

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

Filière : Sciences Alimentaires

Spécialité/Option : Qualité des Produits et Sécurité Alimentaire

Département : Biologie

Thème

**Caractérisation physicochimique, biologique et rhéologique du
fromage traditionnel « Bouhezza ».**

Présenté par :

- HARID Narimane
- KHELAIKIA Mabrouka Nada
- SERIDI Chaima

Devant le jury composé de :

Président :	M. ATHAMNIA Mohammed (MCB)	Université de Guelma
Examineur :	M. BOUSBIA Aissam (MCA)	Université de Guelma
Encadreur :	M. GUEROUI Yassine (MCA)	Université de Guelma

Octobre 2020

« Au nom d'Allah, le Clément, le Miséricordieux »

Remerciement

« الحمد لله الذي هدانا لهذا وما كنا لنهتدي لولا ان هدانا الله »

Tout d'abord, nous tenons à remercier Allah qui nous avait guidés pour mener à terme notre travail dans cette période très difficile de la pandémie coronavirus (covid-19) qui avait laissé un goût amer à nous tous.

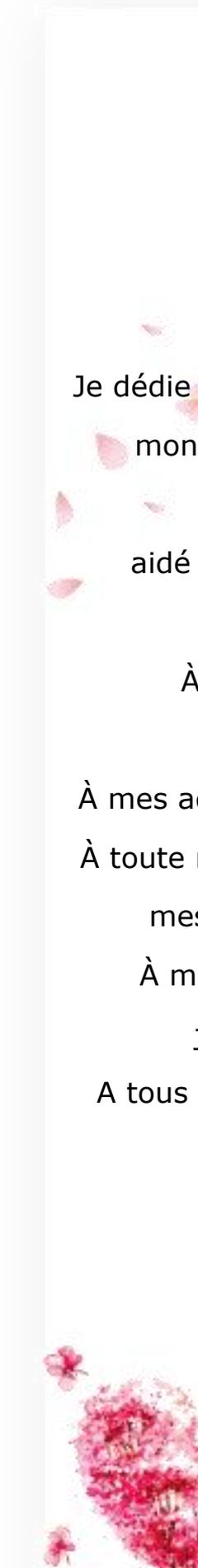
Nous tenons également à remercier **M. ATHAMNIA Mohammed** d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire. Nous remercions de même **M. BOUSBIA Aissam** d'avoir accepté de faire l'honneur de juger ce modeste travail. Et nous adressons nos plus vifs remerciements à notre encadreur **M. GUEROUI Yassine** qui nous a bien guidé avec ses précieux conseils et ses critiques durant toute la période du travail.

Nous tenons à remercier tous les responsables de département de biologie et nos chers enseignants.

Un grand merci surtout à notre invisible soldat " **Meryem SERIDI** ".

Enfin, merci à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.





Dédicace

Je dédie ce modeste travail à ceux qui m'ont donné la vie, qu'ont été
mon ombre durant toutes les années de mes études, on m'a
encouragé,

aidé et me protégé, à **mon cher père** et **ma chère mère** ♥

Qu'Allah vous gardes et vous protèges ...

À mon cher frère **Mouslem** et à mes adorables sœurs

Assia , **Meryem** et **Selma** , je vous aime ♥ ...

À mes adorables anges nièce et neveu : **Salam**, **Anes** que j'adore ♥

À toute ma grande famille : **mes grands-pères** et **grands-mères**,
mes **oncles**, mes **tantes**, mes **cousins** et mes **cousines**.

À mes compagnons et mes camarades **Narimane** et **Nada**,
je vous souhaite tout le bonheur que vous méritez ♥

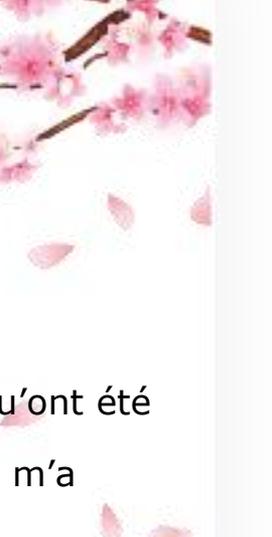
A tous **mes chères** et **proches amies**, **mes sœurette**s qu'Allah
vous donne tout le bonheur ♥

À tous mes collègues de la promotion 2020

À tous ce qui m'est chères ...

À tous qui m'aiment, À tous ceux que j'aime ...

Je dédie ce travail ♥



Chaima,

Dédicace

Ce travail est dédié à **mon cher père** qui n'a jamais connu mes succès.

J'espère que, du monde qui est sien maintenant, il apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'une fille qui a toujours prié pour le salut de son âme.

Puisse Dieu, le tout puissant, l'avoir en sa sainte miséricorde !

À ma **chère mère** qui m'a toujours soutenu et cru en moi,
Maman, que Dieu te préserve ♥

A **mon frère** unique, que dieu vous bénisse

À **mon fiancé**, pour son accompagnement et son soutien indéfectible.

À mes sœurs, mes amies et mes camarades **Chaima** et **Nada**,

je vous aime ♥

À **mes proches amies** et toutes les personnes qui me sont chères.

Je dédie aussi ce travail à toute ma famille et à **tous ceux qui m'aiment ...**

Narimane,



Dédicace

Je dédie ce modeste travail à ceux qui m'ont donné la vie,
l'amour et le confort moral tout au long de mes études,
Mon cher papa Khelaifia Mohamed taher et ma chère maman
khebab messaouda Je souhaite que vous restiez toujours près
de moi et que DIEU vous protège et vous donne bonne santé, je
vous aime .

A Mes chers sœurs **nina** , **haidi** , **kawther** je vous réserve
toujours une place dans mon cœur et mes pensées. je vous
adores

A mes tantes et mes chers cousins ,vous êtes les meilleurs
A mon enseignant de Pôle pro **Mr abdelaziz benkirat** Et la
technicienne de laboratoire **Mme Himeur ratiba** pour ses
encouragement et soutien moral

À mes collègues et mes chers amis **Narimane** et **Chaima** , pour
l'harmonisation dans le travail d'équipe ,je vous souhaite que de
bonheur.

A Toutes mes proches amies : **amani atatra** ,**chainez sebti**
et **nada** , merci d'être toujours là , je vous souhaite que de
réussite , je vous aime .

A toutes mes Amies et mes collègues de la promotion 2020 sans
exception

Aux gens qui m'aiment et que j'aime ♥

Nada,



Table des matières

Résumé

Liste des abréviations et acronymes

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction	2
CHAPITRE I: GENERALITES SUR LES FROMAGES	4
1. Définition du fromage	3
2. Histoire et origine des fromages.....	3
3. Bases de la fabrication du fromage	4
3.1. Composition du lait	4
3.1.1. Eau.....	5
3.1.2. Lactose.....	5
3.1.4. Protéines	6
3.1.5. Sels.....	8
3.2. Fabrication des fromages	8
3.2.1. Prétraitement du lait.....	8
3.2.2. Coagulation.....	9
3.2.3. Egouttage	12
3.2.4. Pressage	12
3.2.5. Salage.....	13
3.2.6. Affinage (finition).....	13
4. Classification.....	15
4.1. Fromages frais à pâte fraîche.....	15
4.2. Fromage à pâte molles.....	15
4.3. Fromage à pâte pressées	15

4.4. Fromage à pâte pressée et cuite	15
4.5. Fromage à pâtes persillées	15
5. Écologie microbienne du fromage	16
5.1. Source de micro-organismes dans le fromage	16
5.2. Facteurs influençant la croissance des micro-organismes dans le fromage	16
5.3. Microorganismes du fromage	17
CHAPITRE II: FROMAGE TRADITIONNEL BOUHEZZA	8
1. Produits laitiers traditionnels Algériens	20
1.1. Lait fermenté (lben et Rayeb)	20
1.2. Dérivés laitiers gras (zebda et smen)	20
1.3. Fromages	21
2. Fromage traditionnel « Bouhezza »	21
2.1. Définition.....	21
2.2. Fabrication de « Bouhezza »	22
2.3. Caractéristiques physicochimiques et microbiologiques.....	24
3. Propriétés rhéologiques et structural des fromages.....	27
3.1. Définition de la rhéologie	27
3.2. Texture des fromages.....	28
3.3. Principales méthodes de mesure de la texture	29
Conclusion.....	32
Références bibliographiques.....	33

Résumé

Le large éventail de fromages d'aujourd'hui peut être classé en fonction du pays d'origine, du procédé de fabrication ou d'une propriété d'utilisation finale. Le fromage Bouhezza occupe une place socio-économique très importante établie dans l'environnement rural et périurbain. C'est un fromage traditionnel de la région Est de l'Algérie fabriqué à partir de différents types de lait (chèvre, mouton et vache), affiné dans un sac en peau de chèvre ou de mouton appelé Chekoua ou djeld de Bouhezza traité principalement avec du sel et de genièvre où se produit une fermentation spontanée du lait, «lben». Le lben est obtenu par barattage et écrémage partiel du lait spontanément fermenté après production de beurre. Le fromage est généralement affiné dans les sacs de peau pendant un ou deux mois. Le processus final de fabrication du fromage est caractérisé par l'ajout de lait cru entier, qui permet de corriger la salinité et l'acidité du fromage. Avant consommation, le fromage est généralement épicé avec du piment rouge. La rhéologie est la branche qui vise à mesurer les propriétés des matériaux qui contrôlent leur déformation et leur comportement à l'écoulement lorsqu'ils sont soumis à des forces externes. Chaque fromage, à un instant donné de son affinage, constitue une entité rhéologique et nombreux paramètres sont susceptibles de modifier son comportement.

Mots clés : Fromage traditionnel, Bouhezza, Rhéologie, Texture.

Abstract:

The wide range of cheeses today can be categorized by the country of origin, the manufacturing process or the end-use property. Bouhezza cheese occupies a very important socio-economic place established in the rural and peri-urban environment. It is a traditional cheese from the eastern region of Algeria made from different types of milk (goat, sheep and cow), matured in a goat or sheep skin bag called « Chekoua » or « Djeld de Bouhezza » treated mainly with salt and juniper where spontaneous fermentation of milk occurs, “lben”. Lben is obtained by churning and partial skimming of spontaneously fermented milk after the production of butter. The cheese is usually ripened in the skin bags for one or two months. The final cheese making process is characterized by the addition of whole raw milk, which corrects the cheese’s salinity and acidity. Before consumption, the cheese is generally spiced with red pepper. Rheology is the branch that aims to measure the properties of materials that control their deformation and flow behavior when subjected to external forces. Each cheese, at a given moment in its maturing process, constitutes a rheological entity and many parameters are likely to modify its behavior.

Keywords: Traditional cheese, Bouhezza, Rheology, Texture.

ملخص:

يتميز الجبن اليوم بأنواعه وأشكاله المختلفة والتي يمكن تصنيفها اما حسب بلد المنشأ، عملية التصنيع أو خاصية الاستخدام النهائي. يحتل جبن بوهزة مكانة اجتماعية واقتصادية مهمة للغاية في البيئة الريفية وشبه الحضرية. هو جبن تقليدي من الشرق الجزائري مصنوع من انواع مختلفة من الحليب (جلب الماعز، الاغنام، البقر) ينضج في كيس من جلد الماعز يسمى « شكوا » او « جلد بوهزة » معالج بشكل اساسي بالملح و العرعر والتي ينتج عنها تخمر تلقائي للحليب او ما يعرف بـ « اللبن ». يتم الحصول على اللبن عن طريق الخفق والقشط الجزئي للحليب المخمر تلقائيا بعد انتاج الزبدة. ينضج الجبن عادة في أكياس الجلد لمدة شهر أو شهرين. تتميز مرحلة صنع الجبن النهائية بإضافة الحليب الخام الكامل، مما يسمح بتعديل ملوحة وحموضة الجبن. قبل الاستهلاك، عموما يُتَبَّل الجبن بالفلفل الأحمر. الريولوجيا هي الفرع الذي يهدف إلى قياس خواص المواد التي تتحكم في التشوهات و سلوك التدفق عندما تتعرض لقوى خارجية . تشكل كل جبنة ، في وقت معين أثناء نضجها ، كياناً ريولوجياً والعديد من المعايير عرضة لتعديل سلوكها.

الكلمات المفتاحية: جبن تقليدي، بوهزة ، ريولوجيا ، بنية.

Liste des abréviations et acronymes

		Symboles
%	Pourcentage	
° C	Degré celsius	
α	Alpha	
β	Béta	
A		
(aw)	Activité de l'eau	
C		
c-à-d	C'est-à-dire	
CO ₂	Le dioxyde de carbone.	
CMP	caséinomqcropeptide	
E		
Exp	Exemple	
F		
FAO/WHO	Codex alimentarius.	
FAO	Food and Agriculture Organisation	
G		
g/l	Gramme par litre	
H		
h	Heure	
I		
ISO	Organisation internationale de normalisation	
K		
κ -caséine	Caséine kappa	
L		
L	Litre	
Log	Logarithme	
P		
Ph	Potentiel d'hydrogène	
P	Propionibacterium.	
M		
min	Minute	
N		
NH ₃	Ammoniac	
N	nombre	
S		
Sp	Ecpèce	
SPP	<u>Sous-espèce</u>	

U

UFC Unité Formant Colonie

UTM Universal Testing Machine (machine d'essai
universelle).

W

WHO World Health Organization

Liste des figures

Figure 1 :	Représentation schématique du processus de coagulation acide.....	10
Figure 2 :	Représentation schématique du processus de coagulation enzymatique par la présure.....	12
Figure 3 :	Chekoua de Bouhezza.....	22
Figure 4 :	Schéma illustratif du procédé de fabrication du fromage «Bouhezza»	23
Figure 5 :	Conservation du Bouhezza dans la Chekoua et des récipients en céramique.....	24
Figure 6 :	Vue schématique d'une machine d'essai universelle (UTM).....	30

Liste des tableaux

Tableau 1 :	Principales transformations biochimiques au cours de l'affinage.....	14
Tableau 2 :	Évolution des principaux groupes de microorganismes (Log UFC/g) dans le fromage de Bouhezza à base du lait de vache lors de la fabrication et de l'affinage.....	26
Tableau 3 :	Composition chimique du fromage traditionnel de Bouhezza à base de lait de chèvre.....	26
Tableau 4 :	Évolution des principaux groupes de microorganismes(LogUFC/g) dans le fromage de Bouhezza à base du lait de chèvre lors de la fabrication et de l'affinage	27

INTRODUCTION

Introduction

La croissance du secteur des plats cuisinés ces dernières années s'est traduite par l'augmentation de la demande de fromage en tant qu'ingrédient alimentaire. Le fromage râpé, coupé en dés, tranché et même liquide a été développé pour répondre aux besoins de l'industrie alimentaire moderne, alors que les plats cuisinés continuent de gagner en popularité ([Bachmann, 2001](#)). On estime qu'il existe plus de 2000 variétés, et la liste pourrait encore s'allonger. La Fédération internationale du lait a estimé que la production mondiale de fromage en 2015 s'élevait à environ 23 millions de tonnes. Cette production était répartie sur six continents et comprenait du fromage fabriqué principalement à partir de lait de vache (20,7 millions de tonnes). Le reste est composé de fromages d'autres espèces (buffles, chèvres et moutons) ainsi que des fromages traditionnels qui n'apparaissent pas dans les statistiques nationales ([IDF, 2016](#); [Whitley, 2018](#)).

Les fromages traditionnels se caractérisent par un lien fort avec leur pays d'origine et reflètent l'histoire et la culture communautaires du produit. En Algérie, les produits locaux y compris les fromages ont tendance à disparaître du fait de l'industrialisation de la plupart des méthodes traditionnelles de préparation de nombreux produits régionaux. De plus, l'exode rural a provoqué l'abandon des pratiques rurales telles que la fabrication traditionnelle de ces produits ([Medjoudj et al., 2020](#)).

Bouhezza est un fromage traditionnel fabriqué à partir de différents types du lait (vache ou chèvre) dans la région de Chaouia située à l'Est Algérien. Sa fabrication est réalisée dans un sac en peau perméable appelé «Chekoua ou Jeld de Bouhezza». Ce fromage est fabriqué sans présure, ne subit aucun traitement thermique, l'autorégulation de la fabrication est basée sur le sel et l'acide produits par la microflore autochtone du lait qui contribuent à protéger le produit vis-à-vis de la flore de contamination et les germes pathogènes, et ainsi conserver le fromage en toute sécurité ([Medjoudj et al., 2017](#)).

Le fromage a une structure très complexe qui conduit à des différences, même au sein d'une même variété, résultant à la fois de facteurs de composition et des changements que ceux-ci subissent lors de l'affinage. La rhéologie du fromage est étudiée depuis le début des années 1950. Depuis lors, de nombreuses avancées ont eu lieu tant dans la technologie du fromage que dans la rhéologie. Le fromage devenant une partie importante de l'alimentation dans de nombreuses régions du monde, l'industrie fromagère a réagi en fabriquant de nouveaux types de fromages avec des textures variées pour répondre à des besoins variés et pour promouvoir l'utilisation du fromage à la fois comme fromage de table et comme

ingrédient alimentaire. Cette rafale de nouveaux fromages et applications et technologies de fabrication du fromage a également entraîné un besoin aigu de caractériser les attributs rhéologiques et texturaux des fromages pour assurer leur haute qualité. Ainsi, pour les rhéologues et les scientifiques de l'alimentation, le fromage fait partie des sujets d'étude les plus populaires ([Sundaram and Ak, 2003](#); [Diezhandino et al., 2016](#)).

Dans cette étude, différents aspects sont présentés comprenant des généralités sur les fromages à savoir leurs caractéristiques, leurs préparations, les différents types...etc. ainsi qu'un aperçu sur le fromage traditionnel Bouhezza et les propriétés rhéologiques. Cependant, la partie pratique de ce travail n'a pas été réalisée suite à la conjoncture sanitaire qu'ait connue le monde entier y compris notre pays ce qui nous a obligé de limiter notre travail à une revue bibliographique qui se compose principalement de deux chapitres : Généralités sur les fromages, le fromage traditionnel Bouhezza.

CHAPITRE

1

GENERALITES SUR LES FROMAGES

Tous les fromages partagent un ensemble de principes qui impliquent une matrice complexe de changements chimiques, biochimiques et microbiologiques interdépendants. Bien que certaines variétés soient consommées immédiatement après la fabrication sous forme de fromage frais, la plupart subissent une période ultérieure de vieillissement ou d'affinage, allant de plusieurs semaines à plusieurs années selon la variété, au cours de laquelle les caractéristiques sensorielles subissent des changements multiformes.

1. Définition du fromage

Le fromage est le nom générique d'un groupe de produits alimentaires à base de lait fermenté, produits dans une grande variété de saveurs et de formes à travers le monde ([Fox et al., 2004](#)).

Selon la définition du *Codex Alimentarius* ([Alimentarius, 1978](#)), le fromage est le produit laitier affiné ou non affiné, de consistance molle ou semi-dure, dure ou extra-dure qui peut être enrobé et dans lequel le rapport protéines de lactosérum/caséine ne dépasse pas celui du lait, et qui est obtenu:

- Soit par coagulation complète ou partielle des protéines du lait, du lait écrémé, du lait partiellement écrémé, de la crème, de la crème de lactosérum ou du babeurre, seuls ou en combinaison, grâce à l'action de la présure ou d'autres agents coagulants appropriés et par égouttage partiel du lactosérum résultant de cette coagulation, tout en respectant le principe selon lequel la fabrication du fromage entraîne la concentration des protéines du lait (notamment de la caséine), la teneur en protéines du fromage étant par conséquent nettement plus élevée que la teneur en protéines du mélange des matières premières qui a servi à la fabrication du fromage ;
- Soit par l'emploi de techniques de fabrication entraînant la coagulation des protéines du lait et/ou des produits provenant du lait, de façon à obtenir un produit fini ayant des caractéristiques physiques, chimiques et organoleptiques similaires à celles du produit défini à l'alinéa précédente.

2. Histoire et origine des fromages

Le fromage est l'une des formes les plus anciennes des produits alimentaires. Ce qui a peut-être commencé comme un caillage accidentel du lait, il a été affiné en fabrication de fromage. En plusieurs milliers d'années, la fabrication du fromage est passée d'un art à une quasi-science. Les variétés de fromages ont proliféré pour répondre à des conditions et des exigences variées, en particulier au cours de la dernière décennie ([Gunasekaran and Ak, 2002](#)).

Le mot fromage vient du moule qui est utilisé pour la fabrication. En Europe, les faisselles où le lait caillé était déposé s'appelaient les "Forma" en latin et "Formos" en grec. C'est qu'à partir du 12^{ème} siècle, le mot devient "Formage" ou "Fourmage" selon les régions. Généralement, le fromage a évolué dans le "Croissant fertile" entre le Tigre et l'Euphrate en Irak, il y a environ 8 000 ans. La révolution agricole s'est produite ici avec la domestication des plantes et des animaux. Vraisemblablement, l'homme s'est vite rendu compte de la valeur nutritive du lait produit par ses animaux domestiques et a réussi à partager le lait de la mère avec sa progéniture. Au Moyen-âge, la fabrication du fromage s'est grandement développée avec la découverte de l'utilisation de la présure lors du stockage et du transport du lait dans des outres fabriquées avec des estomacs d'animaux permettant de faire cailler le lait plus rapidement et donc d'augmenter leur conservation ([Fox et al., 2004](#)).

Dû aux bactéries contaminantes, le lait a une courte durée de conservation, en particulier dans les climats chauds. Par conséquent, il se peut que le lait aigre se sépare naturellement en caillé et petit-lait, le caillé solide fournissant un aliment comestible et nourrissant ([Fox et al., 1996](#)). Il est probable que les tribus nomades, disséminées du Moyen-Orient à l'Europe occidentale et à l'Asie du Sud et centrale, ont trouvé que les sacs en peau d'animal étaient un moyen utile de transporter le lait sur le dos des animaux lors de leurs déplacements. La fermentation des sucres du lait ferait cailler le lait et le mouvement de balancement briserait le caillé et donnerait du caillé solide et du petit-lait buvable. Le caillé serait enlevé, égoutté et légèrement salé pour fournir un aliment riche en protéines savoureux et nourrissant. Les Romains ont ensuite élevé cette fabrication de fromage brut à un semblant de technologie précoce et l'ont répandue dans diverses régions européennes. La raison fondamentale de la transformation délibérée du lait en fromage est de conserver un aliment périssable et de le convertir en un produit stable et stockable. Il élargit également la variété des aliments ([Vedamuthu and Washam, 1983](#)).

3. Bases de la fabrication du fromage

3.1. Composition du lait

Le lait est la matière première à partir de laquelle tous les fromages sont produits; par conséquent, les bases de la fabrication du fromage commencent par les bases de la chimie du lait. Le bref examen suivant des cinq composants fondamentaux du lait (c'est-à-dire l'eau, le lactose, les matières grasses, les protéines et les sels) jette les bases pour comprendre comment chaque composant contribue à la chimie et à la structure du fromage et à leur intégration les uns avec les autres.

3.1.1. Eau

Le lait contient environ 85% d'eau; donc l'eau est le composant le plus abondant du lait et sert de phase continue dont les composants solides (lactose, lipides, protéines, et sels) sont dispersés ([Walstra et al., 2006](#)). En raison de leur forte nature dipolaire, les molécules d'eau sont attirées les unes vers les autres et vers d'autres molécules et ions polaires; par conséquent, ils ont tendance à se regrouper étroitement par des liaisons hydrogène transitoires. En revanche, les molécules d'eau évitent les molécules non polaires et minimisent leur zone d'interface. Les constituants solides du lait restent dispersés dans toute la phase aqueuse car ils sont de nature polaire ou, dans le cas de la matière grasse du lait et de la caséine, sont emballés dans des structures macromoléculaires qui contiennent une couche de surface polaire qui permet à la structure d'interagir avec les molécules d'eau. La coagulation, la première étape cruciale de la fabrication du fromage, est réalisée en convertissant les protéines du lait (ou de la crème, ou du lactosérum ou du babeurre selon la variété du fromage) de leur forme polaire native à une forme non polaire. Lorsque cela se produit, la protéine est forcée de se séparer de la phase aqueuse par un processus qui emprisonne les graisses et les minéraux et, initialement, toute l'eau et les substances dissoutes. Ce phénomène, appelé coagulation, et le processus de synérèse (c'est-à-dire la contraction du caillé et l'expulsion de l'eau « lactosérum ») qui suit la coagulation donnent naissance à des particules de caillé discrètes à partir desquelles le fromage est fabriqué ([Johnson and Law, 2010](#)).

3.1.2. Lactose

Le lait contient environ 5% de lactose, ce qui est un disaccharide hautement polaire qui existe en solution. Par conséquent, lorsque l'eau du lait se sépare sous forme de lactosérum du caillé pendant la fabrication du fromage, elle transporte du lactose avec elle en proportion égale. Seule une petite fraction (généralement environ 5 %) de l'eau et du lactose du lait est finalement retenue dans le fromage. Le lactose est néanmoins vital pour la fabrication du fromage, car c'est le substrat que les bactéries lactiques fermentent en acide lactique pendant le processus de fabrication. La petite quantité de lactose résiduel qui est retenue dans le fromage nouvellement fabriqué a également un impact sur l'affinage de diverses manières, en fonction des acteurs microbiens qui fermentent finalement le lactose résiduel et des voies de fermentation qu'ils utilisent ([Donnelly, 2014](#)).

3.1.3. Matière grasse

Environ 98 % des matières grasses du lait sont constituées de triglycérides ([MacGibbon and Taylor, 2006](#)). Les triglycérides sont très non polaires et ne peuvent donc pas rester

dispersés dans l'eau à moins d'être conditionnés sous forme d'émulsion sous forme de gouttelettes recouvertes d'une couche de surface polaire. La matière grasse du lait existe sous forme de grosses gouttelettes de triglycérides ou de globules emballés dans une membrane phospholipidique polaire qui permet aux globules de rester dispersés dans le lait ([Keenan and Mather, 2006](#)).

Lors de la fabrication du fromage, les protéines du lait emprisonnent physiquement les globules gras lorsque les protéines se séparent de la phase aqueuse pendant la coagulation et la synérèse. Par conséquent, presque toute la matière grasse du lait (généralement 90 % ou plus) se concentre dans le fromage. La matière grasse du lait influence fortement à la fois la saveur et la texture du fromage. La texture est influencée d'une manière fortement dépendante de la température car les triglycérides de la matière grasse du lait possèdent un intervalle de fusion graduel; c'est-à-dire que la proportion de triglycérides non cristallisés (liquides) par rapport aux triglycérides cristallisés (solides) augmente progressivement avec l'augmentation de la température. À $< 5^{\circ}\text{C}$, la majorité des triglycérides dans les globules de graisse du lait sont cristallisés, formant des sphères solides dures. Les globules deviennent moins cristallisés et progressivement plus doux et plus fluides avec l'augmentation de la température, atteignant une liquidité totale autour de 38°C ([Wright and Marangoni, 2006](#)). Dans le fromage, cette transition se traduit par une texture plus douce et plus collante. La matière grasse du lait contribue à la saveur du fromage en raison de sa distribution typiquement élevée d'acides gras à chaîne courte dans les triglycérides. Lorsqu'ils sont libérés de la structure des triglycérides par hydrolyse enzymatique (c.-à-d. lipolyse), les acides gras à chaîne courte (de 4 à 12 atomes de carbone de longueur) sont très volatils et possèdent un arôme et saveur piquants qui contribuent aux caractéristiques sensorielles de nombreuses variétés de fromages ([Collins et al., 2004](#)).

3.1.4. Protéines

Les protéines du lait sont composée de deux familles distinctes, appelées les caséines, qui représentent environ 80 % de la protéine totale, et les protéines du lactosérum, qui représentent les 20 % restants. Deux des trois grandes familles de fromages (les familles coagulées à l'acide et coagulées à la présure) résultent de la coagulation de la caséine seule. Pour ces fromages, les protéines du lactosérum ne participent pas à la coagulation et, comme leur nom l'indique, sont éliminées avec le lactosérum lors de la fabrication du fromage. En revanche, les protéines du lactosérum et les caséines participent à la coagulation et sont incorporées dans la troisième grande famille de fromages, ceux pour lesquels une

combinaison d'acide et de chaleur est utilisée pour initier la coagulation au début de la fabrication du fromage ([Donnelly, 2014](#)).

a. Caséines

Les caséines sont constituées de quatre composants principaux qui sont appelés α_s1 -, α_s2 -, β - et κ -caséine. Ils sont classés comme des phosphoprotéines, ce qui signifie qu'ils possèdent jusqu'à 13 groupes phosphate chargés négativement qui sont liés des acides aminés des molécules de caséine, dont la longueur varie de 169 à 209 acides aminés ([Swaisgood, 2003](#)). Les résidus de phosphosérine ont la capacité de former des liaisons ioniques avec les ions calcium, qui sont abondamment présents dans le lait; le calcium lié ioniquement, à son tour, forme des complexes ioniques avec des ions phosphate inorganiques qui sont également abondants dans le lait, créant ainsi des nanocristaux de phosphate de calcium colloïdal. En raison de cette caractéristique, la grande majorité des caséines dans le lait sont conditionnées sous forme de grandes structures macromoléculaires sphériques appelées micelles de caséine ([De Kruif and Holt, 2003](#)).

Les micelles de caséine présentent trois caractéristiques essentielles à la fabrication, à l'affinage et à la diversité des fromages. Premièrement, la surface de la micelle de caséine est très polaire en raison de sa forte concentration en κ -caséine. En revanche, l'intérieur de la micelle est comparativement non polaire. La surface polaire permet à la micelle d'interagir avec les molécules d'eau et de rester dispersée dans la phase aqueuse du lait. Deuxièmement, les micelles de caséine ont une capacité tampon prodigieuse (c'est-à-dire une capacité d'absorption des ions hydrogène) en raison de leur teneur élevée en phosphate de calcium. Enfin, il est important de reconnaître que les micelles de caséine possèdent de fortes capacités de rétention d'eau ([Walstra et al., 2006](#)).

b. Protéines du lactosérum

Les protéines du lactosérum existent principalement sous forme de monomères ou de dimères qui sont pliés en agencements tridimensionnels globulaires compacts ([Mietton et al., 2004](#)). Leurs états natifs pliés permettent aux protéines du lactosérum de rester dispersées dans la phase aqueuse du lait car les régions polaires de leurs squelettes d'acides aminés sont orientées vers l'extérieur vers la phase aqueuse et protègent les régions non polaires enfouies en dessous. Par conséquent, comme le lactose, les protéines de lactosérum sont éliminées avec le lactosérum en proportion égale à l'eau pendant la fabrication des fromages coagulés à l'acide et à la présure. Cependant, les protéines du lactosérum sont sensibles à la chaleur et commencent à se dénaturer et à se déplier à des températures supérieures à environ 79 °C,

exposant ainsi leurs régions hydrophobes non polaires. Les protéines du lactosérum deviennent encore plus sensibles à la chaleur lorsque le pH du lait passe de sa valeur physiologique (environ 6,7) à 6,0 ou moins (par exemple, en raison de la production d'acide lactique par les bactéries lactiques ou de l'ajout externe d'un acide). Les protéines de lactosérum dénaturées par la chaleur perdent leur capacité à interagir avec les molécules d'eau en raison de leurs régions hydrophobes exposées, ce qui les amène à s'agréger les unes avec les autres et avec les micelles de caséine. Les micelles de caséine deviennent également sensibles à la chaleur lorsque le pH du lait est abaissé, et cette instabilité combinée à la dénaturation des protéines de lactosérum et aux interactions caséine-protéines de lactosérum est à la base de la coagulation acide/chaleur ([Donnelly, 2014](#)).

3.1.5. Sels

Le lait contient à la fois des sels inorganiques et organiques, mais les ions calcium et phosphate sous forme de phosphate de calcium sont les plus importants du point de vue de la fabrication du fromage. Le calcium et le phosphore combinés représentent environ la moitié de la teneur totale en minéraux du lait. L'importance principale du phosphate de calcium réside dans son association avec les micelles de caséine ([Donnelly, 2014](#)).

3.2. Fabrication des fromages

Les processus de fabrication de la plupart des fromages partagent plusieurs étapes communes. Des variations à une ou plusieurs étapes de la fabrication produisent des fromages de textures et de saveurs différentes. Les étapes essentielles de la fabrication du fromage sont les suivantes :

3.2.1. Prétraitement du lait

Le lait utilisé pour la fabrication du fromage est normalement standardisé et traité thermiquement.

a. Standardisation

La standardisation du lait est devenue nécessaire pour garantir que le lait obtenu auprès de plusieurs producteurs ou laiteries soit d'une composition et d'un état «standard» tout au long de l'année. Il est également courant d'ajouter du calcium au lait pour ajuster le pH du lait à un niveau souhaité, connu sous le nom de pré-acidification. L'ajout de calcium accélère la coagulation ou réduit la quantité de présure nécessaire et produit un gel plus ferme.

b. Traitement thermique

Le traitement thermique du lait est principalement destiné à détruire la population microbienne nocive et les enzymes du lait cru afin d'assurer la sécurité et la qualité du produit ([Sundaram and Ak, 2003](#)).

Bien que le lait cru soit encore utilisé dans la fabrication du fromage commercial et à la ferme, la plupart du lait de fromage est maintenant pasteurisé, généralement juste avant l'utilisation. La pasteurisation est le traitement thermique le plus couramment utilisé (72 °C pendant 15 secondes), non seulement détruit la plupart des bactéries présentes, y compris les bactéries lactiques, mais inactive également de nombreuses enzymes. La pasteurisation du lait de fromage minimise le risque que le fromage serve de vecteur d'intoxication alimentaire ou de microorganismes pathogènes, de sorte que même du lait cru de haute qualité peut être inacceptable pour la fabrication du fromage. Un traitement thermique doux, appelé thermisation (60 à 65 °C pendant 15 à 30 secondes) peut également être utilisé avantageusement avant ou après la pasteurisation, l'objectif est de contrôler les bactéries psychrotrophes ([Sundaram and Ak, 2003](#); [Fox et al., 2004](#)).

3.2.2. Coagulation

La coagulation du lait est la première étape par excellence de la fabrication du fromage car elle initie un processus de concentration sélective qui entraîne la séparation de la plupart de la caséine et de la matière grasse du lait (ainsi que de moindres quantités de sels) sous forme de caillé de la plupart d'eau et de ses solides dissous. Les fromagers d'autrefois ont découvert trois façons différentes de coaguler le lait, ce qui a donné naissance à trois familles de fromages distinctes: les fromages coagulés à l'acide, coagulés à la présure et coagulés à l'acide et à la chaleur.

a. Coagulation par acidification

La coagulation acide se produit lorsque les bactéries lactiques inoffensives fermentent le lactose en acide lactique tout en grandissant et en se reproduisant à des populations élevées dans du lait chaud. Dans la pratique traditionnelle, les bactéries lactiques étaient naturellement présentes dans le lait cru en tant que contaminants accidentels provenant de sources environnementales telles que les surfaces des trayons et les surfaces des seaux, des cuves, des ustensiles, etc. Dans la pratique moderne, les espèces et souches des bactéries lactiques et leurs densités de population sont déterminées par la culture de départ qui est ajoutée au lait au début de la fabrication du fromage. Au fur et à mesure que l'acide lactique est produit et que le pH du lait diminue vers le point isoélectrique de la caséine à pH 4.6, l'accumulation d'ions

hydrogène neutralise essentiellement les surfaces polaires des micelles de caséine, les rendant ainsi incapables d'interagir avec les molécules d'eau. Les micelles sont ainsi forcées à interagir les unes avec les autres d'une manière particulière qui se traduit par la formation d'agrégats et de chaînes de micelles. Au fur et à mesure que la coagulation progresse, les chaînes micellaires augmentent en longueur et s'imbriquent les unes avec les autres pour former une matrice tridimensionnelle en forme de filet qui emprisonne initialement toute l'eau et les composants solides (principalement le lactose, la graisse, les protéines de lactosérum et les sels) du lait (**Fig. 1**). Au cours de plusieurs heures, le lait est ainsi transformé d'un état liquide à un gel doux et fragile, ou coagulum. La matrice de caséine qui donne au coagulum sa structure est fortement déminéralisée car la majeure partie du phosphate de calcium micellaire est dissoute par la concentration élevée d'acide lactique et le pH bas nécessaire pour initier la coagulation ([Parente, 2004](#)).

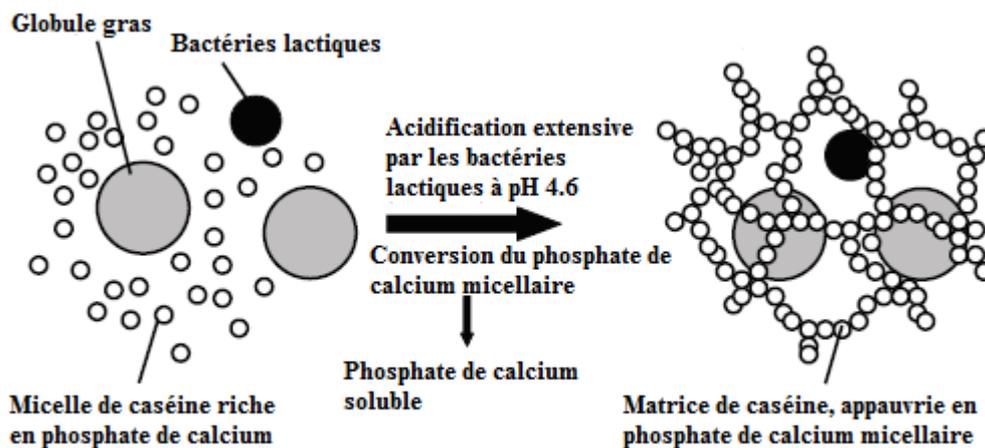


Figure 1. Représentation schématique du processus de coagulation acide ([Donnelly, 2014](#)).

b. Coagulation acide/chaueur

Bien que les protéines du lactosérum soient facilement dénaturées lors du chauffage, les micelles de caséine dans le lait frais sont très stables à la chaleur et restent en dispersion colloïdale à des températures allant jusqu'à 140 °C ([Fox et al., 2004](#)). Cependant, le lait moyennement acidifié (pH 6,2 à 5,4), soit par la production d'acide lactique par les bactéries lactiques, soit par l'addition d'un acide externe tel que le vinaigre, devient sensible à la coagulation induite par la chaleur à des températures relativement basses (par exemple, 85 °C), ce qui donne naissance à une deuxième famille de fromages plutôt petite connue sous le nom de fromages acidifiés/enrobés à chaud. La coagulation se produit parce que les protéines du lactosérum se déplient et perdent leur capacité à interagir avec l'eau sous l'influence

combinée de l'acide et de la chaleur. En même temps, les surfaces polaires des micelles de caséine sont neutralisées ([O'connell and Fox, 2003](#)). Cela amène les protéines du lactosérum dénaturées à se fixer sur les surfaces micellaires et les micelles à s'agréger en grappes qui emprisonnent les globules de graisse. Les flocs ou particules de caillé résultants flottent alors à la surface et sont séparés du lactosérum avec un tamis ou une poche perforée. Le caillé peut ensuite s'égoutter et, dans certains cas, être pressé. La famille des fromages coagulés à l'acide et à la chaleur a une teneur en humidité élevée (environ 50 à 80 %), ce qui, en combinaison avec leurs valeurs de pH généralement élevées, rend la plupart de ces fromages très sensibles à l'altération microbienne ([Kamber, 2007](#)).

c. Coagulation enzymatique

La majorité des fromages sont produits par coagulation enzymatique (présure). La présure fait référence à un groupe de protéinases qui coupent préférentiellement la κ -caséine à la surface des micelles de caséine lorsqu'elles sont ajoutées au lait, amorçant ainsi la coagulation ([Horne and Banks, 2004](#)). Dans les pratiques traditionnelles et modernes, les enzymes présure proviennent de diverses sources animales, végétales et microbiennes. Techniquement, le terme présure est limité aux enzymes dérivées de la caillette des ruminants; les enzymes coagulantes provenant d'autres sources sont simplement appelées coagulants ou substituts de présure ([Andren, 2003](#)).

La coagulation de la présure se produit selon un processus en deux étapes qui est caractérisé par une phase enzymatique et une phase non enzymatique ([Harboe and Budtz, 1999](#)). Quelle que soit la source, toutes les enzymes présure initient la phase enzymatique en hydrolysant la κ -caséine, ce qui entraîne la libération de la région chargée et riche en glucides de la molécule, appelée caséinomacropéptide (CMP). Les enzymes présure coupent efficacement la couche polaire riche en glucides à la surface micellaire. Cela expose l'intérieur micellaire, qui devient non polaire dans l'environnement riche en calcium du lait, et cela déclenche la phase non enzymatique. Les micelles sphériques perdent leur capacité à interagir avec les molécules d'eau, les forçant à interagir les unes avec les autres pour former des agrégats et des chaînes micellaires, similaire au processus qui se produit lors de la coagulation acide. Au fur et à mesure que la coagulation progresse, les chaînes micellaires augmentent en longueur et s'emboîtent les uns avec les autres pour former une matrice tridimensionnelle en forme de filet qui emprisonne initialement toute l'eau et les composants solides (principalement le lactose, la graisse, les protéines du lactosérum et les minéraux) du lait (**Fig. 2**) ([Donnelly, 2014](#)).

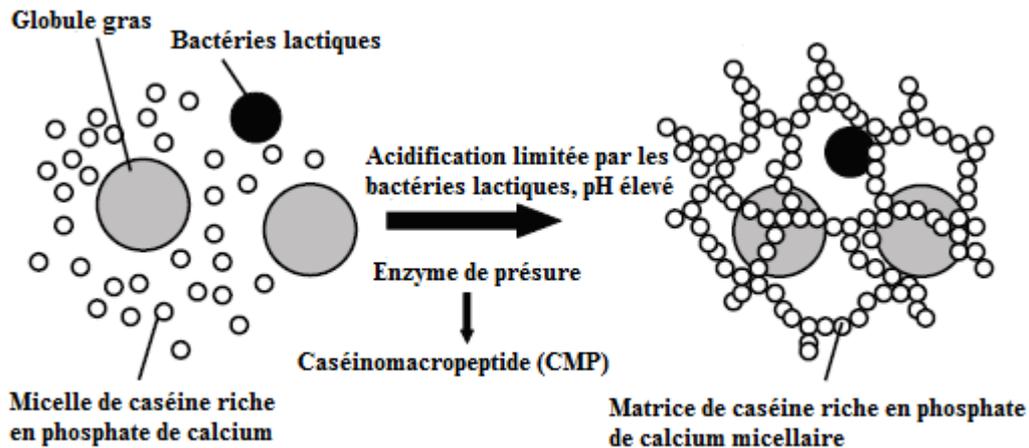


Figure 2. Représentation schématique du processus de coagulation enzymatique par la présure (Donnelly, 2014).

3.2.3. Egouttage

Il est nécessaire de séparer les particules du caillé du lactosérum libre afin que les particules puissent fusionner et former une entité plus grande qui deviendra le fromage. Deux approches ont été développées historiquement pour séparer le lactosérum. La méthode la plus ancienne est appelée trempage, par laquelle le mélange caillé-lactosérum est prélevé ou versé hors du récipient qui a été utilisé pour la coagulation et placé dans un récipient de drainage tel qu'un tamis en céramique ou un panier en osier. Le petit-lait s'écoule alors progressivement à travers les perforations du tamis ou du panier, laissant derrière lui un tapis de caillé. Les modifications ultérieures ont consisté à enfiler un tissu de mousseline le long du fond du récipient, sous le mélange caillé-lactosérum, à soulever le «sac» en tissu résultant du récipient et à le placer dans un moule pour l'égoutter et pressage. La vidange diffère du trempage en ce que le caillé reste dans la cuve utilisée pour la coagulation, et le petit-lait est évacué par une vanne équipée d'une passoire pour retenir le caillé. En variante, dans la pratique industrielle, le caillé et le lactosérum sont pompés de la cuve vers une table de drainage équipée d'un bac perforé qui draine le lactosérum et retient le caillé (Donnelly, 2014).

3.2.4. Pressage

Le pressage implique l'application d'une pression externe sur le caillé. Dans la pratique ancienne, le pressage était accompli en appuyant sur le caillé à la main ou en plaçant un poids tel qu'une pierre sur le dessus du caillé pendant qu'il égouttait. Certains fromages sont dits «non pressés» parce que le drainage par gravité seul est utilisé pour tricoter les particules de caillé ensemble. Le pressage aide à expulser le lactosérum et favorise une fusion plus complète des particules de caillé, résultant en une texture de fromage plus fermée avec moins

d'ouvertures. Plus tard, les fromagers ont développé une variété de dispositifs de pressage qui pourraient appliquer des pressions beaucoup plus élevées au caillé, permettant ainsi la production de gros fromages avec des textures très fermées et compactes et des surfaces serrées ([Donnelly, 2014](#)).

3.2.5. Salage

L'ajout du sel au fromage en grains crée une force motrice osmotique qui attire le lactosérum à la surface, où il est libéré ([Fox et al., 2000](#)). Ainsi, le salage est encore une autre étape utilisée pour expulser l'humidité du fromage. Plus l'absorption du sel est élevée, plus la libération du lactosérum est importante. Trois méthodes différentes ont été développées dans le passé pour incorporer du sel dans le fromage :

- Le sel sec peut être frotté sur la surface du fromage fini, où il se dissout dans la phase aqueuse et se diffuse progressivement à l'intérieur; de manière simultanée, l'humidité est tirée de la surface et s'évapore.
- Le sel peut également être appliqué sur la surface en immergeant le fromage dans la saumure concentrée. Le salage de saumure est particulièrement utile dans la fabrication de gros fromages à croûte car il permet une plus grande absorption du sel tout en déshydratant progressivement la surface en préparation de la formation de la croûte.
- Une troisième méthode d'application du sel consiste à mélanger le sel directement avec les particules de caillé avant que le caillé ne soit pressé ensemble pour former le fromage final ([Donnelly, 2014](#)).

3.2.6. Affinage (finition)

A l'exception des fromages à pâte fraîche, tous les types de fromages sont affinés. La finition, ou affinage, est le processus par lequel le fromage non affiné est transformé ou «affiné» jusqu'à son état de pleine maturité. La finition nécessite souvent une combinaison spécifique de conditions environnementales (température, humidité, environnement physique, présence d'une microflore indigène spécifique, etc.) et de manipulations physiques (frottement, grattage, retournement, lavage, etc.) qui sont effectuées par le fromager ou l'affineur (une personne qui se spécialise dans l'art de la finition). La finition peut prendre des semaines, des mois ou des années selon le fromage. Le processus d'affinage qui se produit peut être largement en deux, le corps (ou l'intérieur) du fromage et la surface. Dans le corps du fromage, des sous-zones d'affinage peuvent également se développer en raison des gradients de sel et d'humidité qui se forment pendant le salage ou des gradients de pH qui se développent pendant le vieillissement. D'un point de vue microbiologique, le corps et la

surface du fromage représentent généralement des environnements, le premier devenant très anaérobie lors de l'affinage et le second restant aérobie. Une exception importante à ceci est lorsque le fromage est pré-emballé et affiné dans un film barrière imperméable à l'oxygène, auquel le corps et la surface restent anaérobies (Fox et al., 2000).

En effet, lors de l'affinage, les fromages subissent des transformations biochimiques différentes (Tab. 1) ; ces transformations ont un impact sur la texture, la flaveur et les qualités nutritionnelles du produit fini (Sundaram and Ak, 2003).

Tableau 1. Principales transformations biochimiques au cours de l'affinage (Hebert, 2010).

Substrats	Type de transformation	Principaux produits formés
Protéines, peptide	Protéolyse	Peptide, acides aminés
Acides aminés	Désamination, Décarboxylation, Dégradation des chaînes latérales	NH ₃ , CO ₂ , amines, <i>acides α-cétoniques</i> , phénols, indole, méthane thiol et autres composés soufrés volatils
Amines	Désamination oxydative	NH ₃ , aldéhydes, acides
<i>α -cétoacides</i>	Décarboxylation	Aldéhydes
Triglycérides, glycérides partiels	Lipolyse	Acides gras, glycérides partiels, glycérol
Acides gras à chaîne moyenne ou courte	<i>β</i> -oxydation	Méthylcétones, CO ₂
Acides gras, éthanol, alcool aliphatiques ou aromatiques, thiols	Estérification	Esters Thioester
Lactose	Fermentation lactique (homo)	Acide lactique
	Fermentation lactique (hétéro)	Acide lactique, éthanol, acide acétique, CO ₂
	Fermentation alcoolique	Ethanol, CO ₂ , acide acétique, acétaldéhyde
Acide citrique	Assimilation (bactéries lactique)	CO ₂ , acétaldéhyde, acétoïne, diacétyl
Acide lactique	Fermentation propionique	Acide propionique, acide acétique, acide succinique, CO ₂

4. Classification

La vaste gamme des fromages d'aujourd'hui peut être classée selon le pays d'origine, le procédé de fabrication ou certaines propriétés d'utilisation finale ([Sundaram and Ak, 2003](#)). Selon [Pernodet \(1987\)](#) les fromages peuvent être classés en :

4.1. Fromages frais à pâte fraîche

Ce sont des fromages très humides qui ont subi un égouttage léger additionnés habituellement du sel, d'arômes, du sucre ou d'herbe. Ces fromages sont consommés sans être affinés. Ne subissant pas d'affinage, ils doivent être consommés rapidement. Les fromages frais contiennent jusqu'à 80 % d'eau. Ils sont généralement maigres (entre 0,1 et 13% de matière grasses) et peu énergétiques. Ils deviennent gras et énergétiques lorsqu'ils sont fabriqués avec la crème (jusqu'à 30 % de la matière grasse).

4.2. Fromage à pâte molles

C'est le produit d'un caillage mixte grâce à un mélange de ferments lactiques et de présure. Il présente une pâte molle presque fondante, conséquente à la protéolyse pendant l'affinage. Cette pâte est enrichie et revêtue de moisissures blanches du genre *Penicillium*. L'exemple le plus répandu est celui du camembert fabriqué par l'ajout du pénicillium spécifique : *Penicillium camembertii*. Le taux d'humidité varie entre 50 et 60 % et les matières grasses représentent 20 à 26 % du poids du fromage.

4.3. Fromage à pâte pressées

Ce sont des fromages obtenus par action de la présure, qui subissent un affinage après la fermentation lactique, et qui sont obtenus par égouttage avec découpage du caillé, brassage et pression. Leur humidité est moyenne (45 à 50 % pour les pâtes non cuites) ou faible (35 à 40 % pour les pâtes non cuites ou très brassées). Leur conservation est améliorée par le froid. Exemple : le cheddar.

4.4. Fromage à pâte pressée et cuite

Ce sont des fromages de gros format caractérisés par la présence d'ouvertures conséquentes au développement des bactéries propioniques et ayant subi un traitement thermique. Exemple : le gruyère.

4.5. Fromage à pâtes persillées

Ce sont des fromages dont la pâte est sillonnée de l'intérieur, elle est verdâtre ou bleuâtre, constituées par les filaments mycéliens de la moisissure *Penicillium*. Le fromage le plus connu est le Roquefort produit par *Penicillium roqueforti*.

5. Écologie microbienne du fromage

De nombreux micro-organismes peuvent se développer dans le lait. Les bactéries lactiques sont la population dominante dans le lait cru mais aussi les populations psychrotrophes deviennent des composants majeurs du lait pendant la conservation au froid. Les microorganismes du lait peuvent avoir une contribution positive en améliorant les propriétés organoleptiques et texturales des produits laitiers ou un effet négatif, en raccourcissant la durée de conservation du lait pendant le stockage réfrigéré ([Montel et al., 2014](#); [Capodifoglio et al., 2016](#)).

5.1. Source de micro-organismes dans le fromage

Les microorganismes du fromage sont soit associés aux ingrédients utilisés dans la fabrication du fromage, soit aux composants de la culture de départ (ferments lactiques) ([Whitley, 2018](#)). Après avoir mis en place des procédures pour améliorer sa qualité hygiénique, le lait cru présente encore une diversité microbienne importante. La surface des trayons et les biofilms formés sur l'équipement de la traite peuvent être des sources directes de microorganismes. L'aliment et la salle de traite et l'étable peuvent également être des sources indirectes de micro-organismes ([Verdier-Metz et al., 2012](#)). Au total, plus de 100 genres et 400 espèces microbiennes ont été détectés dans le lait cru. Il s'agit principalement de bactéries Gram-négative (> 90 espèces), de bactéries Gram-positive (> 90 espèces), de bactéries lactiques (> 60 espèces), de levures (> 70 espèces) et de moisissures (> 40 espèces) ([Montel et al., 2014](#)).

5.2. Facteurs influençant la croissance des micro-organismes dans le fromage

Le processus de fabrication du fromage détermine la composition du fromage et les conditions environnementales auxquelles les micro-organismes devront faire face pendant le processus. La teneur en eau et en sel, le pH, le potentiel redox, la teneur en acide organique et les conditions de maturation contrôleront la croissance des micro-organismes dans le fromage ([Whitley, 2018](#)).

➤ Au cours des premières étapes de la fabrication du fromage, l'activité de l'eau (a_w) est proche de 1, favorisant la croissance de la plupart des micro-organismes. Cependant, après le drainage du lactosérum, le salage et pendant la maturation, les niveaux de a_w chutent à 0,988 et 0,917, valeurs nettement inférieures aux exigences optimales de nombreux microorganismes ([Beresford et al., 2001](#)).

➤ La concentration en sel, qui varie selon la variété du fromage, entraînerait une réduction ([Beresford et al., 2001](#)).

- Dans le caillé du fromage, les faibles valeurs de pH (4,5–5,3) inhibent la croissance des espèces sensibles aux acides ([Beuchat and Golden, 1989](#)).
- Dans la plupart des variétés de fromage, la coagulation a généralement lieu entre 30 °C et 37 °C, permettant la croissance de la plupart des microorganismes. Si une étape de cuisson (entre 37 °C et 54 °C) suit la coagulation, certains microorganismes pourraient être inhibés ([Fox et al., 1996](#)).
- Le potentiel redox du fromage, est l'un des principaux facteurs déterminant le type de microorganismes qui se développera dans le fromage. À l'intérieur du fromage anaérobie, seuls les microbes anaérobies obligatoires ou facultatifs se développent, alors qu'à la surface du fromage, se développent principalement des aérobie obligatoires ([Beresford et al., 2001](#)).

5.3. Microorganismes du fromage

5.3.1. Ferments lactiques

Les ferments lactiques sont une préparation microbienne d'un grand nombre de cellules d'au moins un microorganisme, sa fonction principale étant de provoquer une acidification rapide ([Leroy and De Vuyst, 2004](#)). L'ajout des ferments lactiques au lait pasteurisé permet de contrôler le processus de fermentation et d'obtenir un produit standardisé. Les ferments, ajoutés en grand nombre au lait, deviennent prédominantes dans le fromage, en particulier aux premiers stades de l'affinage. Ce processus, connu sous le nom d'autolyse, a été corrélé à une protéolyse accrue et est utilisé pour accélérer l'affinage du fromage ([Hannon et al., 2003](#)).

Les bactéries lactiques ont une longue histoire d'utilisation dans la production d'aliments fermentés. Ils améliorent la durée de conservation et la sécurité microbienne et améliorent la texture et contribuent au profil sensoriel du produit final. Les bactéries lactiques les plus souvent utilisés comme des ferments sont des membres des genres *Lactococcus*, *Lactobacillus*, *Streptococcus*, *Leuconostoc* et *Enterococcus*. *Lactococcus lactis* et *Leuconostoc spp.* sont parmi les espèces mésophiles utilisées (température de croissance optimale à 30 °C) et *Streptococcus thermophilus*, *Lactobacillus delbrueckii spp. bulgaricus* et *Lactobacillus helveticus* sont parmi les espèces thermophiles (température de croissance optimale à 42 °C) sont tous capables de fermenter le lactose ([Fox et al., 2004](#)). *Lactococcus lactis* est le principal constituant des ferments lactiques mésophiles utilisés dans le monde pour la production de nombreux produits laitiers fermentés ([Mills et al., 2010](#)).

5.3.2. Bactéries lactiques non fermentatives

Certaines bactéries lactiques ne sont pas ajoutées dans le cadre de fermentation. Elles appartiennent la flore autochtone du lait ou proviennent à partir de sources environnementales

ou technologiques ([Montel et al., 2014](#)). Elles deviennent une proportion importante de la flore de presque toutes les variétés de fromage et contribuent à la formation de la saveur pendant le processus d'affinage. Elles représentent un groupe très hétérogène, bien que les lactobacilles non fermentatives constituent la majorité de cette population, les *Lactococcus*, les *Pediococcus*, les entérocoques, *Leuconostoc sp.* et les bactéries lactiques thermophiles en font également partie ([Beresford et al., 2001](#)).

5.3.3. Bactéries propioniques

Le genre *Propionibacterium* comprend quatre espèces: *P. freudenreichii*, *P. acidipropionici*, *P. jensenii* et *P. thoenii* qui sont caractéristiques de la flore des fromages de type suisse. Ces bactéries métabolisent l'acide lactique en acide acétique et propionique et le CO₂, et jouent un rôle clé dans la formation d'acides gras libres, contribuant à la saveur et à l'apparence caractéristiques (formation des yeux) des fromages de type suisse ([Thierry et al., 2004](#)).

5.3.4. *Micrococcus* et *Staphylococcus*

Les *Micrococcus*, *Staphylococcus* et les bactéries corynéformes (*Arthrobacter*, *Brachybacterium*, *Brevibacterium*, *Corynebacterium*, *Microbacterium* et *Rhodococcus spp.*) sont des bactéries aérobies qui font partie de la flore de surface de nombreux types de fromages. Elles sont présentes en grand nombre à la surface des fromages affinés après désacidification de la surface du fromage par les moisissures et les levures et jouent un rôle important dans la détermination des caractéristiques finales de ces variétés ([Irlinger and Bergère, 1999](#); [Corsetti et al., 2001](#)).

5.3.5. Levures et moisissures

Les moisissures jouent un rôle important dans l'affinage des fromages affinés, où un consortium complexe de levures, de bactéries et de champignons filamenteux se forme pendant la phase de maturation ([Addis et al., 2001](#)). Leur contribution à la protéolyse et à la lipolyse conduit à des améliorations de la texture, de la saveur et de la qualité nutritionnelle du fromage ([Fox et al., 2004](#)). Les fromages affinés aux moisissures sont divisés en deux groupes: les fromages affinés à la moisissure de base et les fromages affinés à la moisissure en surface. Dans le premier groupe (exp. Roquefort), *Penicillium roqueforti* pousse et forme des veines bleues dans le fromage, alors que dans le second groupe (exp. camembert), *Penicillium camemberti* pousse sur la surface du fromage ([Beresford et al., 2001](#)).

En contre partie, les espèces de levure détectées dans le lait cru comprennent *Kluyveromyces marxianus*, *Kluyveromyces lactis*, *Rhodotorula mucilaginosa*, *Debaryomyces hansenii*, *Geotrichum candidum*, *G. catenulate*, *Pichia fermentans*, *Candida sake*, *Candida parapsilosis*, *Candida inconspicua*, *Trichosporon cutaneum*, *Trichosporon lactis*, *Cryptococcus curvatus*, *Cryptococcus carnescens* et *Cryptococcus victoriae*. Les levures fréquemment présentes dans le fromage appartiennent aux genres *Candida*, *Geotrichum*, *Kluyveromyces*, *Pichia*, *Rhodotorula*, *Saccharomyces*, *Trichosporon*, *Torulospora*, *Yarrowia* et *Zygosaccharomyces spp.* ([Beresford and Williams, 2004](#)).

5.3.6. Probiotiques

Les probiotiques sont définis comme des microorganismes vivants qui, lorsqu'ils sont administrés en quantités adéquates, confèrent un avantage sanitaire à l'hôte. Les microorganismes d'espèces des genres *Lactobacillus* et *Bifidobacterium* sont les principales bactéries Gram-positives actuellement caractérisées comme probiotiques, bien que plusieurs autres comme *Propionibacterium*, *Streptococcus*, *Bacillus*, *Enterococcus*, *Escherichia coli* et les levures sont également utilisés comme probiotiques ([FAO/WHO, 2001](#)).

CHAPITRE

2

FROMAGE TRADITIONNEL BOUHEZZA

1. Produits laitiers traditionnels Algériens

Il existe une très grande variété de produits laitiers dans le monde à savoir des laits fermentés, du beurre, des fromages selon la source du lait (vache, brebis, chèvre, etc.) et la technologie appliquée (traitement thermique, utilisation de levains, etc.) ([Fox et al., 2004](#)).

En Algérie les produits laitiers fermentés sont consommés traditionnellement ce qui reflète un aspect important de la culture Algérienne. La transformation traditionnelle du lait en produits laitiers traditionnels Algériens fait partie intégrante de l'héritage et a une grande importance culturelle médicinale et économique ([El Marrakchi and Hamama, 1996](#); [Lahsaoui, 2009](#)).

Cette transformation abondant dans certaines périodes de l'année a permis l'apparition d'une gamme de produits laitiers dont les boissons, les dérivés laitiers gras et les fromages. Cependant, plusieurs produits traditionnels sont actuellement en voie de disparition pour différentes raisons dont les plus importantes, la migration rurale et le changement des habitudes alimentaires ([Aissaoui et al., 2006](#); [Bendimerad, 2013](#)).

1.1. Lait fermenté (Iben et Rayeb)

Le lait caillé ou « Rayeb », est un produit qui n'a pas subi un traitement thermique préalable et laissé fermenter à une température ambiante durant une période qui varie de 24h à 72h selon la saison jusqu'à l'obtention d'un caillé ([Touati, 1990](#)).

Le Iben est issu du barattage puis de l'écémage du Rayeb. Le lait est abandonné à lui-même jusqu'à sa coagulation à température ambiante et dure 24h à 48h selon la saison. Le barattage qui lui succède dure 30 à 40 minutes. A la fin du barattage, on ajoute généralement un certain volume d'eau tiède (environ 10 % du volume du lait), de façon à ramener la température de l'ensemble à un niveau convenable au rassemblement des grains du beurre ([Benkerroum and Tamime, 2004](#)).

1.2. Dérivés laitiers gras (zebda et smen)

Selon la norme du Codex Alimentaire ([Alimentarius, 2011](#)), le beurre est un «produit gras dérivé exclusivement du lait et/ou de produits obtenus à partir du lait, principalement sous forme d'une émulsion du type eau dans l'huile». Pour le beurre frais (Zebda), il est obtenu après barattage du Rayeb. Ce dernier est parfois augmenté d'une quantité d'eau tiède (40-50 °C) à la fin du barattage pour favoriser l'agglomération des globules lipidiques et accroître le rendement en beurre. Les globules gras apparaissant en surface, et ils sont récupérés à la fin du barattage ([Bellakhdar, 2008](#)). Par contre, le Smen est défini comme le surplus du beurre

produit qui est transformé en beurre rancie par : lavage du beurre frais à l'eau tiède, saumurage et salage à sec ([Bendimerad, 2013](#)).

1.3. Fromages

En Algérie, il existe plusieurs types de fromages traditionnels qui peuvent se répartir en quatre catégories: les fromages frais qui regroupent « Jben, Mechouna, Ighounane, Aghoughlou, Kemariya, Oudiouan Oulli et Klila frais ». Le groupe des fromages affinés comprend « Bouhezza », alors que le type des fromages fondus regroupe « Medghissa ». Enfin, on trouve pour les fromages durs « Ioulsân, Takammart et Klila séché ([Leksir, 2018](#)).

2. Fromage traditionnel « Bouhezza »

Chaque fromage traditionnel provient de systèmes complexes qui lui donnent des caractéristiques organoleptiques spécifiques. Les différents éléments qui entrent dans la typicité de chaque fromage sont liés à divers facteurs de biodiversité, comme l'environnement, le climat, le pâturage, la race des animaux, l'utilisation du lait cru et de sa microflore naturelle, la technologie fromagère s'appuyant sur le savoir-faire unique des hommes et non pas sur une technologie automatisée, les outils historiques et enfin les conditions naturelles d'affinage ([Aissaoui et al., 2006](#)).

En Algérie, les fromages traditionnels sont peu nombreux, non entièrement recensés mais aussi peu étudiés ; environ dix types de fromages sont connus dans les différentes régions du pays ([Zitoun et al., 2011](#)). Parmi ces fromages, il se positionne le fromage traditionnel « Bouhezza ».

2.1. Définition

Le fromage « Bouhezza » est un fromage traditionnel affiné, à pâte molle connu depuis longtemps dans la région de Chaouia, à l'Est Algérien ([Leksir, 2018](#); [Boudalia et al., 2020](#)). Il est fabriqué à partir du lait de chèvre, de brebis, de vache ou d'un mélange et considéré non seulement comme un produit alimentaire mais aussi faisant partie intégrante de la vie des «Chaouias». La fabrication de «Bouhezza» a la particularité d'associer simultanément les étapes de coagulation, égouttage, salage et affinage. Le fromage est obtenu après transformation du «Lben» dans la «Chekoua» (peau de chèvre préalablement traitée au sel et au genièvre) ([Zitoun et al., 2011](#); [Medjoudj et al., 2017](#)).

Ce fromage est fabriqué sans présure, ne subit aucun traitement thermique; la fabrication est basée sur le sel et l'acide produits par la microflore indigène du lait. Ils contribuent à

protéger le produit vis-à-vis de la flore contaminée et des germes pathogènes, et ainsi à conserver le fromage en toute sécurité ([Medjoudj and Zidoune, 2018](#)).

2.2. Fabrication de « Bouhezza »

La préparation de Bouhezza débute habituellement en mois de mars jusqu'au mois de juin. Le lait utilisé dans la fabrication provient des différentes races de chèvre, de brebis et de vache, mais actuellement, c'est le lait de vache qui est le plus utilisé car c'est le plus disponible ([Zitoun et al., 2011](#)).

2.2.1. Préparation de Chekoua

La Chekoua est la peau animale entière (peau de chèvre ou de brebis, mais celle de la chèvre est la plus utilisée) qui a subi un traitement spécial pour donner la forme d'un récipient utilisé pour la fabrication de Bouhezza ([Belbeldi, 2013](#)). La Chekoua de Bouhezza se présente comme un sac souple et humide, ayant la couleur naturelle de la peau et se caractérise par une certaine perméabilité (**Fig. 3**). En effet elle a deux rôles essentielle : à la fois d'un contenant de la masse fromagère et l'autre d'un séparateur de phase (égouttage). C'est à travers les perforations naturelles de la peau que le lactosérum est coulé et la masse fromagère qui s'accumule au cours du temps ([Zitoun et al., 2012](#)).



Figure 3. Chekoua de Bouhezza ([Boudalia et al., 2020](#)).

2.2.2. Préparation du Iben (lait fermenté)

Le Iben utilisé pour la fabrication de Bouhezza est obtenu comme suit: le lait cru (3 L) subit les processus de fermentation et de coagulation pendant 24 à 36h à température

ambiante (25-30 °C). Le lait coagulé nommé «Rayeb» est baratté pendant 30 à 45 minutes et un peu d'eau tiède de 0,25 L à 20-25 °C est ajouté à ce mélange. Après un écrémage partiel, le lben récupéré est utilisé dans la fabrication de Bouhezza ([Medjoudj et al., 2017](#)).

2.2.3. Préparation du fromage

La préparation du fromage commence par l'introduction d'une quantité de lben (**Fig. 4**).

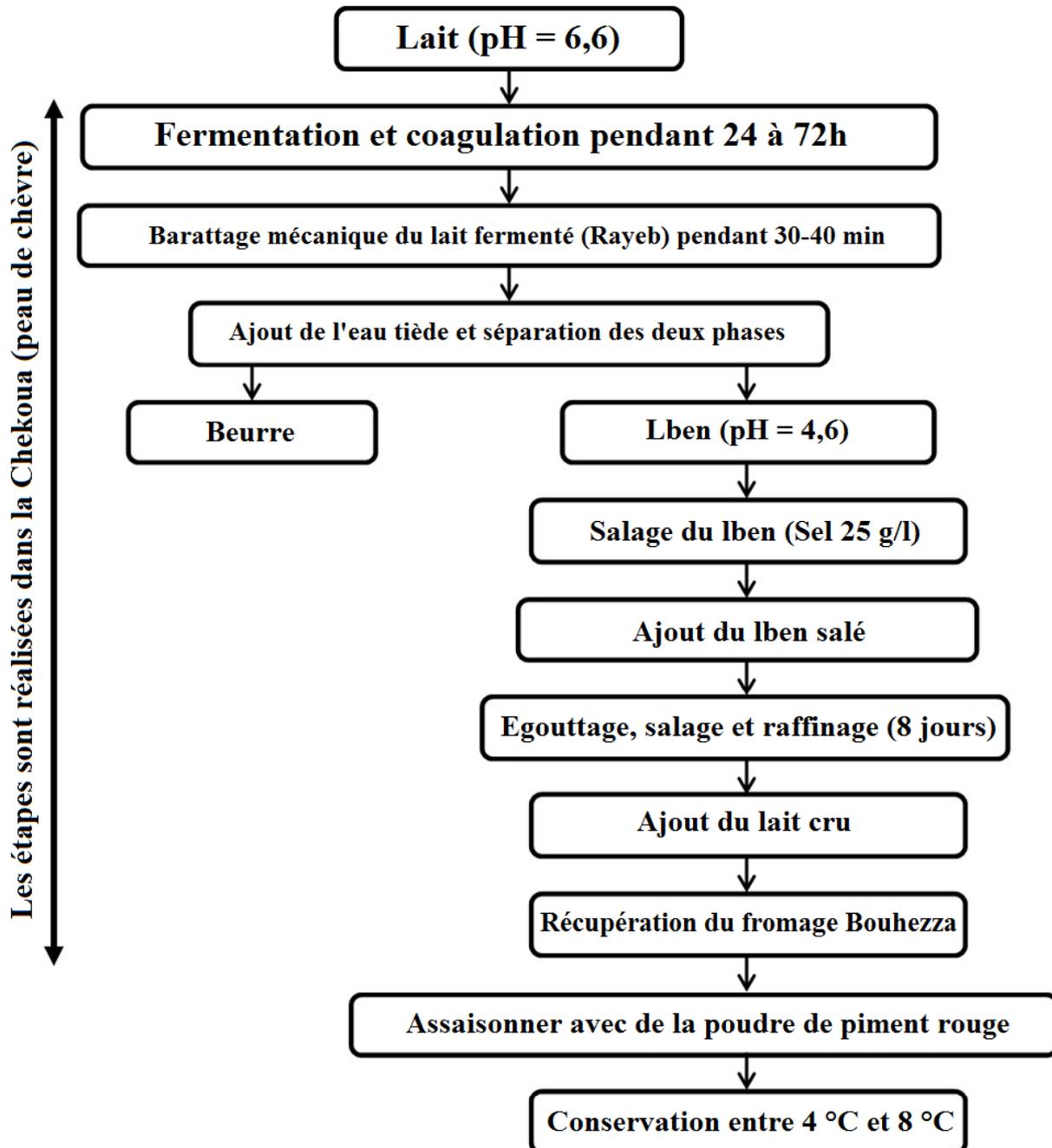


Figure 4. Schéma illustratif du procédé de fabrication du fromage «Bouhezza» ([Boudalia et al., 2020](#)).

Cette quantité est complétée durant toute la période de fabrication par des ajouts successifs de lben et enfin du lait cru ([Belbeldi, 2013](#)). Lors de la fabrication du fromage, la Chekoua est placée dans un endroit bien ventilé et nettoyé tous les jours et après chaque ajout de matière première. Le nettoyage se fait en scarifiant l'extérieur de Chekoua et en rinçant à l'eau pour éviter toute accumulation de lactosérum et / ou de phase soluble ([Medjoudj et al., 2017](#)).

Le salage se fait en masse et il est apprécié durant la fabrication par dégustation. Une fois le fromage est affiné, un ajout du lait cru est réalisé pour ajuster l'acidité et la salinité du fromage. A la fin, le fromage est épicé avec la poudre du piment rouge piquant qui est mélangée avec une quantité du lait cru lors du dernier ajout et bien homogénéisé. L'addition de H'rissa, poivron noir, vinaigre, et colorants (généralement le rouge) est aussi possible. Le fromage est le plus souvent conservé dans la Chekoua. Il peut être conservé dans d'autres récipients que la Chekoua soit en verre, en céramique, ou en plastique (**Fig. 5**). Bouhezza peut être consommé sous forme de pâte plus ou moins ferme, de tartine sur pain ou déshydraté après séchage et broyage manuel ([Zitoun et al., 2012](#)).



Figure 5. Conservation du Bouhezza dans la Chekoua et des récipients en céramique ([Boudalia et al., 2020](#)).

2.3. Caractéristiques physicochimiques et microbiologiques

Dans une étude réalisée sur le fromage de Bouhezza fabriqué à base du lait de vache, ([Zitoun et al., 2011](#)) ont montré que les teneurs en matière sèche, en matière grasse et en protéines ont augmenté dans le fromage au cours de dix semaines de fabrication. La matière sèche variait de 20,77g / 100g de la première semaine à 35,86g / 100g de la dixième semaine.

Toutes ces augmentations étaient probablement dues à des ajouts réguliers de lben et de lait cru pendant la fabrication et à un drainage continu du sérum à travers les perforations naturelles du sac de peau qui permet l'accumulation de composants insolubles et l'augmentation de la masse de fromage. Les modifications du taux de matière grasse ont commencé à partir de la quatrième semaine et augmentent principalement après la sixième semaine. La teneur en acide lactique a augmenté de manière significative dans le fromage et variait de 3,08g / 100g dans la forme finale de Bouhezza. Cette augmentation suggère que le fromage ne permet pas le développement de bactéries qui oxydent l'acide lactique et permettent la neutralisation du caillé. Jusqu'à dix semaines de fabrication, le pH est resté d'environ 4. Tout au long de la première semaine, le caillé de Bouhezza présente un taux de d'environ 35,60 g / 100 g de l'azote total. Cette protéolyse reste suffisamment importante pendant toute la durée de fabrication et atteint 37,5 g / 100 de l'azote total dans le fromage final.

Du point de vue microbiologique, la même étude ([Zitoun et al., 2011](#)) a montré que les bactéries lactiques étaient les principaux composants de la microflore de Bouhezza et leur évolution n'a pas subi de changements importants (**Tab. 2**). Les *Lactobacillus* ont évolué autour de 7-8 log UFC/g depuis la troisième semaine. Les *Lactococcus* se sont développés différemment, leur nombre a évolué entre 5 et 6 log UFC/g au cours des sept premières semaines de fabrication et après l'ajout du lait cru entier, ils augmentent significativement à 7 log UFC/g. Le nombre des entérobactéries n'a pas subi de changements significatifs au cours des dixièmes semaines de fabrication et leur numération était comprise entre environ 4 et 5-6 log UFC/g. Le nombre des levures et moisissures (4-5 log UFC/g) et la flore lipolytique (3-4 log UFC/g) étaient moins importantes et ne présentaient pas de variabilité. Le nombre de bactéries protéolytiques a augmenté de manière significative pendant la fabrication.

Dans une autre étude réalisée sur le fromage de Bouhezza à base du lait de chèvre, ([Medjoudj and Zidoune, 2018](#)) ont montré que pendant la fabrication il y avait une augmentation de la teneur en matières grasses, en protéines et en acidité titrable (**Tab. 3**). Le pH a diminué pendant l'affinage, ses valeurs étaient de 4,69 pour le jour 7 et de 3,99 pour le jour 50. La teneur en matière sèche augmente et atteint 30,60 % à la fin l'affinage. Le taux de la matière grasse et de protéines a également augmenté proportionnellement avec la matière sèche. Cette augmentation était due au drainage de l'eau à travers les pores de Chekoua. La teneur en sel et en cendres a présenté les mêmes changements pendant l'affinage.

Tableau 2. Évolution des principaux groupes de microorganismes (Log UFC/g) dans le fromage de Bouhezza à base du lait de vache lors de la fabrication et de l'affinage ([Zitoun et al., 2011](#)).

Groupe des microorganismes	Semaine	Fromage (n = 3)							
		1	2	3	4	6	7	8	10
Flore aérobie totale		7.71	7.87	7.50	8.67	8.08	8.73	8.02	8.03
<i>Lactobacillus</i>		6.56	6.40	7.56	7.51	8.17	7.41	8.14	7.56
<i>Lactococcus</i>		6.55	6.04	5.49	6.10	6.68	6.87	7.38	7.64
Entérobactéries		5.81	4.93	4.60	5.92	5.46	4.27	6.44	6.41
Levures et moisissures		4.35	5.16	5.43	5.84	5.25	5.69	5.90	4.31
Flore lipolytique		2.95	3.59	4.35	3.42	4.93	3.49	4.26	4.44
Flore protéolytique		5.44	5.83	6.00	6.04	5.49	6.76	7.89	7.92

Tableau 3. Composition chimique du fromage traditionnel Bouhezza à base de lait de chèvre ([Medjoudj and Zidoune, 2018](#)).

Jours/ Paramètres	7	15	21	28	34	49	64
pH	4.69	3.73	3.88	3.62	3.58	4.07	3.99
Acidité	0.85	0.87	1.02	1.25	1.23	1.41	1.59
Matière sèche	14.32	16.59	18.46	19.86	21.29	27.42	30.60
Protéines	9.92	9.52	12.46	16.41	17.94	17.03	15.65
Matière grasse	22.69	28.93	34.24	39.33	43.54	38.55	35.62
Azote total	ND	1.00	ND	1.18	ND	1.56	2.04
Cendres	2.30	2.44	2.51	2.36	1.93	1.98	1.24

Du point de vue microbiologique, ([Medjoudj and Zidoune, 2018](#)) ont montré que le nombre de la flore totale dans le fromage Bouhezza à base du lait de chèvre diminue de 9,23 log UFC/g (7 jours) à 7,51 log UFC/g (à la fin du processus d'affinage) (**Tab. 4**). Les bactéries lactiques présentes dans le lait présentaient en moyenne 8,40 log UFC/g (*Lactococcus*) et 8,51 log UFC/g (*Lactobacillus*). Elles ont augmenté après transformation du lait en lben avec un niveau de 9,99 et 8,68 log UFC/g, respectivement. Dans le fromage Bouhezza, la flore fongique est restée stable pendant 4 semaines avec des teneurs comprises entre 3 et 4 log

UFC/g. Cette flore a atteint 6,45 log UFC/g à la 4^{ème} semaine, puis a diminué au cours des trois semaines suivantes et a finalement atteint 6,53 log UFC/g à la 8^{ème} semaine.

Tableau 4. Évolution des principaux groupes de microorganismes (Log UFC/g) dans le fromage de Bouhezza à base du lait de chèvre lors de la fabrication et de l'affinage ([Medjoudj and Zidoune, 2018](#)).

Groupe des microorganismes	Semaine	1	7	15	21	28	34	42	49	64
Flore Totale		8.84	9.23	8.21	8.60	8.46	8.47	7.97	8.23	7.51
<i>Lactococcus</i>		9.54	9.70	9.40	8.50	9.47	8.41	8.03	7.82	7.67
<i>Lactobacillus</i>		8.37	8.41	8.36	8.59	8.58	8.63	7.52	6.92	7.31
Levures et moisissures		4.44	3.95	4.03	4.39	6.45	5.65	5.01	5.29	6.53

3. Propriétés rhéologiques et structural des fromages

Le terme rhéologie a été inventé par le professeur E.C. Bingham pour représenter une nouvelle branche de la mécanique concernée par l'étude de la déformation et de l'écoulement de la matière ([Reiner, 1964](#)). La rhéologie est maintenant un domaine bien reconnu avec de nombreuses applications dans différentes industries. Les professionnels de diverses disciplines (physiciens, chimistes, biologistes, mathématiciens) s'intéressent aux aspects théoriques et pratiques de la rhéologie ([Sundaram and Ak, 2003](#)).

3.1. Définition de la rhéologie

La rhéologie, du grec « rhé », qui signifie couler, est une branche de la physique qui est formellement définie comme l'étude de l'écoulement et de la déformation de la matière. La rhéologie alimentaire est une extension de cette notion aux produits alimentaires ([Fox et al., 1996](#)).

La rhéologie vise à mesurer les propriétés des matériaux qui contrôlent leur déformation et leur comportement à l'écoulement lorsqu'ils sont soumis à des forces externes. Lorsqu'ils sont soumis à des forces externes, les solides (ou les matériaux vraiment élastiques) se déforment, tandis que les liquides (ou les matériaux vraiment visqueux) s'écoulent ([Doraiswamy, 2002](#)).

La rhéologie traite de la relation entre trois variables: la déformation, la contrainte et le temps.

3.1.1. Déformation (strain)

Lorsqu'un matériau est soumis à une force externe, des points individuels du corps se déplaceront les uns par rapport aux autres, provoquant un changement de taille et de forme du matériau. La déformation est la mesure d'un tel changement de taille et de forme. Parfois, la déformation normale est exprimée en unités, par exemple, mm/mm ou en pourcentage, et la déformation de cisaillement en radian ([Sundaram and Ak, 2003](#)).

3.1.2. Contrainte (stress)

La contrainte est définie comme la force par unité de surface sur laquelle la force est appliquée. Deux types de contraintes peuvent agir sur une surface: la contrainte normale et la contrainte de cisaillement. Une contrainte mécanique appliquée de manière parallèle ou tangentielle à une face d'un matériau, par opposition aux contraintes normales qui sont appliquées de manière perpendiculaire. C'est le rapport d'une force à une surface ([Sundaram and Ak, 2003](#)).

3.1.3. Temps

La troisième variable rhéologique importante, le «temps», est introduite dans la mesure de la vitesse de déformation. Le concept de vitesse de déformation est nécessaire pour décrire le comportement d'écoulement des matériaux.

3.2. Texture des fromages

La texture d'un fromage est un paramètre important pour son classement et l'appréciation de sa qualité organoleptique. L'évaluation des propriétés texturales des fromages peut être faite par deux méthodes : une méthode sensorielle et des méthodes instrumentales.

C'est l'ensemble des propriétés physiques, mécaniques et rhéologiques d'un produit alimentaire, perçues par les organes des sens au moment de la consommation ([Adrian et al., 1995](#)). Autre définition, C'est l'ensemble des propriétés mécaniques, géométriques et de surface d'un produit perceptibles par les mécanorécepteurs, les récepteurs tactiles et, éventuellement, visuels et auditifs. Les propriétés mécaniques sont les propriétés liées à la réaction du produit à une contrainte divisées en cinq caractéristiques primaires: dureté, cohésion, viscosité, élasticité et adhérence. Par contre les propriétés géométriques sont les propriétés liées aux dimensions, à la forme et à l'arrangement des particules dans un produit. Enfin, les propriétés de surface sont les propriétés liées aux sensations telle que celles produites par l'eau et/ou les matières grasses ([ISO, 1994](#)).

3.3. Principales méthodes de mesure de la texture

Il existe diverses méthodes permettant d'évaluer les propriétés texturales d'un aliment. Elles sont de trois types : imitatives (l'appareil mime un phénomène naturel comme par exemple la mastication), empiriques (l'appareil mesure un ou plusieurs paramètres plus ou moins bien définis mais reliés à une caractéristique texturale comme par exemple la fermeté) ([Maurer, 1996](#)).

3.3.1. Tests imitatifs

Ces méthodes permettent de décrire, à l'aide d'un seul test, un ensemble de paramètres texturaux (cohésion, dureté, adhésivité, masticabilité) pouvant être reliés, de façon plus ou moins efficace, à des caractéristiques sensorielles. Les méthodes utilisées permettent de réaliser des profils d'analyse de texture en imitant :

- La morsure par les incisives ou les molaires ;
- La mastication par les molaires ;
- La compression entre la langue et le palais ;
- La compression avec un couteau ou une cuillère ;
- La compression et l'écoulement entre les doigts ([Maurer, 1996](#)).

3.3.2. Méthodes empiriques

Les méthodes empiriques sont nombreuses et permettent de mesurer divers paramètres liés à la texture (fermeté, propriétés d'écoulement). Ces méthodes sont essentiellement de 4 types :

➤ **Cisaillement**

Cette méthode suppose l'utilisation d'une boîte de cisaillement où l'échantillon est cisailé par un module comprenant dix lames. Elle permet de mesurer la résistance de l'échantillon au cisaillement exercé ([Maurer, 1996](#)).

➤ **Compression-pénétration**

La compression permet de mesurer de la résistance de l'échantillon à la compression entre deux plaques. Les mesures en compression et pénétration sont plus généralement appliquées à des produits solides et qui permettent d'étudier les paramètres texturaux de la fermeté, l'élasticité, la cohésivité, le caractère caoutchouteux et la masticabilité. Par contre la pénétration mesure la force nécessaire pour atteindre une certaine profondeur de pénétration d'une sonde (cône, aiguille, tige) ([Maurer, 1996](#)).

a. Test de compression : Compression uniaxiale

La compression uniaxiale est le test le plus populaire pour déterminer les propriétés rhéologiques des aliments, y compris le fromage. Ce test est populaire probablement parce qu'il est facile à exécuter et qu'il n'est pas nécessaire de saisir des échantillons. Presque tous les tests de compression sur le fromage sont effectués à l'aide de l'un des instruments polyvalents communément appelés Universal Testing Machine (UTM) (Figure). L'UTM fournit un contrôle précis de la déformation tout en mesurant avec précision la force. Les UTM peuvent être utilisés pour effectuer des essais de compression ainsi que de traction, de flexion et de cisaillement. Dans cet essai, un spécimen de forme et de taille connues est placé entre deux plaques rigides parallèles d'un UTM, et souvent la plaque supérieure est déplacée vers le bas à une vitesse (traverse) constante (c.-à-d. taux de déformation constant) tout en enregistrant la force comme un fonction du temps. Les paires de données force-temps résultantes sont converties en valeurs de contrainte et de déformation correspondantes à partir desquelles d'autres grandeurs rhéologiques telles que le module de Young ou le module d'élasticité peuvent être calculées (**Fig. 6**) ([Sundaram and Ak, 2003](#)).

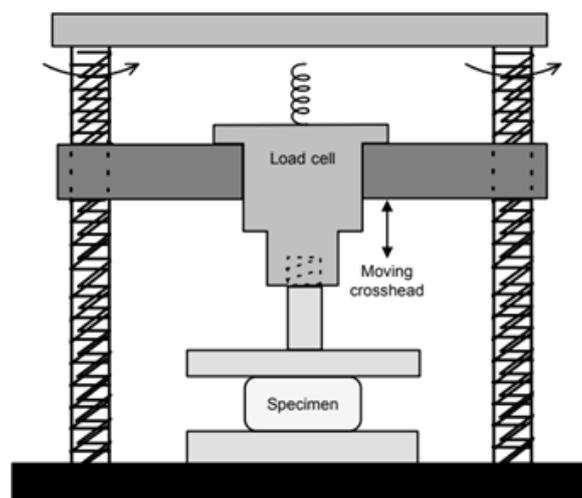


Figure 6. Vue schématique d'une machine d'essai universelle (UTM).

b. Test de pénétrométrie

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. 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 ([Louhichi, 2008](#)).

➤ **Extrusion capillaire**

Les méthodes en extrusion capillaire ont été largement employées pour mesurer les propriétés d'écoulement de matériaux à consistance pâteuse extrêmement différents. Les viscosimètres capillaires utilisés sont intéressants pour les fluides visqueux car la structure mécanique permet d'imposer de hautes vitesses de cisaillement ([Maurer, 1996](#)).

Le fromage présente une combinaison de déformation élémentaire relevant de l'élasticité, de la viscosité et de la plasticité lorsqu'il est soumis à une contrainte (pression, pénétration, cisaillement, etc). Ce comportement peut être différent d'un fromage à un autre selon l'importance et le type de contrainte imposée. Chaque fromage, à un instant donné de son affinage, constitue une entité rhéologique et nombreux paramètres sont susceptibles de modifier son comportement ([Zitoun et al., 2012](#)).

CONCLUSION

Conclusion

Le fromage est l'un des premiers et des plus populaires produits alimentaires. Ce qui a peut-être commencé comme un caillage accidentel du lait, il a été affiné en fabrication de fromage. En plusieurs milliers d'années, la fabrication du fromage est passée d'un art à une quasi-science. Les variétés de fromages ont proliféré pour répondre à des conditions et des exigences variées, en particulier au cours de la dernière décennie. Le fromage fait désormais partie des aliments consommés dans de nombreux pays.

Plusieurs fromages traditionnels existent dans les pays méditerranéens et comprenant l'Algérie. Beaucoup d'entre eux sont produits uniquement dans des zones géographiques restreintes et consommés localement. Le fromage Bouhezza est un fromage traditionnel. Cette typologie de fromage n'est produite que dans des zones géographiques restreintes du pays « Chaouia ». Il est fabriqué à très petite échelle et dépend de la disponibilité du lait, en fait, il peut être produit à partir de lait de chèvre, de brebis ou de vache et de leurs mélanges. Le processus de fabrication du fromage implique des opérations successives de coagulation, d'égouttage, de salage et pour certains fromages également d'affinage. Pour le fromage Bouhezza, la fabrication est différente. Les villageois produisent du fromage bouhezza à partir du lait cru. La particularité de son procédé est la survenue simultanée d'opérations spontanées de coagulation, salage, égouttage et maturation (affinage) dans un sac en peau animale naturelle et perméable appelé « Chekoua ».

La rhéologie, en tant que branche indépendante des sciences naturelles, est apparue il y a plus de 70 ans. La principale méthode de rhéologie consiste à construire des modèles, qui sont utiles dans la description qualitative ou quantitative des résultats expérimentaux du comportement mécanique de différents matériaux. Traditionnellement, la rhéologie est définie comme l'étude des déformations et des flux de matière qui consiste principalement à établir la relation entre les forces appliquées et les effets géométriques induits par ces forces sur le produit.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

Addis, E., Fleet, G., Cox, J., Kolak, D., Leung, T., 2001. The growth, properties and interactions of yeasts and bacteria associated with the maturation of Camembert and blue-veined cheeses. *International journal of food microbiology* 69, 25-36.

Adrian, J., Frangne, R., Potus, J., 1995. *La science alimentaire de A à Z, Technique et documentation Lavoisier.*

Aissaoui, O., Zitoun, M., Zidoune, N., 2006. Le fromage traditionnel algérien «Bouhezza». Séminaire d'animation régional. Technologie douce et procédés de séparation au service de la qualité et de l'innocuité des aliments. INSAT-Tunis, Tunisie.

Alimentarius, C., 1978. Codex general standard for cheese. CODEX STAN 283.

Alimentarius, C., 2011. Codex standard for butter, codex standard 279-1971. Milk and milk products, 36e37.

Andren, A., 2003. Rennets and coagulants, p 281–286. *Encyclopedia of Dairy Sciences* 1.

Bachmann, H.-P., 2001. Cheese analogues: a review. *International dairy journal* 11, 505-515.

Belbeldi, A., 2013. Contribution à la caractérisation du fromage Bouhezza: Contenu lipidique et vitamines. Mémoire de Diplôme en Sciences Alimentaires, Institut de la Nutrition, de l'Alimentation et des Technologies Agro-Alimentaires (INATAA), Alger.

Bellakhdar, J., 2008. Hommes et plantes au Maghreb: éléments pour une méthode en ethnobotanique, Lulu. com.

Bendimerad, N., 2013. Caractérisation phénotypique technologique et moléculaire d'isolats de bactéries lactiques de laits crus recueillis dans les régions de l'Ouest Algérien. Essai de fabrication de fromage frais type «Jben.».

Benkerroum, N., Tamime, A., 2004. Technology transfer of some Moroccan traditional dairy products (Iben, jben and smen) to small industrial scale. *Food Microbiology* 21, 399-413.

Beresford, T., Williams, A., 2004. The microbiology of cheese ripening. *Cheese: chemistry, physics and microbiology* 1, 287-318.

Beresford, T.P., Fitzsimons, N.A., Brennan, N.L., Cogan, T.M., 2001. Recent advances in cheese microbiology. *International dairy journal* 11, 259-274.

Beuchat, L.R., Golden, D.A., 1989. Antimicrobials occurring naturally in foods. *Food technology (USA)*.

- Boudalia, S., Boudebbouz, A., Gueroui, Y., Bousbia, A., Benada, M., Leksir, C., Boukaabene, Z., Saihi, A., Touaimia, H., Ait-Kaddour, A., 2020. Characterization of traditional Algerian cheese “Bouhezza” prepared with raw cow, goat and sheep milks. *Food Science and Technology*.
- Capodifoglio, E., Vidal, A.M.C., Lima, J.A.S., Bortoletto, F., D’Abreu, L.F., Gonçalves, A.C.S., Vaz, A.C.N., de Carvalho Balieiro, J.C., Netto, A.S., 2016. Lipolytic and proteolytic activity of *Pseudomonas* spp. isolated during milking and storage of refrigerated raw milk. *Journal of dairy science* 99, 5214-5223.
- Collins, Y., McSweeney, P., Wilkinson, M., 2004. Lipolysis and catabolism of fatty acids in cheese. *Cheese: chemistry, physics and microbiology* 1, 373-389.
- Corsetti, A., Rossi, J., Gobbetti, M., 2001. Interactions between yeasts and bacteria in the smear surface-ripened cheeses. *International journal of food microbiology* 69, 1-10.
- De Kruif, C., Holt, C., 2003. Casein micelle structure, functions and interactions. *Advanced dairy chemistry—1 proteins*, Springer, pp. 233-276.
- Diezhandino, I., Fernández, D., Sacristán, N., Combarros-Fuertes, P., Prieto, B., Fresno, J., 2016. Rheological, textural, colour and sensory characteristics of a Spanish blue cheese (Valdeón cheese). *LWT-Food Science and Technology* 65, 1118-1125.
- Donnelly, C.W., 2014. *Cheese and microbes*, ASM Press.
- Doraiswamy, D., 2002. The origins of rheology: a short historical excursion. *Rheology Bulletin* 71, 1-9.
- El Marrakchi, A., Hamama, A., 1996. Aspects hygiéniques du fromage frais de chèvre: Perspectives d'amélioration de la qualité. *FAO ANIMAL PRODUCTION AND HEALTH PAPER*, 24-32.
- FAO/WHO, E.C., 2001. Health and nutritional properties of probiotics in food including powder milk with live lactic acid bacteria. *World Health Organization Córdoba*.
- Fox, P., Guinee, T., Cogan, T., McSweeney, P., 2000. Cheese Rheology and texture in *Fundamentals of Cheese Science*.(pp. 305–333), Gaithersburg, MD. Aspen Publishers, Inc.[Google Scholar].
- Fox, P., O'connor, T., McSweeney, P., Guinee, T., O'brien, N., 1996. Cheese: physical, biochemical, and nutritional aspects. *Advances in food and nutrition research*, Elsevier, pp. 163-328.
- Fox, P.F., McSweeney, P.L., Cogan, T.M., Guinee, T.P., 2004. *Cheese: Chemistry, Physics and Microbiology, Volume 1: General Aspects*, Elsevier.
- Gunasekaran, S., Ak, M.M., 2002. *Cheese rheology and texture*, CRC press.

- Hannon, J., Wilkinson, M., Delahunty, C., Wallace, J., Morrissey, P., Beresford, T., 2003. Use of autolytic starter systems to accelerate the ripening of Cheddar cheese. *International dairy journal* 13, 313-323.
- Harboe, M., Budtz, P., 1999. The production, action and application of rennet and coagulants. *Technology of cheesemaking*, 33-65.
- 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*.
- Horne, D., Banks, J., 2004. Rennet-induced coagulation of milk. *Cheese: chemistry, physics and microbiology* 1, 47-70.
- IDF, 2016. International Dairy Federation. The World Dairy Situation (2016) Bulletin No. 484/2016, International Dairy Federation (INPA), Boulevard Auguste Reyers 70/B, 1030 Brussels, Belgium. . 71, 274-275.
- Irlinger, F., Bergère, J.-L., 1999. Use of conventional biochemical tests and analyses of ribotype patterns for classification of micrococci isolated from dairy products. *Journal of dairy research* 66, 91-103.
- ISO, 1994. ISO 11036: Sensory analysis-Methodology-Texture profile.
- Johnson, M., Law, B., 2010. The origins, development and basic operations of cheesemaking technology. *Technology of cheesemaking* 2, 68-69.
- Kamber, U., 2007. The traditional cheeses of Turkey: cheeses common to all regions. *Food reviews international* 24, 1-38.
- Keenan, T., Mather, I., 2006. Intracellular origin of milk fat globules and the nature of the milk fat globule membrane. *Advanced dairy chemistry volume 2 lipids*, Springer, pp. 137-171.
- Lahsaoui, S., 2009. Étude du procédé de fabrication d'un produit laitier traditionnel Algérien (Kilila)'. Thèse de Doctorat: Science Agronomie, université de Batna (Algérie).
- Leksir, C., 2018. Caractérisation, fabrication et consommation du dérivé laitier traditionnel 'Klila' dans l'Est Algérien. Université 8 mai 1945 de Guelma.
- Leroy, F., De Vuyst, L., 2004. Lactic acid bacteria as functional starter cultures for the food fermentation industry. *Trends in Food Science & Technology* 15, 67-78.

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.

MacGibbon, A., Taylor, M., 2006. Composition and structure of bovine milk lipids. *Advanced dairy chemistry volume 2 lipids*, Springer, pp. 1-42.

Maurer, K., 1996. Étude rhéologique et texturale de dispersions alimentaires: essai de quantification de leur complexité structurale au moyen du concept de géométrie fractale. Institut National Polytechnique de Lorraine.

Medjoudj, H., Aouar, L., Derouiche, M., Choiset, Y., Haertlé, T., Chobert, J.-M., Zidoune, M.N., Hayaloglu, A.A., 2020. Physicochemical, microbiological characterization and proteolysis of Algerian traditional Bouhezza cheese prepared from goat's raw milk. *Analytical Letters* 53, 905-921.

Medjoudj, H., Aouar, L., Zidoune, M.N., Hayaloglu, A.A., 2017. Proteolysis, microbiology, volatiles and sensory evaluation of Algerian traditional cheese Bouhezza made using goat's raw milk. *International journal of food properties* 20, S3246-S3265.

Medjoudj, H., Zidoune, M.N., 2018. Contribution à l'étude pour la caractérisation du fromage traditionnel «Bouhezza» au lait de chèvre. Université des Frères Mentouri, Constantine.

Mietton, B., Gaucheron, F., Salaün-Michel, F., 2004. Minéraux et transformations fromagères. *Minéraux et Produits Laitiers*, Tec & Doc, Paris, France, 472-563.

Mills, S., O'SULLIVAN, O., Hill, C., Fitzgerald, G., Ross, R.P., 2010. The changing face of dairy starter culture research: From genomics to economics. *International Journal of Dairy Technology* 63, 149-170.

Montel, M.-C., Buchin, S., Mallet, A., Delbes-Paus, C., Vuitton, D.A., Desmasures, N., Berthier, F., 2014. Traditional cheeses: rich and diverse microbiota with associated benefits. *International journal of food microbiology* 177, 136-154.

O'connell, J., Fox, P., 2003. Heat-induced coagulation of milk. *Advanced Dairy Chemistry—1 Proteins*, Springer, pp. 879-945.

Parente, E., 2004. Starter cultures: general aspects, p 123–147. In Fox PF, McSweeney PLH, Cogan TM, Guinee TP (ed), *Cheese: chemistry, physics and microbiology*, vol 1. General aspects. Elsevier Academic Press, London, United Kingdom.

Pernodet, G., 1987. Technologies comparee des differents types de caille. Fromage/coordonne par Andre Eck; comite de redaction, Andre Eck...[et al.].

Reiner, M., 1964. The Deborah number. *Physics today* 17, 62.

Sundaram, G., Ak, M.M., 2003. *Cheese rheology and texture*. Boca Raton, Florida: CRC Press LLC.

Swaisgood, H.E., 2003. Chemistry of the caseins. *Advanced dairy chemistry—1 Proteins*, Springer, pp. 139-201.

Thierry, A., Maillard, M.-B., Hervé, C., Richoux, R., Lortal, S., 2004. Varied volatile compounds are produced by *Propionibacterium freudenreichii* in Emmental cheese. *Food chemistry* 87, 439-446.

Touati, K., 1990. *Chimique d'un fromage artisanal algérien" la klila*. Mémoire d'ingénieur, INATAA, Constantine, Algérie.

Vedamuthu, E., Washam, C., 1983. *Cheese*.

Verdier-Metz, I., Gagne, G., Bornes, S., Monsallier, F., Veisseire, P., Delbès-Paus, C., Montel, M.-C., 2012. Cow teat skin, a potential source of diverse microbial populations for cheese production. *Applied and environmental microbiology* 78, 326-333.

Walstra, P., Wouters, J., Geurts, T., 2006. *Milk for liquid consumption*. Dairy Science and Technology, 2nd edition. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor and Francis Group, LLC, 421-445.

Whitley, L., 2018. *Global Cheesemaking Technology: Cheese Quality and Characteristics (2018)*, edited by Photis Papademas, Thomas Bintsis. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK. ISBN 978-1-119-04615-8. Price: hard copy£ 160, e-book£ 144.99. *International Journal of Dairy Technology* 71, 551-551.

Wright, A., Marangoni, A., 2006. Crystallization and rheological properties of milk fat. *Advanced Dairy Chemistry Volume 2 Lipids*, Springer, pp. 245-291.

Zitoun, O.A., Benatallah, L., Ghennam, E., Zidoune, M.N., 2011. Manufacture and characteristics of the traditional Algerian ripened bouhezza cheese. *Journal of Food, Agriculture & Environment* 9, 96-100.

Zitoun, O.A., Pediliggieri, C., Benatallah, L., Lortal, S., Licitra, G., Zidoune, M.N., Carpino, S., 2012. Bouhezza, a traditional Algerian raw milk cheese, made and ripened in goatskin bags. *Journal of Food, Agriculture and Environment* 10, 289-295.