

Manger, hier, aujourd'hui, demain... en chimie

Hervé This, physico-chimiste, est directeur du Centre international de gastronomie moléculaire et physique AgroParisTech-INRAE, directeur de la Fondation Science & Culture alimentaire de l'Académie des sciences, membre de l'Académie d'agriculture de France, membre correspondant de l'Académie royale des sciences, des lettres et des beaux-arts de Belgique. Il vient de recevoir le prix Sonning (Danemark).

Introduction

Les jésuites disaient qu'il faut se comporter en chrétien, et non en tant que chrétien : de même, je propose de nous intéresser ici à l'alimentation en chimiste pour cet ouvrage issu du colloque « Chimie et alimentation ». Quand on parle de chimie, il faut immédiatement ajouter qu'il y a beaucoup de confusion à propos de la « chimie », dans le public,

mais aussi dans le monde de la chimie et de ses applications. La chimie est une science de la nature, qui est apparue entre le premier et le quatrième tome de l'*Encyclopédie* de Denis Diderot et Jean Le Rond d'Alembert (Kahn, 2016). Par le passé, il y avait l'alchimie, dont la branche non ésotérique (celle qui évitait les prétendues pierres philosophales, transmutations du plomb en or, etc.) explorait les transformations

de la matière qu'opéraient les métallurgistes, les cuisiniers, les fabricants de savons et autres produits cosmétiques, les pharmaciens...

Progressivement, les sciences physiques modernes s'étant développées après la Renaissance, le même esprit de modernité non dogmatique souffla sur les activités d'exploration des transformations de la matière : au lieu de penser qu'une « expérience qui rate » est due à l'insuffisance de l'expérimentateur, on finit par comprendre que les résultats des expériences s'imposent absolument, quelles que soient les « autorités » qui s'y opposeraient, et ce fut la « chymie », qui devint la « chimie » quand Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794) (**Figure 1**) lui donna les bases quantitatives que toute science moderne ne manque pas d'avoir ; quand, dans un même mouvement, il réfuta la théorie du phlogistique (une matière de masse négative qui aurait été donnée par le feu, lors des

calcinations), lorsqu'il introduisit des méthodes modernes quantitatives d'analyse, quand il proposa une meilleure définition de la notion d'« élément », quand il proposa avec quelques collègues une rénovation du langage de la chimie.

Comme les autres sciences de la nature, la chimie a eu et a pour fonction de découvrir les objets du monde, d'explorer les mécanismes des phénomènes. La méthode est donc celle qu'introduisirent François Viète (1540-1603), René Descartes (1596-1650) (à qui nous devons beaucoup de notre formalisme algébrique), Francis Bacon (1561-1626) et surtout Galilée (1564-1642), qui put énoncer bien plus clairement les choses. Et c'est ainsi que l'expérience devient première, assortie du calcul, et que l'on rompit alors avec les études anciennes, dogmatiques : Galilée écrivait très clairement que *« la philosophie [de la nature, c'est-à-dire la science] est écrite dans le grand livre qui se tient ouvert devant nos yeux – je veux dire l'univers –, mais nous ne pouvons le comprendre que si nous apprenons le langage et les symboles dans lequel il est écrit. Ce livre est écrit en langage mathématique, et les symboles sont les triangles, cercles et autres figures géométriques, sans l'aide desquelles il est impossible d'en comprendre un seul mot »*. Progressivement, on a donc compris que les méthodes des sciences de la nature consistent en :

1. l'identification d'un phénomène ;
2. la caractérisation quantitative de ce dernier ;



Figure 1

Antoine Laurent de Lavoisier dans son laboratoire.

Crédit : H. This.

3. la réunion des données de mesure en équations ;
4. la réunion d'équations et l'introduction de concepts pour former une théorie ;
5. la recherche de conséquences théoriques testables de la théorie ;
6. tests expérimentaux de ces prévisions théoriques.

La chimie s'est ensuite développée, irriguant les techniques d'application tirées des nouvelles connaissances. J'insiste : on a tort de confondre la chimie avec les applications de la chimie, de confondre la science avec ses applications, et, à ce propos, on se rappellera les mots de Louis Pasteur (1822-1895), qui répétait, jusqu'à la colère, qu'il n'existe pas de « sciences appliquées », expression auto-contradictoire, mais seulement des applications des sciences. Le travail de l'ingénieur qui utilise les résultats de la chimie n'est pas de la chimie, puisqu'il ne s'agit pas d'un travail scientifique, mais technologique, et l'on gagne à avoir une idée claire des champs désignés par la technique (du grec *techné*, « faire »), le technologique (l'étude de la technique en vue de son amélioration), l'ingénierie (les procédés, l'orchestration des études techniques) et la science, sous-entendu « de la nature », laquelle se préoccupe de découvertes, et non d'inventions.

1 Hier

Tout cela étant dit, nous pouvons examiner plus clairement l'évolution de l'alimentation, à

partir de l'aube de l'humanité, dont nous avons une vision par les études zoologiques ou paléoanthropologiques, entre autres. Notamment les travaux de nos collègues (Hladik, 1977) ont bien établi que les végétaux ont coévolué avec les animaux, produisant notamment des nutriments dans des baies colorées et riches en sucres (essentiellement D-glucose, D-fructose et saccharose) (Figure 2), « afin » que les animaux consomment ces baies et aillent disperser les graines au loin, évitant ainsi que les rejetons d'une plante soient en concurrence avec la plante mère.

Les primates non humains, par exemple, ont consommé non seulement les baies, mais également les tiges ou les racines, qui contiennent des oligo- ou des polysaccharides, et des acides aminés. Car les plantes

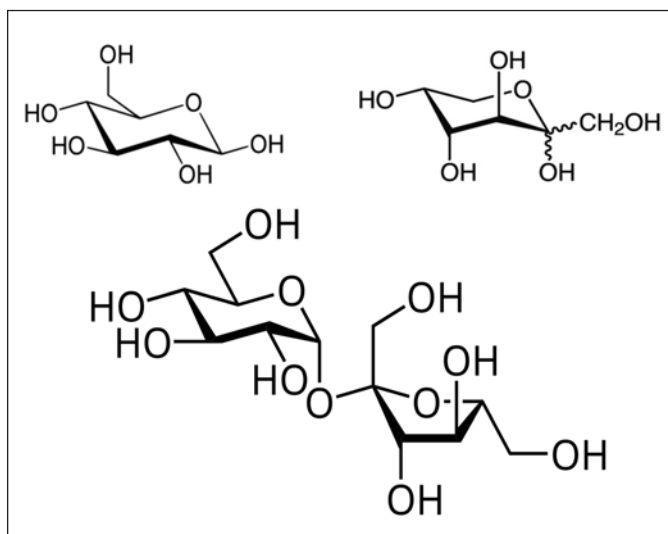


Figure 2

Formules du D-glucose (en haut, à gauche), du D-fructose (en haut, à droite) et du saccharose (en bas), composés présents dans tous les végétaux.

ont des canaux conducteurs qui montent la sève brute (essentiellement de l'eau et des minéraux) vers les feuilles, grâce à l'évapotranspiration, qui assure une montée de la sève par capillarité, dans les canaux du tissu conducteur des plantes (xylème, phloème). Puis, dans les feuilles, s'effectue la synthèse organique de nombreux composés organiques, à partir du dioxyde de carbone de l'atmosphère et de l'énergie lumineuse ; les composés synthétisés sont redescendus dans la plante par les canaux du phloème, jusque dans les racines (notamment), où les oligosaccharides (les « petits sucres », lessivables parce que solubles) sont associés en polysaccharides stockés (par exemple, l'amidon des tubercules de pommes de terre) (**Figure 3**).

Pas étonnant, alors, que les pucerons, avec leur rostre,

piquent les tiges des plantes et aillent aspirer les sucres et les acides aminés présents dans les canaux du phloème, se gonflant... jusqu'à être « traits » par les fourmis, qui récupèrent ces précieux composés organiques dans le miellat (substance déposée sur les feuilles). Les singes, également, mastiquent tiges et racines, pour extraire ces composés qui sont de l'énergie sous la forme chimique, notamment le D-glucose, le D-fructose et le saccharose, stockés sous forme non lessivable d'amidon dans les racines et les graines (les tubercules de pomme de terre, les grains de blé, de maïs, etc.).

Veut-on voir quels ingrédients contiennent de l'amidon ? Une goutte de teinture d'iode, brune, vire au bleu quand elle est déposée sur de l'amidon, parce que les atomes d'iode viennent se loger au cœur des hélices d'un des deux composés de l'amidon : l'amylose (l'autre a pour nom « amylopectine »). Évidemment, il y a une réaction dans cette affaire et cela relève de cette branche de la chimie qui est dite « supramoléculaire ».

Il faudrait des volumes entiers pour décrire l'alimentation des primates, qui fut celle de nos lointains ancêtres, et nous nous arrêterons seulement sur quelques exemples, qui illustrent cette idée importante selon laquelle « *tout ce qui relève du vivant doit s'interpréter en termes de biologie de l'évolution* » (Dobzhansky, 1973).

Tout d'abord, il est intéressant d'observer que les singes ont progressivement acquis

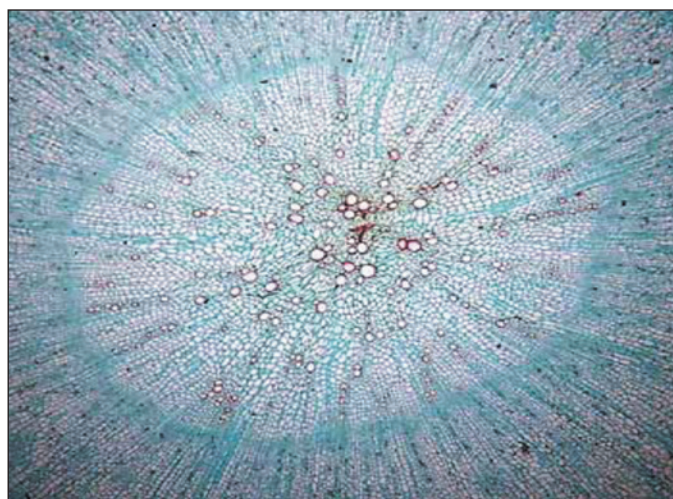


Figure 3

Coupe transversale d'une racine de *Daucus carota* L. (« carotte »). Les petits ronds blancs centraux correspondent aux canaux du xylème et du phloème.

– génétiquement – la capacité de métaboliser l'éthanol, formé par fermentation des fruits sucrés : cette adaptation favorable s'est transmise, parce qu'elle permettait de mieux valoriser les ressources, et elle nous a été aussi transmise.

Dans ce registre des mutations utiles, enchaînons avec une découverte récente (2022) d'Evershed qu'une mutation est apparue dans les pays du nord de l'Europe, entre -10 000 et -5 000 ans : elle a permis à des groupes humains de métaboliser le lactose du lait, un disaccharide (**Figure 4**) qui n'était assimilable que par les nourrissons, les adultes ne pouvant consommer le lait que sous la forme de yaourts, après que des micro-organismes avaient transformé le lactose non assimilable en acide lactique.

Mais nous sommes allés trop vite, car nous n'avons pas encore considéré que **la maîtrise du feu**, à une époque sans doute comprise entre 800 000 et 400 000 avant notre ère (Gowlett *et al.*, 1981), **a constitué un progrès essentiel, parce que la « cuisson » a des fonctions nombreuses :**

– elle détruit les micro-organismes pathogènes, qui contaminent toujours la surface des denrées (on n'oublie pas que les micro-organismes ont les mêmes besoins que nous, à savoir la présence d'eau, de nutriments et une température suffisamment chaude pour permettre leur prolifération, mais suffisamment froide pour ne pas inactiver les enzymes nécessaires à leur métabolisme) ;

– elle tue les parasites qui contaminent éventuellement l'intérieur ou l'extérieur des denrées (porc, cheval, poissons, cresson, etc.) ;

– elle permet de dégrader des composés toxiques des ingrédients alimentaires, telles certaines lectines (des protéines) hémato-agglutinantes des haricots ;

– elle dissocie des composés non directement assimilables (par exemple, les amyloses et les amylopectines de l'amidon,

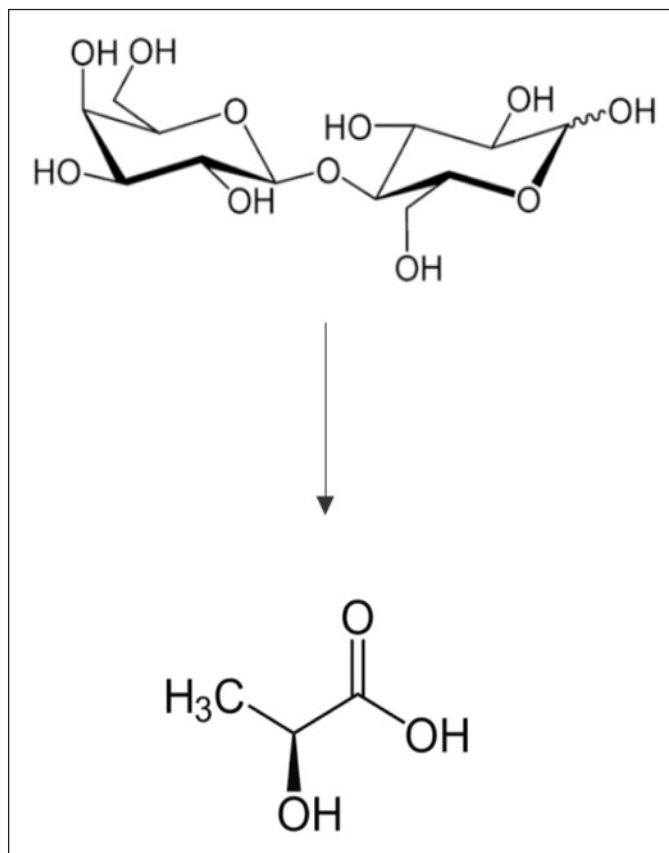


Figure 4

Le lactose (en haut), sucre présent dans le lait, est un disaccharide composé d'un résidu de galactose et d'un résidu de D-glucose. Dans les yaourts, des micro-organismes le transforment en acide S-lactique (en bas).

les pectines des parois cellulaires, les protéines), formant des composés qui peuvent passer rapidement dans le sang ;

- elle modifie la consistance des denrées, tels les tissus végétaux, facilitant l'assimilation, et augmentant la bioactivité des composés qui sont présents (par exemple, le bêta-carotène des carottes, notamment, est bien plus assimilé à partir d'une purée de carottes qu'à partir d'une carotte crue) ;

- elle engendre des composés odorants et sapides appréciés des humains et des animaux (des singes préfèrent des carottes cuites à des carottes crues, par exemple) ;

- elle engendre des composés qui, détectés par le système sensoriel, servent de signaux pour établir la satiété (par exemple, les acides aminés pour les viandes) ;

- et l'on n'a sans doute pas fini d'identifier l'intérêt des modifications chimiques des denrées alimentaires par le feu.

Si le feu a favorisé l'évolution de l'humanité, en lui évitant de passer trop de temps à mastiquer, il n'est pas le seul facteur : nos ancêtres ont cherché à ne plus être tributaires des variations climatiques, annuelles ou à une échelle supérieure (Labalette, 2009 ; Miller *et al.*, 2012) grâce à **l'agriculture, la pêche et l'élevage**. Dans ces développements, il s'agissait d'assurer la **« sécurité sanitaire »** (le fait d'avoir un approvisionnement alimentaire suffisant). Et **des techniques de conservation se sont empiriquement**

perfectionnées : les fromages, après tout, sont des conserves de lait ; les saucissons, les viandes en saumure ou les viandes et poissons fumés sont des conserves de viande ; les confitures sont des conserves de fruits.

Dans toutes ces discussions, il y a une différence importante à faire entre la « sécurité alimentaire », déjà évoquée, et la « sécurité sanitaire des aliments » (les aliments doivent être sains) : nos lointains ancêtres n'avaient ni l'une ni l'autre, et s'ils percevaient bien l'absence de toxicité immédiate des denrées, ils n'avaient pas d'idées sur la sécurité sanitaire réelle de leurs aliments. En ces matières, la « tradition » n'est pas suffisante pour nous permettre d'éviter des aliments toxiques à long terme, surtout quand leur goût est initialement bon, tels les sels de plomb (toxiques) que les Romains utilisaient pour édulcorer les vins. C'est ainsi que le remarquable *Compendium des plantes toxiques*, publié par l'Agence européenne de sécurité sanitaire des aliments, fondé sur les travaux modernes d'épidémiologie nutritionnelle, fait état de nombre de plantes dont la consommation était « traditionnelle », alors même qu'elles sont toxiques (Efsa, 2009) : à mettre entre les mains de toutes celles et de tous ceux qui cuisinent et qui mangent !

Pour en revenir au feu, notamment, la cuisson des viandes ou d'autres denrées au-dessus du foyer conduit à la contamination des aliments par des hydrocarbures polycycliques,

fortement cancérigènes (Lijinsky et Shubik, 1964 ; Chung *et al.*, 2011). Pourquoi l'humanité a-t-elle progressivement appris à mettre les pièces à rôtir devant le feu, et non au-dessus ? Une hypothèse est de nature économique : rôtie, la viande (qui se contracte en raison de la dénaturation du tissu collagénique) perd jusqu'à plus d'un quart de sa masse, ce qui était rédhibitoire à une époque où elle était moins abondante qu'aujourd'hui (Figure 5).

En mettant la viande devant le feu plutôt qu'au-dessus, ce qui cuit tout aussi bien, vu que les rayonnements infrarouges ne sont pas sensibles à la gravité, on évitait que les jus ne soient perdus dans le feu, on pouvait les récupérer dans des « lèchefrites » placées sous la viande... et l'on évitait du même coup, inconsciemment,

le dépôt d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et autres.

Pourquoi supportons-nous que nos barbecues, le plus souvent horizontaux, soient si souvent mal conçus ? On mesure mieux le problème quand on sait qu'une viande ainsi cuite, au barbecue horizontal, peut contenir jusqu'à près de 900 $\mu\text{g}/\text{kg}$ de ces HAP dans les viandes, alors qu'il n'en est autorisé que 30 $\mu\text{g}/\text{kg}$ dans les poissons fumés commercialisés (Normand, 2007 ; Commission européenne, 2020) !

Parallèlement au rôtissage, et toujours en vue de bien récupérer les nutriments, s'est introduite **la cuisson en fosse** : on creuse une fosse que l'on tapisse d'une peau d'animal, et l'on y met de l'eau, que l'on chauffe à l'aide de pierres qui

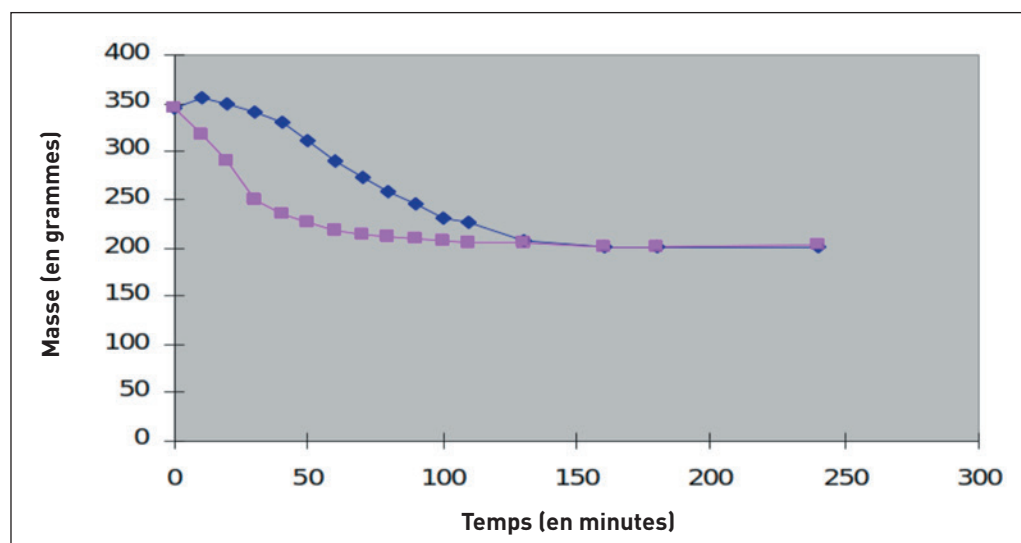


Figure 5

Chauffée, la viande se contracte, expulsant des jus. Dans l'expérience dont le résultat est donné ici, on a comparé deux moitiés égales d'une même viande, l'une placée dans l'eau bouillante (en pourpre), et l'autre dans l'eau froide (en bleu). Quand les deux pièces sont à la même température, elles ont la même masse.

sont d'abord chauffées dans un feu voisin (Wandsnider, 1997; Speth, 2015). La viande et d'autres denrées placées dans l'eau sont alors cuites, formant de surcroît un « bouillon ». Là, rien n'est perdu : on consomme à la fois les denrées initialement utilisées et le bouillon. Cela explique sans doute pourquoi le pot-au-feu et le bouillon sont universellement pratiqués, constituant la base des cuisines du monde entier, au point que les bouillons et les pots-au-feu sont au début de la plupart des livres de cuisine classique (This, 2009).

Cela étant, au cours des derniers siècles, la technique a suscité de nombreuses questions : faut-il mettre la viande dans l'eau initialement froide et chauffer ensuite, ou bien est-il préférable de mettre la viande dans l'eau qui bout déjà ? Il est intéressant d'observer que les débats ont fait rage non seulement chez les cuisiniers, mais aussi dans le milieu des chimistes qui s'intéressaient à la cuisine, sans que la question soit bien explorée scientifiquement. Pourtant, il n'est pas difficile de mettre la même viande soit dans l'eau froide, soit dans l'eau chaude, en pesant pendant la cuisson : on voit que la perte de masse est supérieure dans l'eau froide... jusqu'à ce que la viande soit dans l'eau bouillante, moment à partir duquel la masse devient exactement égale à celle de la viande mise initialement dans l'eau bouillante (environ 150 minutes) (This, 2007).

Avec le temps, la cuisine est une technique qui s'est progressivement améliorée,

notamment avec l'utilisation de pots et d'autres ustensiles de cuisine. Les études de l'histoire de l'alimentation ont bien montré que, pendant très longtemps, les pots en terre ont été les seuls récipients utilisés, avec un grave inconvénient : ils cassent (Rigault, 2022). Et c'est ainsi que l'on retrouve des quantités considérables de tessons dans les sites anciens fouillés par les archéologues. L'utilisation du fer, pour les plus fortunés, avait évidemment l'avantage d'éviter ces bris, mais avec l'inconvénient de la rouille. Le cuivre, lui, avait l'inconvénient de former du vert-de-gris, qui est parfaitement toxique : selon les cas, l'oxydation par l'atmosphère produit des hydroxycarbonates, des hydrosulfates ou des hydrochlorures (on ne confondra pas ce vert-de-gris atmosphérique avec les acétates de cuivre utilisés comme pigment en peinture). Pour le cuivre, les instances sanitaires, soucieuses de sa toxicité, en ont réduit la quantité considérée comme admissible à 0,07 mg/kg de poids corporel (Efsa, 2023). Et nous devons nous émerveiller de la mise au point de l'acier inoxydable, qui, grâce au chrome qu'il contient, ne se casse pas, n'interagit pas chimiquement avec l'aliment. Il n'est pas le seul puisque des verres spéciaux se sont également ajoutés, mais avec une conduction thermique bien inférieure.

Avec tout cela, que mange-t-on ? Et mange-t-on différemment de ce qu'on mangeait par le passé ? L'examen des livres de cuisine anciens, tel *Le Viandier* de Guillaume Tirel, dit Taillevent (Tirel, 1319), montre

Chapitre de poisson d'eau douce

Le bar.

Cuit en eau et sel, mengiés à la sauce verte.

Sauce verte.

Prennés pain, persil, gingembre, broiés bien et deffaites de verjus et de vin aigre.

Figure 6

La recette de bar donnée par le cuisinier Guillaume Tirel, dans son *Viandier*, ne diffère pas des recettes modernes. Le bar et la sauce verte restent consommés aujourd'hui.

que nos recettes ont bien peu changé : la **figure 6** montre ainsi que l'on mangeait du bar cuit dans de l'eau salée, ce qui se fait encore aujourd'hui, et que le poisson ainsi cuit était servi avec une « sauce verte », qui se sert encore aujourd'hui.

Certes, il y a eu des modifications : par exemple, la sauce mayonnaise est apparue à la toute fin du ^{xix}e siècle, à partir de la sauce connue au moins depuis le Moyen Âge sous le nom de « rémoulade ». Cette dernière était une émulsion à base de moutarde et de matière grasse soit froide, soit chaude : le mot « émulsion » fut introduit en 1560 par Ambroise Paré, chirurgien du roi de France, pour désigner des dispersions d'un liquide dans un autre, par exemple de l'huile dans une solution aqueuse (TLFi, 2025) (**Figure 7**).

Progressivement, la rémoulade a évolué jusqu'à ce

qu'apparaisse la mayonnaise, où la moutarde disparaît au profit du jaune d'œuf, pour assurer l'émulsification. La différence de goût était si

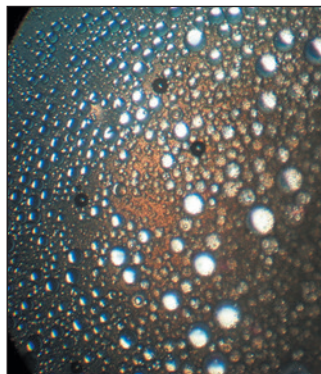


Figure 7

Une émulsion au microscope. Ici, la dispersion de l'huile a été faite à l'aide d'un fouet de cuisine, et la taille des gouttelettes est entre 0,0001 et 0,1 millimètre (les trois formes sombres sont des bulles d'air introduites lors de la préparation de l'échantillon).

considérable que le cuisinier Marie-Antoine Carême (1783-1833) en fit un ingrédient essentiel de sa cuisine (**Figure 8**).

Alors que la technique (la cuisine) évoluait, se développaient aussi les technologies et les sciences des aliments, souvent d'ailleurs avec moins de séparation qu'on ne le fait aujourd'hui. On doit commencer par citer Denis Papin, qui, en 1681, introduisit

un « digesteur » (**Figure 9**), ancêtre de nos cocottes-minute, pour faire le meilleur usage possible des denrées animales, et notamment des os : si les chiens s'en nourrissent, c'est qu'ils renferment des « matières alimentaires » (Papin, 1682 ; d'Arcet, 1829).

D'autre part, les alchimistes avaient bien perçu que les viandes putréfiaient avec une odeur ammoniaquée puissante, alors que les végétaux n'avaient pas ce comportement. À l'époque, on caractérisait cela avec des « sirops de violette », ancêtres de nos indicateurs colorés, en raison des anthocyanes présents dans les fleurs (**Figure 10**).

François Quesnay (1694-1774), en 1736, introduisit le mot « albumine » pour désigner ce « principe » particulier des viandes qui putréfiait en produisant des alcalis, des composés que nous disons aujourd'hui « basiques » (Quesnay, 1736). Toutefois, on aura intérêt à considérer que cette « albumine » n'est pas celle d'aujourd'hui, ou plus exactement n'est pas celles (au pluriel) d'aujourd'hui.

En effet, au XVIII^e siècle, tout d'abord, Jacopo Beccari, à Bologne, avait détecté un « principe animal » (qui fut nommé « gluten » bien plus tard, au XIX^e siècle) dans la farine de blé ; et, en 1759, le chimiste Johannes Kesselmeyer proposa une méthode de « lixiviation » pour l'extraire : il s'agit de malaxer de la farine de blé avec de l'eau, pour faire une boule de pâte que l'on presse ensuite doucement dans un grand récipient d'eau pure ;



Figure 8

Marie-Antoine Carême (1783-1833) fut le cuisinier de plusieurs rois ou empereurs. Il utilisa largement la sauce mayonnaise (qu'il nommait alors « magnonnaise »), alors récemment introduite, pour ses préparations de banquet et sa cuisine « monumentale ».

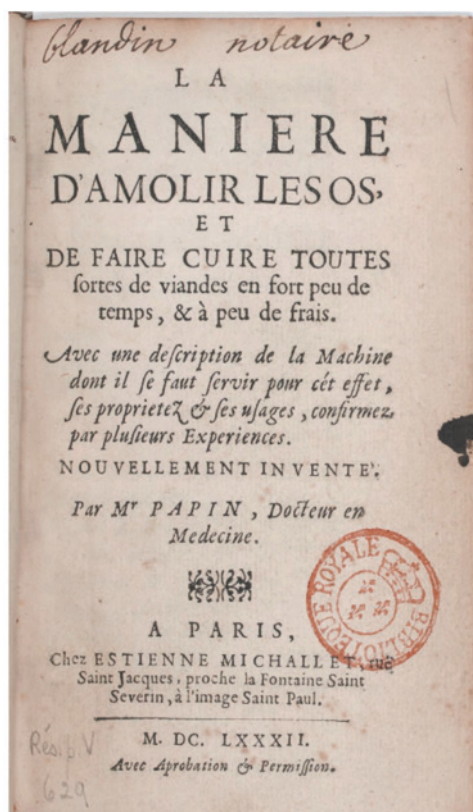
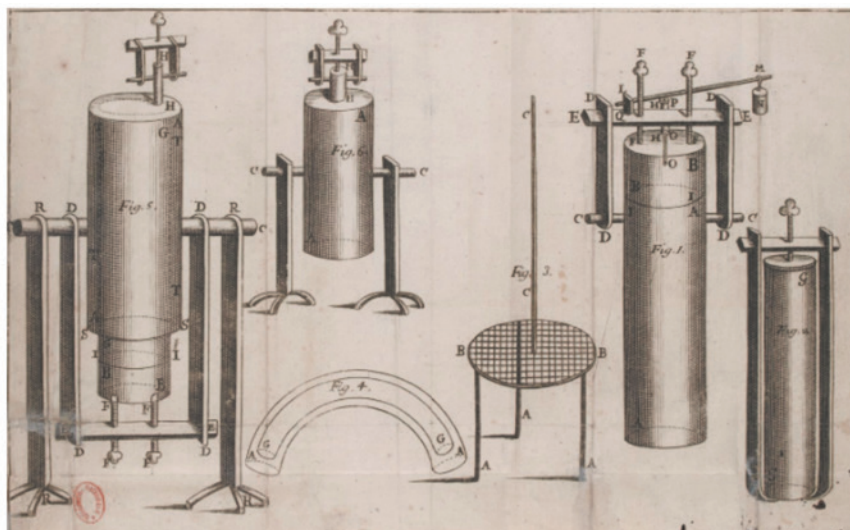


Figure 9

Le digesteur (en haut) introduit par Denis Papin pour confectionner des « bouillons d'os ». L'illustration est extraite de son livre publié en 1682.



Figure 10

En 1664, le chimiste irlandais Robert Boyle proposa des décoctions de violette (en haut) pour détecter les acides et les «alkalis» (bases). En furent dérivés nos modernes papier pH, produits initialement à partir d'anthocyanes, ces pigments de fleurs et de fruits. En bas, la structure moléculaire de la pélagonidine, notamment présente dans les fleurs de violette (*Viola odorata*).

en sort une poudre blanche (l'amidon) tandis que reste entre les doigts une matière

«viscoélastique» (à la fois visqueuse et élastique), qui est le gluten (**Figure 11**). En réalité, cette matière est un mélange de diverses protéines nommées «gliadines» et «gluténines» (essentiellement).

À la même époque, Geoffroy le Cadet (1685-1752) étudia le bouillon, suivi par Lavoisier, qui écrivit en 1783 (Lavoisier, 1783) : «*La Société royale de médecine ayant été consultée, par le ministre de la marine, sur le régime qu'on doit faire observer aux malades dans les hôpitaux, elle s'est aperçue, dans les conférences nombreuses qui ont été tenues à cet effet, qu'on n'avait pas de connaissances assez précises sur la nature du bouillon qu'on donne aux malades, sur la proportion d'eau et de viande qu'on donne aux malades pour le composer, sur la quantité de matière gélatineuse ou extractive qu'il contient, sur les différences qu'apportent dans sa qualité les différentes espèces de viandes ; sur le degré de force que doit avoir le bouillon, suivant les différents états de maladie ou de convalescence ; enfin, sur les caractères au moyen desquels on peut connaître sa qualité. [...] M. Geoffroy a communiqué à l'Académie des sciences, en 1730, un travail sur le même objet ; mais, comme son but était différent du mien, nous ne nous sommes rencontrés ni dans les moyens, ni dans les résultats. L'objet de ce chimiste était de connaître, par l'analyse chimique, la nature des différentes substances nourissantes, soit animales, soit végétales ; en conséquence, dans les expériences qu'il a faites sur les chairs des animaux, il les a successivement fait bouillir dans un*

grand nombre d'eaux différentes, qu'il renouvelait jusqu'à ce que la viande fût entièrement épuisée de toute matière extractive ; alors il faisait évaporer toute l'eau qui avait passé sur la viande, et il obtenait ainsi séparément toute la partie gélatineuse et extractive qu'elle contenait. Mon objet, au contraire, était d'acquérir des connaissances purement pratiques et de déterminer, non ce que la viande contient de substances gélatineuse et extractive, mais ce qu'elle en peut communiquer par une ébullition lente et longtemps continuée, à une quantité donnée d'eau. » Et Lavoisier découvrit que l'on extrait plus à grande eau qu'à petite eau... pour des raisons qui restent à comprendre.

Revenons aux protéines, alors nommées « albumine » au singulier. À l'époque, l'analyse chimique était encore très rudimentaire. Grâce à Lavoisier, elle devient « élémentaire », ce qui signifie que l'on dosait les « éléments » (carbone, oxygène, hydrogène, azote). En tout cas, par ces techniques et à la découverte du gluten, Antoine-François Fourcroy (1755-1809) se mit à évoquer des « albumines végétales ». Puis, progressivement, on découvrit bien des composés du même type, et **le concept de « protéines » fut proposé vers 1910, pour remplacer celui d'albumine ou d'albumines.** Aujourd'hui, on a conservé le mot « albumine », mais pour désigner une catégorie particulière de protéines : globulaires, solubles dans l'eau.

À la même époque, **Antoine Augustin Parmentier (1737-1813) explorait la pomme de**



Figure 11

Quand on malaxe doucement dans de l'eau une boule de pâte faite de farine de blé et d'eau, on voit une poudre blanche en sortir : c'est de l'amidon. L'opération, nommée « lixiviation », laisse entre les doigts une matière plus jaune, le gluten, et qui est faite de nombreuses sortes de protéines.

terre par des travaux scientifiques d'une part, technologiques de l'autre, mais aussi techniques et de propagande (Parmentier, 1783). Il y avait alors un petit âge glaciaire qui réduisait dramatiquement les récoltes, au point que l'on mourait de froid et de faim en pleine nature, le blé manquant plusieurs années de suite (Corvol-Dessert, 2025). Parmentier, pharmacien militaire, revint d'Allemagne où il mangea des pommes de terre : il comprit que, la culture de ces dernières supportant le froid, il y avait là un moyen d'aider les populations. À l'époque, toutefois, l'Académie de médecine avait publié que les pommes de terre, de la famille des Solanacées, parfois toxiques (comme la mandragore *Mandragora officinarum* L. ou la belladone *Atropa belladonna* L.) devaient être évitées : elles auraient donné la lèpre. Mais Parmentier explora

davantage la question, et publia finalement son *Examen chymique des pommes de terre* : il y mêle des données scientifiques et des données techniques. Par exemple, on lit : « *L'eau dans laquelle ont cuit les Pommes de terre étant verte, j'ai fait quelques recherches pour découvrir l'origine de cette couleur, soupçonnant qu'elle n'était pas due aux Pommes de terre en totalité ; je fis donc bouillir à part la peau des Pommes de terre, & la décoction, au lieu d'être verte, prit une couleur semblable à celle d'une forte infusion de thé, laquelle étoit un peu âcre, sans contenir rien d'acide, ainsi que je l'ai jugé à l'aide d'une dissolution martiale. [...] Les Pommes de terre, dépouillées de leur première peau, se décolorent par le contact de l'eau bouillante qui devint verte aussitôt, ce qui me fit présumer d'abord que la couleur rouge en étoit la seule cause : pour m'en assurer davantage, je séparai avec beaucoup de soin la surface rouge des Pommes de terre, & l'eau devint verte en même temps qu'elle prit une saveur un peu âcre.* »

Rétrospectivement, il est intéressant d'observer que Parmentier eut à établir que les pommes de terre étaient « saines », alors que les trois premiers millimètres sous la surface des tubercules contiennent des glycoalcaloïdes (a-solanine, a-solanidine, a-chaconine), et, si l'ANSES (Agence nationale de sécurité des aliments) n'a pas signalé de difficultés à la consommation de pommes de terre non pelées, Aziz *et al.* (2009) montrent que la pratique actuelle qui consiste à consommer les pommes de

terre avec leur peau conduit à consommer des quantités de glycoalcaloïdes parfois supérieures à la limite de consommation (200 mg/kg de masse fraîche, pour la totalité des glycoalcaloïdes). Autrement dit, il faut s'étonner que le public, qui cherche par ailleurs des aliments « sains » et « naturels », ignore que **le cortex des tubercules contient ces alcaloïdes toxiques, et thermorésistants de surcroît, jusqu'à des températures (285 °C) bien supérieures aux températures couramment utilisées pour les frites profondes.**

Parmentier ne s'est pas limité à la chimie des pommes de terre, et il est allé jusqu'à de la cuisine : « *J'ai fait un gâteau qui a très-bien levé, avec parties égales de pulpe de Pommes de terre & de farine de froment, en y ajoutant du beurre, des œufs, du sel & un peu de levure ; il était même si délicat & si bon, qu'il eût été difficile au plus habile gourmet d'y distinguer la saveur des Pommes de terre : cette saveur est cependant notable dans tous les pains où les Pommes de terre se trouvent, quelle qu'en soit la dose : elle me paroît semblable, si je ne me trompe, à celle du seigle. Je n'ai garde de passer sous silence cette remarque, dans la crainte qu'un jour des gens intéressés, ou de mauvaise foi, ne commettent quelques fraudes.* »

Surtout, Parmentier fut un remarquable propagateur, n'oubliant pas, comme Charles-Maurice de Talleyrand (« *Donnez-moi un bon cuisinier, et je vous ferai de bons traités* ») que la table est un lieu de pouvoir : « *La facilité avec laquelle nos Pommes de terre se prêtent à toutes fortes*

de ragoût m'a fait naître l'idée d'en composer un repas, auquel j'invitai plusieurs Amateurs; & au risque de passer pour être atteint de la manie des Pommes de terre, je vais terminer cet Examen par en faire la description : c'étoit un dîné. On nous servit d'abord deux potages, l'un de purée de nos racines, l'autre d'un bouillon gras, dans lequel le pain de Pommes de terre mitonnoit assez bien sans s'émietter; il vint après une matelote suivie d'un plat à la sauce blanche, puis d'un autre à la maître-d'hôtel, & enfin un cinquième au roux. Le second service consistoit en cinq autres plats non moins bons que les premiers; d'abord un pâté, une friture, une salade, des beignets, & le gâteau économique dont j'ai donné la recette; le reste du repas n'étoit pas fort étendu, mais délicat & bon; un fromage, un pot de confiture, une assiette de bifcuit, une autre de tartes, & enfin une brioche aussi de Pommes de terre, composoient le désert; nous primes après cela le café, aussi décrit plus haut. Il y avait deux sortes de pain; celui mêlé de pulpe de Pommes de terre & farine de froment, représentoit assez bien le pain mollet; le second, fait de pulpe de Pommes de terre, avec leur amidon, portoit le nom de pain de pâte ferme; j'aurais désiré que la fermentation m'eût mis à même de faire une boisson de nos racines, pour contenter pleinement mes convives, & dire avec fondement : aimez-vous les Pommes de terre, on en a mis partout. Chacun fut gai; & si les pommes de terre sont assouplissantes, elles produisirent sur nous un effet tout contraire. »

La stratégie de Parmentier ? Les analyses *a posteriori* sont souvent sujettes à caution,

mais il n'est pas douteux que la mise en œuvre de l'argument d'autorité ait été principale : faire manger des pommes de terre à la famille royale fut essentiel.

Dans l'examen des travaux anciens de chimie des aliments, il faut prendre garde aux termes : de même que le mot « albumine » n'a pas le même sens aujourd'hui et par le passé, les acceptions des termes « chlorophylle », « lécithine » ou « osmazôme » ont changé.

Le mot « **chlorophylle** », tout d'abord, fut introduit en 1818 par les pharmaciens français Joseph Bienaimé Caventou (1795-1877) et Pierre Joseph Pelletier (1788-1842), de l'École de pharmacie de Paris, pour désigner la matière que les cuisiniers extrayaient des végétaux verts, et, notamment, le « vert d'épinard » [encore utilisé aujourd'hui]. On l'obtient en broyant des épinards, puis en chauffant doucement le jus; se sépare alors, en surface, une mousse d'un beau vert printanier; dessous, un liquide brun, qui décante. On récupère la partie verte, que l'on utilise ensuite pour colorer diverses préparations (telle la mayonnaise), en vue de donner une fraîche couleur. Il y a quelques siècles, le vert était associé au printemps, et, par là, dans les tableaux et statues de la religion catholique, à la résurrection du Christ. D'où son importance culinaire dans la cuisine française.

Caventou et Pelletier, intéressés par cette matière colorante, reconnurent que leur apport n'était pas considérable :



Figure 12

Séparation, par chromatographie sur plaque, des divers pigments d'un « vert de haricot ». C'est la somme de toutes les couleurs qui fait le vert caractéristique du végétal.

La position verticale de l'image reflète la manière dont la chromatographie est effectuée : verticalement, le bas trempant dans un solvant qui montre par capillarité.

Crédit : Juan Valverde et Hervé This.

« Nous n'avons aucun droit pour nommer une substance connue depuis longtemps, et à l'histoire de laquelle nous n'avons ajouté que quelques faits ; cependant nous proposerons, sans y mettre aucune importance, le nom de chlorophylle. »

Et cette « chlorophylle » fut progressivement analysée : les chimistes George Gabriel Stokes (1864), H. C. Sorby (1873), Mikhaïl Tswett (1906) et Richard Willstätter (1872-1942) découvrirent que la couleur des végétaux verts est due à la fois à des composés verts ou bleus, ou jaunes, ou orange ou rouges. L'un des progrès importants de l'analyse chimique fut la mise au point de la technique de chromatographie sur couche mince : on dépose une fine poudre sur une plaque rigide, avant de placer, à la base de la plaque disposée verticalement, un mélange de composés que l'on veut séparer ; si l'on place la partie inférieure de la plaque dans un solvant, ce dernier monte dans la poudre par capillarité, entraînant les divers composés du dépôt à des vitesses différentes. Se séparent alors des taches qui peuvent avoir des couleurs différentes : chacune correspond à un composé particulier (Figure 12). Parmi les composés séparés du vert d'épinard, certains sont rouges, d'autres orange, d'autres encore jaunes, et d'autres verts ou bleus, correspondant à des chlorophylles, à leurs dérivés (phéophytines, phéophorbides, etc.) ou à des caroténoïdes. Pour les composés donnant des taches vertes, on a ensuite conservé le nom de « chlorophylle »... mais au pluriel, car

on a identifié de nombreuses chlorophylles (Figure 13) : a, a', b, b', c... **Aujourd'hui, parler de la chlorophylle n'a plus aucun sens : il faut parler des chlorophylles, au pluriel.**

Pour la « **lécithine** », c'est Théodore Gobley (1811-1876) qui réussit à l'extraire du jaune d'œuf et qui créa le nom à partir du grec *lekythos*, qui signifie « jaune d'œuf ». La nature chimique de cet extrait resta inconnue jusqu'en 1874, quand les chimistes découvrirent que la lécithine est un mélange de plusieurs composés. Là où la cacophonie s'installe – ce qui fait le lit des fraudes, des malhonnêtetés, des incompréhensions, etc. –, c'est que les publications techniques ou technologiques n'ont pas suivi les progrès de la chimie, et que l'on trouve des définitions diverses et incohérentes : certains définissent le produit commercialisé sous le nom de « lécithine » comme « un mélange de lipides polaires (glycolipides, phospholipides) et de triglycérides, obtenu à partir de tissus animaux ou végétaux » ; d'autres désignent sous ce nom « des lipides contenant du phosphore, extraits des œufs ou du tissu cérébral » ; et une troisième définition désigne la phosphatidylcholine. Selon l'International Lecithin & Phospholipids Society (ILPS, 2020), **la lécithine serait « un mélange complexe de glycérophospholipides d'origine végétale, animale ou microbienne, contenant des quantités variées de triglycérides, d'acides gras, de glycolipides, de stérols, et de sphingophospholipides »**. Toutefois, une définition commune a été

donnée en 2019 par l'Union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAC) : les **lécithines** sont des esters choliques d'acides phosphatidiques» (Figure 14).

2 Un passé encore actuel

Comme Lavoisier et bien d'autres, je crois que la confusion entre science et technologie est néfaste, parce que l'innovation qui se limite à l'examen des techniques est moins puissante que celle qui fait usage des résultats scientifiques. Par exemple, on doit répéter que, sans les travaux d'Albert Einstein sur la relativité, nous n'aurions pas, aujourd'hui, de positionnement par satellite. En matière d'aliment, la confusion est, hélas, répandue : l'analyse d'une table des matières récente d'une grande revue de «chimie des aliments» révèle que la quasi-exclusivité des travaux publiés est constituée de travaux technologiques, et non scientifiques (This vo Kientza, 2024).

Ce déséquilibre a des conséquences étonnantes : par exemple, il est paradoxal

que, encore au début des années 2000, l'industrie alimentaire produisant des bouillons de légumes par milliers de tonnes, on ignorait comment les composés d'une carotte passent en solution lors de la confection d'un bouillon. Aujourd'hui encore, plus de 5 millions d'articles scientifiques sont consacrés au thé, mais pas un ne décrit les mécanismes du passage des composés des feuilles vers l'eau qui fera la boisson. Ou encore, alors que 47 % des sauces classiques françaises comportent du vin, qui est cuit, aucun article n'envisage les modifications de composition de ce vin au cours de la cuisson !

On voit, avec ces exemples, que les sciences de l'aliment sont bien insuffisantes, et c'est la raison pour laquelle, en 1988, le physicien Nicholas Kurti (1908-1998) et moi-même avons introduit la discipline scientifique que nous avons nommée «gastronomie moléculaire et physique» : nous voulions focaliser des études sur les mécanismes des phénomènes qui surviennent lors des transformations culinaires. Insistons :

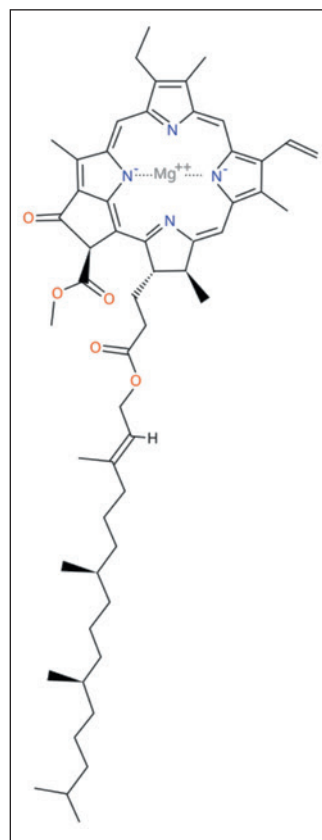


Figure 13

Structure moléculaire des chlorophylles a et b. Chaque sommet ou extrémité d'un segment est occupé par un atome de carbone. Les lettres C, N, O, H et Mg représentent respectivement des atomes de carbone, d'azote, d'oxygène, d'hydrogène et de magnésium.

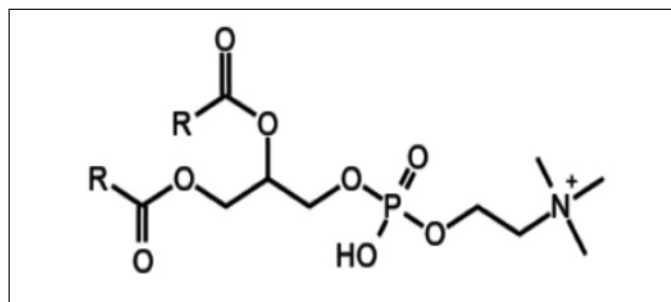


Figure 14

Formules des lecithines. Les lettres R désignent des «restes» hydrocarbonés variés.

même si la gastronomie moléculaire et physique part de l'étude de la « cuisine », il ne s'agit pas de travaux technologiques, mais bien d'explorer les mécanismes, de faire des découvertes, non des inventions. Ce projet véritablement scientifique se poursuit aujourd'hui : plus de 34 équipes de recherche ou d'enseignements, dans divers pays du monde, s'intéressent à la gastronomie moléculaire et physique et ont contribué, pour beaucoup d'entre elles, au *Handbook of molecular gastronomy* (Burke *et al.*, 2021) – 900 pages avec 150 auteurs de 23 pays !

Pour autant, on a vu qu'il reste beaucoup à faire, et c'est d'ailleurs un encouragement pour tous les jeunes qui visent une carrière dans la science ou dans la technologie. Ainsi, nos masters technologiques d'AgroParisTech cherchent à former les élèves ingénieurs à une technologie fondée sur la connaissance scientifique.

Considérons deux résultats de gastronomie moléculaire et physique, l'un très ancien, quasi fondateur, et l'autre bien plus récent et plus puissant.

Pour le travail le plus ancien, un contexte doit être donné : **en 1969**, Kurti écrivait qu'il était paradoxal qu'on connaisse mieux la température à l'intérieur du Soleil qu'à l'intérieur d'un soufflé. Et il est vrai que, à l'époque, **la température dans les soufflés était inconnue. Pour expliquer le gonflement**, on avançait – sans véritable base scientifique – que les soufflés auraient gonflé en raison d'une dilatation des bulles d'air apportées par

les blancs d'œufs battus en neige qui sont utilisés pour confectionner la préparation du soufflé. En 1980, alors que je m'étais intéressé à une « précision culinaire » donnée par des cuisiniers professionnels, à savoir que les soufflés auraient mieux gonflé si les jaunes avaient été ajoutés deux par deux, plutôt que tous ensemble, j'ai commencé par réfuter cette idée. Puis mes expérimentations m'ont montré que des différences apparaissaient entre des soufflés faits à partir de blancs d'œufs battus en neige ferme ou non (This, 2002). Surtout, mes mesures de température et de pression à l'intérieur des soufflés m'ont montré que le mécanisme de gonflement des soufflés n'avait rien à voir avec celui qui était proposé par la théorie, et j'ai fini par établir que si les soufflés gonflent à la cuisson, c'est principalement que l'eau présente dans la préparation s'évapore.

Cette observation scientifique a des conséquences technologiques : notamment, les soufflés gonflent mieux si l'on évapore leur eau par le fond, poussant les couches vers le haut. Il est intéressant de rappeler les résultats d'une expérience toute simple qui a montré qu'un soufflé de 100 g a perdu environ 10 g à la cuisson : avec la production de plus de 15 l de vapeur, il y avait largement de quoi faire gonfler les soufflés. D'ailleurs, lors d'un séminaire de gastronomie moléculaire, nous avons fait gonfler des soufflés sans battre les blancs d'œufs en neige, simplement en nous basant sur le mécanisme plus juste qui avait été découvert.

Il reste beaucoup à faire à propos des soufflés si l'on se souvient que la méthode des sciences de la nature vise à réfuter des théories par nature insuffisantes, mais passons à un autre système : **les sauces émulsionnées**. Avant l'introduction de la gastronomie moléculaire et physique, il y avait, notamment à propos de la sauce mayonnaise, des dizaines d'idées plus ou moins farfelues à propos de cette sauce : par exemple, il était dit, écrit, enseigné que les femmes ayant leurs règles n'auraient pas pu la réussir ; ou que la sauce aurait raté en période de pleine lune, ou quand il y aurait eu des courants d'air, quand du blanc d'œuf serait resté présent avec le jaune d'œuf, etc. Les expériences ont facilement montré que la plupart de ces idées étaient fausses. Mais pourquoi, en cas de réussite, obtenait-on une émulsion ? Les sciences et technologies de l'aliment avaient également des idées fausses. Par exemple, il aurait fallu des pH particuliers, ou pas trop de sel ; il aurait fallu battre avec un fouet en fer dans une bassine en cuivre, afin d'avoir un « effet pile électrique ». Encore dans les années 1990, il était prétendu que les sauces auraient dû leur structure émulsionnée aux phospholipides... mais la production d'une émulsion à partir d'eau et de protéines a bien montré que ces dernières sont des agents bien plus efficaces. Et aujourd'hui, on s'intéresse à la structure du jaune d'œuf, fait de « granules » dispersés dans un plasma, pour comprendre l'émulsification. L'histoire n'est pas terminée.

Terminons cet examen des travaux de la gastronomie moléculaire et physique avec un résultat d'ampleur bien supérieure : l'introduction d'un formalisme pour décrire la structure physique des aliments. La proposition initiale (2001) a évolué progressivement pour former ce qui est nommé aujourd'hui « NDSF », pour *new dispersed system formalism*, « nouveau formalisme des systèmes dispersés » (This vo Kientza, 2021). Il s'agit d'abord de choisir l'échelle à laquelle on veut faire la description d'un système physico-chimique. Pour comprendre ce point, on considérera un aliment à l'œil nu et l'on observera qu'il a une structure macroscopique. Puis, si nous regardons chacune de ses parties au microscope, nous verrons une structure microscopique. Continuons à grossir, et nous détecterons des structurations nanoscopiques, jusqu'à des organisations supramoléculaires.

Une échelle de description ayant été choisie, on s'intéresse aux « phases » constitutives : gaz, « eau » (solutions aqueuses), « huile » (matière grasse à l'état liquide), solide. Dans les aliments, le NDSF décrit les phases et l'organisation topologique de ces dernières : on s'intéresse moins aux formes qu'à l'organisation des phases les unes par rapport aux autres, ce que l'on désigne à l'aide d'opérateurs, au nombre de cinq : / pour une dispersion aléatoire, + pour la coexistence de deux phases dans une troisième, σ pour une superposition ou une juxtaposition, @ pour une inclusion, x pour une imbrication de deux phases continues.

Enfin on décrit la dimension mathématique des éléments

constitutifs : D3 désigne un objet à l'échelle considéré, à trois dimensions, un bloc en quelque sorte ; D2 désigne des objets de type feuille, pour lesquelles une dimension est plus petite que les deux autres d'au moins un ordre de grandeur, et c'est ainsi qu'on a également des lignes D1 ou des points D0.

Avec ces trois types de symboles, pour les phases, les dimensions et les organisations, il y a une quinzaine de symboles qui, jusqu'à ce jour, ont toujours permis de décrire tous les systèmes alimentaires et d'autres systèmes formulés.

Ce formalisme a été utilisé pour l'étude d'un type de système très important pour les aliments à savoir les gels, définis par l'Union internationale de chimie pure et appliquée comme des solides emplis de liquide. Cette définition est très vaste puisqu'elle s'applique aussi bien aux gels de gélatine, pour lesquels il y a deux phases continues (eau et solide), qu'aux tissus végétaux, pour lesquels il y a une dispersion aléatoire de phase aqueuse (l'intérieur du cytoplasme des cellules

végétales) dans l'ensemble du tissu (**Figure 15**). Cela correspond d'ailleurs à des propriétés bien différentes, notamment en termes de diffusion : alors qu'un colorant placé à la surface d'un gel de gélatine peut diffuser dans l'ensemble du système, le même colorant posé à la surface d'un tissu ne diffusera que très localement et par des mécanismes très différents.

Combien existe-t-il de gels ? La mise en œuvre d'un programme informatique fondé sur le NDSF a finalement montré qu'il en existe 16, et 16 seulement, pour les gels les plus simples, avec deux phases. Puis, quand on considère des gels plus complexes, où la phase liquide coexiste avec d'autres phases, à côté de la phase solide structurante, alors on obtient un nombre de gels plus complexes bien supérieur, et notamment égal à 1489 pour la classe 2. Un travail analogue a été effectué pour les suspensions pour lesquelles il existe 6 suspensions de classe 1, et 362 suspensions de classe 2.

Pour tous les systèmes ainsi considérés, il y a des « bioactivités » différentes : les composés présents dans le système ne sont pas libérés de la même façon, à la même vitesse, par les mêmes mécanismes dans le milieu où le système est placé. Et c'est ainsi que s'impose un travail de recherche des relations entre la formule et la bioactivité. Un tel travail est en cours. Évidemment, le NDSF est un formalisme qui permet la description des systèmes,

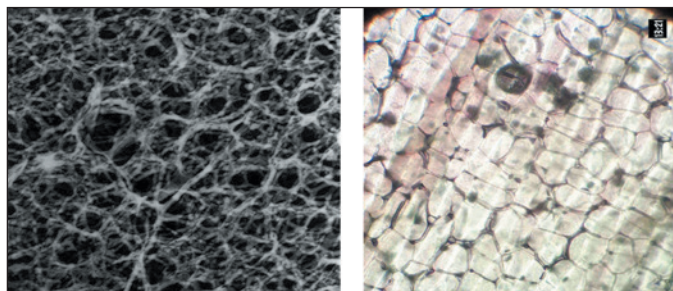


Figure 15

Comme le gel de gélatine (à gauche), le tissu végétal (à droite) est formellement un « gel ».

mais il permet aussi l'innovation : n'importe quelle formule trouvée et écrite peut correspondre à un système formulé qui aura donc des propriétés physiques, chimiques ou biologiques particulières.

D'ailleurs, le NDSF a immédiatement conduit à des propositions technologiques : ayant observé que les dispersions étaient à la base de nombreux systèmes colloïdaux, nous avons imaginé de mettre en série et en parallèle des «micro-mélangeurs». Il a suffi d'une matinée pour assembler trois pompes et trois micro-mélangeurs pour obtenir un système physico-chimique fondé sur une formule NDSF simple. Puis, dans la foulée,

des collègues de Mainz ont produit un micro-mélangeur plus complexe, avec 11 éléments de mélange, qui a été couplé à un ordinateur (sur lequel on entrait des formules) et à des pompes : ce «pianocktail» a été montré en public en 2002 (*Figure 16*).

La cuisine moléculaire : rénover les techniques

Passons maintenant à des applications de la gastronomie moléculaire et physique. La stratégie de Parmentier a été explicitement reproduite dès le début des années 1980, quand il s'est agi de rénover cette activité très périmée qu'était la « cuisine ». Ayant observé la médiocrité de nos systèmes de

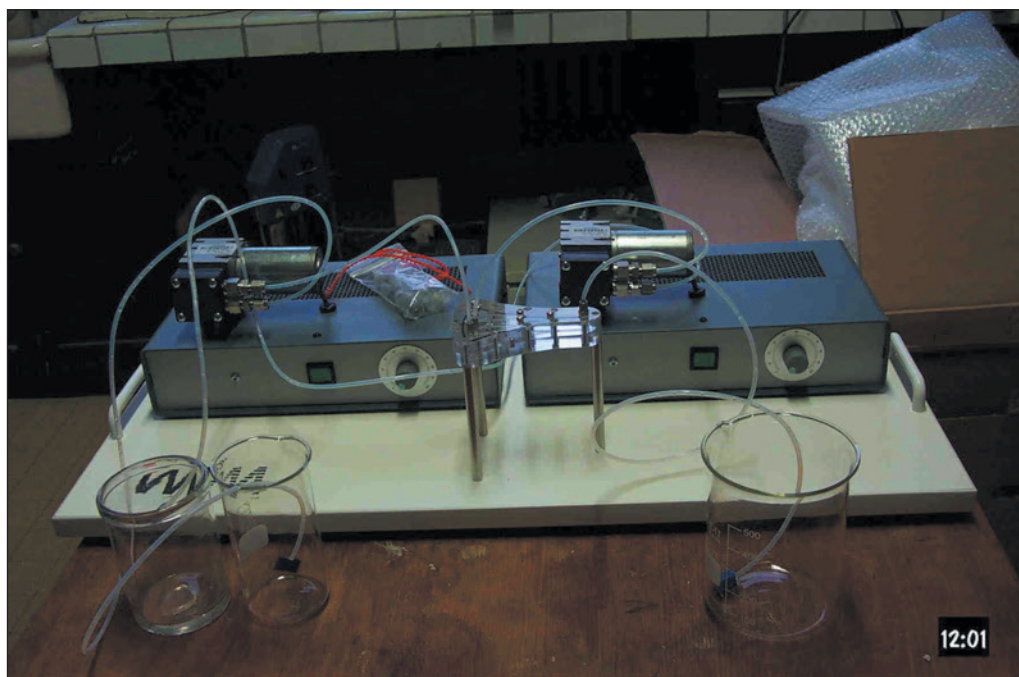


Figure 16

Le « pianocktail » (à gauche), avec son système à plusieurs micro-réacteurs, a été réalisé à Mainz sous la direction de Volker Hessel.



Figure 17

Dans les laboratoires de chimie, les ampoules à décanter permettent de séparer deux liquides non miscibles. En cuisine, ils peuvent être utilisés pour dégraisser les bouillons.

chauffage, puis ayant considéré combien nos pratiques culinaires étaient peu différentes de celles du passé, nous avons conclu qu'il était de la toute première importance de modifier les pratiques culinaires, notamment en faisant évoluer les ustensiles et les méthodes. C'est ce qui a été nommé la « cuisine moléculaire », laquelle s'est aujourd'hui introduite dans l'ensemble des pays du monde (plus de quatre millions de pages Google évoquent la cuisine moléculaire).

Les nouvelles techniques permettant de nouveaux usages, la cuisine a évolué avec la cuisine moléculaire, au point que les cuisiniers professionnels et amateurs, même ceux déclarant ne pas aimer la cuisine moléculaire, ne savent parfois plus qu'ils sont passés à une pratique modernisée, utilisant par exemple des siphons pour obtenir le foisonnement des sauces, des fours modernisés pour cuire à basse température ou confondant l'agar-agar, les alginates et divers carraghénanes avec la gélatine.

Pourtant, nombre de matériels de laboratoire mériteraient d'être mieux utilisés en cuisine. Par exemple, pour la clarification des bouillons, la technique classique impose, une fois le bouillon produit, de le refroidir pour récupérer la graisse, puis de le réchauffer en lui ajoutant un blanc d'œuf battu en neige pour emprisonner les particules qui le troublent, avant de filtrer l'ensemble dans un linge plié en quatre, tapissant un « chinois ». Il serait si simple d'utiliser une ampoule à décanter, pour la séparation

de la matière grasse, et des filtres de laboratoires, pour clarifier (**Figure 17**) ! Très généralement, l'ensemble des procédés classiques de techniques culinaires mérite d'être révisé à l'aune de la technique moderne dont nous disposons dans les laboratoires.

On observera que la stratégie de Parmentier, mise en œuvre dans le cas de la cuisine moléculaire, a eu l'inconvénient de laisser penser que cette pratique était coûteuse : la nouvelle technique a d'abord été proposée aux cuisiniers les plus en vue. Cela a sans doute retardé un peu l'adoption des techniques modernes par le public, qui était en réalité visé. En revanche, les explorations scientifiques de la gastronomie moléculaire qui sous-tendaient le développement de la cuisine moléculaire ont conduit à des innovations par centaines, et, surtout, à un examen critique des techniques jusque-là mises en œuvre.

Un exemple parmi mille : alors que les mousses au chocolat ont toujours été produites en mélangeant du chocolat fondu à du blanc d'œuf battu en neige, le « chocolat Chantilly » (introduit en 1996) [This, 1996] consiste à faire foisonner une émulsion de chocolat dans une solution aqueuse, ce qui conduit à économiser les blancs d'œufs, inutiles techniquement. Il s'agit donc à la fois de bon sens et d'économie familiale.

Mieux, le développement de la gastronomie moléculaire s'est accompagné de l'introduction, dans l'enseignement général ou professionnel, de nouveaux programmes qui sont venus

pallier la disparition des activités culinaires. Cette suppression était justifiée par le fait que l'École ou le Collège doivent former des citoyens éclairés, et non des exécutants de protocoles (ce que sont les utilisateurs des recettes). En d'autres termes, les systèmes nationaux d'enseignement sont plus utiles pour l'enseignement de la technologie que de la technique, ce qui reste une question débattue par l'encadrement du secteur de l'Hôtellerie-Restauration.

Inversement, les jeunes citoyens devant être formés

à une saine consommation alimentaire, il a semblé indispensable de réintroduire l'enseignement de notions culinaires, mais en les incluant dans un cadre culturel plus large. Et c'est ainsi que, le 17 septembre 2000, en Sorbonne, le ministre de l'Éducation nationale d'alors a introduit au niveau national, pour le Premier Degré, les « Ateliers expérimentaux du goût », suivis, en 2004, par les « Ateliers Science & Cuisine », pour les Collèges, en relation avec les programmes scolaires (This, 2000).

Conclusion

Et demain ?

Comment l'alimentation humaine peut-elle encore évoluer ? Nous avons vu que de nombreuses questions demeurent à propos des mécanismes des phénomènes : les sciences des aliments et, notamment, la gastronomie moléculaire et physique ont de quoi faire. Du point de vue technique, on peut observer que, si des progrès ont été faits, entre autres, en termes de cuisson des aliments (les plaques à induction ou les fours à micro-ondes ont des rendements énergétiques bien supérieurs à ceux des systèmes qui consomment du gaz ou d'anciennes plaques électriques), se pose la question de la sécurité alimentaire : les projections semblent maintenant bien acceptées d'une population entre 9 et 10 milliards d'individus, qu'il faudra nourrir. Ne doit-on pas, tout d'abord, s'attaquer aux pertes et aux gaspillages ? Les quantités perdues sont discutées, avec des valeurs considérables dans les pays les moins industrialisés, et des causes diverses

sont évoquées, mais on observera que le transport des tissus végétaux ou animaux puis leur stockage dans les domiciles particuliers s'accompagnent d'une péremption, notamment parce que les micro-organismes ambiants trouvent dans ces tissus des conditions favorables à leur développement (la loi de 1905 interdit la vente de produits non marchands comme le sont beaucoup de denrées endommagées). D'autre part, les systèmes de froid sont critiqués pour leur forte consommation d'énergie. Enfin, on observera que le transport des ingrédients alimentaires est un gaspillage énergétique, dans la mesure où les ingrédients, étant principalement des tissus végétaux ou animaux, sont composés de 40 à 99 % d'eau !

Les coûts de l'énergie augmentant, qui accompagnent l'accès d'une population croissante à l'énergie, doivent sans tarder faire reconsidérer cette dernière question. Et c'est ainsi qu'a été **proposée la «cuisine de synthèse», ou «cuisine note à note», qui, supplantant la «cuisine moléculaire», conduirait à utiliser des composés purs, obtenus par fractionnement ou par craquage des tissus végétaux ou animaux, sur les lieux de production.** Des fractionnements et des craquages sont déjà effectués industriellement dans le cas du lait ou du blé, et les techniques (essentiellement membranaires) mises en œuvre sont déjà au point. La proposition est d'utiliser ces techniques pour toutes les productions de l'agriculture et de l'élevage, et non seulement les deux filières où elles sont utilisées aujourd'hui. À noter que ces opérations de fractionnement s'apparentent en tous points, du point de vue conceptuel, à la lixiviation de l'amidon dans les pâtons de farine malaxée avec de l'eau, telle que la pratiqua initialement Kesselmeyer.

La cuisine de synthèse n'est pas une vue de l'esprit, puisque de nombreux cuisiniers l'explorent

déjà et qu'elle fait l'objet d'enseignements à des élèves ingénieurs agroalimentaires. D'une part, des cuisiniers individuels testent les nouvelles propositions depuis 2009, quand, avec notre aide, le cuisinier français Pierre Gagnaire fut le premier à servir un plat de cuisine de synthèse dans un restaurant, à l'hôtel Mandarin Oriental de Hong Kong, lors d'un repas couvert par la presse internationale. Depuis, les initiatives se sont multipliées. D'autre part, depuis plus de dix ans, des élèves ingénieurs, des cuisiniers et du public participent aux concours internationaux de cuisine de synthèse (International Centre of Molecular and Physical Gastronomy, 2025). De nombreuses autres actions de promotion sont en cours.

La cuisine de synthèse est l'occasion de poser de nombreuses questions artistiques, techniques, technologiques, économiques, sociologiques, scientifiques (au sens des sciences quantitatives). Par exemple, le remplacement des tissus vivants frais par des fractions sèches conduit à repenser la notion d'additifs ou d'aromatisants (fautivement nommés «arômes» par la réglementation actuelle, qui devra changer). Les nouveaux produits, d'ailleurs, doivent faire l'objet de nouvelles catégorisations par les services des douanes, mais aussi par la répression des fraudes. La législation sur la dénomination des aliments, également, sort bouleversée par la cuisine de synthèse.

D'un point de vue nutritionnel et toxicologique, les questions s'imposent également : comment construire une alimentation quotidienne qui serait entièrement de synthèse ? La biodisponibilité des nutriments devient alors une question essentielle, qui doit être explorée en relation avec la construction (technique, artistique) de la microstructure des aliments. De ce fait, on comprend que la question de la construction multi-échelle des aliments devienne un

sujet d'étude passionnant, dans la mesure où il détermine à la fois l'appréciation sensorielle des aliments et la bioactivité des composés bioactifs qu'ils renferment.

Cette cuisine s'imposera-t-elle? Sans avoir aucune certitude, on devra chercher des éléments de réponse en tenant compte de divers éléments : (1) l'augmentation de la population dans le monde s'accompagnera nécessairement d'une réorganisation des circuits alimentaires; (2) l'augmentation des coûts de l'énergie conduira nécessairement à des changements de comportement; (3) la physiologie humaine, forgée au cours de millions d'années d'évolution biologique, ne pourra se modifier notablement dans la courte période des vingt-cinq années qui nous séparent de l'an 2050; (4) l'alimentation est un acte culturel, où les influences sociales, religieuses, symboliques, etc., ne peuvent être omises; (5) le monde vivant évolue, notamment avec des espèces animales qui disparaissent, et qui, de ce fait, ne seront plus consommables demain (on pense aux espèces marines).

Enfin, on serait avisé de ne pas oublier que l'alimentation ne peut changer rapidement, en raison de la «néophobie alimentaire», qui nous est infligée individuellement. La cuisine de synthèse rencontre et rencontrera les réticences qu'a connues la cuisine moléculaire dans les dernières décennies, et l'emploi de la pomme de terre après son introduction en Europe, jusqu'à Parmentier. À nous de guider les évolutions dans des directions favorables, d'utiliser les résultats des sciences pour du bon. La chimie, notamment, devra apporter sa pierre, peut-être moins en mettant des «produits chimiques dans nos assiettes» qu'en apportant des connaissances qui permettront de mieux appréhender les questions de sécurité alimentaire, de sécurité sanitaire, mais aussi d'art culinaire.

BIBLIOGRAPHIE

- Arcet J.-P.-J. (d'), *Mémoire sur les os provenant de la viande de boucherie*, Paris, Gaultier-Laguionie, 1829.
- Aziz A., Randhawa M.A., Butt M.S., Asghar A., Yasin M., Shibamoto T., "Glycoalkaloids (α -Chaconine and α -Solanine) Contents of Selected Pakistani Potato Cultivars and Their Dietary Intake Assessment", *Journal of Food Science*, 2012, vol. 77, n° 3, T58-T61.
- Burke R., Kelly A., Lavelle C., This vo Kientza H. (eds), *Handbook of Molecular Gastronomy*, Boca Raton, Floride, CRC Press.
- Chung S.Y., Yettella R.R., Kim J.S., Kwon K., Kim M.C., Min D.B., "Effects of grilling and roasting on the levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in beef and pork", *Food Chemistry*, 2011, vol. 129, n° 4, pp. 1420-1426.
- Commission européenne, Règlement (UE) 2020/1255 de la Commission du 7 septembre 2020, 2020. En ligne : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/fr/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R1255>.
- Corvol-Dessert A., *Les Famines dans la France des XVIII^e et XVIII^e siècles*, Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France, 2025, vol. 19, n° 3, pp. 1-14.
- Dobzhansky T., "Nothing in Biology Makes Sense Except in the Light of Evolution", *The American Biology Teacher*, 1973, vol. 35, n° 3, pp. 125-129.
- Efsa, "Compendium of botanicals that have been reported to contain toxic, addictive, psychotropic or other substances of concern", *EFSA Journal*, 2009, vol. 7, n° 9, p. 281.
- Efsa, "Re-evaluation of Lecithins (E 322) as a food additive", *EFSA Journal*, 2017, vol. 15, n° 4. En ligne : <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2903/j.efsa.2017.4742>.
- Efsa, Re-evaluation of the existing health-based guidance values for copper and exposure assessment from all sources, 2023. En ligne : <https://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/pub/7728>.
- Gowlett J., Harris J., Walton D. et al. "Early archaeological sites, hominid remains and traces of fire from Chesowanja", Kenya, *Nature*, 1981, n° 294, pp. 125-129.
- Hladik C.M., *Le Régime alimentaire des primates et son adaptation aux ressources du milieu forestier. Alimentation et Nutrition*. Thèse de doctorat. Museum national d'Histoire naturelle – MNHN Paris, 1977.
- ILPS, 2020. En ligne : <http://ilps.org>.
- International Centre of Molecular and Physical Gastronomy. International contests for note by note cooking, 2025. En ligne : <https://icmpg.hub.inrae.fr/international-activities-of-the-international-centre-of-molecular-gastronomy/synthetic-cooking-note-by-note-cooking>.
- IUPAC, *Manual of Symbols and Terminology for Physicochemical Quantities and Units*, Appendix II: Definitions, Terminology and Symbols in Colloid and Surface Chemistry, Pure and Applied Chemistry, 2012, vol. 31, pp. 577-612.
- IUPAC, *Compendium of Chemical Terminology*, 2nd ed. (the "Gold Book"), 2018. Compiled by McNaught AD, Wilkinson A. Blackwell Scientific Publications, Oxford (1997). Online version [2019-] created by S. J. Chalk. ISBN 0-9678550-9-8. <https://doi.org/10.1351/goldbook>.
- Kahn D., *Le Fixe et le volatil*, Paris, CNRS Éditions, 2016.
- Labalette F., « Les terribles ravages du "grand hiver" de 1709 », *Historia*, 2009, vol. 759, n° 47.
- Lavoisier A. L., « Expériences de novembre 1783. Mémoire sur le degré de force que doit avoir le bouillon, sur sa pesanteur spécifique et sur la quantité de matière gélatineuse solide qu'il contient », in Lavoisier A. L., *Œuvres*, 1783. En ligne : <http://www.lavoisier.cnrs.fr/>.
- Lijinsky W., Shubik P., "Benzo[a]pyrene and other polynuclear hydrocarbons in charcoal-broiled meat", *Science*, 1964, vol. 88, pp. 145-153.
- Miller G.H., Geirsdóttir A., Zhong Y., Larsen D.J., Otto-Bliesner B.L., Holland M.M., Bailey D.A., Refsnider K.A., Lehman S.J., Southon J.R., Anderson C., Björnsson H., Thordarson T., "Abrupt onset of the Little Ice Age triggered by volcanism and sustained by sea-ice/ocean feedbacks", *Geophysical Research Letters*, 2012, vol. 39, L02708.
- Normand J., « Les résidus toxiques générés lors de la cuisson de la viande bovine », 2007, Interbev. En ligne : http://bibliothequerd.interbev.fr/wp-content/uploads/2017/12/residus_cuisson_ie_2008.pdf.
- Papin D., *La Manière d'amolir les os*, Amsterdam, Henry Desbordes, 1682.
- Parmentier A. A., *Examen chimique des pommes de terre*, Paris, Didot, 1783.
- Quesnay F., *Essai phisique sur l'oéconomie animale*, Paris, Guillaume Cavelier, 1736.
- Quesnay F., *Le Journal des sçavans*, Paris, Chaubert, 1736. En ligne : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k110163x#>.
- Rigault C., « La "Rue des fossés" de Mehun-sur-Yèvre (Cher) : un abondant mobilier céramique du XIV^e siècle rejeté au cœur du quartier canonial (chronotypologie et dynamisme d'un marché) », *Cahiers d'archéologie et d'Histoire du Berry*, 2022, vol. 232, pp. 15-34.

Speth J.D., "When did humans learn to boil?", *Paeo Anthropology*, 2015, pp. 54-67.

This H., « Le chocolat Chantilly », *Pour la Science*, 1996, vol. 230, p. 20.

This H., "Molecular Gastronomy", *Angewandte Chemie*, 2002, vol. 41, n° 1, pp. 83-88.

This H., *Les Ateliers expérimentaux du goût*, Paris, Presses de la Sorbonne, 2000.

This H., « Une histoire chimique du bouillon de viande », *Mémoi-*

res de l'Académie de Stanislas, Nancy, Année 2007-2008, 8^e série, tome XXII, pp. 175-215.

This H., « Histoires chimiques de bouillons et de pot-au-feu », *L'Actualité chimique*, 2009, vol. 11, n° 336, pp. 14-16.

This vo Kientza H., "Disperse system formalism", *Handbook of Molecular Gastronomy*, CRC Press, 2021, pp. 207-212.

This, vo Kientza H., "Science, technology, engineering and technique", *International Journal*

of Molecular and Physical Gastronomy, 2024, vol. 10(1), n° 4, pp. 1-13. DOI: 10.17180/ijmpg-2024-art04.

Tirel G., *Le Viandier*, 1319. En ligne : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k62367s.textImage>.

Wandsnider L.A., "The roasted and the boiled: food composition and heat treatment with special emphasis on pit-hearth cooking", *Journal of Anthropological Archaeology*, 1997, vol. 16, n° 1, pp. 1-48.

POUR EN SAVOIR PLUS

Académie d'agriculture de France, séance publique, 2013.
Encyclopedia Britannica, "Lecithin", 2020. En ligne : <https://www.britannica.com/science/lecithin>.

ESCO report prepared by the EFSA Scientific Cooperation Working Group on Botanicals.

European Parliament, Directive, 1995. En ligne : <https://eur-lex.europa.eu/legal->

JECFA, "Lecithin", 1993. En ligne : http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/jecfa_additives/docs/monograph4/additive-250-m4.pdf.

Scholfield C.R., Dutton H.J., Dimler R.J., "Carbohydrate constituents of soybean 'lecithin'", *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 1952, vol. 29, n° 7, pp. 293-298.

Shurtleff W., Aoyagi A., *History of lecithin and phospholipids (1850 to 2016): Extensively annotated bibliography and source book*, Soyinfo Center, California, Lafayette, 2016.

Szuhaj B.F., *Lecithins: Sources, Manufacture & Uses*, American Chemists Society, BF (ed.), Indiana, Fort Wayne, 1989.

This H., « Les lécithines », Encyclopédie de l'Académie d'agriculture de France. En ligne : <https://www.academie-agriculture.fr/publications/encyclopedia/questions-sur/0801q16-les-lecithines>.

Wareing M., *The Cook's Book: Recipes and Step-by-Step Techniques from Top Chefs*, Copenhagen, DK Publishing, 2005.

Whitehurst R.J., *Emulsifiers in Food Technology*, Blackwell Publishing Ltd, 2004.

Wunderlich L., Szarka A., *A biokémia alapjai*, Typotex Kiadó, Budapest, 2014.