

# Modélisons au premier ordre, avant d'aller voir les détails...

Hervé This

Les sciences de l'aliment sont diverses, puisque les phénomènes qui s'observent entre le champ et l'assiette attirent tout aussi bien des analyses chimiques, physiques, biologiques... qu'historiques, anthropologiques, sociologiques... Pour cette chimie, qui est objet de passion pour tous les lecteurs de *L'Actualité Chimique*, seuls comptent toutefois les réarrangements atomiques qui ont lieu lors des transformations des aliments, que ces transformations – que nous devons nommer « culinaires » – soient mises en œuvre dans les foyers ou dans les usines (puisque, en réalité, ce sont les mêmes).

Nous sommes bien d'accord que la chimie est une science des transformations, plutôt qu'une collection de papillons morts, que seraient les molécules ou les autres assemblages atomiques sans leur réactivité. De même pour la gastronomie moléculaire : ce sont bien les transformations qui comptent, plutôt que les « aliments » eux-mêmes, sans compter que la carotte dans le champ n'est chimiquement pas composée comme la julienne de carotte, en raison précisément des modifications moléculaires qui ont eu lieu lors du passage de la carotte dans le champ à la julienne de carottes dans sa sauce vinaigrette.

Toutefois, qui veut explorer les transformations culinaires doit aussi suivre une série d'états, caractérisés chacun par une composition chimique. La « modélisation » des aliments aux divers stades de leur préparation n'est donc pas indue, et, mieux encore, elle est indispensable pour comprendre les transformations. Ne nous étonnons donc pas si l'analyse chimique est une composante notable de la gastronomie moléculaire, mais, surtout, essayons d'examiner ici comment modéliser les principaux « aliments » lorsqu'ils sont « traités thermiquement » (c'est-à-dire cuits !).

## Composition et ordres de grandeur

Classiquement, la chimie des aliments s'est préoccupée de leur composition, puisque c'est une forme de modélisation. Il existe d'ailleurs des tables, bien colligées, qui entrent dans les détails de cette composition, mais en réalité, les détails nous égarent. Le monde vivant, d'où proviennent les ingrédients que sont les viandes, poissons, fruits, légumes... c'est-à-dire essentiellement des tissus végétaux ou animaux, a bénéficié de tant de temps d'évolution qu'il a eu la possibilité de s'embellir d'une foule de composés présents en quantités très variées dans les tissus. La seule issue, pour une telle description, est donc d'examiner les choses aux quelques premiers ordres.

Toutefois, ce ne serait pas faire œuvre de science très moderne que de constater que les aliments sont faits majoritairement d'eau, puis de protéines/peptides/acides aminés, « lipides » (triglycérides, phospholipides...), de saccharides (divers degrés de polymérisation, de ramification...), avant de contenir également des classes moléculaires variées, telles que composés phénoliques, sels minéraux... D'autant que ce



Vive la chimie !

« premier ordre » de description chimique n'a rien à voir avec le « premier ordre gustatif » : l'eau est insipide, tout comme les protéines ou les polysaccharides à longue chaîne (pensons à la cellulose, à l'amidon...), et de ce point de vue gustatif, ce sont parfois des molécules en petites concentrations qui sont importantes, et qui doivent donc être énumérées par ordre d'importance gustative. Plus généralement, on a intérêt à bien identifier que les aliments sont des systèmes « bioactifs », en ce sens qu'ils peuvent libérer des molécules susceptibles d'agir sur nos sens et notre physiologie en se liant à des récepteurs... de sorte qu'il existe autant d'ordres successifs de bioactivité que de type de récepteurs.

Par exemple, si l'eau est le composé majoritaire d'un jus de citron (premier ordre en termes de composition), c'est l'acide citrique (acide 3-carboxy-3-hydroxypentanedioïque) qui devient le composé principal du point de vue sapictif (les saveurs, perçues par les cellules réceptrices des papilles fautiveusement nommées gustatives, et qu'il vaudrait mieux qualifier de sapictives). Au premier ordre olfactif maintenant, l'eau et l'acide citrique sont détrônés par le limonène (1-méthyl-4-prop-1-èn-2-yl-cyclohexène) par exemple.

Le chimiste ne se satisfait pas de cette amélioration, car pourquoi la consistance échapperait-elle à l'analyse ? Pour cette caractéristique, hélas trop souvent confondue avec la texture, l'analyse en termes de clés et de serrures de l'olfaction ou de la sapiction est sans objet, car les capteurs sont d'une autre nature.

Examinons d'abord pourquoi la consistance n'est pas la texture... en plongeant dans une piscine : quand le saut est bien fait, l'eau s'écarte raisonnablement devant le plongeur, qui s'enfonce dans l'onde sans bruit ; en revanche, quand il y a un « plat », l'eau n'a pas la possibilité de migrer assez vite devant le corps, et un gros bruit se fait entendre, tandis que l'eau, pourtant liquide, semble dure comme du béton. Dans le premier cas, la texture de l'eau est liquide, pourrait-on dire, et dans le second, elle est quasi solide. De même, un carré de chocolat a une consistance... de carré de chocolat,

laquelle dépend de la microstructure ; en revanche, la texture est fondante quand on suce le carré, et croquante quand on le croque. Généralisons : la consistance, c'est en gros la microstructure, alors que la texture, c'est son appréciation, laquelle dépend de la façon dont on appréhende l'objet.

Reste que les aliments ont une microstructure, et que, en tant que physico-chimiste, je ne vois pas de raison pour laquelle cette caractéristique reviendrait dans l'escarcelle de la physique : le comportement des matériaux que sont les aliments résulte d'arrangements moléculaires et atomiques, et, mieux encore, c'est sans doute un parti pris de la physico-chimie que de penser que les phénomènes s'interprètent d'abord en termes moléculaires. Là encore, une modélisation s'impose.

## Tissus végétaux

Nous avons maintenant les trois idées clés qui nous permettent d'appréhender les aliments, de les modéliser : la microstructure, les ordres de grandeur, les types de bioactivité. Examinons ici les modélisations des systèmes les plus courants de notre alimentation : les tissus végétaux (fruits, légumes) et les tissus animaux ; promis, dans un texte suivant, nous considérerons la grande question des sauces.

Commençons par les tissus végétaux et les modifications de consistance. Que la plante concernée soit la carotte (*Daucus carotta* L.), l'oignon (*Allium cepa* L.), le haricot vert (*Phaseolus vulgaris* L.), etc., le tissu est le plus souvent composé de cellules rendues jointives par les parois cellulaires. En termes chimiques, il s'agit donc d'un gel, formellement, puisque le cytosol est essentiellement composé d'eau, et il n'est pas inutile pour notre propos (comprendre les phénomènes qui ont lieu lors des « cuissons ») de savoir que les cellules sont peu modifiées structurellement quand on chauffe des tissus végétaux à des températures qui ne dépassent pas la température d'ébullition de l'eau. Dit différemment, les cellules de carotte (plus exactement de racines de carotte) sont intactes quand on prépare une purée de carotte.

Pourquoi la purée de carotte n'a-t-elle alors plus la consistance de la carotte ? Parce que les cellules qui étaient maintenues jointives ont été séparées mécaniquement. Comment ont-elles pu l'être ? C'est le ciment intercellulaire qui a été modifié par le traitement thermique. Rappelons en effet que dans les tissus végétaux, les cellules, limitées par une membrane (double couche phospholipidique, avec une foule de protéines insérées, notamment, dans la double couche), sont jointoyées par le béton qu'est la paroi cellulaire. Dans ce béton, il y a une charge, inerte, à savoir les molécules de cellulose et d'hémicelluloses, très stables au point qu'un chauffage de coton hydrophile dans l'huile ne produit pas de « bisque », contrairement au chauffage de la chitine d'une carapace de crustacé. En revanche, le ciment que sont les pectines, polysaccharides évoqués dans un texte ancien consacré à la confiture [1], est dégradé : les molécules de pectines subissent une hydrolyse nommée élimination bêta, qui libère de l'acide galacturonique et divers constituants oligosaccharidiques.

Bien sûr, cette réaction n'est pas la seule à se produire, et l'on suppose à juste titre que bien d'autres phénomènes ont lieu. Par exemple, les enzymes sont dénaturées, tout comme les autres protéines ; ou encore, les autres polysaccharides sont hydrolysés, comme l'amidon, qui libère des molécules de glucose... D'ailleurs, cette évocation doit nous conduire à prendre en compte le temps de traitement thermique : avant que l'amidon ne soit hydrolysé, il est

« empesé », ses constituants amylosiques se dissolvant dans le milieu aqueux environnant tandis que des molécules d'eau s'introduisent entre les molécules d'amylopectine (les deux types de composés, amylopectine et amylose, sont respectivement des polymères ramifiés et linéaires du glucose, avec des liaisons alpha 1-4 pour la chaîne principale, et des branchements 1-6).

Et la température compte également : quand l'environnement du tissu végétal est à plus de 100 °C, l'eau de la surface du tissu est rapidement éliminée, formant une « croûte » composée des molécules non évaporables du tissu. À ce sujet, il n'est pas inutile de rappeler que la forte chaleur latente de l'eau (2 257 kJ/kg) « protège » l'intérieur du tissu végétal contre l'échauffement. Pour un soufflé cuit dans un four à 180 °C, l'épaisseur de croûte n'est que de quelques millimètres après plusieurs dizaines de minutes de cuisson. De même, le pain a une croûte de quelques millimètres d'épaisseur seulement, alors que la durée de cuisson, à des températures qui atteignent 250 °C, avoisine une heure.

Voilà pour le premier ordre des consistances. Pour l'aspect visuel, il en va très différemment. Les tissus végétaux verts, tout d'abord, prennent une teinte qui évolue, en raison des modifications des divers pigments. N'oublions pas que dans un légume vert, la couleur est due à la fois aux chlorophylles (a, a', b, b'), lesquelles ne sont pas « vertes » mais de teintes comprises entre le jaune et le bleu, et aux caroténoïdes que sont les carotènes, les xanthophylles... sans oublier les composés phénoliques parfois présents (on connaît des haricots verts violets !). Lors du traitement thermique, les chlorophylles peuvent perdre leur ion magnésium central pour se transformer en phéophytines de couleur vert olive tirant sur le brun, mais selon les conditions, les caroténoïdes peuvent aussi se transformer (n'oublions pas leurs merveilleuses liaisons doubles conjuguées). Les polyphénols, exposés à des milieux d'acidités variées, ou encore en présence d'ions métalliques, peuvent changer de couleur.

Et pour l'ordre olfactif ? Et pour l'ordre sapictif ? Là encore, bien des possibilités existent, de la libération d'hydrogène sulfuré par les protéines à cystéine, par exemple, en passant par mille possibilités qui font les particularités des divers végétaux (pensons à l'oignon, à l'ail, aux choux...). C'est un trop gros morceau pour un seul texte, et nous devons y revenir. En attendant, passons au premier ordre des tissus animaux.

## Viandes et poissons

Formellement, l'analogie entre les tissus animaux et végétaux est fascinante. Des deux côtés, il y a des tissus composés par assemblage de cellules. Toutefois, à la paroi végétale correspond le tissu collagénique dans les tissus animaux, assemblage de fibres de trimères. Le collagène correspond-il aux pectines, ou bien à la cellulose ? Ou bien encore, est-il illusoire de chercher une homologie stricte là où il n'y a rien à chercher ? Ce qui est net, c'est que dans les deux cas, ce sont des polymères qui font la liaison entre les cellules adjacentes. D'ailleurs, au premier ordre, si les pectines sont faites d'enchaînements d'acide galacturonique, si les celluloses sont faites d'enchaînements de glucose, les collagènes sont faits de répétitions de la séquence résidu de glycine/résidu de proline/résidu d'hydroxyproline.

Bref, nous avons dans les tissus musculaires des cellules jointoyées par du tissu collagénique. Et l'homologue du xylène et du phloème, que sont les canaux qui montent et

descendent la sève dans les végétaux, est le réseau sanguin, qui irrigue les tissus musculaires. D'ailleurs, on ne manquera pas de comparer l'hémoglobine du sang avec les chlorophylles des tissus végétaux : dans les deux cas, un noyau tétrapyrrolique et un ion métallique.

La transformation des tissus animaux au cours d'un traitement thermique ? De même que les pectines étaient hydrolysées dans les végétaux, le tissu collagénique est dissocié, et le collagène s'hydrolyse... au point qu'une solution de gélatine cuite pendant quelques heures perd ses propriétés gélifiantes. Là encore, pas de « fuite » du contenu intracellulaire dans le milieu environnant (un « bouillon » par exemple) : l'électrophorèse d'un bouillon de viande ne montre pas d'actines ni de myosines, mais seulement le collagène et ses produits de dégradation. D'ailleurs, au cœur des fibres musculaires, ces protéines coagulent, à des températures variées (55 °C pour la partie fibrillaire de la myosine, 66 pour les protéines sarcoplasmiques, la partie globulaire de la myosine, 79 pour l'actine).

La couleur ? Elle évolue, tout comme évoluait la couleur des végétaux verts, parce que la myoglobine ne fixe plus l'oxygène dès 70 °C. L'intérieur de la viande devient rose, comme on le voit bien quand on coupe un rôti de bœuf en tranche. À propos de couleur, un autre phénomène apparaît, en surface essentiellement, en raison des « réactions de Maillard »... que l'on a mises à toutes les sauces. Luttons d'abord contre l'idée fautive selon laquelle ces réactions n'auraient lieu qu'à haute température : si les diabétiques ont l'œil qui s'opacifie, c'est en raison de réactions de Maillard... qui ont donc lieu à 37 °C seulement ; lentement certes (heureusement), mais sûrement (malheureusement). D'autre part, je propose que nous cessions de confondre ces réactions avec la caramélisation qui, notre collègue Jacques Defaye l'a bien montré [2], résulte d'une déshydratation du

saccharose, avec formation de dianhydrides de fructose, caractérisés par des pont spirolactone. Les réactions de Maillard, elles, résultent de la formation d'un composé d'Amadori, par réaction d'un sucre réducteur (du glucose, comme il s'en trouve dans le sang) et d'un acide aminé ou d'un résidu d'acide aminé. Rien à voir ! Et puis, signalons aussi que la surface des viandes évolue en raison de bien d'autres réactions : oxydations, hydrolyses... Sans compter qu'à haute température, des pyrolyses ont lieu.

Mais ce serait entrer ici dans des détails qui méritent mieux que d'être survolés tant ils sont passionnants. Je propose de poursuivre une autre fois, en conservant ici l'idée simple que les transformations culinaires sont simples... au premier ordre. Vive la gourmandise éclairée !

[1] This H., Histoire d'une pièce d'argent, *L'Act. Chim.*, **2008**, 315, p. 9.

[2] Ratsimba V., Gardia Fernandez J.M., Defaye J., Nigay H., Voilley A., Qualitative and quantitative evaluation of mono- and disaccharides in D-fructose, D-glucose and sucrose caramels by gas-liquid chromatography-mass spectrometry. Di-D-fructose dianhydrides as tracers of caramel authenticity, *J. of Chromatography A*, **1999**, 844, p. 283.



Photo : L. Monier

#### Hervé This

est physico-chimiste INRA\* et directeur scientifique de la Fondation « Science et culture alimentaire » de l'Académie des sciences.

\* Équipe de gastronomie moléculaire, UMR 214, INRA/Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement (AgroParisTech), 16 rue Claude Bernard, 75005 Paris.  
Courriel : herve.this@paris.inra.fr  
<http://sites.google.com/site/travauxdehervethis>

## Ressources nationales de chimie

www.educnet.education.fr/rnchimie

RNChimie (Ressources nationales de chimie) est un site destiné aux enseignants des lycées généraux et technologiques, des BTS et des CPGE. Vous y trouverez plus de 600 protocoles de travaux pratiques, des recommandations pédagogiques, des cours, des exercices, des présentations sous forme de diaporamas télé-chargeables, des fiches techniques de TP, des informations relatives à la sécurité mais aussi de l'histoire des sciences, des informations et des données sur les techniques spectroscopiques et chromatographiques dont des données expérimentales directement utilisables. Vous y trouverez également des cours, TD et applications sur les plans d'expérience (mathématiques), des cours et exercices de génie chimique, des exemples de TP basés sur la démarche d'investigation.

RNChimie, c'est 600 pages web,  
700 fichiers doc/zip, 930 documents pdf  
et des dizaines de diaporamas à votre disposition !

Illustration : Xavier Bataille

© Ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche - Direction de la technologie - SDTICE