



Caractérisation biomécanique in situ du système langue-aliment-palais par ultrasons quantitatifs pour une meilleure compréhension des perceptions de texture

Mathieu Mantelet

► To cite this version:

Mathieu Mantelet. Caractérisation biomécanique in situ du système langue-aliment-palais par ultrasons quantitatifs pour une meilleure compréhension des perceptions de texture. Ingénierie des aliments. Université Paris Saclay (COMUE), 2018. Français. NNT : 2018SACLA036 . tel-02299200

HAL Id: tel-02299200

<https://theses.hal.science/tel-02299200>

Submitted on 27 Sep 2019

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.

Caractérisation biomécanique *in situ* du système langue-aliment-palais par ultrasons quantitatifs pour une meilleure compréhension des perceptions de texture

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay
préparée à AgroParisTech (Institut des sciences et industries du vivant et de
l'environnement)

Ecole doctorale n°581 Agriculture Alimentation Biologie Environnement Santé (ABIES)
Spécialité de doctorat: Génie des Aliments

Thèse soutenue à Paris, le 13 décembre 2018, par

MATHIEU MANTELET

Composition du Jury :

Gérard Cuvelier Professeur, Agroparistech (UMR 1145 GENIAL)	Président du jury
Frédéric Pignon Directeur de Recherche, CNRS (UMR 5520 LRP)	Rapporteur
Guillaume Haïat Directeur de Recherche, CNRS (UMR 8208 MSME)	Rapporteur
Claire Gaiani Professeure, Université de Lorraine (EA 4364 LIBIO)	Examineur
Vincent Mathieu Chargé de Recherche, INRA (UMR 0782 GMPA)	Encadrant
Isabelle Souchon Directrice de Recherche, INRA (UMR 0782 GMPA)	Directrice de thèse
Jean-Luc Gennisson Directeur de Recherche, CNRS CEA (UMR 8081 IR4M)	Invité
Frédéric Restagno Chargé de Recherche, CNRS (UMR 8502 LPS)	Invité co-directeur de thèse

*« The most exciting phrase to
hear in science, the one that
heralds new discoveries, is not
'Eureka!' but 'That's funny...' »*

Isaac Asimov

Valorisations issues de ce travail de thèse

Publications

- Mathieu MANTELET, Maud PANOUILLE, François BOUE, Véronique BOSC, Frédéric RESTAGNO, Isabelle SOUCHON and Vincent MATHIEU. Impact of sol-gel transition on the ultrasonic properties of complex model foods : application to agar/gelatin gels and emulsion filled gels. [Accepté pour publication à Food Hydrocolloids](#).
- Mathieu MANTELET, Frédéric RESTAGNO, Isabelle SOUCHON and Vincent MATHIEU. Quantitative ultrasound as a new method to characterize tongue-food interface : an in vitro study on the impact of tongue roughness and lubrication. [En révision à Ultrasounds in Medicine and Biology](#).
- Mathieu MANTELET, Frédéric RESTAGNO, Isabelle SOUCHON, Vincent MATHIEU. Using Quantitative Ultrasound to monitor tongue/food interface through mechanical breakdown. [A soumettre à Ultrasounds in Medicine and Biology](#).

Communications dans des conférences internationales et nationales

- Mathieu Mantelet, Vincent Mathieu, Maud Panouillé, Frédéric Restagno, Isabelle Souchon. Using quantitative ultrasound to monitor and understand food mechanical breakdown during a compression. *Food Oral Processing, 2016, Lausanne, Suisse*. ([Poster Anglais](#)).
- Mathieu Mantelet, Maud Panouillé, François Boué, Frédéric Restagno, Isabelle Souchon, Vincent Mathieu. Impact of sol-gel transition on the acoustic properties of complex model foods : application to agar/gelatin gels and emulsion filled gels. *Acoustical Society of America, Fall 2017, New Orleans, USA*. ([Oral, Anglais](#)).
- Mathieu Mantelet, Maud Panouillé, François Boué, Frédéric Restagno, Isabelle Souchon, Vincent Mathieu. Quantitative ultrasound for the dynamic biomechanical analysis of tongue-food interface during oral processing : An in vitro study . *Acoustical Society of America, Fall 2017, New Orleans, USA*. ([Oral, Anglais](#)).
- Mathieu Mantelet, Isabelle Souchon, Maud Panouillé, François Boué, Frédéric Restagno and Vincent Mathieu. Quantitative Ultrasound for the dynamic biomechanical analysis of tongue-food interface during oral processing : an in vitro study. *Food Oral Processing, 2018, Nottingham, UK* ([Oral, Anglais](#)).

Remerciements

Ma thèse est le fruit d'un travail collaboratif riche et je me dois de remercier toutes les personnes qui y sont intervenu et qui m'ont permis d'avancer.

Je souhaite remercier Guillaume Haïat et Frédéric Pignon pour avoir accepté d'être les rapporteurs de mes travaux de thèse.

Je remercie aussi, Claire Gaiani et Gérard Cuvelier pour avoir examiné mes travaux de thèse.

Merci à Jean-Luc Gennisson pour ses conseils et ses remarques constructives.

Un grand merci à Isabelle Souchon, qui, grâce à ses conseils avisés m'a permis de me concentrer sur mes objectifs et d'améliorer le contenu de mes travaux.

Mes remerciements vont aussi à Frédéric Restagno, qui a toujours été d'une aide précieuse dans le domaine de la mécanique du contact et aussi pour rendre mes présentations plus pédagogiques.

Mes plus grands remerciements vont à Vincent Mathieu. Par ta gentillesse, ta disponibilité, ta prévoyance et ta rigueur, tu m'as permis d'effectuer ma thèse dans les meilleures conditions et avec un suivi d'une excellente qualité. Je suis vraiment reconnaissant d'avoir pu effectuer ma thèse avec toi.

Merci à Pierre Roussel et Bruce Denby pour leurs collaborations et pour nous avoir permis d'utiliser leur système d'échographie.

Merci François Boué et Véronique Bosc, pour leurs présences à mes comités de thèse et les discussions intéressantes qui en ont découlées.

Thank you to Rohit Srivastava for your precious help at the end of my PhD. I'm sure that you will do a great PhD work !

Un grand merci à Dylann Mons-Le Roux, Florent Brizard, Claire Juguet, Raphaëlle Ponthieux et Gabriel Debar pour l'excellent travail qu'ils ont pu effectuer au cours de leurs stages et pour les résultats qui en ont suivi.

Je remercie aussi David Forest pour toute son aide dans la préparation de mes expériences.

Je remercie aussi Frédéric et Jérôme de l'atelier pour toute l'aide technique qu'ils m'ont fourni et pour toutes les astuces qu'ils m'ont transmises.

Je remercie Laurence, Thierry et Evelynne du secrétariat pour m'avoir aiguillé dans ce labyrinthe administratif et pour avoir grandement simplifier mes démarches.

Je remercie Daniela, ma co-bureau, pour sa gentillesse et ses très bons conseils. Obrigado !

Je tiens aussi à remercier toutes les autres personnes que j'ai pu croiser au laboratoire et qui ont contribué à rendre mon environnement de thèse agréable : Solenne, Julie, Vincent

Monclus, Hélène, Benoît, Florence, Amélie, Audrey, Ana-Karen, Bastien, Yohann, Maria, Thomas Chabin, Valentine, Julien, Marc, Thomas Cattenoz, Anne-Cécile, Célia, Pauline, Johanna, Raphaëlle, Victor, Marco, Pierre, Nelson, Ana-Karen, Maria, Justine, et tous ceux que j'ai oublié...

Un énorme merci à mes amis "hors labo" qui ont toujours été là et pour avoir supporté avec moi cette fin de thèse. Un grand merci à : Aymeric, Laurane, Alexandre, Quentin, Margot, Mathieu S , Hugo.

Pour finir, je souhaite remercier ma famille qui a été d'un soutiens infailible. Je n'aurai pas pu arriver jusqu'ici sans vous. Je remercie plus particulièrement mes parents, Grégory et Anaïs.

Table des matières

Table des matières	i
Introduction Générale	1
1 État de l'art	5
1.1 Perceptions de texture et processus oral	7
1.1.1 Définition de la texture	7
1.1.2 La cavité orale	8
1.1.3 Le processus oral	14
1.2 Des aliments modèles pour étudier la texture	17
1.2.1 Généralités	17
1.2.2 Les gels	18
1.2.3 Les gels mixtes	18
1.2.4 Les émulsions gélifiées	21
1.3 Les méthodes sensorielles pour évaluer la texture des gels	24
1.3.1 Généralités	24
1.3.2 Techniques d'évaluations couramment utilisées pour étudier les perceptions de textures	25
1.3.3 Synthèse	26
1.4 Les méthodes instrumentales pour caractériser la texture	27
1.4.1 Séquences clés du processus oral et caractérisations instrumentales des perceptions de texture associées	28
1.4.2 Caractérisations rhéologiques	29
1.4.3 Caractérisations Tribologiques	32
1.4.4 Vers le besoin de développement de méthodes <i>in situ</i> pour caractériser le système langue-aliment-palais	34
1.5 Le potentiel des Ultrasons Quantitatifs	40
1.5.1 Généralités	40
1.5.2 Les Ultrasons Quantitatifs pour caractériser les aliments	43
1.5.3 Investigation de la cavité orale par l'échographie	45
1.6 Objectifs des travaux de thèse et démarche expérimentale	46
2 Matériels et méthodes : Développement du système expérimental	49
2.1 Présentation de la technique par US quantitatifs développée au laboratoire	50
2.2 Conception d'un dispositif biomimétique du système langue-aliment-palais	51

2.2.1	Description générale	51
2.2.2	La langue biomimétique	52
2.3	Traitement des signaux ultrasonores	58
2.3.1	Filtrage des signaux	59
2.3.2	Identification et extraction des échos	60
2.3.3	Détermination des temps d'occurrence t_0 et t_1	60
2.3.4	Détermination des amplitudes A_0 et A_1	61
2.3.5	Calcul des paramètres ultrasonores d'intérêt	62
3	Impact de la transition sol-gel sur les propriétés ultrasonores de gels modèles complexes	65
3.1	Introduction	67
3.2	Material and methods	69
3.2.1	Ingredients	69
3.2.2	Composition	69
3.2.3	Preparation of the model foods	70
3.2.4	Quantitative ultrasound method	71
3.2.5	Rheology	74
3.2.6	Density	74
3.2.7	Statistical analyses	74
3.3	Results and discussions	75
3.3.1	Characterization of products	75
3.3.2	Impact of composition and temperature on US properties	76
3.4	Conclusion	87
4	Les Ultrasons quantitatifs comme nouvelle méthode pour caractériser l'interface langue-aliment	89
4.1	Introduction	90
4.2	Material and methods	93
4.2.1	Model's food	93
4.2.2	Tongue bio-mimicking surface	94
4.2.3	Quantitative Ultrasound measurements	95
4.2.4	Statistical analysis	97
4.3	Results and discussions	97
4.3.1	Impact of tongue roughness on the ultrasound reflection coefficient	97
4.3.2	Impact of food properties on US reflectivity	100
4.3.3	Impact of tongue lubrication on US reflectivity	102
4.4	Conclusion	104
5	Utiliser les Ultrasons Quantitatifs pour suivre l'interface langue/aliment pendant la déstructuration des aliments	107
5.1	Introduction	108
5.1.1	Context	108
5.1.2	Dynamic instrumental investigation of textures perceptions	108

5.1.3	Ultrasound technic to study <i>in situ</i> and dynamically mechanical interactions at tongue/food interface through oral processing	109
5.2	Material and methods	110
5.2.1	Model foods	110
5.2.2	Tongue bio-mimicking phantoms	110
5.2.3	Compression protocol	111
5.2.4	Ultrasonic technic	112
5.3	Results and discussions	113
5.3.1	Impact of tongue roughness on US reflectivity	113
5.3.2	Impact of food properties on US reflectivity	115
5.3.3	Impact of tongue lubrication on the variation of US reflectivity	117
5.4	Conclusion	119
6	Etude <i>in vitro</i> de l'impact de la déformabilité de la langue sur la réponse ultrasonore du système langue-aliment au cours d'une compression uni-axiale	123
6.1	Introduction	124
6.2	Matériels et méthodes	125
6.2.1	Fabrication et caractérisation des langues biomimétiques	125
6.2.2	Protocole de compression langue-palais	127
6.3	Résultats et discussions	129
6.3.1	Impact de la déformabilité de la langue sur le temps de vol dans l'aliment	129
6.3.2	Sensibilité de la réflectivité ultrasonore à la rigidité de la langue	133
6.4	Conclusion	136
7	Caractérisations sensorielles de la texture des produits et liens avec les propriétés UltraSonores	139
7.1	Introduction	141
7.2	Matériels et méthodes	142
7.2.1	Fabrication et conditionnement des produits	142
7.2.2	Analyses sensorielles	143
7.2.3	Analyses statistiques	146
7.3	Résultats et discussions	147
7.3.1	Mécanismes dominants et perceptions associées au cours de la consommation des produits DTM et DTS	147
7.3.2	Caractérisation sensorielles des produits : profils de texture	151
7.3.3	Effet du temps lors du processus oral sur les intensités de texture	159
7.3.4	Confrontation des données sensorielles à la réflectivité US à l'interface PVC/produit	159
7.4	Conclusion	164
8	De la preuve de concept <i>in vitro</i> vers des applications <i>in vivo</i>	167
8.1	Introduction	168
8.2	Echographie du système langue-aliment-palais	169
8.3	Elastographie du système langue-aliment-palais	177

Conclusion Générale et perspectives	181
Références	185
Liste des figures	203
Liste des tableaux	211

Introduction Générale

Le rôle majeur de l'alimentation dans les problématiques de santé publique et dans la transition écologique doit amener à de profondes refontes au sein de l'industrie agro-alimentaire. Formuler des aliments moins gras, moins salés, moins sucrés ; proposer une offre adaptée aux besoins spécifiques (texture, nutrition) de certaines populations (du nourrisson à la personne âgée) ; réduire les apports en matières premières d'origine animale ; inclure des démarches d'écoconception dans la chaîne de production de l'aliment ; autant de défis qui nécessitent de revoir la façon de produire, de transformer, de concevoir nos aliments.

L'une des clés de la réussite de ces transformations est la maîtrise de leur impact sur les perceptions sensorielles de l'aliment nouveau. Qu'il s'agisse d'arôme, de saveur, ou de texture, les perceptions sensorielles jouent en effet un rôle important dans les choix et préférences des consommateurs. Un aliment ne peut pas se contenter d'être sain, il faut également qu'il soit bon.

Les perceptions de texture jouent un rôle singulier dans l'appréciation sensorielle d'un aliment. De nature multi-sensorielle, multi-paramétrique et dynamique, elles traduisent toutes les manifestations sensorielles liées aux propriétés physiques de l'aliment. Au cours du processus oral, les perceptions de texture évoluent pour rendre compte de la déconstruction de l'aliment et de sa transformation en un bol alimentaire prêt à être dégluti. La compréhension des mécanismes de perception de texture est ainsi liée à différents enjeux, comme identifier les déterminants (i) de l'appréciation sensorielle de la structure d'un aliment, (ii) du déclenchement de la déglutition dans des conditions à la fois sûres et confortables ou encore (iii) de la modulation de la libération des composés sapides et aromatiques de l'aliment par la structure de l'aliment.

Au cours des dernières décennies, différentes approches ont été mises en œuvre afin de faire le lien entre les mécanismes physiques de déconstruction de l'aliment et la libération des stimuli responsables des perceptions de texture. Si un certain nombre de réponses a pu être apportées, notamment par la rhéologie et la tribologie, il apparaît plus important de mettre au point des outils capables d'effectuer le suivi de la déconstruction par des approches non-invasives, *in situ* et en temps réel. Les méthodes ultrasonores présentent un potentiel intéressant pour satisfaire cet objectif.

Dans ce contexte, la question de recherche principale de cette thèse est la suivante :

« Les méthodes ultrasonores permettent-elles de caractériser, en temps réel et de façon non destructive, des mécanismes physiques à l'origine des perceptions de texture entre la langue et le palais ? »

Afin de répondre à cet objectif, ce travail s'est appuyé sur une démarche expérimentale pluridisciplinaire organisée en 3 axes de travail : i) le développement de gels modèles et leur caractérisation physique (axe disciplinaire « physico-chimie ») ii) le développement d'un système biomimétique simulant la compression entre la langue et le palais, associé à un suivi en temps réel des propriétés ultrasonores (axe disciplinaire « sciences de l'ingénieur ») et iii) l'étude des liens entre processus oral, propriétés sensorielles (texture) et propriétés ultrasonores (axe disciplinaire « sciences des aliments et analyse sensorielle »).

Ce manuscrit de thèse se décompose en sept chapitres. A travers un état de l'art, le chapitre 1 donne des éléments de contexte sur les perceptions de texture et le processus oral, sur les différentes approches expérimentales mises en œuvre jusqu'à maintenant pour les étudier, et enfin sur l'intérêt et le potentiel des méthodes ultrasonores.

Le chapitre 2 est dévolu à la description des outils expérimentaux développés au cours de la thèse. En effet, la nature exploratoire de ces travaux de thèse a conduit au développement de nombreux outils et méthodes, incluant notamment un système d'analyse ultrasonore, un montage biomimétique du système langue-aliment-palais, mais encore des méthodes de traitement du signal pour permettre le suivi en temps réel de la réponse échographique du système au cours de la déconstruction de l'aliment.

Le chapitre 3 du manuscrit, qui a fait l'objet d'une publication acceptée dans la revue Food Hydrocolloids, a pour but de comprendre l'impact de la composition, de la structure et des propriétés mécaniques de gels modèles sur leurs propriétés acoustiques. Ces gels constituent les systèmes modèles retenus pour étudier le potentiel de la méthode ultrasonore au cours de la thèse.

Le chapitre 4 s'intéresse ensuite à l'impact des propriétés de ces gels, ainsi que des propriétés de la surface d'une langue biomimétique non déformable (rugosité, lubrification) sur la réflectivité ultrasonore à l'interface langue-aliment lors de leur mise en contact. Ces travaux, qui font actuellement l'objet de révisions pour publication dans la revue Ultrasound in Medicine and Biology, montrent le potentiel de la réflectivité ultrasonore pour évaluer le contact entre la langue et l'aliment.

Après la caractérisation en condition statique du contact entre la langue et l'aliment, le chapitre 5 poursuit les développements en s'intéressant au suivi de la réponse ultrasonore du système au cours d'une compression uni-axiale mimant la compression de l'aliment entre la langue et le palais.

Enfin, la dernière phase de développement du système biomimétique a été de considérer, dans le chapitre 6, l'impact de la déformabilité de la langue. Ces travaux explorent, au-delà de la caractérisation de l'interface langue-aliment, l'évolution des taux de déformations appliqués à la langue et à l'aliment au cours d'une compression.

Le chapitre 7 de la thèse propose ensuite d'effectuer une caractérisation sensorielle des systèmes modèles et des mouvements associés au processus oral, et d'établir des liens avec les propriétés ultrasonores. Plusieurs approches ont été développées. La première a permis de mettre en relation l'évolution des perceptions sensorielles de texture et les mécanismes de déconstruction associés, confirmant le rôle important joué par la langue dans le processus oral associé aux gels modèles étudiés. La seconde a consisté à effectuer un profil sensoriel des gels, fournissant des données quantitatives sur l'intensité d'attributs de

perception de texture à différents temps de la consommation. Un protocole de consommation spécifique a été défini et imposé aux volontaires, afin de pouvoir établir des liens entre les mesures sensorielles et les données expérimentales acquises dans les chapitres précédents.

Enfin, le dernier chapitre de ce manuscrit propose une mise en relief et une projection des connaissances issues de la thèse, sous la forme de travaux préliminaires et d'ouverture réalisés sur différents outils ultrasonores et dont le potentiel d'application *in vivo* a déjà été éprouvé. Ces essais préliminaires, discutés en lien avec les données *in vitro* acquises, permettent de donner des éléments de perspective quant à la poursuite des travaux de développement de la technique, au-delà de cette thèse.

Chapitre 1

État de l'art

Sommaire

1.1 Perceptions de texture et processus oral	7
1.1.1 Définition de la texture	7
1.1.2 La cavité orale	8
1.1.2.1 Généralités	8
1.1.2.2 Les dents	9
1.1.2.3 La langue	9
1.1.2.4 La salive	11
1.1.2.5 Les mécanorécepteurs	13
1.1.3 Le processus oral	14
1.2 Des aliments modèles pour étudier la texture	17
1.2.1 Généralités	17
1.2.2 Les gels	18
1.2.3 Les gels mixtes	18
1.2.4 Les émulsions gélifiées	21
1.3 Les méthodes sensorielles pour évaluer la texture des gels	24
1.3.1 Généralités	24
1.3.2 Techniques d'évaluations couramment utilisées pour étudier les perceptions de textures	25
1.3.2.1 Le profil sensoriel	25
1.3.2.2 Les méthodes sensorielles dynamiques ou temporelles	25
1.3.3 Synthèse	26
1.4 Les méthodes instrumentales pour caractériser la texture	27
1.4.1 Séquences clés du processus oral et caractérisations instrumentales des perceptions de texture associées	28
1.4.2 Caractérisations rhéologiques	29
1.4.3 Caractérisations Tribologiques	32
1.4.4 Vers le besoin de développement de méthodes <i>in situ</i> pour caractériser le système langue-aliment-palais	34
1.5 Le potentiel des Ultrasons Quantitatifs	40
1.5.1 Généralités	40
1.5.2 Les Ultrasons Quantitatifs pour caractériser les aliments	43

1.5.3 Investigation de la cavité orale par l'échographie	45
1.6 Objectifs des travaux de thèse et démarche expérimentale	46

Sur la base d'une analyse critique de la littérature scientifique, ce chapitre a pour but de décrire le cheminement qui a conduit à l'objectif central du projet de thèse, qui est d'étudier le potentiel des méthodes ultrasonores pour caractériser, en temps réel et de façon non-invasive, des phénomènes physiques à l'origine de mécanismes de perception de texture. Ce chapitre est organisé en deux sections principales. La première vise à dresser un panorama des connaissances sur les perceptions de texture intégrant la physiologie orale et les méthodes de caractérisation, qu'elles soient sensorielles ou instrumentales. A l'issue de cette section, le constat est fait de la nécessité du développement d'outils permettant d'effectuer des suivis de déconstruction *in situ*, en temps réel et de façon non invasive, afin de mieux intégrer l'impact des variabilités physiologiques du consommateur. Ainsi, la deuxième section de ce chapitre d'état de l'art argumente le potentiel des méthodes ultrasonores pour répondre à ce défi, tout d'abord par leur capacité démontrée à explorer la cavité orale, mais également pour leur mise en œuvre reconnue pour suivre et caractériser les propriétés de l'aliment au cours de procédés de fabrication.

1.1 Perceptions de texture et processus oral

Après avoir donné des éléments de définition de la perception de texture, ainsi que du rôle tout particulier de la sphère orale dans son évaluation, les systèmes d'aliments modèles qui ont pu être conçus afin de mieux comprendre les mécanismes liés aux perceptions de texture, en particulier entre langue et palais, seront décrits. Les méthodes d'analyse sensorielle développées et appliquées à l'étude et à la caractérisation des perceptions de texture seront ensuite présentées. Elles seront complétées par un panorama et une analyse des méthodes instrumentales proposées dans la littérature pour caractériser des mécanismes de déconstruction de l'aliment durant le processus oral, et leur pertinence pour expliquer la réponse sensorielle.

1.1.1 Définition de la texture

Les perceptions de texture ont été définies en 1994 par l'Organisation Internationale de la Standardisation comme englobant « *tous les attributs mécaniques, géométriques et de surface d'un produit, perceptibles par les récepteurs mécaniques, tactiles et, lorsqu'approprié, visuels et auditifs* ». La texture est donc une propriété évaluée par la mise en œuvre des sens qu'il s'agisse du toucher, de la vue ou encore de l'ouïe.

Selon [Szczesniak \(2002\)](#), les perceptions de texture présentent quatre caractéristiques essentielles :

- Comme toutes les propriétés sensorielles, elles sont évaluées par des êtres vivants et dépendent donc de l'individu.
- Elles sont multiparamétriques, dans le sens où elles résultent de l'expression d'une multitude d'attributs qui évoluent au cours du temps.
- Elles sont également multisensorielles car si le toucher joue un rôle central, elle relève également de l'ouïe, la kinesthésie ou encore la vue, etc

- Elles découlent de la structure de l'aliment consommé (depuis l'échelle moléculaire jusqu'aux niveaux micro et macroscopiques).

Les perceptions de texture peuvent être évaluées à différentes étapes de la consommation d'un produit : tout d'abord lors de l'apparition de l'aliment dans le champ visuel du consommateur (vue), ensuite lors de sa préhension et durant toutes les étapes de transformation qui précèdent la mise en bouche (vue, toucher, ouïe, kinesthésie), et enfin tout au long du processus oral et jusqu'à la déglutition du produit (Wilkinson et al., 2000). La littérature s'accorde sur le rôle central de la phase orale dans l'évaluation des perceptions de texture (Szczesniak, 2002; Wilkinson et al., 2000).

Par ailleurs, le caractère dynamique des perceptions de texture au cours du processus oral a été mis en évidence par les travaux de Hutchings and Lillford (1988). En effet, depuis la mise en bouche et jusqu'à la déglutition, l'aliment est soumis à différents mécanismes de déconstruction (réduction de taille des particules, hydratation et hydrolyse enzymatique grâce à la salive) (Devezeaux de Lavergne et al., 2015a,b; Panouillé et al., 2014). La langue joue un rôle central dans l'évaluation des perceptions de texture liées à ces transformations. D'une part, elle permet de contribuer à l'appréciation des qualités et des défauts sensoriels des aliments par le consommateur. D'autre part, elle permet à l'individu de déterminer l'état du bol alimentaire le plus adapté afin de déclencher le processus de déglutition, dans des conditions sûres et confortables.

1.1.2 La cavité orale

Cette section de l'état de l'art a pour but de décrire (i) l'environnement général de la cavité orale, (ii) l'impact de la langue et de la salive sur la déconstruction de l'aliment, et (iii) le rôle des mécanorécepteurs situés dans les tissus mous de la cavité orale (en particulier dans la langue).

1.1.2.1 Généralités

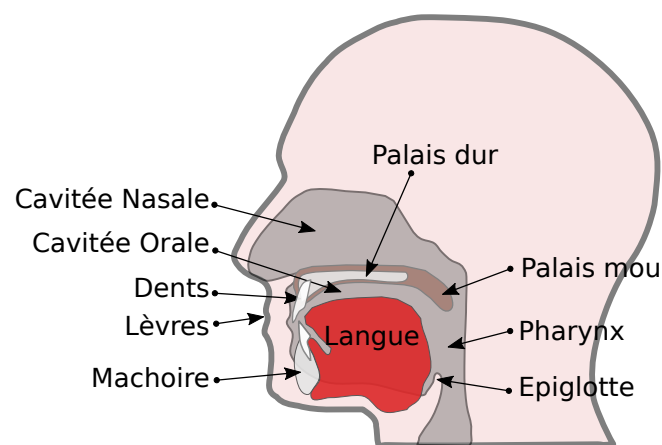


FIGURE 1.1 – Schéma de la cavité orale, adapté de Chen (2009)

La cavité orale est présentée à la Figure 1.1. Elle se situe entre les maxillaires et la mandibule, ouverte à l'avant par la fente orale (lèvres) et à l'arrière par l'isthme du gosier

(au niveau du palais mou (Velum)).

Les dents, la langue et la salive sont trois éléments « clés » du processus oral qui participent à la déconstruction de l'aliment et contribuent aux mécanismes de perception de texture.

1.1.2.2 Les dents

Les dents (32 sur un individu normal) sont les organes impliqués dans la mastication des aliments. Trois catégories de dents ont été identifiées : les incisives pour découper les aliments, les canines pour découper et déchirer, et enfin les molaires pour réduire les aliments en particules au cours de la mastication. Au-delà de leur rôle mécanique lors de la mastication de l'aliment, les dents sont également sensibles aux forces qui leur sont appliquées grâce au ligament parodontal. Elles sont par conséquent elles aussi impliquées dans l'évaluation des perceptions de texture. (Chen, 2009).

1.1.2.3 La langue

La langue est un organe majeur dans le processus oral puisque par des mouvements complexes et variés, elle permet de manipuler l'aliment et le bol alimentaire au cours du processus oral, puis d'initier la déglutition (Hiemae and Palmer, 2003). Elle peut être impliquée dans la fracturation de produits semi-solides par compression de ces derniers directement contre le palais. Elle permet aussi de collecter les particules de bol alimentaire pour les orienter vers le type de dent le plus adapté aux mécanismes de déconstruction requis par chaque aliment. Elle permet aussi la formation du bol alimentaire en mélangeant les particules avec la salive grâce à un cycle de mouvements où la langue se déplace d'avant en arrière avec des amplitudes qui dépendent des propriétés de l'aliment (Figure 1.2). Par ailleurs, la vitesse de la langue au cours de la déglutition de liquide a été évaluée en moyenne à $10.34 \pm 2.1 \text{ mm.s}^{-1}$ dans une gamme allant de 2.1 mm.s^{-1} à 32.43 mm.s^{-1} (Peng et al., 2000).

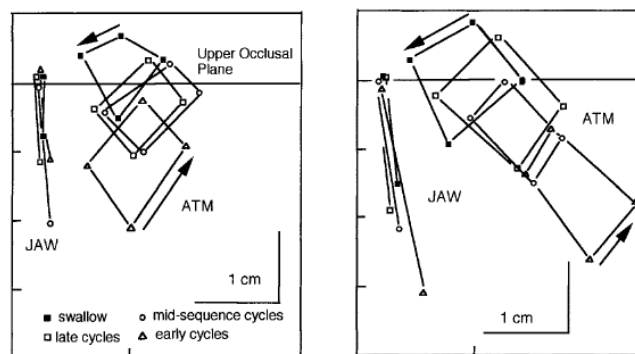


FIGURE 1.2 – Mouvement de la langue (ATM) et de la mâchoire (JAW) au cours de la consommation d'un aliment mou (à gauche) et d'un aliment dur (à droite) (Hiemae and Palmer, 2003)

Cette fonction de la langue est rendue possible par son architecture complexe. En effet, elle est composée de 8 muscles (Figure 1.3), dont quatre dits « extrinsèques » (génio-glosse, hyoglosse, stylo-glosse, palatoglosse) qui trouvent une insertion à l'extérieur du corps de la langue et 4 autres dits « intrinsèques » (vertical, transverse, supérieur longitudinal, inférieur

longitudinal), qui sont entièrement localisés à l'intérieur de l'organe (Abd-El-Malek, 1939; Gaige et al., 2007; Miller et al., 2002; Shawker et al., 1984). Ces muscles sont orientés différemment les uns des autres et travaillent en coordination pour conférer à la langue son agilité. Les « muscles extrinsèques » sont responsables du positionnement de la langue : le génioglosse permet la protrusion de la langue, l'hyoglosse est responsable de la dépression de la langue, le stylo-glosse permet le retrait et l'élévation de la langue et la palatoglosse permet le contact langue/palais. Les « muscles intrinsèques » permettent de leur côté, de modifier la forme de la langue : agrandissement/raccourcissement de la langue, courbure des extrémités de la langue et l'aplatissement ou la courbure de la surface de la langue (Chen, 2009).

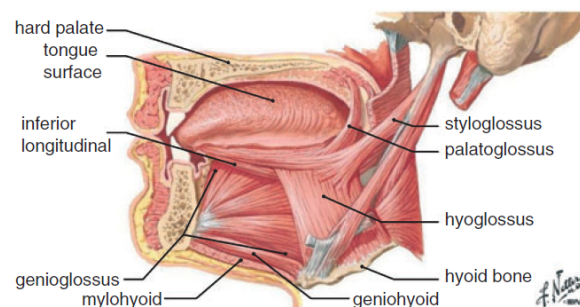


FIGURE 1.3 – Schéma de la structure de la langue adapté par Kajee et al. (2013)

Chaque muscle est composé de fibres musculaires, composants élémentaires qui lui confèrent ses capacités de contraction. Ces fibres sont rassemblées en faisceaux au sein d'un fascia dont l'ensemble forme le muscle. A partir de la connaissance de l'architecture de la langue et des muscles qui la composent, les travaux de Kajee et al. (2013) ont proposé un modèle biomécanique de la langue afin d'étudier le rôle de la contraction des muscles de la langue qui sont à l'origine de l'apnée du sommeil. Le modèle de Hill (Hill, 1938) permet de modéliser le comportement mécanique d'une fibre musculaire en une dimension. La prise en compte de l'ensemble des fibres des muscles, ainsi que des propriétés mécaniques des tissus interstitiels, permet de modéliser par éléments finis le comportement mécanique global de la langue. Bien que ce type de modélisation permette de prendre en compte la complexité de la langue, il est toutefois possible de considérer la langue comme un ensemble homogène comme dans les travaux de Ishihara et al. (2013).

La langue est un hydrostat musculaire, c'est-à-dire que son volume reste constant lorsqu'elle est contractée, ou bien lorsqu'elle est en mouvement (Napadow et al., 1999). Par contre sa rigidité évolue. Elle a été évaluée par diverses méthodes : indentation mécanique ($G=0.38 \text{ kPa}$) (Gerard et al., 2005), compression mécanique (Ishihara et al., 2013), élastographie par IRM ($G=2.67 \text{ kPa}$) (Cheng et al., 2011) et en ajustant un modèle par éléments finis à des conditions de pression exercées au niveau de la langue ($G=2 \text{ kPa}$) (Malhotra et al., 2002). Cette rigidité évolue de façon significative entre l'état « au repos » ($E=12.2 \pm 4.2 \text{ kPa}$) et l'état « contracté » ($E=122.5 \pm 58.5 \text{ kPa}$) (Ishihara et al., 2013).

La surface de la langue est recouverte d'une diversité de papilles impliquées dans la perception des saveurs, qui lui confèrent également un état de surface jouant un rôle essentiel dans l'interaction mécanique avec les aliments. On distingue quatre types de papilles répar-

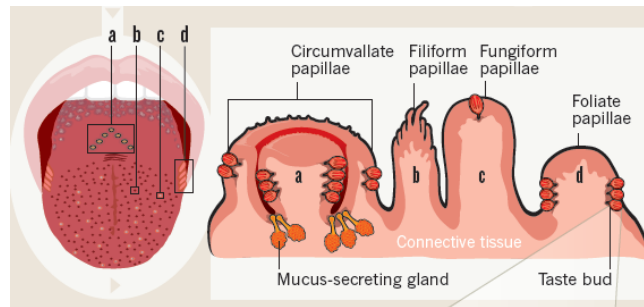


FIGURE 1.4 – Schématisation des différents types de papilles et de leur répartition sur la surface de la langue, adapté de Trivedy (2012)

ties sur la surface de la langue (Figure 1.4) : les papilles fongiformes, filiformes, caliciformes et foliées (Jung et al., 2004; Miller and Reedy, 1990; Ranc et al., 2006b; Trivedy, 2012). Douze papilles caliciformes forment un "V" à l'arrière de la langue. Les papilles fongiformes sont quant à elles disséminées sur l'ensemble de la langue, alors que les papilles filiformes, présentes en forte densité, tapissent l'ensemble de la surface de la langue et en impactent donc fortement la rugosité. Enfin, les papilles foliées se situent plutôt sur les côtés de la langue.

La rugosité de la surface de la langue a fait l'objet de plusieurs études dans la littérature. L'un des principaux paramètres de rugosité est le paramètre Ra , qui est défini par la moyenne arithmétique des écarts à la ligne moyenne du profil de surface (la ligne moyenne étant une ligne pour laquelle la surface au-dessus est par définition égale à la surface au-dessous de cette ligne). Plusieurs études rapportent des mesures d'ordres de grandeur de Ra pour la langue : 65 μm en moyenne avec un intervalle de variation compris entre 42.5 à 101.4 μm selon Uemori et al. (2012), de 10 à 100 μm pour Ranc et al. (2006b), ou encore une moyenne de 51 μm avec des valeurs extrêmes de 13.5 et 108.4 μm selon Nagaoka et al. (2001). La variabilité de la rugosité de la langue est donc forte entre les individus, et plusieurs pathologies peuvent également l'altérer.

La langue possède aussi des propriétés de mouillabilité particulières. Les travaux de Ranc et al. (2006a) ont montré que la surface de la langue de porc a des propriétés de mouillabilité différentes selon qu'elle est enduite de salive (angle de contact avec l'eau de $50.5 \pm 2.4^\circ$) ou sèche (angle de contact avec l'eau de $77.3 \pm 4.1^\circ$).

1.1.2.4 La salive

La salive est un composant essentiel de la cavité orale. Elle assure cinq principales fonctions : (1) un rôle de lubrification et de protection, (2) un rôle de tampon chimique et de nettoyage, (3) la participation au maintien de l'intégrité des dents, (4) une activité antibactérienne et (5) un rôle dans la perception du goût (Humphrey and Williamson, 2001). Une attention particulière sera portée ici aux connaissances portant sur le rôle lubrifiant de la salive puisqu'il impacte directement les propriétés interfaciales et les perceptions des textures.

La salive est sécrétée par 5 paires de glandes salivaires majeures réparties dans la cavité orale (Figure 1.5) : les glandes sublinguales situées en dessous de la langue, les glandes submandibulaires localisées à la base sur l'avant et les côtés de la langue et les

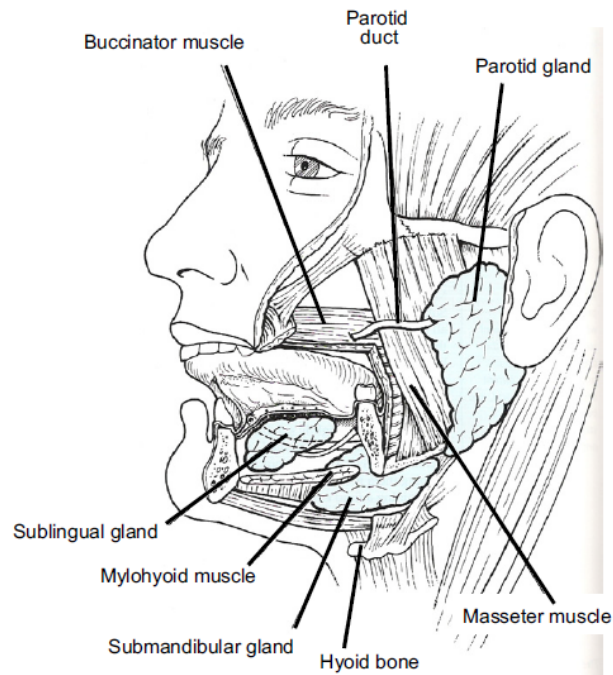


FIGURE 1.5 – Répartition des glandes salivaires dans la cavité orale (Chen, 2009)

glandes parotides situées au niveau des premières molaires supérieures. Des glandes mineures qui tapissent la surface de la cavité produisent également de la salive et participent à la lubrification des surfaces orales. La production de salive est variable suivant le moment de la journée et selon les stimulations mécaniques ou chimiques subies par la cavité orale (Humphrey and Williamson (2001)).

Une salive extraite au repos (sans stimulation préalable et en dehors des heures habituelles de repas) est majoritairement composée d'eau à 99%. Cependant, contrairement à l'eau, la salive est un fluide complexe : non Newtonien, rhéofluidifiant et viscoélastique. Elle doit ces propriétés au reste de ses composants (glycoprotéines, électrolytes, protéines, sucres, bactéries, enzymes) qui jouent un rôle capital pour lui permettre d'assurer les fonctions citées plus haut. Les mucines de la salive, qui sont des protéines complexes, lui donnent en particulier son caractère lubrifiant (diminution de la friction bol alimentaire/muqueuse) (Bongaerts et al., 2007; Humphrey and Williamson, 2001; van der Reijden et al., 1993). Leur particularité est de pouvoir interagir avec les muqueuses orales pour pouvoir former des couches adhésives et améliorer la lubrification des surfaces (Macakova et al., 2010). De plus, les autres protéines et l' α -amylase présentes dans la salive peuvent également interagir avec les composés de l'aliment, en participant à sa déconstruction, et donc en altérant les perceptions de textures. Par exemple, l'interaction entre des protéines issues de la salive (mucoprotéines) et certains constituants tels que les polyphénols ou encore les β -lactoglobulines peuvent donner lieu à une perception d'astringence expliquée par la précipitation des protéines salivaires (Guinard and Mazzucchelli, 1996; Rosseti et al., 2009; Vardhanbuthi et al., 2011). L'interaction entre l' α -amylase (qui permet l'hydrolyse enzymatique de l'amidon) et l'aliment a un impact sur la perception de fondant ou d'épais pour des émulsions gélifiées (Engelen et al., 2003). De plus, les travaux de Dresselhuis et al. (2008b) ont permis de montrer que l'enduction de la langue par la salive permettait d'augmenter la

rétenion de la matière grasse et pouvait induire une floculation des gouttelettes de matière grasse dans une émulsion.

L'épaisseur du film salivaire varie fortement entre les différentes muqueuses orales. L'épaisseur de salive sur la surface de la langue a été estimée entre 60 et 100 μm (Collins and Dawes, 1987; Watanabe and Dawes, 1990). Une étude récente (Pramanik et al., 2018) a réussi à évaluer l'épaisseur de salive à la surface de la langue en mesurant à l'aide d'un papier filtre absorbant la quantité de salive présente sur une surface connue. Ils ont déterminé une épaisseur moyenne de 54 μm de salive sur la langue de personnes saines.

Par ailleurs, le rôle de la salive est mis en exergue chez des patients souffrant de troubles de la salivation (xérostomie) et qui produisent une quantité moins importante de salive provoquant l'assèchement des muqueuses orales. La réduction de la quantité de salive a pour conséquence de réduire la formation et l'hydratation du bol alimentaire réduisant le plaisir de la consommation et provoquant des troubles de la déglutition (Mese and Matsuo, 2007). La salive est donc un élément important de la cavité orale à prendre en compte pour étudier les perceptions de texture.

1.1.2.5 Les mécanorécepteurs

La cavité orale comprend de nombreux récepteurs sensoriels qui permettent notamment d'évaluer le goût via les récepteurs chimiques à la surface des papilles (présentes sur la langue), ou encore les perceptions de texture via les mécanorécepteurs. Ces derniers, répartis sur l'ensemble des tissus mous de la cavité orale (les gencives, le palais, le ligament parodontal, et bien sûr la langue) (Jacobs et al., 2002), ont pour objectif de traduire les stimuli mécaniques induits par le toucher (pression, vibrations) et la proprioception (Bukowska et al., 2010; Haggard and de Boer, 2014; Johansson et al., 1988) en perceptions sensorielles.

On distingue 3 types de mécanorécepteurs dans les tissus de la cavité orale (Foegeding et al., 2015) :

- La terminaison nerveuse de Merkel, située à la base interne de l'épiderme, permettant de détecter l'application d'une pression sur le tissu biologique.
- Le corpuscule de Ruffini, encapsulé dans une structure ovoïdale hautement fibreuse, permettant de détecter l'application de la tension des tissus.
- Le corpuscule de Meissner, correspondant à l'empilement de cellules plates juste en dessous de l'épiderme, responsable de la détection d'un toucher léger et de vibrations jusqu'à une fréquence de 50 Hz.

La présence de mécanorécepteurs de type corpuscules de Pacinian est également mentionné mais reste controversée (Haggard and de Boer, 2014).

Ces mécanorécepteurs des muqueuses de la cavité orale se caractérisent par des mécanismes d'adaptation différents : (i) les mécanorécepteurs à adaptation lente composés du type SAI (terminaison nerveuse de Merkel) et SAII (corpuscule de Ruffini) et (ii) les mécanorécepteurs à adaptations rapide RAI (corpuscule de Meissner) (Johansson et al., 1988; Trulsson and Essick, 1997; Trulsson and Johansson, 2002). Les mécanorécepteurs présents sur la langue sont répartis sur différentes profondeurs de la peau (Figure 1.6). La catégorie

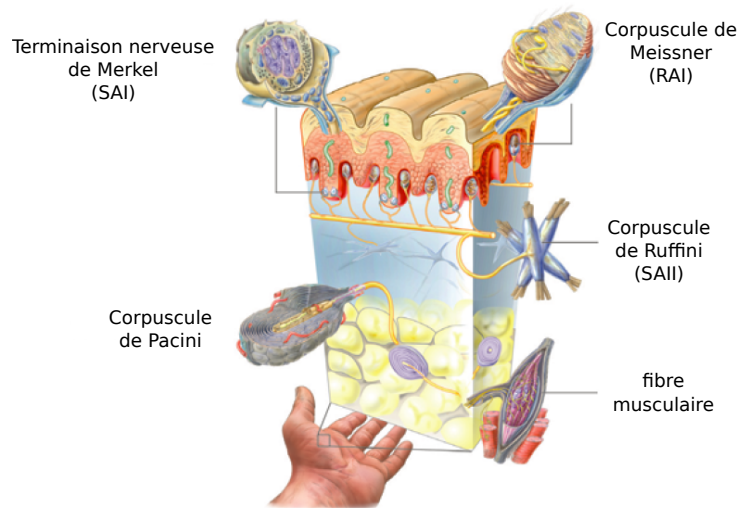


FIGURE 1.6 – Représentation de la position des mécanorécepteurs dans l'épaisseur de la peau de la main, adapté de Halata and Baumann (2008).

RAI est placée en surface et est relative au sens du toucher, alors que les catégories SAI et SAII sont placées en profondeur de la langue et sont relatives aux perceptions de proprioceptions (Foegeding et al., 2015; Haggard and de Boer, 2014). Il faut noter qu'il n'existe pas de récepteurs spécifiques à une perception de texture donnée, et que l'intégration dans le temps par le cerveau de l'ensemble des stimuli envoyés par les mécanorécepteurs sont à l'origine des perceptions de textures (Hutchings and Lillford, 1988).

1.1.3 Le processus oral

Le processus oral est le processus physiologique qui consiste à déconstruire l'aliment pour le transformer progressivement en un bol alimentaire pouvant être dégluti de façon confortable et sûre (Chen, 2009).

Les travaux de Hiimae (2004) présentent un modèle physiologique du processus oral, réalisé pour des aliments solides et liquides sur la base d'observations *in vivo* réalisées par vidéo-fluorographie.

La Figure 1.7 présente les différentes étapes du processus oral de ce modèle. Ce dernier fait ressortir la grande diversité des stratégies orales qui sont susceptibles d'évoluer de façon significative (i) selon la nature de l'aliment considéré et (ii) selon les préférences et les aptitudes de l'individu. Ainsi, après la mise en bouche, un aliment liquide glissera rapidement vers la partie postérieure de la langue pour être dégluti. Un aliment solide sera quant à lui progressivement déconstruit par différentes actions (compression langue-palais, mastication, hydratation) pour progressivement former un bol alimentaire qui sera transporté vers la partie postérieure de la langue avant d'être à son tour dégluti (Stokes et al., 2013). Le modèle (Figure 1.7) met en évidence des boucles de rétrocontrôle qui schématisent le processus de décision du transport du bol alimentaire vers la partie postérieure de la langue, ou bien de la poursuite de la déconstruction. Les seuils sensoriels qui permettent ces prises de décision (et notamment le déclenchement de la déglutition) demeurent partiellement compris. S'il semble acquis que des mécanismes physiques d'interaction à l'interface langue-bol alimentaire jouent un rôle central, leur nature précise reste à identifier.

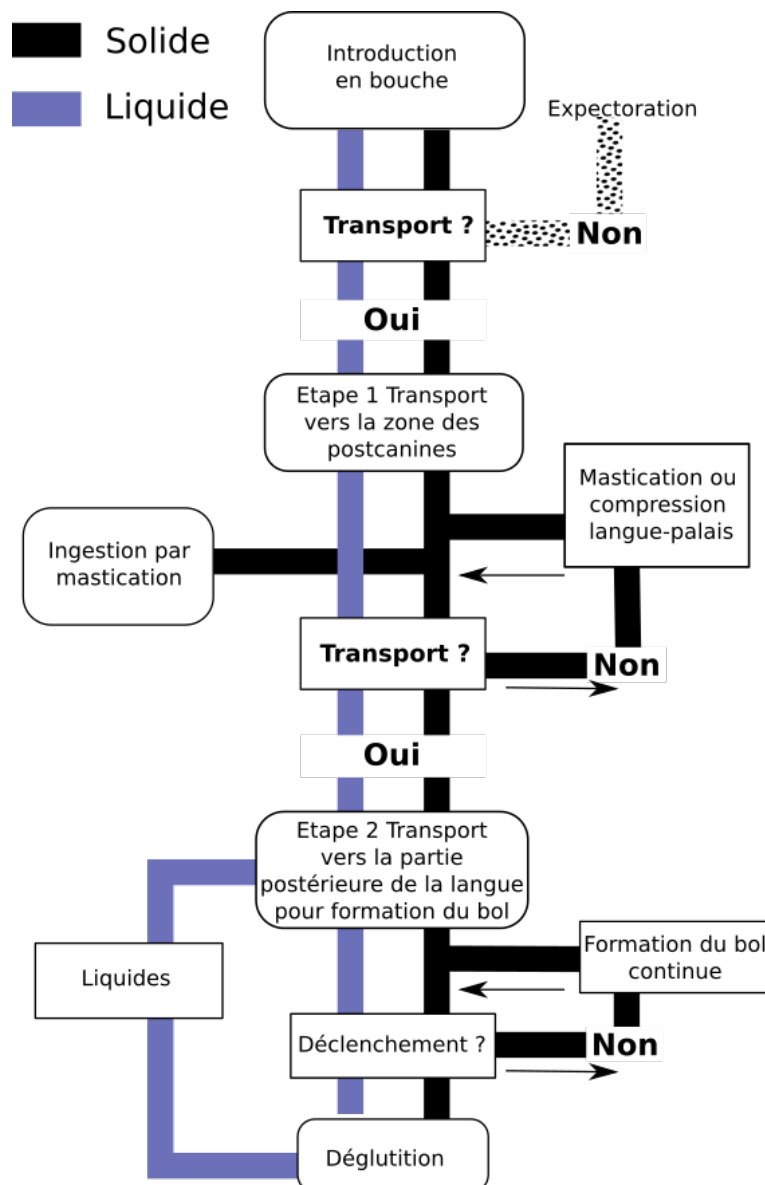


FIGURE 1.7 – Modèle de processus oral selon Hiemae (2004).

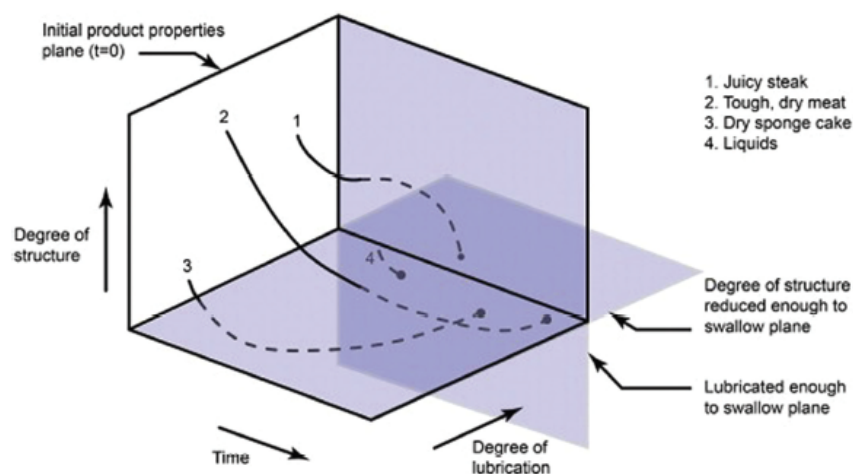


FIGURE 1.8 – Trajectoire de la déstructuration des aliments au cours du processus oral selon Hutchings and Lillford (1988) adaptée par Devezeaux de Lavergne et al. (2017).

Une autre approche de modélisation conceptuelle du processus oral a été développée dans la littérature ([Hutchings and Lillford, 1988](#)) (Figure 1.8). Ce modèle propose une représentation selon trois axes : (i) le temps, (ii) le degré de structure et (iii) le degré d'hydratation. Le processus oral de chaque type d'aliment peut ainsi être caractérisé par une trajectoire selon chacun de ces trois axes. Il permet ainsi de décrire, en fonction du temps, la convergence des degrés de structure et d'hydratation vers certains seuils sous lesquels le déclenchement de la déglutition peut se faire dans des conditions sûres et confortables. Cependant, la nature de ces seuils reste partiellement comprise.

Afin d'accomplir son rôle de déstructuration de l'aliment pour former un bol alimentaire, le processus oral est composé de trois éléments clés ([Chen, 2009](#)) :

- Le premier coup de dent, qui consiste à réaliser une première fracturation des aliments. Cette première fracture peut être réalisée entre les dents (incisives, molaires) pour des aliments durs ou bien entre la langue et le palais pour des aliments mous. La force impliquée dans cette étape est dépendante de l'aliment (propriétés mécaniques, géométries). De plus, cette force peut être anticipée avant la mise en bouche ou induite par le comportement de l'aliment à la mise en bouche.
- La mastication, qui a pour but de réduire la taille des particules de l'aliment et d'améliorer l'expérience du consommateur en augmentant les perceptions. Ce processus est effectué entre les molaires.
- La sélection orale, qui est effectuée par la langue et qui consiste à sélectionner les particules suffisamment grosses pour pouvoir être réduite entre les molaires. Cette étape a lieu en parallèle du processus de mastication.

Tout au long du processus oral, la langue joue un rôle important dans l'évolution du degré de structure et d'hydratation de l'aliment. Elle participe ainsi à la déconstruction de l'aliment par compression contre le palais, ou bien pour les aliments plus rigides en orientant les fragments vers les dents. Elle collecte les particules et contribue à l'incorporation de salive qui facilite la déconstruction et favorise l'agglomération de bol alimentaire. Enfin, elle permet la formation d'une pellicule de salive autour du bol alimentaire, qui facilite la lubrification et permet le transport du bol lors de la compression contre le palais mou qui initie la déglutition. Tout au long de ces actions, les mécanorécepteurs situés dans les tissus de la langue renvoient des informations relatives aux stimuli mécaniques auxquels ils sont exposés, et permettent ainsi non seulement d'apprécier les qualités sensorielles de l'aliment, mais également d'affiner la stratégie orale.

Devant la grande diversité des structures d'aliments, trois principales catégories de produits ont pu être dénombrées dans la littérature, selon le processus oral qui leur est associé ([van Vliet et al., 2009](#)) :

- Les produits liquides qui s'écoulent entre la langue et le palais et nécessitent peu d'effort pour les rendre aptes à être déglutis.
- Les produits semi-solides qui se caractérisent par un seuil d'écoulement ou de fracture atteints lors d'une compression entre langue et palais, et pour lesquels d'une façon générale la langue prévaut sur les dents dans la stratégie orale de déconstruction ([van Aken et al., 2007](#)).

- Les produits solides qui sont fracturés et réduits en particules par les dents.

Nous nous concentrerons dans le cadre de cette étude sur les aliments semi-solides. Toutefois, il est important de noter que la langue intervient dans le processus oral de chacune de ces trois catégories de produits. Ainsi, l'étude des phénomènes physiques générant des perceptions de textures au niveau de la langue est donc pertinente pour tout type d'aliment.

1.2 Des aliments modèles pour étudier la texture

1.2.1 Généralités

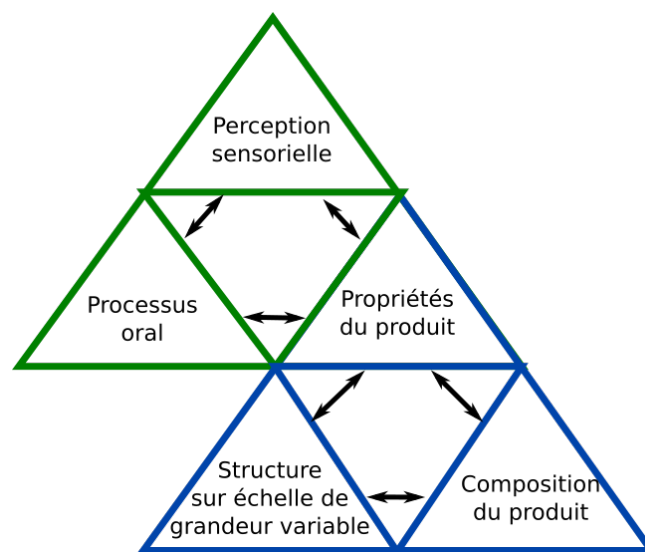


FIGURE 1.9 – Représentation du lien entre les caractéristiques des aliments et leurs perceptions. Les triangles verts englobent les éléments amenant aux perceptions et les triangles bleus englobent les éléments amenant aux propriétés du produit. L'interaction entre le processus oral et l'aliment est à l'origine des propriétés du bol et des perceptions associées. Adapté de [van Vliet et al. \(2009\)](#).

Les perceptions de texture des aliments sont dépendantes de leur microstructure ([Foegeding et al., 2017](#)). La Figure 1.9 présente le lien complexe qu'il y a entre les propriétés du produit, dépendant de la combinaison entre composition et structure de l'aliment, et sa perception sensorielle associée également au processus oral ([van Vliet et al., 2009](#)). Selon [Foegeding et al. \(2017\)](#), la compréhension de la perception de texture passe par le contrôle et la compréhension de l'impact de la microstructure sur la formation et les propriétés du bol alimentaire.

Les gels composés de biopolymères (protéines, polysaccharides) sont largement utilisés en tant qu'aliments modèles puisque leur usage est répandu dans l'industrie agro-alimentaire et puisqu'ils représentent une grande variété d'aliments semi-solides du commerce, tels que des préparations carnées, des fromages ou encore des desserts lactés (flans, yaourts, etc). Le Tableau 1.2 (p 36) donne un panorama des aliments modèles étudiés dans la littérature. La microstructure de ces gels évolue, notamment en fonction de leur teneur en polymère, de la nature et du nombre de polymères, du processus de gélification ou encore de la présence de colloïdes (gouttelettes de matière grasse, particules, etc).

Les aliments modèles utilisés régulièrement dans la littérature peuvent alors se décomposer en plusieurs catégories suivant leur composition (Tableau 1.2 p36) : les gels, les gels mixtes et les émulsions gélifiées.

1.2.2 Les gels

Un gel est un système dilué qui ne s'écoule pas à l'état stable. Pour les sciences de l'aliment, il s'agit d'aliments majoritairement composés d'eau dont le volume d'eau est soutenu par un réseau tridimensionnel de polymères. Cependant, la phase aqueuse peut comporter d'autres solutés (sucre, arômes, etc).

Les propriétés des gels dépendent de la nature et de la concentration du polymère. Deux types de biopolymères sont majoritairement utilisés pour former des gels modèles : les protéines et les polysaccharides (Tableau 1.2) (Foegeding, 2007; Renard et al., 2006).

Les protéines globulaires (protéines sériques, ovalbumine, protéines de soja et pois, etc.) peuvent former des gels par traitement thermique ou à basse température par processus chimique (gélification induite par ions, urée, acides) ou enzymatique (Totosaus et al., 2002). Pour les protéines globulaires, la gélification est non-réversible. Le mécanisme de gélification se fait par agrégation des protéines et varie suivant les conditions d'interactions (Renard et al., 2006). On peut distinguer des conditions d'interactions intrinsèques (interaction électrostatiques, présence de ponts disulfures et des échanges thiol-disulfures, le poids moléculaire, la composition en acides aminés, l'hydrophobicité) et des conditions extrinsèques (concentration en protéines, le pH, la température, la force ionique, la pression, le type de sel).

La gélatine est une protéine dont la gélification est réversible lorsque le gel se gélifie par traitement thermique. Contrairement aux autres protéines, son processus de gélification est similaire à ceux des polysaccharides. Durant le refroidissement de la gélatine, à hautes températures les chaînes de gélatines sous forme de pelote sont transformées en triples hélices et forme la structure du gel (Renard et al., 2006). Les polysaccharides (agar, carraghénane, gellane, gomme de guar, gomme de xanthane, gomme de caroube) forment des gels réversibles par traitement thermique. Les gels de polysaccharides se polymérisent par liaisons physiques entre les chaînes de polymères pour former un réseau tridimensionnel assurant les propriétés mécaniques du gel. Le mécanisme de gélification (polymérisation) est différent d'un polysaccharide à l'autre (Renard et al., 2006)).

1.2.3 Les gels mixtes

Les gels mixtes sont des gels résultant d'un mélange entre plusieurs biopolymères. Pour former la plupart des aliments modèles, les mélanges entre protéines et polysaccharides sont régulièrement considérés dans la littérature (Tableau 1.2 p36) (Foegeding et al., 2017). Ce type de mélanges a pour conséquence de générer une grande variété de structures (Figure 1.10). Cette diversité de structures est liée aux processus de séparation de phases ayant lieu au cours de la gélification des produits.

La séparation de phase peut avoir lieu par (Foegeding et al., 2017; van de Velde et al., 2015) :

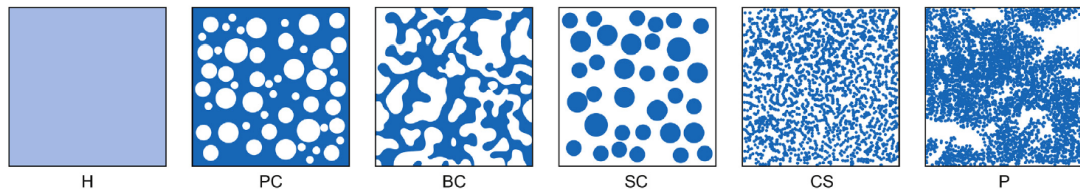


FIGURE 1.10 – Variété de structures réalisable avec des mélanges protéines-polysaccharides (Foe-geding et al., 2017). Les zones riches en protéines sont représentées en bleu. Le taux de polysaccharides augmente en se déplaçant vers la gauche. H : Homogène, PC : Protéine Continu, BC : bicontinu, SC : phase aqueuse continue, CS : Granuleux, P : dispersé.

- Ségrégation, où les chaînes de polymères sont soumises à des forces répulsives comme dans les cas où les deux polymères sont hydrophiles ou bien lorsqu'ils ont des charges de mêmes signes. Dans ces cas, l'une des phases sera composée d'un polymère en condition dilué et l'autre en condition concentré.
- Agrégation, correspondant au cas où les polymères possédant des charges opposées sont mélangés.

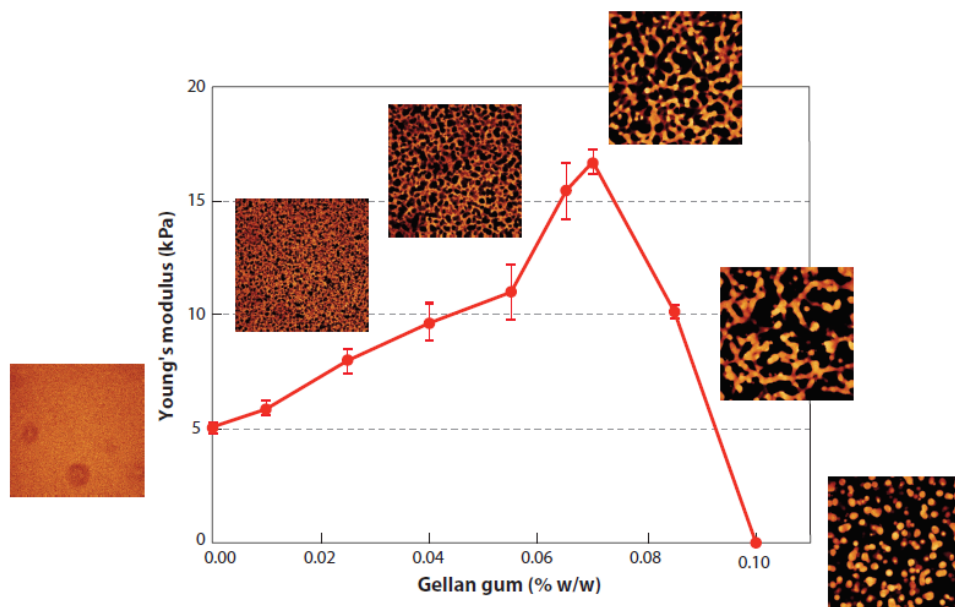


FIGURE 1.11 – Microstructure et module de Young en fonction de la concentration en polysaccharides d'un mélange de protéines sériques (WPI) et de gomme de gellane. Les images acquises par microscopie confocale représentent la microstructure du gel. (van de Velde et al., 2015)

La microstructure ainsi que la texture des gels sont les résultats des mécanismes combinés de séparation de phase et de gélification. Le choix des polymères, du mécanisme et de la cinétique de séparation de phase permet d'accéder à une large gamme de microstructure. Dans la plupart des mélanges protéine/polysaccharide, la gélification est obtenue à partir de la gélification de la phase protéique à l'aide d'un des mécanismes cités précédemment. La gélification à basse température induite par acidification est en général préférée car elle permet un contrôle fin de la microstructure et des propriétés mécaniques du gel mixte obtenu. Cependant, le même type de microstructure peut être obtenu par d'autres procédés de gélification (van de Velde et al., 2015). La Figure 1.11 représente l'évolution du module

de Young et de la microstructure du gel en fonction de la concentration en polysaccharide d'un mélange de protéines sériques et de gomme de gellane gélifié par acidification. Avec 0% de gomme de gellane, la phase protéique est continue et forme un gel pouvant soutenir une charge. Avec l'augmentation de la teneur en polysaccharide, la séparation de phase conduit à une augmentation de la concentration en protéine dans la phase protéique, ce qui induit une augmentation du module de Young. Le module de Young du mélange augmente jusqu'à l'inversion de phase entre la phase protéique et la phase riche en polysaccharides qui devient continue. A la plus haute concentration en polysaccharide, le mélange devient liquide car la phase en polysaccharide n'est plus continue.

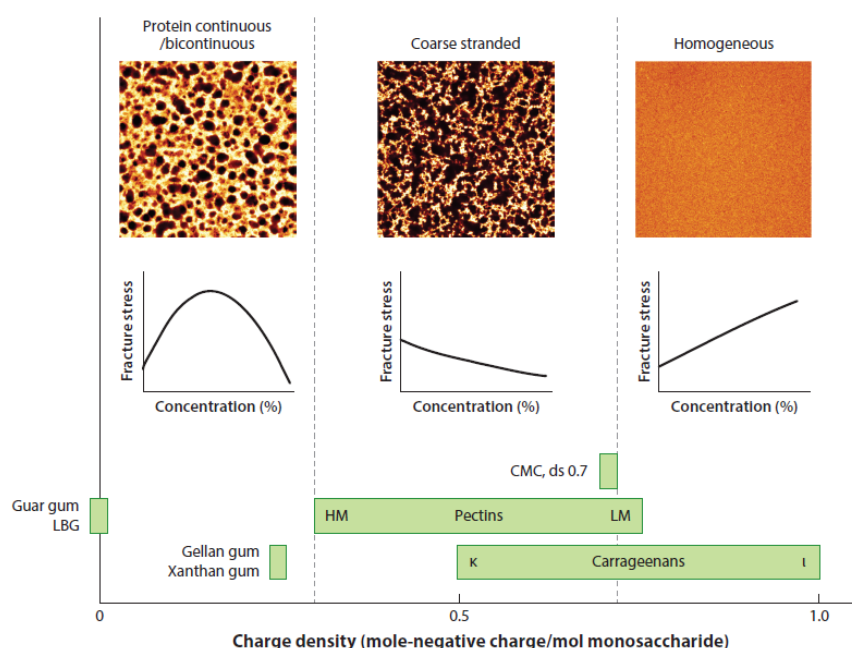


FIGURE 1.12 – Représentation de l'évolution des propriétés mécaniques du gel mixte avec une phase protéique composée de protéines sériques (WPI) en fonction du polysaccharides et de sa concentration (van de Velde et al., 2015)

Dans le cas d'un mélange de protéines sériques avec des polysaccharides, l'évolution des propriétés mécaniques et de structure sont fonction de la densité de charge des chaînes de polymères des polysaccharides. On distingue trois catégories de polysaccharides (Figure 1.12) suivant leur densité de charge : faible densité de charge (en dessous de 0.3 (mole de charges négatives/mole de monosaccharide)), densité de charge intermédiaire (entre 0.3 et 0.7 (mole de charges négatives/mole de monosaccharide)) et densité de charge élevée (au-dessus de 0.7 (mole de charges négatives/mole de monosaccharide))(Figure 1.12).

Ainsi, suivant les conditions de gélification et les polymères choisis, il est possible d'accéder à des microstructures très variables. Les microstructures atteignables avec les gels mixtes peuvent être classées en six catégories (Figure 1.12) : (i) Homogène (H), (ii) Continue en Protéine (PC), (iii) BiContinue (BC), (iv) phase aqueuse continue (SC), (v) Granuleux (CS) et (vi) Dispersé (P). Ces différentes microstructures ont pu être reliées à des perceptions de textures. Par exemple, la perception de « friable » a pu être reliée aux microstructures *Homogène*(H) et *Continue en Protéine* (PC), alors que la perception d'« humide » a pu être reliée avec la structure *Bicontinue* (BC) (Çakır et al., 2012). Ce lien entre la micro-

structure et les perceptions de texture peut être relié avec le processus de déstructuration de l'aliment au cours du processus oral. Les structures *Homogène*, *Continue en Protéine* et *Bicontinue* ont été associées à l'apparition de larges particules après le premier coup de dent. Et les structures *Phase aqueuse continue* et *Granuleux* ont pu être reliées à une haute libération de sérum (van den Berg et al., 2007a,b).

1.2.4 Les émulsions gélifiées

Les émulsions gélifiées sont des aliments modèles représentant une grande variété de produits du commerce tel que les fromages, les crèmes glacées ou des produits carnés gélifiés. Ces aliments possèdent une méso-structure plus complexe que les gels présentés précédemment expliquée par l'ajout d'une phase dispersée (huile liquide sous forme de gouttelettes, matière grasse solide) à la phase gel (protéines, polysaccharides, ou gel mixte). Deux configurations d'émulsions gélifiées peuvent exister (Figure 1.13) : (i) des gels renforcés par émulsion (« emulsion filled gel ») ou (ii) des gels d'émulsion qui correspond à l'agrégation des gouttelettes pour former un réseau de gouttelettes (Geremias-Andrade et al., 2016).

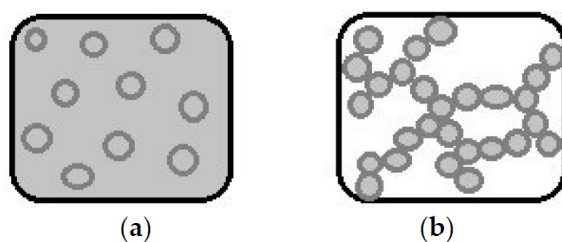


FIGURE 1.13 – Représentation des deux configurations d'émulsion gélifiée : (a) gel renforcé par émulsion (« emulsion filled gel ») et (b) gel d'émulsion. (Geremias-Andrade et al., 2016)

Comme les gels, les émulsions gélifiées peuvent être préparées suivant plusieurs protocoles tels que le traitement thermique, l'acidification, l'action enzymatiques ou encore l'ajout de présure (Dickinson, 2012).

Les propriétés mécaniques des émulsions gélifiées peuvent être contrôlées par leur teneur en polymères, mais aussi par les propriétés des gouttelettes d'émulsions ajoutées à la matrice, à savoir : leur fraction volumique, leur taille, leur propriété rhéologique et leur charge de surface (van Vliet, 1988). La Figure 1.15 résume les propriétés des émulsions gélifiées et leur lien avec les perceptions de texture.

Si les gouttelettes (solides ou liquides) possèdent des propriétés mécaniques (module de Young, viscosité) supérieure à celle de la matrice, l'ajout des gouttelettes aura pour conséquence d'augmenter les propriétés mécaniques du gel global et réciproquement. Cet effet s'accroît avec la concentration en gouttelettes. Par ailleurs, la distribution spatiale des gouttelettes et l'inhomogénéité de la matrice ont aussi un effet sur les propriétés rhéologiques du gel global. Les gouttelettes peuvent être agrégées ou regroupées en contrôlant la cinétique de gélification ce qui aura pour conséquence d'augmenter le module de Young de l'émulsion gélifiée (Foegeding et al., 2017; Geremias-Andrade et al., 2016).

De plus, suivant leurs propriétés de surfaces, les gouttelettes peuvent interagir avec la matrice. Il s'agit, dans ce cas, de renforts actifs ou de gouttelettes liées. Dans le cas contraire

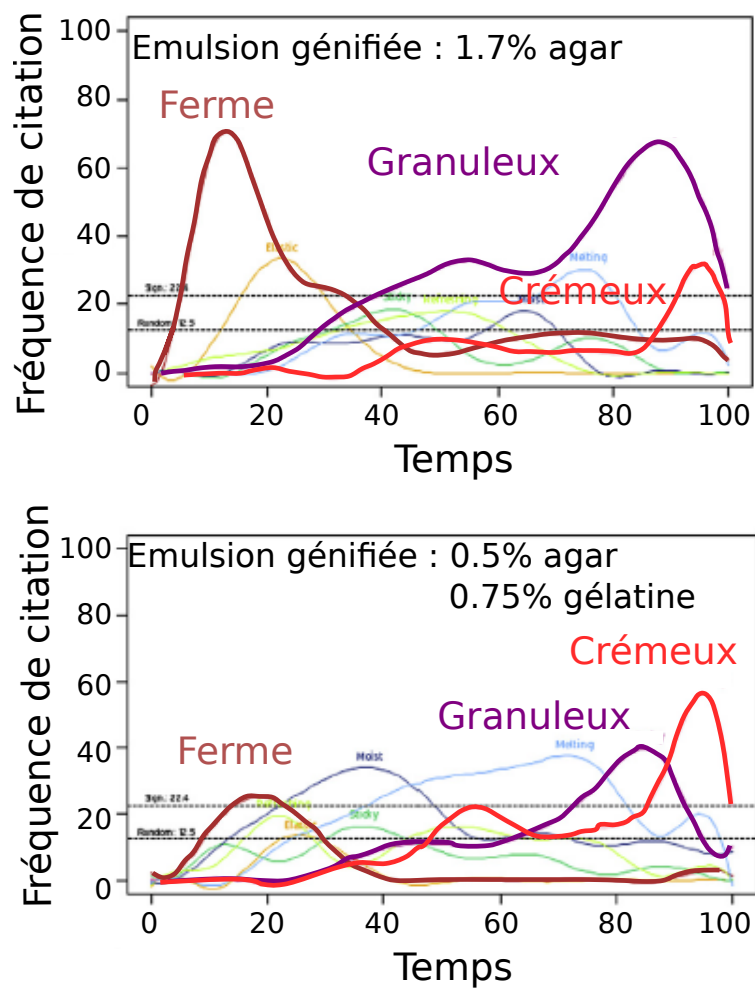


FIGURE 1.14 – Fréquence de citation d'attributs de perception de texture au cours du processus oral pour deux émulsions gélifiées. Figure adaptée de Devezeaux de Lavergne et al. (2015b)

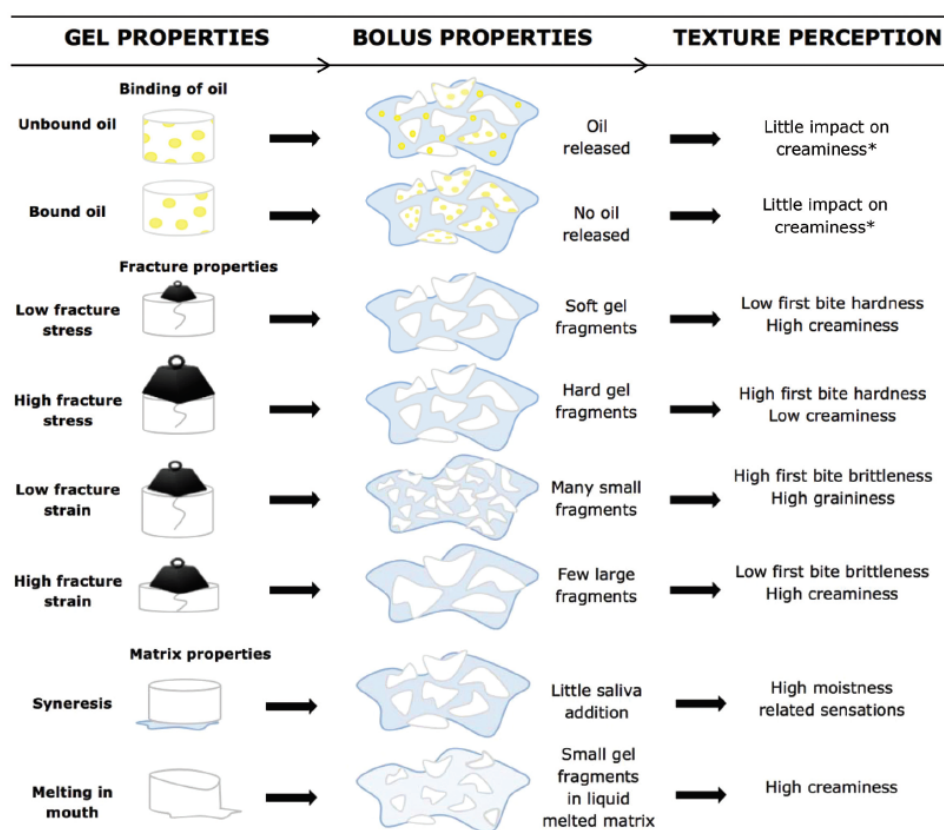


FIGURE 1.15 – Propriétés des émulsions gélifiées, du bol alimentaire associé et des perceptions de textures induites (Devezeaux de Lavergne et al., 2017)

où elles n'interagissent pas avec la matrice, il s'agit de renforts inactifs ou de gouttelettes non liées (Foegeding et al., 2017; Geremias-Andrade et al., 2016).

Le type de gel, la fraction volumique d'huile et la capacité de libération des gouttelettes à partir de la matrice environnante peuvent avoir un impact sur la perception de « crémeux ». La non liaison des gouttelettes à la matrice peut entraîner une libération plus importante de gouttelettes et un dépôt d'huile plus important sur la langue Camacho et al. (2015). Par ailleurs, une plus forte coalescence des gouttelettes est observée dans le bol lorsque les gouttelettes ne sont pas liées à la matrice, ce qui a pour conséquence de diminuer les forces de friction et d'augmenter la perception de gras (Liu et al., 2015). L'impact des propriétés des gouttelettes et de leurs interactions avec la matrice, sur les perceptions de texture, ne sont cependant pas encore bien connus dans la littérature (Foegeding et al., 2017).

Comme dans le cas des gels, les propriétés de transition de phase de la phase gel peuvent également avoir un impact sur les perceptions de texture. Ainsi, des émulsions gélifiées à base de gélatine peuvent fondre en bouche augmentant la perception de crémeux (Foegeding et al., 2017). De même, les produits contenant de l'amidon peuvent aussi être partiellement hydrolysés par l'action de l'amylase salivaire et conduire à des perceptions de textures comme de saveurs modifiées (Foegeding et al., 2017).

Ainsi, les émulsions gélifiées sont des modèles pertinents pour étudier l'aspect dynamique de la perception de texture. L'étude de Devezeaux de Lavergne et al. (2015b) a permis de montrer l'évolution des perceptions de texture d'émulsions gélifiées à partir d'agar et de gélatine (Figure 1.14). Ces auteurs ont pu en particulier identifier les séquences de

perceptions de texture de ce type de gels en lien avec les propriétés des bols. La perception « ferme » était évaluée au début du processus oral, les perceptions de « collant », « élastique », « humide », « rafraichissant » étaient évaluées au milieu du processus oral, alors que les perceptions de « granuleux », « fondant » et « crémeux » étaient perçues à la fin du processus oral. Ces aliments modèles représentent ainsi un moyen d'investigation pertinent pour évaluer l'aspect dynamique de la perception de texture. Toutefois, il est nécessaire pour cela de disposer de propriétés sensorielles robustes et répétables évaluées avec des méthodes pertinentes.

1.3 Les méthodes sensorielles pour évaluer la texture des gels

1.3.1 Généralités

La compréhension des mécanismes de perception de texture, liés à l'interaction physique entre la langue et l'aliment, passe par la mise en œuvre de méthodes de caractérisations sensorielles. Qu'elles soient qualitatives ou quantitatives, ponctuelles ou dynamiques, ces méthodes permettent d'analyser la réponse sensorielle de l'individu à l'exposition de différents stimuli résultant de l'interaction physique entre le consommateur et les systèmes d'aliments modèles décrits précédemment. L'objectif de cette partie est ainsi de donner des éléments d'introduction sur les méthodes d'analyse sensorielles qui permettent de caractériser les perceptions de texture en s'appuyant sur des panels de juges entraînés. En sciences des aliments, l'analyse sensorielle est définie comme « l'étude systématique des réponses humaines aux propriétés physicochimiques des aliments et des boissons » (Depledt and Strigler, 2009). Les évaluations sensorielles permettent de caractériser les propriétés sensorielles ou organoleptiques des produits. Celles-ci sont largement utilisées dans la littérature pour caractériser des produits réels comme des aliments modèles. Les études utilisant des aliments modèles pour mieux comprendre les perceptions de textures se concentrent sur des données sensorielles analytiques (qualitatives et quantitatives) pour étudier des différences entre produits (Tableau 1.2 p36). Sur la base de la littérature s'intéressant aux propriétés de texture d'aliments modèle, on distingue principalement deux grands types de méthodes sensorielles : les méthodes de profils sensoriels (QDA : qualitative Descriptive Analysis) et les méthodes sensorielles temporelles (TDS : Temporal Dominance of Sensations, TI : Time Intensity)

Les évaluations sensorielles nécessitent de travailler avec des groupes d'individus appelés panels. Suivant le type de méthode employée, le panel pourra générer une liste d'attributs sensoriels à laquelle il sera entraîné. L'entraînement du panel permet de s'assurer de sa performance. Celle-ci repose sur trois piliers : (i) l'homogénéité (accord entre les juges), (ii) le pouvoir discriminant (capacité à différencier des produits) et (iii) la répétabilité (à l'échelle du juge et du panel).

1.3.2 Techniques d'évaluations couramment utilisées pour étudier les perceptions de textures

1.3.2.1 Le profil sensoriel

Les méthodes de type QDA (Analyse Descriptive Quantitative) sont largement répandues dans la littérature pour décrire les perceptions de textures des produits. Elles consistent à recruter un panel extérieur à l'étude, à générer avec le panel une liste d'attributs sensoriels permettant de décrire et de discriminer le mieux les produits, à entraîner le panel à identifier et à quantifier l'intensité de ces attributs et enfin à évaluer les attributs sensoriels des produits de l'étude par le panel. Le vocabulaire utilisé est un vocabulaire non-technique afin de minimiser les biais d'interprétation (Murray et al., 2001). Cette méthode a par exemple été employée pour déterminer l'impact de la microstructure d'un mélange protéines sériques (WPI) / gellane sur des attributs comme « humide », « glissant », « ferme » ou encore « friable » (van den Berg et al., 2008, 2007b). Elle a également été mise en œuvre pour étudier les perceptions de « crémeux » ou « ferme » dans des émulsions gélifiées (de Wijk et al., 2006a; Devezeaux de Lavergne et al., 2015a; Liu et al., 2015; Sala et al., 2008, 2007) ou des produits laitiers (Panouillé et al., 2011).

Le profil de texture (« Texture Profile Method », TPM) est une méthode sensorielle de type QDA mais uniquement dévolue aux perceptions de textures (Murray et al., 2001). Cette méthode a été développée simultanément avec l'analyse du profil de texture (TPA) qui est une méthode instrumentale. Elle permet d'évaluer les intensités de texture sur une échelle d'intensité suivant des définitions et un ordre établi dans la littérature. Toutes les définitions des perceptions évaluées en TPM sont définies à partir de propriétés physiques évaluées instrumentalement. Le Tableau 1.1 présente une synthèse des descripteurs sensoriels qui ont pu être mis en lien avec les propriétés physiques des gels évalués avec la méthode instrumentale TPA (Texture Profile Analysis).

Le principal inconvénient des méthodes sensorielles de type QDA, pour l'étude des perceptions de textures, est qu'elles n'offrent pas une évaluation sensorielle résolue dans le temps et qu'elles ne donnent donc pas d'information sur le moment du processus oral à laquelle la perception est évaluée.

1.3.2.2 Les méthodes sensorielles dynamiques ou temporelles

Les méthodes dynamiques ou temporelles présentent l'avantage de permettre l'évaluation des perceptions de texture en fonction du temps tout au long du processus oral.

L'analyse Temps-Intensité (TI) est une méthode proposée dans la littérature pour suivre l'évolution de l'intensité d'un à deux attributs de perception de texture au cours du temps durant la consommation. La méthode exige un niveau de concentration et de réactivité qui ne permet pas de travailler simultanément sur un plus grand nombre d'attributs sensoriels. Une évaluation sur l'ensemble des attributs sensoriels par la mesure Temps-Intensité passe donc par la démultiplication des séances en fonction du nombre d'attributs à étudier (Pineau et al., 2009).

La méthode des Dominances Temporelles des Sensations (DTS) est une méthode plus récente permettant d'évaluer, au cours du temps, la fréquence de citation des descripteurs

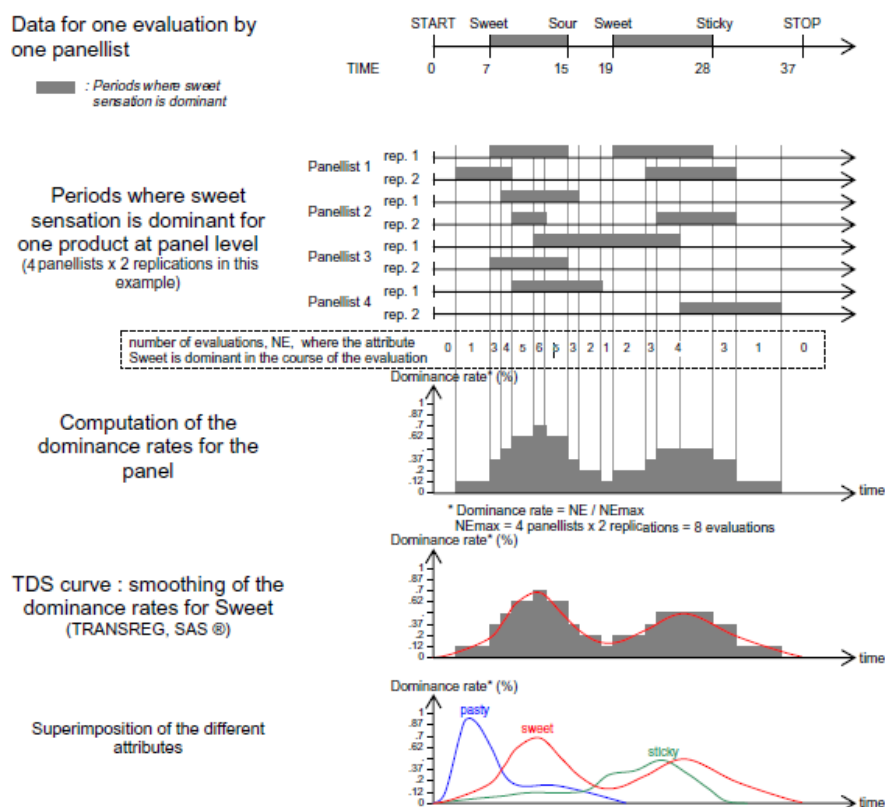


FIGURE 1.16 – Représentation des étapes permettant de calculer et tracer les courbes de dominances temporelles des sensations TDS (Pineau et al., 2009)

qui attirent le plus l'attention des juges au cours de la consommation d'un produit (Pineau et al., 2009). C'est une méthode qui requiert peu d'entraînement de la part du panel. Elle ne donne toutefois pas d'indication sur l'intensité des descripteurs mais renseigne uniquement sur la fréquence des descripteurs ayant attiré l'attention du panel et ceci depuis la mise en bouche jusqu'à déglutition de l'aliment, voire jusqu'à ce que toutes perceptions aient disparues. Contrairement à la méthode temps-intensité, la méthode DTS permet d'évaluer au même instant jusqu'à 10 attributs. La Figure 1.16 représente le principe de construction des courbes de TDS.

Afin d'obtenir des données d'intensité des attributs en fonction du moment de consommation, des méthodes alternatives à la méthode DTS ont été proposées. Il s'agit par exemple de la méthode du Profil Progressif (« Progressive Profiling », PP). Celle-ci permet d'évaluer les intensités de perception en fonction du temps, en demandant aux panélistes d'évaluer les perceptions de texture à des temps donnés du processus oral. Cette méthode a pu être utilisée par exemple pour évaluer les sensations de « gras » ou de « crémeux » persistant après la déglutition, résultant des dépôts de matière grasse laissés sur la langue par des émulsions (Camacho et al., 2015).

1.3.3 Synthèse

Toutes ces méthodes sensorielles sont complémentaires et apportent des informations diverses (Figure 1.17). Elles sont par ailleurs souvent associées entre elles, afin de disposer

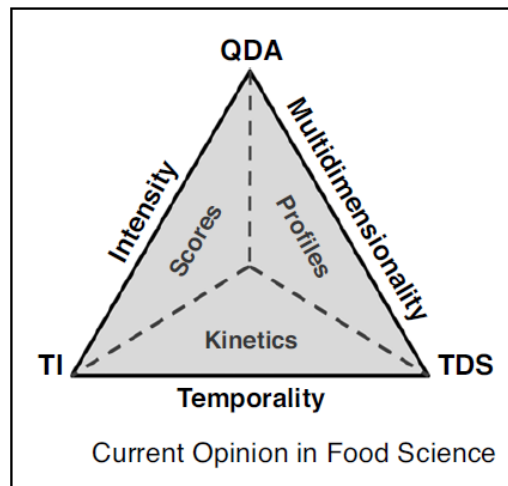


FIGURE 1.17 – Complémentarité des méthodes sensorielles de profils et temporelles (Schlich, 2017)

d'une caractérisation à la fois temporelle et quantitative (Devezeaux de Lavergne et al., 2017; Jourden et al., 2016; Saint-Eve et al., 2015; Schlich, 2017).

1.4 Les méthodes instrumentales pour caractériser la texture

Il est admis que les perceptions de texture sont l'intégration dans le temps de tous les stimuli mécaniques perçus par les mécanorécepteurs des muqueuses orales au cours du processus oral. L'origine de la perception de texture est alors admise comme physique (Chen and Stokes, 2012). La compréhension des mécanismes de perception de texture implique d'élucider les liens entre l'aliment (sa structure, ses propriétés mécaniques), les mécanismes de déconstruction auxquels il est soumis en bouche, puis les stimuli responsables des perceptions. Cette connexion entre l'aliment et la réponse sensorielle passe donc par le développement de méthodes instrumentales qui doivent permettre de caractériser l'interaction homme-aliment tout au long du processus oral. S'il est maintenant admis que les propriétés mécaniques et rhéologiques de l'aliment gouvernent la réponse sensorielle pendant les premières étapes de manipulation en bouche, les évolutions des degrés de structure et d'hydratation du bol alimentaire au cours du processus oral conduisent à une évolution toute aussi importante des perceptions de texture qui ont peu de lien avec les propriétés initiales de l'aliment. Au cours de la déconstruction orale, les changements d'échelle d'organisation du bol alimentaire (réduction de taille des particules, altération du film salivaire par la dissolution de particules alimentaires) conduisent à une transition progressive entre un régime initial dominé par la rhéologie et les propriétés mécaniques de l'aliment, et un régime dominé par les propriétés interfaciales de tribologie et de lubrification. Nous nous sommes attachés dans cette section à décrire et à illustrer comment ces différentes approches instrumentales qui se déclinent entre rhéologie et tribologie ont permis, en se focalisant sur l'étude de séquences spécifiques du processus oral, de mieux comprendre certaines caractéristiques des perceptions de texture.

1.4.1 Séquences clés du processus oral et caractérisations instrumentales des perceptions de texture associées

Le processus oral est dynamique (Hutchings and Lillford, 1988) et comporte plusieurs étapes de transport du bol (de la langue vers les dents, des dents vers la langue) et de réduction de taille de particule afin de former un bol facilement déglutissable (Hiimae, 2004). Par conséquent, une méthode instrumentale basée sur un seul mécanisme élémentaire du processus oral tels que la compression, le cisaillement ou la fracturation trouverait de réelle limitation pour décrire le comportement de l'aliment tout au long de sa consommation.

L'analyse du processus oral a conduit l'équipe de l'Université de Queensland (Stokes et al., 2013) à proposer un découpage de ce dernier en plusieurs étapes sur la base des mécanismes et des perceptions associées. L'objectif des auteurs était de pouvoir étudier le comportement des aliments à chacune de ces étapes via les multiples modalités et transformations (compression, cisaillement, etc).

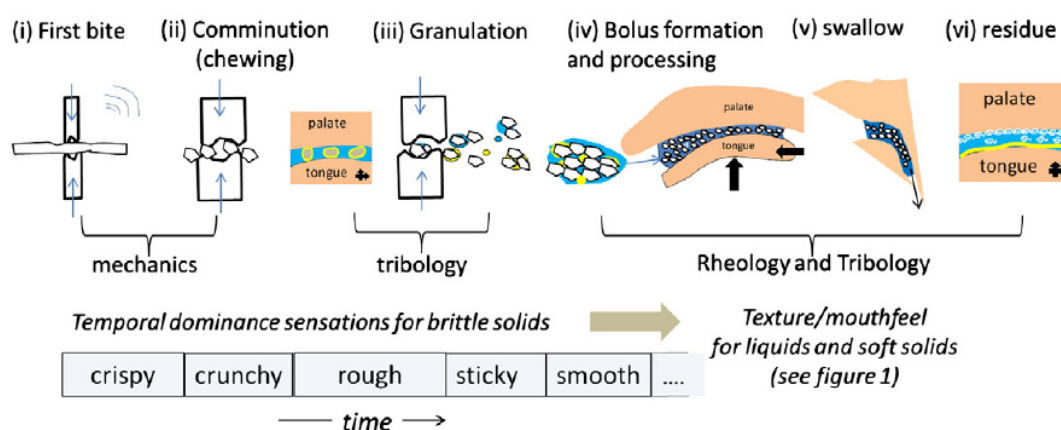


FIGURE 1.18 – Représentation des étapes clés du processus oral pour l'étude instrumentale des perceptions de texture (Stokes et al., 2013)

Les étapes clés du processus oral proposées par Stokes et al. (2013) sont présentées sur la Figure 1.18. Six étapes sont ainsi identifiées : (i) le premier coup de dent qui consiste à fracturer l'aliment entre les dents ou entre la langue et le palais, (ii) la comminution qui consiste à fragmenter l'aliment en des morceaux grossiers, (iii) la granulation qui consiste à réduire la taille des particules, (iv) la formation et le traitement du bol alimentaire qui consiste à mélanger les particules avec de la salive pour former un bol homogène, (v) la déglutition et (vi) les résidus qui correspondent au reliquat de bol alimentaire encore présent entre la langue et le palais après déglutition.

A chacune de ces phases, les propriétés mécaniques de l'aliment ainsi que les propriétés tribologiques et/ou rhéologiques du bol peuvent permettre de mieux comprendre les perceptions de texture. Le tableau 1.2 p36 présente une synthèse de la littérature portant sur les caractérisations instrumentales et sensorielles de différents types de gels. Ce panorama de la littérature met en avant deux grands types de caractérisations instrumentales : (i) les méthodes rhéologiques avec les compressions uni-axiale et en cisaillement, et dans une moindre mesure (ii) les méthodes tribologiques.

1.4.2 Caractérisations rhéologiques

La rhéologie est un domaine de la physique permettant de relier une force (contrainte) à une déformation d'un matériau. Par conséquent, elle est adaptée pour décrire le comportement des aliments aux sollicitations mécaniques rencontrées au cours du processus oral. C'est la raison pour laquelle la rhéologie a été utilisée dès les premières études instrumentales portant sur la perception de texture.

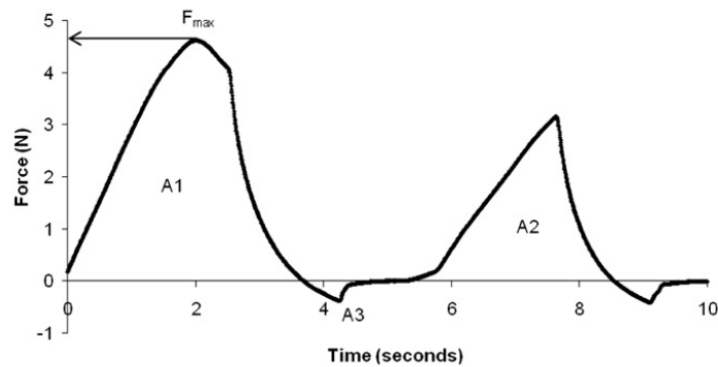


FIGURE 1.19 – Courbe Force-temps d'un essai de TPA. La dureté est définie comme la force maximale (F_{max}) (N), l'adhésivité est égale à l'aire A3 (N.mm), la cohésion est égale au rapport de l'aire A2/aire A1 (sans dimension) (Panouillé et al., 2011)

Dans de très nombreux travaux s'intéressant à une caractérisation instrumentale de la texture des aliments solides ou semi-solides, les essais en compression sont réalisés avec un équipement de compression/traction (TA.XT ou Instron). Il s'agit d'un appareil permettant de déformer uni-axialement un aliment entre deux surfaces dures et de mesurer la contrainte (Force/section) en fonction de la déformation de l'aliment ou du temps. Le protocole de compression le plus couramment employé pour caractériser la texture est l'Analyse du Profil de Texture (Texture Profil Analysis, TPA) proposée par Szczesniak (1963). Ce protocole consiste à réaliser une double compression de l'aliment, de recueillir une courbe traçant l'évolution de la force au cours du temps (Figure 1.19) et d'extraire de la courbe des paramètres définis empiriquement en lien avec les propriétés de texture (Tableau 1.1). La double compression a été choisie afin de mimer l'action des dents lors de la mastication ou de l'action de la langue au moment de la compression langue-palais. Les paramètres issus de la courbe TPA ont été mis en relation avec de nombreux attributs de texture. La force maximale (F_m), défini comme le paramètre « dureté » est par exemple très souvent corrélé à la perception « ferme ». Le paramètre « cohésif » correspondant au rapport entre les surfaces sous la courbe obtenues entre la première et la deuxième compression est corrélé à la perception « friable » (Pons and Fiszman, 1996).

Par ailleurs, une seule compression uni-axiale est également très souvent utilisée pour mesurer des paramètres mécaniques fondamentaux (Tableau 1.2). En effet, les résultats d'une compression uni-axiale peuvent être présentés sous la forme d'une courbe contrainte-déformation (Figure 1.20). Dans le domaine d'élasticité linéaire (pour de faibles déformations), la contrainte peut s'exprimer en fonction de la déformation par la loi de Hook :

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (1.1)$$

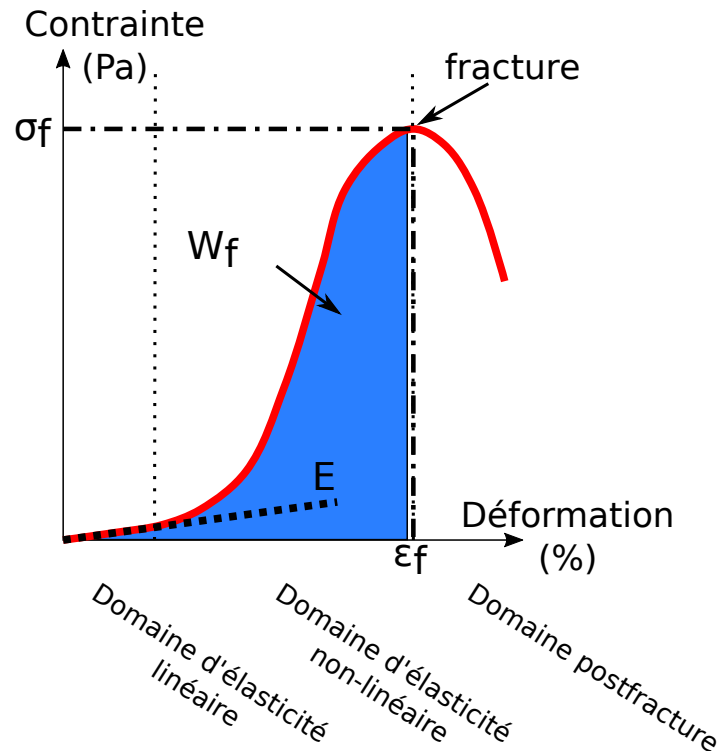


FIGURE 1.20 – Représentation conceptuelle d'une courbe contrainte- déformation d'un essai de compression. Les paramètres classiques d'un essai à hautes déformations sont présentés : le module de Young (E), la contrainte (σ_f) et l'élongation à la rupture (ϵ_f) ainsi que le travail à la rupture (W_f)

Où σ représente la contrainte (Pa), ϵ la déformation (%) et E le module de Young (Pa). Le module de Young peut ainsi être mesuré en calculant la pente à l'origine de la courbe contrainte-déformation.

Les propriétés à hautes déformations sont caractéristiques de la manière dont un produit se fracturera. Si la fracture a lieu, il est possible de mesurer le travail à la fracture W_f (aire en dessous la courbe jusqu'à la fracture), la contrainte σ_f et la déformation ϵ_f à la rupture.

De plus, il est aussi possible de mesurer l'énergie de récupération des gels en mesurant le travail fourni pour déformer l'échantillon de 25% W_1 et le travail fourni pendant la décompression de l'échantillon W_2 (Koç et al., 2013; Sala et al., 2009b). L'énergie de récupération s'écrit ensuite :

$$\%RE = \frac{W_2}{W_1} \cdot 100 \quad (1.2)$$

Bien qu'étant plus rares, d'autres type de transformations sont réalisées pour caractériser mécaniquement les aliments solides. L'application d'une contrainte de cisaillement par un mouvement de torsion peut être réalisée pour mesurer le module de cisaillement G (ou module de Coulomb) lié au module de Young (Barrangou et al., 2006b; Çakır and Foege- ding, 2011; Gwartney et al., 2004). L'avantage de cette méthode est qu'elle ne provoque pas de variation de volume, ce qui facilite la mesure de G mais elle est délicate à mettre en place (Tabilo-Munizaga and Barbosa-Cánovas, 2005). De plus, la flexion des produits peut aussi être envisagée pour évaluer des paramètres en lien avec la force de pliage ou directement le module de Young des produits (Scher, 2006). Dans le cas des travaux de Çakır et al. (2012) une entaille est présente au milieu du produit pendant la flexion. Le résultat de ce type de

test leur a permis de mesurer des propriétés à la fracture des gels (dureté, énergie de récupération) qu'ils ont pu mettre en lien avec des perceptions de texture évaluées au premier coup de dent (« fermeté ») et au cours de la mastication. L'application d'entailles sur les produits permet aussi d'étudier la propagation de la fissuration de l'échantillon. Le facteur d'intensité de contrainte critique (K_{Ic}) peut ensuite être calculé en fonction de la contrainte à la fracture (σ_f en Pa) et de la taille de l'entaille (a en m) par :

$$K_{Ic} = \sigma_f \sqrt{\pi \cdot a} \quad (1.3)$$

Toutes ces méthodes ont été utilisées avec succès dans de nombreux travaux (Tableau 1.2 p36) et notamment pour étudier par exemple l'impact de la microstructure des mélanges de gels mixte et des émulsions gélifiées sur leurs propriétés à la fracture et sur leurs perceptions de textures (Tableau 1.1) (de Jong and van de Velde, 2007; Devezeaux de Lavergne et al., 2017; Liu et al., 2015; Panouillé et al., 2011; Sala et al., 2008).

Les méthodes précédemment introduites se montrent pertinentes pour des aliments solides, en revanche pour des aliments liquides des mesures par cisaillement sont plus adaptées. Ce type de techniques consiste à caractériser l'écoulement d'un fluide entre deux surfaces en lui appliquant une contrainte tangentielle (τ en Pa). Cette sollicitation mécanique provoquera un gradient de vitesse ($\dot{\gamma}$ en s^{-1}) au sein du volume du fluide. Deux courbes peuvent alors être tracées, la courbe d'écoulement (τ en fonction de $\dot{\gamma}$) et la courbe de viscosité (la viscosité en fonction de $\dot{\gamma}$).

De nombreuses études ont montré de fortes corrélations entre la viscosité et la perception d'« épais » ou de « fondant » (Chojnicka-Paszun and de Jongh, 2014; Kokini et al., 1977; Liu et al., 2016; Pollen et al., 2004). Les indices de consistance et d'écoulement (obtenus dans le cas de fluide sans contrainte seuil) ont été également utilisés pour expliquer la perception de « crémeux » de crèmes desserts (de Wijk et al., 2006a).

Les produits alimentaires, solides comme liquides, sont bien souvent viscoélastiques. La caractérisation des propriétés viscoélastiques trouve une forte application pour suivre la gélification des produits et ainsi comprendre la formation de leur microstructure (Pang et al., 2015). En outre, par la capacité à étudier à la fois les produits liquides et solides, les méthodes en cisaillement par oscillation présentent un fort potentiel pour étudier les bols alimentaires au cours du processus oral (Tableau 1.2). Par exemple, les travaux de Saint-Eve et al. (2015) ont pu étudier l'impact des propriétés viscoélastiques des aliments et du bol alimentaire sur les perceptions de texture en mettant en lien le temps de déglutition avec les valeurs de G' et de G'' de fromages modèles avant consommation et juste avant déglutition. Un autre étude Panouillé et al. (2014) a aussi montré sur des pains, possédant des structures et des taux de matière grasse différents, que les propriétés viscoélastiques du bol étaient dépendantes des caractéristiques initiales du produit ainsi que de la variabilité inter-individuelle des consommateurs.

Les propriétés du bol peuvent être étudiées *ex situ* par un test de compression à deux cycles (TCPT) qui est une adaptation du TPA. Cette technique consiste à appliquer deux fois de suite sur l'échantillon, une compression à l'aide d'un appareil de compression/traction et de mesurer la force appliquée sur l'échantillon en fonction du temps. A partir de la courbe force-temps obtenue, des paramètres expérimentaux corrélés aux perceptions de textures

TABLEAU 1.1 – Attributs sensoriels et paramètres rhéologiques corrélés dans la littérature (adapté de (Devezeaux de Lavergne et al., 2017))

Attribut Sensoriel	Paramètres issus de la rhéologie
Attributs de textures aux premiers temps de la mastication	
Dureté	Valeur maximum de déformation par fluage
Fermeté	Valeur maximum de déformation par fluage
	Module de Young et de fracture
	Travail à la fracture
	Facteur d'intensité de la contrainte
	Énergie de surface à la fracture
Fracturabilité	Déformation à la fracture
Fragilité	énergie de récupération
Friabilité	Module et contrainte à la fracture
	Maintien en eau
Déformabilité	Déformation à la fracture
Attributs de textures aux temps intermédiaires de la mastication	
Taille de particule	Contrainte et déformation à la fracture
Fréquence masticatoire	Contrainte et déformation à la fracture
Adhésion, collant	$\tan \delta$
	Contrainte à la fracture
Attributs de texture aux temps finaux	
Cohésion	énergie de récupération
	Déformation à la fracture
Granularité	Déformation à la fracture
Crémeux	Déformation et contrainte à la fracture
	Fond en dessous de 37°
Perception des résidus	
Enduction de la langue par les particules	énergie de récupération
	Déformation à la fracture
Humidité de la langue	Synérèse, maintien en eau
	énergie de récupération

sont mesurés tel que l'amplitude du premier pic de force, la fluidité, l'adhésion (Devezeaux de Lavergne et al., 2017).

La rhéologie permet ainsi d'expliquer certaines perceptions de textures à quelques étapes clés du processus oral notamment à la mise en bouche et au cours du premier coup de dent (Tableau 1.1) (Stokes et al., 2013). Néanmoins, elle montre des limitations pour décrire le comportement du bol alimentaire pour des étapes avancées du processus oral.

1.4.3 Caractérisations Tribologiques

La tribologie est le domaine de la mécanique qui s'intéresse à la friction, à l'usure et à la lubrification entre deux surfaces en mouvement. C'est un domaine émergent pour étudier les perceptions de texture car il permet de décrire l'interaction entre les dents, la langue et le palais, les dents et la langue, les joues et la langue (Chen and Stokes, 2012; Stokes et al., 2013).

Le coefficient de frottement est un paramètre mesuré en tribologie. Ce paramètre est constant lorsque les deux surfaces sont sèches mais il évolue en fonction de la force normale

appliquée aux deux surfaces et avec les propriétés rhéologiques du fluide à l'interface. Dans le cas de la tribologie orale, et plus particulièrement dans le contact entre la langue et le palais, les surfaces mises en contact sont déformables et rugueuses, ce qui a un impact sur le coefficient de friction.

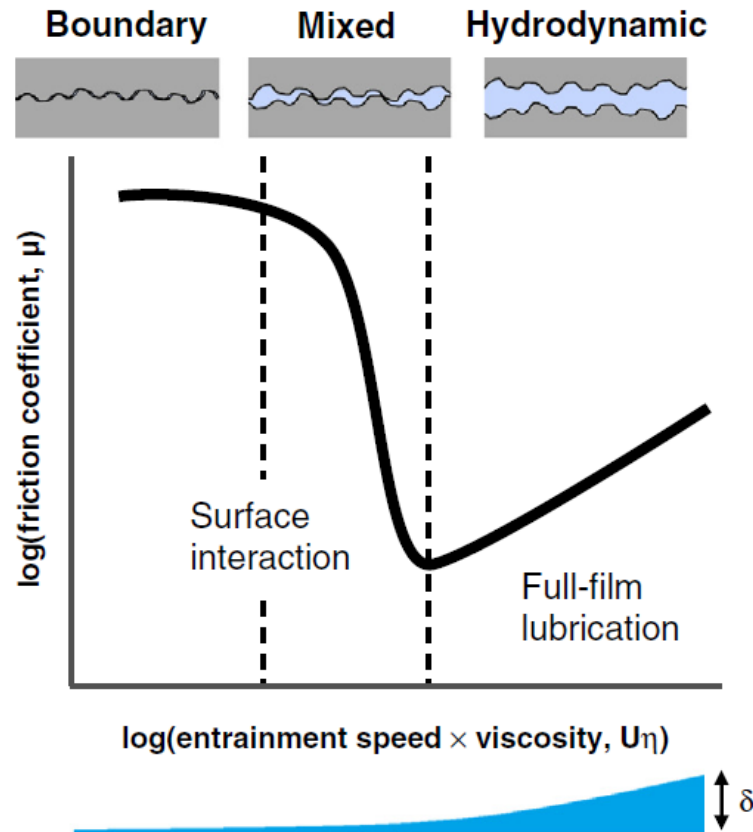


FIGURE 1.21 – Représentation des trois régimes rencontrés en tribologie à partir d'une courbe de Stribeck. μ représente le coefficient de frottement, η représente la viscosité du fluide, U représente la vitesse d'entraînement et δ représente l'épaisseur du film de fluide à l'interface (Selway and Stokes, 2013).

Lorsque deux surfaces compliant et rugueuses sont mises en mouvement l'une par rapport à l'autre, le coefficient de friction varie suivant l'épaisseur du film à l'interface et suivant la grandeur $v * \eta$. Où, v est la vitesse de déplacement des surfaces (m.s^{-1}) et η est la viscosité (Pa.s) du fluide à l'interface. Le tracé du coefficient de friction en fonction de la grandeur $v * \eta$ permet de représenter la courbe de Stribeck (Figure 1.21). En fonction de $v * \eta$ il est possible de distinguer 3 régimes de lubrification (Figure 1.21) :

- Le régime limite et extrême pression, correspondant au cas où le frottement dépend des propriétés physico-chimiques des surfaces et du lubrifiant.
- Le régime mixte qui correspond à un régime de transition entre le régime limite et le régime élasto-hydrodynamique où une partie de la charge est supportée par des zones fluides et une autre partie par un contact entre les deux surfaces.
- Le régime élasto-hydrodynamique qui correspond à un cas où les deux surfaces ne sont plus en contact et où le coefficient de friction dépend à la fois des propriétés visqueuses du fluide à l'interface et aussi des propriétés élastiques des surfaces.

Durant le processus oral, ces trois régimes de lubrification peuvent être rencontrés (Chen and Stokes, 2012).

Il existe plusieurs configurations pour réaliser des essais tribologiques mais la configuration largement utilisée dans la littérature pour étudier la perception de texture est la configuration « pion-sur-disque rotatif » (« pin-on-disk » en anglais) car elle est simple d'utilisation. Sur ce montage, la force appliquée par le pion sur le disque, la vitesse du disque ainsi que les matériaux du disque et du pion sont modulables.

Les propriétés de lubrification des aliments ou des bols alimentaires sont très souvent évaluées à l'aide de surfaces simples comme des surfaces en verre ou TEFLON™. Toutefois celles-ci ne sont pas déformables et restent souvent assez peu pertinentes par rapport aux conditions physiologiques. Pour étudier l'impact des propriétés de lubrification des aliments, combinées avec celles des surfaces orales, des surfaces déformables et rugueuses peuvent être envisagées. Le PolyDimethyl Siloxane (PDMS) est un matériau déformable fréquemment employé dans la littérature (Stokes et al., 2013) car il est possible de moduler ses propriétés mécaniques (module de Young) et de surfaces (hydrophobicité, rugosité) pour mimer celles des tissus oraux comme la langue (Anvari and Joyner, Melito; Anvari et al., 2018; Dresselhuis et al., 2008b; Huc et al., 2016). D'autres études ont utilisé des langues de porc pour avoir des propriétés mécaniques et de surfaces plus proches de conditions physiologiques (Dresselhuis et al., 2008a; Prinz et al., 2007; Ranc et al., 2006a,b). Néanmoins, travailler avec des langues *ex situ* est contraignant, car les propriétés mécaniques des tissus extraits sont peu stables et varient fortement au cours du temps.

Des systèmes expérimentaux ont aussi été utilisés pour étudier l'impact de la salive sur le coefficient de friction, et par la même occasion, sur certaines perceptions de textures comme le crémeux ou l'astringence. Par exemple, les travaux de Dresselhuis et al. (2007) ont mis en évidence l'augmentation du coefficient de friction lorsque l'une des deux surfaces du tribomètre est enduite de salive. Les auteurs expliquent cet effet par l'adhérence des protéines de la salive sur les surfaces du tribomètre. Par contre, l'ajout d'une émulsion entre les deux surfaces, en plus de celle de la salive, a pour conséquence d'abaisser légèrement le coefficient de friction (Dresselhuis et al., 2007; Ranc et al., 2006b). La perception de « gras » pourrait être reliée à cette diminution du coefficient de friction (Dresselhuis et al., 2008a). Par ailleurs, des liens ont été mis en évidence entre coefficients de friction et la perception d'astringence en présence de salive et de β -lactoglobuline (Vardhanbuthi et al., 2011) ou de tanins (Brossard et al., 2016).

La tribologie est ainsi une méthode instrumentale complémentaire aux méthodes rhéologiques. Elle a permis en particulier d'expliquer des perceptions de texture pour des étapes avancées du processus oral comme : la perception de « lisse », la perception de « gras », la perception de « crémeux » (Stokes et al., 2013) ou encore la perception d'« astringent » (Brossard et al., 2016).

1.4.4 Vers le besoin de développement de méthodes *in situ* pour caractériser le système langue-aliment-palais

L'analyse de la littérature a permis de mettre en avant un ensemble de méthodes instrumentales pertinentes mais qui restent toutefois assez éloignées des conditions réelles

de consommation. En effet, il s'agit de méthode *in vitro* ou *ex situ*, mais en aucun cas ces méthodes ne peuvent être réalisées en condition réelle de consommation (*in vivo*). A notre connaissance, seule l'étude de [van Aken \(2013\)](#) a porté sur l'étude *in vivo* du contact entre la langue et le palais. Cette étude présente une méthode permettant d'analyser le signal acoustique généré par le contact (friction, adhésion) entre la langue et le palais dur et il est enregistré à l'aide d'un capteur placé sur une des incisives supérieures. Ce signal acoustique s'est montré sensible à la teneur en matière grasse, au temps de nettoyage et à l'histoire mécanique des produits laitiers testés. De plus, ce signal a pu être mis en lien avec la perception de « lisse », « lubrifiant », « crémeux » opposé aux perceptions « rugueux », « astringent » et « sec ». Cette méthode montre ainsi une sensibilité à l'aliment testé et un lien aux perceptions de textures, néanmoins à ce niveau de développement, elle ne permet pas d'évaluer un coefficient de friction et elle est limitée pour décrire la physique du contact langue/palais.

La formation du bol alimentaire au cours du processus oral est une étape dépendante des propriétés rhéologiques de l'aliment, du consommateur et de l'interaction aliment /consommateur via le processus oral ([Mosca and Chen, 2016](#)). Il s'agit d'un processus difficilement modélisable et prédictible puisqu'il est individu dépendant. Pour cette raison, de nombreuses études ont porté sur la caractérisation de bol *ex situ* (après expectoration du bol alimentaire) ou *in vitro* (à l'aide d'appareils imitatifs comme des masticateurs *in vitro*). La caractérisation de bols réels (après expectoration) est complexe et lourde car les bols sont instables et très variables d'un individu à l'autre. L'utilisation de système *in vitro* est une alternative intéressante permettant de s'affranchir des différences interindividuelles et permettant de découpler les mécanismes. Toutefois, de nombreuses études utilisent des salives artificielles pour mimer les conditions ou mécanismes physiologiques. Ces salives artificielles ont des compositions et propriétés rhéologiques très différentes de celles d'une salive réelle ([Panouillé et al., 2016](#)) mettant clairement en avant les limites des méthodes *in vitro*. Les principales limites de ces méthodes ont été soulignées par [Panouillé et al. \(2016\)](#) :

- L'utilisation d'un seul paramètre instrumental pour expliquer les perceptions de textures qui sont fortement multifactorielles.
- La difficulté de mimer la trajectoire complexe des propriétés mécaniques de l'aliment et la complexe géométrie de la cavité orale.
- La difficulté de prendre en compte l'impact d'une salive réelle.

Par conséquent, une approche *in situ* et en temps réel permettrait de faire le lien entre les temps initiaux du processus oral où les propriétés de volumes sont prépondérantes, et les temps avancés du processus oral où les propriétés de surface sont prédominantes sur les stimuli mécaniques.

TABLEAU 1.2 – Tableau bibliographique général non exhaustif présentant la composition d'aliments modèles semi-solides et les techniques de caractérisation mécaniques et sensorielles utilisées par quelques études

Type de Gel	Composition	Méthode instrumentale	Propriétés mécaniques étudiées	Méthode sensorielle	Perceptions étudiées	Références
Gel	Agarose	Torsion	Contrainte et elongation à la rupture, module de fracture	Analyse descriptive	Dureté, fermeté, cohésion, mastica-bilité, taille de particule	(Barrangou et al., 2006a)
Gel mixte	Gélatine, WPC	Compression uni-axiale, test en cisaillement oscillant	Module de Young, contrainte et elongation à la rupture	-	-	(Walkenström and Hermansson, 1997)
	Galactomannans, ι -carraghénane, WPI, gomme de gellane à faible acyl, gomme de xanthane, κ -carraghénane, GSK- carraghénane, gomme de caroube	Compression uni axiale	Module de Young, contrainte et elongation à la rupture	-	-	(de Jong and van de Velde, 2007)
	WPI, GDL, Gellan gum low acyl, gomme de caroube, κ -carraghénane, pectine.	Compression uni axiale	Contrainte et elongation à la rupture	QDA	Ferme, friable, étalable, humide	(van den Berg et al., 2007c)
	WPI, gomme de Gellan faible acyl, GDL	Compression uni axiale	Contrainte et elongation à la rupture	QDA	Ferme, friable, étalable, humide ré-silient	(van den Berg et al., 2007b)
	WPC, λ - carrageenan	Test en cisaillement oscillant TPA	G' , G'' , δ , propriétés textu- rales (TPA)	-	-	(Spahn et al., 2008)
	WPI, gomme de gellane à faible acyl, κ -carraghénane, gomme de caroube, pectine, GDL	Test en cisaillement oscillant	G' , G''	-	-	(de Jong et al., 2009)
	WPI, κ -carraghénane	Test en cisaillement oscil-lant, Torsion	G' , G'' , δ , elongation et contrainte à la rupture	-	-	(Çakır and Foege-ding, 2011)
	Gomme de gellane, gomme de graine de psyllium	Test en cisaillement oscillant sur bol artificiel	G' , δ	-	-	(Ishihara et al., 2014)

Type de Gel	Composition	Méthode instrumentale	Propriétés mécaniques étudiées	Méthode sensorielle	Perceptions étudiées	Références
	WPI, κ -carraghénane, NaCl	Compression uni axiale, flexion	Module de Young, contrainte et élongation à la rupture, contrainte critique, Energie de contrainte libérée	QDA	Élasticité, compressibilité, fermeté, fracturable, relargage d'eau, taille des particules, distribution de taille de particule, cohésion, taux de fracture, poudreux, adhésion.	(Çakır et al., 2012)
	Gomme de gellane, gomme de graine de psyllium	Compression uni axiale	Courbe contrainte déformation	NC	Cohésion, adhésivité	(Funami et al., 2012)
	Gomme de gellane, protéine de soja	Test en cisaillement oscillation, compression uni axiale,	Module de Youg, contrainte et élongation à la rupture, G' , G'' , δ	-	-	(Guo et al., 2014)
	Agar, κ -carraghénane, gomme de caroube	Compression uni axiale, torsion, tension	Contrainte et élongation à la rupture, énergie de fracture de surface, facteur d'intensité de contrainte	-	-	(Koç et al., 2014)
	Gélatine, WPI, GDL	Test en cisaillement oscillation, TPA	G' , G'' , δ , propriétés texturales (TPA)	-	-	(Pang et al., 2015)
Émulsion gélifiée	WPI (gélifiant), huile de tournesol	Torsion	Propriétés à la fracture	Analyse descriptive basé sur le profil de texture	Lisse de surface, glissant de surface, élastique compressible, ferme, humide, friable, taille de particule, distribution de taille de particule, forme des particules, bol lisse, taux de fracturation, adhésion, le nombre de coup de dent, le temps pour préparer le bol	(Gwartney et al., 2004)
	WPI, κ -carraghénane, gélatine, huile de tournesol, TWEEN 20, GDL, saccharine	Compression uni axiale	Propriétés à la fracture	QDA	Ferme, élastique, dur, froid, glissant, gras, spongieux, effort au friable, friable, fibreux, crémeux, étalement, fondant, rugueux, sec, granuleux, collant, humide,	(Sala et al., 2007)

Type de Gel	Composition	Méthode instrumentale	Propriétés étudiées	mécaniques	Méthode sensorielle	Perceptions étudiées	Références
	WPI, κ -carraghénane, ι -carraghénane, gélatine, MCT, GDL	Compression uni axiale	Propriétés à la fracture		QDA	Ferme, élastique, glissant, crémeux, mou, étalement, fondant, friable, rugueux, froid, collant, humide	(Sala et al., 2008)
	gélatine, κ -carraghénane, WPI, TWEEN20, MCT, GDL	Compression uni axiale	Propriétés à la fracture		-	-	(Sala et al., 2009a)
	gélatine, κ -carraghénane, WPI, TWEEN20, MCT, GDL	Compression uni axiale	Propriétés à la fracture		-	-	(Sala et al., 2009c)
	Poudre de rétentat de lait écrémé, matière grasse laitière, GDL, présure	Rhéomètre (faible déformation oscillation), TPA, compression uni axiale	G' , G'' , $\tan \delta$, propriétés texturales, module de Young, elongation et contrainte à la rupture		QDA	Humide, élastique, friable, ferme, collant, gras	(Panouillé et al., 2011)
	Fromages du commerce avec teneur en MG et extrait sec variable	Test oscillant dynamique, caractérisation de bol (test oscillant dynamique, test d'étalement)	G' , G'' , étalement et adhésion du bol		PP, TDS	Dureté, fermeté, élasticité, cassant, fondant, collant, hétérogénéité, épais, enduction de la langue	(Saint-Eve et al., 2015)
	WPI, TWEEN20, Agar, Gélatine, huile de tournesol	Compression uni axiale	Module de Young, contrainte et elongation à la rupture		QDA, TI, TDS	Collant, ferme, élastique, cassant, humide, rugueux, astringent, étalement, crémeux, gras, granuleux	(Devezeaux de Lavergne et al., 2015a)
	WPI, TWEEN20, Agar, Gélatine, huile de tournesol	Test de pénétration à deux cycles (sur bol) (TCPT)	Force du premier pic de force, résilience, adhésion, relaxation, fluidité		QDA, TI, TDS	Collant, ferme, élastique, cassant, humide, rugueux, astringent, étalement, crémeux, gras, granuleux	(Devezeaux de Lavergne et al., 2015b)
	Graisse de boeuf, graisse de porc, graisse de volaille, gélatine, WPI, Tween 20, huile de paraffine	Compression uni axiale, tribomètre optique	Module de Young, contrainte et elongation à la rupture, force de friction		QDA	Ferme, élastique, cassant, morceaux, étalement, sec, humide, fondant, gras, collant, glissant, crémeux, astringent, gluant	(Liu et al., 2015)
	Agar, gélatine, WPI, huile de tournesol	Compression uni axial, tests de double pénétration	Module de Young, contrainte et elongation à la fracture, Energie de fracture, force du premier pic, résilience, adhésion, relaxation		TDS	Ferme, élastique, glissant, effort au friable, friable, crémeux, fondant, rugueux, granuleux, collant, humide, poudreux	(Devezeaux de Lavergne et al., 2016)

Type de Gel	Composition	Méthode instrumentale	Propriétés mécaniques étudiées	Méthode sensorielle	Perceptions étudiées	Références
	Agar, gélatine, gomme de caroube, κ -carraghénane, gomme de gellane, TWEEN 20, huile de tournesol	Compression uni axiale, test en cisaillement oscillant, tribomètre	Module de Young, contrainte et elongation à la fracture, Energie à la relaxation, coefficient de friction, G' (fonte gel)	QDA	Collant, ferme, élastique, cassant, humide, rugueux, astringent, étalement, crémeux, gras, granuleux, poudreux, épais, rugueux, poivre, résiduelle	(Devezeaux de Lavergne Marine et al., 2015)
	MWP, WPI, gélatine	Cisaillement continue, compression uniaxiale, tribologie	Viscosité, ϵ_f , σ_f , E, coefficient de friction	QDA	Epais, crémeux, poudreux, sec, rugueux, gras	(Liu et al., 2016)
Émulsion	Gomme de guar, huile de tournesol, triodan	Tribomètre	Coefficient de friction	-	-	(Malone et al., 2003)
	Amidon, MG Laitière	Tribomètre, test en cisaillement	Coefficient de friction, G' , G'' , η	QDA	Crémeux, rugueux, aéré, hétérogène, fondant, épais	(de Wijk et al., 2006a)
	Huile de tournesol, WPI, huile d'olive, huile de ricin, MCT	Tribomètre	Coefficient de friction	QDA	Epais, crémeux, gras, glissant, gluant, sec, astringent	(Dresselhuis et al., 2007)
	CMC	Tribomètre (langue de porc)	Coefficient de friction	-	-	(Prinz et al., 2007)
	MCT-huile	Tribomètre (Silicone)	Coefficient de friction	-	-	(Ranc et al., 2006b)
	MWP, WPI, gélatine	Cisaillement continue, compression uniaxiale, tribologie	Viscosité, ϵ_f , σ_f , E, coefficient de friction	QDA	Epais, crémeux, poudreux, sec, rugueux, gras	(Liu et al., 2016)

MCT (Medium-Chain-Triglyceride) : triglycéride à chaîne Moyenne, MG (Matière Grasse), CMC (Carbo-méthyl-cellulose), GDL (Glucosyl-Lactone), WPI (Whey Protein Insulated) : isolat de protéines sériques, WPC (Whey Protein Concentrated) : concentré de protéines sérique, QDA (Quantitative Descriptive Analysis) : analyse descriptive statistique, TPA (Texture Profil Analysis) : analyse du profil de texture, NC (Non Communiqué).

1.5 Le potentiel des Ultrasons Quantitatifs

Face à la nécessité du développement de méthodes non invasives et non destructives de suivi du processus oral, le but de cette section est de décrire les éléments de contexte qui nous ont conduits à étudier le potentiel des méthodes ultrasonores au cours de cette thèse.

1.5.1 Généralités

Les ondes ultrasonores sont des ondes mécaniques caractérisées par des fréquences qui dépassent le domaine de l'audible de l'oreille humaine (supérieures à 20 kHz). Ces ondes mécaniques correspondent aux mouvements oscillatoires des particules de la matière autour de leur position d'équilibre et qui se propagent de proche en proche dans les différents milieux. On peut distinguer deux modes de propagation :

- Les ondes longitudinales, ou ondes de compression, pour lesquels le déplacement des particules se fait dans la direction de propagation de l'onde.
- Les ondes transverses, ou ondes de cisaillement, pour lesquelles le déplacement des particules s'effectue perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde dans des milieux isotropes. Ce deuxième mode est propre aux milieux solides car il repose sur l'élasticité de cisaillement du milieu de propagation.

Une onde ultrasonore est principalement caractérisée par une amplitude A (unité arbitraire) et une fréquence f (en Hz), qui sont induites par les caractéristiques du capteur et du système de génération. Plusieurs caractéristiques de l'onde ultrasonore dépendent quant à elles du milieu de propagation. Parmi elles, on distingue la longueur d'onde λ (en m) et le coefficient d'atténuation α (en Np.m^{-1}), tous deux dépendants de la fréquence. La vitesse de propagation de l'onde ultrasonore c (en m.s^{-1}) correspond à la distance traversée par l'onde par unité de temps. Elle est reliée à la longueur d'onde et à la fréquence, de telle sorte qu'il s'agit d'une caractéristique propre au milieu de propagation :

$$c = \lambda \cdot f \quad (1.4)$$

La vitesse ultrasonore dépend des modules élastiques et de la densité du milieu de propagation. Dans le cas d'un solide homogène isotrope, la vitesse d'une onde de compression c_L s'écrit :

$$c_L = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3} \cdot G}{\rho}} \quad (1.5)$$

Où K est le module d'élasticité isostatique (exprimé en Pa, il s'agit de l'inverse de la compressibilité χ du matériau), G est le module élastique de cisaillement (exprimé en Pa) et ρ est la masse volumique (en kg.m^{-3}). Pour le cas d'une onde de cisaillement, la vitesse c_T dans le même type de solide s'écrit :

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1.6)$$

Cependant, pour la plupart des produits alimentaires (et notamment les aliments semi-solides qui nous intéressent particulièrement dans la thèse) comme pour les tissus mous (comme la langue), le module de cisaillement est négligeable devant le module isostatique (Parker and Povey, 2012). La vitesse de propagation des ondes de compression peut alors s'écrire :

$$c_L = \sqrt{\frac{1}{\chi \cdot \rho}} \quad (1.7)$$

Où χ (en Pa^{-1}) est donc la compressibilité du milieu.

Dans le cas de milieux viscoélastiques, les modules K et G sont des modules complexes, qui dépendent de la fréquence. Ils peuvent ainsi être décomposés en une partie conservative (K' et G') et une partie dissipative (K'' et G''). La caractérisation ultrasonore peut ainsi être assimilée à une caractérisation rhéologique dynamique, où la fréquence est plutôt de l'ordre du MHz, là où les mesures rhéologiques ne dépassent pas le kHz.

Le coefficient d'atténuation α renseigne quant à lui sur la rapidité avec laquelle l'amplitude de l'onde décroît lors de sa propagation dans un matériau. Ainsi, plus le coefficient d'atténuation est important, plus la diminution d'amplitude est importante. Les deux principales sources de l'atténuation de l'onde ultrasonore sont les pertes d'énergie par absorption et par diffusion. L'absorption est due à la transformation de l'énergie mécanique en chaleur, par des phénomènes de friction interne (liés par exemple à la viscosité), ainsi qu'au temps de relaxation des molécules (retour à leur position initiale après le passage de l'onde). La diffusion correspond quant à elle aux pertes énergétiques dans les milieux hétérogènes comme les émulsions, les suspensions, ou encore les mousses. Une part de l'énergie acoustique est alors réémise par la présence d'objets dans des directions différentes de l'onde incidentes. On peut distinguer plusieurs types de régimes de diffusion, selon le rapport entre la taille caractéristique des objets ϕ et la longueur d'onde λ du faisceau ultrasonore : diffusion directionnelle si $\phi \gg \lambda$, antérieure et postérieure si $\phi \sim \lambda$ ou encore omnidirectionnelle si $\phi \ll \lambda$. Le coefficient d'atténuation ultrasonore s'exprime en Neper par mètre (Np.m^{-1}), dérivant de l'équation suivante :

$$A = A_0 e^{-\alpha x} \quad (1.8)$$

Où A_0 est l'amplitude de l'onde au point d'émission et x est la distance à la source. Les mesures de vitesse et d'atténuation ultrasonores sont à la base de nombreuses techniques ultrasonores quantitatives.

Au-delà de leur sensibilité aux propriétés mécaniques et structurales intrinsèques des milieux qu'elles traversent, les ondes ultrasonores présentent également l'intérêt d'être influencées par les interfaces qu'elles rencontrent. Ainsi, à l'interface entre deux milieux 1 et 2, une part de l'onde est réfléchiée (repartant dans le milieu 1), tandis que l'autre part est transmise dans le milieu 2. Les parts d'énergie transmises et réfléchiées dépendent notamment des impédances acoustiques des milieux situés de part et d'autre de l'interface. Notée Z et exprimée en Rayleigh (Ray), l'impédance acoustique correspond au produit entre la vitesse ultrasonore c et la masse volumique ρ . Ainsi, lorsque l'onde incidente arrive perpendiculairement à l'interface, le coefficient de réflexion sera alors dépendant de la différence

d'impédance des deux milieux :

$$R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad (1.9)$$

Plus la différence d'impédance acoustique entre les deux milieux est grande, plus le coefficient de réflexion est élevé. Pour un coefficient de réflexion proche de 1, on parle de réflexion totale. C'est par exemple le cas entre l'eau ($Z = 1.5$ MRay à 20 °C) et l'air ($Z = 413$ Ray à 20 °C).

En incidence oblique, certaines orientations de faisceaux peuvent conduire à des phénomènes de conversion de mode (une onde de compression devient une onde de cisaillement, ou réciproquement). Par ailleurs, les angles de réflexion et de réfraction dépendent des vitesses ultrasonores dans les différents milieux. Par ailleurs, l'interaction entre l'onde et l'interface dépend également de l'état de surface au niveau de l'interface, la présence de rugosités pouvant induire des phénomènes de diffusion.

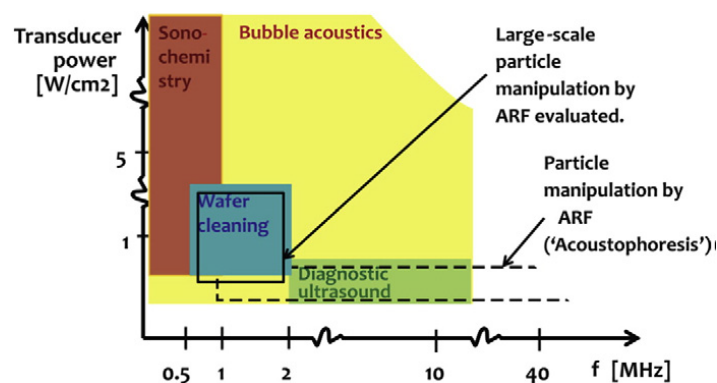


FIGURE 1.22 – Domaine de l'acoustique en fonction de l'énergie et de la fréquence de l'onde (Povey, 2017)

Dans ce projet de thèse, nous nous intéressons aux méthodes ultrasonores à faible intensité, pour lesquelles l'énergie du faisceau émis est non destructive pour les milieux étudiés (Figure 1.22). Dans ce régime, les déformations induites par le passage des ondes se font dans le domaine élastique. Contrairement aux méthodes à haute intensité, elles n'ont donc aucune incidence irréversible sur le milieu de propagation.

Ces ondes sont générées par des transducteurs ultrasonores. Dans la plupart des cas, ils sont constitués d'éléments piézoélectriques munis d'électrodes. L'application d'une différence de potentiel entre les électrodes permet de faire entrer l'élément piézoélectrique en vibration, générant ainsi une onde ultrasonore. Inversement, lorsqu'une onde ultrasonore est rétrodiffusée vers le transducteur, l'élément piézoélectrique permet de convertir cette onde en un signal électrique. Le transducteur sert ainsi à la fois d'émetteur et de récepteur. Les propriétés de l'onde (sa fréquence, sa polarisation, sa focalisation) peuvent varier en fonction de la taille de l'élément piézoélectrique, ou encore en couplant le transducteur à des lentilles acoustiques.

1.5.2 Les Ultrasons Quantitatifs pour caractériser les aliments

Les méthodes ultrasonores quantitatives ont fait l'objet de nombreuses applications dans le domaine de l'agro-alimentaire, qu'il s'agisse de caractériser les propriétés des aliments ou d'effectuer le suivi d'opérations de transformation diverses. Les méthodes quantitatives reposent essentiellement sur la mesure des paramètres de vitesse d'atténuation et de réflectivité décrits dans la section précédente. Ces mesures peuvent être effectuées dans des cellules dédiées qui permettent un contrôle de la température et une connaissance précise des éléments de géométries nécessaires à la détermination des paramètres (voir Figure 1.23). Cependant, les mesures peuvent également être réalisées en conditions *in situ* (sur la ligne de transformation, dans l'espace de stockage, ou encore à travers un emballage).

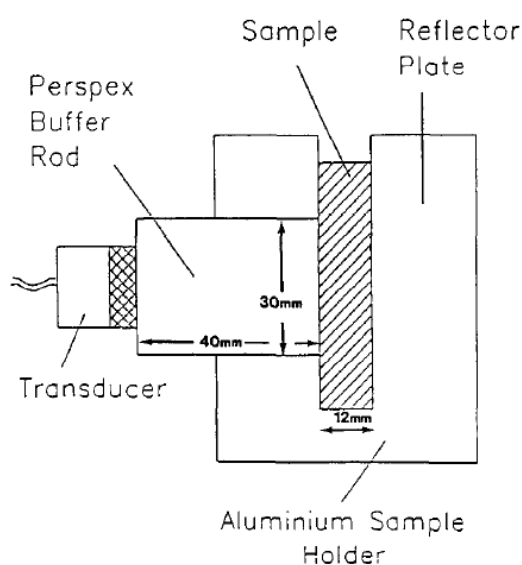


FIGURE 1.23 – Schéma de principe d'une cellule de mesure ultrasonore du type Ultrasound Pulse Echo Receiver (UPER) (McClements and Fairley, 1991) (Perspex=PMMA)

On dénombre des applications sur tous types d'aliments : produits carnés, fruits et légumes, produits céréaliers, produits gras et émulsionnés, mousses ou encore gels. La mesure des paramètres ultrasonores a ainsi pu permettre de suivre l'évolution de certaines propriétés clés au sein de l'aliment, par l'impact de ces propriétés sur les caractéristiques mécaniques et structurales de l'aliment. Parmi ces propriétés de l'aliment, on peut citer (McClements and Gunasekaran, 1997)

- Des facteurs de composition comme le taux de sucre ou de matière grasse.
- Des phénomènes de transition de phase comme la fusion de la matière grasse dans les produits.
- Des données structurales la distribution de la taille des particules au sein d'un aliment.
- Des changements de conformation structurale dans les réseaux de biopolymères.
- Des évolutions de la température.

Le Tableau 1.3 présente un tableau tiré de la revue de McClements and Gunasekaran (1997) qui récapitule un ensemble large de mesures qui ont pu être réalisées.

TABLEAU 1.3 – tableau de synthèse des mesures ultrasonores réalisée dans des produits alimentaires (McClements and Gunasekaran, 1997). c , α , Z et t représentent respectivement la vitesse, l'atténuation, l'impédance et le temps de vol des ultrasons.

Application	Food Material	Property measured
Composition	Sugar concentration of aqueous solution	c
	Salt concentration of brine	c
	Triglycerides in oils	c, α
	Droplet concentration of emulsions	c, α
	Alcohol content of beverages	c
	Air bubbles in aerated foods	c, α, Z
	Composition of milk	c, α
	Ratio of fat to lean in meat	α
	Biopolymer concentration in gels	c, α
Phase transition	Milk fat globules	c, α
	Triglycerides in fatty foods	c, α
	Water in meat	c, α
Particle Size	Oil droplets in salad cream	c, α
	Milk fat globules	c, α
	Casein micelles	c, α
	Air bubble in aerated foods	c, α, Z
Miscellaneous	Quality of eggs	c, α
	Ripeness and quality of fruits	c, α, Z
	Texture of biscuits	c, α
	Gelation of gels	c, α
	Cracks in cheese	c, α, Z
	Flow rate of liquids in pipes	t
	level of liquids in tanks	t
	Detection of extraneous matter	t, Z
	Monitoring enzymatic reactions	c, α
	Molecular interactions of solutes	c, α
	Structure of biopolymers	c, α
	Creaming profiles of emulsion droplets	c, α
	Temperature of foods	t
	Imaging of microbial growth	t, Z

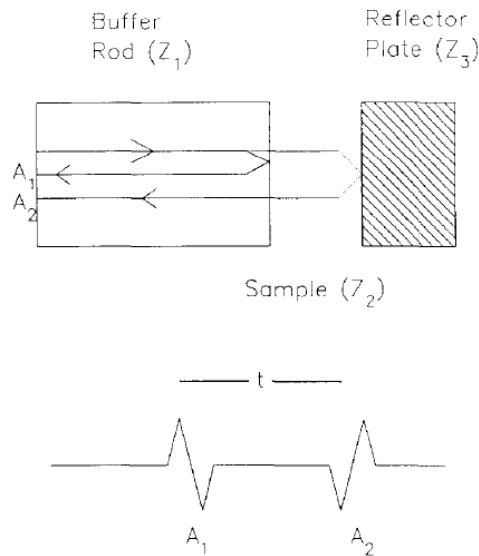


FIGURE 1.24 – Représentation de la propagation des ondes au travers d'une cellule de type UPER (McClements and Fairley, 1991)

Pour le cas des aliments semi-solides qui ont fait l'objet d'un intérêt tout particulier au cours de la thèse, certaines études ont porté sur le suivi par ultrasons quantitatifs de la gélification de certains systèmes de bio-polymères comme la gélatine (Emery et al., 1986; Parker and Povey, 2012), l'agar (Cobus et al., 2007; Gettins et al., 1978), ou des mélanges de polysaccharides divers (Audebrand et al., 1995). Ces études ont pu montrer la sensibilité de l'atténuation ultrasonore à l'évolution de différents paramètres de structure au sein des gels, comme le changement de conformation des chaînes de gélatine, les séparations de phases dans le cas de mélanges de polymères ou encore la dispersion dans les milieux hétérogènes.

1.5.3 Investigation de la cavité orale par l'échographie

Par leur nature non-invasive et non-destructive, les méthodes ultrasonores ont également fait l'objet de nombreuses applications pour l'exploration de la cavité orale, notamment grâce aux méthodes d'échographie.

L'une des premières utilisations de l'échographie ultrasonore dans la cavité orale pour étudier la structure de la langue afin d'identifier le mouvement de certains muscles de la langue au cours de l'élocution de quelques phonèmes (Shawker et al., 1984) en plaçant la sonde sous le menton (Figure 1.25 et Figure 1.26). Elle a également permis d'étudier les mouvements de la langue au cours de l'élocution de volontaires, afin de comprendre la création de la parole (Stone, 2005) et d'identifier des troubles de l'élocution (Shawker et al., 1984). Le mouvement de la langue a aussi été étudié au cours de la déglutition d'aliments liquides (Chi-Fishman, 2005; Galén and Jost-Brinkmann, 2010; Peng et al., 2000, 2007; Yu, 2015) et semi-solides (de Wijk et al., 2006b) afin de connaître les conditions de déformations imposées au cours du processus oral. Par ailleurs le mouvement de la langue a aussi été évalué par échographie pour comprendre l'origine de l'apnée du sommeil (Chien et al., 2017; Weng et al., 2017), pour étudier la phase de déglutition de patient dysphagiques (qui ont un

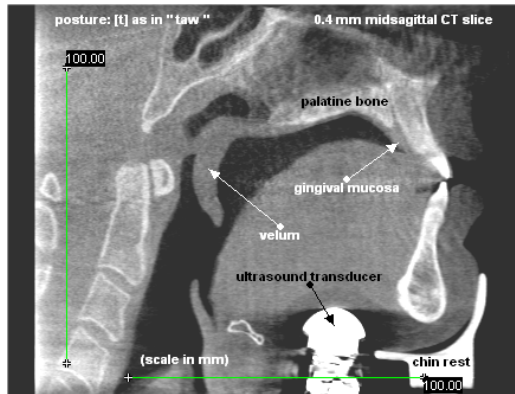


FIGURE 1.25 – Radiographie par rayons X de la cavité orale qui illustre le positionnement d'une sonde échographique sous le menton d'un individu. (Epstein and Stone, 2005)

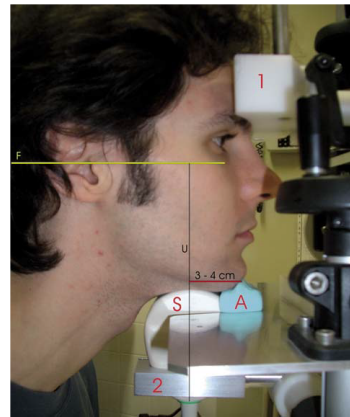


FIGURE 1.26 – Positionnement du volontaire et de la sonde échographique (Galén and Jost-Brinkmann, 2010)

trouble de la déglutition) (Hsiao et al., 2012; Kim and Kim, 2012) et aussi pour étudier la déformation de la langue au cours de la compression langue/palais (Gao et al., 2016b).

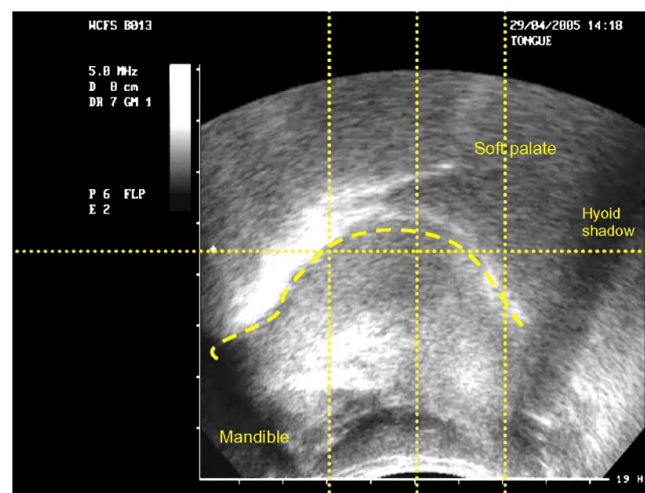


FIGURE 1.27 – Image échographique d'une langue (de Wijk et al., 2006b)

Ces différentes applications montrent ainsi l'accessibilité des ondes ultrasonores à la cavité orale, et permettent ainsi d'ouvrir des perspectives quant à l'étude du système langue-aliment-palais au cours du processus oral.

1.6 Objectifs des travaux de thèse et démarche expérimentale

Cet état de l'art a permis de décrire l'importance du processus oral, et notamment du rôle de la langue, dans les mécanismes de perception de texture. Plusieurs approches comme la rhéologie et la tribologie ont permis des avancées considérables dans l'identification et la compréhension de différentes interactions entre la langue et l'aliment à l'origine de ces perceptions, associées à certaines étapes particulières du processus oral. Cependant, elles ont également mis en évidence la nécessité du développement de méthodes dynamiques,

afin de suivre le système langue-aliment en temps réel tout au long du processus oral, et ce de façon non invasive et non destructive. De telles méthodes doivent permettre de mieux intégrer, tout au long de la déconstruction en bouche, les parts respectives des propriétés des aliments (puis du bol) et de la physiologie orale dans la génération des stimuli mécaniques responsables des perceptions. Le potentiel reconnu des méthodes ultrasonores pour explorer la cavité orale et caractériser les propriétés mécaniques et structurales des aliments en font des candidates de premier plan pour le suivi en temps réel du système langue-aliment. Cependant, à ce jour, la question n'a pas encore été abordée.

Dans ce contexte, l'objectif de ces travaux de thèse est d'étudier le potentiel des méthodes ultrasonores quantitatives pour caractériser et étudier des phénomènes physiques lors de la compression de l'aliment entre langue et palais, et impliqués dans les perceptions de texture. Sur la base des méthodes d'exploration *in vivo* disponibles dans la littérature, nous proposons d'utiliser un transducteur ultrasonore sous la cavité orale, de façon à enregistrer en temps réel la réponse échographique des différents milieux successivement traversés, qui incluent les tissus mous et la langue, l'aliment, puis le palais. Cependant, l'hétérogénéité des tissus de la langue, les irrégularités géométriques des interfaces de la cavité orale, les variations de température ou encore la nature complexe des séquences de mouvements de la langue sont autant de facteurs qui impactent fortement les phénomènes de propagation des ondes ultrasonores. Ainsi, au cours de la thèse, le caractère pionnier de la méthode nous a conduit à en étudier son potentiel dans un environnement contrôlé, à l'aide d'un système biomimétique. L'avantage de cette approche est qu'elle permet de prendre en compte progressivement différents aspects de la complexité de l'environnement physiologique, et d'en analyser les contributions respectives sur la réponse ultrasonore. En effet, la propagation des ultrasons au travers du système biomimétique est dépendante des propriétés de volume de la langue et de l'aliment, ainsi que des propriétés de l'interfaces langue-aliment. Pour cela, nous avons décomposé pas à pas les mécanismes, afin de découpler et de mieux comprendre la part des signaux ultrasonores expliquée par l'aliment et par les interfaces entre la langue et l'aliment (Figure 1.28). Par conséquent, afin d'identifier les informations mesurables par la méthode par ultrasons quantitatifs et pouvant expliquer les perceptions de texture, la démarche expérimentale de cette thèse a été découpée en 5 étapes où l'impact de chaque élément du système a été étudié séparément :

1. Dans un premier temps, l'impact des propriétés de volumes (la composition, la structure, les propriétés mécaniques) des aliments modèles ont été explorées sur 3 paramètres ultrasonores d'intérêts (vitesse, réflectivité, atténuation) (Figure 1.28.1).
2. Ensuite, le potentiel de la réflectivité ultrasonore a été étudié pour caractériser l'interface langue-aliment au moment de la mise en contact de gels modèles sur des surfaces non-déformables, rugueuses et lubrifiées jouant le rôle de la langue (Figure 1.28.2).
3. Dans la continuité de l'étape 2, un suivi de la réflectivité a été réalisé pour observer l'évolution de l'interface langue-aliment au cours de la compression uni-axiale des produits. (Figure 1.28.3).
4. Par la suite la déformabilité de la langue a été prise en compte pour examiner, pendant la compression uni-axiale des produits, l'évolution de la réflectivité ultrasonore et du

temps de propagation des ultrasons dans les aliments. (Figure 1.28.4).

- Enfin, les liens entre les mesures ultrasonores acquises sur le montage *in vitro* et les perceptions de textures ont été examinés en confrontant les résultats provenant des analyses sensorielles des produits étudiés à ceux provenant des mesures ultrasonores (Figure 1.28.5).

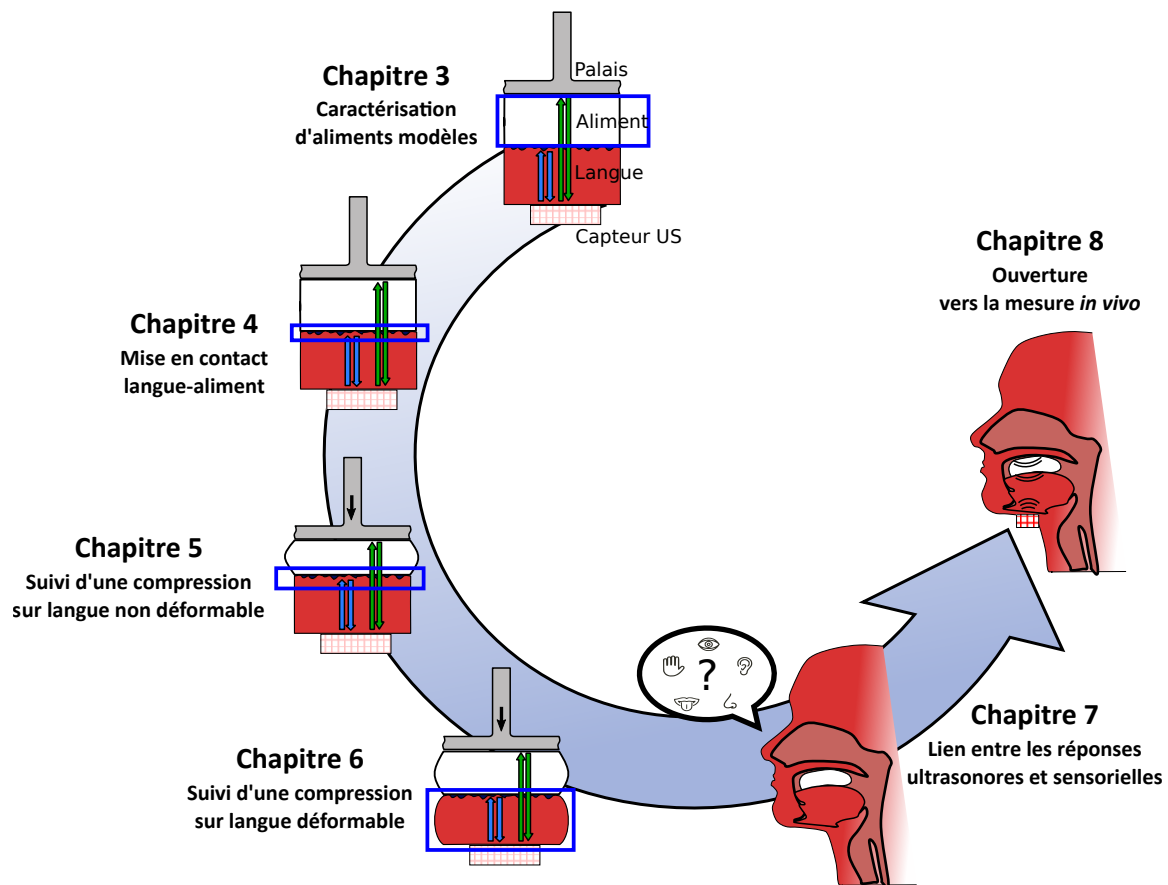


FIGURE 1.28 – Représentation de la démarche expérimentale de la thèse. Chaque étape correspond à l'étude de l'impact d'un composant du système langue-aliment-palais sur la mesure US.

Chapitre 2

Matériels et méthodes : Développement du système expérimental

Sommaire

2.1	Présentation de la technique par US quantitatifs développée au laboratoire . . .	50
2.2	Conception d'un dispositif biomimétique du système langue-aliment-palais . .	51
2.2.1	Description générale	51
2.2.2	La langue biomimétique	52
2.2.2.1	Langues non déformables en PVC	53
2.2.2.2	Langues déformables en PVA	55
2.3	Traitement des signaux ultrasonores	58
2.3.1	Filtrage des signaux	59
2.3.2	Identification et extraction des échos	60
2.3.3	Détermination des temps d'occurrence t_0 et t_1	60
2.3.4	Détermination des amplitudes A_0 et A_1	61
2.3.5	Calcul des paramètres ultrasonores d'intérêt	62

Le caractère innovant de l'application d'une méthode ultrasonore à l'étude du système langue-palais a conduit à de nombreux développements expérimentaux et méthodologiques tout au long de la thèse. Ce chapitre, composé de trois parties, a pour but de mettre en avant les travaux de conception, de validation et de développement sur ces outils et méthodes, qui ont constitué une part très significative du travail de la thèse. La première partie concerne la description du système d'analyse ultrasonore. La deuxième décrit la conception du dispositif biomimétique mis en œuvre pour l'étude de la preuve de concept de la méthode ultrasonore. Enfin, la troisième partie a pour but d'expliquer les méthodes de traitement du signal employées pour extraire les informations d'intérêt à partir des données ultrasonores acquises au cours de la déconstruction de l'aliment sur le système biomimétique.

2.1 Présentation de la technique par US quantitatifs développée au laboratoire

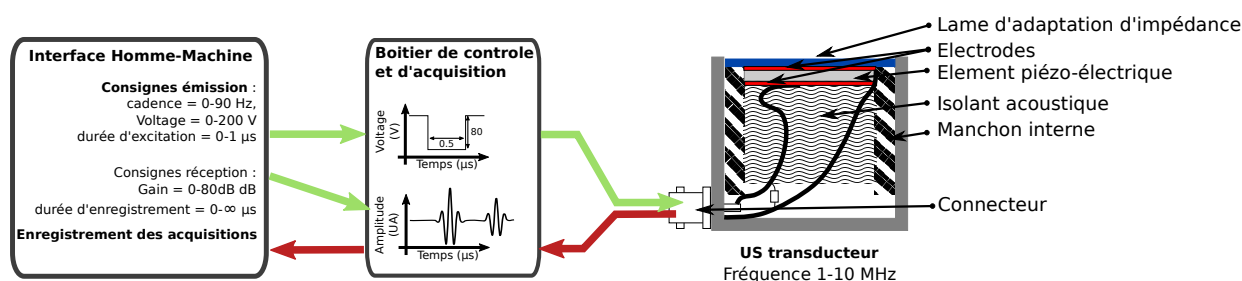


FIGURE 2.1 – Schéma d'interactions des différentes composantes du système d'analyses ultrasonores. Les flèches représentent les informations transmises entre les blocs : vertes pour les données entrantes, rouges pour les données sortantes

L'élément central du système est le transducteur mono-élément qui permet d'émettre et de recevoir les ondes ultrasonores (voir Figure 2.1). Celui-ci est composé d'un élément piézo-électrique qui produit des vibrations mécaniques lorsqu'une tension lui est appliquée. Inversement, lorsque l'élément entre en vibration au passage d'une onde ultrasonore, le transducteur permet de convertir la vibration mécanique en signal électrique. Trois modèles de transducteurs ultrasonores ont été utilisés au cours de la thèse. Tous trois de dimensions identiques (et donc interchangeables sur les différents systèmes expérimentaux) et à polarisation longitudinale, les capteurs (Olympus, Shinjuku, Tokyo, Japon) diffèrent par leur fréquence centrale : 1 (V103-rm), 5 (V109-rm) ou 10 MHz (V111-rm).

Plus la fréquence est élevée, plus le signal ultrasonore est résolu (faible longueur d'onde), mais plus l'atténuation de l'onde est importante. La gamme de fréquence utilisée ici permet d'obtenir un compromis intéressant entre résolution et rapport signal/bruit, raison pour laquelle elle est largement employée en échographie médicale pour imager les tissus biologiques.

Le transducteur est utilisé en mode échographique. Il s'agit d'un mode qui consiste à commander l'envoi d'une impulsion ultrasonore dans le milieu à étudier, puis à enregistrer le signal rétrodiffusé au même transducteur pendant une certaine durée.

Les propriétés du signal d'émission dépendent des caractéristiques intrinsèques du capteur, mais également du mode de génération de l'impulsion électrique. L'alimentation est

pilotée par un boîtier d'émission réception (Sonatronic, Evry, France), (voir Figure 2.1) qui émet une impulsion carrée négative, d'amplitude réglable de 1 à 200 V, et de largeur réglable de 30 ns à 1 μ s, à adapter en fonction des caractéristiques du transducteur.

Le même boîtier électronique amplifie le signal reçu (0-40 dB), puis le numérise par le biais d'une carte d'acquisition codant sur 12 bits, avec une fréquence d'échantillonnage de 100 MHz (voir Figure 2.1). La fréquence de récurrence de l'émission des ondes ultrasonores est comprise entre 0 et 90 Hz. Le boîtier d'émission est commandé par une interface homme-machine programmée sous le logiciel LabVIEW (National Instrument, Austin, Texas, Etats Unis). Cette interface gère la commande des propriétés du signal d'émission : la tension, la largeur de l'impulsion ou encore la fréquence de récurrence peuvent ainsi être ajustées. Elle permet ensuite de régler le gain appliqué au signal reçu, ainsi que d'effectuer une moyenne sur un nombre fini de signaux. Ces deux réglages contribuent à la réduction significative du bruit électronique sur les signaux. Une fenêtre permet la visualisation en temps réel des signaux ultrasonores. Enfin, le programme commande l'acquisition des signaux ultrasonores numérisés sur une fenêtre d'intérêt.

Les données sont récupérées sous forme de fichiers comportant pour chaque « tir » ultrasonore (i) le temps associé à l'émission du tir et (ii) le vecteur d'amplitude du signal ultrasonore en fonction du temps de propagation de l'onde. Ces données sont ensuite importées sous Matlab (The MatWorks, Natick, Massachussets, US) afin d'être traitées. Les méthodes de traitement du signal font l'objet de la troisième partie de ce chapitre. Auparavant, il est nécessaire de présenter le dispositif biomimétique de la compression entre la langue et le palais car il conditionne les phénomènes de propagation d'ondes observés, et donc le traitement du signal associé.

2.2 Conception d'un dispositif biomimétique du système langue-aliment-palais

2.2.1 Description générale

L'objectif du dispositif biomimétique est de mimer la compression de l'aliment entre langue et palais dans un environnement contrôlé qui permette d'étudier la preuve de concept du potentiel de la méthode ultrasonore. Une étape importante concerne la formulation d'hypothèses sur le rôle joué par certaines propriétés spécifiques de la physiologie orale sur les mécanismes de perception de texture. Dans ces travaux de thèse, nous nous sommes attachés à étudier tout particulièrement l'impact de certaines propriétés de la langue : sa rugosité, sa lubrification, son déplacement ou encore sa rigidité sont autant de facteurs susceptibles d'altérer les mécanismes d'interaction à l'interface entre la langue et l'aliment, et donc d'influencer les stimuli sensoriels perçus au niveau des différents mécanorécepteurs de la langue. La démarche de conception du dispositif biomimétique a consisté à prendre progressivement en compte chacun de ces facteurs, de façon à pouvoir identifier/découpler leurs effets sur la réponse ultrasonore du système.

L'élément central du dispositif est un appareil de traction-compression (TA.XT plus, stable Micro System, Surrey, United Kingdom), utilisé pour mimer les mouvements relatifs entre

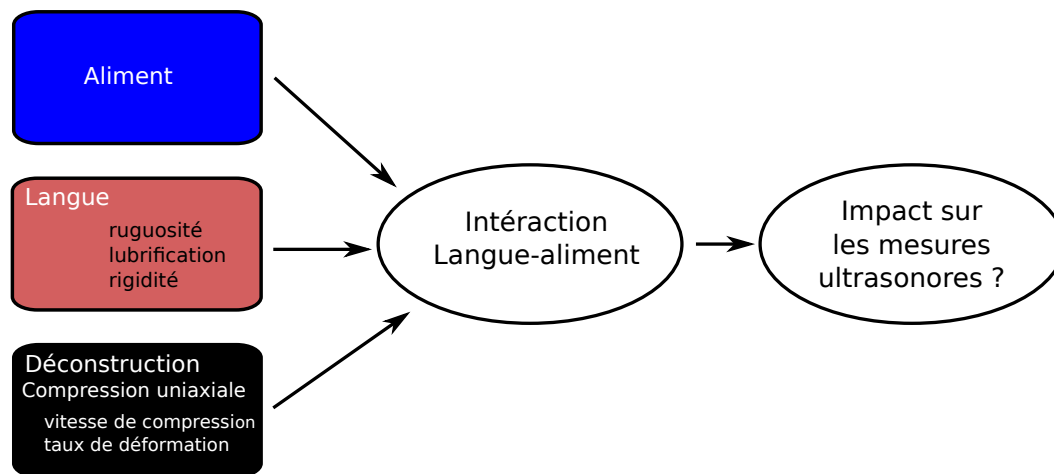


FIGURE 2.2 – Modèle *in vitro* du système langue-aliment-palais. Les paramètres d'entrée du modèle sont inscrits dans chaque bloc à gauche.

langue et palais. Bien que les mouvements mis en œuvre entre langue et palais durant le processus oral soient loin de se limiter à une compression uni-axiale, cette configuration simplifiée s'est imposée pour l'étude de la preuve de concept de la méthode ultrasonore.

Sur ce système, le rôle du palais dur est joué par un mobile circulaire (de diamètre 40 mm) en aluminium. Une hypothèse forte a été de négliger l'impact de la couche de tissus mous recouvrant le palais osseux et ainsi d'assimiler le palais à un matériau non déformable. La compression entre langue et palais est représentée par le déplacement du mobile (la langue étant fixée sur la base de l'appareil), commandé via le logiciel fourni par le fabricant (Exponent). L'interface permet d'imposer des déplacements à vitesse constante (réglable de 0 à 10 mm.s⁻¹), et une cellule de force située au-dessus du mobile en aluminium prend en charge l'acquisition de la force imposée au cours d'un essai.

Différents protocoles ont ainsi été étudiés, pour faire varier la vitesse de compression ou encore le taux de déformation maximale appliqués au système.

2.2.2 La langue biomimétique

Deux types de matériaux ont été utilisés pour modéliser la langue. D'une part, l'utilisation de Polychlorure de Vinyle (PVC) a permis d'étudier l'impact de certaines propriétés de surface de la langue (rugosité, lubrification) sur la réponse ultrasonore du système, tout en s'affranchissant de mécanismes de déformation de la langue, eux aussi susceptibles d'affecter la propagation des ondes ultrasonores. La déformation de la langue a été prise en compte dans un deuxième temps, en utilisant des gels de poly(alcool vinylique) (PVA) qui permettent d'obtenir des échantillons de rigidité pertinente (entre 14 kPa et 110 kPa).

La morphologie de la langue est une caractéristique complexe et hautement variable d'un individu à l'autre. Son irrégularité implique des phénomènes complexes au niveau de la propagation des ondes ultrasonores. Ainsi, le choix a été fait d'étudier la preuve de concept de la méthode ultrasonore dans des conditions simplifiées. C'est la raison pour laquelle les langues artificielles considérées sur ce système biomimétique sont de forme cylindrique. Leur face inférieure est en contact avec le capteur ultrasonore, tandis que la face supérieure est celle qui interagit avec l'aliment. Le parallélisme entre les surfaces de la langue et du

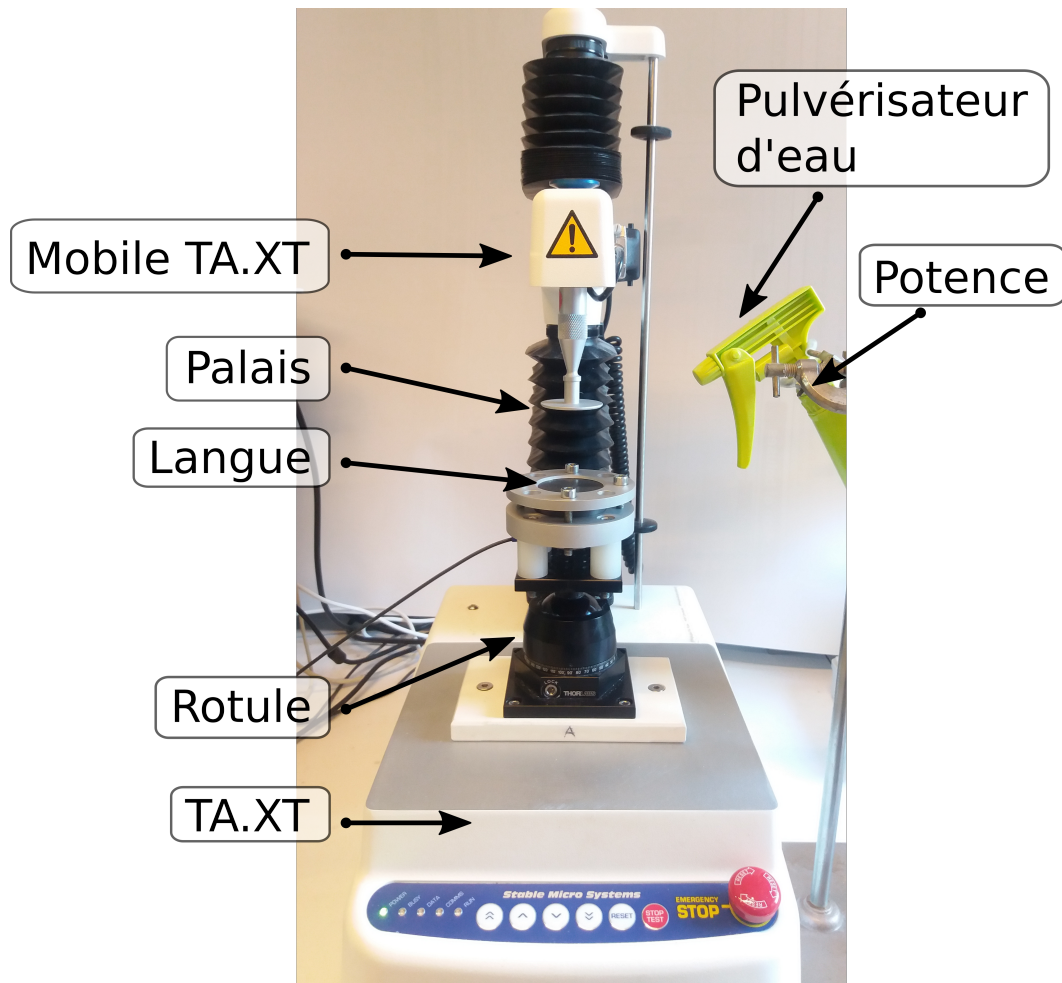


FIGURE 2.3 – Photographie du montage expérimental du modèle *in vitro* de système langue-palais.

palais est assuré par le réglage d'une rotule située sous le support de la langue. Dans cette configuration, le faisceau ultrasonore est perpendiculaire aux surfaces de la langue et du palais (incidence normale), favorisant l'étude de la preuve de concept de la méthode ultrasonore. Le diamètre et l'épaisseur des cylindres ont été ajustés pour chaque type de langue, en prenant en compte l'impact du matériau sur les propriétés du faisceau ultrasonore (divergence du faisceau, champ proche) : 25 mm d'épaisseur et 50 mm de diamètre pour le PVC, 20 mm d'épaisseur et 50 mm de diamètre pour le PVA.

2.2.2.1 Langues non déformables en PVC

Le PVC est un matériau solide qui peut être considéré comme non déformable, si on le compare aux familles d'aliments semi solides susceptibles d'être déconstruits entre la langue et le palais durant le processus oral. Il s'agit d'un matériau d'utilisation courante en laboratoire, pour lequel la mise en forme et l'état de surface peuvent être facilement contrôlés. De plus, la vitesse ultrasonore (environ 2400 m.s^{-1} (Afifi, 2003)) présente l'avantage d'être faible pour un matériau solide, bien qu'encore éloignée des valeurs de vitesse rencontrées dans les tissus musculaires (environ 1500 m.s^{-1} (Bamber and Hill, 1979)).

Des cylindres de 50 mm de diamètre et de 25 mm d'épaisseur ont ainsi été usinés. La rugosité de la langue a été prise en compte en modifiant l'une des deux faces circulaires.

Bien que certaines études aient utilisé des motifs de surfaces périodiques pour prendre en compte la rugosité, la surface de la langue possède un profil de rugosité irrégulier (Nagaoka et al., 2001; Uemori et al., 2012). Des simulations numériques (méthodes des différences finies dans le domaine temporel, à l'aide du logiciel SimSonic®) ont été réalisées afin d'étudier l'impact de la topographie du profil de rugosité sur la réflexion des ondes ultrasonores. Ces travaux ont permis de mettre en évidence des artefacts liés à des phénomènes d'interférences lorsque la surface présente des motifs de rugosité périodiques (comme par exemple des micro-piliers). Ainsi, pour s'affranchir de ces artefacts et pour se placer dans des conditions plus représentatives d'une langue réelle, nous avons donc choisi d'imprimer une rugosité à l'aide de surfaces de référence aléatoires, consistant en des disques de papier abrasif. Ces disques, caractérisés par une taille moyenne de grains des particules abrasives collées, permettent de contrôler la taille et l'espacement entre les aspérités. De nouvelles simulations de propagations d'ondes ont été réalisées sur des surfaces rugueuses ayant un profil de rugosité aléatoire, avec une valeur moyenne de Ra variant entre 0 et 300 μm . Elles ont permis de montrer que pour des Ra inférieures à 100 μm , les phénomènes de diffusion et/ou de diffraction des ondes ultrasonores avaient un impact négligeable sur le coefficient de réflexion d'ondes ultrasonores de fréquence 1 MHz (figure 2.4).

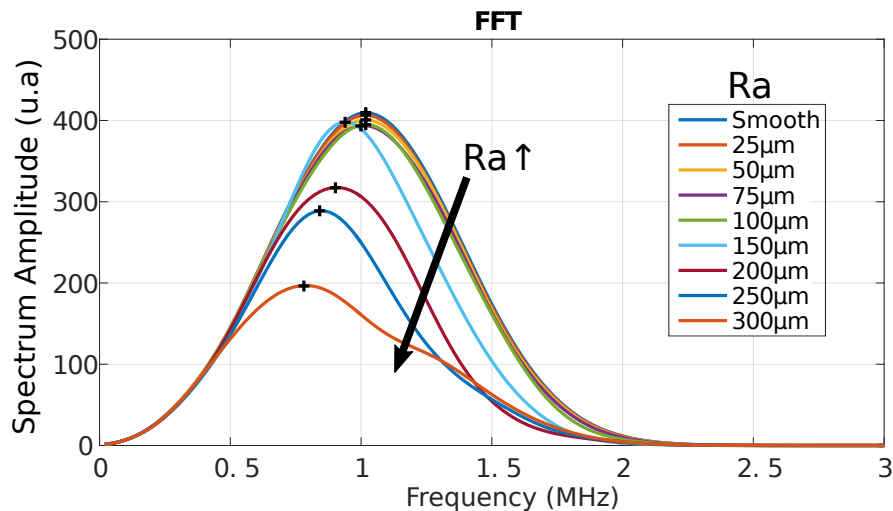


FIGURE 2.4 – Spectre de l'écho réfléchi par une interface rugueuse dont le profil possède une valeur de Ra variant entre 0 et 300 μm (simulations par méthode des différences finies – SimSonic).

Trois types de surfaces ont été étudiés avec les langues de PVC : une surface lisse ($R_0\beta_0$) qui correspond à la configuration dite « lisse » (juste usinage des cylindres) et deux surfaces rugueuses ($R_1\beta_1$, $R_1\beta_2$) moulées sur papier abrasif. Pour imprimer l'état de surface des surfaces $R_1\beta_1$ et $R_1\beta_2$, un disque de papier abrasif a été enduit de graisse alimentaire (Carlex spray, Zeelandia, Zierikzee, The Netherlands), puis mis en contact avec une surface en PVC et pressé sur une plaque chauffante à 150°C pendant une durée donnée (voir Figure 2.5). Le Tableau 2.1 récapitule la taille de grain, les temps et les poids appliqués pour chaque état de surface.

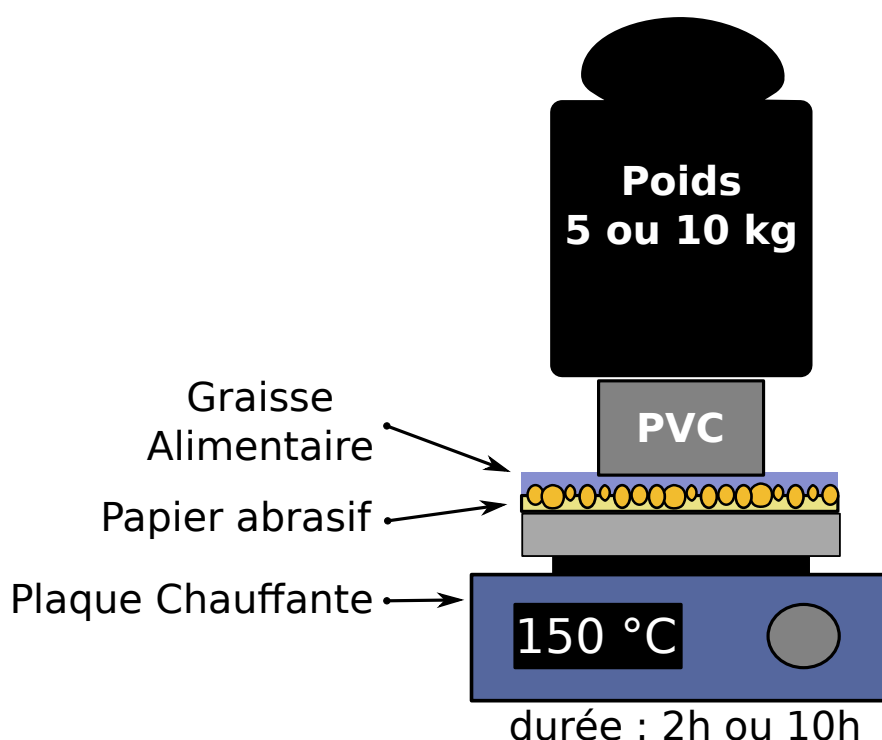


FIGURE 2.5 – Représentation du montage réalisé pour texturer les surfaces de PVC

TABEAU 2.1 – Caractéristiques des papiers abrasifs utilisés et des protocoles de formations des surfaces associés.

	Grain n°1	Grain n°2	Grain n°3
Marque du papier abrasif	Struers, Champigny-sur-Marne, France	Klingspor, Haiger, Germany	Norton, Saint Gobain, Courbevoie, France
Taille de grain du papier abrasif	P80 200 μm	P60 269 μm	P40 425 μm
Poids utilisé (kg)	-	5	10
Temps de moulage (h)	-	2	10
Matériaux utilisés	PVA	PVC	PVC, PVA

2.2.2.2 Langues déformables en PVA

La déformabilité de la langue a pu être prise en compte grâce à l'utilisation de PVA. Le PVA est un matériau régulièrement utilisé en imagerie médicale pour simuler les tissus mous. Il s'agit d'un polymère qui acquiert sa structure de gel en le soumettant à des cycles de congélation/décongélation. Ces cycles permettent de former des zones amorphes et cristallines permettant de former une matrice de chaînes de PVA physiquement réticulés. Plus le nombre de cycle sera élevé et plus la taille des pores à l'intérieur des gels (zones cristallines) sera faible et plus les propriétés mécaniques seront fortes (Wan et al., 2014). Une solution à 10%w/w de PVA (CAS : 9002-89-5, Mw 89-98, 99+% hydrolyzed, Sigma Aldrich, Saint-Louis, USA) a servi de base au développement des deux types de langues déformables utilisées pendant la thèse. Pour l'un, 2 cycles de congélation/décongélation ont été appliqués et pour l'autre 6 cycles. A l'aide d'un appareil d'élastographie ultrasonore, leur morphologie ainsi que leur élasticité ont été évalués. Les modules de Young mesurés sont

de 14 ± 3.8 kPa et 110 ± 26.9 kPa pour 2 et 6 cycles respectivement. Ces valeurs sont en accord avec celles évaluées pour des langues caractérisées *in situ* où l'élasticité de la langue évolue de façon significative entre l'état « au repos » ($E=12.2\pm4.2$ kPa) et l'état « contracté » ($E=122.5\pm58.5$ kPa) (Ishihara et al., 2013). En plus de sa déformabilité, le PVA présente l'avantage d'avoir une impédance acoustique similaire à celle des tissus mous. Par conséquent, il s'agit d'un modèle pertinent pour approcher des phénomènes de propagation des ondes ultrasonores dans les tissus mous et la langue en condition *in vivo*.

Le protocole de préparation des solutions des langues de PVA est schématisé en Figure 2.6. Une solution de PVA (concentration massique de 10%) a été préparée à température ambiante et laissée sous agitation lente pendant 5 min. Sous la même agitation, la solution a ensuite été portée à 80°C durant 2 h dans un bain-marie (Grant Instrument, Cambridge, England) afin de faire fondre le PVA et d'obtenir une solution homogène, puis placée à température ambiante pendant 2h afin de conserver une solution homogène lors du refroidissement. Enfin, la solution a été versée dans des moules cylindriques en polyéthylène (20 mm d'épaisseur et 50mm de diamètre, UFP, Le Versoud, France) qui ont été conservés à 19°C durant 16h afin de laisser les bulles d'air s'élever au sein du volume de la solution pour obtenir un milieu homogène.

La gélification du PVA a été réalisée en imposant des cycles de congélation/décongélation : 8 h à -15°C dans un congélateur domestique (ECM30132W/BMI310, Electrolux, Nyíregyháza, Hongrie), suivies de 14h à 19°C dans une salle climatisée.

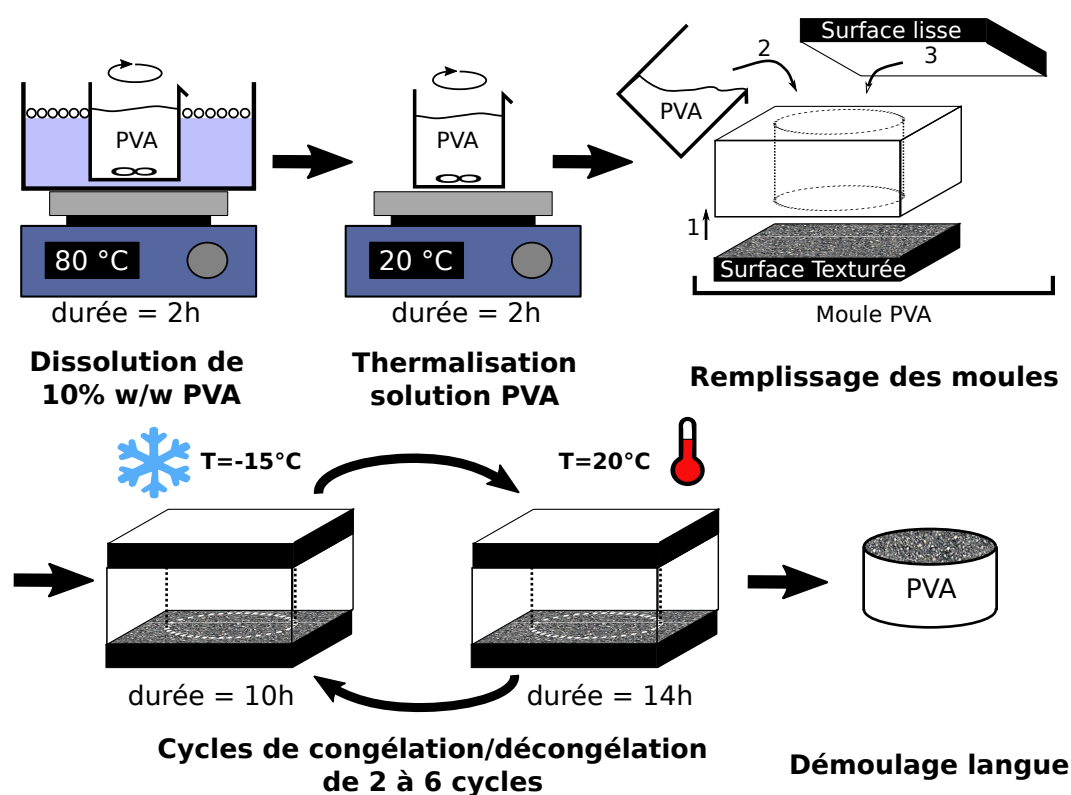


FIGURE 2.6 – Protocole de fabrication des langues en PVA

Au total, six références de langues ont été retenues pour l'étude : $R_0\beta_0$, $R_1\beta_1$, $D_{relax}R_1$, $D_{relax}R_2$, $D_{contr}R_2$ et $R_1\beta_2/D_{hard}R_2$. Le profil de chacune des surfaces a été caractérisé à l'aide d'un profilomètre de contact (Brucker Dektak XT, Billerica, MA, USA). Une pointe de

TABLEAU 2.2 – Paramètres de surfaces (Ra et β) mesurés pour chaque langue

Roughness	Ra μm	Correlation length (β) μm
$R_0\beta_0$	2.54 ± 0.09	35 ± 0.4
$R_1\beta_1$	58.2 ± 5.3	206 ± 4
$R_1\beta_2 / D_{hard}R_2$	52 ± 11.2	243 ± 12
$D_{relax}R_1$	41.9 ± 0.5	289.1 ± 36.4
$D_{relax}R_2$	72.2 ± 14.0	435.1 ± 61.8
$D_{contr}R_2$	103.5 ± 3.2	428.9 ± 63.4

50 nm de diamètre a été utilisée pour scanner les surfaces des langues biomimétiques. La position de la pointe est contrôlée et analysée par le logiciel Vision 64® du constructeur. La force appliquée sur la pointe était de 1 mg. Pour chaque surface, trois balayages 1D de 30 mm ont été effectués, à chaque fois après avoir en pivoté la surface de 45°.

Pour chaque profil, la moyenne arithmétique de la hauteur des aspérités (Ra), correspondant à la hauteur moyenne des irrégularités de surfaces observées, et la longueur de corrélation (β), correspondant à un paramètre relatif de la périodicité de la surface, ont été calculées (voir Figure 2.7 et Tableau 2.2) (Gadelmawla et al., 2002).

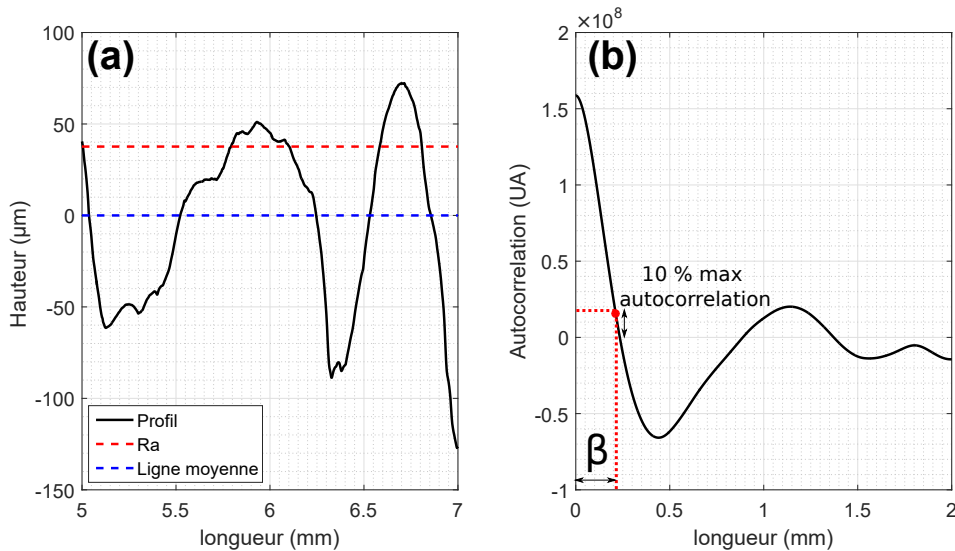


FIGURE 2.7 – (a) représentation d'une portion de 2 mm d'un profil de surface et représentation du Ra et de la ligne moyenne du profil calculé sur 30 mm. (b) représentation de la fonction d'autocorrélation du profil tracé en (a) et de la longueur de corrélation (β).

Les surfaces de langues générées ont des propriétés de surfaces cohérentes avec celles des langues évaluées *in vivo* dans la littérature, ces Ra varient dans une gamme de 40 à 100 μm (Nagaoka et al., 2001; Uemori et al., 2012). La Figure 2.8 représente une vue en trois dimensions de la topographie des surfaces $D_{relax}R_1$ et $D_{hard}R_2$ où la différence d'amplitude des pics et de périodicité des pics peut être visuellement observée.

La langue est naturellement lubrifiée par un film salivaire dont l'épaisseur peut varier entre 60 μm et 100 μm selon (Collins and Dawes, 1987; Watanabe and Dawes, 1990) et il est de 54 μm selon (Pramanik et al., 2018). Ce film salivaire a un fort impact sur l'interaction mécanique entre la langue et l'aliment (hydratation, lubrification, etc). Il était donc nécessaire

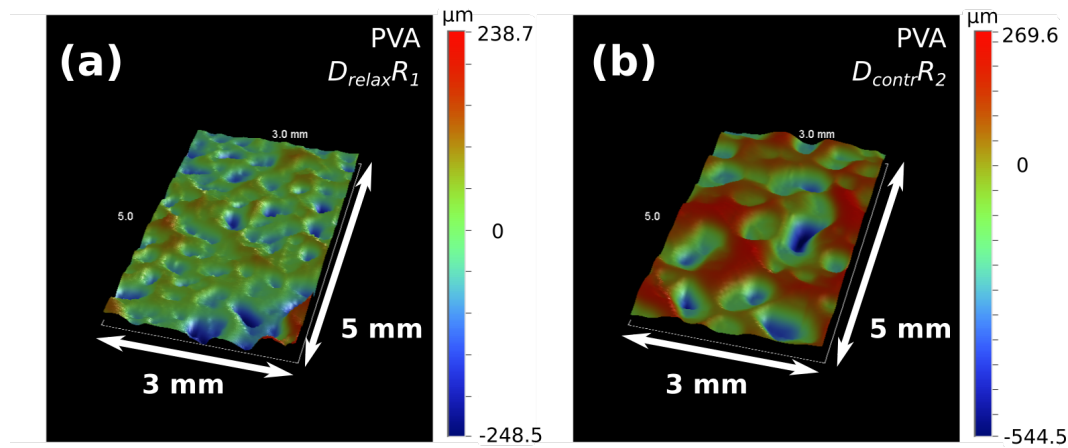
FIGURE 2.8 – Cartographie réalisé par profilométrie de contact pour $D_{relax}R_1$ (a) et $D_{contr}R_2$ (b).

TABLEAU 2.3 – Quantité d'eau déposé selon la condition de lubrification

Lubrication name	Water mass dropped off mg	Equivalent thickness μm
Dry	-	-
Low	30 ± 5	15 ± 3
Medium	86 ± 9	40 ± 5
High	2000	1000

de le prendre en compte sur le système biomimétique. Cependant, la salive est un fluide complexe (non-Newtonien, viscoélastique, et fortement instable). De nombreuses études se sont attachées à composer des salives artificielles, sans pour autant parvenir à mimer de façon exhaustive les propriétés rhéologiques et enzymatiques de la salive humaine. Ainsi, dans un souci de répétabilité, nous avons donc fait un choix de simplification en utilisant dans un premier temps l'eau comme lubrifiant.

Quatre conditions de lubrification ont été testées : *Dry (sec)*, *Low Lubrication (faible lubrification)*, *Medium Lubrication (Lubrifiée moyennement)* et *High Lubrication (lubrifiée fortement)*.

La condition sèche correspond simplement à une absence de lubrifiant à la surface de la langue. Pour les conditions faiblement lubrifiée et moyennement lubrifiée, un vaporisateur d'eau a été utilisé pour couvrir la surface de la langue avec des gouttelettes d'eau. La quantité d'eau déposée a été mesurée à l'aide d'une balance de précision (Precisa 303A, Dietikon, Switzerland) (voir Tableau 2.3). En considérant une répartition homogène de l'eau à la surface de la langue, les épaisseurs d'eau déposée sont cohérentes par rapport aux conditions *in vivo*. Pour finir, la condition hautement lubrifiée correspond à la submersion de la surface de la langue par 2 mL d'eau, versée à l'aide d'une pipette.

2.3 Traitement des signaux ultrasonores

Lors de la propagation des ondes ultrasonores dans le système biomimétique, deux principales interfaces sont rencontrées : entre la langue et l'aliment, puis entre l'aliment et le palais (voir Figure 2.9). Chaque interface réfléchit une partie de l'énergie de l'onde incidente,

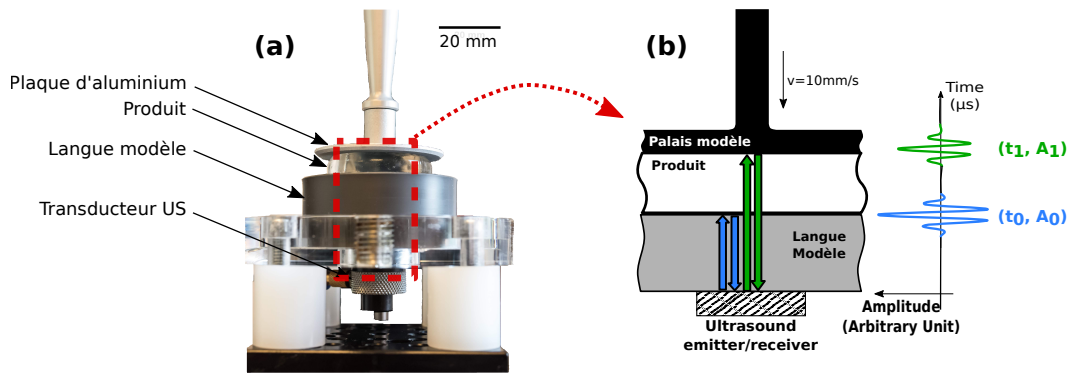


FIGURE 2.9 – Photographie du système langue-aliment-modèle (a) et représentation de la propagation des ondes dans le système modèle (b)

rétrodiffusée vers le capteur sous la forme d'un écho : E_0 pour l'écho de l'interface langue-aliment, E_1 pour l'interface aliment-palais. Le traitement du signal mis en œuvre au cours de la thèse a consisté à développer des méthodes robustes de détection et de caractérisation des temps d'occurrence et des amplitudes de chacun de ces échos au cours du temps, à partir des signaux bruts. Ces informations ont ensuite pu être retranscrites en paramètres quantitatifs liés à l'interaction entre la langue et l'aliment au cours d'une compression.

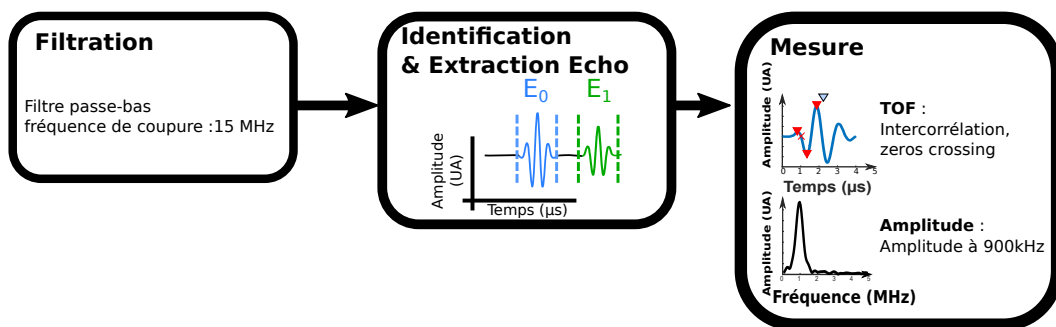


FIGURE 2.10 – Schéma récapitulant les différentes étapes du traitement du signal.

Une séquence d'acquisitions ultrasonores peut comporter entre 500 et 1500 signaux. Il a donc été nécessaire de développer des procédures semi-automatiques afin de faciliter le traitement et l'extraction, pour chaque signal, des temps d'occurrence t_0 et t_1 et des amplitudes A_0 et A_1 respectivement relatifs aux échos E_0 et E_1 .

La Figure 2.10 représente les différentes étapes de cette procédure semi-automatique réalisée sous MATLAB™ (The MathWorks, Natick, Massachusetts, USA), qui seront détaillées une par une dans les sections suivantes.

2.3.1 Filtrage des signaux

Le premier traitement appliqué à chacun des signaux d'une séquence est un filtre passe-bas d'ordre 8. La fréquence de coupure à 15 MHz permet au filtre d'atténuer une partie du bruit lié aux composantes hautes fréquences sur les signaux, et ainsi d'améliorer la qualité du signal sans altérer les composantes liées à l'onde ultrasonore étudiée (fréquence de 1 MHz dans la très grande majorité des cas).

2.3.2 Identification et extraction des échos

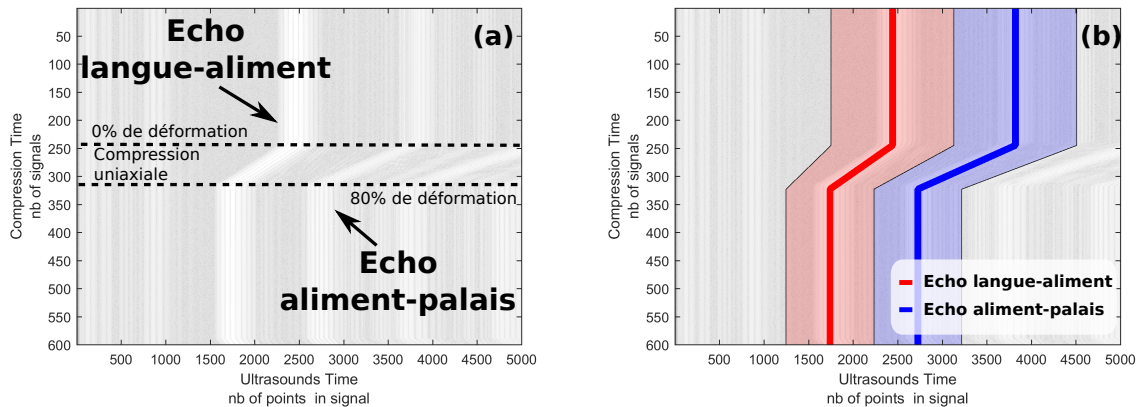


FIGURE 2.11 – Représentation de la matrice d'une séquence d'acquisition en niveau de gris (a). Le temps d'acquisition est représenté en abscisse et le temps de compression est affiché en ordonnée. Plus l'amplitude sera élevée et plus le pixel de l'image sera blanc. L'identification manuelle des échos est représentée en (b). L'écho langue-aliment et l'écho aliment-palais sont représentés en rouge et bleu respectivement. Les zones rouges et bleues correspondent aux fenêtres temporelles utilisées pour affiner la détection des échos langue-aliment et aliment-palais respectivement.

La détermination précise des temps d'occurrence et des amplitudes des échos E_0 et E_1 nécessite d'abord d'identifier et d'isoler des fenêtres qui les englobent. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur une représentation matricielle de l'ensemble des signaux d'une séquence d'acquisitions ultrasonores (voir Figure 2.11.a). Chaque ligne correspond ainsi à un signal, dont l'amplitude (en échelle logarithmique) est codée en niveaux de gris. Ce type de visualisation permet de suivre tout au long d'un essai (de haut en bas) l'évolution de la position et de l'amplitude de chaque écho. Au cours de processus dynamiques (comme par exemple durant une compression), l'évolution de l'épaisseur de l'aliment et/ou de la langue conduit au décalage des échos E_0 et E_1 . Ces décalages peuvent varier en fonction des propriétés de la langue et de l'aliment, mais également selon les caractéristiques de la phase de compression (vitesse, taux de déformation). D'un aliment à l'autre, la réponse ultrasonore du système présente une grande variabilité, tant pour l'amplitude que pour le temps de vol des différents échos. Ainsi, il n'a pas été possible de mettre au point une méthode de traitement du signal automatique qui soit à la fois robuste et adaptable. Une méthode semi-automatique a donc été préférée, avec une interface utilisateur qui permet, sur la représentation matricielle de la séquence, de tracer des traits centrés sur le pic d'amplitude de chacun des deux échos E_0 et E_1 (traits gras rouges et bleus sur la Figure 2.11.b).

Des fenêtres ont ensuite été définies, centrées sur chacune de ces lignes, et dont la largeur correspond à la demi-distance entre les deux lignes (zones colorées sur la Figure 2.11.b).

2.3.3 Détermination des temps d'occurrence t_0 et t_1

Les fenêtres décrites dans la section précédente ont d'abord été utilisées pour extraire les valeurs de temps d'occurrence relatives à chacun des deux échos E_0 et E_1 .

Pour cela, une première approche a reposée sur l'utilisation d'une méthode dite de «

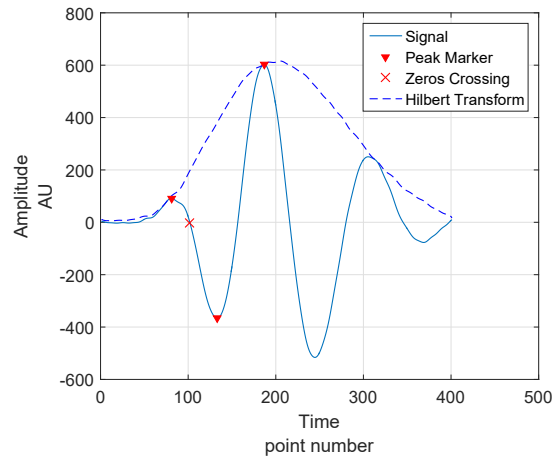


FIGURE 2.12 – Représentation d'un signal provenant de l'interface langue-aliment. Le premier passage à zéros de l'impulsion US ("first zeros crossing") est représenté par une croix rouge. Les amplitudes des trois premiers pics de l'impulsion US sont représentées par des triangles rouges.

First zero crossing » (Haïat et al., 2005). Cette méthode consiste, pour déterminer t_0 et t_1 , à déterminer pour chaque fenêtre le temps du premier passage à zéro après le franchissement d'un seuil d'amplitude donné (voir Figure 2.12).

Dans certains cas, la détermination du seuil d'amplitude nécessaire au « First-zero-crossing » peut s'avérer délicate (par exemple lorsque le rapport signal-sur-bruit défavorable) et ainsi limiter l'efficacité de la méthode. Une deuxième approche a donc été mise au point, basée sur l'inter corrélation entre chacune des fenêtres temporelles définies précédemment et une fenêtre de référence (voir Figure 2.13.a). Le programme permet de renvoyer une fonction qui représente le degré de « similitude » entre deux signaux (voir Figure 2.13.b). Lorsque la courbe d'inter corrélation atteint sa valeur maximale (pic de similitude), il est possible de déterminer le décalage de phase entre les deux signaux. Les valeurs de temps d'occurrence de chacun des échos E_0 et E_1 sont ensuite déduites à partir de ce décalage de phase et de la connaissance du temps d'occurrence associé à la fenêtre de référence. Pour gagner en précision, la détection du pic de similitude est faite à l'aide une interpolation parabolique (Gennisson, 2004; Renaud, 2008).

2.3.4 Détermination des amplitudes A_0 et A_1

Une fois la détection des temps d'occurrences t_0 et t_1 réalisée sur l'ensemble des signaux, de nouvelles fenêtres temporelles sont définies pour chacun des échos E_0 et E_1 . Centrées sur les temps d'occurrence mesurés précédemment par inter-corrélation, ces nouvelles fenêtres ont toutes une largeur identique (de 4 μ s) et servent de support à la détermination des amplitudes A_0 et A_1 .

Une transformée de Fourier rapide (FFT) est ensuite appliquée à chaque fenêtre (voir Figure 2.14), après apodisation avec un filtre de Tukey ($r = 0.2$). Enfin, les amplitudes A_0 et A_1 sont déduites en déterminant la valeur du spectre à la fréquence centrale du transducteur ultrasonore (dans la plupart des cas 900 kHz). Un fenêtrage de type Tukey ($r = 0.2$) est ensuite appliqué, avant le calcul de la transformée de Fourier rapide (FFT).

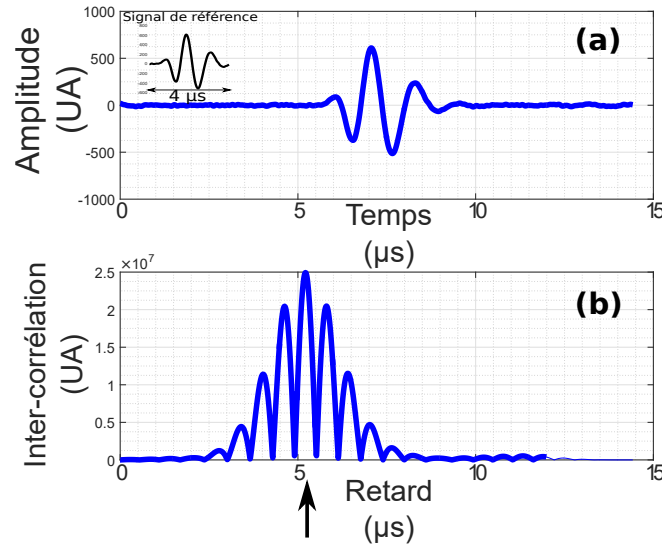


FIGURE 2.13 – Représentation d'un pulse US (a) et de la figure d'intercorrélacion (b) réalisée entre le signal tracé en (a) et le signal de référence. La position de l'écho sera alors égale à la maximum du maximum de la figure d'intercorrélacion (flèche noire) + la demi-largeur du signal de référence soit $\approx 7\mu s$ dans cet exemple.

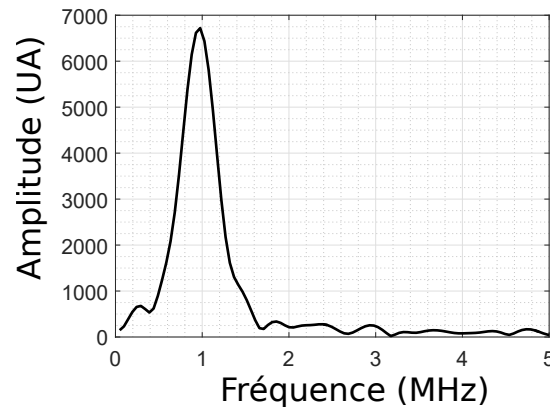


FIGURE 2.14 – Spectre d'une impulsion US réfléchi à l'interface langue-aliment

2.3.5 Calcul des paramètres ultrasonores d'intérêt

Deux principaux paramètres quantitatifs ont été utilisés pour suivre la compression d'aliments sur le système biomimétique. Le premier est le coefficient de réflexion apparent de l'onde ultrasonore à l'interface entre la langue et l'aliment (noté R). Par abus de langage, on parlera parfois plus succinctement du coefficient de réflexion, sans préciser qu'il est associé à l'interface langue-aliment. Il s'agit de la proportion d'énergie de l'onde ultrasonore incidente réfléchi par cette interface et rétrodiffusée vers le transducteur, et s'obtient par la relation :

$$R = \frac{A_0}{A_{0,ref}} \quad (2.1)$$

Où $A_{0,ref}$ est l'amplitude de l'écho E_0 issue d'un signal de référence acquis en l'absence d'échantillon au contact de la langue, et pour lequel la totalité de l'énergie du faisceau ultrasonore incident est réfléchi vers le transducteur (réflexion totale). Le coefficient de réflexion de l'interface langue-aliment dépend de l'impédance acoustique des deux milieux, ainsi que

de la continuité du contact (couplage). Le deuxième paramètre d'intérêt étudié est le temps de vol dans l'aliment ToF :

$$ToF = t_1 - t_0 \quad (2.2)$$

Ce paramètre correspond au temps de propagation de l'onde ultrasonore dans l'aliment et peut s'écrire :

$$ToF = \frac{2 \times e}{c} \quad (2.3)$$

Où e est l'épaisseur de l'aliment et c est la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans l'aliment (qui dépend de la densité et des modules élastiques de l'aliment). La mesure du temps de vol permet donc potentiellement de suivre l'évolution du taux de déformation, de la densité et de l'élasticité de l'aliment au cours d'une compression imposée.

Ce chapitre met en avant les nombreux développements réalisés pendant la thèse. Au-delà du système biomimétique, les aliments choisis (et notamment leurs propriétés) sont une étape importante de la stratégie de recherche mise en place dans ce travail. Ces aliments doivent pouvoir être simples, parfaitement contrôlés et caractérisés en terme de structure, et offrir un large spectre de propriétés sensorielles. Ainsi il était essentiel, dans une première étape, **de comprendre l'influence de la composition et des propriétés mécaniques des aliments sur leurs propriétés ultrasonores** (figure 2.15). C'est l'objet du chapitre 3.

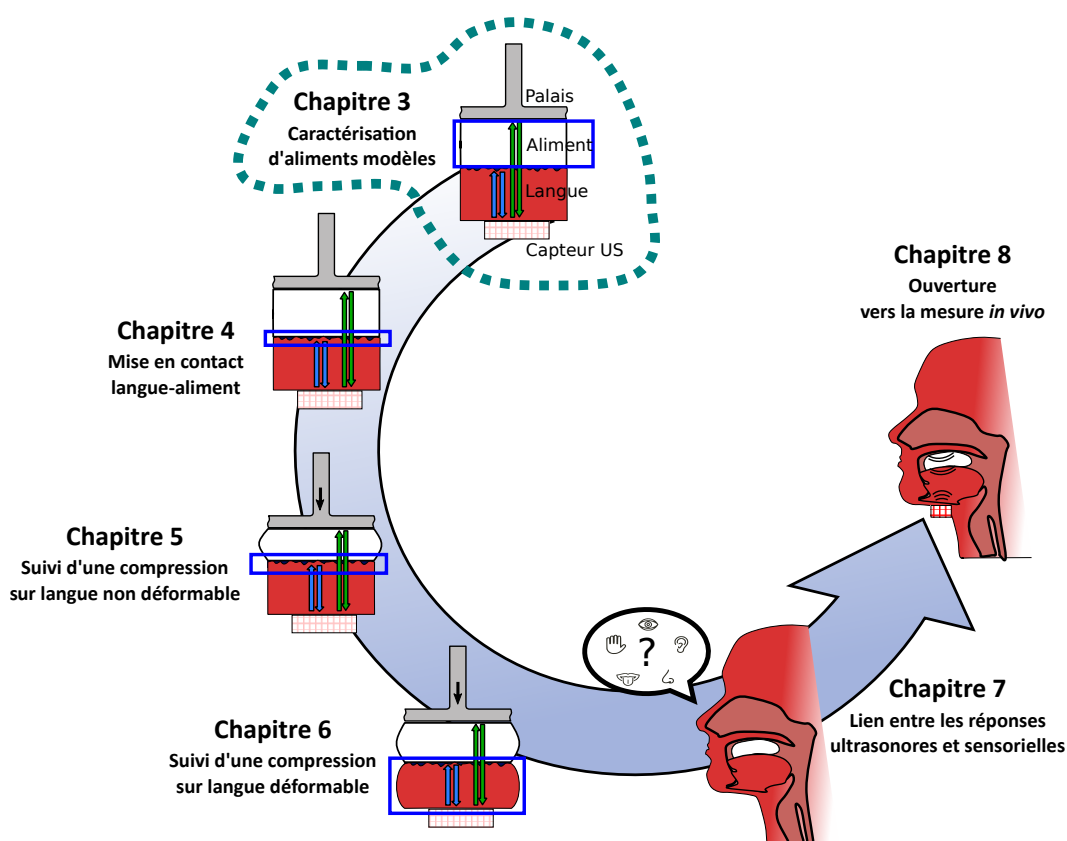


FIGURE 2.15 – Stratégie expérimentale de la thèse

Chapitre 3

Impact de de la transition sol-gel sur les propriétés ultrasonores de gels modèles complexes : application aux gels d'agar/gelatin et aux émulsions gélifiées

Sommaire

3.1 Introduction	67
3.2 Material and methods	69
3.2.1 Ingredients	69
3.2.2 Composition	69
3.2.3 Preparation of the model foods	70
3.2.4 Quantitative ultrasound method	71
3.2.4.1 Measuring cell	71
3.2.4.2 Ultrasonic device	71
3.2.4.3 Temperature control	72
3.2.4.4 Signal processing	73
3.2.5 Rheology	74
3.2.6 Density	74
3.2.7 Statistical analyses	74
3.3 Results and discussions	75
3.3.1 Characterization of products	75
3.3.1.1 Viscoelastic properties	75
3.3.1.2 Density	76
3.3.2 Impact of composition and temperature on US properties	76
3.3.2.1 Ultrasonic velocity : a driver of bulk elasticity	77
3.3.2.1.1 Contribution of sucrose	77
3.3.2.1.2 Contribution of gelling agents	78
3.3.2.1.3 Contribution of emulsion	79

3.3.2.2 Consistency between Ultrasonic reflectivity and velocity	79
3.3.2.3 Relationship between ultrasonic attenuation and sol-gel transition	83
3.4 Conclusion	87

Abstract

Quantitative ultrasound (US) techniques have an attractive potential for the non-invasive and real-time characterization of the structural and mechanical properties of food. The objective of the present study is to unravel the determinants of the variations of US properties during sol-gel transition of emulsion filled gels of agar and gelatin, due to the relative contributions (i) of their individual components and (ii) of their combined interactions. Nine model foods were designed, accounting gradually for the complexity of an emulsion filled gel composed of water, sucrose, agar, gelatin and sunflower oil. A quantitative US device was designed to monitor the sol-gel transition of the model foods. US velocity, reflectivity and attenuation were measured at 50 °C (sol-state) and 20 °C (gel-state) with a 1 MHz transducer in pulse-echo mode. US data were then compared to visco-elastic shear moduli and density measurements. Bulk elastic modulus was shown to prevail over density for explaining the variations of US velocity and reflectivity during sol-gel transition, while high gelatin concentration and interactions between agar and gelatin had an impact on US attenuation. In addition to the fact demonstrated here that US reflectivity is easier to measure compared to velocity and attenuation, the literature reports that this parameter also highly depends on the mechanical coupling of interfaces. Therefore, this study is a baseline for future investigations on the potential of US reflectivity for the characterization of physical interactions between food and more complex surfaces, so that to mimic tongue-food interaction during oral processing.

3.1 Introduction

Proteins and polysaccharides are commonly used as functional ingredients in agro-food industry. Thanks to their gelation behaviour, these two classes of biopolymers highly contribute to the structural and textural properties of a wide diversity of food products. From solubilisation by heating to gelation by cooling, the important structural and mechanical transformations undergone by gelling agents in gels and emulsion filled gels have been the subject of numerous studies (Dickinson, 2003). Proteins have thus been shown to have emulsifying and foaming properties, while polysaccharides have been identified as valuable for their water-holding and thickening properties (Dickinson, 2018; Saha and Bhattacharya, 2010). Rheology is considered as the gold standard for the physical and mechanical characterization of such gel systems, which is critical for a better understanding of the impact of food structure on the underlying mechanisms of texture perceptions (Stokes et al., 2013). However, even if rheological experiments are usually conducted at low stress and strain amplitudes, they may result in significant alterations of the structure of the materials investigated. As a consequence, noninvasive and non-destructive techniques like Quantitative Ultrasound (QUS) have been proposed as an alternative solution (Awad et al., 2012). Such methods could find applications for in-line and non-intrusive monitoring of processes on production chains. Ultrasound (US) waves are elastic waves, sensitive to the mechanical properties of the media and interfaces they propagate through. Different ultrasonic properties have been shown to be of interest for the characterization of food (McClements and Gunasekaran,

1997; Parker and Povey, 2012).

For isotropic solid materials, ultrasonic velocity c of longitudinal waves depends (i) on bulk elastic modulus K' , (ii) on shear elastic modulus G' and (iii) on density ρ in the propagation media, following :

$$c = \sqrt{\frac{K' + \frac{4}{3}G'}{\rho}} \quad (3.1)$$

In many food systems such as gels, G' is negligible when compared to K' , and ultrasonic velocity can be simplified to $c = \frac{K'}{\rho}$, where K' is the reciprocal of compressibility χ (Povey and McClements, 1988).

At an interface between two media 1 and 2, the reflection coefficient R describes how much the energy of a US wave is backscattered by an acoustic impedance discontinuity, following :

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (3.2)$$

where $Z_1 = \rho_1 \cdot c_1$ and $Z_2 = \rho_2 \cdot c_2$ are the acoustic impedances of media 1 and 2.

Ultrasound attenuation α is another parameter of interest, corresponding to the loss of energy of the signal, with multiple origins : absorption (viscosity, thermal effects), scattering phenomena (in multiphase systems) as well as mode conversions.

The measurement of velocity c , reflectivity sol-gel transition and attenuation α of US waves gives the opportunity to characterize various structural and mechanical properties of gels and emulsions (Awad et al., 2012; McClements, 1995).

Even though the variations of shear elastic moduli in food gels have a negligible impact on the velocity of US longitudinal waves, US velocity has been shown to be sensitive to macromolecular reorganisations related to sol-gel transition for some specific polymers like iota-carrageenan (while not for some others like pectin) (Toubal et al., 2003). Other studies have put in evidence the biopolymer-type dependence of US velocity and attenuation to sol-gel transition (Wang et al., 2005). Moreover, phase separation mechanisms occurring shortly before sol-gel transition have been shown to influence US velocity and attenuation for mixed gels of amylose and alginate (Audebrand et al., 1995).

Ultrasound techniques have also been extensively used for the characterization of emulsions. Droplet size distribution has been characterized by attenuation measurements due to scattering phenomena in the dispersed phase (Coupland and McClements, 2001). The characterization of creaming and flocculation mechanisms has also been the subject of different studies involving ultrasound modalities (Dickinson et al., 1997, 1994).

Consequently, when considering more complex food products like emulsion filled gels, ultrasound properties (sol-gel transition, c , α) are very likely to be impacted simultaneously by numerous physical and mechanical characteristics. The relative contributions of the different constituents combined in complex products remains partially explained. The consideration of more complex model foods is therefore necessary to progressively fill the gap with the US properties of real foods, as well as to gain fundamental understanding of food oral processing and sensory perceptions. Emulsion filled gels of agar and gelatin were shown to

be promising in that way, as they offer different formulation leverages that make it possible to vary structural and mechanical properties, consistently with real foods (Devezeaux de Lavergne et al., 2015a,b).

Almost all the components of emulsion filled gels of agar and gelatin have been shown to have a significant impact on US wave properties. Some studies thus focused on the influence of sucrose (Berchiesi et al., 1987; Contreras et al., 1992; Smith and Winder, 1983), some others on the concentrations of biopolymers like agar (Gormally et al., 1982) or gelatin (Emery et al., 1986; Parker and Povey, 2012), while still others worked on the contribution of disperse phase fraction (McClements, 1991). However, to our knowledge, there has been no study considering more complex model foods that combine all these constituents. Such an approach is important to gain knowledge on their respective influence on US properties.

In this context, the objective of the present study is to unravel the relative contributions (i) of individual constituents and (ii) of their interactions on the variations of US properties through sol-gel transition of emulsion filled gels of agar and gelatin adapted from the literature (Devezeaux de Lavergne et al., 2015b). The study must therefore help to better identify the main structural and mechanical determinants of US properties in such complex model food systems. To do so, a total of 9 types of products were considered, with a gradual complexity laying from a simple water solution to a complex emulsion filled gel. A simple and original QUS set-up was designed in order to measure simultaneously various ultrasonic properties (including velocity, reflectivity and attenuation) in model foods under controlled temperature (at liquid and solid states). In parallel, shear visco-elastic moduli and densities of products were measured and compared to ultrasonic data in order to understand the potential of the present ultrasonic device for the identification of mechanical and structural properties emerging from sol-gel transition.

3.2 Material and methods

3.2.1 Ingredients

The model foods considered in the present study consisted in solutions, emulsions, gels and emulsion filled gels. Sunflower oil (Auchan, groupe Auchan, Villeneuve d'Ascq, France) and sucrose (Daddy, Cristalco, Paris, France) were purchased from a local retailer and used with no further purification. Agar-agar (red seaweed, E406, Kalys, Bernin, France) and Edible pig skin gelatin (bloom 200 PS30, Rousselot, Son, The Netherlands) were used as gelling agents. Tween 20 (CAS : 9005-64-5 FG, Sigma-Aldrich, St Louis, MO, USA) was used as an emulsifier for emulsion filled gels.

3.2.2 Composition

Nine types of model foods were considered (detailed final compositions in Table 3.1), accounting gradually for the complexity of the different components of an emulsion filled gel. Two groups of model foods were thus defined :

- i . The first group is composed of three control solutions (referred to as "S") : (i) water, (ii) an aqueous sucrose solution, and (iii) a tween stabilized oil-in-water emulsion (20%)

containing sucrose (respectively referred to as S_W , S_{WS} and E/S_{WS}). This group makes it possible to quantify the effect of the gradual addition of sucrose and of dispersed oil on the ultrasonic properties.

- ii . The second group is composed of six gels with the same sucrose content as control solution S_{WS} :
 - a . Two gels with different concentrations in agar : $Ag_{0.3}$ and $Ag_{1.8}$ (0.3 and 1.8 wt%).
 - b . Two gels with different concentrations in gelatin : $Ge_{3.5}$ and Ge_7 (3.5 and 7 wt%).
 - c . A mixture $Ag_{0.3}Ge_7$ of agar (0.3 wt%) and gelatin (7 wt%).
 - d . An emulsion filled gel $E/Ag_{0.3}Ge_7$, consisting in a continuous phase composed of a gel of agar and gelatin (with the same total amounts of sucrose and polymer as for $Ag_{0.3}Ge_7$) and a dispersed phase of sunflower oil stabilized by tween. Accordingly, the introduction of the oil fraction led to an increase of the concentrations in sucrose and polymer in the gel phase, compared to $Ag_{0.3}Ge_7$. The concentrations in gelling agents were defined based on the literature in order to obtain model foods with contrasting texture and rheological properties.

TABLEAU 3.1 – Composition of the model foods : three control solutions and six gels gradually accounting for the complex components of an emulsion filled gel.

Grams per each component for 100g of final product						
Product	Water	Sucrose	Agar	Gelatin	Sunflower oil	Tween
S_W	100	-	-	-	-	-
S_{WS}	85	15	-	-	-	-
E/S_W	65	15	-	-	20	1.2
$Ag_{0.3}$	84.7	15	0.3	-	-	-
$Ag_{1.8}$	83.2	15	1.8	-	-	-
$Ge_{3.5}$	81.5	15	-	3.5	-	-
Ge_7	78	15	-	7	-	-
$Ag_{0.3}Ge_7$	77.7	15	0.3	7	-	-
$E/Ag_{0.3}Ge_7$	56.5	15	0.3	-	20	1.2

3.2.3 Preparation of the model foods

The model foods were prepared following protocols adapted from (Devezeaux de Lavergne et al., 2015b). During the preparation, all the products underwent an identical temperature history.

For products without fat, solutions of water or water with sucrose were prepared and stirred for 30 min at room temperature (20 °C). For gels with agar, agar was then added and all solutions were heated to 100 °C (to ensure the complete dissolution of agar). Next, solutions were cooled and stabilized for 5 min to 60 °C. Gelatin was then added (for gels with gelatin) and all solutions were stirred for 20 min at 60 °C.

Model foods with fat consisted in mixing the previously described solutions with a liquid emulsion, prepared separately from the gelling solution at 60 °C so that to limit undesired air trapping phenomena promoted in high viscosity mixtures. This liquid emulsion was obtained by (i) mixing water with Tween 20 during 60 min at ambient temperature, (ii) adding sunflower

oil and stirring for two sequences of 1 min at 10 000 rpm with an Ultraturrax (Type T25, IKA, Staufen, Germany), and (iii) homogenizing the obtained pre-emulsion with a sonifier (Sonifier 450, Branson, Danbury Connecticut, USA) by alternating cycles of 0.5 s impulsions (50% power) with 0.5 s rest during 10 min (all by cooling with ice). This last step of emulsification also enabled to remove remaining air bubbles. Finally, model foods with fat were obtained by pouring the emulsion in the gelling solutions previously described (1 :1 ratio, at 60 °C) under gentle mixing conditions.

Different pretests have been conducted in preparation of the study (data not shown), so that to characterize and control the reproducibility of the size of oil droplets with classical microscopy and image analysis. These pretests led to an average size of 1 μm for oil droplets in the emulsion.

3.2.4 Quantitative ultrasound method

This section describes the set-up that was designed to monitor the US properties of the different food products as a function of temperature during sol-gel transition.

3.2.4.1 Measuring cell

A measuring cell made of PVC was designed specifically for the US experiments (see Fig. 3.1 a). The originality of cell's geometry (see Fig. 3.1 b) is to make it possible to explore simultaneously the propagation of ultrasonic waves in gels through two different paths between parallel surfaces, with different spacing : $d_1=7.1\text{mm}$ and $d_2=11.1\text{ mm}$. The length d_0 (equal to 24 mm) corresponds to the thickness of the PVC layer between the transducer and the food sample (see Fig. 3.1 b). The value of d_0 was set so that to be (i) high enough to prevent from nearfield US measurements, (ii) low enough because of high attenuation of US waves in PVC, and (iii) adapted to the avoidance of undesired superimpositions of US echoes arising from the different interfaces with the food sample.

For all experiments, the temperature was controlled by 4 type-K thermocouples (RS-pro, RS Component SAS, Corby, UK) positioned at different locations in the sample cavity of the measuring cell. The measurements were then carried out at the different levels of temperature targeted, with a precision error of $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$.

3.2.4.2 Ultrasonic device

The ultrasonic device is composed of a planar contact transducer (V103RM, Olympus, Shinjuku, Tokyo, Japan) with a 900 kHz center frequency. The transducer emits longitudinally polarized pulses and was used in pulse echo mode (acting both as emitter and receiver). A slot and holding accessories enable the reproducible positioning of the US transducer, with a balanced distribution of US beam energy on the two surfaces located at distances d_1 and d_2 (see Fig. 3.1 b). Silicon grease was spread on the surface of the transducer to ensure the stability of coupling for the whole duration of the experiments and through the whole range of temperatures investigated. A US pulser-receiver (Sonatronic, Evry, France) emits a negative squared pulse to the transducer (500 ns width and 80 V amplitude). It also

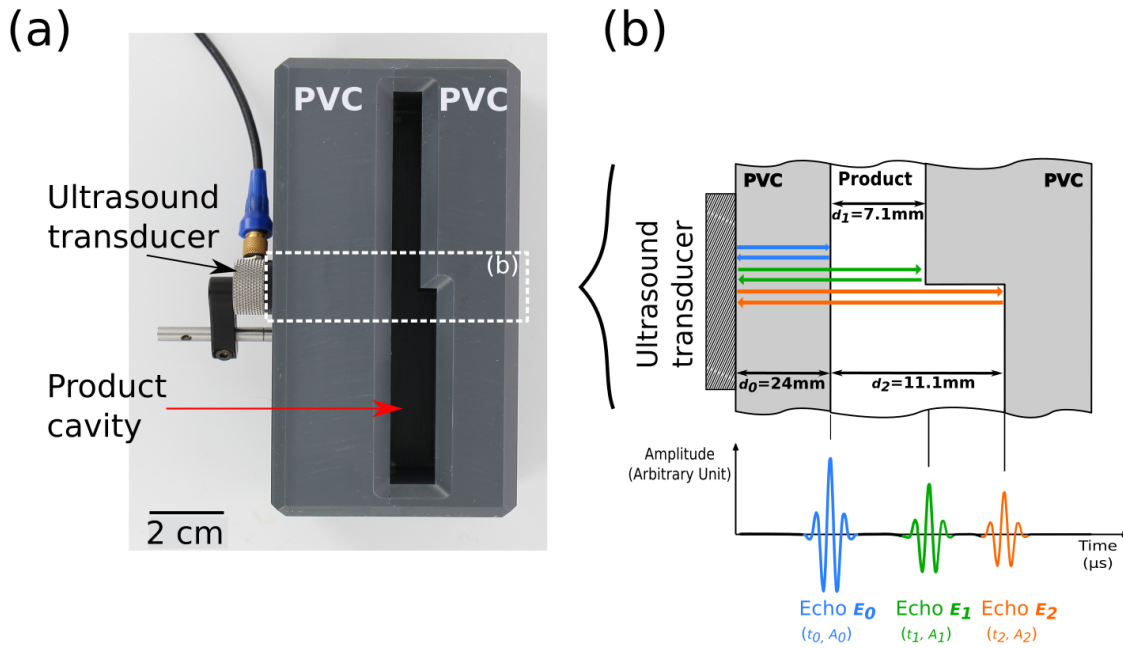


FIGURE 3.1 – (a) Top view photo of the measuring cell for US experiments. The food product is poured in the product cavity. The transducer is mounted aligned so that beam energy is homogeneously distributed between the two external surfaces of the cavity. (b) Illustration of the measuring cell and description of the origin of echoes E_0 , E_1 and E_2 .

includes a 12-bit transient recorder with a 100 MHz sampling frequency for the digitization of rf signals. A human machine interface was developed with LabVIEW (National Instrument, Austin, Texas, US) to control the emission of US pulses at regular intervals, and to record (i) the rf signals corresponding to the US response of the system as well as (ii) the variations of temperature given by the four thermocouples.

3.2.4.3 Temperature control

A heat chamber (type B115, Binder, Tuttlingen, Germany) was used to consider different temperature stages. For each new sample, reference rf signals were acquired on the cell before pouring the solutions. Such measurements were carried out at 20 °C and 50 °C, with a 2 h waiting period so that to ensure temperature stabilization. These temperatures were chosen in order to keep product at sol state (50 °C) and at gel state (20 °C), also to avoid any damage to the ultrasound transducer ($T \leq 50$ °C)

The experiments started by pouring the 60 °C solutions in the cell's cavity, and then by placing the cell immediately in the heat chamber set to 50 °C. From this point on, US signals were acquired every 5 min for the whole duration of the experiments. A waiting period of at least 2 h was observed to ensure the stabilization of temperature to the first temperature stage : 50 °C for sol state measurements. The heat chamber was shut down, and 14–18 h waiting periods were observed to ensure (i) the stabilization of product temperature to 20 °C (room air conditioning) and (ii) similar gelation times compared to (Devezeaux de Lavergne et al., 2015b). US measurements were done at least in triplicate for each type of product.

3.2.4.4 Signal processing

The rf signals were processed with MATLAB™ (The MathWorks, Natick, Massachusetts, US), following the same automatic procedure so that to derive the three acoustic parameters of interest for the present study : wave velocity c and attenuation α in products, as well as the reflection coefficient sol-gel transition on PVC/product interface.

First, a low-pass filter with 15 MHz cutoff frequency was applied on the Fast Fourier Transform (FFT) of the signals for high-frequency noise filtration.

As depicted in Fig. 3.1 b, rf signals are composed of 3 main echoes. The first one, referred to as echo E_0 , corresponds to the energy reflected by the PVC-product interface at the arrival of the US beam in the product cavity. The two following echoes, referred to as E_1 and E_2 , originate from product-PVC interface at the opposite surface of the product cavity, after propagation through wave paths of distances respectively equal to d_1 and d_2 .

An automatic algorithm was developed to extract, from each rf signal, three sections covering the three echoes of interest (E_0 , E_1 and E_2). Rf signals acquired at the beginning of each experiment (at 20 and 50 °C) were used to extract three reference sections (corresponding to E_0 , E_1 and E_2) of 4 μs , centered with respect to the peak amplitude of the modulus of the Hilbert transform of each echo. The three reference sections were then used in a cross-correlation algorithm so that to determine the temporal windows of echoes E_0 , E_1 and E_2 for all rf signals.

The time-of-flight and the amplitude of echoes E_0 , E_1 and E_2 were then determined for each rf signal. The times-of-flight (respectively t_0 , t_1 and t_2 for echoes E_0 , E_1 and E_2) were obtained following the first-zero-crossing procedure (Haïat et al., 2005), consisting in the evaluation of the time corresponding to zero ordinate crossing after the first peak of each echo.

The amplitudes (respectively A_0 , A_1 and A_2 for echoes E_0 , E_1 and E_2) were computed in the frequency domain with the Fast Fourier Transform applied to the three previously described signal portions, filtered with a 20% tapered cosine window. The values of amplitudes were taken at the center frequency of the transducer (900 kHz).

Ultrasonic velocity c was then calculated on echoes E_0 and E_2 , following :

$$c = \frac{2 \cdot d_2}{t_2 - t_0} \quad (3.3)$$

The reflection coefficient of PVC-product interface was calculated on echo E_0 , following :

$$R = \frac{A_0}{A_{0,ref}} \quad (3.4)$$

where $A_{0,ref}$ is the amplitude of echo E_0 obtained on the reference signal (recorded before pouring the product in the measurement cavity, for the different levels of temperature). In absence of a product, this amplitude $A_{0,ref}$ corresponds to a full reflection configuration (negligible acoustic impedance of air compared to PVC). This is why it was used as reference for the calculation of sol-gel transition through products.

The attenuation coefficient α was obtained based on echoes E_1 and E_2 , following :

$$\frac{\alpha}{f^2} = \ln \left(\frac{|A_1|}{|A_2|} \right) \cdot \frac{1}{2 \cdot (d_2 - d_1)} \cdot \frac{1}{f^2} \quad (3.5)$$

3.2.5 Rheology

Visco-elastic shear moduli G' and G'' were measured using a commercial rheometer (Physica MCR-301, Anton Paar, Graz, Austria) equipped with a Couette geometry system (with sand-blasted surfaces). Cooling kinetics were controlled with the Peltier modulus so as to mimic the temperature decrease observed experimentally for US measurements in the cell. The following sequences were thus programmed : 2 h with linear decrease from 50 °C–25 °C, 2 h with linear decrease from 25 °C to 20 °C, and 10 h at 20 °C. The measurements were conducted at 1 Hz with 1% strain chosen in the linear viscoelastic domain, with 10 min time intervals. Rheology measurements were performed at least in triplicate, only on the six products containing gelling agents.

3.2.6 Density

Density measurements were conducted using 50 mL pycnometers (B0218/0033, Belleville SA, Fontenay-sous-Bois, France). Each pycnometer was calibrated at 20 °C and 50 °C with water for an accurate determination of the volume capacity of the pycnometers V at each temperature. In the case of liquid products, solutions were poured directly in pycnometers. The weight of the pycnometers was measured before (m_p) and after (m_{p+s}) being filled with solutions. The density ρ was then deduced following :

$$\rho = \frac{m_{p+s} - m_p}{V} \quad (3.6)$$

For solids, gels had to be cut into small fragments (squared section of 7mm width and 1.5 cm height) and approximately 15 g were inserted in the pycnometers. The pycnometers were then weighed (mass m_{p+s}) and the volume was made up with water. The pycnometers filled with fragments of gels and water were then weighted again (mass m_{p+s+w}). Finally, density values for solid products were computed following :

$$\rho = \frac{m_{p+s} - m_p}{V - \frac{m_{p+s+w} - m_{p+s}}{\rho_w}} \quad (3.7)$$

where ρ_w is the density in water (998.2 and 988.04 kg.m^{-3} respectively at 20 and 50 °C (Kell, 1975)).

Density measurements were done in triplicate.

3.2.7 Statistical analyses

The resulting sets of data related to G' , G'' , ρ , c , sol-gel transition and α were computed through statistical analyses with Anova with Matlab, after checking that all the data follow a normal distribution. The effects (i) of the type of food product, (ii) of the level of temperature and (iii) of the interaction between both factors were then investigated.

3.3 Results and discussions

3.3.1 Characterization of products

3.3.1.1 Viscoelastic properties

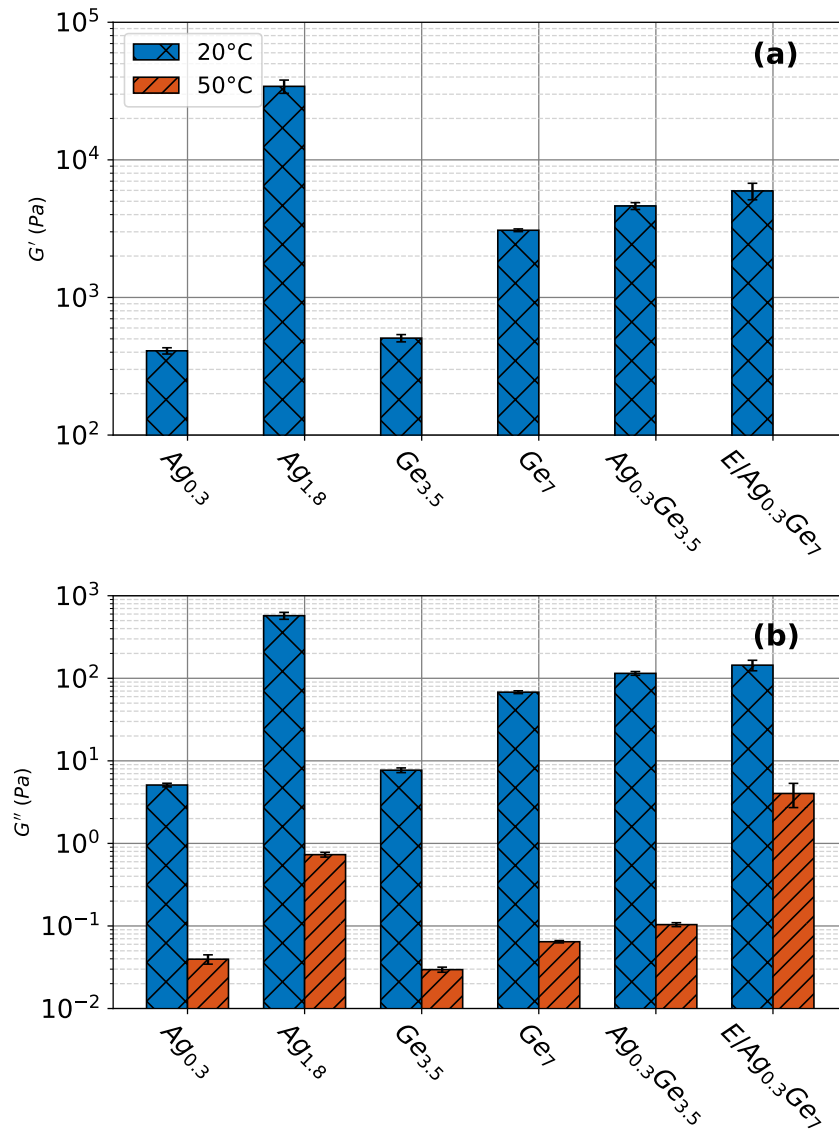


FIGURE 3.2 – Variations of shear viscoelastic moduli G' (a) and G'' (b) throughout the different gels and for the two temperatures. Significant differences were observed by Anova on G' ($p < 0.01$) for factors temperature ($F=475.5$), product ($F=235.6$) and associated interaction ($F=234.6$). Similarly, significant differences were reported for G'' ($p < 0.01$) for factors temperature ($F=700.3$), product ($F=275.9$) and associated interaction ($F=274.4$).

Fig. 4.2 shows the variations of G' and G'' throughout the six types of products containing gelling agents. However, at sol-state (50 °C), only $Ag_{1.8}$ and $E/Ag_{0.3}Ge_7$ were shown to have values of G' higher than the sensitivity threshold of the rheometer (respectively 0.29 ± 0.09 and 8.6 ± 5.2 Pa). As a consequence, the display scale in Fig. 4.2 a was optimized for the viewing of 20 °C G' data. Significant differences were reported by Anova on G' ($p < 0.01$) with the factors of temperature ($F=475.5$), product ($F=235.6$) and associated interac-

tion ($F=234.6$). Significant differences were also reported for G'' ($p < 0.01$) with the factors of temperature ($F=700.3$), product ($F=275.9$) and associated interaction ($F=274.4$).

The results of rheological characterizations plotted in Fig. 4.2 put in evidence the wide diversity of shear visco-elastic moduli obtained throughout the different products.

In spite of lower gelling agent concentrations investigated (0.3–1.8% for agar, compared to 3.5–7% for gelatin), agar was shown to have a higher impact on visco-elastic moduli. However, combining the presence of agar and gelatin in the same gel ($Ag_{0.3}Ge_7$) did not lead to cumulative effects on rheological moduli. These results are consistent with previous observations available in the literature (Clark et al., 1983; McEvoy et al., 1985), discussing phenomena of phase separation regimes between agar and gelatin networks (depending on thresholds and ratios of concentrations). In this way, the agar-gelatin mix $Ag_{0.3}Ge_7$ corresponds to a gelatin-dominant configuration, which may explain why only slight increases of G' and G'' values were reported between Ge_7 and $Ag_{0.3}Ge_7$. The effect of the addition of fat, for its part, can be discussed by comparing $Ag_{0.3}Ge_7$ with $E/Ag_{0.3}Ge_7$. At sol-state (50 °C), the presence of emulsion strikingly affected the values of G'' , suggesting changes of interactions, or even of structure. At gel state (20 °C), a slight increase of G'' and an increase of 1500 Pa of G' were observed between $Ag_{0.3}Ge_7$ and $E/Ag_{0.3}Ge_7$, showing the impact of the increasing concentration of polymer content in the aqueous phase of $E/Ag_{0.3}Ge_7$ compared to $Ag_{0.3}Ge_7$.

3.3.1.2 Density

Fig. 4.3 shows the results of density measurements, for all products (including both control solutions and gels) and for the two temperature levels. Significant differences were reported by Anova ($p < 0.01$) for temperature ($F=263.19$), product ($F=252.25$) and, to a lesser extent, for temperature/product interaction ($F=2.46$) factors.

For all products, similar gaps of density were reported between 50 and 20 °C. As a consequence, neither the presence of sucrose or fat, nor structure changes in agar/gelatin networks seem to affect significantly the variations of ρ with temperature (within 20–50 °C range). This decrease of ρ with respect to the temperature is thus governed by the well-known variations of intrinsic thermo dynamical properties of water (Kell, 1975).

A gradual increase of mass density was observed accordingly to the increase of the mass of sucrose and gelling agents in products (from S_w to $Ag_{0.3}Ge_7$). This may be explained by the higher molecular weight of these components (compared to water), with 3-D organizations of molecules during the dissolution that poorly affects the volume of products.

The density in liquid emulsion E/S_{ws} and in emulsion filled gel $E/Ag_{0.3}Ge_7$ were consistent with a mixing law between the densities in continuous and dispersed phases.

3.3.2 Impact of composition and temperature on US properties

The results of ultrasound measurements were separated in three different figures. Fig. 4.3 shows the variations of velocity, reflectivity and attenuation in the three control solutions, allowing us to discuss the effect of sucrose and fat independently from the gelling agents interactions. Fig. 4.5 presents the same US parameters for gel products without fat. Products

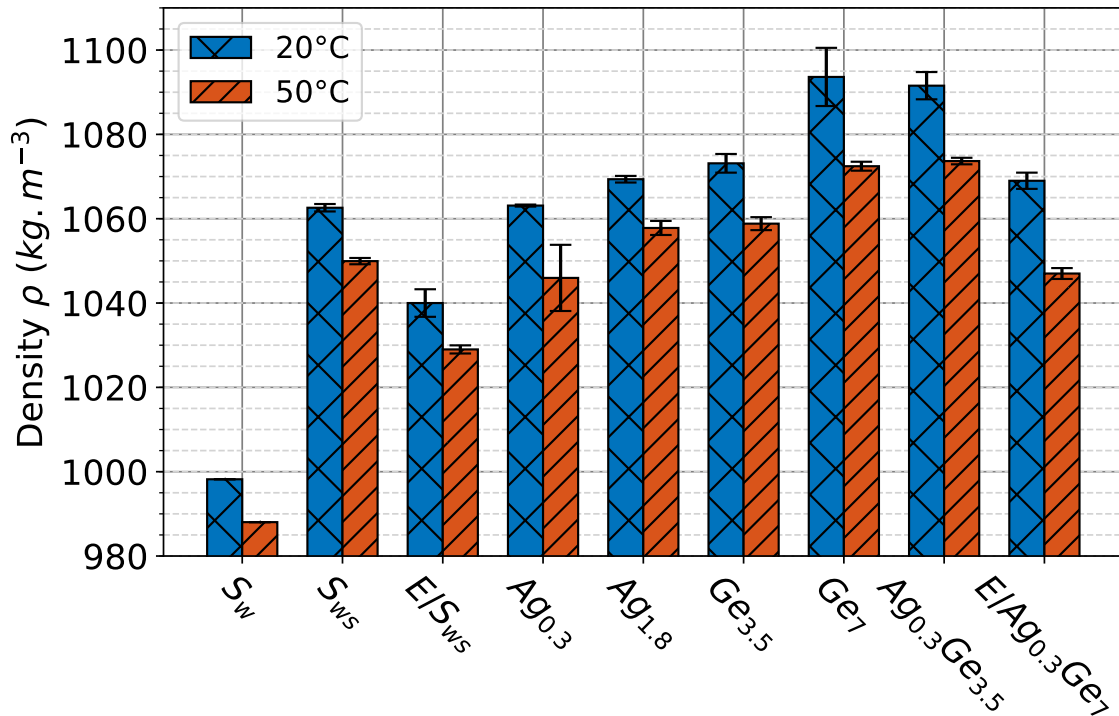


FIGURE 3.3 – Variations of mass density ρ throughout the different gels and for the two temperatures. Significant differences were reported by Anova ($p < 0.01$) for factors temperature ($F=196.35$), product ($F=291.0$) and associated interaction ($F=3.2$).

were ranked from the left to the right in ascending order of gelling agent mass content. This figure makes it possible to comment on the effect of the gradual increase of the amount of the two gelling agents on the ultrasonic properties at the two temperature levels. Fig. 3.7 shows the combined effects of fat and gelling agents, with the variations of ultrasonic parameters through products S_{ws} , E/S_{ws} , $Ag_{0.3}Ge_7$ and $E/Ag_{0.3}Ge_7$.

3.3.2.1 Ultrasonic velocity : a driver of bulk elasticity

This section aims at investigating how the characteristics of model foods impact the variations of US velocity. The Anova test reported significant differences ($p < 0.01$) on c for temperature ($F=742.7$), product ($F=368.9$) and associated interaction ($F=81.5$) factors.

3.3.2.1.1 Contribution of sucrose In fluid samples like S_w , S_{ws} and E/S_{ws} , shear elastic modulus (G') was shown to be negligible, and ultrasound velocity may thus be determined as follows :

$$c = \sqrt{\frac{K'}{\rho}} \quad (3.8)$$

Where the bulk modulus K' is the inverse of fluid compressibility χ .

The increase of velocity observed in S_w between 20 and 50 °C (see Fig.4.4a) has been shown in the literature to be mainly driven by the increase of compressibility (Del Grosso and Mader, 1972; Kell, 1975), but is also consistent with the decrease of density (reported in

Fig. 4.3). Conversely, the increase of ρ between S_w and S_{ws} does not support the increase of velocity (see 3.8). This observation allows to underline the high compensatory role of compressibility χ . For sucrose or other monosaccharide solutions, this increase of χ has been conferred to the substitution of water bonds by water-solute bonds (Berchiesi et al., 1987; Smith and Winder, 1983).

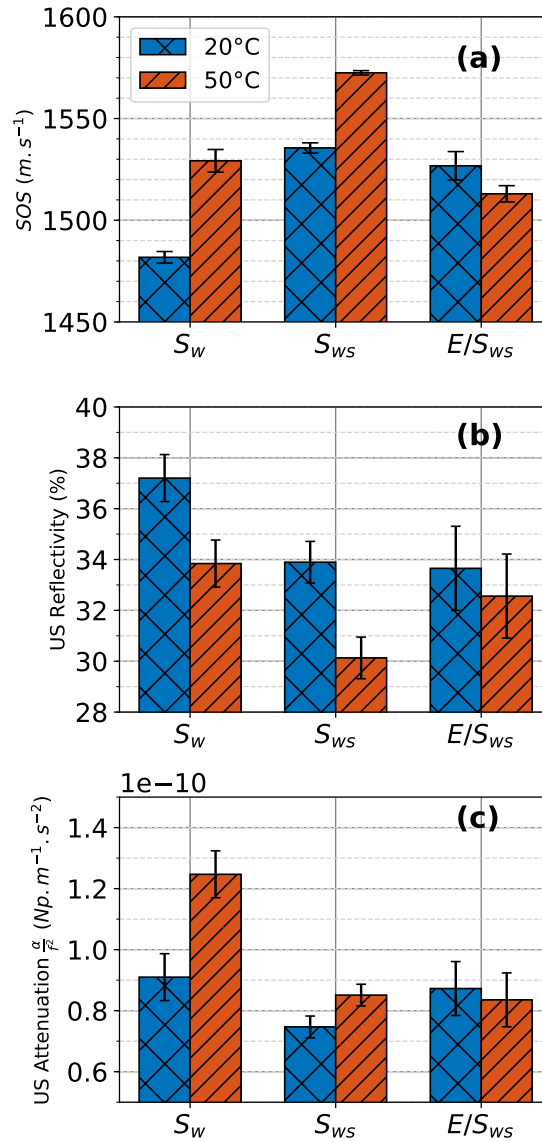


FIGURE 3.4 – Effect of sucrose and emulsion on the variations of (a) the velocity, (b) the reflectivity and (c) the attenuation of US waves in liquid control products.

3.3.2.1.2 Contribution of gelling agents The main difference between US velocity in gel and fluid state materials (see 3.1 and 3.8) lies in the contribution of the shear elastic modulus G' . However, the values of G' reported throughout the different products at 20 °C (ranging between 0.4 and 34.2 kPa) remain negligible compared to the values of bulk modulus K' available in the literature for water (2.2 GPa) and agar/gelatin mixes (2.8 GPa in a 3% agar - 6% gelatin mix (Glozman and Azhari, 2010)). This is why the extreme values of G' reported for gels $Ag_{0.3}$ and $Ag_{1.8}$ at 20 °C do not result in significant differences in terms of US velocity.

Consistently with previous conclusions in the literature, US velocity is not relevant to probe the mechanical state of hydrogels (Emery et al., 1986; Parker and Povey, 2012).

Based on this observation, the bulk modulus K' was calculated from c and ρ measurements in the different gels by neglecting G' in 3.1. The values of K' are plotted in Fig. 3.6 b, with error bars corresponding to the uncertainty $\Delta K'$ derived from the uncertainty on c and ρ .

Whatever the type and the concentration in agar and/or gelatin, a similar decrease of ultrasound velocity (around $35 m.s^{-1}$) was observed between 50 and 20 °C throughout the different gels. In the same way as for control solutions, this decrease of ultrasound velocity was not consistent with density variations and was thus dominated by the decrease of the bulk modulus, in accordance with previous observations in the literature (Cobus et al., 2007; Emery et al., 1986; Parker and Povey, 2012)

For both levels of temperatures, US velocity was shown to increase inconsistently as a function of density throughout the different products (see Fig. 3.8 a1). Beyond the impact on the increase of density, the addition of the different solutes (including sucrose, as well as agar and gelatin) contributes to the increase of bulk modulus in products (see Fig. 3.6 a). This behaviour is very likely to be different according to the type of solute considered. However, a plot of velocity versus dry matter content (encompassing the mass fraction of all solutes) also shows a good alignment of three points (see Fig. 3.8 a2). Hence, dry matter content seems to be an appropriate descriptor of the evolution of US velocity.

3.3.2.1.3 Contribution of emulsion As in the case of density, the bulk modulus K' of an emulsion can be determined as a linear combination of the values in the continuous and dispersed phases (McClements, 1991). Based on data from (Coupland and McClements, 1997) for sunflower oil at 20 °C ($\rho = 919 kg.m^{-3}$ and $K' = 1.99 GPa$), the mixing laws for ρ and K' lead a value of US velocity in E/S_{ws} of around $1525 m.s^{-1}$, which is consistent with the present results (see Fig. 3.7 a). The results show that the 20% oil fraction added to S_{ws} in solution E/S_{ws} has a higher impact on c at 50 °C than at 20 °C, due to a growing gap of velocity between the continuous phase (corresponding to S_{ws}) and the dispersed phase (sunflower oil) when temperature increases. The gaps of velocity between products without and with emulsion were investigated from the data in Fig. 3.7 a for gels ($-18 \pm 5 m.s^{-1}$ at 20 °C, $-78 \pm 4 m.s^{-1}$ at 50 °C) and for control solutions ($-9 \pm 9 m.s^{-1}$ at 20 °C, $-59 \pm 5 m.s^{-1}$ at 50 °C). The errors indicated here correspond to the sum of the standard deviations for products with and without emulsion. Although these errors only give a rough and overrated estimation of the variability of the gap of US velocity between the two conditions, they make it possible to assert that for both levels of temperature, higher decreases of US velocity were reported for gels than for control solutions. This may be due to differences in temperature dependence of US velocity in the continuous phases of E/S_{ws} and $E/Ag_{0.3}Ge_7$.

3.3.2.2 Consistency between Ultrasonic reflectivity and velocity

After US velocity, this section focuses on the properties of model foods impacting the variations of US reflectivity. Significant differences were observed by Anova on R ($p < 0.01$)

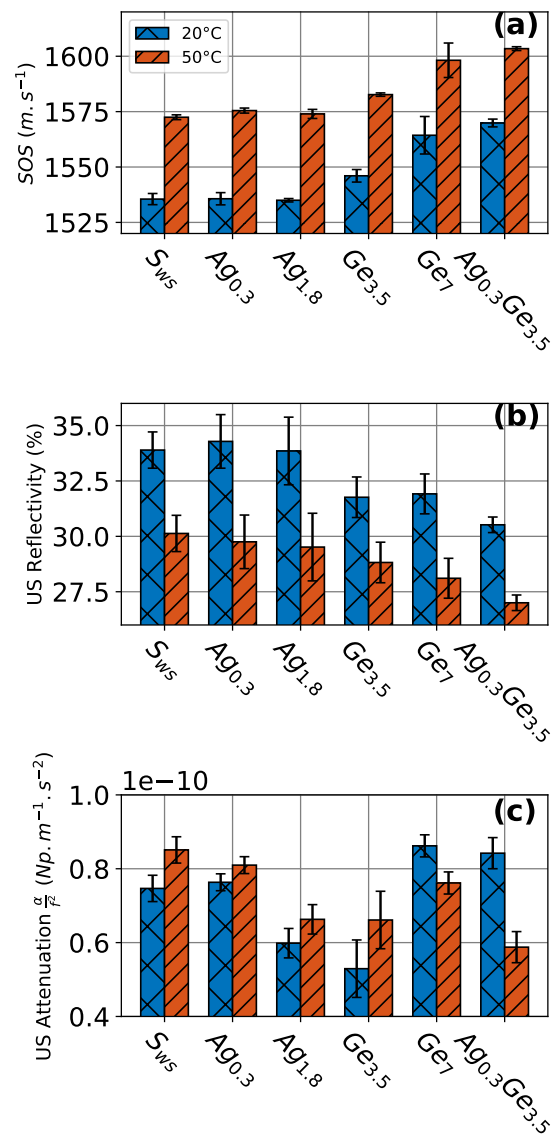


FIGURE 3.5 – Effect of agar and gelatin concentrations on the variations of (a) the velocity, (b) the reflectivity and (c) the attenuation of US waves in products without emulsion.

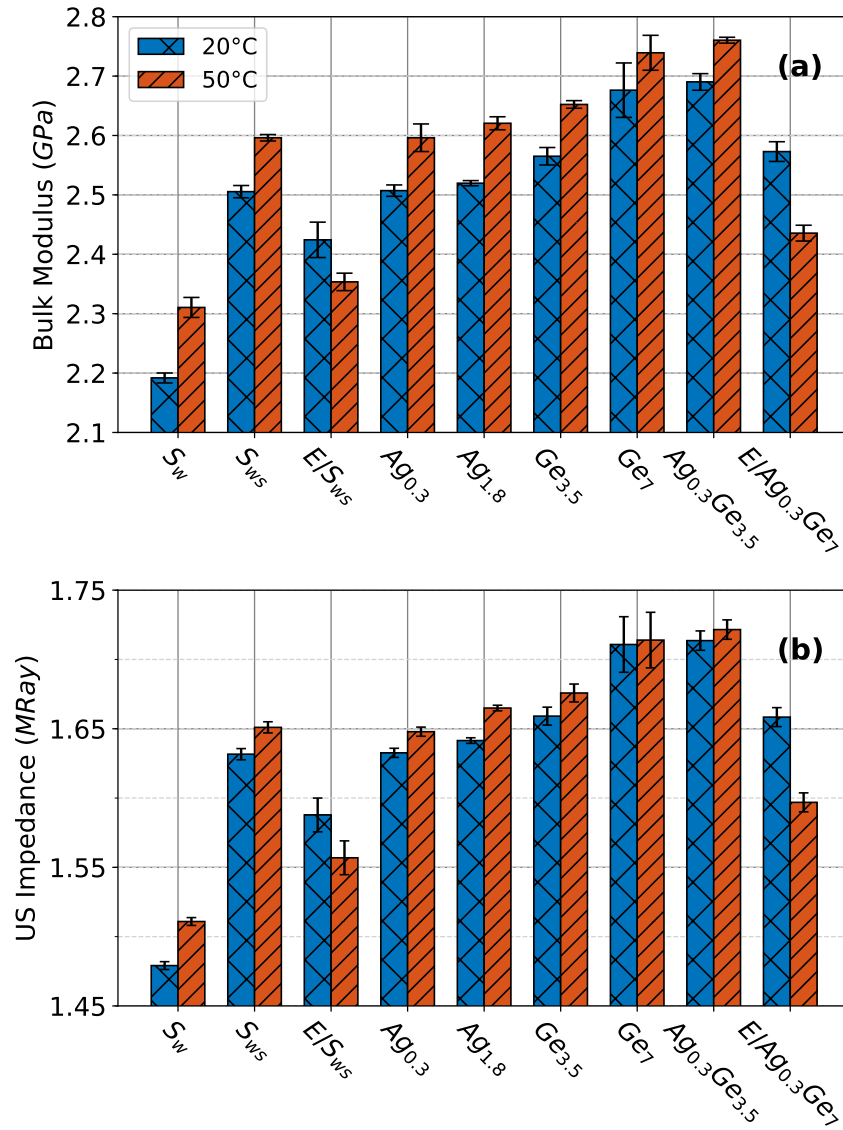


FIGURE 3.6 – Variations of (a) bulk modulus K' and of (b) acoustic impedance Z throughout the different model foods, calculated from mass density and US velocity measurements.

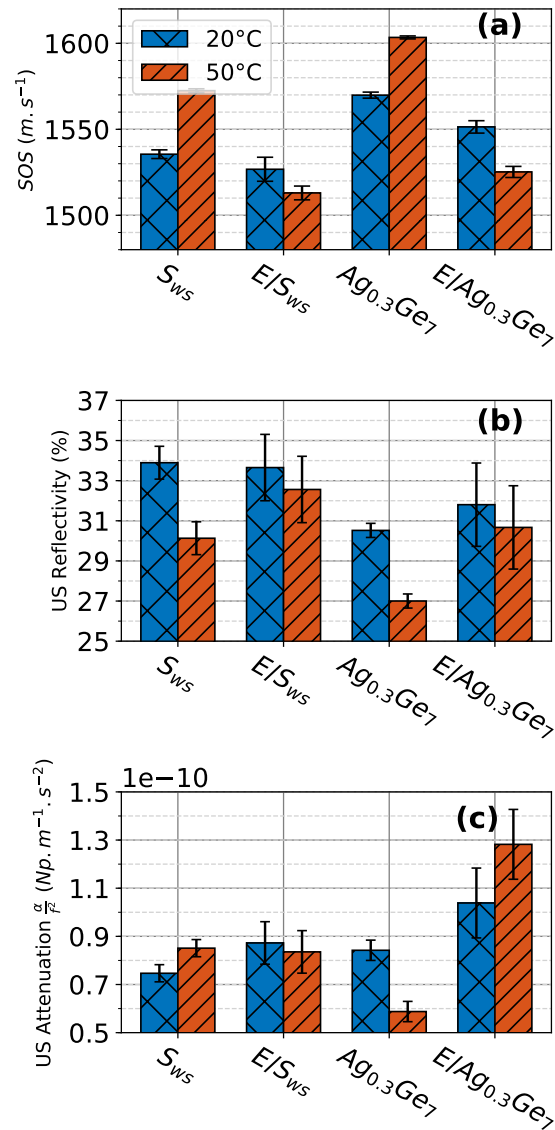


FIGURE 3.7 – Effects of emulsion and of agar/gelatin mix on the variations of (a) the velocity, (b) the reflectivity and (c) the attenuation of US waves.

for temperature factor ($F=166.3$), and to a lesser extent for product ($F=30.0$) and temperature/product factor ($F=2.3$).

Unlike for US velocity, the advantage of US reflection coefficient sol-gel transition is that it is easily measurable as it does not require the accurate knowledge of the wave path geometry. Amplitude measurements on rf signals are indeed self-sufficient for the determination of R (see 3.4). However, US reflectivity does not only depend on the properties of the product, and may also be affected by the variations of PVC properties with temperature. For echo E_0 , the reflection coefficient is related to the gap of acoustic impedance between PVC and the food product (see 3.2). Velocity and density measurements performed separately on the same material made it possible to show that the acoustic impedance of PVC is of around 3.14 MRay at 20 °C and 2.99 MRay at 50 °C. The acoustic impedances in the different products were calculated from c and ρ measurements ($Z = \rho \cdot c$) and plotted in 3.6 b, with error bars corresponding to the measurement uncertainty ΔZ . The results show that the variations of the acoustic impedance as a function of temperature is lower for food products (lying between 0.01 and 0.07 MRay) than for PVC (0.15 MRay). As a consequence, the differences observed between sol-gel transition values at 20 and 50 °C are mainly driven by the variations of the acoustic impedance of PVC.

However, for a given temperature, PVC had no impact on the variations of sol-gel transition reported between the different products in Fig 4.4 b and Fig. 4.5 b. For products without emulsion, US reflectivity was shown to decrease as a function of dry matter content (see Fig. 3.8 b_2), which is consistent with the increase of acoustic impedance in products (tending to a reduction of the gap of acoustic impedance with PVC). The differences between products are slightly less pronounced than for US velocity, due to the variability induced by the sensitivity to the quality of the acoustic coupling between the product and the surface of the measurement cell. However, the results show a good agreement between US velocity and reflectivity (see Fig. 3.9), which is expected as both US reflectivity and velocity depend on the acoustic impedance in products.

3.3.2.3 Relationship between ultrasonic attenuation and sol-gel transition

This section proposes to discuss how US attenuation may contribute to describing the sol-gel transition of the model foods. Contrary to velocity and reflectivity measurements, Anova tests on α reported significant differences only for the product factor ($p < 0.01$, $F=11.4$). Temperature factor ($p=0.12$, $F=2.4$) and temperature/product interaction ($p=0.04$, $F=2.2$) were not shown to be clearly discriminating factors.

US attenuation has been widely used in the literature for the study of sol-gel transition of various polymers. Correlations have been put in evidence between the inflection point of US attenuation curve and solgel transition temperature of amylose, alginate, pectin or also carrageenan systems (Audebrand et al., 1995, 2006; Wang et al., 2005). During gelation, the chains of gelatin and agar progressively change their conformation to form respectively triple and double helical networks. The degree of helicity of gelatin molecules has been identified as a major driver of the variations of US attenuation during sol-gel transition (Emery et al., 1986). For gelatin, a minimal concentration of 5% wt was necessary to observe a significant increase of attenuation at gel state (Parker and Povey, 2012). Structural changes

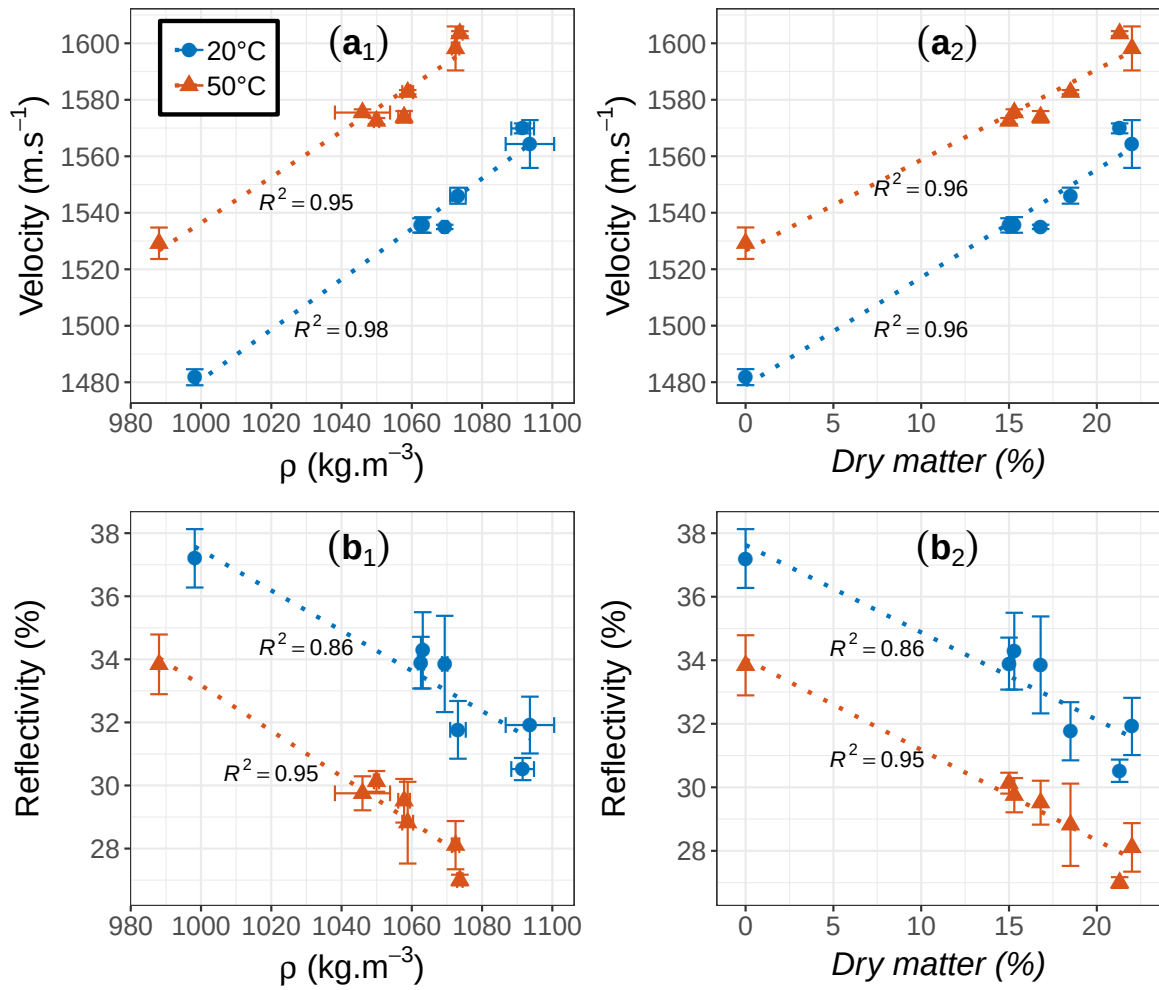


FIGURE 3.8 – Variations of US velocity (a) and of US reflectivity (b) as a function of density (a_1, b_1) and dry matter content (a_2, b_2) throughout products without fat.

in agar systems were for their part shown to be detectable for an agar concentration of 3 % wt (Gormally et al., 1982). In the present study, similar slight decreases of US attenuation were reported between 50 and 20 °C for control solution S_{ws} and for gels $Ag_{0.3}$, $Ag_{1.8}$ and $Ge_{3.5}$ (see Fig. 4.5 c). As $Ag_{1.8}$ has the highest value of G' , these results suggest that US attenuation does not enable to characterize the emergence of shear elastic moduli during sol-gel transition for the present samples. However, the opposite trend was drawn for gel Ge_7 (consistently with the 5 % wt threshold described above) and significantly emphasized for mixgel $Ag_{0.3}Ge_7$, suggesting, as described by (Audebrand et al., 1995), the good sensitivity of US attenuation to phase separation phenomena (occurring at early steps of the gelation).

In the literature, the dispersed phase of oil droplets of emulsions has been shown to lead to scattering phenomena resulting in US attenuation (Chanamai et al., 1998; Coupland and McClements, 2001). The average size of oil droplets in the present samples (around 1 μm , determined during pretests with light microscopy) was significantly lower than the wavelength of US waves in gels (around 1.5 mm), which is consistent with Rayleigh scattering configuration (McClements and Povey, 1989). However, no significant increases of US attenuation were reported when adding emulsion in samples, except between $Ag_{0.3}Ge_7$ and $E/Ag_{0.3}Ge_7$ at 50 °C (see Fig. 3.7 c). As a consequence, the results suggest that for this US frequency and for these emulsion properties, US attenuation does not seem to be mainly governed by scattering phenomena. In absence of scattering phenomena, the attenuation coefficient of a two phase non-scattering system has been shown to be equal to the volume average of the attenuation coefficients of the component phases (Allegra and Hawley, 1972; McClements, 1991)

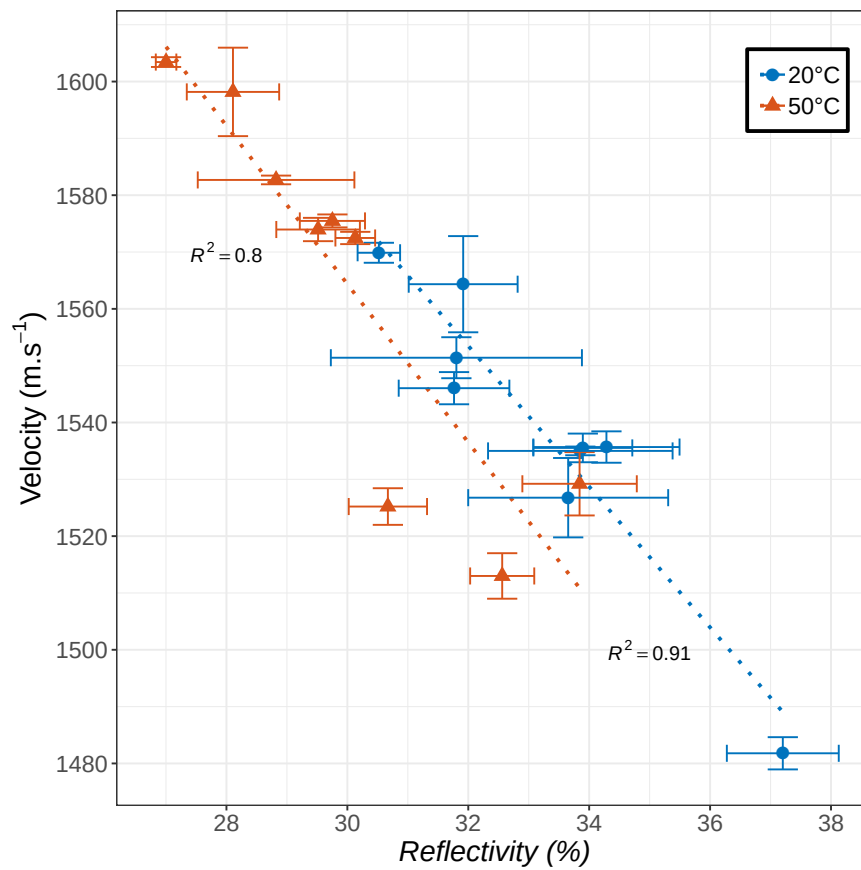


FIGURE 3.9 – Relationship between US velocity and reflectivity measurements reported throughout the different food products.

3.4 Conclusion

In the present study, the determinants of the variations of US properties during sol-gel transition were investigated in complex model foods. The variations of US velocity and reflectivity were shown to be dominated by bulk elastic modulus rather than by density, both of them evolving independently from sol-gel transition during temperature decrease. The values of US attenuation were for their part consistent with the formation of triple helical gelatin network for the high gelatin concentration sample (Ge_7), and with the interactions between agar and gelatin phases for the mixed gel ($Ag_{0.3}Ge_7$). However, the variations of US attenuation through sol-gel transition did not put in evidence significant contributions of scattering phenomena in presence of emulsion. Contrary to US velocity and attenuation, US reflectivity can be easily measured, as its calculation does not depend on sample thickness.

The US reflection coefficients measured in the present study correspond to a full and homogeneous contact between food and a smooth and non-deformable surface (PVC). A perspective for future works will be to investigate the behaviour of US reflectivity at interfaces between food and more complex surfaces. Several studies have indeed shown that aside from being related to bulk properties of materials, US reflectivity is also highly sensitive to the properties of interfaces (roughness, lubrication) and to coupling conditions (Dwyer-Joyce, 2005; Hodgson et al., 2000). The high complexity of tongue organ (deformability, roughness, wettability, lubrication) is very likely to influence the physical interactions between tongue and food. Such interactions play a crucial part in various mechanisms of texture perceptions for the present emulsion filled gels (Devezeaux de Laverne et al., 2015a,b). Therefore, this study is a baseline for future investigations on how US reflectivity has a potential for the non-invasive and real-time characterization of the physical interactions between tongue and food during oral processing, resulting in texture perceptions.

Acknowledgments

We want to acknowledge Jean-Luc Gennisson for his thorough advice for the analysis of US measurements. We also thank Florent Brizard and David Forest for their kind and precious technical support.

Principaux messages à retenir :

- La vitesse ultrasonore dans l'aliment et la réflectivité ultrasonore à l'interface entre la cellule de mesure (PVC) et l'aliment dépendent majoritairement des variations du module de compressibilité isostatique durant la transition sol-gel des produits.
- L'atténuation des ondes ultrasonores peut permettre de caractériser, durant la gélification, la formation des réseaux de triples hélices dans les gels à forte teneur en gélatine, ou encore l'interaction entre les phases d'agar et de gélatine dans les gels mixtes
- Le coefficient de réflexion est un paramètre prometteur pour l'étude du système langue-palais car (i) sa caractérisation ne requiert pas de données morphologiques de l'échantillon et (ii) il est sensible aux propriétés des milieux de part et d'autre d'une interface, mais également au couplage mécanique à l'interface.

L'impact de l'aliment sur les paramètres ultrasonores a donc pu être évalué. Il a permis de mettre en avant l'intérêt de la réflectivité ultrasonore pour ce travail, qui permet de caractériser le couplage mécanique entre deux milieux. En effet, il s'agit d'une grandeur relative aux propriétés d'interface, évaluable *in situ*, et qui présente donc un fort potentiel pour étudier l'interface entre la langue et l'aliment. C'est pourquoi la suite du travail (décrite dans le chapitre 4) s'est tournée vers l'étude de **l'impact des paramètres de surface de la langue et des propriétés de l'aliment sur la réflectivité de l'interface langue-aliment** (figure 3.10).

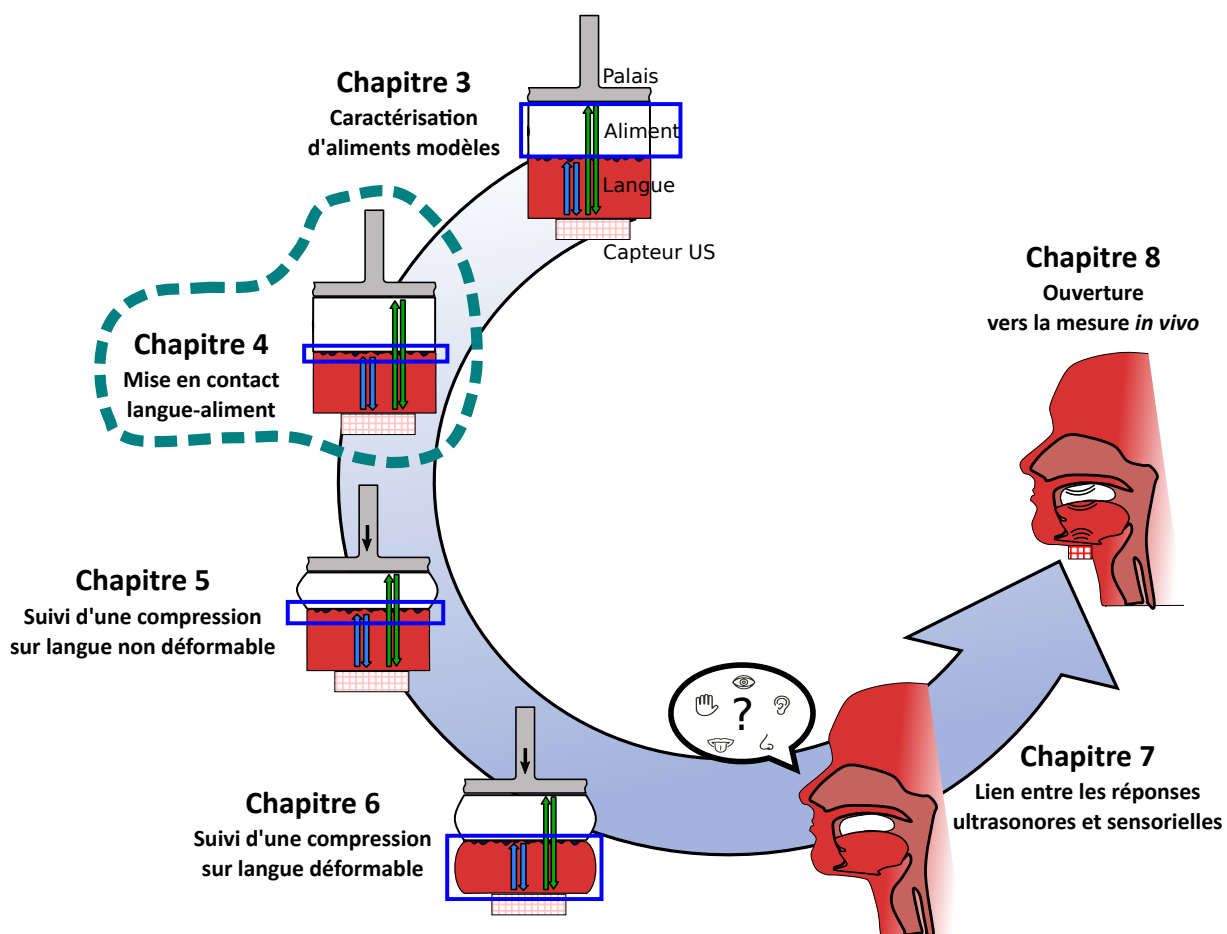


FIGURE 3.10 – Stratégie expérimentale de la thèse

Chapitre 4

Les Ultrasons quantitatifs comme nouvelle méthode pour caractériser l'interface langue-aliment : une étude *in vitro* sur l'impact de la rugosité et de la lubrification de la langue

Sommaire

4.1 Introduction	90
4.2 Materiel and methods	93
4.2.1 Model's food	93
4.2.2 Tongue bio-mimicking surface	94
4.2.3 Quantitative Ultrasound measurements	95
4.2.4 Statistical analysis	97
4.3 Results and discussions	97
4.3.1 Impact of tongue roughness on the ultrasound reflection coefficient	97
4.3.2 Impact of food properties on US reflectivity	100
4.3.3 Impact of tongue lubrication on US reflectivity	102
4.4 Conclusion	104

Abstract

The reflection coefficient of a 1 MHz ultrasound compressional wave between tongue surface mimicking samples (rough and lubricated) and model food gels of agar and/or gelatin was measured. For highly smooth and lubricated conditions, weak variations of the reflection coefficient were reported throughout the different gels ($33.6 \pm 3.5 \%$). An increase of the reflection coefficient was observed (i) for deep and tightened tongue asperities, (ii) for low lubrication conditions and (iii) for gels with low rigidity (reaching between 45.9 ± 3.4 and $84.3 \pm 0.7 \%$ throughout the different gels). The ultrasound reflection coefficient reflects the capacity of the food gels to fill the surface asperities, or to promote the formation of a coupling liquid film. This study paves the way for the use of ultrasound methods for the characterization and understanding of physical phenomena involved in texture perceptions between the tongue and the palate.

4.1 Introduction

Based on the well-known relationship between diet and health, public authorities encourage food industry to reduce sugar, salt and fat content in processed food, in order to ensure healthy food supply. However, the success of emerging food products still relies on sensory appreciation by the consumer. In particular, texture perceptions play a major role in consumer's preferences and choices. Therefore, the road to healthier food products runs through a better understanding of the mechanisms of texture perceptions.

Oral processing and texture perceptions

The definition of food texture by the International Organization for Standardization (ISO, 1992) states “all the rheological and structural (geometric and surface) attributes of the product, perceptible by means of mechanical, tactile and, where appropriate visual and auditory receptors”. During oral processing, the rheological and structural alterations of food are perceived by mechano receptors located in various organs of the oral cavity (including lips, periodontal ligaments, oral mucosa and tongue) (Chen, 2009; Koç et al., 2013; Szczesniak, 2002). Even though the use of these different organs highly varies throughout individuals and food categories (van Vliet, 2002), tongue remains as the major organ involved in food texture evaluation during oral processing (Hiemae, 2004). Tongue is a highly complex organ (heterogenous, viscoelastic and anisotropic), composed of various groups of muscles to allow a high maneuverability of food bolus (Abd-El-Malek, 1939; Kajee et al., 2013; Miller et al., 2002; Shawker et al., 1984). The contraction of these muscles during speech, food oral processing or swallowing leads (i) to acute variations of the viscoelastic properties of the tissues, as well as (ii) to high amplitude motions and changes in shape and curvature of tongue dorsal surface. Due to the presence of papillae (filliform, fungiform), the roughness of tongue surface may affect the mechanical interaction between tongue and food during oral processing, and consequently texture properties (Lauga et al., 2016; Ranc et al., 2006b; Stokes et al., 2013). Various mechanoreceptors distributed in lingual mucosa make it possible to evaluate and monitor the mechanical status of food during bolus formation (Bukowska et al.,

2010) : slowly adapting (SA) receptors (Merkel's discs and Ruffini endings) for static stimulations, and rapidly adapting (RA) receptors (Meissner's and Pacinian corpuscles) for sudden stimuli onset/offset. Tactile perceptions emerging from the activation of these receptors are critical, not only because they highly contribute to the sensory experience of the consumer, but also because they make it possible to decide the most appropriate moment to trigger a safe swallowing sequence. A growing part of the population is affected by troubles of swallowing (dysphagia), with potential dramatic consequences for patients, such as risks of choking, lung infections and in a longer perspective, avoidance of some categories of food and drink products, leading to dehydration and malnutrition issues (Rommel and Hamdy, 2016). In this regard, understanding the mechanisms of texture perceptions between tongue and palate before swallowing is essential in order to design appropriate alternative food products combining health and pleasure for patients affected by dysphagia.

Instrumental investigations of texture perceptions

Various approaches have been proposed in the literature to investigate the physical determinants of food texture properties between tongue and palate (Stokes et al., 2013). Rheology and tribology are two sub-disciplines of mechanics essential for this purpose.

The rheological properties of food are complex because even before their introduction in mouth, they strongly vary over time, depending on their intrinsic stability, on their temperature or also on their manipulation by the consumer. Rheological applications were particularly used to study texture properties perceived at early stages of oral processing (Funami, 2017; Pons and Fiszman, 1996; Stokes et al., 2013; Szczesniak, 2002; van Vliet, 2002). For instance, the stress and strain at yield or fracture of cheese products were found to be correlated with texture attributes like "firm", "hard" or "elastic" (Foegeding, 2007). On the other hand, texture attributes like "creamy", "crumbly" or "grainy" do not correlate with the rheological properties of food as they require to account for the mechanical breakdown undergone by food during oral processing (Stokes et al., 2013). As a consequence, various rheological methodologies have been proposed to study the link between texture perceptions and the rheological properties of food boli (obtained *ex situ* after expectoration by volunteers, or *in vitro* by devices developed to mimic oral processing) (Panouillé et al., 2016). For example, storage and loss shear moduli measured in food boli were successfully compared to texture perceptions related to mouth coating, or residual sensations after swallowing (Saint-Eve et al., 2015). However, the use of rheological approaches faces limitations when it comes to study texture features depending on surface properties.

On the other hand, tribological approaches were shown to be relevant to study friction mechanisms between food and oral surfaces at the end of oral processing (involved in texture perceptions such as astringency, fattiness or oiliness) (Camacho et al., 2014; Panouillé et al., 2016; Stokes et al., 2013). Tribological applications partially allow to account for physiological properties of oral mucosa (such as roughness and lubrication), that are as much important as food properties to understand texture perceptions. However, both rheological and tribological approaches face the limit of being restricted to *in vitro* or *ex vivo* frameworks. As suggested by several authors (Panouillé et al., 2016; Szczesniak, 2002), the development of *in situ*, real-time and non-invasive methodologies is of great importance to go further in

the understanding of the dynamic mechanisms of texture perceptions, all by accounting for the high variability of oral physiology.

The potential of Quantitative Ultrasound (QUS)

Based on their non-destructive, non-invasive and real-time nature, ultrasound techniques have been shown to be promising for the characterization of bulk and interfacial mechanical properties in food products and transformation processes (Awad et al., 2012; McClements and Gunasekaran, 1997). Food oral processing can also be in some way considered as a transformation process. The development of ultrasound techniques to monitor food oral processing could then provide original insights to study texture perceptions. Although the complexity of ultrasound wave propagation phenomena through tongue and oral cavity has been put in evidence for decades (Kelsey and Minifie, 1971), ultrasound imaging of the oral cavity has been proposed for various fields of applications : to study the conformation of the tongue during speech (Stone, 2005), to understand the origin of sleep apnea events (Chien et al., 2017; Weng et al., 2017), to study swallowing phase for dysphasic patients (Hsiao et al., 2012; Kim and Kim, 2012) or also to investigate bolus flow during swallowing (Chi-Fishman, 2005; de Wijk et al., 2006a; Galén and Jost-Brinkmann, 2010; Gao and Kohyama, 2014; Gao et al., 2013; Peng et al., 2000). These studies demonstrate the accessibility of the tongue food-palate system with ultrasound. Moreover, several studies have successfully shown the potential of ultrasound imaging to monitor the echo amplitude of the dorsal surface of tongue, and then to track tongue motions during food oral processing (de Wijk et al., 2006a; Gao et al., 2016a,b).

Aim of the study

In the same context, the objective of the present approach is to investigate if, irrespective of tongue motions, the amplitude of the echo from the dorsal surface of the tongue could also carry information about the physical interactions between tongue and food. Such interactions are actually critical for the understanding of the mechanisms underlying texture perceptions. Face to the high complexity of wave propagation phenomena in oral cavity, a controlled and oversimplified experimental framework was required. This study proposes to investigate the relative contributions (i) of tongue surface properties (independently from tongue motions and deformability) and (ii) of food properties on the variations of the ultrasound reflection coefficient at tongue-food interface. The knowledge gained by this study must help to identify and characterize physical phenomena that may contribute to stimulating tongue mechanoreceptors during oral processing. The present work proposes to study the proof-of-concept of a newly designed ultrasound device with a controlled *in vitro* set-up mimicking the deposition of the food product on tongue surface (early stage of oral processing). In particular, the roles of tongue roughness and lubrication were investigated.

4.2 Materiel and methods

4.2.1 Model's food

Considering simple homogenous model foods with controlled planar surfaces was a mandatory step in order to obtain reproducible conditions for the investigation of tongue-food interaction in this feasibility study. Gels and emulsion filled gels of agar and gelatin have been shown in the literature to be interesting models to study texture perceptions. Varying the concentrations of biopolymer in these products make it possible to obtain wide ranges of mechanical properties (including rigidity, adhesion as well as holding capacity) leading to various texture sensory trajectories (Devezeaux de Lavergne et al., 2015b). As a consequence, such gels are appropriate models in order to investigate the potential of the ultrasound method. Moreover, a recent study by our group proposed to characterize the ultrasound properties of these gels in a dedicated measuring cell made of polyvinyl chloride (PVC) (Mantelet et al., 2018a). The knowledge gained in our previous study by the characterization of the physical determinants of ultrasound wave velocity and reflection coefficient in such a controlled measuring cell should now help to understand the behavior of the ultrasound reflection coefficient between similar model foods and a rough and lubricated surface of PVC.

Eight food gels of agar (HP700IFG, Kalys, Bernin, France) and/or gelatin (Bloom 250 PS 8/3, Rousselot, Gent, Belgium) were considered to investigate the impact of food physical properties on the ultrasound reflection coefficient at tongue-food interface. The preparation protocol, adapted from the work by (Devezeaux de Lavergne et al., 2015b), was extensively described in our previous study (Mantelet et al., 2018a) et al. 2019). Briefly, it consists of dissolved gelling agents and sucrose (Daddy, Cristalco, Paris, France) in a solution of water (at 100 °C for agar, 60 °C for gelatin). At the end of the preparation, the samples were poured in cylindrical molds made of polyethylene (30 mm diameter, 10 mm height), and left at 20 °C for 15 to 18 h. The samples were then unmolded at the last moment before the experiments.

Table 4.1 summarizes the composition of the 8 model foods : 2 agar gels ($Ag_{0.3}$ and $Ag_{1.8}$), 3 gelatin gels ($Ge_{3.5}$, Ge_7 and Ge_7T) and 3 mixed gels ($Ag_{0.3}Ge_{3.5}$, $Ag_{0.7}Ge_{0.75}$ and $Ag_1Ge_{0.75}$). Ge_7 and Ge_7T differ by the presence of TWEEN 20 (CAS : 9005-64-5 FG, Sigma-Aldrich, St Louis, MO, USA), an emulsifier that affects the wettability of the sample. Young's modulus was measured for each type of food product. Uni-axial compression tests were performed with a Texture Analyser (TA.XT plus, Stable Micro System, Surrey, United Kingdom) on the cylindrical samples (30 mm diameter, 10 mm height) lubricated with paraffin oil (Devezeaux de Lavergne et al., 2015b). The experiments were performed at room temperature (20 °C). A 70 mm diameter flat circular probe was used with a constant speed of 1 mm.s⁻¹, up to 80 % strain rate. Young's modulus was calculated as the initial slope of the stress/strain curve using MATLAB™ (The MathWorks, Natick, Massachusetts, USA). At least six replications were performed for each reference.

TABLEAU 4.1 – Food composition. All samples contained 15% wt% of sucrose.

Product	Water wt%	Agar wt%	Gelatin wt%	TWEEN 20 wt%
$Ag_{0.3}$	84.7	0.3	-	-
$Ag_{1.8}$	83.3	1.8	-	-
$Ge_{3.5}$	81.5	-	3.5	-
Ge_7	78	-	7	-
$Ag_{0.3}Ge_{3.5}$	81.2	0.3	3.5	-
$Ag_{0.7}Ge_{5.85}$	78.45	0.7	5.85	-
$Ag_1Ge_{0.75}$	84.25	1	0.75	-
Ge_7T	77.25	-	7	1.5

4.2.2 Tongue bio-mimicking surface

Cylinders of polyvinylchloride (PVC) were manufactured (UFP, Le Versoud, France) and used as tongue bio-mimicking samples (50 mm in diameter and 20 mm in height). PVC was chosen because (i) of its low US velocity (around 2300 m.s^{-1}) for a non-deformable material (required for this feasibility study), and (ii) of its ease of use and shape.

Tongue surface profiles

Three different types of surface profiles were designed, referred to as $R_0\beta_0$, $R_1\beta_1$ and $R_1\beta_2$, in order to investigate and understand the mechanisms underlying the variations of the ultrasound reflection coefficient at tongue-food interface through tongue roughness. $R_0\beta_0$ is the smoothest surface and did not go through modifications after being machined by the supplier. The two rough surfaces $R_1\beta_1$ and $R_1\beta_2$ were obtained following similar protocols. Sand paper was stuck on a heating plate (RCT basic, IKA, Staufen im Breisgau, Germany) set at 150°C . PVC cylinders were then positioned on the sand paper previously coated with vegetable oil (Carlex spray, Zeelandia, Zierikzee, The Netherlands), and compressed by a mass for a given duration. The difference between references $R_1\beta_1$ and $R_1\beta_2$ lies :

- i . in the type of the sand paper used : p60 grainsize sandpaper (finishing paper P60, Klingspor, Haiger, Germany) for $R_1\beta_1$ and p40 grainsize sandpaper (Z40, Norton, Saint Gobain, Courbevoie, France) for $R_1\beta_2$.
- ii . in the mass used to compress the cylinders : 5 kg for $R_1\beta_1$ and 15 kg for $R_1\beta_2$.
- iii . in the molding duration : 2 hours for $R_1\beta_1$ and 10 hours for $R_1\beta_2$.

A stylus profiler Dektak XT (Bruker, Billerica, MA, USA) was used for roughness measurements on the three surface profiles ($R_0\beta_0$, $R_1\beta_1$ and $R_1\beta_2$). A 50 nm radius stylus was used for surface scanning and was controlled and analyzed with the Vision 64 software (Bruker, Billerica, MA, USA). The stylus strength used for these scans was 0.5 mg. The roughness of the samples was determined through 60 mm 1D scans. Three scans were performed for each surface (with a 45° rotation between each scan), in order to be representative of the overall surface. A slope correction of the surfaces was applied with Vision 64 software, prior to process the roughness parameters with a MATLAB™ algorithm. Two classical parameters were chosen to characterize the roughness of each surface profile (see Table 4.2). The

arithmetic average height Ra corresponds to the average height of asperities. The correlation length β is, for its part, a parameter which gives information about the periodicity of the surfaces (Gadelmawla et al., 2002) : the higher β , the lower the density of asperities.

TABLEAU 4.2 – Mean values $\pm$ standard deviations of the surface parameters for the three tongue surface profiles investigated..

Roughness	Ra (μm)	Correlation Length β (μm)
$R_0\beta_0$	2.54 ± 0.09	35 ± 0.4
$R_1\beta_1$	58.2 ± 5.3	206 ± 4
$R_1\beta_2$	52 ± 11.2	243 ± 12

Tongue surface lubrication

The impact of tongue lubrication on the variations of the ultrasound reflection coefficient was investigated through four lubrication conditions, referred to as “Dry”, “Low”, “Medium” and “High”. For the sake of simplicity, water was used as a lubricant to mimic saliva. “Dry” condition simply corresponds to the absence of lubricant on tongue surface. For “Low” and “Medium” conditions, a water spray was used to cover the tongue surface with water. The difference between “Low” and “Medium” lies in the quantity of water spread on tongue surface, weighed with a precision balance (Precisa 303A, Dietikon, Switzerland). Finally, the “High” condition corresponds to an excess volume of 2 mL of water poured on tongue surface with a pipette, ensuring a totally submerged surface.

Table 4.3 summarizes, for each lubrication condition, the mass of water deposited on tongue surface, as well as the thickness of resulting water film (assuming homogeneous spreading).

TABLEAU 4.3 – Mean values $\pm$ standard deviations (i) of the quantity of water and (ii) of the thickness of the water film deposited on tongue surface for the four lubrication conditions.

Lubrication Condition	Mass of water deposited (mg)	Equivalent thickness (μm)
Dry	0	0
Low	30 ± 5	15 ± 3
Medium	86 ± 9	40 ± 5
High	2000	1000

4.2.3 Quantitative Ultrasound measurements

The general aim of the study is to investigate the impact of food and tongue surface properties described above on the variations of the ultrasound reflection coefficient at tongue-food interface. An ultrasound (US) device and associated signal processing protocols were thus designed to that end.

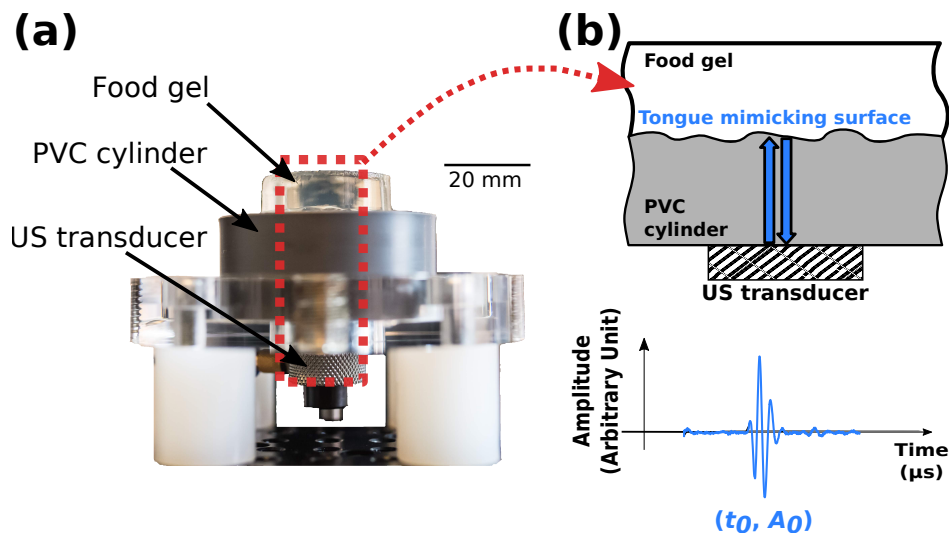


FIGURE 4.1 – (a) Picture of the experimental set-up. (b) Schematic representation of the set-up (Red dotted line rectangle corresponding to picture (a)) and of associated wave propagation phenomena. Two echoes were observed : E_0 (time t_0 , amplitude A_0) in blue for tongue-food interface and E_1 (time t_1 , amplitude A_1) in green for food-air interface.

Experimental set-up

A mono-element piezoelectric transducer (V103RM, Olympus, Shinjuku, Tokyo, Japan) with 900kHz central frequency was used both as emitter and receiver, in pulse echo-mode. The frequency was chosen to minimize attenuation of ultrasound waves in PVC, as well as to ensure measurements beyond the near-field distance. The transducer was plugged to a US pulser-receiver (Sonatronic, Evry, France). The system emits a negative squared pulse (500 ns width, 80 Volt amplitude) to the transducer and digitalizes (12-bit quantification, 100 MHz sampling rate, 38 dB gain) the rf signals. The pulser-receiver was controlled using a dedicated human-machine interface programmed with LabVIEW (National Instrument, Austin, Texas, USA).

The experiments were conducted in a climate-controlled room (19 °C). The US transducer was placed underneath tongue mimicking surface sample (see Figure 4.1) at least 2 hours before running any experiment, in order to stabilize to both acoustic coupling (with silicon grease) and temperature. The tongue mimicking surface sample was cleaned prior to each measurement. The cleaning protocol consisted in brushing tongue surface with dish soap (Liquide Vaisselle Main Ecologique, Prop, Paris, France) and water for 10 seconds and rinsing 3 times with water in order to systematically recover the identical initial surface properties.

First, reference US rf signals of the PVC cylinders were recorded after the cleaning protocol (absence of food sample). Second, the rough surface of the PVC cylinders was lubricated following one of the four lubrication conditions described above. Third, a food sample was unmolded and carefully deposited at the center of a tongue mimicking surface. Finally, US rf signals of the PVC-food system were recorded. US measurements were performed at least in triplicate for each set of conditions investigated (corresponding to a type of food product, placed on one of the three types of surfaces, and lubricated following one of the four conditions).

Signal processing

The rf signals were processed with MATLAB™ (The MathWorks, Natick, Massachusetts, US) in order to derive the ultrasound reflection coefficient R of tongue-food interface. For all rf signals, high-frequency noise was reduced with a low-pass filter (15 MHz cutoff frequency) applied on the Fast Fourier Transform (FFT). The rf signals were composed of an echo referred to as E_0 , corresponding to the acoustic energy reflected by the PVC/food interface (see Figure 4.1). For each rf signal, an automatic procedure was developed to extract a temporal window defined as (i) centered on the maximum of the Hilbert transform of echo E_0 , and (ii) with a width equal to 4 μ s. The Fast Fourier Transform of this temporal window was then computed, and the amplitude A_0 of echo E_0 was defined as the amplitude of the FFT at 900 kHz (the center frequency of the transducer). The amplitudes of ultrasound echoes were measured in the frequency domain following a method developed for partially contacting interfaces (Drinkwater and Cawley, 1997), with low sensitivity to signal noise.

The ultrasound reflection coefficient at PVC/food interface was then computed following :

$$R = 100 \cdot \frac{A_0}{A_{0,ref}} \quad (4.1)$$

Where $A_{0,ref}$ is the amplitude of echo E_0 obtained on a reference signal recorded prior to lubricate the tongue mimicking surface. In absence of food sample, echo E_0 corresponds to a PVC/air interface. Due to the negligible acoustic impedance of air compared to PVC, $A_{0,ref}$ corresponds to a full reflection configuration required for the calculation of the ultrasound reflection coefficient. No significant variations of $A_{0,ref}$ were reported throughout the three profiles investigated. The wavelength of ultrasound waves in PVC and food (superior to 1.5 mm) was much higher than the average height of the roughest profile considered here (around 60 μ m). As a consequence, scattering phenomena at PVC interface had an negligible impact on the amplitude $A_{0,ref}$.

4.2.4 Statistical analysis

Analyzes of Variance (ANOVA) with post-hoc analyzes (Newman-Keuls) were performed with R software (R Core Team 2018, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria) on Young's modulus values and on the log of R values (using the log of the values allows to have a normal distribution), in order to identify groups with meaningful differences. A level of significance of $p\text{-value} > 0.05$ was used.

4.3 Results and discussions

4.3.1 Impact of tongue roughness on the ultrasound reflection coefficient

The surface properties of the three PVC surfaces are represented in Table 4.4. Significant differences were reported on Ra between i) $R_0\beta_0$ and ii) $R_1\beta_1$ and $R_1\beta_2$. The three PVC surfaces were shown to be significantly different regarding β . The lowest values of Ra and β reported for $R_0\beta_0$ confirm that this surface can be considered as smooth compared to $R_1\beta_1$ and $R_1\beta_2$. The results also suggest that in spite of different sandpaper grain sizes used

TABLEAU 4.4 – Mean values $\pm$ standard errors of US reflectivity at tongue-food interface for all tested experimental

Roughness	Food Product	Lubrication			
		Dry	Low	Medium	Full
$R_0\beta_0$	$Ag_{0.3}$	33.3 $\pm$ 0.2	-	-	33.2 $\pm$ 0.5
	$Ge_{3.5}$	33.4 $\pm$ 0.7	-	-	35.1 $\pm$ 2.3
	Ge_7	33.2 $\pm$ 3.7	34.7 $\pm$ 3.4	38.3 $\pm$ 4.2	33.5 $\pm$ 3.7
	Ge_7T	23.7 $\pm$ 12.8	31.4 $\pm$ 0.8	31 $\pm$ 0.6	23.2 $\pm$ 14.4
$R_1\beta_1$	$Ag_{0.3}$	45.9 $\pm$ 3.4	33.9 $\pm$ 2.2	34.5 $\pm$ 1.3	35.2 $\pm$ 0.9
	$Ag_{1.8}$	84.8 $\pm$ 3.3	76.6 $\pm$ 5.7	69.3 $\pm$ 2.7	37.1 $\pm$ 1.9
	$Ge_{3.5}$	66.2 $\pm$ 2.5	52.1 $\pm$ 5.8	48.6 $\pm$ 2.8	35.4 $\pm$ 1.6
	Ge_7	80.3 $\pm$ 1	83.4 $\pm$ 9.4	63.2 $\pm$ 3.1	33.9 $\pm$ 1.8
	Ge_7T	81.4 $\pm$ 3.8	63.7 $\pm$ 15.3	40.6 $\pm$ 8.4	34.3 $\pm$ 0.9
	$Ag_{0.3}Ge_{3.5}$	74.2 $\pm$ 3.9	61.4 $\pm$ 9.8	54.9 $\pm$ 8.7	34.3 $\pm$ 0.9
	$Ag_{0.7}Ge_{5.85}$	84.3 $\pm$ 0.7	65.6 $\pm$ 11.1	60.6 $\pm$ 20.4	35.4 $\pm$ 1.4
	$Ag_1Ge_{0.75}$	70.1 $\pm$ 3.6	68.8 $\pm$ 8.4	59.4 $\pm$ 22.8	35.2 $\pm$ 1.5
$R_1\beta_2$	$Ag_{0.3}$	37.8 $\pm$ 3.2	-	-	35 $\pm$ 0.9
	$Ge_{3.5}$	53.6 $\pm$ 1.8	-	-	37.6 $\pm$ 3.3
	Ge_7	68.1 $\pm$ 2.3	59.3 $\pm$ 8.2	42.7 $\pm$ 2.5	34 $\pm$ 1.1
	Ge_7T	63.6 $\pm$ 0.4	53.5 $\pm$ 1	36.3 $\pm$ 2	34.7 $\pm$ 0.5

for $R_1\beta_1$ and $R_1\beta_2$, the molding process of PVC surface led to similar values of Ra . As a consequence, comparing the values of the reflection coefficient for $R_1\beta_1$ and $R_1\beta_2$ will allow to discuss on the impact of β .

Figure 4.2 shows the variations of the ultrasound reflection coefficient at PVC-food interface as a function of surface roughness, for three different food products (Ge_7 , $Ge_{3.5}$ and $Ag_{0.3}$). The Anova test carried out on the whole dataset revealed a significant impact of the roughness of PVC surface on R values (p-value<0.0001).

In a previous study, the storage and loss viscoelastic shear moduli (respectively G' and G'') have been characterized for very similar model foods, and compared to different ultrasound properties (Mantelet et al., 2018a). The reflection coefficient between food gels and PVC was measured in a dedicated measuring cell made with smooth surfaces (identical to $R_0\beta_0$). The food products were gelled directly in the cell, ensuring that the surface of PVC was entirely bonded by gels (no air bubbles trapped at the interface). In this configuration, the reflection coefficient was fully ruled by the acoustic impedances of gels and PVC. The slight variations of ultrasound reflection coefficient observed throughout the products (ranging between 30 and 34%) were shown to be dominated by the variations of food compressibility (with a bulk elastic modulus superior to 2.5 GPa) rather than by the shear moduli ($G'<50$ kPa, $G''<0.5$ kPa). As a consequence, the viscoelastic properties of the food gels have a negligible impact on the acoustic impedance of the gels.

The values of reflection coefficient obtained in the present study with the surface profiles $R_0\beta_0$ were inferior to 34 % (see Table 4.4 and Figure 4.2), suggesting that here again, the surface of PVC was fully bonded by food gels. However, significantly higher values of R were reported for surface profiles $R_1\beta_1$ and $R_1\beta_2$, with values superior to 46% and up to 84%, implicating the presence of air bubbles trapped at the interface. In particular, the viscoelastic properties of the gels may play an important role on their capacity to deform and fill the

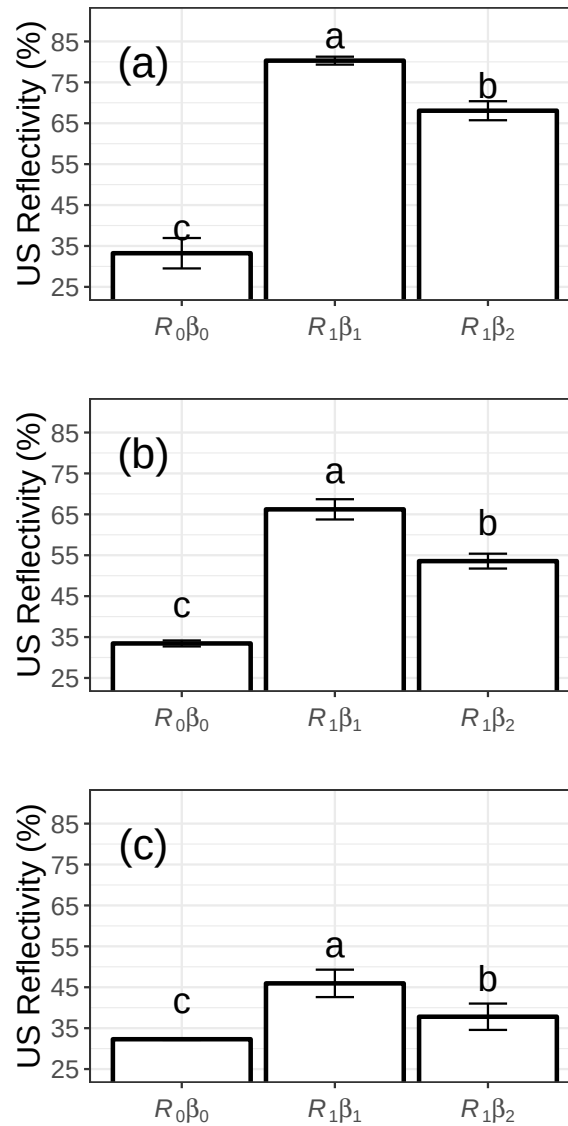


FIGURE 4.2 – Variations of US reflectivity at tongue-food interface throughout the three surface profiles (« Dry » lubrication condition) for three food products : (a) Ge_7 , (b) $Ge_{3.5}$ and (c) $Ag_{0.3}$.

asperities of surfaces $R_1\beta_1$ and $R_1\beta_2$. The fraction of intimate contact between a rigid rough surface and a smooth deformable surface lies on the capacity of the soft surface to deform and to mold the asperities of the hard surface (Gonzalez-Valadez et al., 2010; Hodgson et al., 2000; Persson et al., 2005).

Very similar phenomena have recently been notified in a study aiming at monitoring the osseointegration of bone implants with ultrasound methods (Hériveaux et al., 2018). The authors investigated the reflection coefficient at an interface composed of a rough titanium surface in contact with a mixture of bone and soft fibrous tissues. The results of their numerical simulations show that this reflection coefficient is an increasing function of the proportion of soft fibrous tissues in intimate contact with the asperities of titanium surface. This tendency is explained by the increasing gap of acoustical properties when soft tissues are in contact with the implant surface, compared to an interface fully bounded by bone tissue. In the same way, our present experiments show that the reflection coefficient at the interface

between PVC and food is an increasing function of the proportion of air in contact with PVC rough surface, compared to an interface fully surrounded with food gel. The gap of acoustic impedance is indeed more important between PVC and air than between PVC and gels. The fraction of food in intimate contact with the surface of PVC contributes to low energy reflection (inferior to 34%) whereas the fraction of air in intimate contact with PVC contributes to a full reflection (due to the negligible acoustic impedance of air compared to PVC). As a consequence, the higher the fraction of intimate contact between PVC and food, the lower the value of R . Conversely, the higher the fraction of PVC in contact with air, the higher the value of R . This mechanism explains why the ultrasound reflection coefficient was higher on rough surfaces $R_1\beta_1$ and $R_1\beta_2$ than on smooth surface $R_0\beta_0$.

Interestingly, the increase of β between $R_1\beta_1$ and $R_1\beta_2$ led to a decrease of the reflection coefficient R . Increasing β is equivalent to stretching horizontally the asperities of the surface profile, leading to peaks and valleys with the same height, but with different slopes (β tending to infinity for smooth surfaces). As a consequence, when β increases, the compliance of food required to mold the asperities of PVC tongue surface decreases, leading to higher contact surface (Drinkwater and Cawley, 1997; Kendall and Tabor, 1971), and then to lower values of R .

A rough estimate of the contact area A between a flat soft surface of Young modulus E and contact radius r , can be roughly assumed (forgetting the numerical prefactors) using the JKR approximation :

$$A \sim \left(\frac{WR^2}{E} \right)^{2/3} \quad (4.2)$$

where W is the thermodynamical work of adhesion between tongue and food and where we can estimate that $R \sim \frac{\beta^2}{Ra}$. This clearly rationalizes the strong effect of the β parameter as a control of the contact between the two surfaces.

4.3.2 Impact of food properties on US reflectivity

As seen in the previous section, the capacity of the food product to mold the asperities of tongue surfaces highly governs the variations of US reflection coefficient. The aim of the following section is then to discuss the impact of food properties on the values of R . The issue of the impact of material properties on the ultrasound reflection coefficient of a rough interface has been tackled in different studies in the literature (Drinkwater and Cawley, 1997; Gonzalez-Valadez et al., 2010; Hodgson et al., 2000). However, the rigidity of the materials considered (higher for metals and rubbers) and the roughness of the interfaces studied (Ra between 0.2 to 2 μm and β between 2 and 25 μm) in these studies were not consistent with the present experimental conditions.

Food products investigated here are mixed gels of agar and gelatin. Depending on the ratio between the two biopolymers, the products may have either a continuous phase of gelatin with agar inclusions (gelatin dominant), or reciprocally a continuous phase of agar with gelatin inclusions (agar dominant) (McEvoy et al., 1985). Figure 4.3.a shows the variations of the ultrasound reflection coefficient between tongue $R_1\beta_1$ and food for the two groups of food products (gelatin dominant with white bars, agar dominant with grey bars), ranked by

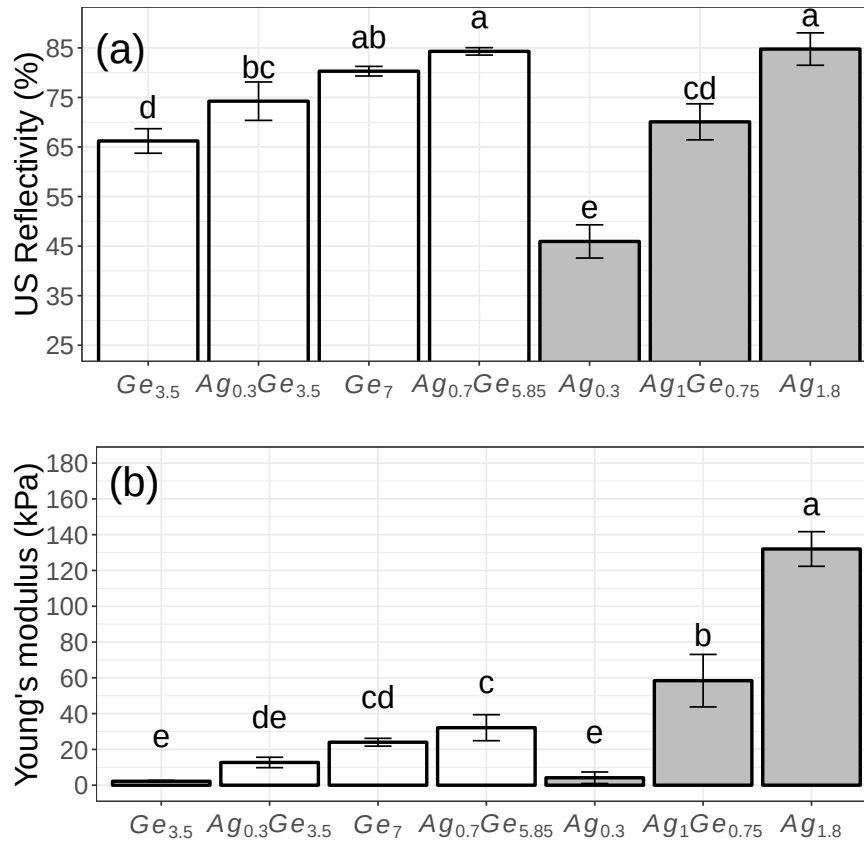


FIGURE 4.3 – Variations (a) of US reflectivity at tongue-food interface (tongue surface profile $R_1\beta_1$, lubrication condition « Dry ») and (b) of Young's modulus for the seven food products without Tween 20 : white bars for gelatin dominant products and grey bars for agar dominant products.

increasing Young's modulus (see Figure 4.3.b). Moreover, the variations of R were plotted as a function of the Young's modulus in Figure 4.4 (agar dominant gels connected with a solid blue line, gelatin dominant gels with a solid red line). When considering separately agar and gelatin dominant systems, an increase of R was observed with the increase of Young's modulus, suggesting a lower fraction of tongue asperities in intimate contact with food when the Young's modulus increases. As a consequence, the compliance of the food product under its own weight is very likely to contribute significantly to the impedance matching at PVC interface (as qualitatively described by Eq 4.2).

However, the results in Figure 4.4 also suggest that Young's modulus is not sufficient to explain the variations of R . For instance, even if $Ge_{3.5}$ and $Ag_{0.3}$ have similar Young's moduli (around 3 kPa), R is 20 % higher for the gelatin dominant sample. Similarly, comparable values of R (around 85 %) were reported between samples $Ag_{0.7}Ge_{5.85}$ and $Ag_{1.8}$, whereas the Young's modulus is almost four times higher for the agar dominant product.

The ranges of Young's modulus investigated here indicate that food adhesive energy could also be a contributory factor (Shull, 2002). The surface interaction between product and PVC is a combination of adhesive and elastic forces, that will respectively promote and moderate the ingress of the product inside the asperities (Dies et al., 2015; Persson et al., 2005; Poulard et al., 2010). The competition between adhesive and elastic behaviors may be influenced by the structure of the two types of gels. The continuous phase of gelatin do-

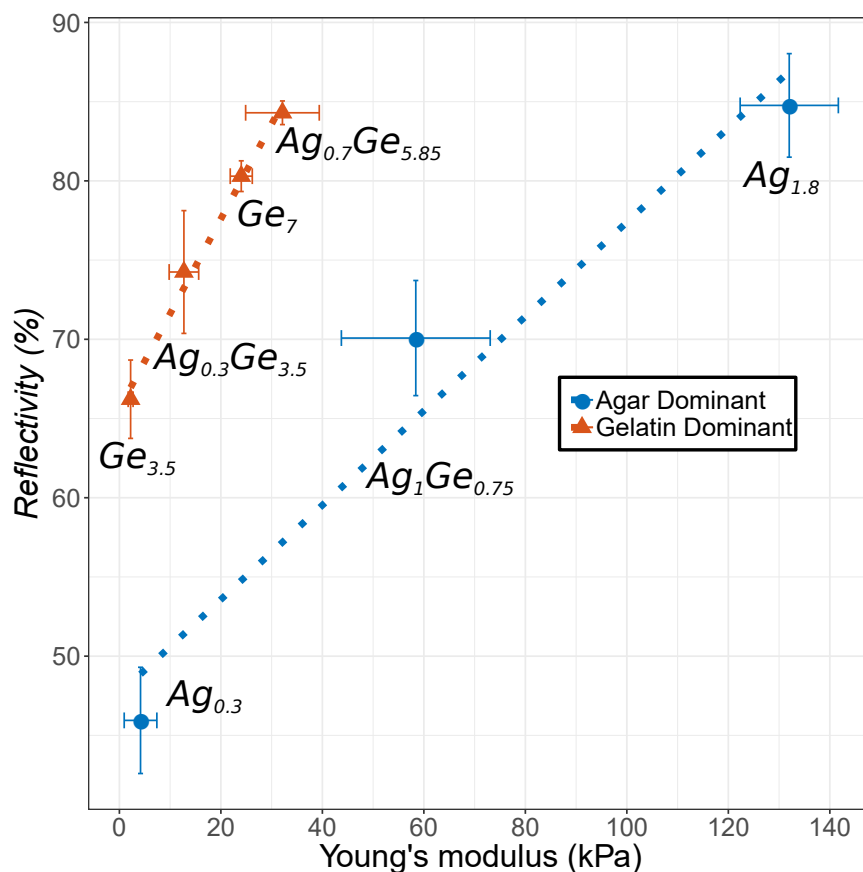


FIGURE 4.4 – Variations of US reflectivity at tongue-food interface (tongue surface profile $R_1\beta_1$, lubrication condition « Dry ») as a function of Young's modulus for agar (blue) and gelatin (orange) dominant products.

minant products is composed of a network of triple helixes of gelatin. In the case of agar dominant products, it consists in a network of double helixes of agar chains. Lower gelling agent concentrations are required in agar than in gelatin dominant systems in order to obtain food products with similar Young's modulus. In return, the structure of agar dominant products is more brittle and the quantity of water bounded to the polymer network is less important. Agar gels have thus been shown to be subject to syneresis (Boral et al., 2010), which is the ability of hydrocolloids to expel water because of competing contributions of osmotic pressure and of elastic forces in the product. The consequences of the release of water at the surface of agar dominant products is an improvement of acoustic coupling properties at the interface between the tongue mimicking surface and the product (acting in the same way as an acoustic coupling gel), and then leading to the decrease of the ultrasound reflection coefficient. Syneresis phenomena have been shown to mitigate with the increase of polymer amount. As a consequence, syneresis could contribute in the same way as Young's modulus to the increase of R observed in Figure 4.3 with the increase of agar amount.

4.3.3 Impact of tongue lubrication on US reflectivity

The experimental results depicted in the two first sections of the Results and discussions made it possible to discuss on the effect of surface roughness and of product material

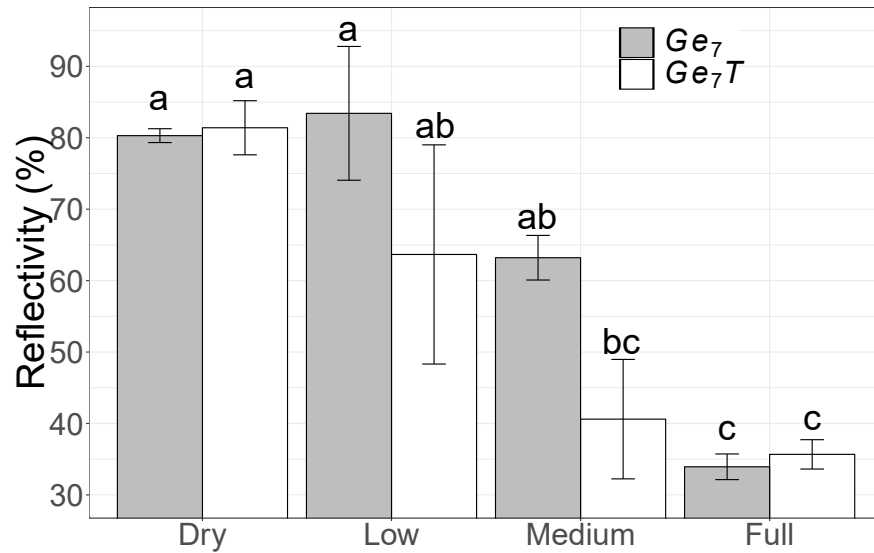


FIGURE 4.5 – Variations of US reflectivity at tongue-food interface (tongue surface profile $R_1\beta_1$) throughout the four lubrication conditions for products Ge_7 (grey bars) and Ge_7T (white bars).

properties on the variations of ultrasound reflection coefficient of a tongue mimicking surface in absence of lubrication. However, lubrication by saliva is another critical component of tongue-food interface which has to be taken into account.

In the literature, different studies have shown the impact of lubricant thickness and material properties on the reflection coefficient of a smooth interface between various materials (Dwyer-Joyce et al., 2003a; Reddyhoff et al., 2005). Some models have thus been proposed to predict the variations of the reflection coefficient, accounting for the acoustic impedance and the thickness of the lubricating film.

In the present study, water was chosen as saliva substitute. Even if saliva is a complex fluid (heterogeneous, non-Newtonian, viscoelastic), it is majorly composed of water (more than 99%) (Humphrey and Williamson, 2001). As a consequence, we can reasonably assume that both the density and the velocity of ultrasound wave in saliva (and consequently its acoustic impedance) should be very close from water. The acoustic impedance of water and of the different food products are also similar (1.48 MRay for water and 1.57 MRay for Ge_7). As a consequence, the presence of water as a lubricant at the interface between PVC and food does not result in additional interfaces that would turn in the apparition of new echoes on rf signals, but behaves as a coupling agent that will promote the contact between the two media.

For the condition of “High” lubrication (where water was poured in excess prior to the positioning of the sample), very close values of reflection coefficients were reported for all food products and surface profiles (see Table 4.4). This assumption is consistent with the studies of (Dufour et al., 2013; Saad et al., 2012), showing the decrease of the reflection coefficient until the theoretical values (with full and homogeneous contact conditions), from the Cassie state (water droplets on the top of asperities, higher values of R) to the Wenzel state (water droplets inside asperities, lower values of R). In the literature, the thickness of the salivary film has been measured *in-vivo* on the anterior tongue of healthy volunteers for dry (12.3 μm) and wet (54 μm) conditions (Pramanik et al., 2018). The “Low” and “Medium”

conditions investigated here were thus consistent with physiological orders of magnitude, whereas the “High” condition was voluntarily overestimated in order to consider an extreme case. For all products, “Low” and “Medium” conditions have been found to be relevant to describe the transient behavior of the values of R between “Dry” and “High” conditions, with a decrease of R with the increase of lubricant content (see Table 4.4). Ge_7 and Ge_7T were the two samples chosen to illustrate in Figure 4.5 the effect of tongue lubrication on the values of R (for $R_{1\beta_1}$ tongue). These two products are gelatin gels with identical gelatin concentration (7%), and they differ only by the incorporation of an emulsifying agent (Tween 20) in order to discuss on the impact of product wettability on the interaction with the lubricating film. The measurements of contact angle with water revealed perfect wetting properties for Ge_7T (the contact angle is 0°), whereas the contact angle was equal to $40 \pm 12^\circ$ for Ge_7 . In “Dry” conditions, even though slightly higher values of Young’s modulus were reported for Ge_7t compared to Ge_7 , similar values of R were observed (80.3 and 81.4%), suggesting similar contact conditions at PVC-food interface. For the “High” condition, the two products also show similar values of R (33.9 and 35.7 %), that are in agreement with PVC-gel reflection coefficients in the case of full and homogeneous contact. However, the two intermediate lubrication conditions revealed that the trajectories of the decrease of R from “Dry” to “High” conditions were different for the two products. The decrease of R was then higher for Ge_7T than for Ge_7 , both for “Low” (respectively 63.7 and 83.4 %) and for “Medium” (respectively 40.6 and 63.2 %) conditions. It suggests that when the lubricant is not present in excess, the wettability of the food product promotes the homogeneous spreading of the film at the interface. As a consequence, the results of this section enabled to show that the quantity of lubricant is a key factor, but that the wetting properties of the media located on both sides of the interface are also likely to influence the variations of the ultrasound reflection coefficient.

4.4 Conclusion

The present study allowed us to investigate the potential of the ultrasound reflection coefficient to evaluate the mechanical interactions between a tongue mimicking surface and food at the initial step of the oral consumption. Non-deformable mimicking surfaces were used as a model tongues and made it possible to study the impact of the roughness and of the lubrication on the reflection coefficient throughout various food products.

The results of this study put in evidence the sensitivity of the ultrasound reflection coefficient (i) to roughness parameters of the tongue mimicking surface (including both Ra and β , (ii) to food properties (including rigidity, adhesion or also syneresis and wettability), and (iii) to the level of lubrication of the tongue mimicking surface. All these parameters and mechanisms contribute together to the capacity of food products to mold the asperities of the tongue surface, which result in the decrease of US reflection coefficient at PVC/food interface (due to a decrease in the gap of acoustic impedance at the interface). The method paves the way for the indirect estimation of tongue-food surface fraction area at early stages of food oral processing. Such a characterization is of interest for the understanding of the mechanisms of texture perceptions (Ares et al., 2007; Szczesniak, 2002) taking place at early stage of oral processing (e.g. firmness perception due to the transmission of me-

chanical stresses to the mechanoreceptors in the vicinity of tongue asperities, moistness perception due to the joint capabilities of food and salivary film to interact with tongue asperities). Moreover, the characterization of surface ratios with the ultrasound method could also help to better predict the diffusion phenomena of sapid components towards the taste receptors of the tongue.

Many physiological features will have to be gradually taken into consideration in the next studies, in order to progressively close the gap with real physiology. However, the usefulness of the ultrasound method is not solely reduced to its *in vivo* application. The literatures reports a lack of instrumental methods making it possible to investigate the physical interactions at the interface between tongue and food. The implementation of the ultrasound method in a controlled tongue palate bio-mimicking device could contribute to tackle this challenge. Future works will then consist in the study of the real-time potential of the ultrasound method and to progressively account for tongue motility, starting with a compression test, before gradually moving towards realistic tongue motions. Accounting for the compliance of tongue tissue and for the rheological complexity of real saliva will be other priorities of future explorations.

Moreover, the approach should also be extended to a broader diversity of food products (more realistic with irregular shapes, heterogeneities, as well as air inclusions), all by accounting for the evolving properties of the food bolus during oral processing (particle size reduction, saliva incorporation).

Acknowledgments

We want to acknowledge Jean-Luc Gennisson for his thorough advice for the analysis of US measurements. We also thank David Forest, Claire Juguet, Raphaëlle Ponthieux and Gabriel Debar for their kind and precious technical support.

Principaux messages à retenir :

- La mesure du coefficient de réflexion à l'interface entre la langue et l'aliment permet une mesure indirecte de la surface de contact intime à l'interface.
- Cette surface peut être influencée (i) par la déformabilité et l'adhésivité du gel qui le conduisent à épouser les aspérités de la surface de la langue, ou encore (ii) par la lubrification de la langue et la capacité du gel à libérer de l'eau et ainsi faire le continuum entre l'aliment et la surface de la langue.

Ce chapitre a permis de valider l'intérêt de la réflectivité ultrasonore pour caractériser le contact entre une langue non-déformable un aliment. La phase suivante du travail, qui correspond au chapitre 5 de cette thèse, a donc été d'étudier l'évolution de ce paramètre dans les mêmes conditions d'utilisation de langues non-déformables, mais lorsque l'aliment est soumis à une compression uni-axiale (figure 4.6).

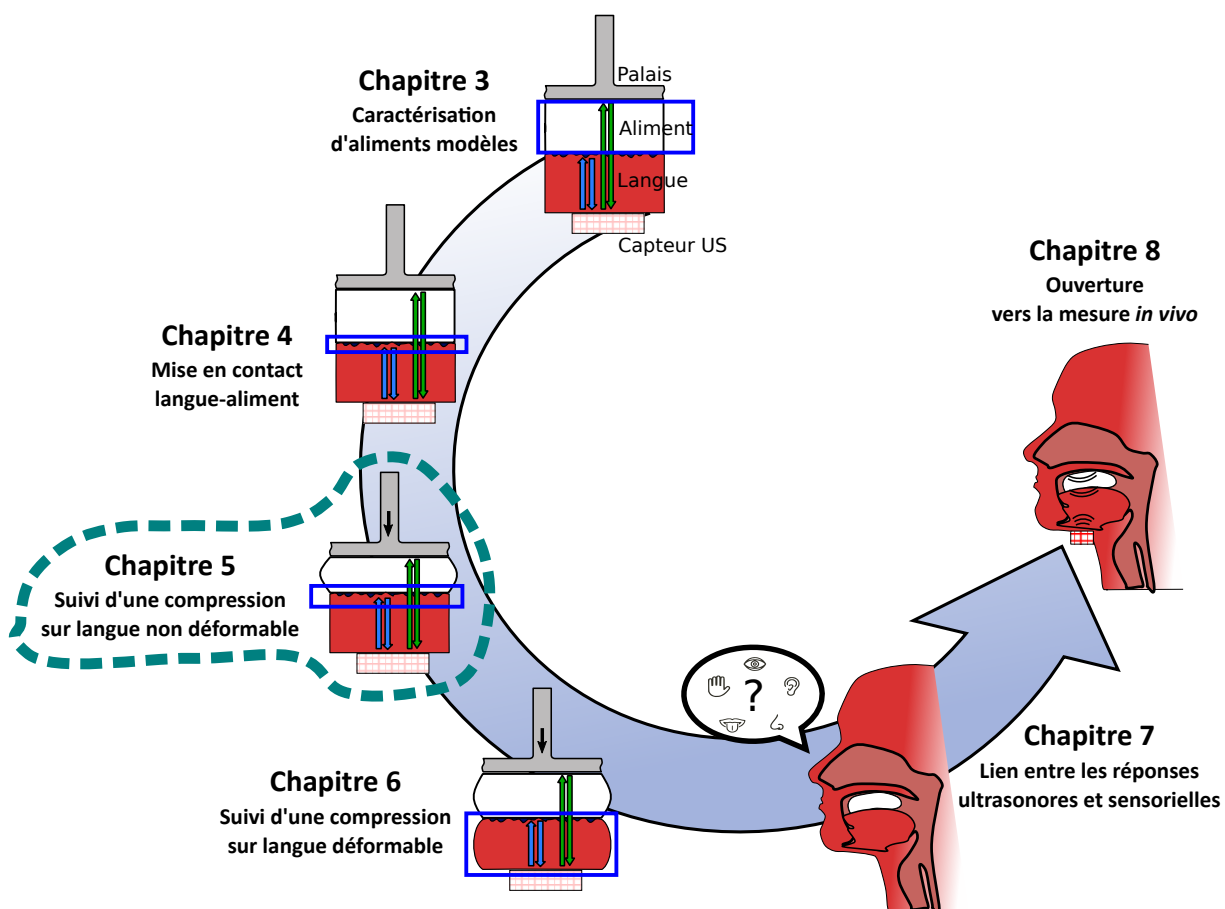


FIGURE 4.6 – Stratégie expérimentale de la thèse

Chapitre 5

Utiliser les Ultrasons Quantitatifs pour suivre l'interface langue/aliment pendant la déstructuration des aliments

Sommaire

5.1 Introduction	108
5.1.1 Context	108
5.1.2 Dynamic instrumental investigation of textures perceptions	108
5.1.3 Ultrasound technic to study <i>in situ</i> and dynamically mechanical interactions at tongue/food interface through oral processing	109
5.2 Material and methods	110
5.2.1 Model foods	110
5.2.2 Tongue bio-mimicking phantoms	110
5.2.3 Compression protocol	111
5.2.4 Ultrasonic technic	112
5.2.4.1 Ultrasonic device	112
5.2.4.2 Ultrasonic signal processing	112
5.3 Results and discussions	113
5.3.1 Impact of tongue roughness on US reflectivity	113
5.3.2 Impact of food properties on US reflectivity	115
5.3.3 Impact of tongue lubrication on the variation of US reflectivity	117
5.4 Conclusion	119

Abstract

Understanding the physical interactions between tongue, food and palate during oral processing is critical to adapt food supply for specific populations affected by swallowing disorders. To address this challenge, a new method based on quantitative ultrasound (QUS) was developed, consisting in the real-time and non-invasive measurement of US reflectivity at tongue-food interface. The variations of the US reflection coefficient between non-deformable biomimicking tongue phantoms (accounting for surface roughness and lubrication) and agar/gelatin model gels were investigated during a uni-axial compression. Higher decreases of US reflectivity were reported for hard gels, in presence of rough and dry tongue surfaces, due to an increase of the surface contact ratio between of food at tongue interface. The study confirms the potential of QUS methods for the real-time characterization of dynamic phenomena occurring during oral processing.

5.1 Introduction

5.1.1 Context

Even though there is no question that food and health are inextricably linked, a food product cannot be reduced to a sum of nutritional components. It is thus now accepted that food structure has a high impact on the kinetics of nutrient release, in the same way that it can also influence the sensory experience of eating. Food oral processing is the first step of digestion, involving complex and simultaneous mechanisms, including particle size reduction, hydration and enzymatic hydrolysis (Hutchings and Lillford, 1988; Stokes et al., 2013). The aim of oral processing is to transform the food product in a bolus safe and comfortable to swallow (Hiemae, 2004). During oral processing, the dynamic physical interactions at tongue-food interface give rise to the activation of various mechanoreceptors located in tongue, and that highly contribute to the texture perceptions of food (Bukowska et al., 2010). In that way, tongue plays a crucial part in the sensory experience of the consumer, as well as it make it possible to evaluate in real-time the changes of the mechanical status of the bolus, so that to decide of the most appropriate moment to trigger a safe swallowing sequence (Chen, 2009; Hutchings and Lillford, 1988). A growing part of the population faces swallowing disorders, with potential dramatic consequences for patients. In this context, understanding the mechanisms of texture perceptions between tongue and palate could be helpful for the design of an alternative food supply for specific populations with dysphagia. The response to this challenge requires the unraveling of the dynamic structural and mechanical transformations undergone at tongue-food interface during oral processing (Foegeding et al., 2017; Hutchings and Lillford, 1988; Panouillé et al., 2016; Szczesniak, 2002).

5.1.2 Dynamic instrumental investigation of textures perceptions

Numerous studies have sought to mimic some specific sequences of food oral processing using mechanical tests or rheology (Chen and Stokes, 2012). However, even though these technics are suitable for the characterization of bulk transformations of food, they do

not make it possible to capture physical information related to surface properties, which are critical for tactile mechano-sensations. Tribology has then been proposed to describe, at the end of oral processing or right after swallowing, the friction mechanisms due to the interaction between tongue surface and thin films of food bolus (Stokes et al., 2013). However, from introduction in oral cavity to swallowing, food undergoes major transformations, in such a way that oral processing goes from a rheology to tribology dominant phases. As a consequence, the development of *in situ* and non-destructive methods suitable for the continuous evaluation of the different phases of oral processing represents a major issue (Foegeding et al., 2017).

5.1.3 Ultrasound technic to study *in situ* and dynamically mechanical interactions at tongue/food interface through oral processing

Ultrasound (US) methods could help to address this challenge. US imaging has already been used in oral cavity for various applications, including the study of food bolus transportation during swallowing (de Wijk et al., 2011; Galén and Jost-Brinkmann, 2010; Peng et al., 2000), of tongue shape and motions during speech (Stone, 2005), of functional disorders such as dysphagia (Hsiao et al., 2012; Kim and Kim, 2012; Rommel and Hamdy, 2016) or also of obstructive sleep apnea events (Chen et al., 2014; Chien et al., 2017; Weng et al., 2017). The wide diversity of these fields of application confirms the capability of US imaging for the real-time exploration of dynamic mechanisms in oral cavity.

Furthermore, quantitative ultrasound (QUS) technics are sensitive to the physical properties of the media and interfaces they propagate through. For instance, QUS technics have thus been proposed to characterize food composition, structure, or transformation processes in various products such as meat, fruits, vegetables, emulsions or gels (Awad et al., 2012).

A first exploratory study has been proposed to investigate the impact of tongue roughness and lubrication on the variations of US reflectivity at the interface between non-deformable tongue phantoms and agar/gelatin mixed gels with various physical properties (Mantelet et al., 2018b). The results have shown the potential of US reflectivity to characterize indirectly the ratio of intimate contact between tongue surface and the food samples. Both tongue phantoms characteristics (roughness, lubrication) and food properties (Young's modulus, syneresis, and adhesion) were shown to have an impact on US reflectivity. However, these experiments were conducted in static conditions, mimicking the initial contact of food on tongue surface (no mechanical load applied).

To go further, the aim of the present study is to investigate the evolution of US reflectivity at tongue-food interface during a uni-axial compression mimicking the first step of food oral processing. The same tongue phantoms and model gels as those considered in the first study have been used to explore the impact of tongue and food properties.

TABLEAU 5.1 – Composition of product. All products are composed of 15% w/w sucrose

Product	Water wt%	Agar wt%	Gelatin wt%	TWEEN 20 wt%
$Ag_{0.3}$	84.7	0.3	-	-
$Ag_{1.8}$	83.3	1.8	-	-
$Ge_{3.5}$	81.5	-	3.5	-
Ge_7	78	-	7	-
$Ag_{0.3}Ge_{3.5}$	81.2	0.3	3.5	-
$Ag_{0.7}Ge_{5.85}$	78.45	0.7	5.85	-
$Ag_1Ge_{0.75}$	84.25	1	0.75	-
Ge_7T	77.25	-	7	1.5

5.2 Material and methods

5.2.1 Model foods

The eight food gels of agar and gelatin previously considered in static conditions were reused in the present study (Mantelet et al., 2018b). These gels are composed of agar (HP700IFG, Kalys, Bernin, France) and gelatin (Bloom 250 PS 8/3, Rousselot, Gent, Belgium), sucrose (Daddy, Cristalco, Paris, France) and water. For one of the eight samples Tween 20 (CAS : 9005-64-5 FG, Sigma-Aldrich, St Louis, MO, USA) emulsifier was used to alter sample wettability. The preparation protocol extensively described our previous study has been strictly followed (Mantelet et al., 2018a). Briefly, all the products underwent identical thermal paths, so that to dissolve sucrose, agar and gelatin at different temperature steps. 60 °C solutions were then poured in poly-ethylene cylindrical molds (30 mm in diameter, 10 mm in height) and left at 19°C during 15h-18h. Table 5.1 summarizes the composition of the eight products. The diameter of the food samples (30 mm) was designed so that to be significantly superior to the diameter of the ultrasound beam (15 mm when the wave is approaching the tongue-food interface), in order to avoid any side effects. The products can be classified in two main categories : $Ag_{0.3}$, $Ag_{1.8}$ and $Ag_1Ge_{0.75}$ are agar dominant samples, whereas $Ge_{3.5}$, Ge_7 , $Ag_{0.3}Ge_{3.5}$ and $Ag_{0.7}Ge_{5.85}$, are gelatin dominant samples. The last one, Ge_7T , differs from Ge_7 only by the presence of Tween 20.

5.2.2 Tongue bio-mimicking phantoms

The three cylindrical samples of PVC (50 mm in diameter, 20 mm in height) used in the previous study were used again as tongue phantoms (Mantelet et al., 2018c). Referred to as $R_0\beta_0$, $R_1\beta_1$ and $R_1\beta_2$, they differ by their arithmetic height average Ra (mean value in μm of the height of asperities) or by their correlation length β (in mm, related to the periodicity of the asperities). These properties were measured previously and are summarized in Table 5.2.

For the sake of simplicity, water was used as lubricant to mimic the film of saliva on tongue surface. Four lubrication conditions were applied, referred to as « Dry », « Low », « Medium » and « High ». Between « Dry » (absence of lubricant) and « High » (2 ml of water poured in excess on tongue surface), « Low » and « Medium » were obtained with a spray

TABLEAU 5.2 – Surface properties of biomimicking tongues. Mean values $\pm$ standard deviations are shown.

Roughness	Ra μm	Correlation Length beta mm
$R_0\beta_0$	2.54 ± 0.09	35 ± 0.4
$R_1\beta_1$	58.2 ± 5.3	206 ± 4
$R_1\beta_2$	52 ± 11.2	243 ± 12

so that to deposit a controlled film of lubricant more consistent with physiological conditions. The details about the four conditions are summarized in Table 5.3.

TABLEAU 5.3 – Mean values $\pm$ standard deviations (i) of the quantity of water and (ii) of the thickness of the water film deposited on tongue surface for the four lubrication conditions.

Lubrication Condition	Mass of water deposited mg	Equivalent thickness μm
Dry	0	0
Low	30 ± 5	15 ± 3
Medium	86 ± 9	40 ± 5
High	2000	1000

5.2.3 Compression protocol

A tension-compression machine (TA.XT plus, stable Micro System, Surrey, United Kingdom) was used to simulate the tongue/palate compression (see Figure 5.1). The bio-mimicking tongue was mounted on the base of the apparatus, while an aluminum circular probe (diameter 40 mm) was used for the palate. Food samples underwent a 80% uni-axial compression at 10 mm.s^{-1} . The compression protocol was composed of different steps.

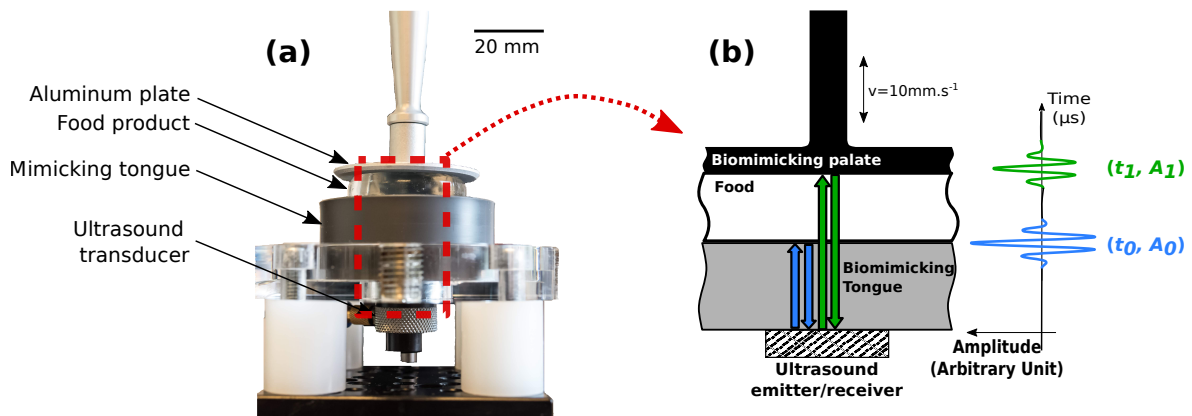


FIGURE 5.1 – (a) Picture of the experimental set-up. The US transducer (1 MHz, longitudinal polarization) is placed underneath the PVC artificial tongue. The food product is placed between the mimicking tongue and a moving aluminum probe (10 mm.s^{-1} , 80% strain). (b) Drawing of the wave path of the ultrasonic wave, leading to two echoes : echo E_0 (in blue) corresponds to the reflection at tongue/food interface, echo E_1 (in green) to food/palate interface.

First, before each test, tongue surface was cleaned with dish soap (Liquide Vaisselle Main Ecologique, Prop, Paris, France), following a protocol extensively described in a previous study (Mantelet et al., 2018c). Tongue surface was then lubricated following the one of

the four conditions described above. The cylindrical food samples (30 mm diameter and 10 mm height) were unmolded right before being deposited on tongue surface. Then, the palate was positioned in contact with the food sample and the following sequence was controlled : a holding step of 3 seconds at 0% strain, followed by a compression step of 80% at 10 mm.s^{-1} , and finally a new holding step of 3 seconds.

The experiments were conducted at room temperature ($19 \pm 1^\circ\text{C}$), and in triplicate for each set of conditions investigated (tongue roughness and lubrication levels, food product reference).

5.2.4 Ultrasonic technic

The ultrasonic set up aims at monitoring the evolution of ultrasound reflectivity at tongue-food interface during the compression of the different food gels on the bio-mimicking device described here above.

5.2.4.1 Ultrasonic device

The device is composed of a longitudinal mono-element piezo-electric transducer (V103RM, Olympus, Shinjuku, Tokyo, Japan) with a central frequency of 900 kHz . The US transducer was positioned underneath the artificial tongue (silicon grease was used as coupling agent) on the biomimicking set-up at least two hours before the experiments. The transducer is connected to a US pulser-receiver (Sonatronic, Evry, France), which produces a negative squared pulse signal (500 *ns* width, 80 *Volt* amplitude) for the emission of the US pulse, and which digitalizes *rf* signals (12-bit quantification, 100 *MHz* sampling rate, 38 *dB* gain) corresponding to the pulse echo response of the system. The acquisition of the *rf* signals was done using a dedicated user-interface Labview program (Labview, National Instrument, Austin, Texas, USA) in parallel of compression tests.

5.2.4.2 Ultrasonic signal processing

The sets of *rf* signals obtained for each compression test were processed with Matlab (The MathWorks, Natick, Massachussetts, USA). The reflection coefficient R of US waves at tongue-food interface was determined for each individual *rf* signal, following the protocol extensively described in the previous study (Mantelet et al., 2018b). Briefly, a first step consisted in high-frequency noise reduction with a low-pass filter (15 *MHz* cutoff frequency) applied to the Fast Fourier Transform (FFT) of the *rf* signals. Then, time intervals of interest (4 μs width) centered on the maximum of modulus of the Hilbert transform of echo E_0 (see Figure 1.b) were determined to track the echo of tongue-food interface. Amplitude A_0 was then calculated for each *rf* signal, as the modulus of the FFT of these temporal windows at 900 kHz . Finally, the reflection coefficient R was computed following :

$$R(\epsilon) = \frac{A_0(\epsilon)}{A_{0,ref}} \quad (5.1)$$

Where ϵ is the value of food strain rate (ranging from 0 to 80%) corresponding to each *rf* signal and where $A_{0,ref}$ is a reference value of amplitude A_0 measured before the positioning

of the food sample on tongue surface (case of full acoustic reflection). The variations of R were also computed, referred to as ΔR and defined following :

$$\Delta R(\epsilon) = R(\epsilon) - R(\epsilon = 0) \quad (5.2)$$

5.3 Results and discussions

The results and discussion are structured in three distinct subsections, so that to discuss successively on the impact of (i) tongue roughness, (ii) food properties and (iii) tongue lubrication on the variations of tongue-food interface US reflectivity as a function of time (or strain rate) during a compression test. For all figures, the curves with identical colors correspond to the replicates of identical conditions (both for tongue and food properties). This solution was preferred over average curves in order to better observe the specific variations of each individual test.

5.3.1 Impact of tongue roughness on US reflectivity

Figure 5.2 shows, for three different products ($Ag_{0.3}$, $Ge_{3.5}$, Ge_7) and in absence of lubrication (condition « Dry »), the variations ΔR of US reflection coefficient during a compression test throughout the three levels of roughness investigated ($R_0\beta_0$, $R_1\beta_1$, $R_1\beta_2$). The three specific products selected here give an overview of the various behaviors observed throughout the eight gels.

The reflectivity of US waves on tongue surface highly depends on the acoustic impedance of the media located in the vicinity of tongue surface asperities. When tongue surface is in contact with air, the negligible acoustic impedance of air (relatively to PVC) leads to a full reflection configuration ($R = 100\%$). Conversely, when a gel of agar or gelatin fully covers the asperities of tongue surface, US reflection coefficient has been shown to range between 31 and 34 %, depending on the variations of acoustic impedance (mass density and compressibility) throughout the different products (Mantelet et al., 2018b). When a food sample is deposited on tongue surface, some air bubbles remain trapped in contact with tongue surface, in such a way that the media located in intimated contact with surface asperities combine both water and gel. Consequently, the reflection coefficient at tongue surface has been shown to be a good indicator of the effective contact ratio between the food gel and tongue surface (Mantelet et al., 2018b). High values of reflection coefficient (tending to 100%) correspond to a dominance of air ratio in the vicinity of tongue surface, whereas low values of reflection coefficient (tending to around 30%) suggest a high coupling between the food sample and tongue surface.

In the case of the smooth tongue profile $R_0\beta_0$, no significant variations of US reflectivity were reported during the compression of the different products (see curves in blue on Figure 5.2). This observation suggests that the contact surface between tongue and food was not altered during the compression tests. For these three products, US reflectivity was shown to range between 33 and 34%, suggesting, even before the beginning of the compression, a full contact between tongue and food.

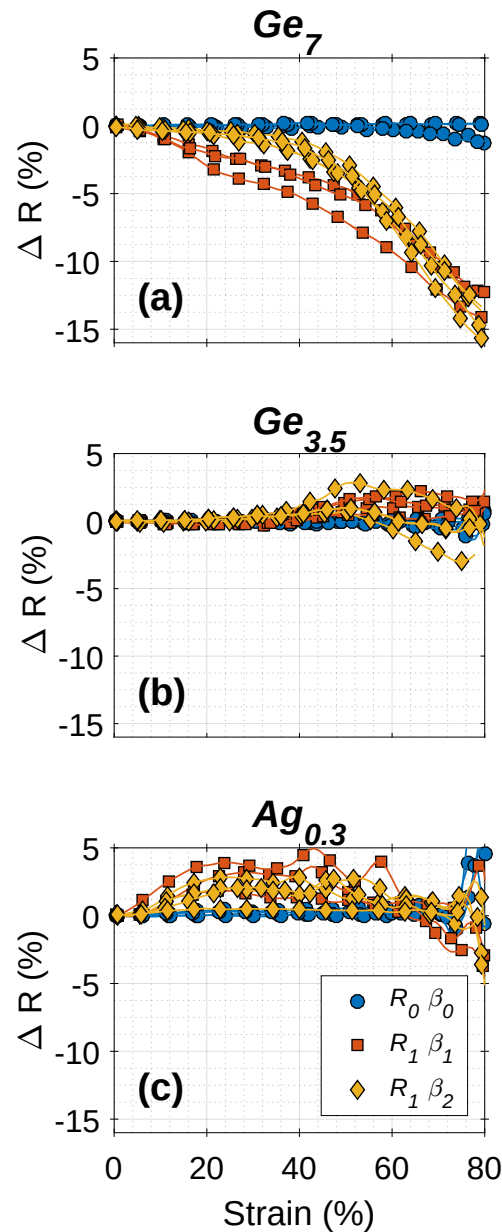


FIGURE 5.2 – US reflectivity ΔR variations as a function of strain during a compression. Reflectivity variation from initial reflectivity (ΔR) plotted versus the mechanical strain for $R_0\beta_0$ (blue circle), $R_1\beta_1$ (red square) and $R_1\beta_2$ (yellow diamond). Graphs have been plotted for Ge_7 (a), $Ge_{3.5}$ (b) and $Ag_{0.3}$ (c).

Contrary to $R_0\beta_0$, variations of US reflectivity were reported for rough tongue profiles $R_1\beta_1$ and $R_1\beta_2$ during the compression (see figure 5.2). These results suggest that the amount of contact surface between gels and tongue varies when the food product is under load. Interestingly, different trends were observed throughout the three products in Figure 5.2. For gels $Ge_{3.5}$ and $Ag_{0.3}$, a slight increase of US reflectivity was first observed, followed by a decreasing trend during the second portion of the compression (see Figure 5.2.b and Figure 5.2.c). However, for these two gels, no major differences were observed between the two tongue's profiles $R_1\beta_1$ and $R_1\beta_2$. The largest variations of R were reported for gel Ge_7 , with a

decrease of ΔR by around 15% after 80% (see Figure 5.2.a). Interestingly, a faster decrease was observed for profile $R_1\beta_1$ at the beginning of the compression, before $R_1\beta_1$ and $R_1\beta_2$ curves meet similar values at the end of the compression. This result suggests that tongue roughness parameters may influence the evolution of the intimate contact between tongue asperities and gel during a compression. $R_1\beta_1$ and $R_1\beta_2$ profiles have similar values of Ra (average value of the height of asperities) and mainly differ by their correlation length β , lower for $R_1\beta_1$ than for $R_1\beta_2$, indicating a higher stretching of asperities for $R_1\beta_2$. As a consequence, a low value of β is likely to promote food-gel coupling at early stage of compression, without affecting the global decrease rate of US reflection coefficient after the whole compression.

5.3.2 Impact of food properties on US reflectivity

The eight food products considered in the present study mainly differ by the composition of their agar/gelatin ratio. As a consequence, due to separation phase mechanisms between agar and gelatin (Clark et al., 1983; McEvoy et al., 1985), the products can be split into two groups : gelatin dominant products consisting in a continuous phase of gelatin with, if appropriate, agar inclusions ($Ge_{3.5}$, $Ag_{0.3}Ge_{3.5}$, $Ag_{0.3}Ge_{3.5}$, Ge_7), and conversely agar dominant products composed of a continuous phase of agar with, if present, inclusions of gelatin ($Ag_{0.3}$, $Ag_1Ge_{0.75}$, $Ag_{1.8}$).

Figure 5.3 shows the variations of US reflectivity ΔR (Figure 5.3.a) and of the applied force F (Figure 5.3.b) as a function of strain for the four gelatin dominant products. Similarly, Figure 5.4.a and Figure 5.4.b respectively represent the variations of ΔR and F for agar dominant products. Both Figure 5.3 and Figure 5.4 correspond to experimental configurations with surface profile $R_1\beta_1$, in absence of lubrication (condition « Dry »).

Two different trends of ΔR variations were reported for gelatin dominant products (Figure 5.3.a) : (i) a continuous decrease of ΔR for Ge_7 and $Ag_{0.3}Ge_{3.5}$ products, reaching around -10% at 80% strain and (ii) a slight evolution of ΔR for $Ge_{3.5}$ and $Ag_{0.3}Ge_{3.5}$, resulting in a null value of ΔR at 80% strain. Consequently, the results suggest a slight increase of interface coupling for Ge_7 and $Ag_{0.3}Ge_{3.5}$, whereas the compression does not seem to induce major changes for gels $Ge_{3.5}$ and $Ag_{0.3}Ge_{3.5}$.

In the same way, two behaviors can be distinguished for agar dominant samples (see Figure 5.4.a) : (i) a decrease of US reflectivity to reach around -15% for $Ag_1Ge_{0.75}$ and -30% for $Ag_{1.8}$ at 80% strain and (ii) an almost constant profile for $Ag_{0.3}$.

Interestingly, the same groups of products can be derived from stress-strain curves in Figure 5.3.b (gelatin dominant products) and in Figure 5.4.b (agar dominant products). The products leading to the highest force profiles during the compression (Ge_7 and $Ag_{0.3}Ge_{3.5}$ for gelatin dominant products, $Ag_1Ge_{0.75}$ and $Ag_{1.8}$ for agar dominant products) also are the products leading to the highest decrease of US reflectivity. Conversely, with lower mechanical loads applied, samples $Ge_{3.5}$, $Ag_{0.3}Ge_{3.5}$ and $Ag_{0.3}$, went through lower variations of US reflectivity.

Moreover, during the fracture of $Ag_{1.8}$ at 50% strain and of $Ag_1Ge_{0.75}$ at 45%, the force decrease related to relaxation mechanisms was shown to result in a breakpoint of US reflectivity decrease during the compression. As a consequence, US reflectivity was shown to be a good indicator of fracture point for these specific products.

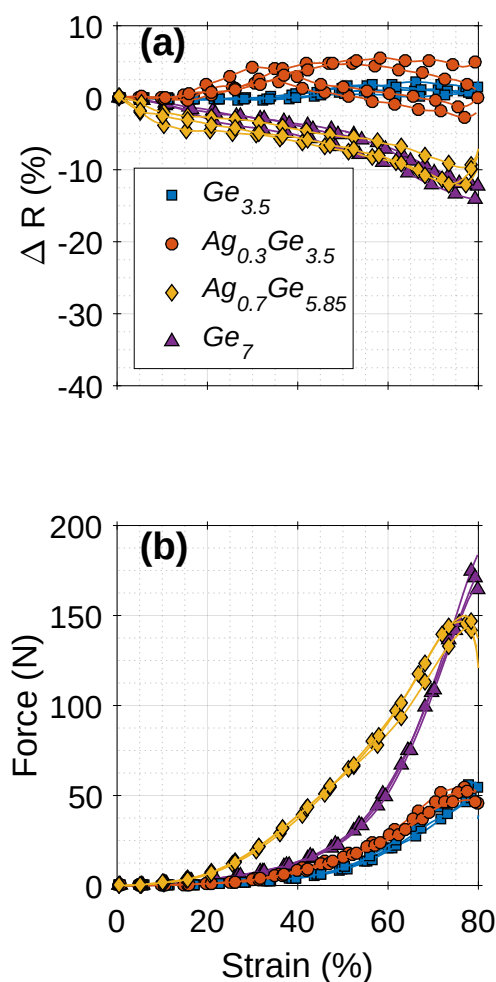


FIGURE 5.3 – Effect of the product on the ultrasonic reflectivity for $R_1\beta_1$ surface. Reflectivity variation from initial reflectivity (ΔR) is plotted versus the mechanical strain (a) and Force applied on product during compression versus mechanical strain (b) for Gelatin dominant product : $Ge_{3.5}$ (blue square), $Ag_{0.3}Ge_{3.5}$ (red circle), $Ag_{0.7}Ge_{5.85}$ (yellow diamond) and Ge_7 (purple triangle).

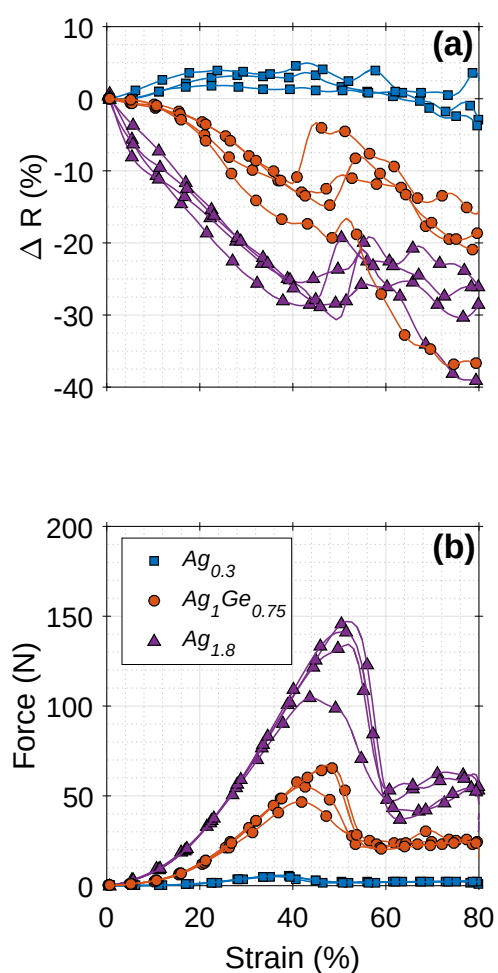


FIGURE 5.4 – Effect of the product on the ultrasonic reflectivity for $R_1\beta_1$ surface. Reflectivity variation from initial reflectivity (ΔR) is plotted versus the mechanical strain (a) and Force applied on product during compression versus mechanical strain (b) for Agar dominant product : $Ag_{0.3}$ (blue square), $Ag_1Ge_{0.75}$ (red circle) and $Ag_{1.8}$ (yellow diamond).

Another interesting point is that more pronounced variations of ΔR were reported for agar than for gelatin dominant products, suggesting a higher capability of agar gels to fill the asperities of the profile of tongue surface. The brittle behavior of agar dominant products observed from a macroscopic point of view with fracture points in Figure 5.4.b may also result in local phenomena at the level of tongue interface. The roughness of tongue surface profile leads to a high heterogeneity of food sample stress field in the vicinity of tongue surface asperities (high stress close to peaks, lower close to valleys) (Persson et al., 2005). As a consequence, the higher brittle behavior of agar products may induce micro-fractures which result in improving the capacity of the sample to fill the asperities of tongue surfaces (while only elastic deformation may occur for gelatin dominant products).

5.3.3 Impact of tongue lubrication on the variation of US reflectivity

All the experiments in the two first parts of this discussion consisted in investigating the behavior of US reflectivity in the case of a dry contact. Accounting for tongue lubrication is critical as it already has been shown to drastically affect US reflectivity in absence of mechanical load applied (Mantelet et al., 2018c). Ge_7 and Ge_7T were chosen to illustrate the impact of tongue surface lubrication on the variations of US reflectivity during a compression. They differ by the presence of Tween 20 in Ge_7T , an emulsifying agent used to modify surface tension properties all by preserving the elastic properties of product Ge_7 . Figure 5.5 shows, for the four lubrication conditions, the variations of US reflectivity as a function of strain for Ge_7 (Figure 5.5.a₁ and 7.a₂) and Ge_7T (Figure 5.5.b₁ and 5.5.b₂). Two surface profiles are plotted : $R_0\beta_0$ (Figure 5.5.a₁ and Figure 5.5.b₁) and $R_1\beta_2$ (Figure 5.5.a₂ and Figure 5.5.b₂).

For the profile $R_0\beta_0$, US reflectivity remained roughly constant all along the compression for both products and for all of the four lubrication conditions. Only a slight decrease of ΔR was reported for some lubrication conditions with Ge_7 between 60 and 80% strain. These results, and the low values of US reflectivity reported before the beginning of compression tests, confirm that even before applying any load to the food sample, there is already a full and homogenous contact between the food sample and tongue surface.

Different trends of variations were reported throughout the four lubrication conditions for the profile $R_1\beta_2$. « Dry » condition led to the highest variations of ΔR , with a decrease by around 15% for Ge_7 and 7% for Ge_7T . In the same manner as for the previous sections, these observations suggest a significant improvement of the acoustic coupling at tongue surface. Interestingly, the initial reflectivity of Ge_7T ($63 \pm 0.4\%$) is also lower than the reflectivity of Ge_7 ($68.1 \pm 2.3\%$), indicating a better contact between tongue and Ge_7T than the tongue and Ge_7 (see Figure 5.6). The main difference between Ge_7 and Ge_7T is the presence of TWEEN 20 which increase the wettability of the product Ge_7T compares to those of Ge_7 and, considering the reflectivity at initial strain, may increase the adhesion. As it can be seen previously with $Ag_{0.3}$, $Ge_{3.5}$ and $Ag_{0.3}Ge_{3.5}$ products, the adhesion's increase may decrease the reflectivity variation during uniaxial compression.

Conversely, « High » condition led to the lowest variations of US reflectivity, with a slight linear decrease reaching of ΔR (around -1,5 %) both for Ge_7 and Ge_7T . Here again, the low values of US reflectivity measured before the beginning of the compression suggest

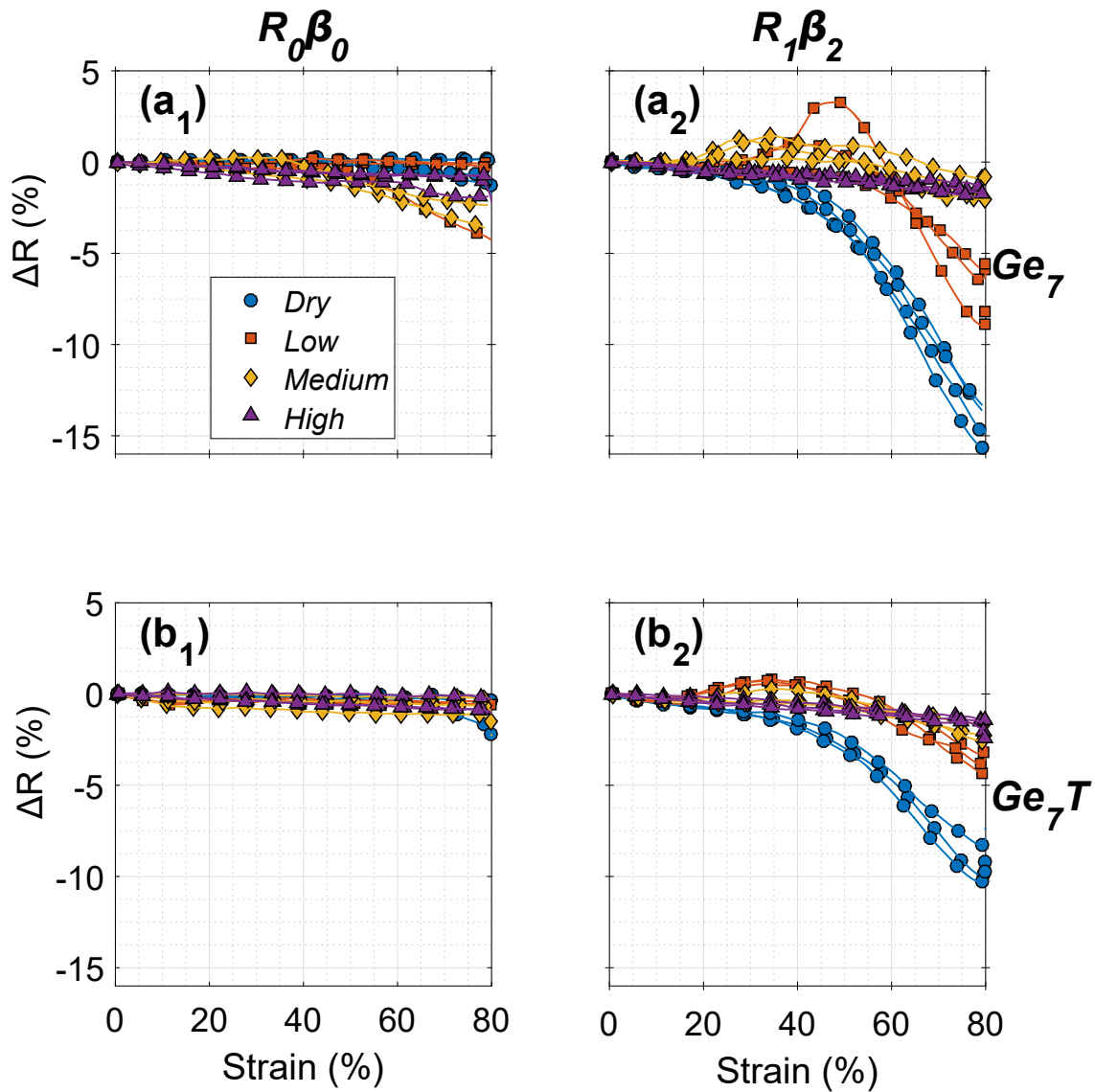


FIGURE 5.5 – Effect of the Lubrication on the ultrasonic reflectivity. Reflectivity variation from initial reflectivity (ΔR) is plotted versus the mechanical strain for Dry lubrication (blue circle), Low lubrication (red square), Medium Lubrication (yellow diamond) and Full lubrication (purple triangle). Graphs are plotted for Ge_7 on $R_0\beta_0$ (a₁) and $R_1\beta_2$ (a₂), and for Ge_7T on $R_0\beta_0$ (b₁) and $R_1\beta_2$ (b₂).

a full and homogeneous coupling between food samples and tongue surface. The film of water (with an acoustic impedance close to those of gels) acts as a coupling agent and fills the asperities of tongue surface. The results in Figure 5.5.a₂ and 5.5.b₂ suggest that for the « High » lubrication condition, when a load is applied to the food sample during the compression, the excess of water at the interface flows to the external boundaries of the sample, but does not affect the coupling at tongue interface. This results are consistent with the work of (Dwyer-Joyce et al., 2003b) which modeled the decrease of reflectivity with the decrease of lubricant's thickness. In our case, the lubricant thickness decrease because of the flow of water to the external boundary of product and the decrease of reflectivity, considering the model of (Dwyer-Joyce et al., 2003b), is negligible (1%).

« Low » and « Medium » conditions made it possible to observe intermediate behaviors, all by providing relevance compared to the physiological level of tongue lubrication.

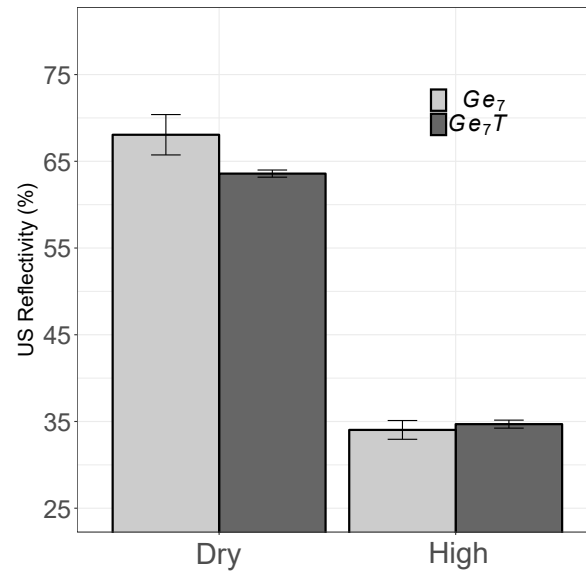


FIGURE 5.6 – US Reflectivity of PVC/product interface. Results on $R_1\beta_2$ surface and « Dry » and « High » lubrication are presented for $Ag_{0.3}$, $Ge_{3.5}$ and Ge_7 product. Mean values $\pm$ standard deviation are presented. Adapted from (Mantelet et al., 2018b)

For « Low » and « Medium » conditions, US reflectivity pattern was first shown to increase slightly, before decreasing during the second portion of the compression, suggesting complex and competitive interactions at the interface. Accordingly, this behavior is present for heterogeneous lubrication layer on rough tongue for elastic product (compliant), and the presence of roughness, air bubbles and water is a favorable condition to observe this effect.

5.4 Conclusion

The present study made it possible to go further in the investigation of dynamical and physical mechanisms at tongue-food interface by QUS. In this study, the ultrasound reflectivity at the tongue-food interface was monitored through a uniaxial compression of agar and/or gelatin-based hydrogel between a rough non-deformable tongue and an aluminum plate.

Results show the dynamical sensitivity of the ultrasound reflectivity to the tongue's roughness, the mechanical behavior of products and the intermediate lubrication state. This sensitivity seems due to the filling of tongue asperities by the food or linked to the spreading of lubricant droplet through uniaxial compression. The filling of tongue's asperities by product and the droplet spreading have been shown to be sensitive to the force applied on the product and the roughness parameters of the tongue. So, this study shows the evolution of the contact at tongue-food interface through uniaxial compression and it shows the possibility to investigate it by QUS. Such information may be helpful to understand the origin of the stimuli perceived by the mechanoreceptors through time's consumption to understand its time integration by the central nervous system which lead to texture perception.

However, the *in situ* tongue's roughness may evolve under uniaxial compression and the in-situ tongue-food contact may also depend on the deformability of the tongue. In addition, the impedance's difference between PVC and product is large enough to detect the tongue-food interface even in the case of perfect contact, whereas a real tongue has an impedance

close to those of products, accordingly the detection of tongue-food echo may be difficult to obtain.

Futures work will then use a deformable biomimicking tongue which have an impedance close to those of products in order to study the evolution of the ultrasound reflectivity considering a deformable tongue profile.

Acknowledgments

We want to acknowledge Jean-Luc Gennisson for his thorough advice for the analysis of US measurements. We also thank David Forest, Claire Juguet, Raphaëlle Ponthieux and Gabriel Debar for their kind and precious technical support.

Principaux messages à retenir :

- Une grande diversité de profils de variation de la réflectivité ultrasonore de l'interface langue-aliment a pu être observée au cours de la compression des différents types de gels.
- Cette compression permet d'améliorer la qualité du couplage acoustique à l'interface avec la langue dans le cas où celui-ci n'est pas optimal dès la phase de mise en contact.
- Les phénomènes de fracture observés pour certains gels en cours de compression ont donné lieu à des hausses soudaines du coefficient de réflexion, qui traduisent un détachement entre la langue et l'aliment lié aux mécanismes de relaxation mécanique.

Pour se rapprocher de conditions physiologiques, l'étape suivante décrite dans le chapitre 6 de la thèse s'est intéressée à l'étude de **l'impact de la déformabilité de la langue sur la propagation des ondes ultrasonores dans le système modèle langue-aliment-palais pendant une compression uni axiale** (figure 5.7).

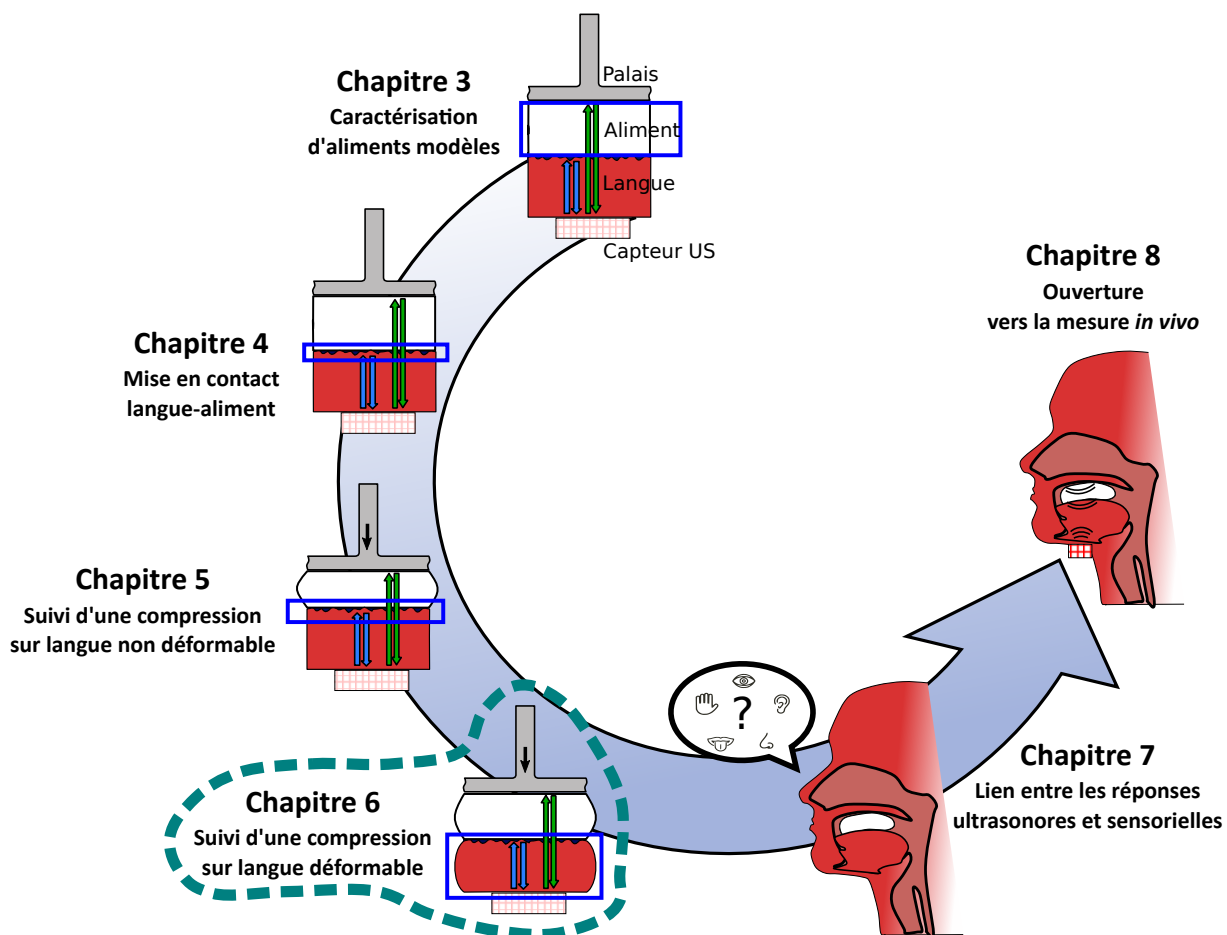


FIGURE 5.7 – Stratégie expérimentale de la thèse

Chapitre 6

Etude *in vitro* de l'impact de la déformabilité de la langue sur la réponse ultrasonore du système langue-aliment au cours d'une compression uni-axiale

Sommaire

6.1 Introduction	124
6.2 Matériels et méthodes	125
6.2.1 Fabrication et caractérisation des langues biomimétiques	125
6.2.1.1 Composition	125
6.2.1.2 Protocole de fabrication des langues en PVA	125
6.2.1.2.1 Préparation et coulage d'une solution de PVA	125
6.2.1.2.2 Etape de gélification	125
6.2.1.2.3 Contrôle de la rugosité des langues	126
6.2.2 Protocole de compression langue-palais	127
6.2.2.1 Suivi par ultrasons et traitement du signal	128
6.2.2.2 Traitement du signal	128
6.3 Résultats et discussions	129
6.3.1 Impact de la déformabilité de la langue sur le temps de vol dans l'aliment	129
6.3.2 Sensibilité de la réflectivité ultrasonore à la rigidité de la langue	133
6.4 Conclusion	136

6.1 Introduction

Au cours des deux chapitres précédents, l'utilisation d'une langue non déformable en PVC nous a permis de montrer que le coefficient de réflexion des ondes ultrasonores à l'interface langue/aliment est sensible à la capacité (i) de l'aliment à s'immiscer au contact des aspérités de la surface de la langue, mais aussi (ii) de l'eau (mimant la salive) à assurer un rôle de couplage entre les surfaces de l'aliment et de la langue. Toutefois, bien que l'utilisation du PVC nous ait permis d'étudier l'impact de la présence de rugosités à la surface de la langue sur le coefficient de réflexion, les propriétés de ce matériau restent éloignées de celles de la langue humaine. En effet, l'impédance du PVC, ainsi que ses propriétés hydrophobes (limitant sa mouillabilité par la salive), ne sont pas représentatives de la physiologie orale. Nous avons donc souhaité faire évoluer le système expérimental, afin de mieux prendre en compte les propriétés mécaniques, interfaciales et acoustiques d'une vraie langue. Comme présenté dans l'état de l'art (section 1), la langue humaine présente un module de Young compris entre 12.2 ± 4.2 kPa et 122.5 ± 58.5 kPa selon son niveau de contraction (Ishihara et al., 2013). Il s'agit par ailleurs d'un organe très riche en eau, dont les propriétés acoustiques restent également proches de celles de l'aliment. Enfin, sa surface est hydrophile, permettant une lubrification parfaite de sa surface par la salive. Sur la base des travaux réalisés dans le domaine biomédical pour simuler des tissus mous, le PolyVinyl Alcohol (PVA) a été choisi (Kumar and Han, 2017; Surry et al., 2004) pour formuler les nouvelles langues artificielles. En effet, la vitesse de propagation des ultrasons au sein de gels de PVA est proche de celle rencontrée dans ce type de tissus (1550 m.s^{-1} pour 10% w/w de PVA). Par conséquent, la réflexion des ondes ultrasonores à l'interface PVA/aliment sera proche de celle rencontrée entre les tissus biologiques de la langue et l'aliment. Au-delà de ses caractéristiques acoustiques, le PVA offre également un spectre intéressant de propriétés mécaniques qu'il est possible de contrôler en renouvelant des cycles de congélation/décongélation, tout en restant à composition constante (Fromageau et al., 2007). Le PVA est également un matériau facile à mouler et pour lequel il est aisé de contrôler l'état de surface. Ainsi de part ses caractéristiques, le PVA est le matériau que nous avons sélectionné afin d'étudier la compression d'un aliment par une langue déformable.

Après avoir définies les conditions permettant l'obtention de langues déformables aux caractéristiques proches d'une langue humaine, l'objectif de ce chapitre est l'étude de l'impact de la déformation de la langue (surface, volume, rigidité) sur plusieurs paramètres ultrasonores (temps de vol, réflectivité) au cours de la compression uni-axiale du système langue/aliment. Les langues de PVA ont été fabriquées en faisant varier la rigidité et l'état de surface sur deux niveaux. Les essais ont été réalisés sur deux produits choisis pour leurs propriétés extrêmes ($Ag_{0.3}$ et Ge_7) afin d'étudier le comportement de la propagation des ultrasons pour une large variété de configurations.

6.2 Matériels et méthodes

6.2.1 Fabrication et caractérisation des langues biomimétiques

6.2.1.1 Composition

Les langues biomimétiques déformables ont été réalisées à partir d'une solution de 10% g/g de PolyVinyl Alcohol (CAS : 9002-89-5, Mw 89-98, 99+% hydrolyzed, Sigma Aldrich, Saint-Louis, USA) et d'eau milliQ (MilliQ Advantage, MilliPore, Guyancourt, France).

6.2.1.2 Protocole de fabrication des langues en PVA

6.2.1.2.1 Préparation et coulage d'une solution de PVA 450 ml d'une solution de PVA à 10% g/g ont été préparés à température ambiante sous agitation lente pendant 5 min. La solution a ensuite été chauffée à 80°C sous la même agitation, durant 2h à l'aide d'un bain-marie (Grant Instrument, Cambridge, England) permettant la dissolution du PVA et l'obtention d'une solution homogène. La solution a ensuite été placée à température ambiante sous agitation lente pendant 2h, afin de s'assurer d'un refroidissement homogène de l'ensemble. Après refroidissement, la solution de PVA a été versée dans des moules cylindriques en polyéthylène (20 mm de hauteur et 50 mm de diamètre, UFP, Le Versoud, France) et conservée à 20 ± 1 °C durant 16h afin de permettre l'évacuation de bulles d'air à l'intérieur du PVA. Deux références de papier abrasif ont été utilisées pour tapisser le fond des moules et faire varier l'état de surface des langues : i) un papier abrasif de grain p40 (GrainSize= 425µm, Norton, Saint-Gobain, France) pour les surfaces rugueuses (R_2) et ii) un papier abrasif de grain p80 (GrainSize=200µm, Struers, Champs-sur-Marne, France) pour les surfaces un peu moins rugueuses (R_1). Après avoir effectué le nombre de cycles définis (2 ou 6), les langues sont conservées à 20 ± 1 °C dans de l'eau osmosée afin d'éviter leur déshydratation avant utilisation.

6.2.1.2.2 Etape de gélification La gélification du PVA a été réalisée en imposant des cycles de congélation/décongélation. L'étape de congélation s'est déroulée en plaçant les moules contenant le PVA dans un congélateur domestique (ECM30132W/BMI310, Electrolux, Nyíregyháza, Hongrie) pendant 8h à -15°C. L'étape de décongélation a été effectuée en plaçant les moules dans une salle climatisée à 20 ± 1 °C durant un minimum de 14h. La rigidité des échantillons augmente après chaque cycle de congélation/décongélation. Deux niveaux de raideur ont été considérés : le niveau « D_{relax} » pour deux cycles de compression et le niveau « D_{contr} » pour six cycles. Ces nombres ont été définis afin d'être respectivement représentatifs des états relâchés et contractés de la langue.

Les modules de Young des langues ont été déterminés par élastographie ultrasonore (Aixplorer, SuperSonic Imagine, Aix-en-Provence, France – caractérisation réalisée au laboratoire IR4M d'Orsay). Le tableau 6.1 rassemble les données obtenues. En parallèle des mesures par élastographie réalisées sur les langues de PVA, des mesures ont été réalisées sur la langue de quatre individus aux états « relâché » et « contracté ». Les valeurs moyennes obtenues sont de 14 ± 3.8 kPa au repos et de 110 ± 26.9 kPa dans le cas contracté. Ces résultats confortent le choix du nombre de cycles de congélation-décongélation permettant

TABLEAU 6.1 – Modules de Young des langues déformables en PVA utilisées et des langues de 4 individus (au repos et contracté)

Tongue	Young's modulus (kPa)
$D_{relax}R_1$	18.3±2.1
$D_{relax}R_2$	18.3±2.1
$D_{contr}R_2$	117.2±9.4
Tongue of 4 individuals at rest	14±3.8
Tongues of 4 individuals in contracted conditions	110±26.9

TABLEAU 6.2 – Propriétés de surface des langues déformables en PVA et en PVC utilisées

Tongue	Ra μm	β μm
$D_{relax}R_1$	41.9±0.5	289±36.4
$D_{relax}R_2$	72.2±14.0	435.1±61.8
$D_{contr}R_2$	103.5±3.2	428.9±63.4
$D_{hard}R_2$	52±11.2	243±12

l'obtention d'un spectre des propriétés mécaniques compatibles avec ceux d'une langue réelle.

Une langue artificielle en PVC a également été incluse dans l'étude (similaire à celles décrites dans les chapitres précédents). Avec un module de Young de l'ordre du GPa, elle permet d'aider à comprendre l'impact de la raideur du matériau qui joue le rôle de la langue sur les variations des différents paramètres ultrasonores. Référencée « $D_{hard}R_2$ », elle a été moulée selon le protocole décrit dans le chapitre précédant, à l'aide de l'empreinte de papier abrasif p40 (GrainSize= 425μm, Norton, Saint-Gobain, France).

6.2.1.2.3 Contrôle de la rugosité des langues Au total, quatre références de langues ont été retenues pour l'étude : $D_{relax}R_1$, $D_{relax}R_2$, $D_{contr}R_2$ et $D_{hard}R_2$. Le profil de chacune des surfaces a été caractérisé à l'aide d'un profilomètre de contact (Brucker Dektak XT, Billerica, MA, USA). Une pointe de 50 nm de diamètre a été utilisée pour scanner les surfaces des langues biomimétiques. La position de la pointe est contrôlée et analysée par le logiciel Vision 64® du constructeur. La force appliquée sur la pointe était de 1 mg. Pour chaque surface, trois balayages 1D de 30 mm ont été effectués, à chaque fois après en avoir fait pivoter la surface de 45°.

Pour chaque profil, la moyenne arithmétique de la hauteur des aspérités (Ra) et celle de la longueur de corrélation (β) ont été calculées en suivant le protocole de traitement des données décrit dans le chapitre précédent.

Les propriétés de surface de chacune des langues déformables sont réunies dans le tableau 6.2

Bien que les échantillons $D_{relax}R_2$, $D_{contr}R_2$ et $D_{hard}R_2$ aient été fabriqués à l'aide d'une même surface de référence (référence de disque abrasif identique), on constate des valeurs de Ra significativement différentes entre les trois références, et des valeurs de β également différentes entre les deux références en PVA et la référence en PVC. Ainsi, il est à noter que la comparaison des expériences réalisées avec ces trois types d'échantillons ne permettra

pas de conclure uniquement sur l'effet de la rigidité.

La singularité des propriétés de surface de la langue de PVC s'explique par une limitation technique du procédé de moulage pour aller imprimer en profondeur le profil de rugosité de l'empreinte de référence. Pour les différences entre les deux langues de PVA, bien que la cause effective n'ait pas encore pu être clairement mise en évidence, plusieurs mécanismes sont susceptibles d'en être à l'origine. Tout d'abord, la rétraction des aspérités pourrait être plus importante pour un faible nombre de cycles de congélation/décongélation. De plus, la littérature rapporte des phénomènes de déroulement des chaînes de PVA à bas nombre de cycles (Hassan and Peppas, 2000; Hatakayema et al., 2005; Lozinsky et al., 2008; Mallapragada and Peppas, 1996; Ricciardi et al., 2004), qui pourrait favoriser l'érosion de la surface durant le stockage des échantillons dans l'eau osmosée et par l'application d'un acte de cisaillement au cours des essais mécaniques. Cependant, il est à noter que les expériences décrites dans ce chapitre montrent une reproductibilité robuste dans le temps, rassurant quant au peu d'évolution des échantillons de PVA.

6.2.2 Protocole de compression langue-palais

Toute la base du système expérimental biomimétique décrit dans le chapitre précédant a été conservée. La compression de l'aliment reste imposée par le même appareil de traction-compression (TA.XT plus, stable Micro System, Surrey, United Kingdom). Cependant, la mise en œuvre d'échantillons déformables pour mimer la langue a nécessité quelques évolutions du système. En particulier, un nouveau réceptacle de langue artificielle a ainsi été conçu, permettant (i) d'assurer le maintien de la langue sur la base de l'appareil de traction compression et (ii) d'exercer une pression répétable du traducteur ultrasonore au contact de la langue (voir Figure 6.1.a). La forte teneur en eau du gel de PVA permet de s'affranchir de l'utilisation de gel échographique pour le couplage entre le transducteur et la langue, sans altération des propriétés du contact sur la période de temps des expériences.

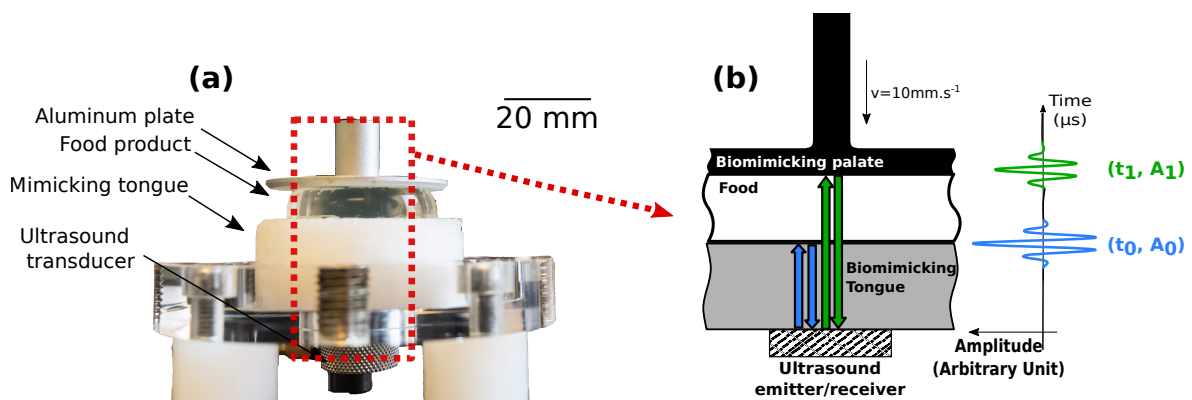


FIGURE 6.1 – (a) photographie du montage biomimétique avec le système US. (b) représentation de la propagation des US dans le système langue/aliment/palais avec le signal US brut qui y est généré.

De par les propriétés de relargage d'eau du gel de PVA, le contrôle de l'état de lubrification de la surface de la langue forme un point d'attention particulier. Un seul état de lubrification a été considéré dans cette partie, consistant à réaliser un essai de compression dans les 2 min suivant l'absorption de l'excédent d'eau à la surface de la langue à l'aide

d'un papier absorbant (Kimtech, Kimberly-Clark, Surrey, UK). L'aliment est ensuite déposé au centre de la surface de la langue puis une compression uni-axiale est imposée. Les paramètres de compression sont identiques à ceux du chapitre précédent (déplacement de 8 mm à une vitesse de 10 mm.s^{-1}). Cependant, il est à noter que le caractère déformable de la langue implique qu'à l'issue de la compression, le taux de déformation de l'aliment est inférieur à 80%.

Deux produits ont été inclus dans ces travaux afin d'étudier l'impact de la rigidité de la langue sur le suivi de la compression d'échantillons qui diffèrent à la fois par leur rigidité et par leur comportement à la rupture au cours des cycles de compression imposés. Ces deux produits sont le gel de gélatine à 7% (Ge_7) et le gel d'agar à 0.3% ($Ag_{0.3}$). Les échantillons ont été fabriqués dans les mêmes moules cylindriques que dans les deux chapitres précédents : 10 mm d'épaisseur pour 30 mm de diamètre.

Pour chaque configuration (couple produit/langue), les expériences ont été réalisées en 6 répliques.

6.2.2.1 Suivi par ultrasons et traitement du signal

Le système d'acquisitions ultrasonores est identique à celui décrit dans les chapitres précédent : il s'agit d'un système d'émission/réception (Sonatronic, Evry, France) qui génère une impulsion carrée négative (80 V, 500 ns) à un transducteur longitudinal plan de fréquence centrale 900 kHz (V103RM, Olympus, Shinjuku, Tokyo, Japan, transducteur plan, ondes longitudinales). Les signaux sont numérisés par une carte intégrée au système d'émission/réception (12 bit, 100 MHz) et l'acquisition est contrôlée par l'intermédiaire d'une interface homme-machine développée sous Labview (LabVIEW, National Instrument, Austin, Texas, USA).

Comme dans le chapitre précédent, des mesures de référence ont été effectuées juste avant la mise en place de l'aliment sur la langue, puis pendant toute la phase de compression à raison d'environ 100 signaux par seconde.

6.2.2.2 Traitement du signal

La prise en compte de la déformabilité de la langue n'entraîne pas de modification particulière de la forme générale des signaux ultrasonores (voir Figure 6.1.b). Ils sont ainsi toujours composés d'un premier écho (noté E_0) qui correspond à la réflexion de l'onde sur l'interface langue/aliment, puis d'un deuxième (noté E_1) pour l'interface aliment/palais. Les variations d'amplitude des échos E_0 et E_1 restent liées au couplage des deux interfaces. Cependant, nous observons maintenant à la fois l'évolution du temps t_1 d'occurrence de l'écho E_1 et celle du temps t_0 de l'écho E_0 . Ces variations permettent de rendre compte en temps réel de l'évolution de la déformation de la langue et de l'aliment au cours d'une compression. En plus du coefficient de réflexion R de l'interface langue-aliment, nous proposons donc d'extraire par le traitement du signal un paramètre supplémentaire relatif au temps de vol dans l'aliment (noté ToF), qui correspond au temps de parcourt de l'onde ultrasonore dans l'aliment.

Les signaux sont dans un premier temps débruités à l'aide d'un filtre passe-bas d'ordre 8

(fréquence de coupure à 10 MHz). L'étape suivante consiste à extraire, pour chaque signal, deux fenêtres temporelles englobant respectivement les échos E_0 et E_1 . Pour déterminer ces fenêtres (qui se déplacent au cours d'une compression), un algorithme d'auto-corrélation est utilisé entre des fenêtres de référence (obtenues sur un signal avant le lancement de la séquence de compression). Les résultats des algorithmes d'auto-corrélation sont des pics permettant de déduire, pour chaque signal, les temps d'occurrence t_0 et t_1 des échos E_0 et E_1 . Le paramètre ToF de temps de vol de l'onde ultrasonore dans l'aliment est ensuite déduit selon la relation :

$$ToF = t_1 - t_0 \quad (6.1)$$

Le coefficient de réflexion R de l'interface langue-aliment est déterminé à partir de l'amplitude de l'écho E_0 . Pour cela, pour chaque signal, une transformée de Fourier est appliquée à une fenêtre centrée sur le temps t_0 et dont la largeur vaut 4 μs . L'amplitude A_0 de l'écho E_0 est ensuite déterminée, définie par l'amplitude du spectre de la fenêtre à la fréquence de 900 kHz, qui correspond à la fréquence centrale du transducteur ultrasonore. Le coefficient de réflexion R de l'interface langue-aliment est ensuite déduit à partir du ratio entre l'amplitude A_0 de chaque signal et une amplitude $A_{0,ref}$ obtenue sur un signal de référence enregistré avant le dépôt de l'aliment sur la surface de la langue (cette amplitude correspond au cas d'une réflexion totale) :

$$R = \frac{A_0}{A_{0,ref}} \quad (6.2)$$

6.3 Résultats et discussions

6.3.1 Impact de la déformabilité de la langue sur le temps de vol dans l'aliment

L'utilisation de langues artificielles en PVA et la mesure du temps de vol dans l'aliment (ToF) permettent d'étudier l'impact de la rigidité de la langue sur la déformation réelle subie par le produit tout au long d'une compression. De façon indirecte, la mesure de ToF donne ainsi également accès à la déformation de la langue, reliée au champ de contraintes mécaniques auquel elle est soumise, et donc à la sollicitation des mécanorécepteurs responsables des perceptions de texture. Les Figures 6.2.a₁ et 6.2.a₂ permettent de comparer, pour les deux aliments de l'étude (respectivement Ge_7 et $Ag_{0.3}$), l'évolution du temps de vol de l'aliment ToF en fonction du déplacement z du mobile supérieur au cours d'une compression. La figure rassemble les données acquises pour trois langues moulées avec la même empreinte de rugosité : la langue non déformable en PVC (référence $D_{hard}R_2$) et les deux langues déformables en PVA variant en rigidité ($D_{relax}R_2$ et $D_{contr}R_2$).

Durant une compression, l'épaisseur de l'aliment (notée e) peut être déterminée à partir du temps de vol ToF et de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans l'aliment (notée c) :

$$e = \frac{1}{2} \cdot c \cdot ToF \quad (6.3)$$

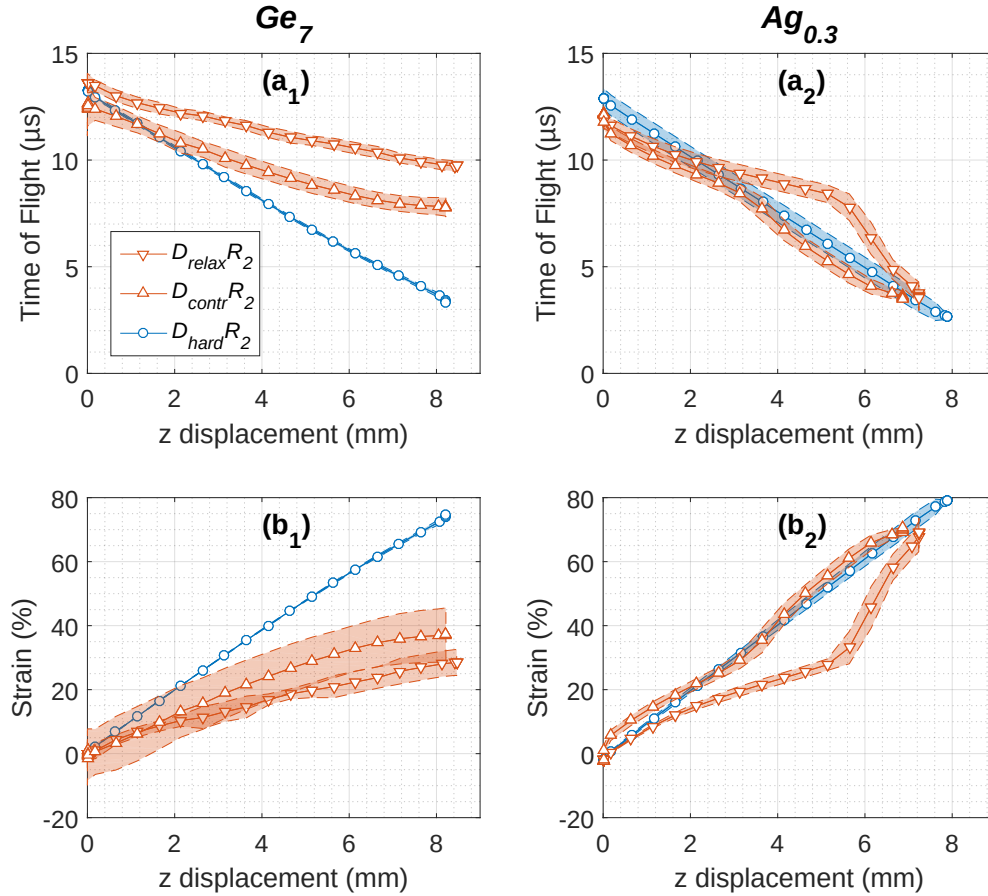


FIGURE 6.2 – Evolution du Temps de vol (*ToF*) en fonction du déplacement de la plaque d'aluminium (*z*) pour Ge_7 en a_1 et $Ag_{0.3}$ en a_2 . La déformation (*Strain*) calculée à partir du *ToF* est tracée en fonction de *z* pour Ge_7 en b_1 et $Ag_{0.3}$ en b_2 . Les valeurs moyennes et écarts-types obtenues pour $D_{hard}R_2$ (● bleu), pour le $D_{contr}R_2$ (▼ rouge) et pour le $D_{relax}R_2$ (▲ rouge) sont tracées pour chaque graphique.

Si l'on fait l'hypothèse que la vitesse ultrasonore dans l'aliment varie de façon négligeable au cours d'un essai de compression, alors la mesure des variations du temps de vol suffit pour recalculer l'épaisseur de l'échantillon alimentaire (et donc le taux de déformation auquel il est soumis) au cours d'un essai de compression.

Cependant, comme décrit dans l'état de l'art, la vitesse *c* de propagation des ondes ultrasonores dépend de plusieurs propriétés qui *a priori* sont susceptibles d'évoluer au cours de la compression de l'aliment, comme le module d'élasticité Isostatique *K*, le module de cisaillement *G*, ou encore la masse volumique ρ . Hugues and Kelly (1958) ont par exemple pu montrer, sur des matériaux rigides comme le polystyrène ou le pyrex, que les vitesses des ondes de compression et de cisaillement formaient de bons marqueurs de l'évolution des modules *K* et *G* au cours d'une compression uni-axiale. Cependant, pour des systèmes semi solides comme les gels d'agar et de gélatine, les résultats du chapitre 3 et de la littérature (Emery et al., 1986; Parker and Povey, 2012) s'accordent sur le fait que la vitesse ultrasonore d'une onde longitudinale est peu dépendante du module de cisaillement *G* et de ses variations. De plus, les contraintes exercées au cours des essais de compression des aliments étant négligeables devant le module d'élasticité isostatique (environ 2.25

GPa), les variations de K et ρ peuvent être considérées comme négligeables). Les figures 6.2.a₁ et 6.2.a₂ représentent, pour deux échantillons (respectivement Ge_7 et $Ag_{0.3}$), l'évolution du temps de vol ToF de l'onde ultrasonore dans l'aliment en fonction du déplacement du mobile supérieur (qui joue le rôle du palais), et ce pour les trois références de langues biomimétiques étudiées. Dans le cas de la langue rigide $D_{hard}R_2$, seul l'aliment est déformé et le ToF évolue de manière quasi-linéaire pour les deux produits. Ces observations valident donc les hypothèses formulées précédemment, indiquant que les variations de ToF au sein des échantillons dépendent exclusivement des variations de l'épaisseur de l'échantillon. En considérant la vitesse ultrasonore constante, il est ainsi possible de déduire en fonction du temps le taux de déformation de l'aliment ($\epsilon = (e_0 - e)/e_0$) uniquement à partir des mesures de temps de vol :

$$\epsilon = 100 \cdot \frac{ToF_0 - ToF}{ToF_0} \quad (6.4)$$

Les Figures 6.2.b₁ et 6.2.b₂ permettent ainsi de comparer respectivement pour Ge_7 et $Ag_{0.3}$ l'évolution du taux de déformation de l'aliment en fonction du déplacement du palais au cours de la compression. Dans le cas des langues déformables en PVA ($D_{relax}R_2$ et $D_{contr}R_2$), on observe une décroissance non linéaire du ToF , qui traduit la déformation réelle subie par l'aliment au cours d'un essai de compression.

Le déplacement du mobile induit alors à la fois une déformation du produit et de la langue. Pour un déplacement identique du mobile, la déformation du produit est donc moins importante avec une langue en PVA qu'avec une langue en PVC. De plus, l'augmentation de la rigidité de la langue (entre $D_{relax}R_2$ et $D_{contr}R_2$) implique une déformation plus importante de l'aliment, et donc moins marquée pour la langue. Par conséquent, le produit Ge_7 subit une déformation finale plus importante pour la langue $D_{contr}R_2$ (ToF plus faible) que pour la langue $D_{relax}R_2$ (ToF plus important). Dans le cas du gel $Ag_{0.3}$ comprimé sur les langues déformables $D_{relax}R_2$ et $D_{contr}R_2$, l'évolution du ToF en fonction du déplacement du mobile est non linéaire et comporte un point d'inflexion (diminution soudaine du ToF respectivement à 5.5 et 3.5 mm). A la différence de la gélatine, le gel d'agar $Ag_{0.3}$ est un produit cassant et ayant un module de Young plus faible que ceux des langues en PVA ($4.2 \pm 3.2 \text{ kPa}$) (Mantelet et al., 2018b,c). Par conséquent, le déplacement de la plaque induit une plus grande déformation pour le gel $Ag_{0.3}$ que pour le gel Ge_7 . Par ailleurs, la chute soudaine du ToF observée sur les courbes rouges correspond à la fracture des produits. Ainsi, au cours de la compression du produit, la langue de PVA est comprimée en même temps que le produit jusqu'à ce que le produit se fracture. Après cet évènement, la langue en PVA se relaxe et la surface de la langue en PVA se rapproche de la surface de la plaque en aluminium engendrant une diminution du ToF .

Les courbes de la Figure 6.3 représentent l'évolution de la force en fonction de la déformation des gels Ge_7 (Figure 6.3.a) et $Ag_{0.3}$ (Figure 6.3.b) pour différentes raideurs de langue : $D_{relax}R_2$, $D_{contr}R_2$, et $D_{hard}R_2$. Pour mieux comprendre le comportement mécanique du système langue-aliment, une représentation possible est de l'assimiler à un système de deux ressorts en série représentant respectivement la langue et l'aliment. Chaque ressort est caractérisé par une raideur (k_A pour l'aliment, k_L pour la langue) reliée au module de Young, ainsi que par une elongation (Δz_A pour l'aliment, Δz_L pour la langue) dont la

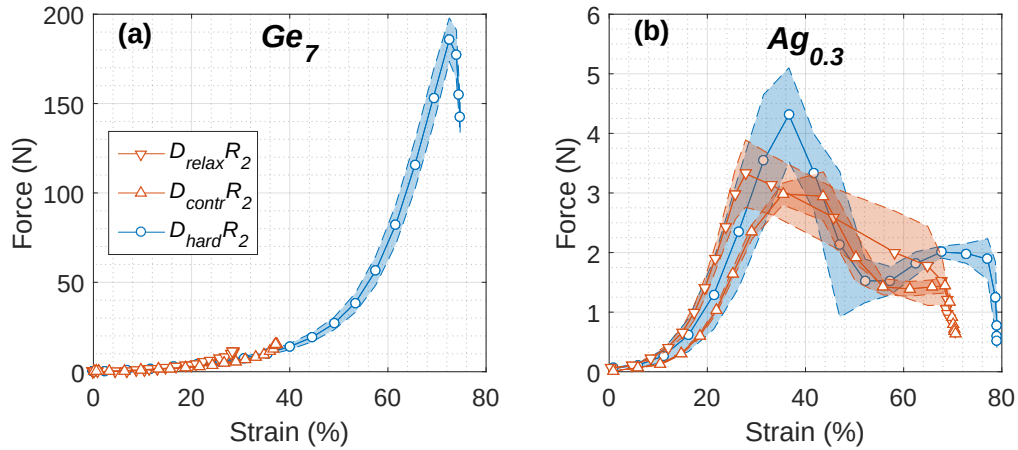


FIGURE 6.3 – Force appliquée sur le produit en fonction de la déformation du produit pour les gels Ge_7 et $Ag_{0.3}$ en a et b respectivement. Les valeurs moyennes et écarts-types obtenues pour $D_{hard}R_2$ (● bleu), pour le $D_{relax}R_2$ (▼ rouge) et pour le ($D_{contr}R_2$ rouge) sont tracées pour chaque graphique

valeur, négative dans le cas d'une compression, est liée au taux de déformation de chacun des milieux. La force F appliquée lors de la compression du système est alors égale à la force appliquée sur chacun des deux ressorts. Elle peut ainsi s'écrire :

$$F = k_A \cdot \Delta z_A = k_L \cdot \Delta z_L \quad (6.5)$$

Pour une force appliquée donnée, la déformation subie par le gel n'est donc pas impactée par la raideur de la langue. Il est alors cohérent d'observer, pour le gel Ge_7 comme pour le gel $Ag_{0.3}$, des courbes relativement confondues pour l'évolution de la force F aux faibles niveaux de déformation de l'aliment (voir Figure 6.3).

Cependant, l'évolution de la force en fonction du taux de déformation de l'aliment n'est pas linéaire. En effet, le modèle n'est valable qu'aux petites déformations, dans le domaine d'élasticité linéaire. Au-delà, l'augmentation de la pente des courbes traduit un accroissement progressif de la rigidité de l'aliment. Il faut alors considérer une raideur k_A qui augmente au cours de la compression, jusqu'à atteindre le point de rupture dans le cas du gel $Ag_{0.3}$.

En l'absence de rupture (ce qui est le cas pour le gel Ge_7), on constate que plus la raideur de la langue est importante, plus le taux de déformation final subie par l'aliment est important à l'issue de la séquence de compression. La représentation sous forme de ressorts en série peut aider à comprendre ce mécanisme. Le système peut alors être assimilé à un ressort unique, qui relie la force F à l'allongement global $\Delta z = \Delta z_A + \Delta z_L$ par une raideur équivalente, donnée par la relation :

$$F = \frac{k_A \cdot k_L}{k_A + k_L} \cdot \Delta z \quad (6.6)$$

Il est alors possible de relier l'allongement de l'aliment (lié à son taux de déformation) à l'allongement global du système (lié quant à lui au déplacement imposé lors de la compression) selon la relation suivante :

$$\Delta z_A = \left(1 - \frac{k_A}{k_A + k_L}\right) \cdot \Delta z \quad (6.7)$$

L'Equation 6.7 montre ainsi que l'allongement de l'aliment (et donc son taux de déformation) est ainsi une fonction croissante de la raideur de la langue (liée à sa raideur). Ainsi, pour un aliment donné, il est cohérent de constater à la fin de la compression ($\Delta z = 8 \text{ mm}$) que plus la langue est rigide (module d'Young élevé), plus le taux de déformation de l'aliment est important (respectivement 29, 35 et 75 % respectivement observés pour les langues $D_{relax}R_2$, $D_{contr}R_2$, et $D_{hard}R_2$).

Ces résultats sont en accord avec les observations faites dans la littérature sur un système similaire s'intéressant à la compression uni-axiale de gel d'agar sur une langue en silicone (10 mm.s^{-1} à 50% de déformation totale) (gel d'agar)(Ishihara et al., 2013). Le taux de déformation de l'aliment et de la langue a alors été mesuré grâce à un système de caméras. L'augmentation de la rigidité de la langue a alors également impliqué une augmentation du taux de déformation du produit. L'originalité de la méthode ultrasonore est qu'elle permet de caractériser de façon non-invasive et non-destructive le taux de déformation des différents milieux, sans les contraintes d'accessibilité visuelle inhérentes à un système de caméras. La mesure du temps de vol dans l'aliment (mais également dans la langue) ouvre ainsi des perspectives intéressantes quant à la compréhension des mécanismes de déconstruction de l'aliment entre la langue et le palais.

6.3.2 Sensibilité de la réflectivité ultrasonore à la rigidité de la langue

Les résultats des deux chapitres précédents ont permis de montrer, dans le cas d'une langue non déformable, que les propriétés de la langue (rugosité, lubrification) et de l'aliment (rigidité, mouillabilité, adhésion) ont un impact (i) sur le coefficient de réflexion ultrasonore à l'interface langue-aliment, et (ii) sur son évolution au cours d'une compression. Ces résultats en font donc un candidat à fort potentiel pour décrire les mécanismes physiques se produisant à l'interface langue-aliment. L'étude réalisée dans ce chapitre doit maintenant permettre de confirmer ou d'infirmer ce potentiel en prenant en compte la déformabilité de la langue, qui constituait l'une des simplifications majeures des modèles de langues jusqu'alors étudiés.

Les variations du coefficient de réflexion ultrasonore R de l'interface langue-aliment ont été tracées en Figure 6.4.a₁ et 6.4.a₂ en fonction du taux de déformation de l'aliment ϵ (issu des mesures de temps de vol décrites ci-dessus) pour les trois mêmes langues que dans la section précédente ($D_{relax}R_2$, $D_{contr}R_2$ et $D_{hard}R_2$). Ces trois langues varient en rigidité ($D_{relax}R_2$ et $D_{contr}R_2$ par le nombre de cycles de congélation/décongélation du PVA, et $D_{hard}R_2$ par le caractère non déformable du PVC) et ont été toutes trois moulées à partir de la même empreinte de rugosité. Néanmoins, nous insistons sur le fait que les résultats de profilométrie ont permis d'établir que leurs profils de rugosité sont différents.

Les résultats des deux chapitres précédents ont permis de montrer que le coefficient de réflexion (R) lié à l'écho E_0 (interface langue-aliment) dépend fortement de la nature des milieux en contact avec les aspérités du profil rugueux de la surface de la langue. La surface de la langue est ainsi recouverte soit par le gel alimentaire, soit par de l'air,

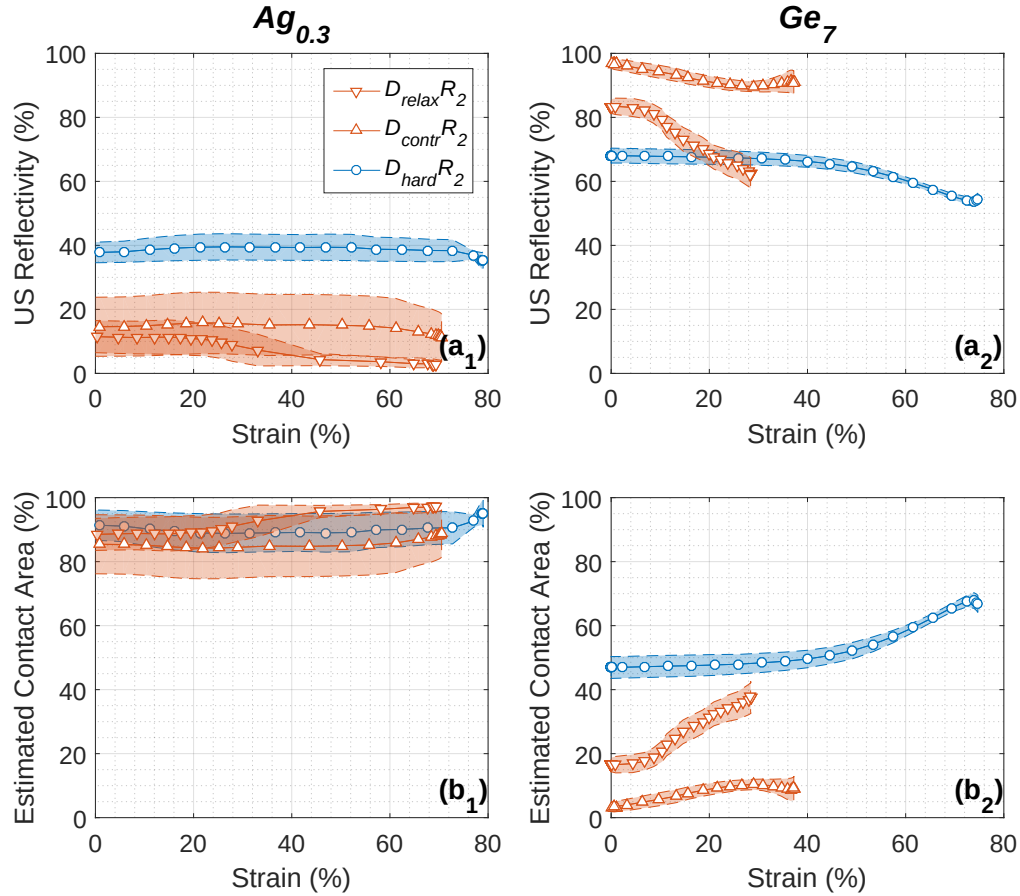


FIGURE 6.4 – Tracé de la réflectivité US (US reflectivity) en fonction de la déformation des gels respectivement $Ag_{0.3}$ et Ge_7 en a_1 et a_2 . La surface de contact estimée par la réflectivité US en fonction de la déformation des produits est représentée pour les gels $Ag_{0.3}$ et Ge_7 respectivement en b_1 et b_2 . Les valeurs moyennes ainsi que les écarts-types obtenus pour $D_{hard} R_2$ (● bleu), pour $D_{relax} R_2$ (▼ rouge) et pour $D_{contr} R_2$ (▲ rouge) sont tracés pour chaque graphique

soit plus vraisemblablement par un mélange des deux (bulles d'air piégées entre la langue et l'aliment). Dans le cas d'une langue en contact uniforme avec de l'air, le coefficient de réflexion de l'interface langue-air (noté R_{Air}) est de 100%, et ce de la même façon si la langue est composée de PVA ou de PVC. En effet, le coefficient de réflexion ultrasonore à l'interface entre deux milieux dépend de l'écart d'impédance acoustique entre les milieux en question (produit de la vitesse de l'onde ultrasonore et de la densité). Or, l'impédance de l'air est négligeable devant celle du PVA et du PVC : on parle alors de réflexion totale. À l'inverse, le coefficient de réflexion d'une surface de langue complètement tapissée par un gel alimentaire (noté R_{Gel}) pourra varier entre 2 et 35%, selon les impédances acoustiques de la langue (PVA ou PVC) et de l'aliment modèle. Dans le cas où la surface de la langue est recouverte avec un mélange gel/air (et en négligeant les phénomènes de diffraction et d'interférences des ondes à l'interface langue/aliment), le coefficient de réflexion R peut alors s'écrire :

$$R = \Phi \cdot R_{Gel} + (1 - \Phi) \cdot R_{Air} \quad (6.8)$$

où Φ correspond à la proportion de la surface de la langue en contact intime avec le gel alimentaire. Il est alors possible, à partir de la mesure du coefficient R , de décrire l'évolution

du taux de surface de contact Φ entre la surface de la langue et l'aliment tout au long de la compression (voir Figures 6.4.b₁ et 6.4.b₂ respectivement pour les gels $Ag_{0.3}$ et Ge_7).

Dans le cas du gel $Ag_{0.3}$, on note des profils similaires d'évolution du taux de surface de contact langue/aliment Φ pour les trois types de langue utilisés. Supérieur à 80% dès la mise en place de l'échantillon, ce taux varie peu par la suite au cours de la compression. Ces résultats mettent ainsi en évidence la capacité à promouvoir son couplage avec la surface de la langue, sans nécessité d'appliquer une sollicitation mécanique. Plusieurs caractéristiques du gel peuvent contribuer à expliquer ce mécanisme. Tout d'abord, le gel $Ag_{0.3}$ présente des propriétés de raideur et d'adhésivité qui favorisent conjointement sa capacité à se déformer pour épouser les aspérités de la surface de la langue. Par ailleurs, la structure des gels d'agar est connue pour sa synérèse (relargage d'eau) (Boral et al., 2010), due à son instabilité mécanique (Banerjee and Bhattacharya, 2011). L'eau et le gel ayant des impédances acoustiques très proches, l'eau relarguée par le gel est susceptible de mouiller les surfaces de la langue et de l'aliment, et ainsi agir en qualité de couplant acoustique. Les propriétés intrinsèques de ce type de gel permettent donc de mieux comprendre les hauts niveaux de couplages rencontrés avant même le début de la compression.

Pour le gel Ge_7 , le taux de surface de contact entre la langue et le produit varie différemment selon le type de langue utilisé. La valeur initiale et l'évolution de Φ semblent donc, pour ce gel, dépendre de la déformabilité de la langue. On peut constater que pour les trois langues, la surface de contact augmente avec la pression appliquée sur le produit mais en aucun cas le contact est établi à 100%. Cependant, on observe que l'évolution de la surface de contact est plus rapide pour la langue $D_{relax}R_2$ (20% d'augmentation pour 30% de déformation du produit) que pour la langue $D_{hard}R_2$ (augmentation de 20% pour 80% de déformation du produit). L'amélioration du couplage semble ainsi plus aisée pour une langue déformable. Néanmoins, la déformabilité de la langue ne semble pas être le seul facteur influençant le taux de surface de contact. En effet, à l'état initial le taux de surface de contact ne se classe pas en fonction de la rigidité de la langue et, de manière surprenante, il s'agit de la langue $D_{hard}R_2$ en PVC qui présente le plus haut taux de surface de contact. La mouillabilité du PVC est différente de celle du PVA et l'adhésion entre le produit et la langue pourrait être modifier pouvant entrainer un taux de surface de contact différent. De plus, bien que le même type de papier abrasif ait été utilisé pour former la surface des trois langues, leurs paramètres de surfaces ne sont pas similaires. De ce fait, l'état de surface peut aussi ici jouer un rôle sur le taux de contact initial. Le protocole de fabrication des langues serait donc à améliorer afin de conclure sur l'effet de la déformabilité, de l'état de surface et de la mouillabilité.

Les résultats décrits plus haut ont permis de mettre en lumière, selon les cas, des phénomènes de compétition ou de synergie entre la rigidité et la rugosité de la langue pour expliquer les variations du coefficient de réflexion de l'interface langue-aliment au cours d'une compression. Afin de mieux comprendre le rôle de la rugosité de la langue indépendamment de sa rigidité, la Figure 6.5 présente les variations du taux de surface de contact entre la langue et l'aliment (Φ) en fonction du taux de déformation de l'aliment (ϵ), relevées pour le gel Ge_7 lors de la compression par deux types de langues en PVA ayant une rigidité similaire (D_{relax}) mais avec un état de surface différent (R_1 et R_2).

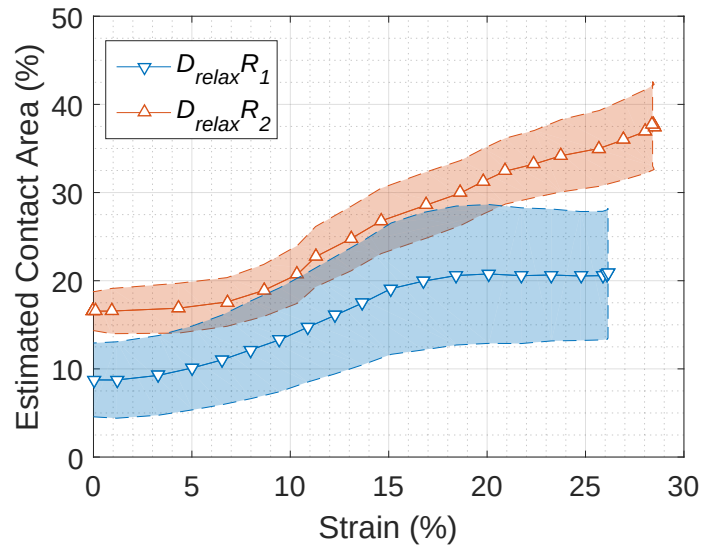


FIGURE 6.5 – Surface de contact estimée avec la réflectivité US en fonction de la déformation de Ge_7 . Les valeurs moyennes ainsi que les écarts types sont tracés pour le produit Ge_7 et pour $D_{relax}R_2$ (▼ bleu) et pour $D_{relax}R_1$ (▲ rouge).

Pour les deux types de langue, on observe une augmentation de l'aire de contact au cours de la compression de l'aliment. Cependant, des comportements distincts sont observés pour les deux types de langues. Ainsi, la langue $D_{relax}R_2$ permet un meilleur couplage avec l'aliment que la langue $D_{relax}R_1$, avec des valeurs de Φ plus importantes tout au long de la compression.

A la mise en contact du produit avec la langue, nous avons pu établir dans le chapitre 4 que dans le cas d'une langue non déformable, l'augmentation de la hauteur moyenne des aspérités (Ra) induit une diminution de la surface de contact, alors qu'inversement, une hausse de la longueur de corrélation β (liée à l'étirement de profil) induit quant à elle une augmentation de la surface de contact (Mantelet et al., 2018c). Dans le cas présent, la langue de type $D_{relax}R_2$ se distingue par des valeurs de Ra et β plus importantes. Les résultats semblent ainsi laisser indiquer le rôle prédominant de la longueur de corrélation par rapport à la hauteur des aspérités pour promouvoir le couplage à l'interface langue-aliment. La longueur de corrélation étant liée à l'étirement du profil, plus cette dernière est importante, plus le profil de surface est lissé, et moins il est nécessaire d'appliquer un effort important pour déformer l'aliment et adapter le couplage acoustique.

6.4 Conclusion

L'objectif de ce chapitre de thèse est de montrer l'applicabilité de la méthode ultrasonore sur un modèle *in vitro* prenant en compte la déformabilité de la langue.

Deux paramètres ultrasonores pertinents ont pu être identifiés : le temps de vol dans l'aliment et le coefficient de réflexion de l'interface langue-aliment. La mesure de temps de vol dans l'aliment apporte de nouvelles perspectives dans le développement de l'outil. En effet, les résultats du chapitre 3 ont permis de montrer que des propriétés comme la vitesse de propagation des ondes ultrasonores ne permettent pas la caractérisation des

modules de Young et de cisaillement au sein de l'aliment. Or, l'évolution de ces propriétés au cours du processus oral ouvrirait des perspectives intéressantes pour la compréhension des mécanismes de perception de texture. La mesure du temps de vol dans l'aliment rouvre l'intérêt de l'approche, dans la mesure où elle permet d'avoir accès, en temps réel, à l'état de déformation des différents milieux, qui reflète les propriétés élastiques de la langue et de l'aliment. En outre, les mesures de temps de vol ne sont pas confinées à l'étude des déformations dans le domaine élastique, puisqu'elles ont également permis de détecter les points de fracture et les phénomènes de relaxation associés.

Par ailleurs, les chapitres précédents avaient déjà mis en avant le potentiel du coefficient de réflexion ultrasonore à l'interface langue-aliment pour décrire les interactions entre les propriétés de la langue et celles de l'aliment. Les résultats présentés ici avec les langues de PVA permettent de conforter ce potentiel. En effet, comme argumenté précédemment, le caractère non déformable des matériaux utilisés jusqu'à présent constituait une limitation majeure du modèle par rapport aux propriétés physiologiques de la langue. L'utilisation de gels de PVA, dont l'impédance acoustique est proche de celle de la langue, a permis de lever certains doutes. S'il n'y avait aucun doute quant au caractère échogène d'une interface PVC/aliment en raison d'une différence notable d'impédance acoustique entre les deux milieux, les gels de PVA et d'agar/gélatine ont pour leur part des impédances acoustiques très proches (qui impliquent une réflectivité très faible dans le cas d'un contact « parfait »). Les expériences décrites dans ce chapitre ont permis de se rassurer quant au rapport signal/bruit de l'écho E_0 , et de faire la preuve de la robustesse des méthodes de traitement du signal mises en œuvre pour le caractériser. La caractérisation indirecte du taux de surface de contact effective entre la langue et l'aliment est intéressante d'une part pour comprendre la transmission des efforts mécaniques qui conduisent à la libération de stimuli de perceptions de texture, mais également car elle gouverne les surfaces d'échanges qui permettent la diffusion des composés sapides vers les récepteurs du goût.

Les perspectives de cette étude seront de mettre au point des modèles de langues déformables qui permettent de distinguer clairement les contributions de la rugosité et de la raideur, mais également de considérer la lubrification de la langue, dont on a pu voir des chapitres 4 et 5 qu'elle jouait un rôle important dans la réponse ultrasonore. Les expériences de faisabilité conduites ici sur un nombre restreint d'aliments modèles pourront ainsi être étendues à une gamme plus large d'échantillons, similairement aux approches décrites dans les chapitres 4 et 5.

Ce chapitre conclut la part de ce travail de thèse consacrée au développement instrumental de la méthode ultrasonore sur le système biomimétique. Les travaux réalisés ont permis de mettre en évidence des paramètres d'intérêt pour étudier l'interaction entre l'aliment et la muqueuse de la langue au cours d'une compression. Le travail à suivre consiste à tenter de mettre en lien ces propriétés avec la réponse sensorielle des produits.

Principaux messages à retenir :

- La prise en compte de la déformabilité de la langue a d'abord permis de conforter, dans une configuration plus représentative de la physiologie orale, le potentiel de la réflectivité ultrasonore pour suivre l'évolution du contact intime entre la langue et l'aliment au cours d'une compression.
- Un indicateur relatif au temps de vol de l'onde ultrasonore dans l'aliment a été développé. Il permet de décrire en temps réel l'impact d'un mouvement de compression sur l'évolution des taux de déformation subis par la langue et l'aliment, à mettre en lien avec la rigidité de l'aliment, mais également sa contrainte et sa déformation à la rupture.

Afin de valider l'intérêt des développements méthodologiques réalisés au cours de la thèse, le chapitre 7 décrit l'étude des **liens entre les perceptions sensorielles, et notamment la texture, et la réflectivité ultrasonore de l'interface langue-aliment** (figure 6.6).

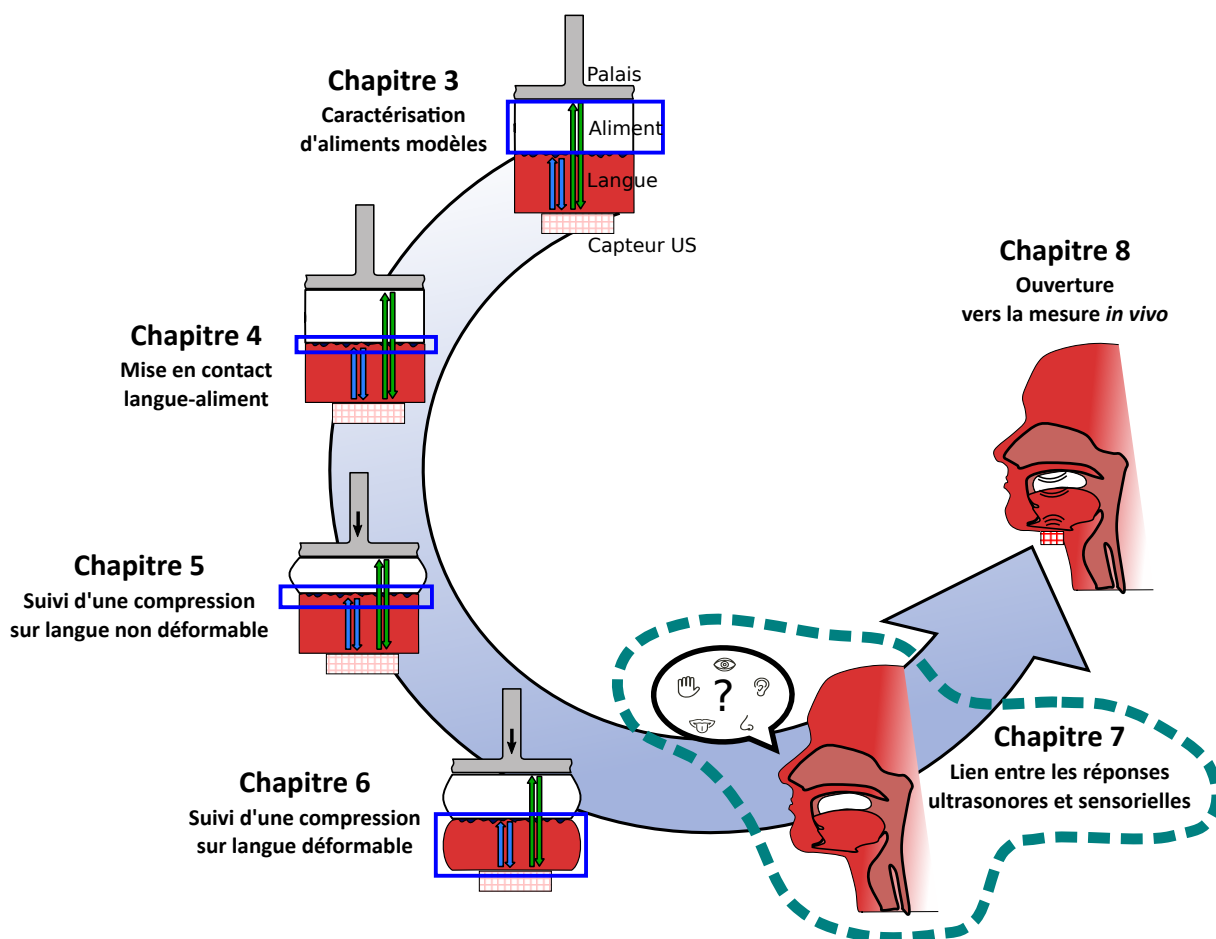


FIGURE 6.6 – Stratégie expérimentale de la thèse

Chapitre 7

Caractérisations sensorielles de la texture des produits et liens avec les propriétés UltraSonores : La réflectivité UltraSonore peut-elle être reliée aux perceptions de texture des produits ?

Sommaire

7.1 Introduction	141
7.2 Matériels et méthodes	142
7.2.1 Fabrication et conditionnement des produits	142
7.2.1.1 Composition des produits	142
7.2.1.2 Fabrication des produits	142
7.2.2 Analyses sensorielles	143
7.2.2.1 Le panel	143
7.2.2.2 L'entraînement du panel	143
7.2.2.3 Dominance Temporelle des Sensation : DTS	143
7.2.2.4 Dominance Temporelle des Mouvements : DTM	144
7.2.2.5 Profil Sensoriel de Texture	144
7.2.3 Analyses statistiques	146
7.3 Résultats et discussions	147
7.3.1 Mécanismes dominants et perceptions associées au cours de la consommation des produits DTM et DTS	147
7.3.2 Caractérisation sensorielles des produits : profils de texture	151
7.3.2.1 Propriétés des gels à la mise en bouche	151
7.3.2.1.1 Effet Produit	151
7.3.2.1.2 Effet produit et effet lubrification de la langue	153
7.3.2.2 Propriétés des gels après une compression langue/palais	155

7.3.2.2.1	Effet produit	155
7.3.2.2.2	Effet produit et effet lubrification de la langue	157
7.3.3	Effet du temps lors du processus oral sur les intensités de texture	159
7.3.4	Confrontation des données sensorielles à la réflectivité US à l'interface PVC/produit	159
7.3.4.1	Confrontation entre les attributs de texture évalués à la mise en bouche et la réflectivité US	161
7.3.4.2	Corrélation entre les perceptions de textures après une compres- sion langue/palais et la réflectivité US	161
7.4	Conclusion	164

7.1 Introduction

Les chapitres précédents ont mis en évidence la sensibilité des ultrasons (US) aux interfaces entre la langue et l'aliment dans un système en conditions *in vitro*. Ces résultats ont montré que la réflectivité US était influencée par des paramètres physiologiques de la langue tels que la rugosité, la lubrification, ou la déformabilité et par des propriétés mécaniques et de surface des aliments. Les aliments modèles sélectionnés pour ce travail ont été inspirés de ceux étudiés par (Devezeaux de Lavergne et al., 2015b) qui présentaient un large spectre de structures et de textures. Afin de pouvoir découpler certains mécanismes et dans un souci de simplification, nous avons adapté la composition de ces aliments modèles pour notre étude (suppression de la phase d'huile en particulier), ce qui a entraîné des modifications de structure et par conséquent des modifications de texture. L'objectif de cette partie est de mettre en lien les propriétés ultra-sonores de ces gels avec leurs propriétés sensorielles. Pour cela, il a été nécessaire de caractériser à la fois les perceptions de texture mais aussi les mouvements du processus oral impliqués lors de la consommation et associés aux perceptions.

Cette partie de la thèse a donc pour objectifs d'identifier et de quantifier (i) les mécanismes prédominant en bouche lors de la consommation des gels préalablement développés et de comprendre leur impact sur l'évolution des perceptions dominantes de texture, (ii) les intensités de ces perceptions de textures au cours des différentes séquences du processus oral et enfin (iii) d'étudier les liens potentiels entre la réflectivité US et les perceptions de textures.

Pour cela, en collaboration avec Anne Saint-Eve (Enseignant-Chercheur spécialiste d'analyse sensorielle au sein de l'équipe ADP, de l'UMR GMPA), j'ai pu contribuer au développement d'une méthode sensorielle originale visant à décrire les séquences des mouvements en bouche mis en œuvre lors de la consommation de différents gels (DTM – Dominance Temporelle des Mouvements) (Saint-Eve et al., 2018). Ces séquences de mouvements ont été mises en relation avec les séquences de perceptions (DTS – Dominance Temporelle des Sensations) pour comprendre quels mouvements contribuent à quelles sensations de texture.

Les méthodes DTM et DTS sont basées sur des fréquences temporelles de mouvements et de sensations, et elles permettent de recueillir des informations d'ordre qualitatif, ne pouvant pas directement être corrélés aux résultats US. C'est pourquoi, un profil de texture a été réalisé dans un deuxième temps afin d'évaluer les intensités des descripteurs de textures par un panel de juges entraînés. Pour cela, un protocole de consommation contrôlé a été conçu, basé sur le protocole de compression *in vitro*, afin de faire un focus sur les perceptions associées à la compression de l'aliment entre langue et palais, et de pouvoir confronter les intensités de textures et les résultats US selon une transformation mécanique similaire. Différents produits et conditions de consommation ont été étudiés permettant ainsi de mieux comprendre l'impact de la composition des produits ainsi que celui de l'enduction de la langue par de la salive (condition normale de consommation et après élimination mécanique de la salive) sur l'origine physique de certaines perceptions. Les intensités des différents descripteurs de texture ont ensuite été confrontées aux mesures de réflectivité US

des aliments obtenues au contact (sans compression) d'une langue en PVC rugueuse en conditions lubrifiées et non lubrifiées.

7.2 Matériels et méthodes

7.2.1 Fabrication et conditionnement des produits

7.2.1.1 Composition des produits

Huit gels ont été étudiés dans cette étude. Leur composition est présentée dans le tableau 7.1 ainsi que leur module de Young.

7.2.1.2 Fabrication des produits

Les produits ont été fabriqués dans des conditions permettant de respecter les règles d'hygiène liées à leur consommation. Les matières premières ainsi que l'ensemble des matériels utilisés au contact des aliments étaient de grade alimentaire. Les matériels ont été stérilisés (autoclavage 120 °C, 20 min pour les flacons, spatules inox et joints en silicone) ou désinfectés (bain d'éthanol à 70% pendant 2h et séchage 20 minutes sous UV, pour les moules en polyéthylène) avant toute utilisation.

Les produits ont été moulés en cylindre de 10 mm de hauteur et de 15 mm de diamètre afin de permettre une mise en bouche des produits plus aisée pour les juges.

Un contrôle microbiologique par un laboratoire extérieur a été réalisé pour chaque produit et a permis de valider leur conformité sanitaire pour une consommation par le panel.

Les produits ont été démoulés juste avant de les faire évaluer par les juges et au maximum 16h après les avoir moulés dans les moules fermés. Les échantillons ont été présentés dans des coupelles fermées à usage unique annotées avec un code à 3 chiffres aléatoirement choisi.

TABLEAU 7.1 – Composition et module de Young des produits. Tous les produits contiennent 15% w/w de sucre. Le TWEEN 20 est utilisé comme émulsifiant.

Product	Water (wt%)	Agar (wt%)	Gelatin (wt%)	TWEEN 20 (wt%)	Young's modulus (kPa)
<i>Ag</i> _{0.3}	84.7	0.3	-	-	4.2±3.2
<i>Ag</i> _{1.8}	83.3	1.8	-	-	132.0±9.7
<i>Ge</i> _{3.5}	81.5	-	3.5	-	2.2±0.5
<i>Ge</i> ₇	78	-	7	-	24.0±2.2
<i>Ag</i> _{0.3} <i>Ge</i> _{3.5}	81.2	0.3	3.5	-	12.7±2.9
<i>Ag</i> _{0.7} <i>Ge</i> _{5.85}	78.45	0.7	5.85	-	32.1±7.3
<i>Ag</i> ₁ <i>Ge</i> _{0.75}	84.25	1	0.75	-	58.4±14.7
<i>Ge</i> ₇ <i>T</i>	77.25	-	7	1.5	17.2±1.8

7.2.2 Analyses sensorielles

7.2.2.1 Le panel

Un panel de 16 volontaires (11 femmes et 5 hommes) avec un âge moyen de 23 ans a été recruté pour cette étude. La moitié des membres du panel était membre du laboratoire et l'autre moitié était composé d'étudiants d'AgroParisTech. Ils ne présentaient aucune allergie alimentaire. Ils ont été informés du contexte général de l'étude et des conditions d'évaluations, et ont donné leurs libres consentements pour participer à cette étude. Ils ont été récompensés avec des chèques cadeaux à la fin de l'étude.

7.2.2.2 L'entraînement du panel

Un total de 5 séances d'entraînement a été réalisé. Trois séances d'une heure ont permis la génération, la sélection et la définition des descripteurs de texture. Ce travail a été réalisé sur des produits du commerce présentant un large spectre de perceptions de texture (Flanby, Babybel, Kiri, Gelée de groseilles). Il était demandé aux juges de ne se focaliser que sur les propriétés de texture et ceci indépendamment des perceptions de saveurs et d'arômes. Pour cela les produits choisis lors de l'entraînement étaient aussi bien des produits sucrés que salés et pouvaient présenter de grandes différences en termes d'arôme.

Après la sélection et la définition de chacun des descripteurs, les panelistes ont aussi été entraînés à l'utilisation du logiciel Fizz (Version 2.47A, Biosystemes, France) et à l'acquisition des données temporelles permettant d'enregistrer les perceptions ou mécanismes perçus au cours de la consommation.

Enfin, deux séances ont été dédiées à l'entraînement pour le profil sensoriel. Il s'agissait ici de valider les descripteurs à évaluer lors des différentes phases de consommation, afin de se rapprocher des conditions *in vitro* dans lesquelles ont été réalisées les mesures ultra-sonores. Les panélistes étaient invités à déposer le produit sur leur langue (phase 1) puis à réaliser une compression de l'aliment entre la langue et le palais (phase 2) puis enfin à consommer le produit librement. A chaque phase, une série de descripteurs a été sélectionnée et définie. Les juges ont été également entraînés à utiliser une échelle d'intensité permettant d'évaluer les attributs de texture de 0 (peu intense) à 10 (très intense).

Toutes les analyses sensorielles ont eu lieu dans une pièce climatisée à 20°C et ventilée dans des cabines individuelles sous une lumière blanche.

7.2.2.3 Dominance Temporelle des Sensation : DTS

La méthode de DTS permet d'évaluer au cours du temps l'évolution des dominances des sensations, depuis la mise en bouche et jusqu'à ce que plus aucune sensation ne soit perçue. Cette méthode a été appliquée sur les huit gels présentés sous forme de petits cylindres pouvant être consommés en une bouchée.

Les attributs de texture sélectionnés pour l'évaluation des produits sont présentés dans le Tableau 7.2.

Au moment du dépôt du produit sur leur langue, réalisé à l'aide d'une cuillère, les juges devaient lancer l'acquisition sur le logiciel à l'aide d'un bouton « start », puis consommer le

TABLEAU 7.2 – Définitions des descripteurs sensoriel utilisé en DTS

Descripteurs	Terms (EN)	Definitions
<i>Cassant</i>	<i>Brittle</i>	Se casse de façon nette en gros morceaux lorsqu'on l'écrase
<i>Friable</i>	<i>Crumbly</i>	Se casse en une multitude de petits morceaux lorsqu'on l'écrase
<i>Pâteux</i>	<i>Doughy</i>	Forme une pâte lorsqu'on l'écrase
<i>Elastique</i>	<i>Elastic</i>	Reprend sa forme initiale après sollicitation mécanique sans fracturation
<i>Collant</i>	<i>Sticky</i>	Colle aux dents et au palais
<i>Humide</i>	<i>Moist</i>	Sensation d'eau à la surface de la langue
<i>Sec</i>	<i>Dry</i>	Ne contient pas d'eau
<i>Glissant</i>	<i>Slippery</i>	Glisse sur la langue, s'échappe au moment de la compression
<i>Ferme</i>	<i>Firm</i>	Effort nécessaire pour déformer l'aliment
<i>Mou</i>	<i>Soft</i>	S'écrase très facilement après sollicitation mécanique
<i>Fondant</i>	<i>Melting</i>	Passe de l'état solide à liquide sous l'effet d'un réchauffement en bouche
<i>Granuleux</i>	<i>Grainy</i>	Forme un bol avec de petites particules
<i>Lisse</i>	<i>Smooth</i>	Forme un bol lisse et homogène
<i>J'ai avalé</i>		

plus naturellement possible le produit. Au cours de la consommation des produits, les juges étaient entraînés à sélectionner l'attribut (via un bouton) qui attire le plus leur attention. Un seul attribut peut être sélectionné à la fois. Les attributs étaient présentés sous forme de liste, dans un ordre défini aléatoirement et différent entre chaque panéliste. Les panélistes devaient également indiquer le moment de déglutition et la fin de l'acquisition en appuyant sur un bouton « stop ». Entre chaque échantillon les juges devaient se rincer la bouche avec de l'eau.

Les produits ont été évalués en DTS lors de quatre séances distinctes (8 produits, 2 répétitions).

7.2.2.4 Dominance Temporelle des Mouvements : DTM

La méthode DTM est basée sur le même principe que la méthode DTS, mais cette fois ci les panélistes sont invités à décrire les séquences des mouvements ou mécanismes qu'ils mettent en œuvre lors du processus oral.

Pour cela, un travail préalable réalisé en amont de l'étude par les membres de l'équipe, a permis de définir un ensemble de mécanismes (associés à des schémas et des définitions) qui ont été proposés aux panélistes. Sur la base de ce travail, le panel a pu ensuite collectivement simplifier, préciser et s'approprier la liste des mouvements, leur définition ainsi que le schéma associé à ces derniers.

Les attributs sélectionnés pour décrire les mécanismes du processus oral sont présentés dans le Tableau 7.3. Les descripteurs étaient également associés à des schémas présents sur l'écran, lors de l'acquisition. Le déroulement d'une acquisition DTM était identique à une acquisition DTS.

Les mêmes produits ont été évalués en DTS et DTM lors de quatre séances distinctes (8 produits, 2 répétitions).

7.2.2.5 Profil Sensoriel de Texture

Nous nous sommes attachés à évaluer les intensités des attributs de texture lors de deux principales phases du processus oral : à la mise en bouche et lors de la compression

TABLEAU 7.3 – Définitions et schémas correspondant aux descripteurs sensoriels utilisés en DTM

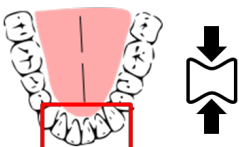
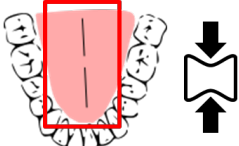
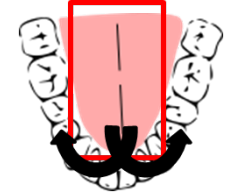
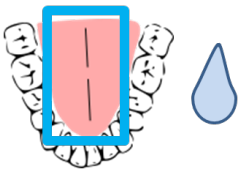
Descripteurs	Définitions	Schémas
Incisives	Je coupe avec les incisives	
Molaires	J'écrase avec les molaires	
Langue/palais	J'écrase entre la langue et le palais	
Joues	J'utilise les joues	
Je rassemble	Je rassemble avec la langue	
Salive	J'ajoute de la salive	
Je déglutis	Je déglutis	

TABLEAU 7.4 – Moment d'évaluation des attributs sensoriels du profil sensoriel. Les attributs ont été définis de la même manière que ceux du DTS.

Attributs	Bornes de l'échelle		Mis en bouche	Compression
Cassant	Friable	Cassant		Bouchée 2
Pâteux	Pas Pâteux	Très Pâteux		Bouchée 2
Elastique	Pas Elastique	Très Elastique	Bouchée 1	Bouchée 3
Glissant	Glissant	Collant	Bouchée 1	Bouchée 3
Humide	Sec	Humide		Bouchée 3
Ferme	Mou	Ferme		Bouchée 3
Fondant	Pas Fondant	Très Fondant		Bouchée 3
Tenue	Faible Tenue	Haute Tenue	Bouchée 1	

de l'aliment entre langue et palais. Le choix de ces deux phases s'est basé sur une volonté de se rapprocher des mesures ultrasonores réalisées sur le système *in vitro*. A chacune de ces phases du processus oral, les panelistes devaient évaluer des descripteurs de texture différents (Tableau 7.4). Seul les attributs « glissant », « humide » sont communs aux deux phases. Afin que la tâche ne soit pas trop complexe pour les panélistes et que le processus oral reste contrôlé mais représentatif de mécanismes « naturels », les descripteurs ont été évalués lors de trois bouchées. Pour chaque bouchée, les juges devaient réaliser l'ensemble des trois phases du processus oral (mise en bouche, compression langue-palais, puis protocole libre jusqu'à déglutition) mais ne devaient évaluer que de 2 à 3 descripteurs. Ainsi, une bouchée permettait d'évaluer à la mise en bouche, la perception d' « humide », de « glissant » et de « tenue du gel ». Une deuxième bouchée permettait d'évaluer après la compression de l'aliment entre langue et palais, les perceptions d' « humide », et de « glissant ». Et une troisième bouchée permettait d'évaluer après la compression de l'aliment entre langue et palais, les perceptions de « ferme », d' « élastique » et « fondant » (Tableau 7.4).

Enfin, pour quatre des huit produits, une condition supplémentaire lié à la physiologie des individus a été testée : les mêmes attributs ont été évalués en suivant le même protocole que décrit précédemment mais, les juges devaient assécher leurs langues avant chaque bouchée en appliquant sur celle-ci du papier absorbant (WattMan, Sigma-Aldrich, Saint-Quentin Fallavier, France). Ce protocole avait pour objectif de tester l'influence de l'absence de salive sur les perceptions de texture. Ainsi, pour les 4 produits $Ag_{0.3}$, $Ge_{3.5}$, Ge_7 et Ge_7T , deux conditions d'hydratation de la langue ont pu être comparées : l'état de la langue hydratée (état naturelle) et l'état de la langue asséchée.

7.2.3 Analyses statistiques

Les résultats DTS et DTM sont présentés sous forme de courbes de dominances pour l'ensemble du panel (fréquence de dominance) en fonction du temps standardisé (0 = mise en bouche et 100 = fin des perceptions) ; ces courbes ont été réalisées par le logiciel Matlab (The MathWorks, Natick, Massachusetts, Etats-Unis), d'après la méthode décrite par (Pineau et al., 2009).

Les données de profils ont été analysées en réalisant une analyse de variance (ANOVA), à 2 facteurs (juge, produit) pour étudier l'effet produit en condition langue hydratée sur 8

aliments, et à 3 facteurs (juge, produit et état de lubrification) en considérant les interactions pour étudier l'effet produit combiné à celui de l'hydratation de la langue sur 4 aliments. Dans le cas où la p-value de l'ANOVA était inférieure à 0.05, un test de comparaisons multiples (Newman-Keuls) a été réalisé. Ces deux analyses, exécutées à l'aide du logiciel R (R Core Team (2018), Vienne, Autriche), ont permis d'identifier les groupes de produits présentant des différences significatives selon les attributs et les conditions d'hydratation de la langue.

7.3 Résultats et discussions

7.3.1 Mécanismes dominants et perceptions associées au cours de la consommation des produits DTM et DTS

A partir des données DTS et DTM, nous avons souhaité identifier pour chacun des 8 produits les mécanismes prédominants lors du processus oral et comprendre plus spécifiquement à quelles perceptions étaient associées la compression de l'aliment entre la langue et le palais. Pour cela nous avons analysé dans un premier temps les données obtenues à partir de chacune des méthodes puis nous en avons proposé une analyse combinée.

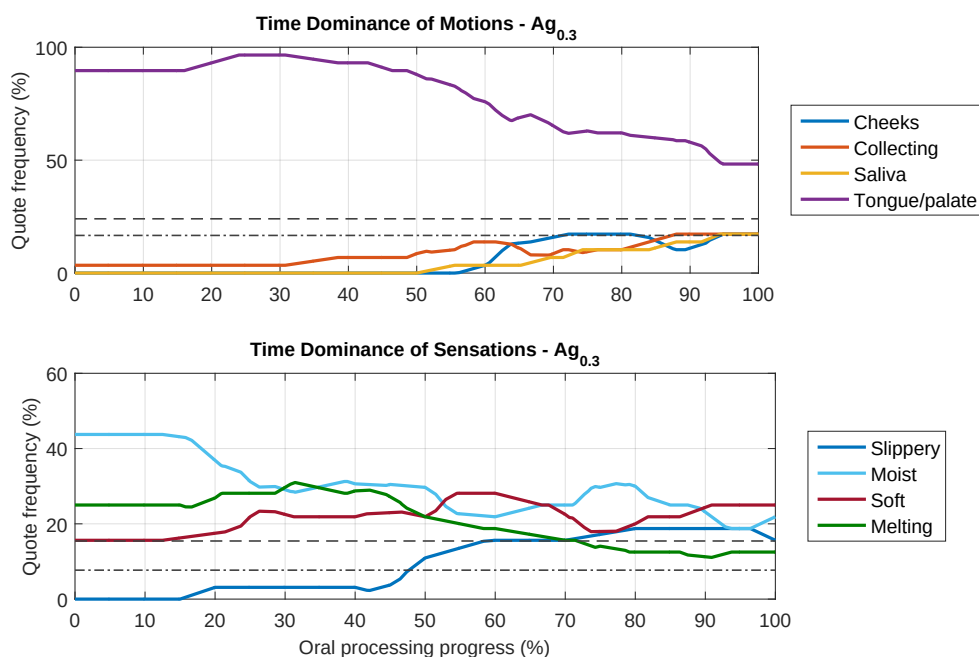


FIGURE 7.1 – Résultats des Time Dominance of Motion (DTM) en (a) et Time Dominance of Sensation (DTS) en (b) pour le produit $Ag_{0.3}$. La ligne de significativité est représentée par des tirets larges. Au-dessus de cette ligne la dominance des attributs est considérée comme significative. La ligne de chance est représentée par des tirets points et indique le niveau de dominance pouvant être atteint par hasard.

Deux exemples de résultats de DTS et de DTM sont présentés sur la Figure 7.1.a et Figure 7.1.b pour le produit $Ag_{0.3}$ et sur la Figure 7.2.a et Figure 7.2.b pour le produit Ge_7 . Ces courbes présentent les fréquences de citations de tous les descripteurs de mouvement (Figure 7.1.a et Figure 7.2.a) et de tous les descripteurs de texture (Figure 7.1.b et Figure 7.2.b) au cours d'une séquence de consommation d'une bouchée (exprimé en % du temps du pro-

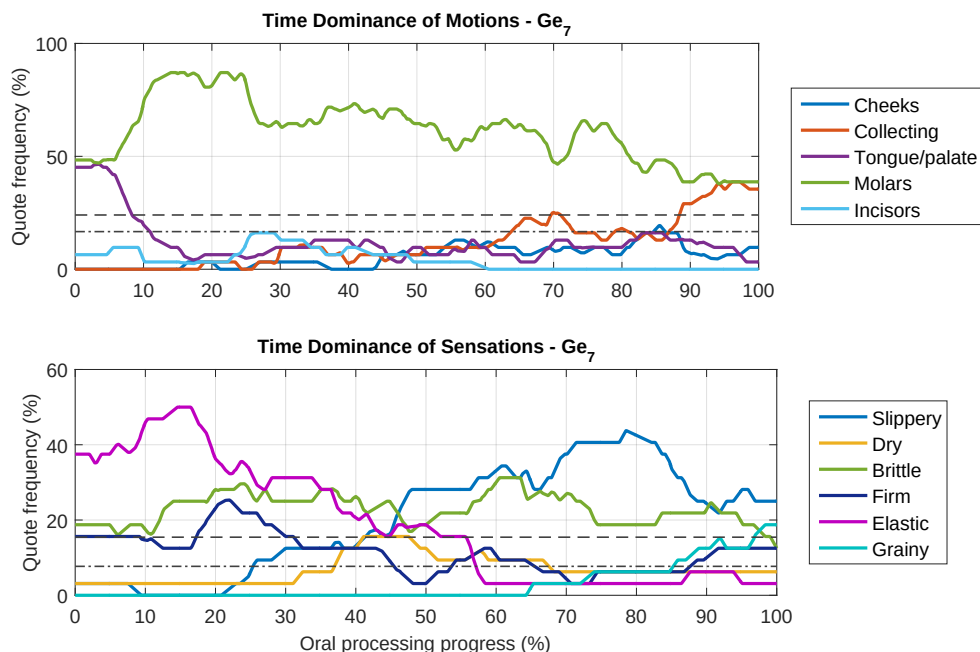


FIGURE 7.2 – Résultats des Time Dominance of Motion (DTM) en (a) et Time Dominance of Sensation (DTS) en (b) pour le produit Ge_7 . La ligne de significativité est représentée par des tirets larges. Au-dessus de cette ligne la dominance des attributs est considérée comme significative. La ligne de chance est représentée par des tirets points et indique le niveau de dominance pouvant être atteint par hasard.

cessus oral). Il s'agit de courbes moyennes obtenues à partir des données individuelles de l'ensemble du panel. Les temps ont été normalisés : 0% correspond à la mise en bouche et 100% au début de la déglutition. La courbe de significativité permet d'identifier les descripteurs dont la fréquence de citation est suffisante pour être considérée comme dominante. Les Figures 7.1 et 7.2 illustrent la grande diversité des mécanismes et des perceptions de texture mises en jeu pour ces deux produits. En effet, pour l' $Ag_{0.3}$, seul le descripteur de mouvement « langue-palais » est significativement cité au cours de la consommation, tout comme les attributs « fondant », « humide », et « mou » pour les descripteurs de texture. Pour le produit Ge_7 , ce sont les attributs « molaires » et « je rassemble » qui sont les plus fréquemment cités en début et en fin de processus oral. Les attributs de perceptions rapportés en début de séquence (« élastique », « cassant », « ferme ») comme les attributs de mouvement en fin de consommation (« je rassemble ») sont, eux aussi, différents de ceux observés pour le produit $Ag_{0.3}$. Ces deux produits montrent ainsi des mécanismes de consommations différents auxquels sont associés des perceptions de textures distinctes.

Afin de s'assurer qu'il était possible de mettre en lien les données DTS et DTM nous avons comparé les temps d'acquisition de chaque séquence de consommation d'une bouchée pour chacune des deux méthodes et pour chaque gel (figure 7.3). Un temps similaire est observé pour la durée des séquences de consommation bien que le temps d'évaluation semble systématiquement un peu plus court pour la méthode DTM que DTS. Par ailleurs, on observe une évolution du temps des séquences de consommation en fonction des produits qui est également très similaire d'une méthode à l'autre, indiquant une forte corrélation entre les temps d'acquisition des deux techniques. Si un temps différent de séquence avait

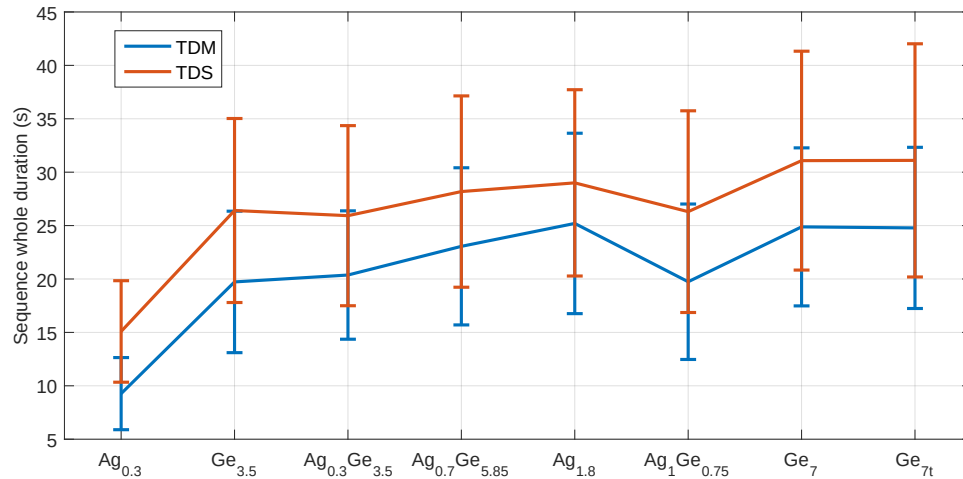


FIGURE 7.3 – Représentation de la durée totale moyenne de la séquence de consommation d'une bouchée (« Sequence whole duration », en seconde) pour chacun des produits testés en fonction de la méthode. Les temps résultant du DTS (TDS) sont affichés en rouge et ceux correspondant au DTM (TDM) le sont en bleu.

été observé, alors il serait difficile de relier les deux jeux de données car cela indiquerait que les juges ont adapté leur processus oral à la tâche (DTS ou DTM) qu'il leur était demandé. Les temps légèrement plus courts pour le DTM suggèrent que, pour les panélistes, l'évaluation des perceptions de textures est probablement une tâche plus complexe que celle des mouvements.

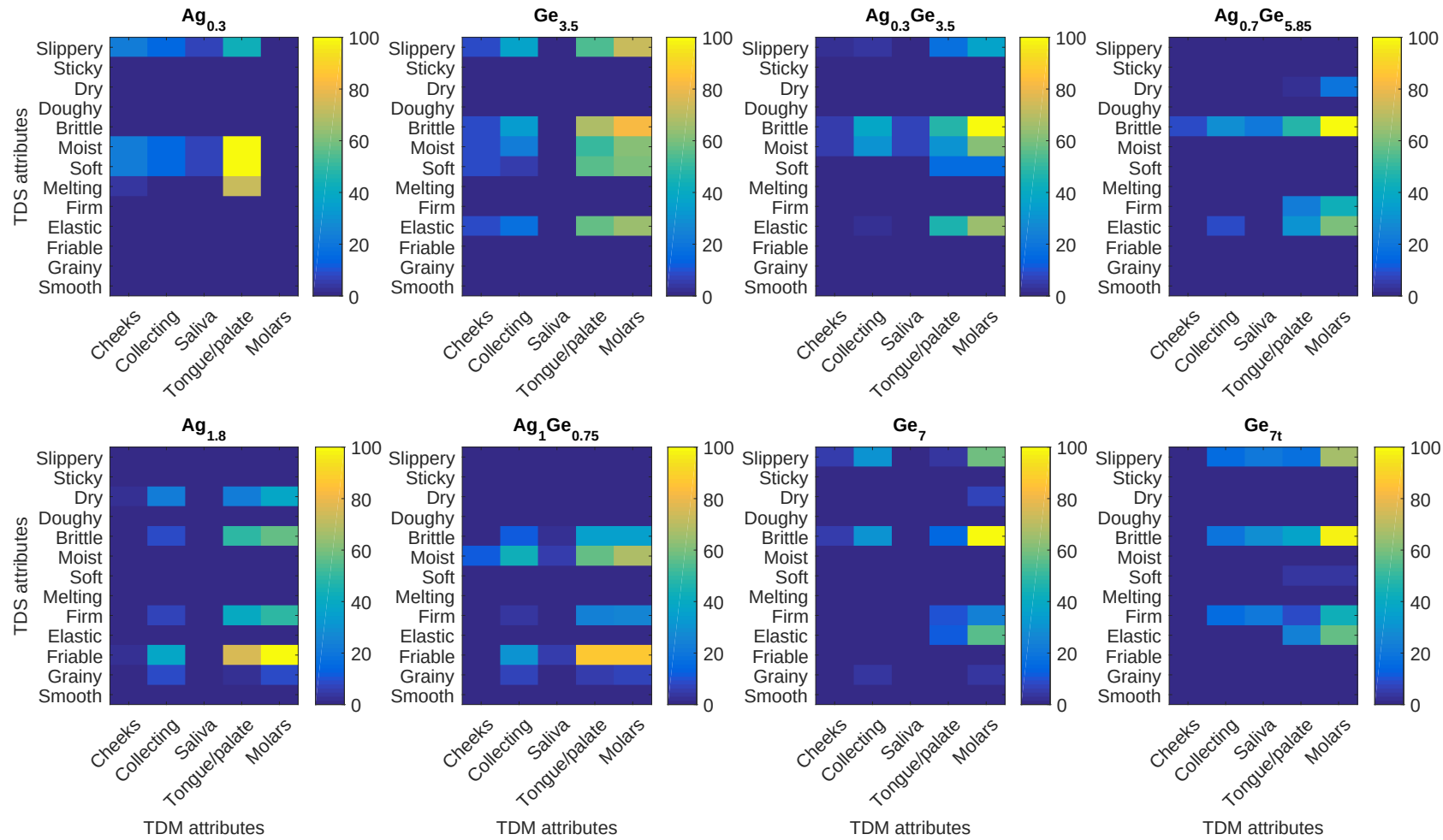


FIGURE 7.4 – Correspondance entre les fréquences de sensations de texture et les fréquences de sensations de mouvements des produits. Le code couleur représente la fréquence de citation d'un attribut de texture au moment où un attribut de mouvement est cité. Plus la case est jaune et plus l'attribut de texture a été cité en même temps que l'attribut de mouvement correspondant.

Afin de pouvoir plus facilement identifier les mouvements dominants lors de la consommation et les perceptions associées, les fréquences temporelles des mouvements ont été représentées directement en lien avec les perceptions de texture (Figure 7.4) (Saint-Eve et al., 2018). La Figure 7.4 présente ainsi pour chaque produit le pourcentage de durée pendant laquelle les perceptions de mouvements et de texture apparaissent simultanément. Plus une case est jaune et plus les perceptions de texture (colonne) et les perceptions de mouvement (ligne) apparaissent simultanément. L'analyse de cette figure montre que la compression langue-palais est utilisée pour tous les produits. Cette figure montre plus spécifiquement que les fréquences de citation des perceptions de texture les plus élevées (>70%) pour tous les produits sont observées pour les mécanismes : « langue/palais » et pour les « molaires ». On note également que la diversité des perceptions de texture est plus faible pour le produit $Ag_{0.3}$ que pour les autres gels. Par ailleurs, les produits distingués comme « agar dominant » et « gélatine dominant » dans les chapitres précédents semble se différencier vis-à-vis de l'association entre le mouvement « molaires » et les perceptions de texture associées. Ainsi, pour la famille des gels « agar dominant », l'attribut « friable » est majoritairement (>70%) associé au descripteur « molaires », alors que pour la famille « gélatine dominant » c'est l'attribut « cassant » qui est associé à ce descripteur de mouvement. Cette observation montre l'effet des propriétés de volumes des aliments sur les sensations pour un même mécanisme de déstructuration.

7.3.2 Caractérisation sensorielles des produits : profils de texture

Les profils de dominances temporelles, DTS et DTM, ont permis d'une part d'identifier les descripteurs de texture et de leur moment d'apparition au cours du processus oral et d'autre part de valider que la compression de l'aliment entre langue et palais était un mécanisme clé associé à certains descripteurs de texture. Néanmoins, il n'est toutefois pas possible de relier ces données sensorielles directement aux propriétés ultrasonores, car il s'agit de fréquences de citations et non d'intensités de perception. Pour permettre cette mise en relation entre propriétés de texture et propriétés ultrasonores, le profil de texture des 8 gels a été réalisé. Sur la base des résultats DTM et DTS, ainsi qu'à partir des conditions d'obtention des propriétés ultrasonores *in vitro*, un protocole de consommation des gels a été imposé aux juges. Ce dernier permet d'évaluer les perceptions à deux temps de la consommation. Ainsi, les descripteurs « Glissant », « Humide » et « Tenue » des gels ont été évalués à la mise en bouche, et les descripteurs « Glissant », « Humide », « Ferme », « Fondant », « Élastique » et « Pâteux » après une compression langue-palais. Les résultats seront présentés suivant ces deux moments de la consommation.

7.3.2.1 Propriétés des gels à la mise en bouche

7.3.2.1.1 Effet Produit Les tests statistiques montrent un effet significatif du produit (valeur de $p < 0.001$) sur les trois descripteurs évalués à la mise en bouche (« Humide », « Glissant », « Tenue du gel »). La Figure 7.5 présente les résultats des évaluations sensorielles de chaque produit à la mise en bouche pour une langue à l'état « hydratée » (conditions normales de consommation). Les résultats sont présentés pour les descripteurs

Moist (Humide) (Figure 7.5.a), Slippery (Glissant) (Figure 7.5.b) et Strength (Tenue du gel) (Figure 7.5.c). Les produits « Gélatine » dominant sont représentés en blanc et les produits « Agar » dominant sont représentés en gris sur chaque figure.

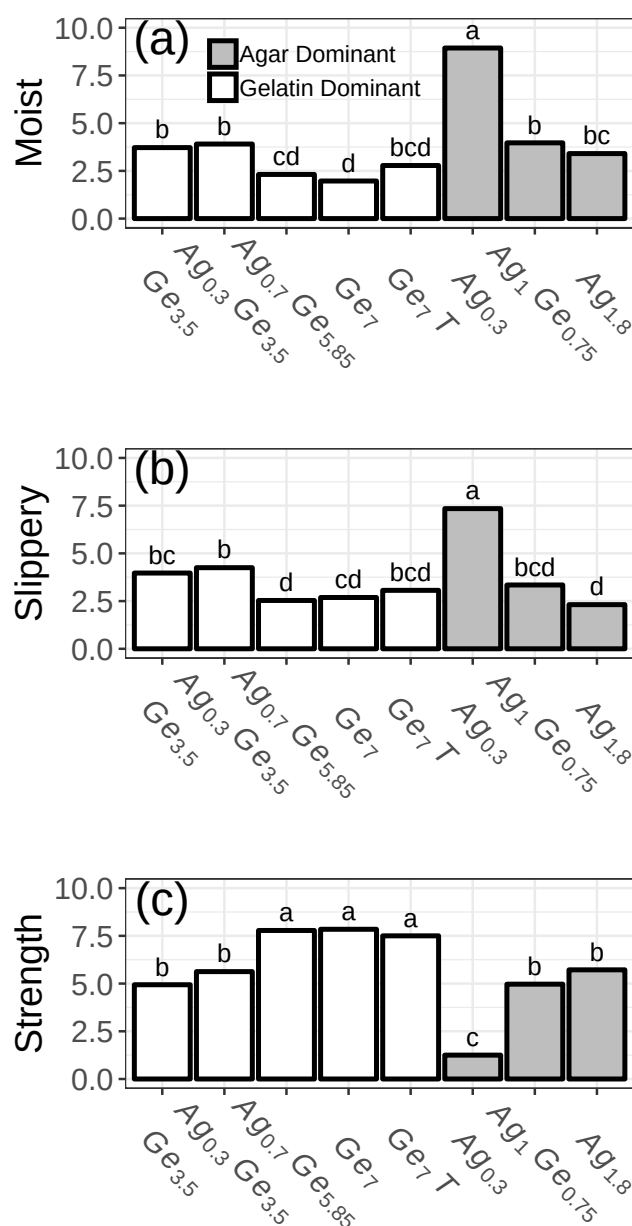


FIGURE 7.5 – Notes moyennes des attributs de textures à la mise en bouche (T1) pour les attributs (a) Humide (Moist), (b) Glissant (Slippery) et (c) de Tenue (Strength). Les lettres représentent les groupes statistiques auxquelles appartiennent les moyennes. (ANOVA 2 facteurs, test de comparaison multiple Newman Keuls, $p < 0.05\%$.)

Pour les gels « agar dominant », les attributs « humide » et « glissant » diminuent avec l'augmentation de la teneur en polymère et l'attribut tenue du gel augmente avec la teneur en polymère. Ces résultats pourraient être expliqués par les propriétés de relargage d'eau des gels d'agar. En effet, les chaînes de polymère y ont une conformation en doubles hélices permettant d'obtenir des modules élastiques élevés avec de faible concentration en polymère (Arnott et al., 1974). Cependant, la microstructure des gels d'agar pour de très

faible concentration en polymère n'est pas suffisante pour maintenir son volume d'eau et un phénomène de synérèse apparaît (Boral et al., 2010). Pour le gel $Ag_{0.3}$ la concentration en agar n'est pas suffisante pour maintenir un gel mécaniquement stable pouvant expliquer les perceptions « humide » et avec une faible tenue de ce gel (Banerjee and Bhattacharya, 2011).

La diminution de la perception de « glissant » à la mise en bouche pour les produits « agar dominant » peut être expliqué par l'augmentation de la stabilité mécanique du gel et la diminution de la synérèse menant à une manipulation plus aisée du produit.

Concernant les produits « gélatine dominant », les produits $Ge_{3.5}$ et $Ag_{0.3}Ge_{3.5}$ ont été perçus significativement plus humide que le produit Ge_7 . Comme pour l'agar, la sensation d'humide pour les produits « gélatine » dominant semble diminuer lorsque la teneur en gélatine augmente mais ne peut être reliée ici à la synérèse et à la stabilité mécanique des gels. L'élasticité ou l'adhésion des gels seraient donc probablement à l'origine de cette perception.

Les perceptions de tenues du gel sont plus tranchées. Les produits $Ge_{3.5}$ et $Ag_{0.3}Ge_{3.5}$ ont été perçus significativement moins intenses que les produits $Ag_{0.7}Ge_{5.85}$, Ge_7 et Ge_7T . Tous les gels de gélatine testés sont mécaniquement stables et l'ensemble des produits offre un spectre large de modules de Young qui augmentent linéairement avec la teneur en polymère, alors que les résultats sur la perception de tenue du gel présentent seulement deux niveaux de valeurs. Le module de Young ne semble donc pas être une propriété suffisante pour discriminer tous les produits sur le descripteur « tenue » des gels à la mise en bouche.

7.3.2.1.2 Effet produit et effet lubrification de la langue Les tests statistiques montrent un effet significatif du produit (valeur de $p < 0.001$) sur les trois descripteurs évalués à la mise en bouche en condition de langue lubrifiée (conditions normales de consommation) et asséchée. L'effet de la lubrification est significatif pour les attributs « humide » et « glissant ». La figure 7.6 présente la moyenne des intensités perçues pour les attributs Moist (Humide) (figure 7.6.a), Slippery (Glissant) (figure 7.6.b). Les attributs ont été évalués en condition langue humide (condition normale de consommation / barres bleues) et en condition langue sèche (langue asséchée par un papier absorbant / barres blanches) pour quatre gels : $Ag_{0.3}$, $Ge_{3.5}$, Ge_7 et Ge_7T .

L'assèchement de la langue a un effet significatif sur l'attribut Humide sur les produits $Ag_{0.3}$, $Ge_{3.5}$ et Ge_7T . Ceux-ci sont perçus plus « humide » en condition langue « hydratée » (conditions normales) qu'en condition langue « sèche ».

L'assèchement de la langue conduit à une diminution significative de la perception de « glissant » pour les produits $Ag_{0.3}$, $Ge_{3.5}$ et Ge_7 . Une tendance à la diminution est également observée pour le gel Ge_7T mais celle-ci n'est pas significative. Ainsi, l'assèchement de la langue conduit à une perception plus faible du caractère « glissant » des gels qui pourrait être expliquée par une adhésion ou une friction plus importante entre le produit et la langue.

Les résultats montrent également qu'il n'existe aucune différence significative sur l'attribut « tenue des gels » entre la langue en conditions normales et la langue asséchée.

A notre connaissance, le rôle de la salive sur les perceptions de texture a été étudiée dans la littérature uniquement sur des émulsions (Dresselhuys et al., 2008b; Engelen et al.,

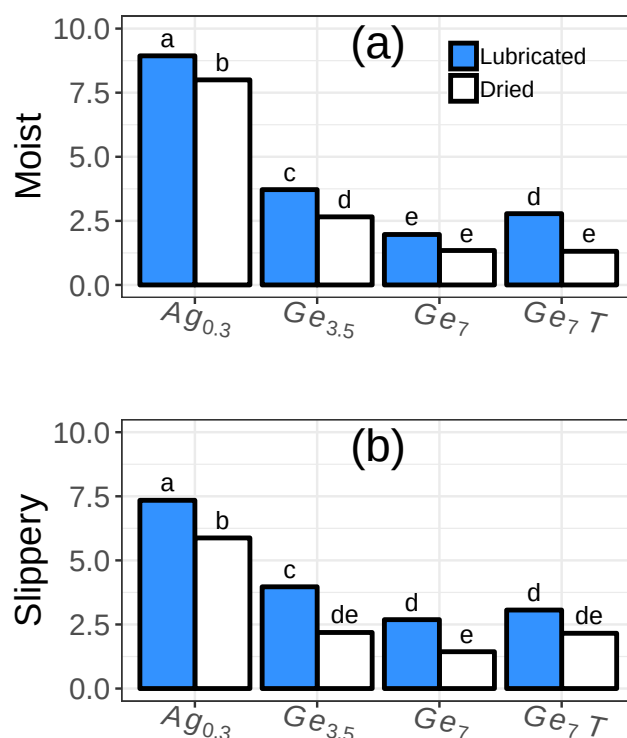


FIGURE 7.6 – 5 Moyennes des notes évaluées à la mise en bouche en conditions normale d'hydratation de langue (barres bleues) et après avoir essuyé la salive de la langue (barres blanches) pour les attributs (a) Moist (Humide) et (b) Slippery (Glissant). Les lettres représentent les groupes statistiques auxquelles appartiennent les moyennes. (ANOVA 3 facteurs, test de comparaison multiple Newman Keuls, $p < 0.05\%$.)

2003). Les mécanismes identifiés étaient liés à une modification de la structure de l'émulsion et ne peuvent être extrapolés aux observations sur les gels étudiés ici. Néanmoins, la salive a un rôle mécanique de lubrification et de protection (Bongaerts et al., 2007; Humphrey and Williamson, 2001). L'élimination de la salive à la surface de la langue pourrait ainsi provoquer une augmentation des phénomènes de friction entre la langue et les produits. La perception de « glissant » pourrait ainsi être affectée.

Enfin, il est intéressant de noter que les échantillons Ge_7 et Ge_7T montrent l'écart le plus important entre les intensités du descripteur humide évaluées dans les deux conditions. De même ces deux gels montrent l'écart le plus faible pour le descripteur « glissant » entre les deux conditions. La présence de Tween 20 et non la concentration en gélatine, est à l'origine de ces écarts. Le TWEEN 20 est un tensio-actif et il peut agir en faveur d'un meilleur étalement de la couche de salive entre le produit et la langue (due à la meilleure mouillabilité du produit) (l'angle de contact est de 0° pour Ge_7T et de $40 \pm 12^\circ$ pour Ge_7). Ce phénomène physique peut expliquer la modification de la perception d'humide pour le produit Ge_7T et à l'inverse, le peu d'impact du niveau de lubrification sur le caractère « glissant » sur ces deux gels.

7.3.2.2 Propriétés des gels après une compression langue/palais

7.3.2.2.1 Effet produit Tous les attributs sont significativement sensibles au produit (valeur de $p < 0.001$). La Figure 7.7 présente pour les 8 produits, les notes moyennes de chaque attribut évalué par le panel après une compression langue/palais.

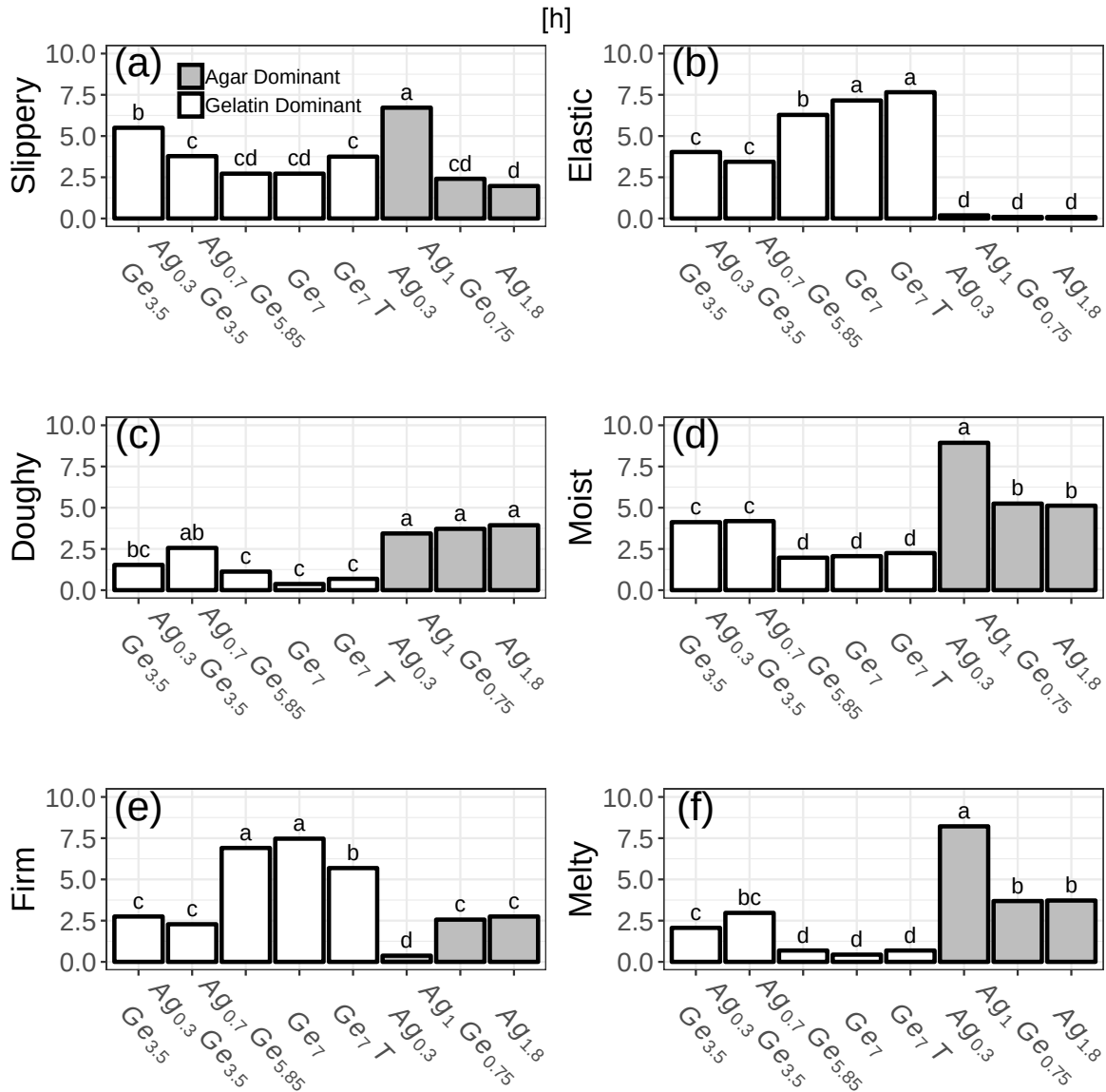


FIGURE 7.7 – Notes moyennes après une compression langue/palais pour les attributs (a) *Slippery* (Glissant), (b) *Elastic* (Elastique), (c) *Doughy* (Pateux), (d) *Moist* (Humide), (e) *Firm* (Ferme) et (f) *Melty* (Fondant). Les lettres représentent les groupes statistiques auxquelles appartiennent les moyennes. (ANOVA 1 facteur, test de comparaison multiple Newman Keuls, $p < 0.05\%$).

Le panel a perçu les produits « agar dominant » moins élastiques que les produits « gélatine dominant » (figure 7.7.b). La perception élastique a déjà été mise en lien avec les propriétés à la fracture des gels (Barrangou et al., 2006b; Devezeaux de Laverne et al., 2017; Foegeding et al., 2011). Toutefois aucune différence n'a été observée entre les gels « Agar dominant » sur l'attribut élastique. Pourtant, le produit Ag0.3 se fracture dès la compression langue/palais (faible contrainte à la rupture et faible élongation à la rupture) alors que les produits Ag1Ge0.75 et Ag1.8 ne se fracturent pas par compression langue/palais (pro-

duit cassant avec hautes contraintes à la rupture) montrant ainsi que le caractère élastique évalué par le panel ne correspond pas à l'évaluation de la contrainte à la rupture des gels de type « agar » dominant. Les produits à base de gélatine sont eux, des produits mécaniquement élastiques, ils peuvent se déformer fortement sous l'action d'une faible contrainte (selon le module de Young des produits) sans pour autant casser. C'est la raison pour laquelle ils sont perçus plus élastiques que les produits « agar dominant ». De plus, l'attribut élastique des gels à base de gélatine augmente avec la teneur en polymère. Foegeding et al. (2011) ont montré que la perception « élastique » des gels est expliquée par la relaxation du produit après compression (« résilience ») Foegeding et al. (2011). Toutefois, cette grandeur n'a pas été mesurée sur les gels étudiés.

Les gels « agar dominant » sont perçus plus « pâteux » que les gels « gélatine dominant » (figure 7.7.c). Le caractère « pâteux » des gels est évalué sur les propriétés du bol après fracturation. Ainsi, par sa définition, l'attribut « pâteux » résulte de la manière dont les gels se fracturent. Or le phénomène de fracturation pour les gels d'agar conduit à plusieurs morceaux tandis que les produits « gélatine dominant » se fracturent de manière nette en peu de morceaux. Ainsi, ce sont les propriétés à hautes déformations qui pourraient expliquer les différences de perceptions de « pâteux » entre ces deux types de gels.

Les produits $Ag_{0.3}$ et $Ge_{3.5}$ ont été perçus significativement plus « glissant » (et plus fondant pour $Ag_{0.3}$) que les autres produits (figures 7.7.a et 7.7.f). Les perceptions de fondant et de « glissant » du produit $Ag_{0.3}$ pourraient être expliquées par la faible stabilité mécanique du produit $Ag_{0.3}$ comparée aux autres produits. Les gels à base de gélatine sont également connus pour être perçus comme fondant lorsqu'ils sont réchauffés au cours de la manipulation orale du produit (Muñoz et al., 1986). La faible concentration en gélatine de $Ge_{3.5}$ permet au produit d'être plus facilement déstructuré au cours d'une compression, générant plus rapidement une surface d'échange plus grande avec les muqueuses et la salive et conduisant à une fonte plus rapide du gel pouvant expliquer cette perception de fondant.

Concernant la perception d'humide, le panel a discriminé 4 groupes de produits significativement différents : i) $Ag_{0.3}$, ii) $Ag_1Ge_{0.75}$, $Ag_{1.8}$, iii) $Ge_{3.5}$, $Ag_{0.3}Ge_{3.5}$, et iv) $Ag_{0.7}Ge_{5.85}$, Ge_7 et Ge_7T . Les groupes obtenus sont proches mais toutefois mieux discriminer que ceux obtenus à la mise en bouche. La compression du gel entre langue et palais aiderait donc à mieux percevoir le caractère humide des gels. Dans la littérature, la perception « humide » a été reliée au relargage de fluide hors du gel lors de la compression du produit (coup de dent ou compression langue/palais) (Pascua et al., 2013). Cette propriété dépend du réseau de polymère maintenant le volume de liquide au sein du produit (Pascua et al., 2013). La nature du polymère ainsi que sa concentration impactent la structure du réseau de polymère et ainsi sa propriété à la rétention de fluide. De la même manière qu'à la mise en bouche, l' $Ag_{0.3}$ est un produit non stable qui se déstructure facilement au cours de la compression langue/palais en libérant une phase aqueuse. L'attribut « humide » semble ainsi être sensible à la nature de la phase continue du gel (« agar dominant » ou gélatine dominant ». Le premier et le deuxième groupe correspondent aux produits « agar dominant » alors que les deux autres correspondent à des gels « gélatine dominant ». La nature de l'interaction entre les gels et la langue serait donc différente entre ces deux catégories de gels, avec plutôt un phénomène de synérèse pour l'un et d'adhésion pour l'autre, qui pourrait expli-

quer la diminution de l'intensité du descripteur humide avec l'augmentation de la teneur en polymère.

Au sein d'une même catégorie d'aliment (« agar dominant » et « gélatine dominant »), la perception de fermeté augmente avec la teneur en polymère (figure 7.7.e). L'attribut de fermeté est un attribut connu pour être associé à la contrainte à la fracture des gels (Foegeding et al., 2011). Ainsi, en accord avec la littérature, en augmentant la teneur en polymère, la contrainte à la fracture augmente et une augmentation de la fermeté des gels est observée. Toutefois, si l'on compare les échantillons « agar dominant » et « gélatine dominant » entre eux, on peut noter que le produit $Ag_{1.8}$ est perçu significativement moins ferme que produit Ge_7 alors qu'ils ont la même contrainte à la rupture. La stratégie orale employée pourrait être à l'origine de cette différence. En effet, le produit $Ag_{1.8}$ a un module d'Young important (150kPa) et par conséquent il n'est pas fracturable entre la langue et le palais (module d'Young > 16.2kPa (Foegeding et al., 2011)). Il est, par ailleurs, contrairement à Ge_7 , peu déformable. Ainsi, durant la compression langue/palais le produit $Ag_{1.8}$ a été peu déformé mais perçu moins ferme probablement à cause d'une interaction avec d'autres perceptions comme le fondant par exemple.

7.3.2.2.2 Effet produit et effet lubrification de la langue L'effet de la lubrification est significatif pour les attributs « Glissant » et « Humide ». Tandis que pour l'attribut « Ferme », l'interaction lubrification-produit est significative. La figure 7.8 représente pour 4 gels ($Ag_{0.3}$, $Ge_{3.5}$, Ge_7 et Ge_7T) les intensités perçues moyennes pour chacun de ces attributs en conditions normales (« langue humide ») et en condition « langue sèche » (après déshydratation de la langue).

L'état d'hydratation de la langue a eu un impact significatif sur les perceptions de « glissant » et d'humide pour les produits $Ge_{3.5}$ et Ge_7T après une compression langue/palais (Figure 7.8.a et Figure 7.8.b). Les mêmes hypothèses que lors de la mise en bouche peuvent être ici avancées. Pour le produit $Ge_{3.5}$, l'assèchement de la langue a conduit à réduire la perception de « glissant » expliqué probablement par un meilleur contact et une meilleure adhésion entre le produit et la langue conduisant à plus de frottement lors de la compression et donc à une diminution de la sensation de « glissant ». Par ailleurs, la sensation de « glissant » a tendance à augmenter entre Ge_7 et Ge_7T dans l'état hydraté alors qu'elle a tendance à diminuer en condition langue sèche, avec pour conséquence un écart important du descripteur « glissant » pour Ge_7T entre les conditions « langue hydratée » et « langue non-hydratée ». Le TWEEN 20 permet par ses propriétés tensio-active une meilleure mouillabilité du produit et donc une meilleure enduction du produit par la salive, qui pourrait avoir un effet important sur la perception de « glissant ».

La perception d'humide, présente une intensité en général plus faible pour une langue sèche plutôt que pour une langue hydratée mais seuls les produits $Ge_{3.5}$ et Ge_7T sont perçus moins humide de façon significatives pour la condition « langue sèche ». Ces résultats illustrent probablement des propriétés de mouillabilité et d'adhésion particulières de ces deux gels.

Par ailleurs, Ge_7T est perçu plus ferme en condition « langue sèche » qu'en condition « langue humide » (Figure 7.8.e). Les forces de frottement qui augmentent pour la condition «

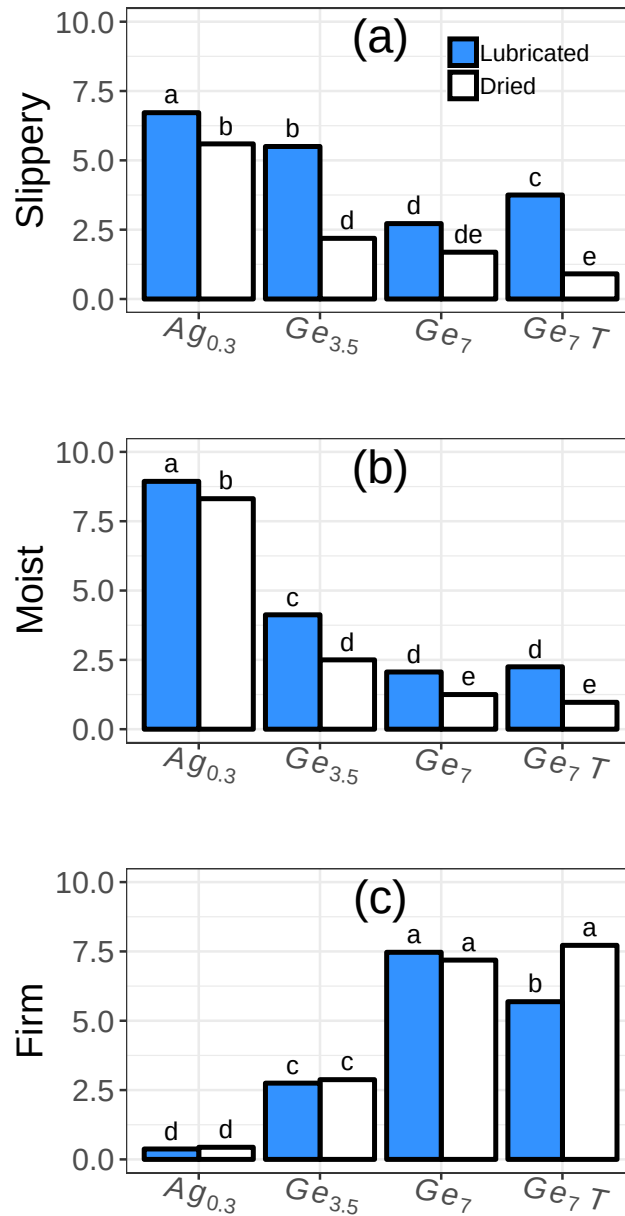


FIGURE 7.8 – Moyennes des notes évaluées après une compression langue/palais en condition langue humide (bleu) et en langue sèche (blanc). Les notes moyennes des attributs (a) Slippery (Glissant), (b) Moist (Humide) et (c) Firm (Ferme) sont représentés. Les lettres représentent les groupes statistiques auxquelles appartiennent les moyennes (ANOVA 3 facteurs, test de comparaison multiple Newman Keuls, $p < 0.05\%$).

langue sèche » pourraient expliquer ce résultat. Les attributs « pâteux », élastique et fondant ne sont pas affectés par les conditions « sèche » ou « humide » de la langue. Ainsi les attributs « Glissant », « Humide » et « Ferme » qui eux sont impactés en particulier pour les produits $Ge_{3,5}$ et Ge_7T , seraient plus sensibles aux propriétés de surface entre la langue et le produit.

7.3.3 Effet du temps lors du processus oral sur les intensités de texture

Deux attributs de texture ont été évalués aux deux temps du processus oral (à la mise en bouche et à la compression entre langue et palais). Ces deux descripteurs sont « Glissant » et « Humide ». Afin d'évaluer l'effet du temps du processus oral sur ces deux descripteurs, une ANOVA à 3 facteurs (produit, juge, temps) a été réalisée. Le test n'a pas montré de différence significative entre les intensités de texture des produits perçues aux deux temps du processus oral. Ces deux descripteurs semblent donc être évalués de façon équivalente dès la mise en bouche comme lors de la compression.

7.3.4 Confrontation des données sensorielles à la réflectivité US à l'interface PVC/produit

Pour mettre en lien les données sensorielles et les propriétés ultrasonores, nous avons dans une première approche, considéré les données ultrasonores obtenues en conditions *in vitro* sur les langues en PVC. En effet, si les langues en PVA ont des propriétés mécaniques plus proches physiologiquement que de vraies langues, seuls quelques gels ont été étudiés avec ces langues, alors qu'un jeu complet de propriétés ultrasonores a été obtenu avec la langue en PVC ($R_1\beta_1$), sur l'ensemble des gels étudiés également en analyse sensorielle.

Les coefficients de corrélations ont été calculés entre les intensités des attributs sensoriels de textures décrits précédemment à l'introduction en bouche et lors de la compression, et la réflectivité US entre une surface $R_1\beta_1$ en PVC et les produits pour une surface sèche et lubrifiée (Tableau 7.5).

Les corrélations significatives ont été obtenues, quel que soit l'attribut sensoriel ou le moment de consommation, avec la réflectivité obtenue sur une langue en PVC $R_1\beta_1$ non lubrifiée (voir Tableau 7.5).

La réflectivité US est liée à l'amélioration du couplage à l'interface entre deux milieux, la langue et l'aliment. La lubrification de la surface en PVC par de l'eau induit une amélioration du couplage (en chassant les bulles d'air à l'interface PVC/produit) rendant l'écart de réflectivité entre les produits moins importante et moins sensible aux interactions de surface. Alors que dans le cas de la réflectivité US mesurée à une interface PVC/produit sèche, l'amélioration du couplage est liée à la surface de contact entre le produit et une surface rugueuse qui est sensible aux propriétés du produit et notamment à son adhésion à l'interface PVC/produit comme au module de Young (Mantelet et al., 2018b). La réflectivité US d'une interface PVC/produit rugueuse et sèche est donc plus sensible à des propriétés physiques des produits et des propriétés de surfaces qu'une surface en PVC lubrifiée, expliquant des corrélations significatives observées entre les données sensorielles et la réflectivité *in vitro*

TABEAU 7.5 – Coefficient de corrélation entre les moyennes des notes par attributs de textures à la mise en bouche et lors de la compression de l'aliment entre langue et palais et les mesures de réflectivité ultrasonore de chaque produits (en condition sèche (Dried Tongue) et en condition langue hydratée (Hydrated Tongue). La symbole * indique les coefficients de corrélation significatifs.

Texture attributes		Hydrated Tongue				Dried Tongue	
		$R_1\beta_1$ Dry		$R_1\beta_1$ Medium		$R_1\beta_1$ Dry	
		Coefficient	p-value	Coefficient	p-value	Coefficient	p-value
Introduction	<i>Slipperry</i>	-0.95*	<0.01	-0.76*	0.03	-0.94	0.06
	<i>Moist</i>	-0.93*	<0.01	-0.66	0.08	-0.98*	0.02
	<i>Strength</i>	0.92*	<0.01	0.53	0.17	1.00*	<0.01
Compression	<i>Melty</i>	-0.83*	0.01	-0.42	0.30	-0.98*	0.02
	<i>Firm</i>	0.75*	0.03	0.39	0.34	0.98*	0.02
	<i>Moist</i>	-0.84*	0.01	-0.41	0.32	-0.97*	0.03
	<i>Slipperry</i>	-0.86*	0.01	-0.87*	0.01	-0.97*	0.03
	<i>Doughy</i>	-0.39	0.34	0.10	0.81	-0.99*	0.01
	<i>Elastic</i>	0.51	0.20	-0.05	0.92	0.99*	0.01

obtenue à partir d'une langue en PVC non lubrifiée. C'est donc cette condition qui a été choisie pour discuter des liens entre les données sensorielles et les propriétés ultrasonores et qui est présentée dans la suite du travail. De plus, les attributs « glissant », « humide », « tenue de gel », « fermeté » et « fondant » seront présentés par la suite car ce sont les attributs qui ont montré une corrélation significative pour les deux conditions de lubrification testés sensoriellement.

7.3.4.1 Confrontation entre les attributs de texture évalués à la mise en bouche et la réflectivité US

Les liens entre les attributs sensoriels « humide », « glissant » et « tenue du gel » à la mise en bouche (« introduction ») avec la réflectivité ultrasonore obtenue *in vitro* avec la langue PVC $R_1\beta_1$ sont présentés Figure 7.9 pour deux conditions d'évaluation sensorielle, « langue sèche » et « langue humide ».

Les corrélations obtenues sont significatives. La réflectivité US et les attributs « Humide » et « Glissant » sont corrélés négativement indiquant qu'une augmentation de la réflectivité induit une diminution de l'intensité des descripteurs « Humide » et « Glissant ». Ces résultats confirment l'importance des propriétés d'interfaces sur ces perceptions. Notamment le rôle de la synérèse et de l'adhésion.

La réflectivité US est corrélée positivement au descripteur Tenue du gel évalué à la mise en bouche. Si la réflectivité est reliée au module de Young, cette propriété des gels n'explique pas à elle seule le descripteur Tenue du gel. En effet, le produit $Ag_{1.8}$ est perçu comme ayant une tenue intermédiaire entre celle de $Ag_{0.3}$ et celle de Ge_7 alors qu'il a le plus fort module de Young des produits étudiés. La nature du polymère, et par conséquent les propriétés de synérèse et d'adhésion, sont aussi à prendre en compte pour expliquer cette corrélation.

7.3.4.2 Corrélation entre les perceptions de textures après une compression langue/palais et la réflectivité US

Les liens entre les attributs sensoriels « humide », « glissant », « ferme » et « fondant » lors de la compression avec la réflectivité ultrasonore obtenue *in vitro* avec la langue PVC $R_1\beta_1$ sont présentés figure 7.10

Les coefficients de corrélation obtenus entre la réflectivité US à l'interface PVC/produits et les perceptions d'« *humide* » et de « glissant » lors de la compression de l'aliment sont moins élevés que lors de la mise en bouche mais des tendances similaires sont observées. Par ailleurs, la perception de « fondant » est aussi corrélée négativement à la réflectivité. Par conséquent, les mêmes mécanismes d'interfaces identifiés pour les perceptions « glissant » et « humide » peuvent expliquer cette tendance.

La sensation de « *fermeté* » est corrélée significativement et positivement à la réflectivité US. Le module de Young est un paramètre influençant à la fois la perception de fermeté (Devezeaux de Lavergne et al., 2017) mais aussi la réflectivité US mesuré sur la surface en PVC $R_1\beta_1$ avant compression (voir Chapitre 4). Ce paramètre pourrait donc expliquer le lien entre les deux grandeurs.

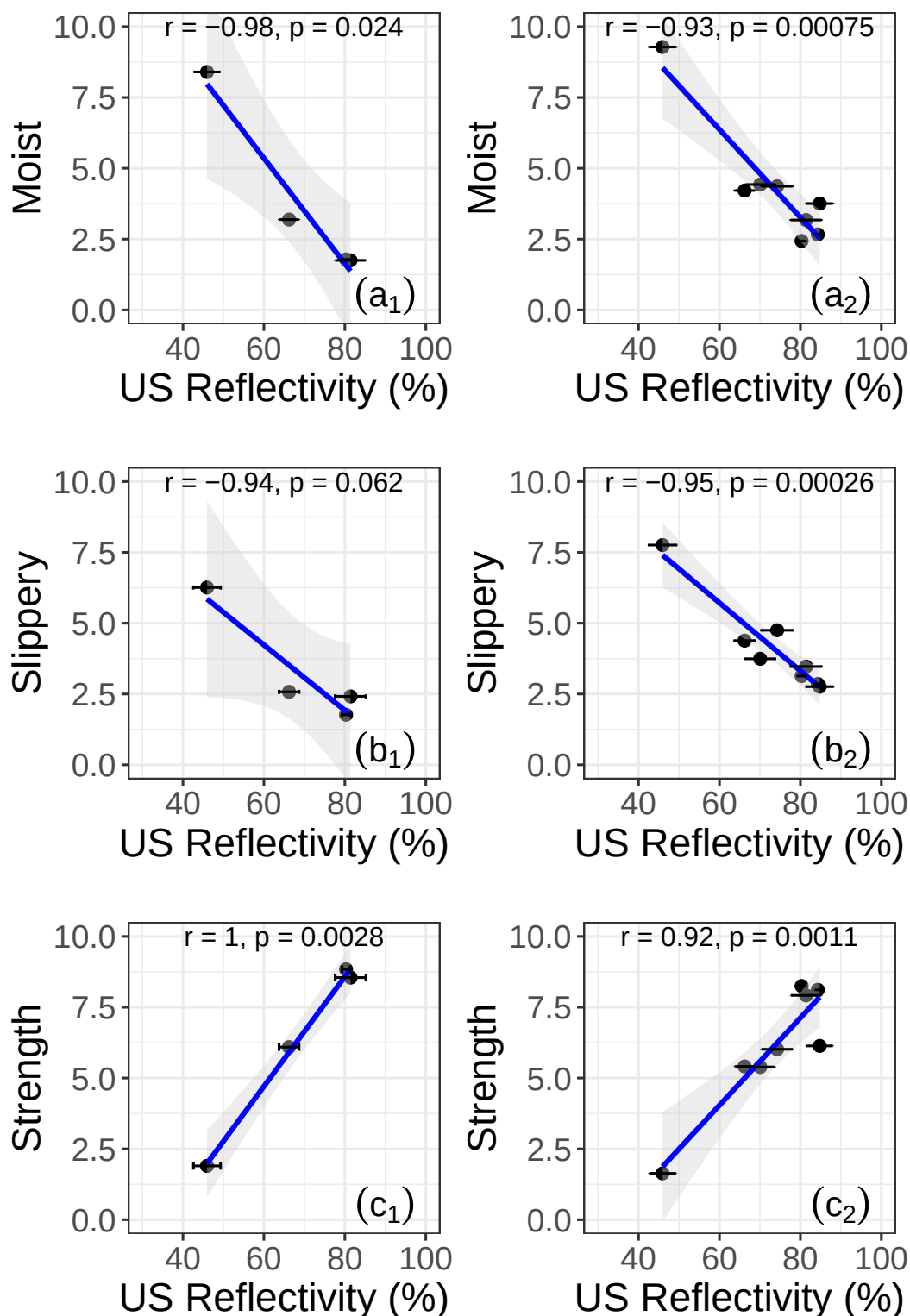


FIGURE 7.9 – Représentation des tendances observées entre les données sensorielles à la mise en bouche et la réflectivité US à l'interface PVC/produits avec une surface $R_1\beta_1$. Les données pour une « langue sèche » (après déshydratation de la surface de la langue) et une surface en PVC non lubrifiée (a_1 , b_1 et c_1) ainsi que celles pour une « langue hydratée » (conditions normales de consommation) et une surface en PVC non lubrifiée (a_2 , b_2 et c_2) sont tracées.

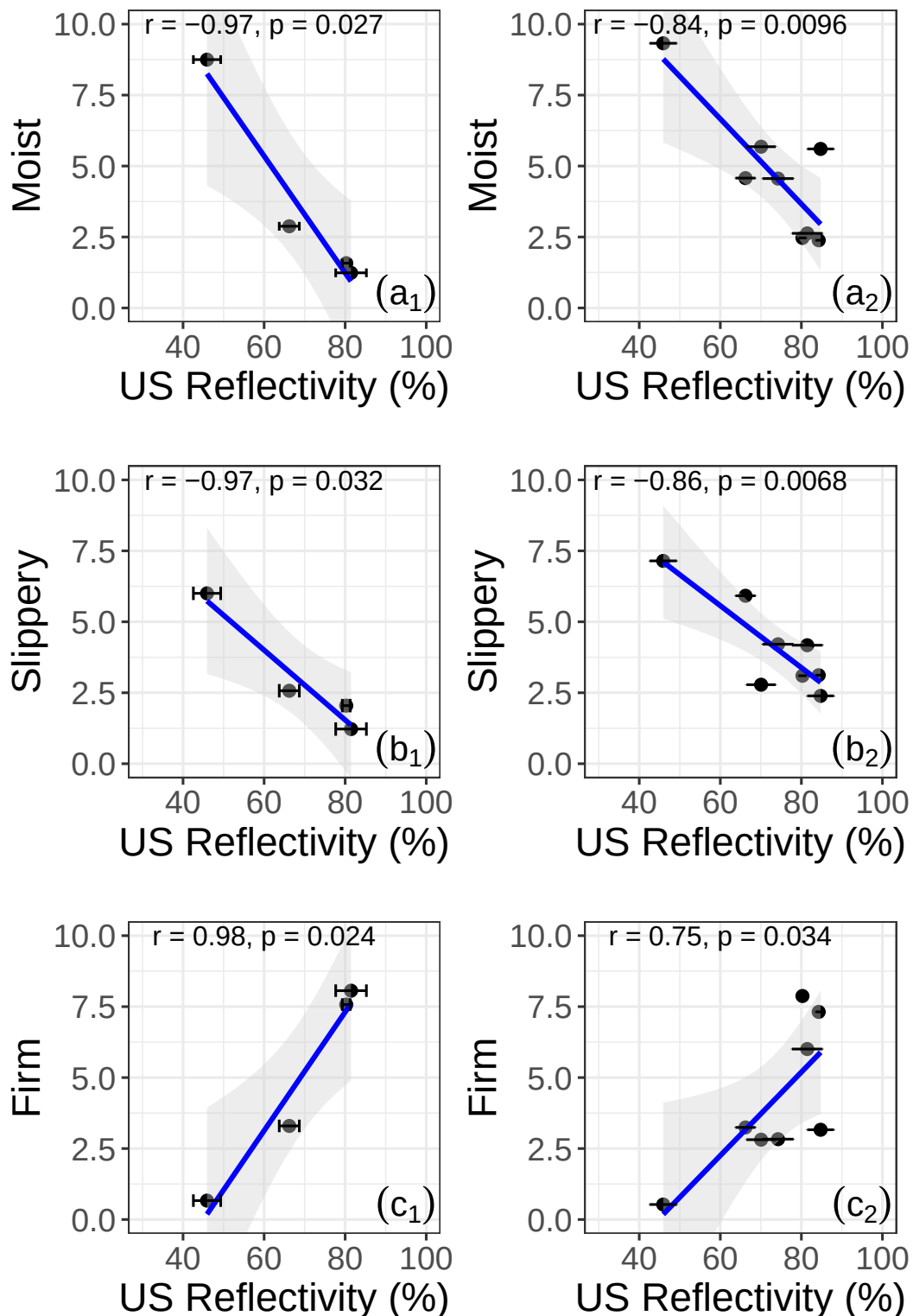


FIGURE 7.10 – Représentation des tendances observées entre les données sensorielles après une compression langue-palais et la réflectivité US à l'interface PVC/produits avec une surface $R_1\beta_1$. Les données pour une « langue sèche » (après déshydratation de la surface de la langue) et une surface en PVC non lubrifiée (a_1 , b_1 et c_1) ainsi que celles pour une « langue hydratée » (conditions normales de consommation) et une surface en PVC non lubrifiée (a_2 , b_2 et c_2) sont tracées.

7.4 Conclusion

Les objectifs de cette étude étaient multiples. Il s'agissait de caractériser sensoriellement les aliments modèles, d'identifier et mieux comprendre les mécanismes du processus oral et leur évolution au cours du temps à l'origine de ces perceptions et notamment le rôle de la salive à la surface de la langue et d'étudier les liens entre la mesure de réflectivité US à l'interface PVC/produit et les perceptions de textures. Un travail original sur la description sensorielle des mécanismes en bouche (DTM – Dominances Temporelles des Mécanismes), associé aux perceptions temporelles de texture (DTS – Dominances Temporelles des Sensations) a permis d'identifier le rôle clé de la compression langue-palais lors du processus oral. Nous avons pu ainsi identifier que la compression langue/palais est employée pour l'ensemble des 8 gels étudiés. Elle est associée à différents descripteurs de texture comme « humide », « glissant », « cassant », « friable », ou encore « mou ».

Une caractérisation sensorielle des produits a été réalisée par la méthode de profil à deux temps clés du processus oral : à la mise en bouche et après une compression langue/palais. Les attributs « humide », « glissant » et « fondant » sont des attributs dépendant des interactions de surface entre la langue et le produit alors que les attributs « ferme », « élastique » et « pâteux » sont des attributs relatifs des propriétés de volume des produits. Les liens observés entre les attributs sensoriels et la réflectivité ultrasonore a permis de valider l'importance des propriétés interfaciales sur les perceptions de texture des gels étudiés.

La modification de l'état d'hydratation de la langue a eu un effet sur les attributs « humide » et « glissant » qui sont liés aux interactions de surface langue/produit. Cet effet est plus marqué sur des échantillons ayant des propriétés de mouillabilité particulière comparé aux autres produits ($Ag_{0.3}$, $Ge_{3.5}$ et Ge_7T).

Enfin, nous avons montré que la réflectivité US mesurée à une interface rugueuse en PVC non lubrifiée présente de meilleur coefficient de corrélation avec les perceptions « Humide », « Glissant », « Ferme » et de « Tenue de gel » que les mesures de réflectivité sur des surfaces en PVC lubrifiées. Ce résultat a pu être expliqué par une sensibilité plus grande des modifications d'interface dans le cas du PVC non lubrifié. Pour la suite du travail, il sera nécessaire de relier les données sensorielles aux propriétés ultrasonores obtenues avec des langues déformables plus proches de la réalité physiologique.

De même au-delà de la compression du gel entre langue et palais, il serait intéressant d'étudier l'évolution des propriétés interfaciales du bol avec la langue au cours du processus oral. Les premiers résultats obtenus ici, ouvrent de nombreuses perspectives pour mieux comprendre les perceptions de texture.

Principaux messages à retenir :

- La compression langue-palais est un mécanisme impliqué dans la déconstruction orale de l'ensemble des gels étudiés. Elle est dominante pour les gels les plus mous, mais intervient également en association avec la compression par les molaires pour les gels plus fermes. La compression langue-palais est associée aux descripteurs : humide, glissant, cassant, friable et mou.
- Les attributs humide, glissant et fondant évalués lors de la mise en bouche des gels semblent être plus spécifiquement dépendants des interactions de surface entre la langue et le produit.
- L'état de lubrification de la langue semble impacter les attributs humide, glissant et ferme
- La réflectivité ultrasonore à l'interface langue-aliment présente de forts coefficients de corrélation avec les descripteurs humide et glissant.

Ces premiers résultats montrent tout l'intérêt des méthodes ultrasonores pour mieux comprendre les perceptions de texture. Toutefois, l'intérêt à terme de ces méthodes est de pouvoir étudier *in situ* et en temps réel l'évolution des propriétés des bols et des interfaces entre bol et muqueuse en conditions *in vivo* au cours du processus oral. Pour cela, il nous a semblé donc important dans le dernier chapitre de cette thèse d'explorer le potentiel des méthodes ultrasonores en conditions *in vivo* (figure 7.11).

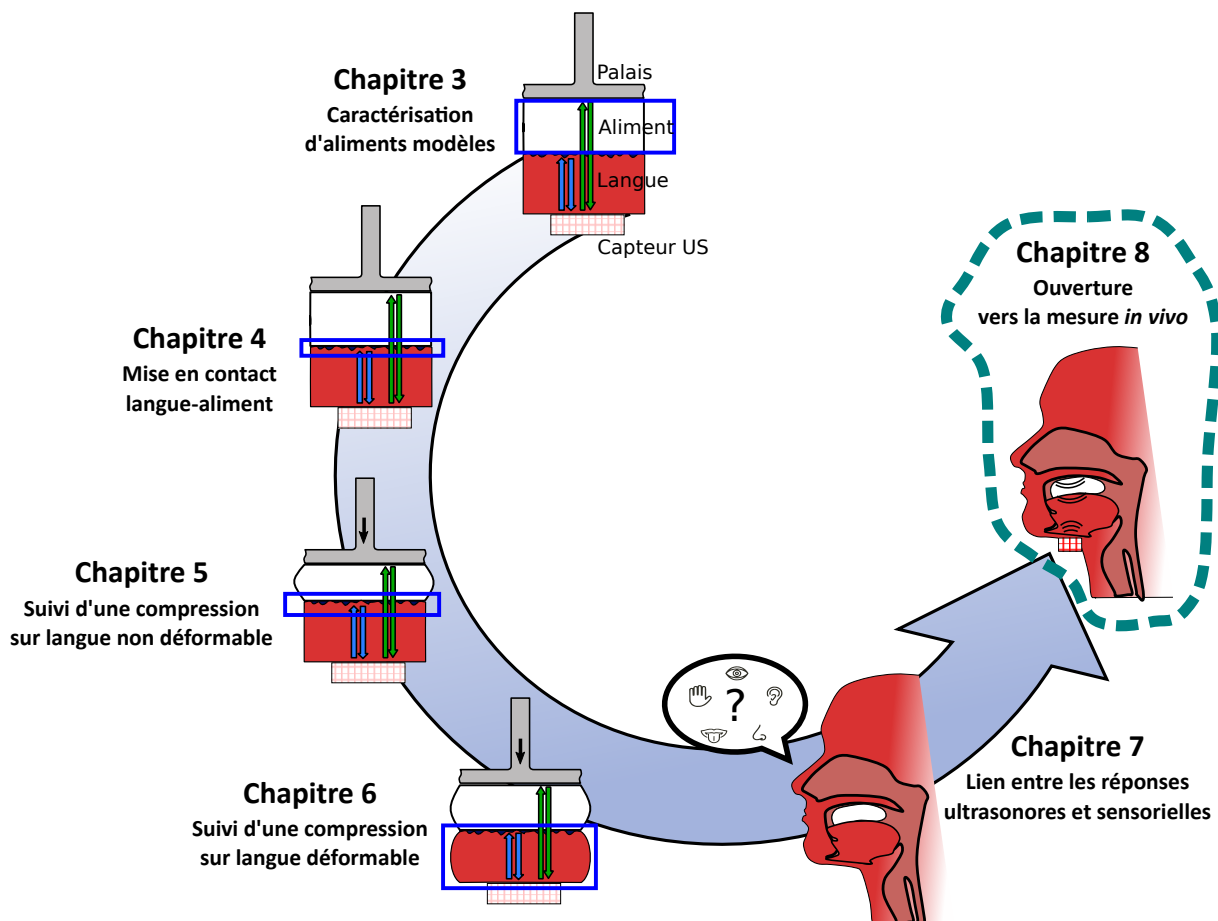


FIGURE 7.11 – Stratégie expérimentale de la thèse

Chapitre 8

De la preuve de concept *in vitro* vers des applications *in vivo*

Sommaire

8.1 Introduction	168
8.2 Echographie du système langue-aliment-palais	169
8.3 Elastographie du système langue-aliment-palais	177

8.1 Introduction

Les travaux de cette thèse ont permis d'identifier le coefficient de réflexion de l'interface langue-aliment et le temps de vol dans l'aliment comme des paramètres ultrasonores à fort potentiel pour étudier des phénomènes physiques à l'origine des perceptions de texture entre la langue et l'aliment. Devant la complexité des phénomènes de propagation des ondes ultrasonores dans la cavité orale, une attention toute particulière a été portée à la conception de montages expérimentaux comme une cellule de mesure ultrasonore et surtout un système biomimétique permettant de progressivement prendre en compte plusieurs caractéristiques majeures de la langue (rugosité, lubrification, raideur, motilité). Une part importante de la thèse a donc été dédiée au développement de ces systèmes expérimentaux intégrant également le traitement et l'analyse des signaux ultrasonores. Le temps accordé pour l'utilisation des systèmes développés et pour la génération des données sur les aliments a donc été contraint par les temps dédiés au développement des méthodes. Des choix ont alors été pris pour maximiser la quantité d'informations exploitables dans les délais imposés et, par conséquent, prouver la robustesse de notre démarche. De nombreuses pistes concernant le choix des paramètres ultrasonores et la conception du montage biomimétique ont été explorées pour en sélectionner seulement quelques-unes et établir des principes stables sur lesquelles les futures études de ce projet s'appuieront. Le cadre contrôlé offert par l'environnement biomimétique permettra à l'avenir d'explorer différentes structures d'aliments, et de contribuer à mieux comprendre les phénomènes physiques qui interviennent lors de leur déconstruction entre langue et palais. Mais pour aller plus loin, une perspective encore plus ambitieuse serait de pouvoir transférer la méthode en conditions *in vivo*. Réaliser l'acquisition directement sur le consommateur offrirait ainsi la possibilité de récolter simultanément des mesures physiques et sensorielles et de consolider la mise en relation des deux types de données.

Cependant, de nombreuses perspectives de développement du système biomimétique s'imposent encore afin de combler l'écart avec la réalité physiologique de la cavité orale : (i) la mise en œuvre de séquences de mouvements complexes (combinant compression et cisaillement), (ii) la prise en compte des irrégularités géométriques de la cavité orale, ou encore (iii) la considération du caractère hétérogène, anisotrope et instable dans le temps des propriétés mécaniques de la langue. Toutes ces caractéristiques sont susceptibles d'altérer significativement les phénomènes de propagation des ondes ultrasonores dans le système langue-palais. Or, les paramètres d'intérêt identifiés au cours de la thèse (qu'il s'agisse de mesures de réflectivité ou de temps de vol) reposent sur une détection et une caractérisation fiable et robuste des échos des différentes interfaces du système langue-aliment-palais. Les transformations à prévoir sur le système biomimétique forment ainsi autant de défis à relever pour faire évoluer la technique ultrasonore et permettre un jour d'en envisager le transfert en conditions *in vivo*, directement sur le consommateur. Cependant, plusieurs opportunités de collaborations se sont présentées durant la thèse pour nous permettre de réaliser des premières mesures en conditions *in vivo*. Sans attendre les évolutions à venir du système expérimental, nous avons donc eu l'occasion d'étudier le potentiel de différents outils d'imagerie. Le choix de réaliser ces essais s'appuyait sur une volonté d'une toute première

étape de validation de la faisabilité du transfert de l'approche *in vitro* à celle *in vivo*, mais aussi de mieux cibler les transformations à intégrer sur le système biomimétique. Il s'agissait également de faire le lien entre les mesures permises grâce aux méthodes ultrasonores développées durant la thèse et les possibilités offertes par les outils d'imagerie, qui sont des techniques éprouvées pour l'investigation en condition *in vivo*.

Comme développé dans la partie état de l'art, les méthodes d'imagerie ultrasonore ont déjà été communément employées dans différents domaines pour l'exploration de la cavité orale. Mais contrairement à l'approche développée au cours de la thèse, l'usage de ces méthodes est souvent restreint à l'observation qualitative des milieux. Certains travaux vont néanmoins plus loin, comme à l'institut Langevin (UMR 7587 ESPCI – CNRS) à Paris, où sont notamment développées des méthodes de traitement d'image innovantes afin de suivre par échographie les déplacements de la langue au cours de l'élocution (Xu et al., 2014, 2016). La première partie de ce dernier chapitre propose ainsi de décrire les premiers essais *in vivo* rendus possible grâce à l'accueil de Pierre Roussel et Bruce Denby pour la réalisation de ces essais à l'Institut Langevin.

Par ailleurs, les progrès techniques des méthodes ultrasonores au cours des dernières années permettent maintenant, au-delà des images d'échographie, de remonter également à l'élasticité des tissus. L'élastographie par ultrasons repose ainsi sur la génération d'une onde de cisaillement basse fréquence, puis au suivi de la propagation de cette onde dans les différents tissus, rendu possible par les dernières technologies d'imagerie ultrasonore à haute cadence. La mesure de la vitesse et de l'atténuation de cette onde permet ainsi de remonter à une cartographie des propriétés viscoélastiques des milieux. La deuxième section de ce chapitre décrit des essais préliminaires réalisés grâce à l'invitation de Jean-Luc Gennisson (UMR 8081 IR4M Paris Sud – CNRS) au Service Hospitalier Joliot Curie (Orsay). Au cours de ces tests, des mesures d'élasticité ont été effectuées en temps réel sur les échantillons de langues artificielles déformables, ainsi que sur la langue de différents individus.

8.2 Echographie du système langue-aliment-palais

Les transducteurs ultrasonores utilisés jusqu'alors dans ces travaux de thèse sont des capteurs dits « mono-élément », c'est-à-dire qu'ils sont composés d'un seul élément piézo-électrique qui assure la conversion électromécanique responsable de l'émission et de la réception de l'onde ultrasonore. Un transducteur ultrasonore « mono-élément » permet donc l'acquisition d'un signal, que l'on visualise sous la forme de son amplitude en fonction du temps de propagation de l'onde. On parle alors de mode-A, pour « amplitude ». Dans le cas d'une sonde d'imagerie ultrasonore, le capteur est composé d'une barrette « multiéléments » (généralement de forme linéaire ou convexe). Ces sondes, dites à contrôle de phase (technologie « phased array »), permettent de maîtriser le déphasage des impulsions envoyées à chacun des éléments, et ainsi de contrôler la forme du front de l'onde ultrasonore générée : par exemple pour focaliser le faisceau ultrasonore à une profondeur donnée, ou bien pour générer une onde en incidence oblique par rapport à la surface de la sonde. Les données sont visualisées sous la forme d'une image 2-D, obtenue par reconstruction à partir de l'en-

semble des signaux (mode-A) issus de chacun des éléments de la sonde. On parle alors de mode-B, pour « brightness », où l'image traduit l'amplitude des signaux ultrasonores en niveaux de gris.

Grâce à Pierre Roussel et Bruce Denby de l'institut Langevin (UMR 7587 ESPCI – CNRS, à Paris), l'opportunité nous a été offerte de pouvoir réaliser des essais préliminaires sur un système d'imagerie dédié à l'observation de la langue. La sonde ultrasonore utilisée dans le cadre de ces essais est une sonde convexe de fréquence centrale 5 MHz (Vermon, Tours, France). Elle est commandée par un boîtier (Terason, T2000, Burlington, MA, USA) relié à une station de travail sur laquelle une interface homme-machine dédiée a été conçue de façon à synchroniser plusieurs sources de mesures : image ultrasonore, caméra, microphone. . .

La sonde est montée sur un casque, qui permet d'ajuster la position sous le menton d'un volontaire. Une fois le réglage du positionnement de la sonde validé, la sonde est bloquée de telle sorte qu'au cours des essais, elle puisse rester immobile dans le référentiel de la boîte crânienne du volontaire. L'élasticité des tissus sous le menton permet de maintenir la sonde au contact de la peau du volontaire tout au long de l'expérience (Figure 8.1). Un exemple d'image échographique provenant de ce montage est présenté en Figure 8.2.

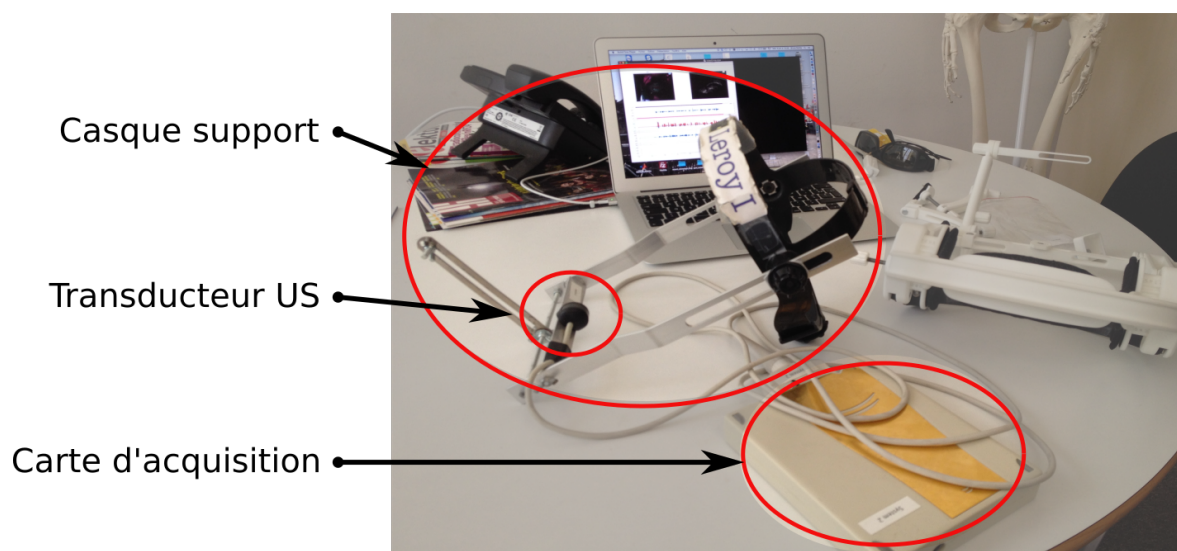


FIGURE 8.1 – Système expérimental utilisé pour réaliser l'échographie du système langue-palais au cours de la consommation des gels.

Les tests ont été réalisés sur deux références de gels : $Ag_{0.3}$ et Ge_7 . De par leurs caractéristiques mécaniques et sensorielles contrastées, ils forment des supports intéressants pour l'étude d'une preuve de concept.

Ces essais de faisabilité ont été réalisés sur un volontaire. Un protocole de consommation a été mis au point afin d'imposer des séquences pertinentes de mouvement par rapport aux essais réalisés *in vitro* sur le système biomimétique, mais également durant le profil sensoriel. La séquence d'instruction se décomposait comme suit : après le lancement de la séquence d'enregistrement, on demandait au volontaire : (i) de laisser sa langue au repos pendant 3 secondes, (ii) de la porter au contact du palais pendant 2 secondes, (iii) de déposer le produit sur la surface de la langue puis d'attendre 3 secondes, (iv) d'effectuer une compression uni-axiale entre la langue et le palais, et enfin (v) de consommer l'aliment

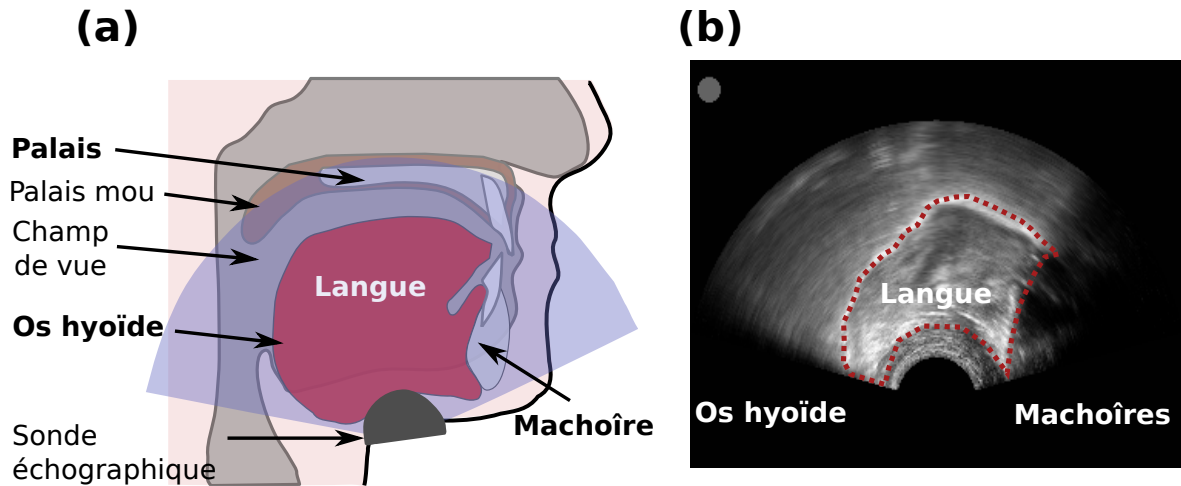
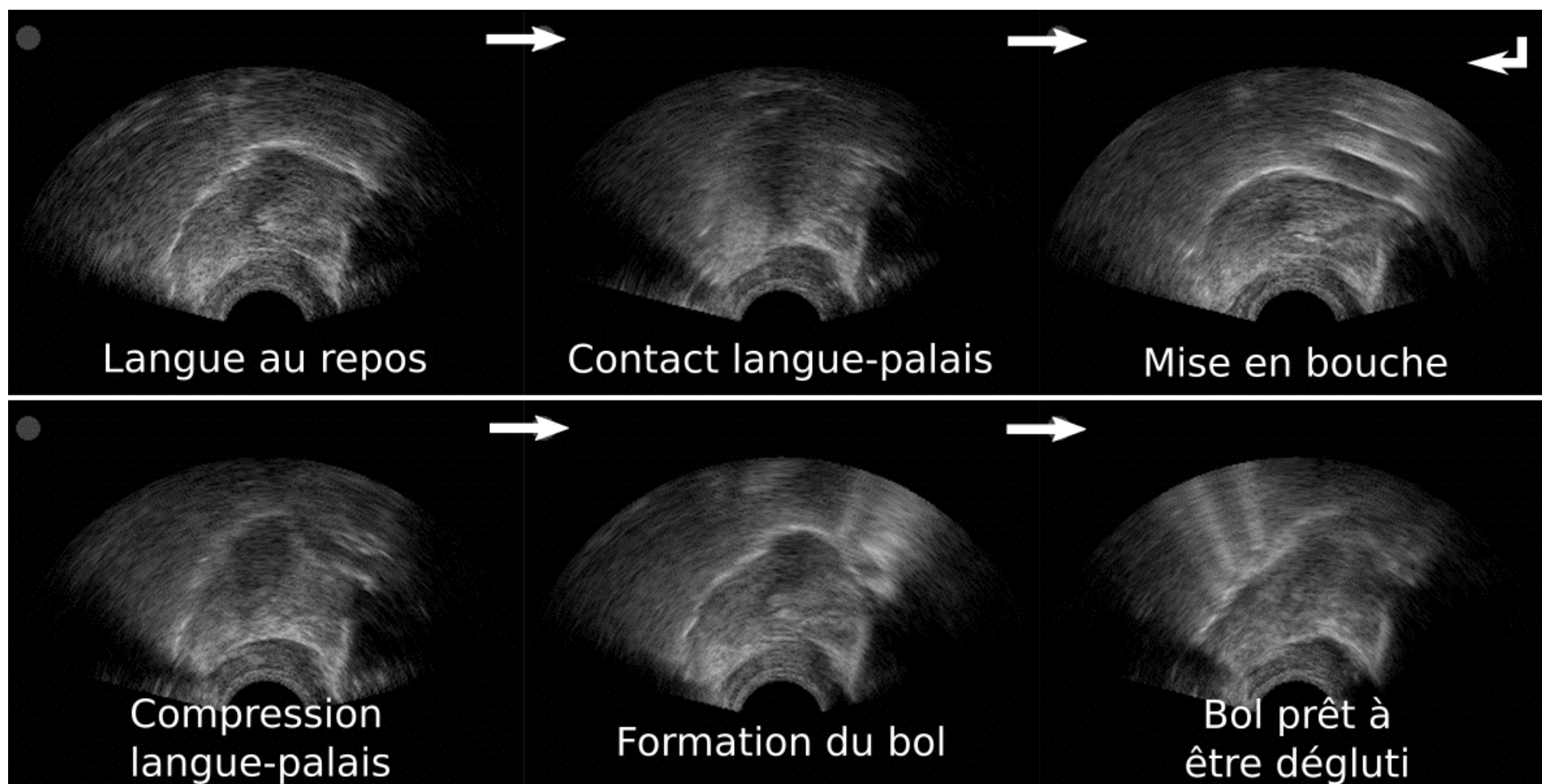


FIGURE 8.2 – Représentation de la cavité orale et du champ de vue (en bleu) de la sonde échographique utilisée (a). Image échographique obtenue par le dispositif d'imagerie (b).

librement jusqu'à la déglutition.

Des images ont été extraites des séquences échographiques pour chaque étape du protocole de consommation évoqué précédemment. Elles sont présentées à la figure 8.3 pour l' $Ag_{0.3}$ à différents temps du processus oral. La figure 8.4 représente une comparaison des images obtenues pour le gel d'Agar $Ag_{0.3}$ et le gel de gélatine Ge_7 .

FIGURE 8.3 – Évolution du système langue-Ge₇-palais évaluée *in situ* par échographie US.

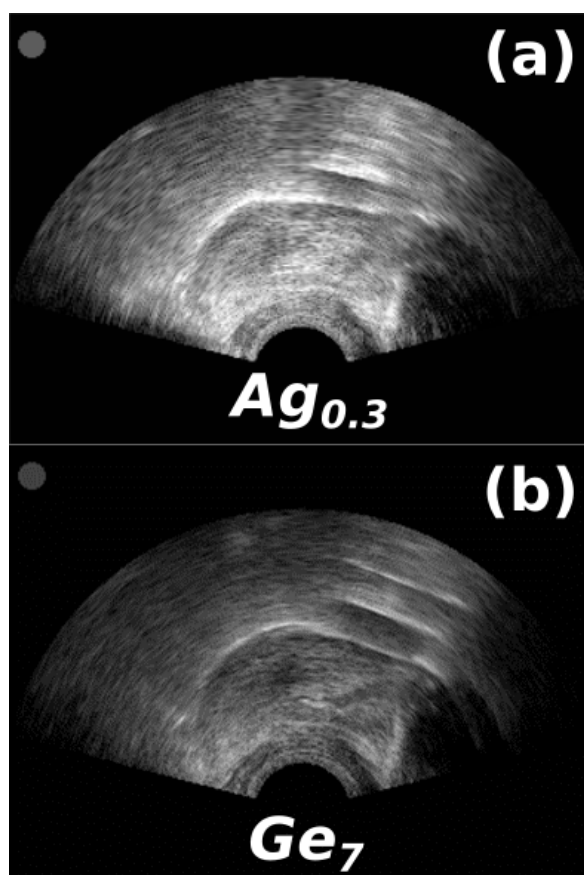


FIGURE 8.4 – Images échographiques de la cavité orale lors de la mise en bouche du produit $Ag_{0.3}$ (a) et du produit Ge_7 (b).

Les images échographiques obtenues montrent qu'à part lors de l'étape de mise en contact entre la langue et le palais avant la mise en bouche de l'échantillon, la surface de la langue génère un écho visible à toutes les étapes du processus imposé pour la consommation de l'aliment. Ces observations sont donc encourageantes quant à la possibilité d'accéder à l'écho de l'interface langue-aliment tout au long du processus oral.

De plus, lorsque l'on compare les images obtenues pour les deux produits lors de l'étape de mise en bouche (Figure 8.4), on peut constater un meilleur contraste de l'écho de l'interface langue-aliment (et des rebonds successifs) dans le cas du gel Ge_7 . Ces observations confortent les résultats obtenus sur le système biomimétique avec les langues déformables (voir chapitre 6). En effet, l'observation de l'interface langue-aliment avait alors pu être expliquée par le couplage mécanique entre les rugosités de la surface de la langue et l'aliment (dont les impédances acoustiques sont pourtant très proches). Les mesures avaient ainsi révélé des valeurs de coefficient de réflexion à l'interface langue-aliment significativement plus importantes pour le gel Ge_7 . La faible rigidité et la forte adhésivité du gel $Ag_{0.3}$, combinées à sa capacité à lubrifier l'interface par le relargage de l'eau qu'il contient permettaient d'expliquer les niveaux de réflectivité ultrasonores plus faibles observés pour ce produit, et qui semblent se confirmer par ces mesures *in vivo*. Bien sûr, il ne s'agit là que d'observations préliminaires, qui devront être consolidées avec des répétitions, puis étendues à l'étude d'autres volontaires et sur une gamme plus large de produits.

Les images d'échographie permettent également d'observer de façon globale la transfor-

mation progressive de l'aliment en bol alimentaire tout au long de la phase orale. Cette dynamique de formation du bol peut être visualisée en mode-M. Ce mode consiste, en partant de l'image ultrasonore (mode-B), à extraire l'équivalent d'un signal (un trait sur l'image), puis à en suivre l'évolution en fonction du temps, et à le représenter sous la forme d'une image en niveaux de gris. L'axe des ordonnées correspond au temps de propagation de l'onde (dont la résolution dépend de la résolution de l'image ultrasonore) et l'axe des abscisses est le temps écoulé durant l'expérience (dont la résolution dépend de la cadence d'imagerie de l'appareil). La Figure 8.5 illustre un traitement des images réalisé sous ImageJ™ v.1.47 (National Institutes of Health, Bethesda, MA, USA) dans le cas de la compression d'un gel de type $Ag_{0.3}$. Deux modes-M ont été représentés : le premier en partie postérieure de la langue selon un axe traversant l'os hyoïde, le second en partie antérieure de la langue, juste derrière la mandibule. Les deux représentations permettent ainsi de suivre respectivement les mouvements de l'os hyoïde et de la surface de la langue au cours de la consommation des produits. Ce mode de représentation a déjà été utilisé dans la littérature pour étudier la déglutition (Peng et al., 2000) ou encore la consommation de produits semi-solides (de Wijk et al., 2006a).

Au cours des chapitres précédents, nous avons pu observer que les produits $Ag_{0.3}$ et Ge_7 ont montré des comportements mécaniques très différents : le gel $Ag_{0.3}$ a un faible module de Young avec un taux de déformation à la rupture de 40%, tandis que les essais conduits sur le gel Ge_7 n'ont pas permis de le conduire à la rupture. Les images de mode-M issues de la Figure 8.5 permettent d'observer (pour le gel $Ag_{0.3}$) chaque phase du protocole de consommation. Le premier évènement correspond, avant la mise en bouche de l'aliment, au moment où il est demandé au volontaire de placer sa langue au contact du palais. Cette séquence est caractéristique de la forme de l'image au moment d'une compression langue-palais. On peut alors voir sur l'image un rehaussement de la surface de la langue. Une fois l'aliment mis en bouche, on constate au contraire un léger affaissement de la surface de la langue, juste avant la première compression, imposée par le protocole de consommation. Pour la phase suivant la compression de l'aliment par la langue, qui correspond à la phase « libre » du protocole de consommation, on peut noter 4 compressions rapprochées de l'aliment entre langue et palais, avant que celui-ci ne soit conduit en direction du pharynx pour la déglutition. Le mode-M correspondant au cas du gel Ge_7 n'a pas été représenté ici en raison de la phase libre du protocole, dont la durée s'est révélée significativement plus longue (environ 35 secondes, contre 5 secondes pour $Ag_{0.3}$), limitant la visibilité de la figure. Pour les deux types de gels, nous avons pu noter que le suivi des mouvements de l'os hyoïde (qui présente des propriétés fortement échogènes) coïncident avec les mouvements de la langue liés à la compression contre le palais ou encore à la déglutition. Ces outils présentent donc un intérêt pour le suivi des séquences de mouvement de la langue au cours du processus oral. Ils pourraient ainsi être mis en œuvre pour faire du lien avec la méthode sensorielle de dominance temporelle des mouvements (DTM) développée au cours de la thèse.

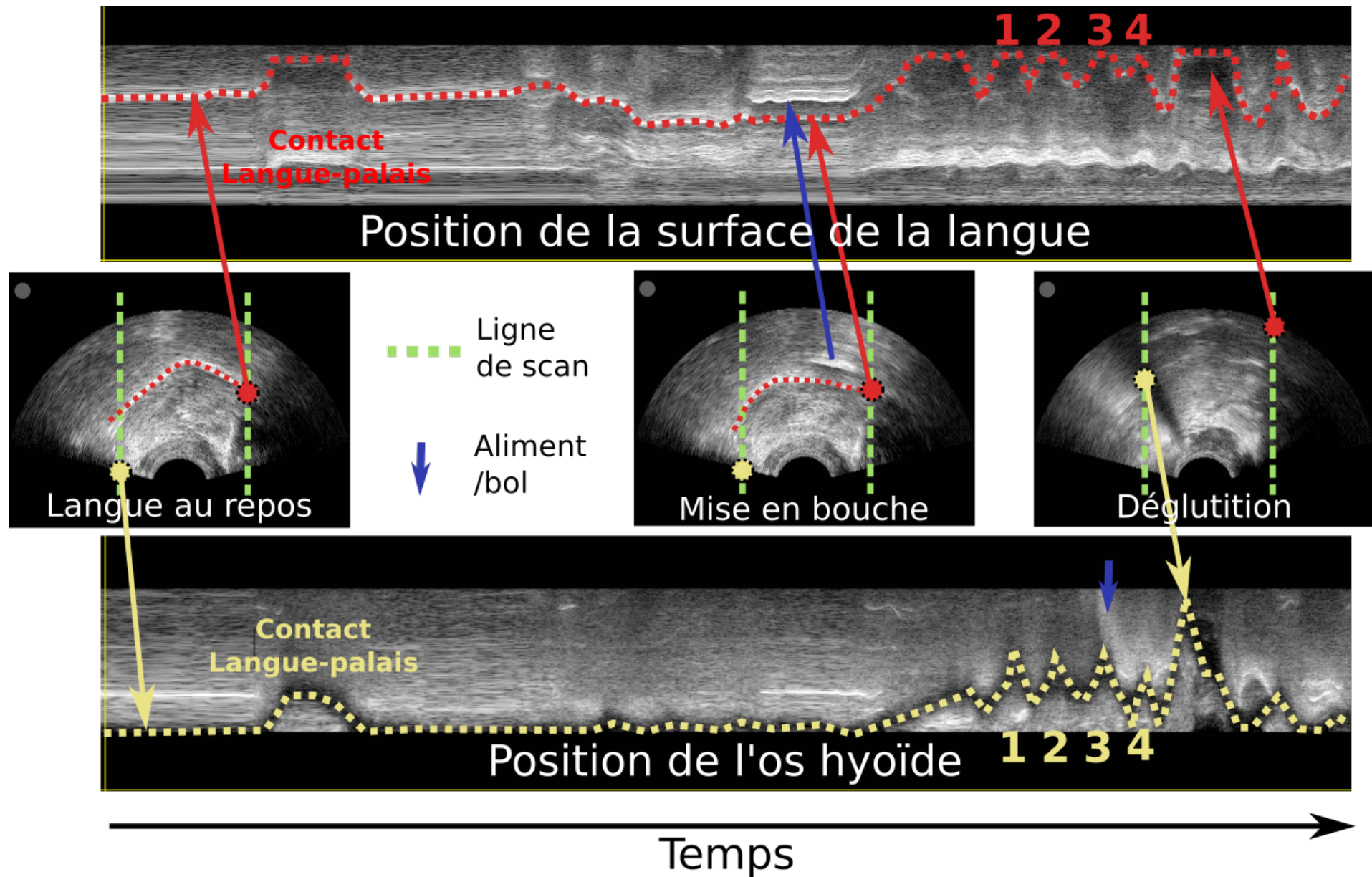


FIGURE 8.5 – Représentation en mode-M d'une séquence d'échographie acquise lors de la consommation d'un échantillon de gel $Ag_{0.3}$. Les lignes rouges et jaunes ont été tracées afin de guider le lecteur pour suivre respectivement la surface de la langue et la position de l'os hyoïde au cours du processus oral.

De plus, la représentation en mode-M peut également être confrontée aux séquences d'acquisitions ultrasonores réalisées en conditions *in vitro*. En effet, il est possible d'assembler bout à bout l'ensemble des signaux acquis en fonction du temps au cours d'une compression pour former une image correspondant à un mode-M. La Figure 8.6.b représente ainsi la visualisation en mode-M de la compression uni-axiale d'un échantillon de gel $Ag_{0.3}$ réalisée en conditions *in vitro* sur le système biomimétique. Ces expériences peuvent être mises en relation avec le mode-M de la séquence de compression uni-axiale imposée au volontaire lors des mesures *in vivo*. Une des différences entre les figures 8.6.a et 8.6.b (Figure 8.6.a et Figure 8.6.b) vient du fait qu'en conditions *in vivo*, la langue se déplace pour imposer la compression alors qu'*in vitro*, la compression est imposée par le déplacement du palais. L'analyse du profil de vitesse de déplacement de la langue issue des expériences réalisées *in vivo* pourrait servir de référence pour paramétrer *in vitro* une séquence de compression qui soit plus représentative d'un mouvement réel. De plus, le point commun entre la Figure 8.6.a et la Figure 8.6.b est la faible intensité de l'écho langue-aliment (moins blanc) comparé à celle de l'écho aliment-palais (plus blanc), indiquant une interaction langue-aliment similaire. Cette observation conforte, une fois de plus, le choix des langues déformables en PVA lors des essais *in vitro*.

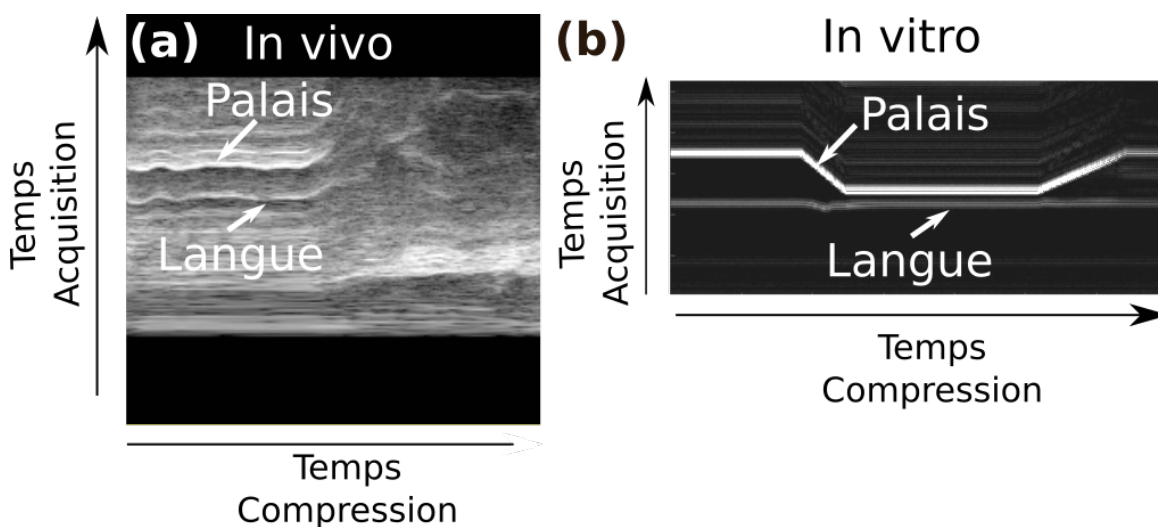


FIGURE 8.6 – Comparaison des représentations en mode-M d'une séquence d'acquisition US pour le produit $Ag_{0.3}$ pendant une compression en conditions *in vivo* (a) et *in vitro* (b) sur une langue déformable en PVA ($D_{contr R_2}$).

En conclusion, ces essais préliminaires ont permis de valider la faisabilité de la visualisation de l'écho de l'interface langue-aliment tout au long du processus oral. Ces résultats sont donc encourageants quant au potentiel de transfert de la méthode en conditions *in vivo*. Bien sûr, de nombreuses questions restent encore à traiter pour envisager une mesure fiable et robuste de paramètres quantitatifs comme des coefficients de réflexion ou des temps de vol. Les mesures *in vivo* qui traduisent le comportement réel du consommateur peuvent contribuer à lever ces verrous, notamment en fournissant des données de référence (comme la trajectoire ou la déformation de la langue) à prendre en compte pour l'évolution du système biomimétique.

8.3 Elastographie du système langue-aliment-palais

Au cours de la thèse, la question s'est posée de prendre en compte l'élasticité de la langue sur le système biomimétique. Or, la langue est un milieu complexe : hétérogène, anisotrope, et dont les propriétés mécaniques sont instables dans le temps (par exemple entre l'état relâché et l'état contracté). Aussi, la littérature fait remonter la difficulté technique que représente la caractérisation d'une propriété comme le module de Young, pourtant a priori simple. L'une des principales limites est le manque de méthodes disponibles pour pouvoir effectuer la caractérisation *in situ*. L'élasticité de la langue humaine est une propriété propre à l'Homme, découlant de sa morphologie, de son anatomie, ou encore de son mode d'alimentation. Et, les rares mesures réalisées ex vivo sur l'homme ne permettent d'obtenir que des ordres de grandeur, en partie biaisés par la rigidité cadavérique.

Le chapitre 3 a permis de confirmer le fait que les méthodes ultrasonores mettant en œuvre des ondes de compression ne sont pas pertinentes pour caractériser l'élasticité de milieux mous ou semi solides comme la langue ou les gels alimentaires. En étudiant des modèles de langues déformables dans le chapitre 6, il a été possible d'observer par ultrasons les déformations subies par la langue et l'aliment au cours d'une compression. L'amplitude des déformations est la conséquence de la rigidité, mais les mesures effectuées jusqu'alors ne permettent pas de remonter directement à ces informations. De plus, en raison des régimes de grandes déformations liés au processus oral, la rigidité de la langue et de l'aliment évolue au cours du temps.

Les méthodes d'élastographie développées au cours des dernières années pourraient cependant permettre de relever en partie ce défi. L'élastographie est une méthode utilisée essentiellement dans le domaine biomédical pour mesurer l'élasticité des tissus biologiques au sein d'organes. Pour ce faire, le principe de l'élastographie repose sur l'observation des mouvements au sein d'un milieu, suite à l'application d'une force extérieure qui va le perturber. La technique varie selon le type de perturbation induite, qui peut être statique ou dynamique.

Le régime statique repose sur l'application d'une contrainte sur un milieu, puis sur l'analyse du champ des déformations induites par la contrainte à l'aide d'une méthode d'imagerie. L'analogie peut ainsi être faite avec les analyses faites grâce à la méthode ultrasonore développée au cours de la thèse. En effet, à partir des données sur la contrainte imposée au cours d'une compression et sur la déformation qui en résulte (mesurée par ultrasons), il est possible de remonter à l'élasticité globale de l'aliment et de la langue. Cependant, l'élastographie statique va plus loin, en permettant d'obtenir une cartographie de l'élasticité au niveau local dans le milieu étudié. Ceci est rendu possible par l'observation du champ de déplacement des hétérogénéités du milieu (par corrélation bi-dimensionnelle des images), qui sont responsables de tâches sur l'image échographique (« speckle »). L'une des limitations de cette approche est qu'elle nécessite une connaissance fiable de la contrainte appliquée au milieu étudié.

Dans le cas du régime dynamique, la contrainte appliquée peut être une excitation continue (à une fréquence déterminée) ou une impulsion mécanique brève (on parle d'élastographie impulsionnelle). Dans les deux cas, cette perturbation mécanique va induire la

formation d'ondes mécaniques. Parmi ces ondes générées, on peut observer des ondes de cisaillement, dont la vitesse de propagation c_s (de l'ordre de 1 à 50 m.s⁻¹) est directement reliée au module de cisaillement G dans le milieu ($G = \rho \cdot c_s^2$). Or, dans les tissus mous, le module de Young peut s'écrire simplement en fonction du module de cisaillement ($E = 3.G$). La cartographie du champ de vitesse des ondes de cisaillement permet ainsi de remonter à une cartographie de l'élasticité au sein du milieu étudié. Ces méthodes dynamiques permettent une meilleure résolution que les méthodes statiques, mais elles nécessitent un matériel plus complexe. En effet, elles requièrent à la fois un système de génération des ondes de cisaillement et une méthode d'imagerie rapide afin de les détecter (imagerie ultrasonore ou imagerie par résonance magnétique).

Au cours de la thèse, nous avons eu la chance de pouvoir réaliser des essais préliminaires sur un dispositif d'élastographie ultrasonore impulsionnelle grâce à l'invitation de Jean-Luc Gennisson (UMR 8081 IR4M Paris Sud – CNRS) au Service Hospitalier Joliot Curie (Orsay). L'originalité de l'appareil utilisé (AixPlorer, SuperSonic Imagine, Aix-en-Provence, France) est qu'une seule et même sonde permet la génération des ondes de cisaillement et leur détection par échographie ultrarapide (jusqu'à 20 000 images par seconde). L'étude a d'abord porté sur la caractérisation de deux langues artificielles de PVA (mises en œuvre au chapitre 6 de la thèse). Ces deux échantillons diffèrent par le nombre de cycles de congélation/décongélation qui leur a été imposés (2 ou 6) et qui leur confèrent différents niveaux de rigidité. La Figure 8.7 illustre le type d'images que l'on peut observer, où sont superposées en niveaux de gris l'image morphologique issue de l'échographie ultrasonore, et en couleur l'image de la cartographie de l'élasticité dans les deux types d'échantillons. Des régions d'intérêt (pointillées noirs sur les images) ont été définies afin de calculer des valeurs moyennes et d'écart-type pour le module de Young dans chaque type d'échantillon. Pour faciliter le suivi de la propagation des ondes de cisaillement, les mesures d'élasticité par élastographie nécessitent la présence de diffuseurs au sein des milieux sondés. Des zones de mesures, denses en diffuseurs ont ainsi été définies. Les valeurs de module de Young obtenues sont de 18.3 ± 2.1 kPa et 117.2 ± 9.4 kPa pour les échantillons ayant subi respectivement 2 et 6 cycles de congélation/décongélation.

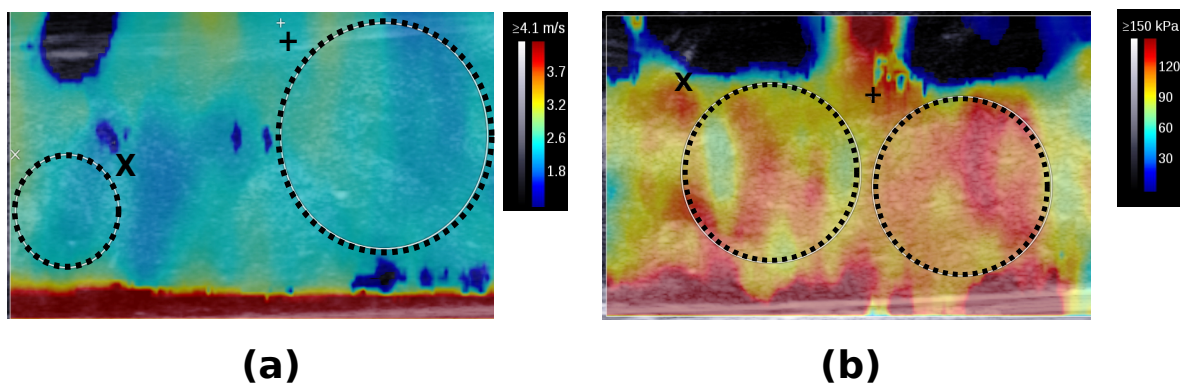


FIGURE 8.7 – Cartographie d'élasticité des langues en PVA réalisées par élastographie. (a) 2 cycles de congélations/décongélation (C_2) 18.5 ± 1.9 kPa pour la zone X et 18.3 ± 2.1 kPa pour la zone +. (b) Langue en PVA ayant subi 6 cycles de congélations/décongélation (C_6), 103.5 ± 12.7 kPa pour la zone X et 117.2 ± 9.4 kPa pour la zone +.

Les mesures d'élasticité ont également été effectuées sur quatre volontaires auxquels il

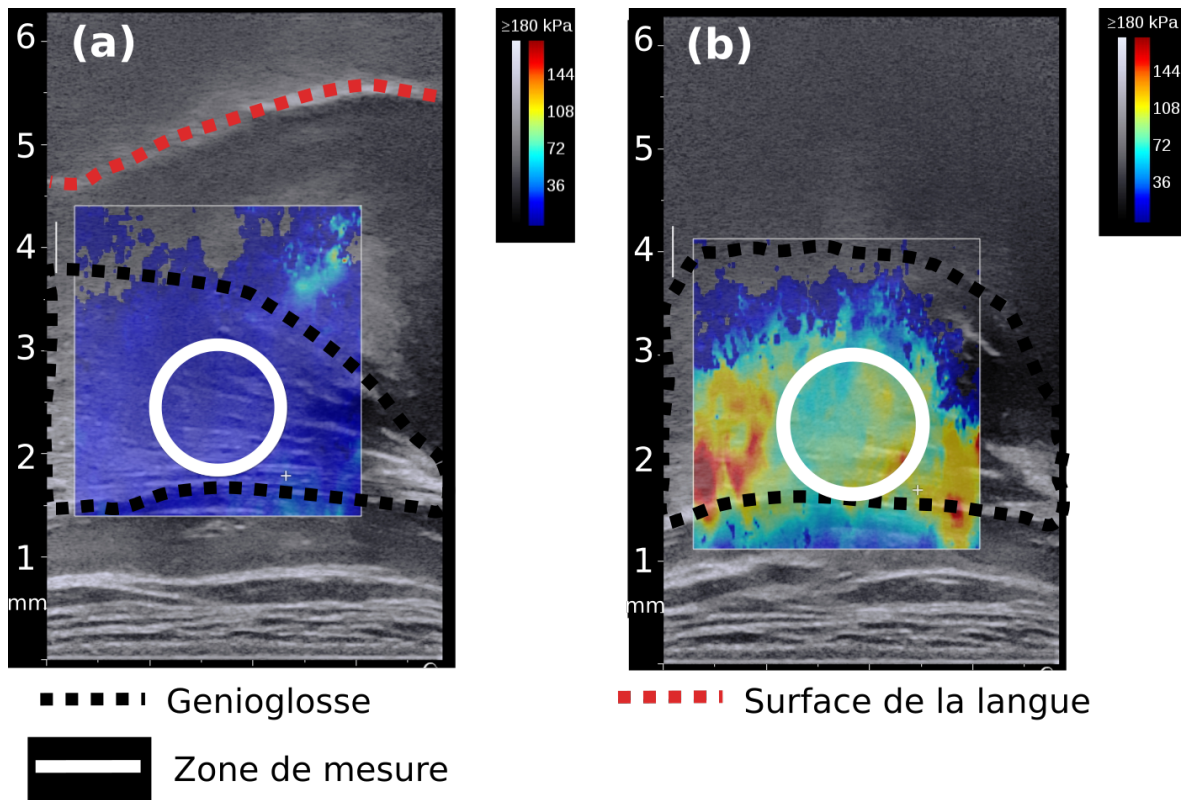


FIGURE 8.8 – Cartographie *in vivo* de l'élasticité d'une langue et indication des muscles observés pour (a) une langue au repos et (b) une langue au travail. Les modules d'Young sont mesuré à l'intérieur de la zone de mesure.

a d'abord été demandé de laisser la langue à l'état relâché, avant de la comprimer au plus fort de leur capacité. La Figure 8.8 illustre les images obtenues pour les deux configurations sur un même volontaire. Les valeurs moyennes d'élasticité évaluées en conditions *in vivo* sont : au repos de 14 ± 3.8 kPa et à l'état contracté de 110 ± 26.9 kPa. Ces résultats nous ont ainsi permis de valider la rigidité des langues artificielles de PVA utilisées dans le chapitre 6.

Au-delà de cette validation, ces premiers essais ont permis d'affirmer un potentiel intéressant des méthodes d'élastographie ultrasonore. Un premier intérêt est évidemment la possibilité d'effectuer des mesures en conditions *in vivo*. Cependant, l'implémentation de la méthode sur le système biomimétique pourrait également, dans un environnement contrôlé, permettre d'aller plus loin dans la caractérisation fine du système langue-palais à différentes étapes de la déconstruction de l'aliment. Les techniques d'élastographie n'ont cessé de progresser durant les dernières décennies. Les avancées à venir pour les prochaines années permettront certainement d'effectuer du suivi en temps réel, en améliorant encore les cadences d'évaluation de l'élasticité, qui sont pour le moment limitées à quelques images par seconde.

Conclusion générale et perspectives

L'objectif principal de ces travaux de thèse était de démontrer l'applicabilité des méthodes ultrasonores pour étudier et caractériser, en temps réel et en conditions *in situ*, des phénomènes physiques résultant de l'interaction entre la langue et l'aliment au cours du processus oral. De telles techniques pourraient, à terme, être utilisées en conditions *in vivo* sur le consommateur, et venir en appui de l'analyse sensorielle pour mieux comprendre l'impact de la formulation d'aliments nouveaux sur les cinétiques de perception de texture.

Bien que différentes méthodes ultrasonores aient déjà pu être mises en œuvre pour l'étude de la cavité orale, ou encore pour suivre les procédés de transformation de l'aliment, le suivi par ultrasons de la déconstruction de l'aliment durant le processus oral constitue une approche novatrice. Un dispositif biomimétique du système langue-palais a été conçu pour répondre à l'objectif de la thèse. Le potentiel de la méthode ultrasonore a ainsi été étudié dans un environnement contrôlé, qui a permis de progressivement prendre en compte et évaluer la contribution de différents paramètres physiologiques.

La première partie du travail a consisté à développer un ensemble d'aliments modèles pertinents pour l'étude des mécanismes de perception de texture entre la langue et le palais. Sur la base d'une analyse de la littérature, des systèmes de gels mixtes d'agar et de gélatine ont été mis au point. Ces systèmes présentent différents leviers de formulation, permettant d'agir de façon contrôlée sur leurs propriétés mécaniques et structurales, et de leur conférer une large diversité de réponses sensorielles. La première mise en œuvre des méthodes ultrasonores a eu pour but de comprendre l'impact des propriétés mécaniques et structurales de ces aliments modèles sur les variations de différents paramètres mesurables par ultrasons quantitatifs. L'émergence de ces propriétés mécaniques et structurales lors de la gélification nous a conduit à développer une cellule de mesure, afin de suivre l'évolution de trois paramètres durant la transition sol-gel : la réflectivité à l'interface entre la cellule de mesure (PVC) et l'aliment, mais également la vitesse de propagation et l'atténuation des ondes dans l'aliment. Ce travail de caractérisation préliminaire a permis de conclure, pour la gamme de produits étudiés, quant au rôle dominant du module d'élasticité isostatique dans les variations de vitesse et de réflectivité ultrasonore lors du passage de l'état liquide à l'état gel. Par ailleurs, des changements de conformation au sein des réseaux de polymères ont pu être observés dans certains cas (forte teneur en gélatine, séparation de phase entre agar et gélatine) par la mesure de l'atténuation ultrasonore. Cependant, l'étude montre que les variations des propriétés ultrasonores à travers l'espace des produits considérés restent modérées. Dans l'optique de suivre l'interface entre la langue et l'aliment, un obstacle à l'utilisation de la vitesse et de l'atténuation ultrasonore est la nécessité d'avoir accès en temps réel à la distance entre les interfaces. L'étude permet ainsi de conclure sur la pertinence de

développer des indicateurs quantitatifs dépendant exclusivement des propriétés du signal ultrasonore, à l'image de la réflectivité.

La suite du travail a consisté à étudier, toujours en conditions contrôlées *in vitro*, l'impact des propriétés de surface de la langue sur la réponse ultrasonore de l'interface langue-aliment lors de la mise en contact d'échantillons de gels sur la surface d'une langue non-déformable offrant différentes propriétés de surface (rugosités et lubrification). Dans un premier temps, le choix a été fait de négliger la déformabilité de la langue et de ne pas appliquer de contraintes à l'aliment. Ces conditions simplifiées et contrôlées favorisent la compréhension de la réponse ultrasonore du système, tout en faisant sens du point de vue physiologique, lorsque l'on compare cette configuration à la mise en bouche de l'aliment et à son dépôt sur la surface de la langue. Les résultats ont ici permis de montrer que les propriétés de la langue (rugosité, lubrification) et de l'aliment ont un impact sur le coefficient de réflexion de l'interface langue-aliment. Les variations de réflectivité mesurées ne peuvent pas s'expliquer par les différences mineures d'impédance acoustique entre les deux milieux (mises en évidence au chapitre précédent), mais correspondent à la qualité du couplage mécanique entre les deux milieux. La mesure du coefficient de réflexion à l'interface entre la langue et l'aliment permet ainsi une mesure indirecte de la surface de contact intime à l'interface. Cette surface peut être influencée (i) par la déformabilité et l'adhésivité du gel qui la conduisent à épouser les aspérités de la surface de la langue, ou encore (ii) par la lubrification de la langue et la capacité du gel à libérer de l'eau et ainsi faire le continuum entre l'aliment et la surface de la langue.

Après l'étude de la phase de mise en contact, les travaux se sont poursuivis en s'intéressant au suivi d'une compression uni-axiale des gels sur les mêmes langues non déformables. Il s'agissait alors de mimer la première compression entre la langue et le palais après la mise en bouche de l'aliment. Une grande diversité de profils de variation de la réflectivité ultrasonore de l'interface langue-aliment a pu être observée au cours de la compression des différents types de gels. Cette compression permet d'améliorer la qualité du couplage acoustique à l'interface avec la langue dans le cas où celui-ci n'est pas optimal dès la phase de mise en contact. Par ailleurs, les phénomènes de fracture observés pour certains gels en cours de compression ont donné lieu à des hausses soudaines du coefficient de réflexion, qui traduisent un détachement entre la langue et l'aliment lié aux mécanismes de relaxation mécanique. Ainsi, le type de bio polymère et leur concentration au sein des différents gels influencent l'évolution de la surface de contact intime entre la langue et l'aliment.

La prise en compte de la déformabilité de la langue est une étape essentielle pour se rapprocher des conditions physiologiques de l'interaction mécanique entre la langue et l'aliment. Du point de vue de l'analyse ultrasonore, elle entraîne le déplacement de l'ensemble des échos observés sur les signaux, et se traduit par deux principales conséquences. D'une part, elle complexifie la détection et l'analyse des signaux et implique des développements méthodologiques pour adapter le traitement du signal à une configuration plus réaliste. D'autre part, elle offre la possibilité d'explorer le potentiel de nouveaux indicateurs relatifs aux déplacements de ces échos, qui traduisent les états respectifs de déformation de la langue et de l'aliment. Cette étude de faisabilité a été menée sur deux des huit références

de gels étudiées auparavant. Elle a d'abord permis de conforter, dans une configuration plus représentative de la physiologie orale, le potentiel de la réflectivité ultrasonore pour suivre l'évolution du contact intime entre la langue et l'aliment au cours d'une compression. Mais elle a également permis de développer un indicateur relatif au temps de vol de l'onde ultrasonore dans l'aliment. Cet indicateur permet de décrire en temps réel l'impact d'un mouvement de compression sur l'évolution des taux de déformation subis par la langue et l'aliment, et à les mettre en lien avec la rigidité de l'aliment mais également avec sa contrainte et sa déformation à la rupture.

Les travaux menés avec le système d'analyses ultrasonores sur le dispositif biomimétique ont ainsi permis de suivre de façon non-invasive différents mécanismes physiques intervenant à l'interface entre la langue et l'aliment. Il était ensuite important d'étudier si ces mécanismes pouvaient être mis en relation avec des perceptions de texture. Une étude sensorielle a donc été réalisée sur un panel de juges entraînés, avec les huit références de gels mixtes d'agar et de gélatine. Une méthode sensorielle innovante a été développée, consistant à décrire et confronter l'évolution au cours du processus oral, des perceptions de texture avec celle des mouvements et mécanismes au cours du processus oral avec l'évolution de la déconstruction de l'aliment. Cette méthode a permis de valider l'importance des mouvements de la langue, et en particulier de la compression entre langue et palais, dans le processus de déconstruction orale des gels étudiés au cours de la thèse. Elle a par ailleurs permis de mettre en évidence l'importance, à la fois de certains mécanismes du processus oral et du type de gels, sur les descripteurs « cassant » et « friable ». Des séquences spécifiques du processus oral et des descripteurs sensoriels ont pu ainsi être définis et appliqués, dans un deuxième temps, à la réalisation d'un profil sensoriel. Ce dernier a permis de caractériser l'intensité perçue pour différents attributs de perception de texture, à différents moments du processus oral, selon un protocole de dégustation imposé cohérent avec les phases étudiées *in vitro*. A la mise en bouche, comme lors de la compression, des corrélations ont ainsi pu être mises en évidence entre les valeurs de coefficient de réflexion à l'interface langue-aliment et les intensités perçues pour les sensations d'humide, de glissant, ou encore de tenue mécanique des gels.

Les travaux réalisés durant ces trois années de thèse ont permis de valider le potentiel des méthodes ultrasonores pour suivre en temps réel, de façon non invasive et non destructive différents mécanismes physiques se produisant à l'interface entre la langue et l'aliment, et susceptibles de contribuer à mieux comprendre l'origine des perceptions de texture. Ils offrent ainsi de nombreuses perspectives, à commencer par compléter les études de preuve de concept décrites dans ce travail pour mieux capitaliser sur les nombreux développements méthodologiques qui ont constitué une part très importante du travail de la thèse. Une meilleure compréhension des mécanismes physiques qui influencent la réponse ultrasonore du système biomimétique passe également par la mise en relation des données avec d'autres approches de caractérisation physique : des mesures de tribologie pour les phénomènes de frottement, des mesures de mouillabilité pour les mécanismes de lubrification, ou encore des mesures de type Tack pour les problématiques d'adhésion. Enfin, le système biomimétique pourra évoluer afin d'étendre son utilisation à différents types d'aliments, mais également pour continuer à se rapprocher progressivement de conditions réalistes par

rapport à l'environnement physiologique : considérer des mouvements plus complexes combinant compression et cisaillement, prendre en compte l'hétérogénéité et l'anisotropie de la langue, ou encore intégrer la complexité morphologique de la langue et du palais. Ces différentes perspectives permettront ainsi de lever les verrous techniques et scientifiques pour, à terme, étudier les mécanismes responsables des perceptions de texture directement sur le consommateur.

Références

- Abd-El-Malek, S. (1939). Observations on the morphology of the human tongue. *Journal of Anatomy*, 73(Pt 2) :201. [10](#), [90](#)
- Afifi, H. A. (2003). Ultrasonic Pulse Echo Studies of the Physical Properties of PMMA, PS, and PVC. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 42(2) :193–205. [53](#)
- Allegra, J. R. and Hawley, S. A. (1972). Attenuation of Sound in Suspensions and Emulsions : Theory and Experiments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 51(5B) :1545–1564. [85](#)
- Anvari, M. and Joyner (Melito), H. S. (2017). Effect of formulation on structure-function relationships of concentrated emulsions : Rheological, tribological, and microstructural characterization. *Food Hydrocolloids*, 72 :11–26. [34](#)
- Anvari, M., Tabarsa, M., and Joyner (Melito), H. S. (2018). Large amplitude oscillatory shear behavior and tribological properties of gum extracted from *Alyssum homolocarpum* seed. *Food Hydrocolloids*, 77 :669–676. [34](#)
- Ares, G., GonçAlvez, D., PéRez, C., Reolón, G., Segura, N., Lema, P., and Gámbaro, A. (2007). Influence of gelatin and starch on the instrumental and sensory texture of stirred yogurt. *International Journal of Dairy Technology*, 60(4) :263–269. [104](#)
- Arnott, S., Fulmer, A., Scott, W. E., Dea, I. C. M., Moorhouse, R., and Rees, D. A. (1974). The agarose double helix and its function in agarose gel structure. *Journal of Molecular Biology*, 90(2) :269–284. [152](#)
- Audebrand, M., Doublier, J. L., Durand, D., and Emery, J. R. (1995). Investigation of gelation phenomena of some polysaccharides by ultrasonic spectroscopy. *Food Hydrocolloids*, 9(3) :195–203. [45](#), [68](#), [83](#), [85](#)
- Audebrand, M., Kolb, M., and Axelos, M. A. V. (2006). Combined Rheological and Ultrasonic Study of Alginate and Pectin Gels near the Sol-Gel Transition. *Biomacromolecules*, 7(10) :2811–2817. [83](#)
- Awad, T., Moharram, H., Shaltout, O., Asker, D., and Youssef, M. (2012). Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food : A review. *Food Research International*, 48(2) :410–427. [67](#), [68](#), [92](#), [109](#)

- Bamber, J. C. and Hill, C. R. (1979). Ultrasonic attenuation and propagation speed in mammalian tissues as a function of temperature. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 5(2) :149–157. 00265. [53](#)
- Banerjee, S. and Bhattacharya, S. (2011). Compressive textural attributes, opacity and syneresis of gels prepared from gellan, agar and their mixtures. *Journal of Food Engineering*, 102(3) :287–292. [135](#), [153](#)
- Barrangou, L. M., Drake, M., Daubert, C. R., and Foegeding, E. A. (2006a). Textural properties of agarose gels. II. Relationships between rheological properties and sensory texture. *Food Hydrocolloids*, 20(2-3) :196–203. [36](#)
- Barrangou, L. M., Drake, M. A., Daubert, C. R., and Foegeding, E. A. (2006b). Sensory texture related to large-strain rheological properties of agar/glycerol gels as a model food. *Journal of Texture Studies*, 37 :241–262. [30](#), [155](#)
- Berchiesi, G., Amico, A., Vitali, G., Amici, L., and Litargini, P. (1987). Ultrasonic investigation in aqueous solutions of sucrose. *Journal of Molecular Liquids*, 33(2) :157–181. [69](#), [78](#)
- Bongaerts, J. H. H., Rossetti, D., and Stokes, J. R. (2007). The Lubricating Properties of Human Whole Saliva. *Tribology Letters*, 27(3) :277–287. 00133. [12](#), [154](#)
- Boral, S., Saxena, A., and Bohidar, H. (2010). Syneresis in agar hydrogels. *International Journal of Biological Macromolecules*, 46(2) :232–236. [102](#), [135](#), [153](#)
- Brossard, N., Cai, H., Osorio, F., Bordeu, E., and Chen, J. (2016). “Oral” Tribological Study on the Astringency Sensation of Red Wines : Oral Tribological Study on Astringency Sensation. *Journal of Texture Studies*, 47(5) :392–402. [34](#)
- Bukowska, M., Essick, G. K., and Trulsson, M. (2010). Functional properties of low-threshold mechanoreceptive afferent in the human labial mucosa. *Experimental Brain Research*, 201(1) :59–64. [13](#), [90](#), [108](#)
- Çakır, E., Daubert, C. R., Drake, M. A., Vinyard, C. J., Essick, G., and Foegeding, E. A. (2012). The effect of microstructure on the sensory perception and textural characteristics of whey protein/ κ -carrageenan mixed gels. *Food Hydrocolloids*, 26(1) :33–43. [20](#), [30](#), [37](#)
- Çakır, E. and Foegeding, E. A. (2011). Combining protein micro-phase separation and protein–polysaccharide segregative phase separation to produce gel structures. *Food Hydrocolloids*, 25(6) :1538–1546. [30](#), [36](#)
- Camacho, S., den Hollander, E., van de Velde, F., and Stieger, M. (2015). Properties of Oil/Water Emulsions Affecting the Deposition, Clearance, and After-Feel Sensory Perception of Oral Coatings. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(8) :2145–2153. [23](#), [26](#)
- Camacho, S., van Riel, V., de Graaf, C., van de Velde, F., and Stieger, M. (2014). Physical and Sensory Characterizations of Oral Coatings of Oil/Water Emulsions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(25) :5789–5795. [91](#)

- Chanamai, R., Coupland, J. N., and McClements, D. J. (1998). Effect of temperature on the ultrasonic properties of oil-in-water emulsions. *Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects*, 139(2) :241–250. [85](#)
- Chen, J. (2009). Food oral processing—A review. *Food Hydrocolloids*, 23(1) :1–25. [8](#), [9](#), [10](#), [12](#), [14](#), [16](#), [90](#), [108](#), [203](#)
- Chen, J. and Stokes, J. R. (2012). Rheology and tribology : Two distinctive regimes of food texture sensation. *Trends in Food Science & Technology*, 25(1) :4–12. WOS :000304690600001. [27](#), [32](#), [34](#), [108](#)
- Chen, J.-W., Chang, C.-H., Wang, S.-J., Chang, Y.-T., and Huang, C.-C. (2014). Submental ultrasound measurment of dynamic tongue base thickness in patients with obstructive sleep apnea. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 40(11) :2590–2598. [109](#)
- Cheng, S., Gandevia, S., Green, M., Sinkus, R., and Bilston, L. (2011). Viscoelastic properties of the tongue and soft palate using MR elastography. *Journal of Biomechanics*, 44(3) :450–454. [10](#)
- Chi-Fishman, G. (2005). Quantitative lingual, pharyngeal and laryngeal ultrasonography in swallowing research : A technical review. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 19(6-7) :589–604. [45](#), [92](#)
- Chien, C.-Y., Chen, J.-C., Chang, C.-H., and Huang, C.-C. (2017). Tracking dynamic tongue motion in ultrasound images for obstructive sleep apnea. *Ultrasound in Medicine & Biology*. [45](#), [92](#), [109](#)
- Chojnicka-Paszun, A. and de Jongh, H. (2014). Friction properties of oral surface analogs and their interaction with polysaccharide/MCC particle dispersions. *Food Research International*, 62 :1020–1028. [31](#)
- Clark, A. H., Richardson, R. K., Ross-Murphy, S. B., and Stubbs, J. M. (1983). Structural and mechanical properties of agar/gelatin co-gels. Small-deformation studies. *Macromolecules*, 16(8) :1367–1374. [76](#), [115](#)
- Cobus, L. A. E. B., Ross, K. A., Scanlon, M. G., and Page, J. H. (2007). Comparison of Ultrasonic Velocities in Dispersive and Nondispersive Food Materials. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(22) :8889–8895. [45](#), [79](#)
- Collins, L. M. C. and Dawes, C. (1987). The Surface Area of the Adult Human Mouth and Thickness of the Salivary Film Covering the Teeth and Oral Mucosa. *Journal of Dental Research*, 66(8) :1300–1302. [13](#), [57](#)
- Contreras, N. I., Fairley, P., McClements, D. J., and Povey, M. J. (1992). Analysis of the sugar content of fruit juices and drinks using ultrasonic velocity measurements. *International journal of food science & technology*, 27(5) :515–529. [69](#)
- Coupland, J. N. and McClements, D. J. (1997). Physical properties of liquid edible oils. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 74(12) :1559–1564. [79](#)

- Coupland, J. N. and McClements, D. J. (2001). Droplet size determination in food emulsions : Comparison of ultrasonic and light scattering methods. *Journal of Food Engineering*, 50(2) :117–120. [68](#), [85](#)
- de Jong, S., Klok, H. J., and van de Velde, F. (2009). The mechanism behind microstructure formation in mixed whey protein–polysaccharide cold-set gels. *Food Hydrocolloids*, 23(3) :755–764. [36](#)
- de Jong, S. and van de Velde, F. (2007). Charge density of polysaccharide controls microstructure and large deformation properties of mixed gels. *Food Hydrocolloids*, 21(7) :1172–1187. [31](#), [36](#)
- de Wijk, R., Prinz, J., and Janssen, A. (2006a). Explaining perceived oral texture of starch-based custard desserts from standard and novel instrumental tests. *Food Hydrocolloids*, 20(1) :24–34. [25](#), [31](#), [39](#), [92](#), [174](#)
- de Wijk, R. A., Janssen, A. M., and Prinz, J. F. (2011). Oral movements and the perception of semi-solid foods. *Physiology & Behavior*, 104(3) :423–428. [109](#)
- de Wijk, R. A., Wulfert, F., and Prinz, J. F. (2006b). Oral processing assessed by M-mode ultrasound imaging varies with food attribute. *Physiology & Behavior*, 89(1) :15–21. [45](#), [46](#), [204](#)
- Del Grosso, V. A. and Mader, C. W. (1972). Speed of Sound in Pure Water. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 52(5B) :1442–1446. [77](#)
- Depledt, F. and Strigler, F. (2009). *Evaluation Sensorielle : Manuel Méthodologique*. Lavoisier, 3 edition. [24](#)
- Devezeaux de Lavergne, M., Tournier, C., Bertrand, D., Salles, C., van de Velde, F., and Stieger, M. (2016). Dynamic texture perception, oral processing behaviour and bolus properties of emulsion-filled gels with and without contrasting mechanical properties. *Food Hydrocolloids*, 52 :648–660. [38](#)
- Devezeaux de Lavergne, M., van de Velde, F., and Stieger, M. (2017). Bolus matters : The influence of food oral breakdown on dynamic texture perception. *Food & Function*, 8(2) :464–480. [15](#), [23](#), [27](#), [31](#), [32](#), [155](#), [161](#), [203](#), [204](#), [211](#)
- Devezeaux de Lavergne, M., van de Velde, F., van Boekel, M. A. J. S., and Stieger, M. (2015a). Dynamic texture perception and oral processing of semi-solid food gels : Part 2 : Impact of breakdown behaviour on bolus properties and dynamic texture perception. *Food Hydrocolloids*, 49 :61–72. [8](#), [25](#), [38](#), [69](#), [87](#)
- Devezeaux de Lavergne, M., van Delft, M., van de Velde, F., van Boekel, M. A. J. S., and Stieger, M. (2015b). Dynamic texture perception and oral processing of semi-solid food gels : Part 1 : Comparison between QDA, progressive profiling and TDS. *Food Hydrocolloids*, 43 :207–217. [8](#), [22](#), [23](#), [38](#), [69](#), [70](#), [72](#), [87](#), [93](#), [141](#), [204](#)

- Devezeaux de Lavergne Marine, Strijbosch Veerle M.G., Van den Broek Annemiek W.M., Van de Velde Fred, and Stieger Markus (2015). Uncoupling the Impact of Fracture Properties and Composition on Sensory Perception of Emulsion-Filled Gels. *Journal of Texture Studies*, 47(2) :92–111. [39](#)
- Dickinson, E. (2003). Hydrocolloids at interfaces and the influence on the properties of dispersed systems. *Food Hydrocolloids*, 17(1) :25–39. [67](#)
- Dickinson, E. (2012). Emulsion gels : The structuring of soft solids with protein-stabilized oil droplets. *Food Hydrocolloids*, 28(1) :224–241. [21](#)
- Dickinson, E. (2018). Hydrocolloids acting as emulsifying agents – How do they do it? *Food Hydrocolloids*, 78 :2–14. [67](#)
- Dickinson, E., Golding, M., and Povey, M. J. W. (1997). Creaming and Flocculation of Oil-in-Water Emulsions Containing Sodium Caseinate. *Journal of Colloid and Interface Science*, 185(2) :515–529. [68](#)
- Dickinson, E., Ma, J., and Povey, M. J. W. (1994). Creaming of concentrated oil-in-water emulsions containing xanthan. *Food Hydrocolloids*, 8(5) :481–497. [68](#)
- Dies, L., Restagno, F., Weil, R., Léger, L., and Poulard, C. (2015). Role of adhesion between asperities in the formation of elastic solid/solid contacts. *The European Physical Journal E*, 38(130). [101](#)
- Dresselhuis, D., Dehoog, E., Cohenstuart, M., and Vanaken, G. (2008a). Application of oral tissue in tribological measurements in an emulsion perception context. *Food Hydrocolloids*, 22(2) :323–335. [34](#)
- Dresselhuis, D. M., Klok, H. J., Stuart, M. A. C., de Vries, R. J., van Aken, G. A., and de Hoog, E. H. A. (2007). Tribology of o/w Emulsions Under Mouth-like Conditions : Determinants of Friction. *Food Biophysics*, 2(4) :158–171. [34](#), [39](#)
- Dresselhuis, D. M., Stuart, M. A. C., van Aken, G. A., Schipper, R. G., and de Hoog, E. H. (2008b). Fat retention at the tongue and the role of saliva : Adhesion and spreading of ‘protein-poor’ versus ‘protein-rich’ emulsions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 321(1) :21–29. [12](#), [34](#), [153](#)
- Drinkwater, B. and Cawley, P. (1997). Measurement of the frequency dependence of the ultrasonic reflection coefficient from thin interface layers and partially contacting interfaces. *Ultrasonics*, 35(7) :479–488. 00026. [97](#), [100](#)
- Dufour, R., Saad, N., Carlier, J., Campistron, P., Nassar, G., Toubal, M., Boukherroub, R., Senez, V., Nongaillard, B., and Thomy, V. (2013). Acoustic Tracking of Cassie to Wenzel Wetting Transitions. *Langmuir*, 29(43) :13129–13134. [103](#)
- Dwyer-Joyce, R. S. (2005). The Application of Ultrasonic NDT Techniques in Tribology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J : Journal of Engineering Tribology*, 219(5) :347–366. [87](#)

- Dwyer-Joyce, R. S., Drinkwater, B. W., and Donohoe, C. J. (2003a). The measurement of lubricant-film thickness using ultrasound. *Proceedings of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 459(2032) :957–976. [103](#)
- Dwyer-Joyce, R. S., Drinkwater, B. W., and Donohoe, C. J. (2003b). The measurement of lubricant–film thickness using ultrasound. *Proceedings of the Royal Society of London A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 459(2032) :957–976. [118](#)
- Emery, J. R., Chatellier, J. Y., and Durand, D. (1986). Application des techniques ultrasonores à l'étude de la transition pelote-hélice dans les solutions aqueuses de gélatine. *Journal de Physique*, 47(6) :921–925. [45](#), [69](#), [79](#), [83](#), [130](#)
- Engelen, L., de Wijk, R., and Prinz, J. F. (2003). A comparison of the effects of added saliva, α -amylase and water on texture perceptions in semisolids. *Physiology & Behavior*, 78(805) :11. [12](#), [153](#)
- Epstein, M. A. and Stone, M. (2005). The tongue stops here : Ultrasound imaging of the palate. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 118(4) :2128–2131. [46](#), [204](#)
- Foegeding, E., Daubert, C., Drake, M., Essick, G., Trulsson, M., Vinyard, C., and Van De Velde, F. (2011). A Comprehensive Approach to Understanding Textural Properties of Semi- and Soft-Solid Foods. *Journal of Texture Studies*, 42(2) :103–129. [155](#), [156](#), [157](#)
- Foegeding, E. A. (2007). Rheology and sensory texture of biopolymer gels. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 12(4-5) :242–250. [18](#), [91](#)
- Foegeding, E. A., Stieger, M., and van de Velde, F. (2017). Moving from molecules, to structure, to texture perception. *Food Hydrocolloids*, 68 :31–42. 00000. [17](#), [18](#), [19](#), [21](#), [23](#), [108](#), [109](#), [203](#)
- Foegeding, E. A., Vinyard, C. J., Essick, G., Guest, S., and Campbell, C. (2015). Transforming Structural Breakdown into Sensory Perception of Texture : Food Structure Breakdown and Texture. *Journal of Texture Studies*, 46(3) :152–170. [13](#), [14](#)
- Fromageau, J., Gennisson, J.-L., Schmitt, C., Maurice, R., Mongrain, R., and Cloutier, G. (2007). Estimation of polyvinyl alcohol cryogel mechanical properties with four ultrasound elastography methods and comparison with gold standard testings. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 54(3) :498–509. [124](#)
- Funami, T. (2017). In vivo and rheological approaches for characterizing food oral processing and usefulness of polysaccharides as texture modifiers- A review. *Food Hydrocolloids*, 68 :2–14. 00000. [91](#)
- Funami, T., Ishihara, S., Nakauma, M., Kohyama, K., and Nishinari, K. (2012). Texture design for products using food hydrocolloids. *Food Hydrocolloids*, 26(2) :412–420. [37](#)
- Gadelmawla, E. S., Koura, M. M., Maksoud, T. M. A., Elewa, I. M., and Soliman, H. H. (2002). Roughness parameters. *Journal of Materials Processing Technology*, 123(1) :133–145. [57](#), [95](#)

- Gaige, T. A., Benner, T., Wang, R., Wedeen, V. J., and Gilbert, R. J. (2007). Three dimensional myoarchitecture of the human tongue determined in vivo by diffusion tensor imaging with tractography. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 26(3) :654–661. [10](#)
- Galén, S. and Jost-Brinkmann, P.-G. (2010). B-mode and M-mode Ultrasonography of Tongue Movements during Swallowing. *Journal of Orofacial Orthopedics / Fortschritte der Kieferorthopädie*, 71(2) :125–135. [45](#), [46](#), [92](#), [109](#), [204](#)
- Gao, Z., Ishihara, S., Nakao, S., Hayakawa, F., Funami, T., and Kohyama, K. (2016a). Texture Evaluation of Soft Gels with Different Fracture Strains using an Artificial Tongue : Texture evaluation of soft gels using an artificial tongue. *Journal of Texture Studies*, 47(6) :496–503. [92](#)
- Gao, Z. and Kohyama, K. (2014). Ultrasound Pulsed Wave Doppler Imaging of the Esophagus Illustrates the Effects of Water Volume on Bolus Kinematics : Ultrasound Doppler Analysis of Bolus Kinematics. *Journal of Texture Studies*, 45(5) :335–343. [92](#)
- Gao, Z., Nakao, S., Ishihara, S., Funami, T., and Kohyama, K. (2016b). A Pilot Study on Ultrasound Elastography for Evaluation of Mechanical Characteristics and Oral Strategy of Gels : A Pilot Study on Ultrasound Elastography. *Journal of Texture Studies*, 47(2) :152–160. [46](#), [92](#)
- Gao, Z., Taniwaki, M., Shimada, H., Ishihara, S., Nakauma, M., Funami, T., and Kohyama, K. (2013). Ultrasound Analysis of the Effects of Food Bolus Volume on Tongue Movement at the Initiation of Swallowing : Analysis of the Effects of Food Bolus Volume on Tongue Movement at Swallowing. *Journal of Texture Studies*, 44(5) :387–396. [92](#)
- Gennisson, M. J.-L. (2004). *Le Palpeur Acoustique : Un Nouvel Outil d'investigation Des Tissus Biologiques*. PhD thesis, UNIVERSITE PARIS 6. [61](#)
- Gerard, J., Ohayon, J., Luboz, V., Perrier, P., and Payan, Y. (2005). Non-linear elastic properties of the lingual and facial tissues assessed by indentation technique. *Medical Engineering & Physics*, 27(10) :884–892. [10](#)
- Geremias-Andrade, I. M., Souki, N. P. B. G., Moraes, I. C. F., and Pinho, S. C. (2016). Rheology of Emulsion-Filled Gels Applied to the Development of Food Materials. *Gels*, 2(3) :22. [21](#), [23](#), [203](#)
- Gettins, W. J., Jobling, P. L., and Wyn-Jones, E. (1978). Ultrasonic relaxation spectra of agarose sols and gels. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 2 : Molecular and Chemical Physics*, 74 :1246–1252. [45](#)
- Glozman, T. and Azhari, H. (2010). A Method for Characterization of Tissue Elastic Properties Combining Ultrasonic Computed Tomography With Elastography. *Journal of Ultrasound in Medicine*, 29(3) :387–398. [78](#)
- Gonzalez-Valadez, M., Baltazar, A., and Dwyer-Joyce, R. S. (2010). Study of interfacial stiffness ratio of a rough surface in contact using a spring model. *Wear*, 268(3–4) :373–379. [99](#), [100](#)

- Gormally, J., Pereira, M. C., Wyn-Jones, E., and Morris, E. R. (1982). Ultrasonic relaxation of agarose and carrageenan gels. The role of solvent. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 2 : Molecular and Chemical Physics*, 78(10) :1661–1673. [69](#), [85](#)
- Guinard, J.-X. and Mazzucchelli, R. (1996). The sensory perception of texture and mouth-feel. *Trends in Food Science & Technology*, 7(7) :213–219. [12](#)
- Guo, J., Liu, Y.-C., Yang, X.-Q., Jin, Y.-C., Yu, S.-J., Wang, J.-M., Hou, J.-J., and Yin, S.-W. (2014). Fabrication of edible gellan gum/soy protein ionic-covalent entanglement gels with diverse mechanical and oral processing properties. *Food Research International*, 62 :917–925. [37](#)
- Gwartney, E. A., Larick, D. K., and Foegeding, E. A. (2004). Sensory texture and mechanical properties of stranded and particulate whey protein emulsion gels. *Journal of Food Science*, 69(9) :S333–S339. [30](#), [37](#)
- Haggard, P. and de Boer, L. (2014). Oral somatosensory awareness. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 47 :469–484. [13](#), [14](#)
- Haïat, G., Padilla, F., Barkmann, R., Kolta, S., Latremouille, C., Glüer, C.-C., and Laugier, P. (2005). In vitro speed of sound measurement at intact human femur specimens. *Ultrasound in Medicine and Biology*, 31(7) :987–996. [61](#), [73](#)
- Halata, Z. and Baumann, K. I. (2008). Anatomy of receptors. In Grunwald, M., editor, *Human Haptic Perception : Basics and Applications*, pages 85–92. Birkhäuser Basel, Basel. [14](#), [203](#)
- Hassan, C. M. and Peppas, N. A. (2000). Structure and Morphology of Freeze/Thawed PVA Hydrogels. *Macromolecules*, 33(7) :2472–2479. [127](#)
- Hatakayema, T., Uno, J., Yamada, C., Kishi, A., and Hatakayema, H. (2005). Gel-sol transition of poly(vinyl alcohol) hydrogels formed by freezing and thawing. *thermochimica acta*, 431 :144–148. [127](#)
- Hériveaux, Y., Nguyen, V.-H., and Haïat, G. (2018). Reflection of an ultrasonic wave on the bone-implant interface : A numerical study of the effect of the multiscale roughness. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 144(1) :488–499. [99](#)
- Hiiemae, K. M. (2004). Mechanisms of food reduction, transport and deglutition : How the texture of food affects feeding behavior. *Journal of Texture Studies*, 35(2) :171–200. [14](#), [15](#), [28](#), [90](#), [108](#), [203](#)
- Hiiemae, K. M. and Palmer, J. B. (2003). Tongue movements in feeding and speech. *Critical Reviews in Oral Biology & Medicine*, 14(6) :413–429. [9](#), [203](#)
- Hill, A. (1938). The heat of shortening and the dynamic constants of muscle. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B - Biological Sciences*, 126(843) :136–195. [10](#)
- Hodgson, K., Dwyer-Joyce, R. S., and Drinkwater, B. W. (2000). Ultrasound as an experimental tool for investigating engineering contacts. *Tribologia*, 19(4) :9–17. [87](#), [99](#), [100](#)

- Hsiao, M.-Y., Chang, Y.-C., Chen, W.-S., Chang, H.-Y., and Wang, T.-G. (2012). Application of ultrasonography in assessing oropharyngeal dysphagia in stroke patients. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 38(9) :1522–1528. [46](#), [92](#), [109](#)
- Huc, D., Michon, C., Bedoussac, C., and Bosc, V. (2016). Design of a multi-scale texture study of yoghurts using rheology, and tribology mimicking the eating process and micro-structure characterisation. *International Dairy Journal*, 61 :126–134. [34](#)
- Hugues, D. and Kelly, J. (1958). Second_Order Elastic Deformation of Solids. *Physical Review*, 92(5) :1145–1149. [130](#)
- Humphrey, S. P. and Williamson, R. T. (2001). A review of saliva : Normal composition, flow, and function. *The Journal of prosthetic dentistry*, 85(2) :162–169. 01067. [11](#), [12](#), [103](#), [154](#)
- Hutchings, J. B. and Lillford, P. J. (1988). The Perception of Food Texture - the Philosophy of the Breakdown Path. *Journal of Texture Studies*, 19(2) :103–115. [8](#), [14](#), [15](#), [16](#), [28](#), [108](#), [203](#)
- Ishihara, S., Isono, M., Nakao, S., Nakauma, M., Funami, T., Hori, K., Ono, T., Kohyama, K., and Nishinari, K. (2014). Instrumental Uniaxial Compression Test of Gellan Gels of Various Mechanical Properties Using Artificial Tongue and Its Comparison with Human Oral Strategy for the First Size Reduction : Instrumental Evaluation of Food Texture. *Journal of Texture Studies*, 45(5) :354–366. [36](#)
- Ishihara, S., Nakao, S., Nakauma, M., Funami, T., Hori, K., Ono, T., Kohyama, K., and Nishinari, K. (2013). Compression Test of Food Gels on Artificial Tongue and Its Comparison with Human Test : *In Vitro* Evaluation System of Food Texture. *Journal of Texture Studies*, 44(2) :104–114. [10](#), [56](#), [124](#), [133](#)
- Jacobs, R., Wu, C.-H., Goossens, K., Van Loven, K., Van Hees, J., and Van Steenberghe, D. (2002). Oral mucosal versus cutaneous sensory testing : A review of the literature. *Journal of Oral Rehabilitation*, 29(10) :923–950. [13](#)
- Johansson, R. S., Trulsson, M., Å. Olsson, K., and Westberg, K. G. (1988). Mechanoreceptor activity from the human face and oral mucosa. *Experimental Brain Research*, 72(1) :204–208. [13](#)
- Jourdren, S., Saint-Eve, A., Panouillé, M., Lejeune, P., Déléris, I., and Souchon, I. (2016). Respective impact of bread structure and oral processing on dynamic texture perceptions through statistical multiblock analysis. *Food Research International*, 87 :142–151. [27](#)
- Jung, H.-S., Akita, K., and Kim, J.-Y. (2004). Spacing patterns on tongue surface-gustatory papilla. *International journal of developmental biology*, 48 :157–162. [11](#)
- Kajee, Y., Pelteret, J.-P. V., and Reddy, B. D. (2013). The biomechanics of the human tongue : The biomechanics of the human tongue. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, 29(4) :492–514. [10](#), [90](#), [203](#)

- Kell, G. S. (1975). Density, thermal expansivity, and compressibility of liquid water from 0.deg. to 150.deg.. Correlations and tables for atmospheric pressure and saturation reviewed and expressed on 1968 temperature scale. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 20(1) :97–105. 01293. [74](#), [76](#), [77](#)
- Kelsey, C. A. and Minifie, F. D. (1971). Ultrasonic Scans of the Tongue. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 49(1A) :133–134. [92](#)
- Kendall, K. and Tabor, D. (1971). An Ultrasonic Study of the Area of Contact between Stationary and Sliding Surfaces. *Proceedings of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 323(1554) :321–340. [100](#)
- Kim, J.-H. and Kim, M.-S. (2012). Lateral pharyngeal wall motion analysis using ultrasonography in stroke patients with dysphagia. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 38(12) :2058–2064. [46](#), [92](#), [109](#)
- Koç, H., Çakir, E., Vinyard, C., Essick, G., Daubert, C., Drake, M., Osborne, J., and Foege-
ding, E. (2014). Adaptation of Oral Processing to the Fracture Properties of Soft Solids :
Oral Processing and Fracture Properties. *Journal of Texture Studies*, 45(1) :47–61. [37](#)
- Koç, H., Vinyard, C. J., Essick, G. K., and Foege-
ding, E. A. (2013). Food Oral Processing :
Conversion of Food Structure to Textural Perception. *Annual Review of Food Science and
Technology*, 4(1) :237–266. [30](#), [90](#)
- Kokini, J. L., Kadane, J. B., and Cussler, E. L. (1977). Liquid texture perceived in mouth.
Journal of Texture Studies, 8(2) :195–218. [31](#)
- Kumar, A. and Han, S. S. (2017). PVA-based hydrogels for tissue engineering : A review.
International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials, 66(4) :159–182.
[124](#)
- Lauga, E., Pipe, C. J., and Le Révérend, B. (2016). Sensing in the Mouth : A Model for
Filiform Papillae as Strain Amplifiers. *Frontiers in Physics*, 4. [90](#)
- Liu, K., Stieger, M., van der Linden, E., and van de Velde, F. (2015). Fat droplet characteris-
tics affect rheological, tribological and sensory properties of food gels. *Food Hydrocolloids*,
44 :244–259. [23](#), [25](#), [31](#), [38](#)
- Liu, K., Stieger, M., van der Linden, E., and van de Velde, F. (2016). Tribological properties of
rice starch in liquid and semi-solid food model systems. *Food Hydrocolloids*, 58 :184–193.
[31](#), [39](#)
- Lozinsky, V., Damshkaln, L., Kurochkin, I., and Kurochkin, I. (2008). Study of Cryostructuring
of Polymer Systems : 28. Physicochemical properties and Morphology of Poly(vinyl alco-
hol) Cryogels Formed by Multiple Freezing–Thawing. *Colloid Journal*, 70(2) :189–198.
[127](#)
- Macakova, L., Yakuboc, G., Plunkett, M., and Stokes, J. R. (2010). Influence of ionic strength
changes on the structure of pre-absorbed salivary films. A response of a natural multi-
layer. *Colloids and Surfaces B*. [12](#)

- Malhotra, A., Huang, Y., Fogel, R. B., Pillar, G., Edwards, J. K., Kikinis, R., Loring, S. H., and White, D. P. (2002). The Male Predisposition to Pharyngeal Collapse : Importance of Airway Length. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 166(10) :1388–1395. [10](#)
- Mallapragada, S. K. and Peppas, N. A. (1996). Dissolution mechanism of semicrystalline poly(vinyl alcohol) in water. *Journal of Polymer Science Part B : Polymer Physics*, 34(7) :1339–1346. [127](#)
- Malone, M., Appelqvist, I., and Norton, I. (2003). Oral behaviour of food hydrocolloids and emulsions. Part 1. Lubrication and deposition considerations. *Food Hydrocolloids*, 17(6) :763–773. [39](#)
- Mantelet, M., Panouillé, M., Boue, F., Bosc, V., Restagno, F., Souchon, I., and Mathieu, V. (2018a). Impact of sol-gel transition on the ultrasonic properties of complex model foods : Application to agar/gelatin gels and emulsion filled gels. *Food Hydrocolloids*. [93](#), [98](#), [110](#)
- Mantelet, M., Restagno, F., Souchon, I., and Mathieu, V. (2018b). A new method using quantitative ultrasounds to characterize tongue food interface : An in vitro study on the impact of tongue roughness and lubrication. *Submitted to Ultrasounds in medicin and biology*. [109](#), [110](#), [112](#), [113](#), [119](#), [131](#), [159](#), [207](#)
- Mantelet, M., Restagno, F., Souchon, I., and Mathieu, V. (2018c). Using Quantitative Ultrasound to monitor tongue/food interface through mechanical breakdown. *Submitted to Ultrasounds in medicin and biology*. [110](#), [111](#), [117](#), [131](#), [136](#)
- McClements, D. J. (1991). Ultrasonic characterisation of emulsions and suspensions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 37(1) :33–72. [69](#), [79](#), [85](#)
- McClements, D. J. (1995). Advances in the application of ultrasound in food analysis and processing. *Trends in Food Science & Technology*, 6(9) :293–299. [68](#)
- McClements, D. J. and Fairley, P. (1991). Ultrasonic pulse echo reflectometer. *Ultrasonics*, 29(1) :58–62. [43](#), [45](#), [204](#)
- McClements, D. J. and Gunasekaran, S. (1997). Ultrasonic characterization of foods and drinks : Principles, methods, and applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 37(1) :1–46. [43](#), [44](#), [67](#), [92](#), [211](#)
- McClements, D. J. and Povey, M. J. W. (1989). Scattering of ultrasound by emulsions. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 22(1) :38. [85](#)
- McEvoy, H., Ross-Murphy, S. B., and Clark, A. H. (1985). Large deformation and ultimate properties of biopolymer gels : 2. Mixed gel systems. *Polymer*, 26(10) :1493–1500. [76](#), [100](#), [115](#)
- Mese, H. and Matsuo, R. (2007). Salivary secretion, taste and hyposalivation. *Journal of Oral Rehabilitation*, 34(10) :711–723. [13](#)

- Miller, I. J. and Reedy, F. E. (1990). Quantification of fungiform papillae and taste pores in living human subjects. *Chemical senses*, 15(3) :281–294. [11](#)
- Miller, J. L., Watkin, K. L., and Chen, M. F. (2002). Muscle, adipose, and connective tissue variations in intrinsic musculature of the adult human tongue. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 45(1) :51–65. [10](#), [90](#)
- Mosca, A. C. and Chen, J. (2016). Food oral management : Physiology and objective assessment. *Current Opinion in Food Science*, 9 :11–20. [35](#)
- Muñoz, A. M., Pangborn, R. M., and Noble, A. C. (1986). Sensory and mechanical attributes of gel texture. : I. Effect of gelatin concentration. *Journal of Texture Studies*, 17(1) :1–16. [156](#)
- Murray, J., Delahunty, C., and Baxter, I. (2001). Descriptive sensory analysis : Past, present and future. *Food Research International*, 34 :461–471. [25](#)
- Nagaoka, S., Hirata, Y., Iwaki, H., Sakamoto, K., Takagi, M., and Amagasa, T. (2001). A Study of the Surface Roughness of Tongue Cancer and Leukoplakia Using a Non-contact Three-dimensional Curved Shape Measuring System. *Oral Medicine & Pathology*, 6(2) :85–90. [11](#), [54](#), [57](#)
- Napadow, V. J., Chen, Q., Wedeen, V. J., and Gilbert, R. J. (1999). Intramural mechanics of the human tongue in association with physiological deformations. *Journal of biomechanics*, 32(1) :1–12. [10](#)
- Pang, Z., Deeth, H., Sharma, R., and Bansal, N. (2015). Effect of addition of gelatin on the rheological and microstructural properties of acid milk protein gels. *Food Hydrocolloids*, 43 :340–351. [31](#), [37](#)
- Panouillé, M., Saint-Eve, A., de Loubens, C., Délérís, I., and Souchon, I. (2011). Understanding of the influence of composition, structure and texture on salty perception in model dairy products. *Food Hydrocolloids*, 25(4) :716–723. [25](#), [29](#), [31](#), [38](#), [204](#)
- Panouillé, M., Saint-Eve, A., Délérís, I., Le Bleis, F., and Souchon, I. (2014). Oral processing and bolus properties drive the dynamics of salty and texture perceptions of bread. *Food Research International*, 62 :238–246. [8](#), [31](#)
- Panouillé, M., Saint-Eve, A., and Souchon, I. (2016). Instrumental methods for bolus characterization during oral processing to understand food perceptions. *Current Opinion in Food Science*, 9 :42–49. [35](#), [91](#), [108](#)
- Parker, N. and Povey, M. (2012). Ultrasonic study of the gelation of gelatin : Phase diagram, hysteresis and kinetics. *Food Hydrocolloids*, 26(1) :99–107. [41](#), [45](#), [68](#), [69](#), [79](#), [83](#), [130](#)
- Pascua, Y., Koç, H., and Foegeding, E. A. (2013). Food structure : Roles of mechanical properties and oral processing in determining sensory texture of soft materials. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 18(4) :324–333. [156](#)

- Peng, C.-L., Jost-Brinkmann, P.-G., Miethke, R.-R., and Lin, C.-T. (2000). Ultrasonographic measurement of tongue movement during swallowing. *Journal of ultrasound in medicine*, 19(1) :15–20. [9](#), [45](#), [92](#), [109](#), [174](#)
- Peng, C.-L., Miethke, R.-R., Pong, S.-J., and Lin, C.-T. (2007). Investigation of Tongue Movements during Swallowing with M-Mode Ultrasonography. *Journal of Orofacial Orthopedics / Fortschritte der Kieferorthopädie*, 68(1) :17–25. [45](#)
- Persson, B. N. J., Albohr, O., Tartaglino, U., Volokitin, A. I., and Tosatti, E. (2005). On the nature of surface roughness with application to contact mechanics, sealing, rubber friction and adhesion. *Journal of Physics : Condensed Matter*, 17(1) :R1–R62. [99](#), [101](#), [117](#)
- Pineau, N., Schlich, P., Cordelle, S., Mathonnière, C., Issanchou, S., Imbert, A., Rogeaux, M., Etiévant, P., and Köster, E. (2009). Temporal Dominance of Sensations : Construction of the TDS curves and comparison with time–intensity. *Food Quality and Preference*, 20(6) :450–455. [25](#), [26](#), [146](#), [204](#)
- Pollen, N., Daubert, C. R., Prabhasankar, P., Drake, M., and Gumpertz, M. (2004). QUANTIFYING FLUID FOOD TEXTURE. *Journal of Texture Studies*, 35(6) :643–657. [31](#)
- Pons, M. and Fiszman, S. M. (1996). Instrumental texture profile analysis with particular reference to gelled systems. *Journal of Texture Studies*, 27(6) :597–624. [29](#), [91](#)
- Poulard, C., Restagno, F., Weil, R., and Léger, L. (2010). Mechanical tuning of adhesion through micro-patterning of elastic surfaces. *Soft Matter*, 7(2543). [101](#)
- Povey, M. J. W. (2017). Applications of ultrasonics in food science - novel control of fat crystallization and structuring. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 28 :1–6. [42](#), [204](#)
- Povey, M. J. W. and McClements, D. J. (1988). Ultrasonics in food engineering. Part I : Introduction and experimental methods. *Journal of Food Engineering*, 8(4) :217–245. [68](#)
- Pramanik, R., Osailan, S. M., Challacombe, S. J., Urquhart, D., and Proctor, G. B. (2018). Protein and mucin retention on oral mucosal surfaces in dry mouth patients. *European Journal of Oral Sciences*, 118(3) :245–253. [13](#), [57](#), [103](#)
- Prinz, J., de Wijk, R., and Huntjens, L. (2007). Load dependency of the coefficient of friction of oral mucosa. *Food Hydrocolloids*, 21(3) :402–408. [34](#), [39](#)
- Ranc, H., Elkhyat, A., Servais, C., Mac-Mary, S., Launay, B., and Humbert, P. (2006a). Friction coefficient and wettability of oral mucosal tissue : Changes induced by a salivary layer. *Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects*, 276(1-3) :155–161. [11](#), [34](#)
- Ranc, H., Servais, C., Chauvy, P.-F., Debaud, S., and Mischler, S. (2006b). Effect of surface structure on frictional behaviour of a tongue/palate tribological system. *Tribology International*, 39(12) :1518–1526. [11](#), [34](#), [39](#), [90](#)

- Reddyhoff, T., Kasolang, S., Dwyer-Joyce, R. S., and Drinkwater, B. W. (2005). The Phase Shift of an Ultrasonic Pulse at an Oil Layer and Determination of Film Thickness. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J : Journal of Engineering Tribology*, 219(6) :387–400. 00023. [103](#)
- Renard, D., van de Velde, F., and Visschers, R. W. (2006). The gap between food gel structure, texture and perception. *Food Hydrocolloids*, 20(4) :423–431. [18](#)
- Renaud, G. (2008). *Mesure de Non-Linéarités Élastiques et Dissipatives Par Interaction d'ondes Acoustiques : Application à La Quatification Du Micro-Endommagement de l'os Trabéculaire*. PhD thesis, Tours. [61](#)
- Ricciardi, R., Auriemma, F., Gaillet, C., De Rosa, C., and Lauprêtre, F. (2004). Investigation of the Crystallinity of Freeze/Thaw Poly(vinyl alcohol) Hydrogels by Different Techniques. *Macromolecules*, 37 :9510–9516. [127](#)
- Rommel, N. and Hamdy, S. (2016). Oropharyngeal dysphagia : Manifestations and diagnosis. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 13(1) :49–59. [91](#), [109](#)
- Rosseti, D., Bongaerts, J. H. H., Wantling, E., Stokes, J. R., and Williamson, A. (2009). Astringency of tea catechins : More than an oral lubrication tactile percept. [12](#)
- Saad, N., Merheb, B., Nassar, G., Campistrone, P., Carlier, J., Ajaka, M., and Nongaillard, B. (2012). Characterization of the state of a droplet at a micro-textured silicon wafer using a finite difference time-domain (FDTD) modeling method. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, 42 :012052. [103](#)
- Saha, D. and Bhattacharya, S. (2010). Hydrocolloids as thickening and gelling agents in food : A critical review. *Journal of Food Science and Technology*, 47(6) :587–597. [67](#)
- Saint-Eve, A., Mathieu, V., Mantelet, M., Morgenstern, M. P., and Souchon, I. (2018). Temporal Dominance of Motions : A new concept to enlighten the links between texture perceptions and oral processing. *in progress*. [141](#), [151](#)
- Saint-Eve, A., Panouillé, M., Capitaine, C., Délérès, I., and Souchon, I. (2015). Dynamic aspects of texture perception during cheese consumption and relationship with bolus properties. *Food Hydrocolloids*, 46 :144–152. [27](#), [31](#), [38](#), [91](#)
- Sala, G., de Wijk, R. A., van de Velde, F., and van Aken, G. A. (2008). Matrix properties affect the sensory perception of emulsion-filled gels. *Food Hydrocolloids*, 22(3) :353–363. [25](#), [31](#), [38](#)
- Sala, G., van Vliet, T., Cohen Stuart, M., van de Velde, F., and van Aken, G. A. (2009a). Deformation and fracture of emulsion-filled gels : Effect of gelling agent concentration and oil droplet size. *Food Hydrocolloids*, 23(7) :1853–1863. [38](#)
- Sala, G., van Vliet, T., Cohen Stuart, M. A., van Aken, G. A., and van de Velde, F. (2009b). Deformation and fracture of emulsion-filled gels : Effect of oil content and deformation speed. *Food Hydrocolloids*, 23(5) :1381–1393. [30](#)

- Sala, G., van Vliet, T., Cohen Stuart, M. A., van Aken, G. A., and van de Velde, F. (2009c). Deformation and fracture of emulsion-filled gels : Effect of oil content and deformation speed. *Food Hydrocolloids*, 23(5) :1381–1393. [38](#)
- Sala, G., Vandewilde, F., Cohenstuart, M., and Vanaken, G. (2007). Oil droplet release from emulsion-filled gels in relation to sensory perception. *Food Hydrocolloids*, 21(5-6) :977–985. [25](#), [37](#)
- Scher, J. (2006). Rhéologie, texture et texturation des produits alimentaires | Techniques de l'Ingénieur. *Technique de l'ingénieur*, -(-) :-. [30](#)
- Schlich, P. (2017). Temporal Dominance of Sensations (TDS) : A new deal for temporal sensory analysis. *Current Opinion in Food Science*, 15 :28–42. [27](#), [204](#)
- Selway, N. and Stokes, J. R. (2013). Insights into the dynamics of oral lubrication and mouthfeel using soft tribology : Differentiating semi-fluid foods with similar rheology. *Food Research International*, 54(1) :423–431. [33](#), [204](#)
- Shawker, T. H., Sonies, B. C., and Stone, M. (1984). Soft tissue anatomy of the tongue and floor of the mouth : An ultrasound demonstration. *Brain and Language*, 21(2) :335–350. [10](#), [45](#), [90](#)
- Shull, K. R. (2002). Contact mechanics and the adhesion of soft solids. *Materials Science and Engineering : R : Reports*, 36(1) :1–45. [101](#)
- Smith, D. E. and Winder, W. C. (1983). Effects of temperature, concentration and solute structure on the acoustic properties of monosaccharide solutions. *Journal of Food Science*, 48(6) :1822–1825. [69](#), [78](#)
- Spahn, G., Baeza, R., Santiago, L., and Pilosof, A. (2008). Whey protein concentrate/ λ -carrageenan systems : Effect of processing parameters on the dynamics of gelation and gel properties. *Food Hydrocolloids*, 22(8) :1504–1512. [36](#)
- Stokes, J. R., Boehm, M. W., and Baier, S. K. (2013). Oral processing, texture and mouthfeel : From rheology to tribology and beyond. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 18(4) :349–359. [14](#), [28](#), [32](#), [34](#), [67](#), [90](#), [91](#), [108](#), [109](#), [204](#)
- Stone, M. (2005). A guide to analysing tongue motion from ultrasound images. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 19(6-7) :455–501. [45](#), [92](#), [109](#)
- Surry, K. J. M., Austin, H. J. B., Fenster, A., and Peters, T. M. (2004). Poly(vinyl alcohol) cryogel phantoms for use in ultrasound and MR imaging. *Physics in Medicine and Biology*, 49(24) :5529–5546. [124](#)
- Szczesniak, A. S. (1963). Classification of Textural Characteristics. *Journal of Food Science*, 28(4) :385–389. [29](#)
- Szczesniak, A. S. (2002). Texture is a sensory property. *Food quality and preference*, 13(4) :215–225. [7](#), [8](#), [90](#), [91](#), [104](#), [108](#)

- Tabilo-Munizaga, G. and Barbosa-Cánovas, G. V. (2005). Rheology for the food industry. *Journal of Food Engineering*, 67(1-2) :147–156. [30](#)
- Totosaus, A., Montejano, J. G., Salazar, J. A., and Guerrero, I. (2002). A review of physical and chemical protein-gel induction. *International journal of food science & technology*, 37(6) :589–601. [18](#)
- Toubal, M., Nongaillard, B., Radziszewski, E., Boulenguer, P., and Langendorff, V. (2003). Ultrasonic monitoring of sol–gel transition of natural hydrocolloids. *Journal of Food Engineering*, 58(1) :1–4. [68](#)
- Trivedy, B. (2012). The finer points of taste. *Nature*, 486. [11](#), [203](#)
- Trulsson, M. and Essick, G. K. (1997). Low-threshold mechanoreceptive afferents in the human lingual nerve. *Journal of Neurophysiology*, 77 :737–748. [13](#)
- Trulsson, M. and Johansson, R. S. (2002). Orofacial mechanoreceptors in humans : Encoding characteristics and responses during natural orofacial behaviors. *Behav. Brain Res*, 135 :27–33. [13](#)
- Uemori, N., Kakinoki, Y., Karaki, J., and Kakigawa, H. (2012). New method for determining surface roughness of tongue. *Gerodontology*, 29(2) :90–95. [11](#), [54](#), [57](#)
- van Aken, G. A. (2013). Acoustic emission measurement of rubbing and tapping contacts of skin and tongue surfaces in relation to tactile perception. *Food Hydrocolloids*, 31(2) :325–331. [35](#)
- van Aken, G. A., Vingerhoeds, M. H., and de Hoog, E. H. (2007). Food colloids under oral conditions. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 12(4-5) :251–262. [16](#)
- van de Velde, F., de Hoog, E. H., Oosterveld, A., and Tromp, R. H. (2015). Protein-Polysaccharide Interactions to Alter Texture. *Annual Review of Food Science and Technology*, 6(1) :371–388. [18](#), [19](#), [20](#), [203](#)
- van den Berg, L., Carolas, A., van Vliet, T., van der Linden, E., van Boekel, M. A. J. S., and Van De Velde, F. (2008). Energy storage crumbly perception in whey proteins/polysaccharide mixed gels. *Food Hydrocolloids*, 22 :1404–1417. [25](#)
- van den Berg, L., van Vliet, T., van der Linden, E., van Boekel, M. A. J. S., and Van De Velde, F. (2007a). Breakdown properties and sensory perception of whey proteins/polysaccharide mixed gels as a function of microstructure. *Food Hydrocolloids*, 21(5-6) :961–976. [21](#)
- van den Berg, L., van Vliet, T., van der Linden, E., van Boekel, M. A. J. S., and van de Velde, F. (2007b). Serum release : The hidden quality in fracturing composites. *Food Hydrocolloids*, 21(3) :420–432. [21](#), [25](#), [36](#)
- van den Berg, L., Vanvliet, T., Vanderlinden, E., Vanboekel, M., and Vandevelde, F. (2007c). Breakdown properties and sensory perception of whey proteins/polysaccharide mixed gels as a function of microstructure. *Food Hydrocolloids*, 21(5-6) :961–976. [36](#)

- van der Reijden, W., Veerman, E., and Amerongen, A. (1993). Shear rate dependent viscoelastic behavior of human glandular salivas. *Biorheology*, 30(141) :52. [12](#)
- van Vliet, T. (1988). Rheological properties of filled gels. Influence of filler matrix interaction. *Colloid and Polymer Science*, 266(6) :518–524. [21](#)
- van Vliet, T. (2002). On the relation between texture perception and fundamental mechanical parameters for liquids and time dependent solids. *Food Quality and Preference*, 13(4) :227–236. [90](#), [91](#)
- van Vliet, T., van Aken, G. A., de Jongh, H. H., and Hamer, R. J. (2009). Colloidal aspects of texture perception. *Advances in Colloid and Interface Science*, 150(1) :27–40. [16](#), [17](#), [203](#)
- Vardhanbhati, B., Cox, P., Norton, I., and Foegeding, E. A. (2011). Lubricating properties of human whole saliva as affected by beta-lactoglobulin. *Food Hydrocolloids*, 25. [12](#), [34](#)
- Walkenström, P. and Hermansson, A.-M. (1997). High-pressure treated mixed gels of gelatin and whey proteins. *Food Hydrocolloids*, 11(2) :195–208. [36](#)
- Wan, W., Bannerman, A. D., Yang, L., and Mak, H. (2014). Poly(Vinyl Alcohol) Cryogels for Biomedical Applications. In Okay, O., editor, *Polymeric Cryogels*, volume 263, pages 283–321. Springer International Publishing, Cham. [55](#)
- Wang, Q., Rademacher, B., Sedlmeyer, F., and Kulozik, U. (2005). Gelation behaviour of aqueous solutions of different types of carrageenan investigated by low-intensity-ultrasound measurements and comparison to rheological measurements. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 6(4) :465–472. [68](#), [83](#)
- Watanabe, S. and Dawes, C. (1990). Salivary Flow Rates and Salivary Film Thickness in Five-year-old Children. *Journal of Dental Research*, 69(5) :1150–1153. [13](#), [57](#)
- Weng, C.-K., Chien, J.-W., Lee, P.-Y., and Huang, C.-C. (2017). Implementation of a wearable ultrasound device for the overnight monitoring of tongue base deformation during obstructive sleep apnea events. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 43(8) :1639–1650. [45](#), [92](#), [109](#)
- Wilkinson, C., Dijksterhuis, G. B., and Minekus, M. (2000). From food structure to texture. *Trends in Food Science & Technology*, 11(12) :442–450. [8](#)
- Xu, K., Yang, Y., Jaumard-Hakoun, A., Adda-Decker, M., Amelot, A., Kork, S. A., Crevier-Buchman, L., Chawah, P., Dreyfus, G., Fux, T., et al. (2014). 3D tongue motion visualization based on ultrasound image sequences. In *Fifteenth Annual Conference of the International Speech Communication Association*. [169](#)
- Xu, K., Yang, Y., Stone, M., Jaumard-Hakoun, A., Leboullenger, C., Dreyfus, G., Roussel, P., and Denby, B. (2016). Robust contour tracking in ultrasound tongue image sequences. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 30(3-5) :313–327. [169](#)
- Yu, T. (2015). Application of B+M-Mode Ultrasonography in Assessing Deglutitive Tongue Movements in Healthy Adults. *Medical Science Monitor*, 21 :1648–1655. [45](#)

Liste des figures

1.1	Schéma de la cavité orale, adapté de Chen (2009)	8
1.2	Mouvement de la langue (ATM) et de la mâchoire (JAW) au cours de la consommation d'un aliment mou (à gauche) et d'un aliment dur (à droite) (Hiimeae and Palmer, 2003)	9
1.3	Schéma de la structure de la langue adapté par Kajee et al. (2013)	10
1.4	Schématisation des différents types de papilles et de leur répartition sur la surface de la langue, adapté de Trivedy (2012)	11
1.5	Répartition des glandes salivaires dans la cavité orale (Chen, 2009)	12
1.6	Représentation de la position des mécanorécepteurs dans l'épaisseur de la peau de la main, adapté de Halata and Baumann (2008).	14
1.7	Modèle de processus oral selon Hiimeae (2004).	15
1.8	Trajectoire de la déstructuration des aliments au cours du processus oral selon Hutchings and Lillford (1988) adaptée par Devezeaux de Lavergne et al. (2017).	15
1.9	Représentation du lien entre les caractéristiques des aliments et leurs perceptions. Les triangles verts englobent les éléments amenant aux perceptions et les triangles bleus englobe les éléments amenant aux propriétés du produit. L'interaction entre le processus oral et l'aliment est à l'origine des propriétés du bol et des perceptions associées. Adapté de van Vliet et al. (2009).	17
1.10	Variété de structures réalisable avec des mélanges protéines-polysaccharides (Foegeding et al., 2017). Les zones riches en protéines sont représentées en bleu. Le taux de polysaccharides augmente en se déplaçant vers la gauche. H : Homogène, PC : Protéine Continu, BC : bicontinu, SC : phase aqueuse continue, CS : Granuleux, P : dispersé.	19
1.11	Microstructure et module de Young en fonction de la concentration en polysaccharides d'un mélange de protéines sériques (WPI) et de gomme de gellane. Les images acquises par microscopie confocale représentent la microstructure du gel. (van de Velde et al., 2015)	19
1.12	Représentation de l'évolution des propriétés mécaniques du gel mixte avec une phase protéique composée de protéines sériques (WPI) en fonction du polysaccharides et de sa concentration (van de Velde et al., 2015)	20
1.13	Représentation des deux configurations d'émulsion gélifiée : (a) gel renforcé par émulsion (« emulsion filled gel ») et (b) gel d'émulsion. (Geremias-Andrade et al., 2016)	21

1.14	Fréquence de citation d'attributs de perception de texture au cours du processus oral pour deux émulsions gélifiées. Figure adaptée de Devezeaux de Lavergne et al. (2015b)	22
1.15	Propriétés des émulsions gélifiées, du bol alimentaire associé et des perceptions de textures induites (Devezeaux de Lavergne et al., 2017)	23
1.16	Représentation des étapes permettant de calculer et tracer les courbes de dominances temporelles des sensations TDS (Pineau et al., 2009)	26
1.17	Complémentarité des méthodes sensorielles de profils et temporelles (Schlich, 2017)	27
1.18	Représentation des étapes clés du processus oral pour l'étude instrumentale des perceptions de texture (Stokes et al., 2013)	28
1.19	Courbe Force-temps d'un essai de TPA. La dureté est définie comme la force maximale (F_{max}) (N), l'adhésivité est égale à l'aire $A3$ ($N.mm$), la cohésion est égale au rapport de l'aire $A2$ /aire $A1$ (sans dimension) (Panouillé et al., 2011)	29
1.20	Représentation conceptuelle d'une courbe contrainte- déformation d'un essai de compression. Les paramètres classiques d'un essai à hautes déformations sont présentés : le module de Young (E), la contrainte (σ_f) et l'élongation à la rupture (ϵ_f) ainsi que le travail à la rupture (W_f)	30
1.21	Représentation des trois régimes rencontrés en tribologie à partir d'une courbe de Stribeck. μ représente le coefficient de frottement, η représente la viscosité du fluide, U représente la vitesse d'entraînement et δ représente l'épaisseur du film de fluide à l'interface (Selway and Stokes, 2013).	33
1.22	Domaine de l'acoustique en fonction de l'énergie et de la fréquence de l'onde (Povey, 2017)	42
1.23	Schéma de principe d'une cellule de mesure ultrasonore du type Ultrasound Pulse Echo Receiver (UPER) (McClements and Fairley, 1991) (Perspex=PMMA)	43
1.24	Représentation de la propagation des ondes au travers d'une cellule de type UPER (McClements and Fairley, 1991)	45
1.25	Radiographie par rayons X de la cavité orale qui illustre le positionnement d'une sonde échographie sous le menton d'un individu. (Epstein and Stone, 2005)	46
1.26	Positionnement du volontaire et de la sonde échographique (Galén and Jost-Brinkmann, 2010)	46
1.27	Image échographique d'une langue (de Wijk et al., 2006b)	46
1.28	Représentation de la démarche expérimentale de la thèse. Chaque étape correspond à l'étude de l'impact d'un composant du système langue-aliment-palais sur la mesure US.	48
2.1	Schéma d'interactions des différentes composantes du système d'analyses ultrasonores. Les flèches représentent les informations transmises entre les blocs : vertes pour les données entrantes, rouges pour les données sortantes	50
2.2	Modèle <i>in vitro</i> du système langue-aliment-palais. Les paramètres d'entrée du modèle sont inscrits dans chaque bloc à gauche.	52
2.3	Photographie du montage expérimentale du modèle <i>in vitro</i> de système langue-palais.	53

2.4	Spectre de l'écho réfléchi par une interface rugueuse dont le profil possède une valeur de Ra variant entre 0 et 300 μm (simulations par méthode des différences finies – SimSonic).	54
2.5	Représentation du montage réalisé pour texturer les surfaces de PVC	55
2.6	Protocole de fabrication des langues en PVA	56
2.7	(a) représentation d'une portion de 2 mm d'un profil de surface et représentation du Ra et de la ligne moyenne du profil calculé sur 30 mm. (b) représentation de la fonction d'autocorrélation du profil tracé en (a) et de la longueur de corrélation (β).	57
2.8	Cartographie réalisé par profilométrie de contact pour $D_{relax}R_1$ (a) et $D_{contr}R_2$ (b).	58
2.9	Photographie du système langue-aliment-modèle (a) et représentation de la propagation des ondes dans le système modèle (b)	59
2.10	Schéma récapitulant les différentes étapes du traitement du signal.	59
2.11	Représentation de la matrice d'une séquence d'acquisition en niveau de gris (a). Le temps d'acquisition est représenté en abscisse et le temps de compression est affiché en ordonnée. Plus l'amplitude sera élevée et plus le pixel de l'image sera blanc. L'identification manuelle des échos est représentée en (b). L'écho langue-aliment et l'écho aliment-palais sont représentés en rouge et bleu respectivement. Les zones rouges et bleues correspondent aux fenêtres temporelles utilisées pour affiner la détection des échos langue-aliment et aliment-palais respectivement.	60
2.12	Représentation d'un signal provenant de l'interface langue-aliment. Le premier passage à zéros de l'impulsion US ("first zeros crossing") est représenté par une croix rouge. Les amplitudes des trois premiers pics de l'impulsion US sont représentées par des triangles rouges.	61
2.13	Représentation d'un pulse US (a) et de la figure d'intercorrélation (b) réalisée entre le signal tracé en (a) et le signal de référence. La position de l'écho sera alors égale à la maximum du maximum de la figure d'intercorrélation (flèche noire) + la demi-largeur du signal de référence soit $\approx 7\mu\text{s}$ dans cet exemple.	62
2.14	Spectre d'une impulsion US réfléchi à l'interface langue-aliment	62
2.15	Stratégie expérimentale de la thèse	64
3.1	(a) Top view photo of the measuring cell for US experiments. The food product is poured in the product cavity. The transducer is mounted aligned so that beam energy is homogeneously distributed between the two external surfaces of the cavity. (b) Illustration of the measuring cell and description of the origin of echoes E_0 , E_1 and E_2 .	72
3.2	Variations of shear viscoelastic moduli G' (a) and G'' (b) throughout the different gels and for the two temperatures. Significant differences were observed by Anova on G' ($p < 0.01$) for factors temperature ($F=475.5$), product ($F=235.6$) and associated interaction ($F=234.6$). Similarly, significant differences were reported for G'' ($p < 0.01$) for factors temperature ($F=700.3$), product ($F=275.9$) and associated interaction ($F=274.4$).	75

3.3	Variations of mass density ρ throughout the different gels and for the two temperatures. Significant differences were reported by Anova ($p < 0.01$) for factors temperature ($F=196.35$), product ($F=291.0$) and associated interaction ($F=3.2$).	77
3.4	Effect of sucrose and emulsion on the variations of (a) the velocity, (b) the reflectivity and (c) the attenuation of US waves in liquid control products. . . .	78
3.5	Effect of agar and gelatin concentrations on the variations of (a) the velocity, (b) the reflectivity and (c) the attenuation of US waves in products without emulsion.	80
3.6	Variations of (a) bulk modulus K' and of (b) acoustic impedance Z throughout the different model foods, calculated from mass density and US velocity measurements.	81
3.7	Effects of emulsion and of agar/gelatin mix on the variations of (a) the velocity, (b) the reflectivity and (c) the attenuation of US waves.	82
3.8	Variations of US velocity (a) and of US reflectivity (b) as a function of density (a_1, b_1) and dry matter content (a_2, b_2) throughout products without fat.	84
3.9	Relationship between US velocity and reflectivity measurements reported throughout the different food products.	86
3.10	Stratégie expérimentale de la thèse	88
4.1	(a) Picture of the experimental set-up. (b) Schematic representation of the set-up (Red dotted line rectangle corresponding to picture (a)) and of associated wave propagation phenomena. Two echoes were observed : E_0 (time t_0 , amplitude A_0) in blue for tongue-food interface and E_1 (time t_1 , amplitude A_1) in green for food-air interface.	96
4.2	Variations of US reflectivity at tongue-food interface throughout the three surface profiles (« Dry » lubrication condition) for three food products : (a) Ge_7 , (b) $Ge_{3.5}$ and (c) $Ag_{0.3}$	99
4.3	Variations (a) of US reflectivity at tongue-food interface (tongue surface profile $R_1\beta_1$, lubrication condition « Dry ») and (b) of Young's modulus for the seven food products without Tween 20 : white bars for gelatin dominant products and grey bars for agar dominant products.	101
4.4	Variations of US reflectivity at tongue-food interface (tongue surface profile $R_1\beta_1$, lubrication condition « Dry ») as a function of Young's modulus for agar (blue) and gelatin (orange) dominant products.	102
4.5	Variations of US reflectivity at tongue-food interface (tongue surface profile $R_1\beta_1$) throughout the four lubrication conditions for products Ge_7 (grey bars) and Ge_7T (white bars).	103
4.6	Stratégie expérimentale de la thèse	106

5.1	(a) Picture of the experimental set-up. The US transducer (1 MHz, longitudinal polarization) is placed underneath the PVC artificial tongue. The food product is placed between the mimicking tongue and a moving aluminum probe (10 mm.s ⁻¹ , 80% strain). (b) Drawing of the wave path of the ultrasonic wave, leading to two echoes : echo E_0 (in blue) corresponds to the reflection at tongue/food interface, echo E_1 (in green) to food/palate interface.	111
5.2	US reflectivity ΔR variations as a function of strain during a compression Reflectivity variation from initial reflectivity (ΔR) plotted versus the mechanical strain for $R_0\beta_0$ (blue circle), $R_1\beta_1$ (red square) and $R_1\beta_2$ (yellow diamond). Graphs have been plotted for Ge_7 (a), $Ge_{3.5}$ (b) and $Ag_{0.3}$ (c).	114
5.3	Effect of the product on the ultrasonic reflectivity for $R_1\beta_1$ surface. Reflectivity variation from initial reflectivity (ΔR) is plotted versus the mechanical strain (a) and Force applied on product during compression versus mechanical strain (b) for Gelatin dominant product : $Ge_{3.5}$ (blue square), $Ag_{0.3}Ge_{3.5}$ (red circle), $Ag_{0.7}Ge_{5.85}$ (yellow diamond) and Ge_7 (purple triangle).	116
5.4	Effect of the product on the ultrasonic reflectivity for $R_1\beta_1$ surface. Reflectivity variation from initial reflectivity (ΔR) is plotted versus the mechanical strain (a) and Force applied on product during compression versus mechanical strain (b) for Agar dominant product : $Ag_{0.3}$ (blue square), $Ag_1Ge_{0.75}$ (red circle) and $Ag_{1.8}$ (yellow diamond).	116
5.5	Effect of the Lubrication on the ultrasonic reflectivity. Reflectivity variation from initial reflectivity (ΔR) is plotted versus the mechanical strain for Dry lubrication (blue circle), Low lubrication (red square), Medium Lubrication (yellow diamond) and Full lubrication (purple triangle). Graphs are plotted for Ge_7 on $R_0\beta_0$ (a_1) and $R_1\beta_2$ (a_2), and for Ge_7T on $R_0\beta_0$ (b_1) and $R_1\beta_2$ (b_2).	118
5.6	US Reflectivity of PVC/product interface. Results on $R_1\beta_2$ surface and « Dry » and « High » lubrication are presented for $Ag_{0.3}$, $Ge_{3.5}$ and Ge_7 product. Mean values $\pm$ standard deviation are presented. Adapted from (Mantelet et al., 2018b)	119
5.7	Stratégie expérimentale de la thèse	121
6.1	(a) photographie du montage biomimétique avec le système US. (b) représentation de la propagation des US dans le système langue/aliment/palais avec le signal US brut qui y est généré.	127
6.2	Evolution du Temps de vol (ToF) en fonction du déplacement de la plaque d'aluminium (z) pour Ge_7 en a_1 et $Ag_{0.3}$ en a_2 . La déformation ($Strain$) calculée à partir du ToF est tracée en fonction de z pour Ge_7 en b_1 et $Ag_{0.3}$ en b_2 . Les valeurs moyennes et écarts-types obtenues pour $D_{hard}R_2$ (● bleu), pour le $D_{contr}R_2$ (▼ rouge) et pour le $D_{hard}R_2$ (▲ rouge) sont tracées pour chaque graphique.	130
6.3	Force appliquée sur le produit en fonction de la déformation du produit pour les gels Ge_7 et $Ag_{0.3}$ en a et b respectivement. Les valeurs moyennes et écarts-types obtenues pour $D_{hard}R_2$ (● bleu), pour le $D_{relax}R_2$ (▼ rouge) et pour le ($D_{contr}R_2$ rouge) sont tracées pour chaque graphique	132

6.4	Tracé de la réflectivité US (US reflectivity) en fonction de la déformation des gels respectivement $Ag_{0.3}$ et Ge_7 en a_1 et a_2 . La surface de contact estimée par la réflectivité US en fonction de la déformation des produits est représentée pour les gels $Ag_{0.3}$ et Ge_7 respectivement en b_1 et b_2 . Les valeurs moyennes ainsi que les écarts-types obtenus pour $D_{hard}R_2$ (● bleu), pour $D_{relax}R_2$ (▼ rouge) et pour $D_{contr}R_2$ (▲ rouge) sont tracés pour chaque graphique	134
6.5	Surface de contact estimé avec la réflectivité US en fonction de la déformation de Ge_7 . Les valeurs moyennes ainsi que les écarts types sont tracés pour le produit Ge_7 et pour $D_{relax}R_2$ (▼ bleu) et pour $D_{relax}R_1$ (▲ rouge).	136
6.6	Stratégie expérimentale de la thèse	138
7.1	Résultats des Time Dominance of Motion (DTM) en (a) et Time Dominance of Sensation (DTS) en (b) pour le produit $Ag_{0.3}$. La ligne de significativité est représentée par des tirets larges. Au-dessus de cette ligne la dominance des attributs est considérée comme significative. La ligne de chance est représentée par des tirets points et indique le niveau de dominance pouvant être atteint par hasard.	147
7.2	Résultats des Time Dominance of Motion (DTM) en (a) et Time Dominance of Sensation (DTS) en (b) pour le produit Ge_7 . La ligne de significativité est représentée par des tirets larges. Au-dessus de cette ligne la dominance des attributs est considérée comme significative. La ligne de chance est représentée par des tirets points et indique le niveau de dominance pouvant être atteint par hasard.	148
7.3	Représentation de la durée totale moyenne de la séquence de consommation d'une bouchée (« Sequence whole duration », en seconde) pour chacun des produits testés en fonction de la méthode. Les temps résultant du DTS (TDS) sont affichés en rouge et ceux correspondant au DTM (TDM) le sont en bleu.	149
7.4	Correspondance entre les fréquences de sensations de texture et les fréquences de sensations de mouvements des produits. Le code couleur représente la fréquence de citation d'un attribut de texture au moment où un attribut de mouvement est cité. Plus la case est jaune et plus l'attribut de texture a été cité en même temps que l'attribut de mouvement correspondant.	150
7.5	Notes moyennes des attributs de textures à la mise en bouche (T1) pour les attributs (a) Humide (Moist), (b) Glissant (Slippery) et (c) de Tenue (Strength). Les lettres représentent les groupes statistiques auxquelles appartiennent les moyennes.(ANOVA 2 facteurs, test de comparaison multiple Newman Keuls, $p < 0.05\%$.)	152
7.6	5 Moyennes des notes évaluées à la mise en bouche en conditions normale d'hydratation de langue (barres bleues) et après avoir essuyé la salive de la langue (barres blanches) pour les attributs (a) Moist (Humide) et (b) Slippery (Glissant). Les lettres représentent les groupes statistiques auxquelles appartiennent les moyennes.(ANOVA 3 facteurs, test de comparaison multiple Newman Keuls, $p < 0.05\%$.)	154

7.7	Notes moyennes après une compression langue/palais pour les attributs (a) <i>Slippery</i> (<i>Glissant</i>), (b) <i>Elastic</i> (<i>Elastique</i>), (c) <i>Doughy</i> (<i>Pateux</i>), (d) <i>Moist</i> (<i>Humide</i>), (e) <i>Firm</i> (<i>Ferme</i>) et (f) <i>Melty</i> (<i>Fondant</i>). Les lettres représentent les groupes statistiques auxquelles appartiennent les moyennes. (ANOVA 1 facteur, test de comparaison multiple Newman Keuls, $p < 0.05\%$).	155
7.8	Moyennes des notes évaluées après une compression langue/palais en condition langue humide (bleu) et en langue sèche (blanc). Les notes moyennes des attributs (a) <i>Slippery</i> (<i>Glissant</i>), (b) <i>Moist</i> (<i>Humide</i>) et (c) <i>Firm</i> (<i>Ferme</i>) sont représentés. Les lettres représentent les groupes statistiques auxquelles appartiennent les moyennes (ANOVA 3 facteurs, test de comparaison multiple Newman Keuls, $p < 0.05\%$).	158
7.9	Représentation des tendances observées entre les données sensorielles à la mise en bouche et la réflectivité US à l'interface PVC/produits avec une surface $R_1\beta_1$. Les données pour une « langue sèche » (après déshydratation de la surface de la langue) et une surface en PVC non lubrifiée (a_1 , b_1 et c_1) ainsi que celles pour une « langue hydratée » (conditions normales de consommation) et une surface en PVC non lubrifiée (a_2 , b_2 et c_2) sont tracées.	162
7.10	Représentation des tendances observées entre les données sensorielles après une compression langue-palais et la réflectivité US à l'interface PVC/produits avec une surface $R_1\beta_1$. Les données pour une « langue sèche » (après déshydratation de la surface de la langue) et une surface en PVC non lubrifiée (a_1 , b_1 et c_1) ainsi que celles pour une « langue hydratée » (conditions normales de consommation) et une surface en PVC non lubrifiée (a_2 , b_2 et c_2) sont tracées.	163
7.11	Stratégie expérimentale de la thèse	165
8.1	Système expérimental utilisé pour réaliser l'échographie du système langue-palais au cours de la consommation des gels.	170
8.2	Représentation de la cavité orale et du champ de vue (en bleu) de la sonde échographique utilisée (a). Image échographique obtenue par le dispositif d'imagerie (b).	171
8.3	Évolution du système langue- Ge_7 -palais évaluée <i>in situ</i> par échographie US.	172
8.4	Images échographiques de la cavité orale lors de la mise en bouche du produit $Ag_{0.3}$ (a) et du produit Ge_7 (b).	173
8.5	Représentation en mode-M d'une séquence d'échographie acquise lors de la consommation d'un échantillon de gel $Ag_{0.3}$. Les lignes rouges et jaunes ont été tracées afin de guider le lecteur pour suivre respectivement la surface de la langue et la position de l'os hyoïde au cours du processus oral.	175
8.6	Comparaison des représentations en mode-M d'une séquence d'acquisition US pour le produit $Ag_{0.3}$ pendant une compression en conditions <i>in vivo</i> (a) et <i>in vitro</i> (b) sur une langue déformable en PVA ($D_{contr}R_2$).	176

8.7	Cartographie d'élasticité des langues en PVA réalisées par élastographie. (a) 2 cycles de congélations/décongélation (C_2) 18.5 ± 1.9 kPa pour la zone X et 18.3 ± 2.1 kPa pour la zone +. (b) Langue en PVA ayant subi 6 cycles de congélations/décongélation (C_6), 103.5 ± 12.7 kPa pour la zone X et 117.2 ± 9.4 kPa pour la zone +.	178
8.8	Cartographie <i>in vivo</i> de l'élasticité d'une langue et indication des muscles observés pour (a) une langue au repos et (b) une langue au travail. Les modules d'Young sont mesuré à l'intérieur de la zone de mesure.	179

Liste des tableaux

1.1	Attributs sensoriels et paramètres rhéologiques corrélés dans la littérature (adapté de (Devezeaux de Lavergne et al., 2017))	32
1.2	Tableau bibliographique général non exhaustif présentant la composition d'aliments modèles semi-solides et les techniques de caractérisation mécaniques et sensorielles utilisées par quelques études	36
1.3	tableau de synthèse des mesures ultrasonores réalisée dans des produits alimentaires (McClements and Gunasekaran, 1997). c , α , Z et t représentent respectivement la vitesse, l'atténuation, l'impédance et le temps de vol des ultrasons.	44
2.1	Caractéristiques des papiers abrasifs utilisés et des protocoles de formations des surfaces associés.	55
2.2	Paramètres de surfaces (Ra et β) mesurés pour chaque langue	57
2.3	Quantité d'eau déposé selon la condition de lubrification	58
3.1	Composition of the model foods : three control solutions and six gels gradually accounting for the complex components of an emulsion filled gel.	70
4.1	Food composition. All samples contained 15% wt% of sucrose.	94
4.2	Mean values $\pm$ standard deviations of the surface parameters for the three tongue surface profiles investigated.	95
4.3	Mean values $\pm$ standard deviations (i) of the quantity of water and (ii) of the thickness of the water film deposited on tongue surface for the four lubrication conditions.	95
4.4	Mean values $\pm$ standard errors of US reflectivity at tongue-food interface for all tested experimental	98
5.1	Composition of product. All products are composed of 15% w/w sucrose . . .	110
5.2	Surface properties of biomimicking tongues. Mean values $\pm$ standard deviations are shown.	111
5.3	Mean values $\pm$ standard deviations (i) of the quantity of water and (ii) of the thickness of the water film deposited on tongue surface for the four lubrication conditions.	111
6.1	Modules de Young des langues déformables en PVA utilisées et des langues de 4 individus (au repos et contracté)	126

6.2	Propriétés de surface des langues déformables en PVA et en PVC utilisées .	126
7.1	Composition et module de Young des produits. Tous les produits contiennent 15% w/w de sucre. Le TWEEN 20 est utilisé comme émulsifiant.	142
7.2	Définitions des descripteurs sensoriel utilisé en DTS	144
7.3	Définitions et schémas correspondant aux descripteurs sensoriels utilisés en DTM	145
7.4	Moment d'évaluation des attributs sensoriels du profil sensoriel. Les attributs ont été définis de la même manière que ceux du DTS.	146
7.5	Coefficient de corrélation entre les moyennes des notes par attributs de textures à la mise en bouche et lors de la compression de l'aliment entre langue et palais et les mesures de réflectivité ultrasonore de chaque produits (en condition sèche (Dried Tongue) et en condition langue hydratée (Hydrated Tongue). La symbole * indique les coefficients de corrélation significatifs. . . .	160

Titre : Caractérisation biomécanique *in situ* du système langue-aliment-palais par ultrasons quantitatifs pour une meilleure compréhension des perceptions de texture

Mots clés : Aliments, Texture, Biomécanique, Ultrasons Quantitatifs, Rhéologie, Interface

Résumé : Les pratiques d'agriculture et de production alimentaire évoluent de façon profonde afin de proposer une offre alimentaire permettant de répondre aux enjeux de la croissance démographique, et de satisfaire des critères de santé et de durabilité. Cependant, le succès des produits alimentaires qui découlent de ces mutations repose avant tout sur leur appréciation sensorielle par le consommateur. En particulier, les perceptions de texture jouent un rôle majeur dans les choix et préférences des consommateurs.

Ces travaux de thèse s'insèrent dans la problématique générale de la compréhension des mécanismes de perception de texture qui découlent des interactions mécaniques entre la langue, l'aliment et le palais durant le processus oral. L'objectif de la thèse réside dans le développement d'une méthode nouvelle et originale, basée sur les ultrasons quantitatifs, pour l'évaluation non-destructive, non-invasive et en temps réel des propriétés mécaniques du système langue-aliment-palais.

Un montage bio-mimétique a été développé au laboratoire afin de reproduire en conditions contrôlées, *in vitro*, le comportement du système langue-palais durant la compression d'un aliment. Ce système a permis de progressivement prendre en compte la complexité de l'environnement physiologique, en intégrant notamment les caractéristiques liées à la rugosité, à la lubrification et à la déformabilité de la langue. Un ensemble de gels modèles d'agar et de gélatine a été développé, permettant d'obtenir une gamme de produits alimentaires avec des caractéristiques physiques et sensorielles contrastées. Un dispositif expérimental à ultrasons quantitatifs a ensuite été

conçu afin de mesurer la réponse échographique du système langue-aliment-palais au cours de compressions uni-axiales imposées par le système biomimétique sur les aliments modèles. Des techniques de traitement du signal et des outils de simulation de propagation d'ondes ont permis de développer des indicateurs quantitatifs fournissant des informations sur les mécanismes physiques observés aux interfaces du système langue-aliment-palais. Deux paramètres ultrasonores ont alors été identifiés : i) la réflectivité de l'interface entre la langue et l'aliment, qui permet de caractériser le contact intime entre l'aliment et les aspérités de la surface de la langue, et ii) le temps de vol des ondes ultrasonores dans l'aliment, qui traduit l'état de déformation subi par ce dernier. Ces propriétés issues des signaux ultrasonores ont été confrontées à des données d'analyse sensorielle évaluées grâce à un panel de juges entraînés sur les aliments modèles sélectionnés. Les attributs sensoriels « humide » et « glissant » ont par exemple pu être mis en relation avec les mesures de réflectivité ultrasonore à l'interface langue-aliment, elles-mêmes liées à l'état de lubrification de l'interface.

Ces travaux de thèse ont ainsi permis de montrer le potentiel des méthodes ultrasonores pour mieux comprendre et caractériser, en conditions *in vitro* contrôlées, des phénomènes physiques qui peuvent jouer un rôle important dans les mécanismes de perception de texture de l'aliment. Ils permettront d'ouvrir la voie aux perspectives de transfert de la technologie en conditions *in vivo*, directement sur le consommateur.

Title : *In-situ* biomechanical characterisation of the tongue food system by quantitative ultrasound to better understand texture perception

Keywords : Food, Texture, Biomechanic, Quantitative Ultrasounds, Rheology, Interface

Abstract : Agriculture and agri-food industry practices evolve in a deep way to supply a new food offer allowing to address population growth issues, and to meet health and sustainability criteria. However, the success of commercial products emerging from these transformations highly depends on sensory appreciation by the consumer. In particular, texture perceptions have been shown to play a major role in the choices and preferences of consumers.

This thesis work fits within the general issue of understanding the mechanisms of texture perception resulting from the mechanical interactions between tongue, food and palate during oral processing. The aim of this thesis lies in the development of a new and original method, based on quantitative ultrasounds, for the non-destructive, non-invasive and real time evaluation of the mechanical properties of the tongue-food-palate system.

A bio-mimicking system was developed in the laboratory to reproduce in controlled *in vitro* conditions, the behavior of tongue-palate system during the compression of a food sample. This system allowed to consider gradually the complexity of the physiological environment, by integrating characteristics related to tongue roughness, lubrication and deformability. A set of model gels of agar and gelatin was developed to obtain a range of food products with contrasting physical and sensory characteristics. Then, a quantitative ultrasound device was designed to measure the ultrasound pulse-echo response of the tongue-food-

palate system throughout a uniaxial compression achieved by the bio-mimicking apparatus on the products. Signal processing methods and wave propagation simulation tools were used to develop quantitative indicators related to physical mechanisms occurring in tongue-food system interfaces. Two ultrasonic parameters were then identified: i) the reflectivity of tongue-food interface, which makes it possible to characterize the intimate contact between food and the asperities of tongue surface, and ii) the time of flight of ultrasonic waves through the food sample, which is related to the level of deformation undergone by the sample. Finally, the properties stemming from ultrasonic signals were compared with sensory data estimated on the set of food samples, thanks to a panel of trained judges. "Moist" and "slippery" sensory attributes were for instance shown to correlate with ultrasound reflectivity measurements, which are themselves related to lubrication conditions at tongue-food interface.

This thesis work allowed to show the potential of ultrasonic methods to better understand and characterize, in controlled *in vitro* conditions, physical phenomena which may play an important role in the mechanisms of food texture perception. This work must pave the way for future investigations on the transfer of the technology to *in vivo* conditions, directly on the consumer.