboratoire chez un pharmacien de Rouen. Venu à Paris, il y tomba malade, mais fut accepté par un pharmacien nommé Chéradame, qui le recommanda à Antoine-François Fourcroy : il fit une brillante carrière au Muséum et à la faculté de médecine de Paris, découvrant deux éléments : le chrome et le béryllium. En 1824, Chevreul lui dédicaça une de ses œuvres principales : « A Nicolas-Louis Vauquelin, mon maître ».

En tout cas, parallèlement à ses travaux de laboratoire, Chevreul continuait sa formation en assistant aux cours du Collège de France en mathématiques, physique, histoire, grec et latin. Quand Vauquelin fut nommé professeur du Muséum pour la « chimie des arts », en 1804, Chevreul le suivit, devenant son assistant officieux. Vauquelin quittait rarement le Muséum, et Chevreul passait la plupart de ses soirées à travailler avec lui. Il y rencontrait alors Fourcroy, qui était professeur de chimie générale.



Figure 19. Antoine-François de Fourcroy (15 juin 1755-16 décembre 1809) était le fils d'un apothicaire qui mourut quand il n'avait que sept ans (à droite). Il fut d'abord répétiteur, puis chargé des livres à la Société royale de médecine. Collaborateur de l'Encyclopédie, associé chimiste à l'Académie des sciences, il fut un des premiers à se convertir aux idées de Lavoisier, avec lequel il collabora. En 1795, il proposa la création de ce qui est aujourd'hui l'École polytechnique, Sous Napoléon Bonaparte, il fut directeur général de l'instruction publique.

Le Muséum avait été initialement le « Jardin royal des plantes médicinales » (ou « Jardin du roi »). Créé en 1636 par le roi Louis XIII, il faisait une belle place à la chimie depuis 1647, quand le médecin alchimiste écossais William Davisson (1593-1669) donna le premier cours de chimie public et gratuit jamais professé en France. Ses successeurs firent de l'institution un centre actif de chimie, avec notamment Étienne François Geoffroy (1672-1731), Pierre Joseph Macquer (1718-1784), Fourcroy, pour n'en citer que quelques-uns. En 1793, la Convention avait réorganisé l'institution, la renommant Muséum national d'histoire naturelle, et la c'est la seconde chaire de chimie,

d'abord attribuée à Antoine Louis Brongniart (1742-1804), qui passa à Vauquelin après neuf années de carence.

Lorsque Chevreul arriva pour étudier avec Vauquelin, le Muséum jouait un rôle important en science, abritant ces remarquables personnalités scientifiques qu'étaient Georges Cuvier (1769-1832), Jean-Baptiste de Lamarck (1744-1829), Étienne Geoffroy Saint-Hilaire (1772-1844) ou Haüy. À l'époque, la recherche en « chimie organique » (ce qui désignait l'étude chimique des êtres vivants) était encore rudimentaire, parce que les matières organiques ne résistent pas aux traitements classiques de la chimie, alors souvent fondés sur des distillations ou des calcinations.

Par exemple, Macquer écrivait dans son *Dictionnaire de chymie* (1789) :

« Dans les décompositions de tous les êtres véritablement vivants, organisés et qui portent en eux une cause de reproduction, tels que sont les végétaux et les animaux, on retire constamment une substance inflammable grasse ou huileuse et, au contraire, on ne trouve pas le moindre vestige de ce principe, dans aucune substance purement minérale ».

De fait, les matériaux organiques (sang, bile, muscles, feuilles des plantes, bois des arbres, etc.) semblaient être des assemblages compliqués de substances diverses que l'on cherchait à séparer plus ou moins difficilement en leurs « principes immédiats ».

Au premier chapitre de ce livre, nous avons déjà évoqué le « gluten », qui avait été détecté dans la farine, probablement dans les années 1720, par Beccari. Et nous avons vu le procédé de « lixiviation » qui avait été introduit par Kesselmeyer : le malaxage de la pâte de farine et d'eau dans de l'eau libre une poudre blanche, l'« amidon », qui sédimente, tandis que reste entre les doigts une matière viscoélastique jaune, qui fut nommé plus tard « gluten » (This, 2018). Beccari avait signalé que le gluten était une matière « animale » parce que sa fermentation faisait changer de couleur le liquide coloré obtenu par broyage de pétales de violette dans de l'eau et qu'une odeur ammoniaquée en émanait (comme le faisait les viandes, par exemple) : de fait, le gluten, mélange de protéines, contient de l'azote comme les protéines des viandes.

Autre séparation du même type d'une substance en « principes immédiats » : quand on laisse du blanc d'œuf s'évaporer (une semaine dans un bol à l'air libre, par exemple), on voit que la masse initiale – liquide, visqueuse, transparente, jaune tirant vers le vert – de 40 grammes environ se réduit à une feuille dure, jaune, de 4 grammes. La masse perdue par le blanc d'œuf est de l'eau : on la voit s'échapper quand on place un verre froid dans la fumée blanche au-dessus d'un blanc d'œuf que l'on cuit, la buée inodore et insipide qui se condense étant de l'eau. La matière restante, qui était jadis nommée « albumine », est faite de plus de 300 protéines différentes (on se souvient : 300 sortes de protéines, et non pas 300 molécules seulement) (Pu *et al.*, 2023).

Au Muséum, pour y revenir, Fourcroy et Vauquelin étudiaient les matériaux organiques, notamment d'intérêt médical ou pharmaceutique, examinant les parties

liquides ou solides de tissus végétaux et animaux surtout par des extractions à l'aide de solvants. Vauquelin enseigna à Chevreul ces techniques d'étude des produits naturels, notamment appliquées aux « principes colorants » présents dans des mélanges complexes d'huiles, de résines, de gommes, etc.

Ainsi formé, Chevreul reçut sa première position officielle, d'aide-naturaliste au Muséum en 1810. Il commença à enseigner en 1813, nommé professeur de sciences physiques au lycée Charlemagne, position qu'il conserva jusqu'en 1828. En 1814, quand Alexandre I^{er} de Russie visita Paris, il offrit à Chevreul la direction de l'École polytechnique de Saint-Pétersbourg, mais Chevreul refusa, pensant qu'il ne devait pas quitter son pays occupé.

La chimie organique quand Chevreul commença ses travaux sur les graisses

L'année d'avant, Chevreul avait donc commencé ses travaux de « chimie organique » sur les graisses. Nous avons vu que la difficulté de l'analyse des êtres vivants tenait effectivement à ce que les molécules organiques se dégradent à la chaleur, mais, aussi, à ce que les tissus végétaux ou animaux sont faits de très nombreux composés différents. Malgré les difficultés expérimentales, malgré l'absence de cette connaissance théorique que nous avons aujourd'hui des molécules, les chimistes réussirent patiemment à isoler un nombre croissant de composés organiques, dont la description vint grossir les parties de « chimie animale » et de « chimie végétale » des traités de chimie. Mais de quoi les composés isolés étaient-ils faits ?

À ce propos, l'apport de Lavoisier avait été essentiel, notamment parce que ses travaux sur la combustion et l'oxygène l'avaient conduit aux idées d'élément, d'une part, mais aussi de « radical » (ici, des guillemets parce que cette notion évolua considérablement avec le temps, en chimie) : les acides, notamment, auraient été constitués de deux parties, à savoir de l'« oxygène » et un « radical ». Par exemple, dans l'acide nitrique, le radical aurait été l'« azote » ; dans l'« acide carbonique », il aurait été le carbone ; dans l'acide phosphorique, il aurait été le « phosphore ». Dans certains cas, les « radicaux » étaient inconnus : par exemple, pour l'« acide muriatique », que nous nommons aujourd'hui acide chlorhydrique (et pour cause, ce chlorure d'hydrogène, HCl, ne comporte pas d'oxygène), ou pour l'acide benzoïque (figure 20) (Lavoisier, 1777b ; Lafont, 2006).

Toutefois les études de la combustion, et le recours systématique à la pesée ou aux mesures de volumes avaient montré à Lavoisier que la combustion des matières organiques engendrait constamment du « gaz carbonique » (dioxyde de carbone) et de l'eau : il avait donc postulé la présence de carbone et d'hydrogène dans ces matériaux,

en plus de l'oxygène. Berthollet, de son côté, avait montré la présence d'azote dans les matières organiques d'origine animale.

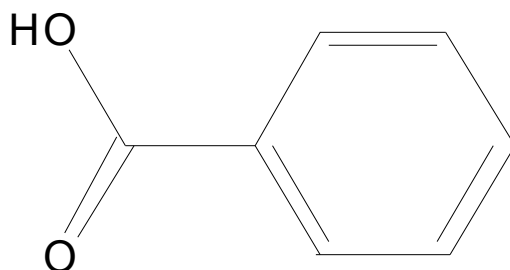


Figure 20. Aux débuts de la chimie organique, l'acide benzoïque était une énigme, parce que l'on ne savait pas y trouver le « radical » qui aurait été associé à de l'oxygène, C'était un des composés organiques connus aux débuts de la chimie organique, parce que c'est le principe constituant du benjoin d'Indochine.

Chauffant des masses connues de substances organiques avec des quantités connues de dioxygène ou d'un agent oxydant (tel l'oxyde de mercure), Lavoisier mesurait combien ces substances contenaient de carbone, d'hydrogène et d'oxygène, parfois d'azote, de soufre et de phosphore. Et c'est par ces analyses élémentaires (au sens de la recherche des éléments) qu'il avait proposé que les substances animales et végétales soient des oxydes de « radicaux » qui auraient été faits de « carbone » et d'« hydrogène », ou de « carbone », d'« hydrogène » et d'« azote ». Les « radicaux » des substances minérales auraient été simples, tandis que les « radicaux » des substances animales et végétales auraient été « composés ».

En outre, comme les « radicaux simples » pouvaient former plus d'un oxyde (par exemple, avec du fer et de l'oxygène, on peut faire de l'oxyde ferreux FeO ou de l'oxyde ferrique Fe_2O_3), Lavoisier jugea qu'il devait en être de même pour les « radicaux organiques ». Il supposa que les sucres, les gommes et l'amidon étaient des oxydes végétaux ; d'oxydes, ils auraient pu devenir des acides par l'addition d'« oxygène ». Par exemple, il considérait le sucre de table (le saccharose) comme un « oxyde neutre », et l'acide oxalique, qui se forme quand le sucre est oxydé par l'acide nitrique, comme un « oxyde supérieur du même radical ». Les oxydes des substances animales et végétales auraient différé par les proportions de carbone et d'hydrogène de leurs radicaux, et par leur degré d'oxygénation. L'étude des « radicaux » s'imposa en chimie organique, avec d'ailleurs des évolutions de l'acception du mot « radical » (Lafont, 2008).

À la fin du 18^e siècle et au début du 19^e siècle, Fourcroy publia un état des lieux complet dans son *Système des connaissances chimiques*, avec deux volumes en 1782, et jusqu'à dix en 1800.



Figure 21. Entre 1782 et 1800, Antoine-François Fourcroy publia son *Système des connaissances chimiques*.

Les quatre derniers volumes de l'édition finale traitaient de chimie animale et végétale, donnant l'ensemble des connaissances de chimie organique de l'époque. Dans la partie consacrée à la composition chimique des végétaux, Fourcroy présentait un historique des recherches sur les substances végétales. Les premières recherches traitaient des substances constituant les tissus organiques telles que graisses, amidons et sucres. Et il y répétait la difficulté d'analyser ces produits par les réactions que l'on mettait alors en œuvre pour étudier les composés minéraux : les réactions détruisaient les produits ; d'où la nécessité d'effectuer des extractions et des purifications des divers produits « immédiats » des plantes.

Notamment les études de la distillation des tissus organiques firent apparaître que l'on ne pouvait pas recomposer après avoir séparé, indication que l'on avait non seulement séparé, mais décomposé. Par exemple, quand on chauffe du bois à sec, dans un tube en verre fermé, s'échappe une vapeur qui peut s'enflammer, et qui est l'« esprit de bois », le méthanol, dirions-nous aujourd'hui : ce méthanol n'existe pas dans le bois, mais la

pyrolyse effectuée lors de l'opération dégrade des molécules du bois, formant des molécules plus petites, telle celles de méthanol.

Selon Fourcroy, Guillaume François Rouelle (1703-1770) fut un pionnier de la séparation des « principes immédiats » par solvants : il distingua des « principes immédiats » des végétaux et publia une méthode complète d'analyse de ces derniers, en insistant sur les solvants à utiliser : l'eau, l'éthanol, l'« éther » (éthoxyéthane) notamment.



Figure 22. Guillaume-François Rouelle (15 septembre 1703, Mathieu (Calvados) - 3 août 1770, Paris) donnait des démonstrations de chimie suivies par la plupart des chimistes d'alors, tels Macquer, Lavoisier ou Venel, et aussi par quelques grandes figures des Lumières, tels Diderot, Condorcet, Turgot et Malesherbes. Un jour, au milieu de son cours, il prévint : « Vous voyez bien messieurs, ce chaudron sur ce brasier ; eh bien, si je cessais de remuer un seul instant le mélange qu'il contient, il s'ensuivrait une explosion qui nous ferait tous sauter en l'air ». Distrayant par une question, sa prédiction s'accomplit : une explosion terrible fit voler les vitres du laboratoire en éclats (La Science populaire, 1880).

Toutefois les combinaisons et les mélanges chimiques restaient des notions confuses ; par exemple, certains chimistes considéraient l'acide formique (présent dans le liquide irritant des fourmis) et l'acide lactique (qui donne le goût aigrelet des yaourts) comme des formes impures de l'acide acétique (l'acide principal du vinaigre).

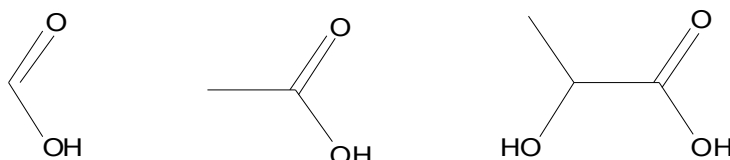


Figure 23. De gauche à droite, l'acide formique, l'acide lactique et l'acide acétique (c). Comme précédemment, les atomes de carbone ne sont pas indiqués, et il faut imaginer des atomes d'hydrogène en nombre suffisant pour que chaque atome de carbone ait quatre liaisons.

En outre, on n'avait pas encore découvert que nombre de « principes immédiats » n'étaient pas des composés purs (avec une seule sorte de molécules) ; beaucoup étaient des mélanges, telle l'« albumine », qui semblait d'ailleurs être présente aussi bien dans le blanc d'œuf que dans certaines légumineuses, et que l'on nommait alors « albumine végétale ». La liste des 20 principes végétaux immédiats qui figure dans le *Système des connaissances chimiques* de Fourcroy comporte aussi bien des composés, tel le camphre, que des mélanges complexes, telle la sève des plantes.

Contrairement au camphre, qui est un composé pur, l'« osmazôme », préparé par Louis Jacques Thenard (1777-1857) à l'aide d'« alcool » à partir d'une gelée de viande, était en réalité un mélange de nombreux composés (Thenard, 1815 ; Brillat-Savarin, 1825). Malgré la réclame efficace qu'en fit le juriste Jean-Anthelme Brillat-Savarin dans sa célèbre *Physiologie du goût* (1825), ce « principe immédiat » n'est pas constant : selon les viandes, sa composition diffère considérablement. En tout cas, il n'est pas la « partie éminemment sapide des viandes », comme le disait Brillat-Savarin.

Autant les composés inorganiques, minéraux étaient de composition fixe (par exemple, il y a toujours la même proportion de cuivre, de soufre et d'oxygène dans le sulfate de cuivre CuSO_4 , ou dans le sulfate de cuivre hydraté $\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$), autant les produits végétaux et animaux semblaient avoir des compositions variables. Et la séparation de la chimie organique et de la chimie inorganique, minérale, laissait la place à des conceptions « vitalistes ». Par exemple, en 1819, le Suédois Jöns Berzelius (1779-1848) imagina que les corps organiques, ceux des organismes vivants, auraient été assemblés par des forces spéciales, qui auraient différé des forces chimiques ordinaires (Berzelius, 1832) :

« Dans la nature organique, les éléments paraissent obéir à des lois tout autres que dans la nature inorganique ; les produits qui résultent de l'action réciproque de ces éléments diffèrent donc de ceux que nous présente la nature organique. En découvrant la cause de cette différence, on aurait la clé de la théorie de la chimie organique, mais cette théorie est tellement cachée que nous n'avons aucun espoir de la découvrir, du moins quant à présent. Néanmoins, nous devons faire des efforts pour nous rapprocher de cette connaissance, car nous finirons par y arriver ou bien par être arrêtés à une limite que nos investigations ne sauraient dépasser ».

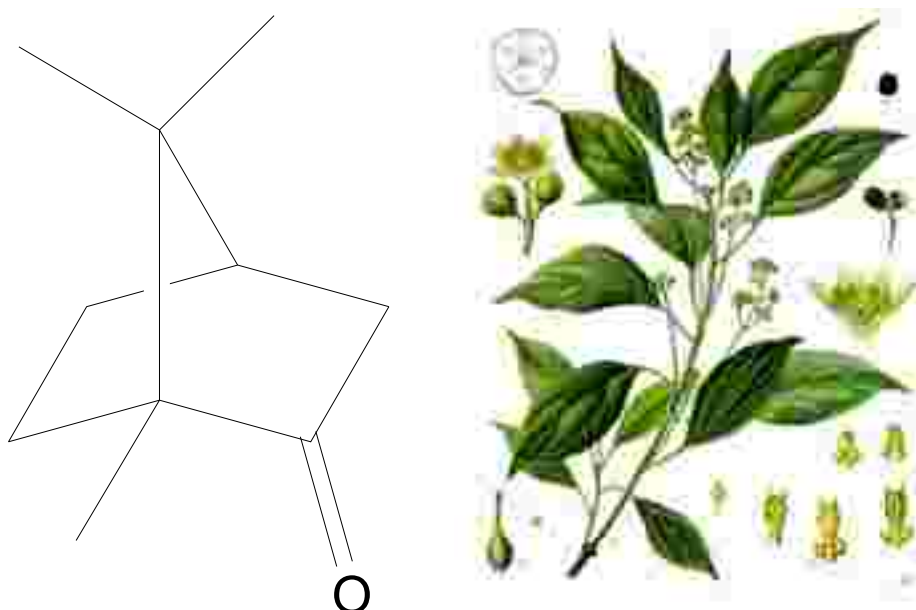


Figure 24. Le composé, nommé justement 1,7,7-triméthylbicyclo [2,2,1-heptan-2-one, est présent dans de nombreuses plantes. Il est produit au Japon depuis le moyen-âge : il était extrait du bois de camphrier (*Cinnamomum camphora*) par un procédé d'entraînement à la vapeur d'eau suivi d'une purification par sublimation. Le mot camphre vient du latin médiéval *camfora*, provenant du nom malais *kapur Barus* qui veut dire « craie de Barus » : les marchands malais vendaient le camphre à Barus (un port sur la côte ouest de l'île indonésienne de Sumatra) aux négociants venus d'Inde et du Moyen-Orient. La substance se présente sous la forme d'un solide cristallin, blanc, translucide, onctueux au toucher, d'odeur vive, de saveur amère. Il était utilisé par la médecine traditionnelle chinoise, principalement utilisé pour ses vertus antiseptiques.

La question était d'autant plus difficile que la question des fermentations – avec les transformations moléculaires qu'elles opèrent – n'avait pas encore été explorée par Pasteur, Robert Koch (1843-1910), Claude Bernard (1813-1878) et d'autres. La grande querelle de la fermentation alcoolique était encore loin de commencer : il n'était pas encore imaginable de se demander si l'éthanol du vin apparaît à partir des sucres (notamment le D-glucose) par l'action de micro-organismes vivants (« levures »), comme le proposa plus tard Pasteur, ou si elle pouvait se faire sans intervention du vivant, notamment par des enzymes (« diastases »). Certains imaginaient que, dans les organismes vivants, de nombreuses réactions avaient eu lieu pour produire tous les phénomènes de la vie, et ils pensaient que, une fois que ces opérations avaient cessé, les éléments du corps revenaient à leur nature inorganique pour obéir alors aux lois inorganiques ; l'essence des organismes vivants n'aurait pas été dans leurs éléments inorganiques, mais dans un « principe », ou « force vitale ».

Cette hypothèse ne faisait toutefois pas l'unanimité. Berthollet, notamment, maintenait que la synthèse des composés organiques ne faisait intervenir que des forces usuelles, et Thenard prévoyait que des synthèses organiques seraient bientôt réalisées. De fait, la première le fut en 1828 par le merveilleux chimiste allemand Friedrich Wöhler (1800-1882), qui transforma du cyanate d'ammonium en urée. Chevreul était de l'avis de Thenard.

Dans le développement de la chimie organique, l'analyse jouait évidemment un rôle primordial, et, notamment après Lavoisier, l'analyse « immédiate » s'était augmentée de l'analyse élémentaire, ce qui signifiait (et signifie encore) que l'on décomposait les composés (par exemple, en dioxyde de carbone et en eau), afin de déterminer les proportions des éléments (carbone, hydrogène, oxygène, azote, soufre, phosphore) qu'ils contiennent.

Dans son *Traité élémentaire de chimie*, Lavoisier avait indiqué comment il avait imaginé et mis en œuvre la technique d'analyse des corps organiques par la combustion, en 1774. Cela lui avait fait conclure que le bois de chêne, par exemple, aurait été une combinaison d'eau, d'acides, d'huiles, dont le résidu était du charbon, lui-même décomposable en cendres et en « alcali » (notamment la « potasse », ou hydroxyde de potassium KOH, pour les cendres de certains bois). Mais Lavoisier savait qu'il fallait aller plus loin :

« Nous ignorons 1° quelle est la qualité de cette immense quantité d'air qui se dégage pendant la distillation : il y a probablement de l'air fixe [du dioxyde de carbone] et de l'air inflammable [du dihydrogène] ; 2° ce que c'est que l'huile : il paraît que par la combustion on peut la réduire en air et en eau ; mais nous ne savons rien au-delà ; 3° ce que c'est que le charbon : nous savons bien qu'en brûlant, il convertit l'air environnant en air fixe ; mais nous ne savons pas s'il donne lui-même de l'air fixe. » (Poirier, 2024 ; Berthelot 1902b).

Puis, en 1777, Lavoisier avait analysé l' « esprit de vin » (notre éthanol, $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$), l'huile d'olive et la cire, établissant que les matières animales comme les matières végétales résultent de la combinaison d'oxygène, d'hydrogène et de carbone (Lavoisier, 1777a). Il commença rapidement à perfectionner la technique pour tenir compte de l'azote présent :

« Le moindre degré de chaleur, pourvu qu'il soit un peu supérieur à celui de l'eau bouillante, suffit pour réunir l'oxygène et l'hydrogène, l'hydrogène et le carbone, et pour former de l'huile et de l'eau ; mais aussi, les phénomènes se compliquent un peu davantage, parce qu'il existe, comme M. Berthollet le démontre, un quatrième principe dans les matières animales, l'azote, qui, avec l'hydrogène, forme de l'alcali volatil ou ammoniac ».

En pratique, la technique de l'analyse élémentaire semble simple : par exemple, on fait brûler une masse connue du matériau à analyser avec un volume connu d'un composé qui apporte de l'oxygène, et l'on conduit les gaz formés sur un solide qui absorbe d'abord l'eau (on pèse le solide avant et après absorption pour savoir la quantité d'eau absorbée), on fait barboter les gaz séchés dans une solution qui réagit avec le dioxyde de carbone, et on pèse le précipité formé, et l'on mesure la quantité d'oxygène qui n'a pas réagi. La méthode évolua progressivement ; par exemple, comme source d'oxygène, Lavoisier avait testé l'oxyde de mercure, l'oxyde de manganèse MnO_2 ou le chlorate de potassium KClO_3 , mais il savait qu'il fallait encore travailler pour avoir des résultats plus précis.

Vers 1804, des méthodes « eudiométriques » apparurent : le chimiste anglais John Dalton (1766-1844) analysa des hydrocarbures (comme leur nom l'indique, des composés dont les molécules ne contiennent que des atomes de carbone et des atomes d'hydrogène) en les faisant exploser dans une cloche fermée avec du dioxygène ; analysant les produits de réaction, il obtint des formules élémentaires pour le « gaz des marais » (un mélange de méthane CH_4 , d'hydrogène sulfuré H_2S et de dioxyde de carbone CO_2) et pour le « gaz oléfiant » (l'éthylène, C_2H_4).

L'analyse progressa notablement en 1811, quand Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850) et Thenard mirent au point une méthode qui consistait à mélanger des quantités pesées de matériau organique broyé finement avec du « muriate suroxygéné de potasse » (du chlorate de potassium KClO_3), à faire tomber des « boulettes » de ce mélange dans un tube vertical pour les faire arriver sur une partie chauffée, où la combustion avait lieu instantanément ; les gaz produits étaient recueillis dans une cuve à mercure au moyen d'un tube latéral ; en ajoutant des quantités connues d' « hydrogène » (du dihydrogène) et en faisant détonner le mélange, ils déterminaient la quantité de dioxygène présent dans le gaz recueilli, le dioxyde de carbone étant absorbé par de la « potasse » (hydroxyde de potassium, KOH).

De la sorte, ils analysèrent des substances qui ne contenaient pas d'azote (sucre, gomme arabique, amidon, bois de chêne, etc.) et des substances qui en contenaient (« fibrine », « albumine », « caséum », « gélatine »), en déterminant l'azote sous forme élémentaire. Cette méthode permettait d'analyser de petits échantillons et de répéter les analyses, avec une précision qui était notablement augmentée (Gay-Lussac et Thenard, 1811).

Dans le « sucre » (saccharose), la gomme arabique, l'amidon, le lactose, les bois de chêne et de hêtre, les proportions d'hydrogène et d'oxygène correspondaient à celles que l'on trouve dans l'eau, mais, dans les acides organiques (« tartrique », citrique, ou acétique, notamment), la proportion d'oxygène était supérieure : influencés par Lavoisier et Berthollet, dont ils étaient les successeurs et élèves, Gay-Lussac et Thenard pensèrent qu'une substance végétale est acide quand la proportion d'oxygène est plus grande que dans l'eau ; avec une proportion inférieure à l'eau, les substances végétales auraient été résineuses, huileuses ou alcooliques ; et il y aurait eu un type neutre, sucre ou gomme pour une proportion égale à celle de l'eau.

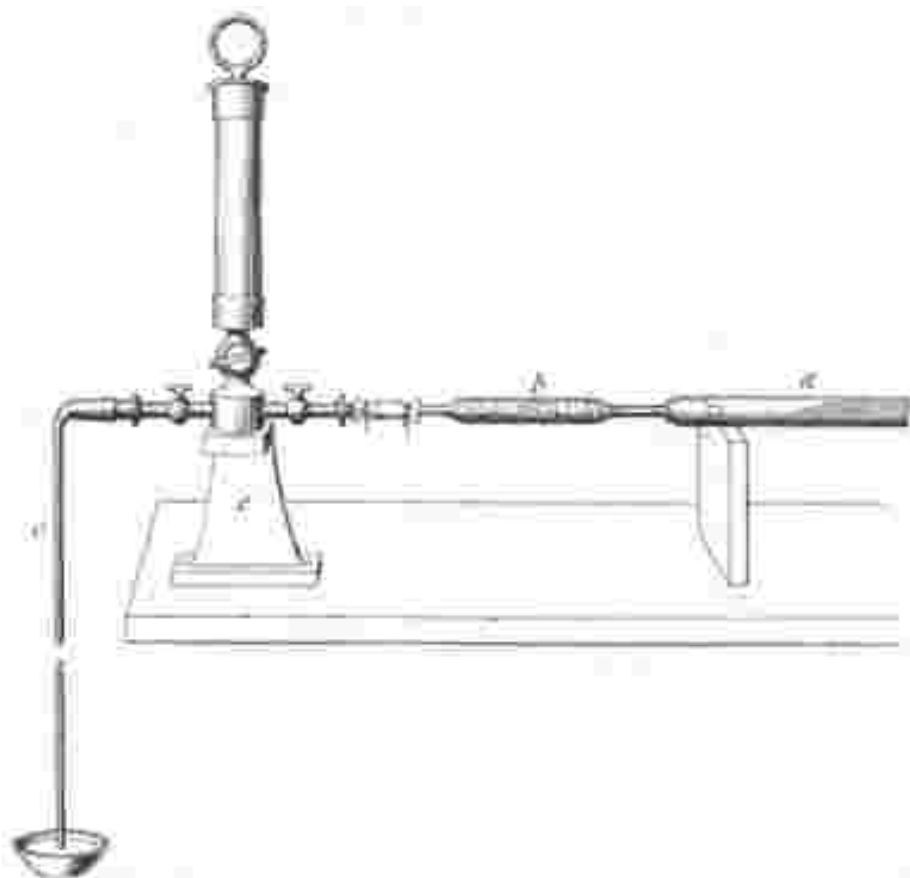


Figure 25. L'appareil utilisé par Gay-Lussac et Thenard pour les analyses élémentaires.

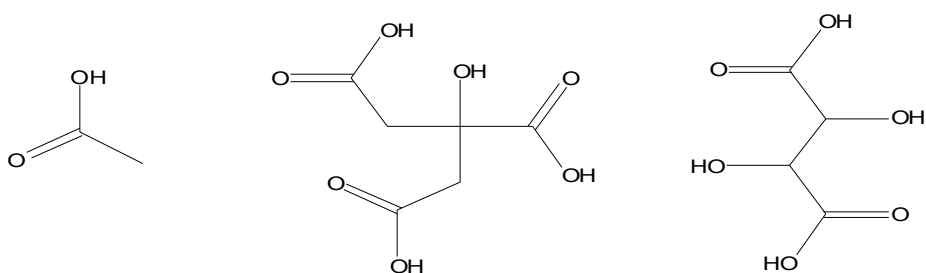


Figure 26. Les acides acétique, citrique et « tartrique » (de gauche à droite). Pour le dernier, on a écrit des guillemets, parce qu'il en existe plusieurs.

Au vu de leurs résultats, Berzelius reprit courage : alors que, en 1807, il n'avait pas réussi à étudier les acides organiques, il améliora la méthode de Gay-Lussac et Thenard, et attribua des formules quantitatives (en termes d'éléments) à des acides organiques et à des sucres et gommés.

Dans ce contexte, les travaux du chimiste suisse Nicolas-Théodore de Saussure (1767-1845) furent particulièrement importants : il établit que l'on pouvait produire du « sucre » à partir d'« amidon », mais, également, ses analyses de l'« alcool » et de l'« éther » semblèrent montrer que l'« alcool » contenait un excès d'hydrogène par rapport à celui qui était nécessaire pour former de l'eau à partir de la combustion dans l'oxygène, et que cet excès d'hydrogène par rapport au carbone était dans le même rapport que le carbone dans l'éthylène : en conséquence, il proposa de représenter l'« alcool » (l'éthanol C_2H_6O) comme une « combinaison » de « gaz oléfiant » (l'éthylène C_2H_4) et d'eau (H_2O). Toutefois, comme les analyses de l'éther conduisaient aux mêmes conclusions, il proposa que l'alcool et l'éther ($C_2H_5OC_2H_5$) soient deux combinaisons différentes du « gaz oléfiant » et de l'eau (figure 27).

En 1815, Gay-Lussac remplaça le chlorate de potassium $KClO_3$ par l'oxyde de cuivre, qui convenait mieux pour l'étude des matières azotées, la combustion avec le chlorate de potassium conduisant à des combustions violentes et à la formation d'oxydes d'azote. Étudiant la composition de la vapeur produite par le bleu de Prusse, il trouva que ce gaz était la base d'une série de composés : la vapeur, qu'il nomma « cyanogène », se combinait avec l'hydrogène, le chlore, l'iode et des métaux, pour former des composés qui étaient analogues aux chlorures, le « cyanogène » étant analogue au simple radical inorganique qu'était le chlore. Le radical « cyanogène », comme le chlore, restait inchangé lors de réactions variées.

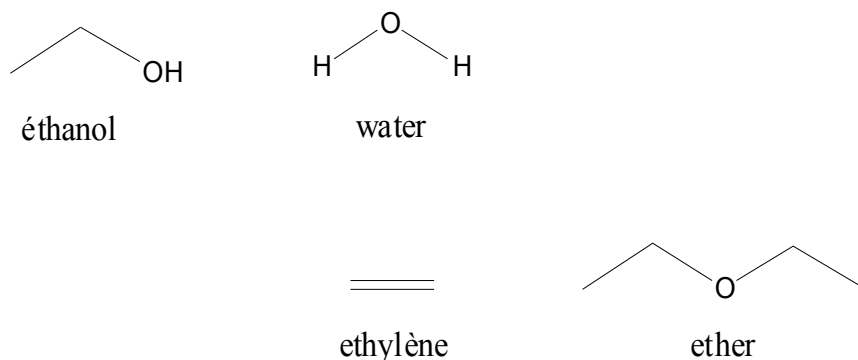


Figure 27. Formellement, l'éthanol $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ a effectivement les mêmes atomes que ceux cumulés de l'éthylène C_2H_4 et de l'eau, mais il s'agit d'un composé particulier, qui n'est pas un simple assemblage physique des deux premiers (même si on peut effectivement l'obtenir par une réaction nommée « hydratation ». Pour l'« éther » (éther diéthylique, ou éthoxyétane, $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-O-CH}_2\text{-CH}_3$), la confusion n'a pas lieu.

Cette découverte conduisait à réviser l'idée selon laquelle un « radical » était une partie d'une substance qui est combinée avec l'oxygène : il fallait admettre qu'un « radical » était un groupe composé qui se comportait comme un élément et agissait comme une unité lors de réactions. Cette idée devint centrale, pour le développement de la chimie organique : après la découverte du « radical cyanogène », puis la découverte du « radical benzoyle » par Justus von Liebig (1803-1873) et Wöhler, les chimistes se mirent à explorer les « radicaux ».

À partir de 1815, une autre série de découvertes éclaira la constitution des substances organiques. Dalton, étudiant les propriétés des gaz obtenus lors de la distillation sèche des huiles, trouva un hydrocarbure qui différait du « gaz oléfiant » et qui semblait contenir deux fois plus de carbone et d'hydrogène que le « gaz oléfiant ». Comment toutes ces « combinaisons », tous ces assemblages se faisaient-ils ? On était alors tenté de représenter les composés organiques comme des juxtapositions de composés binaires simples, plutôt que comme des oxydes de radicaux composés. À Iéna, Johann Wolfgang Döbereiner (1780-1849), par exemple, décrivit ainsi nombre de substances, et, en 1820, Saussure, après une analyse d'huiles, proposa qu'elles soient des « combinaisons binaires » (des associations avec une partie de chaque constituant) de « gaz oléfiant » (éthylène), de dioxyde de carbone, et d'eau. On voit que beaucoup des débats tenaient dans l'ambiguïté de mots tels que combinaison ou assemblage.

Les choses se compliquèrent quand, étudiant les fulminates et les cyanates, Gay-Lussac y vit des corps différents ayant des compositions identiques : y avait-il des arrangements différents des éléments constitutifs dans ces corps ? Berzelius considéra

les conclusions de Gay-Lussac comme absurdes, ne pouvant pas concevoir des corps ayant la même composition (élémentaire, à cette époque), mais des propriétés différentes.

Pourtant, en 1825, à la Royal Institution de Londres, Michael Faraday (1791-1867) confirma l'hypothèse de Dalton quand il analysa un liquide qui se condensait quand on produisait du gaz domestique en distillant de l'huile : l'analyse « montra » que la composition de ce liquide (le butène, C_4H_8) était la même que celle du « gaz oléfiant » (éthylène, C_2H_4) ; il se liait facilement au chlore pour former une « huile », mais sa densité était deux fois supérieure à celle du « gaz oléfiant ». Cet hydrocarbure (la molécule n'est composée que d'atome de carbone et d'atomes d'hydrogène) avait la même composition que le « gaz oléfiant », mais avec deux fois plus d'atomes.

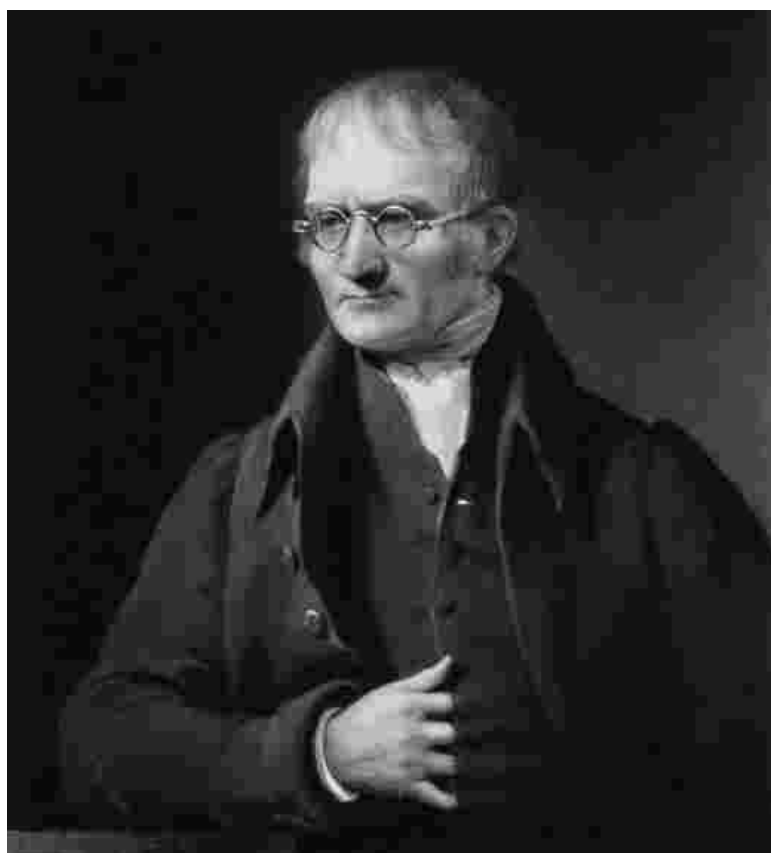


Figure 28. John Dalton (1766–1844) fut un des artisans de la théorie atomique moderne, bien que, comme d'autres, il ait confondu atomes et molécules. Il utilisait le terme « atome » pour décrire les atomes modernes, des gaz qu'il pensait être monoatomiques (l'« azote », qui est en réalité du diazote) et ce que nous nommons des composés (« atomes d'eau »). (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:John_Dalton_by_Charles_Turner.jpg).

Peu avant cette observation, Liebig – formé à l'analyse élémentaire à Paris, avec Gay-Lussac – avait montré que les sels de l'acide fulminique ($\text{HC} \equiv \text{N}^+ - \text{O}^-$) avaient la même composition que les sels correspondants de l'acide isocyanique ($\text{HN}=\text{C}=\text{O}$), analysés par Wöhler. Cette fois, Berzelius dut s'incliner... surtout, quand Wöhler montra, en 1828, que le cyanate d'ammonium et l'urée avaient la même composition élémentaire, puis quand il vit lui-même que l'« acide racémique » (mélange de plusieurs acides tartriques différents) et l'« acide tartrique » le plus courant avaient la même composition. L'idée que de tels corps existaient fut acceptée, et, en 1830, Berzelius introduisit les termes « isomère », « métamère », « polymère », pour désigner différentes façons d'avoir cette propriété.

C'est environ à ce moment que Chevreul commença ses études des graisses : les composés organiques restaient mystérieux, mais si l'on était encore loin de penser à notre idée moderne de molécule, l'analyse chimique avait progressé.

Chapitre 4

Les graisses et les savons, une histoire millénaire

Quand Chevreul commença ses études des matières grasses, celles-ci étaient utilisées depuis longtemps pour fabriquer des produits cosmétiques variés. Notamment les Égyptiens, les Sumériens et les Mésopotamiens savaient fabriquer des baumes, des cosmétiques, mais aussi des détergents à partir d'huiles d'olive, d'amande, de noix, de castor, de carthame. Des textes antiques expliquent comment faire des savons et autres détergents en faisant bouillir des corps nommés « alcalis » (des bases) avec des graisses ou des huiles : les savons formés n'étaient pas séparés du mélange des réactifs ; ils restaient mêlés à de l'eau et à du glycérol (nous examinerons cela bientôt) dans un état gélifié ou liquide.

Pour le monde occidental, le plus ancien document connu qui décrit la fabrication d'un savon est l'*Histoire naturelle* de Pline, qui mentionne une recette gauloise, à partir de graisse de chèvre et de cendres de hêtre (Pline, 77 ; André, 1956). Initialement on fabriquait les savons en préparant d'abord une lessive de cendres (de plantes ou de bois), par simple ajout d'eau à de la cendre, puis en faisant bouillir une matière grasse avec cette lessive de cendres, tout en mélangeant l'ensemble afin de faire venir en contact les deux phases immiscibles. Quand toute l'eau était évaporée, on ajoutait à nouveau des cendres, et l'on poursuivait en alternant évaporation et ajout de lessive de cendres. Ce procédé produisait une lente « saponification » des graisses, leur transformation en savon.

On le découvrit lentement : les composés saponifiants, dans les cendres de bois sont notamment la « potasse » (hydroxyde de potassium, KOH), tandis que c'est la « soude » (hydroxyde de sodium, NaOH) dans les cendres de plantes halophytes (telle la salicorne). En parallèle, de nombreux peuples savaient que certaines plantes, tel le lierre, contiennent de quoi faire mousser l'eau, et nettoyer : par exemple, la cuisson de feuilles de lierre pendant 15 minutes, suivie d'une longue macération, permet d'obtenir un détergent liquide.

La fabrication des savons s'était progressivement améliorée : les explorations empiriques avaient identifié que la saponification était plus rapide quand on renforçait la lessive de cendres avec de la « chaux vive » (oxyde de calcium, CaO). Ayant fait bouillir la matière grasse avec de la lessive de cendres renforcée, jusqu'à obtenir une masse formée d'un mélange de savon et de graisse non saponifiée, on ajoutait de la nouvelle base caustique (renforcée, donc) jusqu'à ce que tout devienne homogène et compact.

Avec les cendres obtenues lors de la combustion de plantes terrestres, qui contenaient seulement de l'hydroxyde de potassium, KOH , les savons obtenus restaient mous, mais quand on découvrit que les cendres de certaines plantes donnent de la consistance aux savons (parce que ces cendres contenaient de l'hydroxyde de sodium, NaOH), les villes de Valencia, Malaga, Marseille, Venise et Gênes devinrent des centres européens de production de savon variés. Au 8^e siècle, il y avait des usines de savon en Italie et en Espagne, et il y en eut à Marseille au début du 9^e siècle. Dans ces régions, les oliviers étaient abondants, fournissant l'huile, tandis que le pourtour méditerranéen portait des plantes dont on tirait la « soude » (hydroxyde de sodium, NaOH). Au 13^e siècle, Marseille était le principal centre de production de savons d'Occident, avant d'être dépassé par Gênes et Venise.

À partir du 17^e siècle, la diversité des savons augmenta quand les fabricants utilisèrent des graisses et des huiles nouvelles, notamment venues du Nouveau Monde. L'huile de baleine et l'huile de poissons pêchés sur les bancs de Terre Neuve étaient bon marché, de sorte que les fabricants de savon les utilisèrent, agrandissant la gamme des savons, avec différentes couleurs et duretés.

Comment améliorer encore la production ? Le procédé du chimiste Nicolas Leblanc (1742-1806) pour la production de « soude » (du carbonate de sodium Na_2CO_3) résolut le problème en 1789 (figure 29) : l'idée était de chauffer d'abord le sel de mer avec de l'acide sulfurique pour produire du sulfate de sodium et du chlorure d'hydrogène (qui s'élimine sous la forme d'un gaz que l'on peut récupérer) ; puis on effectue une opération de « réduction », en chauffant le sulfate de sodium avec du charbon, pour former le sulfure de sodium (avec un dégagement de dioxyde de carbone, encore sous la forme d'un gaz) ; la calcination de ce sulfure de sodium avec du carbonate de calcium forme du carbonate de sodium, et du sulfure de calcium ; et l'on dissout le carbonate de sodium (« soude ») dans de l'eau, avant de concentrer les solutions en les chauffant (pour évaporer de l'eau).

Puis, quand la France fut en guerre contre une bonne partie de l'Europe, le Comité de salut public de la Convention nationale confia à Jean Darcet (né d'Arcet), Claude Hugues Lelievre, Bertrand Pelletier et Alexandre Giroud le soin d'étudier la question de la fabrication des savons. Ils commencèrent leur travail en recueillant les connaissances empiriques des fabricants. Par exemple, un ajout de sel à la fin de la saponification

permettait de mieux récupérer le savon, qui se dégageait alors de la pâte épaisse formée (dont on ignorait qu'elle était constituée de savon, d'eau, de glycérol et de base en excès montant à la surface du mélange, au-dessus d'une solution de glycérol, de sel et de base. En 1793, l'équipe scientifique mandatée publia un *Rapport sur les divers moyens d'extraire avec avantage du sel de soude du sel marin*. Puis, en 1794, Darcet, Lelievre et Pelletier publièrent un *Rapport sur la fabrication des savons*.

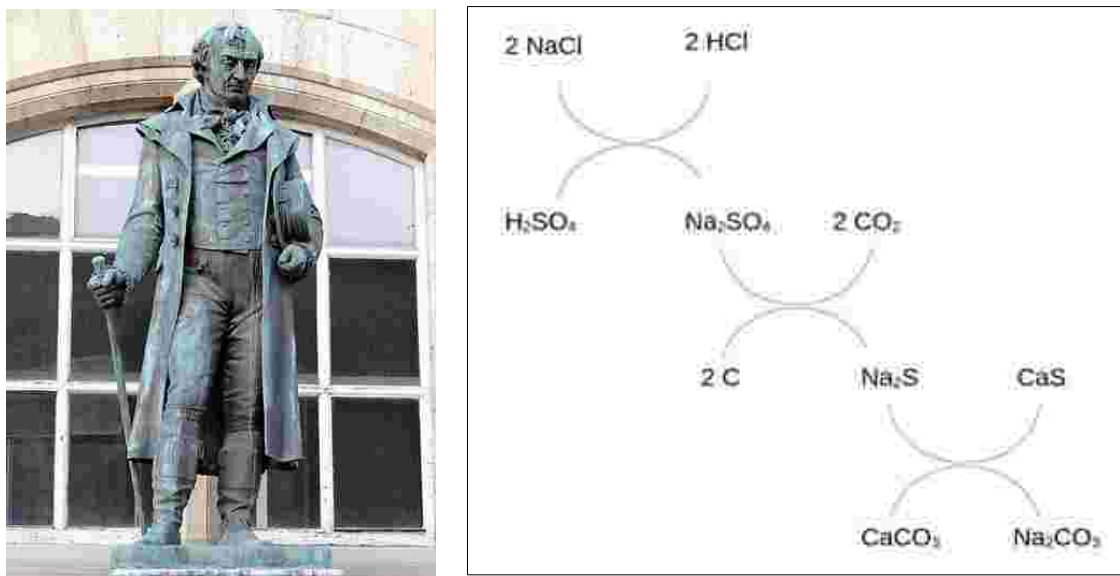


Figure 29. Le procédé Leblanc (à droite) doit son nom au chimiste français Nicolas Leblanc (à gauche), qui, suite à une mise aux prix, trouva en 1789 une suite de réactions pour obtenir du carbonate de sodium à partir de sel marin (à droite).

On comprend mieux la question posée, et les solutions trouvées, quand on considère une description moderne des phénomènes. Nous avons vu qu'une matière grasse telle qu'une huile (de tournesol, d'olive, de noix, etc.) est très majoritairement faite de molécules de nombreux triglycérides différents. Ces triglycérides diffèrent par les types de résidus d'acide gras dans les molécules : plus ou moins longs, plus ou moins « insaturés » (avec des doubles liaisons entre des atomes de carbone voisins). Par exemple, pour de la matière grasse laitière, il y a environ 400 résidus d'acides gras différents dans la totalité des molécules de triglycérides, soit des millions de triglycérides différents (400 possibilités pour la première position, 400 pour la deuxième, et 400 pour la troisième, avec une division pour tenir compte des symétries).

Partant d'un tel mélange, la réaction de « saponification » consiste à le traiter par un « alcali » (une base) (figure 30) : la base (par exemple, l'hydroxyde de sodium, NaOH) libère dans l'eau un ion hydroxyde OH⁻, qui détache trois ions carboxylate (R-COO⁻) et un alcool qui est le glycérol.

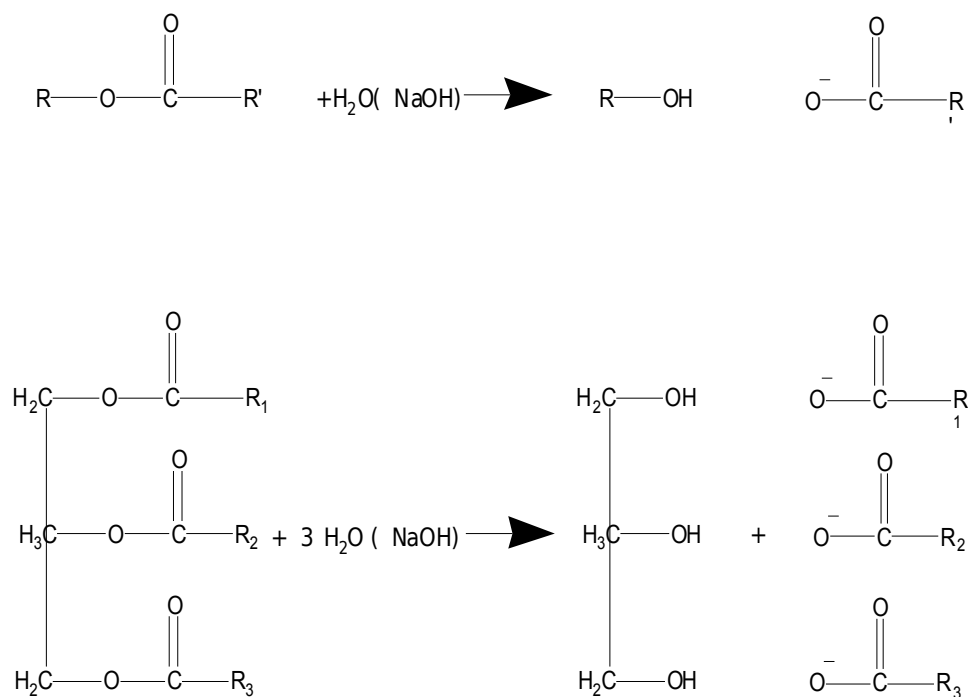


Figure 30. La réaction de saponification part d'un ester (en haut à gauche) que l'on traite par une base (laquelle apporte l'ion OH⁻) ; on obtient un carboxylate RCOO⁻ et un alcool ROH. Dans le cas des savons (en bas), l'ester est en réalité un tri-ester du glycérol, un « triglycéride », qui donne trois ions carboxylates en solution, et du glycérol.

Bien avant les travaux consignés dans les rapports de 1793 et 1794, les chimistes avaient observé que la distillation des graisses libérait un « principe acide », ne comprenant pas que cette substance résultait de l'altération des graisses par la chaleur. En outre, on considérait le « principe acide » comme la cause de l'union de la graisse et de la base dans les saponifications : l'acide qui aurait été « niché » dans les graisses se serait combiné avec la base, et les savons auraient été une combinaison binaire de la graisse et d'une base, tout comme les sels inorganiques (par exemple le chlorure de sodium) résultent d'une neutralisation d'un acide par une base (l'acide chlorhydrique et l'hydroxyde de sodium, pour le chlorure de sodium).

En 1741, Geoffroy avait fait une découverte essentielle, observant que la « graisse » obtenue par la décomposition d'un savon était soluble dans l'alcool, ce qui n'était pas le cas des graisses initialement utilisées pour fabriquer le savon ! Puis, en 1779, intéressé par les graisses, Scheele chauffa de l'huile d'olive et de la litharge (l'oxyde de plomb PbO), et observa qu'un « sirop de saveur douce » (du glycérol en solution) se séparait lors de la réaction : cette substance différait des sucres connus ; elle ne cristallisait pas, ne fermentait pas, mais produisait de l'acide oxalique quand elle était chauffée avec de l'acide nitrique, comme le faisaient d'autres sucres.

Comme ce « sirop » pouvait être obtenu à partir de toutes les huiles ou graisses qu'il avait étudiées, Scheele le désigna sous le nom de « principe doux des huiles ». Toutefois il se trompa en pensant que le « principe doux » était un constituant de l'huile dérivée du savon et aussi de l'huile initiale. En outre, Scheele adhérait à la théorie phlogistique, et il interprétait ses résultats à la lumière de cette théorie erronée : pour lui, les huiles étaient composées de phlogiston, d'air fixe et d'eau, et le « principe doux » était une sorte de sucre qui différait du sucre commun par une plus grande quantité de phlogiston.

Berthollet, aussi, s'était intéressé à la saponification : en 1780, il avait exploré l'utilisation de la chaux vive (oxyde de calcium) dans la fabrication des savons, isolant le savon calcique, insoluble. Remplaçant l'eau de chaux (solution d'hydroxyde de calcium, Ca(OH)_2) par des solutions de sels de cuivre, d'argent, de plomb, etc. et isolant le savon insoluble dans chaque cas, il avait attribué la formation des savons à l'affinité de l'huile pour la base employée : les savons auraient été des composés où la graisse entière, agissant comme un acide, aurait neutralisé la base. Et les travaux de Berthollet avaient fourvoyé Fourcroy, selon lequel la formation des savons aurait résulté de l'oxydation des huiles sous l'action de l'air et des bases.

Chapitre 5

Enfin Chevreul

Chevreul commença ses études des graisses parce que Vauquelin lui proposa d'étudier des échantillons de « savons de potasse » faits à partir de graisse de porc, en 1811 (Malloizel, 1886). À partir de 1813, il publia régulièrement ses résultats dans les *Annales de chimie*, réunissant finalement ses articles et les augmentant dans le document intitulé *Recherches chimiques sur les corps gras d'origine animale*, en 1823 (un texte qu'il signe Michel-Eugène Chevreul, alors qu'il signait seulement M. Chevreul dans les articles précédents).

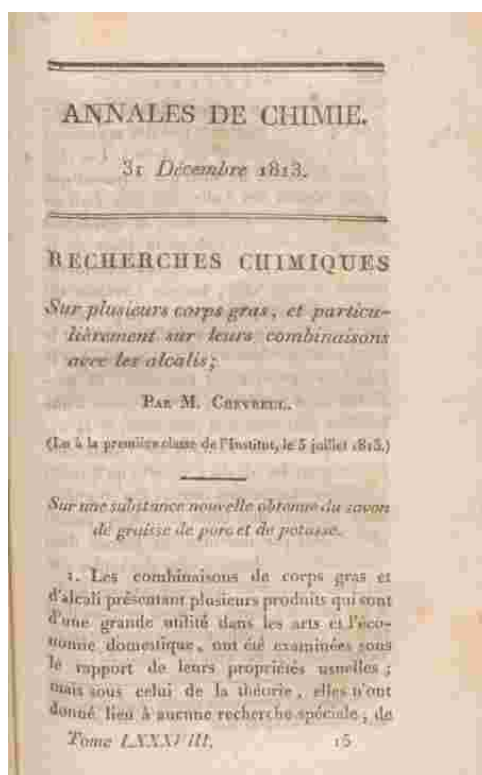


Figure 31. Le premier des mémoires de Chevreul publiés sur les « corps gras » dans les *Annales de chimie*, devenues *Annales de chimie et de physique* en 1816.

Dans un premier article sur les graisses, qu'il lut devant l'Académie des sciences le 5 juillet 1813, Chevreul rapporta que, quatre années auparavant, ayant dilué le savon de graisse de porc et de potasse dans une grande quantité d'eau, il avait observé de « petites paillettes brillantes ».

D'où venaient-elles ? Chevreul s'était étonné, avait repris l'expérience et observé que, quand on diluait du savon potassique de porc dans de l'eau, une partie se dissolvait, tandis qu'une autre formait les paillettes nacrées. Il avait séparé, par cristallisation dans l'alcool, une substance « grasse » qui était acide (« un nouveau type d'acide »), contrairement à la graisse initiale, qui était neutre. Il l'avait initialement nommée « margarine », du grec *margarites*, qui signifie perle, mais il renomma ultérieurement « acide margarique » ce mélange d'acide stéarique et d'acide palmitique. Ce fut en tout cas la première fois que l'on isola des acides gras à partir des graisses naturelles (Chevreul, 1813).

Nous l'avons indiqué précédemment, cet « acide margarique » fut ultérieurement étudié plus en détail par le chimiste allemand Franz Varrentrapp (1815-1877), qui préparait sa thèse sous la direction de Justus von Liebig, mais ce n'est qu'au milieu du 19^e siècle que Wilhelm Heinrich Heintz (1817-1880), à l'université de Halle, découvrira que l'« acide margarique » n'était pas un composé pur, mais un mélange d'acide palmitique (un acide gras à 16 atomes de carbone) et d'acide stéarique (à 18 atomes de carbone) (Lehmann, 1853), et il y avait de quoi confondre, car un tel mélange a une masse molaire similaire à ce qu'aurait été l'acide gras saturé à 17 atomes de carbone, ou acide heptadécanoïque.

Dans un mémoire suivant, Chevreul rapporte ses analyses des produits de la saponification par la potasse (Chevreul, 1815a). Puis il observe que « le savon de graisse de porc et de potasse » n'est vraisemblablement pas un « composé binaire », une juxtaposition de deux corps. Il indique comment, à partir de l'huile d'olive refroidie, il avait séparé au moins deux « principes gras ». L'observation se fait facilement aujourd'hui, quand on met de l'huile d'olive au réfrigérateur, une partie cristallise au fond de la bouteille : ce sont les triglycérides les plus facilement fusibles. Et le procédé est à la base de la confection de matières grasses tartinables : si l'on sépare ainsi d'une matière grasse, des « fractions » qui cristallise à mesure qu'on refroidit, on peut ensuite remélanger une proportion augmentée de graisses très fusibles, avec juste ce qu'il faut de graisses plus difficilement fusibles. C'est d'ailleurs une opération bien différente de celle qui consiste à séparer des acides gras différents.

Chevreul rapporta aussi que, à partir de la partie du savon qui s'était dissoute dans la grande quantité d'eau, il avait obtenu un second produit acide, un liquide qu'il avait d'abord nommé « graisse fluide », renommé plus tard acide oléique. En effet, dissolvant le savon de graisse de porc dans de l'alcool chaud, séparant les aiguilles nacrées du solvant par refroidissement, tandis qu'il récupérait une huile après élimination de

l'alcool, il conclut que la « graisse » (en réalité, la graisse saponifiée) n'était pas un « principe simple », mais qu'elle aurait été formée de deux « principes immédiats » qui pouvaient être séparés de la graisse sans altération, sous la forme d'un solide et d'un liquide. Autrement dit, le « savon de potasse » fait à partir de graisse de porc aurait été composé de deux savons, formés par l'union de la « potasse » avec deux « acides gras » différents (en réalité, le nombre d'acides gras possible est bien supérieur à deux, mais on n'oubliera pas qu'il s'agissait d'abord de voir qu'il y avait un mélange !). Et Chevreul d'annoncer : « Ces recherches ont donc établi que le savon, qui avait été regardé comme un composé d'une matière grasse et d'un alcali, est réellement un composé double d'alcali et de deux corps gras acides ».

Les mêmes résultats furent publiés quasi simultanément par Henri Braconnot (1780-1855), à Nancy, lequel s'était interrogé sur la diversité des graisses et leurs différences de consistance. Cela suscita d'ailleurs une réclamation de Chevreul, dans les *Annales de chimie*, parce que le calendrier des publications faisait apparaître ses travaux comme postérieurs à ceux de Braconnot, alors qu'il avait en réalité été le premier à communiquer sur ce fait, devant l'Académie des sciences (Chevreul, 1815b). Quoi qu'il en soit, la question était posée : les deux produits acides et le « principe doux » étaient-ils des « principes immédiats » de la graisse non encore saponifiée ?

Dans un troisième mémoire, publié en 1815, Chevreul posait des questions, auxquelles il apportait des éléments de réponse par le compte rendu d'expériences (Chevreul, 1815c). Par exemple, l'acide acétique est-il un produit de la saponification ? Et l'acide carbonique ? Le « gaz oxygène » est-il nécessaire à la saponification (ah, l'influence durable de Lavoisier !), comme l'avait proposé Fourcroy ? La graisse qui a été saponifiée diffère-t-elle de celle qui ne l'a pas été ? La graisse est-elle un « principe immédiat simple » ? Ses expériences de saponification sous vide, sans dioxygène, lui firent penser qu'un acide – plus un « principe doux » (le glycérol) – était finalement produit, et il fut amené à penser que soit la graisse avait considérablement changé sous l'action de la « potasse », soit qu'elle était initialement composée de « margarine », de « graisse fluide » et d'un « principe doux », ce qui était toutefois difficile à concevoir, car la « graisse fluide » et la « margarine » étaient toutes deux acides : dans un tel cas, le « principe doux » aurait dû être très basique. En tout cas, l'hypothèse de Fourcroy était réfutée. Et, d'autre part, il apparaissait que « les produits essentiels de la saponification sont la margarine, la graisse fluide et le principe doux ».

Dans un quatrième article (1815d), Chevreul observe que les produits de la saponification de la graisse de porc sont les mêmes quelles que soient les bases employées. Il rapporte également que les acides gras sont des acides qui forment une classe de sels distincts, en se combinant aux bases.

Puis il explora la graisse des cadavres, du blanc de baleine, ou spermaceti, et la substance cristalline présente dans les calculs biliaires humains. Il trouva que cette

dernière substance n'était pas une graisse saponifiable. En revanche, le spermaceti se saponifiait, bien que le « principe doux » n'ait pas été retrouvé dans les produits de saponification. Ainsi Chevreul montra que ces trois corps, considérés par Fourcroy comme des variétés d'un même principe, étaient trois matières différentes. Surtout, Chevreul s'enorgueillit à juste titre d'avoir montré que diverses bases sont utilisables, et d'avoir établi les quantités nécessaires pour les réactifs de la saponification, ce qui était évidemment utile à l'« art des savonniers ».

Un mémoire suivant montre un chimiste qui revient sans cesse sur ses expériences, qui les refait, qui poursuit inlassablement les séparations, et qui ré-interprète différemment ses précédents résultats, sur la base de tout ce qu'il a déjà vu. Chevreul fait un résumé de ses mémoires précédents, et expose une nomenclature des substances découvertes, nommant « cholestérine » (cholestérol) la substance cristalline des calculs biliaires, « cétine » le spermaceti, « stéarine » et « élaïne » les principes gras solides et liquides (Chevreul, 1824a ; 1824b). Il renomme « acide margarique » la « margarine », et acide oléique la « graisse fluide ». L'acide obtenu par saponification du spermaceti est nommé acide cétique, et il applique les noms de « margarates », « oléates », « cétates » pour les savons formés avec des bases.

Dans ce mémoire, Chevreul rapporte également ses explorations d'autres graisses et d'autres savons que ceux de porc, mais, surtout, il relate avoir découvert que les produits de saponification pèsent plus que les graisses initialement saponifiées d'environ 4 à 6 pour cent ! Quelques pour cent qui sont essentiels pour notre histoire de la chimie, parce qu'ils font toute la différence entre une juxtaposition de composés (le glycérol et trois acides gras) en un composé (triglycéride) qui résulte d'une réaction entre les réactifs : en effet, pour saponifier, en décomposant les molécules de triglycérides, il faut ajouter des atomes d'oxygène et d'hydrogène (disons de l'eau), et cela fait la différence de masse ! Je propose d'ailleurs d'observer que, pour faire cette différence, il ne suffit pas de faire des expériences précises, mais il faut aussi faire un saut conceptuel extraordinairement courageux, avec une foi solide dans ses résultats expérimentaux.

Je passe les résultats parce qu'ils sont trop nombreux. Certains travaux furent plus difficiles que d'autres, notamment quand Chevreul découvrit des « acides gras » volatils dans les graisses de bœuf et de chèvre, en 1818 ; il lui fallut jusqu'en 1822 pour identifier les acides butyrique (quatre atomes de carbone), caproïque (six atomes de carbone), caprique (dix atomes de carbone), isovalérique (cinq atomes de carbone) à partir d'huile de dauphin (initialement acide delphinique, puis phocénique) ; en 1816, il mentionne la découverte de l'acide stéarique.

C'est en 1815 que l'on voit apparaître des résultats d'analyses élémentaires. Chevreul faisait initialement ses analyses par la méthode de Gay-Lussac et Thenard, améliorée par Berzelius et par lui-même. Comment cela se faisait-il ? On pourrait se limiter à exposer que la matière organique était brûlée dans un tube de verre, en présence d'oxyde

de cuivre, que de l'eau dégagée, absorbée par du chlorure de calcium, on déduisait la masse d'hydrogène contenue dans le produit analysée ; puis, en recommençant l'opération, on recueillait dans une sorte de cloche posée sur du mercure (un « eudiomètre ») les gaz qui se dégageaient, on mesurait la quantité de dioxyde de carbone avec de la « potasse », et la quantité de dioxygène avec du phosphore.

Toutefois ce ne serait pas rendre justice à Chevreul que de s'arrêter à cette description : ce qui se dit en quelques mots néglige une foule de précautions essentielles. Par exemple, il s'agit tout d'abord de bien sécher le tube qui sert à faire la combustion initiale (26 centimètres de long environ), en le chauffant pendant une demi-heure. Puis on le ferme et on le pèse très précisément. On pèse la matière à analyser (un demi gramme environ) et on la met dans un récipient de porcelaine avec de l'oxyde cuivrique (préalablement pesé) chauffé au rouge. On ajoute une quantité pesée de tournure de cuivre préalablement calcinée, que l'on tasse. Puis on pèse à nouveau le tube de réaction où l'on a placé les réactifs. On cherche alors la quantité d'air dans le tube. Ayant préparé un tube qui viendra relier le tube de réaction à un récipient plein de mercure retourné sur du mercure, on procède à la réaction, avec de nombreuses précautions relatives au chauffage du tube de réaction. Puis, après refroidissement, on note le niveau du mercure au-dessus du niveau de la cube... et ainsi de suite sur près de 10 pages des *Recherches chimiques sur les corps gras* (1824).

Le livre complet (528 pages) est bien plus que la collection des articles publiés dans les dix années précédentes. C'est une passionnante synthèse, qui mêle des considérations générales, supérieures, et des indications expérimentales nombreuses, sans lesquelles aucun discours scientifique n'est fondé. Chevreul y décrit notamment toutes les graisses, avec leurs produits de saponification, leurs propriétés, composition, préparation, nomenclature, histoire naturelle. Surtout les analyses immédiates ou élémentaires étaient si bien faites que Chevreul put en dériver les mécanismes de saponification. Notamment, comme indiqué plus haut, il évoque le fait que la masse totale des produits de la saponification était environ 5 % supérieure à la masse des réactifs. Utilisant la constance du point de fusion des composés définis comme guide, il contrôlait les opérations : c'est à lui que l'on doit cet usage de la mesure du point de fusion en chimie organique, comme moyen de contrôle de la pureté des composés (Leray, 2023).

Le cinquième livre contient un examen comparatif de ses analyses élémentaires, et une discussion de la saponification. Chevreul arrive à un point où, par une interprétation magistrale des réactions, il éclaire la saponification : prudemment il émet l'hypothèse que, dans les graisses, le glycérol joue le même rôle que l'éthanol dans l'acétate d'éthyle, ce qui est exact, puisque, dans les deux cas, la réaction est une « estérification ». Plus tard, Berthelot confirmera cette idée en obtenant la synthèse de glycérides (Berthelot, 1854).

Le texte est une belle synthèse, bien claire :

« On peut définir aujourd'hui exactement le sens qu'on doit attacher au mot saponification, créé pour désigner l'opération par laquelle on fait le savon, ou encore le phénomène que présente un corps gras lorsqu'il concourt avec un alcali à produire du savon. Les savons étant des réunions de stéarate, de margarate et d'oléate, et ces composés étant toujours préparés en grand avec les huiles et les graisses formées de stéarine et d'oléine, corps qui ne sont point acides aux réactifs colorés, il s'ensuit que la saponification est une opération par laquelle, au moyen d'un alcali, on obtient de certains corps gras non acides, des corps gras acides, ou qu'elle est le phénomène que présentent des corps gras non acides lorsqu'ils manifestent l'acidité après avoir été soumis à l'action d'un alcali. [...] On voit encore que dans la saponification des graisses, celles-ci se partagent en deux portions très inégales: 1° l'une qui s'élève au moins aux 92/100 du poids des graisses et qui est formé d'oxygène, de carbone et d'hydrogène : ces deux derniers sont dans un rapport peu différent de celui où ils se trouvent dans les graisses ; mais leur proportion relativement à l'oxygène est plus forte que dans cette dernière ; 2° l'autre portion qui est également formée d'oxygène, de carbone et d'hydrogène, et qui fixe de l'eau pour constituer la glycérine d'une densité de 1,27. »

Concluons en observant que non seulement Chevreul avait résolu une question notoirement difficile, mais, de surcroît, il avait à son actif tant des « découvertes » d'acides gras que l'élucidation des mécanismes de réaction, sans compter les perfectionnements techniques d'analyse qui lui avaient permis de gravir une sorte d'Himalaya chimique ! De quoi lui assurer une gloire durable.

Conséquences.

985. La somme des poids de la glycérine et des acides hydratés de chaque sorte de graisse est plus grande que le poids de la graisse soumise à l'action de l'alcali.

986. Puisque la saponification s'opère dans le vide (973), et sans qu'il y ait dégagement d'aucun gaz, il faut qu'il y ait eu de l'eau fixée dans les produits de la saponification. Cette eau peut avoir été fixée dans deux circonstances : d'abord pendant l'action de l'alcali, ensuite lorsque les acides ont été séparés de la potasse au moyen de l'acide phosphorique. Je remarquerai que l'augmentation de poids est certainement plus grande que celle qui résulte de l'expérience, car les opérations assez multipliées au moyen desquelles la glycérine a été séparée des acides hydratés n'ont pu être pratiquées sans perte ; et d'un autre côté, lorsqu'on a séché la glycérine et les acides hydratés par l'action de la chaleur, on en a indubitablement volatilisé, toutes les deux étant susceptibles de s'évaporer, surtout quand on les chauffe au milieu de l'atmosphère ; ajoutez à ces pertes celle qui a dû résulter de la réaction de l'oxygène de l'air sur le carbone et l'hydrogène de ces mêmes matières.

Figure 32. Un passage crucial, dans le texte de 1823 : Chevreul y observe la différence de masse entre celle d'un triglycéride et celle cumulée de glycérol et de trois acides gras.

Chapitre 6

Avant et après 1824

En 1818, un peu avant la publication de sa grande synthèse, alors qu'il finissait ses travaux sur les graisses, Chevreul avait épousé Sophie Davallet, la fille de Nicolas-Benoit Davallet, receveur général des contributions du département de la Seine. Le couple Chevreul habitait à Paris en hiver, tandis que, le reste de l'année, Sophie résidait dans leur belle maison de l'Haÿ (devenu l'Haÿ-les-roses), en banlieue parisienne. Le samedi soir, après dîner, Chevreul faisait 9 kilomètres pour la rejoindre, et il rentrait le lundi matin soit au Muséum, soit aux Gobelins (Bouchard, 1932).

En 1819, Berzelius avait loué une maison à l'Haÿ, où il se trouvait le voisin de Chevreul. Il fréquentait assidûment chez ce dernier. Les deux savants et leurs épouses se lièrent d'une vive et durable amitié. Les Chevreul recevaient leurs amis le dimanche, tels le physicien André-Marie Ampère (1775-1836), et Frédéric Cuvier, le jeune frère du célèbre naturaliste Georges Cuvier.

Ces trois hommes discutaient de leurs travaux et de diverses questions scientifiques. Ils étaient également intéressés par l'épistémologie, et, notamment, les méthodes scientifiques et la classification du savoir : en 1833, Ampère exposa ses idées dans son *Essai sur la philosophie des sciences*, tandis que Chevreul mettait à profit ces discussions pour organiser ses *Recherches chimiques sur les corps gras d'origine animale* (1824) :

« Nous pensons donc qu'au lieu de recueillir, sur des sujets très différents, des faits qui manquent de corrélation, il est préférable, pour les progrès de la science, de rassembler de plus possible de faits analogues, de les coordonner ensemble, afin d'en déduire les conséquences générales qui, seules peuvent imprimer à un ensemble de faits, le caractère constitutif de la science ».

Des faits ? Lavoisier avait conseillé de *« ne déduire aucune conséquence qui ne dérive immédiatement des expériences et des observations ; ne conserver que les faits qui ne sont que des données de la nature, à ne chercher la vérité que dans l'enchaînement naturel des expériences et des observations »* (1789). Chevreul reprendra la question bien plus tard.

En attendant, après avoir publié les *Considérations générales sur l'analyse organique et sur ses applications* (Chevreul, 1824c), Chevreul dépose, en 1825, avec Gay-Lussac, un brevet d'application sur la fabrication de bougies stéariques. Le brevet ne sera pas exploité directement, en raison de la mauvaise qualité des mèches employées, et il

faudra les améliorations des médecins Louis Adolphe de Milly (1799-1876) et Adolphe Motard (1804–1882) pour parvenir à une bonne solution : la « soude » fut d’abord remplacée par de la « chaux éteinte », afin de séparer plus facilement les acides gras de la matière première qu’était le suif, et le problème du carbonate de calcium restant dans la masse de la bougie fut résolu par une imprégnation de la mèche par de l’acide borique ; enfin, afin d’éviter des vides résultant de la cristallisation de la masse, la coulée s’effectuait à une température juste supérieure à son point de fusion. De Milly et Motard commercialisèrent alors les bougies avec leur *Manufacture de Bougies de l’Étoile* (ainsi nommée parce qu’elle était près de la place de l’étoile, à Paris). Reconnaisants (et peut-être désireux de publicité), ils offriront en 1886 les bougies destinées à éclairer le banquet du centenaire de Chevreul et la réception à l’Hôtel de ville de Paris.

Les années qui suivent voient le développement de la carrière de Chevreul : examinateur de chimie à l’École polytechnique, directeur de l’Atelier des teintures de la Manufacture royale des Gobelins (il y passera 61 ans de sa vie), membre de l’Académie des sciences, professeur de chimie appliquée aux corps organiques au Muséum nationale d’histoire naturelle (1830)... et, à partir de 1849, activités très régulières et assidues à ce qui était alors Société nationale et centrale d’agriculture, où il fut alternativement vice-président et président pendant vingt ans (vingt ans !), la société devenant Académie d’agriculture de France en 1915.

Aux Gobelins, on lui soumit aussitôt la question des couleurs qui passaient ou qui manquaient de vigueur, pour les tapisseries et les teintures. Toutefois, à son arrivée à la Manufacture, il n’avait pas de laboratoire, de sorte qu’il dut aménager les locaux et acheter des appareils avant de se mettre au travail. À l’époque, les colorants de synthèse étaient alors encore inconnus (le premier sera réalisé en 1856 par William Henry Perkin, et nommé mauvéine), et l’on teignait à l’aide de substances végétales, telles que cet indigo que Chevreul avait étudié naguère, ainsi qu’avec quelques colorants minéraux. Chevreul étudie les propriétés de ces colorants naturels et publie dans les *Mémoires de l’Académie des sciences*, entre 1838 et 1864, tout une série d’articles (14) relatant l’histoire naturelle de ces colorants et leur usage.

Lors de ses études aux Gobelins, il découvre notamment que l’instabilité chimique des teintures n’est pas la seule difficulté des teinturiers : le manque de vigueur des noirs utilisés pour faire les ombres des draperies bleues et violettes est un effet de contraste, tout comme la perte d’intensité du noir sur un fond violet ou bleu. Il publie ses observations en 1828, dans un *Mémoire sur l’influence que deux couleurs peuvent avoir l’une sur l’autre quand on les voit simultanément*, avant de publier en 1829 des *Leçons de chimie appliquée à la teinture* : un traité complet de chimie dont seules les deux dernières leçons sont entièrement consacrées à la teinture.

Puis, après des études méthodiques de ce phénomène physiologique, il formule les lois qui gouvernent le contraste des couleurs, notamment dans *De la loi du contraste simultané des couleurs* (1839).

Pour établir ces lois, il avait disposé des écheveaux de laine ou des bandes de papier les uns à côté des autres, et noté les effets produits. Il avait découvert qu'il y avait trois types de contrastes : simultané, successifs et mixtes. Le contraste simultané est la modification de teinte et d'intensité qui résulte de l'observation de deux couleurs simultanément : par exemple, du jaune semble apparaître sur un fond pourtant blanc, à l'extérieur d'un rond bleu sur ce fond blanc. Le contraste successif s'observe quand on regarde d'abord une couleur, puis une autre, et il résulte notamment de la persistance rétinienne.

Au cours de ces recherches, Chevreul mit au point un système de classification rationnelle des couleurs de teinture des laines, d'où dérive le système qui reste utilisé de nos jours : il proposa un classement universel fondé sur 18 cercles chromatiques de 72 secteurs, définissant 14 400 tons. Non seulement le travail des teinturiers en fut modifié, mais la peinture aussi : les peintres néo-impressionnistes utilisèrent les travaux de Chevreul pour déterminer la juxtaposition des couleurs voisines.



Figure 33. Un des cercles chromatiques de Chevreul, publié en 1855.

Chevreul avait-il alors abandonné la chimie ? Absolument pas ! Non seulement il faisait ses études en chimiste, mais il mit aussi sa compétence de chimiste à l'appui de ses études de l'agronomie et des autres « arts chimiques » : notamment à propos de questions posées à la Société d'agriculture, il effectuait des analyses. Plus généralement, il ne cessait de produire des rapports : à propos de mortier, de fermeture de bocaux à l'aide de caoutchouc, de dessiccation des meules de foin, de fabrication du cidre, d'hygiène publique, d'ampélographie, de photographie...

Il s'intéressait beaucoup à l'histoire, la psychologie et la philosophie, publiant dans le *Journal des savants*. Il y fit notamment l'analyse du livre intitulé *Histoire de la chimie*, par Jean-Christien Ferdinand Hoefer (1811-1878), avec des commentaires étalés sur huit années ! Dans le dernier de ses commentaires, publié en 1851, Chevreul regrettait d'avoir eu « l'obligation de faire court », mais il poursuivit ses analyses des écrits de ses prédécesseurs ou collègues ; il exposait ses propres idées tout en présentant les leurs.

À partir de 1853, d'autre part, à partir d'une demande de l'Académie des sciences, il explore des phénomènes psychiques, notamment les pratiques des sourciers, montrant que les mouvements de la baguette ou des pendules résultent de réflexes inconscients gouvernés par l'observation de l'environnement. Il en profite pour faire état de considérations épistémologiques, et, notamment, pour comparer les pratiques courantes et la méthode scientifique.

Chevreul voyait les expérimentations comme des tests d'inductions théoriques fondées sur l'étude de phénomènes. Il nommait cela « méthode *a posteriori* expérimentale ». Cette méthode est définie par opposition à la méthode *a priori*, dans laquelle l'esprit serait entraîné par son imagination ; tel était le cas pour Ampère, qui, pour Chevreul, « se laissait aller à la méthode *a priori* ». Et d'insister :

« La méthode *a posteriori* expérimentale intervient à la condition expresse que le savant institue des expériences propres à prouver la vérité d'un raisonnement fait avec l'intention de ramener à sa cause immédiate le phénomène donné par l'observation ou par la simple expérience ».

Pourquoi en arrive-t-il à changer sa signature dans ses publications, à cette époque ? Le livre publié en 1864 sous le titre *Des couleurs, et de leurs applications aux arts industriels à l'aide des cercles chromatiques*, est signé non plus M. Chevreul (M peut signifier Michel ou Monsieur), ni M.E ou M.-E. Chevreul (soit pour Michel-Eugène, soit pour Monsieur Eugène), ni même Michel-Eugène Chevreul, mais E. Chevreul, et l'on voit ensuite cette signature de plus en plus fréquemment utilisée. Comment le nommait-on en privé ? Je n'ai pas trouvé de sources définitives, mais une lettre manuscrite de Chevreul, datée de 1857, est signée « E Chevreul ».

En tout cas, entre la direction du Muséum (elle dura 15 ans à partir de 1864), les activités à la Société d'agriculture, la participation assidue aux séances de l'Académie

des sciences (en 63 ans, il n'en manqua pas une), ses recherches, Chevreul vieillissait (figure 34).

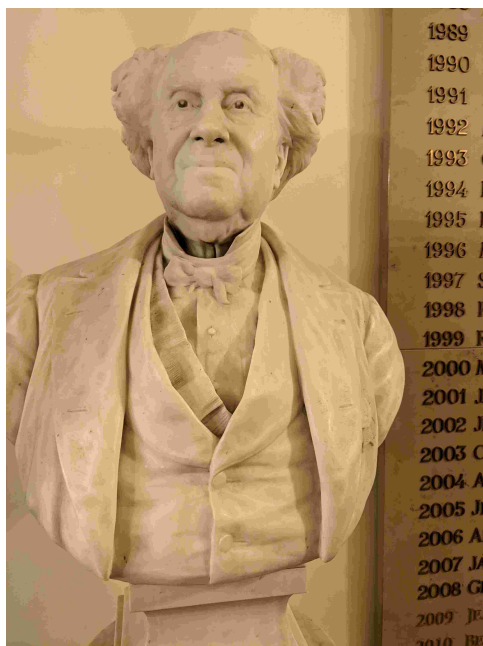


Figure 34. Le buste de Michel Eugène Chevreul à l'Académie d'agriculture de France.

Il travaillait sans relâche, et, quand on lui demandait le secret de sa longévité, il répondait : « *Le travail est une des conditions essentielles pour une vie centenaire* » (mais il ajoutait qu'il ne buvait pas de boissons excitantes, par exemple). Il était méthodique et régulier, attirant des jeunes chimistes brillants tels que Charles Gerhardt (1816-1856), Cannizzaro, Auguste Cahours (1813-1891). Patient, logique, précis, son élocution était détaillée et méthodique, et il avait une passion pour la vérité, ainsi qu'une grande curiosité. En 1886, le photographe Félix Nadar réalisa le premier interview photographique en publiant une série d'entretiens illustrés dans le *Journal illustré* sous le titre « L'art de vivre cent ans ».

Dans les années qui précédaient son décès, à l'âge de 102 ans, après des célébrations nationales, Chevreul signait « E. Chevreul, doyen des étudiants de France » (figure 35). Doyen des étudiants de France ? Oui, mais d'abord chimiste !



Figure 35. Le doyen des étudiants de France : centenaire !

Références

On observera que n'est donnée ici qu'une sélection des articles ou livres utilisés.

André J. 1956. Gaulois *sapana*, latin *sapo* ; grec *ΣΑΠΩΝ*, *Études Celtiques*, 7(2), 348-355. doi : <https://doi.org/10.3406/ecelt.1956.1291>.

Berthelot M. 1854. *Mémoire sur les combinaisons de la glycérine avec les acides et sur la synthèse des principes immédiats des graisses des animaux*, Mallet-Bachelier, Paris.

Berthelot M. 1902a. *Notice historique sur la vie et les travaux de Chevreul*, Didot, Paris.

Berthelot M. 1902b. *La révolution chimique Lavoisier*, Félix Alcan, Paris, 260.

Berzelius J. 1832. *Traité de chimie* (traduction de l'édition de 1819), Firmin Didot-Baillière, Paris.

Bouchard G. 1932. *Chevreul*, Éditions de la Madeleine, Paris.

Brillat-Savarin JA. 1825. *La physiologie du goût*, chez l'auteur, Paris.

Pelletier PJ, Caventou JB. 1817. Mémoire sur la matière verte des feuilles, *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, 8, p. 194–196.

Chevreul M. 1806. Examen chimique des os fossiles trouvés clans le département d' Eure-et-Loir, *Annales de chimie*, 67, 45-50.

Chevreul M. 1808. Expériences chimiques sur l'indigo, *Annales de chimie*, 66, 5-50.

Chevreul ME. 1813. Recherches chimiques sur plusieurs corps gras et particulièrement sur leurs combinaisons avec les alcalis. Mémoire 1 – Sur une substance nouvelle obtenue du savon de graisse et de potasse. *Annales de Chimie*, 88, 225–261.

Chevreul M. 1815a. Examen chimique du savon des graisses de porc et de potasse, *Annales de Chimie*, 94, 80–107.

Chevreul M. 1815b. Lettre de M. Chevreul à MM les rédacteurs des Annales de chimie, *Annales de chimie*, 94, 73-79.

Chevreul M. 1815b. De la saponification de la graisse de porc et de sa composition. *Annales de chimie*, 94, 113–144.

Chevreur M. 1815c. Des corps qu'on a appelés adipocire, c'est à dire de la substance cristallisée des calculs biliaires humains, du spermaceti et de la substance grasse des cadavres. *Annales de Chimie*, 95, 5–50.

Chevreur M. 1816. Examen des graisses d'homme, de mouton, de bœuf, de jaguar et d'oie, *Annales de Chimie et de Physique*, 2, 339–372.

Chevreur M. 1817a. Recherches chimiques sur plusieurs corps gras, et particulièrement sur leurs combinaisons avec les alcalis – De la cétine. *Annales de Chimie et de Physique*, 7, 155–181.

Chevreur M. 1817b. Recherches chimiques sur plusieurs corps gras, et particulièrement sur leurs combinaisons avec les alcalis – De l'huile du Delphinus globiceps. *Annales de Chimie et de Physique*, 7, 264–275.

Chevreur M. 1817c. Recherches chimiques sur plusieurs corps gras, et particulièrement sur leurs combinaisons avec les alcalis – De l'acide delphinique. *Annales de Chimie et de Physique*, 7, 367–382.

Chevreur ME. 1823a. *Recherches chimiques sur les corps gras d'origine animale*, FG Levraut, Paris.

Chevreur ME. 1823b. Sur les causes des différences que l'on observe dans les savons, sous le rapport de leur degré de dureté ou de mollesse et sous celui de leur odeur ; et sur un nouveau groupe d'acides organiques. *Annales de Chimie et de Physique*, 23, 16–32.

Chevreur ME. 1824a. *Considérations générales sur l'analyse organique et sur ses applications*. FG Levraut, Paris.

Chevreur ME. 1824b. Note sur la présence de cholestérine dans la bile de l'homme, *Mémoires du Muséum d'Histoire Naturelle*, 11, 239–240.

Chevreur ME. 1824c. *Considérations générales sur l'analyse organique et sur ses applications*. Levraut, Paris. 1 vol. in-8, XXI, 256 pages.

Costa AB. 1962. *Michel Eugène Chevreul, pioneer of organic chemistry*, Logmark Editions, Madison (Wisconsin).

Duhem P. 1899. Une science nouvelle, La chimie physique. Extrait de la *Revue philomathique de Bordeaux et du Sud-Ouest*, 2e année, numéro 5, 1er mai, et numéro 6, 1er juin 1899, Publié à Bordeaux imprimerie 11 rue Guiraud.

ENCCRE. 2024. Édition Numérique Collaborative et CRitique de l'*Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers* de Diderot, D'Alembert et Jaucourt (1751-1772), <http://enccre.academie-sciences.fr/encyclopedia/>.

Fourcroy AF. 1782. *Système des connaissances chimiques*, Baudoin, Paris.

Galilée. 1640. *Lettre à Liceti*, http://homepages.ulb.ac.be/~pmarage/HIST-F-101_notes.pdf, https://www.researchgate.net/publication/262592609_Letter_from_Galileo_Galilei_to_Fortunio_Liceti.

- Gay-Lussac J, Thenard LJ. 1811. *Recherches physico-chimiques*, Deterville, Paris, 265 et suivantes.
- IUPAC. 2019. Glycerides. In *Compendium of chemical terminology*, 2nd ed. (The Gold Book), <https://goldbook.iupac.org/terms/view/G02647>, dernier accès 2020-12-15.
- Jacques J. 1987. *Berthelot : autopsie d'un mythe*, Belin, Paris.
- Joubert A. 1886. *Michel Eugène Chevreul*, 1786-1886, Germain et G. Grassin, Angers.
- Kahn D. 2016. *Le fixe et le volatil*, CNRS Editions, Paris.
- Klere J, Mordret F. 2000. De Mege-Mouriès aux margarines d'aujourd'hui, *L'Actualité chimique*, 11, 10-12.
- Lafont O. 2006. Lavoisier et les radicaux, *Revue d'histoire de la pharmacie*, 352, 447-452. doi : 10.3406/pharm.2006.6050.
- Lavoisier AL. 1777a. Mémoire sur la combustion en général, *Mémoire de l'Académie Royale*, https://www.academie-sciences.fr/pdf/dossiers/Franklin/Franklin_pdf/Mem1777_p592.pdf.
- Lavoisier AL. 1777b. In *Oeuvres*, II, 588.
- Lavoisier AL. 1789. *Traité élémentaire de chimie*, Cuchet, Paris.
- Lavoisier AL, Hassenfratz JH, Fourcroy AF, Berthollet CL, Guyton-Morveau LB, Adet PA. 1787. *Méthode de nomenclature chimique, proposée par MM. de Morveau, Lavoisier, Berthollet & de Fourcroy. On y a joint un nouveau système de caractères chimiques, adaptés à cette nomenclature*, par MM. Hassenfratz et Adet, Cuchet, Paris.
- Lehmann CG. 1853. *Lehrbuch der physiologischen Chemie*, Verlag Wilhelm Engelmann, Leipzig, 71.
- Lemay P, Oesper RE. 1948. Michel Eugène Chevreul (1786-1889), *Journal of Chemical Education*, 25(2), 62-70.
- Leray C. 2023. Contribution of Chevreul to lipid chemistry, *OCL*, 30(9), 1-5.
- Lide DR. 2005. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, Internet Version 2005, CRC Press, Boca Raton, Florida, <http://www.hbcpnetbase.com>, dernier accès 2020-12-15.
- Lower S. 2020. *All about water*, Chemistry Libretexts, [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_\(Physical_and_Theoretical_Chemistry\)/Physical_Properties_of_Matter/All_About_Water](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Physical_Properties_of_Matter/All_About_Water), dernier accès 2020-12-15.
- Macquer PJ. 1789. *Dictionnaire de Chymie*, Imprimerie de la Société Typographique, Neuchâtel, Suisse.

- Malloizel G. 1886. *Oeuvres scientifiques de Michel-Eugène Chevreul*, Julien Lecerf, Paris-Rouen.
- Motte E. 2016. Les bouillons médicinaux dans les ouvrages de Nicolas Lémery, un reflet de l'évolution des sciences. *Revue d'histoire de la pharmacie*, 103e année, 391, 359-370.
- Myers RJ. 2012. What are elements and compounds, *Journal of chemical education*, 89(7), 822-833.
- Ollivier D, Pinatel C, Ollivier V, Artaud J. 2014. Composition en acides gras et en triglycérides d'huiles d'olive vierges de 34 variétés et 8 Appellations d'Origine françaises et de 2 variétés étrangères implantées en France : constitution d'une banque de données, *Olivae*, 119, 36-48.
- Pline. 74. *Histoire naturelle*, 28, 191.
<https://agoraclasse.fltr.ucl.ac.be/concordances/pline%5Fhist%5Fnat%5F02/lecture/default.htm>.
- Poirier JP. 2024. *Les amis de Lavoisier; 5. Le biologiste*. http://historyofscience.free.fr/Comite-Lavoisier/f_chap5_lavoisier.html.
- Pons A, Allamy L, Schüttler A, Rauhut D, Thibon C, Darriet P. 2017. What is the expected impact of climate change on wine aroma compounds and their precursors in grape?, *OENOOne*, Institut des Sciences de la Vigne et du Vin, 51 (2-3), 141-146.
- Pu J, Zhao B, Liu X, Li S, Wang B, Wu D, Wang J, Geng F. 2023. Quantitative proteomic analysis of chicken egg white and its components, *Food Research International*, 170 (2023) 113019.
- PNNS. 2020. *Manger bouger : les huiles riches en acides gras polyinsaturés*, <https://www.mangerbouger.fr/pro/sante/alimentation-19/nouvelles-recommandations-adultes/rubrique-test/e-les-huiles-riches-en-acides-gras-poly-insaturees.html>, dernier accès 2020-12-15.
- Reina, M, This H, Reina A. 2022. Improving the understanding of chemistry by using the right words: A clear-cut strategy to avoid misconceptions when talking about elements, atoms and molecules, *Journal of Chemical Education*. 8 juillet 2022, <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c00411>.
- Roques B. 1998. *Michel-Eugène Chevreul: Un savant, des couleurs !*, Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris.
- Scheidecker-Chevallier M. 1997. L'hypothèse d'Avogadro (1811) et d'Ampère (1814) : la distinction atome/molécule et la théorie de la combinaison chimique, *Revue d'histoire des sciences*, 50(1/2), 159-194.
- Thenard LJ. 1815. *Traité de chimie élémentaire théorique et pratique*, tome 3, Crochard, Paris.
- This H. 2003. Phlogistique. In Klein E (ed.) *Quand la science a dit c'est bizarre !*, Le Pommier, Paris.
- This H. 2018. Who discovered the gluten and who discovered its production by lixiviation?, *Notes académiques de l'Académie d'Agriculture de France/Academic Notes from the French Academy of Agriculture (N3AF)*, 2018, 3, 1-11.

This H. 2021a. La rigueur terminologique pour les concepts de la chimie : une base pour des choix de société rationnels, *Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France / Academic Notes from the French Academy of Agriculture (N3AF)*, 11(1), 1-17. <https://doi.org/10.58630/pubac.not.a43610>.

This H. 2021b. Hervé This, Albumen et albumines, *Encyclopédie de l'Académie d'agriculture de France*, <https://www.academie-agriculture.fr/publications/encyclopedia/questions-sur/0801q01-albumen-et-albumines>.

This H. 2021c. Des cristaux d'Auguste Laurent et des techniques d'analyse optique de Jean-Baptiste Biot furent directement à l'origine de la découverte de la chiralité par Louis Pasteur, *Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France*, 9, 1-33, <https://www.academie-agriculture.fr/publications/notes-academiques/des-cristaux-dauguste-laurent-et-des-techniques-danalyse-optique-de-0>.

This H. 2023 Chlorophylles et caroténoïdes, *Encyclopédie de l'Académie d'agriculture de France*, <https://www.youtube.com/watch?v=uClBczitX1s>.

Thom R. 1970. *Les mathématiques « modernes », une erreur pédagogique et philosophique ?*, L'Age de la science. <http://gaogoa.free.fr/HTML/Textes/Les%20Mathematiques%20Modernes%20par%20R.THOM.pdf>, dernier accès 2021-01-13.

Van Aubel M. 1963. Accident, catégories et prédicables dans l'œuvre d'Aristote, *Revue Philosophique de Louvain*. Troisième série, 61(71), 361-401.

Van 't Hoff JH. 1874. *Archives Neerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles*. 1874, 9, 445 – 454.

Wisniak J. 2002. Michel Eugène Chevreul, *Educación Química*, 13(2), 63-68. DOI: 10.22201/fq.18708404e.2002.2.663.

Index

Académie d'agriculture de France.....	3, 5, 60, 63, 69
Académie de médecine.....	28
Académie des sciences.....	28, 32, 53 sq., 60, 62
acide acétique.....	38, 54
acide benzoïque.....	34 sq.
acide carbonique.....	34, 54
acide carboxylique.....	14, 23
acide chlorhydrique.....	34, 50
acide formique.....	38
acide gras.....	13, 19 sq., 23, 49, 53
acide isocyanique.....	40, 46
acide lactique.....	38
acide margarique.....	12 sqq., 53, 55
acide muriatique.....	34
acide nitrique.....	26, 34 sq., 51
acide oléique.....	53, 55
acide oxalique.....	35, 51
acide palmitique.....	14, 53
acide phosphorique.....	34
acide principal.....	38
acide sulfurique.....	48
acide tartrique.....	46
acides aminés.....	20
acides gras.....	13 sq., 19 sqq., 49, 53 sqq., 57 sq., 60, 68
acides tartriques.....	46
Adet.....	26, 67
albumine.....	9, 11, 33, 38, 42
alcali.....	40 sq., 50, 54, 57
alchimie.....	24
alcool.....	9, 15, 38, 43, 50 sq., 53 sq.
amidon.....	10 sq., 33, 35, 42 sq.
amidons.....	36
Ampère.....	59, 62, 68
analyse chimique.....	4, 9 sq., 27
analyse élémentaire.....	35, 40 sqq., 46, 55 sq.
analyses élémentaires.....	35, 42, 55 sq.
Angers.....	4, 24, 28 sqq., 67
Aristote.....	17, 69
atome.....	8, 14 sqq., 22 sq., 27, 38, 45, 68
atomes.....	7 sqq., 13 sqq., 25, 27, 29, 38, 41, 44 sq., 49, 53, 55
Avogadro.....	17 sq., 68

azote.....	33 sqq., 40 sqq., 45
baleine.....	48, 54
Bayen.....	26
Beccari.....	11, 33
benjoin.....	35
Bernard.....	26, 40
Berthelot.....	17, 30, 40, 56, 65, 67
Berthollet.....	26, 35, 40 sqq., 51, 67
béryllium.....	31
Berzelius.....	38, 43 sq., 46, 55, 59, 65
bibliothèque.....	30
bleu de Prusse.....	43
Bonaparte.....	32
bougies.....	59 sq.
Braconnot.....	54
Brillat-Savarin.....	38, 65
Brongniart.....	33
Cahours.....	63
calcite.....	27
camphre.....	38 sq.
camphrier.....	39
Cannizzaro.....	17 sq., 27, 29, 63
carbonate de sodium.....	48 sq.
carbone.....	7, 13 sqq., 20 sqq., 34 sq., 38, 40 sq., 43 sqq., 48 sq., 53, 55 sqq.
carboxylate.....	50
caroténoïde.....	11
Caventou.....	11 sq., 48 sq., 65
Caventoui.....	11 sq., 65
cendre.....	47
cercles chromatiques.....	61 sq.
charbon.....	40, 48
chaux.....	48, 51, 60
Chéradame.....	31
chimie.....	4, 6, 9 sqq., 13, 15 sqq., 22, 24 sqq., 30 sqq., 44, 52, 54 sqq., 60, 62, 65 sqq.
chlorate de potassium.....	41, 43
chlore.....	43, 45
chlorophylle.....	9, 11 sq.
cholestérine.....	55, 66
cholestérol.....	55
chrome.....	31
chymie.....	10, 24, 33, 67
Collège de France.....	31
colorants.....	34, 60
combinaisons.....	38, 43 sq., 65 sq.
Commission des poids et mesures.....	28

composé.....	9, 13, 15 sqq., 22, 27, 38 sq., 41, 44, 53 sq.
composés.....	9 sqq., 14 sq., 17, 19, 21, 26, 34 sqq., 38, 40 sq., 43 sqq., 51, 55 sqq.
composition.....	36, 38, 43, 45 sq., 56, 65, 68
composition chimique.....	36
Condorcet.....	37
Conservatoire national des arts et métiers.....	24
contraste.....	60 sq.
Convention.....	15, 30, 32, 48
corps simples.....	26 sq.
couleurs.....	48, 60 sqq., 68
cristallographie.....	27
cuve.....	41
Cuvier.....	33, 59
cyanate d'ammonium.....	40, 46
cyanates.....	44
cyanogène.....	43 sq.
D-glucose.....	40
d'Alembert.....	24 sq.
d'Arcet.....	48
Dalton.....	41, 44 sq.
Darcet.....	48 sq.
Davallet.....	59
Davisson.....	32
détergent.....	47
diazote.....	45
Diderot.....	24 sq., 37, 66
dioxyde de carbone.....	34
analyse élémentaire.....	41
dioxygène.....	9, 25 sq., 35, 41, 54, 56
distillation.....	36, 40, 44, 50
Döbereiner.....	44
Duhem.....	24, 66
École centrale.....	30
École polytechnique.....	32, 34, 60
élément.....	9, 15, 25 sq., 34, 44
élément chimique.....	15
éléments.....	4, 9, 15, 18, 25 sqq., 31, 35, 39 sq., 43 sq., 54
Encyclopédie.....	24 sq., 32, 66, 69
enzymes.....	40
esprit de bois.....	36
esprit de vin.....	15, 41
éthanol.....	15 sqq., 37, 40 sq., 43 sq., 56
éther.....	37, 43 sq.
éthoxyétane.....	44
éthoxyéthane.....	37

éthylène.....	41, 43 sqq.
extractions.....	34, 36
Faraday.....	45
farine.....	10 sq., 33
fermentation.....	33, 40
force vitale.....	40
Fourcroy.....	26, 30 sqq., 36 sqq., 51, 54 sq., 66 sq.
fulminates.....	44
Galilée.....	24, 66
Gay-Lussac.....	41 sqq., 55, 59, 67
gaz oléfiant.....	41, 43 sqq.
gélatine.....	42
Geoffroy.....	32 sq., 51
Gerhardt.....	63
Giroud.....	48
gliadine.....	11
gluten.....	9 sqq., 33, 68
gluténine.....	11
glycérol.....	13 sq., 19 sq., 22 sq., 47, 49 sqq., 54, 56, 58
Gobelins.....	4, 6 sq., 17, 59 sq.
gomme arabique.....	42
gommes.....	34 sq., 43
graisse.....	47 sq., 50 sqq., 65
graisses.....	4 sq., 9, 16, 27, 34, 36, 46 sqq., 50 sqq., 59, 65 sq.
Guyton de Morveau.....	26
Guyton-Morveau.....	26, 67
Hassenfratz.....	26, 67
Haüy.....	27 sq., 33
heptadécanoïque.....	13 sq., 53
Hoefer.....	62
Hôtel de ville.....	60
huile.....	19 sq., 40 sq., 45, 48 sq., 51, 53, 55, 66
hydratation.....	44
hydrocarbure.....	44 sq.
hydrogène.....	7 sq., 14 sqq., 20 sqq., 34 sq., 38, 40 sqq., 48, 55 sqq.
hydroxyde de potassium.....	40 sq., 47 sq.
hydroxyde de sodium.....	47 sq., 50
hydroxyle.....	23
hypothèse.....	17, 40, 45, 54, 56, 68
indigo.....	30, 60, 65
IUPAC.....	19, 22, 67
Karlsruhe.....	18, 27
Kesselmeyer.....	11, 33
kilogramme.....	28
l'Haÿ-les-roses.....	59

laboratoire.....	10, 30 sq., 60
Lavoisier.....	4, 9 sq., 24 sqq., 28, 32, 34 sq., 37, 40 sqq., 54, 59, 65, 67 sq.
Leblanc.....	48 sq.
Lelievre.....	48 sq.
lessive de cendres.....	47 sq.
liaison double.....	14
liaisons chimiques.....	14 sqq., 19
Liebig.....	44, 46, 53
lierre.....	47
litharge.....	51
lixiviation.....	11, 33, 68
macération.....	47
Macquer.....	32 sq., 37, 67
Malesherbes.....	37
margarine.....	12 sq., 53 sqq.
mauvéine.....	60
Mège-Mouries.....	13
mélanges.....	9, 34, 38
mercure.....	35, 41, 56
méthane.....	41
méthanol.....	36 sq.
méthode a posteriori expérimentale.....	62
Méthode de nomenclature chimique.....	26, 67
Michel-Eugène.....	2, 4, 28 sq., 52, 62, 68
micro-organismes.....	40
Milly.....	60
minéralogie.....	30
molécule.....	4, 6 sqq., 13 sqq., 25 sqq., 33 sq., 37 sq., 41, 45 sq., 49, 55, 68
Motard.....	60
Muséum.....	4, 27, 30 sqq., 59 sq., 62, 66, 68
Muséum national d'histoire naturelle.....	4
Muséum National d'Histoire Naturelle.....	68
Nadar.....	63
octadécanoïque.....	14
osmazôme.....	38
oxigène.....	25
oxigine.....	25
oxyde de calcium.....	48, 51
oxyde de cuivre.....	43, 55
oxyde de manganèse.....	41
oxyde de mercure.....	35, 41, 56
oxyde ferreux.....	35
oxyde ferrique.....	35
oxydes.....	26, 35, 43 sq.
oxygène.....	7 sqq., 14 sqq., 21 sqq., 25 sq., 34 sq., 38, 40 sqq., 54 sq., 57

paillettes.....	53
particules.....	27
pastel.....	30
Pasteur.....	27, 40, 69
peintres.....	61
Pelletier.....	11 sq., 48 sq., 65
Perkin.....	60
phase.....	16
phlogistique.....	51, 68
phlogiston.....	25 sq., 51
phosphore.....	34 sq., 40, 56
Physiologie du goût.....	38, 65
Pline.....	47, 68
point de fusion.....	56, 60
polymère.....	46
potasse.....	40 sq., 47, 52 sqq., 56, 65
Priestley.....	26
principe doux.....	13, 51, 54 sq.
principe doux des huiles.....	51
principe immédiat.....	9, 38, 54
principes immédiats.....	9 sq., 33, 37 sq., 54, 65
propane-1,2,3-triol.....	13 sq.
protéine.....	11
protéines.....	9, 11, 20, 33
Proust.....	30
purification.....	39
purifications.....	36
racémique.....	46
radical.....	34 sq., 43 sq.
radicaux.....	34 sq., 44, 67
réduction.....	48
résidu.....	13, 22 sq., 40
résines.....	34
Révolution.....	26, 29, 65
Rouelle.....	37
Rouen.....	31, 68
Royal Institution.....	45
saccharose.....	6 sq., 15, 35, 42
saponification.....	47 sq., 50 sq., 53 sqq., 65
Saussure.....	43 sq.
savon.....	47 sqq., 51, 53 sq., 57, 65, 68
savons.....	4 sq., 40, 47 sqq., 54 sq., 57, 66
Scheele.....	14, 26, 51
Société nationale et centrale d'agriculture.....	60
solvant.....	34, 37

solvants.....	34, 37
soude.....	47 sqq., 60
soufre.....	35
sourciers.....	62
spermaceti.....	54 sq., 66
squalène.....	21
Stahl.....	24
stéarique.....	14, 53, 55
stérois.....	21
Strasbourg.....	11
sublimation.....	39
substance.....	9, 15 sqq., 33, 39, 42, 44, 50 sq., 53 sqq., 65 sq.
sucré.....	6 sq., 15, 26, 35, 42 sq., 51
sucres.....	35 sq., 40, 43, 51
sulfate de cuivre.....	38
Système des connaissances chimiques.....	36, 38, 66
tapisseries.....	60
teinture.....	26, 60 sq.
teintures.....	60
Thenard.....	38, 40 sqq., 55, 67 sq.
théorie atomique.....	45
tocophérols.....	21
Traité élémentaire.....	25 sq., 40, 67
Traité élémentaire de chimie.....	25
triacylglycérols.....	21
triglycéride.....	5, 14, 19 sqq., 49 sq., 53, 55, 58, 68
Turgot.....	37
Turin.....	18
Union internationale de chimie pure et appliquée.....	13
urée.....	40, 46
van 't Hoff.....	17, 29, 69
Varrentrapp.....	53
Vauquelin.....	30 sq., 33 sq., 52
vert d'épinard.....	11
vinaigre.....	38
Wöhler.....	40, 44, 46
œuf.....	9, 15, 33, 38



Académie d'agriculture de France
18 rue de Bellechasse
75007 PARIS

Directrice de la publication : Chantal Gascuel, secrétaire perpétuelle

Coordination éditoriale : Philippe Clergeau, comité des livres

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorise, 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 droits ou ayant cause est illicite (art. L 122-4).

ISBN :

Mis en ligne juin 2026