

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة 8 ماي 1945 قالمة
Université 8 Mai 1945 Guelma
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Sciences de la terre et de l'Univers



Mémoire En Vue de l'Obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie
Spécialité/Option : Qualité des Produits et Sécurité Alimentaire
Département : Biologie
Filière : Science Alimentaire

Propriétés Rhéologiques des Fromages : Domaines d'Application et Méthodes d'Evaluation

Présenté par :

AMIRI Chahira

HEDIBLI Bouchra

REDJIMI Feres

Devant le jury composé de :

Pr. Mabrouk CHEMMAM (Professeur)

Dr. Aissam BOUSBIA (MCA)

Dr. Mouslim BARA (MCA)

Président

Encadreur

Examineur

Université de Guelma

Université de Guelma

Université de Guelma

Septembre 2020

Remerciement

Nous remercions d'abord le bon dieu, pour le courage qu'il nous a donné pour surmonter toutes les difficultés durant nos années d'étude et de nous avoir accordée la force, la volonté et le courage pour bien mener ce travail.

Nous faillirons à la tradition si nous n'exprimons pas ici notre gratitude envers tous ceux qui ont collaborés de près ou de loin à l'exécution de ce mémoire.

*Nous remercions très vivement notre encadreur **Dr. BOUSBIA Aïssam** Maître de Conférence à l'Université de 8 Mai 1945 Quelma qui nous fait l'honneur de diriger ce travail, qu'il trouve ici l'expression de notre gratitude et de notre profond respect. Nous exprimons notre vive reconnaissance et immense gratitude pour leur aide précieuse et claire, ses relectures attentives et ses orientations.*

*Nos remerciements aussi adressés au membre de jury **Mr CHEMMEM Mabrouk** Professeur à l'université 8 Mai 1945 qui nous fait l'honneur de présider ce jury, hommage respectueux et **Mr BARA Mouslim** Maître de Conférence à l'Université de du 8 Mai 1945.*

Nous tenons également à remercier infiniment l'ensemble des enseignants de la faculté des sciences de la nature et de la vie et sciences de la terre et de l'univers qui nous ont appris les bases de la science, et en particulier ceux du département de biologie.

Merci à vous, sans votre aide, ce travail n'aurait jamais pu être accompli.

Dédicace

À ceux qui dès que j'ai ouvert mes yeux à la vie, j'ai les trouvés devant moi, qui m'ont aidé et guidé mes pas, et m'ont appuis les principes de la vie, qui m'ont couvert par leur amour, et par leur tendresse, à qui tous les mots du monde n'arriveront jamais à les décrire,

À mes chers parents :

Ma mère ; celle qui m'a tant donné sans rien demander, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite.

Mon père ; école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger.

Que dieu les gardes et les protège.

À mon frère : " Redwan " Pour l'aide et l'amour qu'il m'a apporté tout au long de ma vie.

À ma sœur : " Mina " Pour vos encouragements, vos soutient moral et vos conseils.

À mes adorables sœurs : " Souhila ", " Zahra ", " Meriem ", Le trésor de ma vie.

À mon beau-frère " Sofiane " et ma belle-sœur " Naima "

À mes neveux d'amour " Amine ", " Yanis " et " Yahia "

À mon adorable nièce " Ritel "

À tous mes amis : " Bouchra ", " Amira ", " Mouslam ", et " Fares "

À chaque cousin et cousine, et toute ma famille

À mon trinôme " Bouchra " et " Fares ", à qui je souhaite une vie pleine de joie et de réussite.

À tous ceux qui me sont chères

À tous ceux qui m'aiment

À tous ceux que j'aime

Je dédie ce modeste travail

Chahira

Dédicace

A l'aide de Dieu, le tout puissant, ce travail est achevé.

C'est avec un grand plaisir et une immense fierté et joie que je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents

Rien au monde ne pourrait compenser les efforts, l'affection dont vous m'avez toujours comblée et les sacrifices infinis que vous avez consentis pour mon bien être, mon éducation et la poursuite de mes études de bonnes conditions.

Vous êtes dépensés pour moi sans compter.

Ma mère : pour avoir toujours cru en moi, pour son courage, son soutien moral et pour toutes ces années partagées.

Mon père : pour son regard bienveillant et encourageant tout au long de ma vie, pour son sens de devoir et soutien affectif permanent.

Aucune dédicace, ne saurait exprimer à sa juste valeur le profond amour que je vous porte. Puisse dieu, vous procure santé, bonheur et longue vie.

A mes adorables sœurs : " Belkis " et " Manassa ", et mon frère : " A. Elmoiz "

Meilleurs vœux de succès dans vos études.

A tous mes oncles pour leur soutien et leur encouragement.

A mes belles amies : " Chakira ", " Zeineb ", " Sandra ", " Hadjer " et " Sara ".

A mon trinôme " Chakira " et " Fares " à qui je souhaite une vie plein de joie et de réussite.

A tous mes amis et mes collègues d'études et toutes les personnes que j'aime.

Dédicace

Du profond de mon cœur je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers,

À la mémoire de mon père :

Ce travail est dédié à l'esprit de mon père " Yahia " j'espère que, du monde qui est sien maintenant, il apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'un fils qui a toujours prié pour le salut de son âme. Puis Dieu, le tout puissant, l'avoir en sa sainte miséricorde

À ma mère :

Tu m'as donné la vie, la tendresse et le courage pour réussir, tout ce que je peux t'offrir ne pourra exprimer l'amour et la reconnaissance que te porte. En témoignage, je t'offre ce modeste travail pour te remercier pour tes sacrifices et pour l'affection dont tu m'as toujours entouré

À mes très chers frères :

" Nacer ", " Semati ", " abd baki ", et " Amara " et mes belles-sœurs " Nabila " et " Soaâd " qui ont toujours su m'encourager à leur façon

À mes chers amis :

" Taysir ", " Fodil ", " Ramzi ", " Mokim ", " Aymen ", " Asma ", " khawla ", " chaima " et " Inâam "

À mon trinôme " Chakira " et " Bouchra ", à qui je souhaite une vie pleine de joie et de réussite. Vous êtes le titre de la vraie fraternité et de l'amitié vous serez un souvenir immortel

À tous mes camarades de promotion QPSA 2020

Propriétés Rhéologiques des Fromages : Domaines d'Application et Méthodes d'Evaluation

Le fromage est un produit alimentaire fermenté à base de lait, produit dans un large éventail, leur texture est un paramètre important pour classer et apprécier les fromages. La rhéologie du fromage est formellement définie comme l'identification des propriétés texturales et structurales en utilisant les différentes méthodes instrumentales, ces dernières présentent les avantages d'être reproductibles et d'être mise en œuvre rapidement. L'objectif de ce mémoire est de passer en revue les principaux axes relatifs à la rhéologie des fromages à savoir : (i) des notions fondamentales relatives aux fromages (ii) rhéologie et texture du fromage (iii) les facteurs de la variation des propriétés fonctionnelles des fromages (iv) méthodes rhéologiques et texturales. Nous avons identifié 85 articles publiés dans des revues internationales évaluées par des pairs apparus entre 1947 et 2018, ainsi un certain nombre d'ouvrages, chapitres et thèses qui couvraient la rhéologie du fromage. Le fromage est un matériau viscoélastique leur comportement s'apparente à la fois au comportement du solide/élastique et du liquide/visqueux. Lorsque le fromage est soumis à une contrainte une déformation globale peut-être analysée comme étant une combinaison de déformations élémentaires, une fois la contrainte s'annule, la déformation est immédiatement disparue relevant de l'élasticité, de la viscosité et de la plasticité du fromage. Conclusion : le changement de la conformation et de la composition de la matrice fromagère due à plusieurs facteurs est à l'origine d'une modification notable de la texture.

Mots clés : Fromage, Rhéologie, Texture, Viscoélastique, Contrainte, Déformation.

Cheeses rheology: application and methods of evaluation

Cheese is a fermented food product produced from milk; their texture is an important parameter for cheeses classification and appreciation. Cheese rheology is defined as the textural and structural properties using different reproducible rapidly instrumental methods.

The objective of this narrative review was to synthesize: **(i)** fundamental concepts relating to cheeses **(ii)** rheology and texture of the cheeses **(iii)** variation factors of cheeses functional properties and **(iv)** rheological and textural methods. We identified 85 articles published in international peer-reviewed journals that appeared between 1947 and 2018, as well as several books, chapters and PhD thesis that covered cheeses rheology area. Cheese is a viscoelastic material and their behavior is akin to both the behavior of solid / elastic and liquid / viscous. When the cheese is subjected to a stress an overall deformation can be analyzed as being a combination of elementary deformations, once the stress was canceled, the deformation was immediately disappeared relating to cheese elasticity, viscosity and plasticity. Conclusion: the change in the conformation and composition of the cheese matrix can lead to a notable modification of the texture, which are due to several factors.

Keywords: Cheese, Rheology, Texture, Viscoelastic, Stress, Deformation.

الخواص الريولوجية للجبن: مجالات التطبيق وأساليب التقييم

الجبن هو منتج غذائي مخمر يعتمد على الحليب والذي يتم إنتاجه في نطاق واسع، حيث يعتبر قوام الجبن عامل مهم جداً لتصنيفه. تعرف ريولوجيا الجبن رسمياً على أنها تحديد الخواص الخارجية والبنائية الخاصة به باستخدام مختلف الطرق، حيث تتميز هذه الطرق بقابلية التكرار وسرعة التنفيذ. لذلك فإن الهدف من دراستنا هو إبراز المحاور الرئيسية المتعلقة بالخواص الريولوجية للجبن، والتي تتضمن ما يلي: (1): المفاهيم الأساسية عن للجبن (2): ريولوجيا وقوام الجبن (3): عوامل تنوع الخصائص الوظيفية للجبن (4): وسائل قياس وتحديد الخواص الريولوجية وقوام الجبن. قد حددنا 85 مقالا نُشر في مجلات دولية ما بين عام 1947 و2018، وكذلك عدد من الكتب، الفصول والأطروحات التي تناولت مواضيع خاصة بريولوجيا الجبن. الجبن هو مادة مرنة لزجة تشبه في سلوكها كل من سلوك المادة الصلبة/المرنة، والسائلة/اللزجة. عندما يتعرض الجبن إلى قوة الضغط فإنه يمكن تحليل تشوهه كلياً على أنه مزيج من التشوه العنصري، وبمجرد اختفاء الضغط فإن التشوه يختفي فوراً بسبب مرونة ولزوجة الجبن. خلاصة: التغيير في تكوين وتركيب مصفوفة الجبن يعود إلى عدة عوامل هي السبب الأصلي للتغير الملحوظ في القوام.

الكلمات المفتاحية: جبن، الخواص الريولوجية، قوام، مرنة/لزجة، ضغط، تشوه.

Liste des figures

N°	Titre	Page
Figure 01	(A) Structure d'un globule de matière grasse, (B) Modèle de caséine, (C) modèle de caséine selon le modèle de Schmidt	05
Figure 02	Résumées des Principales étapes de la fabrication fromagère (dressée par nos soins à partir de la littérature)	09
Figure 03	Classification des fromages	12
Figure 04	Les différentes régions du spectre viscoélastique des fluides non-Newtoniens	18
Figure 05	G' et G'' aux basses et hautes fréquences, représentés par les modèles de Maxwell et Kelvin-Voigt, d'après	19
Figure 06	Facteurs de variation la fonctionnalité du fromage	27
Figure 07	Test de pénétration	34
Figure 08	Enregistrement suite à un test de pénétrométrie : force en fonction de distance	34
Figure 09	Principe de test de pénétration utilisée pour les mesures rhéologiques	35
Figure 10	Analyse de la texture par test de pénétrométrie	36
Figure 11	Variation de la force moyenne en fonction de temps lors d'un test de pénétrométrie	36
Figure 12	Test de compression uni-axial	37

Figure 13	Échantillon de fromage cheddar mature avant (a) et après (b) compression à un taux de 60 mm/min à 80 % de la hauteur d'origine sur un analyseur de texture TAHDI.	37
Figure 14	Test de compression dynamique	39
Figure 15	Courbe de test de cisaillement dynamique avec balayage température sur des fromages expérimentaux de type pâte pressée (n=10 Mamirolle) (triangle : $\tan \delta$, losange plein : G' , losange vide : G'')	40
Figure 16	Principe de l'analyse du profil textural	41
Figure 17	Calculs effectués par le logiciel «Texture Exposit Software» des paramètres de l'analyse du profil textural des fromages	41

Liste des tableaux

N°	Titre	Page
Tableau 01	Les applications de la rhéologie dans l'industrie fromagère	14
Tableau 02	Terminologies utilisées en rhéologie	15
Tableau 03	Fonctionnalités des fromages à froid et ses propriétés rhéologiques relatives	22
Tableau 04	Exigences fonctionnelles du fromage à chaud et la variation de la fonctionnalité des fromages utilisés comme ingrédient	25
Tableau 05	Teneur moyenne en matières grasses et protéiques des vaches, chèvres et brebis	28

Table des matières

<i>Résumé</i>	i
<i>Summary</i>	ii
<i>المخلص</i>	iii
<i>Liste des figures</i>	iv
<i>Liste des tableaux</i>	vi
<i>Introduction</i>	1

Chapitre 01 : Généralités sur les fromages

1.1. Introduction	3
1.2. Historique et origine du fromage	3
1.3. Sciences et technologie des fromages	3
1.4. Aperçu sur les principales étapes de fabrication des fromages	4
1.4.1. La préparation du lait	4
1.4.2. Coagulation du lait	6
1.4.2.1. La coagulation par la voie acide	6
1.4.2.2. La coagulation par la voie enzymatique	7
1.4.3. Egouttage	8
1.4.4. Salage	8
1.4.5. Affinage	8
1.5. Classification des fromages	10

Chapitre 02 : Rhéologie et texture du fromage

2.1. Définition	13
2.2. Concept et terminologie de base	13
2.3. Types et modèles rhéologiques de base	13
2.3.1. Liquide viscoélastique	17
2.3.2. Solide viscoélastique	18

Chapitre 03 : Facteurs de la variation des propriétés fonctionnelles des fromages

3.1. La fonctionnalité alimentaire	20
3.2. Les principales fonctionnalités des fromages utilisés comme ingrédients	20
3.2.1. Les propriétés rhéologiques des fromages à froid	21
3.2.2. Les propriétés rhéologiques des fromages à chaud	24
3.2.2.1. Etalement (couvrant, nappant, fondant)	24

3.2.2.2. L'exsudation de matière grasse.....	24
3.2.2.4. Gratinant.....	24
3.3. Les facteurs de la variation des propriétés fonctionnelles des fromages	27
3.3.1. Propriétés du lait	27
3.3.2. Procédure de fabrication du fromage.....	29
3.3.2.1. Culture de démarrage ou encore « starter ».....	29
3.3.2.2. Type de coagulant.....	29
3.3.2.3. Traitement du caillé	29
3.3.3. La composition du fromage	30
3.3.3.1. Taux d'humidité	30
3.3.3.2. Teneur en matière grasse.....	30
3.3.3.3. Teneur en sel (NaCl)	31
3.3.3.4. pH.....	31
3.3.4. Processus post production	31
3.3.4.1. Vieillessement	31
3.3.4.2. Stockage et congélation	32
3.3.4.3. Température	32
Chapitre 04 : Méthodes rhéologiques et texturales	
4.1. Les méthodes rhéologiques.....	33
4.1.1. Test de pénétrométrie	33
4.1.2. Test de compression simple (élasticité, contrainte et déformation).....	36
4.1.3. Test de compression dynamique (viscosité, élasticité, viscoélasticité).....	38
<i>Conclusion</i>	42
<i>Références Bibliographiques</i>	43

Introduction

Le fromage est considéré comme un aliment idéal en raison de sa haute valeur nutritive, sa densité, sa commodité, ses variétés, son disponibilité et son goût (**Bogue et al., 1999**).

Sandine and Elliker (1970) ont suggéré qu'il y avait plus de 1000 variétés de fromages à travers le monde. La production mondiale de fromage était de 19 millions tonnes en 2014, avec une augmentation annuelle de 3% durant les 20 dernières années. L'Europe, avec une production annuelle de 8,7 millions tonnes, soit 53% de la production mondiale représente le continent le plus producteur du fromage dans le monde (**Muthukumarappan and Swamy, 2017**). La consommation de fromage dans la plupart des pays pour lesquels des données sont disponibles a été considérablement augmentée depuis 1970 (**IDF, 2012**). L'une des attentes des consommateurs est que le fromage possède une texture attendue, caractéristique d'une variété particulière. La texture est une caractéristique importante utilisée pour différencier de nombreuses variétés de fromage (**Antoniou et al., 2000; Wendin et al., 2000**). Ainsi, elle est considérée par le consommateur comme un déterminant de la qualité globale et des préférences des consommateurs (**Adda et al., 1982; Guinard and Mazzucchelli, 1996; LEE et al., 1978**). Plusieurs changements de la structure du fromage ont une incidence majeure qui se produisent pendant l'entreposage. Dans la pratique, les fromages qui ont une longue durée de stockage, une diminution de la fermeté (ou du ramollissement) du corps se produit. Deux phases de développement de la texture pendant le stockage ont été identifiées. La première phase a lieu entre 7 et 14 jours après la production. Pendant ce temps, la texture caoutchouteuse du jeune fromage est convertie en texture caractéristique plus lisse de la variété spécifique. Dans cette phase, il y a hydrolyse d'environ 20 % du α_{s1} -CN par le coagulant résiduel, ainsi qu'une redistribution de l'eau dans le réseau fromager (**Kindstedt et al., 1992; Lawrence et al., 1987; McMahon et al., 1999**). Un changement plus graduel de la texture du fromage se produit pendant la seconde phase de la maturation. Pendant ce temps, les autres α_{s1} -CN et les autres caséines sont hydrolysées. Contrairement à la première phase, qui ne prend que quelques jours, la seconde phase se déroule sur une période de plusieurs mois (**Lawrence et al., 1987**). Le fromage est un matériau viscoélastique où il présente un comportement à la fois solide et fluide (**Konstance and Holsinger, 1992; Taneya et al., 1992**). Les méthodes rhéologiques caractérisent les propriétés physiques du fromage. Cependant, ils doivent être jumelés à une interprétation psychophysique humaine des perceptions tactiles et visuelles qui se produisent lors de la consommation de fromage afin de comprendre complètement ce qui cause des

différences dans la texture du fromage (**Szczesniak, 1963**). La rhéologie du fromage est un outil important pour étudier et identifier les propriétés texturales et structurales. Elle traite de la déformation de l'échantillon en utilisant les différents types d'instruments. Les résultats des tests de petite et grande déformation sont interprétés pour comprendre l'effet de la composition du lait, de la modification des processus de fabrication et du stockage (**Joshi et al., 2004**). C'est dans ce contexte que ce travail de Master a été proposé, dont l'objectif primordial était l'étude des propriétés rhéologiques des fromages : domaines d'application et méthodes d'évaluation. Cependant, le protocole expérimental n'a pas été réalisé suite à la crise sanitaire qu'ait connue le monde entier, nous étions contraints de limiter notre travail à une revue bibliographique relative à notre objectif de départ. En effet, cette revue se compose principalement de quatre chapitres : (1) Définition des fromages (2) rhéologie et texture du fromage (3) les facteurs de la variation des propriétés fonctionnelles des fromages (4) les méthodes rhéologiques.

*Chapitre 01 : Généralités
sur les fromages*

1.1. Introduction

La Fédération internationale du lait a estimé que la production mondiale de fromage en 2015 s'élève à environ 23 millions de tonnes (**IDF, 2016**). Cette production était répartie sur six continents et comprend le fromage fabriqué principalement à partir de lait de vache (20,7 millions de tonnes). Le reste est composé de fromages des autres espèces (buffles, caprins et ovins) ainsi que de fromages faits maison et fermiers qui n'apparaissent pas dans les statistiques internationales (**IDF, 2016**).

1.2. Historique et origine du fromage

La littérature scientifique est très riche en ce qui concerne l'histoire du fromage (**Kindstedt, 2018**). L'histoire de la fabrication du fromage remonte au néolithique, c'est à dire 7 000 ans av. J-C. Le fromage apparaît en même temps que la domestication des animaux et à la traite des femelles de différentes espèces (**Fox et al., 2004**). Les fromages de chèvre et de brebis apparaissent en premier, bien avant les fromages de vache car la domestication des bovins est de quelques milliers d'années plus tardive que celle des ovins et caprins (**Vigne, 2008, 2011**). L'invention du fromage est liée à la pratique du transport et du stockage du lait. Certains avancent aussi l'observation de lait caillé dans la caillette de veau abattus pour être consommés. Le fromage est le nom générique d'un groupe de produits alimentaires à base de lait fermenté, produits dans une large gamme de saveurs et formes à travers le monde. Bien que l'objectif principal de la fabrication du fromage soit la conservation des principaux constituants du lait, le fromage a évolué pour devenir un aliment de haute valeur culinaire et nutritionnelle (**Sandine and Elliker, 1970**). Dans la conception traditionnelle, le fromage est le résultat de la coagulation du lait cru de vache, de chèvre ou de brebis, caractérisés par un savoir-faire ancestral transmis d'une génération à l'autre jusqu'à nos jours, où nous observons qu'un certain nombre de fromages a fait la transition de l'échelle traditionnelle à l'industrielle (**Marino et al., 2012**)

1.3. Sciences et technologie des fromages

Le fromage est le groupe de produits laitiers le plus diversifié et académiquement, le plus intéressant (**Fox et al., 2004**). Bien que de nombreux produits laitiers, s'ils sont correctement fabriqués et stockés, sont biologiquement, biochimiquement, chimiquement et physiquement très stables. Par contre, les fromages sont caractérisés par une dynamique biologique et biochimiques très remarquables (**Fox et al., 2004**). Un autre aspect important du fromage est la

gamme de disciplines scientifiques impliquées où les études relatives à la fabrication du fromage et son maturation impliquent plusieurs domaines de recherches à savoir : la chimie, la biochimie de constituants du lait, fractionnement et caractérisation chimique des constituants du fromage, microbiologie, enzymologie, génétique moléculaire, chimie des arômes, nutrition, toxicologie, rhéologie et génie chimique. Par conséquent, de nombreux scientifiques se sont impliqués dans les études de fabrication et d'affinage du fromage. En effet, une littérature scientifique très riche et abondante est disponible (**Davies and Law, 1984; Kosikowski and Mistry, 1997; Law and Tamime, 2011; Ong et al., 2017; Scott, 1998**).

1.4. Aperçu sur les principales étapes de fabrication des fromages

La fabrication du fromage est le résultat de l'association de deux phases majeures à savoir : la phase d'agglomération et la phase d'écoulement. L'agglomération consiste à l'assemblage des protéines du lait et surtout la caséine qui représente la protéine la plus importante dans le lait. Cette protéine emprisonne les autres composants du lait pour former des morceaux du caillé moulu. L'écoulement consiste à la libération de la phase liquide ainsi, les éléments solubles qui ont été incorporés dans les pores (**Luquet, 1990**). Autrement dit, les principes de base de la fabrication des fromages sont les mêmes pour presque toutes les variétés de fromages. La fabrication consiste à enlever l'eau du lait afin d'augmenter la concentration de six à dix fois d'une partie des protéines, lipides, minéraux et vitamines avec l'expulsion de lactosérum (**Abbas, 2012**). Par conséquent, la préparation du fromage est essentiellement un processus de déshydratation, avec élimination de 90% de l'eau dans le lait et essentiellement toutes les protéines de lactosérum, le lactose et les sels de lait solubles (**Mehta, 2015**). Selon **Brule and Lenoir (1990)**, la transformation du lait en fromage est basée sur la succession de quatre étapes, qui sont précédées par une opération de standardisation du lait, afin d'ajuster l'acidité pour faciliter la coagulation du lait (le pH d'emprésurage). Elles sont décrites plus en détail ci-après et résumées à la figure .2

1.4.1. La préparation du lait

Le lait est un système complexe et hétérogène légèrement acide (pH 6,5 à 6,7) constitué d'une phase aqueuse avec des molécules solubles composée de lactose, des protéines sériques avec un diamètre de 4 à 6 nm, des sels minéraux, des vitamines, une émulsion de globules gras (figure 1A), avec un diamètre de 2000 à 6000 nm et une suspension colloïdale de protéines complexes sous forme de micelles composées de caséine, avec un diamètre qui varie de 50 à 300 nm et sels minéraux (figure 1B et figure 1C). (**Mehta, 2015; Walstra et al., 2005**)

Le lait a une composition qui varie en fonction de nombreux facteurs génétique et pratiques d'élevage (Grappin et al., 2000). L'équilibre de ce milieu complexe est fragile, il varie également en fonction des techniques de conservation et du stockage comme la réfrigération et la congélation et du développement de la flore primaire qui l'habite. En effet, le lait peut subir une préparation avant sa conversion en fromage.

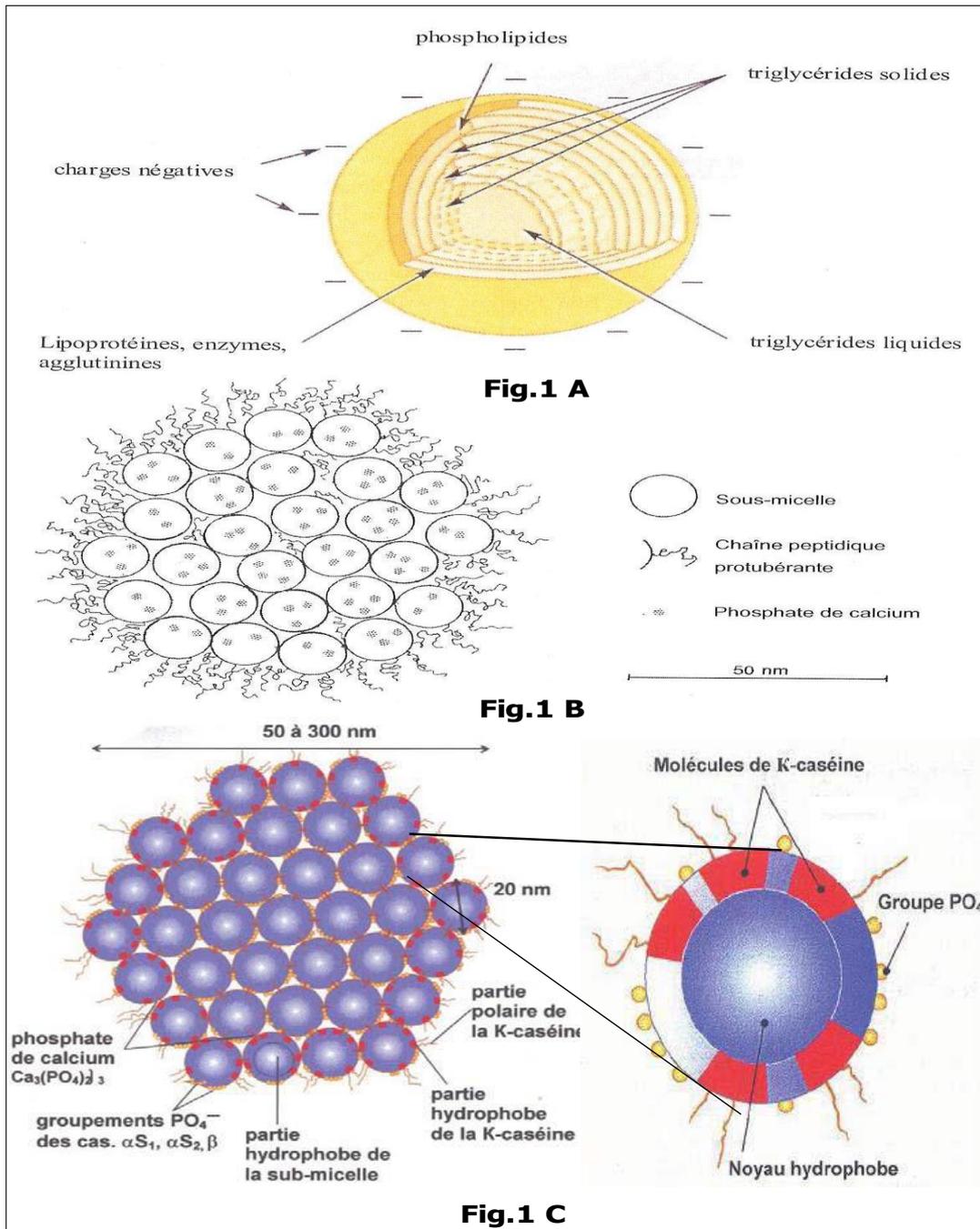


Figure 1. (A) Structure d'un globule de matière grasse (Amiot et al., 2002) (B) Modèle de caséine (C) modèle de caséine selon le modèle de Schmidt (Walstra, 1999)

D'après (**Abbas, 2012**) la préparation du lait avant la transformation en fromage consiste à :

- L'homogénéisation des globules gras : elle permet une meilleure répartition de la matière grasse au sein du caillé, ainsi elle favorise une couleur plus blanche du caillé. Elle peut toutefois accélérer les phénomènes de lipolyse, d'acidification et d'oxydation ;
- La standardisation de la composition chimique du lait en matières grasses par l'addition ou l'élimination de la matière grasse et en matières protéiques (caséinates de Na, Ca, protéines de sérum...);
- La correction technologique de l'état de minéralisation final du caillé : le refroidissement précoce du lait engendre des déplacements de l'équilibre du Calcium lié aux caséines vers le Calcium libre. Une correction de la teneur et de l'équilibre en Ca lié/libre est établi généralement par un apport en chlorure de calcium ;
- Les traitements thermiques : ils visent à détruire la majorité de la flore banale et pathogène tout en conservant au mieux les qualités sensorielles du lait et en créant des conditions favorables aux étapes technologiques suivantes de fabrication fromagère.

1.4.2. Coagulation du lait

La coagulation du lait correspond à des modifications physico-chimiques associées à une déstabilisation de l'état originel des micelles de caséine du lait, cette modification conduit à la formation d'un réseau tridimensionnel appelé « Gel » ou « Coagulum » (**Eck and Gillis, 2006**). La coagulation du lait est obtenue par plusieurs méthodes à savoir : la méthode acide, enzymatique et synthétique qui se base sur la combinaison des deux méthodes citées précédemment (**Lapointe-Vignola, 2002**).

1.4.2.1. La coagulation par la voie acide

L'acidification du lait par l'addition d'acide ou l'ensemencement des bactéries lactiques peut conduire soit à la précipitation de caséine, soit à la formation d'un gel (**Cayot and Lorient, 1998**). Si l'acidification est rapide, par l'ajout d'un acide minéral comme l'acide sulfurique ou organique comme l'acide citrique ou lactique, cette acidification rapide provoque une baisse de pH à environ 4,6 et une floculation des micelles et la précipitation des caséines déminéralisées accompagnée par la formation du gel granuleux dispersé dans le lactosérum (**Alais and Linden, 1997; Eck and Gillis, 2006**). Par contre l'acidification lente obtenue soit par une fermentation lactique, soit par une hydrolyse de la gluconolactone, conduit à la formation d'un gel lisse homogène qui occupe entièrement le volume initial du lait (**Brule and Lenoir, 1990**). Le gel lactique obtenu est fiable, fragile et perméable (**Veisseyer, 1979**), avec une élasticité

pratiquement nulle due au manque de structuration du réseau, les liaisons sont faibles de type hydrophobe et résistent peu au traitement mécanique (Mahaut et al., 2000).

1.4.2.2. La coagulation par la voie enzymatique

Diverses enzymes protéolytiques ont la capacité de coaguler le lait mais la présure est la plus utilisée. Ceci malgré le fait que les prix de la présure animale fluctuent beaucoup en raison de la variation des prix des matières premières et sont considérablement plus élevés que les autres enzymes de coagulation du lait (Hellmuth and van den Brink, 2013). La présure est constituée de deux enzymes, soit la chymosine, qui permet l'hydrolyse de la caséine κ , et la pepsine (Ruettimann and Ladisch, 1987). La coagulation du lait par la présure est divisée en trois étapes : la phase d'hydrolyse enzymatique, la phase d'agrégation et la phase de formation du gel (Brown and Ernstrom, 1988). Ces phases sont décrites ci-après :

- **Phase d'hydrolyse enzymatique** : durant de cette première étape, l'enzyme vient couper le lien peptidique Phe105 -Met106 de la caséine κ et la protéine est scindée en deux peptides, le CMP et la para-k-CN. L'hydrolyse progressive de la caséine κ durant la phase primaire altère les propriétés des micelles à un point où elles deviennent susceptibles à l'agrégation, qui représente la seconde phase de la réaction (Horne, 2006).
- **Phase d'agrégation** : durant la seconde phase, les micelles déstabilisées peuvent se rapprocher et former des liens hydrophobes. Ce changement est facilité par la diminution des charges en surface des micelles suite à la libération du CMP. La perte de ce segment réduit le potentiel zeta de la micelle d'environ 30 à 50 % et diminue les interactions de nature entropique (stérique), ce qui permet un rapprochement des micelles attaquées par l'enzyme et facilite l'agrégation. Cette fraction hydrophobe forme un coagulum de micelles sous forme de gel de paracaseïne par floculation et agrégation (Amiot et al., 2002).
- **Phase de formation du gel** : la troisième phase conduit à la formation d'un réseau tridimensionnel continu nommé gel ou coagulum. Les agrégats augmentent d'abord de taille. Par la suite, la réticulation entre les chaînes et la fusion des particules transforment le lait en gel (Ruettimann and Ladisch, 1987), cette phase marque le début de la formation du caillé. Il existe divers types de présures non issus des sucs gastriques d'animaux. Des présures végétales, extraites de plantes comme le gaillet, l'artichaut, le charbon, les ficines, et d'autres tel que le latex extraite du figuier, la papaïne extraite du papayer et la bromélaïne extraite de l'ananas (Ramet, 1985), ou encore d'origine

microbienne (la protéase de *Bacillus cereus*, de *Bacillus subtilis*, et la protéase de *Cryphonecteriaparasitica*) (Rao et al., 1998).

1.4.3. Egouttage

L'égouttage est une étape de concentration de certains constituants du gel par un phénomène physique de rétraction (synérèse) et l'évacuation passive du lactosérum liée à la porosité et la perméabilité du gel (Walstra et al., 1985). En effet, l'égouttage consiste à l'élimination progressive du lactosérum (par synérèse) qui s'accompagne d'une rétraction et d'un durcissement corrélatif du gel, ce qui aboutit à la formation d'un caillé dont l'extrait est plus ou moins élevé qui correspond au fromage formé (Brule and Lenoir, 1990). Ce phénomène est expliqué par l'effet conjugué de la présure, de l'acidité et de la température, les liaisons moléculaires qui se créent entre les caséines et les minéraux provoquent une contraction du réseau qui expulse l'eau et les solutés (protéines sériques, minéraux solubles, lactose, composés azotés non protéiques). Le caillé peut subir différentes actions mécaniques qui accélèrent le phénomène (brassage, tranchage, broyage, pressage) et donnent un grain et une composition chimique de caillé final variables selon le type de procédé (Abbas, 2012).

1.4.4. Salage

L'importance primordiale du salage est liée d'une part à son rôle sensoriel en donnant une saveur marquée au produit et d'autre part à son rôle technologique en complétant l'égouttage et en limitant l'acidification et la déminéralisation. L'ajout de sel (Na Cl) permet également la sélection de la flore d'affinage (Hardy and Scher, 1997). Le salage se fait à l'aide de sel fin ou de gros sel par saupoudrage, immersion en saumure ou par salage direct du caillé.

1.4.5. Affinage

L'affinage est une étape clé pour le développement des qualités spécifiques de chaque fromage. Tous les types de fromages à l'exception des fromages frais subissent une maturation biologique plus ou moins prononcée. L'affinage est une phase de digestion enzymatique des composés protéiques et lipidiques du caillé égoutté (Romain et al., 2008). Cette digestion est sous l'action d'enzymes de diverses origines, le caillé est fermenté, hydrolysé, transformé en une pâte d'aspect, de texture, de saveur et d'arôme complètement modifiés. Cette étape dépend de la composition et de la structure du caillé, de la durée d'affinage, de la composition de la flore interne et de surface ainsi que du contexte environnementale de la cave : aération, humidité, température, microbisme de la cave, cave contrôlée ou naturelle... (Herbet, 1999). L'affinage est complexe et difficile à contrôler (Abbas, 2012).

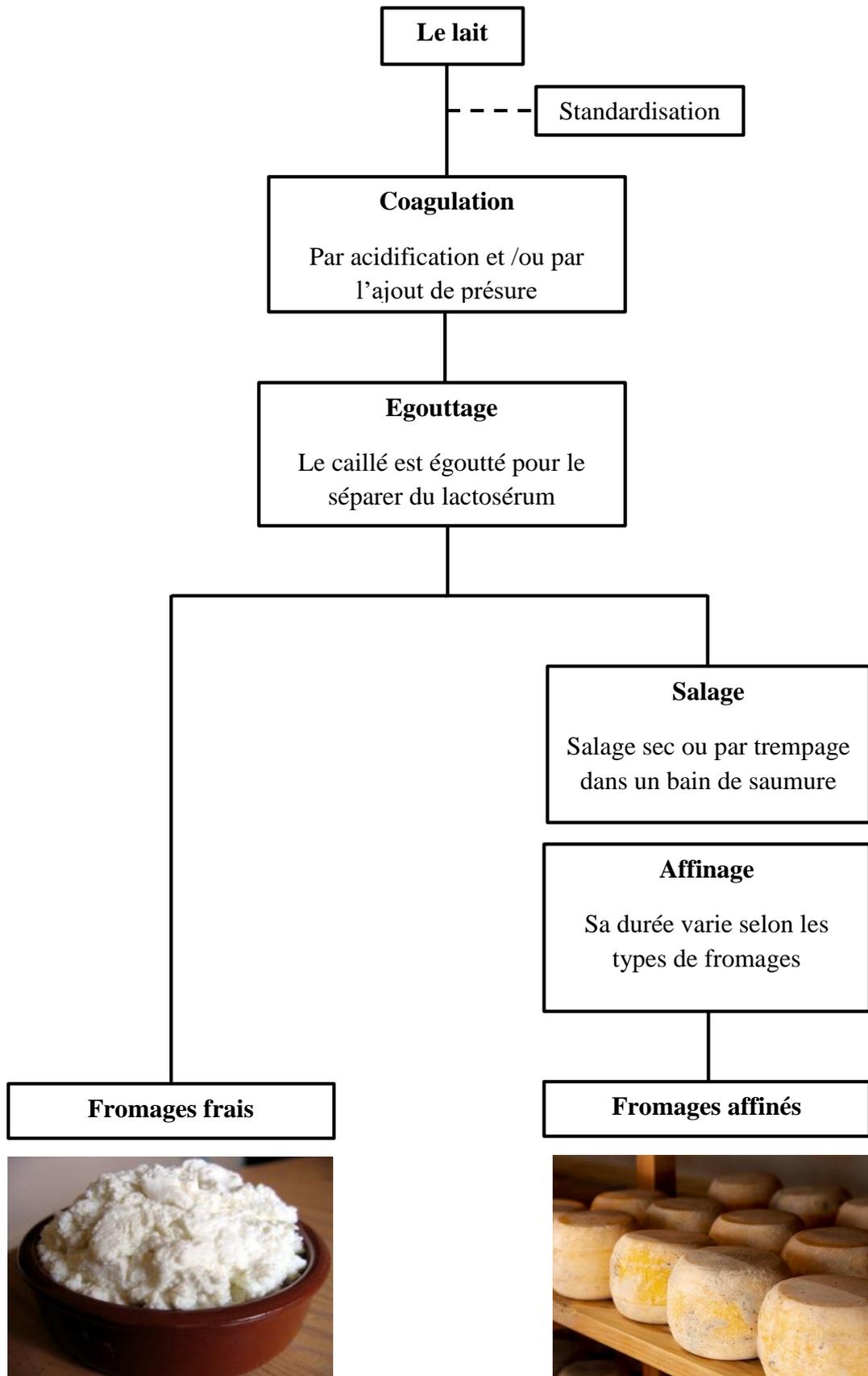


Figure 2. Résumées des Principales étapes de la fabrication fromagère (dressée par nos soins à partir de la littérature)

1.5. Classification des fromages

Il existe plus de 1000 variétés de fromage, certaines variétés sont consommées immédiatement après leur fabrication sous forme de fromage frais, la plupart subissent une période ultérieure de vieillissement ou d'affinage, allant de quelques semaines à plusieurs années selon la variété (**Kindstedt, 2014**). Cette diversité des différentes variétés des fromages engendre des difficultés de classification et de caractérisation des fromages. Les systèmes de classification classiques des fromages sont basés exclusivement sur l'un des critères suivants : les propriétés texturales (fermeté), type de lait, méthode de coagulation, température de cuisson, composition du fromage et composition des agents de maturation (**Almena-Aliste and Mietton, 2014**). Cependant, peu de modèles de classification sont basés sur des approches intégrales qui montrent une image plus précise de la diversité des fromages, et de la différenciation entre les nombreuses variétés. En outre, une évaluation internationale des systèmes de classification par famille indique également deux approches principales mais différentes, qui peuvent dans certains cas être source de confusion. L'approche « européenne » (utilisée principalement en France et en Europe du Sud) utilise les processus technologiques comme critères de classification. Tandis que la classification des « anglo-saxon » est basée sur la texture (**Almena-Aliste and Mietton, 2014**). La classification proposée par **Lenoir et al. (1985)** (figure 3) montre comment la diversité des fromages français est due principalement à des différences dans trois étapes de fabrication des fromages à savoir : la coagulation, l'égouttage et la maturation. Ces étapes définissent le type de technologie et les principales caractéristiques chimiques de chaque variété du fromage.

Ces trois traitements clés définie la base de la diversité et de la différenciation des fromages. Par exemple, le type de coagulation utilisé pour coaguler le lait façonne les caractéristiques du gel en termes de structure, de fermeté et de cohésion. Dans le cas de la coagulation par voie enzymatique, pour évacuer l'humidité du gel qui en résulte, des techniques spécifiques peuvent inclure des actions mécaniques comme la coupe et l'agitation des caillés..., ainsi l'application de la chaleur peut contribuer à l'expulsion de plus d'eau des caillés. Les fromages frais issus de ces étapes sont plus ou moins humides. Les niveaux d'humidité et de minéralisation affectent la taille du fromage et la durée de vie des produits. Quand la teneur en calcium est plus élevée que l'humidité, Les fromages ont de grand format et peuvent être consommée pendant plusieurs mois, voire des années

En revanche, les caillés résultants de l'acidification de lait ont des niveaux d'humidité élevés (plus de 70 % d'eau) et une structure très déminéralisée (seulement 0,2 à 0,5 % de calcium), sont principalement consommées fraîches (**Almena-Aliste and Mietton, 2014**).

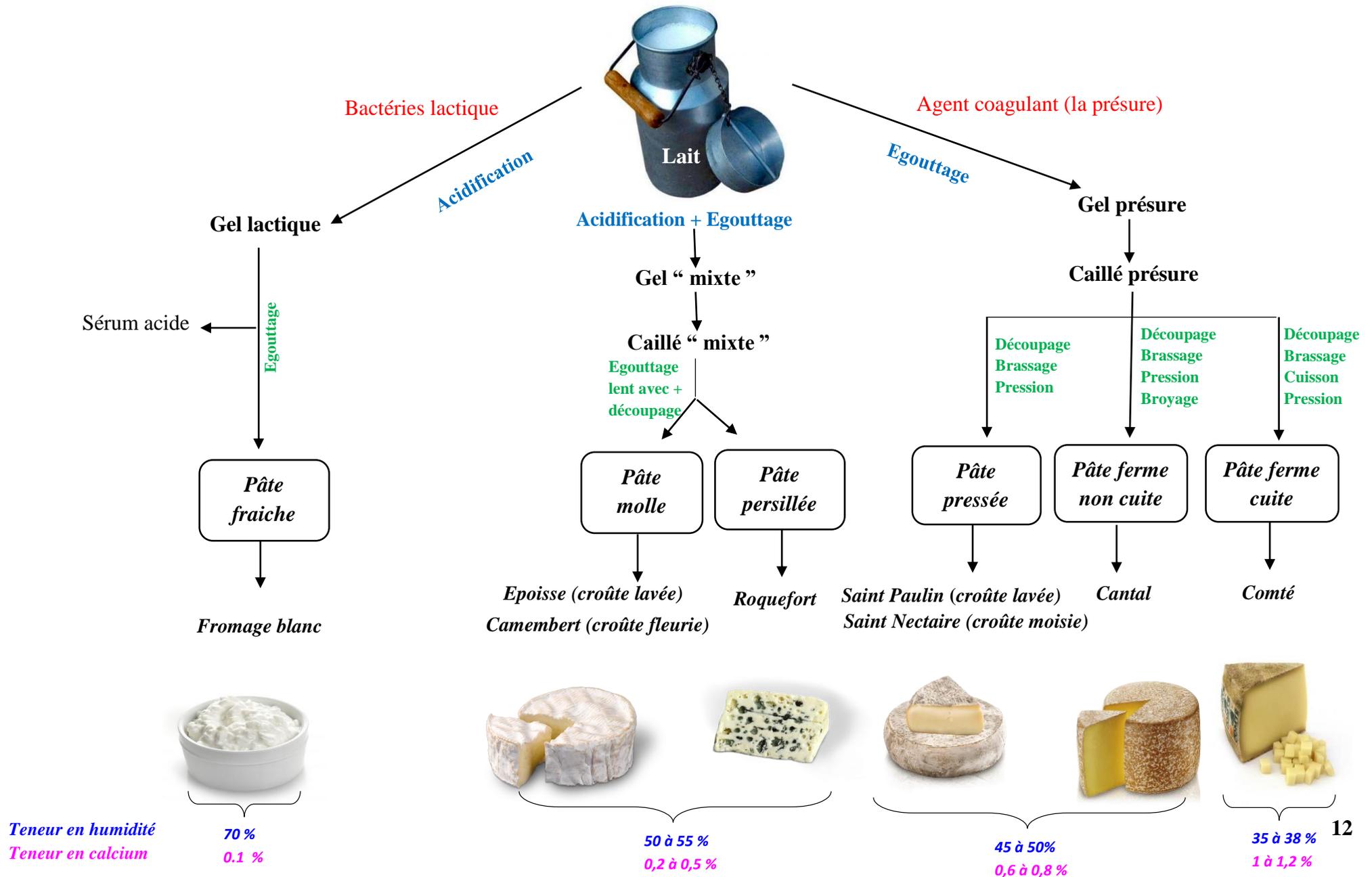


Figure 3. Classification des fromages (Lenoir et al., 1985)

*Chapitre 02 : Rhéologie et
texture du fromage*

2.1. Définition

La rhéologie est définie comme la science de la déformation et de l'écoulement de la matière. Le terme provient du mot grec « rheos » qui signifie « couler ». Le nom a été inventé en 1920 par Eugene C. Bingham, professeur au College La fayette (**Steffe, 1996**). L'objet de la rhéologie est de déterminer les contraintes et les déformations en chaque point d'un milieu (**Zhu et al., 2007**). La rhéologie est applicable à tous les types de matériaux, des gaz aux solides. En science alimentaire, la rhéologie est utilisée pour définir la cohérence des différents produits basés sur la viscosité (épaisseur, manque de glissement) et l'élasticité (adhérence, structure). Par conséquent, dans les applications pratiques, la rhéologie désigne la mesure de viscosité, caractérisation du comportement d'écoulement et détermination de la structure des matériaux. Il existe de nombreux domaines où des données rhéologiques sont nécessaires dans l'industrie fromagère. Ces domaines ont été résumés dans le tableau 1.

2.2. Concept et terminologie de base

La rhéologie traite la relation entre la contrainte, la déformation et le temps (**Blair et al., 1947**). En utilisant la déformation et la contrainte, les rhéologues sont en mesure d'obtenir de véritables propriétés des matériaux indépendamment de la taille et de la géométrie des échantillons, et de comparer les résultats des tests pour des échantillons de différentes tailles et géométries. Les concepts sont décrits dans le tableau 2 (**Gunasekaran and Ak, 2000**).

2.3. Types et modèles rhéologiques de base

Pour qu'un liquide visqueux pur puisse s'écouler, il faut fournir de l'énergie ; cette dernière est intégralement dissipée sous forme de chaleur. Au contraire, un solide élastique idéal conserve tout le travail qui lui a été fourni au cours de la déformation, ce qui permet le retour instantané à l'état initial après suppression de la sollicitation. Les milieux viscoélastiques, qui peuvent être solide ou liquides, présentent de ce point de vue des caractéristiques intermédiaires (**Scher, 2006**). Ainsi, en termes physiques, le fromage est un matériau viscoélastique solide. Un matériau, comme le fromage, est considéré viscoélastique si pendant (et après) une partie de la déformation, l'énergie mécanique qui lui est fournie est stockée dans le matériau (partie élastique) et une partie est dissipée (partie visqueuse) (**Steffe, 1996**). Le rapport entre l'énergie dissipée et l'énergie stockée dépend sur l'échelle de temps de la déformation et la conséquence est que la réponse matérielle dépend du temps. De plus, la dissipation d'énergie peut entraîner (en partie) la déformation qui doit être durable ou permanente.

Tableau 1. Les applications de la rhéologie dans l'industrie fromagère

Domaine le plus important	Application dans l'industrie fromagère	Références
Génie des procédés calculs impliquant des équipements tels que : les pompes, mélangeurs, échangeurs de chaleur, homogénéisateurs, et viscosimètres	Quantification du temps réel d'écoulement rhéologique en ligne.	(Wiklund et al., 2007)
Déterminer la fonctionnalité d'ingrédient dans le produit développement	Les effets du calcium sur la rhéologie du fromage est important. Un rhéomètre à contrainte contrôlée a montré l'effet du calcium sur la rhéologie.	(Solorza and Bell, 1998)
Contrôle de la qualité intermédiaire ou finale des aliments	Les propriétés rhéologiques du fromage mozzarella étaient déterminées par les différents tests de déformation. Les résultats ont montré que la rhéologie peut être utilisée comme outil de contrôle de la qualité qui est étroitement corrélée avec la texture globale, et les attributs sensoriels.	(Muliawan and Hatzikiriakos, 2007)
Test de la durée de conservation	La teneur d'eau dans le fromage diminue la dureté et fermeté des fromages, et par conséquent la rhéologie est un indicateur important de la détérioration des fromages.	(Lee et al., 2004)
Évaluation de la texture des aliments à partir des données sensorielles	Évaluation sensorielle et les propriétés rhéologiques des fromages frais sont souvent utilisées pour identifier la texture des fromages.	(Brown et al., 2003)

Tableau 2. Terminologies utilisées en rhéologie

Terminologie	Description	Références
Rhéologie	La rhéologie permet d'étudier la relation entre la contrainte et la déformation (ou l'écoulement) d'un produit.	(Estellé et al., 2013)
Déformation ou écoulement (strain)	Lorsqu'un matériau est soumis à une force externe, les points individuels du corps se déplaceront par rapport à un autre provoquant un changement dans la taille et la forme du Matériel. Ainsi, la déformation est la mesure de un tel changement de taille et de forme.	(Muthukumarapan and Swamy, 2017)
Contrainte (stress)	La contrainte est définie comme la force par unité de surface sur laquelle la force est appliquée ($\tau = F/S$). Ainsi, l'unité de contrainte dans le système SI est Pa (= N / m ²). Deux types de contraintes peuvent agir sur une surface : contrainte normale et contrainte de cisaillement. La contrainte normale est perpendiculaire à la surface, alors que la contrainte de cisaillement agit parallèle à la surface.	(Muthukumarapan and Swamy, 2017)
Taux de déformation	Le concept de taux de déformation est nécessaire pour décrire le comportement d'écoulement des matériaux. Dans les situations de flux, depuis que la déformation atteindra de très grandes valeurs avec le temps croissant, il est préférable de discuter du comportement matériel en termes de le taux de déformation plutôt que la déformation.	(Muthukumarapan and Swamy, 2017)

Module d'Young (Young's modulus)	C'est une mesure de la résistance du matériau à déformation axial. Il représente la rigidité du matériau à une charge appliquée. Plus la rigidité est grande, plus la force ou la contrainte nécessaire pour provoquer une déformation ou une contrainte donnée est élevée.	(Muthukumarap pan and Swamy, 2017)
Limite proportionnelle	C'est la contrainte la plus élevée à laquelle la contrainte est directement proportionnelle à la déformation. La limite proportionnelle marque également le début de la non-linéarité dans la courbe contrainte-déformation	(Muthukumarap pan and Swamy, 2017)
Limite élastique	C'est la contrainte maximale que le matériau peut supporter sans aucune déformation stable mesurable à la libération complète de la charge. Ainsi, le matériau sera revenir à sa forme/taille d'origine lorsque la contrainte est supprimée.	(Muthukumarap pan and Swamy, 2017)
Seuil de rendement (yield point)	Une légère augmentation de la contrainte au-dessus de la limite élastique entraîne une augmentation relativement importante de la déformation. L'échantillon est perpétuellement malformé même si la charge est réduite à zéro. Ce rendement est désigné comme la contrainte de rendement	(Muthukumarap pan and Swamy, 2017)
Résilience	C'est la quantité d'énergie absorbée par un matériau dans la phase élastique.	(Muthukumarap pan and Swamy, 2017)

τ : contrainte ; F : force de contact ; S : surface de contact

Le caractère viscoélastique est un comportement non-Newtonien très important et très fréquent dans les solutions. Les propriétés viscoélastiques des aliments peuvent être déterminées par la dynamique d'oscillation de faible amplitude ou cisaillement oscillatoire pour mesurer l'élastique ou module de stockage (module d'élasticité) (G'), module visqueux ou de perte (G''), module complexe ou le module de cisaillement complexe (G^*), et tangente de perte ($\tan \delta$), qui est le rapport de module visqueux aux modules élastique (G''/G'). G' représente la partie réelle de G^* . C'est le module de conservation et il caractérise la réponse en phase avec la déformation. Il est associé à la réponse élastique. G'' , est la partie imaginaire de G^* , c'est le module de perte. Il caractérise la réponse visqueuse.

2.3.1. Liquide viscoélastique

Un liquide viscoélastique conserve une partie de l'énergie mécanique fournie, on parle parfois de fluide à mémoire. Ces liquides cisailés dans l'entrefer d'un viscosimètre à cylindre coaxiaux monte lentement autour de l'axe. Il s'agit de l'effet Weissenberg (**Steffe, 1996**). Le liquide viscoélastique peut être modélisé mécaniquement par l'association en série d'un ressort (solide de Hooke) et d'un amortisseur à liquide (fluide newtonien) constituant ainsi ce qu'on appelle « corps de Maxwell ». Lorsque ce corps subit une contrainte, ces deux éléments subissent la même contrainte, et elle est égale à la contrainte globale. Par contre la déformation totale étant la somme des deux déformations élémentaires. Une fois la contrainte s'annule, la déformation du ressort disparaît immédiatement, car l'élasticité du composant Hookien est parfaite. Cependant même une faible contrainte de cisaillement entraîne en définitive un écoulement ; sous cet aspect le corps de Maxwell, qui traduit assez bien le comportement rhéologique de la crème, est un liquide plutôt qu'un solide (**Cheftel and Cheftel, 1977**). Le comportement viscoélastique peut être représenté par d'autres modèles mécaniques plus complexes tels que le modèle de Burger. Ce dernier présente une bonne corrélation avec le comportement des gels d'amidon, ainsi il décrit bien la déformation de certains fromages telle que le Camembert et le Saint paulin (**Hardy and Scher, 1997**). Le modèle de Maxwell fait intervenir deux composants parfaits. Dans le cas réel, le comportement des matériaux est différent. En effet, cinq phases spécifiques ont été identifiées (**Ponche, 2003**) (figure4).

- **Phase visqueuse ou terminale**

L'écoulement est visqueux ($G' < G''$). Tous les matériaux possèdent cette zone. Son apparition dépend du rhéomètre qui peut la détecter ou non, puisque les fréquences dans cette région sont très faibles.

▪ **Phase de transition d'écoulement :**

Elle est nommée ainsi car dans cette zone, les deux modules sont du même ordre de grandeur. Le point d'intersection des deux modules ($G' = G''$) apparaît souvent et dans le cas du modèle de Maxwell.

▪ **Phase du plateau ou la zone caoutchoutique**

Dans cette phase, le comportement élastique domine. Cette zone est marquée par un plateau de G' , avec une légère augmentation avec la fréquence. Le module de perte G'' est toujours inférieur à G' .

▪ **Phase supérieure**

C'est la phase du deuxième point de croisement entre les deux modules ($G' = G''$). La deuxième fréquence critique définit un deuxième temps de relaxation. A ce stade et aux fréquences élevées, G'' est supérieur à G' .

▪ **Phase vitreuse**

Cette zone est caractérisée par une augmentation rapide du module de perte G'' qui devient dominant par rapport au module de conservation G' .

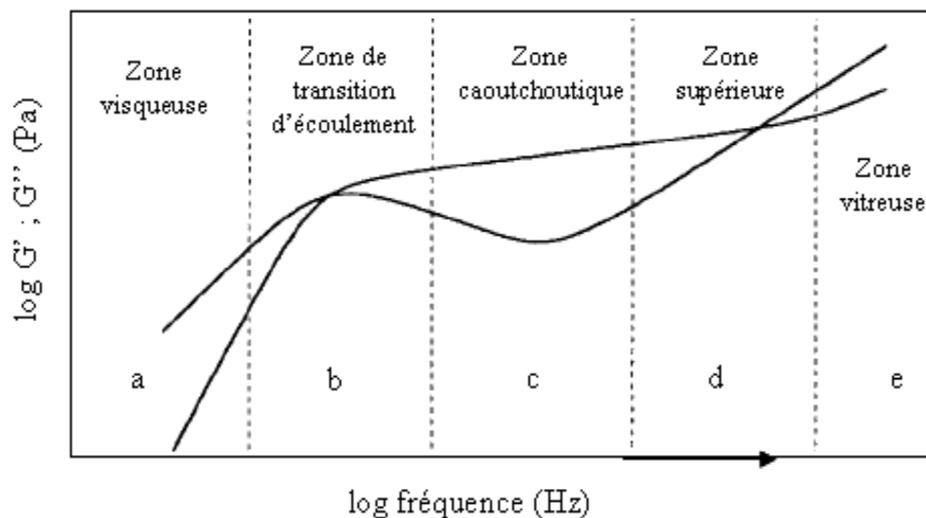


Figure 4. Les différentes régions du spectre viscoélastique des fluides non-Newtoniens (Ponche, 2003)

2.3.2. Solide viscoélastique

Un solide viscoélastique dissipe, sous forme de chaleur, une partie de l'énergie mécanique fournie, ce qui correspond à l'existence d'une « viscosité interne ». C'est ainsi, par exemple, que la réalisation d'un cycle de compression avec retour à la position initiale conduira à la formation d'une boucle d'hystérésis force-déplacement. Les pentes initiales des courbes force-déplacement, et donc les valeurs de module d'Young que l'on peut déduire, augmentent lorsque

la vitesse de compression croît (**Scher, 2006**). La représentation mécanique de base d'un solide viscoélastique est appelé modèle de Kelvin-Voigt. Ce modèle consiste à additionner les contraintes d'origine élastique et les contraintes d'origine visqueuse. Le comportement des systèmes réels peut être schématisé à l'aide de deux modèles : le modèle de Maxwell aux basses fréquences et le modèle de Kelvin-Voigt aux fréquences plus élevées (**Barnes, 2000**). Dans la zone intermédiaire, le comportement élastique prédomine et G' présente un plateau, alors que G'' présente un minimum (figure 5).

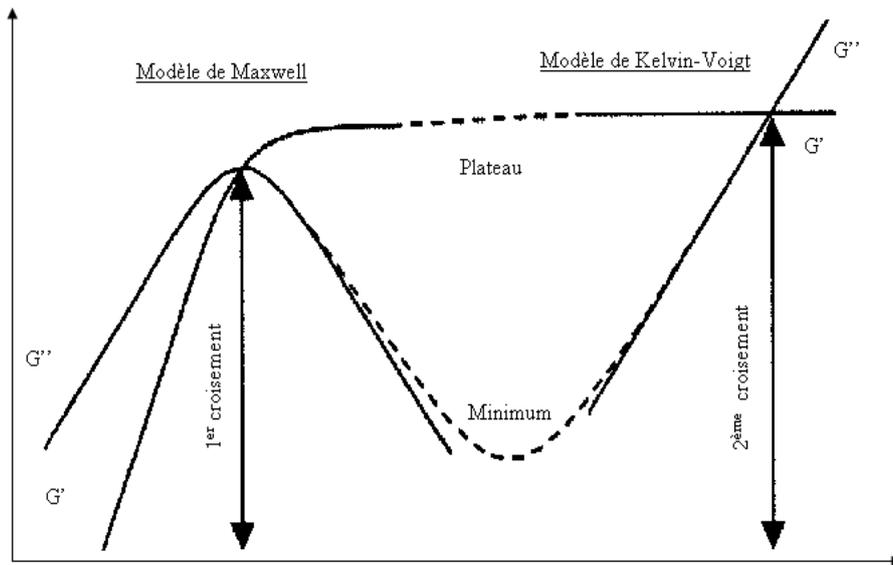


Figure 5. G' et G'' aux basses et hautes fréquences, représentés par les modèles de Maxwell et Kelvin-Voigt, d'après (**Barnes, 2000**)

*Chapitre 03 : Facteurs de la
variation des propriétés
fonctionnelles des fromages*

3.1. La fonctionnalité alimentaire

Souvent l'alimentation est considérée par l'homme comme assurant la couverture des différents besoins physiologiques comme le besoin d'entretien, de maintien de croissance etc., c'est la valeur nutritionnelle des aliments. A cette valeur s'ajoute le sentiment de satisfaction et de bien être qu'elle procure aux consommateurs, constituant un élément tout aussi fondamental qui est la valeur sensorielle de l'aliment. Néanmoins, les recherches scientifiques récentes montrent que les aliments peuvent jouer un rôle bénéfique ou nocif sur la santé humaine, c'est la valeur fonctionnelle de l'aliment (**Hyardin, 2008**).

Au milieu des années 1980, le Japon a été le premier pays qui a adopté le concept d'un aliment fonctionnel (**Arihara, 2004**). Le terme "fonctionnal food" correspond alors à une denrée que l'on ajoute un ingrédient pour lui donner une dimension supplémentaire ce qui favorise les fonctions de l'organisme (**Abbas, 2012**). Aujourd'hui, il n'y a toujours pas de définition légale de la fonctionnalité alimentaire qui est pourtant son utilisation très courante.

Un aliment fonctionnel contient une multitude de composants classifiés ou non comme nutriments qui peuvent remplir différentes fonctions, c'est pour cela qu'il n'existe pas de définition simple et universelle de l'aliment fonctionnel. Selon (**Diplock et al., 1999**), l'aliment fonctionnel est avant tout un concept centré d'avantage sur les fonctions à moduler que sur les produits à développer. C'est avant tout un aliment qui est destiné à une utilisation particulière, il ressemble à un aliment traditionnel consommé dans un cadre de nourriture habituelle. Depuis les années quatre-vingt-dix, de nombreux travaux ont été menés sur l'intérêt et la définition de l'aliment fonctionnel « qui peut fournir un bénéfice pour la santé au-delà de ceux dépendant des nutriments traditionnels qu'il contient » (**Thomas and Martin, 1994**). En effet, la fonctionnalité d'un aliment est considérée comme la capacité d'un aliment à influencer les fonctions de l'organisme (bien être et santé), pour moduler l'activité. La fonctionnalité alimentaire est un terme très large, avec plusieurs domaines comme : les fonctions sensorielles (fonctions gustatives, d'appétence...), nutritionnelles mais aussi technologiques (thermo fonctionnalité, aptitude culinaire...), cette dernière étant très souvent liées aux fonctions sensorielles perçues par le consommateur (**Abbas, 2012**).

3.2. Les principales fonctionnalités des fromages utilisés comme ingrédients

Le secteur fromager se développe actuellement dans l'industrie alimentaire par l'utilisation des fromages sous forme d'ingrédient dans des préparations culinaires chaudes ou froides. De ce fait, certaines propriétés fonctionnelles des fromages sont particulièrement

recherchées pour répondre aux contraintes industrielles et pour satisfaire le consommateur (Abbas, 2012).

Les principales propriétés fonctionnelles des fromages ont été résumées par (Guinee, 2002) selon 3 catégories : (i) les propriétés rhéologiques des fromages à froid (caractéristique de rupture) ; (ii) les propriétés culinaires (fluidité), (iii) les propriétés liées au pouvoir aromatisant.

Ce que nous intéresse dans cette étude c'est les propriétés fonctionnelles des fromages à froid et à chaud. Les propriétés rhéologiques des fromages à froid permettent les actions suivantes : découper, trancher, râper, étaler, effriter pour des usages tels que le portionnage, les sauces froides, la sandwicherie, les salades traiteur. Ce sont des aptitudes qui sont liées aux propriétés d'élasticité, de fermeté, d'adhésivité et de friabilité, la croustillance, la tranchabilité, et la tartinabilité des fromages (tableaux 3 et 4). Les propriétés culinaires correspondent à des thermo-fonctionnalités recherchées dans le cas d'utilisation des fromages à chaud. Ces aptitudes sont liées aux propriétés entre autre de coulant, fondant, nappant, filant (l'aptitude à former des fils), gratinant recherchées pour des usages tels que les sauces chaudes, les pizzas (Guinee *et al.*, 1999).

3.2.1. Les propriétés rhéologiques des fromages à froid

Il existe au moins 1000 variétés de fromages naturels différents. Ce sont généralement consommé comme fromage de table, qui peut être arbitrairement défini comme fromage consommé seul ou en accompagnement de pain lors d'un repas. Un grand nombre de ces fromages ont longtemps été utilisés comme ingrédients dans la préparation de plats culinaires plats à la maison, exemples notables comme les sandwichs grillés, quiche, omelettes, pâtes, pizza et lasagnes. Dans ces applications, le fromage confère des fonctionnalités qui contribuent à la préparation et aux propriétés sensorielles de la nourriture dans laquelle ils sont inclus (Fox *et al.*, 2017). Quelques caractéristiques fonctionnelles du fromage non chauffé et les différents niveaux associés de mesures rhéologiques ont été résumés dans le tableau 3.

Tableau 3. Fonctionnalités des fromages à froid et ses propriétés rhéologiques relatives (Fox *et al.*, 2017; Guinee, 2002)

Caractéristiques fonctionnelles	Description	Type du fromage ayant la propriété	Application	Propriété rhéologique relatives	Grandes caractéristiques de déformation
Tranchabilité	L'aptitude d'un fromage à se : - Couper en tranches minces sans casser, émietter ou coller à l'outil de coupe. - Couper pour résister à la rupture ou à la fracture des bords - Couper pour subir un haut niveau de flexion avant de casser - Couper pour résister à l'assèchement et au frisage aux extrémités en cas d'exposition modérée à l'atmosphère	Gouda, cheddar, et certains produits analogues du fromage (ACPs)	Tranches pour la vente au détail et le service alimentaire	Grande élasticité, longévité, Extensibilité	Contrainte de rupture (ϵ_f) élevée, force de déformation (σ_{max}) moyenne à élevée
	- L'aptitude du fromage à se fracturer facilement en petites particules dures qui peuvent résister à l'écrasement, à la fluidisation et à présenter un flux libre	Fromage dure et cassant comme le parmesan et fromage de type Romano	Fromage séché (poudre)	Fragile, élastique, fracturable, ferme, possède une faible tendance à coller	-Force de fracture (σ_f) élevée, contrainte de rupture (ϵ_f) faible -Force de déformation (σ_{max}) élevée

Tartinabilité	L'aptitude du fromage de se propager facilement lorsqu'il est soumis à une contrainte	Camembert, certains fromages à la crème, fromage fondu à tartiner, certains ACPs	Fromage à tartiner	Long, plastique, fracturable, doux, adhésif	<ul style="list-style-type: none"> - Contrainte de rupture élevée (ϵ_f) - Force de fracture (σ_f) très faible - Force de déformation (σ_{max}) très faible
Friabilité	L'aptitude du fromage à se fracturer facilement en petits morceaux de forme irrégulière lorsqu'il est frotté entre les doigts	Feta, Blue, Stilton, cheshire	Salades, crêpes au fromage, garnitures de soupe	Fromage semi-doux et cassant qui se brise en morceaux de forme irrégulière	<ul style="list-style-type: none"> - Contrainte de rupture (ϵ_f) faible - Force de fracture (σ_f) moyennement faible - Force de déformation (σ_{max}) moyennement faible

Produits analogues du fromage = analogue Cheese products ACPs

3.2.2. Les propriétés rhéologiques des fromages à chaud

Les fonctionnalités des fromages à chaud ont été abondamment étudiées depuis les années quatre-vingt-dix essentiellement en utilisant la Mozzarella puis le Cheddar comme modèles d'étude (**Fife et al., 1996; Guinee, 2002; Abbas, 2012**) Les caractéristiques fonctionnelles des fromages recherchées par les industriels et appréciées par les consommateurs sont donc : le coulant, le fondant, le nappant, le filant, le gratinant.

3.2.2.1. Etalement (couvrant, nappant, fondant) : les trois termes couvrant, nappant et fondant désignent un même phénomène : l'aptitude du fromage à fondre sous l'action de la chaleur de façon uniforme et homogène et à recouvrir le support (aliment, assiette) (**Reparet, 2000**). De même, un fromage ayant un faible taux de matières grasses tendra à être plus dur et moins fondant qu'un autre plus gras (**Fife et al., 1996**). Les fromages ayant un taux d'humidité élevé sont plus nappant, plus coulants que les autres fromages. Le rapport calcium libre/lié aux protéines et donc la proportion de calcium insoluble associé aux caséines interfère également sur la qualité du fondant et la capacité d'étalement des fromages à chaud (**Lucey, 2008**). La facilité d'écoulement des fromages augmente avec le temps d'affinage du à la protéolyse et la perte de calcium insoluble. La fonte proprement dite des fromages est due à une réduction de la force d'interactions des caséines avec l'augmentation de la température et la contraction du réseau (**Guinee et al., 1999**).

3.2.2.2. L'exsudation de matière grasse : ce terme représente la matière grasse qui exsude du fromage lorsqu'il est chauffé. Cette matière grasse exsudée joue un rôle lubrifiant pour le fromage à chaud et facilite l'étalement. Elle joue également un rôle protecteur lors de la cuisson en limitant notamment le gratinage (**Abbas, 2012**).

3.2.2.3. Filant : ce terme représente l'aptitude du fromage à former des fils sous l'action d'une force et de la chaleur (**Kindstedt and Fox, 1993**). La qualité du filant est importante puisque la plupart des consommateurs ne souhaite pas des fils trop longs. La longueur, la tension et le type de fil correspondent à des qualités attribuées au fromage qui sont détériorées avec le vieillissement de celui-ci. Le filant est une caractéristique de la Mozzarella (**Abbas, 2012**).

3.2.2.4. Gratinant : durant le traitement thermique, la couleur de certains fromages augmente. Cette coloration est due aux réactions de Maillard entre les sucres résiduels (ex lactose) et certains acides aminés (fonction NH₂ libre). La coloration peut aller du jaune brun au noir selon la sévérité du traitement thermique, de la concentration en sucre disponible et du type de four utilisé (**Abbas, 2012**).

Tableau 4. Exigences fonctionnelles du fromage à chaud et la variation de la fonctionnalité des fromages utilisés comme ingrédient (Fox *et al.*, 2017)

Type de propriétés	Description	Type du fromage ayant la propriété	Application/Utilisation
Aptitude à fondre	Capacité du fromage de ramollir en chauffant	<ul style="list-style-type: none"> - La plupart des fromages (p. ex., cheddar, gouda, emmental, mozzarella, etc.) après une période d'entreposage donnée, à l'exception des fromages à faible teneur en matière grasse et au lait écrémé et de certains fromages frais à pâte acide. - La plupart des fromages fondus et analogues 	La plupart des applications
Résistance à l'écoulement	Capacité du fromage à résister à l'écoulement ou à tartiner, et à conserver sa forme et ses dimensions d'origine au chauffage	<p>Fromages à base d'ingrédients de présure personnalisés :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Avec un niveau élevé de protéines de lactosérum (p. ex : du lait traité à haute température, surtout s'il est fortifié avec des protéines de lactosérum avant le traitement thermique) - Avec une teneur élevée en protéines intactes - Du lait homogénéisé - Certains fromages frais coagulés à l'acide et à la chaleur acide, en particulier ceux qui ont une teneur élevée en protéines de lactosérum, un faible pH et une faible teneur en matières grasses. - Certains produits de fromage fondu et analogues, en particulier ceux qui ont une teneur élevée en protéines de lactosérum, un rapport calcium-caséine élevé, un rapport protéines-matières grasses élevé, une teneur élevée en protéines et un haut degré d'émulsification des graisses 	Fromage frit, bâtonnets de fromage frit, fromage pour kebabs et dans les burgers

Extensibilité/ Etalement	Aptitude du fromage à chaud à former des fils et/ou des feuilles lorsqu'il est étendu	Fromages soumis au processus de <i>pasta filata</i> au cours de la fabrication (p. ex., Mozzarella) ou à d'autres processus de texturation propices à la formation de fibre de caséine, comme le cheddar (p. ex cheddar à forte teneur en caséine intacte, >90 %) ou extrusion à température élevée (p. ex., fromage à cordes).	Pizza
Huilage (surface brillante)	Aptitude du fromage à exprimer un niveau modéré d'huile libre au chauffage, à donner brillance à la masse de fromage fondu	<p>- La plupart des fromages naturels (à condition qu'ils ne soient pas trop matures, lorsqu'ils sont huilés peuvent devenir excessifs). Les fromages pauvres en acides gras font exception, surtout s'ils sont préparés à partir de lait homogénéisé.</p> <p>- De nombreux fromages transformés et analogues (à condition que le degré d'émulsification des graisses ne soit pas trop élevé ou trop faible, où le niveau d'huilage est insuffisant ou excessif).</p>	La plupart des applications, gratins, les omelettes et la pizza
Fluidité	<p>- Capacité du fromage d'atteindre la fluidité désirée au chauffage, et de ne pas se congeler trop rapidement au refroidissement.</p> <p>- Correspond positivement à la fluidité et à l'ampleur de la tangente de perte.</p>	La plupart des fromages naturels ont tendance à devenir plus fluides pendant la maturation, proportionnellement au degré de protéolyse.	Selon l'application, la fluidité requise peut être très variée dans les gratins à modérée sur la pizza, très faible dans les applications résistantes à écoulement comme les frites bâtonnets de fromage pané.

3.3. Les facteurs de la variation des propriétés fonctionnelles des fromages

Il existe diverse facteurs qui influe sur la fonctionnalité des fromages qui vont de la matière première aux paramètres de post-transformation, ces facteurs sont présentés dans la figure 6.

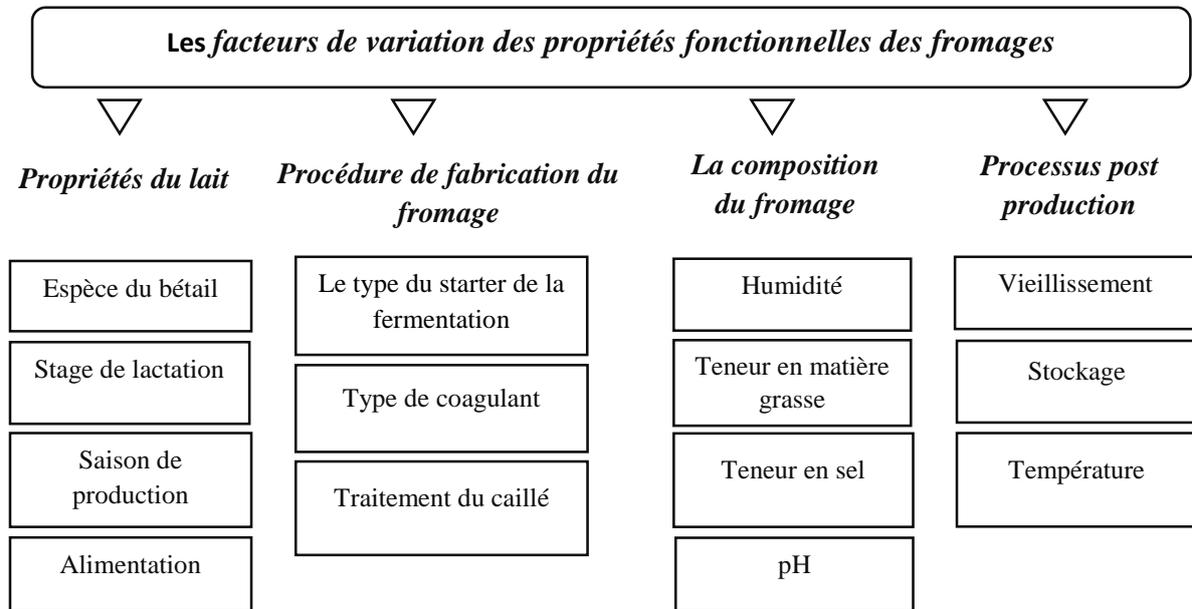


Figure 6. Facteurs de variation la fonctionnalité du fromage (Muthukumarappan and Swamy, 2017)

3.3.1. Propriétés du lait

Le lait représente la matière première de la fabrication du fromage, la composition chimique du lait à savoir : la teneur en matière grasse et protéique est variable, elles se diffèrent selon l'espèce du bétail (vache, chèvre et brebis) (tableau 5). Ainsi, le stage de lactation, la saison de production et le type de rationnement/alimentation, cette composition a un effet direct sur les propriétés fonctionnelles du fromage. La saison a effet important sur la composition du lait en matière utiles (protéines et graisses). La teneur du lait en matières grasses est minimale à la fin du printemps et maximale en automne. Cependant, la teneur en protéines est plus basse en été et plus élevée en hiver (Masson *et al.*, 1978; Hebert, 2010). Au début de lactation, la teneur du lait en matières grasses et protéiques sont maximales, minimales durant le 2^{ème} ou 3^{ème} mois, et puis s'accroissent jusqu'à la fin de la lactation, inversement à la quantité de lait produite (Coulon *et al.*, 1991). Les rations alimentaires à forts apports énergétiques permettent une production laitière élevée avec des taux protéiques très élevés (Sutton, 1989; Coulon *et al.*, 1991).

Tableau 5. Teneur moyenne en matières grasses et protéiques des vaches, chèvres et brebis
(Hebert, 2010)

Espèces	Teneur en matière grasse	Teneur en protéine	Teneur en caséines
Vache	35 à 40 g/l	30 à 35 g/l	27 à 30 g/l
Chèvre	40 à 45 g/l	35 à 40 g/l	30 à 35 g/l
Brebis	70 à 75 g/l	55 à 60 g/l	45 à 50 g/l

Selon **Muthukumarappan and Swamy (2017)**, les protéines et la matière grasse du lait jouent un rôle vital dans la fonctionnalité des fromages :

- L'hydrolyse de la caséine α_1 et de la β -caséine affecte les propriétés fonctionnelles pendant la maturation ;

- Le point de fusion de la matière grasse du lait est directement lié à la fonte et à l'étirement du fromage à des températures élevées.

- La normalisation du lait (rapport caséine-matière grasse) est également responsable de la structure du fromage ; autrement dit, le fromage peut être trop mou ou trop dur lorsque le rapport caséine/graisse n'est pas correctement contrôlé.

La capacité tampon du lait est principalement due au phosphate de calcium colloïdal retenue dans le caillé. Selon le pH et la température, environ deux tiers du calcium est colloïdal et le reste est sous forme de solution. La proportion de phosphate de calcium colloïdal et de pH influence l'extensibilité du fromage. Des études ont également montré que les niveaux de calcium et de phosphore diminuent avec la réduction du pH, augmentant ainsi la capacité de fusion (**Muthukumarappan and Swamy, 2017**).

L'homogénéisation du lait réduit la taille des globules gras, les petits globules gras entraînent une augmentation du nombre de globules et de la surface adipeuse comparativement à un fromage ayant la même teneur en matières grasses, mais une taille moyenne des particules plus grandes. Ainsi l'homogénéisation du lait modifie la membrane des globules gras et crée une nouvelle interface graisse-eau contenant principalement des caséines qui peuvent rendre les globules gras plus stables. De plus, le lait homogénéisé peut augmenter le rendement en fromage. Cependant, les effets négatifs de l'homogénéisation (à des pressions élevées de 6,7

MPa) sur le fromage est la réduction de l'étirabilité et une capacité de fusion médiocres (Muthukumarappan and Swamy, 2017; Lucey, 2008).

3.3.2. Procédure de fabrication du fromage

3.3.2.1. Culture de démarrage ou encore « starter »

Le but principal de l'ajout de ferments est la production d'acide, l'activité protéolytique, et l'utilisation de sucres comme le galactose, le glucose et le lactose. Le taux de production d'acide est essentiel, car il peut influencer sur la composition du fromage. L'activité protéolytique de culture starter affecte les propriétés rhéologiques et texturales du fromage par la dégradation lente mais progressive des caséines pendant le stockage. Certaines espèces sont incapables de fermenter le galactose, ce qui contribue au brunissement du fromage pendant la cuisson, tandis que certaines d'autres réduisent l'étendue du brunissement (Muthukumarappan and Swamy, 2017).

3.3.2.2. Type de coagulant

Les coagulants peuvent être des enzymes ou des acides. Il existe quatre types d'enzymes de coagulation qui sont classées selon leur source en : coagulant d'origine animale (présure) coagulant d'origine microbienne (enzymes de *R. miehei* et *C. parasitica*), coagulant d'origine végétale (extraits de *Cynara cardunculus* et de *Calotropis procera*), et la chymosine produite par la fermentation (chymosine pure). Les principaux acides utilisés comme coagulants comprennent l'acide malique, l'acide citrique, l'acide acétique, l'acide chlorhydrique et l'acide phosphorique (Muthukumarappan and Swamy, 2017).

La proportion de présure ajoutée dans le caillé varie selon le type de la présure, la température de cuisson, et le pH à l'égouttage, ces variables devraient être normalisées si le fromage produit est de qualité constante. Il a été suggéré que l'activité de la chymosine dans le caillé est un facteur limitant dans la maturation du fromage, cependant, l'activité excessive de présure conduit à l'amertume (Fox *et al.*, 2017).

Lors de la protéolyse primaire, les caséines se dégradent en peptides suivie de la protéolyse secondaire où les peptides sont fragmentés en peptides plus petits et en acides aminés libres par les enzymes de culture starter. L'acidification directe du lait influence les propriétés fonctionnelles du fromage en fonction du type d'acide utilisé et du pH où la viscosité du fromage diminue avec la diminution du pH (Muthukumarappan and Swamy, 2017) .

3.3.2.3. Traitement du caillé

La température à laquelle le caillé est cuit affecte les propriétés rhéologiques. Une température de cuisson plus élevée réduit la teneur en humidité et réduit le caillé. Il améliore également l'activité métabolique des bactéries dans le caillé, augmentant la production d'acide

lactique et abaissant le pH, la contraction supplémentaire du caillé. Cette action rend le fromage acide, dur, friable et sec (Muthukumarappan and Swamy, 2017). Le caillé qui est salé et pressé pour former le bloc du fromage, ce procédé est également responsable de la texture caractéristique du fromage. Le pressage favorise le paillage des particules de caillé dans une masse contiguë et ferme (fromage cheddar) ou empêche les particules de caillé de paillage de sorte qu'une texture ouverte est apparue (fromage cheshire¹) (Muthukumarappan and Swamy, 2017).

3.3.3. La composition du fromage

3.3.3.1. Taux d'humidité

L'humidité est un constituant important qui représente plus du tiers de la masse de fromage. La teneur en humidité du fromage dépend de divers facteurs tels que la méthode de cuisson, la température et la teneur en sel (Muthukumarappan and Swamy, 2017). Les fromages à haute teneur en humidité sont plus mous, plus lisses et plus souples qu'un fromage similaire qui a une teneur en humidité plus faible, ses capacités de fusion sont élevées; cependant, ils sont peu effilochés (Lucey, 2008; Muthukumarappan and Swamy, 2017).

3.3.3.2. Teneur en matière grasse

Les matières grasses présentes dans le fromage sont des globules libres ou bien contenus dans le réseau de matrice protéique et sont donc considérées comme des « agents de remplissage » qui influent sur les propriétés rhéologiques, fonctionnelles, texturales et sensorielles du fromage. La teneur en matières grasses varie de 20 à 33 % dans les fromages à pâte semi-dure et à pâte dure. La taille moyenne des globules gras varie d'environ 1,5 à 4 µm (Muthukumarappan and Swamy, 2017).

La variation de la taille et la distribution des globules gras ont un effet important sur les propriétés fonctionnelles du fromage dont une teneur plus élevée en matières grasses permet aux fromages de mieux fondre, mais il peut être plus difficile de les déchiqeter. La graisse présente dans la matrice de fromage agit comme un plastifiant et inhibe la formation de liaisons croisées entre les chaînes de caséine. Une réduction d'un tiers des matières grasses entraîne une texture trop ferme du fromage (Johnson and Olson, 1985; Muthukumarappan and Swamy, 2017).

¹ : *Le cheshire, souvent nommé chester en français, est un fromage anglais dense et friable fait avec du lait de vache*

3.3.3.3. Teneur en sel (NaCl)

Le sel peut avoir un effet majeur sur les propriétés du fromage fondu et non fondu en dépit d'être un constituant mineur. Le NaCl est ajouté directement comme dans le cas de fromage cheddar, ou en plaçant le fromage dans la saumure après l'étape de mélange et de moulage, c'est le cas de mozzarella. En plus d'améliorer le goût, le sel contrôle la teneur en humidité, la croissance microbienne et l'acidité.

L'effet du sel sur la fonctionnalité du fromage est également lié aux changements de capacité de liaison avec l'eau. Un faible niveau de sel et une forte teneur en humidité peuvent rendre le fromage pâteux et mal aromatisé. Cependant le fromage dont la teneur en sel est supérieure à 2 % fond mal et est moins filandreux. Une protéolyse insuffisante due à une teneur élevée en sel peut provoquer une texture sèche dans certains cas (**Johnson and Olson, 1985; Muthukumarappan and Swamy, 2017**).

3.3.3.4. pH

Le moindre changement du pH affecte considérablement les propriétés fonctionnelles des fromages. Le caillé résultant de la coagulation du lait, même sans développement acide significatif, n'est pas capable de s'étirer et de fondre en raison de la réticulation excessive de phosphate de calcium des caséines. L'acidification élimine le calcium des particules de caséine, c'est-à-dire le phosphate de calcium colloïdal (PCC), et les rend plus flexible, ce qui est important pour l'étirement. En cas d'acidification excessive, le caillé perd ses caractéristiques de fusion et d'étirement (**Lucey and Fox, 1993**).

3.3.4. Processus post production

3.3.4.1. Vieillessement

Le vieillissement est essentiel pour le développement de la saveur et des fonctionnalités des fromages. La période de maturation va de quelques semaines à 24 mois. L'hydrolyse protéolytique des caséines intactes en peptides et en acides aminés libres est l'une des forces motrices des changements dans les caractéristiques fonctionnelles des fromages pendant le vieillissement. Les enzymes qui contribuent à la protéolyse provenant de plusieurs sources ; Ces dernières sont les suivantes : lait (plasmin), coagulant (présure, chymosine, etc.), culture starter, culture starter secondaire et micro-organismes non déclencheurs. La dégradation des caséines lors de la protéolyse entraîne une réorganisation et un affaiblissement de la matrice protéique et permet la libération des globules graisseux présents dans la matrice, ceux-ci s'agglutinent lorsque le fromage est chauffé, Le fromage mozzarella est considéré comme un fromage non affiné. L'étape de mélange-moulage à haute température au cours de sa fabrication

inactive en partie le coagulant et son brunissement est également affecté par le vieillissement (Muthukumarappan and Swamy, 2017).

3.3.4.2. Stockage et congélation

La congélation du fromage augmente la durée de conservation et préserve la couleur, la saveur et la valeur nutritive. Commercialement, les fromages sont congelés pour arrêter leur maturation et prolonger leur durée de conservation ; cependant, la congélation peut induire des changements physiques et organoleptiques indésirables. Les fromages cheddar et mozzarella exposés à différentes conditions de gel-dégel sont devenus plus mous et ont fondu mieux après la congélation et la décongélation (Muthukumarappan and Swamy, 2017).

3.3.4.3. Température

La température a un effet profond sur la fonte et l'extensibilité du fromage. La température de chauffage (70 à 200 °c) a une relation linéaire avec l'intensité du brunissement, mais le brunissement est davantage lié à la durée du chauffage. À basse température, un réchauffement prolongé (70 °C pendant 20 min) ne fait pas dorer le fromage, mais une brève exposition à une température élevée (1 à 3 min à 200 °C) entraîne un brunissement important (Muthukumarappan and Swamy, 2017).

La température induit l'association des molécules de caséine qui se dilatent à basse température en raison de l'affaiblissement des interactions hydrophobes (Lucey et al., 2003). Lorsque le fromage est chauffé, la matrice protéique adsorbe l'énergie qui influence les interactions maintenant la structure protéique. Pendant le chauffage, les agrégations de protéines accumulées dans la matrice de caséine modifient la distribution de l'humidité dans la matrice de protéines. La dureté locale et la répartition inégale de l'humidité dans la matrice protéique diminuent l'aptitude à fondre du fromage (Muthukumarappan and Swamy, 2017).

*Chapitre 04 : Méthodes
rhéologiques et texturales*

4.1. Les méthodes rhéologiques

Les mesures rhéologiques permettent d'accéder aux attributs mécaniques de la texture. Les relations contrainte/déformation sont décrites en utilisant les différents termes rhéologiques à savoir : la dureté qui est la force nécessaire pour obtenir la déformation imposée ; l'adhésivité qui est le travail nécessaire pour découler un échantillon de la sonde ; l'élasticité qui est la capacité de l'échantillon à retrouver sa forme initiale ; la cohésion qui est le degré auquel l'échantillon se déforme avant la rupture ; la fracturabilité qui se traduit par la force à laquelle un aliment se brise ; la fermeté qui est la force maximale requise pour comprimer un aliment (**Bourne, 2002; Laithier, 2008**). Ces termes fournissent des indices sur les propriétés rhéologiques liées à la texture du fromage.

La texture d'un fromage peut être évaluée au moyen de techniques instrumentales (dites rhéologiques) ou sensorielles (analyse sensorielle). La méthode faisant appel à l'analyse sensorielle est d'ores et déjà au point (**Hennequin and Hardy, 1993; Ma et al., 1996; Noël et al., 1996**). Cependant, les méthodes sensorielles sont lentes et nécessitent un jury d'experts et font appel à dix descripteurs de la texture : la fermeté en bouche, la fermeté à la coupe, le collant au couteau, le collant en bouche, la friabilité, le fondant, le granuleux, le gras et l'astringent. La mise en point d'une méthode instrumentale de mesure de la texture a en revanche été nécessaire (**Kim et al., 2009; Laithier, 2008**). Les tests les plus utilisés afin d'évaluer les propriétés texturales sont :

- Pénétrométrie ;
- Test de compression simple ;
- Test de compression dynamique ;
- Profil d'Analyse de la Texture (TPA).

4.1.1. Test de pénétrométrie

La pénétrométrie autrement dit les méthodes de pénétration sont largement utilisées pour mesurer les caractéristiques texturales des aliments (**DeMan, 1969**). C'est un test utilisé dans la mesure de la fracturabilité qui est la force nécessaire à la 1^{ère} rupture. Ce test consiste à introduire une sonde à l'intérieur du matériau (aliment) avec une vitesse constante à une profondeur (distance) bien déterminé. La réalisation du test de pénétrométrie produit sur le matériau une conjugaison de compression et de cisaillement (figure 7).

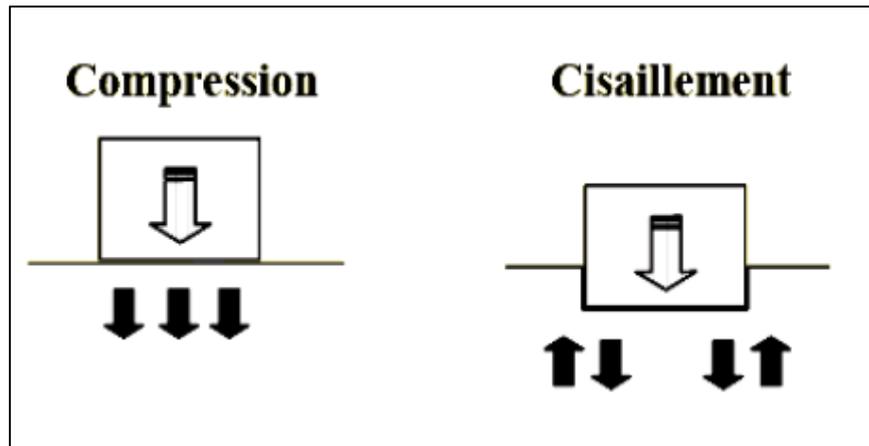


Figure 7. Test de pénétration (Louhichi, 2008)

La conséquence de l'application d'une force sur une sonde qui doit entrer dans un aliment débute par une déformation de la structure sous la pression. Si la vitesse de progression est constante, la force augmente jusqu'à la pénétration de l'outil dans le produit. L'événement est représenté par un brusque changement de la pente de la courbe force-distance. Ce point appelé YP, « yield point », exprime une cassure irréversible de la structure, il est souvent retenu comme la valeur de force la plus intéressante sur un enregistrement de pénétrométrie. L'appareil permet d'enregistrer la variation des forces en fonction de distance de pénétration, l'allure de la courbe obtenue (Figure 8) varie en fonction de l'aliment analysé (Louhichi, 2008).

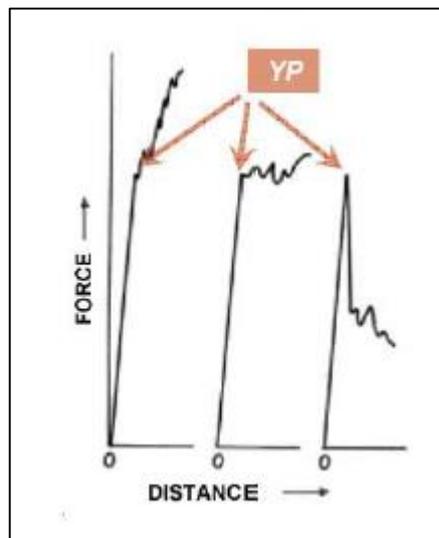


Figure 8. Enregistrement suite à un test de pénétrométrie : force en fonction de distance

Généralement, les essais de pénétration pour les fromages comprennent la mesure de la force nécessaire pour insérer une sonde (cône ou cylindre) à une distance donnée dans une tranche de fromage, ou encore la profondeur de pénétration d'une sonde sous une charge constante pendant une période donnée. Lorsque la sonde pénètre dans l'échantillon, le fromage est fracturé. La force nécessaire à la pénétration est enregistrée. La progression de la sonde est

retardée dans une certaine mesure en fonction de la dureté du fromage sur son trajet et de l'adhérence du fromage à sa surface (qui dépend de la profondeur de pénétration dans le fromage et de l'épaisseur de l'aiguille, ou angle du cône, utilisé) (Callaghan, 2004).

Hennequin and Hardy (1993) ont utilisé une sonde cylindrique (5 mm de diamètre à une vitesse de 10 mm/min à une profondeur de 10 mm) pour pénétrer dans les fromages à pâte molle (comme le Camembert) et ont constaté que la force à la pénétration de 10 mm a donné une forte corrélation avec la fermeté sensorielle. Ils ont conclu que la technique convient comme méthode rapide de mesure de la texture dans le fromage à pâte molle.

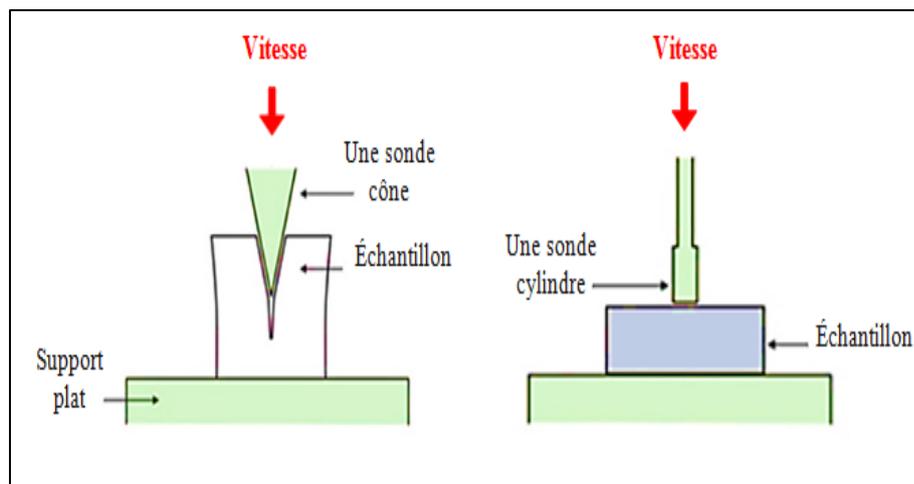


Figure 9. Principe de test de pénétration utilisée pour les mesures rhéologiques

Louhichi (2008) a réalisé un test de pénétration qui a été réalisé au centre et perpendiculairement à la meule de fromage au moyen d'une tige d'acier inoxydable de 6mm de diamètre et de section plane (Figure 10). Ainsi, la vitesse de pénétration de la sonde est fixée à 0.4mm/s. Les résultats obtenus doivent être enregistrés dès la pénétration de la sonde jusqu'à une profondeur de 15mm et sont affichés sous forme de graphique présentant la variation de la force de pénétration (N) en fonction de temps (min) ou en fonction du déplacement (mm). La force enregistrée correspond à la résistance de l'échantillon à la force appliquée.

La figure 11 illustre la variation de la force moyenne en fonction de temps lors d'un test de pénétrométrie pour un fromage donné. Cette courbe détermine la force au seuil de rupture (F_{sr}). Cette dernière correspond à la force nécessaire à la rupture de la croûte de fromage. Ce test peut être utilisé comme indice de fracturabilité (Breene, 1975).

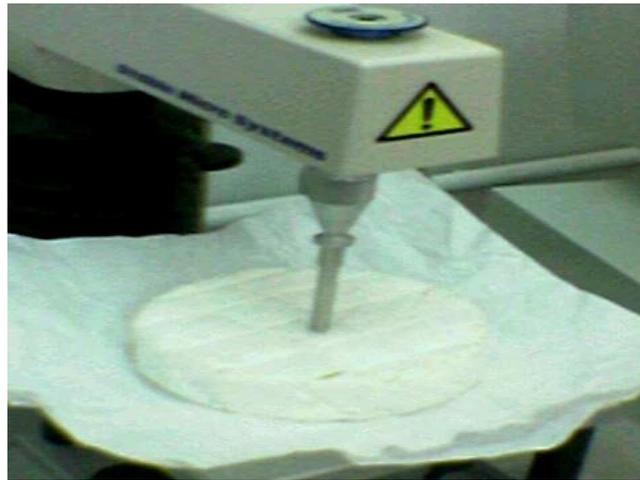


Figure 10. Analyse de la texture par test de pénétration (Louhichi, 2008)

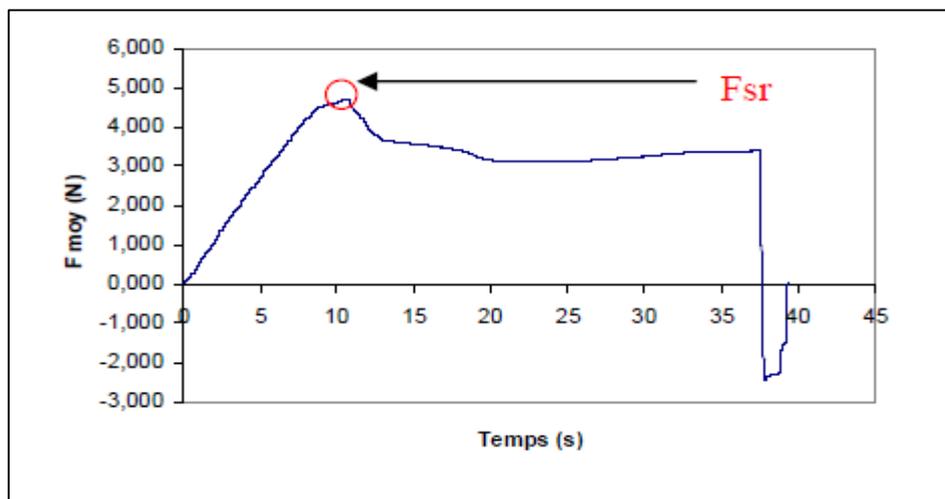


Figure 11. Variation de la force moyenne en fonction de temps lors d'un test de pénétration

4.1.2. Test de compression simple (élasticité, contrainte et déformation)

Le test uni-axial est une méthode populaire pour l'évaluation instrumentale de la texture du fromage (Luyten et al., 1992). La majorité des tests de compression sur le fromage sont effectués à l'aide de l'un des instruments polyvalents qui sont appelés Universal Testing Machine (UTM). L'UTM assure un contrôle précis de la déformation tout en mesurant avec précision la force. Les propriétés mécaniques habituellement calculées à partir des tests de compression uniaxiale sur le fromage comprennent le module d'élasticité, la contrainte (σ) et la déformation (ϵ) au point de fracture et l'énergie de la fracture (WF) (Fenelon and Guinee, 2000). L'UTM peut être utilisé pour effectuer la compression ainsi que l'essai de tension, de flexion et de cisaillement (Velmurugan et al., 2004).

La compression est souvent présentée comme le test mécanique le plus simple et le plus utilisé. La mise en œuvre est relativement facile et permet d'obtenir plusieurs paramètres caractérisant des propriétés texturales (Luyten et al., 1992; Scher, 2006). Le test consiste à écraser lentement l'échantillon, et à noter en continu l'évolution simultanée de la déformation du produit et de l'effort exercé pour obtenir cette déformation (figure 12 et 13).

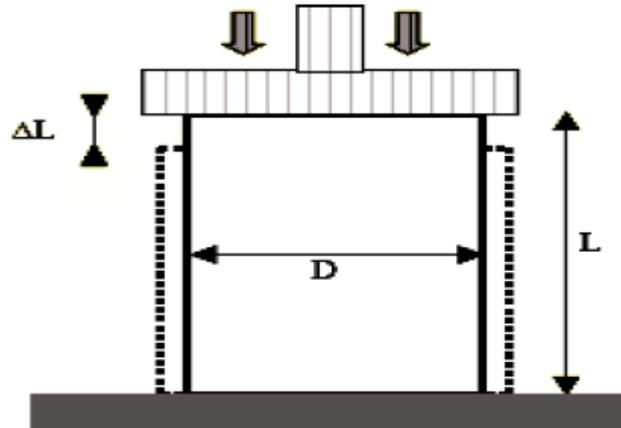


Figure 12. Test de compression uni-axial (Scher, 2006)

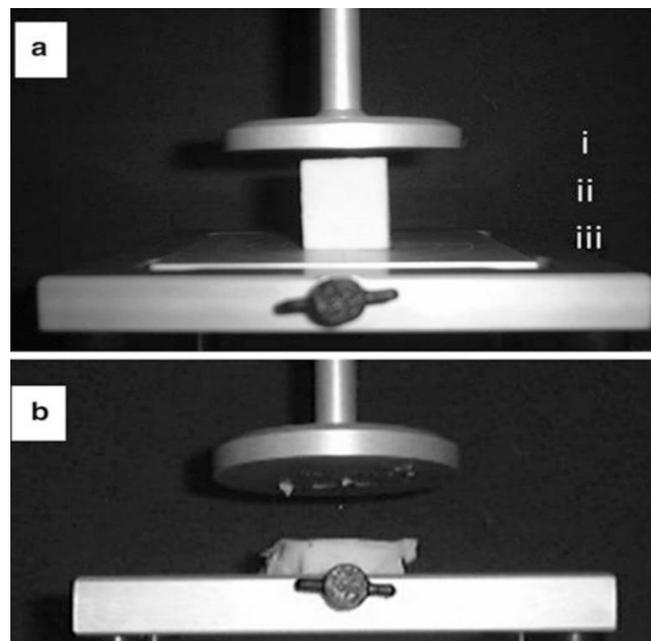


Figure 13. Échantillon de fromage cheddar mature avant (a) et après (b) compression à un taux de 60 mm/min à 80 % de la hauteur d'origine sur un analyseur de texture TAHDI.

(Callaghan, 2004)

Dans la plupart des applications, la prise d'essai est un cylindre. Il faut préciser la forme et les dimensions des échantillons (identiques pour chaque mesure) et connaître la surface de

contact. En général, le diamètre de la sonde est supérieur à la section de l'échantillon. L'aliment est souvent découpé afin d'obtenir un prélèvement homogène et représentatif. La contrainte normale est alors définie comme le rapport de la force appliquée à la surface de contact, tandis que la déformation est donnée par le rapport entre la variation de la hauteur de l'échantillon (ΔL) à sa hauteur initiale (L) (**Louhichi, 2008**). Ce test nous permet d'avoir une courbe exprimant la force en fonction de la déformation relative obtenue. Parmi les paramètres les plus importants à exploiter : le module de déformabilité (Md), en Pa : c'est le rapport entre la contrainte apparente (force par unité de surface initiale) et la déformation relative dans la partie initiale de la courbe (**Steffe, 1996**).

Dans la pratique, l'échantillon à analyser est de forme cylindrique et est placé sur la plateforme du texturomètre. Les deux surfaces de l'échantillon ont été lubrifiées à l'aide de l'huile de paraffine pour éviter la création de « l'effet tonneau », si non ça va entraîner une rupture précoce de l'échantillon (**Louhichi, 2008**). La compression a été réalisée au moyen d'un dispositif de la surface circulaire plane menée à vitesse de 4 mm/s. La compression de l'échantillon a été faite perpendiculairement au plateau inférieur jusqu'à une déformation 50% (5mm) sans avoir une rupture de l'échantillon. A partir des courbes force-déformation (déplacement) relative obtenue on peut déterminer le module d'élasticité ou encore module d'Yong : c'est le rapport entre la contrainte apparente (force par unité de surface initiale) et la déformation relative dans la partie initiale de la courbe, la contrainte est directement proportionnel à la déformation dans cette partie de la courbe le corps présente une élasticité linéaire donné par la loi de Hook (**Kfoury et al., 1989**). La compression uniaxiale et en cisaillement dynamique sont souvent effectuées sous un gradient de température comme (40 °C et 90°C) (**Famelart et al., 2002**).

4.1.3. Test de compression dynamique (viscosité, élasticité, viscoélasticité)

Le test de compression dynamique, basé sur l'application d'une contrainte de façon sinusoïdale, permet de décrire et d'expliquer les modifications structurales susceptibles d'intervenir dans un échantillon de fromage entre autre lors de l'application d'un traitement thermique (**Reparet, 2000**).

Le test de compression dynamique est effectué dans des conditions de cisaillement oscillatoire à faible amplitude, où le disque d'échantillon est placé entre deux plaques parallèles et soumis à une oscillation sinusoïdale, permet de décrire et d'expliquer les modifications structurales susceptibles d'intervenir dans un échantillon de fromage lors de l'application d'un traitement thermique (Figure 14). (**Abbas, 2012; Tunick, 2000**). Les mesures dynamiques doivent être effectuées à une rampe de force comprise entre 0,02 et 0,34 N correspondant à la

région viscoélastique linéaire pour maintenir la structure du fromage intacte. Les expériences d'oscillation dynamique sont réalisées avec un rhéomètre (CP 20, TA Instrument) avec une géométrie de plaque parallèle de 20 mm de diamètre, en appliquant une force à une fréquence constante de 1 Hz et sous une température généralement fixée à 20 °C (Karoui and Dufour, 2003).

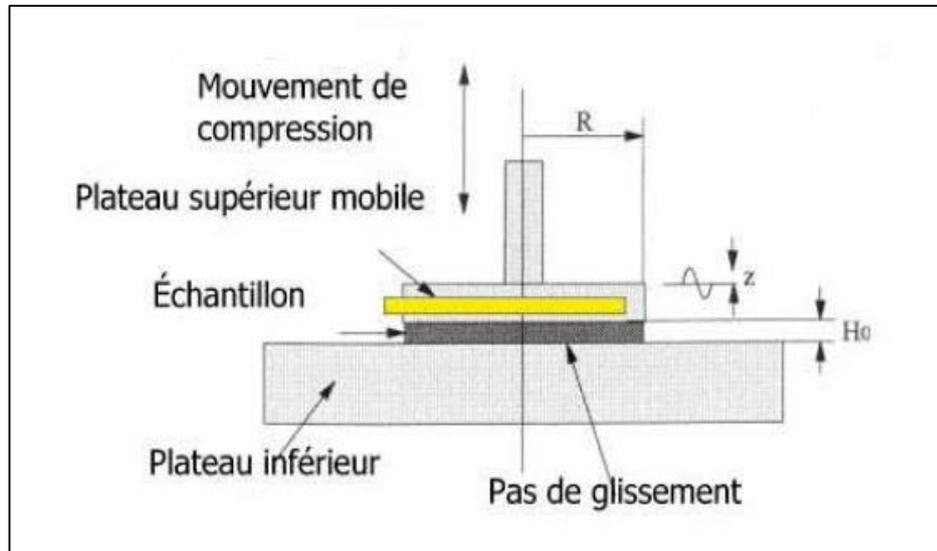


Figure 14. Test de compression dynamique (Abbas, 2012)

La technique d'oscillation est non destructive et elle permet de mesurer simultanément les comportements visqueux et élastique de l'échantillon. Les paramètres rhéologiques calculés à partir des tests dynamiques sont : la composante élastique (G') qui permet de mesurer l'état de la structure d'un matériau, la composante visqueuse (G'') qui permet de mesurer le comportement de type visqueux, et l'angle de la phase ($\tan \delta$) qui mesure la viscoélasticité. G' est le module élastique qu'il est important pour un échantillon de prédominance élastique ou fortement structuré. G'' représente le module visqueux, il est important pour un échantillon de prédominance visqueuse. Le rapport G''/G' correspond à l'angle de déphasage de perte ($\tan \delta$). Ce rapport est un indice du caractère viscoélastique de l'échantillon à une température T et une fréquence ω données, $\tan \delta$ augmente avec la viscosité et diminue lorsque l'élasticité augmente (Figure 15) (Abbas, 2012).

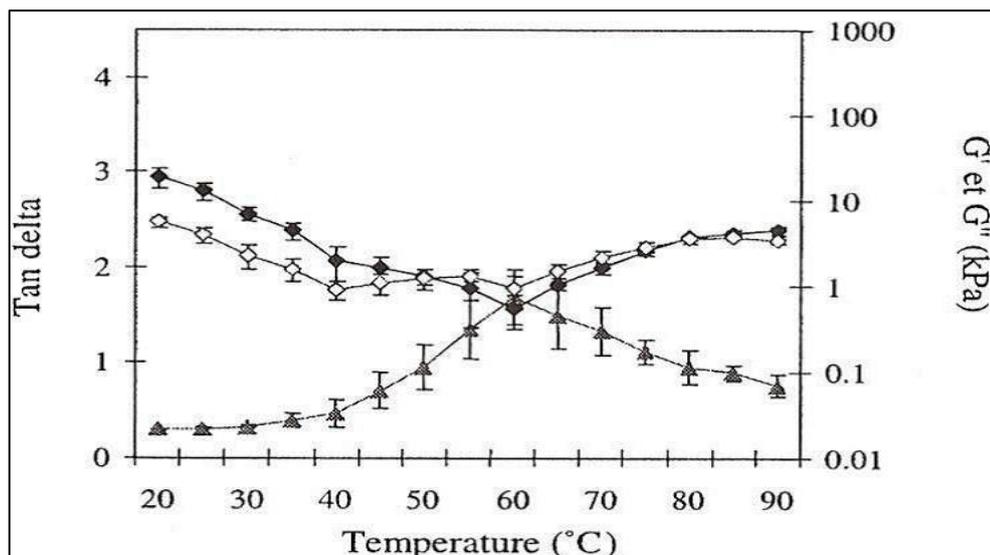


Figure 15. Courbe de test de cisaillement dynamique avec balayage température sur des fromages expérimentaux de type pâte pressée (n=10 Mamirolle) (triangle : Tan δ , losange plein : G', losange vide : G'') (**Reparet and Noël, 2003**)

Le test de compression dynamique présente l'avantage d'être rapide et de permettre plusieurs types de balayage (température, temps...). Le balayage en température peut varier de -10 à 100°C pour les appareils équipés d'un système à effet Peltier (**Abbas, 2012**)

4.1.4. Profil d'Analyse de la Texture (TPA) : dureté, élasticité, cohésion, adhérence

Le Profil d'Analyse de Texture est un test qui vise à reproduire d'une manière partielle le processus de mastication, pour cette analyse un texturomètre de type TAXTPlus est utilisé. Un cylindre d'échantillon de fromage est découpé puis compressé à deux reprises par un mobile plat métallique pour simuler les deux premières bouchées prises pendant la mastication de fromage. Les deux étapes de compression peuvent être séparées par un temps d'attente facultatif. En effet, cette analyse est principalement utilisée pour les fromages à pâte pressées (**Hennequin and Hardy, 1993; Laithier, 2008**). Le test TPA un type de test de compression uniaxiale. D'après **Muthukumarappan and Swamy (2017)** et contrairement aux tests de compression, le test TPA est réalisé en soumettant un spécimen cylindrique à une compression en deux étapes. La première étape de compression, appelée « première morsure », est suivie d'une deuxième, la « deuxième morsure » (Figure 16). La déformation utilisée dans le test TPA est souvent de 70 % ou plus. Pour imiter de plus près l'action de mastication, une compression de 90% est suggérée. Les tests de compression uniaxiale sont terminés au moment de la défaillance de l'échantillon macroscopique ou avant. Des nombreux paramètres de texture peuvent être déduits à partir de la courbe TPA sont les suivants : dureté, cohésion, adhérence, élasticité et fracturabilité (Figure 17).

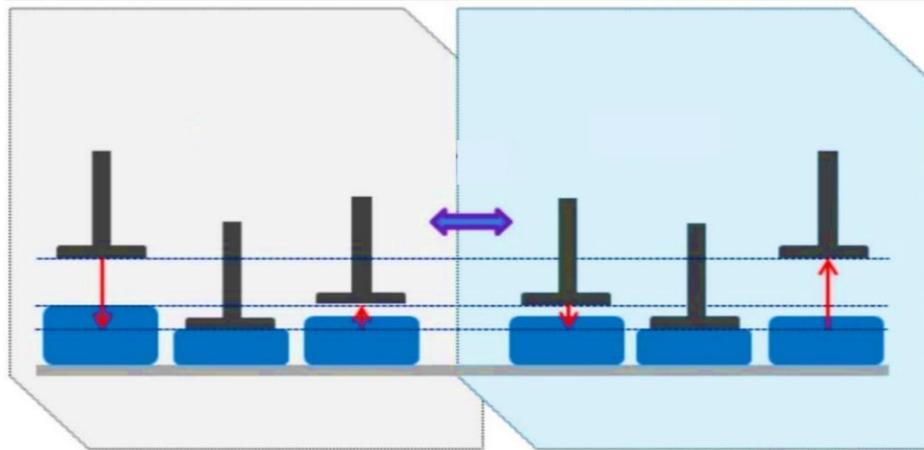


Figure 16. Principe de l'analyse du profil textural

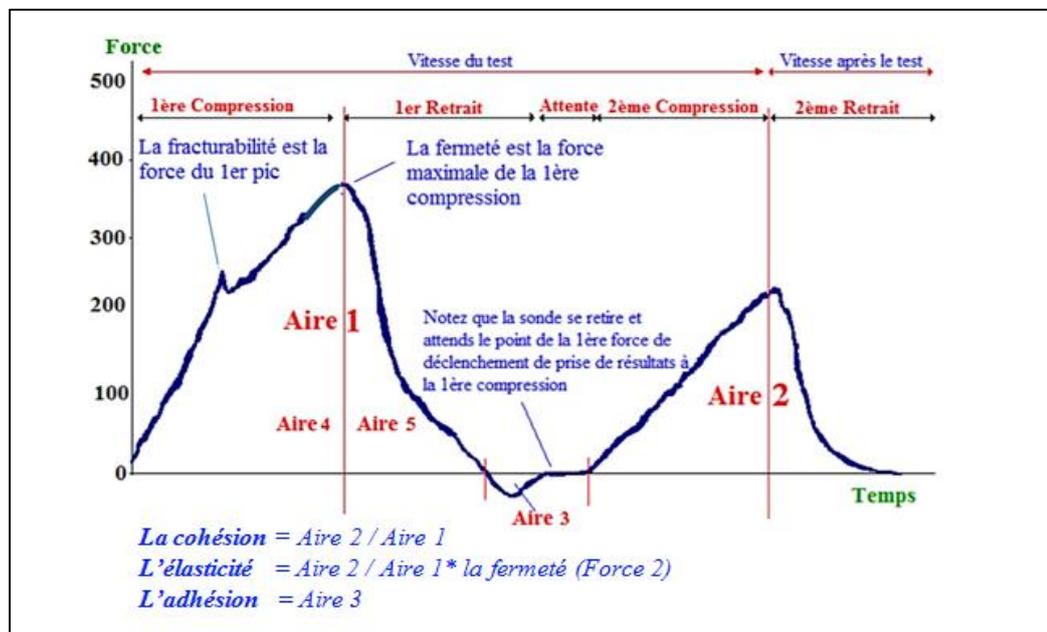


Figure 17. Calculs effectués par le logiciel «Texture Exposit Software» des paramètres de l'analyse du profil textural des fromages (Vallières, 2016)

Conclusion

Conclusion

Le fromage est un ingrédient laitier très polyvalent qui peut être utilisé directement dans un éventail de plats culinaires, de produits alimentaires formulés et de plats préparés. Dans ces applications, le fromage ajouté remplit un certain nombre de fonctions, c'est-à-dire qu'il contribue aux caractéristiques sensorielles telles que la structure, à la texture, à la saveur, et aux propriétés culinaires et nutritionnelles. Grâce à une meilleure connaissance de la chimie, de la biochimie et de la microbiologie du fromage, il est maintenant possible de produire de façon constante du fromage d'une qualité acceptable, bien que cela ne soit pas toujours possible en raison de l'absence de contrôle d'un ou de plusieurs des paramètres clés qui influent sur la composition et l'affinage du fromage. La fonctionnalité des fromages est affectée par la microstructure, qui détermine les propriétés rhéologiques des particules du caillé ; elle est également affectée par sa macrostructure. L'utilisation du fromage comme ingrédient repose en grande partie sur la texture/les caractéristiques rhéologiques du fromage à froid et sur les caractéristiques de cuisson/rhéologique du fromage à chaud. De nombreux facteurs influent sur les caractéristiques fonctionnelles du fromage, tous ces facteurs sont influencés par les conditions de fabrication et peuvent être contrôlés à des degrés divers en contrôlant le processus de fabrication. Les propriétés rhéologiques du fromage ont une grande influence sur sa texture et son comportement lors de la réduction de la taille et, par conséquent sur son adéquation comme ingrédient. De nombreux facteurs influent sur les propriétés rhéologiques, y compris la méthode de fabrication, la variété, la composition et les changements biochimiques pendant la maturation. De nombreuses méthodes sont disponibles pour mesurer les propriétés rhéologiques du fromage ; certaines mesures dans la gamme viscoélastique linéaire pour obtenir des quantités rhéologiques précises. En revanche, les mesures rhéologiques effectuées dans de grandes quantités de déformation ou de rendement sous contrainte qui sont de nature plus empirique, mais qui sont généralement liées aux contraintes et aux contraintes subies pendant la consommation et la réduction de la taille. Dans l'ensemble, une connaissance appropriée de la relation structure-fonction est essentielle à la conception de types de fromages dotés de fonctionnalités et de propriétés spécifiques.

*Référence
bibliographique*

Références Bibliographiques

- Abbas, K. (2012). Effet de traitements thermiques sur les propriétés fonctionnelles de fromages traditionnels: le cas des pâtes persillées, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand.
- Adda, J., Gripon, J., and Vassal, L. (1982). The chemistry of flavour and texture generation in cheese. *Food Chemistry* **9**, 115-129.
- Alais, C., and Linden, G. (1997). "Abrégé de biochimie alimentaire," Masson/Ed.
- Almena-Aliste, M., and Mietton, B. (2014). Cheese classification, characterization, and categorization: a global perspective. *Cheese and Microbes*, 39-71.
- Amiot, J., Fournier, S., Lebeuf, Y., Paquin, P., and Simpson, R. (2002). Chapitre 1: Composition, propriétés physicochimiques, valeur nutritive, qualité technologique et techniques d'analyse du lait; Vignola C, editor. *Science et Technologie du lait; transformation du lait*. C. L. Vignola, ed. *Presses Internationales Polytechniques, Montréal, Québec*, 1-73.2002.
- Antoniou, K., Petridis, D., Raphaelides, S., Omar, Z. B., and Kesteloot, R. (2000). Texture assessment of French cheeses. *Journal of food science* **65**, 168-172.
- Arihara, K. (2004). Functional foods. Encyclopedia of meat sciences. Oxford: Elsevier.
- Barnes, H. A. (2000). A handbook of elementary rheology.
- Blair, G. S., Veinoglou, B., and Caffyn, J. (1947). Limitations of the Newtonian time scale in relation to non-equilibrium rheological states and a theory of quasi-properties. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* **189**, 69-87.
- Bogue, J., Delahunty, C., Henry, M., and Murray, J. (1999). Market-oriented methodologies to optimise consumer acceptability of Cheddar-type cheeses. *British Food Journal*.
- Bourne, M. (2002). , Sensory Methods of Texture and Viscosity Measurement. *Food Texture and Viscosity*.
- Breene, W., M. (1975). Application of texture profile analysis to instrumental food texture evaluation. *Journal of Texture Studies* **6**, 53-82.
- Brown, J., Foegeding, E., Daubert, C., Drake, M., and Gumpertz, M. (2003). Relationships among rheological and sensorial properties of young cheeses. *Journal of dairy science* **86**, 3054-3067.
- Brown, R., and Ernstrom, C. (1988). Milk-clotting enzymes and cheese chemistry. I. Milk-clotting enzymes.
- Brule, G., and Lenoir, J. (1990). Les mécanismes généraux de la transformation du lait en fromage. *Le fromage*. Ed. *Tec. & Doc., Lavoisier, Paris*, 1-21.
- Callaghan, D. O. (2004). Rheology and texture of cheese. *General aspects, Cheese chemistry, physics and microbiology* **1**, 511-540.
- Cayot, P., and Lorient, O. (1998). "Structure et techno-fonction des protéines du lait. ."
- Cheftel, J.-C., and Cheftel, H. (1977). Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments.
- Coulon, J. B., Chilliard, Y., and Rémond, B. (1991). Effets du stade physiologique et de la saison sur la composition chimique du lait de vache et ses caractéristiques technologiques (aptitude à la coagulation, lipolyse).
- Davies, F. L., and Law, B. A. (1984). "Advances in the microbiology and biochemistry of cheese and fermented milk," Sole distributor in the USA and Canada, Elsevier Science.
- DeMan, J. (1969). Food texture measurements with the penetration method. *Journal of Texture Studies* **1**, 114-119.
- Diplock, A., Aggett, P., Ashwell, M., Bornet, F., Fern, E., and Roberfroid, M. (1999). The European Commission concerted action on functional foods science in Europe (FUFOSE). Scientific concepts of functional foods in Europe. Consensus document. *Br J Nutr* **81**, S1-27.
- Eck, A., and Gillis, J. C. (2006). "Le fromage: de la science à l'assurance-qualité," Tec & Doc-Lavoisier.
- Estellé, P., Michon, C., Lanos, C., and Grossiord, J. (2013). De l'intérêt d'une caractérisation rhéologique empirique et relative (chapitre 7).

- Famelart, M.-H., Le Graet, Y., Michel, F., Richoux, R., and Riaublanc, A. (2002). Évaluation des méthodes d'appréciation des propriétés fonctionnelles des fromages d'emmental de l'Ouest de la France. *Le lait* **82**, 225-245.
- Fenelon, M. A., and Guinee, T. P. (2000). Primary proteolysis and textural changes during ripening in Cheddar cheeses manufactured to different fat contents. *International Dairy Journal* **10**, 151-158.
- Fife, R. L., McMahon, D. J., and Oberg, C. J. (1996). Functionality of low fat Mozzarella cheese. *Journal of dairy science* **79**, 1903-1910.
- Fox, P. F., Guinee, T. P., Cogan, T. M., and McSweeney, P. L. (2017). Cheese as an Ingredient. In "Fundamentals of Cheese Science", pp. 629-679. Springer.
- Fox, P. F., McSweeney, P. L., Cogan, T. M., and Guinee, T. P. (2004). "Cheese: Chemistry, Physics and Microbiology, Volume 1: General Aspects," Elsevier.
- Grappin, R., Lefier, D., and Mazerolles, G. (2000). Analyse du lait et des produits laitiers. Technique et Documentation.
- Guinard, J.-X., and Mazzucchelli, R. (1996). The sensory perception of texture and mouthfeel. *Trends in Food Science & Technology* **7**, 213-219.
- Guinee, T. P. (2002). The functionality of cheese as an ingredient: a review. *Australian journal of dairy technology* **57**, 79.
- Guinee, T. P., Auty, M. A., and Mullins, C. (1999). Observations on the microstructure and heat-induced changes in the viscoelasticity of commercial cheeses. *Australian journal of dairy technology* **54**, 84.
- Gunasekaran, S., and Ak, M. M. (2000). Dynamic oscillatory shear testing of foods—selected applications. *Trends in Food Science & Technology* **11**, 115-127.
- Hardy, J., and Scher, J. (1997). Les propriétés physiques et organoleptiques du fromage. *Le fromage*, 479-492.
- Hebert, A. (2010). Ecosystème fromager: de l'étude du métabolisme du soufre chez *Kluyveromyces lactis* et *Yarrowia lipolytica* à l'interaction entre *Kluyveromyces lactis* et *Brevibacterium aurantiacum*.
- Hellmuth, K., and van den Brink, J. (2013). Microbial production of enzymes used in food applications. In "Microbial Production of Food Ingredients, Enzymes and Nutraceuticals", pp. 262-287. Elsevier.
- Hennequin, D., and Hardy, J. (1993). Evaluation instrumentale et sensorielle de certaines propriétés texturales de fromages à pâte molle. *International Dairy Journal* **3**, 635-647.
- Herbet, S. (1999). Caractérisation de la structure moléculaire et microscopique de fromages à pâte molle. Analyse multivariée des données structurales en relation avec la texture, Université de Nantes.
- Horne, D. S. (2006). Casein micelle structure: models and muddles. *Current opinion in colloid & interface science* **11**, 148-153.
- Hyardin, A. (2008). Étude de la fonctionnalité alimentaire de plats industriels, Institut National Polytechnique de Lorraine.
- IDF (2012). "The World Dairy Situation, 2012. ."
- IDF (2016). "The World Dairy Situation, 2016."
- Johnson, M. E., and Olson, N. (1985). Nonenzymatic browning of Mozzarella cheese. *Journal of dairy science* **68**, 3143-3147.
- Joshi, N. S., Jhala, R. P., Muthukumarappan, K., Acharya, M. R., and Mistry, V. V. (2004). Textural and Rheological Properties of Processed Cheese. *International Journal of Food Properties* **7**, 519-530.
- Karoui, R., and Dufour, É. (2003). Dynamic testing rheology and fluorescence spectroscopy investigations of surface to centre differences in ripened soft cheeses. *International Dairy Journal* **13**, 973-985.

- Kfoury, M., Mpagana, M., and Hardy, J. (1989). Influence de l'affinage sur les propriétés rhéologiques du camembert et du saint-paulin. *Le lait* **69**, 137-149.
- Kim, E. J., Corrigan, V., Hedderley, D., Motoi, L., Wilson, A., and Morgenstern, M. (2009). Predicting the sensory texture of cereal snack bars using instrumental measurements. *Journal of Texture Studies* **40**, 457-481.
- Kindstedt, P., Kiely, L., and Gilmore, J. (1992). Variation in composition and functional properties within brine-salted Mozzarella cheese. *Journal of dairy science* **75**, 2913-2921.
- Kindstedt, P. S. (2014). The basics of cheesemaking. *Cheese and Microbes*, 17-38.
- Kindstedt, P. S. (2018). The History of Cheese. *Global Cheesemaking Technology*, 3.
- Kindstedt, P. S., and Fox, P. (1993). Effect of manufacturing factors, composition, and proteolysis on the functional characteristics of Mozzarella cheese. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition* **33**, 167-187.
- Konstance, R., and Holsinger, V. (1992). Development of rheological test methods for cheese. *Food technology (Chicago)* **46**, 105-109.
- Kosikowski, F., and Mistry, V. (1997). Cheese and fermented milk foods. Volume 2: procedures and analysis. *Cheese and fermented milk foods. Volume 2: procedures and analysis*.
- Laithier, C. (2008). Evaluer et maîtriser la texture des fromages de chèvre "jeunes" à coagulation lactique.
- Lapointe-Vignola, C. (2002). "Science et technologie du lait: transformation du lait," Presses inter Polytechnique.
- Law, B. A., and Tamime, A. Y. (2011). "Technology of cheesemaking," John Wiley & Sons.
- Lawrence, R., Creamer, L., and Gilles, J. (1987). Texture development during cheese ripening. *Journal of dairy science* **70**, 1748-1760.
- LEE, C. H., IMOTO, E. M., and RHA, C. (1978). Evaluation of cheese texture. *Journal of food science* **43**, 1600-1605.
- Lee, S. K., Anema, S., and Klostermeyer, H. (2004). The influence of moisture content on the rheological properties of processed cheese spreads. *International journal of food science & technology* **39**, 763-771.
- Lenoir, J., Lamberet, G., Schmidt, J., and Tourneur, C. (1985). La maîtrise du bioréacteur fromage. *Biofutur*, 13 p.
- Louhichi, M. (2008). Effect of irradiation on the texture of a soft cheese like Camembert; Effet de l'irradiation sur la texture d'un fromage a pate molle de type Camembert.
- Lucey, J., and Fox, P. (1993). Importance of calcium and phosphate in cheese manufacture: a review. *Journal of dairy science* **76**, 1714-1724.
- Lucey, J., Johnson, M., and Horne, D. (2003). Invited review: perspectives on the basis of the rheology and texture properties of cheese. *Journal of dairy science* **86**, 2725-2743.
- Lucey, J. A. (2008). Some perspectives on the use of cheese as a food ingredient. *Dairy Science and Technology* **88**, 573-594.
- Luquet, F. M. (1990). "Laits et produits laitiers: Tome 2, Les produits laitiers, Transformation et technologies," Technique et documentation-Lavoisier.
- Luyten, H., Van Vliet, T., and Walstra, P. (1992). Comparison of various methods to evaluate fracture phenomena in food materials. *Journal of Texture Studies* **23**, 245-266.
- Ma, L., Drake, M., Barbosa-Canovas, G., and Swanson, B. (1996). Viscoelastic properties of reduced-fat and full-fat Cheddar cheeses. *Journal of food science* **61**, 821-823.
- Mahaut, M., Jeantet, R., and Brulé, G. (2000). "Initiation à la technologie fromagère," Editions Tec & Doc.
- Marino, V. M., Belbeldi, A., La Terra, S., Manenti, M., Licitra, G., and Carpino, S. (2012). A survey of fat-soluble antioxidants, linolenic acid and conjugated linoleic acid content of traditional Algerian Bouhezza cheese. *Journal of Food, Agriculture & Environment* **10**, 186-190.

- Masson, C., Decaen, C., Rousseaux, P., and Bouty, J. (1978). Variations géographique et saisonnière de la composition du lait destiné à la fabrication de gruyère de Comté (observations préliminaires). *Le lait* **58**, 261-273.
- McMahon, D. J., Fife, R. L., and Oberg, C. J. (1999). Water partitioning in Mozzarella cheese and its relationship to cheese meltability. *Journal of dairy science* **82**, 1361-1369.
- Mehta, B. M. (2015). Chemical composition of milk and milk products. *Handbook of food chemistry*, 511-553.
- Muliawan, E. B., and Hatzikiriakos, S. G. (2007). Rheology of mozzarella cheese. *International Dairy Journal* **17**, 1063-1072.
- Muthukumarappan, K., and Swamy, G. (2017a). Rheology, microstructure, and functionality of cheese. In "Advances in Food Rheology and Its Applications", pp. 245-276. Elsevier.
- Muthukumarappan, K., and Swamy, G. J. (2017b). Chapter 10 - Rheology, Microstructure, and Functionality of Cheese. In "Advances in Food Rheology and Its Applications" (J. Ahmed, P. Ptaszek and S. Basu, eds.), pp. 245-276. Woodhead Publishing.
- Noël, Y., Zannoni, M., and Hunter, E. (1996). Texture of Parmigiano Reggiano cheese: Statistical relationships between rheological and sensory variates. *Le lait* **76**, 243-254.
- Ong, L., Lawrence, R. C., Gilles, J., Creamer, L. K., Crow, V. L., Heap, H. A., Honoré, C. G., Johnston, K. A., Samal, P. K., and Powell, I. B. (2017). Cheddar cheese and related dry-salted cheese varieties. In "Cheese", pp. 829-863. Elsevier.
- Ponche, A. (2003). Suspensions de particules dans des solutions de polymère: Rhéométrie et observations microscopique, Université de Haute Alsace.
- Ramet, J. (1985). "La fromagerie et les variétés de fromages du bassin méditerranéen," Organisation des nations unies pour L'Alimentation et L'Agriculture.
- Rao, M. B., Tanksale, A. M., Ghatge, M. S., and Deshpande, V. V. (1998). Molecular and biotechnological aspects of microbial proteases. *Microbiology and molecular biology reviews* **62**, 597-635.
- Reparet, J.-M. (2000). Les propriétés fonctionnelles évaluées à chaud: des fromages aux imitations fromagères, Paris, Institut national d'agronomie de Paris Grignon.
- Reparet, J.-M., and Noël, Y. (2003). Relation between a temperature-sweep dynamic shear test and functional properties of cheeses. *Le lait* **83**, 321-333.
- Romain, J., Thomas, C., Michel, M., Pierre, S., and Gérard, B. (2008). "Les produits laitiers (2e ed.)," Lavoisier.
- Ruettimann, K., and Ladisch, M. (1987). Casein micelles: structure, properties and enzymatic coagulation. *Enzyme and Microbial Technology* **9**, 578-589.
- Sandine, W. E., and Elliker, P. R. (1970). Microbially induced flavors and fermented foods. Flavor in fermented dairy products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **18**, 557-562.
- Scher, J. (2006). Rhéologie, texture et texturation des produits alimentaires. *Tech. Ing.*
- Scott, R. (1998). Cheese faults and cheese grading. U knjizi Cheesemaking Practice (third edition), Robinson, RK, Wilbey, RA. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York.
- Solorza, F., and Bell, A. (1998). The effect of calcium addition on the rheological properties of a soft cheese at various stages of manufacture. *International journal of dairy technology* **51**, 23-29.
- Steffe, J. F. (1996). "Rheological methods in food process engineering," Freeman press.
- Sutton, J. (1989). Altering milk composition by feeding. *Journal of dairy science* **72**, 2801-2814.
- Szczesniak, A. S. (1963). Classification of Textural Characteristics a. *Journal of food science* **28**, 385-389.
- Taneya, S., Izutsu, T., Kimura, T., and Shioya, T. (1992). Structure and rheology of string cheese. *Food Structure* **11**, 7.
- Thomas, P. R., and Martin, K. R. (1994). "Survival at Nodules: The Time-based Route to Competitive Quality," Heritage Pub.
- Tunick, M. (2000). Rheology of dairy foods that gel, stretch, and fracture. *Journal of dairy science* **83**, 1892-1898.

- Vallières, C. (2016). Effet de réduction en sodium sur la texture et la bioaccessibilité des protéines d'un fromage à pâte molle à croûte fleurie.
- Veisseyer, R. (1979). "Technologie du lait," 3ème édition/Ed.
- Velmurugan, R., Gupta, N., Solaimurugan, S., and Elayaperumal, A. (2004). The effect of stitching on FRP cylindrical shells under axial compression. *International journal of impact engineering* **30**, 923-938.
- Vigne, J.-D. (2008). Zooarchaeological aspects of the Neolithic diet transition in the Near East and Europe, and their putative relationships with the Neolithic demographic transition. In "The Neolithic demographic transition and its consequences", pp. 179-205. Springer.
- Vigne, J.-D. (2011). The origins of animal domestication and husbandry: a major change in the history of humanity and the biosphere. *Comptes rendus biologies* **334**, 171-181.
- Walstra, P. (1999). Casein sub-micelles: do they exist? *International Dairy Journal* **9**, 189-192.
- Walstra, P., Van Dijk, H., and Geurts, T. (1985). The syneresis of curd. 1. General considerations and literature review. *Netherlands Milk and Dairy Journal* **39**, 209-246.
- Walstra, P., Wouters, J. T., and Geurts, T. J. (2005). "Dairy science and technology," CRC press.
- Wendin, K., Langton, M., Caous, L., and Hall, G. (2000). Dynamic analyses of sensory and microstructural properties of cream cheese. *Food Chemistry* **71**, 363-378.
- Wiklund, J., Shahram, I., and Stading, M. (2007). Methodology for in-line rheology by ultrasound Doppler velocity profiling and pressure difference techniques. *Chemical Engineering Science* **62**, 4277-4293.
- Zhu, J., Wang, X., Tao, F., Xue, G., Chen, T., Sun, P., Jin, Q., and Ding, D. (2007). Room temperature spontaneous exfoliation of organo-clay in liquid polybutadiene: Effect of polymer end-groups and the alkyl tail number of organic modifier. *Polymer* **48**, 7590-7597.