



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 زيان عاشور-الجلفة

Université Ziane Achour-Djelfa
كلية علوم الطبيعة والحياة

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences Biologiques

Projet de fin d'étude

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

Filière: Sciences agronomiques

Spécialité: Production animale

Thème

Essai de fabrication du fromage de Ricotta à partir des lactosérums caprins (w. Djelfa)

Présenté par : Zeroug Soumia

Devant le jury composé de :

Président :	Azzouz M.	MCA
Examineur:	Laoun A.	MCA
Examinatrice:	Maidi L.	MAA
Encadreur:	Lahrech A.	MCA

Année universitaire : 2025/2026

Remerciements

Je remercie Dieu Tout-Puissant de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce travail.

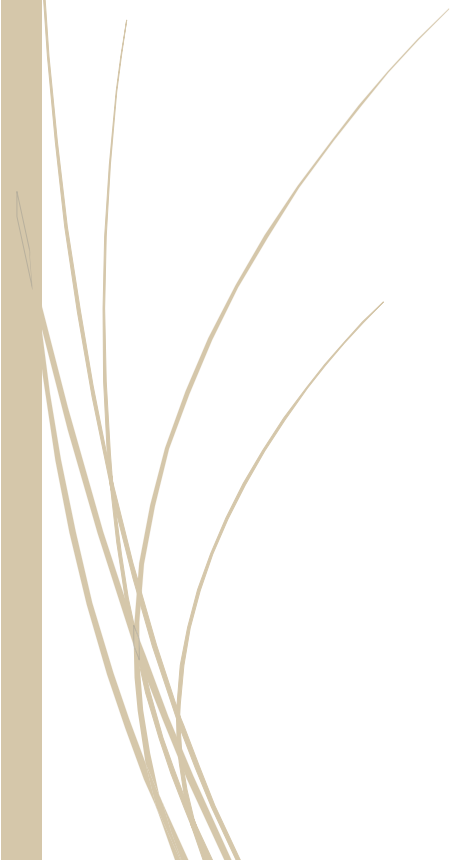
Avant tout, j'exprime ma profonde gratitude à ma directrice de thèse, Mme.Lahrech A., pour son excellent encadrement, son soutien constant et ses précieux conseils, qui ont considérablement enrichi mes connaissances.

Je remercie les membres du jury de soutenance Laoun A. et Maidi L. d'avoir accepté de relire cette thèse. Et bien sûr, je remercie Dr. Rebhi A. pour l'honneur qu'elle m'a fait de présider le jury d'examen.

J'exprime aussi ma gratitude à l'ensemble des enseignants du Département des sciences agricoles et vétérinaires de la Faculté des sciences naturelles et de la vie pour les connaissances et l'expertise qu'ils nous ont transmises tout au long de nos études

Enfin, j'adresse mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail, que ce soit par leurs conseils, leur soutien ou leurs encouragements.

Nous prions pour que Dieu nous accorde le succès dans cette entreprise, la bénisse et nous guide tout au long de son déroulement.



Dédicaces

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

(وَأَخِرُ دَعْوَاهُمْ أَنْ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ)

Le chemin fut long et semé d'embûches. Le rêve était lointain et le parcours difficile, mais j'y suis parvenu.

À mon père :

À celui qui a honoré mon nom des plus beaux titres, qui m'a soutenu sans relâche et qui m'a donné sans rien attendre en retour.

À mon premier soutien, ma force, mon pilier, mon refuge auprès de Dieu.

À ma fierté et ma gloire, que Dieu te protège.

À ma chère mère :

À celle qui m'a accueilli à bras ouverts et qui a apaisé mes souffrances par ses prières, le plus beau don de Dieu.

Le secret de ma force et de ma réussite.

Je ne saurais exprimer la profondeur de mon amour et mon immense gratitude. Que Dieu te protège.

À mes chers frères, mes compagnons et mon soutien indéfectible, je vous remercie de votre présence constante.

À mon fiancé, Mon partenaire et mon amour, qui a été à mes côtés à chaque étape, merci pour votre patience et vos encouragements.

À mes fidèles amis, compagnons de rêves et de souvenirs, merci d'être restés à mes côtés.

J'adresse également ma gratitude à tous les professeurs et directeurs de recherche qui m'ont guidé et accompagné tout au long de ce parcours universitaire.

Merci à tous ceux qui ont contribué à ce travail, de près ou de loin.

Soumia

Résumé

Le lait de chèvre est un aliment très nutritif, riche en protéines, matières grasses, lactose, vitamines et minéraux essentiels. Sa haute digestibilité et sa composition unique en font une excellente matière première pour la fabrication du fromage. Cependant, la fabrication du fromage génère un sous-produit liquide appelé lactosérum, qui représente environ 80 à 90 % du volume de lait transformé. Malgré sa richesse en nutriments tels que les protéines solubles, le lactose et les minéraux, le lactosérum est souvent jeté, ce qui pose un problème environnemental important en raison de sa forte teneur en matières organiques.

Cette étude porte sur la valorisation du lactosérum de chèvre par la production d'un fromage à pâte molle : la Ricotta à partir de lactosérum issu de la coagulation du lait de chèvre.

Les résultats ont montré un rendement en Ricotta compris entre 3,45 et 3,62 g. Les analyses Physico-chimiques réalisées sur le fromage et le lactosérum résiduel ont révélé la haute qualité du Produit final avec des taux de protéines qui baissent de 3,55% à 1,26% en faveur du lactosérum. La même tendance a été enregistrée pour la matière grasse avec 4,49% à 1,66%. Les lactosérums Ricotta ont présenté par contre une forte concentration de lactose, de densité et d'extrait sec dégraissé avec 5,43%, 1,0353 et 9,96% successivement suite à l'évaporation de l'eau lors du chauffage (coagulation).

Cette étude démontre que la valorisation du lactosérum par la production de Ricotta constitue une solution respectueuse de l'environnement (réduction de la pollution organique), économiquement viable (création de valeur ajoutée) et nutritionnellement avantageuse (récupération des protéines du lactosérum). Ce travail contribue également à la diversification des produits laitiers et au développement durable de la filière caprine en Algérie.

Mots-clés :

Coagulation thermique, Caractérisation physicochimique, Densité, Impact environnemental, Lactosérum, Lactose, Matière protéique, Matière grasse, Rendement fromager, Ricotta, Sous-Produit laitier, Valorisation,

الملخص

يُعدّ حليب الماعز غذاءً غنيًا بالعناصر الغذائية، فهو غني بالبروتين والدهون واللاكتوز والفيتامينات والمعادن الأساسية. وبفضل سهولة هضمه وتركيبته الفريدة، يُعتبر مادة خام ممتازة لصناعة الجبن. مع ذلك، تُنتج عملية صناعة الجبن سائلًا ثانويًا يُسمى مصّل اللبن، والذي يُمثل ما يقارب 80 إلى 90% من حجم الحليب المُصنّع. وعلى الرغم من غناه بالعناصر الغذائية، مثل البروتينات الذائبة واللاكتوز والمعادن، غالبًا ما يُهدر مصّل اللبن، مما يُشكل مشكلة بيئية كبيرة نظرًا لاحتوائه على نسبة عالية من المواد العضوية. تركز هذه الدراسة على الاستفادة من مصّل اللبن الناتج عن حليب الماعز من خلال إنتاج جبن طري: ريكوتا، المصنوع من مصّل اللبن المُستخلص من تخثر حليب الماعز.

أظهرت النتائج أن إنتاجية جبن الريكوتا تتراوح بين 3.45 و3.62 غرام. أظهرت التحليلات الفيزيائية والكيميائية التي أُجريت على مصّل اللبن المتبقي جودة عالية للمنتج النهائي، حيث انخفضت مستويات البروتين من 3.55% إلى 1.26% لصالح مصّل اللبن. ولوحظ الاتجاه نفسه بالنسبة لمحتوى الدهون، من 4.49% إلى 1.66%. من ناحية أخرى، أظهر مصّل اللبن المستخدم في صناعة الريكوتا تركيزًا عاليًا من اللاكتوز والكثافة والمواد الصلبة الخالية من الدهون، بنسب 5.43% و1.0353 و9.96% على التوالي، وذلك نتيجة تبخر الماء أثناء التسخين (التخثر).

تُبين هذه الدراسة أن استخدام مصّل اللبن في إنتاج الريكوتا حلٌّ صديق للبيئة (يُقلل التلوث العضوي)، ومُجدٍ اقتصاديًا (يُضيف قيمة)، ومفيد غذائيًا (يُعيد بروتينات مصّل اللبن). كما يُساهم هذا العمل في تنويع منتجات الألبان والتنمية المستدامة لقطاع تربية الماعز في الجزائر.

الكلمات المفتاحية

التخثير الحراري، الخصائص الفيزيائية والكيميائية، الكثافة، الأثر البيئي، مصّل اللبن، اللاكتوز، محتوى البروتين، محتوى الدهون، إنتاج الجبن، الريكوتا، منتجات الألبان الثانوية،

Sommaire

Remerciement

Dédicaces

Résumé

Sommaire

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction

Partie bibliographique

Chapitre I : Le Lait du chèvre.

I.1 Définition du lait.....	03
I.2 Composition physicochimique du lait de chèvre.....	04
I.2.1 Structure générale du lait de chèvre.....	04
I.2.2 Composition globale et variabilité.....	04
I.2.3 Composition protéique du lait.....	05
I.2.3.1 Généralités.....	05
I.2.3.2 Importance technologique.....	05
I.2.3.3 Types de caséines.....	05
I.3.4 Structure micellaire.....	06
I.2.4 Protéines du lactosérum.....	06

I.2.5 Composition lipidique.....	06
I.2.6 Composition glucidique.....	07
I.2.7 Composition minérale.....	08
I.2.8 Composition vitaminique.....	09
I.4 Valeur nutritionnelle du lait de chèvre.....	09
I.5 Facteurs de variation qualitative et quantitative de la production laitière caprine.....	10
I.6 Aptitude du lait de chèvre à la transformation fromagère.....	11
Chapitre II : Les Fromages Frais et la Ricotta	
II.1 Généralités sur les fromages.....	14
II.1.1 Historique des fromages.....	14
II.1.2 Définition du fromage frais.....	14
II.1.3 Fromage de chèvre : informations générales.....	15
II.1.4 Composition nutritionnelle des fromages frais.....	16
II.2 Technologie de fabrication des fromages frais.....	17
II.2.1 Principales étapes de la fabrication fromagère.....	17
II.2.1.1 Préparation du lait.....	17
II.2.1.2 Coagulation.....	17
II.2.1.3 Découpage du caillé.....	18
II.2.1.4 Égouttage.....	18
II.2.1.5 Moulage et pressage.....	18
II.2.1.6 Salage.....	18
II.2.1.7 Affinage.....	18
II.3 Classification des fromages.....	20

II.4 Les fromages issus du lactosérum.....	20
II.4.1 Groupes de fromages à base de lactosérum.....	20
II.4.1.1 Premier groupe des fromages de lactosérum.....	20
II.4.1.2 Deuxième groupe des fromages de lactosérum.....	20
II.4.2 Évolution de la production mondiale du lait et du fromage de chèvre.....	20
II.5 La Ricotta : origine et caractéristiques.....	22
II.5.1 Définition et caractéristiques.....	22
II.5.2 Différence fromage classique vs fromage de lactosérum.....	22
II.5.3 Fabrication traditionnelle et industrielle de la Ricotta.....	22
II.5.4 Valeur nutritionnelle de la Ricotta.....	23

Chapitre III : Le Lactosérum Caprin

III.1 Définition du lactosérum.....	24
III.2 Origine et formation du lactosérum.....	24
III.3 Types de lactosérum (doux et acide)	25
III.3.1 Lactosérum acide.....	25
III.3.2 Lactosérum doux.....	26
III.4 Composition physico-chimique du lactosérum caprin.....	26
III.4.1 Lactose.....	27
III.4.2 Protéines du lactosérum.....	27
III.4.2.1 β -Lactoglobuline.....	28
III.4.2.2 α -Lactalbumine.....	28
III.4.2.3 Immunoglobulines.....	28
III.4.2.4 Lactoferrine.....	29

III.4.3 Matières minérales.....	29
III.4.4 Vitamines et autres composés.....	29
III.5 Importance technologique du lactosérum.....	29
III.6 Valorisation du lactosérum dans l'industrie laitière.....	30
III.7 Impact environnemental du lactosérum.....	30
Chapitre IV : Matériels et Méthodes	
IV.1 Objectif.....	32
IV.2 Zone d'étude.....	32
IV.3 Échantillons.....	33
IV.4 Conditions d'échantillonnage.....	33
IV.5 Matériel.....	33
IV.5.1 Matière première.....	33
IV.5.1.1 Le lait.....	33
IV.5.2 Enzyme coagulante.....	33
IV.5.1.2 La présure.....	33
IV.5.2 L'acide acétique.....	34
IV.6 Méthodes d'analyse.....	34
IV.6.1 Caractérisation du lait de chèvre.....	34
IV.6.1.1 Le PH.....	34
IV.6.1.2 La densité.....	35
IV.6.1.3 Détermination de l'extrait sec total.....	35
IV.6.1.4 Détermination de la teneur en lactose.....	36
IV.6.1.5 Détermination de l'azote.....	36

IV.6.1.6 Détermination de la matière grasse.....	36
IV.6.2 Pratique fromagère.....	36
IV.6.2.1 Coagulation enzymatique.....	37
IV.6.2.2 Coagulation acide.....	37
IV.6.2.3 Coagulation du lactosérum : Ricotta.....	38
IV.6.3 Efficacité fromagère.....	39
IV.6.4 Caractérisation physicochimique des lactosérums (doux et acide).....	39
IV.6.4.1 Volume du lactosérum.....	40
IV.6.4.2 Densité du lactosérum.....	40
IV.6.4.3 pH du lactosérum.....	40
IV.7 Analyses statistiques.....	41

Chapitre V : Résultats et Discussion

V.1 Caractéristiques physicochimiques du lait de chèvre.....	44
V.1.1 La densité du lait.....	44
V.1.2 Le pH du lait.....	45
V.1.3 La matière grasse du lait.....	45
V.1.4 La matière protéique du lait.....	46
V.1.5 Le lactose du lait.....	46
V.1.6 L'extrait sec dégraissé du lait.....	47
V.1.7 La matière minérale du lait.....	47
V.2 Pratique fromagère et évaluation de son efficacité.....	47
V.2.1 Coagulation par présure.....	47
V.2.2 Coagulation acide.....	48

V.2.3 Coagulation des lactosérums : Ricotta.....	49
V.2.4 Efficacité de la pratique fromagère.....	51
V.3 Propriétés organoleptiques des fromages caprins obtenus.....	52
V.3.1 Texture des fromages.....	52
V.4 Caractérisation des lactosérums obtenus (doux, acide, Ricotta)	53
V.4.1 Aspect général des lactosérums.....	53
V.4.2 Caractéristiques physicochimiques des lactosérums obtenus.....	54
V.4.2.1 Volume des lactosérums extraits.....	54
V.4.2.1.1 Les volumes de lactosérum.....	55
V.4.2.2 La densité et l'extrait sec dégraissé des lactosérums.....	55
V.4.2.3 Le lactose des lactosérums.....	56
V.4.2.4 La matière grasse des lactosérums.....	56
V.4.2.5 Les protéines des lactosérums.....	57
Conclusion générale	58
Références bibliographiques.....	60

Liste des abréviations

AFNOR : Association Française de Normalisation

CV : Coefficient de Variation

DBO : Demande Biochimique en Oxygen

FAO : Food and Agriculture Organization

FTLQ : Fondation de Technologie Laitière du Québec

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

MG : Matière Grasse

MM : Matière Minérale

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

PR : Protéines

SNF : Solides Non Gras (Extrait sec dégraissé)

TB : Taux Butyreux

TP : Taux Protéique

UHT : Ultra Haute Température

Liste des figures

Numéros	Titres	Pages
Figure 01 :	Evolution mensuelle des courbes de production laitière, de matière grasse et de matière protéique du lait de chèvre au cours de la lactation (LE JAOUEN,1986)	10
Figure 02 :	Répartition de la production de fromage de chèvre par continent en 2005	16
Figure 03 :	Évolution mondiale de la production de fromage de chèvre (FAOSTAT, 2018).	21
Figure 04 :	Localisation de la zone d'étude : commune d'Aïn Maâbed, wilaya de Djelfa.....	32
Figure 05 :	chèvre croisement entre la race Arbia et la race Saanen (Saanen).....	34
Figure 06 :	Lactoscan.....	34
Figure 07 :	Détermination du pH du lait par pH-mètre électronique	35
Figure 08 :	Étuvage des échantillons de matière sèche de fromage pour analyse.....	36
Figure 09 :	Mise des échantillons dans un dessiccateur.....	36
Figure 10 :	Coagulation du lait.....	38
Figure.11 :	Formation du caillé (fromage).....	38
Figure 12 :	Coagulation du lactosérum	39
Figure 13 :	Mesure du volume du lactosérum.....	40
Figure 14 :	Schéma expérimental	42
Figure 15 :	Analyse physicochimique du lait.....	47
Figure 16	Comparaison des paramètres technologiques obtenus par coagulation enzymatique et coagulation acide du lait de chèvre.....	50
Figure 17	Comparaison des paramètres technologiques des produits obtenus par coagulation acide, coagulation enzymatique et fabrication de la ricotta.....	51
Figure 18	Fromage à la présure.....	53
Figure.19	Fromage acide.....	53
Figure 20 :	Ricotta acide.....	53
Figure 21 :	Comparaison des paramètres physico-chimiques du lactosérum produit par coagulation acide et par coagulation doux.....	55
Figure 22 :	Paramètres physico-chimiques des lactosérums produits par coagulation acid.....	57.

Liste des tableaux

Numéros	Titres	Pages
Tableau 01 :	Composition moyenne des laits de différentes espèces (DANIAUX, 2010)	04
Tableau 02 :	Caractéristiques des caséines caprines et bovines (MARTIN, 1996).....	05
Tableau 03 :	Composition lipidique des différents types de laits (PELLERIN, 2001).....	07
Tableau 04 :	Composition minérale moyenne du lait de différentes espèces (éléments minéraux majeurs mg/l) (GUEGUEN, 1996)	08
Tableau 05 :	Composition nutritionnelle moyenne de 100 g de fromage frais (FAO, 2013).....	17
Tableau 06 :	Les types des fromages (Sonago, 1994 ; Kora,2005)	19
Tableau 07 :	Composition de lactosérum acide et doux (en %) (Morr et Ha 1993).....	27
Tableau 08 :	Analyses physicochimiques du lait du lait de la chèvre Sannen.....	44
Tableau 09 :	des rendements réels et théoriques des différents fromages obtenus.....	52
Tableau 10 :	Caractéristiques physico-chimiques des lactosérums Obtenus.....	54

Introduction

Le lait constitue un aliment essentiel dans la ration alimentaire de la population algérienne et représente une source importante de protéines animales et de nutriments indispensables. Le secteur laitier occupe ainsi une place stratégique dans l'industrie agroalimentaire, bien qu'il soit fortement dépendant des importations pour satisfaire la demande nationale (SILAIT, 2008). Dans ce contexte, la valorisation des ressources locales et des sous-produits laitiers devient une nécessité économique et environnementale.

Parmi ces sous-produits, le lactosérum représente une fraction majeure issue de la fabrication fromagère, correspondant à environ 80 à 90 % du volume du lait transformé (MOLETTE, 2002). Il s'agit de la phase liquide obtenue après coagulation du lait par acidification ou action enzymatique, contenant encore des quantités importantes de lactose, de protéines solubles, de vitamines hydrosolubles et de sels minéraux (VEISSEYRE, 1995 ; DE WITT, 2001). Malgré sa richesse nutritionnelle, le lactosérum a longtemps été considéré comme un déchet industriel, destiné à l'alimentation animale ou rejeté dans l'environnement.

Cependant, ce rejet pose un problème environnemental majeur en raison de sa forte charge organique et de sa demande biologique en oxygène (DBO) très élevée, pouvant atteindre environ 40 000 mg/L, alors que les normes internationales de rejet sont nettement inférieures (GHALY ET AL., 1989 ; POIRIER, 1996). Cette situation nécessite donc le développement de solutions de valorisation adaptées afin de limiter son impact écologique.

Historiquement, le lactosérum est connu depuis plus de 3000 ans avant Jésus-Christ, lorsque les Bédouins observaient sa formation lors du transport et de la coagulation du lait (DE WITT, 2001). Longtemps considéré comme un sous-produit sans valeur, son exploitation industrielle n'a commencé à se développer qu'à partir des années 1970, notamment sous forme de concentrés et dérivés protéiques à haute valeur ajoutée (MULVIHILL ET FOX, 1989 ; HAMBRAEUS, 1992).

Aujourd'hui, le lactosérum est reconnu comme une matière première intéressante en raison de ses propriétés nutritionnelles et fonctionnelles, ce qui encourage son intégration dans différentes applications agroalimentaires. Dans cette perspective, sa valorisation constitue une alternative à la fois économique et écologique, permettant de réduire la pollution et de créer de nouveaux produits alimentaires.

Parmi les voies de valorisation du lactosérum la ricotta qui est un fromage frais traditionnel obtenu par coagulation thermique des protéines résiduelles présentes dans le lactosérum. Elle se distingue par sa texture douce, sa faible teneur en matières grasses et ses qualités nutritionnelles intéressantes, ce qui en fait un produit apprécié sur le plan diététique et gastronomique.

Dans ce contexte, ce travail vise à transformer le lait caprin en fromage en utilisant deux voies de coagulation (acide et présure) et valorisation des lactosérums obtenus en ricotta en évaluant ses caractéristiques physicochimiques et en analysant les paramètres influençant le rendement et la qualité du produit final. Cette étude s'inscrit également dans une démarche de valorisation des sous-produits laitiers et de réduction de l'impact environnemental de l'industrie fromagère.

Le présent document comprend deux parties : une synthèse bibliographique consacrée exclusivement à la description du lait, lactosérum caprin et les fromages caprin frais. Et une partie expérimentale qui présente les principales méthodes utilisées et les résultats obtenus pour les rendements fromagers ainsi que les caractéristiques physicochimiques des lactosérums.

Nos résultats seront complétés par une conclusion et quelques perspectives nécessaires pour optimiser une meilleure valorisation des lactosérums caprins.

CHAPITRE I

Lait de chèvre

I.1 Définition du lait

Le lait est un liquide biologique complexe sécrété par les glandes mammaires des mammifères. Il constitue un aliment complet destiné à la nutrition des nouveau-nés et se caractérise par une composition riche et équilibrée comprenant principalement de l'eau, des protéines, des lipides, du lactose, des vitamines et des sels minéraux. Bien que sa composition puisse varier selon l'espèce, il conserve une structure nutritionnelle similaire assurant des fonctions essentielles à la croissance et au développement (FOX & McSWEENEY, 2015 ; ROY et al., 2020).

Sur le plan physico-chimique, le lait est organisé en plusieurs phases : une phase lipidique sous forme de globules gras en émulsion, une phase protéique constituée principalement de caséines en suspension colloïdale, et une phase aqueuse contenant le lactose, les vitamines et les minéraux. Cette organisation lui confère une grande valeur nutritionnelle et fonctionnelle (CHILLIARD & SAUVANT, 1987 ; MAHÉ, 1996 ; ALAIS, 1998 ; FTLQ, 2002).

Le lait de chèvre, en particulier, est considéré comme l'un des laits les plus complets et les mieux équilibrés sur le plan nutritionnel. Il présente un intérêt particulier en alimentation humaine et peut constituer une alternative intéressante au lait de vache, grâce à ses caractéristiques physico-chimiques et sa digestibilité (JENOT et al., 2000 ; DOYON, 2005 ; WEHRMÜLLER & RYFFEL, 2007).

I.2 Composition physicochimique du lait de chèvre :

I.2.1 Structure générale du lait de chèvre

Le lait de chèvre est un système complexe constitué de trois phases principales :

- Phase aqueuse : elle contient le lactose, les sels minéraux solubles, les protéines sériques, l'azote non protéique ainsi qu'une partie des vitamines hydrosolubles.
- Phase micellaire : elle regroupe les caséines sous forme de micelles ainsi qu'une partie des minéraux insolubles.
- Phase dispersée : elle contient les globules gras, les cellules somatiques (leucocytes) et les micro-organismes.

Le lait contient également des vitamines (A, B, C, D, E, K) et des enzymes comme la lactopéroxydase, la phosphatase et d'autres systèmes enzymatiques.

Le lait de chèvre est pauvre en carotène, ce qui explique sa couleur plus blanche (BRUGÈRE, 2003)

I.2.2 Composition globale et variabilité

La composition du lait de chèvre est globalement proche de celle du lait de vache, notamment pour les protéines, les lipides et le lactose.

Cependant, cette composition varie selon : la race, l'alimentation, la saison, le stade de lactation

Tableau 1 Composition moyenne des laits de différentes espèces (DANIAUX, 2010)

Constituants	Lait de chèvre	Lait de vache
Protéines	29–31 %	32–34 %
Lipides	35–45 %	37–39 %
Glucides	41–44 %	48 %
Minéraux	~1 %	0,7 %

Le lait de chèvre présente une matière sèche d'environ 136 g/kg contre 125 g/kg pour le lait de vache (BRUGÈRE, 2003).

I.2.3 Composition protéique du lait

I.2.3.1 Généralités

Les protéines du lait sont réparties en deux fractions :

Les protéines solubles (protéines du lactosérum).

Les caséines, qui représentent la fraction principale.

Les caséines constituent environ 68 à 70 % des protéines totales du lait de chèvre (St GELAIS et al., 2000).

I.2.3.2 Importance technologique

Les caséines jouent un rôle essentiel dans la coagulation et le rendement fromager.

Dans le lait de chèvre, elles représentent environ 75,6 % des matières azotées totales, dont 70,9 % sont coagulables (GRAPPIN et al., 1981).

I.2.3.3 Types de caséines

Les caséines représentent environ 80% des protéines du lait des ruminants d'élevage alors qu'elles ne constituent que 50% des lactoprotéines humaines. Par fractionnement 04 types ont été isolées : α S1, α S2, β , κ , qui sont toutes phosphorylées (tableau 2). Pour les trois premières, qui ont des fonctions similaires, les sites de Phosphorylation sont regroupés par séries de 4 à 5 résidus de sérine phosphate qui constituent des ponts d'ancrage intermoléculaire, la liaison entre les chaînes protéiques étant assurées par un sel de calcium (phosphate de calcium colloïdal) (MARTIN, 1996).

On distingue quatre types de caséines : α S1, α S2, β et κ .

La caséine κ joue un rôle important dans la stabilité des micelles (ST GELAIS ET AL., 2000).

Tableau 2 : Caractéristiques des caséines caprines et bovines (MARTIN, 1996)

Caséines	α S1		β		α S2		κ	
C : chèvre / v: vache	Caprins	Bovins	Caprins	Bovins	Caprins	Bovins	Caprins	Bovins
Acides aminés(nombre)	199	199	207	209	208	207	171	169
% de la caséine totale	10*	38	48	38	20	11	22	13
Groupe mentphosphate	7/9	8/9	5/6	5	9/11	10/13	2/3	1/2

* : la proportion de la caséine α S1 dans la caséine totale varie, chez la chèvre de 0 à 25% selon le génotype, la valeur indiquée correspond à une moyenne.

I.2.3.4 Structure micellaire

Les caséines $\alpha S1$, $\alpha S2$ et κ sont associées au phosphate de calcium colloïdal.

La caséine κ assure la stabilité des micelles grâce à sa structure amphiphile, empêchant leur agrégation (MARTIN, 1996)

I.2.4 Protéines du lactosérum

Les protéines du lactosérum représentent environ 20 % des protéines du lait de chèvre.

Les principales sont :

La β -lactoglobuline,

L' α -lactalbumine.

Elles interviennent dans le transport de molécules, la synthèse du lactose et la protection immunitaire.

I.2.5 Composition lipidique

Les matières grasses du lait de chèvre sont présentes sous forme de globules gras en émulsion et jouent un rôle essentiel dans les qualités organoleptiques des produits laitiers, notamment la saveur et l'onctuosité des fromages (JENOT et al., 2000). Leur teneur est variable et dépend de plusieurs facteurs tels que l'espèce, la race, l'alimentation et le stade de lactation, avec une moyenne de 35 à 40 g/L chez la chèvre. Les lipides sont principalement constitués de triglycérides, accompagnés de phospholipides, de cholestérol et d'acides gras libres, avec une proportion importante d'acides gras à chaîne courte qui contribue au goût caractéristique du lait caprin (CHILLIARD, 1996). Sur le plan technologique, les matières grasses influencent la texture, le rendement fromager et le développement du goût, mais une lipolyse excessive peut entraîner des défauts de qualité, tandis qu'une lipolyse modérée participe à l'arôme spécifique du lait de chèvre (CHILLIARD, 1996 ; FTLQ, 2002)

Tableau 3 : Composition lipidique des différents types de laits (PELLERIN, 2001)

Lipides totaux en %	Lait de chèvre	Lait de vache	Lait de femme
Triglycérides	95	98	97
Cholestérol	0.4	0.3	0.6
Acides gras libres	0.6	0.4	0.5
Phospholipides	1.0	0.9	1.1

I.2.6 Composition glucidique

Le lactose est le principal glucide du lait de chèvre et constitue un substrat essentiel pour les bactéries lactiques lors des processus de fermentation (FTLQ, 2002). Ces bactéries hydrolysent le lactose en glucose et galactose grâce à la β -galactosidase, puis le transforment en acide lactique. Cette acidification entraîne la baisse du pH, favorise la déminéralisation des micelles de caséine et conduit à la formation du caillé, étape clé de la fabrication fromagère (St-GELAIS et al., 2000).

Sur le plan technologique, une partie du lactose non transformé reste dans la phase liquide appelée lactosérum (petit-lait), ce qui en fait un constituant important de ce sous-produit, influençant sa composition et sa valorisation industrielle.

I.2.7 Composition minérale

Le lait est une bonne source de minéraux et d'oligoéléments. La quantité de ces éléments peut varier selon le stade de lactation, la saison et l'alimentation de l'animal.

Le lait de chèvre contient principalement du calcium, du phosphore, du potassium, du magnésium et du chlore. Le calcium est présent en grande quantité et se trouve en partie lié aux caséines sous forme de phosphocaséinates.

La composition minérale du lait de chèvre est proche de celle du lait de vache. Cependant, le lait de chèvre est légèrement plus riche en calcium et en phosphore, tandis que le rapport Ca/P reste pratiquement similaire, autour de 1,3 (tableau 04). Les éléments comme le magnésium, le potassium et

le chlore sont également présents en quantités relativement plus élevées que dans le lait de vache (GUEGUEN, 1996).

Ces minéraux jouent un rôle important dans les propriétés technologiques du lait, notamment le pouvoir tampon et le processus de coagulation. Selon ST-GELAIS et al., (2000), en technologie fromagère, un lait faiblement tamponné coagule plus rapidement qu'un lait fortement tamponné. de plus, pour un même temps de coagulation, il faut une quantité moindre d'agent coagulant dans le premier cas par rapport au second.

Tableau 4 : Composition minérale moyenne du lait de différentes espèces (éléments minéraux majeurs mg/l) (GUEGUEN, 1996).

	Vache	Chèvre	Brebis
Calcium	1200	1260	1950
Phosphore	920	970	1900
Potassium	1500	1900	1400
Sodium	450	380	460
Chlore	1100	1600	1100
Magnésium	110	130	180
Rapport Ca : P	1.3	1.3	1.3

I.2.8 Composition vitaminique

La composition vitaminique du lait varie selon le type de lait (entier ou écrémé) ainsi que les traitements thermiques appliqués, car certaines vitamines sont sensibles à la chaleur et à la lumière. Le lait de chèvre se distingue par une teneur élevée en vitamine A (rétinol), l'absence de carotène expliquant sa couleur blanche, une richesse en vitamine B3 (niacine), ainsi qu'une teneur relativement faible en vitamines D et E, ces dernières jouant respectivement un rôle dans l'absorption du calcium et du

phosphore et dans l'action antioxydante (JAUBERT, 1996). Par ailleurs, le lait peut contenir différents micro-organismes tels que des bactéries, des levures et des moisissures, dont certaines bactéries lactiques utiles pour la fabrication fromagère et d'autres responsables d'altérations. Le lait est normalement stérile à la sortie de la mamelle, et sa contamination se produit principalement lors de la traite, de la manipulation ou du stockage (DROGOUL et GERMAIN, 1998).

I.3 Valeur nutritionnelle du lait de chèvre

Le lait de chèvre présente une qualité nutritionnelle particulièrement intéressante pour l'alimentation humaine. Il se distingue par une structure lipidique spécifique, notamment des globules gras de petite taille, ainsi qu'une coagulation plus rapide que celle des laits de vache, de brebis ou de bufflonne, ce qui contribue à une meilleure digestibilité (AGANGA et al., 2002). Sa richesse en acides gras à chaîne courte, tels que l'acide caprylique et caprique, ainsi que sa teneur relativement élevée en certains oligo-éléments comme le sélénium, lui confèrent un intérêt nutritionnel particulier, notamment pour les personnes présentant des troubles digestifs ou une sensibilité à certains laits (KNIGHTS et GARCIA, 1997).

Par ailleurs, la digestibilité globale du lait de chèvre est jugée supérieure à celle du lait de vache, tout en conservant une bonne acceptabilité organoleptique, et peut contribuer à l'amélioration de l'état nutritionnel dans certains cas de malnutrition, notamment chez l'enfant (TOUHAMI, 1996). D'une manière générale, le lait représente également une source importante de lactose, sucre qui favorise le développement d'une flore intestinale bénéfique et améliore l'absorption du calcium et des composés azotés (DEBRY, 2001). Sur le plan protéique, il se caractérise par une valeur nutritionnelle élevée grâce à l'équilibre de ses acides aminés essentiels et à leur bonne digestibilité, certaines protéines jouant aussi un rôle protecteur de l'organisme, notamment les immunoglobulines (DEBRY, 2001).

I.3 Facteurs de variation qualitative et quantitative de la production laitière caprine.

La production et la composition du lait de chèvre sont influencées par plusieurs facteurs intrinsèques et extrinsèques. Parmi les facteurs liés à l'animal, la race joue un rôle important : la race Saanen est connue pour sa production laitière élevée, tandis que la race Alpine présente des teneurs plus importantes en matières grasses et en protéines (GAILLON et SIGWALD, 1998). L'alimentation influence également la quantité et la composition du lait, notamment les taux de matière grasse et de

protéines, une alimentation riche en concentrés pouvant diminuer le taux butyreux (JENOT et al., 2000). Au cours de la lactation, la production augmente après la mise basse, atteint un pic entre la 3^e et la 8^e semaine, puis diminue progressivement jusqu'au tarissement. Les taux butyreux (TB) et protéiques (TP) évoluent généralement en sens inverse de la production laitière (LE JAOUEN, 1986). La production atteint son maximum vers la troisième lactation avant de diminuer avec l'âge de la chèvre (GAILLON et SIGWALD, 1998). La santé de la mamelle, évaluée par la numération cellulaire, varie naturellement selon le stade de lactation et le niveau de production, sans être toujours liée à une maladie mammaire (JAUBERT, 1993). Parmi les facteurs extrinsèques, le climat et la saison influencent l'ingestion alimentaire ainsi que la production et la composition du lait, avec une baisse en cas de températures extrêmes (LE JAOUEN, 1986 ; DE SIMIANE et al., 1975). La traite influence également la composition du lait, la teneur en matière grasse étant plus élevée le soir et en fin de traite, ce qui rend nécessaire une traite complète (CALDERON et al., 1984 ; LE JAOUEN, 1999). Enfin, les conditions de logement ont un effet sur l'hygiène de l'élevage et la qualité sanitaire du lait produit.

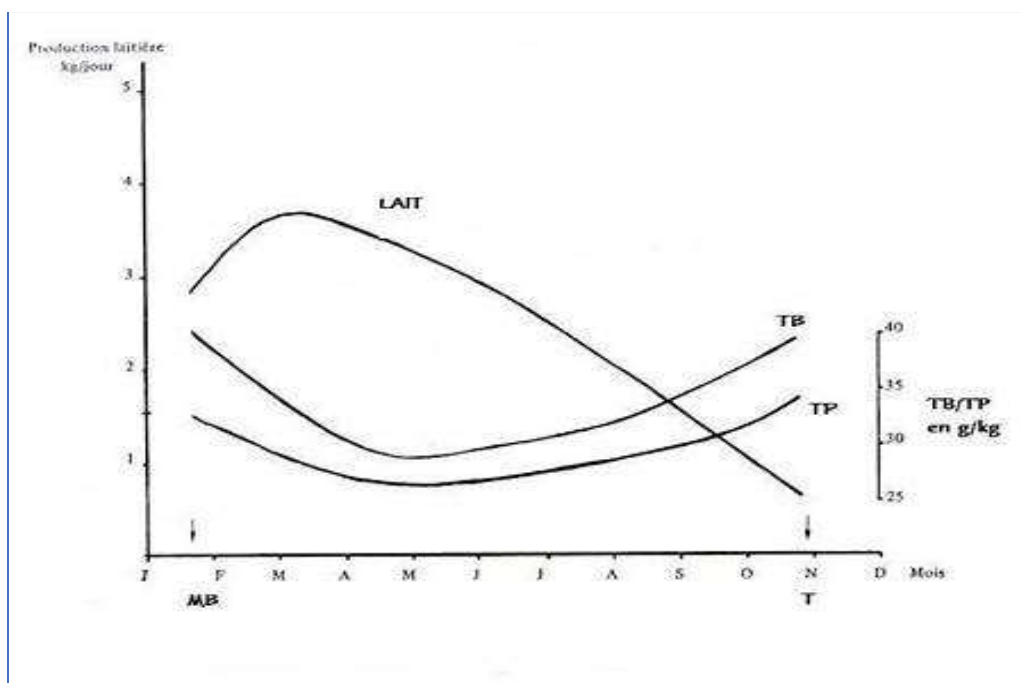


Figure 1 : Evolution mensuelle des courbes de production laitière, de matière grasse et de matière protéique du lait de chèvre au cours de la lactation (LE JAOUEN, 1986)

I.4 Aptitude du lait de chèvre à la transformation fromagère

La fabrication du fromage représente la principale voie de valorisation du lait de chèvre. L'aptitude fromagère de ce lait dépend principalement de sa composition physicochimique, qui peut varier fortement et influencer la qualité du produit final. La faible teneur en protéines coagulables, notamment en caséine α S1, constitue un inconvénient majeur car elle entraîne la formation d'un gel moins ferme et plus friable, provoquant des pertes importantes dans le lactosérum et une diminution du rendement fromager (GROSCLAUDE et al., 1994 ; REMEUF, 1993).

Comparé au lait de vache, le lait de chèvre ne forme pas de crème au repos à cause de la petite taille de ses globules gras et de l'absence d'agglutinine, ce qui le rend plus résistant à l'écémage (RUTGERS et al., 2006) cités par (MOUALEK, 2009 ; CHILLIARD, 1997). De plus, ce lait présente une faible résistance aux traitements thermiques, particulièrement lorsque sa teneur en caséine α S1 est faible, ce qui limite son aptitude aux traitements de type UHT (REMEUF, 1993 ; MORA-GUTIERREZ et al., 1993).

La production du lait de chèvre étant saisonnière, différentes méthodes de conservation peuvent être utilisées afin d'assurer sa disponibilité tout au long de l'année, notamment la réfrigération, la concentration, le séchage ou encore la congélation du caillé (; PORTMANN, 1970 ; SAURIS, 1973 ; LEMELIN, 2005 ; MORGE et al., 2007) Cependant, une conservation prolongée par le froid peut entraîner des phénomènes de lipolyse et d'oxydation responsables de défauts de goût comme le goût rance ou métallique (CALVO, 2000).

Le lait de chèvre possède également un comportement technologique différent de celui du lait de vache lors de la coagulation par la présure. Le gel obtenu est généralement moins ferme et plus fragile, malgré une coagulation plus rapide, ce qui explique un rendement fromager souvent plus faible, surtout pour les laits pauvres en caséine α S1 (LE JAOUEN et al., 1990). Cette faible fermeté est aussi liée à la grande taille des micelles de caséines du lait de chèvre (LE JAOUEN et al., 1990 ; PIERRE et al., 1998) cité par (BENYOUB, 2016).

CHAPITRE II

Le Fromage Frais et la Ricotta

II.1 Généralités sur les fromages

III.1 Historique des fromages

Le terme « fromage » provient du latin *caseus formaticus* (ou *formaticum*), qui désigne un fromage moulu dans une **forma** (moule). Cette origine reflète le principe technologique de base de la fabrication du fromage, qui consiste à former ou mouler le caillé. Les origines du fromage sont très anciennes et restent difficiles à dater avec précision. Toutefois, les données ethnologiques et archéologiques indiquent que la fabrication du fromage remonte à environ 5000 ans avant J.-C., comme en témoignent les découvertes de moules à caillé sur les rives du lac de Neuchâtel, en Suisse (GELAIS et al., 2002 ; KATZ et WEAVER, 2003).

Cette transformation du lait aurait probablement été découverte de manière accidentelle lors du stockage ou du transport du lait dans des récipients fabriqués à partir d'estomacs de jeunes ruminants. Dans ces conditions, la chaleur, l'acidité et l'action enzymatique de la présure naturellement présente dans l'abomasum favorisaient la coagulation du lait. Aujourd'hui, la coagulation demeure une étape fondamentale de la fabrication des fromages. Traditionnellement, elle est réalisée à l'aide de la présure d'origine animale, mais, face à l'augmentation des besoins de l'industrie laitière et à la disponibilité limitée de cette enzyme, des coagulants d'origine végétale et microbienne ont été développés. Ces alternatives présentent des propriétés technologiques intéressantes et font actuellement l'objet de nombreuses recherches comme substituts potentiels de la présure en technologie fromagère (SHAH et al., 2014 ; LIBURDI et al., 2021).

II.1.2 Définition du fromage frais

Les fromages frais sont des produits laitiers obtenus par égouttage lent du lait ou de la crème destinée à la consommation humaine, résultant principalement de la fermentation lactique éventuellement associée à l'action de la présure (MAHAUT et al., 2000) ; (LUQUET et CORRIEU, 2005). Selon (LARPENT, 1997), ils correspondent à des fromages n'ayant subi que la fermentation lactique, fabriqués à partir de matières premières propres à la consommation humaine, sans étape d'affinage ni de vieillissement. Leur structure repose sur un caillé faiblement floconneux formé sous l'action de la flore lactique, avec une texture généralement douce et une forte teneur en eau pouvant atteindre 80 %, ce qui impose une conservation à une température inférieure à 6°C.

Les fromages présentent une grande variabilité sur le plan technologique et microbiologique, notamment en termes de teneur en matière sèche et en matière grasse, qui dépendent du type de fromage et du procédé de fabrication. Certains fromages peuvent également contenir une flore microbienne active, jouant un rôle important dans le développement des caractéristiques technologiques et sensorielles du produit (FOX & MCSWEENEY, 2004).

II.1.3 Fromage de chèvre : Informations générales

Le lait de chèvre se distingue des laits de vache et de brebis par ses propriétés physico-chimiques (sa qualité intrinsèque), qui influent sur les normes techniques de fabrication du fromage. Sa plus faible teneur en protéines, notamment en caséine αS_1 , se traduit par une masse fromagère plus réduite, une texture friable et une moindre résistance au traitement UHT. Les globules gras du lait de chèvre sont composés d'acides gras à chaîne courte et moyenne. Par conséquent, une conservation prolongée au froid (plus de 6 mois) du lait de chèvre frais entraîne des modifications de sa teneur en matières grasses par hydrolyse enzymatique ou oxydation, libérant des acides gras qui affectent directement les propriétés organoleptiques du fromage (apparition d'odeurs et de saveurs indésirables : rance, oxydé, etc.) (BOUCHIN et al., 1998).

Le fromage de chèvre est l'un des plus anciens fromages et peut être fabriqué à partir de lait de chèvre pur (fromage 100 % chèvre) ou mélangé à du lait de vache (fromage semi-pur de chèvre). Il se distingue par ses caractéristiques organoleptiques uniques, dues à sa composition en acides gras hexanoïque, octanoïque et diénoïque. Plus blanc, plus onctueux et plus crémeux que les fromages au lait de vache, il possède une saveur plus prononcée qui varie selon la race de la chèvre, son alimentation, la saison et les méthodes de production.

Selon l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO, 2006), la production de fromage a atteint 118,4 millions de tonnes en 2005, dont 92 % étaient issus du lait de vache et moins de 2 % du lait de chèvre. La figure 2 présente la répartition de la production de fromage de chèvre par continent. L'Europe occupe la première place avec 47 %, suivie de l'Afrique (29 %) et de l'Asie (20 %), tandis que l'Amérique représente la plus faible part avec seulement 4 %. (voir figure 2)

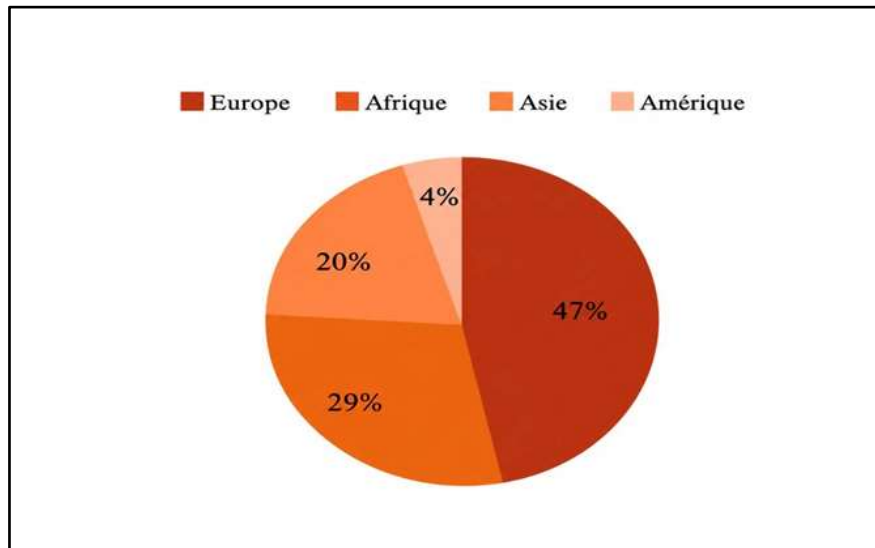


Figure 2 : Répartition de la production de fromage de chèvre par continent en 2005 (FAO, 2006).

II.1.4 Composition nutritionnelle des fromages frais

Le fromage frais est un produit laitier non affiné obtenu par coagulation des protéines du lait, principalement les caséines, suivie d'une séparation partielle du lactosérum. Selon la (FAO, 2013), sa composition chimique est fortement influencée par plusieurs facteurs, notamment la nature et la qualité du lait utilisé (lait de vache, de chèvre ou de brebis), l'origine du lait, ainsi que les paramètres technologiques appliqués au cours du procédé de fabrication, tels que la température de coagulation, le type de ferments lactiques et les conditions d'égouttage.

D'une manière générale, le fromage frais se caractérise par une teneur élevée en eau, ce qui lui confère une texture molle et une faible durée de conservation. Il constitue également une source intéressante de nutriments essentiels, notamment les protéines de haute valeur biologique, les lipides, les minéraux tels que le calcium et le phosphore, ainsi que certaines vitamines liposolubles. Toutefois, sa composition reste variable en fonction des procédés technologiques et des matières premières utilisées (FAO, 2013).

Tableau 5 : Composition nutritionnelle moyenne de 100 g de fromage frais (FAO, 2013)

Constituant	Quantité /100 g de fromage frais
Eau (g)	70 – 82
Glucides (g)	3 – 5
Lipides (g)	4 – 17
Protéines (g)	8 – 10
Calcium (mg)	120 – 160

II.2 Technologie de fabrication des fromages frais

II.2.1 Principales étapes de la fabrication fromagère

La fabrication du fromage est un procédé technologique qui transforme le lait en un produit solide grâce à une série d'étapes successives. Elle repose principalement sur la concentration des constituants du lait et l'élimination progressive du lactosérum afin d'obtenir une pâte fromagère stable (FAO, 2010 ; JEANTET et al., 2017).

II.2.1.1 Préparation du lait

Dans cette première étape, le lait est d'abord nettoyé par filtration puis éventuellement standardisé afin d'ajuster sa composition en matière grasse et en protéines. Un traitement thermique peut être appliqué pour réduire la charge microbienne et améliorer les conditions de fabrication. Ensuite, des ferments lactiques sont ajoutés pour démarrer l'acidification du lait (FAO, 2010 ; JEANTET et al., 2017)

II.2.1.2 Coagulation

La coagulation est l'étape principale de la fabrication fromagère. Le lait passe de l'état liquide à un gel sous l'action de la présure et/ou des bactéries lactiques. Ce phénomène entraîne la formation d'un caillé constitué d'un réseau de caséines qui emprisonne l'eau et les matières grasses (FAO, 2010 ; JEANTET et al., 2017).

II.2.1.3 Découpage du caillé

Après la coagulation, le gel obtenu est découpé en petits grains. Cette opération permet de faciliter la sortie du lactosérum et de contrôler la teneur en eau du futur fromage (FAO, 2010 ; JEANTET et al., 2017).

II.2.1.4 Égouttage

L'égouttage consiste à séparer progressivement le lactosérum du caillé. Cette étape influence directement la texture et l'humidité du fromage final (FAO, 2010 ; JEANTET et al., 2017).

II.2.1.5 Moulage et pressage

Le caillé est ensuite placé dans des moules afin de lui donner sa forme définitive. Selon le type de fromage, un pressage peut être effectué pour éliminer davantage de sérum et améliorer la cohésion de la pâte (FAO, 2010 ; JEANTET et al., 2017).

II.2.1.6 Salage

Le salage peut se faire à sec ou en saumure. Il joue un rôle important dans la conservation du fromage, le développement du goût et le contrôle de l'activité microbienne (FAO, 2010 ; JEANTET et al., 2017).

II.2.1.7 Affinage

L'affinage est la dernière étape de transformation. Durant cette phase, des réactions enzymatiques et microbiologiques modifient progressivement la texture, l'odeur et la saveur du fromage jusqu'à obtention du produit final (FAO, 2010 ; JEANTET et al., 2017).

II.3 Classification des fromages

Selon les procédés de fabrication et le degré de transformation, les fromages sont classés en plusieurs catégories. Les fromages frais se caractérisent par une forte teneur en eau, un égouttage peu poussé et l'absence d'affinage, ce qui leur confère une texture souple ainsi qu'une durée de conservation limitée (LARPENT, 1997). De manière générale, la classification des fromages repose sur le mode de fabrication, la texture de la pâte et les traitements technologiques appliqués lors de leur production (GUIRAUD, 1998).

Par ailleurs, une classification sommaire des différentes catégories de fromages a été proposée par (SANOGO 1994) et présentée dans le (Tableau 6). Selon cette classification, le fromage peut être intégré à deux niveaux : d'une part parmi les fromages frais ou à pâte molle lorsqu'il est consommé à l'état brut non affiné, et d'autre part parmi les fromages à pâte pressée cuite lorsqu'il subit un processus d'affinage impliquant un traitement thermique à base d'extraits de plantes.

Les principaux types de fromages sont :

Tableau 6 : Les types des fromages (SONAGO, 1994 ; KORA, 2005).

Types de fromages	Caractéristiques	Exemple
Fromages frais	Egouttage peu poussé, Humidité importante sans affinage	Petit suisse, chèvre frais, minas, wagashi, ricotta
Fromages affinés	Fromages affinés	Crème de Gruyère, crème de Roquefort
Fromages à pâtes molles	Pas de pressage	Camembert, Féta, wagashis
Fromages à pâtes pressés non cuites	Caillé mixte, pressage	Saint-Paulin, Thélème
Fromages à pâtes pressés cuites	Caillé présure, brassage et chauffage du caillé	Gruyère, wagashi affiné
Fromages à pâte filées	Filetage du caillé	Oaxaca
Fromages très secs	Déshydratation poussée	Chèvre sec, fromage du pourtour du Sahara.
Fromages fondu	Fusion du fromage	Cancoillotte, fromage à tartiner.

II.4 Les fromages issus du lactosérum :

II.4.1 Groupes de fromages à base de lactosérum

La fabrication des fromages et l'extraction de la caséine du lait écrémé donnent comme sous-produit un liquide appelé lactosérum, de couleur jaune verdâtre, dont la composition varie selon le type de fabrication (FAO/WHO, 1978). Les protéines du lactosérum peuvent être récupérées et utilisées pour fabriquer des fromages de lactosérum à partir de lactosérum concentré ou d'un mélange de lait et de lactosérum (FAO/WHO, 1978 ; FAO/WHO, 2002)

II.4.1.1 Premier groupe des fromages de lactosérum

Ils sont obtenus par chauffage et évaporation-concentration d'un mélange de lactosérum et de lait. Ce procédé permet d'obtenir un produit concentré avec une forte viscosité et parfois un brunissement dû à la réaction de Maillard. Lors du refroidissement, les sucres peuvent cristalliser et donner une texture spécifique. Ce type de fromages est principalement produit dans les pays scandinaves, comme le Mysost en Norvège, ainsi que dans certains pays méditerranéens comme la Grèce (SCOTT, 1981 ; GOUDEDRANCHE et al., 2002).

II.4.1.2 Deuxième groupe des fromages de lactosérum

Ce groupe comprend des fromages comme la Ricotta en Italie, le Sérac ou la Brousse en France, et le Brocciu en Corse. Ils sont obtenus par traitement thermique du lactosérum doux, avec ou sans ajout de lait, à des températures comprises entre 80 et 95°C pendant 30 à 45 minutes. Ce chauffage entraîne la dénaturation et l'agrégation des protéines de lactosérum, formant des flocons qui sont ensuite récupérés par filtration ou centrifugation. Le produit peut aussi être acidifié à l'aide d'acidifiants ou de bactéries lactiques (RAMET, 1997 ; GOUDEDRANCHE et al., 2002).

Les fromages de lactosérum se distinguent des fromages standards par leur matière première. Ils sont basés sur les protéines du lactosérum, alors que les fromages classiques sont obtenus par coagulation de la caséine du lait à l'aide de la présure (FAO/WHO, 1978).

II.4.2 Évolution de la production mondiale du lait et du fromage de chèvre

L'élevage caprin laitier a connu un développement progressif à l'échelle mondiale, avec une production estimée à environ 18,66 millions de tonnes de lait de chèvre en 2017. Cette production est

dominée par l'Asie et l'Afrique, qui concentrent la majorité des effectifs caprins et de la production laitière mondiale. Par ailleurs, le fromage de chèvre représente une part croissante de la transformation laitière, avec une production mondiale estimée à 523 000 tonnes en 2014 selon les données FAOSTAT.

L'analyse de l'évolution de la production mondiale de fromage de chèvre entre 2005 et 2014 montre une stabilité relative jusqu'en 2010, suivie d'une augmentation progressive à partir de 2011, atteignant un pic en 2013. Cette croissance est en cohérence avec l'augmentation de la production mondiale de lait de chèvre et le développement de la transformation fromagère caprine. Elle reflète également l'intérêt croissant pour les produits caprins, notamment en raison de leurs qualités nutritionnelles et de leur meilleure digestibilité par rapport aux produits bovins.

Ainsi, l'évolution simultanée de la production laitière et fromagère caprine met en évidence une structuration progressive de la filière caprine mondiale, bien que celle-ci reste encore limitée à une faible part de la production laitière globale.

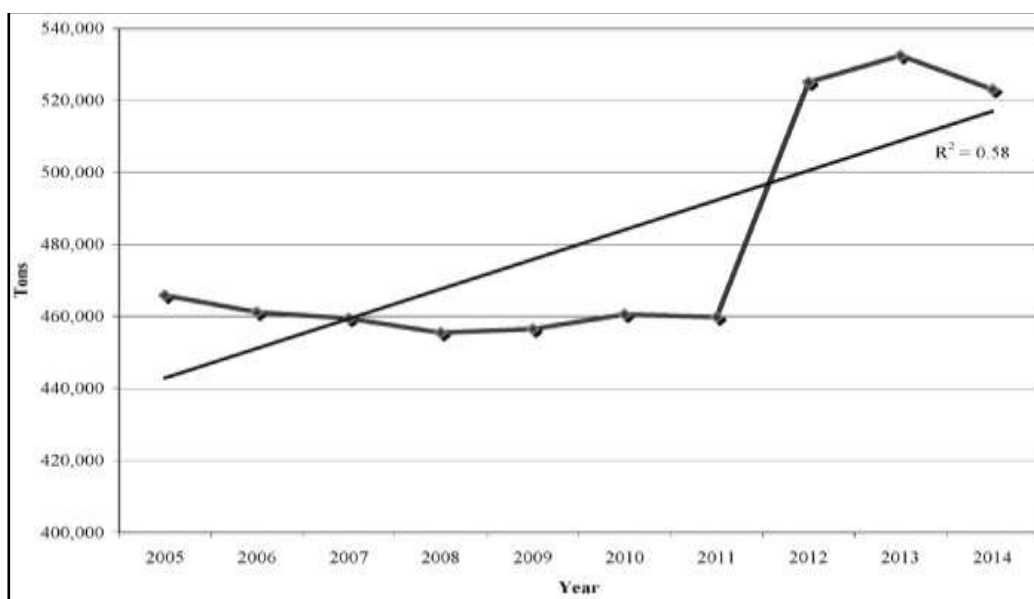


Figure 3: Évolution mondiale de la production de fromage de chèvre (FAOSTAT, 2018).

II.5 La Ricotta : origine et caractéristiques :

II.5.1 Définition et caractéristiques

La Ricotta fraîche de brebis est un produit traditionnel de la Sardaigne (PIRISI, 2002). Elle est produite au niveau fermier mais surtout au niveau industriel (MUCCHETTI et al., 2002). Il s'agit d'un produit obtenu par la coagulation thermique des protéines du lactosérum résiduel de la transformation du lait en fromage. Elle est donc considérée comme un sous-produit de la transformation laitière. Cependant, pour ses caractéristiques nutritionnelles (PIZZOFERRATO, 2002) et sensorielles, est un produit qui a une grande diffusion auprès des consommateurs. La composition du produit et le pH élevé (PIREDDA, 2002) font de la Ricotta un produit fragile du point de vue microbiologique et qui est très difficile à conserver (DE SANTIS et MAZZETTE, 2002). La ricotta est un fromage frais, granuleux et savoureux. Elle est largement consommée dans les pays méditerranéens. Elle peut être fabriquée exclusivement à partir du lait ou du lactosérum (encore appelé petit lait ou sérum) ou du mélange des deux (BESBES et al., 2003).

II.5.2 Différence fromage classique vs fromage de lactosérum

Le fromage de type ricotta est un produit obtenu à partir du lactosérum issu de la fabrication fromagère. Contrairement au fromage traditionnel, élaboré principalement à partir du lait par coagulation des caséines, la ricotta permet la valorisation des protéines sériques présentes dans le lactosérum. Sa fabrication repose sur un traitement thermique entraînant la dénaturation et l'agrégation de ces protéines, conduisant à la formation du coagulum. Les résultats de l'étude montrent également que la qualité de la ricotta varie en fonction des conditions de production, notamment la saison, ce qui influence sa composition chimique ainsi que ses propriétés physico-chimiques et texturales (JOURNAL OF DAIRY SCIENCE, 2025).

II.5.3 Fabrication traditionnelle et industrielle de la Ricotta

La fabrication de la ricotta est apparue dans les pays méditerranéens afin de valoriser le lactosérum issu de la production des fromages à pâtes dures, qui contenait encore une quantité importante de matières grasses (PIZZILLO et al., 2005). Ce sous-produit était difficilement utilisé dans l'alimentation animale, ce qui a conduit à son exploitation pour la production de la ricotta. Aujourd'hui, la fabrication

peut être artisanale ou industrielle, avec des procédés similaires mais réalisés à des échelles différentes (MUCCHETTI et al., 2002 ; PIZZILLO et al., 2005).

Le procédé débute par une filtration du lactosérum afin d'éliminer les impuretés, suivie d'un chauffage progressif. En production artisanale, le chauffage est généralement effectué au gaz, tandis qu'en industrie la vapeur est utilisée (PIZZILLO et al., 2005). Dans certains cas, le lactosérum est acidifié à un pH de 5,9 à 6,0 à l'aide d'acide lactique ou d'autres acidifiants alimentaires. Le mélange est ensuite chauffé entre 90 et 95°C pendant 30 à 45 minutes afin de provoquer la coagulation des protéines et la formation des particules de caillé à la surface (KOSIKOWSKI, 1977). Ces particules sont récupérées manuellement à l'aide d'écumoirs pour obtenir la ricotta finale.

II.5.4 Valeur nutritionnelle de la Ricotta

La ricotta est appréciée pour ses qualités nutritionnelles et sensorielles (PIZZOFERRATO, 2002). Elle constitue une source intéressante de protéines issues du lactosérum, ainsi que de matières grasses, de vitamines et de sels minéraux. Sa texture granuleuse et son goût doux contribuent également à sa large consommation dans les pays méditerranéens. Toutefois, sa teneur élevée en humidité et son pH relativement élevé favorisent le développement des microorganismes, ce qui rend sa conservation difficile (PIREDDA, 2002 ; DE SANTIS et MAZZETTE, 2002).

CHAPITRE III

Le Lactosérum Caprin

III.1 Définition du lactosérum caprin

Le lactosérum, également connu sous les noms de petit-lait ou sérum, est un sous-produit essentiellement issu de la fabrication du fromage (JOUAN, 2002). Il est obtenu après la coagulation du lait lors de la fabrication fromagère et après la séparation du caillé. Traditionnellement, le lait subit un processus de coagulation, soit par l'ajout de présure, soit par l'action acidifiante de bactéries lactiques, voire par acidification chimique. Cette coagulation entraîne l'agrégation des micelles de caséine présentes dans le lait, formant ainsi un gel appelé coagulum. La phase aqueuse résultante correspond au lactosérum.

Il se présente sous la forme d'un liquide jaune-verdâtre composé d'environ 94 % d'eau, de lactose, de protéines sériques, de sels minéraux, de vitamines hydrosolubles et de très peu de matières grasses. Il représente 85 à 90 % du volume de lait utilisé en fromagerie et contient environ 20 % des protéines laitières ainsi qu'une quantité importante de nutriments tels que le lactose, les vitamines et les minéraux (MOLETTA, 2002).

Le lactosérum est un produit fragile et facilement fermentescible. Il est aujourd'hui valorisé dans plusieurs applications alimentaires, notamment dans la fabrication du fromage ricotta (ASHER, 2024).

III.2 Origine et formation du lactosérum caprin

Le lactosérum est un coproduit liquide de l'industrie laitière obtenu lors de la fabrication du fromage et de la caséine, résultant de la séparation de la phase solide (caillé) et de la phase liquide du lait (WALSTRA, WOUTERS & GEURTS, 2006). Cette séparation est liée à la coagulation des caséines, qui peut être induite soit par voie enzymatique à l'aide de la chymosine, soit par acidification du lait, entraînant la formation d'un réseau protéique tridimensionnel (FOX & MCSWEENEY, 2015).

Sur le plan quantitatif, le lactosérum constitue la fraction majoritaire du lait transformé, représentant environ 80 à 90 % du volume initial utilisé en fabrication fromagère (SMITHERS, 2008). Cette forte proportion explique son importance industrielle ainsi que les problématiques environnementales liées à sa gestion.

Le mécanisme enzymatique de coagulation repose sur l'action spécifique de la chymosine sur la κ -caséine, provoquant la déstabilisation des micelles de caséine et leur agrégation en un caillé, tandis que les composants solubles du lait (lactose, protéines sériques, minéraux et vitamines hydrosolubles) restent

dans la phase liquide appelée lactosérum (FOX & MCSWEENEY, 2015). Dans le cas de la coagulation acide, la réduction du Ph jusqu'au point isoélectrique des caséines ($\approx 4,6$) entraîne leur précipitation et la séparation du lactosérum (LUCEY, 2002).

Selon le procédé de fabrication, on distingue le lactosérum doux, issu de la coagulation enzymatique et caractérisé par un Ph compris entre 6,0 et 6,5, et le lactosérum acide, obtenu par fermentation lactique ou acidification directe avec un Ph inférieur à 5 (ALAIS, 1984 ; SOTTIEZ, 1990). Ces différences influencent directement la composition chimique et les propriétés technologiques du lactosérum.

Enfin, le lactosérum contient principalement de l'eau (93–94 %), du lactose, des protéines solubles (β -lactoglobuline, α -lactalbumine), des minéraux et des vitamines hydrosolubles. Cette composition varie selon l'origine du lait et les conditions technologiques de transformation (WALSTRA ET AL., 2006 ; FOX & MCSWEENEY, 2015).

III.3 Types de lactosérum caprin (doux et acide)

Le lactosérum possède une valeur nutritionnelle importante grâce à sa richesse en lactose, protéines solubles et éléments minéraux (LUCEY, J. A., 2002).

Selon son acidité et le mode de coagulation du lait, on distingue généralement deux types de lactosérum : le lactosérum doux et le lactosérum acide. Cette classification repose principalement sur une acidité inférieure ou supérieure à 1,8 g d'acide lactique par litre, soit 18°D (ADRIAN et AL., 1980., FAO, 1995).

La distinction entre ces différents types de lactosérum dépend également du procédé utilisé pour leur obtention (ALAIS, 1984).

III.3.1 Lactosérum acide

Le lactosérum acide est obtenu après coagulation du lait par acidification, soit par ajout d'acides, soit par fermentation lactique, provoquant la précipitation des caséines à leur pH isoélectrique voisin de 4,6 (VIOLLEAU, 1999).

Ce type de lactosérum provient principalement de la fabrication des fromages frais, des pâtes molles ainsi que de la caséine acide. Son acidité est généralement supérieure à 18°D (ADRIAN ET AL., 1980) et peut atteindre environ 120°D (SOTTIEZ, 1990).

III.3.2 Lactosérum doux

Le lactosérum doux est obtenu après coagulation enzymatique de la caséine sous l'action de la présure sans acidification préalable. Il se caractérise par une faible teneur en sels minéraux et une richesse en lactose et en protéines solubles (SOTTIEZ, 1990).

Ce type de lactosérum contient également une glycoprotéine provenant de l'hydrolyse de la caséine κ par la présure (SOTTIEZ, 1990).

Les lactosérums doux proviennent essentiellement de la fabrication des fromages à pâte pressée ou cuite. Leur acidité est inférieure à 18°D (ADRIAN et AL. 1991). et varie généralement entre 15 et 22°D (SOTTIEZ, 1990).

III.4 Composition physico-chimique du lactosérum caprin

La composition du lactosérum varie selon l'origine du lait et le procédé de fabrication, mais il est principalement constitué de lactose, de protéines solubles, de sels minéraux ainsi que d'autres composés mineurs tels que l'acide lactique, les vitamines hydrosolubles et les matières azotées non protéiques. Les sels minéraux du lactosérum sont principalement composés de chlorure de sodium (NaCl) et de chlorure de potassium (KCl), représentant plus de 50 % des minéraux, ainsi que de sels de calcium, notamment les phosphates, en plus d'autres minéraux présents en faibles quantités. Le lactosérum contient également de l'acide lactique (environ 0,05 %), de l'acide citrique, de l'urée, de l'acide urique ainsi que des vitamines du groupe B, contribuant à sa valeur nutritionnelle élevée (FAO, 1995., GONZALEZ, 1996 ; MOLETTA, 2009 ;).

Le tableau suivant illustre la composition physicochimique des lactosérums doux et acide :

Tableau 7 : Composition de lactosérum acide et doux (en %) (MORR ET HA 1993).

Paramètre	Lactosérum doux	Lactosérum acide
PH	6.3	4.6
Eau	93	93.5
Lactose	4.77	4.71
Protéines	0.82	0.75
Matière Grasse	0.07	0.03
Acide lactique	0.15	0.55
Cendres	0.53	0.69
Calcium	0.05	0.13
Sodium	0.07	0.06
Potassium	0.14	0.15
Phosphore	0.06	0.09

III.4.1 Lactose

Le lactose constitue le principal composant de la matière sèche du lactosérum, représentant environ 70 à 80 % de celle-ci, avec une teneur moyenne comprise entre 4 et 5 %. Il joue un rôle important comme source d'énergie pour les micro-organismes, notamment lors des processus de fermentation où il est utilisé comme source de carbone. Le lactose peut également être transformé par cristallisation, hydrolyse ou fermentation par les bactéries lactiques, favorisant ainsi la valorisation industrielle du lactosérum. Il peut également être récupéré à partir du perméat par précipitation des minéraux, évaporation de l'eau et cristallisation (VIGNOLA, 2002).

III.4.2 Protéines du lactosérum

Les protéines du lactosérum représentent environ 0,6 à 0,8 % du lactosérum liquide et environ 20 % des protéines totales du lait. Elles se caractérisent par un faible poids moléculaire, une excellente digestibilité et une haute valeur nutritionnelle en raison de leur richesse en acides aminés essentiels,

notamment les acides aminés soufrés, la lysine et le tryptophane. Contrairement aux caséines, les protéines du lactosérum restent solubles même à leur point isoélectrique et ne coagulent pas sous l'action enzymatique. Elles possèdent également des propriétés fonctionnelles importantes telles que la solubilité, la capacité émulsifiante, le pouvoir moussant et la capacité de rétention d'eau, favorisant leur utilisation dans plusieurs applications agroalimentaires, notamment la fabrication de fromages frais et de ricotta (JOUAN, 2002 ; THAPON, 2005., BOUBEZARI, 2010 ; NAFTI, 2011)

Les principales protéines du lactosérum sont la β -lactoglobuline, l' α -lactalbumine, les immunoglobulines, la lactoferrine, la sérum-albumine ainsi que les fractions protéase-peptone. Ces protéines présentent une valeur biologique élevée et contribuent aux propriétés nutritionnelles et fonctionnelles du lactosérum (SMITHERS, 2008 ; WATSON ET AL., 2017).

III.4.2.1 β -Lactoglobuline

La β -lactoglobuline constitue la principale protéine du lactosérum, représentant environ 50 à 60 % des protéines sériques. Il s'agit d'une protéine globulaire de faible poids moléculaire sensible aux variations de pH et de température. Elle possède d'importantes propriétés fonctionnelles, notamment des capacités gélifiantes, moussantes et une bonne solubilité sur une large gamme de pH, ce qui favorise son utilisation dans l'industrie alimentaire (KINSELLA & WHITEHEAD, 1989 ; SMITHERS ET AL., 1996 ; PEREZ-GAGO & KROCHTA, 2002).

III.4.2.2 α -Lactalbumine

L' α -lactalbumine représente environ 19 % des protéines du lactosérum. Elle se caractérise par une richesse en acides aminés essentiels, ce qui lui confère une valeur nutritionnelle importante. Cette protéine est sensible aux variations de Ph et de température mais peut retrouver sa structure initiale sous certaines conditions, ce qui contribue à son intérêt technologique (PEREZ-GAGO et al., 2005 ; CHATTER-TON et al., 2006).

III.4.2.3 Immunoglobulines

Les immunoglobulines sont des glycoprotéines présentant des propriétés immunologiques importantes. Elles participent à la défense de l'organisme et contribuent à la valeur nutritionnelle du lactosérum. Cependant, elles présentent une sensibilité élevée à la température (DAMODARAN ET PARAF, 1997).

III.4.2.4 Lactoferrine

La lactoferrine est une métalloprotéine contenant du fer et possédant des propriétés antibactériennes importantes. Elle présente une activité bactériostatique et bactéricide contre plusieurs microorganismes pathogènes. Cette protéine possède également des applications dans les domaines diététique et pharmaceutique (DAMODARAN et PARAF, 1997).

III.4.3 Matières minérales

Le lactosérum contient plusieurs sels minéraux essentiels tels que le calcium, le phosphore, le sodium, le potassium et le magnésium. Ces éléments jouent un rôle important dans l'équilibre hydrique, le fonctionnement musculaire et le métabolisme cellulaire. Leur teneur varie généralement entre 0,5% et 0,7% (WALSTRA et al., 2006 ; WATSON et al., 2017).

III.4.4 Vitamines et autres composés

Le lactosérum contient des vitamines hydrosolubles, notamment celles du groupe B, ainsi que des composés mineurs tels que l'acide lactique, l'acide citrique et des matières azotées non protéiques, contribuant à sa valeur nutritionnelle et à ses propriétés fonctionnelles (WALSTRA et al., 2006)

III.5 Importance technologique du lactosérum

Le lactosérum présente un intérêt technologique important grâce à sa richesse en protéines sériques possédant des propriétés fonctionnelles intéressantes. Ces protéines sont capables de former des émulsions, de produire de la mousse et de retenir l'eau, ce qui contribue à améliorer la texture et la stabilité de nombreux produits alimentaires. Elles peuvent également coaguler sous l'effet de la chaleur, permettant ainsi la fabrication de produits tels que la ricotta (WALSTRA et al., 2006).

Le lactose contenu dans le lactosérum participe également à certaines réactions technologiques, notamment la réaction de Maillard, utilisée dans l'industrie alimentaire pour le développement de la couleur et des arômes des produits (FAO, 1995).

Dans la fabrication fromagère traditionnelle, le lactosérum joue également un rôle important dans le maintien de l'équilibre microbien des cultures laitières. Il constitue une source de flore indigène participant à la fermentation naturelle. Son utilisation comme inoculum naturel (repiquage) permet de

préserver certaines caractéristiques technologiques et organoleptiques des fromages. De plus, il contribue à l'acidification lactique et influence ainsi la qualité finale du fromage (BEUVIER et al., 2012).

III.6 Valorisation du lactosérum dans l'industrie laitière

Le lactosérum est un sous-produit de l'industrie laitière obtenu principalement lors de la fabrication du fromage. Il a longtemps été considéré comme un déchet en raison des grandes quantités produites, mais il est aujourd'hui reconnu comme une matière première valorisable grâce à sa richesse en lactose, protéines solubles et minéraux (ALAIS, 1984 ; WALSTRA et al., 2006).

La valorisation du lactosérum repose surtout sur la récupération de ses principaux composants. Les protéines sériques peuvent être extraites sous forme de concentrés ou d'isolats utilisés dans l'alimentation humaine et animale, grâce à leurs bonnes propriétés nutritionnelles et fonctionnelles. Le lactose peut aussi être récupéré et utilisé dans l'industrie alimentaire ou transformé par des procédés biotechnologiques pour obtenir d'autres produits à valeur ajoutée (WALSTRA et al., 2006 ; MOLLEA et al., 2013).

Sur le plan technologique, le lactosérum est traité par différents procédés comme l'ultrafiltration, la concentration et le séchage, ce qui permet de produire des poudres et des ingrédients utilisés dans plusieurs secteurs alimentaires, notamment les boissons, la boulangerie et les produits laitiers (WALSTRA et al., 2006 ; MOLLEA et al., 2013).

Enfin, la valorisation du lactosérum permet de réduire les déchets de l'industrie laitière et de transformer un sous-produit en une ressource économique importante à forte valeur ajoutée (SMITHERS, 2008).

III.7 Impact environnemental du lactosérum

Le lactosérum est un sous-produit de l'industrie laitière qui peut poser un problème environnemental lorsqu'il est rejeté sans traitement. En raison de sa richesse en lactose et en matières organiques, il présente une demande biochimique en oxygène (DBO) très élevée, ce qui peut entraîner une pollution importante des eaux (SMITHERS, 2008).

Son rejet dans les milieux aquatiques provoque une diminution de l'oxygène dissous, ce qui peut perturber l'équilibre écologique et avoir un effet négatif sur la vie aquatique. Ce type d'effluent est donc difficile à gérer lorsqu'il n'est pas valorisé ou traité correctement (SMITHERS, 2008).

Ainsi, le lactosérum représente à la fois un problème environnemental lorsqu'il est rejeté directement, et une ressource intéressante lorsqu'il est récupéré et valorisé dans l'industrie agroalimentaire (SMITHERS, 2008).

CHAPITRE IV

Matériel et Méthodes

IV.1 Objectif

Ce chapitre vise à présenter les différentes techniques et les méthodologies analytiques utilisées pour la réalisation de notre travail ; à savoir :

- Analyse physicochimique du lait de chèvre
- Coagulation enzymatique du lait de chèvre
- Coagulation acide du lait de chèvre
- Essai de fabrication de ricotta à partir des lactosérums obtenus ;
- Analyse physicochimique des lactosérums obtenus.

Les différentes analyses nécessaires à cette recherche sont menées au laboratoire de la Faculté des sciences naturelles et de la vie de l'Université Ziane Achour de Djelfa, ainsi qu'au laboratoire laitier de Bourghba.

IV.2 Zone d'étude

Notre travail était menu à Aïn Maabed, une commune algérienne appartenant au district de Hassi Bahbah, dans la wilaya de Djelfa. Elle se caractérise par un climat semi-aride. Sa principale vocation est l'élevage et l'agriculture, du fait de ses plaines et de ses étendues désertiques.



Figure 4 : Localisation de la zone d'étude : commune d'Aïn Maâbed, wilaya de Djelfa

IV.3 Échantillons

Dans cette étude, le lait cru a été collecté manuellement le matin auprès de plusieurs chèvres Saanen (un croisement entre la race Arbia et la race Saanen) d'âges différents (entre 2 à 2,5 ans). Les échantillons de lait ont été transportés au laboratoire dans un conteneur réfrigéré afin d'assurer leur conservation et leur sécurité pendant le transport.

IV.4 Conditions d'échantillonnage

Il est essentiel de respecter les règles d'hygiène pour garantir la qualité et la sécurité des échantillons de lait collectés. Les règles d'hygiène suivantes ont été appliquées :

- Lavage des mains et de la mamelle de l'animal avant la traite
- Prélèvement du premier jet de lait
- Utilisation de bouteilles en plastique propres
- Transport dans un conteneur réfrigéré à température ambiante.
- Ces mesures permettent de préserver les propriétés physico-chimiques du lait jusqu'à son analyse en laboratoire.

Il est important de respecter ces règles d'hygiène pour obtenir des résultats fiables reflétant fidèlement la qualité du lait étudié.

IV.5.1 Matériel.

IV.5.1.1 Matière première

IV.5.1.1.1 Le lait

Le lait utilisé provient de plusieurs chèvres de race Saanen (voir figure), âgées de 2 à 2,5 ans, élevées en plein air (Djelfa, Aïn Maabed). Elles sont nourries avec du fourrage vert et des aliments concentrés, et ont un accès permanent à l'eau. Après la traite, le lait est transporté réfrigéré au laboratoire où 40 échantillons sont analysés.



Figure 5 : chèvre croisement entre la race Arbia et la race Saanen (Saanen)

IV.5.1.1.2 Enzymes coagulantes.

IV.5.1.1.2.1 La présure :

Nous avons utilisé une présure en poudre commerciale de force 1/100.000 à 520 mg de chymosine /1 g de poudre de présure. La poudre de présure est conservée à 4°C. A partir de cette poudre, nous avons préparé une solution mère par reconstitution à raison de 01 g / 100 ml d'eau distillée. Cette solution est conservée à 4°C.

IV.5.1.1.3 L'acide acétique :

Nous avons utilisé une quantité d'acide acétique équivalente à 4 à 6 ml pour 200 ml de lait.

IV.5.1.1.2.4 Lactoscan :



Figure 6 : Lactoscan

IV.6 Méthodes d'analyse :

IV.6.1 Caractérisation du lait de chèvre.

Dans le but de caractériser le lait de chèvres utilisé dans notre travail, et afin d'évaluer l'efficacité de notre technique fromagère employée, quelques analyses physicochimiques ont été réalisées :

IV.6.1.1 Le pH

A l'arrivée au laboratoire, une détermination du pH est réalisée à l'aide d'un pH- mètre selon la méthode (AFNOR ,1986).



Figure7 : Détermination du pH du lait par pH-mètre électronique.

IV.6.1.2. La densité :

La détermination précise de la densité du lait et du lactosérum a été effectuée à l'aide d'un pycnomètre du liquide Selon la norme AFNOR (NF 60-214 1969)

IV.6.1.3. Détermination de l'extrait sec total :

Cette méthode consiste à sécher un échantillon de lait dans une étuve à $103 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant environ trois heures, jusqu'à obtention d'une masse stable. L'échantillon est ensuite placé dans un dessiccant pendant 20 minutes. Ce procédé permet d'éliminer toute l'eau de l'échantillon et de déterminer sa teneur en matières sèches totales. Celle-ci est exprimée en grammes par litre (g/L) ou en pourcentage.



Figure 8 : Étuvage des échantillons de matière sèche de fromage pour analyse



Figure 9 : Mise des échantillons dans un dessiccateur

IV.6.1.4. Détermination de la teneur en lactose :

La détermination du lactose est réalisée selon la norme de (BERTRAND,1988) (norme FIL-IDF1974/28A).

IV.6.1.5. Détermination de l'azote :

L'azote est dosé selon la norme FILIDF1962/20. La teneur en protéines est obtenue par multiplication du taux d'azote total par un facteur de conversion égal à 6.38 (MATHIEU, 1998).

IV.6.1.6. Détermination de la matière grasse :

La matière grasse est déterminée par la méthode de GERBER (norme AFNOR : NFV04-210 1974).

IV.6.2. Pratique fromagère

Ce procédé repose sur la production de fromage frais à partir de lait de chèvre. Dans notre expérience en laboratoire, nous avons préparé du fromage de chèvre par coagulation e à l'aide de présure et d'acide acétique. Le lait a d'abord été filtré pour éliminer les impuretés (la quantité étudiée était d'un litre par jour). Il a ensuite été divisé en portions de 200 ml

IV.6.2.1 Coagulation enzymatique

On utilise la présure, une enzyme qui agit sur la caséine, et plus particulièrement sur la κ -caséine. Le procédé est le suivant :

- Le lait est chauffé progressivement à 30 °C pour accélérer la coagulation.
- Ensuite, 2 ml de présure sont ajoutés sous agitation douce sur une plaque électrique, permettant la coagulation et la séparation du caillé et du petit-lait. Le mélange est laissé au repos quelques instants pour assurer une coagulation complète,
- Le caillé est séparé à l'aide d'un linge en coton et filtré pour éliminer l'excédent de liquide

IV.6.2.2 Coagulation Acide

Ce phénomène est dû à une diminution du pH causée par la production d'acide lactique par les bactéries lactiques ou par l'ajout direct d'acide acétique. Lorsque le pH atteint environ 4,6, les caséines perdent leur stabilité et s'agglutinent, formant ainsi du caillé. Les étapes de cette coagulation sont les suivantes :

- Versez 200 ml de lait dans un bécher et chauffez-le à 85_90°C en remuant.
- Ajoutez progressivement 5 à 6 ml d'acide acétique, en remuant doucement jusqu'à l'apparition du caillé et la séparation du petit-lait. Retirez le bécher du feu et laissez reposer quelques instants, puis égouttez le caillé
- On laisse le fromage s'égoutter progressivement afin d'obtenir le petit-lait utilisé pour la fabrication de la ricotta.
- Le poids du fromage frais et la quantité de petit-lait obtenue sont mesurés pour chaque échantillon.



Figure 10 : Coagulation du lait



Figure 11 : Formation du caillé (fromage)

IV.6.2.3 Coagulation du lactosérum : Ricotta

Ce procédé s'inspire des travaux de (PIZZELLO et al., 2005) et de (KOSCOWSKI, 1977) sur la préparation de la ricotta. Il s'agit d'un procédé simplifié en deux étapes principales :

- Le lactosérum issu de la fabrication du fromage frais est extrait pour produire la ricotta.
- Chauffage et acidification du lactosérum
- Le lactosérum est chauffé à une température comprise entre 85 et 90 °C (PIZZELLO et al., 2005).
- Immédiatement après, 04 ml d'acide acétique sont ajoutés au lactosérum jusqu'à la formation d'une masse protéique coagulée à la surface. La température est ensuite augmentée progressivement (2°C/minute) sous agitation douce.
- Une cuisson inférieure à 10 minutes donne un fromage de lactosérum très mou, difficile à façonner, et entraîne des pertes importantes. Après 20 minutes, la ricotta est trop cuite.



Figure 12 : Coagulation du lactosérum

IV.6.3 Efficacité fromagère

Afin d'évaluer l'efficacité de la pratique fromagère nous nous sommes référés à la comparaison entre les deux rendements fromagers réels et théoriques. Le premier correspond au poids fromager obtenu après égouttage alors que le deuxième est une valeur calculée par une formule dépendante de deux paramètres biochimiques représentés par les taux protéique et butyreux du lait préalablement mesurés, cette équation est donnée par (CUVILLIER ,2005)

$$\text{Le rendement théorique} = K \times (0.093TB + 0.38TP) \quad \text{Où :}$$

TB : taux butyreux

TP : Taux protéique

K : coefficient d'ajustement ($K = \text{rendement réel} / (0.093TB + 0.38TP)$).

Cette efficacité a concerné deux coagulations réalisées

IV.6.4 Caractérisation physicochimiques des lactosérums (doux et acide)

La coagulation du lait caprin engendre une séparation bien distincte des deux phases : liquide (lactosérum) et solide (coagulum). Notre travail dans une deuxième phase s'est orienté vers la détermination de quelques caractéristiques physicochimiques des différents lactosérums obtenus (doux et acide) à savoir leur volume, leur densité, et leur pH, la matière grasse et protéique ainsi que la matière minérale et le lactose sans oublier l'extrait sec dégraissé.

IV.6.4.1. Volume du lactosérum.

La détermination du volume du liquide dégagé de la synérèse spontanée du lactosérum est basée sur l'utilisation d'une pipette pour extraire le sérum qui est déposé dans une éprouvette graduée afin de mesurer ce paramètre.



Figure 13 : Mesure du volume du lactosérum

IV.6.4.2. Densité du lactosérum.

La densité d'un corps est le rapport entre sa masse volumique et la masse volumique d'un corps de référence. Dans notre cas nous avons employé l'eau dont la masse volumique est égale à 1 comme corps de référence. La détermination précise de la densité du lactosérum est effectuée à l'aide d'un pycnomètre par pesées successives dont il est impératif de conserver le même pycnomètre pour mesurer la masse d'eau et la masse d'échantillon selon la norme (AFNOR NF 60-214 1969).

IV.6.4.3. PH du lactosérum.

Il est mesuré en utilisant un pH mètre numérique de type HANNA HI 9321.

D'autres analyses tel que : matière grasse, matière protéique, sel, lactose et l'extrait sec dé-graissé ont été réalisés à l'aide d'un lactoscan.

IV.7. Analyses statistiques.

Dans le but de comparer les valeurs obtenues lors des tests effectués, nous avons adopté une analyse de la variance ; la différence est considérée comme significative au seuil de 5%.

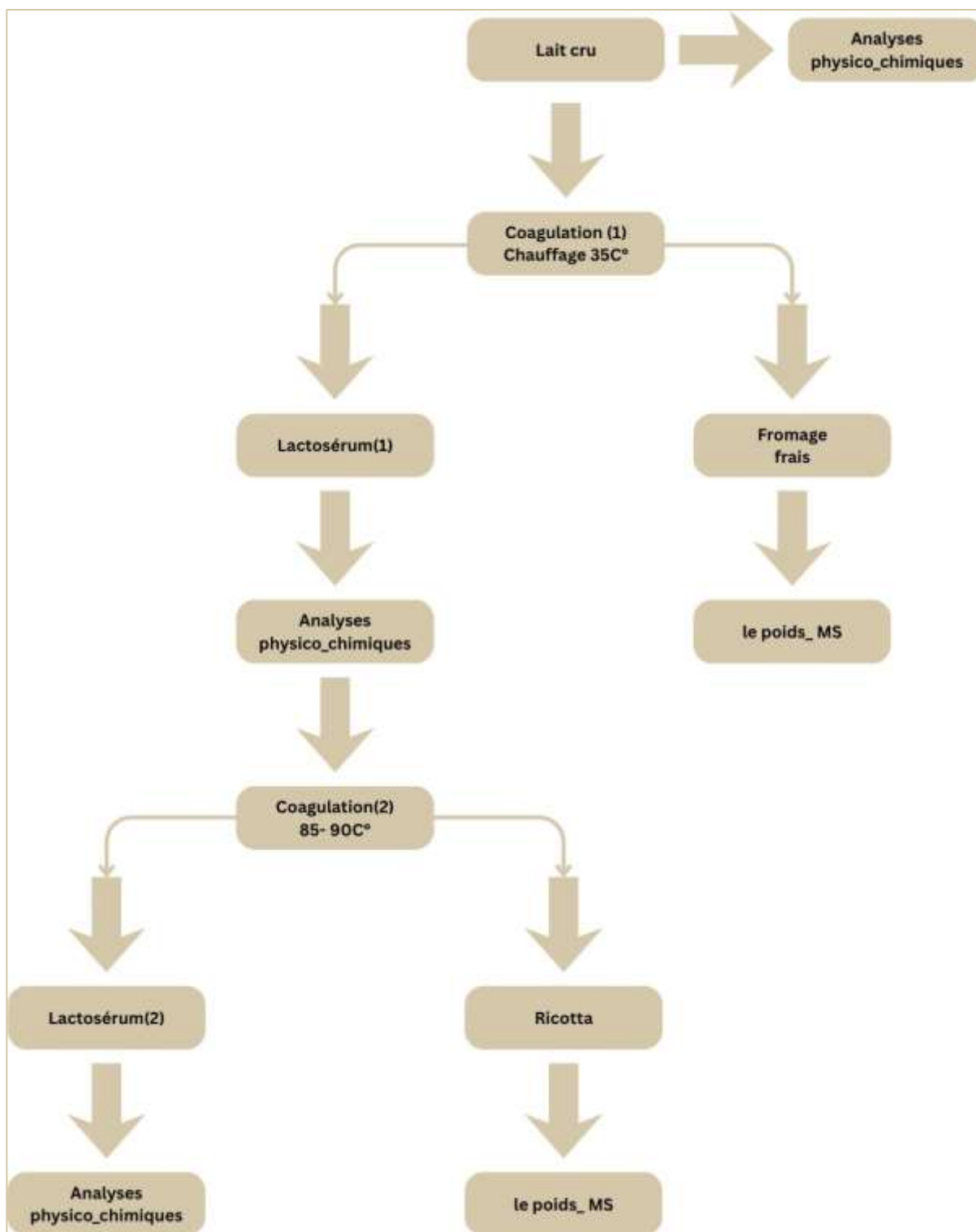


Figure14 : Schéma expérimental

CHAPITRE V

Résultats et Discussion

Ce chapitre présente les résultats obtenus au cours de ces travaux, qui consistent principalement en :

- Analyses physico-chimiques du lait de chèvre et du lactosérum
- Calcul des coefficients d'extraction et du rendement fromager

V.1 Caractéristiques physicochimiques du lait de chèvre :

Le tableau suivant rassemble les moyennes et les écarts types des principales caractéristiques Physicochimiques du lait des chèvres Saanen utilisées lors de notre étude.

Tableau 8 : Analyses physicochimiques du lait du lait de la chèvre Sannen

Paramètres	Valeurs moyennes Lait de chèvre « Saanen »	Coefficient de variance (%)
Densité à 25 °C	1,0315±0,0007	0,068
PH à 25°C	6,56±0,01	—
Matière grasse (%)	4,4±0,14	3,214
Matière protéique (%)	3,25±0,07	2,175
Lactose (g/l)	4,55±0,07	1,554
Sel (%)	0,7±0,01	0
SNF (%)	8,86 ±0,02	—

V.1.1 La Densité du lait

La densité du lait de chèvre obtenue dans notre étude est de 1,0315 ±0,0007 à 25°C. Cette valeur est supérieure à celle rapportée par (LAHRECH,2019), qui a enregistré une densité moyenne de 1,0273 ±0,01, ainsi qu'à celle observée chez la race Saanen par (VULIC et al.,2021), estimée à environ 1,028. Cette différence pourrait être attribuée à une teneur plus élevée en matière sèche totale, notamment en protéines et en sels minéraux.

La densité du lait est une propriété physico-chimique directement influencée par sa composition, notamment les teneurs en matière grasse et en solides non gras. Elle varie également en fonction de plusieurs facteurs tels que la race, le système d'alimentation, les conditions d'élevage et les variations saisonnières, ce qui explique les différences observées entre les laits de différentes origines (MCCARTHY ET AL., 2020)

V.1.2 Le PH du lait de chèvre

PH du lait de chèvre obtenu dans notre étude varie de 6,56 à 6,76. Ces valeurs sont légèrement supérieures à celle rapportée par (LAHREHCH, 2019), qui a enregistré un pH moyen de 6,50 $\pm$ 0,08, et restent proches de celles observées chez la race Saanen par (VULIC et al., 2021), comprises entre 6,5 et 6,7. Les valeurs obtenues se situent dans l'intervalle normal du lait caprin frais, généralement compris entre 6,5 et 6,8.

Le pH du lait de chèvre se situe généralement entre 6,4 et 6,8. Il peut varier en fonction de plusieurs facteurs, notamment le génotype, l'alimentation, le stade de lactation et la fraîcheur du lait (AT-TIA et al., 2000 ; PARK et HEINLEIN, 2007). Ces variations sont liées à la composition biochimique du lait, en particulier aux protéines et aux systèmes tampons présents. Ainsi, les valeurs enregistrées dans notre étude confirment la bonne qualité physico-chimique du lait hydrolysé

V.1.3 La Matière grasse du lait de chèvre

La teneur en matières grasses est le composant le plus variable de la composition du lait. Dans notre étude, elle était de 4,4 %. Cette valeur est significativement supérieure à celle rapportée par LAHRECH (2019), qui indiquait 21,70 g/L ($\approx$ 2,17 %), et également supérieure à 3,20 % ($\approx$ 32 g/L) observée par (VULIC et al., 2021) chez la race Saanen.

Ces résultats démontrent clairement que le lait analysé présente une teneur en matières grasses importante à celle rapportée dans les études précédentes, tant pour la race Arbia étudiée par (LAHRACH, 2019) que pour la race Saanen. Cette différence substantielle peut refléter une variation importante de la teneur en matières grasses du lait de chèvre en fonction des conditions de production.

La teneur en matières grasses est fortement influencée par plusieurs facteurs, notamment la génétique, la race, l'alimentation, le stade de lactation et les conditions d'élevage. Elle est également

souvent liée à la composition globale du lait, en particulier à sa teneur en protéines, ce qui explique les différences notables observées entre les différentes études.

V.1.4 La Matière protéique du lait de chèvre

Les protéines jouent un rôle essentiel dans la fabrication du fromage. Les caséinates sont les principaux composants responsables de la coagulation du lait et déterminent en grande partie la quantité de fromage produite. Lors de la production, ces protéines se combinent au calcium et au phosphore pour former des structures mycéliennes qui fusionnent progressivement pour former le caillé.

Dans notre étude, la teneur en protéines était de 3,25 %. Cette valeur est légèrement inférieure à celle rapportée par (LAHRECH, 2019), qui était de 35,40 g/L ($\approx 3,54$ %), et également inférieure à celle observée par (VULIC et al., 2021) chez la souche Saanen, estimée à 3,64 %. Ces résultats indiquent que l'échantillon étudié présente une teneur en protéines relativement faible par rapport aux valeurs de référence.

Cette différence peut être due à plusieurs facteurs, notamment la génétique, la souche, l'alimentation, le stade de lactation et les conditions d'élevage, qui influencent tous directement la composition protéique du lait.

V.1.5 Le Lactose du lait de chèvre

Le lactose est le sucre principal du lait, synthétisé dans la glande mammaire à partir du glucose, et il joue un rôle important dans la fermentation du lait. Dans notre étude, la teneur en lactose est de 4,55 %. Cette valeur est faible par rapport à celle rapportée par (LAHRECH, 2019), qui est de 52,13 g/L ($\approx 5,21$ %), par contre elle est supérieure à celle observée chez la race Saanen donnée par (VULIC et al., 2021), estimée à environ 3,86 %.

Ces résultats montrent un écart important entre notre échantillon et les valeurs de la littérature. En revanche, les données de (LAHRECH, 2019) et celles de (VULIC et al., 2021) restent proches et indiquent des teneurs normales en lactose dans le lait de chèvre.

Le lactose est généralement considéré comme un constituant assez stable du lait, mais les différences observées peuvent être liées à la méthode d'expression des résultats, à une possible dilution ou encore aux conditions de production et d'analyse.

V.1.6 L'extrait sec dégraissé du lait de chèvre

L'évaluation de l'extrait sec dégraissé (SNF) pour nos échantillons de lait de chèvre de race Saanen révèle une valeur moyenne de 8.86. L'extrait sec dégraissé reflète une composition modérée en solides non gras (protéines + lactose + minéraux), ce qui confirme la densité relativement élevée de l'échantillon (figure14).

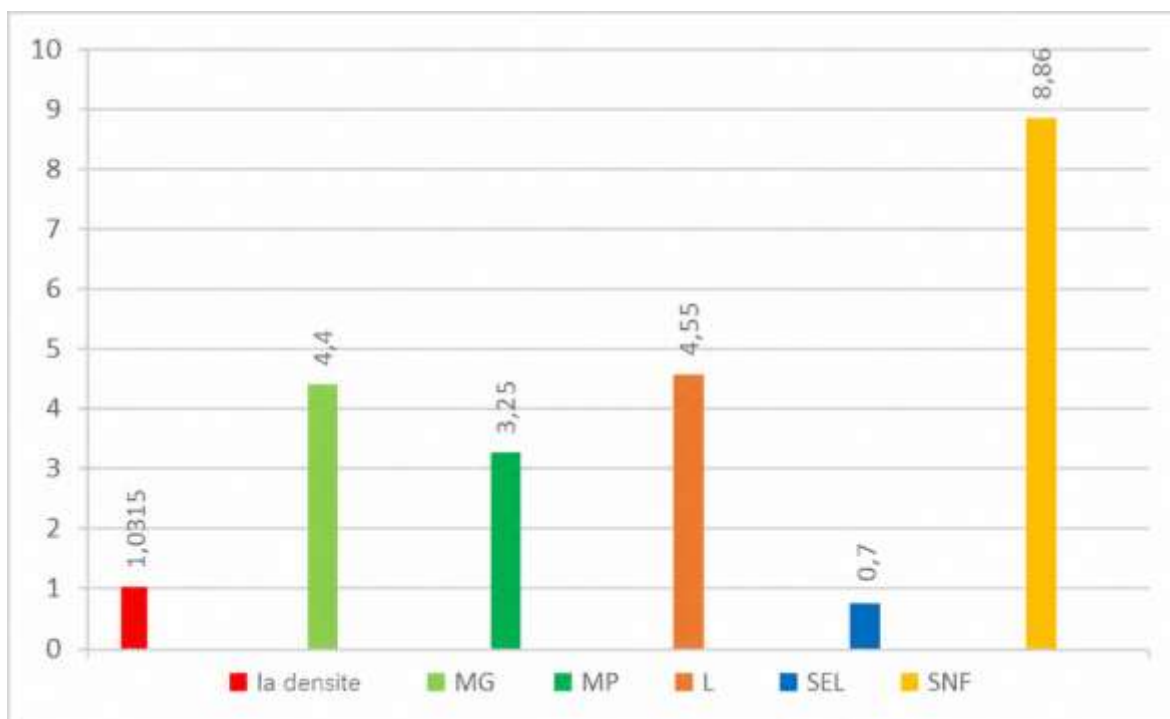


Figure15 : Analyse physicochimique du lait (%)

V.1.7 La Matière Minérale (MM %) du lait :

Les analyses effectuées montrent que le taux moyen de la matière minérale (cendres) dans le lait de chèvre de race Saanen est de 0.7%. Ce résultat reste inférieur à celui de (LAHRECH ,2019), qui a obtenu une valeur moyenne de 0.80 % (soit 8.03 g/l) pour la race Arbia.

V.2.Pratique fromagère et évaluation de son efficacité :

V.2.1 Coagulation par présure

Nos résultats expérimentaux ont montré que la coagulation du lait de chèvre par la présure conduit à la formation d'un caillot cohésif avec une séparation nette du lactosérum. Ce comportement traduit l'action spécifique de l'enzyme sur la κ -caséine, favorisant la formation d'un réseau protéique stable responsable de la structuration du gel.

Ces observations sont en accord avec les résultats de (HOVJECKI et al., 2022), publiés dans la revue Fermentation. Les auteurs ont montré que l'augmentation de la concentration en présure de 0,010 à 0,054g/L entraîne une réduction importante du temps de coagulation (de 15–18 min à 5–7 min), accompagnée d'une amélioration de la fermeté du caillot et de la vitesse d'agrégation des micelles de caséine.

L'étude a également mis en évidence que la réponse du système n'est pas strictement linéaire, puisque la rigidité du gel atteint un plateau à des concentrations élevées de présure. Cela indique qu'au-delà d'un certain seuil, l'augmentation de l'enzyme n'améliore plus significativement la qualité du caillot, en raison d'un phénomène de saturation du système protéique. Ce comportement est expliqué par la déstabilisation progressive des micelles de caséine et la formation d'un réseau de plus en plus dense jusqu'à stabilisation.

En comparaison avec nos résultats, nous observons le même comportement général, à savoir une coagulation rapide et une bonne séparation du lactosérum, ce qui confirme la bonne efficacité de la présure dans nos conditions expérimentales. Ces résultats restent cohérents avec ceux de (HOVJECKI et al. ;2022), qui soulignent l'importance des paramètres technologiques (notamment la température et la concentration enzymatique) dans l'efficacité de la coagulation

V.2.2 Coagulation Acide :

Nos résultats expérimentaux ont montré que la coagulation acide du lait de chèvre se produit après l'ajout d'acide acétique et le chauffage, avec une formation progressive du caillé et une séparation nette du lactosérum (petit-lait). Ce phénomène est associé à une diminution du pH, entraînant une perte de stabilité électrostatique des molécules de caséine et la rupture de la couche protectrice de κ -caséine. Il en résulte l'agrégation des mésylates et la formation d'un réseau protéique.

Ces résultats concordent avec les observations de (HOVJECKI et al. 2022), publiées dans la revue Fermentation, qui ont démontré que la coagulation acide (par abaissement du pH ou modification du milieu) réduit la répulsion entre les mésylates de caséine, accélérant ainsi l'agrégation lorsque le pH se rapproche de la neutralité (environ 4,6 en coagulation acide conventionnelle). Cette étude a également montré que la coagulation acide produit un réseau protéique moins uniforme et moins rigide que la coagulation par la présure, malgré l'accélération du processus d'agrégation.

Les poids de fromages obtenus lors la coagulation acide restent inférieurs par rapport à la coagulation enzymatique avec respectivement 21,55g et 30,50g, cela est dû à la fragilisation des liaisons entre les caséines durant l'acidification. Les coefficients de variation enregistrés étaient de l'ordre de 4,49%.

Les résultats de l'étude ont également montré que la structure du gel dérivé de la caséine dépend de la nature de la réaction :

- En milieu acide : une perte de charge et une agrégation aléatoire des mésylates se produisent (gel faible et hétérogène).
- En milieu enzymatique : le clivage de la κ -caséine se produit, aboutissant à un réseau plus ordonné et stable.

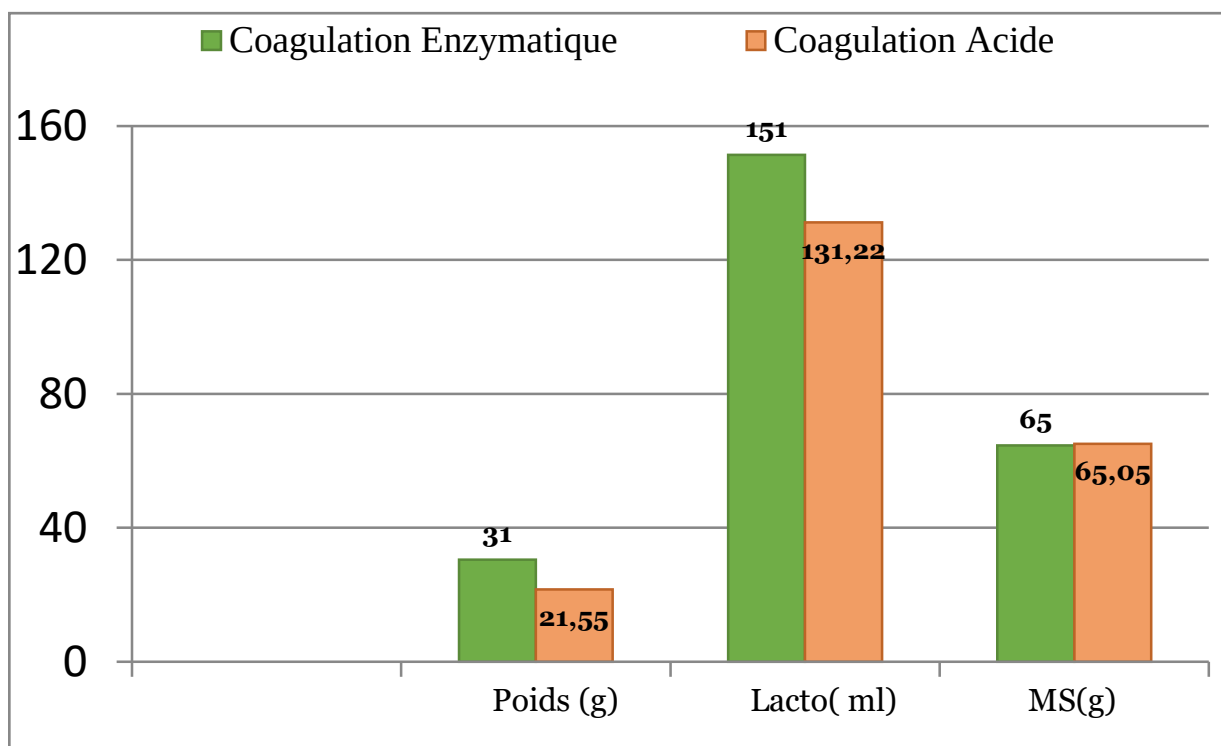


Figure16 : Comparaison des paramètres technologiques obtenus par coagulation enzymatique et coagulation acide du lait de chèvre.

Comparativement à nos résultats, le gel acide s'est avéré relativement mou et contenait une quantité importante de sérum, ce qui concorde avec les conclusions de l'article indiquant que les gels acides sont moins cohésifs et plus hygroscopiques que les gels enzymatiques. Ceci explique l'utilisation de ce type de coagulation dans la production de produits comme la ricotta, qui repose sur la séparation du sérum.

V.2.3 Coagulation des lactosérums : Ricotta :

Une première tentative de fabrication de picota à partir du lactosérum doux (présure animale) a été réalisée. Toutefois, cette méthode n'a pas permis de d'obtenir un coagulum (ricotta). Cela s'explique par le fait que la présure agit principalement sur la K caséine or que le lactosérum contient très peu de caséines, celles ci ayant été retenues dans le caillé lors de fabrication du fromage. Les protéines majoritaires du lactosérum sont les protéines sériques β lactoglobuline et α lactalbumine, qui nécessitent un traitement thermique suivi d'une acidification pour assurer la coagulation. C'est pourquoi la méthode de coagulation acide a permis d'obtenir la picota.

Notre expérience a montré que la ricotta est fabriquée à partir du lactosérum issu de la production de fromages à pâte molle au lait de chèvre. Ce lactosérum est chauffé avec ajout d'acide acétique, ce qui provoque une coagulation des protéines à sa surface. Ce phénomène indique la coagulation des protéines solubles dans le lactosérum, notamment les protéines de lactosérum, sous l'effet de la chaleur et de l'acidité.

Ces résultats concordent avec les observations de (PIZZILLO et al.,2005) et de (KOSCOWSKI,1977), qui ont démontré que la production de ricotta implique principalement le chauffage du lactosérum à haute température (85–90 °C). Cette chaleur dénature les protéines de lactosérum, et le processus de coagulation est ensuite accéléré par l'ajout d'acide acétique, ce qui entraîne l'agglomération des protéines en flocons qui remontent à la surface.

Ces études ont également montré que la maîtrise des conditions de chauffage influe directement sur la qualité de la ricotta. Un chauffage de moins de 10 minutes donne un caillé très mou, faible et difficile à façonner, tandis qu'un chauffage excessif (environ 20 minutes) entraîne une surcuisson de la ricotta, altérant sa texture finale.,

Après la coagulation, ont obtenu des poids de Ricotta minime allant de 3,45 à 3,619 g par rapport aux deux coagulations précédentes. Le CV obtenu était 4,92% qui reste assez significatif.

En comparaison avec nos résultats, un caillé protéique s'est clairement formé à la surface du lactosérum après chauffage et ajout progressif d'acide acétique. Ceci concorde avec les résultats des études de référence concernant le rôle de la chaleur et de l'acidité dans la dénaturation et l'agrégation des protéines du lactosérum pour obtenir la texture de la ricotta.

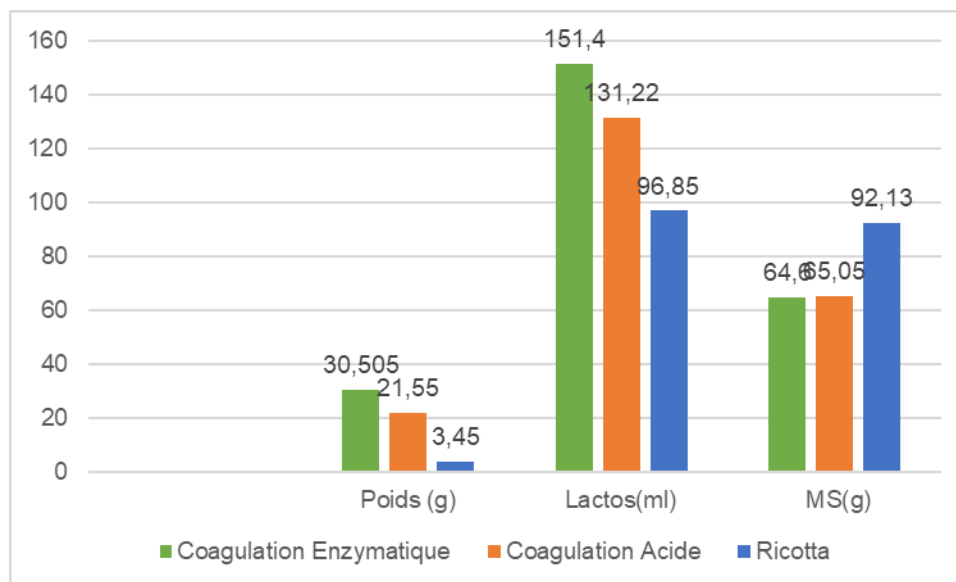


Figure 17 : Comparaison des paramètres technologiques des produits obtenus par coagulation acide, coagulation enzymatique et fabrication de la ricotta.

V.2 4 Efficacité de la pratique fromagère :

Afin d'évaluer l'efficacité de la transformation fromagère nous nous sommes référés à la comparaison entre les deux rendements fromagers réels et théoriques. Le premier correspond au poids fromager obtenu après égouttage alors que le deuxième est une valeur calculée par une formule dépendante de deux paramètres biochimiques représentés par les taux protéique et butyreux du lait préalablement mesurés, cette équation est donnée par (CUVILLIER,2005). Et pour correspondre aux standards fromagers (en %), toutes les données ont été ramenées sur une base de 100 ml de lait de départ (en divisant par deux nos résultats initiaux obtenus sur 200ml).

Le tableau suivant présente les rendements fromagers réels et théoriques des trois fromages obtenus

Tableau 9 : Les rendements réels et théoriques des différents fromages obtenus :

	Rendements réels	Rendement théoriques
Fromages obtenus d'une coagulation enzymatique	15,25 %	15 %

Fromages obtenus d'une coagulation acide	10,58	10,5 %
Ricotta	1,73 %	—
Fromage acide plus ricotta	12,31 %	—

En se référant au tableau ci-dessus, on remarque que pour la coagulation enzymatique, la rétention du gras et des protéines était maximale et cela donne la meilleure efficacité parmi les trois méthodes (15,25%).

Pour la coagulation acide, le rendement était plus faible et moins performant avec 10,58% d'où la fuite de beaucoup de matière sans le lactosérum.

La ricotta, qui présente une bonne valorisation des protéines sériques restantes enregistre un faible rendement réel avec 1,73.

Par contre la combinaison des fromages acides avec la ricotta permet de rattraper une grande partie de la matière perdue et fait monter le rendement total à 12,31%, optimisant ainsi au maximum l'utilisation de notre matière première.

V.3 Propriétés organoleptiques des fromages caprins obtenus

V.3.1 Texture des fromages

Au cours de la fabrication, des différences de texture ont été observées entre les différents fromages obtenus. Le fromage coagulé à la présure présentait une texture ferme et compacte, tandis que le fromage coagulé à l'acide était plus friable et moins ferme. La ricotta de chèvre se distinguait par une texture légère et crémeuse. Ces différences sont liées au mode de coagulation ainsi qu'à la nature des protéines impliquées dans la formation de chaque type de fromage.



Figure 18 : Fromage à la présure



Figure19 : Fromage acide



Figure 20 : Ricotta acide

V.4 Caractérisation des lactosérums Obtenus (Doux, acide, Ricotta).

V.4.1 Aspect générale des lactosérums.

Au cours de nos essais, nous avons observé que les différents lactosérums obtenus présentaient des aspects visuels variables. Le lactosérum doux s'est présenté avec une couleur jaune verdâtre et un aspect relativement limpide. Le lactosérum acide a montré un aspect légèrement plus trouble, avec une transparence réduite par rapport au lactosérum doux. Pour le lactosérum issu de la fabrication de la ricotta, nous avons constaté qu'il était plus clair et plus transparent, ce qui peut s'expliquer par la récupération d'une partie des protéines lors de la coagulation thermique. Aucun dépôt particulier ni anomalie visuelle n'a été observé au niveau des échantillons analysés.

V.4.2 Caractéristiques physicochimiques des lactosérums Obtenus

V.4.2.1 Volume des lactosérums extraits.

Tableau 10 : Caractéristiques physico-chimiques des lactosérums Obtenus

Paramètres	Lactosérum caprin obtenus		
	Doux	Acide	Ricotta acide
Physicochimiques			

Volumes extraits (ml)	135,25±10,21	137,73 ± 45,54	84,85±16,87
Densités à 25°C.	26,2±0,1	31,2±0,98	35,33±1,25
Lactose %	5,75±0,03	4,37±0,22	5,43±0,11
Sel %	0,53±0,02	0,7±0,008	0,85±0,03
Matière grasse %	0,31±0,005	4,49±0,022	1,66±0,05
Matière protéique %	0,88±0,01	3,55±0,12	1,26±0,05
SNF : Extrait sec dégraissé %	6,11±0,03	9,14±0,37	9,96±0,15

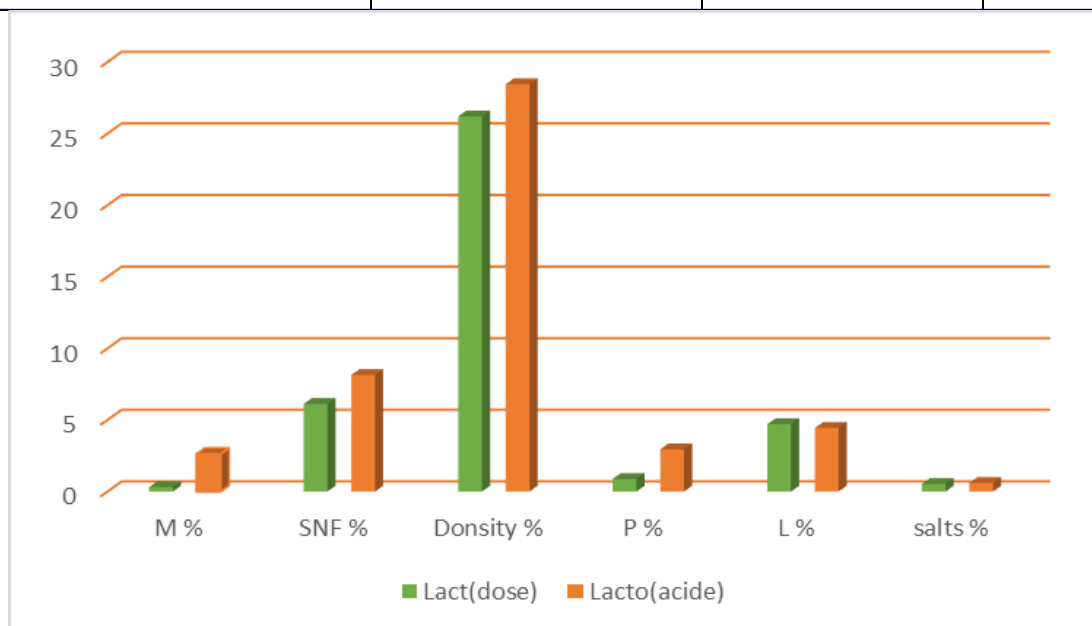


Figure 21 : Comparaison des paramètres physico-chimiques du lactosérum produit par coagulation acide et par coagulation doux

V.4.2.1.1 Les volumes de lactosérum

Les volumes de lactosérum extraits varient selon le type de coagulation. Le lactosérum acide présente le volume le plus élevé (137,73 ±45,54 ml), suivi de près par le lactosérum doux (135,25 ± 10,21 ml), tandis que le lactosérum de ricotta montre le volume le plus faible (84,85 ±16,87 ml).

Cette différence peut s'expliquer par le procédé technologique utilisé : la coagulation pour la ricotta (souvent associée à un traitement thermique plus poussé) entraîne une rétention plus importante de l'eau et des matières dans le caillé, ce qui réduit la quantité de lactosérum récupéré. À l'inverse, les coagulations acide et douce permettent une séparation plus importante de la phase liquide, d'où des volumes plus élevés.

V.4.2.2 La Densité et l'extrait sec dégraissée des lactosérums

La densité du lactosérum acide est beaucoup plus chargée en solide (extrait sec dégraissé 9,14% contre 6,11 pour le lactosérum doux), ce qui fait augmenter sa densité à 1,0312 (contre 1,0260 pour le lactosérum doux).

L'extrait sec dégraissé (SNF) augmente de 9,14 % pour le lactosérum acide à 9,96% pour le lactosérum Ricotta suivi d'une augmentation aussi de la densité de ce dernier à 1,0353. Cela peut être causé par l'évaporation de l'eau et du dégraissage du milieu.

Selon (HOVJECKI ET AL. ; 2022), les paramètres de coagulation (pH, température et type de traitement) modifient la structure du lait et influencent les propriétés physiques comme la densité du lacto-sérum.

Dans l'ensemble, ces résultats indiquent que le traitement thermique et le mode de coagulation influencent directement la teneur en solides non gras des différents lactosérums.

V.4.2.3 Le Lactose des lactosérums

Le lactose est plus élevé dans le lactosérum doux (5,75 %) et diminue dans le lactosérum acide (4,37 %). Cette diminution peut être liée à des transformations du lactose en conditions acides où les bactéries lactiques ont fermenté et consommé une partie du lactose pour le transformer en acide lactique.

HOVJECKI et al. (2022), indiquent également que la baisse du pH peut influencer les transformations biochimiques du lactose, ce qui explique les variations observées.

Entre le lactosérum acide et celui de Ricotta, le taux du lactose augmente de 4,37% à 5,43%. On sait que le lactose est un sucre ultra soluble qui ne coagule pas. Et la coagulation à haute température nécessaire à la Ricotta (85C° à 95C°), provoque une évaporation importante de l'eau. La réduction du volume d'eau concentre la quantité du lactose dans le Ricotta.

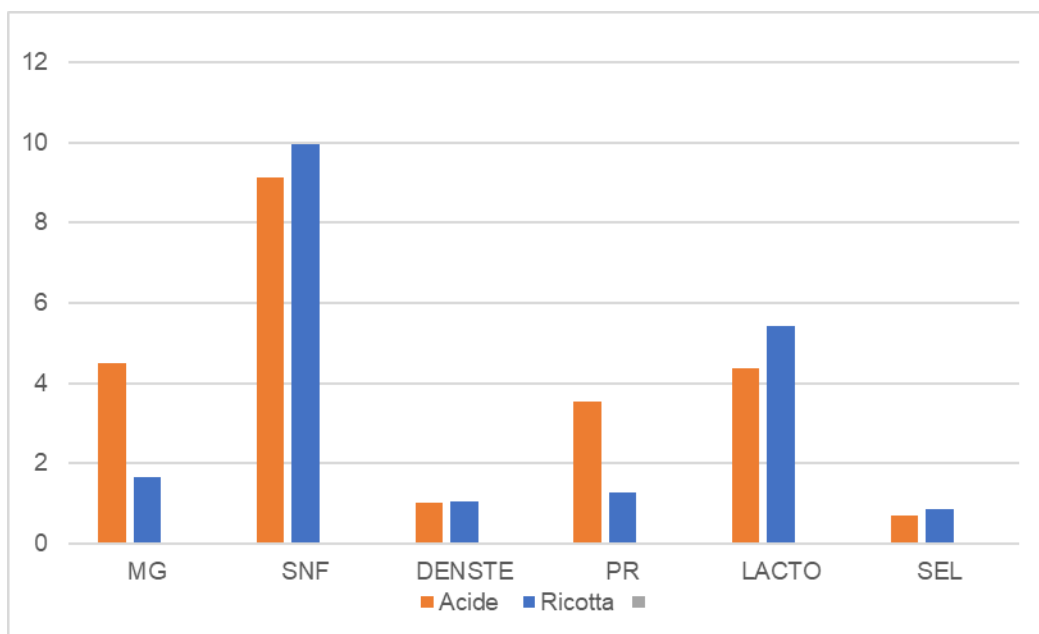


Figure 22 : Paramètres physico-chimiques des lactosérums produits par coagulation acide et Ricotta (%).

V.4.2.4 La Matière grasse (MG) des lactosérums :

Dans notre étude, la teneur en matière grasse varie selon le type de lactosérum, avec une valeur plus élevée dans le lactosérum acide (4,49 %), suivie du lactosérum doux (0,31 %). Cette différence peut être liée au mode de coagulation, notamment la coagulation acide qui favorise une plus grande libération des constituants du lait dans le lactosérum.

Entre le lactosérum acide et celui de la ricotta, le taux de matière grasse chute de 4,49% à 1,66%. En flocculant, les protéines créent un réseau serré qui emprisonne la majorité des globules gras ce qui confère la texture crémeuse du Ricotta.

Cette tendance est cohérente avec les résultats de (HOVJECKI ET AL.,2022), qui montrent que les paramètres de coagulation influencent fortement la répartition des composants du lait dans le lactosérum obtenu.

V.4.2.5 Les Protéines (PR) des lactosérums

Les résultats montrent que le lactosérum doux issu d'une coagulation avec présure contient les valeurs les plus faibles (0,31% et 0,88% de matière grasse et protéique successivement). Cela du

logiquement au l'effet de la présure sur les caséines et les globules gras qui sont piégées dans le fromage. A l'inverse, le lactosérum acide qui montre des taux très élevés (4,49% de matière grasse et 3,55 de matière protéique), ce qui témoigne d'une friabilité du caillé acide ayant laissé échapper une quantité importante de matière dans le lactosérum (caséines et du gras).

Entre le lactosérum acide et celui de la ricotta, le taux de matière protéique chute aussi de 3,55% à 1,26%. Cette différence est liée à la précipitation des protéines sous l'effet de la chaleur pour former le Ricotta.

Selon (HOVJECKI ET AL.,2022), la diminution du pH pendant la coagulation améliore le passage des protéines vers la phase liquide, ce qui confirme la tendance observée dans notre étude (HOVJECKI ET AL.,2022).

CONCLUSION

Dans le cadre de la valorisation des sous-produits laitiers et de la réduction de l'impact environnemental lié à l'industrie fromagère, ce travail a porté sur l'étude de la fabrication de fromage frais de chèvre par coagulation enzymatique et acide, ainsi que sur la valorisation du lactosérum obtenu par la production de ricotta. Une caractérisation physicochimique du lait de chèvre, des lactosérums produits et de la ricotta a également été réalisée afin d'évaluer leur potentiel technologique et nutritionnel.

Dans un premier temps, les analyses physicochimiques du lait de chèvre utilisé ont montré que celui-ci présentait des caractéristiques conformes aux valeurs généralement rapportées pour le lait frais.

Les différences observées par rapport à certaines études antérieures peuvent être attribuées à plusieurs facteurs tels que la race des animaux, leur alimentation, les conditions d'élevage et le stade de lactation.

La fabrication du fromage frais a été réalisée selon deux modes de coagulation : enzymatique à la présure et acide à l'acide acétique. La coagulation enzymatique a permis l'obtention d'un caillé plus ferme, plus homogène et plus facile à égoutter, alors que la coagulation acide a conduit à un caillé plus friable et moins compact. L'évaluation de l'efficacité fromagère confirme ainsi la meilleure aptitude de la coagulation enzymatique à retenir les constituants du lait et à produire un fromage de meilleure qualité technologique.

L'étude des lactosérums obtenus a révélé des différences liées au mode de coagulation. Les volumes récupérés variaient selon le procédé utilisé, la coagulation acide générant généralement un volume légèrement plus important. Sur le plan organoleptique, le lactosérum doux présentait une couleur jaune verdâtre et un aspect relativement limpide, tandis que le lactosérum acide était plus trouble. Le lactosérum résiduel issu de la fabrication de la ricotta apparaissait quant à lui plus clair en raison de la récupération d'une partie des protéines sériques lors du traitement thermique.

Les analyses physicochimiques des lactosérums ont montré que la densité la plus élevée ayant été observée pour le lactosérum de ricotta inversement à la teneur en lactose qui était plus élevée dans le lactosérum doux.

Les teneurs en protéines et en matière grasse différaient également selon les échantillons étudiés, elles étaient beaucoup plus élevées dans les lactosérums acides ce qui peut être attribué à une

rétenion variable des protéines dans le caillé et à leur passage dans la phase liquide au cours des différentes opérations de coagulation enzymatique et douce).

La valorisation du lactosérum par la fabrication de la ricotta a permis d'obtenir un fromage de lactosérum présentant une texture légère et crémeuse. Cette transformation a permis la récupération d'une partie importante des protéines sériques restant dans le lactosérum après la fabrication fromagère.

L'ensemble des résultats obtenus confirme que le lactosérum caprin constitue une matière première de grande valeur grâce à sa richesse en lactose, protéines sériques, minéraux et vitamines. Longtemps considéré comme un simple résidu de fabrication, il représente aujourd'hui une ressource exploitable pour la production de produits à forte valeur ajoutée. Sa transformation en ricotta apparaît ainsi comme une solution efficace permettant simultanément de réduire les impacts environnementaux liés à son rejet direct, notamment en raison de sa forte demande biologique en oxygène (DBO), et de développer de nouvelles opportunités de valorisation pour la filière laitière caprine.

En définitive, cette étude a démontré que la valorisation du lactosérum caprin par la fabrication de la ricotta constitue une approche à la fois écologique, économique et nutritionnelle. Elle offre une alternative durable pour la gestion des sous-produits laitiers tout en contribuant à la diversification des produits issus du lait de chèvre et au développement de la filière caprine en Algérie.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

1. **ADRIAN J., POTUS J. et FRANGNE R., 1991** – La science alimentaire de A à Z. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
2. **ADRIAN J., BOURLIER G. et SABEL A., 1980** – Composition minérale du lactosérum. Influence des facteurs technologiques, saisonniers et géographiques. *Le Lait*, 60(598) : 447-457.
3. **AFNOR, 1986** – Recueil de normes françaises. Contrôle de qualité des produits laitiers. 3e édition.
4. **AFNOR, 1974** – Lait et produits laitiers — Détermination de la teneur en matière grasse — Méthode de Gerber. Norme NF V04-210, AFNOR, Paris
5. **AGANGA A.A., AMARTEIFIO J.O. et NKILE N., 2002** – Effect of stage of lactation on nutrient composition of Taswana sheep and goats milk. *J. Food Comp. Anal.*, 15 : 533-543.
6. **ALAIS C., 1984** – Science du lait : principes des techniques laitières. 814 p.
7. **ALAIS C., 1998** – Ciencia de la leche : principios de técnica lechera. 12a reimpression Ed., CECSA, México.
8. **AMELLAL R., 1995** – La filière du lait en Algérie : entre l'objectif de la sécurité alimentaire et la réalité de la dépendance. *CIHEAM. Options Méditerranéennes Série B*, n°14: 229-238.
9. **ASHER D., 2024** – Milk into Cheese: The Foundations of Natural Cheesemaking Using Traditional Concepts, Tools, and Techniques. Chelsea Green Publishing, 496 p.
10. **ATTIEH J. M., ROBINSON R. K. et SANDERSON W. B., 2000** – Composition and quality of goat milk as affected by genetic and environmental factors. *Small Ruminant Research*.
11. **BEKHOUCHE-GUENDOZ N., 2011** – Evaluation de la Durabilité des Exploitations Bovines Laitières des Bassins de la Mitidja et d'Annaba. Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure Agronomique d'Alger (ENSA), Alger, 49-58 p.
12. **BENCHARIF, 2001** – La production laitière bovine en Algérie. 55 p.
13. **BENYOUB K.Q., 2016** – Caractérisation morphométrique, typologie de l'élevage caprin et étude physico-chimique de son lait au niveau de la wilaya de Tlemcen. Thèse de Master, Université de Tlemcen, 43 p.

14. **BERTRAND P., 1988** – Détermination de la teneur en lactose. Méthode de Bertrand. In Dosage du lactose du lait.
15. **BESBES S., BLECKER C., ATTIA H., MASSAUX C. et DEROANNE C., 2003** – Transformation du lactosérum doux en ricotta : effets du remplacement du traitement thermique par les hautes pressions hydrostatiques. 1ère Journée Scientifique & Technologique de l'Agroalimentaire : Texture et Qualité des Aliments.
16. **Beuvier E., Callon C., Montel M.-C., Lesty M., Anglade P., Durand G., Ray J.-C., Chabanon A., Le Ravallec P., Blanchard B., 2012** – Contribuer à la performance technico-économique des exploitations fromagères fermières en améliorant la maîtrise technologique et la qualité des fromages. *Innovations Agronomiques*, 25, 269–282.
17. **BOUBEZARI M. T., AISSI M. et HARHOURA K., 2010** – Contribution à l'étude des caractéristiques physicochimiques et mycologiques du lait chez quelques races bovines, ovines et caprines dans quelques élevages de la région de Jijel. 124 p.
18. **BRUGERE H., 2003** – Cours sur Le lait et les produits laitiers. École Nationale Vétérinaire de Toulouse.
19. **BUCHIN S., DUBOZ G., LE QUÉRÉ J. L. et GRAPPIN R., 1998** – Développement des caractéristiques biochimiques et sensorielles des fromages de chèvre. Étude interespèce par échange de la matière grasse et du lait écrémé de laits de vache et de chèvre. *Le Lait*, 78(6): 673-687.
20. **CALDERON I., DEPETERS E.J., SMITH N.E. et FRANKE A.A., 1984** – Composition of goat's milk: changes within milking and effects of a high concentrated diet. *Journal of Dairy Science*, 67: 1905-1911.
21. **CALVO M.M., 2000** – Effect of preservation treatments and ultrafiltration on chemical and technological properties of goats dairy product. 7th International conference on goats, 15-21 May, Tours, France.
22. **CHATTERTON D.E., SMITHERS G., ROUPAS P. et BRODKORB A., 2006** – Bioactivity of β -lactoglobulin and α -lactalbumin — Technological implications for processing. *International Dairy Journal*, 16(11) : 1229-1240.

23. **CHILLIARD Y., 1996** – Caractéristiques biochimiques des lipides du lait de chèvre : comparaison avec les laits de vache et humain. Actes du colloque : le lait de chèvre : un atout pour la santé. INRA, Niort, France, pp. 51-65.
24. **CHILLIARD Y., 1997** – Caractéristiques biochimiques des lipides du lait de chèvre : comparaison avec les laits de vache et humains. Intérêt nutritionnel du lait de chèvre. Annales pharmaceutiques françaises, 59(1) : 51.
25. **CHILLIARD Y. et SAUVANT D., 1987** – La sécrétion des constituants du lait. In Le lait matière première de l'industrie laitière. INRA – CEPIL, Ed. INRA, Paris, pp. 13-26.
26. **CUVILLIER D., 2005** – Mesurer votre rendement fromager. Chambre d'agriculture de Saône-et-Loire, France.
27. **DAMODARAN S. et PARAF A., 1997** – Food Proteins and Their Applications. Marcel Dekker.
28. **DANIAUX C., 2010** – Lait de chèvre : vérités et contrevérité. Filière ovine et caprine, n°34, 4ème trimestre, pp. 5-10.
29. **DE SIMIANE M., BROQUAT B. et HUGUET L., 1975** – Facteurs influençant la consommation des fourrages verts par la chèvre laitière. La Chèvre, 88 : 23-29.
30. **DE SANTIS E. P. L. et MAZZETTE R., 2002** – La ricotta : un substrato ideale. Caseus, 7 : 42-44.
31. **DE WITT J.N., 2001** – Manuel de l'Enseignant sur le Lactosérum et les Produits de Lactosérum. 1ère édition, European Whey Products Association, Bruxelles, Belgique.
32. **DOYON A., 2005** – Influence de l'alimentation sur la composition du lait de chèvre : revue des travaux récents. J. Anim. Feed. Sci., 13 : 685-688.
33. **DROGOUL C. et GERMAIN H., 1998** – Santé animale ovin, bovin, caprin. 1ère édition, Educagri, Dijon, 43-53 p.
34. **FAO, 1995** – Le lait et les produits laitiers dans la nutrition humaine. Food & Agriculture Organization, No. 28, 271 p.
35. **FAO, 2006** – Subject : Statistiques Alimentaires. [En ligne]. Dernière mise à jour mars 2006 [www.fao.org], (consulté le).

36. **FAO, 2010** – Small Scale Cheese Making. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
37. **FAO, 2013** – Milk and dairy products in human nutrition. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
38. **FAO/WHO, 1978** – Codex standard for whey cheese. Codex Alimentarius, STAN-A-7, (révisé en 1999).
39. **FAO/WHO, 2002** – Report of the fifth session of the Codex committee on milk and milk products. Codex Alimentarius, ALINORM 03/11.
40. **FOX P. F. et McSWEENEY P. L. H., 2015** – Dairy Chemistry and Biochemistry. Springer, Cham.
41. **FTLQ, 2002** – Science et technologie du lait. Fondation de Technologie Laitière du Québec. Inc., Ed. Presses Internationales Polytechnique, Québec, Canada.
42. **GAILLON P. et SIGWALD J.P., 1998** – Résultats de contrôle laitier des espèces bovines et caprine France 1997. Institut de l'élevage, Paris.
43. **GELAIS S.T.D., TIRRARD-COLLER P., BELANGER G., DRAPEAU R. et COUTURE R., 2002** – Le fromage. In : Science et technologies de transformation du lait. Vignola C.L. Ed., Presses internationales polytechnique, pp. 349-413.
44. **GHALY A. E. et SINGH R. K., 1989** – Pollution potential reduction of cheese whey through yeast fermentation. Applied Biochemistry and Biotechnology, 22(2) : 181-203.
45. **GONZÁLEZ S., 1996** – The biotechnological utilization of cheese whey: A review. Bioresource Technology, 57(1) : 1-11.
46. **GOUDEDRANCHE H., CAMIER-CAUDRON B., GASSI J. Y. et SCHUCK P., 2002** – Procédés de transformation fromagère (partie 3). Techniques de l'ingénieur. Agroalimentaire, 3(F6307) : F6307-1.
47. **GRAPPIN R., JEUNET R., PILLET R. et LE TOQUIN A., 1981** – Étude des laits de chèvre : teneur du lait de chèvre en matière grasse, matière azotée et fractions azotées. Lait, 61 : 117-133.

48. **GROSCLAUDE F., RICORDEAU G., MARTIN P., REMEUF F., VASSA L. et BOUILLON J., 1994** – Du gène au fromage : le polymorphisme de la caséine $\alpha S1$ caprine, ses effets, son évolution. INRA production animale, 7(1) : 3-19.
49. **GUEGUEN N., 1996** – La valeur nutritionnelle minérale du lait de chèvre. Intérêt nutritionnel et diététique du lait de chèvre. Actes du colloque : le lait de chèvre, un atout pour la santé. INRA, Niort, France, pp. 67-80.
50. **GUIRAUD J. P., 1998** – Microbiologie Alimentaires. Volume 4, 2ème Édition, Dunod, Paris, 89-95p.
51. **HAMBRAEUS L., 1992** – Nutritional aspects of milk proteins. Advanced Dairy Chemistry, 1(2): 57-490.
52. **HOVJECKI M., MILORADOVIC Z., BARUKČIĆ I., BLAŽIĆ M. et MIOCINOVIC J., 2022** – Rheological properties of goat milk coagulation as affected by rennet concentration, pH and temperature. Fermentation, 8(6) : 291.
53. **IMADALOU S., 2020** – À la rescousse de la Filière lait en Algérie : « Choix politicien ou simple pis-aller ». ELWATAN, édition économie.
54. **JAUBERT A., 1993** – Numération cellulaire et caractéristiques biochimique et technologiques du lait de chèvre. Somatic cells and milk of small ruminant – Proceeding of an international symposium, 25-27 septembre, Bella, Italy, pp. 263-268.
55. **JAUBERT A., 1996** – Les vitamines et les nucléotides du lait de chèvre. Intérêts nutritionnel et diététique du lait de chèvre. Actes du colloque : le lait de chèvre : un atout pour la santé. INRA, Niort, France, pp. 81-92.
56. **JEANTET R., CROGUENNEC T., GARRIC G., BRULÉ G., 2017** – Initiation à la technologie fromagère. 2e éd., Tec & Doc Lavoisier, Paris, 209 p.
57. **JENOT F., BOSSIS N., CHERBONNIER J., FOUILLAND C., GUILLON M.P., LAURET A., LETOURNEAU P., POUPIN B. et REVEAU A., 2000** – Les taux de lait de chèvre et leur variation. L'Éleveur de Chèvres, numéro 7, 10 p.

58. **JENSEN R., 1995** – Handbook of milk composition - General description of milks. Academic Press, Inc: 3(919).
59. **JOUAN P., 2002** – Lactoprotéines et lactipeptides : propriétés biologiques. Ed. INRA, 128 p.
60. **Journal of Dairy Science, 2025** – Ricotta cheese quality as affected by season. Journal of Dairy Science, article S002203022500253X.
61. **KADI S. A., DJELLAL F. et BRCHICHE M., 2007** – Caractérisation de la conduite des vaches laitières dans la région de Tizi-Ouzou. Algérie. Livestock Research for Rural Development, 12 p.
62. **KINSELLA J. E. et WHITEHEAD D. M., 1989** – Proteins in whey: chemical, physical, and functional properties. Advances in Food and Nutrition Research, 33: 343-438.
63. **KNIGHTS M. et GARCIA G.W., 1997** – The status and characteristics of the goat (*Capra hircus*) and its potential role as a significant milk producer in the tropics: A Review. Small Ruminant Research, 26 : 203-215.
64. **KORA S., 2005** – Contribution à l'amélioration de la technologie de production du fromage peulh au Bénin. Thèse d'ingénieur agronome, Université d'Abomey-Calavi, Bénin.
65. **KOSIKOWSKI F. V., 1977** – Cheese and fermented milk foods. Edwards Bros., Inc., Ann Arbor, MI, pp. 168-179.
66. **KOSIKOWSKI F. V., 1979** – Utilisation du lactosérum et produits à base de lactosérum. pp. 11-21.
67. **LAHRECH A., 2019** – Aptitudes fromagères du lait de chèvres locales "Makatia, Arabia, M'Zab et naine de Kabylie" étude des propriétés fonctionnelles des protéines laitières. Thèse de Doctorat, 238 p.
68. **LARPENT J. P., 1997** – Lait et produits laitiers non fermentés. Dans Microbiologie alimentaire (BOURGEOIS C.M., MESCLE J.F et ZUCCA), Tome 1 : Aspect microbiologique de la sécurité et de la qualité alimentaire. Éd. Tec et Doc. Lavoisier, Paris : 201-215.
69. **LE JAOUEN J.C., 1986** – Composition du lait et de nombreux facteurs. La Chèvre, 153 : 10-13.
70. **LE JAOUEN J.C., 1990** – Les enjeux de la qualité. Réussir la chèvre, 179 : 19-21.
71. **LE JAOUEN J.C., 1999** – Reproduction et traitement lumineux. Chèvre, 230 : 27-29.

72. **LEMELIN M., 2005** – Produire du lait de chèvre à l'année, ou comment dessaisonner sa production. Filière Ovine et caprine, 11: 1-5.
73. **LIBURDI K. et al., 2021** – Milk-clotting enzymes of microbial origin and their role in cheesemaking: A review. Journal of Dairy Science, 108: 10427-10446.
74. **LUCEY J. A., 2002** – Formation and physical properties of milk protein gels. Journal of Dairy Science, 85(2) : 281-294.
75. **LUQUET F. M. et CORRIEU G., 2005** – Bactéries lactiques et probiotiques. Application des bactéries lactiques dans les produits laitiers frais et effet probiotique. pp. 1-100.
76. **MAHAUT M., JEANTET R. et BRULÉ G., 2000** – Initiation à la technologie fromagère. Éditions Tec & Doc.
77. **MAHE S., 1996** – Valeur nutritionnelle du lait en alimentation humaine. Intérêts nutritionnels et diététique du lait de chèvre. Actes du colloque : le lait de chèvre : un atout pour la santé. INRA, Niort, France, pp. 9-26.
78. **MARTIN P., 1996** – La composition protéique du lait de chèvre : ses particularités. Intérêts nutritionnel et diététique du lait de chèvre. Actes du colloque : le lait de chèvre : un atout pour la santé. INRA, Niort, France, pp. 9-26.
79. **MATHIEU J., 1998** – Initiation à la Physico-Chimie du Lait. Ed. Tec & Doc Lavoisier, Paris.
80. **MOLETTA R., 2002** – Gestion des problèmes environnementaux dans les IAA. Tech et Doc, Paris, 600 p.
81. **MOLETTA R., 2009** – Les traitements biologiques. Le Traitement Des Déchets, pp. 408-587.
82. **MOLLEA C., MARMO L. et BOSCO F., 2013** – Valorisation of Cheese Whey, a By-Product from the Dairy Industry. In: Muzzalupo I. (Ed.), Food Industry. IntechOpen.
83. **MORA-GUTIERREZ A., HAROLD M., FARRELL J.R. et KUMOSINSKI T.F., 1993** – Comparison of calcium induced Association of bovine and caprine caseins and the Relationship of α S1-casein content to colloidal stabilization: A thermodynamic linkage analysis. Journal of Dairy Science, 76: 3690-3697.

84. **MORGE S., LEFRILEUX Y. et BLANCHARD F., 2007** – Report du lait et du caillé de chèvre et la qualité sensorielle des fromages au lait cru ou pasteurisé. *Lait*, 81: 743-756.
85. **MORR C. V. et HA E. Y. W., 1993** – Whey protein concentrates and isolates: processing and functional properties. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 33(6) : 431-476.
86. **MOUALEK I., 2009** – Caractéristiques du lait de chèvre collecté localement : séparation chromatographique et contrôles électrophorétiques des protéines. Mémoire de Magister, Science biologique, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 22-23 p.
87. **MUCCHETTI G., CARMINATI D. et PIRISI A., 2002** – Ricotta fresca vaccina ed ovina : osservazioni sulle tecniche di produzione e sul prodotto. *Il Latte*, 27(2): 154-166.
88. **MULVIHILL D. M. et FOX P. F., 1989** – Physico-chemical and functional properties of milk proteins. *Developments in Dairy Chemistry*, 4: Functional milk proteins, pp. 131-172.
89. **NAFTI Y., 2011** – Module Biochimie Alimentaire. Ed. biohay, Université de Djelfa, 93 p.
90. **PARK Y. W. et HAENLEIN G. F. W., 2007** – Milk composition of goats and its variability in relation to breed, feeding and lactation stage. *Handbook of Milk of Non-Bovine Mammals*. Blackwell Publishing.
91. **PARMAR P., LOPEZ-VILLALOBOS N., TOBIN J.T., MURPHY E., McDONAGH A., CROWLEY S.V., KELLY A.L. et SHALLOO L., 2020** – The Effect of Compositional Changes Due to Seasonal Variation on Milk Density and the Determination of Season-Based Density Conversion Factors for Use in the Dairy Industry. *Foods*, 9(8) : 1004.
92. **PELLERIN P., 2001** – Mise au point. Intérêt nutritionnel de lait de chèvre. Connaissances actuelles et perspectives. *Ann Pharm Fr*, 59, Masson, pp. 51-62.
- PE L., ARGÜELLO A., 2019** – Review: Goat milk production and composition. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 32(8), 1306–1320.
93. **PÉREZ-GAGO M.B. et KROCHTA J.M., 2002** – Formation and properties of whey protein films and coatings. In: GENNADIOS A. (Ed.), *Protein-Based Films and Coatings*. CRC Press, Boca Raton, USA, pp. 159-180.

94. **PEREZ-GAGO M.B., SERRA M., ALONSO M., MATEOS M. et DEL RÍO M.A., 2005** – Effect of whey protein-and hydroxypropylmethylcellulose-based edible composite coatings on color change of fresh-cut apples. *Postharvest Biology and Technology*, 36(1): 77-85.
95. **PIERRE A., JEAN-LUC LE QUÉRÉ, RIAUBLANC A., YVON LE GRAET, DEMAIZERES D. et MICHEL F., 1998** – Composition and physico-chemical characteristics of goats milks containing A or O α S1 casein variants. 78 : 191-202.
96. **PIREDDA G., 2002** – La Ricotta : Una grande variabilità compositiva. *Caseus*, 5 : 28-31.
97. **PIRISI A., 2002** – La Ricotta tradizionale. *Caseus*, 5: 18-20.
98. **PIZZOFERRATO L., 2002** – La Ricotta: Giova ricuocere. *Caseus*, 5 : 24-25.
99. **POIRIER M., 1996** – Industrie de transformation du lait et environnement. Guide technique sectoriel. Gouvernement de Québec.
100. **PORTMANN A., 1970** – La congélation et le stockage du fromage de chèvre. *Lait*, 493-494 : 161-164.
101. **RAMET J. P., 1997** – Technologie comparée des différents types de caillé. *Le fromage*, pp. 333-364.
102. **REMEUF F., 1993** – Influence du polymorphisme génétique de la caséine α S1 caprine sur les caractéristiques physicochimiques et technologiques du lait. *Lait*, 73: 549-557.
103. **ROY D., YE A., MOUGHAN P.J. et SINGH H., 2020** – Composition, structure, and digestive dynamics of milk. (Référence incomplète - à compléter).
104. **SANOGO M., 1994** – Créer une petite fromagerie. Édition du GRET, pp. 12-15.
105. **SAURIS Y., 1973** – Fromage de chèvre. *Lait*, 525-526: 309-316.
106. **SHAH M. A., MIR S. A. et PARAY M. A., 2014** – Plant proteases as milk-clotting enzymes in cheesemaking: A review. *Dairy Science & Technology*, 94(1) : 5-16.
107. **SILAIT, 2008** – Actes du 1er salon international du lait et de ses dérivés. 27 au 29 mai 2008, Alger.
108. **SMITHERS G. W., 1996** – New opportunities from the isolation and utilization of whey proteins. *Journal of Dairy Science*, 79(8): 1454-1459.

109. **SMITHERS G. W., 2008** – Whey and whey proteins—From 'gutter-to-gold'. *International Dairy Journal*, 18(7) : 695-704.
110. **SOTTIEZ P., 1990** – Produits dérivés des fabrications fromagères in : lait et produits laitiers ; vache, brebis, chèvre. Édition Lavoisier, Paris, pp. 633.
111. **ST-GELAIS D., OULD BABA A. et TURCOT S., 2000** – Composition du lait de chèvre et aptitude à la transformation. Centre de recherche et de développement sur les aliments : Agriculture et Agroalimentaire Canada, pp. 1-12.
112. **THAPON J. L., 2005** – Science et technologie du lait. Agrocampus-Rennes, France, 14 : 77.
113. **TOUHAMI M., 1996** – Intérêt nutritionnel du lait de chèvre. Intérêts nutritionnel et diététique du lait de chèvre. Actes du colloque : le lait de chèvre : un atout pour la santé. INRA, Niort, France, pp. 93-100.
114. **VEISSEYRE R., 1995** – Technologie du lait. La Maison Rustique, Paris.
115. **VEISSEYRE R., 1975** – Technologie du lait : constitution, récolte, traitement et transformation du lait. 3e édition entièrement refondue. La Maison Rustique, Paris. (714 p.)
116. **VIGNOLA-LAPOINTE C., 2002** – Science et technologie du lait : transformation du lait. Presses internationales polytechnique, pp. 29-34.
117. **VIOLLEAU V., 1999** – Valorisation du lactosérum par électrodialyse. Thèse de Doctorat, Montpellier.
118. **VULIĆ A., KUDUMIJA N., LEŠIĆ T. et al., 2021** – Chemical composition and fatty acid profile of Alpine and Saanen goat milk from Bosnia and Herzegovina. *Veterinarska Stanica*, 52(1) : 13-21.
119. **WALSTRA P., WOUTERS J.T.M. et GEURTS T.J., 2006** – Dairy Science and Technology. CRC Press.
120. **WATSON D. L., HARPER W. J., & ROUPAS P., 2017** – Whey proteins: composition, functionality and applications in food systems. *Food Science & Nutrition*, 5(3), 539–556.
121. **WEHRMULLER K. et RYFFEL S., 2007** – Produits au lait de chèvre et alimentation. ALP actuel, no 27, Ed. Sta. Rech. Agro. Liebefeld-Posieux ALP, Posieux, Suisse.