Bulletin de la Sabix

Société des amis de la Bibliothèque et de l'Histoire de
l'École polytechnique

50 | 2012

Chimie et Révolution. La chimie au lendemain des
révolutions

La contribution de Gay-Lussac dans l'émergence de la chimie organique

Sacha Tomic

Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/sabix/1050>

DOI : 10.4000/sabix.1050

ISSN : 2114-2130

Éditeur

Société des amis de la bibliothèque et de l'histoire de l'École polytechnique (SABIX)

Édition imprimée

Date de publication : 15 mai 2012

Pagination : 61-78

ISSN : 0989-30-59

Référence électronique

Sacha Tomic, « La contribution de Gay-Lussac dans l'émergence de la chimie organique », *Bulletin de la Sabix* [En ligne], 50 | 2012, mis en ligne le 15 mai 2014, consulté le 10 décembre 2020. URL : <http://journals.openedition.org/sabix/1050> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/sabix.1050>

La contribution de Gay-Lussac dans l'émergence de la chimie organique

Sacha TOMIC

1 - Introduction

La naissance de la chimie organique autour de 1830 est un événement qui marque l'histoire de la chimie. La création de cette spécialité est le fruit des travaux d'une communauté d'analystes qui se constitue au cours du XVIII^e siècle et qui est essentiellement composée de pharmaciens et de chimistes mais également de médecins, d'industriels et de naturalistes qui échangent méthodes et pratiques en matière d'analyse végétale et animale¹. En tant qu'un des plus grands chimistes analystes de son temps, Gay-Lussac occupe une place centrale dans ce réseau².

L'intérêt de Gay-Lussac pour la chimie organique a été signalée par l'un de ses tout premiers élèves. Lors d'un discours commémoratif prononcé en 1867, le chimiste allemand Justus Liebig (1803-1873) rapporte les paroles de son maître « il faut vous occuper, me disait-il, tous les jours de la chimie organique, voilà ce qui nous manque³ ». On connaît la réussite du chimiste allemand dans ce domaine.

Avec près d'un article sur cinq, la chimie végétale et animale occupe une place non négligeable de l'activité scientifique de Gay-Lussac⁴. Ses travaux dans ce domaine, essentiellement publiés entre 1810 et 1821, se situent précisément à la fin de la période de gestation de la chimie organique. Les historiens ont surtout retenu quatre contributions: la mise au point d'un système d'analyse élémentaire, la découverte de l'isomérisie, l'expression volumétrique de la composition de l'éther et son travail sur l'acide prussique. C'est surtout ce dernier travail qui a été commenté⁵. Pour son plus récent biographe, les « deux plus brillantes publications » de Gay-Lussac concernent son mémoire sur la combinaison des volumes de 1809 et celui sur le cyanogène publié en 1815⁶. François Arago (1786-1853) qualifie ce mémoire d'un « des plus beaux dont la science puisse s'honorer⁷ ». Le polytechnicien et chimiste Georges Lemoine (1841-1922) rappelle que « beaucoup de savants l'ont regardé comme son chef-d'œuvre, au même titre que l'œuvre capitale d'un grand artiste⁸ ». Pour le rédacteur du *Magasin Pittoresque*, le travail sur ce « redoutable poison » était connu « même dans le public⁹ ». Le chimiste Edmond Fremy (1814-1894), qui fut l'élève, le préparateur et le suppléant de Gay-Lussac au *Muséum* affirme qu'il « ne connaît pas, en chimie, de découverte plus importante que celle du cyanogène » et il n'hésite pas à affirmer que par cette découverte « Gay-Lussac est le fondateur principal de la chimie organique¹⁰ » !

¹ S. Tomic, *Aux origines de la chimie organique. Méthodes et pratiques des pharmaciens et des chimistes (1785-1835)*, Rennes, PUR-Collection Carnot, 2010.

² Szabadvári F., "Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850) and analytical Chemistry", *Talanta*, vol. 25, 1978, 611-617.

³ Cité par Blanc Edmond, Delhoume Léon, *La vie émouvante et noble de Gay-Lussac*, Paris: Gauthiers-Villars, 1950, p. 245 et par Crosland Maurice, *Gay-Lussac, savant et bourgeois*, Paris: Belin, 1991, traduit par J.-P. Bardos de *Gay-Lussac, Scientist and Bourgeois*, Cambridge University Press, 1978, 374.

⁴ Une analyse bibliographique montre qu'il a publié environ 20% d'articles ou a rédigé des rapports relatifs à la chimie organique (environ trente articles sur 150 publications personnelles + une trentaine en collaboration – voir annexe). La première observation de Gay-Lussac dans ce domaine date de 1805 et concerne la chimie animale. Lors de son séjour à Rome, Gay-Lussac entre en contact avec le médecin chimiste italien Domenico Lino Morrichini (1773-1836) et fait part à Berthollet de sa découverte de l'acide fluorique dans l'émail des dents, L. J. Gay-Lussac, "Lettre à M. Berthollet sur la présence de l'acide fluorique dans les substances animales, et sur la pierre alumineuse de la Tolfa", *Annales de chimie*, 1805, 55, 258-275.

⁵ Blanc Edmond, Delhomme Léon, *La vie émouvante et noble de Gay-Lussac*, Paris: Gauthiers-Villars, 1950, 112; Jolibois Pierre, "Cérémonie commémorative du centième anniversaire de la mort de Gay-Lussac", *Académie des Sciences, Notices et Discours*, Paris-Gauthiers-Villars, 1957, t. 3, 99-106.

⁶ F. Arago, "Notice biographique sur Gay-Lussac, lu à l'Académie des sciences le 20 septembre 1852", in J.-A. Barral (dir.), *Œuvres complètes de François Arago*, Paris, Gide et J. Baudry, t. 3, 1855, p. 43.

⁷ F. Arago, "Notice biographique sur Gay-Lussac, lu à l'Académie des sciences le 20 septembre 1852", in J.-A. Barral (dir.), *Œuvres complètes de François Arago*, Paris, Gide et J. Baudry, t. 3, 1855, p. 43.

⁸ G. Lemoine, "Gay-Lussac", in *École Polytechnique. Livre du centenaire, 1794-1894*, Paris, Gauthier-Villars, 1894, t. 1, p. 340.

⁹ Édouard Charton (dir.), "Gay-Lussac", *Le magasin pittoresque*, t. 18, 1850, 311.

¹⁰ E. Fremy, *Encyclopédie chimie*, t. 1, 1^{er} fascicule, Paris, Dunod, 1882, p. 66-67, c'est l'auteur qui souligne.

Au-delà du légitime hommage rendu par ses contemporains et quelle que soit l'importance des travaux qui viennent d'être cités, cette sélection ne donne qu'une vision partielle de l'activité du chimiste dans l'étude des corps organiques. L'histoire montre que, dans ce domaine, il n'y a pas de travaux "mineurs". La chimie organique est une œuvre collective qui s'appuie en grande partie sur les multiples résultats patiemment accumulés auprès de la paille et qui s'inscrit dans un réseau transnational.

Pour évaluer cette dimension de l'œuvre de Gay-Lussac, j'aborderai successivement ses diverses contributions dans l'ordre qui a conduit à l'émergence de la chimie organique : analyse immédiate puis analyse élémentaire pour finir avec la fusion de ces deux domaines.

2 - Perfectionner les outils et raisonner l'analyse immédiate

2.1. Solvants et instrumentation

Si la physionomie générale du laboratoire évolue peu sur la période 1780-1830, quelques innovations vont venir enrichir la palette des analystes. Gay-Lussac est un homme de laboratoire qui a le souci de simplifier les tâches quotidiennes. L'une d'entre elles consiste à travailler le verre à partir de cylindres creux de différents diamètres à l'aide d'une lampe à émailleur à huile. Gay-Lussac propose un modèle simplifié fonctionnant à l'alcool (figure 1). Le dispositif à l'avantage de limiter l'odeur désagréable et de garantir une mèche régulière¹¹. Le chimiste n'hésite pas à simplifier des montages proposés par d'autres collègues, comme celui sur la récupération de petites quantités d'huiles volatiles proposé par le pharmacie-chimiste Alphonse Chevallier (1793-1879), qui s'est lui-même inspiré du prototype de son collègue Hippolyte Amblard (figure 2).

Figure 1 – Lampe à souffler le verre (1831)

Fig.1

Fig.2

Fig.3

Fig.4

Figure 2 – Récipients pour la séparation d'essences légères (1825-1826)

(Fig. 1: récipient Florentin traditionnel; Fig. 2: modèle Amblard; Fig. 3: modèle Chevallier; Fig. 4: modèle Gay-Lussac)

¹¹ L. J. Gay-Lussac, "Description de quelques instruments", *ACP*, 51, 1831, p. 435-441.

Comme de nombreux analystes, Gay-Lussac est peu bavard dans ses leçons sur les méthodes de l'analyse immédiate, celle qui permet d'isoler les « principes immédiats », nos molécules organiques. Dans la 22^e leçon de ses cours de chimie, il écrit : « la chimie ne donne pas de principes assez généraux sur cet objet pour pouvoir être exposés ici ; nous nous bornerons à exposer les procédés particuliers à chacune d'elles à mesure que nous les passerons en revue¹² ». En revanche, en tant que rédacteur des *Annales de chimie et de physique* à partir de 1815, il suit de près les innovations techniques des constructeurs d'appareils et autres « amateurs éclairés par les sciences-physiques » avec lesquels il n'hésite pas à s'associer.

Les solvants d'extraction en particulier sont les outils fondamentaux de l'analyse immédiate. Parmi les trois solvants de choix (eau, alcool, éther), Gay-Lussac, comme tous les analystes de son temps, s'est particulièrement intéressé à l'alcool¹³. C'est un enjeu commercial important pour l'État et en particulier pour les départements du sud de la France. Le contrôle de la pureté de l'alcool est crucial aussi bien pour les commerçants lors de leurs transactions qu'aux pharmaciens et aux chimistes pour leurs opérations de laboratoire. En 1801, le distillateur montpelliérain Édouard-Jean Adam (1768-1807) propose son célèbre appareil à distiller en continu que ses contemporains vont qualifier de « révolutionnaire ». Il permet en effet d'obtenir de l'alcool à différents degrés et sans l'odeur empyreumatique (ou de brûlé) des procédés traditionnels. Il est très vite perfectionné par le médecin chimiste montpelliérain Antoine Simon Jude Duportal (1777-1861), améliorations qu'approuve Gay-Lussac dans un rapport de l'Académie des sciences¹⁴. Si la distillation est désormais en grande partie maîtrisée, Gay-Lussac doit réfuter l'idée propagée par le physicien et agronome italien Giovanni Valentino Mattia Fabbioni (1752-1822) selon laquelle l'alcool ne provient pas de la fermentation, mais qu'il se forme pendant la distillation du vin¹⁵. Les doutes dissipés, Gay-Lussac se penche sur la question du rendement de la fermentation afin de déterminer la quantité d'alcool entraînée par l'acide carbonique lors de la fermentation du moût de raisin¹⁶. Le chimiste critique l'appareil d'une certaine Mademoiselle Gervais qui est censé augmenter la qualité et le degré alcoolique des vins. Il démontre, moyennant quelques hypothèses, que cet appareil ne mérite pas l'avis positif émis par la chambre consultative de l'Hérault fondé sur des « on dit » selon Gay-Lussac. Le chimiste analyse scrupuleusement divers paramètres en s'appuyant sur un travail antérieur dans lequel il avait déterminé les relations en proportions de la fermentation alcoolique (100 g de sucre se convertissent en 51,34 g d'alcool absolu et 48,66 g d'eau) et propose son propre appareil¹⁷.

Malgré ces innovations, l'alcool récupéré n'est jamais pur : il contient encore un peu d'eau. Pour les besoins de l'analyse immédiate, il est important de fixer le degré de pureté de l'alcool car son mélange avec l'eau modifie la sélectivité de son action dissolvante. Les analystes éliminent l'eau grâce à une distillation de l'alcool sur sels hygroscopiques. Gay-Lussac recommande la chaux ou la baryte qui constituent à ses yeux « la preuve la plus directe et la plus concluante que l'on puisse donner en ce moment de la pureté de l'alcool »¹⁸. Se pose ainsi le problème récurrent du contrôle de la qualité de l'alcool « absolu » et de celui du commerce. Alors que les analystes évaluaient grossièrement le degré alcoolique grâce à l'aréomètre de Baumé et à sa variante, celui de Cartier, Gay-Lussac s'associe avec le constructeur et « calculateur » Charles-Félix Collardeau-Duheau (1796-1869) pour mettre au point et commercialiser son fameux « alcoomètre centésimal » et publie une instruction en 1824 (figure 3)¹⁹.

¹² L. J. Gay-Lussac, *Cours de chimie*, op. cit., 2, leçon 22, p. 24.

¹³ À propos de la clarification du vin, il critique une poudre rouge à base de sang qu'il juge « fort cher relativement à sa valeur » et propose à la place de l'albumine du blanc d'œuf, L. J. Gay-Lussac, « Sur la clarification du vin », *Annales de chimie et de physique*, 1822, 21, 335.

¹⁴ C.-L. Berthollet, L. J. Gay-Lussac, J. A. Chaptal, « Rapports sur le Mémoire de M. Duportal sur les Appareils distillatoires », *PVAS*, séance du 25 février 1811, p. 451-452.

¹⁵ L. J. Gay-Lussac, « Expériences pour déterminer si l'alcool existe tout formé dans le vin », *MPCSA*, 3, 1813, p. 105.

¹⁶ L. J. Gay-Lussac, « Observations sur cette question : Quelle est la quantité d'alcool qui est entraînée par l'acide carbonique pendant la fermentation du moût de raisin ? », *Annales de chimie et de physique*, 1821, 18, 380-389.

¹⁷ L. J. Gay-Lussac, « Lettre à M. Clément sur l'analyse de l'alcool et de l'éther sulfurique et sur les produits de la fermentation », *Annales de chimie*, 1815, 95, 318. L'approche de Gay-Lussac des phénomènes de fermentation et de respiration est conforme à celle de ses prédécesseurs, Lavoisier ou Fourcroy, qui voyaient dans le fonctionnement des organismes une suite de réactions chimiques plus ou moins complexes. Il s'inspire du procédé de conservation des aliments proposé par le confiseur Nicolas Appert (1749-1841), qu'il explique en attribuant la fermentation à l'action de l'oxygène., L. J. Gay-Lussac, « Mémoire sur la fermentation, lu à l'Institut le 3 décembre 1810 (extraits) », *Annales de chimie*, 1810, 76, 245-260. Boudet Jean-Pierre oncle, « Extrait d'un mémoire sur la fermentation par M. Gay-Lussac », *Bulletin de Pharmacie*, 1811, 3, 349-354. Vers la fin de sa vie, il s'associe avec Magendie assisté du jeune Claude Bernard pour apporter sa contribution au phénomène de la respiration, « Observations critiques sur la théorie des phénomènes chimiques de la respiration », *Annales de chimie et de physique*, 1844, 11, 5-16; M. Crosland, *Gay-Lussac, savant et bourgeois*, op. cit., 200-203.

¹⁸ L. J. Gay-Lussac, « Expériences pour déterminer si l'alcool existe tout formé dans le vin », *MPCSA*, 3, 1813, p. 105.

¹⁹ L'instrument, divisé en cent parties égales (eau pure : 0 ; alcool pur : 100), est toujours d'actualité (1 °GL = 1 % vol.), L. J. Gay-Lussac, *Instruction pour l'usage de l'alcoomètre centésimal et des tables qui l'accompagnent*, Paris, Collardeau, 1824; Maurice Crosland, *Gay-Lussac, savant et bourgeois*, op. cit., 271-274.

Gay-Lussac prend en compte tous les phénomènes qui peuvent faire varier la mesure (température, phénomènes de dilatation et de contraction du mélange eau-alcool, mouillage) et publie des tables précises qui permettent de calculer la « force réelle », c'est-à-dire la teneur en alcool de la solution. Il se sert de l'alcool absolu obtenu par sa méthode pour étalonner son alcoomètre et fixe la valeur à 100 ° GL (43,8 ° Cartier) à 15 °C. Destiné avant tout aux commerçants, l'alcoomètre de Gay-Lussac ne pénètre que progressivement le laboratoire, mais les publications où apparaît le « degré centésimal » vont très vite se généraliser à partir des années 1830.

Figure 3 – Alcoomètre centésimal et table de conversion (1824)

Le degré alcoolique s'ajoute à la liste de données physico-chimiques que les analystes ne cessent d'étendre. Gay-Lussac déterminera celles de l'éther, solvant de plus en plus sollicité par les analystes (densité = 0,7192 à 25 °C; point d'ébullition = 35,66 °C sous la pression atmosphérique). La conservation de ce précieux liquide pose quelques problèmes. Alors qu'il s'apprête à effectuer des recherches sur les densités de vapeurs, Gay-Lussac s'aperçoit que son éther, vieux de 2 ans, n'est pas pur. Il détecte la présence d'acide acétique et d'une huile étherée de composition inconnue. Ne disposant pas d'un stock suffisant, il « recommande cet objet de recherches aux pharmaciens éclairés qui sont à même de préparer et de conserver de grandes quantités d'éther sulfurique²⁰ ». Les « pharmaciens éclairés », c'est-à-dire les pharmaciens-chimistes, seront nombreux à contribuer à élucider le mécanisme de la formation de l'éther, surtout dans le but d'améliorer les performances de leurs procédés. Le pharmacien Louis-Antoine Planche (1776-1840) fait partie de cette catégorie et Gay-Lussac, ayant pris connaissance d'une note du pharmacien insérée dans sa traduction de la *Pharmacopée* du médecin chimiste italien Luigi Brugnatelli (1761-1818), rappelle que la décomposition de l'éther ne produit pas que de l'acide acétique²¹. Gay-Lussac en profite pour examiner la dilatation de l'éther, de l'eau, de l'alcool et du sulfure de carbone et indique les températures d'ébullition des quatre liquides (eau: 100 °,00; alcool: 78,41; sulfure de carbone: 46,60; éther: 35,66)²².

La connaissance des températures de changement d'état est cruciale en analyse immédiate car ces données font office de critères d'identification d'une espèce chimique. Elles contribuent en outre à la standardisation des protocoles d'extraction et permettent de préciser des points jusque-là laissés à l'appréciation de l'expérimentateur (comme la détermination du terme d'une opération ou d'une réaction par exemple). La température, la pression et la densité sont des grandeurs utilisées pour mesurer le volume des gaz mais également pour reconnaître un principe immédiat. Gay-Lussac a proposé divers instruments tels son baromètre portatif ou son thermomètre²³. Ses courbes de solubilité de différents sels dans l'eau inspireront d'autres analystes à étudier et à quantifier la solubilité de différents principes immédiats dans les solutions alcooliques et dans l'éther²⁴.

²⁰ L. J. Gay-Lussac, "Sur l'altération qu'éprouve l'acide sulfurique", *Annales de chimie et de physique*, 1816, 2, 101.

²¹ L. J. Gay-Lussac, "Observations sur l'éther sulfurique", *Annales de chimie et de physique*, 1816, 2, 213-214.

²² L. J. Gay-Lussac, "Note sur la dilatation des liquides", *Annales de chimie et de physique*, 1816, 2, 130-136.

²³ L. J. Gay-Lussac, "Description d'un nouveau baromètre portatif", *Annales de chimie et de physique*, 1816, 1, 113-119; "Description d'un thermomètre propre à indiquer des maxima et des minima de température", *Annales de chimie et de physique*, 1816, 3, 90-91; "Description de quelques instruments", *Annales de chimie et de physique*, 1831, 51, 435-441.

²⁴ L. J. Gay-Lussac, "Premier mémoire sur la dissolubilité des sels dans l'eau", *ACP*, 11, 1819, p. 296-315; S. Robinet, "Recherches sur l'emploi des sels neutres dans les analyses végétales, et application de ce procédé à l'opium", *ACP*, 30, 1825, p. 209; Maurice Crosland, *Gay-Lussac, savant et bourgeois*, op. cit., 99.

2.2. Réactifs et acides organiques

Outre les données physico-chimiques, encore rares à l'époque, les analystes font largement usage de réactifs pour sonder la matière. Ces outils fournissent de précieux indices sur la composition et la pureté d'un principe immédiat. Il constituent véritablement la « clef de voûte » de la chimie analytique. Leur liste ne cesse de s'allonger et les résultats accumulés sont rassemblés et publiés en 1822 sous forme d'un traité par un « chimiste-manufacturier » Anselme Payen (1795-1871) et le pharmacien-chimiste Jean Baptiste Alphonse Chevallier (1793-1879)²⁵.

Parmi la palette de réactifs disponibles (figure 4), Gay-Lussac s'est intéressé à trois d'entre eux (eau, potasse, chaleur) et a particulièrement étudié les acides organiques et leurs sels dont certains sont très répandus dans les végétaux (acides acétique, malique et oxalique)²⁶. Dans l'un de ses cours à la *Faculté des sciences*, Gay-Lussac, rappellera le rôle fondamental de ces composés en chimie : ils « ont servi à établir la théorie des proportions, devinée par M. Dalton. [...] Le docteur Wollaston a appuyé sur les faits que présentent les oxalates, les principes de la théorie des proportions, que M. Dalton n'avait basé que sur des spéculations²⁷ ».

Figure 4 – Flacons ayant appartenu à Gay-Lussac (Cours historiques de l'École polytechnique, éd. Ellipses)

Gay-Lussac s'est penché à plusieurs reprises sur l'action de la potasse. Mais il ne s'est pas uniquement contenté d'annoncer tel ou tel effet, il a le plus souvent fourni des explications. Il interprète ainsi le produit de l'action de la potasse sur les matières animales à partir de son travail sur le cyanogène et constate par ailleurs qu'un grand nombre de substances végétales se transforment en acide oxalique²⁸.

L'eau présente une action singulière sur certains tissus humains. Gay-Lussac s'intéresse aux corps gras et s'appuie sur les résultats de son collègue du *Muséum*, Michel-Eugène Chevreul (1786-1889), pour répondre à la question d'un abonné des *Annales de chimie*.

²⁵ A. Chevallier, A. Payen, *Traité élémentaire des réactifs, leurs préparations, leurs emplois spéciaux et leurs applications à l'analyse*, Paris, Bachelier (1822), Thomine (1825, 1830).

²⁶ Première série de composés organiques en grande partie découverts par l'apothicaire-chimiste suédois Carl Wilhelm Scheele (1742-1786) dans les années 1780, leur nombre, d'une dizaine au temps de Lavoisier, quadruple vers 1835.

²⁷ L. J. Gay-Lussac, *Cours de chimie*, Paris, Ellipses, 1999 (1^{ère} éd. 1828), 2, leçon 24, p. 9-10. Maurice Crosland, *Gay-Lussac, savant et bourgeois*, op. cit., 197.

²⁸ L. J. Gay-Lussac, "Sur la nature du produit que l'on obtient en calcinant la potasse avec une substance animale", *Annales de chimie et de physique*, 1818, 8, 440-441; id., *Journal de pharmacie*, 4, 1820, 149-151; id., "Action de la potasse sur les matières organiques", *Annales de chimie et de physique*, 1829, 41, 398-402.

Ce dernier veut connaître l'origine de la graisse qui se forme lorsque la fibre musculaire est exposée à une action prolongée de l'eau. Après quelques essais et en accord avec Chevreul, Gay-Lussac en conclut que « la graisse que laissent les substances animales en se décomposant dans l'eau ne provient point de la fibrine, elle en est seulement séparée par la putréfaction que cette dernière éprouve et qui la rend soluble dans l'eau²⁹ ». L'eau joue ainsi le rôle de réactif vis-à-vis de la fibrine et de solvant pour la graisse.

L'effet de la chaleur sur les substances organiques a occupé Gay-Lussac durant toute sa carrière. « L'action de la chaleur est celle qui offre le plus d'analogie dans les résultats », enseigne-t-il à ses élèves³⁰. En novembre 1809, il fait part à la *Société d'Arcueil* d'un fait « très singulier » : certaines substances organiques se volatilisent (acide acétique, alcool, éther, huiles volatiles) tandis que d'autres se décomposent en partie ou complètement (indigo, acide oxalique, cire, huiles fixes). Pour éviter la décomposition, Gay-Lussac recommande de chauffer les corps à une température inférieure à leur décomposition tout en faisant passer « un courant d'un fluide élastique qui n'exerce dans cette circonstance aucune action chimique³¹ ». Selon Gay-Lussac, les corps se volatilisent lorsque leurs vapeurs atteignent une « force élastique » au moins égale à celle de l'atmosphère, ce que facilite un courant de gaz³². À l'occasion de l'examen de l'acétate d'alumine (acétate d'aluminium), Gay-Lussac constate que lorsque l'on chauffe une solution de ce sel, ce dernier se décompose et laisse précipiter une grande quantité d'« alumine³³ ». La réaction est réversible car au refroidissement la solution redevient à nouveau transparente. Gay-Lussac part d'une observation et en tire des conséquences pratiques (amélioration de la préparation du mordant pour les fabricants de toiles peintes) ainsi que pour la « théorie générale de la chimie » (c'est un exemple où la solubilité décroît avec la température). Sept ans plus tard, Gay-Lussac revient sur le sujet. L'échantillon d'acétate d'alumine ne produit plus les mêmes effets. Le chimiste attribue cette différence de comportement à la pureté du sel acide. Le nouvel acétate a été préparé par une autre méthode, mais Gay-Lussac n'arrivant pas à expliquer le phénomène, note qu'il n'est « pas facile de donner une explication de la précipitation de l'alumine, et je n'en vois aucune assez satisfaisante pour la présenter³⁴ ». Une autre difficulté et non des moindres concerne l'identification des acides organiques aux propriétés assez proches. Alors qu'il examine l'acide malique, Gay-Lussac note une confusion possible avec l'acide citrique lorsqu'il est soumis à certains réactifs (nitrate de plomb et nitrate d'argent). Il attribue la confusion au fait que l'acide malique « n'avait pas encore été obtenu à l'état de pureté suffisante ». Il montre que c'est le sel à base de chaux qui précipite avec les réactifs et propose un nouveau protocole pour obtenir de l'acide malique pur à partir du suc de joubarbe. Sa démarche n'a rien d'empirique comme c'est souvent le cas en analyse immédiate. Le chimiste explique les observations grâce à la « loi des doubles affinités » lorsqu'il écrit : « l'acide malique n'a précipité le nitrate de plomb que parce qu'il était combiné avec la chaux, laquelle a saturé l'acide de la portion de nitrate décomposée³⁵ ». Gay-Lussac revient au début des années 1830 sur l'action de la chaleur³⁶. Il est surpris de la facilité de décomposition de l'acide oxalique alors qu'il est considéré « comme un des plus stables ». Il examine les gaz dégagés en comparant les proportions volumiques des produits (acide carbonique et oxyde de carbone) avec la décomposition provoquée par l'acide sulfurique et découvre un autre produit de dégradation, l'acide formique. Il en profite pour proposer un nouveau nom à l'acide oxalique qu'il rebaptise acide hypocarbonique, mais prudent, il ajoute « qu'il convient peut-être d'ajourner encore ce changement de nomenclature ». Ce nom est effectivement resté sans lendemain, comme d'autres noms « rationnels » proposés pour divers composés.

La pratique de la chimie n'étant pas sans danger, Gay-Lussac, comme d'autres chimistes, « travaillait dur » et a été victime de plusieurs accidents de laboratoire, ce qui, à l'époque, était souvent synonyme de « chimiste chevronné ». Pour Arago, c'est le signe « qu'il alla souvent au feu et n'hésita jamais à examiner les choses de très près, lors même qu'il y avait un danger à le faire³⁷ ». C'est au cours de son dernier travail en chimie organique réalisé avec François Larivière, son aide-naturaliste au *Muséum*, qu'il fut victime de son ultime accident en examinant les gaz produits par la décomposition thermique des huiles essentielles³⁸.

²⁹ L. J. Gay-Lussac, « Sur le changement de la fibre musculaire en graisse », *Annales de chimie et de physique*, 1817, 4, 72.

³⁰ L. J. Gay-Lussac, *Cours de chimie*, op. cit., 2, leçon 23, p. 7.

³¹ L. J. Gay-Lussac, « Note sur la décomposition de quelques substances végétales ou animales soumises à l'action de la chaleur », *Annales de chimie*, mai 1810, 74, 192.

³² L. J. Gay-Lussac, « Sur la vaporisation des corps », *Mémoires de Physique et de Chimie de la Société d'Arcueil*, t. 1, 1807, 204-214.

³³ L. J. Gay-Lussac, « Observations sur l'acétate d'alumine », *Annales de chimie*, mai 1810, 74, 193-198. Le sel se décompose en acide acétique et en hydroxyde d'aluminium.

³⁴ L. J. Gay-Lussac, « Sur la décomposition de l'acétate d'alumine par la chaleur », *Annales de chimie et de physique*, 1817, 6, 203.

³⁵ L. J. Gay-Lussac, « Note sur l'acide malique », *Annales de chimie et de physique*, 1817, 6, 332.

³⁶ L. J. Gay-Lussac, « Sur l'acide oxalique, lu à l'Académie, le 5 avril 1831 », *Annales de chimie et de physique*, 1831, 46, 218-220.

³⁷ F. Arago, « Notice biographique sur Gay-Lussac, lu à l'Académie des sciences le 20 septembre 1852 », in J.-A. Barral (dir.), *Œuvres complètes de François Arago*, Paris, Gide et J. Baudry, t. 3, 1855, p. 56; Georges Bram, Nguyễn Trong Anh, « Gay-Lussac et ses accidents. Chimie, la science de tous les dangers? », *L'Actualité chimique*, octobre-novembre 1993, 85-86.

³⁸ L. J. Gay-Lussac, Larivière, « Sur la décomposition des huiles essentielles par la chaleur », *Comptes Rendus des Séances de l'Académie des sciences*, 1841, 12, 125.

3 - Perfectionner et interpréter l'analyse élémentaire

3.1. Une approche physique de l'éthérification

L'éther n'est pas seulement un solvant de choix pour effectuer des extractions, c'est également un principe immédiat dont la composition et la formation sont l'objet de nombreuses spéculations. La théorie de sa formation ou éthérification n'est toujours pas clairement établie malgré de nombreux travaux. Celle qui est admise par une majorité d'analystes a été proposée en 1797 par le médecin chimiste Antoine François Fourcroy (1755-1809) et le pharmacien-chimiste Nicolas Louis Vauquelin (1763-1829). L'on sait qu'au cours de la formation de l'éther, produit de la réaction de l'alcool avec l'acide sulfurique, il se forme également de l'eau et que si la réaction est poussée un peu trop loin, on obtient divers produits secondaires dont le gaz oléfiant (notre éthylène), découvert en 1794 par les chimistes Hollandais.

Figure 5 – Appareil pour la mesure des densités de vapeurs
(Fig. 2^{bis} : ampoule en verre qui contient le liquide dont on veut mesurer la densité de vapeur)

Fidèle à sa méthode volumétrique qu'il juge plus précise que la pesée³⁹, Gay-Lussac va étendre l'analyse volumétrique aux corps organiques. Il annonce son travail dans une courte note où il indique les densités de vapeurs de l'eau, de l'alcool et de l'éther grâce à un appareil de son invention (figure 5)⁴⁰. Il publie un second travail sous forme d'une lettre à son ami physico-chimiste Nicolas Clément (1779-1841)⁴¹. Gay-Lussac reprend le travail du botaniste et chimiste Suisse Nicolas-Théodore de Saussure (1767-1845) qui avait proposé une composition centésimale exprimée en poids : l'éther est représenté par 25 parties d'eau pour 100 de gaz oléfiant. Gay-Lussac réduit ses valeurs en volume à partir des densités de vapeurs mais ne trouve pas de « rapports simples » entre les volumes. Guidé par la théorie plutôt que pas les résultats de Saussure (qu'il suppose erroné), il en déduit que la vapeur d'éther sulfurique est composée de 2 volumes de gaz oléfiant et 1 volume de vapeur d'eau. L'alcool étant représenté par des volumes identiques en eau et gaz oléfiant, Gay-Lussac raisonnant en proportion, double les volumes ce qui lui permet de proposer la réaction de formation de l'éther :

Alcool (2 vol. gaz oléfiant + 2 vol. eau) = éther (2 vol. gaz oléfiant + 1 vol. eau) + eau (1 vol. eau)

Dans la théorie de Fourcroy et Vauquelin, l'acide sulfurique n'est pas décomposé et son action se borne à faciliter la perte d'eau de l'alcool qui se transforme en éther⁴². L'explication de Gay-Lussac est conforme à cette interprétation.

³⁹ Maurice Crosland, *Gay-Lussac, savant et bourgeois*, op. cit., 142.

⁴⁰ L. J. Gay-Lussac, "Annonce d'un travail sur les densités des vapeurs de divers liquides", *Annales de chimie*, 1811, 80, 218-219. Maurice Crosland donne une description littéraire rapporté par Dulong, *Gay-Lussac, savant et bourgeois*, op. cit., 156-158.

⁴¹ L. J. Gay-Lussac, "Lettre à M. Clément sur l'analyse de l'alcool et de l'éther sulfurique et sur les produits de la fermentation", *Annales de chimie*, 1815, 95, 311-318.

⁴² A. F. Fourcroy, N. L. Vauquelin, "De l'action spontanée de l'acide sulfurique concentré, sur les substances végétales et animales", *AC*, 23, 1797, p. 189.

Quelques années plus tôt, le pharmacien nantais Hyacinthe Dabit aîné (1764-1808) avait remis en cause cette vision. Selon lui, l'acide se décompose et cède une partie de son oxygène à l'alcool et se décompose en un acide intermédiaire entre l'acide sulfurique et sulfureux⁴³. D'abord rejetées par les académiciens, les idées du pharmacien sont réhabilitées en 1820, en particulier par le pharmacien-chimiste allemand Henri-Auguste Vogel (1778-1867)⁴⁴. Gay-Lussac reprend le travail de Vogel et confirme ses résultats :

*La théorie de l'éthérification, telle qu'elle a été donnée par Fourcroy et Vauquelin, ne peut plus être admise aujourd'hui. L'acide sulfurique cède réellement de l'oxygène à l'alcool, et le résultat de l'éthérification paraît être de l'éther, de l'acide hyposulfurique, et une matière végétale de nature huileuse qui a la plus grande analogie avec l'huile douce de vin*⁴⁵

Gay-Lussac proposera un nouveau procédé à la suite de cette nouvelle interprétation. Il constate qu'en ajoutant de l'acide chromique ou du peroxyde de manganèse, il se forme facilement de l'éther. Afin d'expliquer que l'acide sulfurique reste intact, Gay-Lussac suppose que l'acide sulfurique cède son oxygène à l'alcool mais le récupère facilement à cause de sa grande affinité avec les oxydes qui se transforment à leur tour⁴⁶. Ce sont finalement Jean-Baptiste Dumas (1800-1884) et le pharmacien-chimiste Félix-Polydore Boullay fils (1806-1835) qui, en 1827, proposeront une première explication satisfaisante de l'éthérification en combinant les volumes de Gay-Lussac avec les résultats de l'analyse élémentaire par voie chimique⁴⁷. Gay-Lussac écrira avec Dumas un rapport sur un mémoire du chimiste Jules Pelouze (1807-1867) sur un sujet qui est loin d'être épuisé puisqu'il occupe « en ce moment presque tous les chimistes de l'Europe » écrivent les rapporteurs du mémoire⁴⁸.

3.2. Le prototype de 1810, la classification et l'isomérisie

En parallèle à la méthode physique, Gay-Lussac va développer une méthode chimique d'analyse fondée sur la combustion. L'histoire de l'évolution de ce type d'analyse est bien connue⁴⁹. C'est Lavoisier qui, le premier, brûle une quantité donnée de substance organique (alcool, huile) grâce à l'oxygène et analyse les produits de la combustion. Connaissant les masses des produits et des réactifs, il en déduit la nature et les proportions en éléments de la substance analysée. Il invente ainsi l'analyse organique élémentaire et propose de classer ces types de substances en fonction de leur radical, notion fondamentale de la chimie organique. Le médecin chimiste Claude-Louis Berthollet (1748-1822), alors au faite de sa gloire et dirigeant avec le physicien Laplace (1749-1827) la célèbre société d'Arcueil, analyse quelques composés mais préfère la calcination dans un tube en porcelaine plutôt que la combustion⁵⁰. Il ne tire cependant aucune conséquence théorique de ses expériences. Ce sont deux de ses élèves, également membre de la société, qui vont réhabiliter et perfectionner la méthode de Lavoisier⁵¹.

⁴³ H. Dabit, "Mémoire sur l'éther", *AC*, 34, 1800, p. 289 ; *id.*, "Essai contenant quelques détails sur un nouvel état de l'acide sulfurique", *AC*, 43, 1803, p. 101.

⁴⁴ H.-A. Vogel, "Recherches sur la décomposition mutuelle de l'acide sulfurique et d'alcool, suivies de l'examen d'un acide nouveau qui se forme aux dépens de ces deux liquides", *JP*, 6, janvier 1820, p. 12.

⁴⁵ L. J. Gay-Lussac, "Sur la combinaison de l'acide chromique avec l'acide sulfurique, et sur la conversion de l'alcool en éther sulfurique, par un procédé nouveau", *Annales de chimie et de physique*, 1821, 16, 102-105.

⁴⁶ L. J. Gay-Lussac, "Sur la combinaison de l'acide chromique avec l'acide sulfurique, et sur la conversion de l'alcool en éther sulfurique, par un procédé nouveau", *Annales de chimie et de physique*, 1821, 16, 102-105.

⁴⁷ J.-B. Dumas, F.-P. Boullay fils, "Mémoire sur la formation de l'éther sulfurique", *ACP*, 36, 1827, p. 294-310. Pour une étude détaillée, voir U. Klein, *Experiments, Models, Paper Tools. Cultures of Organic Chemistry in the Nineteenth Century*, Stanford, Stanford University Press, 2003 ; U. Klein, L. Wolfgang, *Materials in Eighteenth-Century Science: A Historical Ontology*, Cambridge, MIT Press, 2007.

⁴⁸ L. J. Gay-Lussac, J.-B. Dumas, "Rapport fait à l'Académie des sciences sur un mémoire de M. Pelouze, intitulé : de l'action mutuelle de l'alcool et de l'acide phosphorique", *Journal de Pharmacie et des sciences accessoires*, 1833, 19, 166-173.

⁴⁹ A. J. Rocke, "Organic Analysis in Comparative Perspective: Liebig, Dumas, and Berzelius, 1811-1837", in F. L. Holmes, T. H. Levere (éds), *Instruments and Experimentation in the history of Chemistry*, Cambridge, MIT Press, 2000, p. 273-310.

⁵⁰ C.-L. Berthollet, "Considérations sur l'analyse végétale et l'analyse animale", *MPCSA*, 1, 1806, p. 61-64.

⁵¹ Maurice Crosland, *Gay-Lussac, savant et bourgeois*, op. cit., 72-73.

Alors qu'il vient d'être nommé professeur de chimie pratique à *Polytechnique* et professeur de physique à la *Faculté des sciences*, Gay-Lussac s'associe à Louis-Jacques Thenard (1777-1857) et entreprend en 1809 l'analyse de divers composés organiques au moyen d'une technique innovante. L'innovation se situe moins sur le principe introduit par Lavoisier que dans la disposition de leur appareil (figure 6). Les chimistes publient leurs expériences dans le tome II des *Recherches physico-chimiques* (1811). Lu à l'Institut en janvier 1810, un article résumant leur méthode est publié les mois suivants dans plusieurs revues importantes de l'époque⁵².

Figure 6 – Appareil pour analyse élémentaire de Gay-Lussac et Thenard (1810)

Sur le travail accompli par les deux savants, le directeur de Polytechnique Georges Lemoine pourra écrire qu'il « faut avoir passé par la vie des laboratoires pour en sentir toute l'importance⁵³ ». Sur le plan pratique, les chimistes remplacent l'ancestrale cornue par un tube en verre à parois épaisses en position verticale qu'ils chauffent au rouge grâce à une lampe à alcool. Ils choisissent comme agent oxydant le « muriate suroxigéné de potasse » ou « chlorate de potasse », notre KClO_3 , déjà employé par Lavoisier. Le mélange agent oxydant/produit organique est introduit sous forme de boulettes à l'aide du robinet « qui fait tout le mérite de l'appareil ». Les produits d'oxydation (supposée complète), le « gaz carbonique », l'eau et l'oxygène en excès (après absorption du gaz carbonique par une solution de potasse) sont récupérés dans une cuve à mercure. Quelques dizaines de produits organiques végétaux sont ainsi analysés (figure 7) ainsi que quelques substances animales azotées⁵⁴. Cela prouve qu'à leurs yeux, il n'y avait pas de différence fondamentale entre les deux types de composés, ce que l'on peut interpréter comme une manière tacite de fusionner les deux types de chimie. Les résultats sont interprétés selon le critère de l'élémentarité introduit par Lavoisier en s'appuyant sur la composition de l'eau ($\text{O} / \text{H} = 8$) et de l'ammoniac pour les composés azotés. Ils en tirent « trois lois » qui sont en fait des critères de classification artificiels⁵⁵ et que le pharmacien-chimiste Pierre-François-Guillaume Boullay père (1777-1869) présente aussitôt à ses collègues sous forme d'un tableau dans le tout récent *Bulletin de pharmacie*. Il est intéressant de noter que le pharmacien augmente le nombre de substances par rapport à la liste des chimistes, il n'hésite pas à généraliser (huiles fixes et volatiles pour l'huile volatile et la résine de térébenthine) et ne considère que les « produits immédiats végétaux » bien qu'il inclue l'albumine⁵⁶ ! Dans ses notes personnelles, Gay-Lussac inclut indifféremment acides animaux et végétaux, nouvelle preuve de la fusion des deux règnes organiques (figure 7 : acide lactique tiré du lait et acide formique des fourmis).

⁵² L. J. Gay-Lussac, L.-J. Thenard, « Extrait d'un mémoire sur l'analyse végétale et animale », *JPCHNA*, 70, mars 1810, p. 257-266 ; *id.*, *AC*, 74, avril 1810, p. 47-64 ; *id.*, *Bibliothèque Britannique*, 1810, 43, 351-366 ; *id.*, *Journal des Mines*, 27, 1810, 393-406. Un extrait dû à Boullay père paraît dans *JP*, 2, avril 1810, p. 191.

⁵³ G. Lemoine, « Gay-Lussac », in *École Polytechnique. Livre du centenaire, 1794-1894*, Paris, Gauthier-Villars, 1894, t. 1, p. 343.

⁵⁴ La présence d'azote dans un composé est signalée par la formation d'ammoniac lors de sa distillation. Cette méthode permettra à Gay-Lussac d'apporter sa contribution en physiologie végétale en mettant en évidence la présence universelle de matières animalisées ou azotées dans les semences, L. J. Gay-Lussac, « Sur la présence de l'azote dans toutes les semences », *Annales de chimie et de physique*, 1833, 53, 110-111.

⁵⁵ Gay-Lussac et Thenard distinguent les acides organiques qui contiennent plus d'oxygène que d'hydrogène ; les substances neutres (sucre, gomme, amidon, sucre de lait, ligneux, etc.) ont des proportions égales à celle de l'eau ; et les composés qui ont une teneur en hydrogène plus élevée (huiles fixes et volatiles, résines, alcool, éther).

⁵⁶ P.-F.-G. Boullay, « [Nouvelles] des Sociétés Savantes. Institut National », *BP*, 2, avril 1810, p. 191-192.

PREMIER TABLEAU
Contenant la proportion des principes de quinze substances végétales.

Substance analysée.	Cahors contenu dans cette substance.	Origine commune dans cette substance.	Mélange contenu dans cette substance.	On en supposant que l'origine et l'hydrogène soient à l'état d'eau dans les substances végétales.		
				Carbone.	Huile.	Oxygène.
Sucre.....	42,47	50,63	6,80	42,47	57,53	0
Gomme arabique.....	42,55	50,84	6,93	42,55	57,77	0
Amidon.....	43,55	49,68	6,77	43,55	56,75	0
Sucre de lait.....						0
Chêne.....	52,55	41,78	5,69	52,55	47,47	0
Hêtre.....	51,45	43,75	5,82	51,45	48,55	0
Acide muqueux.....	53,69	62,67	3,62	33,69	30,16	36,15
Acide oxalique.....	26,57	70,69	2,74	33,57	22,87	50,56
Acide tartareux.....	24,05	69,2	6,63	24,05	55,24	20,71
Acide citrique.....	33,81	59,86	6,33	33,81	52,75	13,44
Acide acétique.....	50,32	44,15	5,63	50,32	48,91	2,87
Résine de téréb.....	75,04	13,34	10,72	75,04	15,16	8,90
Copale.....	76,81	10,61	12,58	76,81	12,05	11,14
Cire.....	81,79	5,54	12,67	81,79	6,30	11,91
Huile d'olive.....	77,21	9,43	13,36	77,21	10,71	12,08

Figure 7 – Classification des substances végétales par Gay-Lussac et Thenard (1810)

La connaissance de la composition élémentaire de quelques composés organiques permet à Gay-Lussac de noter, à l'occasion de son article sur l'iode, que « la composition de l'acide acétique ne diffère pas sensiblement de celle de la matière ligneuse [cellulose] qui ne jouit en aucune manière des propriétés acides. Voilà donc deux corps composés de carbone, d'oxygène et d'hydrogène, en mêmes proportions, dont les propriétés sont éminemment différentes⁵⁷ ». Le nom d'isomérisie sera donné par Berzelius en 1830 mais c'est Gay-Lussac « qui établit l'existence du phénomène⁵⁸ ».

Sur le plan pratique, les défauts de l'appareil vont très vite apparaître. Thenard aura beau présenter le dispositif jusqu'à la dernière édition de son *Traité*, plusieurs inconvénients dissuadèrent les analystes à poursuivre dans cette voie (complexité et minutie dans la préparation des boulettes, méthode limitée aux composés non volatils, explosions dues à une combustion trop rapide par le chlorate de potassium et combustion souvent incomplète en particulier dans le cas des matières azotées)⁵⁹. En 1815, Berzelius, très critique sur l'appareil des français, apporte plusieurs innovations : le tube est chauffé en position horizontale et le composé à analyser est disposé en sandwich entre deux couches d'agent oxydant⁶⁰. Thenard s'obstine à défendre le système français mais Gay-Lussac adopte très vite le dispositif du Suédois Berzelius et, à l'occasion de l'analyse de l'acide prussique, introduit l'usage de l'oxyde de cuivre comme agent oxydant, moins dangereux et plus efficace que le chlorate de potassium. Dans un mémoire sur l'acide urique, il indique cependant « qu'il y a au moins deux ans [c. 1813] que j'ai indiqué à M. Chevreul l'emploi de l'oxyde de cuivre pour l'analyse des substances végétales et animales, et que je lui ai proposé l'appareil dont je m'étais servi pour analyser quelques substances pour lesquelles on ne peut point faire usage de l'appareil que nous avons décrit, M. Thenard et moi, dans nos Recherches physicochimiques⁶¹ ». Chevreul poursuit alors ses recherches capitales sur les corps gras et modifie légèrement l'appareil de Gay-Lussac pour l'adapter à la nature des substances⁶².

⁵⁷ L. J. Gay-Lussac, "Mémoire sur l'iode, présenté à l'Institut le 1^{er} août 1814", *Annales de chimie*, 1814, 91, 149, note 1.

⁵⁸ Maurice Crosland, *Gay-Lussac, savant et bourgeois*, op. cit., 193, 242.

⁵⁹ De Saussure préfère la méthode de la carbonisation couplée à une analyse eudiométrique, "Nouvelles observations sur la composition de l'alcool et de l'éther sulfurique", *AC*, 89, mars 1814, p. 273-305. Reportant les cours de chimie organique de Berthelot au *Collège de France*, Bourgoin indique en 1864 que l'appareil de Thenard et Gay-Lussac existe toujours dans cet établissement sans préciser s'il est toujours utilisé, Bourgoin, "Cours de chimie organique de M. Berthelot", *Revue des cours scientifiques*, n°10, 4 février 1865, p. 158.

⁶⁰ J. J. Berzelius, "Expériences pour déterminer les proportions définies dans lesquelles les éléments de la nature organique sont combinés", *AC*, 93, avril 1815, p. 17; "Suite des Expériences pour déterminer les proportions définies dans lesquelles les éléments de la nature organique sont combinés", *AC*, 94, mai 1815, p. 170-190; 94, juin 1815, p. 296-323; 94, juillet 1815, p. 51-90.

⁶¹ L. J. Gay-Lussac, "Observation sur l'acide urique", *Annales de chimie*, 1815, 96, 53.

⁶² M.-E. Chevreul, *Recherches chimiques sur les corps gras d'origine animale*, Paris, Levrault, 1823.

Figure 8 – Pompe pneumatique de Gay-Lussac (1831)

Le système Gay-Lussac-Berzelius s'imposera jusqu'à ce qu'en 1830 Liebig introduise son « kaliapparat » et stabilise la méthode pour plusieurs décennies⁶³. Le chimiste allemand incorpore la « pompe pneumatique » de Gay-Lussac (figure 8) qu'il juge « sans contredit un des plus importants perfectionnements dont on a enrichi le procédé d'analyse organique⁶⁴ ». Cette pompe à vide permet de dessécher l'« humidité hygroscopique » de l'oxyde de cuivre et d'améliorer le contact entre la substance analysée et les couches d'agent oxydant qui l'entourent. Dumas, mis au courant du nouveau système par l'intermédiaire de Gay-Lussac, écrit à ce dernier et propose une méthode pour le dosage de l'azote. S'adressant à Gay-Lussac, il pourra écrire : « Je ne crains pas d'avancer, et je suis sûr que vous partagez cette opinion que, dans l'état présent des choses, l'analyse d'une substance organique est plus facile et plus sûre que l'analyse d'une argile⁶⁵ ».

3.3. Perspectives de l'analyse et radical cyanogène

Dès leurs premiers travaux, Thenard et Gay-Lussac avaient pressenti les retombés des résultats de l'analyse élémentaire sur les « progrès de la chimie ». En guise de conclusion de leurs *Recherches physicochimiques*, ils écrivent :

Lorsque l'analyse [élémentaire] de toutes les substances végétales et animales sera faite, on pourra suivre et expliquer toutes les transformations qu'elles éprouveront, soit naturellement, soit artificiellement, ou connaître la nature et la quantité des principes qu'elles cèdent et absorbent dans ces transformations; ce qui doit nécessairement avoir une grande influence sur les progrès de la chimie, et peut-être même de la physiologie végétale et animale⁶⁶.

Dans ses notes personnelles, Gay-Lussac interprète les résultats de l'analyse élémentaire de divers composés organiques à l'instar de l'éther et propose différentes formules en équivalent comme celle du sucre de raisin par exemple (figure 9).

⁶³ Maurice Crosland, *Gay-Lussac, savant et bourgeois*, op. cit., 348.

⁶⁴ J.-B. Dumas, « Lettre de M. Dumas à M. Gay-Lussac, Sur les procédés de l'analyse organique », *Annales de chimie et de physique*, t. 47, 1831, p. 212.

⁶⁵ J.-B. Dumas, « Lettre de M. Dumas à M. Gay-Lussac, Sur les procédés de l'analyse organique », *Annales de chimie et de physique*, t. 47, 1831, p. 212.

⁶⁶ L. J. Gay-Lussac, « Recherches sur l'acide prussique, présenté à l'Institut le 18 septembre 1815 », *Annales de chimie*, 1815, 95, 136-231. C'est de loin son mémoire le plus long en chimie organique avec presque 100 pages ! Son mémoire le plus long est celui consacré à l'iode en 1814 avec plus de 150 pages.

Figure 9 – Formule du sucre de raisin selon Gay-Lussac (fonds G.L., École polytechnique)

En 1815, Gay-Lussac publie son fameux mémoire sur l'acide prussique, ainsi nommé car il produit le bleu de Prusse en se combinant au sulfate de fer⁶⁷. Il est aussitôt présenté par Chevreul et Boullay père⁶⁸. Découvert par Scheele en 1783, ce composé est sans doute l'un des plus étudié par les chimistes, en particulier par son maître Berthollet. Gay-Lussac, reprend naturellement le sujet et publie plusieurs mémoires sur l'acide prussique. Le premier date de 1810 et le chimiste y expose une méthode permettant d'obtenir l'acide prussique dans un grand état de pureté, condition *sine qua non* pour une analyse élémentaire, grâce à un dispositif ingénieux et à un mélange réfrigérant glace/sel⁶⁹. Il est rebaptisé acide hydrocyanique afin de le faire rentrer dans la nouvelle catégorie des « hydracides » qu'il venait de créer pour les dérivés analogues de l'iode⁷⁰. Pour déterminer sa nature, Gay-Lussac utilise trois méthodes complémentaires. Il effectue d'abord sa combustion dans l'oxygène et analyse les gaz à l'eudiomètre de Volta en se fondant sur les densités de vapeur (figure 10)⁷¹. Il procède ensuite à la calcination dans un tube en porcelaine pour déduire les proportions d'azote et d'hydrogène. Il finit par doser le carbone en le brûlant avec l'oxyde de cuivre. Les trois procédés donnant des résultats convergents, il en déduit finalement la composition en poids et en vapeurs (la vapeur prussique est représentée par un volume de carbone, ½ volume d'azote et ½ volume d'hydrogène). En étudiant l'histoire chimique de l'acide prussique, c'est-à-dire sa réaction avec différents corps simples et composés, Gay-Lussac isole le premier radical organique azoté qu'il baptise hydro-cyanique ou *cyanogène* (du grec *genna*, j'engendre et *kuanos*, bleu) en décomposant le cyanure de mercure sec par la chaleur (encore elle !)⁷².

⁶⁷ L. J. Gay-Lussac, "Recherches sur l'acide prussique, présenté à l'Institut le 18 septembre 1815", *Annales de chimie*, 1815, 95, 136-231. C'est de loin son mémoire le plus long en chimie organique avec presque 100 pages ! Son mémoire le plus long est celui consacré à l'iode en 1814 avec plus de 150 pages.

⁶⁸ M.-E. Chevreul, "Recherches sur l'acide prussique, par M. Gay-Lussac", *Bulletin des sciences de la Société philomatique de Paris*, 3^e série, t. 3, 1816, p. 15-21 ; P.-F.-G. Boullay, "Extrait d'un mémoire de M. Gay-Lussac, intitulé Recherches sur l'acide prussique", *Journal de pharmacie et des sciences accessoires*, t. 2, février 1816, p. 49-73.

⁶⁹ L. J. Gay-Lussac, "Note sur l'acide prussique", *Annales de chimie*, 1811, 77, 128-133. Il a déterminé ses propriétés physico-chimiques : l'acide bout à 26,5°C et se solidifie en dessous de -15°C ; valeurs très proches des valeurs actuelles (26°C et -13°C).

⁷⁰ L. J. Gay-Lussac, "Mémoire sur l'iode, présenté à l'Institut le 1^{er} août 1814", *Annales de chimie*, 1814, 91, 148.

⁷¹ Gay-Lussac utilise très certainement l'eudiomètre de Volta modifié dont il publiera la description et qu'il « recommande aux chimistes », "Description d'un eudiomètre de Volta", *Annales de chimie et de physique*, 1817, t. 4, 188-189.

⁷² L. J. Gay-Lussac, "Recherches sur l'acide prussique", *Annales de chimie*, t. 95, 1815, 136-231. Gay-Lussac croit isoler le radical CN. On sait que ce gaz toxique à l'odeur d'amandes amères répond depuis à la formule NC-CN.

Après un traitement similaire à celui de l'acide prussique, Gay-Lussac en déduit sa composition volumique : 2 volumes de carbone et 1 volume d'azote. La réaction du cyanogène avec différents réactifs révèle son « double rôle » de corps simple et composé. Lavoisier, qui a introduit la théorie des radicaux pour les composés organiques, reconnaissait dans son *Traité élémentaire* qu'« on ne connaît point le radical de l'acide prussique ; mais les expériences de M. Scheele et surtout celles de M. Berthollet, donnent lieu de croire qu'il est composé de carbone et d'azote⁷³ ». Un quart de siècle plus tard, l'affaire est entendue. Gay-Lussac exploite immédiatement ce résultat et note que, dans le cas de l'acide urique, « le carbone est à l'azote dans le rapport en volume de 2 à 1 comme dans le cyanogène⁷⁴ ». Il rapproche de même le « tartrate acide de potasse » (crème de tartre) de l'acide hydrocyanique pour sa capacité à former de nombreux sels avec certains oxydes qui se comportent par ailleurs comme des acides, ce qui à ses yeux est « une nouvelle preuve de la difficulté de définir l'acidité et la basicité⁷⁵ ». L'action de divers réactifs sur l'acide prussique et le cyanogène conduit Gay-Lussac à distinguer les cyanates des cyanures. Il remarquera l'isomérisie entre les cyanates et les fulminates et analysera le fulminate d'argent avec le jeune Liebig lors de son séjour parisien (novembre 1822-avril 1824)⁷⁶. Gay-Lussac reviendra à plusieurs reprises sur l'acide prussique en précisant certains résultats.⁷⁷

Figure 10 – Eudiomètre de Volta ayant appartenu à Gay-Lussac

Cette discontinuité dans la quête des radicaux organiques va se vérifier une seconde fois. Cette idée, nouvelle à l'époque, qu'un corps composé puisse se comporter comme un corps simple, conduira Liebig à la découverte du radical benzoyle quinze ans plus tard⁷⁸. Pour expliquer ce « retard », Maurice Crosland évoque un problème de classification et de temps :

Liebig écrira en 1840 que la découverte du cyanogène et de ses composés était l'une des plus fructueuses de toute la chimie organique. [Et d'ajouter] Pourtant ces résultats de Gay-Lussac n'eurent pas l'impact qu'ils auraient dû avoir sur la chimie organique car la plupart des chimistes considéraient ces composés comme relevant de la chimie inorganique. Gay-Lussac se plaignit de ne pas avoir eu assez de temps pour mettre au point son mémoire⁷⁹.

⁷³ L. J. Gay-Lussac, « Observation sur l'acide urique », *Annales de chimie*, 1815, 96, 54.

⁷⁴ L. J. Gay-Lussac, « Observation sur l'acide urique », *Annales de chimie*, 1815, 96, 54.

⁷⁵ L. J. Gay-Lussac, « Sur la propriété qu'à le tartrate acide de potasse de dissoudre un grand nombre d'oxydes », *Annales de chimie et de physique*, 1816, 3, 282. Dans son mémoire sur l'iode, Gay-Lussac s'est longuement exprimé sur la nature des acides et des bases, « Mémoire sur l'iode, présenté à l'Institut le 1^{er} août 1814 », *Annales de chimie*, 1814, 91, note B, 130-152.

⁷⁶ L. J. Gay-Lussac, J. Liebig, « Analyse du fulminate d'argent », *ACP*, 25, 1824, p. 285-331.

⁷⁷ L. J. Gay-Lussac, « Sur la nature du produit que l'on obtient en calcinant la potasse avec une substance animale », *Annales de chimie et de physique*, 1818, 8, 440-441 ; id., *Journal de pharmacie*, 4, 1820, 149-151. id., « Sur l'acide des prussiates triples », *Annales de chimie et de physique*, 1823, 22, 320-323. id., « Faits pour servir à l'histoire du bleu de Prusse », *Annales de chimie et de physique*, 1831, 46, pp. 73-80.

⁷⁸ J. Liebig, « Extrait d'une lettre à M. Liebig, sur le Radical de l'acide benzoïque », *Annales de chimie et de physique*, 1832, t. 50, 334-335. Brock William H., *Justus von Liebig - The Chemical Gatekeeper*, Cambridge: Cambridge University Press, 1997, 80 ; Gérard Christian, « Jean-Baptiste Dumas dans les débats théoriques des années 1830-1860 », *L'Actualité chimique*, février 2002, 40 ; D. Fauque, « Louis-Joseph Gay-Lussac (1778-1850) », *L'Actualité chimique*, janvier 2001, 32.

⁷⁹ M. Crosland, *Gay-Lussac, savant et bourgeois*, op. cit., 189, 244.

Il est vrai que la classification de ce composé et de ses dérivés pose problème. Dans son fameux *Traité de chimie* qui fait alors autorité, Thenard adopte un compromis et décrit une partie des propriétés du cyanogène dans un chapitre sur les corps inorganiques et l'autre partie en chimie animale. Ce n'est que dans la dernière édition (1835) qu'il crée une classe pour tous les acides organiques azotés « avec ou sans radical cyanogène ». En ce qui concerne le manque de temps, Arago rappelle qu'à cette époque Gay-Lussac était absorbé par « des leçons publiques presque journalières⁸⁰ ». Pourtant, Ampère signale dès 1816 que le mémoire de ce « grand chimiste » a « ouvert une nouvelle carrière à la chimie⁸¹ ». Quoi qu'il en soit de ces contingences de l'histoire, chimistes et historiens s'accordent pour souligner à juste titre l'importance de ce travail pour la chimie organique. S'il n'a pas été décisif sur le moment, il a été capital par la suite pour l'établissement de la chimie du carbone.

4 - Les alcaloïdes et la fusion des deux types d'analyses

Bien que Gay-Lussac n'a fait aucune découverte dans le domaine des alcaloïdes, l'annonce de la découverte du premier d'entre eux, la morphine en 1817, a été décisive pour le devenir de la chimie organique⁸². Dans une note placée à la fin de l'article historique du pharmacien allemand Friedrich Wilhelm Sertürner (1783-1841), Gay-Lussac écrit (figure 11):

Nous ne craignons pas d'avancer que la découverte de la morphine va ouvrir un champ nouveau, et que bientôt on aura des notions précises sur les poisons tirés des végétaux ou des animaux. La plupart de ces substances se font remarquer par leur nature azotée, ainsi que par leurs propriétés alcalines, et elles formeront dorénavant un genre dont les espèces se retrouveront dans des végétaux très différents⁸³.

Pourquoi ces produits n'ont-ils pas été découverts plus tôt, s'interrogent les analystes quelques années plus tard? Dans ses cours de 1828, Gay-Lussac explique que « les idées des chimistes n'étaient pas portées à reconnaître ni même à soupçonner l'existence des bases végétales⁸⁴ ». Les esprits étaient jusque-là conditionnés à rechercher les acides organiques et les corps neutres. Après la note de Gay-Lussac, ils sont désormais prêt à accepter des principes immédiats de nature basique. La compétition entre pharmaciens français et allemands aboutit en quelques années à la découverte d'une vingtaine d'alcaloïdes. En France, les pharmaciens-chimistes Joseph Pelletier (1788-1842), Joseph-Bienaimé Caventou (1795-1877) et Pierre-Jean Robiquet (1780-1840) s'illustrent par leurs découvertes et créent les premières industries pharmaceutiques produisant des produits chimiques à haute valeur ajoutée. Gay-Lussac fera appel aux compétences Robiquet pour contrôler la pureté des certaines substances végétales ou pour vérifier certains résultats (comme l'isolement de la morphine).

Principes immédiats « à la mode », les alcaloïdes sont annoncés à la hâte et de nombreux « pseudo-alcaloïdes » à la vie plus ou moins éphémère apparaissent sur le marché. Ainsi, le pharmacien français de Vitry-le-François Pierre-Joseph Leroux (1795-1870) isole la salicine des écorces de saule (*salix helix*), mais les rapporteurs du mémoire, Gay-Lussac et le médecin chimiste François Magendie (1783-1855), corrigent aussitôt le jugement du pharmacien avec l'assentiment de l'auteur⁸⁵. Dans son cours, Gay-Lussac met en garde les futurs analystes: « quelques unes de ces substances ont des propriétés qui n'ont pas été vérifiées, et l'on doit attendre, avant de les admettre au rang des alcalis, qu'elles aient été soumises à de nouvelles épreuves⁸⁶ ».

Ces substances extrêmement actives, vont lancer de nombreux défis aux analystes, en particulier sur leur identification et leur composition chimique. Elles sont très difficiles à distinguer les unes des autres comme le souligne Gay-Lussac dans son cours à la Faculté des sciences en 1828:

⁸⁰ F. Arago, "Notice biographique sur Gay-Lussac, lu à l'Académie des sciences le 20 septembre 1852", in J.-A. Barral (dir.), *Œuvres complètes de François Arago*, Paris, Gide et J. Baudry, t. 3, 1855, p. 45.

⁸¹ A.-M. Ampère, "Suite d'une classification naturelle pour les corps simples", *ACP*, 2, mai 1816, 13.

⁸² Selon son biographe, il aurait inventé le terme alcaloïdes dans un autre contexte pour désigner les éléments possédant une grande affinité pour l'oxygène, voir Maurice Crosland, *Gay-Lussac, savant et bourgeois*, op. cit., 102, 242-243.

⁸³ F. W. Sertürner, "Analyse de l'opium", *ACP*, 5, mai 1817, p. 42, note 1, c'est moi qui souligne.

⁸⁴ J. L. Gay-Lussac, F. Magendie, "Rapport sur un mémoire de M. Leroux, pharmacien à Vitry-le-François, relatif à l'analyse chimique de l'écorce de saule, etc.", *ACP*, 43, 1830, p. 442.

⁸⁵ J. L. Gay-Lussac, F. Magendie, "Rapport sur un mémoire de M. Leroux, pharmacien à Vitry-le-François, relatif à l'analyse chimique de l'écorce de saule, etc.", *ACP*, 43, 1830, p. 442.

⁸⁶ J. L. Gay-Lussac, *Cours de chimie*, op. cit., t. 2, leçon 25, 20-21.

5. Conclusion

Les contributions de Gay-Lussac dans le domaine de la chimie organique sont multiples. Sur le plan pratique, il a proposé divers appareils (lampe à alcool, appareil pour déterminer les densités de vapeur, appareil à fermentation, eudiomètre de Volta modifié) et à perfectionner plusieurs instruments (alcoomètre, baromètre, thermomètre) toujours dans le souci de simplifier les procédures et les tâches quotidiennes effectuées au laboratoire. En analyse immédiate, il a déterminé avec une grande précision certaines données physico-chimiques en particulier pour les solvants (densité, point d'ébullition de l'alcool et de l'éther), il a étudié et expliqué la fermentation alcoolique, l'action de certains réactifs (eau, chaleur, potasse), et il a perfectionné certains procédés qui ont permis l'obtention de principes immédiats très purs (acides organiques en particulier). En analyse élémentaire, il a mis au point avec Thenard le prototype de tous les appareils qui allaient suivre et a introduit l'oxyde de cuivre comme agent oxydant. Il a proposé une classification des composés organiques fondée uniquement sur un critère chimique, ce qui lui a permis de reconnaître le phénomène d'isomérisie. Il a proposé d'expliquer la formation de l'éther en termes d'équation volumétrique, il a découvert le premier radical azoté de la chimie organique et il a noté son double comportement de corps simple et composé.

Sur le plan de la méthode, Gay-Lussac, en privilégiant l'étude des composés organiques volatils, a proposé quasi systématiquement des explications fondées sur les lois volumiques qu'il a lui-même établit. Il n'a pas hésité à formuler des hypothèses (sur la composition d'un corps par exemple) et à déduire certains résultats. Cette approche hypothético-déductive se double d'une démarche empirique⁸⁹. Gay-Lussac, comme n'importe quel analyste de son temps, participe à l'accumulation des données expérimentales qui ne prendront sens que lorsqu'un niveau critique sera atteint. La méthode d'étude des composés organiques place Gay-Lussac parmi les premiers physico-chimistes de la chimie organique. Comme le note Fremy, ces principaux mémoires « sont caractérisés par une remarquable application de toutes les connaissances de la chimie et de la physique⁹⁰ ». Pour Gay-Lussac, la diversité des propriétés s'explique à la fois par des considérations chimiques (nature des composés) et par des considérations physiques (étude des états physiques, mesure des volumes des gaz en particulier). Toutes ses recherches mise bout à bout, ne prennent sens que si on adopte une vue panoramique de l'ensemble des travaux en chimie végétale et animale.

Même s'il n'a pas formé d'école de recherches, l'influence de Gay-Lussac au sein de la communauté d'analystes a souvent été décisive. Ses nombreuses connaissances en France comme à l'étranger, sa position d'académicien, de rédacteur des *Annales de chimie* et surtout de professeur, lui ont permis de propager les idées et les méthodes de la chimie organique. Acteur privilégié de l'évolution des méthodes chimiques de son temps, il a joué un rôle central dans le processus d'unification de la chimie végétale et animale. Conscient que la chimie végétale et animale n'est pas l'affaire d'une seule personne, il a souvent donné l'impulsion initiale et a su mobiliser les analystes autour de certains problèmes comme l'étude de la solubilité des solvants, son appel aux pharmaciens « éclairés » pour élucider le processus de formation de l'éther ou sa note annonçant la découverte des alcaloïdes. Il a initié le jeune Liebig à l'analyse élémentaire que ce dernier perfectionnera et propagera à son tour Outre-Rhin puis dans toute l'Europe, ce qui occultera, pour un temps, les travaux de ses prédécesseurs. Il a enfin transmis sa passion pour la chimie organique à son fils Jules (1810-1877) qui, avec l'aide du pharmacien-chimiste Pelouze, effectuera des recherches sur divers composés organiques⁹¹.

On le voit, le rôle de Gay-Lussac ne se limite pas à la seule découverte du radical prussique. Expert en analyse, il a été impliqué dans à peu près tous les domaines de la chimie organique de son temps. Il a contribué à poser les premières pierres de cet édifice et à annoncer de concert avec Dumas l'unification de l'analyse immédiate et élémentaire en un corps de doctrine cohérent. L'hommage rendu par Fremy qui considère Gay-Lussac comme le « principal fondateur de la chimie organique » n'est pas exagéré si l'on n'oublie pas de signaler qu'il s'inscrit dans une œuvre collective sans laquelle les travaux du chimiste n'auraient certainement pas eu le même impact pour l'histoire de la chimie.

⁸⁹ Maurice Crosland, *Gay-Lussac, savant et bourgeois, op. cit.*, 103.

⁹⁰ E. Fremy, *Encyclopédie chimie*, t. 1, 1^{er} fascicule, Paris, Dunod, 1882, p. 68.

⁹¹ J. Gay-Lussac, J. Pelouze, "Sur la salicine", *Annales de Chimie et de Physique*, 1830, 44, 220-221; id., "Sur la composition de la salicine", *Annales de Chimie et de Physique*, 1831, 48, p. 111; J. Gay-Lussac, "Analyse de la paraffine", *Annales de Chimie et de Physique*, 1832, 50, p. 78-80; J. Gay-Lussac, J. Pelouze, "Sur l'acide lactique", *Annales de chimie et de physique*, 1833, 52, 410-424; id., *Journal de pharmacie*, 19, 1833, 566-567.

Annexe - Publications de Gay-Lussac en chimie organique

Articles

1. Gay-Lussac L.-J., "Lettre à M. Bertholet sur la présence de l'acide fluorique dans les substances animales, et sur la pierre alumineuse de la Tolfa", *Annales de chimie*, 1805, 55, 258-275.
2. Gay-Lussac L.-J., Thenard L.-J., "Quatrième partie: Méthode pour déterminer la proportion des principes qui constituent les substances végétales et animales, et application de cette méthode d'analyse d'un grand nombre de ces substances. Présenté à l'Institut le 15 janvier 1810", in *Recherches physico-chimiques*, Paris, Deterville, 1811, t. 2, 265-350.
3. Gay-Lussac L.-J., Thenard L.-J., "Extrait d'un mémoire sur l'analyse végétale et animale", *Journal de physique, de chimie, d'histoire naturelle et des arts*, mars 1810, 70, 257-266; id., *Annales de chimie*, avril 1810, 74, 47-64; id., *Bibliothèque Britannique*, 1810, 43, 351-366; id., *Journal des Mines*, 27, 1810, 393-406. Boullay P.-F.-G., "Tableau des produits immédiats des végétaux, suivant la méthode de MM. Gay-Lussac et Thenard", *Bulletin de Pharmacie*, avril 1810, 2, 190-192.
4. Gay-Lussac L.-J., "Note sur la décomposition de quelques substances végétales ou animales soumises à l'action de la chaleur", *Annales de chimie*, mai 1810, 74, 189-192.
5. Gay-Lussac L.-J., "Observations sur l'acétate d'alumine", *Annales de chimie*, mai 1810, 74, 193-198.
6. Gay-Lussac L.-J., "Mémoire sur la fermentation, lu à l'Institut le 3 décembre 1810 (extraits)", *Annales de chimie*, 1810, 76, 245-260. Boudet Jean-Pierre oncle, "Extrait d'un mémoire sur la fermentation par M. Gay-Lussac", *Bulletin de Pharmacie*, 1811, 3, 349-354.
7. Gay-Lussac L.-J., "Note sur l'acide prussique", *Annales de chimie*, 1811, 77, 128-133.
8. Gay-Lussac L.-J., "Note sur la densité des vapeurs de l'eau, de l'alcool, de l'éther sulfurique, et sur un appareil fort simple employé pour déterminer cette densité, lu à l'Institut le 25 novembre 1811 (extraits)", *Annales de chimie*, 1811, 80, 218-219.
9. Gay-Lussac L.-J., "Expériences pour déterminer si l'alcool existe tout formé dans le vin, lu à l'Institut le 1^{er} mars 1813", *Mémoire de physique et de chimie de la Société d'Arceuil*, 1813, vol. iii, 94-105; id. *Annales de chimie*, t. 86, 1813, 175-177; id., *Bulletin de Pharmacie*, 1813, 5, 296-297.
10. Gay-Lussac L.-J., "Mémoire sur l'iode, présenté à l'Institut le 1^{er} août 1814", *Annales de chimie*, 1814, 91, 5-160.
11. Gay-Lussac L.-J., "Recherches sur l'acide prussique, présenté à l'Institut le 18 septembre 1815", *Annales de chimie*, 1815, 95, 136-231; M.-E. Chevreul, "Recherches sur l'acide prussique, par M. Gay-Lussac", *Bulletin des sciences de la Société philomatique de Paris*, 3^e série, t. 3, 1816, p. 15-21; P.-F.-G. Boullay, "Extrait d'un mémoire de M. Gay-Lussac, intitulé Recherches sur l'acide prussique", *Journal de pharmacie et des sciences accessoires*, t. 2, février 1816, p. 49-73.
12. Gay-Lussac L.-J., "Lettre à M. Clément sur l'analyse de l'alcool et de l'éther sulfurique et sur les produits de la fermentation", *Annales de chimie*, 1815, 95, 311-318.
13. Gay-Lussac L.-J., "Observation sur l'acide urique", *Annales de chimie*, 1815, 96, 53-54.
14. Gay-Lussac L.-J., "Observations sur l'éther sulfurique [critique d'un travail de Planchel]", *Annales de chimie et de physique*, 1816, 2, 98-101.
15. Gay-Lussac L.-J., "Sur la dilatation des liquides", *Annales de chimie et de physique*, 1816, 2, 130-136.
16. Gay-Lussac L.-J., "Sur la propriété qu'à le tartrate acide de potasse de dissoudre un grand nombre d'oxides", *Annales de chimie et de physique*, 1816, 3, 281-282.
17. Gay-Lussac L.-J., "Sur le changement de la fibre musculaire en graisse", *Annales de chimie et de physique*, 1817, 4, 71-72.
18. Gay-Lussac L.-J., "Sur la décomposition de l'acétate d'alumine par la chaleur", *Annales de chimie et de physique*, 1817, 6, 201-203.
19. Gay-Lussac L.-J., "Note sur l'acide malique", *Annales de chimie et de physique*, 1817, 6, 331-333.

20. Gay-Lussac L.-J., "Sur la nature du produit que l'on obtient en calcinant la potasse avec une substance animale", *Annales de chimie et de physique*, 1818, 8, 440-441; id., *Journal de pharmacie*, 4, 1820, 149-151.
21. Gay-Lussac L.-J., "Sur l'altération qu'éprouve l'acide sulfurique en agissant sur l'alcool", *Annales de chimie et de physique*, 1820, 13, 62-79.
22. Gay-Lussac L.-J., "Sur la combinaison de l'acide chromique avec l'acide sulfurique, et sur la conversion de l'alcool en éther sulfurique, par un procédé nouveau", *Annales de chimie et de physique*, 1821, 16, 102-105.
23. Gay-Lussac L.-J., "Observations sur cette question: Quelle est la quantité d'alcool qui est entraînée par l'acide carbonique pendant la fermentation du moût de raisin?", *Annales de chimie et de physique*, 1821, 18, 380-389.
24. Gay-Lussac L.-J., "Sur la clarification du vin", *Annales de chimie et de physique*, 1822, 21, 335.
25. Gay-Lussac L.-J., "Sur l'acide des prussiates triples", *Annales de chimie et de physique*, 1823, 22, 320-323.
26. Gay-Lussac L.-J., Liebig J., "Analyse du fulminate d'argent, lu à l'Académie des sciences, le 22 mars 1824", *Annales de chimie et de physique*, 1824, 25, 285-311.
27. Gay-Lussac L.-J., "Action de la potasse sur les matières organiques", *Annales de chimie et de physique*, 1829, 41, 398-402.
28. Gay-Lussac L.-J., "Faits pour servir à l'histoire du bleu de Prusse", *Annales de chimie et de physique*, 1831, 46, pp. 73-80.
29. Gay-Lussac L.-J., "Sur l'acide oxalique, lu à l'Académie, le 5 avril 1831", *Annales de chimie et de physique*, 1831, 46, 218-220.
30. Gay-Lussac L.-J., "Sur la présence de l'azote dans toutes les semences", *Annales de chimie et de physique*, 1833, 53, 110-111.
31. Gay-Lussac L.-J., Larivière F., "Sur la décomposition des huiles essentielles par la chaleur", *Comptes Rendus des Séances de l'Académie des sciences*, 1841, 12, 125.
32. Gay-Lussac L.-J., "Observations critiques sur la théorie des phénomènes chimiques de la respiration", *Annales de chimie et de physique*, 1844, 11, 5-16.

Leçons et cours

33. Gay-Lussac L.-J., *Cours de chimie*, Paris: Pichon et Didier, 1828, réed. Ellipses, 1999, tome II, leçon 26, 20
34. Gay-Lussac L.-J., *Cours de chimie générale* au Jardin des Plantes, c. 1844, BIUP, ms 150. Il s'agit en fait de 19 leçons sur la chimie organique.
35. Gay-Lussac L.-J., Frémy E., *Cours de chimie minérale* au Jardin des Plantes, 1845, BIUP, ms 155. 1^{ère} leçon (11 mars 1845) à 59^e leçon (26 juillet 1845). L'écriture semble différente à partir du chapitre "Borates" de la 44^e leçon (21 juin 1845).