

Les méthodes de mesure des odeurs : instrumentales et sensorielles

Anne Saint-Eve est enseignant-chercheur en analyse sensorielle à AgroParisTech (Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement) et réalise ses activités de recherche au sein de l'Unité Mixte de Recherche AgroParisTech¹/INRA² de Génie et Microbiologie des Procédés Alimentaires, dans l'équipe « Aliments, Digestion, Perception ».

L'alimentation ne répond pas qu'à des besoins nutritionnels pour les hommes, elle est également une source de plaisir. Il existe une très grande diversité d'aliments, qui varient, par exemple, selon les cultures ou les saisons (**Figure 1**).

Les aliments peuvent être caractérisés par des individus, par une diversité de propriétés sensorielles et notamment d'odeurs (voir aussi le **Chapitre de P.-M. Lledo** dans cet ouvrage *La chimie et les*

sens, EDP Sciences, 2018). Les molécules d'arôme qui composent les aliments sont à l'origine de la perception olfactive. Lorsqu'elles sont libérées de l'aliment, elles sont susceptibles d'interagir avec les récepteurs olfactifs présents dans la cavité nasale des individus. Ces molécules peuvent être perçues soit par voie directe ou orthonasale – qui apparaît lorsqu'on sent l'aliment, soit par voie indirecte ou rétronasale, lorsque l'aliment est mis en bouche et subit une déstructuration, qui va permettre de libérer les molécules d'arôme de

1. www.agroparistech.fr

2. www.inra.fr

Figure 1

Les aliments sont d'une grande diversité d'aspects et d'odeurs.



1 Perception d'arôme et formulation raisonnée des aliments

La qualité aromatique est un déterminant essentiel de l'acceptabilité d'un aliment par les consommateurs et va contribuer fortement à l'établissement de leurs préférences. On considère que près d'un tiers de l'alimentation d'un européen est aromatisée (produits laitiers, conserves, plats cuisinés, biscuits sucrés ou apéritifs, confiseries, etc.). Cette aromatisation permet d'améliorer les propriétés sensorielles d'un produit et d'en augmenter l'appréciation. Elle permet également d'offrir une gamme diversifiée de produits aux consommateurs, de masquer des défauts de goût ou encore

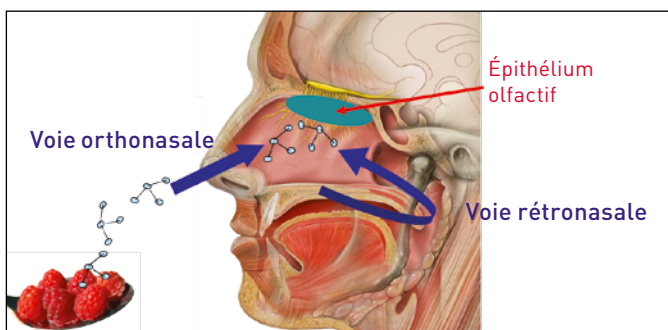
l'aliment vers la cavité buccale. Les molécules d'arôme sont ensuite entraînées *via* la respiration, jusqu'à l'épithélium olfactif³, et peuvent alors interagir avec les récepteurs olfactifs (Figure 2). Ces phénomènes sont ainsi à l'origine des perceptions d'odeurs et d'arômes par les individus.

3. Épithélium olfactif : muqueuse de la cavité nasale dont la fonction principale est la détection de molécules odorantes.

Figure 2

Le trajet des molécules d'arôme odorantes.

Source : anatomie : Wikipédia, licence CC-BY-2.0, Patrick J. Lynch, medical illustrator.



de redonner un arôme à des aliments ayant subi diverses transformations, telles qu'un traitement thermique, par exemple, pour permettre leur conservation. L'arôme peut ainsi être naturellement présent dans les aliments, ou ajouté lors de leur fabrication. L'arôme d'un aliment est constitué par un très grand nombre de molécules d'arôme – on parle de plusieurs centaines. Les composés d'arôme sont définis comme étant des molécules organiques de faible masse molaire (inférieure à 400 g/mol), pouvant appartenir à différentes familles chimiques (aldéhydes, cétones, esters, etc.) et dont la pression partielle dans les conditions normales de température et de pression est suffisamment élevée pour que ces molécules soient partiellement à l'état gazeux et puissent provoquer

un stimulus au contact de la muqueuse olfactive. Les composés d'arôme ne sont présents qu'en faibles concentrations dans la plupart des matrices alimentaires, de l'ordre du mg/L, mais ces quantités sont suffisantes pour induire une perception aromatique, du fait de leur faible seuil de perception.

La **Figure 3** présente un exemple de formulation d'un arôme pêche, simplifiée puisqu'elle ne contient que douze composés d'arôme. À travers cet exemple, on peut constater que les molécules sont de natures très différentes : des alcools, des aldéhydes ou des esters, avec des masses molaires et des températures d'ébullition très diversifiées.

La formulation d'un produit alimentaire, qui intègre sa composition (nature et concentrations des ingrédients) et son procédé de

Figure 3

Exemple de formulation : un arôme pêche.

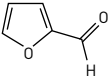

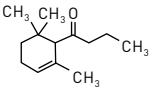
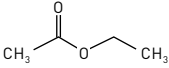


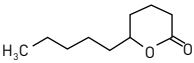
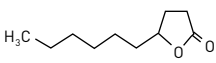
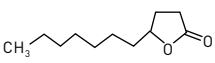
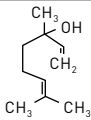
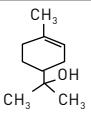
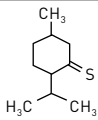
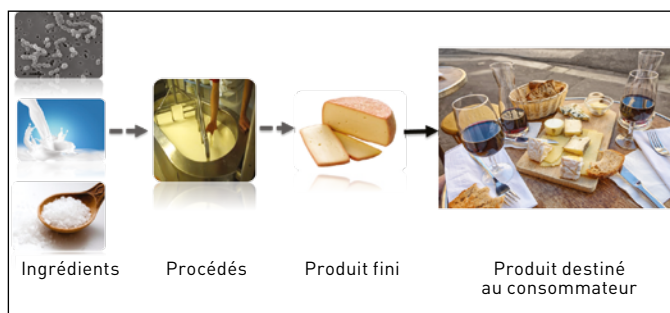
 <p>Furfural (C₅H₄O₂) (MM = 96, Teb = 162, caramel)</p>	 <p>Citral (C₁₀H₁₆O) (MM = 152, Teb = 223, zesté)</p>	 <p>α-damascenone (C₁₃H₂₀O) (192,3, Teb = -, fruité rose)</p>
 <p>Acétate d'éthyle (C₄H₈O₂) (MM = 88, Teb = 77, étherée)</p>	 <p>Benzaldéhyde (C₇H₆O) (MM = 106, Teb = 178, amande amère)</p>	 <p>Hexanol (C₆H₁₄O) (MM = 102, Teb = 157, vert)</p>
 <p>δ-décalactone (C₁₀H₁₈O₂) (MM = 170, Teb = 280, crémeux, frité)</p>	 <p>γ-décalactone (C₁₀H₁₈O₂) (MM = 170, Teb = 280, pêche, huileux)</p>	 <p>γ-undécalactone (C₁₁H₂₀O₂) (MM = 184, Teb = 297, pêche blanche)</p>
 <p>Linalol (C₁₀H₁₈O) (MM = 154, Teb = 198, floral)</p>	 <p>Terpinéol (C₁₀H₁₈O₂) (MM = 154, Teb = 219, lilas)</p>	 <p>Thiomenthone (C₁₀H₁₈O₂) (MM = 170, Teb = -, cassis)</p>

Figure 4

Les étapes de la conception d'un produit : l'exemple d'un fromage.



fabrication (mode d'incorporation des ingrédients en mélange et procédé associé), est une étape déterminante du développement d'aliments ayant des fonctionnalités cibles, sensorielles ou nutritionnelles. Elle conduit à l'élaboration des caractéristiques sensorielles qui conditionnent principalement l'acceptabilité et l'appréciation par le consommateur. Les innovations actuelles en agroalimentaire font encore souvent l'objet d'une démarche empirique de formulation, longue et coûteuse.

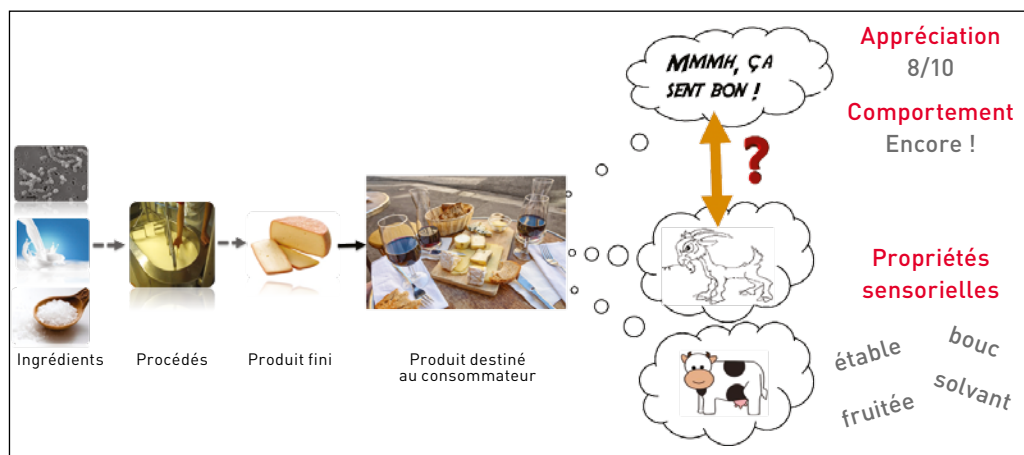
La maîtrise de la formulation constitue donc aujourd'hui une étape importante du processus de développement de nouveaux produits. Mieux comprendre les mécanismes qui régissent la perception est donc indispensable pour formuler des aliments aux propriétés sensorielles mieux maîtrisées et plus efficaces. En particulier, dans les cas des molécules d'arômes, ces dernières proviennent soit des matières premières utilisées pour leur formulation, soit des étapes liées au procédé de transformation des produits (transformation enzymatique, transformation par la chaleur, fermentation, etc.).

Prenons l'exemple du fromage (**Figure 4**), qui, à l'origine, est composé de lait, de sel et de nombreux micro-organismes. Ces ingrédients subissent une technologie et des procédés de fabrication différents propres à chaque type de fromages : les étapes de brassage du caillé, de cuisson, les conditions d'affinage ou les écosystèmes microbiens utilisés conduisent ainsi à une diversité de fromages.

Mieux maîtriser ces étapes de transformation d'un fromage permet de développer des produits aux propriétés sensorielles maîtrisées. Ces dernières vont conditionner l'appréciation de ce produit, mais également le comportement de consommation (quantité consommée, association au sein du repas, etc.) (**Figure 5**).

Afin de raisonner les étapes de formulation des aliments, la démarche consiste plus particulièrement à établir des liens entre les propriétés instrumentales (composition, structure et texture), les propriétés sensorielles (dont les propriétés olfactives) et l'appréciation par le consommateur (**Figure 6**), dans un contexte de consommation donné.

Dans le cas du fromage, mieux comprendre le rôle



de la formulation, et notamment de la composition en molécules d'arôme qui sont libérées de l'aliment et susceptibles d'être perçues (et de donner sa typicité aromatique au fromage), contribue à mettre en place cette démarche de formulation raisonnée. Leur libération va

également être dépendante de la structure et de la texture du produit, dépendant elles-mêmes de la composition et du procédé de fabrication du produit.

En effet les composés d'arôme ne sont pas neutres vis-à-vis de la matrice dans laquelle ils sont présents ou introduits.

Figure 5

L'appréciation d'un produit par le consommateur est un comportement quasi-automatique et instinctif.

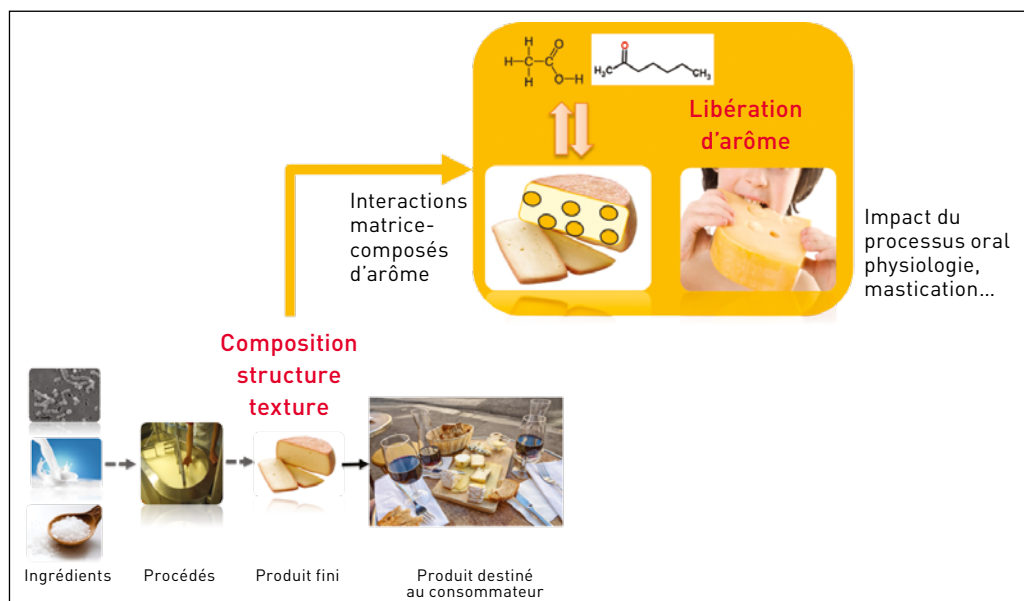


Figure 6

La conception raisonnée d'un aliment.

Les travaux de la littérature ont permis d'identifier le rôle de la composition, de la structure et des propriétés rhéologiques des aliments dans la libération des composés d'arôme et leur perception. Les composants non volatils des matrices alimentaires (épaississants, matière grasse, protéines) peuvent interagir de façon spécifique avec les composés d'arôme. Ces interactions physico-chimiques entre composés non volatils et volatils peuvent alors être à l'origine des propriétés olfactives des produits. La connaissance des propriétés physico-chimiques des composés d'arôme dans les matrices alimentaires (solubilité, hydrophobicité, coefficient de partage air/matrice, etc.) permet d'améliorer la démarche de formulation et s'avère aujourd'hui indispensable pour aller plus loin dans la compréhension des perceptions aromatiques.

Pour mieux comprendre ces mécanismes, il semble nécessaire de prendre en compte les phénomènes dynamiques temporels liés à l'acte de consommation. En effet, en bouche, le produit est mis en mouvement et subit une destruction, qui retentit sur la libération des molécules et donc leur perception. Les cinétiques de libération des stimuli en bouche dépendent du processus oral mis en œuvre par l'individu (comportement masticatoire de l'individu adapté au produit consommé, temps de séjour en bouche, hydratation par la salive, dépôt-nettoyage de produit sur les muqueuses buccales et pharyngées, etc.) et dépendant de chaque type d'aliment

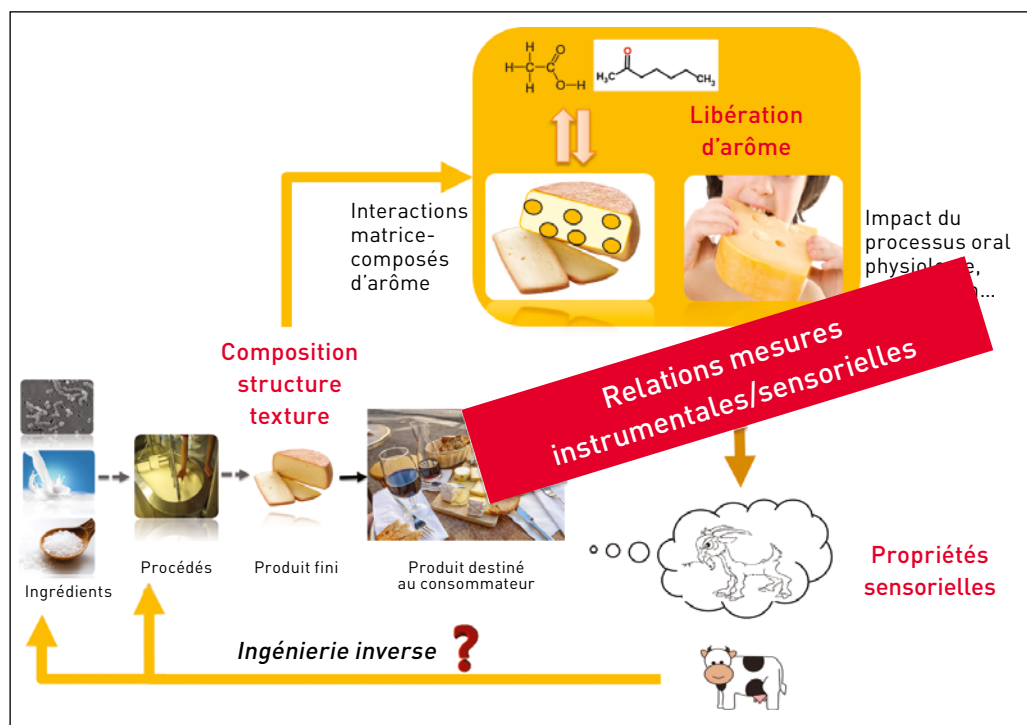
(**Figure 6**). Ces cinétiques sont fonction de l'individu et du type de produit consommé. Prendre en compte ce processus oral permet d'aller plus loin et de mieux comprendre le rôle de la formulation des produits alimentaires sur leur perception.

En couplant des mesures sensorielles et des mesures instrumentales, et en utilisant les techniques d'*ingénierie inverse*, on peut essayer d'optimiser la formulation pour tendre vers des propriétés sensorielles en adéquation avec des cibles sensorielles, appréciées par les consommateurs⁴ (**Figure 7**).

2 Caractérisation des perceptions d'arôme par l'analyse sensorielle

L'analyse sensorielle permet de prendre en compte les perceptions et les comportements des consommateurs lors de la conception et du développement de produits et ainsi de contribuer aux démarches de conception raisonnée. La connaissance des facteurs et des mécanismes qui déterminent la perception et l'utilisation de méthodes d'évaluation sensorielle sont donc indispensables pour appréhender la qualité d'un aliment. L'analyse sensorielle occupe donc une place centrale dans toutes les questions de recherche liées à la transition de l'offre alimentaire, en accord avec les évolutions socio-économiques, nutritionnelles et environnementales. Elle joue

4. Voir aussi *La chimie et l'alimentation*, chapitre de M. Anton et M. Axelos, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, R.A. Jacquesy, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2010.



un rôle majeur sur les questions de conception d'aliments appréciés par les consommateurs, respectant des contraintes de développement (plus sain, plus durable) et/ou pouvant être destinés à des populations particulières (enfants, adolescents, personnes âgées,...).

L'analyse sensorielle représente l'ensemble des méthodes qui permettent de caractériser un produit en faisant intervenir les organes des sens de l'être humain. L'être humain est utilisé comme un instrument de mesure *via* la vue, l'ouïe, l'odorat, le goût, le toucher, mais nous nous focaliserons ici sur l'odorat. Il ne faut cependant pas oublier que lorsqu'on consomme un produit, sa perception est bien un tout qui dépend de l'ensemble de ces sens.

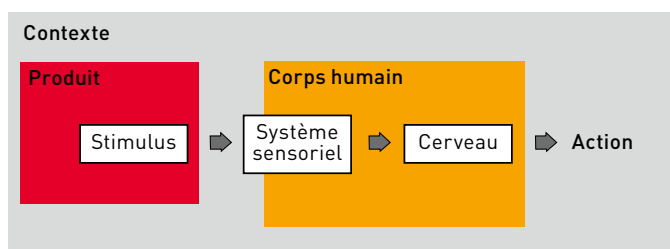
Les propriétés sensorielles d'un produit n'existent pas intrinsèquement. L'odeur, la saveur, la couleur d'un fruit, d'une fleur ou d'un aliment n'existent que par l'individu qui les perçoit. Alors que les caractéristiques physico-chimiques appartiennent au produit, les perceptions sensorielles sont produites par le corps humain, et le plaisir est construit par le cerveau. L'analyse sensorielle mesure ainsi l'interaction produit-sujet (**Figure 8**).

Figure 7

L'analyse sensorielle utilise l'être humain comme instrument de mesure.

Figure 8

L'analyse sensorielle mesure l'interaction produit-sujet. Mesure sensorielle = mesure de l'interaction produit x sujet.



Un produit alimentaire délivre des stimuli, qui entrent en interaction avec le corps humain *via* les différents récepteurs sensoriels, puis *via* le cerveau, qui va le ressentir comme un plaisir (« *c'est délicieux* ») ou une saveur particulière (« *cela a le goût de la fraise* »). Mais tout cela est perçu uniquement dans un contexte donné. Le contexte est un paramètre important qui impacte fortement la perception, car les produits alimentaires sont différents, les êtres humains sont physiologiquement différents, les modes de vie et la façon dont nous utilisons les produits le sont aussi (**Figure 9**). On ne recherchera

donc pas la même chose et les stimuli ne seront pas les mêmes au sein d'individus différents, car la culture alimentaire ou le contexte de consommation conditionnent la façon de consommer et d'apprécier les produits. Pour décrire les propriétés sensorielles d'un aliment, l'analyse sensorielle doit donc être encadrée par des normes strictes de méthodologie et d'éthique (**Encart : « Les méthodes normalisées de l'analyse sensorielle »**).

L'analyse sensorielle fait appel à des méthodologies définies et à des individus pouvant avoir différents niveaux d'expertise dans les différents domaines

LES MÉTHODES NORMALISÉES DE L'ANALYSE SENSORIELLE

Manuels méthodologiques

Normes (AFNOR, ISO)*

Société Française d'Analyse Sensorielle

Comités d'éthique, comité de protection des personnes

*AFNOR : Association Française de Normalisation.

ISO : International Organization for Standardization.

Figure 9

La culture alimentaire conditionne la façon d'apprécier les produits.





Figure 10

L'analyse sensorielle.

de l'alimentaire, allant de consommateurs « naïfs » à des experts (œnologues, fromagers, aromaticiens...) (Figure 10). Des panels d'individus (groupes d'évaluation) peuvent être entraînés durant plusieurs mois sur une famille de produits, à décrire et utiliser des termes précis permettant de décrire et quantifier les perceptions d'un produit. Ils peuvent être entraînés dans des domaines aussi divers que la texture des fromages ou les arômes des cognacs. Pour ce type de test, l'évaluation est réalisée dans des conditions d'évaluation où la température, l'éclairage et la ventilation sont maîtrisés, pour limiter les biais liés à l'environnement.

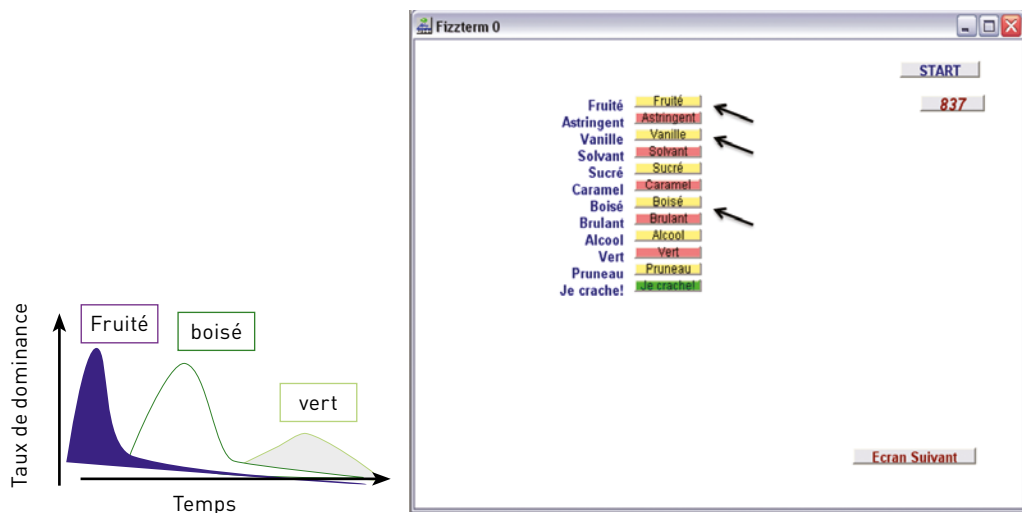
Les nombreux tests et le traitement des données associées

à chacun de ces tests sont choisis selon les objectifs de chaque projet. Par exemple si on cherche à comprendre pourquoi un camembert avec un affinage à dix-huit jours est différent d'un camembert avec un affinage de vingt-quatre jours, mais qui a subi les mêmes étapes de transformation de la même matière première, il faut définir les tests à mettre en œuvre. Dans la plupart des études, les produits sont anonymés : codés et présentés toujours de la même façon au groupe d'évaluation.

L'analyse sensorielle peut être décrite selon deux grandes familles de tests. L'une s'intéresse à discriminer et décrire les propriétés sensorielles des produits, l'autre

Figure 11

Méthode de dominance temporelle des sensations : évaluation de la séquence du descripteur au cours du temps. À chaque instant de la consommation, l'expert clique sur la perception de son choix qu'il considère comme dominante.



à comprendre l'appréciation ou le comportement des consommateurs (**Figure 11**).

La première famille de test permet d'évaluer les différences de perception entre deux produits, variant, par exemple, selon un paramètre de composition, ou de réaliser une description de ces produits par une analyse quantitative descriptive. Ces tests de description, tels que les profils sensoriels, permettent de déterminer une carte d'identité d'un produit, quantifiant les différentes propriétés sensorielles de manière répétable et discriminante. Par exemple si l'on poursuit l'exemple du camembert, ce dernier pourra être décrit ainsi : « *Ce camembert a des notes fleuries plus intenses que cet autre camembert un petit peu plus salé, dont la croûte est un peu plus dure, et qui a un cœur plus crayeux* »... Sur l'exemple de la **Figure 12**, le chocolat, testé par un panel entraîné, a obtenu une note d'intensité de la perception grillée de huit sur dix sur une échelle bornant l'espace

produit de ce type de chocolat. Différents produits peuvent ainsi être comparés selon leurs spécificités et leurs caractéristiques sensorielles.

L'analyse sensorielle permet également de caractériser des produits alimentaires au niveau temporel, pour comprendre comment évolue, par exemple, la texture d'un aliment lors de sa destruction en bouche. Une des techniques qui peut être utilisée est appelée la dominance temporelle des sensations (DTS), qui évalue la séquence des descripteurs qui sont dominants au cours du temps (**Figure 11**). Les juges sont entraînés à l'utilisation de cette méthode, ils disposent d'une liste de descripteurs (dans cet exemple des descripteurs d'aromatiques) et ils sélectionnent les « notes » perçues dominantes au cours de leurs séquences. En faisant des répétitions et sur l'ensemble d'un panel d'experts, cela permet de déterminer l'évolution des notes aromatiques au cours du temps de consommation

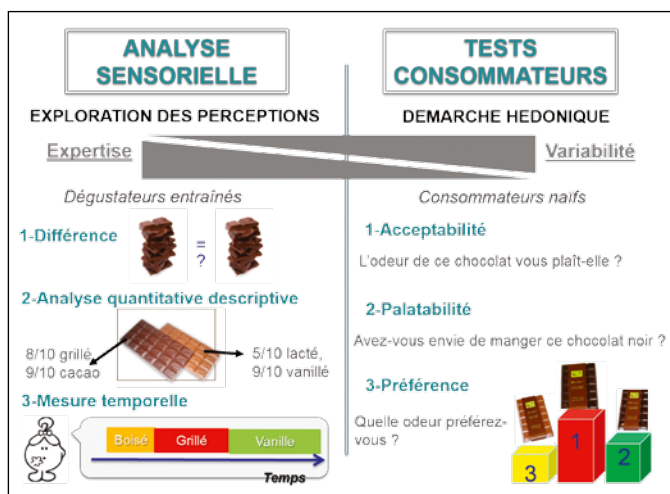


Figure 12

Les deux approches de l'évaluation sensorielle.

caractéristique de chaque produit.

La deuxième famille de tests est constituée de tests réalisés auprès de consommateurs pour comprendre leur appréciation ou comportement lors de la consommation de produits. Pour ces mesures hédoniques, le degré de variabilité des consommateurs est important. Les consommateurs, dits naïfs, dans le sens où ils n'ont jamais été entraînés à la dégustation, sont observés ou répondent à des questions et des tests de nature différente. On peut, par exemple, s'intéresser à la notion d'acceptabilité : « *Est-ce que l'odeur de ce chocolat vous plaît ?* », de palatabilité : « *Est-ce que vous avez envie d'en manger ?* », ou à des notions de préférence : « *Entre ces trois chocolats, lequel préférez-vous ?* »

[Encart : « À quelles questions peut répondre l'analyse sensorielle ? »].

3 Mesurer la libération des molécules d'arôme au sein d'un aliment

3.1. Caractérisations *in vitro* de la libération des composés d'arôme

La complexité des aliments et la diversité des structures vont moduler la disponibilité et la volatilité des composés d'arôme au sein d'un aliment et ainsi provoquer la perception olfactive. Afin de décrire les phénomènes mis en jeu dans la libération des molécules d'arôme au sein d'un aliment, des mesures peuvent

être réalisées en conditions *in vitro*. On peut considérer deux types de propriétés de mobilité des solutés : au sein du produit (diffusion) ou du procédé considéré (partage aux interfaces et transfert de matière vers une autre phase) et représentées par les coefficients de partage aux interfaces, de diffusion ou de transfert de matière.

Ces propriétés ne sont pas liées à l'individu mais correspondent à des mesures d'interactions entre les composés d'arôme et les principaux constituants des aliments (protéines, lipides et polysaccharides). Les interactions ont fait l'objet de nombreuses études, qui ont montré que les facteurs limitant cette libération des composés d'arôme sont les résistances au transfert de matière aux différentes interfaces. L'étude des propriétés des molécules aux interfaces avec l'aliment apporte donc des informations sur l'existence de ces interactions. Afin de déterminer les propriétés de partage avec l'air, l'analyse statique de l'espace de tête est une des méthodes les plus utilisées. Le coefficient de partage aux interfaces (produit/air ou salive) est

À QUELLES QUESTIONS PEUT RÉPONDRE L'ANALYSE SENSORIELLE ?

Comment l'odeur de mon produit est-elle perçue ?

Comment l'odeur de mon produit évolue au cours du temps ?

Quelle solution utiliser pour masquer des défauts d'odeurs ?

Quel est l'impact de la formulation et du procédé de fabrication sur la perception olfactive des aliments ?

déterminé dans des conditions de pression et de température constantes. À l'équilibre, les molécules d'arôme se répartissent dans l'espace de tête, donc dans l'air, qui est au-dessus de l'échantillon contenant les molécules d'arôme (**Figure 13A**). On peut ainsi mesurer le *coefficient de partage* entre les phases air/eau (ou air/matrice), qui correspond au rapport entre la concentration des molécules dans l'air et dans l'eau. C'est une propriété caractéristique d'une molécule d'arôme dans un milieu donné, qui est l'eau dans l'exemple présenté.

La **Figure 13B** concerne le cas d'une émulsion (huile dans eau) contenant des gouttelettes de matière grasse. Les molécules d'arôme, pour la majorité, sont hydrophobes et sont donc susceptibles d'interagir fortement avec la matière grasse ; il en résulte un coefficient de partage air/matrice très différent du coefficient de partage air/eau (plus faible).

La mesure de ces propriétés permet ainsi de quantifier les interactions entre les composés de la matrice (ici la matière grasse) et les arômes, et de comprendre le rôle de ces ingrédients sur la libération de ces molécules d'arôme, à l'origine de la perception.

Pour mesurer les composés d'arôme volatils contenus dans l'espace de tête (air) au-dessus d'un échantillon d'aliment, un prélèvement de l'air au-dessus du produit peut être réalisé par différentes techniques. Par exemple, on peut utiliser une seringue à gaz, puis la composition de cet air prélevé est analysée par chromatographie en phase gazeuse⁵ (**Figure 14**).

Afin d'illustrer l'effet de la teneur en matière grasse sur

Figure 13

Mesure in vitro des interactions matrice/molécules d'arômes.
A) Mesure du coefficient de partage K air/eau ; B) mesure du coefficient de partage air/matrice.

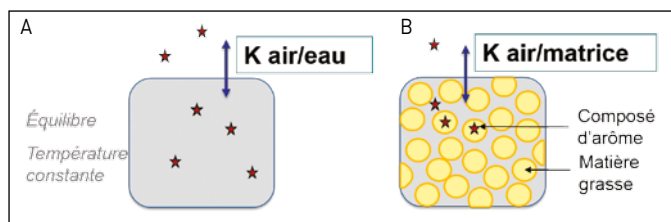
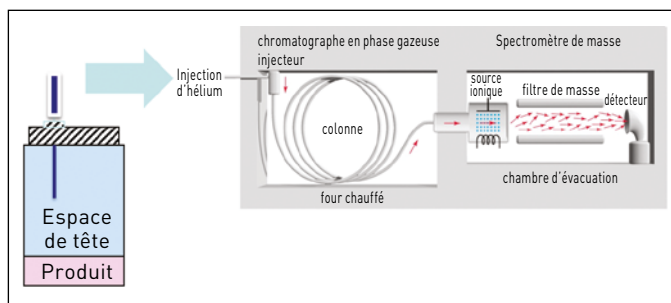


Figure 14

Identification et mesure de la quantité de molécules d'arôme volatiles dans l'espace de tête par chromatographie en phase gazeuse.



la libération de molécules d'arôme volatiles, prenons l'exemple de deux yaourts aromatisés à la fraise, dont la formulation ne varie que selon leur teneur en matière grasse : 0 % ou 4 %. La quantité des différentes molécules d'arôme présentes dans l'espace de tête au-dessus des deux produits a été déterminée par chromatographie en phase gazeuse (quantité relative de composés au-dessus de l'échantillon présentée en bleu pour le yaourt à 0 % et en violet pour le yaourt à 4 %) (**Figure 15**). Pour illustrer ces résultats, un focus particulier est fait sur l'hexanoate d'éthyle, molécule volatile caractéristique de l'arôme fraise avec un comportement plutôt hydrophobe, et sur le diacétyl, molécule plutôt hydrophile. Les résultats montrent que l'hexanoate d'éthyle est plus retenu dans le yaourt avec matière grasse que dans celui sans matière grasse.

Si on regarde maintenant la molécule de diacétyl, qui est responsable par ailleurs d'une note « beurre caramel », on n'observe pas de différence au niveau de la libération de cette molécule. De nature plutôt hydrophile, cette molécule n'a donc pas d'interaction avec la matière grasse ; elle est libérée de façon similaire au-dessus de yaourts avec ou sans matière grasse.

Une autre propriété de mobilité des composés d'arôme dans des matrices de composition et de comportement rhéologique complexes est étudiée dans les travaux de la littérature : le coefficient de diffusion. Le coefficient de diffusion est déterminé sur la base de la loi de Fick. Différents systèmes expérimentaux existent, dont le principe consiste à évaluer les cinétiques de libération des composés d'arôme entre deux compartiments (l'un contenant l'air et l'autre le produit) séparés par une membrane.

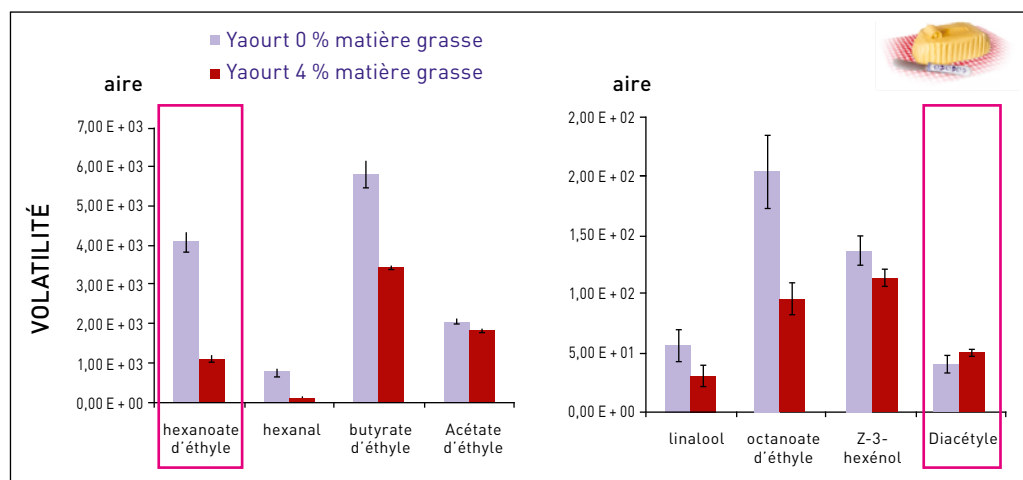


Figure 15

Effet de la teneur en matière grasse sur la libération des molécules d'arôme.

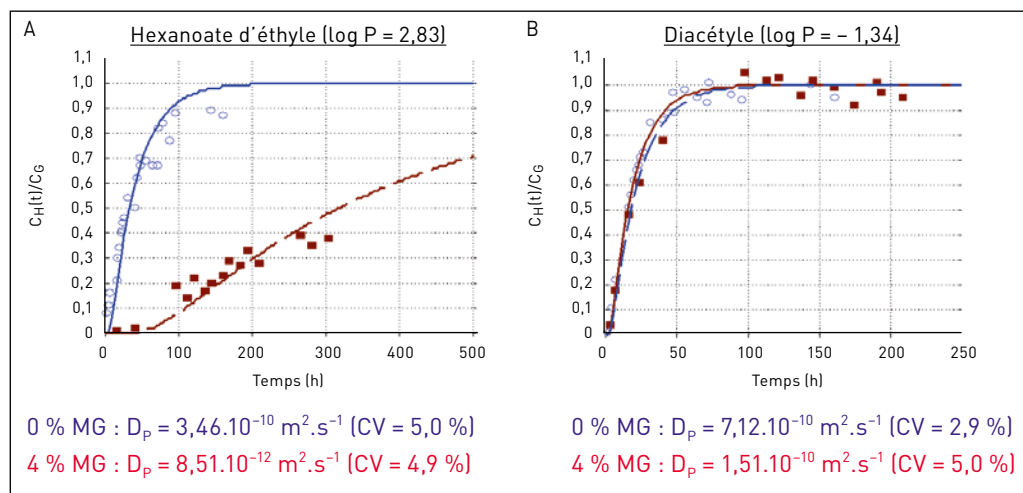


Figure 16

Effet de la teneur en matière grasse sur la diffusion des composés d'arôme (évolution du coefficient de diffusion D_p) : A) diffusion de l'hexanoate d'éthyle ; B) diffusion du diacétyle.

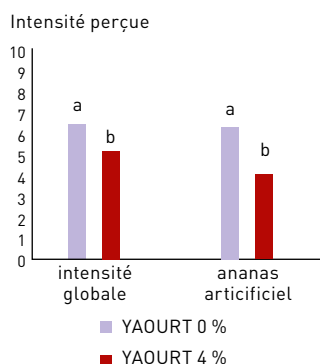


Figure 17

Analyse descriptive quantitative pour mesurer l'effet de la teneur en matière grasse sur la libération et la perception des molécules d'arômes (sur seize sujets entraînés). On observe la diminution de l'intensité aromatique en présence de matière grasse, qui peut être expliquée par les propriétés de partage et de mobilité des composés d'arômes au sein des matrices.

La **Figure 16** montre l'influence de la teneur en matière grasse sur la diffusion des molécules d'arôme, avec le même exemple de yaourt aromatisé à la fraise et contenant soit 0 % (en bleu) soit 4 % (en rouge) de matières grasses. La diffusion est étudiée à partir de la mesure des coefficients de diffusion des deux molécules caractéristiques de l'arôme fraise : l'hexanoate d'éthyle et le diacétyle. L'hexanoate, qui est hydrophobe, diffuse plus lentement en présence de matière grasse (**Figure 16A**), alors que la matière grasse n'a aucun impact sur la diffusion du diacétyle (**Figure 16B**). Le coefficient de diffusion D_p peut diminuer d'un facteur 5 à 40 selon la nature du composé d'arôme.

En parallèle des mesures physico-chimiques réalisées dans cette étude, les yaourts avaient été dégustés par un panel entraîné afin d'étudier

l'effet de la teneur en matière grasse sur la perception (**Figure 17**). Une différence significative de perception a été observée entre le yaourt à 0 % et le yaourt à 4 %. L'intensité aromatique est perçue moins intense dans le yaourt avec matière grasse, ce qui est complètement en accord avec les propriétés de mobilité et de partage déterminées sur ces mêmes yaourts.

3.2. Caractérisation *in vivo* de la libération des molécules d'arôme

L'étude du processus oral permet de comprendre les rôles respectifs de la formulation du produit (composition, structure), de l'individu (paramètres physiologiques, comme les mouvements de langue, l'activité musculaire, l'action de la salive) et de l'interaction entre les deux sur la libération des molécules

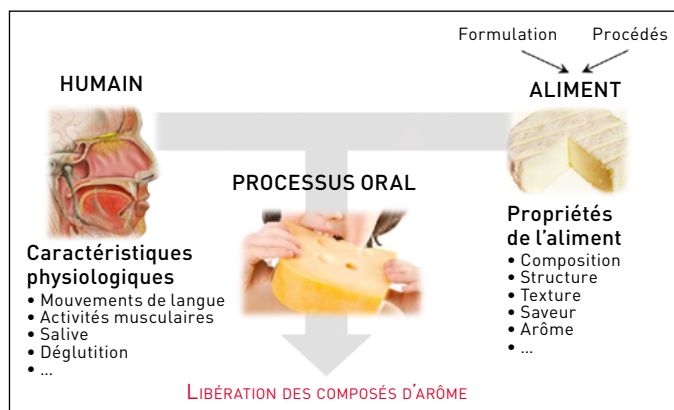


Figure 18

La libération des composés d'arôme dépend des caractéristiques physiologiques du consommateur, des propriétés de l'aliment et de son mode de consommation.

d'arôme et donc à l'origine de la perception olfactive d'un produit (Figure 18).

Pour cela, des mesures *in vivo* peuvent être réalisées pour prendre en compte la physiologie des individus et le processus oral, et détecter et quantifier les composés d'arôme libérés dans la cavité nasale d'un sujet lors de la consommation (Figure 19). Le développement de techniques analytiques sensibles et rapides comme la spectrométrie de masse⁶ à ionisation chimique, à pression

atmosphérique (APCI⁷-SM) ou par réaction de transfert de protons (PTR-MS) permet le suivi dynamique en ligne et en temps réel de la libération de molécules volatiles. Les conditions d'ionisation dites douces limitent la fragmentation des molécules.

La Figure 20A montre les différentes étapes du suivi, en temps réel, par l'expert de la mesure de la libération des composés d'arôme. On commence par analyser l'air de la salle pour détecter tout polluant odorant éventuellement présent, puis l'haleine du sujet

6. Spectrométrie de masse : technique d'analyse permettant de déterminer la masse d'une molécule en utilisant son rapport masse/charge. Elle est utilisée pour identifier des molécules et leurs structures chimiques.

7. APCI : ionisation chimique à pression atmosphérique. C'est une technique d'ionisation dans la phase gazeuse qui intervient dans les premières étapes d'une spectroscopie de masse.

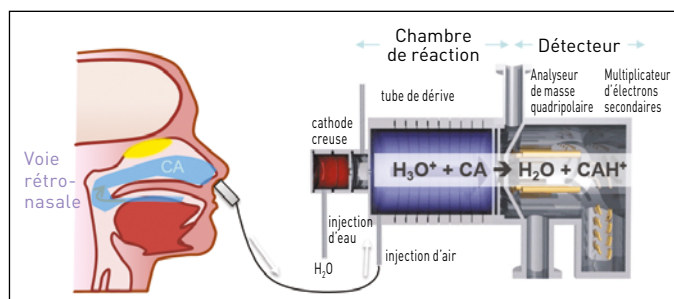


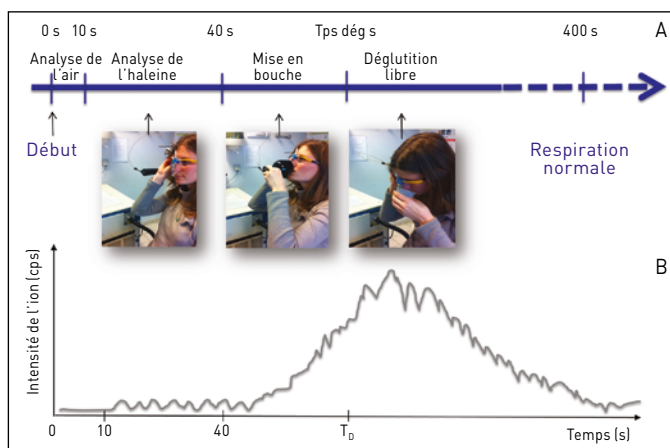
Figure 19

La spectrométrie de masse est une méthode de mesure *in vivo* des composés d'arôme libérés dans la cavité nasale lors de la consommation.

Figure 20

Analyse de la libération des molécules d'arôme en temps réel.

A) Les différentes étapes de la mesure ; B) suivi de l'intensité de l'ion observé par spectrométrie de masse au cours de ces différentes étapes.



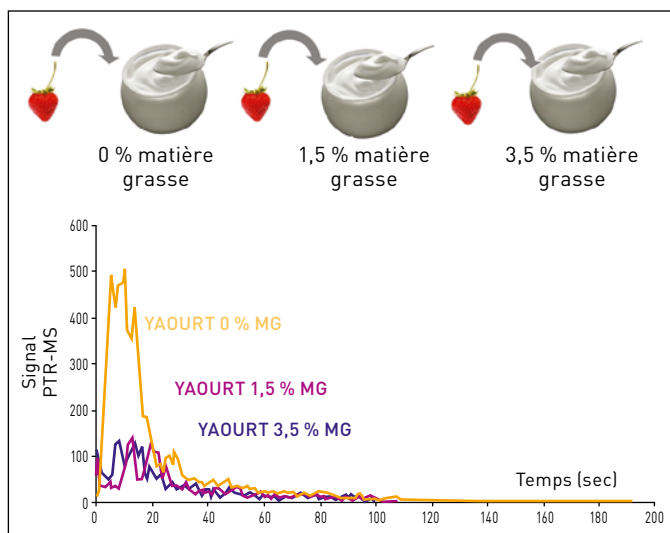
afin de prendre en compte le point de départ et d'établir une ligne de base pour chaque expert testeur. Le produit est ensuite mis en bouche, mastiqué le plus naturellement possible, puis dégluti. La libération des molécules d'arôme est enregistrée jusqu'au retour au niveau de base du sujet testeur. Un exemple de courbe observée durant ces différentes étapes est représenté sur la **Figure 20B**. L'ion clé commence à être détecté lors de la mise en bouche, et

sa présence est maximum lors de la déglutition.

Ces mesures permettent de quantifier les contributions respectives des caractéristiques des produits (composition, structure) et de la physiologie des individus sur les profils de libérations obtenus, et conduisant à la perception. Reprenons l'exemple de la formulation des yaourts avec et sans matière grasse, aromatisé à la fraise (**Figure 21**). Suivons l'évolution du signal PTR-MS

Figure 21

Mesures in vivo : influence de la teneur en matière grasse sur la libération d'une molécule caractéristique de l'arôme fraise d'un yaourt.



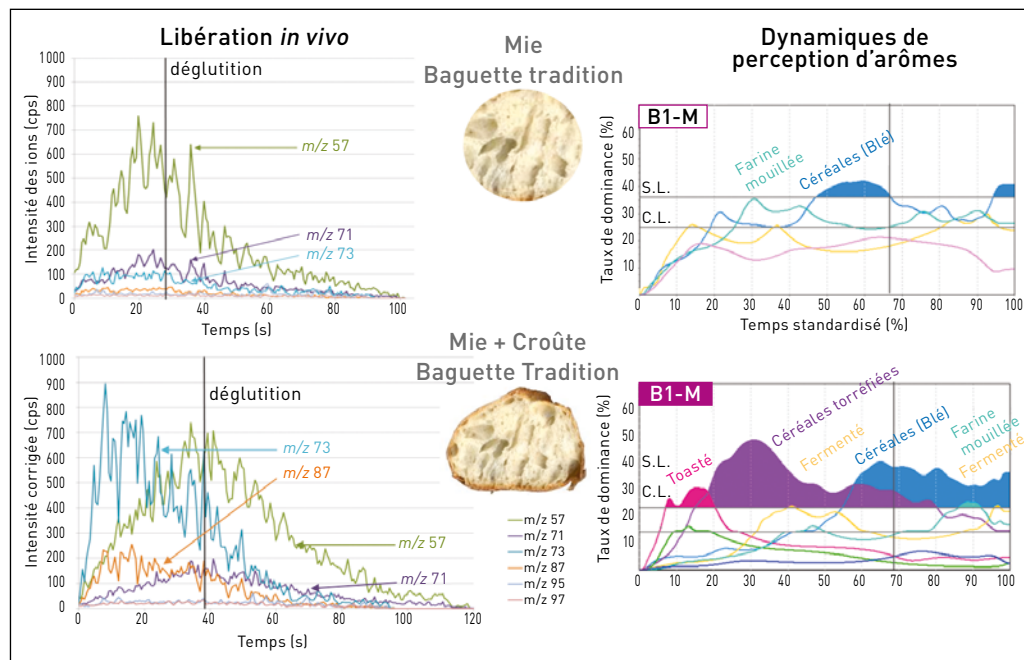
(« *Proton-transfer-reaction mass spectrometry* », spectrométrie de masse à réaction de transfert de proton) de l'hexanoate d'éthyle, qui est l'une des molécules caractéristiques de l'arôme fraise. Dans le yaourt sans matière grasse, on observe un signal très important et relativement précoce alors qu'à partir du moment où il y a de la matière grasse (1,5 ou 3,5 % de matière grasse), le signal est beaucoup plus faible, ce qui montre qu'il y a moins de molécules d'hexanoate d'éthyle dans la cavité nasale du testeur. De plus, dans ce dernier cas, le signal est un peu décalé, son intensité monte moins vite, ce qui montre que la matière grasse diminue aussi la mobilité, elle a donc un effet retardateur et diminue également l'intensité du signal parvenant dans la cavité nasale.

Dans de nombreuses études, ces mesures sont réalisées en parallèle de mesures sensorielles, afin de mieux comprendre les liens existant entre libération de composés volatils et perception aromatique.

Pour illustrer les liens entre les cinétiques de libération et de perception, prenons l'exemple de baguettes de pain traditionnelles en focalisant sur le rôle de la mie de pain et de la croûte dans la libération et la perception des composés d'arôme (Figure 22). Les mêmes ions sont identifiés dans la croûte et dans la mie et ont été suivis par PTR-MS dans la cavité nasale de huit juges différents. Les résultats montrent que l'ion 73 est très fortement libéré en présence de la croûte alors que les autres, et notamment l'ion 57, sont des marqueurs de la mie.

Figure 22

Impact de la croûte sur les dynamiques de libération et de perception des arômes du pain.



Quand on analyse en parallèle la perception évaluée par un panel de juges entraînés, la mie est décrite avec des notes farine mouillée et de céréales, tandis que la croûte, beaucoup plus riche aromatiquement, est décrite par des notes toastées, torréfiées, fermentées, céréales, farine mouillée, etc. On voit donc bien l'apport de la croûte et l'importance de marqueurs aromatiques responsables des notes sensorielles au cours du temps de consommation.

3.3. La modélisation, un outil pour identifier les mécanismes à l'origine de la libération des composés d'arôme

Afin d'aller plus loin dans l'étude des mécanismes et étudier les facteurs limitant la libération et donc la perception, une démarche de modélisation peut être associée aux mesures physico-chimiques et sensorielles.

Différents types de modélisation peuvent être appliquées, nous en présenterons deux. La première est la modélisation statistique où sont mises

en regard les mesures instrumentales et les mesures sensorielles (**Figure 23**) appliquées à différentes formulations pour établir des modèles prédictifs, qui sont validés sur d'autres jeux de données afin d'optimiser la formulation et remonter finalement à la composition, à la formulation et au procédé de fabrication du produit.

L'autre type de modélisation est la modélisation mécanistique, qui a pour objectif de décrire, voire prédire les quantités d'arôme transférées au cours du temps, en prenant en compte les mécanismes complexes mis en jeu lors de la déstructuration de l'aliment en bouche et qui varient selon de type d'aliment dans l'ensemble cavité oro-pharyngée (**Figure 24**). Cette dernière peut être considérée comme un réacteur avec différents compartiments dans lesquels s'appliquent des lois classiques de transfert de matière issues du génie des procédés et appliquées aux mécanismes de mastication, de dissolution, d'incorporation de salive, d'ouverture du vélo-pharynx au fond de la bouche. En prenant en compte tous les

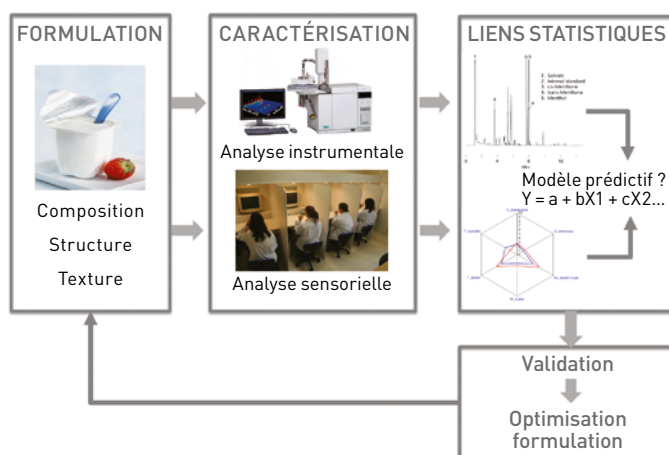


Figure 23

Schéma de principe de la modélisation statistique.

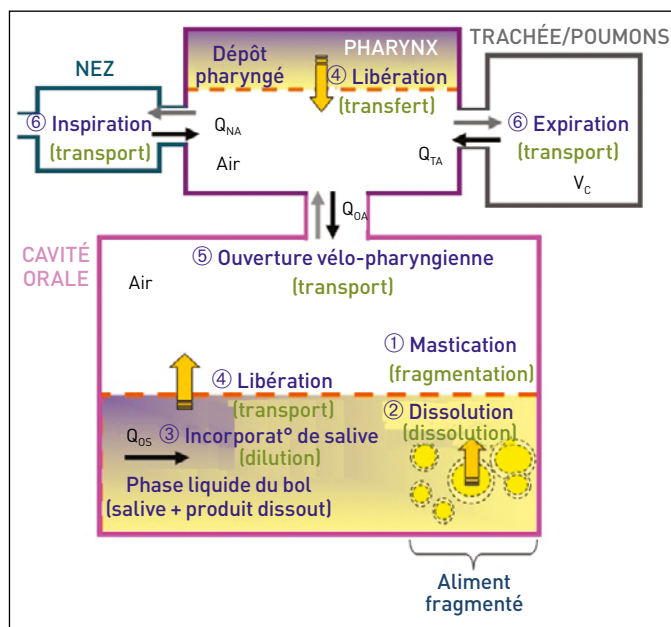


Figure 24

Schéma de principe de la modélisation mécanistique de la libération des molécules d'arôme : compartiments réactionnels, mécanismes et propriétés prises en compte. La modélisation mécanistique a pour but d'identifier les étapes limitantes et de découpler les différents facteurs (aliment, individu et leurs interactions).

transferts, les propriétés des molécules, les propriétés physico-chimiques de l'aliment, mais également les paramètres physiologiques de l'individu qui consomme le produit (volumes, quantité de salive de chaque individu), on peut *modéliser et prédire la libération des molécules d'arôme*.

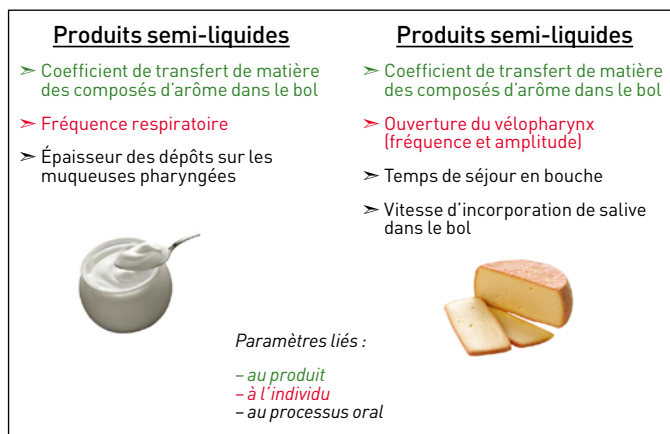
Ces modèles prennent ainsi en compte : (1) les propriétés de mobilité des solutés, que ce soit au sein du produit (diffusion) ou du procédé considéré (partage aux interfaces et transfert de matière vers une autre phase) et représentées par les coefficients de partage aux interfaces, de diffusion ou de transfert de matière ; (2) les surfaces d'échange générées entre les différentes phases considérées. Dans le cas de la consommation d'aliments, elles correspondent aux surfaces de contact entre le produit ou le bol alimentaire et l'air ou la salive, et sont définies par

le comportement mécanique du produit ou du bol lorsqu'ils sont soumis à des contraintes (cisaillement, friction, adhésion, écoulement).

Ce type de modélisation permet d'établir les étapes limitantes et de découpler les différents facteurs et paramètres qui interviennent lors de la consommation d'un produit : aliments, individus, interactions. La **Figure 25**

Figure 25

Facteurs et paramètres intervenant lors de la consommation d'un produit semi-liquide comme les yaourts, ou solides comme les fromages.



est un exemple de ce qu'on peut modéliser dans les deux systèmes très différents : les yaourts, comme exemples de produits semi-liquides, et les fromages comme exemples de produits solides. En effet dans le cas du yaourt, les rôles prépondérants de l'individu, notamment l'ouverture du vélo-pharynx, le flux d'incorporation de salive dans le bol et la durée de consommation, ont été montrés comme paramètres clés pour prédire les cinétiques de libération des molécules d'arôme.

Malgré la précision et l'intelligence des modélisations mécanistique et statistique, prédire la perception ou l'appréciation d'un produit par le consommateur demeure difficile, notamment par le fait qu'il est compliqué de modéliser et intégrer les interactions sensorielles.

4 Rôle des interactions sensorielles sur la perception d'un aliment

La consommation d'un aliment induit une stimulation simultanée de plusieurs sens et son

acceptabilité est largement déterminée par l'intégration des différentes perceptions. Ces perceptions peuvent résulter : (1) d'interactions physico-chimiques comme décrites précédemment, (2) d'interactions physiologiques (interactions entre les composés d'arôme et les récepteurs olfactifs) et (3) d'interactions au niveau cognitif (interactions se manifestant lors du traitement de l'information dans les différentes parties du système nerveux central). Ces dernières, dites interactions sensorielles, ne peuvent pas être mesurées instrumentalement car elles sont dépendantes de chaque individu, de sa culture, de ses connaissances. Pour illustrer ces interactions sensorielles, prenons l'exemple de la vision. La mesure instrumentale n'est pas le reflet exact de la perception par notre cerveau ; la vision elle-même peut nous tromper, comme le montre la **Figure 26**, qui montre que l'on peut avoir l'impression que ces rouleaux tournent si on les regarde rapidement.

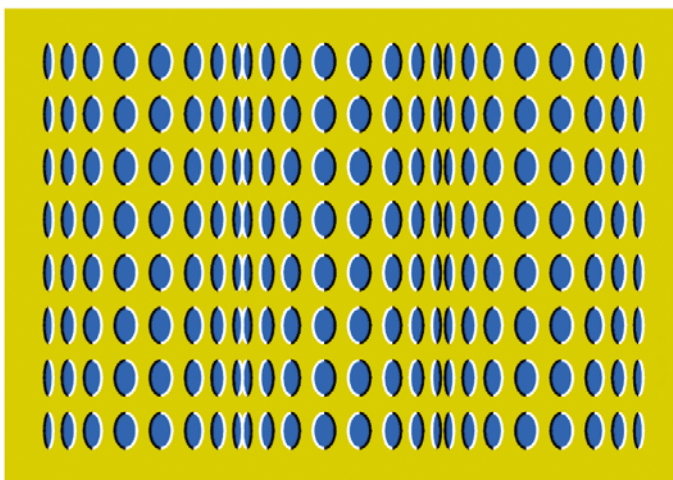


Figure 26

La vision peut nous tromper.

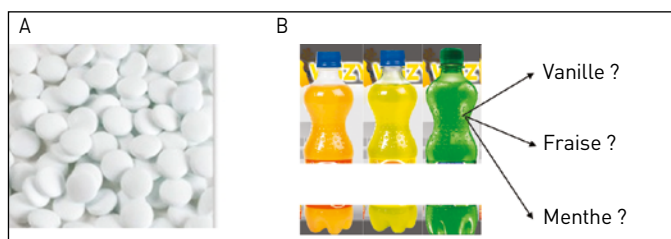


Figure 27

Les produits non colorés sont incorrectement identifiés.

Les interactions sensorielles font l'objet de nombreuses publications et revues, qui traitent d'interactions saveur-saveur, arôme-saveur, couleur-arôme, texture-saveur et texture-arôme.

4.1. Influence de la couleur sur la perception olfactive

La perception odorante de produits non colorés est fréquemment incorrectement identifiée. Si on distribue des bonbons blancs à des consommateurs et qu'on demande d'identifier l'arôme, on obtient une diversité de réponses impressionnante, alors que ce n'est pas le cas avec des bonbons colorés (Figure 27A).

Une petite expérience est reportée sur la Figure 27B : on met dans une boisson verte une odeur de vanille, une odeur de fraise ou une odeur de menthe et on demande à des consommateurs d'identifier la perception aromatique.

La confusion des odeurs perçues est alors fréquente.

Une autre étude permet d'illustrer l'impact de la couleur sur la perception. Dans le cadre de la dégustation d'un vin, il a été montré que la perception de ses qualités olfactives est largement influencée par le contexte. Comme le prouve l'expérience de Morrot, un panel de juges largement sensibilisés (étudiants en œnologie) peut être induit en erreur par sa vision lors de la description de vin blanc coloré en rouge (Figure 28).

4.2. Les arômes modifient les perceptions sensorielles de textures et de saveurs

À l'inverse, la perception de texture peut également être modulée par la perception d'arômes. Afin de comprendre le rôle de la perception aromatique (nature et complexité) sur les perceptions de texture, une étude sur du yaourt

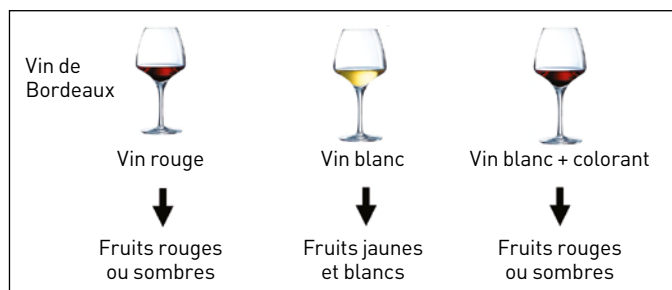
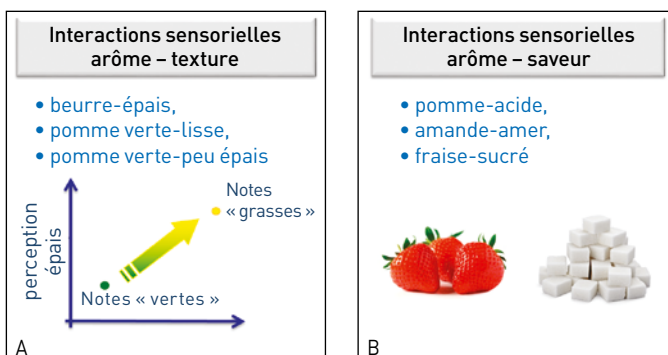


Figure 28

L'expérience de Morrot : la coloration du vin peut induire en erreur !

Figure 29

Interactions sensorielles dans des yaourts de même propriétés physiques et de même teneur en sucre. A) Arôme-texture ; B) arôme-saveur.



a mis en œuvre une stratégie consistant à utiliser une même masse blanche d'un produit (possédant les mêmes propriétés physiques), qui a ensuite été aromatisé avec six composés d'arôme différents, seuls (fraise, banane, amande, coco, beurre) et en mélange (**Figure 29**).

Les résultats ont montré qu'un yaourt aromatisé avec une note de beurre, pourtant possédant les mêmes propriétés rhéologiques, paraîtra plus épais au consommateur qu'un yaourt contenant des

notes vertes, qui semblera alors plus lisse ou moins épais (**Figure 29A**). Également, un yaourt avec des notes pomme semblera plus acide alors que le pH est strictement le même entre les produits. Si on ajoute des notes amande, il semblera plus amer, et avec des notes fraise plus sucré (**Figure 29B**).

L'explication des phénomènes de congruence est neurophysiologique. Des convergences entre les systèmes nerveux gustatif et olfactif au niveau du noyau du faisceau solitaire ont été montrées.

L'odeur, au-delà des mesures physico-chimiques

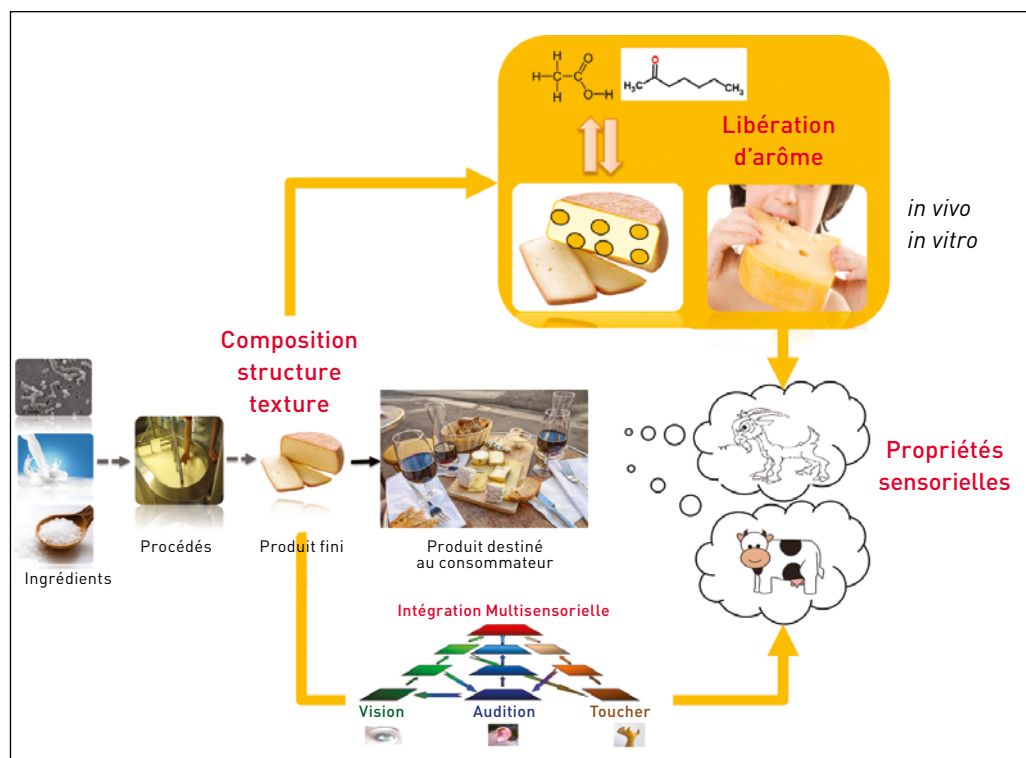
L'arôme est partie intégrante de l'aliment et de sa formulation. Les mesures sensorielles sont des outils puissants qui permettent d'évaluer notamment l'odeur des aliments. Les mesures instrumentales sont nombreuses, seules quelques-unes ont été présentées. Ce sont des outils variés qui permettent d'identifier, de quantifier les molécules d'arôme et leur libération au sein des aliments, mais qui peuvent s'avérer insuffisantes pour rendre compte de la perception globale de l'aliment. La nécessité d'intégrer les interactions sensorielles et de

comprendre le rôle du processus oral est donc essentielle (**Figure 30**). En effet, les perceptions d'arômes ne peuvent pas être expliquées uniquement par la composition aromatique des produits, car elles dépendent également de phénomènes dynamiques résultant de la déstructuration lors du processus oral, très dépendante de chaque individu. Tenir compte des différences individuelles, pour mieux comprendre les mécanismes et propriétés clés à l'origine des perceptions, constitue donc un véritable enjeu.

Les travaux de modélisation ont tout leur sens pour comprendre les mécanismes à l'origine de la libération et donc de la perception, et ainsi tendre vers une formulation raisonnée des produits alimentaires, ayant des caractéristiques sensorielles en accord avec les attentes des consommateurs. Pour autant, à l'heure

Figure 30

Les différentes étapes de la compréhension de la perception sensorielle d'un produit.



actuelle, il est encore difficile de les relier aux préférences des consommateurs, dépendantes d'autres facteurs, tels que, par exemple, le contexte de consommation ou la mémoire.

Pour illustrer ce dernier point, faisons référence à Marcel Proust, qui décrit la consommation d'une anodine madeleine, qui engendre une foule d'émotions et de souvenirs jusque-là enfouis : « *Et tout d'un coup le souvenir m'est apparu. [...] Et dès que j'eus reconnu le goût du morceau de madeleine trempé dans le tilleul que me donnait ma tante [...], aussitôt la vieille maison grise sur la rue, où était sa chambre, vint comme un décor de théâtre s'appliquer au petit pavillon donnant sur le jardin [...]; et avec la maison, la ville, la Place où on m'envoyait avant déjeuner, les rues où j'allais faire des courses depuis le matin jusqu'au soir et par tous les temps, les chemins qu'on prenait si le temps était beau* ». Marcel Proust, *Du côté de chez Swann* (1913). À la recherche du temps perdu.