

Chimie des aliments et du goût : une nouvelle rubrique de *L'Actualité Chimique*

On le dit souvent : les Français deviennent, particulièrement, susceptibles lorsque l'on touche à ce qu'ils ont dans leur assiette. D'abord en ce qui concerne la qualité sanitaire de ce qu'ils mangent : quelle diligence des professionnels, voire des politiques, s'impose pour éviter que tel ou tel risque, tel soupçon de *Listeria*, telle trace difficilement détectable de dioxine, tel becquerel, ne provoque une révolution ! Mais en France, cette susceptibilité se tourne en curiosité gourmande – ô combien ! – car en pensant « assiette », on pense vite « gastronomie ».

Notre mission, à *L'Actualité Chimique*, est de promouvoir la science et particulièrement les sciences chimiques. Nous voici donc en présence d'une situation idéale : pénétrer les intelligences de nos lecteurs par le biais de la gastronomie et plus généralement de l'alimentation, puisque nous sommes tous si désireux d'en savoir plus sur ces thèmes, mais en profiter pour leur faire connaître la puissance (et les beautés) de la chimie – et satisfaire en plus leur curiosité scientifique.

Une seule condition pour réussir cette entreprise : confier la mission à un médiateur de talent. Nous avons le grand plaisir d'entraîner dans cette aventure Hervé This, directeur de l'équipe INRA de gastronomie moléculaire et animateur du groupe français Chimie des aliments et du goût de la Société Française de Chimie. Son enthousiasme et sa compétence nous assurent qu'à l'écoute à la fois des lecteurs et des chercheurs actifs dans le domaine, il animera cette nouvelle rubrique, « **Chimie des aliments et du goût** », et saura en faire l'un des points forts de la revue, l'un de ceux que les lecteurs cherchent aussitôt en ouvrant la dernière parution.

Paul Rigny

La chimie des aliments et du goût

Hervé This

Un constat terrible

Il y a quelques années, un constat terrible avait été fait lors de la recension du *Who's who in Food Chemistry* publié par Springer : alors que les Allemands, Anglais, Espagnols, Italiens... se comptaient, pour chaque pays, par centaines ou milliers, dans ce livre, les Français étaient moins d'une trentaine [1] ! Ce fut le départ de la construction du groupe français « Chimie des aliments et du goût », qui vise à constituer une communauté active.

Depuis, les informations venues de l'Europe (EuCheMS) ont été transmises à tous ceux qui se sont inscrits dans ce groupe, et un moment fort de l'activité du groupe a été le congrès européen Euro Food Chem XIV, organisé à Paris fin août 2007, à la demande de la Food Chemistry Division de l'EuCheMS. Les membres de la SFC en étaient informés par l'annonce faite dans *L'Actualité Chimique* [2], tandis que les membres du groupe l'étaient par courriel⁽¹⁾.

Une communauté nécessaire

Évidemment, on ne manquera pas de se demander pourquoi les Français étaient si peu nombreux à se déclarer spécialistes de « food chemistry ». Dans un précédent numéro de *L'Actualité Chimique*, le rédacteur en chef posait la question – lancinante ! – dans son éditorial, mais des décennies de réflexion au sein de la SFC n'ont pas trouvé la solution.

Plus modestement, j'ai enquêté à propos de la « chimie des aliments », notamment auprès des très nombreux collègues de l'INRA, et j'ai obtenu des réponses surprenantes ; par exemple : « *je suis agronome de formation, pas chimiste* », ou encore : « *je suis biochimiste, pas chimiste* », ou « *je fais de la physico-chimie*. »

Oui, mais à ce compte, qui fait vraiment de la « chimie » ? Braconnot ne faisait-il pas œuvre de chimiste quand il découvrit la pectine ? Et Liebig, quand il analysait la viande ? Et Pasteur, qui aurait vraiment mérité de se dire biochimiste ? Et... arrêtons de dresser d'inutiles et néfastes barrières disciplinaires qui, au fond, s'apparentent à celles que les États

dressent entre les peuples : ne sont-elles pas là pour assurer une forme de protectionnisme, surtout en temps de crédits de recherche limités ? Ce qui compte avant tout, n'est-ce pas la connaissance ? À ce titre, la chimie supramoléculaire est exemplaire, parce qu'elle rend floue la différence entre la chimie la plus organique et la biologie d'une part, et entre la chimie et la physique d'autre part : le grand écart, penserait-on, si l'on restait dans une vision disciplinaire de la science.

Pour en revenir à la « chimie des aliments et du goût » – terminologie qui a été choisie pour éviter celle de « chimie des aliments » –, ne pourrait-on pas proposer un plus grand œcuménisme en admettant dans notre communauté tous ceux qui se préoccupent de phénomènes (c'est cela, la science, a dit notre grand « patron » Antoine Laurent de Lavoisier) relatifs aux aliments en ayant en vue les transformations moléculaires ? On ne combattrait pas, ainsi, la faible tendance associative de nos concitoyens, mais au moins, pourrions-nous disposer de compétences plus larges.

Arrêtons-nous sur la terminologie un instant : pourquoi pas seulement « chimie des aliments » ? La question avait été longuement débattue avec Jean-Marie Lehn, qui restait choqué que l'on dise en anglais « *let's grab food* », au lieu de « *allons déguster un met délicieux* » (je caricature à dessein).

Pour poser la question, il n'est pas inutile de nous demander ce que nous mangeons. Certainement pas des nutriments ! Ce fut une grave erreur de Marcellin Berthelot que de le croire, négligeant le fait que nous sommes des êtres forgés par des millions d'années d'évolution biologique, laquelle nous a dotés d'un appareil sensoriel (afin de détecter les ingrédients comestibles, d'éviter les aliments dangereux, toxiques ou contaminés, etc.). De ce fait, les aliments sont sélectionnés non pas sur la base d'une table... de composition (sans jeu de mot), mais sur celle d'une stimulation des récepteurs sensoriels. Ils le sont aussi sur la base d'une culture alimentaire : peut-on expliquer autrement que le même munster, qui plaît tant aux Alsaciens, rebute des Asiatiques qui, de leur côté, se délectent de ce fruit « puant » que l'on nomme le durian ? En tout cas, la clé d'une rationalité alimentaire ne se trouve pas dans les molécules constitutives.



D'autre part, le mot « aliment » est très insuffisant, parce qu'il y a tout le travail de la cuisine entre la carotte dans le champ et les carottes râpées sur la table... pour prendre un exemple sans traitement thermique ! Si l'on ajoute la composante culinaire, l'écart est encore plus grand.

De ce fait, on ne doit sans doute pas mettre dans le même panier les ingrédients et les mets ; c'est une simplification dommageable intellectuellement (la science ne vise-t-elle pas, notamment, à donner un éclairage sur le monde, en « distinguant » ce qui doit être distingué, et en « rapprochant » ce qui doit l'être ?) que de confondre les ingrédients et les préparations culinaires (j'évite donc, ici, la terminologie « préparations alimentaires », que je récusé pour les raisons données plus haut). Bref, je propose de distinguer, parmi toutes les études de chimie qui s'intéressent à ce que nous mangeons : celles qui sont consacrées aux ingrédients alimentaires, celles qui sont consacrées aux transformations culinaires, celles qui sont consacrées aux procédés de transformation industrielle (souvent bien différents des transformations culinaires), et enfin celles qui sont consacrées aux interactions des mets et des récepteurs sensoriels. Et voilà pourquoi nous sommes arrivés à « chimie des aliments et du goût ».

Il y aurait une autre distinction à faire, entre science et technologie, pour notre groupe comme pour la SFC, mais c'est une autre discussion : la science produit des connaissances nouvelles, en cherchant les mécanismes des phénomènes, alors que la technologie se charge de trouver des applications de ces connaissances. On rappelle que les « sciences appliquées » n'existent pas, comme l'a si bien dit (et répété jusqu'à l'exaspération) Pasteur toute son existence : « *Non, mille fois non, il n'existe pas une catégorie de sciences auxquelles on puisse donner le nom de sciences appliquées. Il y a la science et les applications de la science, liées entre elles comme le fruit à l'arbre qui l'a porté* » [3]. Mais c'est là une autre question.

Quelle communication pour notre groupe ?

Comment faire vivre notre groupe Chimie des aliments et du goût ? Il y a mille façons, mais notamment, il y a cette invitation du rédacteur en chef de *L'Actualité Chimique*. Une aubaine, qui me fait rougir de honte : lors de ma thèse intitulée « La gastronomie moléculaire et physique », qui visait (à la demande de l'Académie des sciences) à établir la nouvelle discipline qu'était la « gastronomie moléculaire », j'avais affiché les cinq objectifs suivants : (1) explorer les recettes ; (2) recueillir et tester les dictons culinaires ; (3) inventer des

mets nouveaux en se fondant sur les objectifs (1) et (2) ; (4) introduire en cuisine de nouveaux ustensiles, ingrédients, méthodes ; et (5) utiliser l'attrait du public pour montrer que la science est une activité merveilleuse.

Il n'y a rien à regretter, et les cinq objectifs restent honorables... mais comment ne pas avoir vu que les objectifs (3) et (4) sont de nature technologique... ? Ce qui était un comble, alors que l'on voulait créer une nouvelle discipline scientifique ! Et que l'objectif (5) n'a rien à voir avec la science : il s'agit de communication, sur fond d'idéalisme politique.

Qu'importe, surtout en ce moment : alors que les jeunes dédaignent les carrières scientifiques, l'effort de communication doit être intensifié (en le séparant de l'activité scientifique proprement dite). Et si l'on n'attrape pas des mouches avec du vinaigre, il est également vrai que des matières intellectuelles, fussent-elles les plus belles, méritent d'être rendues appétissantes, comestibles et digestes ! Je pense à la communication au grand public, mais aussi aux étudiants... et pourquoi pas à nos collègues ? C'était cela, notamment, l'idée de Paul Rigny : faire état de travaux scientifiquement rigoureux, sous une forme attrayante.

Notre rédacteur en chef me décerne le titre de « médiateur de talent »... Je le remercie, évidemment pour le « de talent », mais j'hésite à accepter le « médiateur » : ne sommes-nous pas tous des médiateurs ? Lors des conférences (je pense ici aux conférences scientifiques) que nous faisons, pendant les séminaires scientifiques, quand nous écrivons des articles scientifiques, ne sommes-nous pas sans cesse en train de communiquer, d'expliquer ce que nous faisons ? D'ailleurs, je me déssole souvent que, même dans ces cadres scientifiques, nous ne puissions qu'excessivement rarement montrer ce qui fait la beauté de la science : le détail de calcul, la belle équation différentielle rencontrée au coin d'une expérience... Oui, nous faisons bien souvent de la médiation... et nous pourrions même penser, si nous suivons Lavoisier, que la science et la communication se confondent : « *L'impossibilité d'isoler la nomenclature de la science, et la science de la nomenclature, tient à ce que toute science physique est nécessairement fondée sur trois choses : la série des faits qui constituent la science, les idées qui les rappellent, les mots qui les expriment [...]. Comme ce sont les mots qui conservent les idées, et qui les transmettent, il en résulte qu'on ne peut perfectionner les langues sans perfectionner la science, ni la science sans le langage.* » Oui, selon Lavoisier, la science est bonne quand les mots pour le dire sont bons... et c'est à ce titre, et seulement à celui-ci, que j'accepte avec reconnaissance les éloges de Paul Rigny.

Appel à communication

Nous voici donc arrivés au projet proprement dit, pour cette nouvelle rubrique : montrer de la chimie moderne, au sens large du mot « chimie », à propos d'« aliments » et de goût, dans une acception large des termes, sous une forme appétissante, comestible et digeste. Naturellement, à la demande de la rédaction, je me laisserai aller à m'enthousiasmer pour les confitures, les soufflés, les bouillons de carottes, la couleur verte des haricots verts, la béarnaise, le poulet rôti... puisque ce sont les thèmes scientifiques que nous étudions dans l'équipe INRA de gastronomie moléculaire. Comme dans le texte qui suit, je m'efforcerai de toujours terminer par une question simple, en vue d'encourager le dialogue : dans une vie antérieure, j'ai rêvé (activement !) que la revue *Pour la Science* devienne un centre actif d'échanges scientifiques, un peu comme le faisait le Père Mersenne,

lequel mettait en relation Descartes, Pascal, Fermat et de nombreux mathématiciens de ce siècle ; ici, j'espère que cette nouvelle rubrique contribuera à forger une nécessaire communauté.

Rubrique, et non chronique ! Je serais ravi que des collègues viennent me prendre la plume pour présenter leurs propres études, faire état de leurs passions dans ce domaine merveilleux qu'est la « chimie des aliments et du goût ». Vive la chimie !

Note et références

- (1) L'inscription à ce groupe est libre : il suffit d'envoyer un courriel à Hervé This en indiquant coordonnées et thèmes de recherche.
- [1] This H., *L'Act. Chim.*, fév. 2003, p. 59.
- [2] *L'Act. Chim.*, mars 2007, 306, p. 64.
- [3] Pasteur L., Pourquoi la France n'a pas trouvé d'homme supérieur au moment du péril : article publié dans a) le *Salut public*, Lyon, mars 1871, et b) la *Revue Scientifique*, Œuvres complètes, tome 7, 22 juillet 1872, 2^e série.

Histoire d'une pièce d'argent

Hervé This

Le cuivre n'est pas inutile pour faire les confitures... mais n'est-il pas toxique ?



Photo : S. Bléneau Serdel.

À l'invitation du rédacteur en chef de *L'Actualité Chimique*, ce texte inaugure donc une série qui montrera les beautés de la chimie dans notre alimentation.

Alimentation ? Nous ne sommes pas encore lancés que le mot « alimentation » doit nous arrêter, tout comme nous arrêterait le mot *food* en anglais. C'est parce que ces mots conviennent mal que le groupe Chimie des aliments et du goût a été créé sous ce nom, sous l'égide de la Société Française de Chimie : la chimie (je parle ici de la science expérimentale qui porte ce nom, pas des applications de celle-ci) trouve trois fois sa place, d'une part entre le commerçant qui nous procure les produits végétaux et animaux, et notre organisme d'autre part.

La première fois, c'est dans la connaissance des produits qui, vus du côté de la cuisine, seront plutôt des ingrédients (du latin *ingredi*, « entrer dans »). La deuxième fois, c'est lors de la transformation culinaire, qui produit des mets, des plats, plutôt que des aliments. La troisième fois, c'est dans le trajet qui mène de l'assiette à l'estomac. Pour chaque étude, la chimie s'associe à des sciences différentes : la première fois avec l'agronomie, la zoologie, la biologie ; la deuxième, avec la physique pour former la gastronomie moléculaire ; la troisième, avec la physiologie humaine (physiologie sensorielle, physiologie générale, toxicologie...).

Tout cela est bien abstrait, et rien ne vaut l'exemple ; parlons donc de l'exemple des confitures. Merveilleuses confitures, sucrées, délices d'adultes, chapardages d'enfants !

La question posée par un collègue chimiste et ami est : « Une pièce d'argent posée au fond de la bassine en cuivre est-elle utile lors de la réalisation des confitures ? »

Du simple, avant le compliqué

Analysons la question au premier ordre. Nous admettons que les fruits sont des tissus végétaux, composés comme on le sait de cellules, lesquelles sont limitées par une membrane cellulaire faite de phospholipides, laquelle est renforcée par une paroi. Au premier ordre, l'intérieur des cellules est fait d'eau. D'eau qui a du goût (nous reviendrons un jour sur ce terme), mais d'eau. La paroi, elle, est un superbe assemblage, composé essentiellement de celluloses, d'hémicelluloses et de « pectines ».

Oui, la description est chimiquement très rudimentaire ; mais pourquoi entrer dans les détails quand ce n'est pas nécessaire ? À quoi bon savoir que la paroi est composée de trois parties, dont une est la lamelle moyenne, formation la plus externe de chaque cellule, donc commune à deux cellules contiguës, riche en substances pectiques, assurant la cohésion des cellules entre elles ? À quoi bon savoir que la



· Mais l'opération pour laquelle il se sentait vraiment né, c'était la soustraction qu'il exécutait avec un brio et une sûreté de mains tout à fait dignes d'éloges, dans l'armoire de madame sa mère qui avait parfois le mauvais goût d'en témoigner quelque mécontentement.

Illustration issue de l'ouvrage *L'idée fixe du Savant Cosinus* de S. Christophe et G. Colomb (Armand Colin, 1959).

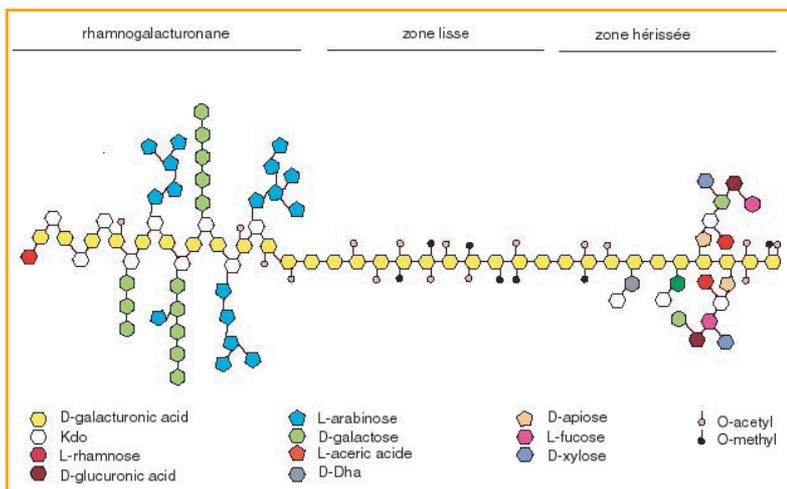


Figure 1.

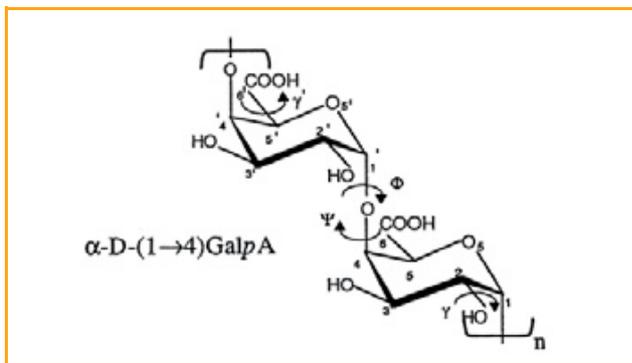


Figure 2 - La liaison entre deux résidus d'acide galacturonique.

paroi primaire, mince, souple, hydrophile, peu dense et de faible résistance mécanique, élaborée par les jeunes cellules en croissance, est principalement composée d'un réseau lâche de fibres cellulosiques et d'hémicelluloses, enchâssées dans une matrice amorphe d'autres polysides ? Ou encore que la paroi secondaire, épaisse, compacte, rigide et très résistante, mécaniquement inextensible, est construite par dépôt de cellulose en couches orientées, avec de la lignine incrustée ?

Bien sûr, il y a le plaisir de la connaissance, et cette envie rentrée d'encyclopédisme qui est en nous tous, mais il faut aussi considérer qu'entrer dans de telles considérations nous éloigne de notre sujet : la confiture ! La question du cheminement, qui opposait Descartes et Montaigne (la « méthode », c'est le chemin, droit pour Descartes, musardant pour Montaigne), reste évidemment d'actualité, et j'ai beau aimer beaucoup la méthode des *Essais*, il me faut quand même admettre que les informations précédentes sur la constitution des végétaux sont ici inutiles, voire gênantes.

Il s'agit surtout de savoir extraire les composés « pectiques », de faire prendre les confitures et de leur donner une composition qui assure la conservation des gels formés. Pectine : le mot a été lâché plusieurs fois, parce que c'est la clé de la compréhension du phénomène, due au chimiste français Henri Braconnot (Commercy, 29 mai 1780-Nancy, 15 janvier 1855) qui découvrit en 1825 la molécule qui fait prendre les confitures.

Cette fois, l'information est pertinente : ni les hémicelluloses, ni les celluloses ne répondent à la question de

la confiture, et seules les pectines sont en cause. Comment font-elles prendre la confiture ? Il faut la connaissance de la constitution chimique de la molécule pour répondre à la question.

Les pectines

Les pectines sont présentes dans les végétaux à des teneurs qui atteignent une dizaine de grammes par kilogramme de tissu frais. Ce sont des hétéropolysides à teneur élevée (30-35 %) en résidus d'acide α -D-galacturonique. Plus précisément, les molécules de pectines sont une succession de zones dites lisses et de zones dites hérissées.

Les zones lisses (ou chaîne principale non ramifiée) sont constituées d'homogalacturonanes ou de rhamnogalacturonanes (figure 1). Les homogalacturonanes sont des enchaînements linéaires de résidus d'acide D-galacturonique (acide 3,4,5,6-tétrahydroxy-tétrahydro-pyran-2-carboxylique), liés en α -(1→4) en conformation 4C_1 . Les liaisons entre les résidus d'acide galacturonique sont axiale-axiales (figure 2), ce qui conduit à donner aux molécules d'homogalacturonanes une conformation hélicoïdale droite, avec un pas de deux ou trois monomères par tour.

Tous les 80 à 100 résidus, la chaîne homogalacturonique est interrompue par des unités L-rhamnopyranose (6-méthyl-tétrahydro-pyran-2,3,4,5-tétraol), formant des chaînes rhamnogalacturoniques. Ces chaînes seraient constituées de répétitions du motif dimère $[-\rightarrow 4]-\alpha$ -D-GalA-(1→2)- α -L-Rha-(1→). Selon l'origine de la pectine, la proportion de rhamnose substitué est variable : 10 à 50 % pour les pectines de carotte, 60 % pour celles de betterave.

D'autre part, les zones dites hérissées sont riches en rhamnogalacturonanes où sont greffées des chaînes latérales composées d'oses neutres (principalement d'arabinose et de galactose) qui s'organisent de façon complexe, avec des degrés de polymérisation et de ramification pouvant être importants (figure 1).

Attardons-nous sur les résidus d'acide galacturonique, qui peuvent être estérifiés par du méthanol : le degré de méthylation (DM) est le nombre de groupes estérifiés pour cent résidus d'acide galacturonique. Précision chimique inutile, encore ? Non, car la gélification de solutions de pectines dépend de leur DM. Nous verrons plus loin que ceux qui voudront utiliser des pectines commerciales pour confectionner des confitures devront ainsi bien distinguer les pectines « hautement méthoxylées » (pectine HM), de DM supérieur à 50 %, des pectines de DM inférieur à 50 %, faiblement méthoxylées (pectine LM), et des acides pectiques ou pectates, quand le DM est inférieur à 5 %.

Autre précision importante pour comprendre la prise des confitures : certaines pectines contiennent une quantité notable d'acide acétique. Les groupes hydroxyle secondaires des résidus d'acide galacturonique peuvent être estérifiés par de

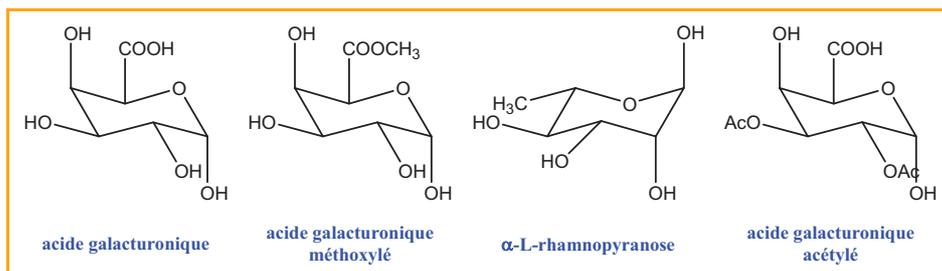


Figure 3.

l'acide acétique en O-2 ou en O-3. On définit de même un degré d'acétylation (DA) comme la proportion de résidus d'acide galacturonique acétylés pour 100 résidus. Les DA sont généralement faibles : de l'ordre de 7 à 13 % pour la carotte, avec une valeur élevée de 30 % dans la betterave.

Enfin : la prise

Comment les confitures prennent-elles (dans les bons cas) ? Les informations précédentes nous le disent. D'abord, les résidus d'acide galacturonique sont soit sous la forme protonée, neutre, en milieu acide, soit sous une forme carboxylate, négativement chargée, quand le pH est supérieur. Puisque la gélification nécessite l'association de pectines, on comprend que la neutralisation des groupes carboxylate soit utile : d'où l'usage culinaire, empiriquement sain (pour une fois !), qui veut que l'on ajoute du jus de citron dans les confitures afin de les faire prendre. À ce propos, notons que les chimistes habitués aux pH-mètres et autres indicateurs ne devraient pas se fier à leur bouche pour estimer le pH des fruits : le même vinaigre, de pH égal à 2 ou 3, imbuvable, devient parfaitement agréable quand on lui ajoute une forte quantité de sucre ; l'acidité perçue en bouche n'est pas proportionnelle à l'acidité mesurée par le pH.

D'autre part, notons que la gélification dépend du degré de méthylation : les gels de pectines hautement méthoxylés se forment par empilement des groupes méthoxyle, à la faveur des interactions hydrophobe et des liaisons hydrogène, tandis que les gels de pectines à faible DM s'établissent en présence de cations divalents ou polyvalents, qui forment des ponts entre les parties négativement chargées des molécules (plus précisément, les cations divalents forment des ponts entre groupes acide carboxylique de résidus d'acide galacturonique situés sur des parties séparées des molécules).

D'où l'usage de bassines en cuivre : cet usage est justifié chimiquement... mais malsain : que de ravages a fait le vert-de-gris, avant que ne s'impose l'acier inoxydable en cuisine !

À ce propos, il serait souhaitable que nos concitoyens les plus effrayés par la chimie aient connaissance des pratiques culinaires anciennes : dans le temps, les pots en terre (qui se brisaient) ont été avantageusement remplacés par le fer... mais ce dernier rouillait. D'où l'usage du cuivre... qui se vert-de-grisait. D'où l'étamage... qui ne tenait pas à la chaleur et qu'il fallait renouveler. Enfin l'acier inoxydable vint... et la cuisine devint plus facile, grâce aux progrès de la chimie – en l'occurrence de la métallurgie.

Pourquoi le cuivre est-il alors resté en usage dans les confitures ? Parce que ses ions divalents font merveille, comme le montre la merveilleuse expérience suivante : chauffons une pomme avec du sucre et de l'eau jusqu'à l'ébullition, puis divisons le mélange en deux parties égales, que l'on répartit dans deux bécchers. Dans l'un des bécchers, ajoutons du sulfate de cuivre, et laissons l'autre préparation nature. Puis chauffons un peu, laissons refroidir, et observons : alors que la préparation nature reste liquide, l'autre, verte (et toxique) est dure et prise ! Oui, décidément, la connaissance de la chimie éclaire bien des mystères culinaires.

Progressons : comment nous débarrasser de ces ions cuivre toxiques ? Remplaçons-les par des ions calcium, puisque ceux-ci sont réputés « bons pour nos os ». Comment ? Le chimiste qui sait où s'approvisionner n'aura pas de difficultés à répondre à la question, mais à la maison ? Je propose d'attaquer une coquille d'œuf par du jus de citron ou du vinaigre : lorsque l'effervescence cesse, la solution est chargée d'ions calcium.

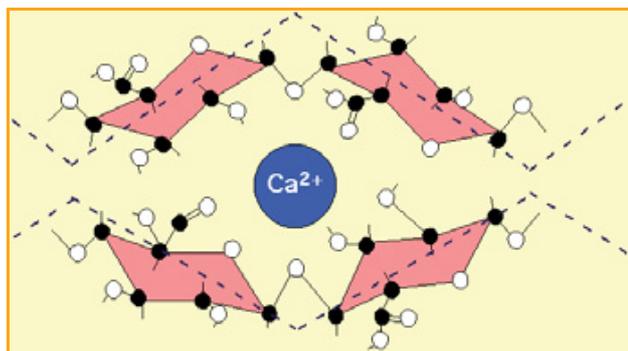


Figure 4 - Dans les modèles « boîte à œufs », du calcium divalent peut se lier à neuf atomes électronégatifs et assurer ainsi la liaison entre deux chaînes de pectine.

Et la pièce d'argent, dans toute cette histoire ? Je vous laisse deviner la réponse, en fournissant toutefois deux potentiels chimiques standard : celui du couple Cu^{2+}/Cu , égal à +0,34 V, et celui du couple Ag^+/Ag , égal à 0,80 V.

Bibliographie

- McNeil M., Darvill A.G., Fry S.C., Albersheim P., Structure of plants cell walls of plants, *Annual Review of Biochemistry*, **1984**, 53, p. 625.
- Roland J.C., Visualisation des polysaccharides au niveau structural, *Les polymères végétaux*, B. Monties et coll. (eds), Paris, **1980**, p. 30.
- Raven P., Evert R., Eichhorn S., *Biology of Plants*, W.H. Freeman and Co, New York, 7^eed., **2005**.
- Massiot P., Thibault J.-F., Rouau X., Les pectines et les fibres de carotte, *Cahier scientifique et technique*, **1989**, IAA septembre, p. 727.
- Aspinall G.O., Chemistry of cell-wall polysaccharides, *The Biochemistry of Plants*, J. Preiss (ed.), Academic Press, New York, **1980**, p. 457.
- Voragen A.G.J., Pilnik W., Thibault J.F., Axelos M.A.V., Renard C., Pectins, *Food polysaccharides and their applications*, A. Stephen (ed.), Marcel Dekker, New York, **1995**, p. 287.
- Braccini I., Grasso R., Pérez S., Conformational and configurational features of acidic polysaccharides and their interactions with calcium ions: a molecular modeling investigation, *Carbohydrate research*, **1999**, 317, p. 119.
- Pérez S., Mazeau K., Hervé du Penhoat C., The three-dimensional structures of the pectic polysaccharides, *Plant Physiol. Biochem.*, **2000**, 38, p. 37.
- Renard C., Crépeau M.J., Thibault J.F., Structure of repeating units in the rhamnogalacturonic backbone of apple, beet and citrus pectins, *Carbohydrate Research*, **1995**, 275, p. 155.
- Jarvis M.C., Structure and properties of pectin gels in plant walls, *Plant Cell Wall Environment*, **1984**, 7, p. 153.
- Ralet M.-C., Crépeau M.-J., Buchholt H.-C., Thibault J.-F., Polyelectrolyte behaviour and calcium binding properties of sugar beet pectins differing in their degrees of methylation and acetylation, *Biochemical Engineering Journal*, **2003**, 16, p. 191.
- BeMiller J.N., An introduction to pectins: structure and properties, *Chemistry and Function of Pectins*, M.L. Fishman, J.J. Jen (eds), American Chemical Society, Washington, **1986**, p. 2.
- Powell D.A., Morris E.R., Gidley M.J., Rees D.A., Conformations and interactions of pectins. II. Influence of residue sequence on chain association in calcium pectate gels, *J. of Molecular Biology*, **1982**, 155, p. 517.
- Walkinshaw M.D., Arnott S., Conformations and interactions of pectins. II. Models for junction zones in pectinic acid and calcium pectate gels, *J. of Molecular Biology*, **1981**, 153, p. 1075.



Photo : L. Monier

Hervé This

est physico-chimiste dans l'équipe INRA de gastronomie moléculaire* 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
www.inra.fr/la_sciences_et_vous/apprendre_experimenter/gastronomie_moleculaire
www.inra.fr/fondation_sciences_culture_alimentaire