



HAL
open science

Des outils mathématiques pour comprendre et prédire l'impact de la structure des aliments et de la physiologie des individus, sur la libération des stimuli responsables des propriétés sensorielles et sur la digestion

Isabelle Souchon, Isabelle Deleris, Anne Saint-Eve Delbos, Steven Le Feunteun, Maud Panouille, Clément de Loubens de Verdalle, Marion Doyennette, Ioan-Cristian Trelea

► To cite this version:

Isabelle Souchon, Isabelle Deleris, Anne Saint-Eve Delbos, Steven Le Feunteun, Maud Panouille, et al.. Des outils mathématiques pour comprendre et prédire l'impact de la structure des aliments et de la physiologie des individus, sur la libération des stimuli responsables des propriétés sensorielles et sur la digestion. “ Comprendre et utiliser la structure des aliments pour améliorer leurs qualités nutritionnelles et sensorielles ”, May 2014, Rennes, France. pp.43-55. hal-01195483

HAL Id: hal-01195483

<https://hal.science/hal-01195483>

Submitted on 27 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Des outils mathématiques pour comprendre et prédire l'impact de la structure des aliments et de la physiologie des individus, sur la libération des stimuli responsables des propriétés sensorielles et sur la digestion

Souchon I., Délérís I., Saint-Eve A., Le Feunteun S., Panouillé M., De Loubens C., Doyennette M., Tréléa C.

UMR782 GMPA, INRA AgroParisTech, F-78850 Thiverval Grignon

Correspondance : souchon@grignon.inra.fr

Résumé

La conception d'aliments, en tant que vecteurs intelligents de molécules cibles responsables aussi bien de propriétés sensorielles que nutritionnelles correspond à un enjeu majeur pour l'industrie alimentaire. Il s'agit de proposer des aliments avec des teneurs réduite en sel, sucre ou matière grasse, ou bien enrichis en fibres ou protéines, et ceci en intégrant les besoins spécifiques des populations (enfants, sportifs, personnes âgées ou en surpoids ...). Le tube digestif, de la bouche jusqu'à l'intestin, peut être considéré comme un formidable réacteur multi étagé, compact et parfaitement adaptable. Au cours de ce processus, la structure et donc les caractéristiques physiques du bol alimentaire, ainsi que les caractéristiques de l'individu qui consomme l'aliment impactent les cinétiques de digestion et influencent les régulations physiologiques associées à la santé et au bien-être de l'Homme. La modélisation mathématique des réactions et transferts dans le tube digestif constitue une approche originale et puissante, car elle permet de découpler les phénomènes liés à la structure et la composition de l'aliment d'une part et à l'individu d'autre part. Elle constitue ainsi une base pour construire des outils d'aide à la formulation. Des approches couplant mesures *in vitro* et *in vivo* associées à des développements *in silico* sont illustrées au travers de trois exemples sur des produits laitiers de différentes structures et compositions (gels laitiers modèles, yaourts et fromages), et ceci afin de prédire la perception salée, la perception d'arômes et enfin la digestion de protéines.

Mots-clés : arôme, sel, protéines, gels laitiers, transfert, perception, modélisation

Abstract: **Mathematical tools to understand and predict the impact of food structure and physiology of individuals, on the release of stimuli responsible for sensory properties and on digestion**

The design of food, as smart vectors of target molecules responsible for both sensory and nutritional properties, is a major challenge for the food industry. The aim is to provide good and healthy foods, based on the specific needs of populations (children, athletes, elderly or overweight people). The digestive tract, from the mouth to the intestine, can be considered as a multistep reactor, compact and perfectly adaptable. During this process, i) the structure and therefore the physical characteristics of the bolus, and ii) the physiological characteristics of the individual impact the kinetics of digestion and influence the physiological control related to health and well-being. Mathematical modeling of transfers and reactions in the digestive tract is an original and powerful approach. It allows the decoupling of mechanisms linked to the structure and composition of the food on the one hand and to the physiology of individual on the other hand. It thus provides a basis for building tools to help in the food designing. This approach, coupling *in vitro* and *in vivo* experiments and *in silico* developments, is illustrated through three examples based on dairy products of different composition and structures (model gels, cheeses, yogurts) in order to predict the flavour perception (salt and aroma) and the digestion of proteins.

Keywords: aroma, salt, protein, dairy gels, transfer, perception, modeling

Introduction

Comment concilier alimentation-plaisir et alimentation-santé ? C'est la question à laquelle tentent de répondre les acteurs de l'industrie et de la recherche dans le domaine agro-alimentaire, tout en observant le constat suivant : i) les "produits sains" sont en général moins appréciés - et donc moins consommés que les "produits plaisir" ; ii) les "produits plaisir" semblent être consommés en grande quantité par la population, mais ils présentent de profils nutritionnels déséquilibrés.

Afin de rester compétitifs, les industriels de l'agroalimentaire doivent développer une offre alimentaire adaptée aux changements démographiques (augmentation des seniors et des personnes en surpoids et obèses), tout en respectant les politiques de santé publique. Ils doivent donc : i) formuler des produits équilibrés en termes d'apports nutritionnels (réduction de la teneur en sel, en sucre ou en matière grasse), et ii) concevoir des aliments répondant aux besoins spécifiques de certaines catégories de personnes. Par ailleurs, pour que les nouveaux produits formulés soient acceptés par les consommateurs, ils doivent répondre à un critère essentiel de "goût" et être avant tout appréciés pour leurs propriétés sensorielles (Credoc, 2011).

La formulation de tels aliments est complexe. Elle induit des étapes longues et coûteuses car elle s'appuie trop souvent sur des démarches empiriques. De nos jours, la modélisation tend à devenir un outil incontournable dans un grand nombre de domaines, car c'est un moyen puissant pour intégrer et formaliser les quantités croissantes de connaissances et de données. En découplant les différents mécanismes, la modélisation du devenir de l'aliment dans l'ensemble du tube digestif est une démarche qui vise à la fois une meilleure compréhension des parts relatives de l'individu, du produit et de leur interaction au cours des processus oraux et digestifs, mais aussi une capitalisation des connaissances qui doit permettre la construction d'outils d'aide à la formulation. En partant de gels laitiers de différentes structures et compositions (teneur en matière grasse, structuration du gel) nous proposons d'illustrer les travaux de modélisation visant l'étude des processus oral et digestif et plus spécifiquement le rôle de la structure de la matrice alimentaire sur les cinétiques de mise à disposition à l'organisme de molécules cibles (composés de la flaveur ou nutriments). Ces derniers réalisés au sein de l'UMR GMFA, s'appuient sur des approches couplant des expérimentations *in vitro*, mais également *in vivo*.

1. Prédiction de la libération et de la perception du sel en bouche

1.1 Objectifs de l'étude

Le sel ou chlorure de sodium, est un ingrédient clé, largement impliqué dans la structuration et déstructuration des produits laitiers. Il joue un rôle fondamental dans la qualité organoleptique des aliments, que ce soit en termes de texture, de saveur mais également d'arômes (Saint-Eve *et al.*, 2010). Consommé de façon excessive, le sel agit comme facteur de développement des maladies cardiovasculaires. C'est pourquoi les autorités sanitaires, comme l'Organisation mondiale de la Santé, militent pour une réduction de sa teneur dans les aliments de manière à atteindre la recommandation nutritionnelle fixée aujourd'hui à 5 g/jour soit deux à trois fois moins que la consommation quotidienne moyenne actuelle de certains pays développés dont la France.

Réduire la teneur en sel des aliments sans en altérer les propriétés organoleptiques et technologiques est, à ce jour, un enjeu majeur pour le secteur de l'agroalimentaire et de la recherche.

Des produits contenant la même teneur en sel sont pourtant perçus différemment salés. En effet, pour être perçu le sel doit être libéré dans la salive au cours du processus oral, pour atteindre les récepteurs localisés sur la langue.

Cette libération qui dépend à la fois de la structure du produit mais également de l'individu, induit des différences de perception également modulées par des interactions sensorielles en particulier entre perception salée et perception d'arôme (Saint-Eve *et al.*, 2009 ; Lawrence *et al.* 2009).

Au cours du processus oral, la surface de contact entre le produit et la salive, générée soit par la compression du produit entre langue et palais, soit par la mastication est un facteur clé expliquant la libération des stimuli. Cette surface d'échange dépend à la fois des propriétés de déstructuration du produit mais aussi de l'individu. Afin de mieux comprendre les liens entre libération du sel et perception salée, il est essentiel d'identifier les parts respectives liées au produit d'une part et à l'individu d'autre part, expliquant la libération et la perception du sel en bouche, afin de proposer des stratégies raisonnées de réduction de la teneur en sel des aliments.

1.2 Les produits de l'étude : des gels laitiers de composition et structure différentes mais de même teneur en sel

Afin d'analyser la libération et la perception du sel, quatre gels laitiers modèles ont été étudiés. Ils varient par leur teneur en protéines (150 ou 250 g/kg) et leur teneur en matière grasse (0 ou 40 g de matière grasse laitière anhydre pour 100g d'extrait sec). Les 4 gels avaient la même teneur en sodium (1%).

1.2.1 Propriétés mécaniques des gels laitiers

Les 4 gels laitiers offrent des propriétés mécaniques différentes (Figure 1). Les gels les plus fermes sont ceux avec une teneur élevée en protéines (250 g/kg). La présence de matière grasse induit une diminution de la force à la rupture du gel en particulier lorsque celui-ci a une teneur élevée en protéines.

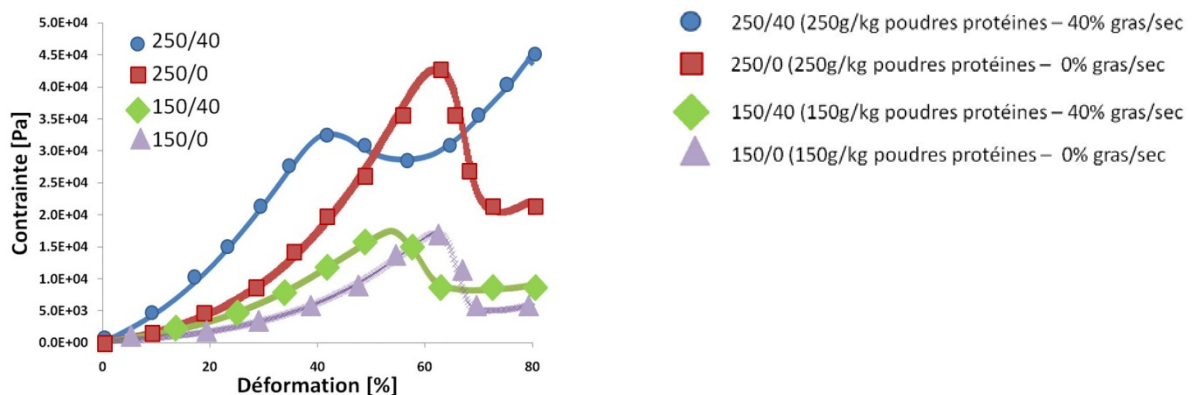


Figure 1 : Courbes contrainte-déformation pour les 4 gels laitiers de l'étude

1.2.2 Libération du sel et perception sensorielles des gels

La libération du sel en bouche ainsi que la perception du sel et de la texture des produits ont été déterminées expérimentalement par un panel de 16 individus. Ces analyses montrent que les produits présentaient des dynamiques de libération et de perception du sel et de texture très différentes. La Figure 2 illustre l'évolution de la perception salée des produits au cours de la consommation. Les produits avec une teneur en protéine faible induisent une perception salée plus rapide pour une même concentration en matière grasse. Quelle que soit la teneur en protéine, l'augmentation de la teneur en matière grasse induit une augmentation de la perception salée.

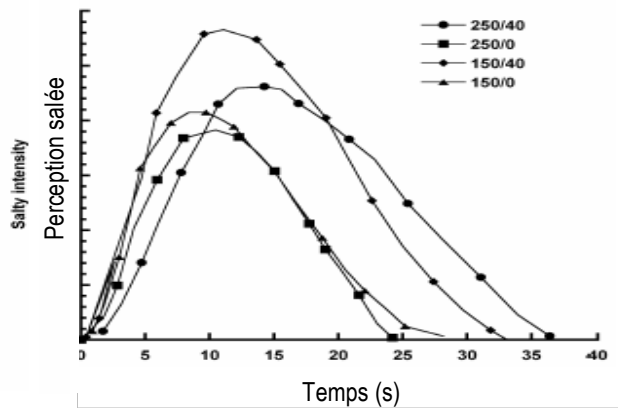


Figure 2 : Courbes moyennes (16 juges) du profil temps-Intensité de la perception salée pour les 4 gels laitiers

La libération du sel en bouche a été suivi par prélèvement de la salive des individus avec du papier filtre suivi d'un dosage par sondes conductimétriques (de Loubens *et al.*, 2011). Une bonne adéquation entre courbes de libération et courbes de perception a été observée. Nous avons montré en particulier, que plus la vitesse initiale de libération du sel est élevée, plus l'intensité maximale de la perception salée est grande (Figure 3).

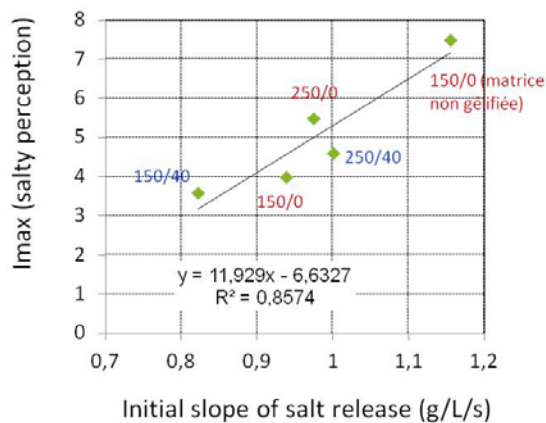


Figure 3 : Relation entre intensité maximale de la perception salée et vitesse de libération du sel en bouche

1.3 Déstructuration du gel et génération des surfaces d'échange entre produit et salive

Afin de déterminer les origines physiques des différences de libération et perception entre les produits, l'influence des propriétés de déstructuration des produits sur la libération du sel a été étudiée. Tout d'abord, un système expérimental a été utilisé afin de mesurer la cinétique de libération du sel de ces produits dans de l'eau -simulant la salive- après une compression standardisée -simulant la mastication- indépendamment de la variabilité inter- et intra- individuelle (Figure 4).

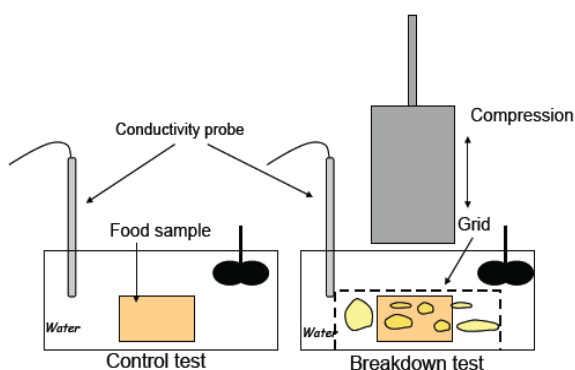


Figure 4 : Système expérimental pour le suivi cinétique de libération du sel dans de l'eau -simulant la salive- après une compression standardisée.

Afin de simuler les courbes de libération *in vitro*, un modèle mathématique basé sur la théorie interfaciale des transferts de matière a été validé et a permis d'identifier par ajustement, les surfaces d'échanges générées après une compression (Figure 5). Ainsi, la présence de matière grasse dans les gels, induit une augmentation très significative de la surface d'échange générée entre le produit et la salive et ceci quelle que soit la teneur en protéines des gels. Une co-localisation de la matière grasse au sein du réseau protéique observée en microscopie confocale explique ce comportement des gels lors de leur déstructuration mécanique.

Les surfaces d'échange identifiées à partir du modèle ont été également validées par analyse d'image. L'intensité salée plus importante dans les matrices avec matière grasse, s'explique pour partie par une force motrice légèrement supérieure entre produit et salive (le sel n'est soluble que dans la phase aqueuse du gel), mais surtout par la génération des surfaces d'échange produit-salive supérieure à celles générées dans les gels sans matière grasse.

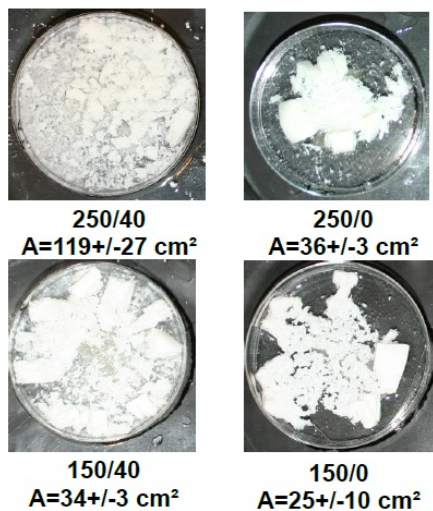


Figure 5 : Observation des 4 gels laitiers après un test de compression standardisé et identification des surfaces d'échange (A) générée entre la salive et le produit à partir du modèle mathématique.

1.4 Modélisation de la libération du sel en bouche en condition *in vivo*

Le modèle mathématique a été ensuite appliqué aux expérimentations *in vivo*. Si dans le modèle, les coefficients de transfert du sel ont pu être déterminés à partir des expérimentations *in vitro*, la surface de contact entre le produit et la salive en condition *in vivo* est un paramètre plus complexe à évaluer. Pour cela, nous avons fait l'hypothèse que la surface maximale générée en bouche était le produit de deux fonctions, l'une liée au produit (F) et l'autre à l'individu (G). L'ajustement du modèle aux données expérimentales, a permis de comprendre l'impact de chacune de ces fonctions sur la surface d'échange générée entre le produit et la salive, et la libération du sel associée. Ainsi, la fonction F, liée au produit, est inversement proportionnelle à l'énergie nécessaire à la rupture du gel (Figure 6a), alors que la fonction G associée à l'individu augmente de façon exponentielle avec l'efficacité masticatoire de l'individu (Figure 6b).

L'efficacité masticatoire est un paramètre simple et global représentant le comportement masticatoire du sujet pour un produit modèle spécifique (capacité de l'individu à fragmenter une pâte dentaire dans un temps donné). Les différences inter-individuelles pour ce paramètre sont fortes et expliquent les différences de libération entre les sujets. Son rôle sur la génération de surface est exponentiel. Par exemple, une personne ayant une efficacité masticatoire de 0,7 générera une surface 7,5 fois plus grande qu'une personne ayant une efficacité masticatoire de 0,2.

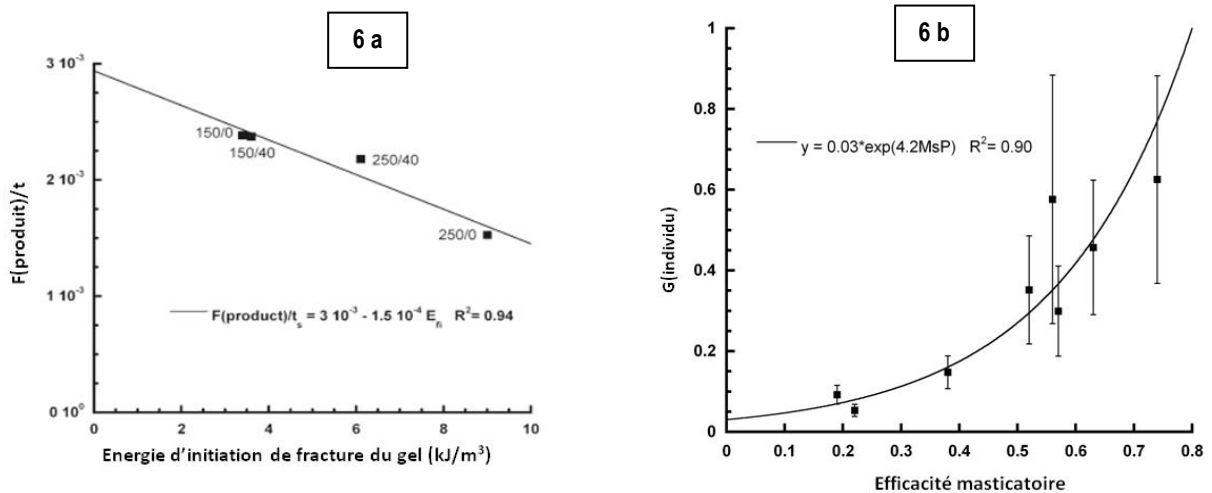


Figure 6a 6b : Relations entre les propriétés mécaniques des gels laitiers (6a) et l'efficacité masticatoire des individus (6b) et la surface d'échange générée en bouche entre produit et salive en condition *in vivo*.

Ainsi à partir d'une approche couplant expérimentations et modélisation, nous avons montré que dans le cas de gels laitiers, la part liée au produit expliquant la libération du sel en bouche, dépend des propriétés de déstructuration du gel qui peuvent être déterminées par un test de compression *in vitro* simple. Pour les gels laitiers étudiés ici, une modification de la structure du produit permet de multiplier par 1,5 la surface de contact maximale. Cependant, le rôle du produit sur la surface maximale générée *in vivo* est moins marqué que sur celle obtenue *in vitro* dans des conditions de déstructuration standardisées. En effet, l'individu adapte son comportement afin d'obtenir, pour une classe de produit donnée, un bol avec des propriétés similaires quelque soit le produit. Cette modulation se répercute en partie sur le temps de mastication, qui dépend des propriétés rhéologiques du produit. De telles observations ont déjà été rapportées dans la littérature (Boland *et al.*, 2006 ; Lauerjat *et al.*, 2009).

Le modèle mathématique développé a ainsi permis de mettre en évidence la part du produit et de l'interaction produit-individu expliquant la libération et la perception du sel des gels laitiers.

2. Prédiction de la libération de composés d'arôme en bouche en lien avec la composition et la structure de matrice alimentaire

Lors de la consommation d'un aliment, une succession de plusieurs étapes va conduire à la libération des molécules volatiles responsables des stimuli sensoriels à l'origine des perceptions olfactives. Ces molécules sont des molécules de petites tailles ($< 400\text{g/mol}$) pouvant appartenir à différentes familles chimiques. Elles ont comme propriétés communes d'être volatiles et odorantes dans des conditions normales de pression et de température. Présentes en faible concentration dans les produits alimentaires, ces molécules peuvent interagir avec les composants de la matrice alimentaire et ainsi moduler la perception sensorielle de l'aliment au cours de sa consommation.

Trois grandes étapes peuvent être identifiées pour expliquer la perception olfactive (Figure 7) :

- La libération des composés d'arôme depuis l'aliment vers la salive ou l'air de la cavité buccale ;
- Le transfert des composés d'arôme de l'espace buccal à l'espace nasal où sont présents les récepteurs olfactifs ;
- La génération d'un stimulus au niveau des récepteurs olfactifs, puis transduction et intégration de ce signal (ce qui permet la création d'une perception sensorielle).

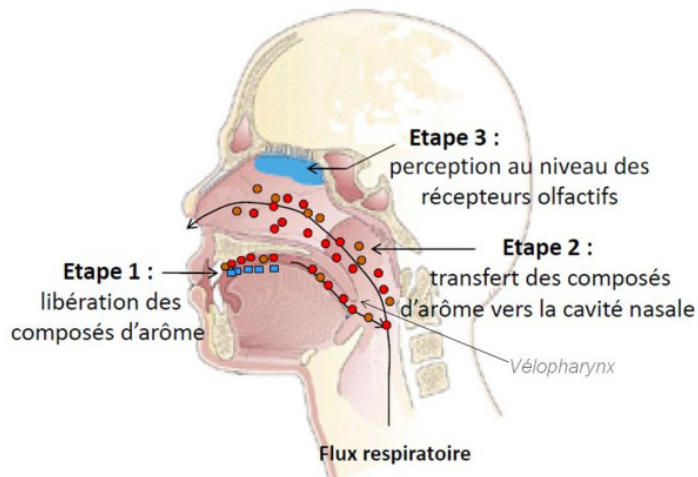


Figure 7 : Les étapes menant à la génération puis à la perception olfactive lors de la consommation d'un produit alimentaire.

La première étape de ce processus de perception olfactive a lieu lors de la manipulation intra-orale de l'aliment. Cette phase est constituée d'un ensemble de processus qui s'enchaînent et se coordonnent afin de transformer les aliments mis en bouche en un bol cohésif qui sera ensuite digéré. Son déroulement dépend de trois grands types de facteurs :

- Les facteurs liés au produit (composition, structure et propriétés rhéologiques) qui impactent la mobilité des solutés au sein du produit (propriétés de transport) et vers la salive ou la phase gazeuse (propriétés de transfert).
- Les facteurs liés à la physiologie et l'anatomie du consommateur (volumes des compartiments de la sphère oro-naso-pharyngée, flux salivaires, composition de la salive, travail masticatoire, etc.) ;
- Les paramètres liés à l'interaction produit-consommateur (adaptation du comportement masticatoire de l'individu au produit consommé, temps de séjour en bouche, hydratation par la salive, quantité et nature du dépôt de produit restant en bouche suite à la déglutition, etc.).

La complexité des mécanismes impliqués explique que l'origine des différences observées dans la perception sensorielle lors de la consommation de différentes matrices de structures variables, reste encore mal identifiée. Il est nécessaire de disposer de modèles permettant de découpler les différents mécanismes impliqués. Pour cela, deux types de produits ont été considérés : i) des produits liquides à semi-liquide qui ne sont pas mastiqués et qui présentent des temps de séjour en bouche très courts et ii) des produits solides qui sont mastiqués avant d'être déglutis.

2.1 Les produits laitiers étudiés : yaourts (produits non-mastiqués) et fromages (produits mastiqués)

Des yaourts aromatisés à la fraise de mêmes compositions mais présentant des structures de gels différentes, soit en modifiant le type de protéines ajoutées, soit en modulant le traitement mécanique ont été formulés (Saint-Eve *et al.*, 2006).

Des fromages de type "fromage fondu" présentant différents teneurs en matière grasse et différentes duretés (dur-gras (Fg), dur-maigre (FFm), mou-gras (MMg) et mou-maigre (Mm)) ont été également développés en partenariat avec les centres de recherche de Bel et Bongrain (Soredab) dans le cadre du projet SensInMouth¹. Tous les produits ont été caractérisés d'un point de vue physique et sensoriel. Ainsi les yaourts les plus liquides étaient perçus comme les plus intenses en arôme (Saint-Eve *et al.*,

¹ SensInMouth : ANR-07-PNRA-0014 (coordination E. Guichard), « Understanding and modelling the human's mouth reactor for predicting sensory perception »

2006). Les produits de type "fromage" présentaient des perceptions et des libérations dépendant du temps de séjour en bouche du produit et de sa dureté (Repoux *et al.*, 2012).

2.2 La libération des composés d'arôme dans la cavité nasale lors de la consommation des produits

Pour l'ensemble des produits, la libération des composés d'arôme a été suivie par une méthode en ligne et en temps réel permettant le suivi des molécules odorantes directement dans la cavité nasale des individus (Figure 8). Ce suivi est possible par l'utilisation de spectromètre de masse de type APCI-MS ou PTR-MS (Déléris *et al.* 2013).

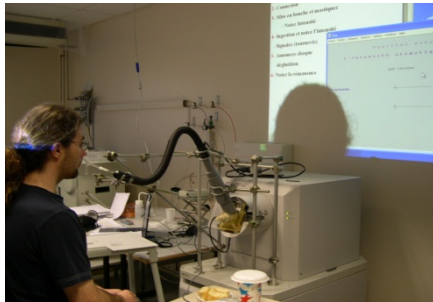


Figure 8 : Système de mesure en ligne APCI-MS¹ pour le suivi de la libération de composés d'arôme dans la cavité nasale des individus.

Même si des différences inter-individuelles sont importantes comme l'illustre la Figure 9, les variations observées sur les cinétiques de libération entre produits, sur l'ensemble du panel, restent très significatives.

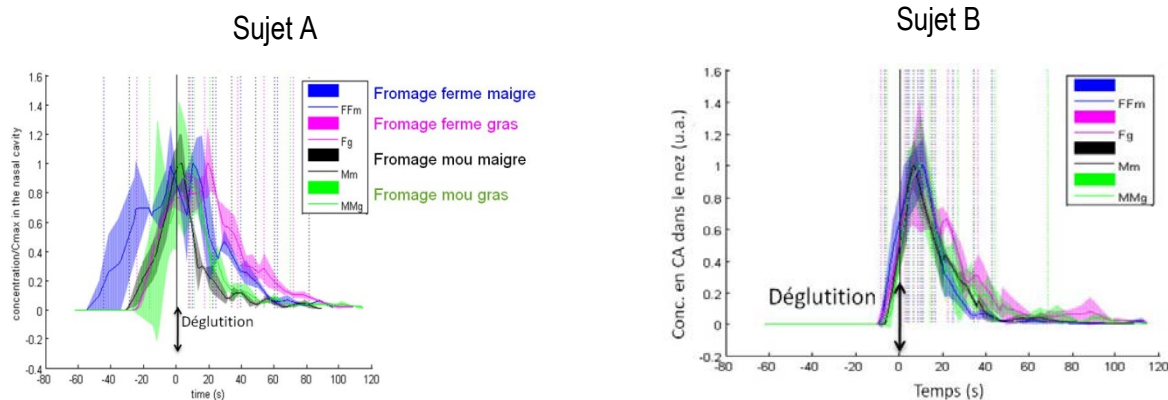


Figure 9 : Cinétiques de libération des composés d'arôme pour deux individus (A et B) consommant 4 fromages de différentes compositions et textures. Les courbes sont centrées sur la première déglutition. La courbe enveloppe de chaque courbe correspond à la répétabilité intra-individuelle du sujet.

2.3 Modèle mathématique pour la prédiction de la libération des composés d'arôme en bouche

Sur la base i) des données *in vivo* décrivant la libération de stimuli mesurée dans la cavité nasale obtenues lors de la consommation de produits de structures et compositions définies et ii) des données *in vitro* sur les mécanismes et propriétés des bols et stimuli, nous avons pu construire des modèles mathématiques permettant de prédire la libération *in vivo* des composés d'arôme dans le cas de produits laitiers non mastiqués (yaourt) ou mastiqués (fromages) (Tréléa *et al.*, 2008 ; Doyennette *et al.*, 2014).

Pour cela, la sphère oro-sensorielle a été considérée comme un ensemble de compartiments à géométrie variable, mettant en mouvement des fluides et échangeant de la matière (Figure 10). En décomposant les différentes étapes du processus oral, il a été possible de décrire pas à pas, dans chaque compartiment, les transferts de matière, en intégrant des données de physiologie (aires naso-oro-pharyngées, flux salivaires, fréquences respiratoires...), déterminées expérimentalement en collaboration avec l'UMR CSGA² de Dijon ou le CHU de Rouen ou à partir de la littérature.

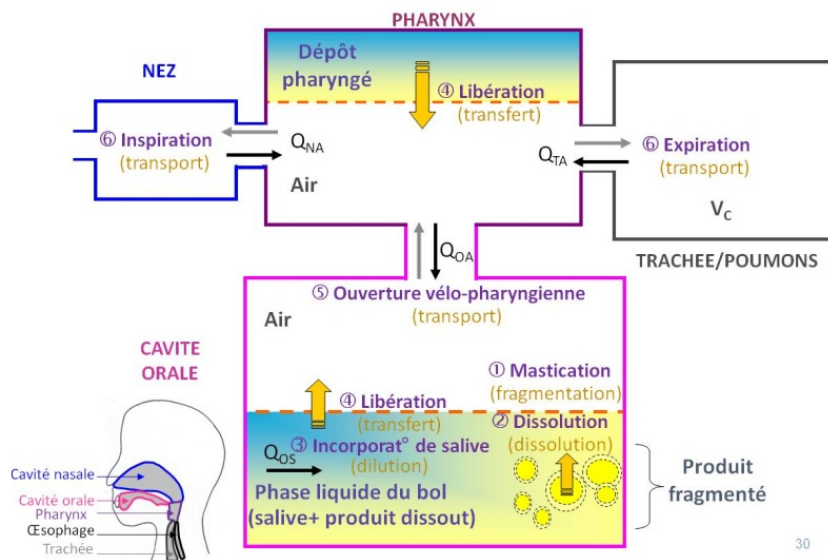


Figure 10 : Représentation schématique des différentes étapes de transfert intégrées dans le modèle mathématique

L'originalité de ce modèle repose, dans le cas des produits solides de type fromage, sur la prise en compte du phénomène de dissolution du produit dans la salive au cours de la mastication, conduisant à la formation d'un bol hétérogène. En outre, la génération d'une surface d'échange produit/fraction liquide du bol a été formalisée mathématiquement sur la base d'études menées en parallèle sur la libération du sel (de Loubens *et al.*, 2011). Le modèle prend aussi en compte l'ouverture vélopharyngienne qui a lieu au cours de la mastication du produit et qui permet le transfert de composés d'arôme vers le pharynx et la cavité nasale (Figure 7).

Une étude de sensibilité du modèle a permis d'identifier les étapes clés expliquant les transferts des stimuli entre les compartiments. Dans le cas de la consommation d'aliments non mastiqués (yaourts), les facteurs clés sont: (i) l'épaisseur du dépôt résiduel de bol sur les muqueuses, (ii) le coefficient de transfert de matière des composés d'arôme dans le bol ainsi que (iii) la fréquence respiratoire du sujet (Tréléa *et al.* 2008 ; Doyennette *et al.*, 2011). Dans le cas de produits mastiqués présentant une large gamme de composition et de texture (produits fromagés), les cinétiques de libération sont influencées par: i) le coefficient de transfert bol/air des composés d'arôme, ii) la vitesse d'hydratation du bol par la salive, iii) la durée de mastication avant déglutition, iv) l'ouverture du vélopharynx (Doyennette *et al.*, 2014).

L'ensemble des simulations ont pu être ajustées de façon satisfaisante par rapport aux données expérimentales de libération du propanoate d'éthyle *in vivo* (Figure 11). Par ailleurs, les deux paramètres inconnus du modèle (la vitesse d'incorporation moyenne de salive dans le bol et la fréquence d'ouverture du vélopharynx) ont pu être déterminés, et leur gamme de variation est similaire aux quelques valeurs que l'on trouve dans la littérature.

² CSGA : Centre des Sciences du Goût et de l'Alimentation, Dijon, UMR1324

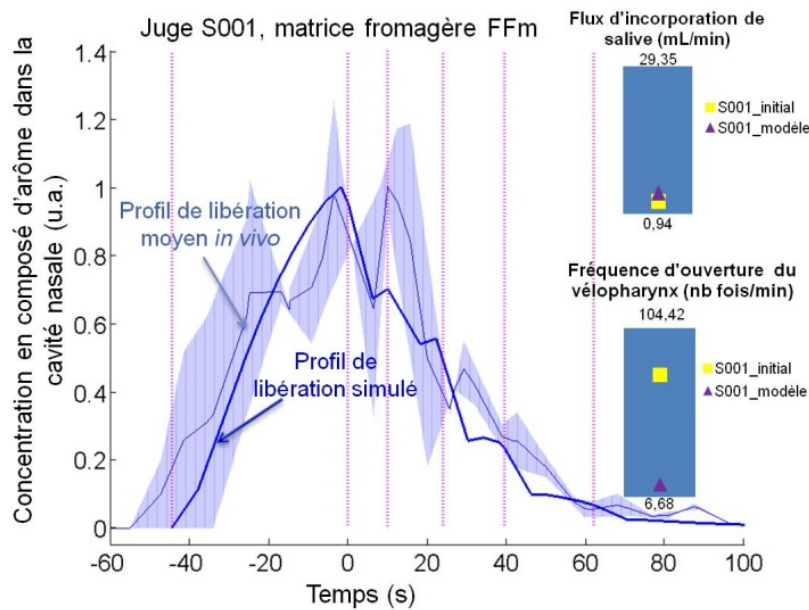


Figure 11 : Comparaison du modèle (courbe en gras) et des données expérimentales de libération.

Le modèle proposé est le premier qui intègre à la fois les propriétés de l'aliment et des paramètres physiologiques des individus pour prédire la libération de composés d'arôme dans le cas de produits de différentes structure (de liquide à solide). Il s'agit d'un outil puissant aussi bien à visée cognitive que prédictive qui constitue un socle solide de connaissances pour tendre vers la formulation raisonnée d'aliment.

3. Modélisation des cinétiques de digestion de matrices protéiques de différentes structures

Au-delà de sa composition en éléments nutritifs, il est désormais établi que la structure des aliments joue également un rôle sur leurs propriétés nutritionnelles. Dans le cas des produits laitiers, des travaux conduits en collaboration avec l'UMR STLO (Rennes) ont récemment montré que les procédés de traitement thermique et de coagulation du lait ont un impact important sur la façon dont nous digérons et assimilons les protéines lactières (Barbé *et al.*, 2013). Pour faire le tri parmi les mécanismes susceptibles d'expliquer les résultats obtenus, un modèle mathématique de la digestion des protéines qui tient compte des propriétés physico-chimiques des produits étudiés, a été développé au sein de l'UMR GMPA en collaboration avec l'unité MIA (Jouy en Josas) (Le Feunteun *et al.*, 2013).

Si les expérimentations sont incontournables pour mieux comprendre les mécanismes concourant au processus de digestion, un grand nombre de parties du système digestif ne sont pas accessibles pour des raisons éthiques évidentes. Les données expérimentales associées à la digestion sont donc souvent parcellaires ou incomplètes. Dans ce contexte, la modélisation mathématique, qui cherche à décrire le comportement d'un système par un ensemble de règles logiques à partir de la connaissance disponible et d'hypothèses raisonnables, apparaît comme un outil très complémentaire. A l'aide d'un modèle de la digestion, il devient en effet possible de tester les hypothèses d'interprétation des résultats expérimentaux, d'estimer l'influence relative des différents phénomènes en jeu, ou encore de recalculer *a posteriori* des grandeurs non observées. C'est en ce sens que la modélisation peut constituer un outil précieux pour mieux comprendre comment les aliments sont digérés.

La structure des produits laitiers (lait écrémé, gel acide, gel présure) peut grandement modifier les cinétiques de digestion des protéines chez le mini-porc, utilisé comme modèle pour la digestion humaine (Barbé *et al.* 2013). La mise à disposition des acides aminés à l'organisme est plus rapide pour un lait que pour un gel mais aussi plus rapide pour un gel acide que pour un gel présure (Figure

12). Pour identifier les mécanismes impliqués un modèle mathématique de la digestion des protéines a été élaboré.

Ce modèle phénoménologique permet d'expliquer les données expérimentales issues de mesures *in vivo* chez des mini-porcs ; données allant des concentrations en diverses espèces en sortie d'estomac aux concentrations en acides aminés dans le sang. Outre le fait qu'il soit basé sur des données *in vivo*, l'originalité du modèle réside dans la prise en considération de l'évolution structurale des aliments ingérés durant la phase stomacale (coagulation du lait dans l'environnement acide, synérèse des agrégats...). Il a permis de reproduire de manière très satisfaisante l'ensemble des résultats considérés ainsi que diverses données de la littérature (digestibilité des protéines, cinétique de transit et d'absorption dans l'intestin...) mais aussi, et surtout, d'estimer l'impact de la structure des matrices ingérées sur des paramètres non observés *in vivo*, comme les cinétiques de vidange stomacale ou les quantités de sucs gastriques sécrétés. L'approche de modélisation a de ce fait apporté un éclairage nouveau concernant l'influence des propriétés des aliments ingérés sur les processus à l'œuvre durant la digestion. Les résultats *in silico* ont en particulier montré que le comportement du bol alimentaire dans l'estomac conditionne fortement la cinétique de vidange qui elle-même gouverne largement la cinétique d'apparition des acides aminés dans le sang. Au-delà d'une aide précieuse à l'interprétation des résultats expérimentaux, le modèle élaboré nous a ainsi offert la possibilité d'établir un lien entre la structure des aliments et les cinétiques de digestion associées.

Le modèle a permis de reproduire l'ensemble des résultats expérimentaux considérés, comme l'illustre en guise d'exemple la Figure 12 pour les concentrations en acides aminés dans le sang après ingestion de trois matrices laitières différant uniquement par leur structure.

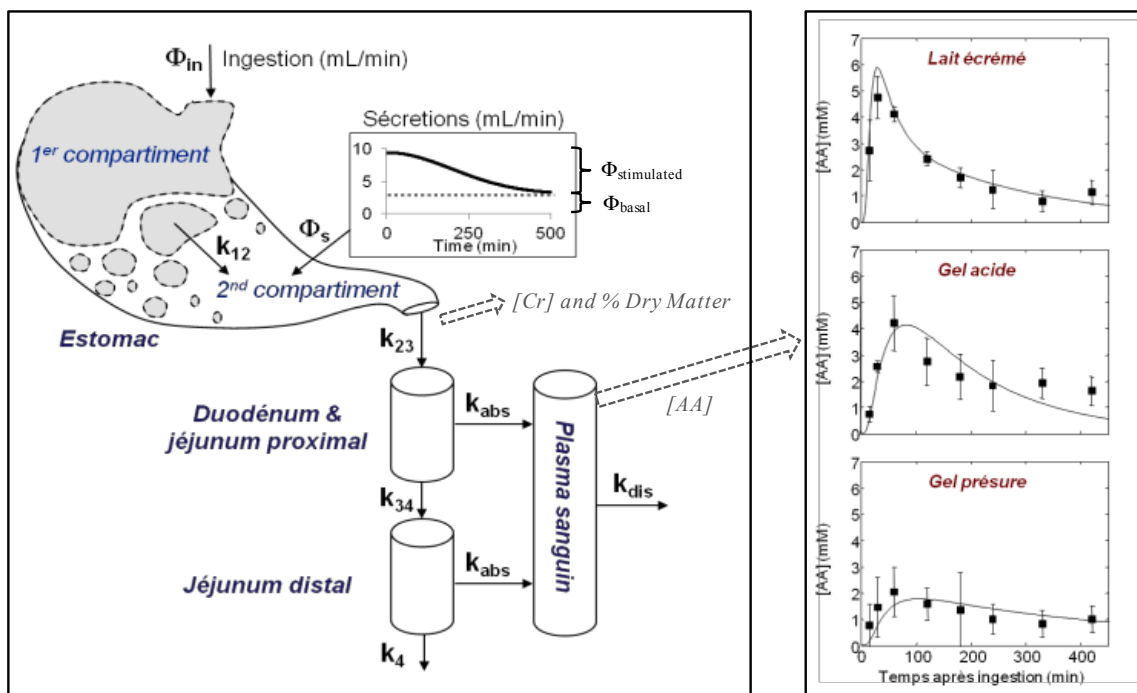


Figure 12 : Gauche: Représentation schématique du modèle mathématique. Le premier sous-compartiment stomacal contient de la matière qui n'est pas assez déstructurée pour sortir de l'estomac. Le second contient de la matière prête à être vidangée dans l'intestin et qui est diluée par les sécrétions endogènes. Droite: Ajustements du modèle (traits pleins) aux concentrations en acides aminés mesurées dans le plasma sanguin de mini-porcs pendant la digestion d'un lait écrémé (A), d'un gel acide (B) et d'un gel présure (C) de même composition chimique.

Le modèle a également été utilisé pour reconstruire des grandeurs non accessibles expérimentalement (cinétiques de vidange stomacale, quantités de sucs gastriques sécrétés...) en très bon accord avec la

connaissance disponible. Ils ont notamment mis en évidence qu'au-delà de la structure initiale des produits, c'est avant tout l'évolution de leur structure dans les conditions acides de l'estomac qui, en modifiant la vitesse de transit vers l'intestin, a d'importantes répercussions sur la cinétique d'apparition des acides aminés dans le sang.

Conclusions

Aujourd'hui, l'UMR GMPA a mis en place des outils et une démarche originale basée sur une analyse systémique d'un procédé complexe, la digestion (de la phase orale à la phase intestinale), intégrant un ensemble de cascades réactionnelles et de mécanismes physiques. La modélisation, fait partie intégrante de cette démarche. Des avancées scientifiques significatives sur la compréhension du processus oral et de la digestion, en lien avec les propriétés de l'aliment, sa perception et la physiologie des individus ont été obtenues. Elles ont permis le développement de modèles mathématiques qui pourraient, à plus long terme, apporter une aide précieuse dans l'optique de prédire comment un produit alimentaire doit être formulé pour répondre à des propriétés nutritionnelles et sensorielles ciblées (nourrissons, personnes âgées atteintes de fonte musculaire, personnes obèses ou en surpoids etc.).

Références bibliographiques

- Barbé F., Ménard O., Le Gouar Y., Buffière C., Famelart M.H., Laroche B., Le Feunteun S., Dupont D., Rémond D., 2013. The heat treatment and the gelation are strong determinants of the kinetics of milk proteins digestion and of the peripheral availability of amino acids. *Food Chemistry* 136, 1203-1212
- Boland A., Delahunty C., van Ruth S., 2006. Influence of the texture of gelatin gels and pectin gels on strawberry flavour release and perception. *Food Chemistry* 96(3), 452-460.
- CREDOC (Centre de Recherche pour l'Etude et l'Observation des Conditions de vie), 2011. Baromètre alimentaire, Ministère de l'alimentation, de l'agriculture et de la pêche.
- de Loubens C., Saint-Eve A., Déléris I., Panouillé M., Doyennette M., Tréléa I.C., Souchon I., 2011. Mechanistic model to understand in vivo salt release and perception during the consumption of dairy gels. *Journal of Agricultural Food Chemistry* 59, 2534-2542.
- de Loubens C., Panouillé M., Saint-Eve A., Déléris I., Tréléa I.C., Souchon I., 2011. Mechanistic model of in vitro salt release from model dairy gels based on standardized breakdown test stimulation mastication. *Journal of Food Engineering* 105, 161-168.
- Déléris I., Saint-Eve A., Sémon E., Guillemain H., Guichard E., Souchon I., Le Quéré J.L., 2013. Comparison of direct mass spectrometry methods for the online analysis of volatile organic compounds in foods. *Journal of Mass Spectrometry* 48, 594-607.
- Doyennette M., De Loubens C., Déléris I., Souchon I., Tréléa C., 2011. Mechanisms explaining the role of viscosity and post-deglutitive pharyngeal residue on in vivo aroma release: A combined experimental and modeling study. *Food Chemistry* 128, 380-390.
- Doyennette M., Déléris I., Féron G., Guichard E., Souchon I., Tréléa I.C., 2014. In-mouth flavor release during eating a solid food product: mechanistic modeling and experimental validation, *Journal of Theoretical Biology* 340, 209-221
- Lauverjat C., Deleris I., Trelea I.C., Salles C., Souchon I., 2009. Salt and aroma compound release in model cheeses in relation to their mobility. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 57(21), 9878-9887.
- Lawrence G., Salles C., Septier C., Busch J., Thomas-Danguin T., 2009. Odour-taste interactions: A way to enhance saltiness in low-salt content solutions. *Food. Qual. Prefer.* 20, 241-248

Le Feunteun S., Barbé F., Rémond D., Ménard O., Le Gouar Y., Dupont D., Laroche B., 2014. Impact of the dairy matrix structure on milk protein digestion kinetics: Mechanistic modelling based on mini-pig in vivo data. *Food and Bioprocess Technology* 7, 1099-1113

Panouillé M., Saint-Eve A., de Loubens C. Déléris I., Souchon I., 2011. Understanding of the influence of composition, structure and texture on salty perception in model dairy products. *Food Hydrocolloids* 25, 716-723.

Repoux M., Laboure H., Courcoux P., Andriot I., Semon E., Yven C., Feron G., Guichard E., 2012. Combined effect of cheese characteristics and food oral processing on in vivo aroma release, *Flavour and Fragrance Journal* 27(6), 414-423.

Saint-Eve A., Lauverjat C., Magnan C., Deleris I., Souchon I., 2009. Reducing salt and fat content: Impact of composition, texture and cognitive interactions on the perception of flavoured model cheeses. *Food Chemistry* 116, 167-175

Saint-Eve A., Martin N., Guillemin H., Sémon E., Guichard E., Souchon I., 2006. Flavored stirred yogurts structure affects the real-time aroma release and the temporal sensory properties during eating. *J. Agric. Food Chem.* 54, 7794-7803

Trelea I.C., Atlan S., Deleris I., Saint-Eve A., Marin M., Souchon I., 2008. Mechanistic mathematical model for in vivo aroma release during eating of semiliquid foods. *Chemical Senses* 33, 181-192.