

La chimie au service du goût

Le plaisir est un bienfait indéniable de l'alimentation. Nous sommes dotés de sens qui nous permettent d'apprécier ce que nous mangeons et qui influent fortement sur notre comportement alimentaire. L'une des principales questions que l'on se pose sur la caractéristique d'un aliment, c'est son goût.

Poussons maintenant la question encore plus loin : qu'est-ce que le goût et comment le percevons-nous ? La compréhension des mécanismes moléculaires sous-jacents à ce phénomène de perception peut être mise à profit du consommateur, auquel l'industrie agroalimentaire s'efforce de répondre de mieux en mieux. Il se trouve que ce consommateur est de plus en plus exigeant en matière de goût, mais pas seulement...

1 Le goût des aliments et leur perception

1.1. Un moteur puissant de notre comportement alimentaire

Il suffit d'observer le comportement d'un bébé qui pleure, et à qui l'on donne ensuite une cuillère d'un aliment, pour voir la plupart du temps se dessiner sur son visage une transformation radicale, des pleurs qui s'arrêtent, un regard pétillant, un visage devenu soudainement attentif et parfois même souriant : on assiste à l'éveil des sens, un éveil qui opère en quelques secondes, un instant extraordinaire. Cela révèle à quel point la nourriture et son goût sont un moteur puissant de notre comportement, et ceci dès les premières heures de la vie (*Figure 1*).

Figure 1

L'effet de la cuillère donnée au bébé est magique. Et quand on a aimé la confiture de son enfance, comment s'en détacher à l'âge adulte ?



LA MADELEINE DE PROUST OU LA RÉMINISCENCE LIÉE AU GOÛT

« Il y avait bien des années que, de Combray, tout ce qui n'était pas le théâtre et le drame de mon coucher, n'existait plus pour moi, quand un jour d'hiver, comme je rentrais à la maison, ma mère, voyant que j'avais froid, me proposa de me faire prendre, contre mon habitude, un peu de thé. Je refusai d'abord et, je ne sais pourquoi, me ravisai. Elle envoya chercher un de ces gâteaux courts et dodus appelés Petites Madeleines qui semblent avoir été moulés dans la valve rainurée d'une coquille de Saint-Jacques. Et bientôt, machinalement, accablé par la morne journée et la perspective d'un triste lendemain, je portai à mes lèvres une cuillerée du thé où j'avais laissé s'amollir un morceau de madeleine. Mais à l'instant même où la gorgée mêlée des miettes du gâteau toucha mon palais, je tressaillis, attentif à ce qui se passait d'extraordinaire en moi. Un plaisir délicieux m'avait envahi, isolé, sans la notion de sa cause. Il m'avait aussitôt rendu les vicissitudes de la vie indifférentes, ses désastres inoffensifs, sa brièveté illusoire, de la même façon qu'opère l'amour, en me remplissant d'une essence précieuse : ou plutôt cette essence n'était pas en moi, elle était moi. J'avais cessé de me sentir médiocre, contingent, mortel. D'où avait pu me venir cette puissante joie ? Je sentais qu'elle était liée au goût du thé et du gâteau, mais qu'elle le dépassait infiniment, ne devait pas être de même nature. D'où venait-elle ? Que signifiait-elle ? Où l'appréhender ? [...]

Et tout d'un coup le souvenir m'est apparu. Ce goût, c'était celui du petit morceau de madeleine que le dimanche matin à Combray (parce que ce jour-là je ne sortais pas avant l'heure de la messe), quand j'allais lui dire bonjour dans sa chambre, ma tante Léonie m'offrait après l'avoir trempé dans son infusion de thé ou de tilleul. La vue de la petite madeleine ne m'avait rien rappelé avant que je n'y eusse goûté ; peut-être parce que, en ayant souvent aperçu depuis, sans en manger, sur les tablettes des pâtisseries, leur image avait quitté ces jours de Combray pour se lier à d'autres plus récents ; peut-être parce que, de ces souvenirs abandonnés depuis si longtemps hors de la mémoire, rien ne survivait, tout s'était désagrégé ; les formes – et celle aussi du petit coquillage de pâtisserie, si grassement sensuel sous son plissage sévère et dévot – s'étaient abolies, ou, ensommeillées, avaient perdu la force d'expansion qui leur eût permis de rejoindre la conscience. Mais, quand d'un passé ancien rien ne subsiste, après la mort des autres, après la destruction des choses, seules, plus frêles mais plus vivaces, plus immatérielles, plus persistantes, plus fidèles, l'odeur et la saveur restent encore longtemps, comme des âmes, à se rappeler, à attendre, à espérer, sur la ruine de tout le reste, à porter sans fléchir, sur leur gouttelette presque impalpable, l'édifice immense du souvenir. »



Figure 2

« L'odeur et la saveur restent encore longtemps... »

Marcel Proust, extrait de *À la recherche du temps perdu* – Du côté de chez Swan.

Ce goût s'imprime aussi très fortement dans notre mémoire, en association avec nos émotions : plaisir lié à un moment émouvant, ou aversion qui rappelle quelque traumatisme. Cette mémoire du goût peut rester ancrée très longtemps dans notre vie. Dans les exemples de plaisirs conditionnés, on ne peut s'empêcher de penser à ce célèbre récit de la madeleine de Proust, où l'auteur goûte une madeleine trempée dans une cuillère de thé, réveillant ses souvenirs lointains et le plongeant dans une sensation de bien-être quelque peu magique (voir *Encart : « La madeleine de Proust ou la réminiscence liée au goût »*, et *Figure 2*).

Aliment qui éveille les sens et ravive la mémoire, mémoire qui exalte le goût ou nous attire vers un aliment plus qu'un autre... le goût alimente le goût. Notre comportement alimentaire sera inéluctablement orienté par le goût, mêlé aux sentiments auxquels on l'a associé. Tel plat nous fera saliver dès la lecture de son intitulé sur les menus, tout comme un produit alimentaire qui attirera l'œil parmi bien d'autres dans les rayons de supermarchés, tel autre aliment suscitera dégoût et stress, parfois à sa seule odeur ou pensée.

Mais n'oublions pas qu'au-delà du goût, qui est un élément déclencheur et fondateur, entre également en jeu l'environnement – le lieu, les sons, les personnes présentes, la fameuse tasse de thé et la forme en coquillage des made-

leines... –, qui accompagne et module tout le travail de notre cerveau et de nos sentiments, à cet instant où l'on goûte un aliment. Ce goût est aussi indissociable des autres caractéristiques telle la couleur (analysée dans le *Chapitre de S. Guyot*), la forme ou la texture (abordée dans le *Chapitre de M. Desprairies*).

1.2. Qu'est-ce qu'est le goût ?

Nous réalisons combien les phénomènes affectifs liés au goût sont complexes et souvent insaisissables ; mais le goût en lui-même est déjà bien complexe à définir. C'est un de nos cinq sens, qui associe à la fois la **saveur** et l'**odeur**, mêlées à l'ensemble des perceptions dites **somesthésiques** telles que le son, comme celui de la biscotte qui craque dans la bouche, l'irritation, le piquant du piment ou de la moutarde, la température d'une soupe bien chaude ou d'une glace bien rafraîchissante, ou encore l'astringence du café et du vin. Ces perceptions sont multiples et variées, dotées des nuances les plus subtiles (*Figure 3*).

Effectivement, derrière notre perception du goût, il se passe de nombreux phénomènes qui font intervenir d'abord des constituants chimiques de l'aliment : actuellement, on estime que la nature fournit environ 20 000 molécules odorantes qui peuvent être perçues par l'homme, qu'elles soient musquées, mentholées, camphrées, éthérées, piquantes, putrides... (*Figure 4*), et près de 5 000 pour les saveurs, qu'elles soient sucrées,



Figure 3

*Ça craque, ça pique, c'est froid...
Nombreuses sont les perceptions
somesthésiques qui accompagnent
les sensations de saveur et d'odeur
des aliments.*

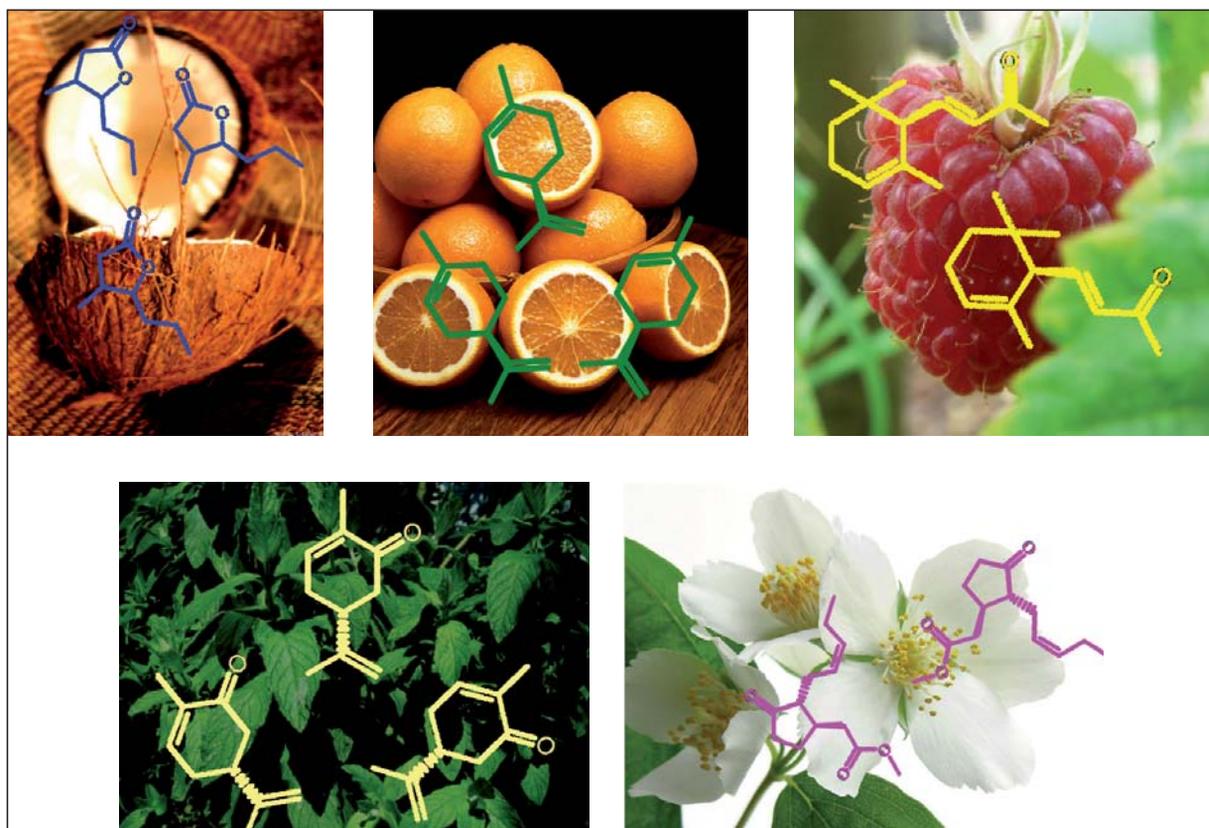
Figure 4

*Limonène, ionone, carvone,
jasmonate... il se dégage des
plantes et des fruits des milliers
de molécules qui font les parfums
et fragrances de la nature...
et de nos aliments.*

salées, acides ou amères
(Figure 5). Une complexité
remarquable ! D'un point de
vue chimique, ce sont des
molécules aux structures très
variées – « chaînes linéaires,
chaînes ramifiées, mono-
cycles, hétérocycles avec de
l'oxygène, de l'azote et du
soufre, halogénés, mono-
fonctionnels, plurifonction-
nels... ». Cela représente un
nombre de combinaisons de
structures inestimable, mais
qui répondent à une condi-

tion commune pour ce qui
est des molécules odorantes,
celle d'être suffisamment
volatiles pour être perçues
comme odorantes (en général
avec une masse inférieure à
350 grammes par mole, elles
sont dotées d'une tension de
vapeur qui les rend volatiles).

Quand nous mangeons, nous
percevons toutes ces molé-
cules parce qu'elles se fixent
sur des **récepteurs**, qui sont
des protéines situées sur notre



langue, dans notre nez, etc. Nous sommes ainsi dotés de près de 380 récepteurs olfactifs différents, qui ont une affinité plus ou moins spécifique pour une centaine de molécules odorantes (Figure 6). Dans les cas extrêmes, notre sensibilité à certaines molécules peut atteindre le mille milliardième de gramme de molécule odorante par kilogramme d'aliment suffisant pour que nous détectons une odeur. Pour donner une idée, un gramme de chloroanisole suffit à contaminer un volume de vin équivalent à un lac d'un kilomètre carré et profond de dix mètres, et donc à donner à ce vin une désagréable odeur de bouchon ! L'odorat joue ainsi un rôle capital dans la perception du goût, ce qui explique d'ailleurs qu'en cas de rhume, où l'organe olfactif est congestionné, les sensations de goût sont considérablement réduites.

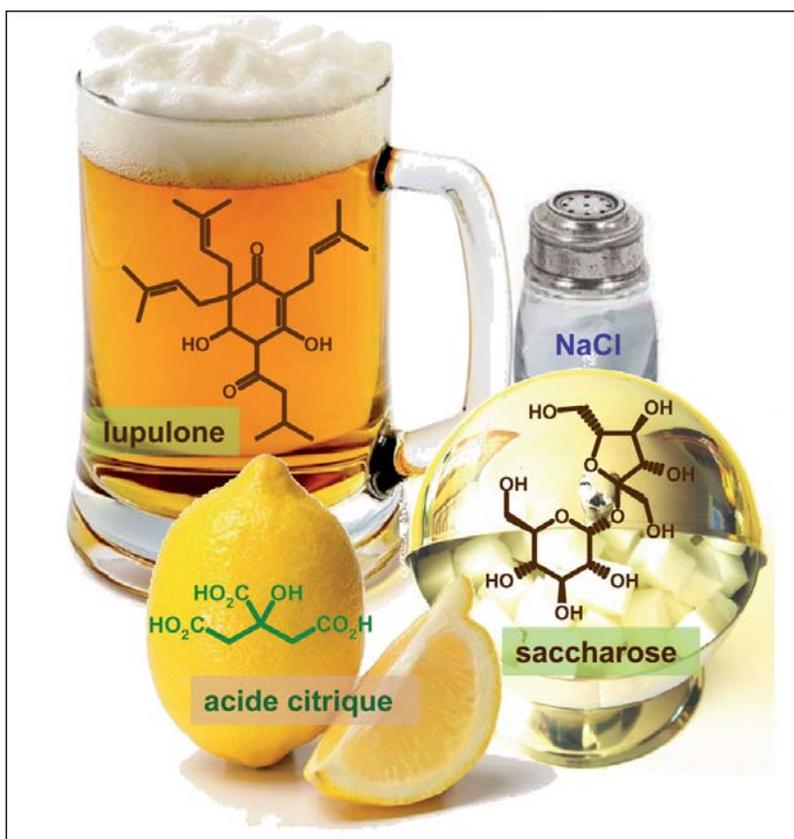


Figure 5

Quelles molécules rendent donc nos aliments sucrés, salés, amers ou acides ? Derrière ces saveurs se cachent le saccharose, le chlorure de sodium, la lupulone, l'acide citrique, et des milliers d'autres molécules possibles...

Figure 6

La molécule odorante est captée par le système olfactif, situé au niveau de la muqueuse olfactive (dans le nez), qui recouvre environ 2 m² de la surface de la muqueuse nasale. Cette région est géographiquement très proche du cerveau, vers lequel elle transporte ses messages chimiques et communique avec le fond de la bouche. C'est ainsi que lorsqu'on mange, le nez perçoit les arômes par voie « rétro-nasale ».

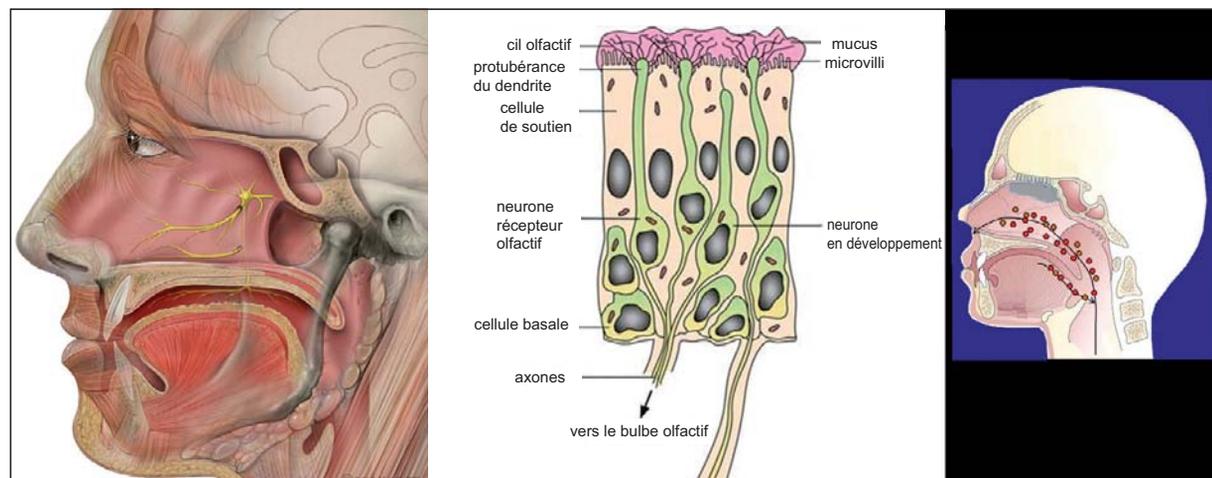




Figure 7

De la graine de *Thaumatococcus danielli* est extraite la molécule de thaumatine, une petite protéine (en rouge et jaune) à fort pouvoir sucrant.

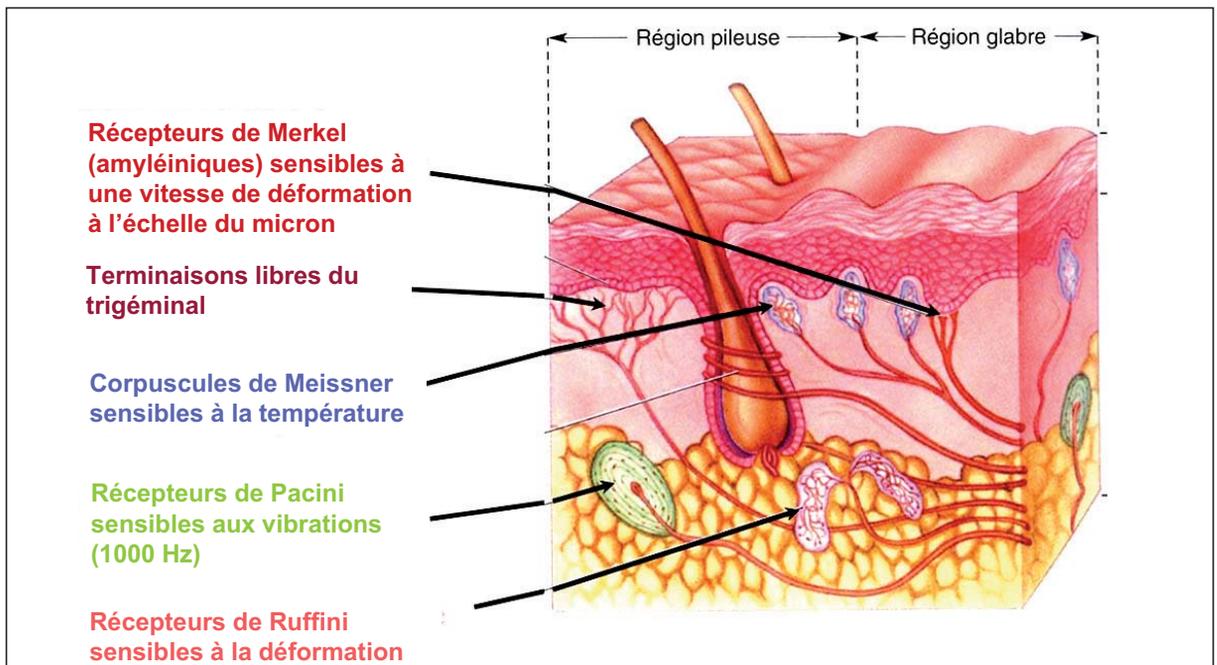
Figure 8

L'arrière des yeux, les cavités nasale et buccale sont tapissés de terminaisons nerveuses et de récepteurs à l'origine des perceptions somesthésiques : pression, irritation, vibration, chaleur...

Quant aux récepteurs des molécules qui provoquent une saveur, tous ne sont pas encore connus, et sont actuellement estimés à une trentaine seulement, principalement situés sur la langue (les papilles gustatives), et dans une moindre mesure le palais et le pharynx. Leurs sensibilités sont de l'ordre du milligramme par kilogramme. Parmi les plus faibles concentrations perceptibles

par l'homme, on trouve la thaumatine, une molécule extraite de la graine de *Thaumatococcus danielli*, plante cultivée en Afrique de l'Ouest, en particulier au Ghana (Figure 7). La thaumatine est une protéine extrêmement sucrée, environ 2 000 fois plus que le sucre de table (saccharose), ce qui en fait un excellent édulcorant et exhausteur de goût.

Les perceptions somesthésiques font quant à elles intervenir les terminaisons nerveuses libres, ainsi que les récepteurs spécialisés des branches du nerf trijumeau et le nerf auditif. Le nerf trijumeau, qui innerve à la fois l'arrière des yeux, la cavité nasale et la cavité buccale, joue un rôle essentiel. Une coupe de derme est représentée sur la Figure 8, où l'on peut apercevoir les différents récepteurs responsables des perceptions somesthésiques. Par exemple, les terminaisons libres du trigéminal peuvent



percevoir directement le côté irritant de certaines molécules ; de leur côté, les récepteurs de Pacini détectent les vibrations. Actuellement, on ne connaît pas encore le mécanisme sous-jacent à la sensation rafraîchissante du menthol, et d'autres mystères restent à éclaircir par les scientifiques.

2 De l'aliment à la perception du goût : tout un cheminement

2.1. Sentir le goût : un phénomène complexe

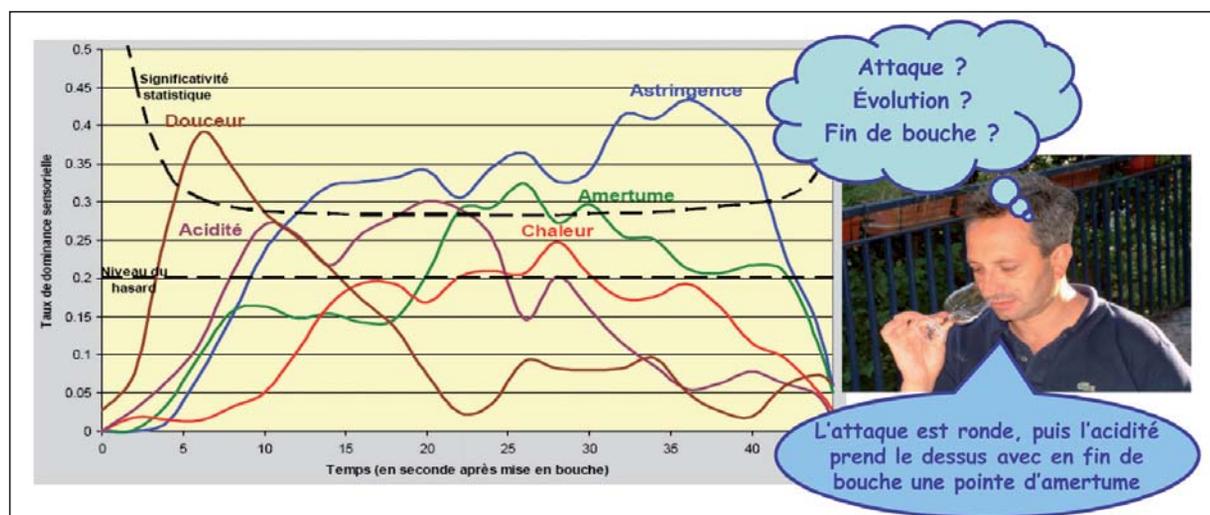
Quand on goûte un aliment, on ne sait pas toujours immédiatement comment en caractériser le goût, tellement celui-ci est complexe et associe de multiples saveurs et odeurs, qui changent entre le moment où l'on porte l'aliment à la bouche, les différentes phases de la mastication jusqu'à la déglutition finale. Il existe même tout un apprentissage de la perception du goût. En témoignent ces nombreux spécialistes du vin, dont certains ont le privilège d'en faire

leur métier ! À chacune de leurs gorgées, concentration oblige, ces dégustateurs se posent la question de savoir comment est l'attaque, l'évolution et la fin de bouche. La psychophysique permet de mesurer avec encore plus de rigueur les évolutions du goût à l'aide de descripteurs de manière répétable dans le temps, grâce à des jurés très entraînés (Figure 9).

Aujourd'hui, dans le cadre de la formulation des produits alimentaires industriels, le choix des additifs et leur quantité, que ce soit pour améliorer la saveur, l'arôme, ou pour relever le goût (édulcorants, exhausteurs de goûts), reste assez empirique. Il est nécessaire d'en connaître plus sur la manière dont il va être perçu par l'organisme, sachant qu'il sera mélangé à une multitude d'autres molécules de goût, et que leurs perceptions ne nous atteindront jamais au même moment, et jamais avec la même intensité. En termes scientifiques, c'est d'abord une affaire de biodisponibilité et de thermodynamique !

Figure 9

L'homme est un appareil de mesure du goût qui peut être aussi bien subjectif qu'objectif !



2.2. Appréhender le goût scientifiquement

Il ne s'agit donc pas simplement pour le fabricant de rajouter de l'arôme dans un aliment, il faut aussi que cet arôme puisse être correctement libéré et perçu.

Il faut donc, pour optimiser la fabrication de l'aliment, comprendre comment les arômes sont libérés de la matrice alimentaire et comment ils cheminent ensuite jusqu'à nos récepteurs olfactifs. Pour cela, accompagnons les molécules odorantes dans leur long périple...

2.2.1. L'arôme, de l'aliment aux récepteurs olfactifs

En premier lieu, il faut savoir que la plupart des arômes

sont solubles dans les graisses, et peu dans l'eau. Ce qui se traduit scientifiquement par un *coefficient de partage solvant/eau* en faveur de la phase solvant qui mime la phase lipidique de l'aliment (voir **Encart** : « *Où se solubilise l'arôme ?* »).

C'est ainsi que les molécules d'arôme préfèrent généralement rester dans les lipides, lesquels sont présents dans la plupart des rations alimentaires. Mais elles peuvent aussi s'associer à des macromolécules telles que l'amidon. C'est par exemple le cas de la menthone, du décanal, ou encore de la δ -déalactone, une molécule à odeur typique de noix de coco, qui est capable de s'encapsuler à l'intérieur de l'hélice d'amylose, l'une

OÙ SE SOLUBILISE L'ARÔME ?

La propension d'une molécule à se mélanger à (voire à se solubiliser dans) un liquide plutôt qu'à un autre est mesurée par une grandeur appelée coefficient de partage. Dans le cas où l'on veut quantifier son caractère hydrophile ou lipophile, on mesure le coefficient de partage suivant :

$$\text{Log } P = \text{Log} (C_{\text{oct}}/C_{\text{eau}}),$$

où C_{oct} est la concentration de la molécule mesurée dans de l'octane (un hydrocarbure, donc lipophile et non miscible à l'eau : c'est la phase en brun dans l'ampoule à décanter sur la **Figure 10**), et C_{eau} sa concentration dans l'eau (la phase en bleu).

Le Tableau 1 indique les coefficients de partage de diverses molécules d'arôme. Parmi les rares arômes à être solubles dans l'eau, on trouve l'acide acétique et l'éthanol. C'est ce qui permet d'avoir sous une forme homogène et limpide le vinaigre (vinaigre = environ 8 % d'acide acétique dans l'eau) et des alcools comme le vin et la bière. À l'inverse, les ionones ont un coefficient de partage élevé de 4, ce qui revient à dire que dans un mélange d'octanol et d'eau, 10 000 de ces molécules d'ionone vont se retrouver dans l'octanol, contre une seule dans l'eau.

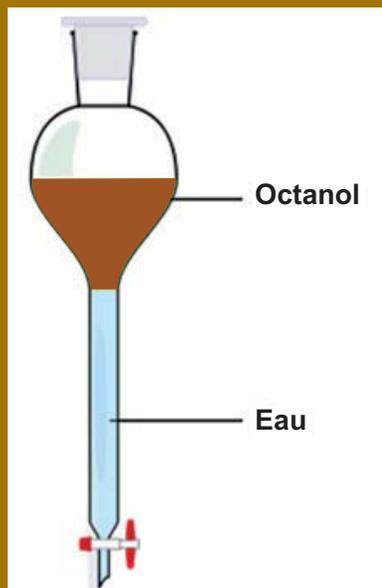


Figure 10

Pour laquelle des deux phases la molécule a-t-elle la plus grande affinité ? L'eau ou l'octanol ? La molécule est-elle hydrophile ou lipophile ? Quel est son coefficient de partage entre ces deux phases de l'ampoule à décanter ?

Tableau 1

Plus le coefficient de partage de l'arôme est élevé, plus il est soluble dans les graisses et donc moins il sera attiré par l'eau.

Arôme	Coefficient de partage $\text{Log } P = \text{Log} (C_{\text{oct}}/C_{\text{eau}})$
Acide acétique (dans le vinaigre)	- 0,31
Éthanol (l'alcool)	- 0,08
Acétaldéhyde (dans les fruits mûrs, le café, le pain frais, le vin jaune. Contribue aux odeurs du romarin, des jonquilles, de l'orange amère, du camphre, du fenouil...)	0,33
Acide isobutyrique (dans le beurre)	0,47
Vanilline (dans la vanille)	1,70
Benzaldéhyde (essence d'amande, présent dans les pêches, le raisin, les fraises, les framboises)	1,72
Acétate d'isoamyle (dans les pommes mûres, le Beaujolais nouveau. Odeur de la banane)	2,13
Limonène (dans les agrumes)	2,67
Naphtalène (goudron de houille)	3,29
Alpha et bêta-ionones (dans certains fruits et certaines fleurs. Odeur de violette, de framboise)	4,1

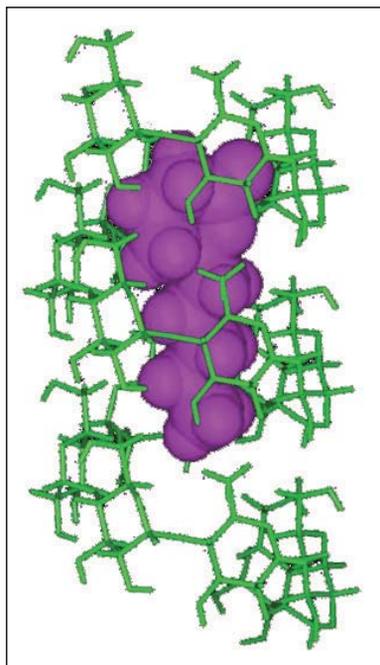


Figure 11

Pour encapsuler la δ -décalactone (en violet), il suffit de la mélanger dans de l'eau à de l'amidon (en vert), puis de chauffer, ce qui favorise la formation du complexe amylose- δ -décalactone (l'amylose est une composante de l'amidon). Au refroidissement, le complexe précipite : l'arôme reste piégé dans l'amidon.

des structures composant l'amidon (Figure 11). Lipophiles et capables de s'emprisonner dans de l'amidon, les molécules d'arôme auront dès le départ du mal à s'extraire d'un aliment contenant à la fois des lipides et de l'amidon (par exemple dans la sauce blanche ou une purée avec de la crème).

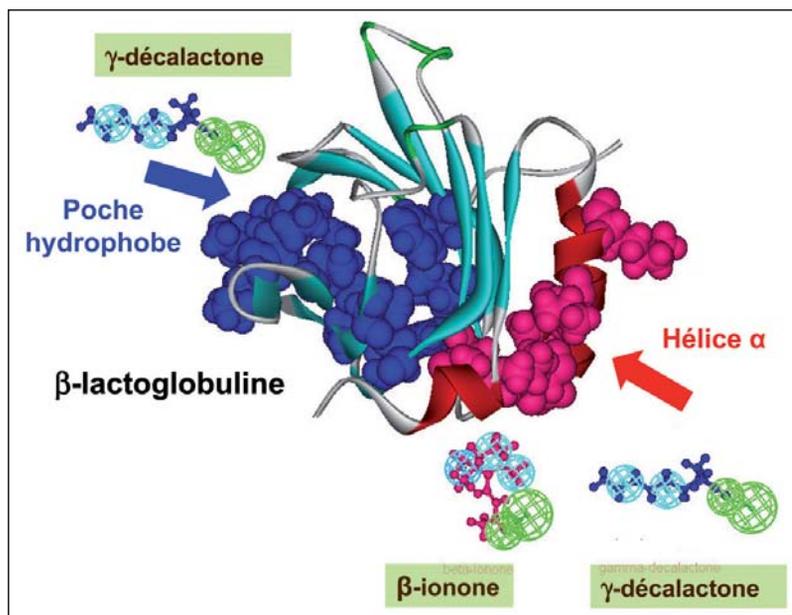
Cela se complique encore quand il s'agit d'arômes présents dans notre steak ou dans notre yaourt par exemple. En effet, certains arômes présentent une affinité pour les protéines, que l'on trouve abondamment dans la viande, le poisson et les laitages. À regarder de près l'une des protéines présentes dans le sérum du lait, la β -lactoglobuline par exemple (Figure 12), qui possède une structure tridimensionnelle typique des protéines, on remarque qu'elle est pourvue d'une « poche hydrophobe », prête à héberger de petites molécules non miscibles à l'eau telle qu'une molécule d'arôme,

par exemple la γ -décalactone. Mais celle-ci a aussi la possibilité de s'insérer sur un site extérieur, une « hélice α », tout comme pourrait le faire l'arôme β -ionone (qui en revanche ne peut pas se loger dans la poche hydrophobe). De nombreuses protéines alimentaires peuvent de cette manière fixer sélectivement des arômes, les empêchant de se volatiliser pour atteindre nos récepteurs. Les scientifiques mesurent pour chaque arôme leur propension à se volatiliser ou à rester liés aux protéines par un *coefficient de partage vapeur/liquide* (voir Encart : « L'arôme se volatiliserait-il ou restera-t-il fixé aux protéines alimentaires ? »).

Par ailleurs, les arômes ont un trajet jonché d'obstacles à emprunter au sein de l'aliment avant de s'en libérer. En effet, il arrive souvent que des aliments soient texturés par de longs réseaux tridimensionnels de macromolécules telles que les polysaccharides, qui peuvent former des gels ou des textures

Figure 12

Beaucoup d'arômes ont tendance à se fixer dans des structures protéiques comme la β -lactoglobuline, protéine du lait qui comporte deux principaux sites de fixation : une poche hydrophobe et une hélice α .



épaisses dans de nombreux produits comme les yaourts ou les jus de fruits (la texturation des aliments est expliquée dans le **Chapitre de M. Desprairies**). Ces réseaux tridimensionnels limitent la diffusion des arômes dans la matrice alimentaire, ce qui

ralentit leur libération dans la bouche, et *a fortiori* leur disponibilité envers les récepteurs olfactifs, et l'on risque d'avaler l'aliment sans savoir quel goût il a !

À ce sujet, les scientifiques ont fait une découverte sur une particularité des cellules

L'ARÔME SE VOLATILISERA-T-IL OU RESTERA-T-IL FIXÉ AUX PROTÉINES ALIMENTAIRES ?

La propension d'une molécule à se volatiliser plutôt qu'à rester dans une phase condensée telle que l'eau ou une solution riche en protéines (par exemple la caséine du lait) est mesurée par le coefficient de partage vapeur/liquide suivant :

$$\text{Log } P = \text{Log} \left(\frac{C_{\text{vap}}}{C_{\text{liq}}} \right),$$

où C_{vap} est la concentration d'arôme qui s'est volatilisé, et C_{liq} la concentration d'arôme qui reste dans la phase liquide (eau, liquide contenant une suspension de protéines, par extension phase semi-liquide et solide).

On peut ainsi comparer les comportements de deux arômes fruités, que l'on trouve dans la pomme et la poire : le butyrate d'éthyle et l'hexanoate d'éthyle (**Figure 13**). Dans l'eau, on observe une plus faible solubilité de l'hexanoate d'éthyle. Lorsque l'on rajoute à la solution de la caséine, la solubilité des deux arômes augmente, mais ceci est particulièrement net pour l'arôme le moins soluble. Ce qui traduit bien le fait que ces deux molécules, et en particulier l'hexanoate d'éthyle, auront plus de mal à quitter la caséine et à se volatiliser. Cela s'explique à la fois par le fait que l'hexanoate d'éthyle est le plus lipophile des deux arômes, mais aussi parce que la forme de sa molécule permet des interactions plus fortes avec des groupements fonctionnels principalement hydrophobes portés par des acides aminés de la protéine.

À titre de comparaison, on observe un effondrement du coefficient de partage dans la trioléine, qui est une huile : les deux arômes sont encore plus fortement piégés qu'en présence de caséine, et ne peuvent que très faiblement se volatiliser dans l'huile où ils préféreraient rester.

Ces mesures donnent donc une idée de l'affinité relative des molécules d'arôme pour l'eau, les lipides et les protéines.

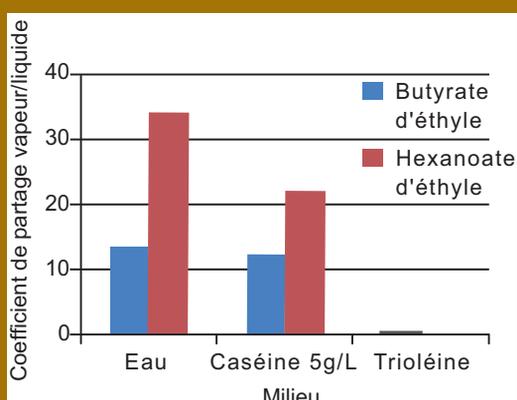


Figure 13

Plus le coefficient de partage vapeur/liquide de l'arôme dans un milieu (eau, aliment) est élevé, plus il est volatil et peut s'échapper de ce milieu.

dites entérochromaffines, situées dans le tube digestif, et capables de percevoir la pression du tractus alimentaire, provoquant alors des mouvements de l'intestin en excréant de la sérotonine (Figure 14). Ils ont constaté que ces cellules possèdent leurs propres récepteurs olfactifs ! Elles vont donc aussi percevoir l'odeur de l'aliment lors de son passage dans le tube digestif et émettre de la sérotonine qui va animer l'intestin. Ainsi, même si les molécules olfactives n'atteignent pas les récepteurs olfactifs au niveau de la muqueuse nasale, elles vont quand même être perçues par les récepteurs du tube digestif qui vont nous préparer à la digestion... mais l'on n'aura pas pour autant senti le goût de l'aliment (pas de message allant au cerveau) !

Face aux nombreuses difficultés rencontrées par les arômes pour pouvoir atteindre nos récepteurs, il est néanmoins possible de les y aider en salant nos plats. Il est bien connu que l'ajout de sel provoque une diminution de la solubilité apparente des molécules dans un milieu donné ; cela va favoriser leur libéra-

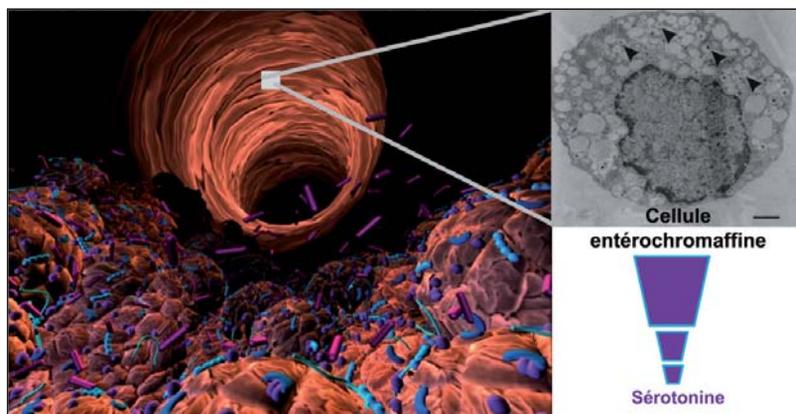
tion de la matrice alimentaire. Cette libération sera d'autant plus facile que l'aliment est pauvre en lipides.

Un fait décisif qui va favoriser la libération de l'arôme de la matrice alimentaire est la mastication. L'aliment va être déchiré, fissuré par les dents, agité par les mouvements de la bouche et de la langue, facilitant ainsi la libération des arômes dans l'espace clos de la bouche. En somme, plus l'on mâche la nourriture, plus elle aura du goût. Et c'est encore mieux si l'on mâche longtemps, car c'est ce qui provoque la sécrétion de la salive, laquelle est renouvelée en permanence au cours de cette phase, contribuant à un lavage continu de la matrice alimentaire, une sorte d'« inondation » qui emporte de plus en plus les molécules d'arôme, quand bien même celles-ci auraient un coefficient de partage élevé. S'ajoute à l'inondation, la « tempête » due à la respiration, entraînant les molécules dans l'air, vers la cavité nasale.

À proximité des récepteurs, une nouvelle difficulté apparaît pour ces molécules généralement hydrophobes entraînées par le flux respiratoire : les récepteurs olfactifs sont situés dans les cils olfactifs, partie visible des neurones olfactifs, qui baignent dans un mucus principalement constitué d'eau. Les molécules d'arôme vont donc devoir traverser cette phase aqueuse pour laquelle elles ont si peu d'affinité, avant de pouvoir interagir au niveau des membranes avec les récepteurs. C'est là que doit se transformer le signal

Figure 14

Dès l'arrivée des molécules d'arôme dans le tube digestif, elles sont perçues par des récepteurs des cellules entérochromaffines, qui donnent alors le signal (sécrétion de la sérotonine) à l'intestin pour qu'il se prépare à travailler.

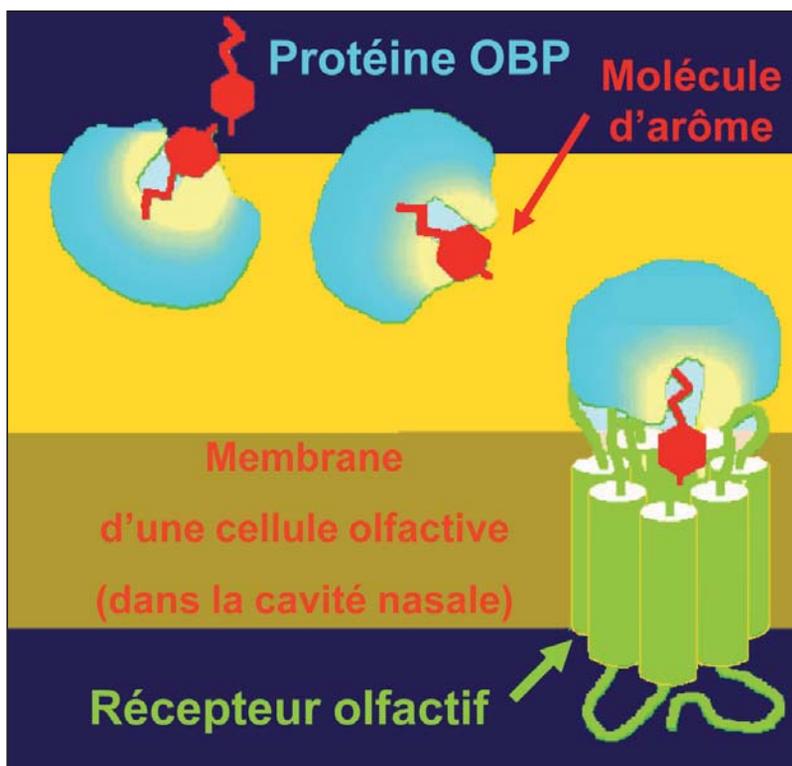


chimique délivré par l'arôme en signal électrique traité par le cerveau. Heureusement, il semble que le transport de ces arômes vers leur destination finale soit facilité par des protéines présentes en grande quantité dans la salive. On sait en effet que ces protéines, appelées OBP (*Odorant Binding Proteins*), sont capables de fixer des molécules odorantes avec lesquelles elles ont une affinité, et ont d'autre part une affinité pour les récepteurs olfactifs, comme les molécules d'arôme (Figure 15). Le mécanisme précis de ce transport n'est pas encore élucidé, mais il est certain que ces protéines OBP vont favoriser la signalisation des molécules d'arôme au niveau des récepteurs.

Quoi qu'il en soit, une fois arrivées à bon port, les molécules d'arôme ayant, comme pour les protéines alimentaires, une bonne affinité pour les récepteurs olfactifs (des protéines également), elles vont s'y fixer sans difficulté, délivrant alors un signal chimique qui va être transformé en un signal électrique envoyé vers le cerveau par des milliers de fibres nerveuses, qui sont la prolongation interne des mêmes neurones émettant côté externe leurs cils olfactifs. C'est à ce niveau que nous prenons conscience du goût (ici en particulier de l'arôme).

2.2.2. Modéliser pour prédire l'effet d'un arôme

Le cheminement de l'arôme vers son récepteur a pu être reproduit avec succès en laboratoire sur des modèles



gérés *in silico*, conçus et mis au point par les chercheurs. Ceci leur a permis d'étudier en détail les processus en jeu, en faisant varier les paramètres critiques, et de pouvoir faire des prévisions (voir *Encart : « Modéliser la perception de l'arôme des aliments »*). Ces études pourront aider les industriels de l'agroalimentaire à orienter leurs choix des arômes à ajouter dans les produits, et, pourquoi pas, à concevoir des arômes inédits, qui répondent de mieux en mieux aux besoins du consommateur ?

3 Les molécules du goût : comment faire le tri ?

Retour du côté des consommateurs... Comme nous l'avons vu, les aliments sont sources de plaisir, et nous les choisissons à la

Figure 15

Dans la salive se trouvent des protéines OBP, qui pourraient aider les molécules d'arôme à atteindre les récepteurs olfactifs.

MODÉLISER LA PERCEPTION DE L'ARÔME DES ALIMENTS

Pour reproduire en laboratoire la fixation des arômes sur nos récepteurs olfactifs, des cellules ont été cultivées dans des boîtes de Pétri et, par une technique de « transfection hétérologue » bien connue des biologistes, les chercheurs leur ont fait exprimer sur leurs membranes des récepteurs olfactifs, accompagnés de tout le système de transduction qui permet la conversion d'un signal chimique – produit par la fixation d'une molécule d'arôme sur un récepteur – en un **signal électrique**, *via* l'ouverture de canaux ioniques situés sur la membrane cellulaire et qui laissent passer des ions sodium et calcium, induisant une dépolarisation de la membrane. Le **signal électrique** qui se produit alors doit, dans l'expérience réelle de la vie, aller vers notre bulbe olfactif, dans la région préfrontale du cerveau, où il sera traité. Dans l'expérience réalisée ici *in vitro*, la fuite de calcium accompagnant l'ouverture des canaux ioniques est visualisée par une modification locale de la fluorescence.

Le terrain étant posé, on peut mesurer l'intensité (affinité) de l'interaction entre le récepteur exprimé dans ces cellules et un odorant injecté sur ces cellules modèles, par exemple le nonanol, le nonanal ou la γ -décalactone, par la variation d'intensité lumineuse de fluorescence enregistrée sur la préparation. Les affinités de liaisons peuvent être utilisées avec d'autres paramètres décrivant la structure des molécules, pour **modéliser les molécules capables d'interagir avec ces récepteurs (Figure 16)**.

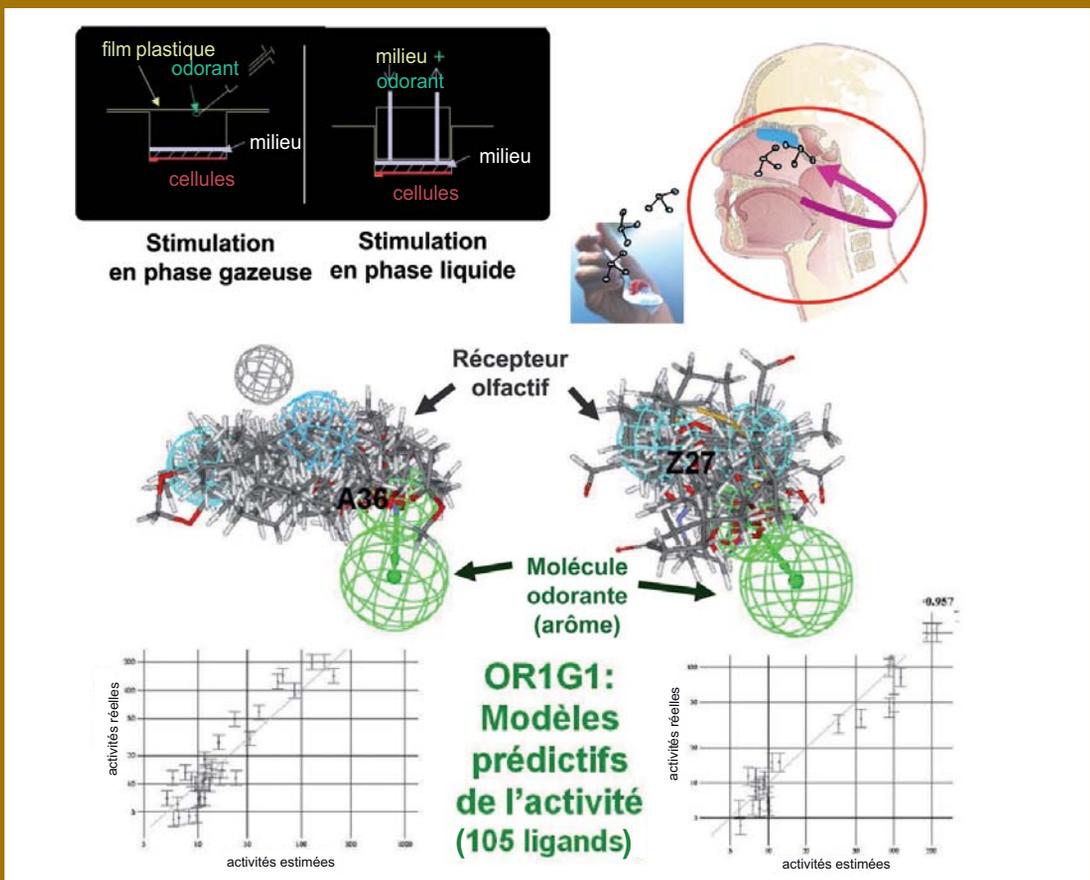


Figure 16

Sur des modèles de cellules olfactives, 105 molécules d'arôme (« ligands ») ont été injectées, et les réponses produites par leur fixation sur les récepteurs olfactifs ont été enregistrées et intégrées dans des modèles mathématiques à but prédictif.

Une autre expérience tout aussi ingénieuse a été conçue pour modéliser la mastication en utilisant un réacteur en guise de bouche ou un simulateur de mastication comportant une langue et une mâchoire mobiles, une arrivée de salive, et permettant de contrôler les taux de compression et de cisaillement de l'aliment (**Figure 17**).

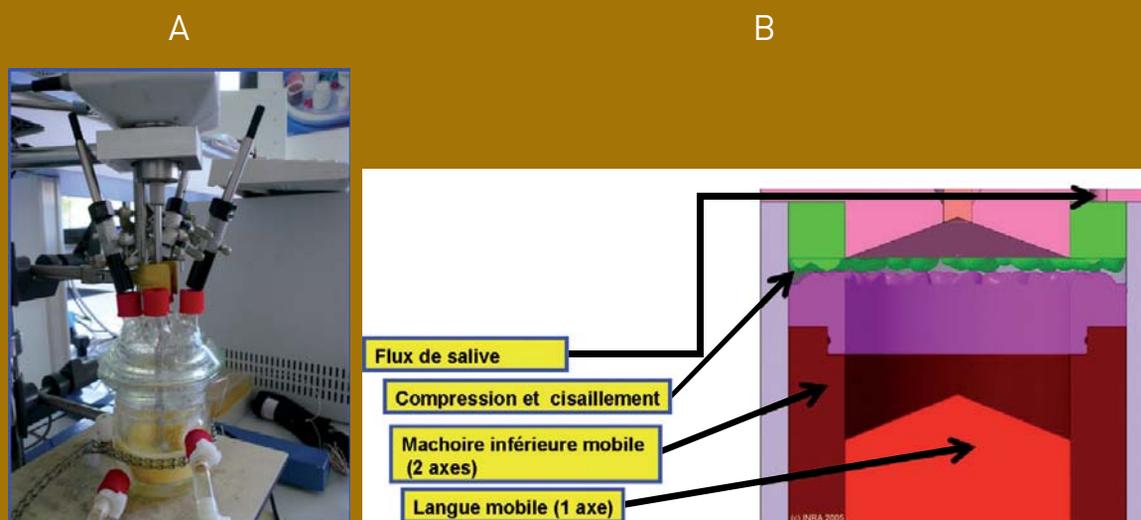


Figure 17

La mastication peut être simulée par un réacteur muni d'un agitateur (A) ou par une bouche virtuelle (B).

Les résultats obtenus sont comparables à ceux que l'on obtient dans la réalité. En effet, tous ces résultats sont validés par des mesures *in vivo*. La concentration des molécules volatiles dans la cavité nasale est mesurée en temps réel à l'aide d'un **spectromètre de masse**, pendant qu'une personne est en train de manger (par exemple un yaourt) (**Figure 18**). Les données obtenues permettent d'alimenter et de valider les modèles *in vitro*, de séparer les différents paramètres et d'alimenter des modèles mathématiques.

Ainsi il a été possible, à partir de dix-sept paramètres – paramètres physiologiques, physiques et chimiques – de mesurer le relargage de l'hexanoate d'éthyle par exemple, après mise en bouche et déglutition. Sur la **Figure 18**, les points expérimentaux apparaissent en rouge et le modèle en noir. Grâce aux courbes obtenues et ainsi validées, il est possible de faire de la prédiction.

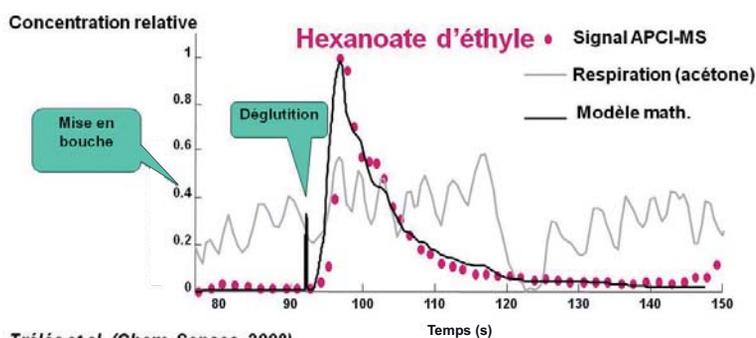
S'il est possible de changer des paramètres liés à la molécule (volatilité donc pression de vapeur saturante, etc.), on peut aussi changer des paramètres liés à la personne proprement dit, sa capacité respiratoire ou la surface d'échange en bouche.



17 paramètres (mesurés ou publiés)

4 physiques & chimiques

13 physiologiques



Tréléa et al. (Chem. Senses, 2008)

Figure 18

Grâce à des modèles expérimentaux traités par informatique et validés par l'expérience réelle, il est possible de prédire l'effet d'un arôme dans la bouche.

fois de manière instinctive et réfléchie, quand nous parcourons le menu d'un restaurant ou longeons des rayons d'un supermarché. Mais de plus en plus, les consommateurs de nos sociétés modernes réfléchissent avant d'opter pour tel ou tel produit, et s'attendent plus longtemps à étudier les intitulés et étiquettes des emballages : origines, compositions, normes de qualité (l'aspect qualité des aliments est développé dans le [Chapitre d'après la conférence de X. Leverage](#)). En plus d'être exigeants en matière gustative, voire de rechercher des produits « bénéfiques pour la santé », ils doutent parfois de l'innocuité de certains ingrédients ([Figure 19](#)).

Dans le marché alimentaire actuel, nous avons de plus en

plus accès à des informations sur ce que nous consommons, et ces informations sont de plus en plus nombreuses... si nombreuses qu'on peut parfois s'y perdre. Produit naturel, produit synthétique, identique ou non au naturel, produit toxique ou non toxique, et à quelle dose, dans quelles conditions... ? Les réglementations en matière de produits alimentaires, qui sont de plus en plus strictes pour nous protéger, sont par conséquent multiples, codifiées et peuvent paraître complexes. Par exemple pour les arômes, près de 2 550 molécules sont répertoriées, faisant l'objet d'autorisations spécifiques, c'est-à-dire qu'elles figurent sur une « liste positive », décrivant non seulement la molécule elle-même, mais

aussi les sources autorisées à partir desquelles on peut extraire la molécule ou l'ensemble de molécules, les aliments dans lesquels on a le droit de l'ajouter, ses éléments toxicologiques... Rien ne passe à la trappe ! Il suffit de voir le *Blue Book* de la Communauté européenne, qui remplit deux tomes et décrit tous ces éléments (**Figure 20**). S'agissant de toxicité, des études ont été réalisées sur un ensemble de molécules, pouvant aboutir à l'établissement d'une dose journalière admissible (DJA, voir l'*Encart « La dose journalière admissible »* du *Chapitre « Bienfaits et risques, la recherche de l'équilibre »*). Ces études toxicologiques sont elles-mêmes très réglementées et contrôlées, et font intervenir des méthodes analytiques bien précises (voir le *Chapitre « Bienfaits et risques, la recherche de l'équilibre »*). Tout est donc réglementé. La plupart des molécules d'arôme sont toutefois considérées, aux doses auxquelles elles sont ingérées, ayant un statut « GRAS », c'est-à-dire « *generally recognized as safe* » (connues pour ne pas avoir d'effets dommageables sur la santé).

Puisque nous évoquons les origines des molécules, il faut savoir que **70 % des arômes que nous consommons en matière de tonnage en France sont d'origine naturelle**. Ils sont largement utilisés comme additifs par l'industrie agroalimentaire. On trouve dans cette catégorie des arômes d'origine végétale, tels que les aromates (cannelle, vanille, poivre...)

et les arômes de fruits, de légumes et de céréales. Sans oublier les huiles essentielles (essences de citronnelle, menthe...) comme sources traditionnelles d'arômes. Les arômes peuvent aussi être d'origine animale (viandes, lait et fromages, poissons). Leurs extractions sont effectuées par différentes méthodes : par entraînement à la vapeur (distillation dans un alambic avec de l'eau), par expression à froid ou par infusion (macération dans de l'alcool), ou au moyen de solvants organiques. Dans les 30 % restants, on trouve des molécules dites « **identiques naturels** ». Ce sont en fait des molécules synthétisées à l'identique de celles fournies par la nature, dont l'extraction à partir de leurs sources peut être coûteuse ; de plus, elles ne sont pas toujours présentes en grande quantité dans le milieu naturel, dont il faut par ailleurs préserver l'équilibre et la biodiversité. Au final, ces molécules reviennent beaucoup moins cher au consommateur que celles directement extraites du milieu naturel mais n'ont pas droit, selon la législation européenne, à l'étiquetage « arôme naturel ».

Ces molécules peuvent être synthétisées à partir de précurseurs fossiles issus de la pétrochimie, ou issues, lorsque c'est possible, de milieux naturels plus accessibles - on parle alors d'« hémisynthèse ». C'est le cas de la vanilline, principal arôme de la vanille, arôme le plus fabriqué dans le monde (**Figure 21**). L'extraction de cette molécule à partir des



Figure 19

Les consommateurs se posent de plus en plus de questions sur la qualité des aliments qu'ils achètent.

Figure 20

Le Blue Book, bible des produits alimentaires de la Communauté européenne.





Figure 21

La vanilline principal arôme de la vanille, est l'additif alimentaire le plus fabriqué au monde.

gousses de vanille étant très chère, il est possible d'obtenir de manière simple et en quantité abondante la même molécule par hémisynthèse à partir de précurseurs plus accessibles tels que le gaïacol (présent dans le bois de gaïac), l'eugénol (extrait du clou de girofle) ou encore la lignine (un des principaux constituants du bois, et qui peut être récupérée par recyclage à partir des eaux résiduaires de l'industrie de la pâte à papier).

Figure 22

La seule lecture de l'emballage peut donner suffisamment d'indications quant à l'origine de certains additifs comme les arômes... quand on connaît la réglementation.

Enfin, une infime quantité des arômes que nous consomons correspond à des arômes dits « artificiels », dont quatorze seulement sont autorisés, ce chiffre étant

amené à stagner et ces rares molécules synthétiques étant utilisées depuis très longtemps. Ici, contrairement au cas de la vanilline industrielle, « artificielle » signifie que ces molécules n'ont jamais été trouvées dans la nature : elles ont été créées en laboratoire en fonction de propriétés sensorielles recherchées et supérieures à celles des molécules naturelles, notamment dans l'objectif de répondre aux besoins des consommateurs. Par exemple, l'éthylvanilline, dont la structure diffère très légèrement de celle de la vanilline (Figure 22), a été imaginée et synthétisée par les chimistes¹, puis son utilisation a été répandue dans l'alimentation à partir des années 1930. Elle possède un pouvoir aromatisant trois fois supérieur à celui de la vanilline, ce qui permet d'en utiliser en quantité moindre dans les aliments, par exemple dans les sachets de sucre vanillé.

Pour revenir à la codification des produits alimentaires

1. Il semblerait qu'en fait, l'éthylvanilline existe dans la nature : elle aurait été récemment découverte dans une espèce de vanille plus rare, que l'on trouve à Tahiti.



qui donne l'impression d'être complexe, l'étiquette de l'emballage est suffisamment indicatrice pour repérer si l'on a à faire à un arôme classé « naturel », ou bien « identique naturel » ou « artificiel ». Pour reprendre l'exemple de la vanilline, le flacon de sucre vanillé de la **Figure 22** indique « arôme naturel de vanille liquide », ce qui garantit le fait que le produit contient de la vanilline extraite de gousses de vanille (on y voit d'ailleurs figurer sur le carton une gousse de vanille, ce qui serait

interdit dans le cas d'un produit ne contenant pas de vanilline naturelle). Quant aux crèmes desserts sur lesquelles est indiquée la mention « saveur vanille », nous n'avons pas à faire à de la vanilline naturelle, mais à de la vanilline « identique naturel », ou plus probablement à de l'éthylvanilline. La mention légale figurant alors sur l'étiquette est celle d'« arôme », excluant une origine naturelle, et on ne trouve pas d'image de gousses de vanille car elle n'y est dans ce cas pas autorisée.

Le goût et nos goûts, de mieux en mieux cernés

Il n'est guère de doute que la compréhension des phénomènes à l'origine du goût ne peut que permettre d'améliorer la qualité de nos aliments. Mieux connaître les propriétés des arômes, c'est aussi mieux les choisir et mieux les doser en fonction des caractéristiques des aliments que l'on aromatise. Parmi les développements possibles de ces recherches, la compréhension du plaisir lié à la perception et de la modification de ce plaisir au cours du vieillissement, ainsi que celle de pathologies et de traitements pharmaceutiques, devrait nous aider à comprendre l'origine des changements de comportement entraînant un risque pour la santé (dénutrition, fonte musculaire, cachexie...) et nous aider à développer des aliments plus adaptés aux besoins spécifiques de populations à risque.

Si les scientifiques et industriels cherchent de plus en plus à comprendre les mécanismes de la perception du goût, les consommateurs eux-mêmes cherchent aussi à comprendre ce qu'ils mangent.

Crédits photographiques

- Fig. 1A : Minh-Thu Dinh-Audouin
- Fig. 1B : Jean-Marc Serdel
- Fig. 3, 4, 5 et 21 : Montages Minh-Thu Dinh-Audouin
- Fig 4A : Noix de coco : Licence CC-BY-SA, Nicolai Schäfer
- Fig. 6B : Patrick J. Lynch, medical illustrator
- Fig. 9 : INRA - Patrick Etiévant.
- Fig. 17 et 18 : INRA - Christian Salles
- Fig. 19 : INRA - Sabrina Gasser
- Fig. 20 : INRA - Patrick Etiévant