

Dix ans de gastronomie moléculaire

Hervé This

Résumé

Créée en 1988, la discipline scientifique nommée gastronomie moléculaire se développe aujourd'hui dans de nombreux pays du monde, tant du point de vue des travaux scientifiques que de celui des applications. Un formalisme de description de la microstructure des systèmes colloïdaux a été proposé. Il a été complété par des études de la bioactivité des systèmes alimentaires, avec notamment des travaux de chimie verte. D'autre part, les applications ont été de deux types : technologiques et éducatives. Une invention par mois est introduite depuis 2000, en relation avec des grands chefs du monde entier, qui contribuent au développement de la « mode culinaire » qui a été nommée « cuisine moléculaire ». Dans les écoles et les universités, la gastronomie moléculaire est un outil efficace pour la promotion de la chimie en particulier et des sciences en général.

Mots-clés

Gastronomie moléculaire, formalisme CDS/NPOS, colloïdes, bioactivité.

Abstract

The last ten years of molecular gastronomy

Created in 1988, the scientific discipline called molecular gastronomy is being developed in many countries of the world, both scientifically, and with applications. First, formalisms were introduced in order to describe the microstructure of the studied systems. Then the bioactivity of food systems was investigated, which involved studies of green chemistry. Applications were of two kinds: technological and educational. One application of molecular gastronomy has been proposed every month since 2000, in relationship with starred chefs of the world, and the trend called "molecular cooking" is the most modern form of cooking. In schools and universities, molecular gastronomy has been used as a tool for the promotion of chemistry and physics, in particular.

Keywords

Molecular gastronomy, CDS/NPOS formalism, colloids, bioactivity.

Toute science a ses questions propres, d'une part, et ses applications, d'autre part, qui sont essentiellement de deux types : technologiques et pédagogiques. La gastronomie moléculaire, discipline scientifique qui explore les mécanismes des phénomènes survenant lors des transformations culinaires (à ne pas confondre avec la « cuisine moléculaire », qui est une forme de cuisine moderne fondée sur les avancées scientifiques), n'échappe pas à la règle. Nous allons examiner ici quelques exemples de travaux scientifiques effectués dans les dix dernières années, et des exemples des deux types d'applications.

Pour ce qui concerne les travaux scientifiques, la question des sauces – systèmes colloïdaux, prototypes de nombreux systèmes formulés (médicaments, cosmétiques, peintures...) – montrera l'utilité d'un formalisme de description qui a été mis au point en 2002 (et présenté dans ces pages) ; puis nous verrons que la « chlorophylle » des légumes verts reste bien mystérieuse, avant d'envisager la question essentielle des échanges entre les tissus végétaux ou animaux, d'une part, et leur environnement, qui est souvent une solution aqueuse, d'autre part.

Les applications technologiques seront montrées à partir de quelques-unes des innovations introduites mensuellement depuis dix ans, et aussi des modifications apportées dans les pratiques culinaires suite aux avancées de notre discipline.

Enfin la question pédagogique sera présentée à partir de l'actualité : les tout nouveaux programmes de collège et de

lycée introduisent un thème « science et cuisine », qui reprend des applications de la gastronomie moléculaire.

Premier pas

En mars 1988, Nicholas Kurti (1908-1998, alors professeur de physique à Oxford [1]) et moi-même avons « inventé » la discipline scientifique nommée « gastronomie moléculaire », parce que nous espérions à la fois explorer l'activité culinaire, la rénover, et trouver dans les transformations culinaires des phénomènes nouveaux, qui conduiraient à la découverte de mécanismes physico-chimiques inédits.

Un nouveau nom nous semblait indispensable pour décrire cette activité spécifique, en particulier parce que, à l'époque, les sciences des aliments se préoccupaient principalement de la composition des ingrédients alimentaires et de procédés industriels, négligeant les transformations culinaires, et notamment les phénomènes survenant lors de ces transformations.

Par exemple, des traités aussi réputés que la *Food Chemistry* donnaient très peu d'informations sur les transformations culinaires [2] : dans l'édition de 1999, moins de 0,5 % du chapitre consacré aux viandes examinait des phénomènes culinaires (la contraction du tissu animal lors du chauffage, en raison de la dénaturation du tissu collagénique), l'essentiel du chapitre étant consacré à la description du tissu musculaire animal ou à la production industrielle (saucisses, extraits de viande). Dans cette même édition, la proportion de texte

consacré aux transformations thermiques du vin, dans le chapitre consacré à ce produit, était nulle... alors que l'activité culinaire fait un très large usage du vin pour la préparation des sauces (par exemple, dans *L'art des sauces* [3], seules 79 sauces sur 194 ne contiennent pas de vin) et que des modifications chimiques notables ont lieu lors du traitement thermique de ce produit, surtout quand la concentration en eau diminue fortement au cours du traitement.

Pourquoi les sciences des aliments avaient-elles négligé les transformations culinaires ? On peut imaginer que la nécessité de nourrir les peuples, qui a été une préoccupation majeure jusqu'à notre siècle (n'oublions pas que nous sommes la première génération à ne pas avoir connu de famine... et encore, pas tous !), est la raison essentielle qui a conduit à des études de la valorisation des denrées, des procédés de conservation, mais on peut aussi supposer que les phénomènes originaux qui ont lieu lors de la production de mets quotidiens, tels que le cassoulet, la sauce hollandaise, la brandade de morue ou la choucroute, étaient jugés trop « vulgaires » : dans les années 1960, un article consacré à la sauce béarnaise dans la revue *Nature* a paru de la plus grande excentricité [4]. Pourtant, le grand Antoine Laurent de Lavoisier n'avait-il pas lui-même montré l'exemple, dans un travail consacré aux bouillons de viande, où il écrivait : « On ne peut s'empêcher d'être surpris, toutes les fois qu'on s'interroge soi-même sur les objets qui nous sont les plus familiers, sur les choses les plus triviales, de voir combien nos idées sont souvent vagues et incertaines, et combien, par conséquent, il est important de les fixer par des expériences et par des faits » [5].

Ainsi, malgré quelques précurseurs, la situation au milieu des années 1980 était analogue à celle de la biologie moléculaire quelques décennies plus tôt. La terminologie « *molecular and physical gastronomy* » s'imposa donc pour désigner, identifier, la nouvelle activité qui consistait en réalité à partir de phénomènes observés lors des transformations culinaires afin de découvrir des phénomènes et des mécanismes inédits [6]. William Astbury n'avait-il pas défini la biologie moléculaire comme : « [...] *moins une technique qu'une approche, avec le point de vue des sciences physiques et l'idée force consistant à chercher des mécanismes moléculaires derrière les manifestations à grande échelle de la biologie classique ?* » [7-8].

Un mot de définition, enfin, parce que l'expérience prouve que le terme « gastronomie » fait très souvent penser – fautivement – à de la cuisine d'apparat. En réalité, la gastronomie est « *la connaissance raisonnée de tout ce qui se rapporte à l'être humain en tant qu'il se nourrit* » [9]. L'histoire de la cuisine est une branche de la gastronomie (gastronomie historique), tout comme la géographie de l'alimentation (gastronomie géographique), ou encore comme la littérature gourmande, etc. Dans notre cas, nous étions intéressés par l'exploration physico-chimique de la composante culinaire de l'alimentation. Aussi était-il légitime de nommer « gastronomie moléculaire » la science que nous envisageons.

Les travaux scientifiques

La question des sauces

Les dix premières années d'activité furent essentiellement consacrées à l'étude des dictons, tours de mains, proverbes, adages, trucs ou astuces culinaires (ce que nous nommons

des « précisions culinaires »), parce que nous supposons que ces objets culturels pouvaient faire apparaître des phénomènes et des mécanismes nouveaux [10]. À ce jour, plus de 25 000 précisions ont été recueillies, rien que dans le corpus culinaire français. La collection est disparate : il y a des précisions culinaires manifestement fausses, telle celle qui stipule que les règles féminines font tourner les sauces mayonnaises, ou des observations dont le statut de véracité est inconnu, telle celle qui indique que les sauces au vin montées au beurre sont moins « brillantes » quand elles sont fouettées que quand la casserole est simplement agitée (« vannée »), lors de l'ajout de beurre (figure 1).

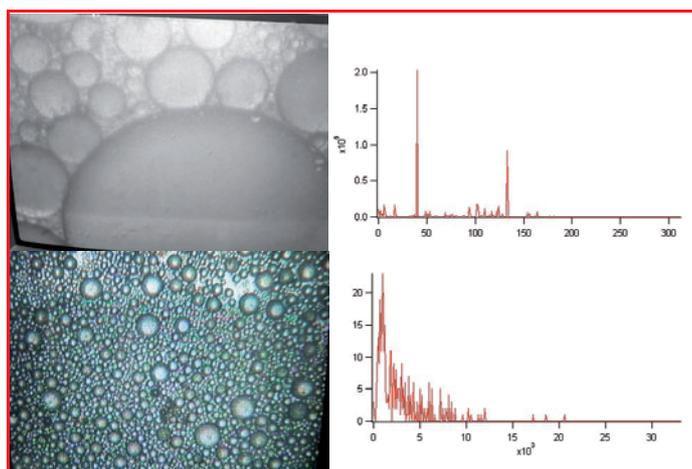


Figure 1 - Les micrographies de gauche montrent la différence considérable de microstructure pour des systèmes modèles de sauce au vin montées au beurre.

En haut, la sauce a été « vannée », et en bas, elle a été fouettée. À droite : les courbes de distribution des gouttelettes de matière grasse émulsionnée.

Amusement futile que l'examen de ces questions ? Ce serait une double erreur de le croire. D'abord, la science doit être évaluée à l'aune de sa production propre, et non selon des critères extérieurs. D'autre part, la question de la « brillance » d'un système colloïdal – pour ne prendre qu'un exemple – est scientifiquement difficile. De surcroît, l'avancée de la science conduit à des applications économiquement essentielles : non seulement la réputation de la cuisine française attire les touristes, mais aussi une part notable de la balance commerciale de la France est due à l'export de produits alimentaires industriels, et repose, de ce fait, sur la réputation culinaire du pays.

Enfin la fréquence élevée de la consommation de certains mets conduit à des constats économiques insoupçonnés *a priori*. Par exemple, il semble bien futile de se demander s'il est vrai que les salades de pommes de terre sont meilleures quand les pommes de terre (tubercules de *Solanum tuberosum* L.), après cuisson dans l'eau, sont mises dans la sauce vinaigrette alors qu'elles sont chaudes. Pourtant, dans l'hypothèse d'une véracité de cette « précision culinaire », résultant de l'absorption d'une quantité pourtant faible de sauce, le coût annuel total, pour toute l'industrie alimentaire (les salades de pommes de terre sont vendues dans tous les supermarchés, et encore plus dans les pays nordiques) est considérable : à raison d'un centime d'euro en plus ou en moins par portion, de cent portions vendues par semaine et par grande surface, il atteint 500 000 centimes, soit 10 000 € par an rien que pour notre pays, et cela chaque année !

De toute façon, il n'est pas illégitime de penser que c'est plutôt l'intuition d'un travail scientifique qui doit guider les

études scientifiques. Dans le cas des sauces, l'observation de leur nature colloïdale a conduit à une chaîne de travaux, qui ont commencé par la description des systèmes. Ainsi la physico-chimie des colloïdes s'est focalisée sur les interfaces et l'exploration des phases exotiques (phases éponge, microémulsions...), mais elle dispose, avec la cuisine, d'un champ remarquable, puisque quelque 450 sauces classiques sont recensées dans les livres de cuisine française.

Fautivement, la plupart sont considérées comme des « émulsions », à commencer par la sauce béarnaise précédemment évoquée... et qui est plutôt une suspension (dispersion de particules solides : les agrégats de protéines ayant coagulé) qu'une émulsion (dispersion de gouttelettes de matière grasse dans une phase non miscible à la première) (figure 2) [11].

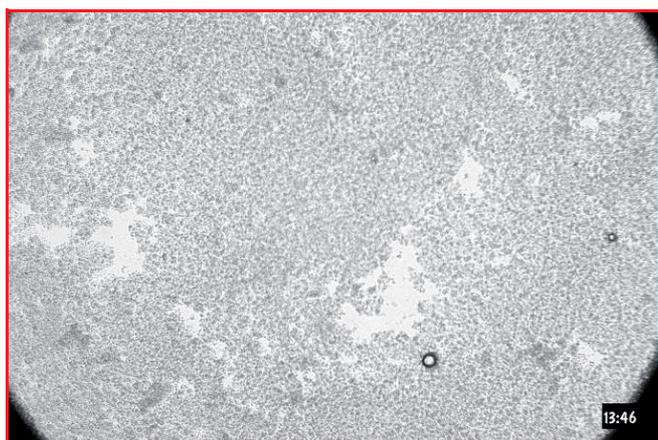


Figure 2 - La crème anglaise, la sauce hollandaise, la sauce béarnaise et les sauces voisines ou dérivées ne sont pas des émulsions (dispersion de gouttes d'huile dans une phase aqueuse), comme cela est encore indiqué dans les manuels de cuisine et aussi dans nombre de publications scientifiques, mais un système colloïdal mixte suspension/émulsion/mousse, puisque certaines protéines de l'œuf coagulent à la température de 82 °C qui est atteinte en cours de cuisson. Autrement dit, une crème anglaise réussie (macroscopiquement) est ratée microscopiquement, puisqu'elle est pleine de microgrumeaux.

Quant aux gels, leur statut était complexe puisque l'on confondait les gels du type des gels de gélatine, où la phase aqueuse, continue, est dispersée dans le réseau solide, également continu, formé par l'enchaînement des molécules de gélatine (du collagène dénaturé et partiellement dégradé), et des gels différents, tels ceux que constituent au premier ordre les tissus vivants, avec une phase aqueuse dispersée dans le réseau solide, continu.

Le formalisme CDS/NPOS (« complex disperse system/non periodical organization of space ») introduit en 2002 en vue de décrire les systèmes colloïdaux (présents dans les divers champs de la formulation : médicaments, peintures, cosmétiques...) a permis de distinguer ces systèmes [12]. À ce jour, tous les systèmes alimentaires ont été décrits par ce formalisme et de nouvelles questions scientifiques ont surgi des études. Par exemple, la « matière grasse » alimentaire est le plus souvent un mélange de divers types de triglycérides, ayant chacun une température de fusion spécifique, de sorte qu'à la température ambiante, un morceau de chocolat, une goutte de matière grasse dans du lait ou une plaquette de beurre contiennent à la fois une fraction liquide et une fraction solide : comment ces deux fractions sont-elles réparties ?

Ce mystère scientifique s'accompagne d'une question à la fois scientifique et technologique : toutes les formules engendrées mécaniquement par ce formalisme correspondent-elles à des systèmes possibles ? La question est difficile, parce que les systèmes dispersés sont le plus souvent métastables. Dans les émulsions ou dans les suspensions, par exemple, les vitesses de crémage dépendent de la taille des structures et de la nature des tensioactifs, mais ces systèmes ne sont pas stables ; leur obtention résulte d'un savoir-faire, pas d'une possibilité thermodynamique. Mieux, la question des relations structure/activité, en chimie thérapeutique, trouve avec le formalisme CDS/NPOS son pendant dans le champ de la galénique : peut-on prévoir les caractéristiques physiques, optiques, mécaniques, rhéologiques, électriques, de libération de composés hydrophobes, etc. à partir de la formule d'un système colloïdal ?

Si ces « graal » demeurent bien lointains, le formalisme CDS/NPOS a montré son utilité lors de l'étude des sauces classiques françaises, lesquelles ont été réalisées (de façon rigoureuse, évidemment, pas en vue d'une consommation) et analysées (essentiellement par microscopie optique). Il est d'abord apparu que toutes ces sauces relevaient de 23 types physico-chimiques [13]. Puis un examen des recettes de sauces dans les ouvrages culinaires du passé a montré que pour le corpus considéré, le nombre de types physico-chimiques a augmenté avec le temps. Pourquoi ? L'analyse semble montrer que l'empirisme culinaire n'a pas eu le temps d'identifier davantage de systèmes, laissant même des « trous » dans la liste des types physico-chimiques rangés par ordre de complexité. En outre, les diverses cultures culinaires n'ont pas toutes les mêmes types physico-chimiques de sauces.

Travail académique ? Sans doute pas : les sociétés qui produisent des cosmétiques savent combien l'innovation est importante ; or l'analyse des gammes de produits existantes peut conduire, comme pour les sauces, à des systèmes dont le type physico-chimique est resté inexploré. Cela vaut pour l'ensemble des activités de formulation.

Les pigments des végétaux

Si l'introduction du formalisme CDS/NPOS a donné un cadre d'étude de plus en plus utilisé par la communauté [14], des travaux qui ont été consacrés à des questions chimiques se sont accompagnés de la mise au point de méthodes d'analyse des systèmes alimentaires, notamment dans le cas des transformations culinaires des tissus végétaux. Pour la physico-chimie, les composés bioactifs des aliments (ceux pour lesquels il existe des récepteurs biologiques des systèmes sensoriels : olfactif, sapictif, trigéminéral, tactile, visuel, auditif...), et notamment des tissus animaux (viandes, poissons) ou végétaux (fruits, légumes), sont essentiellement des marqueurs, susceptibles de révéler soit des chemins que ces composés peuvent emprunter lors des transformations culinaires, soit des effets de matrice avec, notamment, des associations supramoléculaires.

Le monde végétal étant d'une diversité considérable, on a beaucoup étudié les transformations des tissus végétaux, notamment leurs pigments. Ainsi par exemple, l'évolution de la couleur des gousses immatures de *Phaseolus vulgaris* L. (haricots verts) a été suivie au cours de traitements thermiques.

À ce sujet, il est tout à fait extraordinaire que des décennies de travaux aient été consacrées à des broyats de tissus végétaux, alors que la « couleur » des haricots entiers évolue

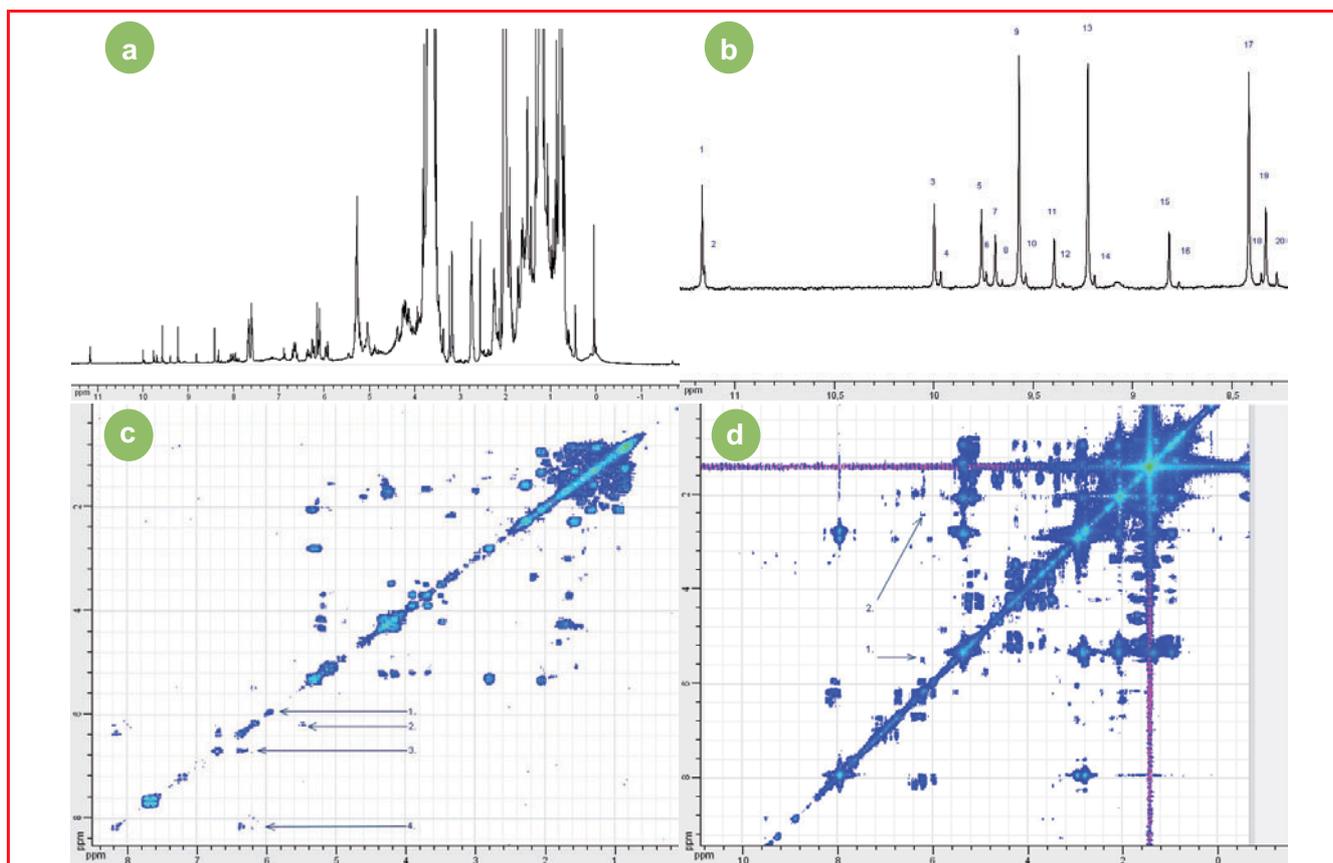


Figure 3 - a) Spectre de RMN du proton (300 MHz, δ [ppm]) à partir du HMDSO) pour des extraits de haricots verts dans la d_6 -acétone ; b) Détail de la région δ 11,3-8,2 ppm, laquelle inclut des pics des chlorophylles et de leurs dérivés ; c) Spectre de RMN bidimensionnelle ^1H - ^1H COSY et d) Spectre de RMN bidimensionnelle ^1H - ^1H TOCSY des mêmes extraits.

différemment de celle de ces broyats. Pis encore, il est extraordinaire d'observer que nombre de travaux scientifiques (sans compter les sujets d'agrégation, les travaux pratiques, etc.) ont pour origine l'extraction des chlorophylles (profitons de l'occasion pour indiquer que « la » chlorophylle n'existe pas, mais qu'il existe « des » chlorophylles : a, a', b, b', c, etc.), des caroténoïdes ou de leurs dérivés, mais que les méthodes d'extraction n'avaient pas été correctement analysées. Il est vrai que la question est compliquée par la présence d'enzymes susceptibles de modifier les composés à extraire, ou d'instabilités chimiques de ces composés dans les solvants d'extraction [15].

Après une étude rationnelle de l'extraction, la spectroscopie de résonance magnétique nucléaire du proton et du carbone 13 (mono- ou bidimensionnelle) a révélé l'évolution du contenu pigmentaire de tissus traités thermiquement, au cours du traitement dans diverses conditions (en fonction du temps de traitement, de la température, du pH du milieu, etc.) [16] (figure 3).

Malgré les résultats obtenus, beaucoup reste à faire pour identifier les mécanismes des transformations, notamment parce qu'il faut tenir compte d'associations supramoléculaires des chlorophylles et des caroténoïdes, lesquelles modifient les réactivités des pigments isolés et semblent protéger, *in vivo*, les chlorophylles des photodégradations. Toutefois l'outil mis au point dans ce cas devrait permettre de mieux suivre ces évolutions.

À noter également que, lors de ces études, un outil fondé sur l'utilisation de la chromatographie sur couches minces, en mode quantitatif, a été mis au point : cet outil permet d'explorer les contenus pigmentaires en champ [17].

Les échanges entre tissus animaux et végétaux et environnement aqueux

Le même type d'outils analytiques a été utilisé pour suivre les échanges entre des tissus vivants et l'environnement aqueux où ils sont traités. Ici, un outil complémentaire a été introduit : la RMN quantitative de tissus entiers [18]. Au cours de la mise au point de cette méthode d'analyse, l'extraction des saccharides à partir de racines de carotte (*Daucus carota* L.) par des méthodes préalablement publiées a été comparée à l'étude des tissus entiers, et des quantités significativement supérieures de glucose ont été trouvées dans les tissus entiers. Cette différence conduit soit à douter des méthodes d'extraction, soit à supposer que la RMN quantitative du proton « voit » des résidus de saccharides présents en nombre notable dans des composés qui pourraient être des composés phénoliques.

Quelle que soit l'hypothèse retenue, la formation de « bouillons » a été suivie, à l'aide la RMN quantitative du proton, et la théorie générale des échanges dans les tissus végétaux a été testée. Ces tissus comportent des parties différentes, avec notamment des tissus conducteurs (xylème et phloème), qui respectivement montent la sève brute vers les parties aériennes des plantes ou redescendent les composés organiques synthétisés dans les feuilles vers les tissus de stockage (racine, tubercule) [19] (figure 4).

La question essentielle est de savoir si les saccharides stockés dans le tissu parenchymateux (les saccharides sont des marqueurs hydrosolubles, importants lors de la

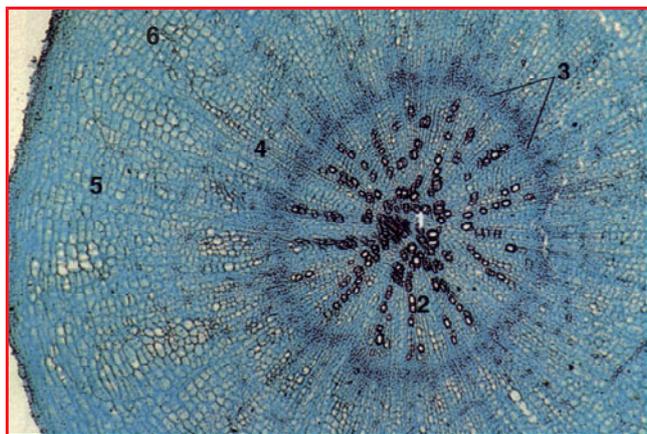


Figure 4 - Sur cette coupe transversale de racine de carotte, on voit le xylème primaire (1), le xylème secondaire (2), le cambium libéro-ligneux (3), le phloème secondaire (4), le cortex (5) et l'épiderme (6) [19].

consommation, parce qu'ils contribuent à la saveur) passent en solution, ou bien si seuls ceux qui sont dissous dans la sève élaborée sont récupérés, auquel cas le taux de récupération serait très faible. À ce jour, les travaux montrent que la seconde hypothèse est sans doute la bonne [20], bien que des études de microscopie confocale à balayage aient révélé que la diffusion de marqueur fluorescent se fasse aussi, dans un premier temps, par les espaces péricellulaires. Pour cette question, beaucoup de travail reste à faire parce que les tissus conducteurs, comme les tissus sanguins, ont la capacité de se fermer partiellement lorsqu'ils sont endommagés [21].

D'autres questions scientifiques passionnantes sont apparues, notamment sur les évolutions des composés organiques extraits, lors des traitements thermiques. Il est bien connu que des composés tels que la cystéine sont modifiés lors de traitements thermiques prolongés, libérant de l'hydrogène sulfuré. Toutefois, cette réaction, courante en cuisine, a été reconnue comme le prototype d'un groupe de réactions de « chimie verte » qui ont lieu lors des traitements culinaires. Il n'est pas nouveau que la « cuisine » s'accompagne de modifications des composés organiques présents dans les tissus végétaux ou animaux, et les réactions de Maillard, par exemple, sont de bons exemples de réactions qui s'effectuent dans ces conditions (et même à des températures aussi basses que celle de l'organisme : l'opacification du cristallin des diabétiques résulte sans doute de telles réactions) [22]. Toutefois, il est essentiel que des synthèses puissent être effectuées dans l'eau, à des températures de 100 °C, pendant des temps longs. Les mécanismes peuvent être originaux, tels ceux qui sont connus pour des acides aminés ou des saccharides (par exemple, la formation de 5-hydroxyméthylfurfural, obtenu par traitement thermique de fructose, est récemment apparue comme une cause de disparition des abeilles, aux États-Unis) [23-24].

Pour ces réactions, comme pour les évolutions des pigments, de nombreux mystères subsistent. Ainsi, pour les tissus végétaux, où les cellules sont cimentées par la paroi végétale – faite de cellulose, d'hémicelluloses et de pectines –, on pourrait admettre que le traitement thermique provoque principalement la bêta élimination des pectines (essentiellement des polymères de l'acide galacturonique, ou acide (2S,3R,4S,5R)-2,3,4,5-tétrahydroxy-6-oxohexanoïque), une réaction d'hydrolyse due à la dissociation des liaisons covalentes entre les résidus d'acide galacturonique.

Toutefois, les expériences montrent que bien d'autres phénomènes sont impliqués.

Expérimentalement, l'importance de la β -élimination sur la consistance des tissus végétaux a été étudiée, mais les résultats sont contradictoires. Par exemple, l'amollissement de racines de carottes (*Daucus carota* L.) a été décrit par des lois variées, mais même des modèles ne donnent pas des résultats cohérents (par exemple, étude de la viscosité de solution de pectines de citron *Citrus citrus*). Bien sûr, les pectines ne sont pas les seuls polysaccharides à être hydrolysés pendant les traitements thermiques des transformations culinaires. Si la cellulose est très thermorésistante, l'amidon (amylose et amylopectine) ou les protéines se dissocient lentement au cours du temps, surtout en milieu acide, comme dans la viande ou dans la plupart des mets.

Les applications technologiques : innovations et rationalisation des outils et ingrédients

Ces quelques exemples ont été choisis parmi de nombreux autres, parce qu'ils montrent combien nos connaissances sont insuffisantes à propos de questions pourtant très familières. Passons à la question des applications, extrêmement nombreuses, notamment parce qu'elles ont été engendrées à l'aide d'une méthodologie d'innovation [25]. Parmi ces applications de la gastronomie moléculaire introduites chaque mois depuis 2000, certaines de ces innovations sont fondées sur des idées simples – tel le « sel glace », simple transposition du sucre glace –, mais d'autres sont plus complexes – tel le « pianocktail », système à base de microréacteurs et de pompes, piloté par ordinateur, qui matérialise les formules CDS/NPOS [26].

Beaucoup de systèmes nouveaux ont reçu le nom de chimistes du passé : Braconnot, Chaptal, Faraday, Gay-Lussac, Geoffroy, Gibbs, Kessel, Lavoisier, Liebig, Paré, Pasteur, Ourisson, Peligot, Priestley, Thenard, Vauquelin, Wurtz... [27]. Par exemple, on a nommé « gay-lussac » des émulsions foisonnées, et « gibbs » des émulsions piégées dans des gels chimiques – en pratique, ce type de systèmes s'obtient par dispersion d'huile dans un blanc d'œuf, par exemple, puis par chauffage de l'émulsion formée : le chauffage dénature les protéines globulaires qui composent le blanc d'œuf et conduit à leur association par des ponts disulfure, ce qui engendre le réseau du gel où l'émulsion reste piégée.

Ces systèmes nouveaux sont aujourd'hui utilisés par les cuisiniers du monde entier, et il ne se passe de jour sans que la presse ne fasse état de l'application des résultats de la gastronomie moléculaire, souvent en confondant celle-ci avec la « cuisine moléculaire ».

Plus précisément, on avait nommé « cuisine moléculaire » cette forme de pratique culinaire modernisée, qui fait usage de « nouveaux » ingrédients, méthodes, outils (les guillemets signalent que le « nouveau » des débuts de la gastronomie moléculaire est quasi classique aujourd'hui ; par « nouveau », on entendra « ce qui n'est pas présent dans les ouvrages de Paul Bocuse », par exemple).

Nouveaux outils ? Dès 1969, Kurti avait montré l'utilisation du froid et du vide en cuisine. Puis l'emploi de matériel de laboratoire de chimie a été proposé [28]. Depuis, les efforts en faveur d'une rénovation technique de la cuisine ont été fructueux puisque le monde culinaire s'équipe maintenant de siphons – où du dioxyde de carbone pousse des liquides afin

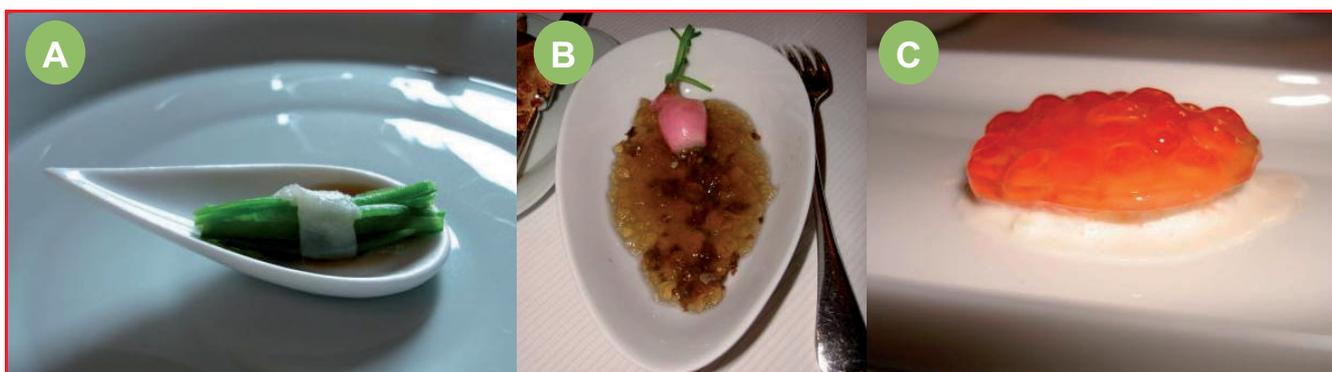


Figure 5 - Quelques exemples d'applications technologiques.

A) Ce « fibré » a la structure de la viande, puisqu'il est constitué de fibres emplies d'une solution aqueuse de protéines. Ici, il est fait de gousses immatures de haricots (*Phaseolus vulgaris* L.) qui ont été percées et emplies d'un gel nommé « foie gras Chantilly ». Dans le formalisme CDS/NPOS, sa formule est D_1/D_3 . B) Ce « liebig » a été réalisé par le cuisinier français Pierre Gagnaire, dans son restaurant parisien ; c'est une émulsion dispersée dans un gel physique. C) Cette « conglomèle » est une orange artificielle, puisque de formule D_0/D_3 dans le formalisme CDS/NPOS. Dans ce plat, le jus d'orange assaisonné a été enclos dans des perles obtenues par gélification d'alginate de calcium, puis les perles ont été collées entre elles par de la gélatine.

d'engendrer des mousses –, d'évaporateurs rotatifs afin de séparer des fractions ayant des goûts originaux, d'entonnoirs à verre fritté pour clarifier les bouillons, d'azote liquide pour faire des sorbets... On le voit, il s'agit ici d'applications simples dans le principe, mais qu'il a fallu une trentaine d'années avant d'imposer à un monde qui était resté très en retard techniquement.

Nouveaux ingrédients : là encore, il a fallu beaucoup d'énergie pour faire adopter l'usage d'agents gélifiants nouveaux ou classiques. Alors que la gélatine (et encore, surtout le pied de veau longuement traité thermiquement dans l'eau) était le seul agent utilisé pour les gelées (la pectine était utilisée, mais pas ajoutée), s'imposent aujourd'hui, chez les cuisiniers du monde entier, l'agar-agar, les alginates de sodium, les carraghénanes, les diverses pectines, etc. D'autres composés définis (acide tartrique, acide citrique, etc.) sont également utilisés, malgré une tendance conjoncturelle à une naturalité bien fantasmatique.

Nouvelles méthodes : la compréhension des transformations culinaires conduit évidemment à des propositions de rénovation des techniques anciennes et à l'emploi de méthodes nouvelles, pour obtenir des produits classiques ou nouveaux. Un bon exemple est le « chocolat chantilly » présenté il y a quelques années dans les pages de *L'Actualité Chimique*, et qui montre que le blanc d'œuf est inutile pour la confection de mousses au chocolat [29].

Les applications pédagogiques : de l'école à l'université

Les premières années du XXI^e siècle ont été des années charnières pour la gastronomie moléculaire, pour plusieurs raisons, mais surtout parce que l'on a cessé de confondre l'activité scientifique, d'une part, et les applications, technologiques et pédagogiques, d'autre part.

Jusque vers 2000 environ, le programme affiché pour la gastronomie moléculaire comprenait cinq objectifs [30] : (1) explorer les recettes ; (2) recueillir et tester les tours de mains, proverbes, adages... culinaires ; (3) inventer des plats nouveaux (4) introduire en cuisine de nouveaux ingrédients, ustensiles, méthodes ; (5) utiliser les travaux précédents pour montrer au public les beautés de la science. Malgré d'innombrables présentations de la gastronomie moléculaire, en France et à l'étranger, dans des cercles scientifiques variés, ce programme initial était toutefois confus, puisqu'il

mêlait la science (objectifs 1 et 2), la technologie (objectifs 3 et 4) et la « communication » (objectif 5).

Or l'ambition de la gastronomie moléculaire, comme pour n'importe quelle science, est la découverte de phénomènes et de mécanismes, pas la technologie ni la communication. Bien sûr, les chercheurs intéressés par la discipline peuvent avoir à cœur de populariser en cuisine des techniques rationalisées, fondées sur les résultats de la physique et de la chimie, ce qui relève de la technologie ; bien sûr, depuis le début des années 1980, nous avons bien perçu que l'attrait du public pour la cuisine permettrait de faire venir à la science des publics variés, de l'école jusqu'au grand public, et nous comptons sur cet attrait pour lutter contre la désaffection commençante des études scientifiques. Toutefois, il demeurerait que la science est la science, pas la technologie ni la communication.

Dans le début du siècle, les réflexions sur les travaux de la discipline, d'une part, et la grande vogue médiatique qui entourait immédiatement les travaux, d'autre part, conduisirent à mieux distinguer la science qu'est la gastronomie moléculaire, la technologie qui peut se fonder sur les avancées de cette science, la technique qui découle des transferts technologiques, la communication qui peut être utilement faite à partir des travaux scientifiques ou technologiques.

Ainsi, au début des années 2000, le programme européen *Innicon* (5^e PCRD) fut l'occasion de placer l'activité scientifique de la gastronomie moléculaire au centre d'un dispositif comprenant des écoles de cuisine européennes et des cuisiniers parmi les plus réputés (Christian Conticini et Émile Jung, France ; Ferran Adrià, Espagne ; Heston Blumenthal, Royaume-Uni...). C'est à ce moment que, l'activité des cuisiniers qui utilisaient de nouveaux ingrédients, outils et méthodes n'étant pas de nature scientifique, la terminologie de « cuisine moléculaire » s'imposa, pour décrire leur travail qui se distingue entièrement de la gastronomie moléculaire.

Simultanément, alors que le Groupe INRA de gastronomie moléculaire se développait sous ma direction, au sein du Laboratoire de chimie des interactions moléculaires du Collège de France (dirigé par Jean-Marie Lehn), le Ministère de l'Éducation nationale demandait deux applications pédagogiques de la discipline : pour les écoles, d'une part, et pour les lycées hôteliers, d'autre part.

La première s'apparente aux actions de la *Main à la Pâte*, mais elle est centrée sur le « fait alimentaire » : les *Ateliers expérimentaux du goût* veulent ainsi « faire monter la

nourriture du ventre à la tête », en organisant, par exemple, des concours de blancs en neige, afin de montrer, par l'expérience, que les pratiques culinaires traditionnelles sont très largement irrationnelles et médiocres. Dans le premier atelier, consacré aux blancs en neige, on fait produire aux enfants plusieurs litres de blanc en neige à partir d'un seul œuf, et, surtout, on leur fait comprendre : pourquoi le blanc en neige est blanc, alors que le blanc d'œuf est jaune ; pourquoi le blanc en neige est ferme, alors qu'on a battu de l'air et un blanc d'œuf liquide ; la structure de la matière, et les liquides en particulier ; l'idée de molécules ; la réflexion de la lumière...

Depuis quelques années, ces *Ateliers expérimentaux du goût* ont été complétés par des *Ateliers Science & Cuisine*, établis par des inspecteurs et des professeurs de l'Éducation nationale (Académie de Paris). Ces nouveaux ateliers, mis en relation avec les programmes de chimie, de physique et de sciences de la vie et de la Terre, à divers niveaux scolaires, ont été intégrés dans les tout nouveaux programmes de collège.

La rénovation de l'enseignement culinaire, d'autre part, s'est fondée sur de nombreux tests expérimentaux effectués soit dans le cadre rigoureux du laboratoire, soit de façon préliminaire lors des *Séminaires INRA de gastronomie moléculaire*. Nombre de ces tests ont réfuté des interprétations données par les manuels d'enseignement culinaire à l'usage des élèves des lycées hôteliers. Par exemple, depuis environ un siècle, les manuels distinguaient classiquement trois types de cuisson qui étaient nommées « cuisson par concentration », « cuisson par expansion », et « cuisson mixte ». La cuisson qui était fautive dite « par concentration » a pour prototype le rôtissage de la viande de bœuf. Dans les manuels d'enseignement de la technique culinaire, on représentait un cercle (le périmètre du rôti) avec quatre flèches dirigées vers le centre du cercle, et l'on indiquait que les jus se concentraient dans la viande : « *Les viandes noires demandent à être saisies, c'est-à-dire soumises à l'action d'une chaleur assez vive pour se trouver rapidement enveloppées d'une couche rissolée et résistante qui forme barrière et s'oppose à la sortie du jus. [...] Dans un rôti bien conduit, il se produit le même phénomène que dans une viande grillée : la chaleur périphérique gagne en profondeur par étapes successives, refoulant le jus vers l'intérieur, jusqu'à ce que celui-ci, frappé de tous côtés, s'échauffe et devienne à son tour un agent de cuisson. Il n'en est pas de même en ce qui concerne les rôtis de viandes blanches, dont les sucs existent à peine ou se présentent sous forme de jus gélatineux* » [31].

Cependant la moindre connaissance physico-chimique, et aussi de simples observations, font douter de toutes ces descriptions : le jus ne peut pas s'accumuler à cœur, car le tissu musculaire est plein d'eau, incompressible. D'autre part, la sauteuse où se trouve le rôti contient, après la cuisson, un résidu brun formé par l'évaporation du jus qui est sorti de la viande au cours de la cuisson : chauffé, le tissu collagénique est contracté, ce qui a expulsé des jus dont l'eau s'est évaporée, et dont les molécules ont été chimiquement modifiées par la chaleur intense du four. D'ailleurs, pour montrer que les jus sortent de la viande en cours de cuisson, il suffit de peser la viande avant et après la cuisson : la perte de masse résulte de la perte de jus.

De même, la cuisson fautive dite « par expansion » était théorisée d'après le gastronome Jean-Anthelme Brillat-Savarin (qui n'était ni cuisinier ni scientifique, mais homme de loi, malgré le titre de docteur dont il se pare dans son



« C'est ça que je veux faire plus tard : chimiste moléculaire. C'est vraiment super ! », Quentin, 12 ans, très enthousiaste après avoir goûté la cuisine moléculaire et assisté à un atelier sur la gastronomie moléculaire au Futuroscope de Poitiers. Photo : S. Bléneau - Serdel. DR.

œuvre), qui stipule que, pour la confection des bouillons de viande, la viande doit être mise dans l'eau initialement froide, sans quoi « *l'albumine coagulant en surface empêcherait les jus de passer dans le bouillon, qui aurait peu de goût* ». Bien que l'albumine soit une notion chimiquement périmée, ou du moins réservée à une classe de protéines très particulières, il est symptomatique qu'on ait encore pu lire en 2002, sous la plume d'un cuisinier français triplement étoilé : « *Mettez toujours votre viande dans l'eau froide, car l'eau bouillante empêche les sucs contenus dans la viande de se marier à l'eau. [...] Au contact de l'eau bouillante, l'albumine coagule et emprisonne les sucs.* » Les expériences, elles, montrent que la viande se contracte quand elle est chauffée, en milieu aqueux, qu'elle ne se dilate pas. L'enseignement culinaire étant encombré d'idées fausses de ce type, une révision des « référentiels » du CAP fut entreprise dès 2002 par l'Inspection générale, sur la base des nombreuses études de détails qui avaient été effectuées depuis 1980. Aujourd'hui, la modernisation se poursuit, malgré les réticences de certains professionnels (cuisiniers ou enseignants) initialement mal formés, et qui s'accrochent à des notions réfutées. Lentement, par de nombreuses actions en relation avec les lycées hôteliers, en France ou à l'étranger, nous parvenons à modifier les divers enseignements.

Enfin, l'enseignement supérieur n'est pas épargné par la vogue (utile) de la gastronomie moléculaire. De nombreuses universités, en France et à l'étranger, ont introduit la gastronomie moléculaire dans les départements de chimie ou de science des aliments, après avoir observé l'attrait que la discipline exerçait sur les étudiants. Ce point important mérite d'être discuté.

Ainsi, si les beautés des convergences de séries ne sont perceptibles qu'à quelques élèves, l'importance de savoir mesurer une masse de matière sèche dans un échantillon d'un aliment s'impose à qui veut explorer les transformations culinaires (lesquelles ont généralement un attrait naturel, qui mériterait d'ailleurs d'être mieux analysé). Une « règle » enseignée dans le supérieur stipule que la masse de matière sèche est la masse de l'échantillon quand, après mise à l'étuve à la température de 95 °C, la masse ne varie plus

à trois mesures successives. Toutefois, cette règle est fautive, car si les écarts entre deux pesées successives sont de type $1/n$, la série des écarts diverge. Bien sûr, on sait la convergence, mais des mathématiques s'imposent alors à l'étudiant pour mieux effectuer ce geste élémentaire qu'est la détermination de la matière sèche.

Plus généralement, l'activité expérimentale, fondée sur la cuisine, a le pouvoir de conduire des étudiants à la maîtrise du calcul, indispensable pour l'exercice des métiers scientifiques et techniques. C'est notamment la raison pour laquelle les « Cours de gastronomie moléculaire » (cours publics et gratuits, analogues à ceux du Collège de France, mais donnés à l'AgroParisTech) ont pour sous-titre général « De l'expérience au calcul ».

Et demain ?

Si les applications technologiques et pédagogiques de la gastronomie moléculaire ont beaucoup intéressé le milieu professionnel ou pédagogique, l'ambition scientifique est restée constamment au cœur des activités du Groupe de gastronomie moléculaire et des autres équipes de la discipline, au Danemark, Brésil, États-Unis, en Espagne, Italie, Belgique...

Dans les années 2000, il est apparu que toute « recette » est composée de trois parties essentielles : une partie techniquement inutile, une « définition » et des « précisions », ce dernier terme désignant toute l'information technique qui ne relève pas de la définition, tels que trucs, astuces, adages, maximes, proverbes, tours de main... En outre, l'activité culinaire a trois composantes : sociale, artistique, technique. Ce qui a conduit au programme (qui semble aujourd'hui fixé) de la gastronomie moléculaire : (1) modéliser les recettes (définitions) ; (2) recueillir et tester les « précisions culinaires » ; (3) explorer (scientifiquement) la composante artistique ; (4) explorer (scientifiquement) la composante « sociale » de la cuisine.

Ce programme scientifique étant posé, quelle est la façon la plus rationnelle d'étudier le champ des phénomènes culinaires ? Comme les transformations culinaires sont des processus dynamiques portant sur des systèmes structurés [32], il semble naturel d'effectuer des analyses complémentaires de l'état physique, d'une part, et de l'état chimique, d'autre part. La bioactivité résulte de l'interaction des deux aspects.

Depuis dix ans, la gastronomie moléculaire s'est ainsi imposée progressivement dans le monde académique international, avec l'organisation de chaires (Corée, Danemark, Irlande...), de séminaires (États-Unis, Cuba, Brésil, Pays-Bas...), de groupes de recherche (Pays-Bas, Allemagne, Corée, États-Unis, Japon...). Ce développement résulte sans doute de l'intérêt intrinsèque de la discipline, mais aussi de l'intérêt qu'elle suscite chez les étudiants, souvent heureux de « comprendre à quoi sert » la science qu'ils étudient ou attirés par le fantasme de la gastronomie, qu'ils confondent avec de la cuisine. Malgré des efforts considérables, la gastronomie moléculaire reste souvent confondue avec la « cuisine moléculaire », entrée en 2009 dans le dictionnaire *Robert*, et qui est la première application culinaire de la gastronomie moléculaire.

Vive la chimie !

Références

[1] This H., Froid, magnétisme et cuisine : Nicholas Kurti (1908-1998, membre d'honneur de la SFP), *Bull. de la Société Française de Physique*, **1999**, 119(5), p. 24.

- [2] Belitz H.-D., Grosch W., *Food Chemistry* (2nd ed.), Springer, **1999**.
- [3] Académie des gastronomes et Académie culinaire de France, *L'art des sauces*, Éditions J. Lanore, Malakoff, **1991**.
- [4] Perram C.M., Nicolau C., Perram J.W., Interparticle forces in multiphase colloid systems: the resurrection of coagulated *sauce béarnaise*, *Nature*, **1977**, 270, p. 572.
- [5] Dans ses *Expériences de novembre 1783*, Lavoisier publie un *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*. Lavoisier A.L., *Œuvres complètes*, **1783**, t. III, p. 563.
- [6] This H., *La Gastronomie Moléculaire et Physique*, Thèse de l'Université Paris 6, **1996**.
- [7] Astbury W.T., Molecular biology or ultrastructural biology?, *Nature*, **1961**, 190, p. 1124.
- [8] http://en.wikipedia.org/wiki/Molecular_biology, consulté le 13/06/2011.
- [9] This H., *Brillat-Savarin J.A.*, in *Molecular Gastronomy*, Columbia University Press, New York, **2006**.
- [10] This H., Les Précisions Culinaires, *Cours de Gastronomie Moléculaire N° 2*, Belin/Quae, Paris, **2010**.
- [11] This H., L'œuf dur : un festin de réactions chimiques, *L'Act. Chim.*, **2008**, 316, p. 5.
- [12] This H., Molecular gastronomy, a chemical look to cooking, *Accounts of Chemical Research*, **2009**, 42(5), p. 575.
- [13] This H., Formal descriptions for formulation, *Int. J. of Pharmaceutics*, **2007**, 344(1-2), p. 4.
- [14] Van der Sman R.G.M., Van der Goot A.J., The science of food structuring, *Soft Matter*, **2009**, 5, p. 501.
- [15] Valverde J., This H., ¹H NMR quantitative determination of photosynthetic pigments from green beans (*Phaseolus vulgaris* L.), *J. of Agricultural and Food Chemistry*, **2008**, 56(2), p. 314.
- [16] Valverde J., Study of the modifications induced by various culinary and industrial treatments of pigments systems from immature pods of green beans (*Phaseolus vulgaris* L.), Introduction of new analytical methods for the study of these systems, Thèse CIFRE avec le Groupe Marie UNIQ, Université Paris 6, **2009**.
- [17] Valverde J., This H., Quantitative determination of photosynthetic pigments in green beans using thin-layer chromatography and a flatbed scanner as densitometer, *J. of Chemical Education*, **2007**, 84(9), p. 1505.
- [18] Cazor A., Deborde C., Moing, A., Rolin D., This H., Sucrose, glucose and fructose extraction in aqueous carrot root extracts prepared at different temperatures by means of direct NMR measurements, *J. of Agricultural and Food Chemistry*, **2006**, 54, p. 4681.
- [19] Bowes B.G., La racine, *Structure des Plantes*, INRA (ed.), Paris, **1996**, p. 144.
- [20] Tardieu A., Guerez A., Phana S., de Man W., This H., Quantitative nuclear magnetic resonance (qNMR) analysis of mono- and disaccharides in aqueous solutions obtained by soaking raw or fried dice of onion bulbs (*Allium cepa* L.), *J. of Food Science*, **2009**, 74(4), p. C319.
- [21] Scheenen T.W.J., Vergeldt F.J., Heemskerck A.M., Van As H., Intact plant magnetic resonance imaging to study dynamics in long-distance sap flow and flow-conducting surface area, *Plant Physiology*, **2007**, 144, p. 1157.
- [22] *The Maillard Reaction in Food and Medicine*, H. O'Brien, H. Nursten, M.J.C. Crabbe, J.M. Ames (eds), The Royal Society of Chemistry, Cambridge, **1998**.
- [23] LeBlanc B.W., Eggleston G., Sammatrot D., Cornett C., Dufault R., Deeby T., St Cyr T., Formation of hydroxymethylfurfural in domestic high-fructose corn syrup and its toxicity to the honey bee (*Apis mellifera*), *J. of Agricultural and Food Chemistry*, **2009**, 57(16), p. 7369.
- [24] This H., Cazor A., Trinh D., Color evolution of aqueous solutions obtained by thermal processing of carrot (*Daucus carota* L.) roots: influence of light, *J. of Food Science*, **2008**, 73(4), p. E176.
- [25] This H., Science, technologie, techniques... culinaires : quelles relations ?, *Cours de Gastronomie Moléculaire N° 1*, Éditions Quae/Belin, Paris, **2009**.
- [26] This H., La gastronomie moléculaire, *Sciences des Aliments*, **2003**, 23(2), p. 187.
- [27] This H., www.pierre-gagnaire.com/francais/cdthis.htm.
- [28] This H., La gastronomie moléculaire, *L'Act. Chim.*, **1995**, (5-6), p. 42.
- [29] This H., Dans la famille mousses au chocolat..., *L'Act. Chim.*, **2008**, 319, p. 5.
- [30] Société des Cuisiniers de Paris, *La Cuisine à l'Usage des Familles* (le livre de la profession), Eyrolles, Paris (sans date), p. 414.
- [32] Dickinson E., Colloid science of mixed ingredients, *Soft Matter*, **2006**, 2, p. 642.



Hervé This

est professeur consultant à AgroParisTech, chimiste à l'INRA* et directeur scientifique de la Fondation « Science & Culture Alimentaire » (Académie des sciences).

* Équipe de gastronomie moléculaire, UMR 1145, INRA/Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement (AgroParisTech), 16 rue Claude Bernard, F-75005 Paris.
Courriel : herve.this@paris.inra.fr