



HAL
open science

Texture et flaveur des aliments : vers une conception maîtrisée

Elisabeth Guichard, Claude Genot, Andrée Voilley, Laurent Brachais, Loïc Briand, Chantal Brossard, Nathalie Cayot, Pascale Chalier, Isabelle Deleris, Jean Louis Doublier, et al.

► **To cite this version:**

Elisabeth Guichard, Claude Genot, Andrée Voilley (Dir.). Texture et flaveur des aliments : vers une conception maîtrisée. Educagri Editions, pp.298, 2012, Références, 978-2-84444-879-8. hal-01191242

HAL Id: hal-01191242

<https://hal.science/hal-01191242v1>

Submitted on 6 Jun 2020

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

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



COORDINATION

Élisabeth GUICHARD
Claude GENOT, Andrée VOILLEY



Texture et flaveur des aliments

VERS UNE CONCEPTION MAÎTRISÉE



Références

educagri
éditions

Éléments sous droits d'auteur

DANS LA MÊME COLLECTION

Agroécologie : entre pratiques et sciences sociales

D. Van Dam, M. Streith, J. Nizet, P. M. Stassart (coord.), 2012

Produits « bio » : de quelle qualité parle-t-on ?

C. Raiffaud, nouvelle édition, 2010

Les circuits courts alimentaires : bien manger dans les territoires

G. Maréchal (coord.), 2008

Édition : Delphine Pauthier

Couverture : Sandrine Dubray / Brigitte Mignotte

PAO : Sandrine Dubray

Coordination infographie : Dominique Azan

Infographie : Dominique Azan, Évy Gonçalves-Lecler, Lucas Jacob, Éric Souverbie

Photographie de couverture : © Naty Strawberry/Fotolia.com



Aux termes du *Code de la propriété intellectuelle*, toute reproduction ou représentation, intégrale ou partielle, de la présente publication, faite par quelque procédé que ce soit (reprographie, microfilmage, scannérisation, numérisation...) sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite et constitue une contrefaçon sanctionnée par les articles L 335-2 et suivants du *Code de la propriété intellectuelle*. L'autorisation d'effectuer des reproductions par reprographie doit être obtenue auprès du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC) – 20 rue des Grands-Augustins 75006 Paris – Tél. : 01 44 07 47 70 / Fax : 01 46 34 67 19.

© Educagri éditions, 2012

ISBN 978-2-84444-879-8

ISSN 1629-7474

Educagri éditions

BP 87999 – 21079 DIJON Cedex

Tél. 03 80 77 26 32 – Fax 03 80 77 26 34

www.editions.educagri.fr

editions@educagri.fr

SOMMAIRE

PRÉFACE	17
INTRODUCTION	
<i>Arômes, saveurs, textures : familiarité ne rime pas avec connaissance...</i>	19
PARTIE I. L'ALIMENT : UN UNIVERS SENSORIEL POTENTIEL	
CHAPITRE 1. MOLÉCULES AROMATISANTES ET SAPIDES	31
1. Formation des molécules aromatisantes et sapides	33
1.1. À partir de réactions enzymatiques	34
1.2. À partir de réactions non enzymatiques	35
2. Structure chimique et caractéristiques	38
2.1. Composés d'arôme	38
2.2. Composés sapides	45
CHAPITRE 2. STRUCTURE ET TEXTURE DES ALIMENTS : DE LA MOLÉCULE À LEUR ORGANISATION MICROSCOPIQUE ET MÉSCROPIQUE	59
1. Microscopies et techniques de préparation	60
1.1. Microscopie optique	60
1.2. Microscopie confocale	60
1.3. Microscopies électroniques à balayage	61
1.4. Microscopie électronique à transmission	64
1.5. Intérêt de l'utilisation des différentes techniques	65
2. Exemples de produits alimentaires	65
2.1. Produits riches en amidon	65
2.2. Produits riches en matière grasse	70
2.3. Produits laitiers	72
CHAPITRE 3. CARACTÉRISATION RHÉOLOGIQUE DES MILIEUX LIQUIDES ET SEMI-SOLIDES	87
1. Les méthodes rhéologiques : principes et outils	88
1.1. Mouvement de cisaillement	89
1.2. Déformation uniaxiale	94

2. La caractérisation rhéologique : exemples de comportements	96
2.1. Propriétés d'écoulement	96
2.2. Exemples concrets (aspects pratiques, procédures)	105
CHAPITRE 4. RÔLE DES DIFFÉRENTS CONSTITUANTS D'UN ALIMENT DANS LE COMPORTEMENT DES COMPOSÉS D'ARÔME	115
1. Interactions des composés d'arôme avec les protéines	116
1.1. Interactions physico-chimiques des protéines avec les composés d'arôme	116
1.2. Conséquences des interactions composés d'arôme-protéines sur la libération et sur la perception	118
2. Interactions des composés d'arôme avec les polysaccharides	119
2.1. Interactions amidon-arômes	120
2.2. Interactions polyosides non amylacés-composés d'arôme	123
3. Interactions des composés d'arôme avec les lipides	125
3.1. Les lipides : réservoirs et précurseurs de composés d'arôme	125
3.2. Effet de la nature des lipides, de leur état physique sur la volatilité des composés d'arôme	125
4. Comportement des composés d'arôme dans les systèmes polyphasiques	128
4.1. Les émulsions	128
4.2. Les matrices gélifiées	133
5. Aliments modèles ou réels : cas concrets	133
CHAPITRE 5. DÉFAUTS D'ARÔME : FORMATION ET PROTECTION	145
1. Mécanismes à l'origine de défauts d'arôme	146
1.1. Mécanismes de dégradation et défauts d'arôme	147
1.2. Évolution de l'arôme liée aux interactions avec l'extérieur et aux interactions contenant-contenu : rôle de l'emballage	150
<u>2. Protéger l'arôme des aliments</u>	<u>154</u>
<u> 2.1. Prévention des réactions de dégradation et de la formation des défauts d'arôme</u>	<u>154</u>
2.2. Protéger les arômes et les extraits aromatiques par encapsulation	155
PARTIE II. DEVENIR DE L'ALIMENT EN BOUCHE	
CHAPITRE 6. MASTICATION ET DÉSTRUCTURATION DES ALIMENTS	173
1. Mécanismes sensori-moteurs de la mastication	174
1.1. Muscles de l'appareil masticateur et forces développées	174
1.2. L'acte de mastication	175
1.3. Récepteurs associés à l'appareil masticateur	176

2. Innervation et contrôle nerveux de la mastication	177
3. Les glandes salivaires et la salive	178
4. La déglutition	179
5. Adaptation du comportement masticatoire à l'aliment	180
5.1. Méthodes d'étude de la mastication	180
5.2. Variabilité de la mastication liée à l'individu	181
5.3. Adaptation de la mastication aux propriétés de l'aliment	184
5.4. Mastication et perception de la texture des aliments	187
6. Formation et caractéristiques du bol alimentaire	188
7. Phase orale pour les aliments semi-solides	193
8. Influence de la mastication dans la perception de la flaveur	194
9. Rôle de la mastication dans l'acceptabilité des aliments	194
CHAPITRE 7. LIBÉRATION DES COMPOSÉS D'ARÔME ET DES COMPOSÉS SAPIDES	203
1. Les méthodes expérimentales de mesure de la libération	204
1.1. Rappels de la théorie du transfert de matière	204
1.2. Caractérisation <i>in vitro</i> des propriétés d'équilibre aux interfaces de transfert	206
1.3. Caractérisation <i>in vitro</i> des propriétés de mobilité des composés d'arôme et des composés sapides au sein d'une matrice	208
1.4. Caractérisation de la libération des molécules d'intérêt	212
2. Facteurs influençant la libération des composés de la flaveur en bouche	216
2.1. Effets liés au produit	216
2.2. Effets liés à la physiologie des individus	218
3. Modélisation des cinétiques de libération lors de la consommation	222
3.1. Modèles mécanistiques	222
3.2. Modélisation empirique	224
3.3. Apport de la modélisation	224
PARTIE III. CARACTÉRISATION SENSORIELLE : PERCEPTION PAR LE DÉGUSTATEUR DE LA FLAVEUR ET DE LA TEXTURE	
CHAPITRE 8. PERCEPTION DES ARÔMES EN MÉLANGE : LES FACETTES DE LA FLAVEUR	235
1. Messages moléculaires : de la préhension à la compréhension	236
1.1. Odeurs et arômes, rudiments de sémantique	236
1.2. Les propriétés d'une odeur pour l'observateur non spécialiste	236
1.3. Les stimuli odorants sont faits de mélanges complexes	237

2. Progresser dans la compréhension : la voie des analogies	237
2.1. Le modèle chromatographie en phase gazeuse	237
2.2. L'analogie biologique	238
2.3. L'approche psychophysique	238
2.4. Des mélanges considérés sous l'angle de l'accumulation	240
2.5. L'impasse : le tout n'est pas la somme des éléments	242
3. Mélanges : place aux interactions perceptives	242
3.1. Tentatives de catégorisation des effets de mélange	243
3.2. Masquage, synergie	246
3.3. Cas particulier de la fusion	248
3.4. Tonalité hédonique de l'odeur des mélanges	249
3.5. La règle des 4 notes : base de départ de l'exploration des mélanges complexes ?	250
4. Les mécanismes biologiques sous-tendant les interactions perceptives	250
4.1. Le niveau présensoriel : juste avant les interactions perceptives	251
4.2. Les interactions perceptives à l'entrée du système : niveau sensoriel périphérique	251
4.3. Les interactions au niveau neurophysiologique	252
4.4. Les interactions cognitives	253
5. Opter pour un cheminement opérationnel ?	254
 CHAPITRE 9. INFLUENCES RESPECTIVES DE LA TEXTURE, DE LA SAVEUR ET DE L'ARÔME VUES PAR UN DÉGUSTATEUR	 263
1. La texture du produit modifie la perception de sa flaveur	264
1.1. La texture modifie la perception de la saveur	264
1.2. La texture modifie la perception de l'arôme	267
2. La flaveur modifie la perception de la texture en bouche	271
2.1. La saveur modifie la perception de la texture	271
2.2. L'arôme modifie la perception de la texture	272
3. Interactions saveur-arôme et leurs effets sur les interactions texture-flaveur	274
 CONCLUSION	
<i>Vers des approches intégrées de la flaveur et de la texture des aliments</i>	293
 LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	 297

PRÉFACE

P. ÉTIÉVANT

Nos comportements et pratiques alimentaires pris dans leur sens le plus large sont la résultante de l'intégration complexe plus ou moins consciente de nombreux facteurs, notamment physiologiques, psychologiques, économiques et sociaux, environnementaux et culturels. Toutefois, un facteur central déterminant nos choix, systématiquement cité par les consommateurs et largement utilisé comme cible par les industries alimentaires, est le « goût » des aliments et le plaisir associé à leur consommation.

Ce déterminant majeur des comportements alimentaires a été largement abordé par les nutritionnistes en raison des conséquences négatives qu'il peut induire dans le contrôle pondéral et la prévalence de maladies métaboliques. En effet, le sucre et les lipides sont de manière indissociable des vecteurs d'énergie pour notre métabolisme et de perception de « goûts » recherchés, respectivement sucré ou de gras en bouche (*mouth feel*). De même, le sel est un vecteur du goût salé et un exhausteur d'arômes, mais sa consommation excessive est fortement suspectée d'entraîner une hypertension et une augmentation de risques vasculaires.

En revanche, le goût comme déterminant de nos comportements a été très insuffisamment étudié dans ses aspects positifs par les physico-chimistes et les biologistes. Seuls les sociologues s'y sont intéressés pour les aspects de convivialité et de partage social qu'il implique, avec des conséquences positives qui ont été démontrées sur le contrôle de la prise alimentaire. En effet, l'attention portée aux aliments consommés au cours du repas grâce à un environnement favorable (verbalisation des mets consommés, temps passé à table, plaisir de partager dans une ambiance agréable) semble favoriser une anticipation de la cascade des signaux physiologiques associés au repas et impliquer une meilleure maîtrise de la prise énergétique.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Les neurophysiologistes se sont aussi intéressés, bien qu'assez récemment, à la relation entre goût, plaisir et prise alimentaire dans l'objectif de comprendre le rôle du goût dans la régulation énergétique au cours du repas.

Bien que nous soyons encore loin de comprendre toutes les implications du goût dans les comportements, il est d'ores et déjà clair que le goût joue un rôle déterminant sur nos choix alimentaires et donc sur notre santé. Agir sur le goût des aliments dans une logique d'ingénierie reverse, c'est-à-dire en partant des attentes du consommateur et des caractéristiques des aliments favorables à sa santé pour aller vers l'optimisation des matières premières et des procédés, devrait donc nous permettre d'inventer des aliments nouveaux satisfaisant à nos attentes en matière de goût et de plaisir, et plus conformes aux recommandations nutritionnelles communément admises comme favorables à une meilleure santé et favorisant le bien-être. Cette démarche qui consiste à agir sur la qualité de l'offre plutôt que sur l'information donnée au consommateur a été amorcée au travers des chartes d'engagements volontaires de progrès nutritionnel signées entre des industriels et l'État.

Ces initiatives et cette logique nécessitent toutefois de connaître avec précision, et de pouvoir modéliser, les relations de causalité entre la composition et la structure de l'aliment, les cinétiques de libération des molécules contribuant au « goût » des aliments au cours de leur déstructuration en bouche et dans le tube digestif et finalement la relation qui existe entre la perception de ces stimuli et leur perception holistique et hédonique.

Cet ouvrage a mobilisé des chercheurs des équipes les plus pointues dans le domaine en France. Il nous permet de faire le point sur nos connaissances et lacunes actuelles concernant la physico-chimie complexe du « goût » des aliments et les perceptions sensorielles induites par ces phénomènes physico-chimiques. Il est conçu de manière très logique pour les non-spécialistes en allant de la molécule aromatique vers sa libération dans le tube digestif et sa perception en mélange, et conclut sur les possibilités actuelles d'intégration des connaissances dans la compréhension plus holistique du goût des aliments.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Les neurophysiologistes se sont aussi intéressés, bien qu'assez récemment, à la relation entre goût, plaisir et prise alimentaire dans l'objectif de comprendre le rôle du goût dans la régulation énergétique au cours du repas.

Bien que nous soyons encore loin de comprendre toutes les implications du goût dans les comportements, il est d'ores et déjà clair que le goût joue un rôle déterminant sur nos choix alimentaires et donc sur notre santé. Agir sur le goût des aliments dans une logique d'ingénierie reverse, c'est-à-dire en partant des attentes du consommateur et des caractéristiques des aliments favorables à sa santé pour aller vers l'optimisation des matières premières et des procédés, devrait donc nous permettre d'inventer des aliments nouveaux satisfaisant à nos attentes en matière de goût et de plaisir, et plus conformes aux recommandations nutritionnelles communément admises comme favorables à une meilleure santé et favorisant le bien-être. Cette démarche qui consiste à agir sur la qualité de l'offre plutôt que sur l'information donnée au consommateur a été amorcée au travers des chartes d'engagements volontaires de progrès nutritionnel signées entre des industriels et l'État.

Ces initiatives et cette logique nécessitent toutefois de connaître avec précision, et de pouvoir modéliser, les relations de causalité entre la composition et la structure de l'aliment, les cinétiques de libération des molécules contribuant au « goût » des aliments au cours de leur déstructuration en bouche et dans le tube digestif et finalement la relation qui existe entre la perception de ces stimuli et leur perception holistique et hédonique.

Cet ouvrage a mobilisé des chercheurs des équipes les plus pointues dans le domaine en France. Il nous permet de faire le point sur nos connaissances et lacunes actuelles concernant la physico-chimie complexe du « goût » des aliments et les perceptions sensorielles induites par ces phénomènes physico-chimiques. Il est conçu de manière très logique pour les non-spécialistes en allant de la molécule aromatique vers sa libération dans le tube digestif et sa perception en mélange, et conclut sur les possibilités actuelles d'intégration des connaissances dans la compréhension plus holistique du goût des aliments.

INTRODUCTION

Arômes, saveurs, textures : familiarité ne rime pas avec connaissance...

J.-P. DUMONT

Les aliments n'ont par eux-mêmes ni arôme ni goût... mais ils renferment des molécules capables d'activer des récepteurs chez le sujet consommateur. Dans la pratique, l'émergence d'arômes et de saveurs nécessite la conjonction de trois facteurs :

- des molécules dotées d'activité aromatique ou sapide ;
- des conditions locales autorisant leur mobilité dans l'aliment et son environnement ;
- la présence de capteurs opérationnels à proximité (le sujet sensible).

Le triptyque « émission - transmission - réception » est commun à l'ensemble du système sensoriel. À la différence des autres sens, le goût et l'odorat sont mis en alerte par des molécules, c'est pourquoi le terme de « sens chimiques » leur est parfois appliqué pour les désigner.

Le présent ouvrage ambitionne de rassembler une collection significative des connaissances actuelles, permettant de mieux cerner les aléas de l'élaboration des arômes et des saveurs en prenant en compte la texture des aliments.

Au commencement étaient les effluves, les odeurs et les parfums...

Phase I. Observer et dénombrer, tout simplement

« Les sons et les parfums tournent dans l'air du soir... ». À la différence du point de vue exprimé par Baudelaire, celui du chimiste est clairement prosaïque : l'air ambiant propage des odeurs imputables à la présence à

l'état vapeur de molécules, autres que les gaz permanents. Les saveurs tiennent, quant à elles, à des molécules solubilisées qui, dans la bouche, subissent un transport sur de plus courtes distances. Le cousinage entre goût et odorat est patent, mais les différences sont sensibles au niveau de leurs modes respectifs d'activation. Les investigations conduites dans ces domaines ont été stimulées par les fantastiques développements contemporains des méthodes analytiques (en particulier, chromatographie et spectrométrie de masse). L'accroissement des connaissances (présentées d'une manière détaillée dans le chapitre 1) a été considérable dans le domaine de l'identité des molécules impliquées, mais il subsiste des zones d'ombre quant aux modalités de leur efficacité.

Phase II. Marier causes et effets

Les tentatives faites pour opérer un rapprochement systématique des molécules inventoriées et des notations sensorielles, qui leur ont été associées dans la littérature, ont fait long feu. Il a fallu se résoudre à admettre que l'exploitation du concept univoque « à effet constaté, cause spécifique » s'avérait impraticable. Ceci marque un tournant dans la conduite des recherches avec la fin de la quête utopique de la « collecte exhaustive ». Extraire « tout ce qui est » dans l'aliment cesse d'être une fin en soi. L'aliment, qui n'est plus considéré comme un minerai à épuiser, devient un support dont les caractéristiques de structure et de texture (à ce sujet, se reporter aux chapitres 2 et 3) doivent être décrites et mesurées. Le tripode qualité - intensité - équilibre entre les stimuli individuels commence alors à se profiler comme le nœud gordien de la construction des caractéristiques de la flaveur perçue.

Phase III. Cerner la réalité au plus près

Dans un souci d'efficacité, la démarche expérimentale va dès lors s'attacher à un nombre limité d'agents. La sélection des composés dignes d'intérêt est opérée sur leur capacité, dans les conditions particulières du milieu, à provoquer une réponse sensorielle du sujet. Cela impose de caractériser le potentiel des molécules-cibles sous le triple aspect de leur pouvoir sensoriel intrinsèque et de leurs réactivités (active et passive) à l'endroit de leur environnement du moment. Cette approche marque un progrès déterminant, puisqu'à compter de cette génération de travaux, les

expérimentateurs se sont véritablement attachés à la fidélité des représentations aromatiques relativement au substrat de départ.

Différentes stratégies (cf. Grosch, 2001) ont été employées dans le but d'estimer l'efficacité sensorielle intrinsèque des composants d'un panel restreint de facteurs d'impact. Leur exploitation pratique (« CHARM[®] », Odour Aroma Value ou OAV) est rendue incertaine par le traitement sommaire appliqué aux données expérimentales. En matière de réactivité (active et passive) à l'endroit des autres locataires du proche environnement, les chapitres 4 et 5 proposent un état des lieux documenté sur les connaissances acquises.

Comportement en bouche des molécules actives et les effets qui en résultent...

Les petits solutés, tant molécules sapides que composés d'arôme ou agents à activité trigéminal, vont être l'objet de transferts en bouche. Cette mobilité est impulsée par des facteurs externes (mastication, imprégnation salivaire du bol) ou internes (déstructuration) à l'aliment. Une certaine proportion des composés d'arôme va cumuler migration et franchissement d'interfaces (liquide-liquide et liquide-air) et/ou changement d'état physique (passage à l'état vapeur). Dans ces conditions, il est difficile de cantonner la perception sensorielle à une banale affaire de capture de signal.

Cette nouvelle configuration des facteurs pousse à rechercher les concentrations efficaces des composés impliqués. Par « efficace », il faut comprendre « qualité des items en situation de stimuler les récepteurs sensoriels, dans les conditions réelles du terrain ». Si on occulte la restitution des effets sensoriels par le sujet, la question soulevée se décline en termes de flux massiques et de régularité d'approvisionnement.

Accepter, ne serait-ce qu'un instant, l'idée que l'hétérogénéité est un état commun du bol alimentaire fait apparaître les incohérences attachées au culte de la moyenne sous un jour très cru. Une inclinaison naturelle à la paresse intellectuelle pousse à raisonner comme si les agents actifs étaient répartis équitablement dans la totalité de l'aliment étudié. Ce concept de concentration moyenne est appliqué à large échelle. Parfois même, on le trouve étendu à des situations (émulsions huile/eau, par exemple) où le partage égalitaire du soluté entre les phases est une impossibilité avérée au plan théorique. Des travaux sur des émulsions huile-dans-eau de

grande viscosité ont mis à mal la fiction de l'uniformité. Ils laissent à penser que le niveau de la stimulation rétronasale du sujet se détermine à partir des zones qui contiennent les agents actifs aux pressions les plus élevées (Brossard *et al.*, 2002a). Ces observations permettent de proposer un modèle schématique du cours des événements en bouche. Deux compartiments bien différenciés seraient le siège des échanges de molécules. Le premier, qui assure l'alimentation des capteurs sensoriels en agents actifs, correspondrait à une phase gazeuse homogène, elle-même approvisionnée par le second compartiment. Chez ce dernier, fluide et hétérogène, la trituration du bol alimentaire ferait le lit de la libération d'arômes dans la région pharyngée après l'ingestion (Normand *et al.*, 2004). Inventorier les échanges et en préciser les modalités dessine les contours d'une préoccupation essentielle. L'étude de ces aspects dynamiques est développée dans les chapitres 6 et 7 qui mettent en situation la déconstruction de la structure de l'aliment et la libération progressive des solutés qui y étaient renfermés.

Le concept « efficacité sensorielle » impose, à l'instar des barèmes « temps-température » de réduction des populations microbiennes, l'agrégation d'une composante temporelle. Le suivi en temps réel des variations de l'intensité de la stimulation sensorielle (dénommé « mesure temps-intensité », dans le jargon des spécialistes) met en valeur une dimension longtemps ignorée par l'approche physico-chimique conventionnelle. Les méthodes développées dans la dernière décennie, en particulier le suivi simultané de la composition de l'atmosphère expirée ou des flux salivaires et de la restitution verbalisée du sujet (déclarations ou notations), éclairent d'un jour nouveau le couplage du stimulus appliqué et de la stimulation opérée. Les observations recueillies portent à conclure que la dynamique des échanges intra-buccaux, approchée par les mesures *in situ*, et la dynamique de la perception aromatique ne procèdent pas d'une base de temps commune. À bien y réfléchir, il n'y a pas là d'offense à la logique puisque le cycle modèle connaît son terme à l'ingestion de l'aliment. Il occulte ainsi certains événements bien réels auxquels le sujet est confronté. En particulier, c'est le cas de la rémanence aromatique et du retour au niveau de base de la chaîne biologique de graduation sensorielle. Fondamentalement, les réponses sont de natures différentes : la mesure instrumentale rapporte un inventaire scrupuleusement objectif, établi sur une base massique ou moléculaire, tandis que la mesure sensorielle est gagée sur une estimation globale de l'intensité de la stimulation, modulée par son évolution sur le court terme.

Caractérisation sensorielle : le dernier espace de liberté ?

Certains travaux (Taylor *et al.*, 2003) ont rapporté la persistance d'une stimulation dans des périodes où aucun agent actif n'est décelable physiquement. Ce phénomène ne se confond pas avec le cas où des défauts de flaveur sont provoqués par des molécules anonymes qui présentent des seuils de perception extrêmement bas (Havekotte, 2003). En la circonstance, l'observation concernait des stimuli connus des sujets et induits par des molécules reconnues par les instruments. Sur un registre voisin, des travaux ont établi qu'à niveau d'aromatisation identique, des systèmes gélifiés de caractéristiques rhéologiques différentes induisent la perception d'intensités aromatiques à raison inverse de la fermeté des gels, mais impliquent des quantités d'arôme expirées équivalentes (chapitre 9). Déconcertantes de prime abord, puisqu'elles contredisent la logique univoque de la relation stimulation/perception, ces constatations invitent à entrer dans le débat en considérant l'approche supports-signaux-sujets sous un angle différent.

La contribution du transfert de masse, indissociable de la notion de disponibilité des agents actifs, serait-elle surestimée à présent après avoir été longtemps ignorée dans le passé ? La texture perçue traduit-elle fidèlement l'état de la structuration de l'aliment ? Quels sont les vecteurs efficaces de la représentation mentale à même de figurer la déformation du système aliment-solutés dans un espace à 4 dimensions (temps + 3 dimensions métriques) ? Avant de crier au miracle ou de conclure à l'énigme historique, il n'est certainement pas inutile de faire le point sur les spécificités de fonctionnement du système sensoriel (chapitre 8) et leur traduction en termes de réponse du dégustateur (chapitre 9).

Dans le domaine sensoriel, la connaissance de l'intensité individuelle des notes d'un accord renseigne mal sur la qualité du tout. Or, les arômes libérés par les aliments ont pour caractéristique constante d'être constitués par des mélanges complexes. Par ailleurs, en règle générale, les dispositifs expérimentaux peinent à intégrer les apports des périodes transitoires d'apparition et de disparition des composés, espaces durant lesquels les concentrations accessibles aux sens varient sur le mode dynamique. Enfin, il faut reconnaître que l'évaluation de l'intensité globale du stimulus a été privilégiée par la démarche expérimentale, en raison, vraisemblablement, de son statut de variable quantitative continue. Pourtant, dans certaines circonstances, la discrimination qualitative des odeurs peut offrir une alternative efficace pour quantifier les aptitudes personnelles de sujets



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Références bibliographiques

- BROSSARD C., ROUSSEAU F., DUMONT J.-P., Oil-water partition coefficients of odorants: reliable index for smell but deceptive for odour rating, *Food Quality and Preference*, 13, 65-72, 2002a.
- BROSSARD C., ROUSSEAU F., DUMONT J.-P., Perception of odor and flavor of liquid emulsions. In Anton M. (Ed.), *Food emulsions and dispersions*, Research Signpost, Trivandrum, India, 83-91, 2002b.
- GROSCH W., Evaluation of the key odorants of foods by dilution experiments, aroma models and omission, *Chemical Senses*, 26, 533-545, 2001.
- HAVEKOTTE H. J., Recent findings on mushroom odour in carbonated soft drinks. In Le Quéré J.-L. & Étievant P. X. (Eds.), *Flavour Research at the Dawn of the Twenty-first Century, proceedings of the 10th Weurman flavour research symposium*, Lavoisier, Paris, 630-633, 2003.
- LAING D. G., FRANCIS G. W., The capacity of humans to identify odors in mixtures, *Physiology & Behavior*, 46, 809-814, 1989.
- MOROT G., BROCHET F., DUBOURDIEU D., The color of odors, *Brain and Language*, 79, 309-320, 2001.
- NORMAND V., AVISON S., PARKER A., Modeling the Kinetics of Flavour Release during Drinking, *Chemical Senses*, 29, 235-245, 2004.
- TAYLOR A., HOLLOWOOD A., DAVIDSON J., COOK R., LINFORTH R., Relating taste, aroma and mouthfeel stimuli to overall flavour perception. In Le Quéré J.-L. & Étievant P. X. (Eds.), *Flavour Research at the Dawn of the Twenty-first Century, proceedings of the 10th Weurman flavour research symposium*, Lavoisier, Paris, 194-199, 2003.
- THOMAS-DANGUIN T., ROUBY C., SICARD G., VIGOUROUX M., FARGET V., JOHANSON A., BENGTZON A., HALL G., ORMEL W., DE GRAAF C., ROUSSEAU F., DUMONT J.-P., Development of the ETOC: A European Test of Olfactory Capabilities, *Rhinology*, 41, 142-151, 2003.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

PARTIE I

L'ALIMENT : UN UNIVERS SENSORIEL POTENTIEL



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Il est maintenant reconnu que la perception globale de la flaveur est un phénomène intégratif multimodal qui non seulement implique la perception due à la présence individuelle de chaque composé d'arôme, de saveur ou responsable de sensations trigéminales dans l'aliment, mais qui prend aussi en compte les interactions intra- et intermodales entre ces différents sens. De plus, la perception de la texture, de la couleur ou l'apparence visuelle peuvent aussi interférer sur la perception de la flaveur ou au moins sur l'appréciation globale de l'aliment.

Les molécules composant un arôme ne représentent qu'un faible pourcentage de la masse totale de l'aliment (0,05 à 1 %) et se trouvent pour une très grande partie emprisonnées dans la matrice alimentaire. Ces molécules sont libérées en bouche sous l'effet de la mastication pour des matrices solides ou semi-solides, et de la salive. Ces composés volatils sont ensuite expulsés de la matrice et dirigés par voie rétronasale vers la muqueuse olfactive (Wilson et Brown, 1997).

Les aliments dont l'arôme est très largement dépendant de la présence d'un seul composé sont peu nombreux. C'est le cas des notes « banane » avec l'acétate d'isoamyle, « ail » avec le disulfure de dipropényle, « anis » avec l'anéthole ou « amande » avec le benzaldéhyde (Burdock, 2004).

Dans d'autres produits alimentaires, l'arôme peut être défini par un petit nombre de composés parmi lesquels on peut parfois distinguer un composé dominant appelé composé d'impact. C'est le cas de la framboise pour laquelle le composé d'impact est la frambinone (4-parahydroxyphénylbutan-2-one). D'autres composés tels que le (Z)-hex-3-én-1-ol, la damascénone et les α et β ionones permettent d'affiner la note du composé d'impact.

Il existe également des substances alimentaires pour lesquelles aucun composé d'impact n'est identifié, bien que l'arôme puisse être reproduit par un petit nombre de composés. C'est par exemple le cas de la tomate dont l'arôme est correctement reproduit par le mélange d'hexanal, de (Z)-hex-3-én-1-ol, de (Z)-hex-3-énal, de (E)-hex-2-énal, d'eugénol, de salicylate de méthyle et de 2-isobutylthiazole.

Pour de nombreux aliments, la note odorante ne peut être donnée qu'à partir d'un nombre important de composés, ce qui dans certains cas peut s'avérer impossible tant le mélange est complexe. C'est le cas de nombreux

aliments cuits ou grillés pour lesquels de très nombreuses substances odorantes sont créées au cours de la cuisson (de l'ordre de 500 pour le café) (Maarse, 1991).

En ce qui concerne les composés sapides, les concentrations dans les aliments sont en général bien plus importantes que celles relevées pour les arômes. Elles peuvent atteindre une proportion relativement importante de l'extrait sec de l'aliment.

Cependant, certains composés amers ou sucrés sont perçus à très faibles concentrations. Leurs structures chimiques sont très variées. Elles couvrent un vaste ensemble de composés qui va d'une molécule minérale simple comme le chlorure de sodium jusqu'à des molécules organiques très complexes comme des polyphénols ou certaines protéines. Au cours de la mastication, ces composés sont progressivement libérés dans la salive et vont atteindre les récepteurs gustatifs situés sur la langue. Ce phénomène conduit à la perception gustative.

Dans ce chapitre, nous nous limiterons à donner les voies de formation des principaux composés aromatisants et sapides à partir de précurseurs, leur nature chimique, leurs propriétés physico-chimiques et sensorielles, et à décrire les principales interactions intra- et inter-modales connues.

1. Formation des molécules aromatisantes et sapides

La diversité des structures chimiques des arômes (Crouzet, 1998) et des composés sapides montre que de nombreuses réactions participent à la formation de ces composés.

Il est possible de distinguer deux principales voies de formation de ces molécules suivant l'origine de leur apparition. Certaines, obtenues par voie enzymatique, sont issues pour la plupart des métabolismes; d'autres, obtenues par voie non enzymatique, ont pour origine des dégradations thermiques, fermentaires ou chimiques dues souvent à un traitement spécifique de l'aliment.

Le tableau 1 résume les différentes origines que peuvent avoir les composés d'arôme.

Tableau 1 : Subdivision des arômes en fonction de la nature de leur formation

Nature des arômes	Nature de leur formation	Exemples
Primaire	Métabolisme des végétaux vivants. Conservation presque intégrale de l'arôme après la récolte.	Épices, herbes, fruits.
Secondaire	Action d'enzymes durant le broyage de la denrée alimentaire. Transformation microbienne et fermentation. Chaleur (cuisson, rôtissage, torréfaction). Corruption.	Certaines espèces d'oignons, moutarde. Vins, produits laitiers, thé. Viande, café, légumes. Oxydation des graisses, rancissement.

1.1. À partir de réactions enzymatiques

Les composés d'arôme peuvent se former à partir d'une multitude de réactions qui se produisent au cours du métabolisme des animaux, des plantes ou des micro-organismes. Certaines réactions enzymatiques peuvent également intervenir après la destruction du tissu lorsque par exemple on broie ou presse certains fruits. Dans certains cas, les enzymes peuvent également indirectement participer à la formation d'arômes en combinaison avec des réactions non enzymatiques ; c'est par exemple le cas dans la bière, le pain ou le cacao.

Dans de nombreux cas, les enzymes ont pour rôle de faciliter des réactions pouvant se produire par voie non enzymatique. Ainsi, les acides gras insaturés tels que l'acide linoléique peuvent subir des réactions de dissociation par voie oxydative. Ces transformations possibles au seul contact de l'oxygène de l'air sont facilitées par l'action des lipoxygénases. L'action de ces enzymes coordonnée à celle des hydroperoxydlyases conduit à des aldéhydes tels que le trans hex-2-éanal ou le cis hex-3-éanal ; les composés d'arôme formés à partir des mêmes acides gras peuvent toutefois varier suivant l'origine de la matrice (fruits, champignons, viande...). On peut également signaler la formation fréquente d'alcools à partir de ces mêmes acides gras et enzymes qui correspondent en fait au degré inférieur à celui des composés carbonyles cités précédemment ; dans de nombreux cas, ces alcools apparaissent après réduction de ces aldéhydes sous l'action du NADH.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Les informations concernant la production de composés sapides au cours de processus thermiques sont très fragmentaires en comparaison à celles concernant la production de composés volatils et de matières colorantes qui ont fait l'objet de nombreuses études.

Certains travaux ont montré la formation de composés amers provenant de la condensation d'hydrates de carbone et d'acides aminés, en particulier la proline (Hofmann, 1999).

Des recherches ont aussi été entreprises pour trouver des stimuli provenant de la réaction de Maillard, ou plus généralement à partir du chauffage des composés présents dans le mélange initial et conduisant à d'autres sensations gustatives. Par exemple, la N-(1-méthyl-4-hydroxy-3-imidazolin-2,3-ylidene)alanine a été isolée d'une fraction obtenue par des étapes successives de dialyses puis chromatographie dont le goût de bouillon est très prononcé. Ce composé pourrait être formé par déshydratation entre la créatinine et l'acide lactique ou par désamination entre la L-alanine et la créatinine au cours du traitement thermique (Shima *et al.*, 1998).

Des composés sapides dans des aliments ayant subi un traitement thermique ont été identifiés par l'analyse sensorielle des fractions obtenues par chromatographie et la détermination du seuil relatif de perception des composés présents dans chacune de ces fractions. Par exemple, le chauffage d'un mélange de xylose et d'alanine puis la séparation par chromatographie ont permis l'obtention de nombreuses fractions amères dont une de saveur intense comportant un composé très amer : le 3-(2-furyl)-8-[(2-furyl)méthyl]-4-hydroxyméthyl-1-oxo-1H, 4H-quinolizinium-7-olate.

D'autres fractions de saveur sucrée ou astringente ont également été obtenues. Le sel de sodium de la N-(1-carboxyéthyl)-6-hydroxyméthylpyridinium-3-ol, nommé alapyridaine, a pu être identifié dans un mélange modèle d'acide aminé et de sucre ainsi que dans un bouillon de bœuf. Ce composé, bien qu'il soit lui-même insipide, a des propriétés d'exhausteur de saveur en présence de certains composés sapides. L'énantiomère physiologiquement actif est le (+)-S-alapyridaine. Ce composé peut exhausser plus d'une saveur, contrairement aux autres exhausteurs qui sont plutôt spécifiques d'une saveur particulière. Il renforce en particulier la saveur sucrée du glucose et sucrose, la saveur umami du glutamate monosodique et de la guanosine-5'-monophosphatée et la saveur salée du chlorure de sodium ; en revanche, les perceptions amère et acide ne sont pas affectées par sa présence dans le mélange. De plus, il intensifie les effets connus de synergie entre composés sapides, comme par exemple les effets

exhausteurs de l'arginine sur la perception de la saveur salée due au chlorure de sodium ou de la guanosine-5'-monophosphatée sur la saveur umami du glutamate monosodique.

Des produits végétaux ayant subi un traitement thermique présentent un défaut de flaveur qui peut apparaître occasionnellement. Il a été attribué à la formation de l'acide 5-oxo-2-pyrrolidone-carboxylique. Ce composé possède des notes médicinales, phénoliques et amères.

2. Structure chimique et caractéristiques

2.1. Composés d'arôme

Les composés d'arôme sont des molécules organiques issues de différentes classes chimiques (Belitz et Grosch, 1994).

2.1.1. Classes

Comme nous l'avons mentionné en introduction, les composés d'arôme sont des molécules volatiles. Cette caractéristique implique que celles-ci soient de faible masse molaire et avec majoritairement une masse molaire inférieure à 400 g/mol. Ces composés sont également généralement d'origine organique et non ioniques.

Les produits alimentaires peuvent être classés en fonction de leur teneur en arômes qui peut être infime pour la grande majorité de ces produits ou atteindre de fortes proportions dans le cas des épices :

- viandes, fruits, légumes... : de l'ordre de 50 ppm ;
- herbes aromatiques : de 0,1 à 1 % ;
- épices : de 1 à 20 %.

Les arômes sont en général classés suivant la classe de composés organiques à laquelle ils appartiennent. Une très grande variété de classes organiques est en fait représentée dans les composés d'arôme, depuis les hydrocarbures les plus simples jusqu'à des composés polyfonctionnels et/ou hétérocycliques assez complexes.

- **Hydrocarbures**

Les composés d'arôme appartenant à cette classe sont pour la très grande majorité de nature terpénique. On trouve en particulier des monoter-

pènes (C_{10}) et des sesquiterpènes (C_{15}). Cette origine terpénique permet d'expliquer la forte analogie de structure de différents composés d'arôme. Cette analogie existe également dans les classes de composés d'arôme autres que les hydrocarbures. Le tableau 2 présente quelques structures. Les molécules d'arôme appartenant à la classe des hydrocarbures ne permettent que rarement de décrire un arôme à elles seules et leurs propriétés organoleptiques ne se révèlent qu'en association avec d'autres composés.

- **Alcools**

Les alcools répertoriés comme composés d'arôme peuvent être aliphatiques ou cycliques; ils sont à l'origine d'une grande diversité de notes olfactives telles que la note herbacée (*cis* hex-3-én-1-ol), la note fruitée (*cis* hept-4-én-2-ol), la note citronnée (nérol), la note florale (linalol), la note mentholée (menthol).

- **Phénols**

Ces alcools aromatiques (au sens chimique) sont classés distinctement par rapport aux autres alcools en raison de leur puissant caractère anti-oxygène. Ils ont également une activité bactéricide intéressante. On distingue en particulier le thymol et le carvacrol, phénols rencontrés dans des herbes aromatiques telles que le thym et l'origan.

- **Éthers**

Si on exclut les éthers cycliques qui appartiennent à la classe des hétérocycles et les composés dans lesquels ces fonctions interviennent suivant les termes de la nomenclature en tant que fonctions secondaires, on trouve peu de composés d'arôme présentant une fonction éther simple. L'exemple de l'anéthole est le plus représentatif par sa note anisée. On peut également citer des dérivés des deux alcools décrits précédemment et qui contribuent à donner une note verte à l'origan.

- **Composés carbonylés**

Les aldéhydes et les cétones sont connus pour leurs propriétés odorantes et participent à des notes très variées.

L'un des exemples les plus typiques est constitué par le benzaldéhyde qui caractérise à lui seul la note d'amande amère. Un autre exemple intéressant est celui de la vanilline; ce composé, bien que renfermant trois fonctions différentes (éther, alcool et aldéhyde), est en effet considéré

comme un aldéhyde au sens de la nomenclature en chimie organique. Il faut également noter que de très nombreux composés d'arôme carbonylés sont $\alpha\beta$ -insaturés (carbonyle conjugué avec une double liaison terpénique ou aromatique), ce qui leur confère une bonne stabilité chimique.

- **Esters et lactones**

Ces composés apportent essentiellement des notes fruitées. Parmi les esters classiques, qui sont des molécules acycliques, on peut citer l'acétate d'isoamyle qui caractérise la note banane, ou l'acétate de butyle et sa forte odeur de pomme. Les lactones renferment quant à elles leur fonction ester dans un cycle. Parmi elles figurent la gamma-nonolactone (note de noix de coco) et la gamma-décalactone (note de pêche).

- **Amines**

Ces composés ont des notes très marquées et une trop forte concentration est presque toujours synonyme d'une perception désagréable. Ainsi, la triméthylamine, qui caractérise l'odeur du poisson, est normalement présente dans celui-ci à des teneurs inférieures à 5 ppm (poisson frais). Ce composé est issu de la réduction par certaines bactéries de l'oxyde de triméthylamine non odorant. La concentration en triméthylamine augmentant après la mort du poisson, un excès de celle-ci est typiquement signe d'un manque de fraîcheur.

- **Composés hétérocycliques**

Les hétérocycles volatils constituent une famille importante dans la chimie des arômes puisqu'ils représentent plus d'un quart des 5 000 composés volatils isolés et caractérisés provenant de nos aliments. Ils présentent généralement des seuils de perception très faibles (de l'ordre du ppb) et offrent une large gamme de notes aromatiques. Cette gamme est liée à la grande diversité de fonctions et structures caractérisant ces composés. Ceux-ci peuvent en effet être azotés (pyridines, pyrazines), oxygénés (furanones, pyranones, lactones), soufrés (thiophènes) ou encore des cycles combinant plusieurs hétéroatomes (thiazoles).

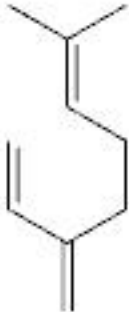
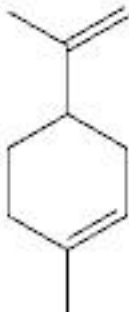
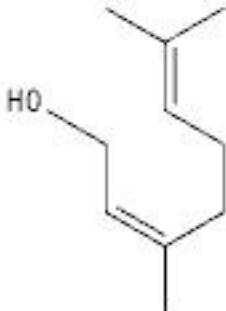
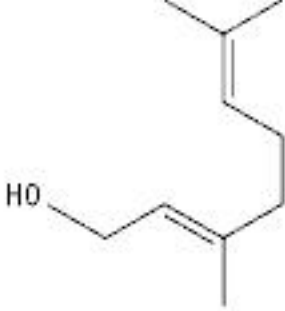
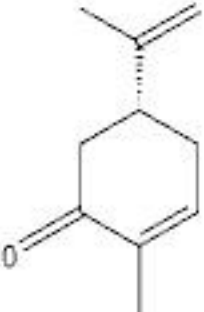
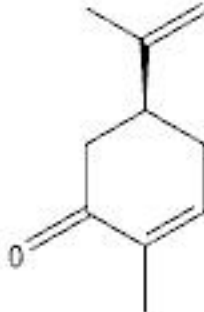
Les lactones, qui ont été citées précédemment pour leur fonction ester, peuvent également être considérées comme des hétérocycles. Ces composés caractérisent un grand nombre de notes cuites (caramel, croûte de pain...) et sont donc issus pour une grande partie de réactions se produisant au cours de la cuisson.

Si on excepte les lactones, ces composés sont assez rares dans les fruits et légumes frais. En revanche, ils peuvent apparaître en grand nombre lors d'étapes de torréfaction, comme c'est le cas dans le café ou le cacao.

2.1.2. Éléments structuraux

Bien que certaines familles d'arômes peuvent être rapprochées de certaines notes, comme les notes généralement fruitées des esters ou encore les notes plus cuites induites par les hétérocycles, il est difficile de prévoir la note odorante d'un composé à partir de sa structure. En effet, dans de nombreux cas, les différences structurales entre deux composés qui paraissent insignifiantes peuvent induire des notes très contrastées.

Tableau 2 : Exemples de composés d'arôme classés selon leurs fonctions chimiques principales

Hydrocarbures	 <p>myrcène (C₁₀H₁₆) mangue</p>	 <p>limonène (C₁₀H₁₆) agrumes</p>
Alcools	 <p>nérol citron</p>	 <p>géraniol géranium</p>
Composés carbonylés	 <p>(-) carvone menthe crépue</p>	 <p>(+) carvone carvi</p>



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Enfin, il est difficile d'utiliser en pratique les seuils de perception mesurés pour des composés purs en solution aqueuse pour des matrices alimentaires généralement complexes. En effet, certaines substances odorantes peuvent subir des effets de rétention liés à la présence d'autres composés qui peuvent interagir avec elles. De même, certains composés d'arôme peuvent par leur présence inhiber la perception d'autres substances.

À l'opposé, certains composés tels que le sel sont connus pour favoriser la perception de nombreux arômes en diminuant leur seuil de détection et portent ainsi le nom d'exhausteurs d'arômes.

2.1.4. Caractéristiques physico-chimiques et stabilité

Les composés d'arôme sont de nature souvent hydrophobe et possèdent des caractéristiques physico-chimiques différentes (tableau 4). La solubilité dans l'eau et l'hydrophobicité permettent d'évaluer la répartition du composé entre les phases organique et aqueuse. L'hydrophobicité est représentée par le $\log P$ qui correspond au logarithme du coefficient de partage entre l'eau et le *n*-octanol. Cette valeur peut être mesurée ou estimée (Sangster, 1997). Les composés d'arôme possédant un $\log P$ inférieur à 1 sont considérés comme polaires et sont relativement solubles dans l'eau. Une autre caractéristique physico-chimique est la pression de vapeur saturante qui représente la volatilité de la molécule à l'état pur. Elle peut être mesurée ou estimée (Le Thanh *et al.*, 1993).

L'une des grandeurs essentielles dans l'étude des équilibres thermodynamiques est le potentiel chimique μ_i d'un constituant *i*. En effet, un système mono ou multiphasique est en équilibre lorsque μ_i est le même en tout point dans chacune des phases du système à une température et une pression données.

Dans le domaine alimentaire, les équilibres rencontrés sont souvent multiphasiques, lorsque plusieurs phases liquide et/ou solide et vapeur sont en mélange. Les composés d'arôme se répartissent entre les différentes phases (vapeur, liquide et/ou solide, aqueuse ou lipidique) en fonction de leur affinité.

L'objectif de la thermodynamique des équilibres entre phases est de décrire quantitativement la distribution de chaque composé dans les différentes phases présentes (vapeur, liquide ou solide) de l'aliment par la détermination du coefficient de partage. Deux coefficients peuvent être appréciés : le coefficient de partage vapeur-milieu, où le milieu peut être un liquide, un solide ou une matrice alimentaire, et le coefficient de partage liquide-liquide entre deux liquides non miscibles.

Tableau 4 : Les arômes et leurs caractéristiques

Composé d'arôme	Masse molaire (g/mol)	Hydrophobie (Log P)	Volatilité à 25 °C			Solubilité dans l'eau (g/L) à 25 °C
			À l'état pur		À l'état dilué	
			Température d'ébullition (°C)	Pression de vapeur saturante (Pa)	Coefficient de partage espace de tête/eau	
Acétate d'éthyle	88	0,71	77	12510	8,3	64,5
Butanoate d'éthyle	116	1,77	121	1885	17,6	4,3
Hexanoate d'éthyle	144	2,83	168	215	24,7	0,6
Octanoate d'éthyle	172	3,90	208	30	59,1	0,02
Acétone	58	-0,16	56	30210	2,2	∞
2-Pentanone	86	0,90	102	5146	4,0	51,9
2-Heptanone	114	1,97	151	631	11,0	4,3
2-Octanone	128	2,5	175	187	13,9	1,3
2-Nonanone	142	3,03	194	-	33,6	0,4
Diacétyle	86	-1,33	88	8306	1,8	331,5
γ-Décalactone	170	2,38	267	0,39	-	0,66

2.2. Composés sapides

La saveur correspond à la sensation perçue dans la cavité buccale lors de la stimulation des récepteurs sensoriels par des molécules généralement de poids moléculaire faible, mais pouvant atteindre exceptionnellement 20 kDa.

Les composés sapides sont représentés par une grande diversité de familles chimiques telles que des acides organiques, des oses, des sels minéraux, des acides aminés, des peptides, des protéines, des nucléotides, certains composés phénoliques et hétéroatomiques... avec différents seuils de perception (tableau 5).

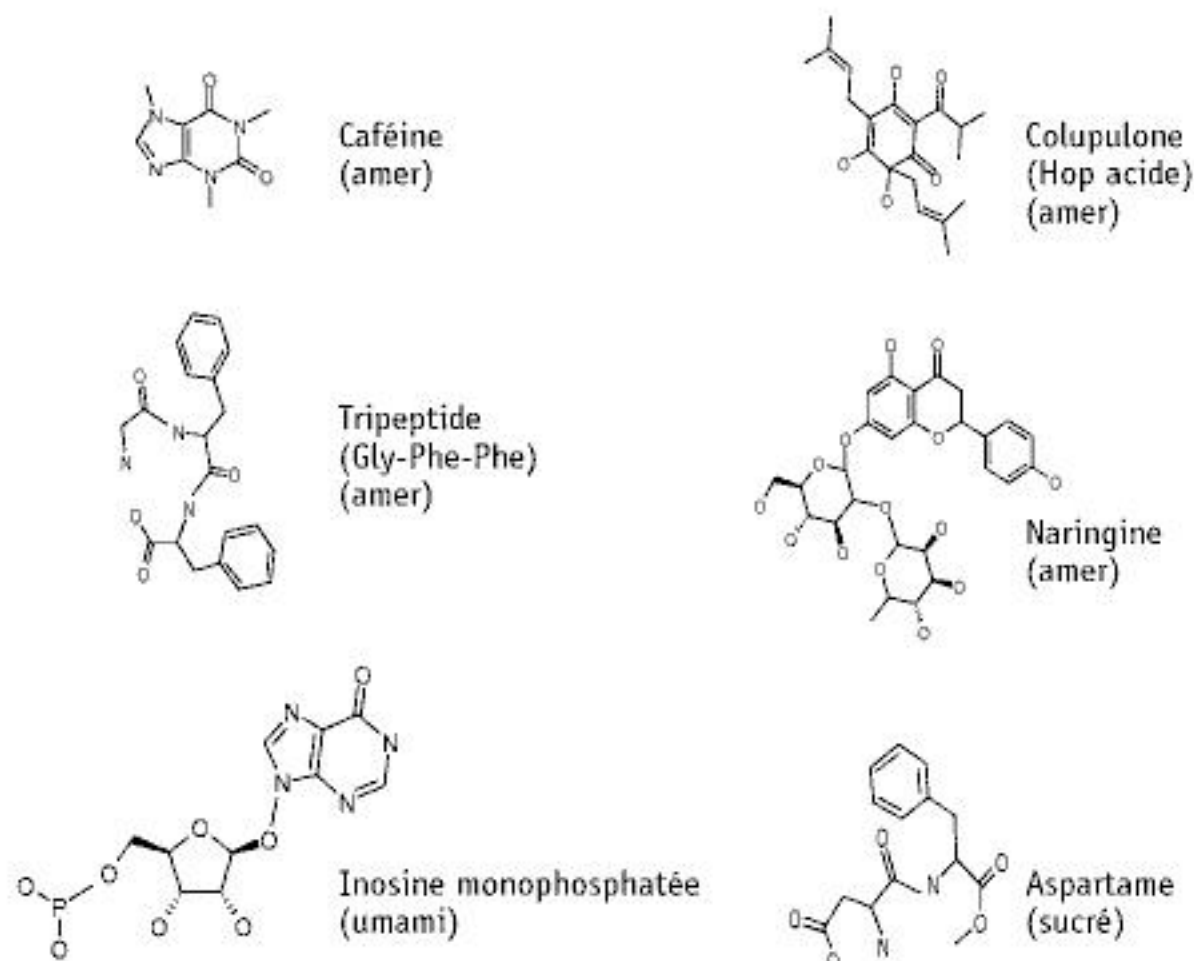
Tableau 5 : Seuils de détection de quelques composés sapides

Composé	Seuil de détection* (mmol/L)	Saveur
Acide acétique	0,9	acide
Acide butyrique	0,07	acide
Acide lactique	0,42	acide
Acide citrique	0,008	acide
D-Glucose	80	sucré
D-Fructose	10	sucré
D-Saccharose	37,4	sucré
L-Gly	17	sucré
L-Leu	17,5	sucré
L-Glu (Na)	0,3 (1,8)	acide (umami)
L-Ser	14,2	sucré
L-Lys	3,4	sucré/amer
Phe-Pro	1,5	amer
Pro-Phe	38	amer
Pro-Gly-Arg	25	amer
Arg-Pro-Gly	0,8	amer
Arg-Arg-Pro-Phe-Phe	0,02	amer
NaCl	7,7	salé
KCl	17,4	salé
CaCl ₂	7,6	amer

* mesuré dans l'eau pure

Quelques composés sapides couramment rencontrés dans les aliments sont présentés sur la figure 2. L'objectif de ce paragraphe n'est pas de dresser une liste exhaustive de tous les composés sapides identifiés, mais simplement de montrer cette grande diversité structurale et fonctionnelle à travers quelques exemples.

La plupart de ces composés sont plutôt hydrophiles, mais certaines molécules, généralement de saveur amère, comme des alcaloïdes (quinine, caféine, théine...) ou des peptides, sont plutôt hydrophobes. Leurs seuils de perception s'étendent sur une large gamme, en fonction de la structure et des propriétés physico-chimiques de ces composés.

Figure 2 : Exemples de structures de molécules sapides


Pendant longtemps, l'univers des saveurs était restreint à une classification à quatre caractéristiques : acide, amer, salé et sucré. Une autre saveur, l'umami, est maintenant unanimement reconnue comme cinquième saveur fondamentale. La plupart des études sur les saveurs menées jusqu'à présent ont utilisé ces cinq saveurs de base ou primaires. Cependant, ce concept utilisant uniquement ces cinq attributs pour décrire l'ensemble des perceptions sapides dans les aliments est simpliste et le concept du continuum des saveurs a été proposé (Delwiche, 1996). Cet autre concept est conforté par le fait que la théorie des cinq saveurs n'a aucune justification anatomique ou physiologique et, par ailleurs, qu'il est possible de faire des distinctions claires pour certaines saveurs de base comme l'acidité et l'amertume en fonction du stimulus.

2.2.1. Sels minéraux et organiques

Le chlorure de sodium est le composé qui présente les caractéristiques salées les plus importantes. Il est responsable de la saveur salée dans la majorité des aliments et est rajouté en quantité plus ou moins importante au cours des processus technologiques de fabrication dans de nombreux aliments. L'ajout de sel dans différents produits peut répondre à diverses

raisons : organoleptiques, hygiéniques et technologiques (texture, aspect extérieur, conservation...) en fonction des produits. Ainsi, dans le pain, la dose de chlorure de sodium dépasse 1 % ; dans les charcuteries, elle est comprise entre 1 et 6 % ; dans les fromages, elle peut atteindre 1,8 %, en fonction des produits. Un excès de consommation en chlorure de sodium est source de pathologie et les recommandations actuelles vont vers une diminution de la teneur en sel dans les aliments. Aussi, les essais de substitution sont à l'ordre du jour.

D'autres sels, minéraux et organiques, présentent aussi des caractéristiques salées, bien que celles-ci soient bien inférieures à celles du chlorure de sodium. Certains d'entre eux ont des qualités de saveur multiples, comme par exemple le chlorure de potassium ou le chlorure de calcium, qui peuvent contribuer à la note salée mais possèdent aussi une composante amère importante. Ainsi, dans le fromage de chèvre relativement jeune, l'amertume est essentiellement reliée à la présence d'ions calcium et magnésium (Engel *et al.*, 2000). Les essais de substitution du chlorure de sodium par des chlorures de potassium, calcium ou magnésium ont donné lieu à des produits présentant des défauts d'amertume importants.

Par ailleurs, dans le cas du jus de tomate, la présence combinée d'acides organiques et de l'ion potassium est importante pour la perception de la note salée. Des interactions entre la note salée et les notes acide et amère peuvent avoir lieu quand des composés sapides sont en mélange, comme c'est le cas pour les aliments (Keast et Breslin, 2003). Ainsi, dans le fromage de chèvre, le chlorure de sodium a un effet exhausteur sur la note acide et un effet masquant sur l'amertume, et tous les sels minéraux ont un effet additif sur la note salée bien que celle-ci soit majoritairement due à la présence de chlorure de sodium.

2.2.2. Acides organiques

La note acide relevée dans de nombreux aliments est causée par la présence de protons (ions hydronium) et par des substances qui conduisent, par hydrolyse, à leur production. Ce sont en particulier les acides organiques dont la structure, la taille, la polarité, le ou les pKa influencent l'intensité de la note acide. Leur variété est grande, car ils proviennent des grandes voies métaboliques ; cependant, certains d'entre eux sont prédominants dans certains aliments. Ainsi, dans la tomate et la plupart des fruits,



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

moléculaire en solution (Mahawanich et Schmidt, 2004) sont des facteurs importants pour la perception de la saveur sucrée.

2.2.5. Acides aminés et amines biogènes

Les acides aminés libres sont impliqués dans la saveur de nombreux aliments. Pour certains d'entre eux, un seul acide aminé joue un rôle majeur ; c'est le cas par exemple pour la saveur sucrée du crabe et du homard due à la présence de glycine, et pour la saveur de l'oursin due à la méthionine. Pour d'autres, comme la viande ou certains fromages, c'est la combinaison des acides aminés présents avec d'autres molécules, comme les sels minéraux, les peptides, les sucres, les acides..., qui contribue à la complexité de la saveur de l'aliment. Leurs caractéristiques sapides varient en fonction de leurs propriétés physico-chimiques, bien que des différences interindividuelles soient à prendre en compte.

Ainsi, les acides aminés ayant une certaine hydrophobicité et de série L tels que L-leucine, L-isoleucine, L-valine, L-arginine, L-méthionine, L-phénylalanine, L-tyrosine, L-tryptophane, L-histidine ont une saveur amère, tandis que ceux de la série D ont une saveur sucrée. D'autres acides aminés de série L, plus polaires, ont une saveur sucrée. C'est le cas des L-glycine, L-alanine, L-serine, L-thréonine, L-lysine, L-proline (Kato *et al.*, 1989). Seuls les acides aminés à groupement latéral acide tels que les acides L-glutamique et L-aspartique sont, sous leur forme dissociée, responsables d'une saveur acide due probablement aux ions H_3O^+ produits dans la solution. Les sels de sodium de ces deux acides, dissociés en solution, sont responsables de la saveur umami. Le L-glutamate de sodium est contenu dans de nombreux aliments à des taux variables mais qui peuvent atteindre des valeurs bien supérieures à son seuil de détection dans l'eau (300 mg/L), et contribue ainsi à leur saveur.

Les amines biogènes sont en général obtenues par décarboxylation d'acides aminés. Leur présence est le signe d'un état de dégradation protéique très avancé dans l'aliment. Dans certains cas, en fonction de leur concentration, elles peuvent apporter de l'amertume à des extraits alimentaires.

2.2.6. Peptides

La gamme de masse des peptides se situe entre la masse d'un dipeptide et environ 10 kDa. De nombreuses études portant sur les peptides de

synthèse ont montré que leur saveur était dépendante de leur structure et des propriétés physico-chimiques qui en découlent.

Les peptides amers comportent un nombre important de résidus d'acides aminés de saveur amère. L'amertume de peptides est reliée à l'hydrophobicité des acides aminés qui les constituent, plus précisément à celle de leur chaîne latérale. Les seuils de détection sont très variables d'un peptide amer à l'autre et dépendent non seulement de la longueur du peptide, mais aussi de l'ordre d'enchaînement des résidus d'acides aminés. Par exemple, le peptide Pro-Gly-Arg a un seuil de détection dans l'eau de 25 mmol/L, tandis que le peptide Arg-Pro-Gly a un seuil de 0,8 mmol/L. Certains dipeptides cycliques appelés dicétopipérazines présentent une amertume plus intense que leurs homologues linéaires.

Dans les fromages, la formation de peptides a lieu au cours de leur maturation, par l'action de plusieurs systèmes enzymatiques (Habibi-Najafi et Lee, 1996). Le défaut d'amertume est principalement dû à l'accumulation de peptides de petite taille ayant une hydrophobicité relativement élevée et présentant dans leur séquence C-terminale de la L-leucine, L-phénylalanine ou de la L-tyrosine. Les caséines et en particulier la bêta-caséine, fortement hydrophobe, sont en grande partie à l'origine de la formation de ces peptides. D'autres peptides peuvent être issus de la dégradation des protéines du lactosérum. Certains facteurs, en plus de la présence de flore et d'activités enzymatiques, peuvent favoriser l'activité protéolytique et donc avoir un rôle sur l'amertume des fromages : le traitement thermique, la nature et la dose du coagulant, le pH du lait à l'emprésurage. On observe des processus semblables avec d'autres produits alimentaires qui subissent une maturation, comme le jambon cru pour lequel une protéolyse importante conduit à la production de peptides.

Les peptides de saveur sucrée possèdent en général un groupement hydrophobe de type ester de méthyle, ester de benzyle, N-acétyle... qui a été greffé sur une des fonctions. Ces peptides dérivés, qui sont donc des peptides issus de synthèses, ont des pouvoirs sucrants bien supérieurs à ceux des sucres naturels comme le saccharose. Le plus connu est l'aspartame (Asp-Phe-O-Méthyle). Son pouvoir sucrant est 180 fois plus élevé que celui du saccharose.

Depuis, l'industrie chimique s'est efforcée de synthétiser des analogues de peptides du même genre pour obtenir des édulcorants avec un pouvoir sucrant jusqu'à 50 000 fois plus important que le saccharose ; cependant, ces analogues n'ont pas tous une stabilité suffisante en solution,

en fonction du pH ou de la température. Certains d'entre eux développent aussi des saveurs secondaires, en particulier de l'amertume en arrière-goût. On peut citer, par exemple, les esters fenchyliques de L-Asp-D-Ala (Yuasa *et al.*, 2001). Il existe cependant aussi des dipeptides basiques et non modifiés qui ont un pouvoir sucrant proche de celui du saccharose comme Gly-Lys et γ -Abu-Lys. Quelques dipeptides chlorhydratés ont été décrits avec une saveur salée, bien que ces résultats soient controversés.

Les peptides de saveur acide comportent des acides aminés acides comme les acides glutamique et aspartique. Un dipeptide est acide s'il comporte au moins un acide aminé acide lié à un autre acide aminé, acide, neutre ou aromatique.

Des pyroglutamyl peptides ont été identifiés dans des fractions d'hydrolysats de gluten de blé désamidonné ayant une saveur umami intense (Schlichterle-Cerny et Amado, 2002). Ces peptides seraient formés par cyclisation du résidu glutamine en position N-terminale pendant la préparation des hydrolysats. Des dérivés glycoconjugués de l'acide glutamique présentent aussi une saveur umami intense (Robert *et al.*, 2004).

2.2.7. Protéines

Un très faible nombre de protéines génère une saveur sucrée chez l'être humain. En effet, la plupart des protéines ne possèdent aucune saveur ou flaveur. Ces protéines sucrées possèdent un pouvoir sucrant qui est de 500 à 3 000 fois supérieur à celui du saccharose (sucre de table). Exception faite du lysozyme (protéine contenue dans le blanc d'œuf) qui est faiblement sucré, toutes ces protéines sont extraites de plantes tropicales (Faus, 2000). Ces protéines sucrées sont utilisées depuis des siècles pour sucrer les aliments ou les boissons par les autochtones des régions où ces plantes qui contiennent ces protéines se développent. Ces protéines sont donc très prometteuses pour l'industrie agroalimentaire comme édulcorants naturels à faible teneur en calories.

Bien qu'elles soient toutes de petites tailles, ces protéines ne partagent aucune homologie de séquence, ni de structures secondaires ou encore de motifs tridimensionnels. Parmi les protéines les plus connues figurent la brazzéine (6,5 kDa), qui a l'avantage d'être thermostable et résistante aux variations de pH, la monelline (10,7 kDa) et la thaumatine (22,2 kDa). Il faut noter que cette dernière est autorisée comme édulcorant dans de nombreux pays. Citons enfin la mabinline et la pentadine, découvertes dans les années 1980, dont les propriétés physico-chimiques et sensorielles ont été peu étudiées.

Deux autres protéines possèdent la propriété surprenante de transformer un goût acide en goût sucré. Parmi celles-ci, la curculine, renommée néoculine, est une protéine présente dans les fruits de la plante asiatique *Curculigo latifolia*. Cette protéine présente la particularité de posséder un faible pouvoir sucrant à pH neutre. En revanche, celui-ci est fortement augmenté sous l'effet de l'acidité. La seconde protéine dotée de propriétés similaires est nommée miraculine. Cette protéine est présente dans les baies du fruit *Richadella dulcifica*, appelé aussi fruit miracle. La miraculine est une protéine homodimérique glycosylée composée de 191 acides aminés. À la différence de la néoculine, la miraculine est dépourvue de saveur lorsqu'elle est mise en bouche. En revanche, l'application d'une solution acide en bouche génère une sensation sucrée qui peut être 40 000 fois supérieure à celle du saccharose. La structure tridimensionnelle de la miraculine n'est pas encore connue. Cependant, un mécanisme d'action a été montré selon lequel la miraculine serait capable de se lier au récepteur du goût sucré à pH neutre sans l'activer, tandis qu'un passage en milieu acide entraînerait un changement de conformation de la protéine, qui active alors le récepteur (Koizumi *et al.*, 2011).

Une seule protéine (35 acides aminés) a été décrite comme pouvant inhiber spécifiquement la perception de la saveur sucrée chez les rongeurs, alors qu'elle est faiblement active chez l'être humain. Cette protéine appelée gurmarine a été isolée des feuilles de la plante indienne *Gymnema sylvestre*. Bien que son mode d'action reste inconnu jusqu'à présent, il a été proposé que la gurmarine puisse interagir directement avec le récepteur du goût sucré (Sigoillot *et al.*, 2012).

2.2.8. Autres composés

Les sulfamates sont une classe de composés présentant des caractéristiques sapides intéressantes. Le cyclamate est connu en temps qu'agent sucrant. Cependant, des dérivés de ce composé présentent aussi des caractéristiques amères et acides, ainsi que des arrière-goûts variés.

Enfin, on peut citer un grand nombre de composés présentant des caractéristiques amères, de structures très différentes et possédant des caractéristiques hydrophobes plus ou moins marquées. Certaines classes ont été développées dans ce chapitre, mais il est difficile de les développer toutes; certaines sont naturelles, d'autres issues des industries chimique et pharmaceutique. Nous nous contenterons de les énumérer. Ce sont des alcools, alcaloïdes, catéchines, benzoate de déatonium, flavanols, isohumulones, sels inorganiques, caféine, sesquiterpènes, triterpènes, phénols, pro-

pylthiouracil (PROP), sucres acétylés, urée, glucosinolates et leurs produits d'hydrolyse, isothiocyanates... On peut dire simplement qu'il n'existe pas vraiment de relations structure-activité entre l'intensité d'amertume et les classes de composés amers, ce qui suggère que probablement plusieurs sites récepteurs différents sont impliqués dans la transduction de ces composés. On peut citer en particulier les composés phénoliques (flavonoïdes, tannins polyphénols) dont il existe une multitude de structures différentes et qui sont responsables d'amertume et d'astringence dans de nombreux fruits et légumes ou produits ayant subi un processus technologique comme le café, le cacao, le thé, le vin, le cidre... Dans les plantes, les substances amères sont essentiellement des alcaloïdes et des hétérosides.

La connaissance de la composition d'un produit ou d'un extrait alimentaire, et des propriétés de flaveur individuelles de chaque composé, n'est pas suffisante pour expliquer l'ensemble des propriétés gustatives du produit. Des interactions physico-chimiques entre matrice, composés sapides et composés aromatiques, ainsi que des interactions perceptives entre perception d'arôme, de saveur, de sensation chémoesthésique et de texture interviennent fréquemment dans des systèmes alimentaires complexes.

En conclusion, les composés d'arôme, tous de nature organique, et les composés sapides de natures organique ou minérale sont d'une très grande diversité. En effet, de nombreuses classes chimiques, des plus simples aux plus complexes, sont représentées, avec une grande variété de structures. Cette grande diversité se traduit par des propriétés physico-chimiques propres à chaque composé, comme sa masse moléculaire, son hydrophobicité, sa polarité, sa volatilité, sa solubilité dans un milieu particulier..., et des propriétés sensorielles qui permettent de décrire chacun d'eux. Ces propriétés physico-chimiques auront un impact fort sur le comportement de ces molécules en mélanges plus ou moins complexes, comme par exemple leur capacité à interagir avec la matrice alimentaire (protéines, matière grasse, polysaccharides...), à être libérées en bouche lors de la déstructuration de l'aliment, et à interagir avec les récepteurs sensoriels.

De plus, des phénomènes d'interactions perceptuelles inter et intra-modalité peuvent affecter la perception de la saveur ou de l'arôme d'un produit. Les lois physico-chimiques, physiologiques et psychologiques régissant ces effets de mélange étant encore mal connues, il est difficile *a priori* de prédire la saveur et/ou l'arôme d'un mélange ou d'un aliment uniquement à partir de sa composition et des propriétés individuelles de ses constituants.

Tous ces aspects seront développés dans les chapitres suivants.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

- SHIMA K., YAMADA N., SUZUKI E., HARADA T., Novel brothy taste modifier isolated from beef broth, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46, 1465-1468, 1998.
- SIGOILLOT M., BROCKHOFF A., LESCOPE E., POIRIER N., MEYERHOF W., BRIAND L., Optimization of the production of gurmarin, a sweet-taste-suppressing protein, secreted by the methylotrophic yeast *Pichia pastoris*, *Applied Microbiology and Biotechnology*, sous presse, 2012.
- WILSON C. E., BROWN W. E., Influence of food matrix structure and oral breakdown during mastication on temporal perception of flavor, *Journal of Sensory Studies*, 12, 69-86, 1997.
- YAMAGUCHI S., NINOMIYA K., What is umami, *Food Reviews International*, 14, 123-138, 1998.
- YUASA Y., NAGAKURA A., TSURUTA H., Synthesis and sweetness characteristics of L-aspartyl-D-L-alanine fenchyl esters, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49, 5013-5018, 2001.

CHAPITRE 2

STRUCTURE ET TEXTURE DES ALIMENTS : DE LA MOLÉCULE À LEUR ORGANISATION MICROSCOPIQUE ET MÉSCROPIQUE

C. GARNIER

L'ouvrage *Studies of Food Microstructure* présente les différentes méthodes utilisées en 1981 pour étudier la microstructure des produits alimentaires. Ce livre, bien qu'ancien, reste un ouvrage de base dans ce domaine, avec près de 900 références bibliographiques. Depuis cette date, des nouveaux types de microscopes ont été commercialisés. La microscopie confocale permet d'apporter des informations sur les échantillons hydratés non accessibles avec la plupart des techniques conventionnelles. La microscopie électronique à vide partiel et la microscopie environnementale permettent d'observer des échantillons plus ou moins hydratés. L'intérêt de ces derniers microscopes reste en revanche limité pour étudier la microstructure des produits alimentaires.

Dans la première partie de ce chapitre, nous rappellerons les principaux équipements utilisables pour étudier la microstructure des aliments et décrirons quelques méthodes de préparation des échantillons en évoquant certaines limites de ces techniques. Nous présenterons également quelques artéfacts que nous avons pu observer.

Dans la seconde partie, nous présenterons, à l'aide d'exemples, la structure de quelques produits alimentaires (produits à base d'amidon, produits riches en matière grasse, produits laitiers). L'influence de certains paramètres sur les caractéristiques et les mécanismes de formation des aliments sera évoquée.

1. Microscopies et techniques de préparation

1.1. Microscopie optique

La microscopie optique ne permet que des observations à faible grossissement. Cette technique peut être utilisée avec des gels liquides ou avec des coupes de l'échantillon (avec ou sans inclusion). Il n'est pas obligatoire de déshydrater l'échantillon et l'utilisation de colorants spécifiques permet de localiser certains constituants de l'aliment.

1.2. Microscopie confocale

La microscopie confocale comble un fossé important entre la microscopie traditionnelle et la microscopie électronique. Dürrenberger *et al.* (2001) détaillent les possibilités et limites de cette technique.

La microscopie confocale utilise la fluorescence naturelle de certains composants des aliments (autofluorescence), mais il est le plus souvent nécessaire de fixer les colorants en milieu liquide à température ambiante. Cette étape de la préparation peut entraîner le gonflement de l'échantillon et/ou la solubilisation de certains composants. Il est possible de localiser *in situ* les protéines, les glucides et les lipides. La résolution spatiale est de l'ordre de 500 nanomètres, mais des composants de plus petite taille peuvent être détectés : ils apparaissent comme des spots de diamètre égal à la résolution de l'appareil.

Il n'est pas nécessaire de déshydrater l'échantillon pour l'observer. Le faisceau de balayage laser pénètre la surface de l'échantillon pour visualiser des coupes optiques, ce qui permet d'obtenir une analyse en 3 dimensions de l'échantillon sans altérer sa structure interne. Il est aussi possible d'analyser la topographie de la surface de l'échantillon en mode d'épi réflexion.

La microscopie confocale peut également permettre de suivre *in situ* des processus dynamiques (séparation de phase, coalescence, agrégation, coagulation, solubilisation...) et même, avec certains appareils spécifiques, la cuisson, le mélange avec la possibilité de simuler des traitements technologiques sous le microscope.

1.3. Microscopies électroniques à balayage

Les microscopes électroniques permettent d'obtenir des images avec une plus forte résolution. L'échantillon est le plus souvent observé sous un vide poussé, ce qui nécessite de déshydrater les échantillons humides (microscopie électronique à balayage conventionnelle) ou de les congeler (microscopie électronique à balayage à basse température avec cryofracture). Il est également possible d'observer directement des échantillons peu hydratés (microscopie à pression partielle) ou dans leur état naturel d'hydratation (microscopie environnementale). La résolution spatiale sur les échantillons biologiques peut atteindre la dizaine de nanomètres.

1.3.1. Microscopie électronique à balayage conventionnelle

Les échantillons secs peuvent être observés directement en microscopie électronique à balayage conventionnelle (MEB).

Les aliments hydratés nécessitent une préparation pour les sécher avant de pouvoir les observer. Lors d'un traitement classique, l'échantillon humide est tout d'abord fixé en milieu liquide, puis il est rincé. Il est ensuite déshydraté dans une série graduée d'éthanol ou d'acétone, puis il est séché par la technique de contournement du point critique en milieu CO₂. Ce protocole, qui est long et délicat, peut générer des artefacts et/ou déformer la structure des aliments.

Remarques :

1. Pour fixer un échantillon, de nombreux protocoles expérimentaux préconisent une double fixation avec du glutaraldéhyde puis du tétra oxyde d'osmium. La simple fixation dans une solution de glutaraldéhyde peut être suffisante dans certains cas, car une postfixation par le tétra oxyde d'osmium, réactif cher et toxique, n'améliore pas systématiquement la qualité des images en MEB. Ce réactif qui s'additionne sur les doubles liaisons permet de fixer les lipides insaturés. Il est ainsi possible de visualiser les globules gras contenus dans une mayonnaise (fig. 6A et B).

À l'opposé, le tétra oxyde d'osmium ne permet pas de fixer complètement les lipides saturés des ruminants. Il en résulte une solubilisation partielle des globules gras qui sont complètement déformés lors de la préparation (fig. 1A).

C'est pourquoi, avec les produits laitiers, il est préférable de ne pas procéder à cette double fixation et de solubiliser complètement les lipides.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

1.5. Intérêt de l'utilisation des différentes techniques

Afin de s'assurer que les images obtenues ne présentent pas d'artéfact, il est recommandé de confronter les résultats obtenus par différentes techniques. Ainsi, la microscopie optique et la microscopie confocale sont très utiles pour vérifier que les méthodes de préparations nécessitant la déshydratation de l'échantillon (ou sa congélation) ne génèrent pas d'artéfacts.

Remarque : Afin de s'assurer de la représentativité des observations, il est souvent utile de commencer à observer un échantillon à faible grossissement, voire en microscopie optique, afin d'étudier son homogénéité puis de sélectionner les zones qui seront étudiées à plus forts grossissements.

2. Exemples de produits alimentaires

2.1. Produits riches en amidon

2.1.1. Gels d'amidon de maïs

L'amidon et ses dérivés sont classiquement utilisés comme additifs dans les préparations alimentaires pour retenir l'eau et augmenter la viscosité des préparations : les grains d'amidon chauffés en milieu aqueux peuvent retenir jusqu'à 80 fois leur poids d'eau.

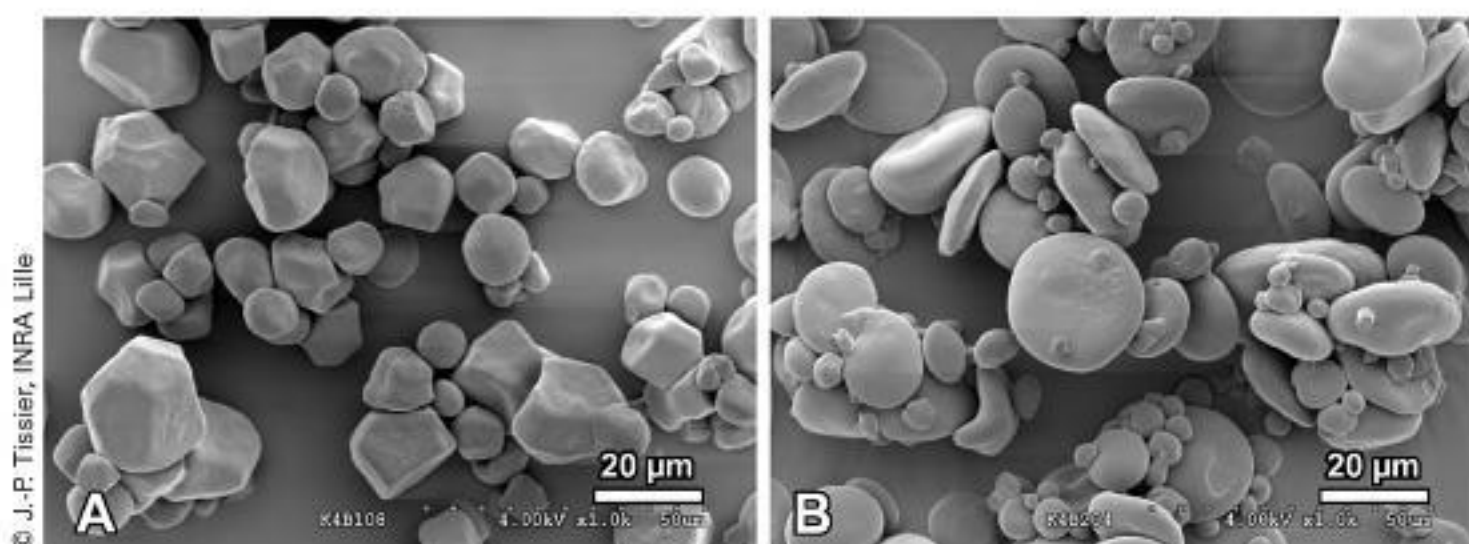
Les grains d'amidon natifs possèdent une structure semi-cristalline et contiennent entre 10 et 20 % d'eau.

La forme et la taille des grains d'amidon dépendent de leur origine botanique :

- Les grains d'amidon de maïs natifs (fig. 2A) ont une taille comprise entre 5 et 25 μm . Les plus petits grains sont plutôt de forme sphérique ; les plus gros ont une forme de polyèdre plus ou moins régulier dont les arêtes sont fortement arrondies.

- L'amidon de blé (fig. 2B) est constitué de granules de type A (80-90 % en poids et 15-20 % en nombre), les plus gros (20 à 25 μm) et lenticulaires, et de type B, plus petits (2 à 10 μm) et sphériques (Feillet, 2000).

Figure 2 : Grains d'amidon de maïs et de blé observés au microscope électronique à balayage



A : Grains d'amidon de maïs.

B : Grains d'amidon de blé.

Feillet (2000) précise le mécanisme complexe de transformation des grains d'amidon chauffés en milieu aqueux :

- Une première phase d'absorption d'eau entraîne un léger gonflement des grains.

- Les grains d'amidon gonflent ensuite fortement, se déstructurent et éclatent. Leurs composants macromoléculaires se dispersent. L'amylose se solubilise en premier et les grains d'amidon se concentrent en amylopectine avant d'être éventuellement solubilisés. Il y a formation d'un empois et, si la concentration le permet, l'amidon gélatinise. Le phénomène démarre des régions amorphes du grain (le hile) vers la périphérie.

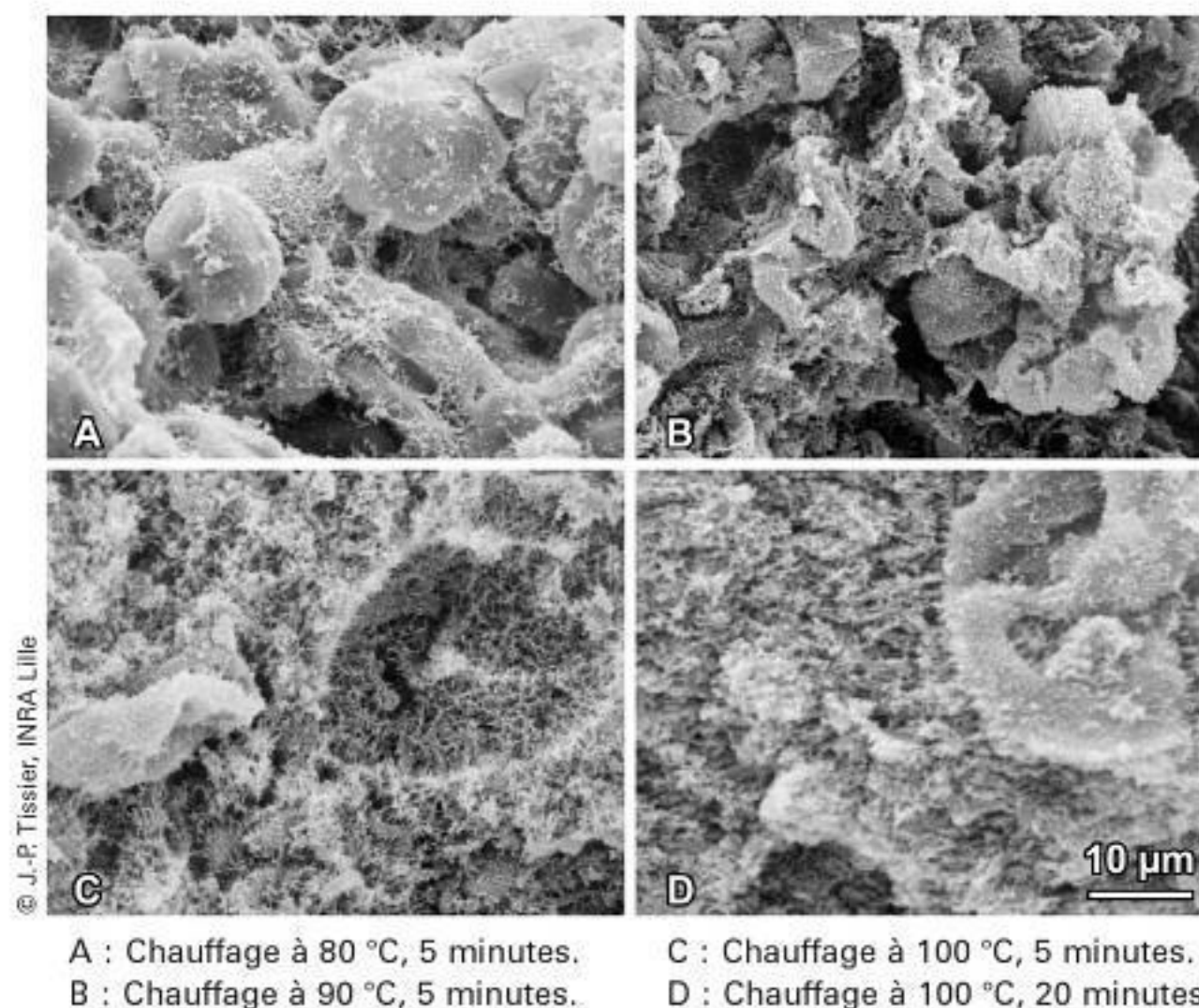
- Au cours du refroidissement, il y a association suivie de la cristallisation des molécules constitutives de l'amidon avec la formation d'un gel. L'amylose s'agrège en premier et forme instantanément des gels, alors que l'amylopectine ne passe à l'état de gel qu'après une longue période de repos. L'amylose et l'amylopectine, quoique très proches, sont incompatibles en solution concentrée. Il se forme ainsi deux phases, l'une riche en amylose et l'autre en amylopectine.

Pour visualiser les transformations complexes de l'amidon de maïs en présence d'un excès d'eau pendant le chauffage, une suspension à 10 % d'amidon de maïs contenant environ 73 % d'amylopectine et 27 % d'amylose a été placée dans un tube scellé. Le tube a été immergé pendant 5 minutes dans un bain d'huile porté à la température de 80 °C pendant 5 minutes, 90 °C pendant 5 minutes, 100 °C pendant 5 minutes ou 20 minutes, puis a été refroidi dans un bain d'eau glacé (Korolczuk *et al.*, 1998). L'évolution de la structure d'un gel d'amidon de maïs a été étudiée au microscope électronique à balayage après déshydratation dans une série graduée d'acétone

suivie d'un séchage par la méthode de contournement du point critique en milieu CO₂.

La microstructure générale des gels obtenus avec les différents traitements thermiques est présentée à la figure 3 (grandissement de 2000) et à la figure 4 (grandissement de 10000).

Figure 3 : Évolution de la structure des grains d'amidon de maïs après différents traitements thermiques
(images vues au grandissement de 2000)

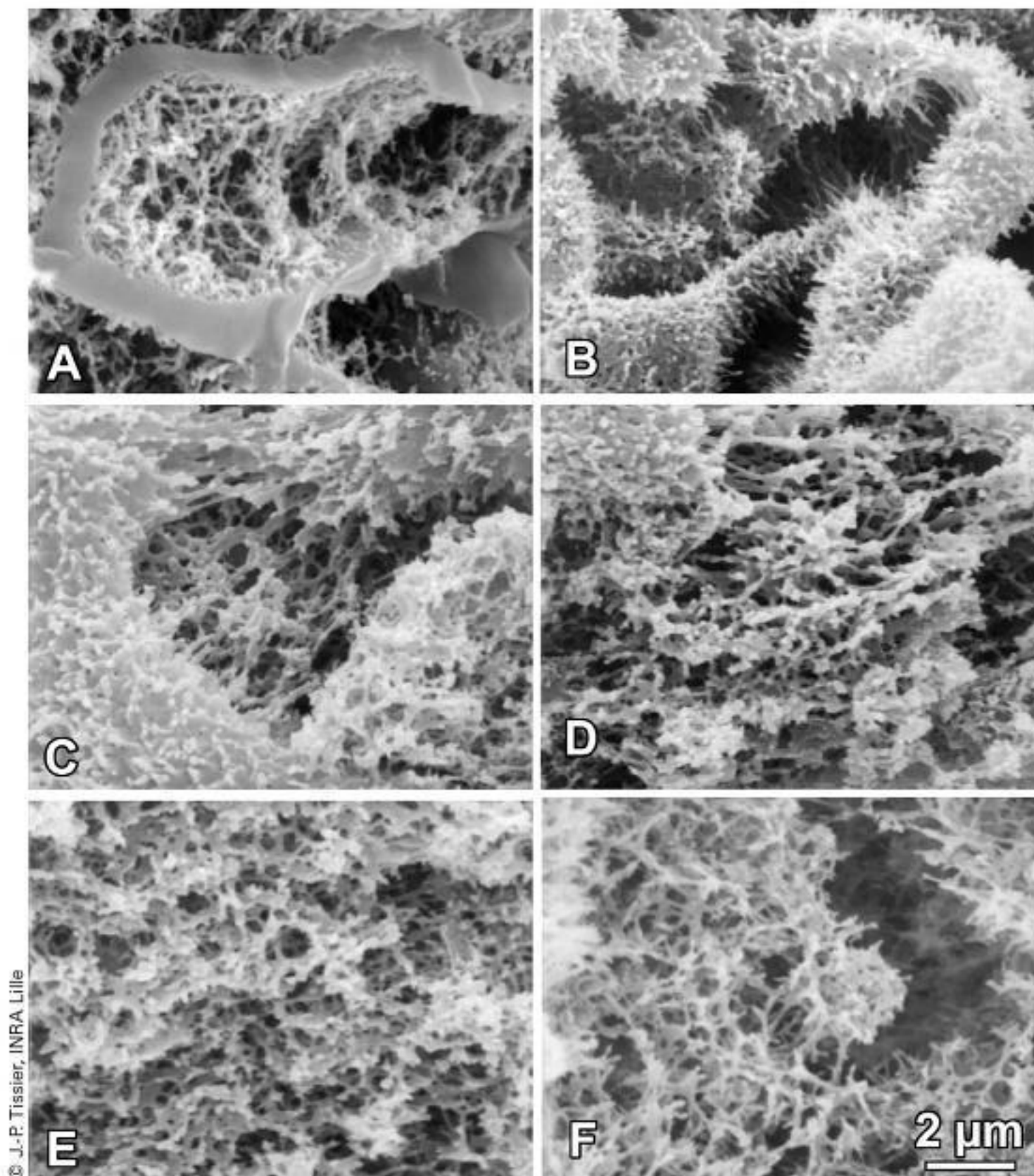


Après le traitement à 80 °C (fig. 3A et 4A), les grains de maïs sont encore nettement visibles. Leur surface est lisse et la présence de chaînes d'amylose solubilisées puis recristallisées lors du refroidissement est visible. La fracture d'un grain d'amidon montre que le cœur du grain est vide, ce qui confirme que le phénomène démarre du hile du grain vers la périphérie.

Après le traitement à 90 °C (fig. 3B et 4B), certains grains ont éclaté. La forme des grains est nettement altérée et leur surface présente une solubilisation partielle avec l'amorce de départ de nombreuses chaînes d'amidon.

Après traitement à 100 °C pendant 5 minutes (fig. 3C), l'empreinte de grains presque complètement solubilisés est visible. Des fragments d'autres grains non solubilisés sont encore observables.

Figure 4 : Évolution de la structure des grains d'amidon de maïs et du gel formé après différents traitements thermiques
(images vues au grossissement de 10000)



A : Chauffage à 80 °C, 5 minutes.
B : Chauffage à 90 °C, 5 minutes.

C, D, E, F : Chauffage à 100 °C, 20 minutes.

Après traitement à 100 °C pendant 20 minutes (fig. 3D, 4C, 4D, 4E et 4F), tous les fragments de grains d'amidon n'ont pas encore été solubilisés. La figure 4D montre que des plaques (probablement de l'amylopectine) semblent se détacher d'un reste de grain non solubilisé situé en haut à gauche.

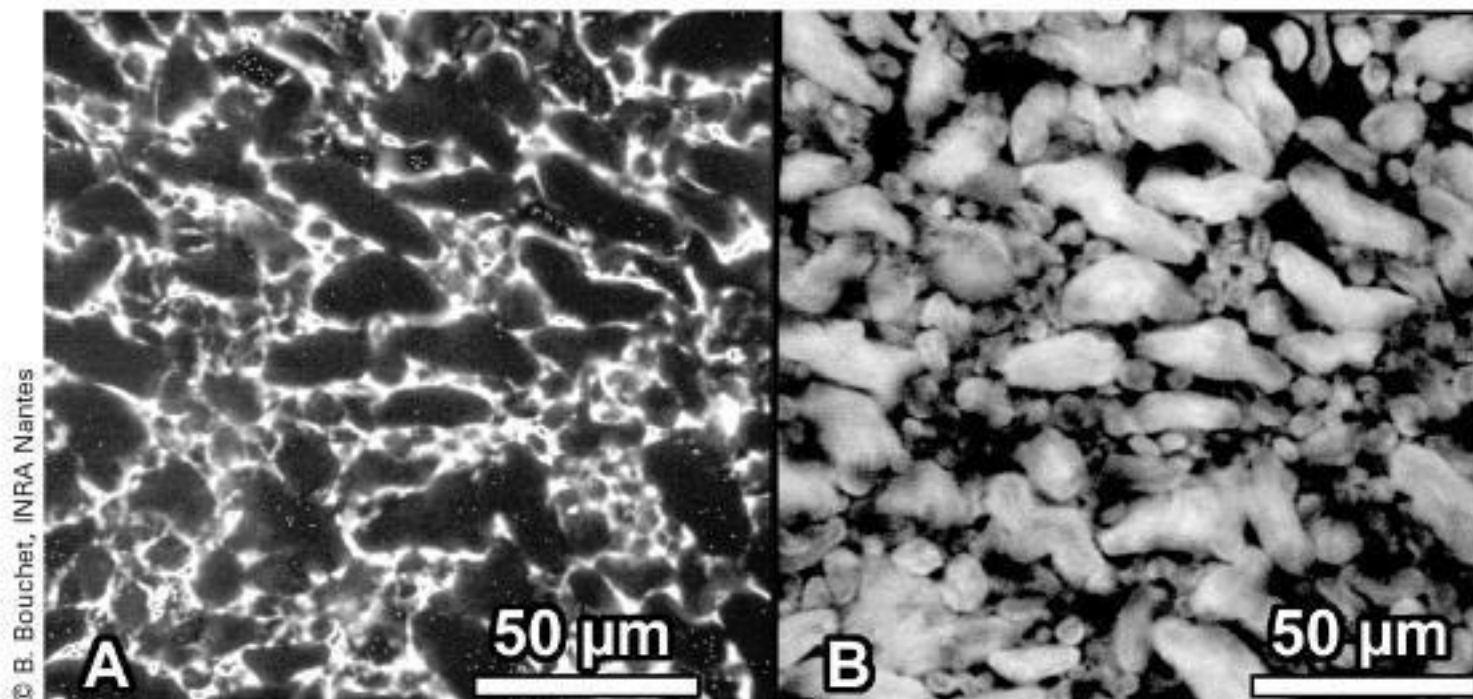
Le gel d'amidon présente de nombreuses plaques très ramifiées. La figure 4E montre qu'une partie du gel est constituée d'un réseau de plaques très ramifiées, alors qu'une autre partie du même gel (fig. 4F) présente une structure du gel formée de fibres beaucoup plus fines et allongées. Des petites particules sphériques peuvent également être observées dans le gel.

Des études complémentaires avec des amidons de maïs riches en amylose ou en amylopectine ne nous ont pas permis de vérifier que les gels formés principalement de plaques ramifiées étaient constitués d'amylopectine et que ceux formés principalement de fibres linéaires étaient constitués d'amylose.

2.1.2. Structure d'un spaghetti pendant la cuisson

L'échantillon représenté à la figure 5 est une coupe après congélation (20 μm d'épaisseur) d'un spaghetti cuit 4 minutes, observé en microscopie confocale. Les photos ont été prises au centre du spaghetti. Les colorations ont lieu sur la même coupe et l'observation se fait successivement avec le laser vert puis le laser bleu.

Figure 5 : Spaghetti observé en microscopie confocale



La photo A montre en clair les protéines et la photo B montre en clair l'amidon.

Les protéines colorées par la fuchsine acide sont observées avec une excitation dans le vert (laser 543 nm). L'émission récupérée au-dessus de 570 nm permet de visualiser les protéines qui apparaissent en clair sur la figure 5A.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Il est probable cependant que le chauffage entraîne la dénaturation de protéines du sérum qui réagissent avec la fraction membranaire protéique des globules gras pour former ces pontages.

2.3. Produits laitiers

2.3.1. Yaourt

Le yaourt est un lait fermenté obtenu par coagulation du lait sans égouttage. Il est fabriqué selon des procédés qui diffèrent légèrement d'un pays à l'autre, mais qui comportent toujours une fermentation lactique conduisant à une gélification due à la déstabilisation du système protéique sous l'effet d'une baisse du pH. La texture est une composante essentielle de la qualité d'un yaourt. Elle est influencée par de nombreux facteurs : la composition du lait, l'importance des traitements appliqués avant fabrication (chauffage, homogénéisation), les conditions culturelles (ferment, température, pH d'arrêt), l'intensité du traitement mécanique après la fermentation.

Il n'est pas possible dans ce chapitre de détailler la technologie de fabrication des yaourts. Rappelons simplement que le lait est généralement enrichi en matière sèche. Il est ensuite pasteurisé afin de favoriser la précipitation d'une fraction des albumines, ce qui entraîne une meilleure rétention d'eau et améliore la consistance du produit. En général, une homogénéisation est effectuée pour stabiliser la matière grasse. Le produit est alorsensemencé avec au moins deux germes spécifiques du yaourt (*Streptococcus thermophilus* et *Lactobacillus bulgaricus*). Le mélange est ensuite incubé afin de produire son acidification et la gélification, puis il est refroidi et conditionné.

La structure du yaourt est donnée par la réaction des ponts disulfures de la β -lactoglobuline avec les caséines kappa et par l'insolubilisation des caséines lors de l'acidification. Il en résulte un réseau plus ou moins développé de protéines dans le yaourt qui assure sa structure. Certaines souches texturantes produisent également des exopolysaccharides (EPS) qui améliorent la cohésion du gel.

De nombreux auteurs ont étudié l'influence des conditions technologiques sur la structure du yaourt. Nous présenterons le résultat d'observations obtenues avec différents microscopes.

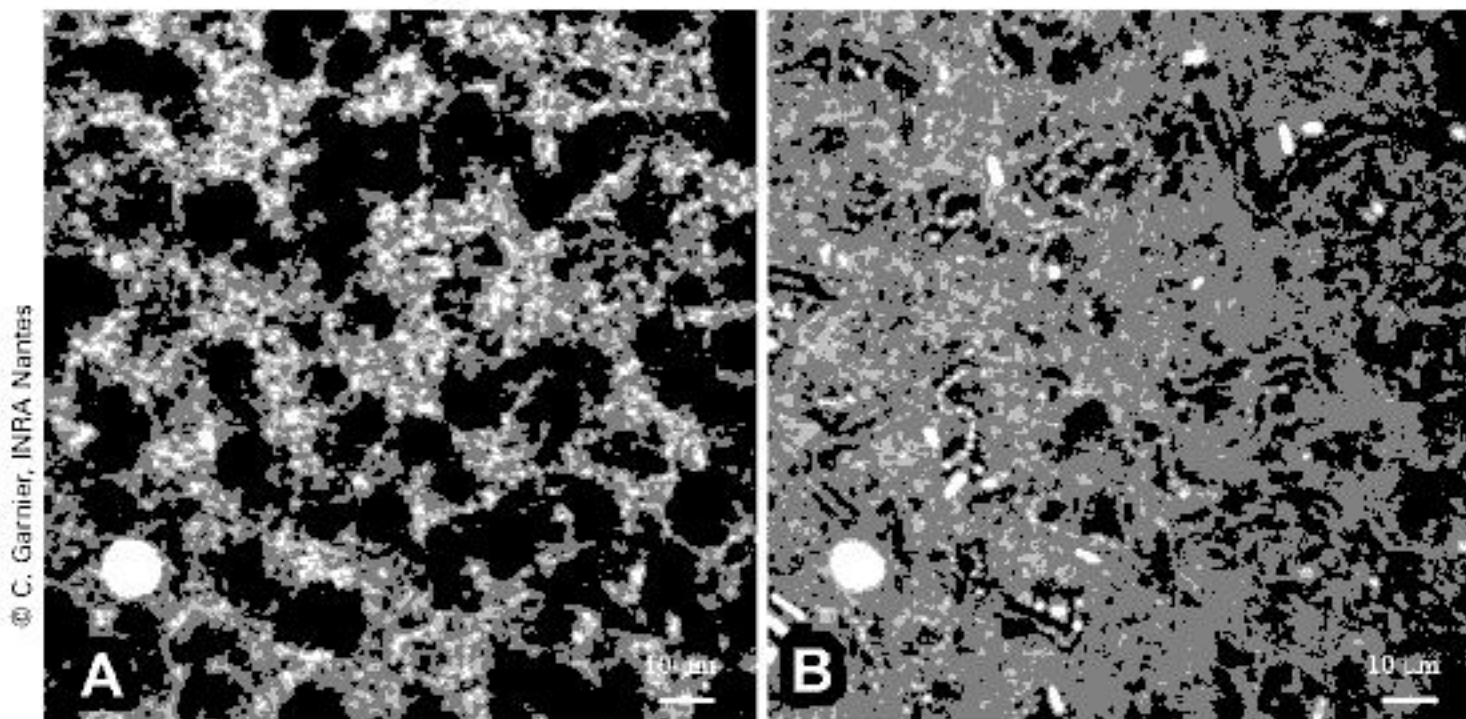
- **Observation par microscopie confocale à balayage laser**

Un MCBL permet d'observer en milieu humide, et donc d'éviter le risque d'artéfacts inhérent au séchage nécessaire pour étudier ce type d'échantillon avec un MEB classique.

L'observation d'un yaourt obtenu par fermentation par une souche de bactéries lactiques non texturantes (non productrices d'exopolysaccharides) à pH 4,6 fait apparaître :

- le réseau protéique codé en rouge (en clair sur la figure 8A) après un marquage FITC, avec une longueur d'onde d'excitation de 543 nm ;
- les bactéries codées en vert (en clair sur la figure 8B) après un marquage DAPI, avec une longueur d'onde d'excitation de 364 nm. Il est possible d'identifier sur la figure 8B les chaînes de *Streptococcus thermophilus* et les *Lactobacillus bulgaricus* qui se présentent sous forme de bâtonnets isolés.

Figure 8 : Yaourt observé en MCBL



Le réseau protéique apparaît en clair sur la figure 8A et les bactéries sont visibles en clair sur la figure 8B.

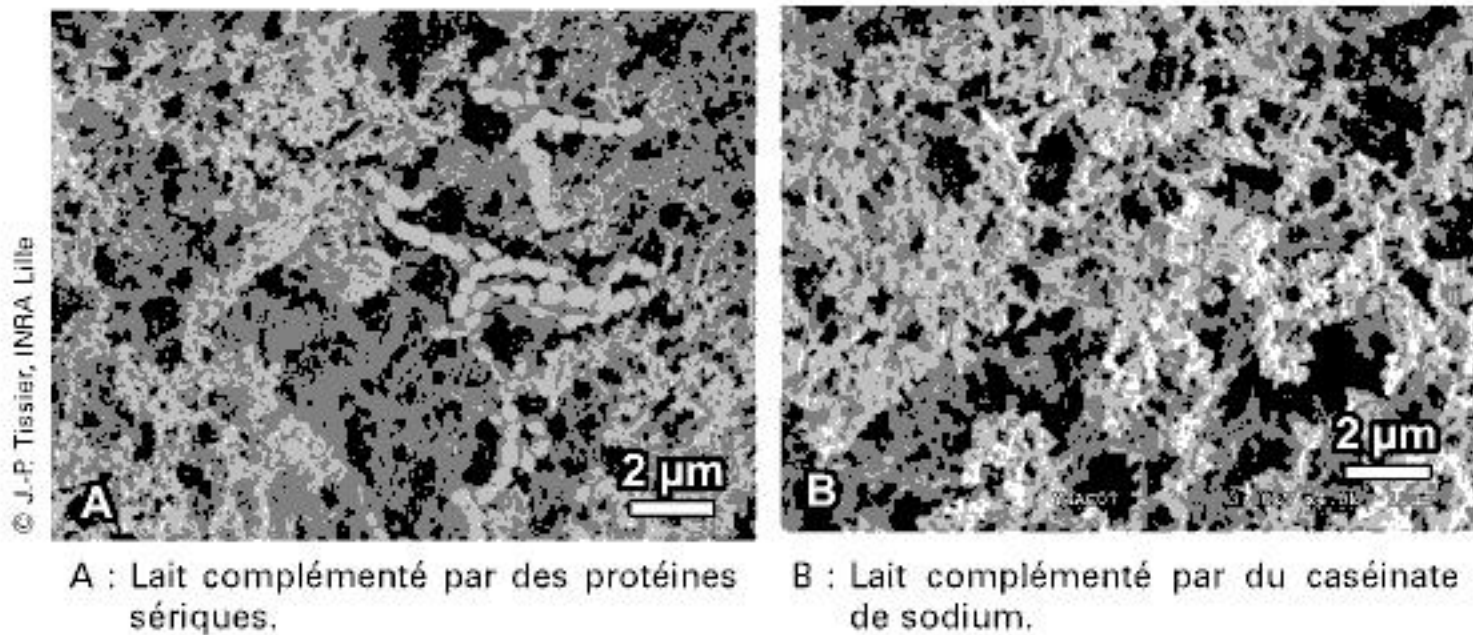
Michalski *et al.* (2002) ont étudié l'influence, sur la rhéologie de yaourts, des propriétés de la membrane des globules gras dont la taille était modifiée par homogénéisation. Le MCBL a permis de localiser les globules gras dans la trame protéique du yaourt.

La figure 9 montre clairement que les globules gras non homogénéisés (fig. 9A) s'insèrent dans les vides du gel du yaourt, alors que les globules gras fortement homogénéisés s'insèrent dans la trame protéique (fig. 9B).



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Figure 10 : Influence de la nature de l'agent fortifiant sur la microstructure du réseau protéique d'un yaourt



- Les exopolysaccharides

Les souches produisant des exopolysaccharides (EPS) sont classiquement utilisées pour améliorer les propriétés physiques des yaourts. Hassan *et al.* (2002) ont étudié avec un MCBL des produits laitiers contenant des EPS. Ces auteurs observent que :

- les EPS et les chaînes protéiques ne sont pas imbriqués dans le yaourt ;
- les EPS sont localisés dans les zones riches en solvant du yaourt.

Le MCBL ne permet de visualiser que des zones concentrées en EPS. Il ne parvient pas à visualiser les chaînes individuelles d'EPS à cause de la résolution insuffisante de ce type de microscope.

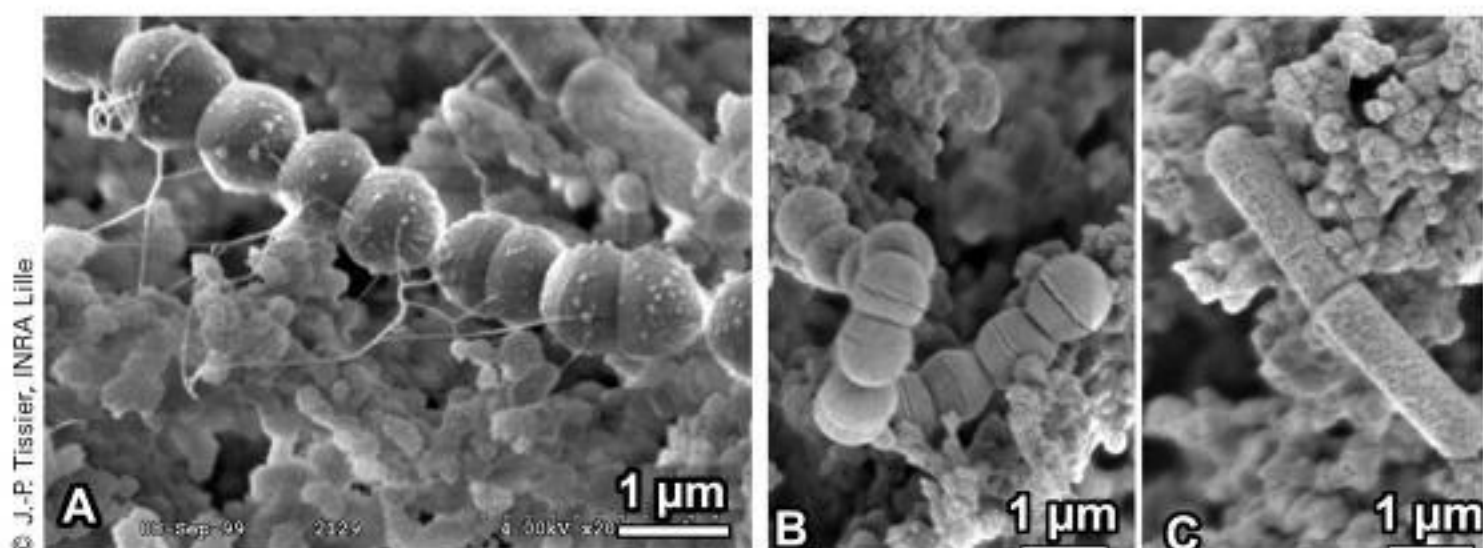
Hassan *et al.* (2003) arrivent à visualiser par cryofracture les EPS hydratés dans du yaourt. Ceux-ci ne sont pas localisés au même endroit que les protéines du lait dans le yaourt. Le réseau formé par les chaînes d'EPS dépend de la nature de la souche productrice d'EPS. Lorsque celles-ci produisent modérément des EPS, le réseau paraît poreux et formé de filaments très fins qui s'enchevêtrent. Lorsque la souche produit beaucoup d'EPS, les chaînes sont plus épaisses, le réseau est plus dense et il y a formation d'un gel tridimensionnel.

- Observation de la microflore du yaourt

L'identification des micro-organismes présents dans un yaourt est facilitée par la microscopie électronique à balayage.

La figure 11 présente la microflore de deux yaourts brassés «goût bulgare» du commerce.

Figure 11 : Micro-organismes (*Streptococcus thermophilus* et les *Lactobacillus*) présents dans des yaourts commerciaux



La forme et l'aspect de surface de ces souches (*Streptococcus thermophilus* et *Lactobacillus bulgaricus*) sont nettement différents. Il est possible de visualiser que ces souches produisent des EPS, fortement altérés par la préparation (Kalab, 1993). Les EPS sont visualisés sous forme de filaments très fins et forment des protubérances sur les micro-organismes lorsqu'ils ont été collapsés lors de la préparation. Ces protubérances sont moins visibles, mais elles sont néanmoins présentes sur les *Lactobacillus bulgaricus* de la figure 11C.

2.3.2. Crème anglaise

Une crème anglaise est préparée industriellement en effectuant les traitements thermiques dans des échangeurs tubulaires. Le lait cru est pasteurisé puis sucré. Le lait sucré est homogénéisé et stérilisé. Du jaune d'œuf liquide est ajouté au lait sucré stérilisé. Une pasteurisation comprenant une homogénéisation et un chambrage complète le procédé. Un dispositif de lissage placé à la sortie de l'équipement permet d'influer sur la qualité du produit fini.

L'étude de la préparation avant la cuisson finale et du produit fini réalisé avec et sans dispositif de lissage permet de comprendre le mécanisme de formation de la crème anglaise.

L'analyse granulométrique présentée à la figure 12 précise l'évolution de la fraction volumique des particules en fonction du logarithme de leur taille exprimée en micromètres.

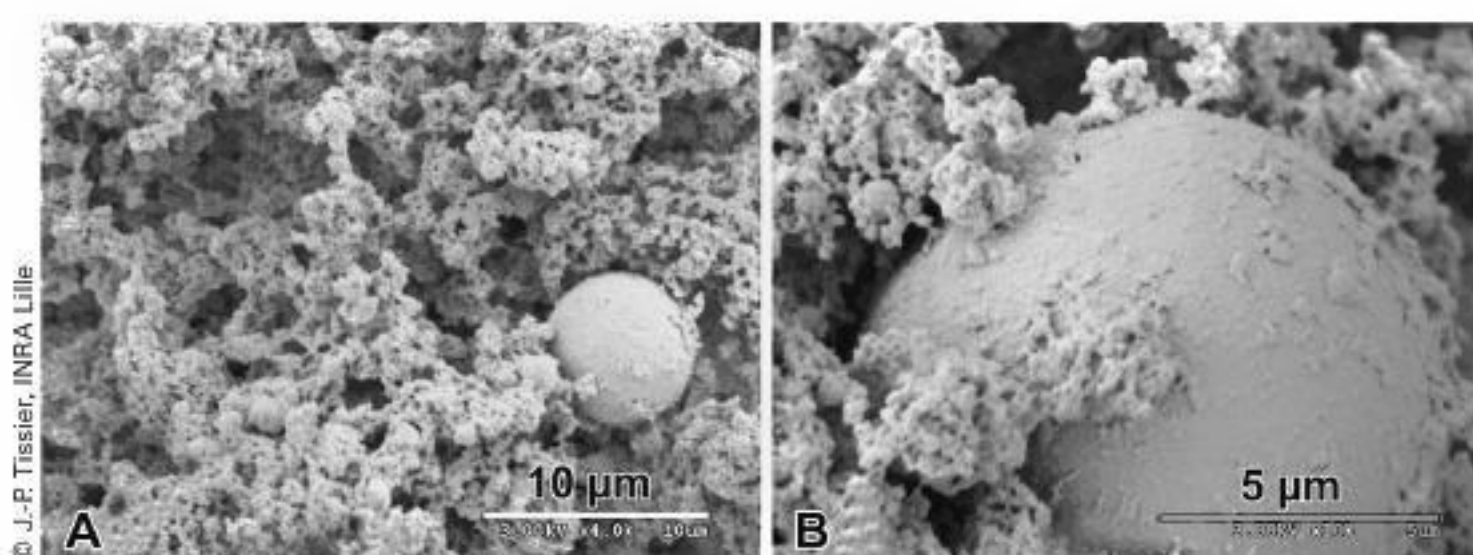


You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

qui assure une dissociation des gros agrégats et une libération des micelles de caséine faiblement liées ou piégées dans les agrégats.

L'observation de la préparation standard par microscopie électronique à balayage conventionnelle avec inclusion dans des puits d'agar, fixation par le glutaraldéhyde et déshydratation dans une série graduée d'acétone, permet d'expliquer le mécanisme de formation de la crème anglaise.

Figure 13 : Observation d'une crème anglaise standard avec un MEB



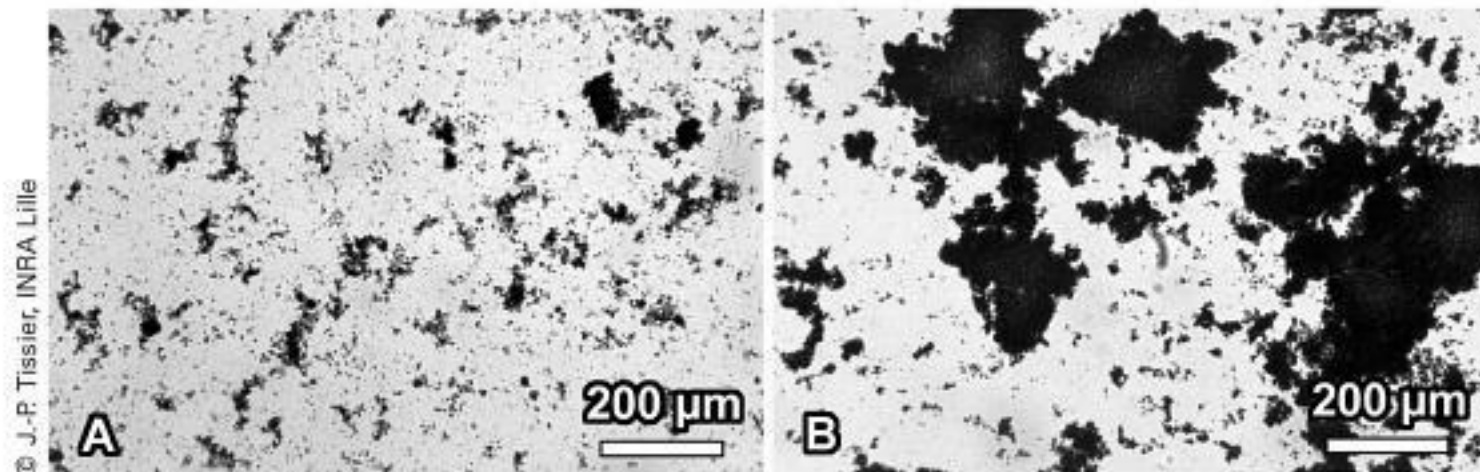
Il apparaît clairement sur les figures 13A et 13B que la crème anglaise est formée d'agrégats de micelles de caséine et que de gros globules de protéine d'œuf, parfaitement sphériques, sont présents au sein de ces agrégats. Ces globules portent systématiquement de nombreuses micelles de caséine plus ou moins associées. Il est donc probable que la protéine du jaune d'œuf homogénéisée, dénaturée lors du traitement thermique, réagisse avec les micelles de caséine pour former des agrégats plus ou moins associés. Ces agrégats donnent la structure du gel de la crème anglaise.

L'étude de l'influence du dispositif de lissage peut être observée par microscopie optique et microscopie électronique.

L'observation au microscope optique de la crème diluée au 1/10^e et colorée au violet de gentiane montre que la crème anglaise préparée dans les conditions standard (fig. 14A) présente des agrégats de petite taille et quelques micelles de caséine isolées.

Il apparaît également clairement que la crème anglaise préparée sans dispositif de lissage (fig. 14B) présente de très gros agrégats et une très faible quantité de micelles de caséine isolées.

Figure 14 : Observation au microscope optique de crèmes anglaises diluées au 1/10^e et colorées par le violet de gentiane

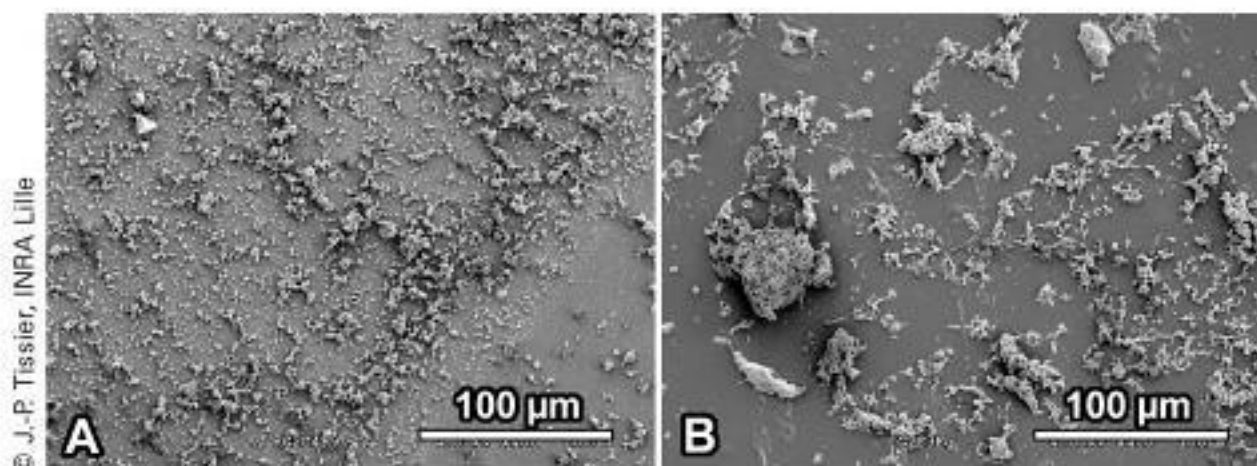


A : Fabrication standard.

B : Fabrication réalisée sans dispositif de lissage.

L'observation au microscope électronique de crèmes anglaises délitées dans le milieu de fixation, filtrées sur un filtre Anopore puis préparées de façon standard, confirme les résultats obtenus au microscope optique.

Figure 15 : Observation avec un MEB de deux fabrications de crèmes anglaises diluées et filtrées sur un filtre Anopore



A : Fabrication standard.

B : Fabrication réalisée sans dispositif de lissage.

Il apparaît donc clairement que :

- La crème anglaise est formée par l'agrégation de micelles de caséine sur la surface des globules de protéine du jaune d'œuf, devenue particulièrement réactive suite à l'homogénéisation et au traitement thermique. L'homogénéisation transforme la protéine du jaune d'œuf en globules sphériques dont la taille peut atteindre une dizaine de micromètres et dont la surface est lisse.

- Lorsque l'équipement contient le dispositif de lissage à la sortie du dernier échangeur, les gros agrégats sont dissociés et la caséine faiblement liée (ou incluse dans les agrégats) est libérée. Lorsque ce dispositif de lissage est court-circuité, les agrégats sont de plus grande taille et la crème anglaise est granuleuse.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



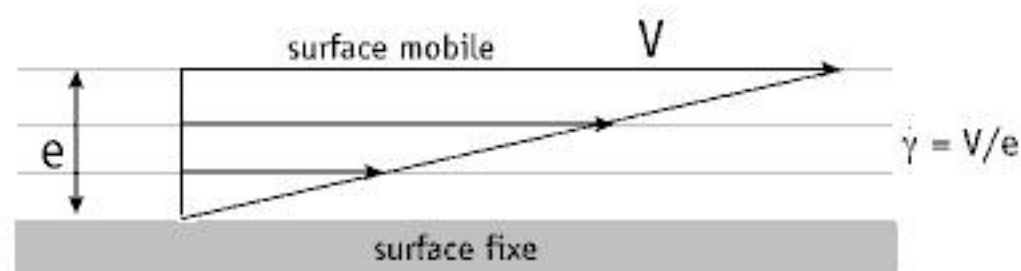
You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

viscoélastiques en régime harmonique à faible déformation sont les plus appropriées. Il sera également possible de réaliser des mesures en compression sur le gel une fois formé, s'il est suffisamment rigide et ne s'affaisse pas sous son propre poids.

1.1. Mouvement de cisaillement

Ce mode de déformation est celui appliqué dans tous les viscosimètres et rhéomètres disponibles sur le marché. Le principe est illustré sur la figure 1 : l'échantillon est placé entre deux surfaces planes, l'une étant au repos, l'autre animée d'un déplacement à la vitesse V . Sous l'effet du cisaillement, l'échantillon se déforme en couches planes, parallèles entre elles ; celles-ci se déplacent à des vitesses différentes qui varient de 0 au contact à la paroi fixe à V pour la couche en contact avec la surface mobile. Ceci suppose évidemment qu'il n'y a pas de glissement au niveau des deux parois.

Figure 1 : Déformation de cisaillement entre deux surfaces planes (cisaillement plan)



1.1.1. Viscosimétrie

Toute mesure viscosimétrique est basée sur l'application d'un mouvement de cisaillement. Dans tous les cas, il s'agit d'établir les relations entre deux grandeurs : la vitesse de cisaillement ($\dot{\gamma}$) qui correspond, dans le cas idéal décrit ci-dessus (parois planes parallèles), au rapport V/e (e étant la distance entre les deux plans) et la contrainte de cisaillement (τ) qui correspond aux forces de frottement entre les couches rapportées à l'unité de surface. La vitesse de cisaillement a les dimensions de l'inverse d'un temps (s^{-1}) et la contrainte de cisaillement s'exprime en N/m^2 (ou pascals). Tout le principe de la viscosimétrie implique ce type de cisaillement. Cette déformation est mise en œuvre de manière presque implicite dans les écoulements laminaires dans les conduites (cisaillement télescopique ou

écoulement de Poiseuille), étant ainsi à la base de la viscosimétrie capillaire. Dans la pratique, cependant, la plupart des viscosimètres commerciaux sont rotatifs : ils présentent des symétries axiales cylindriques, cône-plateau ou plateaux parallèles.

L'objectif est de décrire les propriétés d'écoulement des matériaux étudiés sur la base des relations entre contrainte de cisaillement et vitesse de cisaillement ; on considérera en particulier le rapport $(\tau/\dot{\gamma})$ qui définit la viscosité (η) si le comportement est newtonien (dans ce cas, la contrainte de cisaillement est proportionnelle à la vitesse de cisaillement) ou la viscosité apparente (η_a) dans le cas contraire. Dans ce dernier cas, ce sont les variations de τ en fonction de $\dot{\gamma}$ (ou de η_a en fonction de $\dot{\gamma}$) qui devront être établies (courbes d'écoulement) de manière à décrire les propriétés d'écoulement.

- **Cylindres coaxiaux**

Quelquefois confondus avec les systèmes de Couette, ces dispositifs assez simples reposent sur la rotation de l'un des éléments (cylindre intérieur ou cylindre extérieur) et la mesure de la contrainte par le biais de la connaissance du couple exercé sur la surface verticale de l'un ou l'autre des cylindres.

Par exemple, le système de Couette correspond au fait que le mouvement de rotation est appliqué au cylindre extérieur et le couple est mesuré au niveau du cylindre intérieur. Imposer la rotation du cylindre intérieur et mesurer le couple au niveau du même cylindre intérieur est également courant.

Les formules ci-dessous correspondent au calcul de la contrainte et de la vitesse de cisaillement au niveau du cylindre intérieur. Elles n'impliquent en aucune manière la façon dont le viscosimètre fonctionne.

$$\text{Contrainte de cisaillement } (\tau_1) : \quad \tau_1 = \frac{M}{2\pi R_1^2 b}$$

$$\text{Vitesse de cisaillement : } \dot{\gamma}_1 = \frac{2\Omega}{1 - (R_1/R_2)^2}$$

avec :

M : couple mesuré en N m ;

Ω : vitesse de rotation du cylindre extérieur (en rad/s) ;

R_1 : rayon du cylindre intérieur (en m) ;

R_2 : rayon du cylindre extérieur (en m).



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

En conclusion, si de grandes avancées ont été faites sur la compréhension des mécanismes impliqués dans la rétention des composés d'arôme par les constituants des matrices alimentaires (fig. 2), les données disponibles restent le plus souvent descriptives et limitées à des matrices simples.

En effet, seuls quelques types bien particuliers d'interactions ont été étudiés et bien souvent les types de liaison en jeu entre hydrocolloïdes et composés d'arôme ou protéines et composés d'arôme restent à caractériser. De plus, s'il semble que la viscosité et l'organisation en réseaux gélifiés des matrices diminuent la libération et la perception des composés d'arôme, il demeure difficile de découpler les effets liés à des interactions physico-chimiques spécifiques, de ceux liés à la limitation de la diffusion des molécules volatiles dans les matrices, et enfin ceux liés aux interactions entre perception de la flaveur et de la texture. En amont, une meilleure compréhension des assemblages de molécules dans les systèmes complexes et de leurs conséquences sur la structure et la texture des produits nous paraît indispensable pour rationaliser la démarche de la formulation aromatique. Pour parvenir jusqu'à la prédiction de la perception sensorielle d'un aliment, il nous paraît essentiel de tenir compte de l'aspect temporel de la perception.

Références bibliographiques

- ANDRIOT I., HARRISON M., FOURNIER N., GUICHARD É., Interactions between methyl ketones and β -lactoglobulin: Sensory analysis, headspace analysis, and mathematical modelling, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48, 4246-4251, 2000.
- ARVISENET G., CAYOT N., Influence of aroma compounds on large deformation properties of starch-based systems during aging, *Journal of Texture Studies*, 32, 185-203, 2001.
- ARVISENET G., LE BAIL P., VOILLEY A., CAYOT N., Influence of physicochemical interactions between amylose and aroma compounds on the retention of aroma in food-like matrices, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50, 7088-7093, 2002a.
- ARVISENET G., VOILLEY A., CAYOT N., Retention of aroma compounds in starch matrices: Competitions between aroma compounds toward amylose and amylopectine, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50, 7345-7349, 2002b.
- BOUTBOUL A., GIAMPAOLI P., FEIGENBAUM A., DUCRUET V., Influence of the nature and treatment of starch on aroma retention, *Carbohydrate Polymer*, 47, 73-82, 2002.
- BRAUSS M. S., LINFORTH R. S. T., CAYEUX I., HARVEY B. A., TAYLOR A. J., Altering the fat content affects flavor release in a model yogurt system, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47, 2055-2059, 1999.
- BULÉON A., COLONNA P., LELOUP V., Les amidons et leurs dérivés dans les industries des céréales, *Industries Agricoles et Alimentaires*, 6, 515-531, 1990a.
- BULÉON A., DELAGE M. M., BRISSON J., CHANZY H., Single crystals of V amylose complexed with isopropanol and acetone, *International Journal of Biological Macromolecules*, 12, 25-33, 1990b.
- BYLAITE E., ILGUNAITE Z., MEYER A. S., ADLER-NISSEN J., Influence of α -carrageenan on the release of systematic series of volatile flavor compounds from viscous food model systems, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52, 3542-3549, 2004.
- CAYOT N., TAISANT C., VOILLEY A., Release and perception of isoamyl acetate from starch-based food matrix, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46, 3201-3206, 1998.

- CAYOT N., LAFARGE C., ARVISENET G., TAISANT C., Influence of aroma compounds on the mechanical properties of starch-based food systems, *Journal of Texture Studies*, 31, 297-313, 2000.
- CAYOT N., PRETOT F., DOUBLIER J.-L., MEUNIER J.-M., GUICHARD É., Release of isoamyl acetate from various starch pastes: Thermodynamic and kinetic parameters, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52, 5436-5442, 2004.
- CHANA A., TROMELIN A., ANDRIOT I., GUICHARD É., Flavor release from iota-carrageenan matrix: a Quantitative Structure-Property Relationships approach, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54, 3679-3685, 2006.
- CHARLES M., ROSSELIN V., BECK L., SAUVAGEOT F., GUICHARD É., Flavor release from salad dressing: Sensory and physicochemical approaches in relation with the structure, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48, 1810-1816, 2000.
- DAMODARAN S., KINSELLA J. E., Flavor Protein Interactions. Bindings of Carbonyls to Bovine Serum Albumin: Thermodynamic and Conformational Effects, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 28, 567-571, 1980.
- DECOURCELLE N., LUBBERS S., VALLET N., RONDEAU P., GUICHARD É., Effect of thickeners and sweeteners on the released of blended aroma compounds in fat-free stirred yogurt during shear conditions, *International Dairy Journal*, 14, 783-789, 2004.
- DOYEN K., CAREY M., LINFORTH R. S. T., MARIN M., TAYLOR A. J., Volatile release from an emulsion: Headspace and in-mouth studies, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49, 804-810, 2001.
- DRUAUX C., COURTHAUDON J.-L., VOILLEY A., *Influence de la structure d'une émulsion sur la volatilité des composés d'arôme*, Agoral, Massy, 255-260, 1996.
- DUBOIS C., LUBBERS S., VOILLEY A., Interactions arômes-autres constituants. Application à l'aromatization, *Industries Alimentaires et Agricoles*, 112, 186-193, 1995.
- FABRE M., GUICHARD É., AUBRY V., HUGI A., Correlation between sensory time-intensity and solid-phase microextraction analysis of fruity flavor in model food emulsions. In Deibler K., Delwiche J., *Handbook of Flavor Characterization. Sensory Analysis, Chemistry, and Physiology*, Marcel Dekker, New York, 163-175, 2003.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

d'affinité pour un composé apolaire que pour un composé polaire et y sera facilement sorbé. Par exemple, les alcools sont fortement sorbés dans le copolymère d'éthylène et d'alcool vinylique (EVOH) du fait de la formation de liaisons hydrogène ou de Van der Waals (Van Willige *et al.*, 2002).

Les esters polaires dont la chaîne carbonée est courte ont des affinités avec les polymères polaires (PET), alors que les esters à plus longue chaîne ou les alcanes ont des affinités pour les polymères apolaires comme les polyoléfines (PE).

Toutefois, la sorption des composés peut être particulièrement sélective.

Nielsen *et al.* (1992) ont comparé la sorption dans du PET de trois esters ayant un log P proche (coefficient de partage P de la molécule entre l'octanol et l'eau exprimé en échelle logarithmique qui permet d'évaluer leur hydrophobie) : l'acétate d'hexyle (2,83), le butanoate d'éthyle (1,85) et l'acétate d'isoamyle (2,26) ; ils ont montré que si les deux derniers avaient une sorption assez similaire, celle du composé le plus apolaire était 6 à 7 fois plus importante.

La carvone, composé issu de l'oxydation du limonène, n'est pratiquement pas sorbée dans le polypropylène (PP), alors que celui-ci est sorbé à plus de 70 % à l'équilibre, ce qui peut ainsi limiter sa réactivité (Letinski et Halek, 1992).

Pour les matériaux caoutchoutiques à caractère plus polaire (PVC), la sorption des composés polaires (2-phényléthanol, acétate de benzyle) est favorisée par rapport aux polyoléfines (Sizer *et al.*, 1988).

L'état vitreux ou caoutchoutique d'un polymère peut également influencer la solubilité. Des études ont démontré que les phénomènes de sorption de molécules sont généralement plus importants dans les polymères caoutchouteux que dans les polymères vitreux (Dury-Brun *et al.*, 2007).

De plus, les polymères vitreux ayant un taux de cristallinité élevé sont encore moins sensibles aux phénomènes de sorption, car ceux-ci ont lieu majoritairement dans les zones amorphes du polymère (Van Willige *et al.*, 2002).

Les polymères hydrophobes (PE, PP), de par leur état caoutchoutique, constituent de mauvaises barrières aux gaz permanents et aux arômes (Nielsen *et al.*, 1992).

Les caractéristiques physico-chimiques des composés d'arôme peuvent influencer les phénomènes de diffusion et de sorption. Ainsi, la diffusion, qui correspond à la pénétration de la molécule d'arôme dans le matériau, est influencée par le volume molaire des molécules : plus celui-ci sera

faible, plus la diffusion sera facilitée. Ceci a été mis en évidence pour des alcanes dans des films de PVC (Ducruet *et al.*, 2007) ou encore avec des esters pour des films de PE.

La nature de la matrice et ses interactions avec les composés d'arôme vont impacter l'intensité de la sorption dans l'emballage ; celle-ci dépendra de l'équilibre respectif du composé d'arôme entre la matrice, l'espace de tête et le matériau d'emballage, mais aussi des réactions de dégradation qui peuvent affecter les composés d'arôme. Il a été montré qu'un polymère en contact avec un sirop aromatisé pouvait successivement sorber les esters dans une première période pour les désorber ultérieurement après que leur concentration dans le sirop se soit réduite du fait de leur hydrolyse. Ce phénomène peut avoir un rôle plus ou moins positif sur le profil aromatique (Ducruet *et al.*, 2007).

La sorption est fortement influencée par la température de stockage : dans le PET, la sorption totale après 28 jours de stockage est multipliée par 13 quand la température passe de 4 °C à 40 °C (Van Willige *et al.*, 2002). La température de transition vitreuse (Tg) du PET étant relativement basse (70 °C), plus la température de conditionnement est proche de la température de transition vitreuse du polymère, plus les chaînes du polymère se relâchent, le volume libre augmente alors, la sorption est facilitée (Dury-Brun *et al.*, 2007).

Le taux d'humidité est à prendre en compte lors du conditionnement d'un aliment dans des emballages polaires. En effet, la sorption par le polymère de molécules d'eau peut entraîner une plastification des zones amorphes du film ; le déplacement des molécules, comme les composés d'arôme ou l'oxygène, et donc leur diffusion, seront alors facilités dans ces zones (Dury-Brun *et al.*, 2007).

1.2.3. Perméation

La perméation caractérise le transfert, au travers de l'emballage, de substances volatiles comme les gaz permanents (O₂, CO₂...), la vapeur d'eau ou les vapeurs organiques, aussi bien de l'extérieur vers l'intérieur que dans le sens inverse. Ces transferts peuvent entraîner des pertes de qualité de l'aliment ; ainsi, la perméation de l'oxygène, associée à la lumière, peut favoriser les phénomènes d'oxydation aussi bien des lipides, des vitamines que des composés d'arôme. Une forte perméabilité à la vapeur d'eau peut

entraîner l'humidification du produit emballé et ainsi provoquer un développement microbien ou une augmentation de la réactivité des molécules et donc entraîner l'apparition des défauts d'arôme.

La perméation des composés d'arôme, qui est la résultante du phénomène de diffusion de ces molécules et de leur sorption dans l'emballage, est aussi à l'origine de pertes en composés d'arôme non négligeables et donc du déséquilibre du profil aromatique. On peut aussi constater l'apparition de défaut d'arôme par transfert, à travers l'emballage, de molécules aromatiques qui sont présentes non pas dans le produit mais dans l'environnement de celui-ci, comme par exemple son lieu de stockage.

2. Protéger l'arôme des aliments

2.1. Prévention des réactions de dégradation et de la formation des défauts d'arôme

Les mécanismes de dégradation du profil aromatique mettent en jeu des échanges, des interactions et des réactions nécessitant des contacts, par exemple entre l'enzyme et son substrat, des transferts, celui de l'oxygène, une mobilité des molécules ; ils sont sous la dépendance des caractéristiques intrinsèques de l'aliment (composition, structure), de celles de son environnement (température, composition de l'atmosphère ambiante) et des procédés de transformation (température, cisaillement).

Les aliments, qu'ils soient directement issus de l'agriculture ou de transformations successives et multiples des matières premières, sont généralement des systèmes hétérogènes, possédant des organisations complexes dans lesquelles les molécules évoluent sous l'effet de diverses contraintes.

Cette organisation dynamique de l'aliment est susceptible de provoquer, moduler ou retarder le déroulement des phénomènes à l'origine des dégradations de l'arôme. Limiter les échanges, réduire les contacts, figer le système constitue donc un moyen de limiter les altérations de l'arôme. Dans d'autres cas, il s'agit également de contrôler la réactivité de molécules fragiles en jouant sur les équilibres réactionnels pour éviter la formation de composés indésirables.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

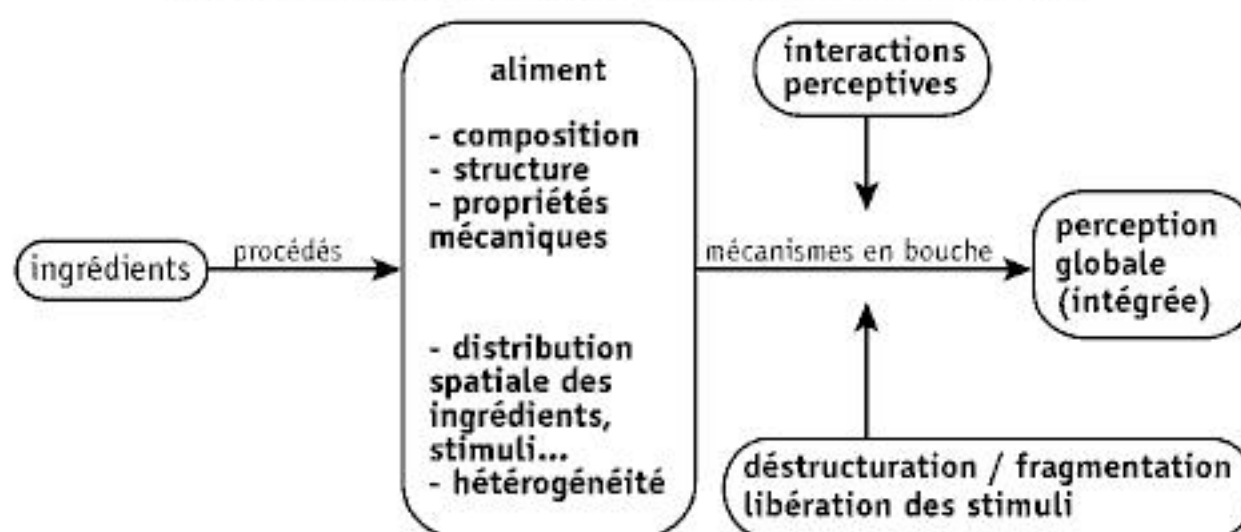


You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

1.4. Caractérisation de la libération des molécules d'intérêt

Pendant la phase buccale, l'aliment est déstructuré par l'action conjointe de la mastication et de la salivation pour former un bol alimentaire et être dégluti. Cette étape constitue une étape préparatoire à la digestion. Cette déstructuration est principalement influencée par la composition de l'aliment, sa texture et les paramètres de mastication. C'est au cours du séjour en bouche de l'aliment que sont majoritairement perçues ses propriétés sensorielles. Les phénomènes impliqués sont très complexes dans la mesure où des paramètres de composition propres à la matrice alimentaire considérée et des paramètres de physiologie orale propres à chaque individu interviennent sur la cinétique de libération des composés d'intérêt en bouche et sur la perception temporelle des arômes, des saveurs et de la texture, et leurs interactions (fig. 1). Cette complexité donne lieu à des différences interindividuelles importantes (Gierczynsky *et al.*, 2011 ; Woda *et al.*, 2006). Celles-ci peuvent être contournées en utilisant des systèmes *in vitro*, simplifiés, pour étudier ou prendre en compte un nombre plus restreint de paramètres. Cependant, ces systèmes, appelés bouches artificielles ou simulateurs de mastication, restent rudimentaires et ne prennent en compte qu'un nombre restreint de paramètres oraux en simplifiant énormément les phénomènes *in vivo*. En conséquence, les profils de libération obtenus avec ces dispositifs restent distincts de ceux existant réellement en bouche et sont incomplets, du fait notamment de la différence au niveau des échelles de temps et d'espace et du nombre de mécanismes impliqués (Chung, 2007). Par ailleurs, ces différences interindividuelles peuvent être mises à profit pour des approches globales mettant en relation des comportements physiologiques et la perception de la flaveur.

Figure 1 : Relations entre la composition de l'aliment, les processus oraux et la perception intégrée de la flaveur



1.4.1. Mesure de la libération *in vivo* des molécules d'intérêt

Les cinétiques de libération des composés volatils sont obtenues *in vivo* par la mesure de l'évolution de leur concentration dans les effluves nasales collectées à la sortie des narines d'un sujet. La composition de ces effluves est supposée représenter la composition en composés d'arôme en contact avec la muqueuse olfactive dans la cavité nasale. Le développement de techniques analytiques sensibles et rapides comme la spectrométrie de masse équipée d'une source d'ions de type ionisation chimique à pression atmosphérique (APCI-MS) (Taylor, 2002) ou par réaction de transfert de proton (PTR-MS) (Lindinger *et al.*, 1998) a rendu possible le suivi dynamique en ligne et en temps réel de la libération de molécules volatiles. Les conditions d'ionisation dites «douces» limitent la fragmentation des molécules, ce qui simplifie l'analyse des spectres.

La plupart des études menées sur ce thème portent sur la compréhension des mécanismes à l'origine de la libération des molécules responsables des stimuli sensoriels ; elles permettent de quantifier les contributions respectives des caractéristiques des produits (composition, structure) et de la physiologie des individus sur les profils de libération obtenus, et conduisant à la perception. Ainsi, ces mesures sont souvent associées à des mesures sensorielles afin de mieux comprendre les liens existant entre libération des molécules volatiles et perception aromatique (Déléris *et al.*, 2011) et mettre en évidence l'existence d'éventuelles interactions sensorielles (arôme-saveur ou texture-arôme). En parallèle, les mesures de paramètres physiologiques caractérisant les processus oraux comme la mastication, la salivation, la déglutition, la respiration permettent d'évaluer leur influence sur les profils de libération et de perception au cours du temps (Repoux *et al.*, 2012; Ruijshop *et al.*, 2011).

Dans le cas des composés sapides (transfert aliment/salive), la mesure *in vivo* de leur libération est basée sur la réalisation de prélèvements de salive avec des adsorbants (coton-tige, papier...) ou directement dans un flacon par «crachat» à différents temps de mastication. Il s'ensuit une phase d'extraction et de dosage des solutés d'intérêt par des méthodes d'analyse classiques. Cette technique du prélèvement de salive permet un échantillonnage en discontinu avec des intervalles de temps assez courts (10 s), mais elle est très consommatrice de temps.

Pour pallier cet inconvénient, des dispositifs permettant de mesurer en temps réel et en ligne la libération de composés sapides lors de la

mastication d'un aliment texturé ont été réalisés. La mesure de conductivité grâce à une électrode fixée sur un «appareil dentaire» fixé dans la partie supérieure de la bouche a permis de suivre la libération du sel pendant la mastication de fromages (Davidson *et al.*, 1998; Jack *et al.*, 1995). Ce dernier a aussi ajouté une électrode pH miniature au dispositif pour suivre les variations d'acidité. D'autres études ont proposé des fixations dans la partie buccale inférieure : entre les dents (Neyraud *et al.*, 2003) ou sur la face extérieure des incisives (Emorine *et al.*, 2012). La difficulté de fixer le capteur dans la cavité buccale dans un bon positionnement permettant des mesures fiables dans la salive, tout en gardant son intégrité pendant tout le processus, rend ces mesures délicates.

La principale limitation de ces capteurs est leur non-spécificité, ne permettant pas d'avoir des informations sur la nature des composants. Des capteurs plus spécifiques comme des électrodes à enzyme immobilisée sont à l'étude. Ils sont coûteux et nécessitent autant de types de capteurs que de composés à doser. Les langues électroniques ont une certaine sélectivité dans leur réponse et permettent des analyses comparatives bien que peu indicatives sur la nature des composants. De toute façon, ces dispositifs possèdent pour l'instant des limitations importantes pour des mesures en continu dans une cavité buccale : taille du dispositif trop importante bien que la tendance soit à la miniaturiser, volume d'échantillon nécessaire trop élevé par rapport aux impératifs physiologiques, temps de réponse peu compatible avec des mesures en temps réel et sensibilité importante à la pollution. De plus, il est impératif que ces dispositifs soient biocompatibles et puissent résister aux contraintes physiques et biochimiques du milieu buccal. Il n'existe donc à l'heure actuelle aucune technique permettant de mesurer spécifiquement chaque composé sapide libéré d'un aliment en temps réel directement dans la cavité buccale.

1.4.2. Mesure de la libération in vitro des molécules d'intérêt

Pour s'affranchir de la forte variabilité interindividuelle existant et pour découpler les phénomènes oraux complexes, des systèmes expérimentaux simulant une ou plusieurs fonctions orales ont été développés. En fonction des objectifs recherchés, ils peuvent être simples et se limiter à un simple réacteur fermé ou plus complexes avec plusieurs fonctionnalités pour simuler au mieux les conditions *in vivo* (Piggott et Schaschke, 2001; Salles *et al.*, 2011). Ils sont cependant encore loin de reproduire l'ensemble des

paramètres de physiologie orale simulés par l'appareil sur la libération de composés de la flaveur et la déstructuration.

Bien que simulant encore très partiellement les fonctions de la cavité oropharyngée, ces dispositifs constituent des outils importants dans la mesure où ils permettent de dissocier certains phénomènes et de s'affranchir de la grande variabilité interindividuelle. Les approches *in vitro* et *in vivo* sont complémentaires pour l'étude des mécanismes en bouche conduisant à la libération des molécules d'intérêt.

2. Facteurs influençant la libération des composés de la flaveur en bouche

De nombreux facteurs liés à la composition de la matrice alimentaire et à la physiologie orale de l'individu ont une influence sur la libération des stimuli en bouche et sur la perception.

2.1. Effets liés au produit

La composition de la matrice alimentaire influence de façon importante les cinétiques de libération des composés d'intérêt à cause des interactions entre les différents constituants (Guichard, 2002). Dans le cas des composés d'arôme, de nombreux travaux ont mis en évidence l'existence d'interactions avec les protéines (Tromelin *et al.*, 2006), la matière grasse (Van Ruth *et al.*, 2002 ; Van Ruth et Roozen, 2000), les polysaccharides et autres macromolécules (Tietz *et al.*, 2008). La nature et la force de ces interactions sont reliées aux propriétés physico-chimiques des stimuli chimiques et des composants de la matrice alimentaire. Dans le cas des composés sapides, généralement plus polaires, des effets de la matière grasse et de l'eau ont été rapportés.

La composition peut aussi avoir un effet indirect en modifiant les propriétés de structure des produits (Kersiene *et al.*, 2008). La structure et la microstructure des produits alimentaires ont des effets sur la mobilité des composés d'arôme et par conséquent sur leur libération (Délérès *et al.*, 2011). La viscosité des produits peut non seulement influencer la mobilité des solutés mais aussi modifier la capacité d'étalement des produits et donc les surfaces d'échange disponibles pour les transferts de matière (Saint-



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

- KERSIENE M., ADAMS A., DUBRA A., DE KIMPE N., LESKAUSKAITE D., Interactions between flavour release and rheological properties in model custard desserts: Effect of starch concentration and milk fat, *Food Chemistry*, 108, 1183-1191, 2008.
- LANDY P., ROGACHEVA S., LORIENT D., VOILLEY A., Thermodynamic and kinetic aspects of the transport of small molecules in dispersed systems, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 12, 57-65, 1998.
- LAUVERJAT C., DE LOUBENS C., DÉLÉRIS I., TRÉLÉA I. C., SOUCHON I., Rapid determination of partition and diffusion properties for salt and aroma compounds in complex food matrices, *Journal of Food Engineering*, 93, 407-415, 2009a.
- LAUVERJAT C., DÉLÉRIS I., TRÉLÉA I. C., SALLES C., SOUCHON I., Salt and Aroma Compound Release in Model Cheeses in Relation to Their Mobility, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57, 9878-9887, 2009b.
- LAWRENCE G., BUCHIN S., ACHILLEOS C., BÉRODIER F., SEPTIER C., COURCOUX P., SALLES C., In vivo sodium release and saltiness perception in solid lipoprotein matrices. 1. Effect of composition and texture, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60, 5287-5298, 2012a.
- LAWRENCE G., SEPTIER C., ACHILLEOS C., COURCOUX P., SALLES C., In vivo sodium release and saltiness perception in solid lipoproteic matrices. 2. Impact of oral parameters, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60, 5299-5306, 2012b.
- LINDINGER W., HANSEL A., JORDAN A., On-line monitoring of volatile organic compounds at pptv levels by means of proton-transfer-reaction mass spectrometry (PTR-MS) - Medical applications, food control and environmental research, *International Journal of Mass Spectrometry and Ion Processes*, 173, 191-241, 1998.
- LINFORTH R. S. T., TAYLOR A. J., Persistence of Volatile Compounds in the Breath after Their Consumption in Aqueous Solutions, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48, 5419-5423, 2000.
- LINFORTH R. S. T., BLISSETT A., TAYLOR A. J., Differences in the effect of bolus weight on flavor release into the breath between low-fat and high-fat products, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53, 7217-7221, 2005.
- MA Y., ZHU C., MA P., YU K. T., Studies on the Diffusion Coefficients of Amino Acids in Aqueous Solutions, *Journal of Chemical and engineering data*, 50, 1192-1196, 2005.

- MAHAWANICH T., SCHMIDT S. J., Molecular mobility and the perceived sweetness of sucrose, fructose, and glucose solutions, *Food Chemistry*, 84, 169-179, 2004.
- MOGI N., SUGAI E., FUSE Y., FUNAZUKURI T., Infinite dilution binary diffusion coefficients for six sugars at 0.1 MPa and temperatures from (273.2 to 353.2) K, *Journal of Chemical and engineering data*, 52, 40-43, 2007.
- NEYRAUD É., PRINZ J. F., DRANSFIELD É., NaCl and sugar release, salivation and taste during mastication of salted chewing gum, *Physiology & Behavior*, 79, 731-737, 2003.
- NORMAND V., AVISON S., PARKER A., Modeling the kinetics of flavour release during drinking, *Chemical Senses*, 29, 235-245, 2004.
- PIGGOTT J. R., SCHASCHKE C. J., Release cells, breath analysis and in-mouth analysis in flavour research, *Biomolecular Engineering*, 17, 129-136, 2001.
- PIONNIER E., CHABANET C., MIOCHE L., LE QUÉRÉ J.-L., SALLES C., In vivo aroma release during eating of a model cheese: relationships with oral parameters, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52, 557-564, 2004.
- REGA B., GUICHARD É., VOILLEY A., Flavour release from pectin gels: Effects of texture, molecular interactions and aroma compounds diffusion, *Sciences des Aliments*, 22, 235-248, 2002.
- REPOUX M., SÉMON É., FÉRON G., GUICHARD É., LABOURÉ H., Inter-individual variability in aroma release during sweet mint consumption, *Flavour and Fragrance Journal*, 27, 40-46, 2012.
- RONDEAU-MOURO C., ZYKWINSKA A., DURAND S., DOUBLIER J.-L., BULÉON A., NMR investigations of the 4-ethyl guaicol self-diffusion in iota (iota)-carrageenan gels, *Carbohydrate Polymers*, 57, 459-468, 2004.
- RUIJSHOP R. M. A. J., ZIJLSTRA N., BOELRIJK A. E. M., DIJKSTRA A., BURGERIN M. J. M., DE GRAAF C., WESTERTERP-PLANTENGA M. S., Effects of bite size and duration of oral processing on retro-nasal aroma release - features contributing to meal termination, *British Journal of nutrition*, 105, 307-315, 2011.
- SAINT-EVE A., JUTEAU A., ATLAN S., MARTIN N., SOUCHON I., Complex Viscosity Induced by Protein Composition Variation Influences the Aroma Release of Flavored Stirred Yogurt, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54, 3997-4004, 2006.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

- VAN RUTH S. M., ROOZEN J. P., Delivery of flavours from food matrices, *Food Flavour Technology*, ed. by A. J. Taylor, Sheffield Academic Press, CRC Press, chp. 6, 167-184, 2002.
- VAN RUTH S. M., GROSSMANN I., GEARY M., DELAHUNTY C. M., Interactions between artificial saliva and 20 aroma compounds in water and oil model systems, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49, 2409-2413, 2001.
- VAN RUTH S. M., KING C., GIANNOULI P., Influence of lipid fraction, emulsifier fraction, and mean particle diameter of oil-in-water emulsions on the release of 20 aroma compounds, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50, 2365-2371, 2002.
- WEEL K. G. C., BOELRIJK A. E. M., BURGER J. J., VERSCHUEREN M., GRUPPEN H., VORAGEN A. G. J., SMIT G., New device to simulate swallowing and in vivo aroma release in the throat from liquid and semiliquid food systems, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52, 6564-6571, 2004.
- WILSON C. E., BROWN W. E., Influence of food matrix structure and oral breakdown during mastication on temporal perception of flavor, *Journal of Sensory Studies*, 12, 69-86, 1997.
- WODA A., FOSTER K., MISHELLANY A., PEYRON M.-A., Adaptation of healthy mastication to factors pertaining to the individual or to the food, *Physiology and Behavior*, 89, 28-38, 2006.
- WRIGHT K. M., HILLS B. P., HOLLOWOOD T. A., LINFORTH R. S. T., TAYLOR A. J., Persistence effects in flavour release from liquids in the mouth, *International Journal of Food Science and Technology*, 38, 343-350, 2003.
- ZORILLA S. E., RUBIOLLO A. C., A model for using the diffusion cell in the determination of multicomponent diffusion coefficients in gels or foods, *Chemical Engineering Science*, 49, 2123-2128, 1994.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Texture et flaveur des aliments

VERS UNE CONCEPTION MAÎTRISÉE

Quelles sont les molécules responsables de l'arôme et de la saveur des aliments ?

Comment ces molécules sont-elles libérées pour accéder aux récepteurs sensoriels et être perçues ?

Comment la texture de l'aliment influence-t-elle la perception de l'odeur et de la saveur ?

Ce livre rassemble les principaux résultats de recherches menées dans le domaine de l'agroalimentaire, dans les sciences des aliments et dans le comportement du consommateur. Il présente les bases nécessaires pour comprendre les mécanismes mis en jeu dans la perception des odeurs et des saveurs dans des aliments de natures différentes. Pour cela, il reprend, de manière simple et accessible, les bases de la chimie des molécules odorantes et sapides, de la composition des aliments et de leurs propriétés de texture, ainsi que des interactions au sein de l'aliment.

Cet ouvrage devra permettre aux acteurs du secteur alimentaire de mieux comprendre le devenir des molécules responsables de la flaveur (odeur plus saveur) depuis l'aliment vers nos récepteurs sensoriels en passant par l'étape de déstructuration en bouche, avec une prise en compte des effets mélange et des interactions entre modalités sensorielles. La compréhension de ces mécanismes est incontournable pour reformuler des aliments prenant en compte les recommandations nutritionnelles, à savoir bons pour la santé mais conservant toutes les propriétés sensorielles, sources de plaisir. Il s'adresse non seulement aux industriels du secteur, mais également aux étudiants, enseignants, chercheurs, soucieux de mieux comprendre comment se forme la perception sensorielle.

Ce livre est également source de nombreuses références bibliographiques auxquelles le lecteur pourra se reporter pour élargir ses connaissances et approfondir certains aspects. C'est pourquoi il se présente également comme point de départ pour de nouvelles recherches en alimentation, dans un objectif d'allier plaisir et santé.

PUBLIC

Chercheurs, étudiants, formateurs, techniciens, professionnels et institutionnels du secteur agroalimentaire, ainsi que toute personne intéressée par les qualités sensorielles des aliments.

AUTEURS

Ouvrage écrit collectivement par des experts en sciences des aliments, sciences du consommateur, appartenant au monde de l'enseignement et de la recherche.

Coordonné par **Élisabeth Guichard**, directrice de recherche à l'INRA-Dijon, en collaboration avec **Claude Genot**, directrice de recherche à l'INRA-Nantes et **Andrée Voilley**, professeure émérite à AgroSupDijon-université de Bourgogne.



educagri
éditions

26, bd Docteur-Petitjean – BP 87999
21079 Dijon Cedex

Tél. : 03 80 77 26 32 – Fax : 03 80 77 26 34
www.editions.educagri.fr – editions@educagri.fr

24 €

ISSN 1629-7474

ISBN 978-2-84444-879-8



AL1203

Éléments sous droits d'auteur