

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie des Procédés

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes

2^{ème} Année Master

*Caractérisation physico-chimique et rhéologique des
produits laitiers et étude in silico du complexe
alpha-caséine/ligand par Docking moléculaire*

Filière : Génie des Procédés
Spécialité : Génie chimique

Présenté par :

GUERNINE Roumaissa

SELLAMI Khawla

Sous la direction de :

Dr CHOUARFA. F

Juin 2023

Remerciement

Avant tout, nous tenons à remercier "Allah" qui nous a incitées à acquérir le savoir et nous avons donné la santé, la volonté, le courage et la patience pour voir réaliser ce travail.

Nous tenons à remercier vivement nos parents pour leur soutien et encouragement dans notre parcours scolaire.

En guise de reconnaissance, Nous vous remercions beaucoup, très sincèrement notre encadreur Dr. Chouarfa Fella, qui a gentiment accepté de superviser ce travail, pour son suivi et ses orientations, sa disponibilité et ses précieux conseils, sans lesquels le présent travail n'aurait pu être effectué.

Nous adressons nos vifs remerciements pour tous les enseignants qui ont contribué à notre formation durant notre cursus universitaire et nous tenons également à remercier tous ceux qui ont aidé à la réalisation de ce mémoire, même avec un mot gentil.

Je tiens à remercier les membres du jury, pour leur présence, pour leur lecture attentive de ce mémoire, ainsi que pour les remarques qu'ils m'adresseront lors de cette soutenance afin d'améliorer notre travail.

Dédicaces

C'est avec grand plaisir que je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère ;

À mon père [Taher](#) et ma mère [Nassima](#), mon bel ange en témoignage de leur affection, leurs sacrifices et de leurs précieux conseils qui m'ont conduite à la réussite dans tout ce que je fais ;

À ma force et mon bonheur, mon frère [Abderrahmane](#) et mes sœurs [Hadil](#), [Arwa](#), [Khadija](#) ;

À mes meilleurs amis, avec qui je partage mes plus beaux souvenirs : [Khawla](#), [Malak](#), [Amina](#) et [Salma](#) ;

*À toute ma famille qui porte le nom [Guernine](#) et [Bouzaaroura](#) ;
À tous mes cousins sans exception ;*

Sans oublier ma chère binôme [Khawla](#) pour sa disponibilité et sa patience, ainsi que pour sa sympathie et son amitié tout au long de ce travail ;

À toutes mes collègues de la promotion Master de [Génie Chimique](#) de l'année [2022-2023](#) ;

Roumaissa



Dédicaces

C'est avec grand plaisir que je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère ;

A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences, à la source d'amour, mon adorable mère [Rafika](#) ;

A celui qui m'a bien élevée et qui m'a toujours aidée à soutenir, que dieu prolonge sa vie, mon cher père [Ammar](#) ;

À ma force et mon bonheur, mon frère [Younes](#) et mes sœurs [Besma](#) et [Karima](#) ainsi qu'à toute ma famille qui porte le nom [Sellami](#) et [Fertas](#) ; Au plus jeunes de la famille, mes neveux : [Kotada](#), [Istabrek](#) et [Athir](#) ;

À mes meilleurs amis, avec qui je partage mes plus beaux souvenirs : [Roumaissa](#), [Malak](#), [Amina](#) et [Selma](#) ;

À mes cousins : [Alaa](#), [Khouloud](#), [Wissem](#), [Ines](#), [Manar](#) et [Asma](#) ;

Sans oublier ma chère binôme [Roumaissa](#) pour sa disponibilité et sa patience, ainsi que pour sa sympathie et son amitié tout au long de travail ;

À toutes mes collègues de la promotion Master de [Génie Chimique](#) de l'année [2022-2023](#) ;

Khawla 

Résumé

Cette étude apporte une contribution au domaine de la science alimentaire en se concentrant sur l'analyse approfondie des produits laitiers, qui sont parmi les produits de consommation les plus essentiels. Nous avons effectué une évaluation complète des caractéristiques physico-chimiques et rhéologiques des produits laitiers examinés, démontrant ainsi leur conformité aux normes requises. En outre, cette étude met en évidence l'utilisation du Docking moléculaire pour étudier la stabilité et les interactions entre l'alpha-caséine et deux familles de ligands (les acides gras et les polyphénols), en identifiant l'affinité et le positionnement optimal de chaque composé dans le site actif.

Mots clés : produits laitiers, rhéologie, analyses physico-chimiques, Docking moléculaire.

Abstract

This study makes a contribution to the field of food science by focusing on the in-depth analysis of dairy products, which are among the most essential consumer products. We have carried out a complete evaluation of the physico-chemical and rheological characteristics of the dairy products examined, this demonstrating their compliance with the required standards. In addition, this study highlights the use of molecular Docking to study the stability and interactions between alpha Casein and two families of ligands (fatty acids and polyphenols), identifying the affinity and the optimal positioning of each compound in the active site.

Keywords: dairy products, rheology, physico-chemical analyses, molecular Docking.

ملخص

تقدم هذه الدراسة مساهمة في مجال علوم الأغذية من خلال التركيز على التحليل المتعمق لمنتجات الألبان، والتي تعد من بين المنتجات الاستهلاكية الأساسية. لقد أجرينا تقييمًا كاملاً للخصائص الفيزيائية والكيميائية والريولوجية لمنتجات الألبان التي تم فحصها، مما يدل على امتثالها للمعايير المطلوبة. بالإضافة إلى ذلك، تسلط هذه الدراسة الضوء على استخدام الالتحام الجزيئي لدراسة الاستقرار والتفاعلات بين ألفا كازين و عائلتين من الروابط (الأحماض الدهنية والبوليفينول) ، وتحديد التقارب والموقع الأمثل لكل مركب في الموقع النشط.

الكلمات المفتاحية: منتجات الألبان، الريولوجيا، التحليلات الفيزيائية والكيميائية، الالتحام الجزيئي.

Sommaire

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Liste des Abréviations

Introduction Générale	1
Chapitre I: Généralités sur les produits laitiers et leurs processus de fabrication	
I.1. Introduction	5
I.2. Le lait	5
I.2.1. Définition	5
I.2.2. Composition chimique	5
I.2.3. Les différents types de lait	6
I.2.3.1 Lait cru	6
I.2.3.2 Lait traité thermiquement	6
I.3. Les produits laitiers	7
I.3.1. Crème fraîche	8
I.3.1.1 Définition	8
I.3.1.2 Composition et valeur nutritionnelle	8
I.3.2. Les Fromages	9
I.3.2.1 Fromage fondu	9
I.3.2.2 Fromage à pâte molle type Camembert	10
I.4. Processus de fabrication	11
I.4.1. Processus de fabrication du crème fraîche	11
I.4.1.1 Ecrémage centrifuge	11
I.4.1.2 Pasteurisation	12
I.4.1.3 Ensemencement et maturation	12
I.4.2. Processus de fabrication du fromage fondu	12
I.4.2.1 Matières premières	12
I.4.2.2 Préparation des matières premières	12
I.4.2.3 Cuisson et traitement thermique du mélange	13
I.4.3. Processus de fabrication de Camembert	13
I.4.3.1 Ensemencement – maturation	13
I.4.3.2 Coagulation	13

Chapitre II: Principes de base de la science rhéologique

II.1. Introduction.....	21
II.2. Définitions.....	21
II.2.1. La rhéologie.....	21
II.2.2. Le rhéomètre.....	21
II.2.2.1 Principe de rhéomètre.....	21
II.2.2.2 Types de rhéomètre rotationnel.....	22
II.3. Utilité de la rhéologie.....	23
II.4. Régimes de mesures rhéologiques.....	23
II.4.1. Régime permanent.....	23
II.4.2. Régime oscillatoire.....	25
II.4.2.1 Balayage en déformation.....	26
II.4.2.2 Balayage en fréquence.....	26
II.5. La rhéologie alimentaire.....	26
II.5.1. La rhéologie des produits laitiers.....	27

Chapitre III: Matériels et Méthodes

III.1. Présentation de la laiterie 'NUMIDIA'.....	30
III.2. Caractérisation des produits laitiers.....	31
III.2.1. Analyses physico-chimiques.....	31
III.2.1.1 Matière première.....	31
III.2.1.2 Produits laitiers.....	33
III.2.2. Analyses rhéologiques.....	36
III.2.2.1 Dispositifs expérimentaux.....	36
III.2.2.2 Principe de rhéomètre.....	37

Chapitre IV: Résultats et Discussions

IV.1. Introduction.....	41
IV.2. Analyses physico-chimiques.....	41
IV.2.1. Matière première.....	41
IV.2.2. Les produits finis.....	42
IV.2.2.1 Crème fraîche.....	42
IV.2.2.2 Fromage fondu.....	43
IV.2.2.3 Le Camembert.....	44

IV.3. Analyse rhéologique	45
IV.3.1. La viscosité.....	45
IV.3.2. Régime oscillatoire	46
IV.3.2.1 La crème fraîche	46
IV.3.2.2 Le fromage fondu.....	47
IV.3.2.3 Le Camembert	49
Chapitre V: Docking moléculaire	
V.1. Introduction.....	52
V.2. Docking moléculaire	52
V.2.1. Programmes de Docking	53
V.2.2. Le récepteur.....	53
V.2.3. Le ligand	54
V.2.4. Grid Box	55
V.2.5. Calcul de RMSD.....	56
V.2.6. Energie de liaison de Docking moléculaire.....	57
V.2.7. Interactions protéine/ligand	58
Conclusion générale.....	64
Annexe	66

Liste des figures

Chapitre I

<i>Figure I.1: Les principaux procédés de transformation du lait .</i>	<i>7</i>
<i>Figure I.2: Crème fraîche .</i>	<i>8</i>
<i>Figure I.3: Fromage fondu .</i>	<i>9</i>
<i>Figure I.4: Composition générale du fromage fondu .</i>	<i>10</i>
<i>Figure I.5: Fromage à pâte molle type Camembert .</i>	<i>10</i>
<i>Figure I.6: Diagramme de fabrication du crème fraîche à l'unité Numidia.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure I.7: Diagramme de fabrication du fromage fondu.</i>	<i>15</i>
<i>Figure I.8: Diagramme de fabrication du Camembert à l'unité Numidia.</i>	<i>16</i>

Chapitre II

<i>Figure II.1: Types de rhéomètre rotationnel .</i>	<i>22</i>
<i>Figure II.2: Cisaillement dans le cas du modèle à deux plaques .</i>	<i>24</i>

Chapitre III

<i>Figure III.1: Laiterie « Numidia» .</i>	<i>30</i>
<i>Figure III.2: Mesure de la densité du lait de vache par lactodensimètre.....</i>	<i>31</i>
<i>Figure III.3: Test d'antibiotique.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure III.4: Mesure d'acidité titrable en °D pour le lait de vache.</i>	<i>33</i>
<i>Figure III.5: Centrifugeuse de Gerber .</i>	<i>34</i>
<i>Figure III.6: Butyromètre.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure III.7 : PH mètre durant l'analyse de l'échantillon de Camembert.</i>	<i>35</i>
<i>Figure III.8: Le dessiccateur infrarouge.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure III.9: Dispositif expérimental de l'étude rhéologique.</i>	<i>37</i>

Chapitre IV

<i>Figure IV.1 : Résultats des analyses physico-chimiques de cinq échantillons du lait de vache.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure IV.2: Résultats des analyses physico-chimiques de cinq échantillons de la crème fraîche.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure IV.3: Résultats des analyses physico-chimiques de cinq échantillons de fromage fondu.</i>	<i>43</i>

<i>Figure IV.4: Résultats des analyses physico-chimiques de cinq échantillons de Camembert.</i>	44
<i>Figure IV.5: Viscosité des produits laitiers en fonction du taux de cisaillement.</i>	45
<i>Figure IV.6: Modules G' et G'' de la crème fraîche en fonction de la déformation.</i>	46
<i>Figure IV.7: Modules G' et G'' du crème fraîche en fonction de la fréquence.</i>	47
<i>Figure IV.8: Modules G' et G'' du fromage fondu en fonction de la déformation.</i>	48
<i>Figure IV.9: Modules G' et G'' du fromage fondu en fonction de la fréquence.</i>	48
<i>Figure IV.10: Modules G' et G'' du Camembert en fonction de la déformation.</i>	49
<i>Figure IV.11: Modules G' et G'' du Camembert en fonction de la fréquence.</i>	50

Chapitre V

<i>Figure V.1: Représentation schématique des étapes du Docking moléculaire.</i>	53
<i>Figure V.2: La structure de l'α-caséine (pdb ID : 1CSN).</i>	54
<i>Figure V.3: Position de GRID BOX dans le site actif de l'α-caséine.</i>	56
<i>Figure V.4: Validation de re-Docking couleur jaune X-ray, gris résultat Dock.</i>	57
<i>Figure V.5: Les interactions entre les sites actives de la caséine et linoléique.</i>	58
<i>Figure V.6: Les interactions entre les sites actives de la caséine et oléique.</i>	58
<i>Figure V.7: Les interactions entre les sites actives de la caséine et palmitique.</i>	59
<i>Figure V.8: Les interactions entre les sites actives de la caséine et catéchine.</i>	59
<i>Figure V.9: Les interactions entre les sites actives de la caséine et gallique.</i>	59
<i>Figure V.10: Les liaisons Hydrogènes donneur-accepteur.</i>	61

Liste des tableaux

Chapitre I

<i>Tableau I.1 : Composition chimique du lait de vache.....</i>	<i>5</i>
<i>Tableau I.2: Valeur nutritionnelle moyenne de la crème fraîche.....</i>	<i>8</i>
<i>Tableau I.3 : Composition moyenne de 100g de Camembert.....</i>	<i>11</i>

Chapitre IV

<i>Tableau IV.1 : Analyses physico-chimiques de lait cru de vache.</i>	<i>41</i>
<i>Tableau IV.2: Analyses physico-chimiques de la crème fraîche.....</i>	<i>42</i>
<i>Tableau IV.3: Analyses physico-chimiques de fromage fondu.</i>	<i>43</i>
<i>Tableau IV.4: Analyses physico-chimiques de Camembert.</i>	<i>44</i>

Chapitre V

<i>Tableau V.1 : Représentation de la structure des ligands en 2D et 3D.....</i>	<i>55</i>
<i>Tableau V.2 : Energie de liaison, $\Delta G_{binding}$ (kcal/mol), prédites par AutoDock Vina des composés étudiés.....</i>	<i>57</i>
<i>Tableau V.3: Les interactions hydrophobiques et hydrogènes du alpha-caséine avec les ligands.</i>	<i>60</i>

Liste d'abréviation

Abs	Absence
AFNOR	Association française de normalisation
AT	Acidité titrable
Å	Angstrom
°C	Degré Celsius
CVO	Continuous Shear Viscosity Oscillation
D°	Degré Dornic
D	Densité
ES	Extrait sec
F	Force
ESD	Extrait Sec Dégraissé
EST	Extrait Sec Total
FAO	Food and Agriculture Organization
G	Gramme
G'	Module de conservation (en Pa)
G''	Module de perte (Pa)
GIPLAIT	Groupe Industriel des Production Laitières
h	Heure
H	Humidité
Hz	Hertz
JORA	Journal Officiel de la République Algérienne
Kg	Kilogramme
kcal	Kilocalorie
Km	Kilomètre
L	Litre
LVER	Linear Viscoelastic Region
ml	Millilitre
MG	Matière grasse
Min	Minute
H	Viscosité dynamique (en Pa.s)
PDB	Protein Data Bank
PDBQT	Protein Data Bank, Partial Charge, Atom Type
pH	Potentiel hydrogène
RMN	Résonance magnétique nucléaire
RMSD	Root Mean Square Deviation
S	Seconde
τ	Contrainte de cisaillement (en Pa)
γ	Déformation de cisaillement (Sans unité)
$\dot{\gamma}$	Vitesse de cisaillement (en s ⁻¹)
μg	Microgramme
V	Volume

Introduction Générale

Introduction

Les industries agroalimentaires occupent aujourd'hui un rôle très important dans les économies des pays, ils se caractérisent par une grande variété des produits alimentaires comprenant notamment les viandes, les céréales, les légumes, les fruits ainsi que les produits laitiers. Le plus grand défi dans ce domaine reste la satisfaction des besoins quotidiens des consommateurs en se concentrant sur des produits de haut qualité capable de rivaliser sur les marchés ^[1].

L'industrie laitière a une place significative au sein de l'industrie agroalimentaire. Elle englobe toutes les activités liées à la production, la transformation et la commercialisation des produits, ce qui rend ce secteur économique un fournisseur important des produits alimentaires de base. Ces aliments sont largement consommés dans de nombreux pays en raison de leur teneur en nutriments essentiels tels que les protéines, les minéraux et les vitamines bénéfiques. À cet égard, l'Algérie vise à développer la production laitière en termes de quantité et de qualité, afin de réduire sa dépendance aux produits laitiers étrangers ^[2].

Le marché dispose d'une grande variété de produits dérivés de lait, chacun avec ses propres caractéristiques et utilisations culinaires, comme le lait, le yaourt, le fromage, le beurre et d'autres dérivés laitiers, qui offrent un grand nombre de choix qui satisferont tous les goûts et besoins.

Notre travail vise à étudier quelques types choisis de produits laitiers ainsi que l'utilisation de la modélisation moléculaire.

La première partie concerne la caractérisation physico-chimique et rhéologique des produits choisis (la crème fraîche, le fromage fondu et le Camembert), et pour cela, nous avons effectué des analyses physico-chimiques au niveau du laboratoire d'analyses Numidia -Constantine-, ces analyses comportent la détermination de l'acidité, la température, la matière grasse, la densité et le test d'antibiotique, tandis que les analyses rhéologiques qu'ont été réalisé au niveau du laboratoire d'analyses industrielles et génie des matériaux LAIGM de l'université de Guelma, consistent la détermination de la viscosité et de deux modules viscoélastiques G' et G'' .

La seconde partie traite de la modélisation moléculaire du type Docking, plus précisément l'AutoDock Vina. Ce logiciel est utilisé pour simuler les interactions entre une petite molécule (ligand) et une macromolécule cible (récepteur), qui est généralement une

protéine, il s'agit d'une méthode qui prédit les orientations et les affinités de liaison entre le ligand et le récepteur. Nous avons choisi comme cible l'alpha-caséine, qui représente la protéine majeure dans le lait, et deux types de ligands (acides gras et polyphénols). Le choix de ces complexes (alpha-caséine/ligand) est principalement dû au rôle essentiel de sa formation sur la structure et les propriétés des produits laitiers.

L'objectif de cette étude consiste à réaliser des analyses physico-chimiques et rhéologiques des produits laitiers sélectionnés afin d'évaluer et de contrôler leur qualité et leur conformité aux normes, et de déterminer leur comportement rhéologique. En parallèle, un programme de Docking moléculaire est mis en place dans le but de prédire et de simuler la position la plus favorable d'un ligand au sein de la protéine, ainsi que de déterminer l'affinité et les différentes interactions protéine/ligand.

Dans ce contexte, nous avons entamé notre étude portant sur la caractérisation physico-chimique et rhéologique des produits laitiers, ainsi que l'étude *in silico* par le biais du Docking moléculaire du complexe alpha-caséine/ligand. Elle est composée de cinq chapitres.

- ✓ Le premier chapitre : traite en particulier des généralités sur les produits laitiers et leurs processus de fabrication.
- ✓ Le deuxième chapitre : aborde les principes de base de la science rhéologique.
- ✓ Le troisième chapitre : présente le matériel et les différentes méthodes d'analyse utilisées pour la caractérisation physico-chimique et rhéologique.
- ✓ Le quatrième chapitre : présente l'ensemble des résultats et leurs discussions.
- ✓ Le dernier chapitre consiste à l'étude de Docking moléculaire de l'alpha-caséine et des cinq ligands (linoléique, oléique, palmitique, catéchine et gallique) et la présentation des résultats obtenus. Ce travail se termine par une conclusion générale.

Références

- [1] **Boudefa M et Bouguemra B**, « fromage fondu à tartiner à base de Cheddar et de l'Emmental », Mémoire en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur de l'Université des frères Mentouri Constantine, 2016-2017.
- [2] **Site web** : https://www.boisson-sans-alcool.com/marques_lait-algerie/, Consulté le 28/03/2023.

Chapitre I

Généralités sur les produits laitiers et leurs processus de fabrication

I.1. Introduction

Les produits laitiers sont des produits alimentaires qui sont fabriqués à partir de lait ou de produits laitiers transformés. Ils sont consommés depuis des milliers d'années dans le monde entier, ils sont une source importante de nutriments tels que les protéines, le calcium, les vitamines B et D. Les produits laitiers les plus couramment consommés sont le lait, le fromage, le yaourt, la crème et le beurre. Ils sont fabriqués à partir de différentes variétés de lait telles que le lait de vache, de chèvre, de brebis et de buffle.

I.2. Le lait

I.2.1. Définition

Le lait est le produit intégral de la traite totale et ininterrompue d'une femelle laitière bien portante, bien nourrie et non surmenée. Il doit être recueilli proprement et ne pas contenir de colostrum ^[1].

De tous les aliments, le lait est celui qui se rapproche le plus d'un aliment idéal, il peut à lui seul couvrir tous les besoins de l'organisme durant les premiers mois de la vie, il contient principalement tous les éléments nécessaires à la croissance et au développement harmonieux de l'organisme humain, en particulier les glucides, les lipides, les protéines, les vitamines et le calcium ^[2].

I.2.2. Composition chimique

La composition chimique du lait de vache est représentée dans le tableau suivant :

Tableau I.1 : Composition chimique du lait de vache ^[3].

Eléments	Composition (g/l)
Eau	905
Glucides (lactose)	49
Lipides	35
Matières grasses proprement dite	34
Lécithine (phospholipides) Insaponifiable	0,5
(Stérols, carotènes, tocophérol)	0,5
Protides	34
Caséine	27
Protéines solubles (globulines, albumines)	2,5
Substances azotées non protéiques	1
Sels	9
L'acide citrique (en acide)	2
L'acide phosphorique (P ₂ O ₃)	2,6
Chlorure de Sodium (NaCl)	1,7
Constituants divers (Vitamines, Enzymes, gaz dissous)	Traces
Extrait sec total	127
Extrait sec non gras	92

I.2.3. Les différents types de lait

L'évolution des processus technologique, des techniques de conservation et de distribution a permis l'élaboration d'une large gamme de "lait de consommation" qui se distingue par leur composition, leur qualité nutritionnelle, et organoleptique et leur durée de conservation, et peuvent être classées en deux catégories [4].

I.2.3.1 Lait cru

Le lait cru recueilli à la ferme par traite mécanique ou manuelle, soit directement transporté au centre de ramassage où il est réfrigéré, soit stocké dans des réservoirs réfrigérés avant le transport dans le cas d'exploitations importantes, dans ces conditions, la flore microbienne est stabilisée [5].

Le lait doit provenir d'animaux sains, soumis à un contrôle vétérinaire, d'une préparation (traite, conditionnement, stockage) effectuée dans des conditions hygiéniques satisfaisantes [4].

I.2.3.2 Lait traité thermiquement

Les laits (traités) industriels peuvent consister en une modification de composition et en traitement thermique destiné à éliminer les éventuels germes pathogènes [6]. Les différents types de ce lait sont :

➤ Lait pasteurisé

La pasteurisation consiste à porter le lait à une température suffisante et pendant un délai pour détruire les bactéries pathogènes [7].

- La pasteurisation inactive la phosphatase du lait cru.

- Immédiatement après pasteurisation, le lait doit être refroidi pour être ramené, dans les meilleurs délais, à une température ne dépassant pas 6°C [8].

➤ Lait stérilisé

Le lait est tout d'abord pré-stérilisé (130-140°C / 3-4s) après homogénéisation dans le cas des laits contenant de la matière grasse. Puis, il est refroidi à 70- 80°C et mis en bouteille (polyéthylène haut densité) pour subir une 2ème stérilisation (115°C / 15-20 min) suivi d'un refroidissement rapide [9].

➤ Lait concentré

Lait concentré, c'est le produit provenant de la concentration du lait propre à la consommation. La concentration du lait peut se faire avec ou sans addition de sucre [10].

La stabilité du lait peut être assurée par réduction de l'activité de l'eau, on y parvient par élimination partielle de l'eau et ajout de sucre [11].

➤ **Lait fermenté**

La dénomination lait fermenté est réservée au produit laitier préparé avec des laits écrémés ou non ou des laits concentrés ou en poudre écrémée ou non sous forme liquide, concentré ou en poudre [12].

➤ **Poudre de lait**

Selon la législation sur les aliments et drogues, les poudres de lait sont des produits résultant de l'enlèvement partiel de l'eau contenant dans le lait. Le lait en poudre est de trois types : entier, demi-écrémé et écrémé, chacun ayant un apport calorique différent [13].

I.3. Les produits laitiers

Le Codex Alimentaires définit un produit laitier comme un « produit obtenu à la suite d'un traitement quelconque du lait, qui peut contenir des additifs alimentaires et autres ingrédients fonctionnellement nécessaires au traitement ».

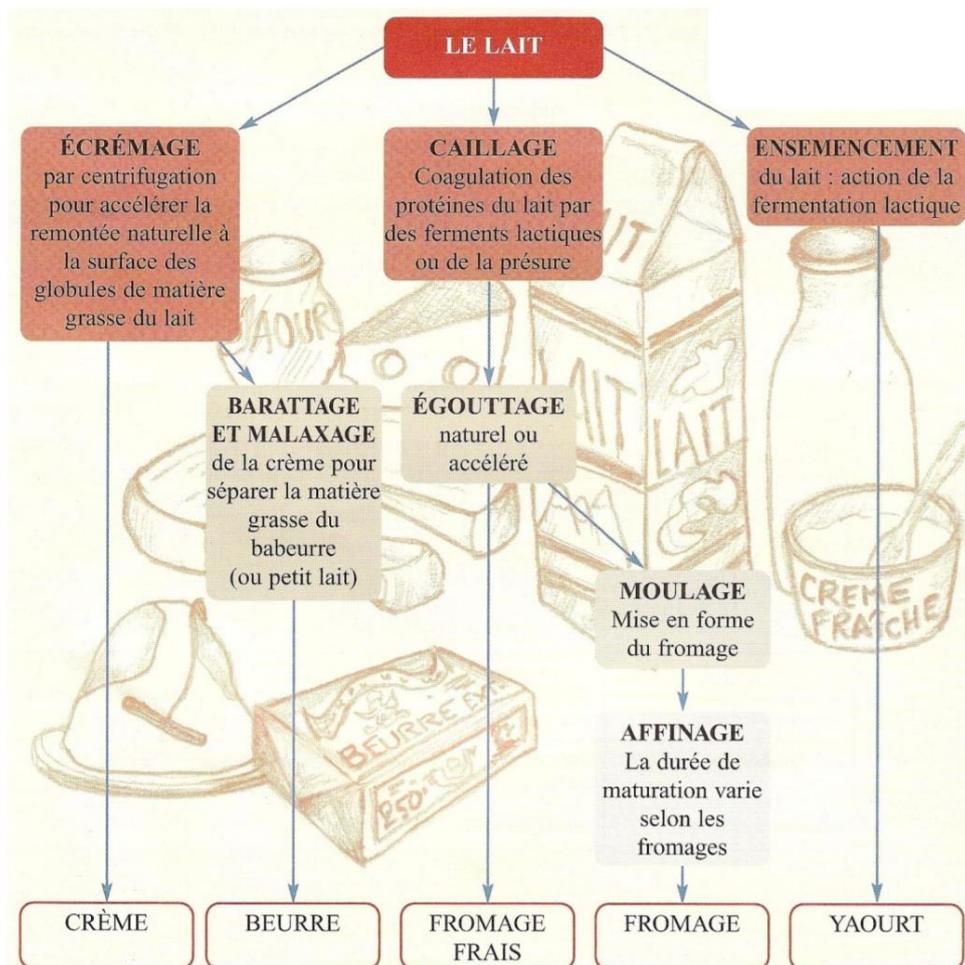


Figure I.1: Les principaux procédés de transformation du lait [14].

I.3.1. Crème fraîche

I.3.1.1 Définition

La crème fraîche est le produit laitier fluide plus ou moins riche en matière grasse qui se présente sous la forme d'une émulsion de type grasse dans le lait écrémé et qui a été obtenue en la séparant physiquement du lait ^[15].

La dénomination crème est réservée au lait contenant au moins 30 g de matière grasse provenant exclusivement du lait pour 100 g de poids total. La dénomination crème légère est réservée au lait contenant entre 12 g inclus et 30 g non inclus de matière grasse provenant exclusivement du lait pour 100g poids total ^[16,17-19].



Figure I.2 : Crème fraîche ^[20].

I.3.1.2 Composition et valeur nutritionnelle

a) Composition moyenne

La crème fraîche contient 33% de lipides dont 20 g d'acides gras saturés, 9g d'acides gras mono-insaturés, 1 g d'acides gras poly-insaturés pour 100 g, 3 à 4 % de glucides et 13% de protides, elle renferme une part négligeable de vitamine A ^[21].

b) Valeur nutritionnelle

Tableau I.2 : Valeur nutritionnelle moyenne de la crème fraîche ^[22].

Composants	Valeur Moyenne	Composants	Valeur Moyenne
Protéines (g)	2	Phosphore (mg)	60
Lipides (g)	33,5	Sodium (mg)	30
Glucides (g)	3	Magnésium (mg)	4
Eau (g)	62	Vitamine A (µg)	250
Cholestérol (mg)	110	Provitamine A (µg)	200
Calcium (mg)	50	Kilocalories	325
Vitamine E (mg)	0,8	Kilojoules	1360

I.3.2. Les Fromages

Le mot « fromage » est réservé au produit fermenté ou non, affiné ou non, obtenu à partir des matières d'origines exclusivement laitière (lait partiellement ou totalement écrémé, crème, babeurre) utilisées seules ou en mélange et coagulées en tout ou en partie avant égouttage ou après élimination partielle de la phase aqueuse ^[22]. La teneur en matière sèche du produit ainsi défini doit être de 23 grammes pour 100 grammes de fromage (bien que pour des produits maigres de type pâte fraîche, elle puisse être comprise entre 10 et 15) ^[18].

Les fromages sont classés en six familles :

- Fromages à pâte fraîche.
- Fromages à pâte persillée.
- Fromages à pâte molle.
- Fromages de chèvre.
- Fromages à pâte pressée.
- Fromages fondus.

I.3.2.1 Fromage fondu

➤ Définition

La dénomination « fromage fondu » est réservée au produit obtenu par la fonte et l'émulsifiassions, à l'aide de la chaleur, de fromage ou d'un mélange de fromages, additionné éventuellement d'autres produits laitiers (lait, lactosérum, beurre, babeurre, co-précipités, etc.), dont la teneur minimale en matière sèche est de 25 g pour 100 g de produit, préparés à partir de fromage et d'autres produits laitiers. Ce produit est obtenu par des techniques de traitement qui incluent la fonte et conduisent à l'émulsification des matières premières et doit avoir subi, au cours de sa fabrication, une température d'au moins 70°C pendant 30s, ou toute autre combinaison de durée et de température d'effet équivalent ^[23].



Figure I.3 : Fromage fondu ^[24].

➤ Composition et valeur nutritionnelle

Le fromage fondu comporte toutes les caractéristiques nutritionnelles essentielles des produits laitiers qui le composent (figure I.4). Il apporte à l'organisme la majorité des nutriments essentiels à un bon équilibre alimentaire. Il ne nécessite aucune préparation. C'est

un excellent moyen d'apporter à notre corps les éléments énergétiques et structuraux nécessaires à son fonctionnement (lipides, glucides, protéines, minéraux et vitamines) [25].

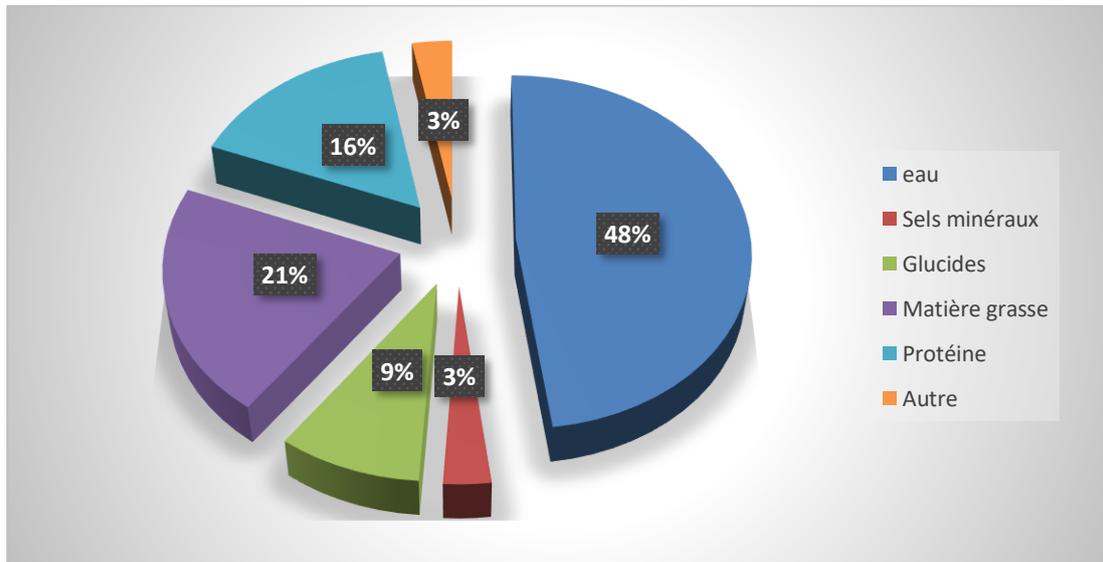


Figure I.4 : Composition générale du fromage fondu [25].

I.3.2.2 Fromage à pâte molle type Camembert

➤ Définition

Le Camembert est défini comme étant un fromage à pâte molle, affiné en surface, principalement par des moisissures, il se présente sous la forme d'un cylindre plat ou de morceaux dudit cylindre. La pâte a une couleur allant du blanc cassé au jaune pâle et une texture molle mais non-friable, affinée de la surface au centre du fromage [26].



Figure I.5 : Fromage à pâte molle type Camembert [27].

➤ Composition et valeur nutritionnelle

Selon son mode d'élaboration, le Camembert renferme 30 à 50 % de matière azotée / matière sèche. Il s'inscrit ainsi parmi les meilleures sources alimentaires de protéines ayant

une digestibilité élevée ^[28]. De plus, la haute valeur biologique de ces protéines est donnée par leur composition équilibrée en acides aminés, que par leur propriété de former une pâte fromagère très appréciée par les consommateurs dans de nombreuses régions du monde ^[29].

Tableau I.3 : Composition moyenne de 100g de Camembert ^[30].

Composition	Teneurs
Eau (g)	50
Lipides (g)	22,6
Protéines (g)	21,4
Glucides(g)	0,3
Ca (mg)	265
Fe (mg)	0,7
Kj	1215
Energie (kcal)	290

I.4. Processus de fabrication

Le processus de fabrication des produits laitiers est une série d'étapes qui transforment le lait ou les produits laitiers en produits finis tels que le fromage, le yaourt, le beurre et la crème. Ces étapes varient en fonction du produit laitier à fabriquer et peuvent inclure la pasteurisation, la coagulation, la fermentation, l'affinage, la maturation et le conditionnement.

I.4.1. Processus de fabrication du crème fraîche

La fabrication de la crème se déroule en deux étapes : l'écémage du lait frais qui s'effectue par centrifugation et la pasteurisation. Après cette étape, on obtient une crème fluide pasteurisée. Cependant, l'obtention d'une crème épaisse pasteurisée, nécessite une opération de maturation (ajout de ferments) juste après l'étape de pasteurisation (Figure I.6) ^[31].

Les différentes étapes de préparation de la crème fraîche sont les suivantes :

I.4.1.1 Ecrémage centrifuge

Quelle que soit l'utilisation de la matière grasse, celle-ci est d'abord séparée du lait au cours de l'opération d'écémage qui donne deux produits : le lait écrémé et la crème. La crème est constituée simplement du lait concentré en matière grasse à environ 10 fois (lait entier : 35 g/kg ; crème : 350g/kg). Son état physique n'est pas modifié de même que la composition du liquide (lait écrémé) dans lequel sont dispersés les globules gras. La concentration en matière grasse est obtenue par écémage spontané ou centrifuge ^[32]. L'écémage du lait est réalisé

dans les écrémeuses centrifuges et hermétiques ^[11]. La crème ainsi obtenue est liquide et douce puisque sa teneur en acide lactique est encore faible, mais selon qu'on la prélève plus ou moins au centre de l'axe de rotation, elle sera plus ou moins riche en matières grasses ^[22].

I.4.1.2 Pasteurisation

La crème contient plus de bactéries par millimètre que le lait dont elle provient, ces bactéries étant entraînées en grand nombre avec les globules gras lors de l'écrémage. La pasteurisation consiste en un traitement thermique à haute température qui se fait entre 80 et 90°C pendant 15 à 20 secondes tout en préservant les qualités organoleptiques de la crème ^[33].

I.4.1.3 Ensemencement et maturation

Pour l'ensemencement, des souches de bactéries lactiques mésophiles acidifiantes, aromatiques et parfois épaississantes sont utilisées à 0,5% ^[33]. Après l'ensemencement, on laisse reposer la crème 16 à 18 heures entre 18 et 20°C. Durant cette période, les ferments acidifient la crème. Ce processus est nommé « maturation biologique ». Quant à l'acidité en fin de maturation, elle doit être comprise entre 40 et 50 °D ^[34].

La maturation rend la crème plus aromatique, lui confère une meilleure protection par production d'acide lactique et de bactériocines et assure son épaississement ^[11].

I.4.2. Processus de fabrication du fromage fondu

I.4.2.1 Matières premières

Les matières premières utilisées pour la fabrication des fromages fondus sont très diverses et l'art du maître fondeur est de se servir des fromages les mieux adaptés aux qualités finales qu'il recherche pour son produit, sont généralement utilisées :

- Des fromages à pâte pressée non cuite cheddar, gouda....
- Des fromages à pâte pressée cuite : emmental, gruyère, comté.
- Du beurre, de la crème du lait (liquide ou en poudre), de la caséine (principale protéine du lait), du lactosérum....
- Des fromages à pâte persillée roquefort, bleus....
- Des fromages blancs, pour la fabrication de fromage blanc fondu pour tartine.

Sels de fonte : les sels de fonte sont les seuls additifs employés dans la fabrication des fromages fondus, agissant comme émulsifiants permettant en définitive de donner au produit fini une texture homogène.

I.4.2.2 Préparation des matières premières

Les matières premières sélectionnées feront l'objet d'un contrôle rigoureux quant à leur composition physico-chimique, bactériologique et leurs caractéristiques organoleptiques ^[35].

I.4.2.3 Cuisson et traitement thermique du mélange

Le traitement thermique se fait pendant la cuisson dans des cuiseurs, lorsqu'on utilise des couteaux tournant à grande vitesse (jusqu'à 3 000 tours par minute), ce broyage fin a lieu directement dans le cutter, de même que l'opération de cuisson-fonte afin d'obtenir un homogène stable chimiquement et microbiologiquement pendant une durée pouvant aller de 3 à 12 mois [36].

Deux paramètres sont fondamentaux : la température et le temps de fonte. En terme physico-chimique, la fonte se caractérise par l'obtention d'une émulsion aussi stable que possible, selon trois étapes indispensables. Ces étapes sont : peptisation, crémage, refroidissement. La figure (I.7) représente les étapes de fabrication du fromage fondu.

I.4.3. Processus de fabrication de Camembert**I.4.3.1 Ensemencement – maturation**

La première étape de fabrication du Camembert à partir d'un lait est d'en introduire des ferments lactiques sélectionnés qui servent à coaguler le lait (en provoquant l'acidification) et participent aussi dans l'activité protéolytique au cours de l'étape de l'affinage de ce fromage. Il est nécessaire d'accorder un temps de maturation suffisant afin d'assurer un bon développement des souches lactiquesensemencées [37,38].

I.4.3.2 Coagulation

La coagulation du lait, qui se traduit par la formation d'un gel, résulte des modifications physico-chimiques intervenant au niveau des micelles de caséine. Les mécanismes proposés dans la formation du coagulum diffèrent totalement suivant que ces modifications sont induites par acidification et/ou action d'enzymes coagulantes [39].

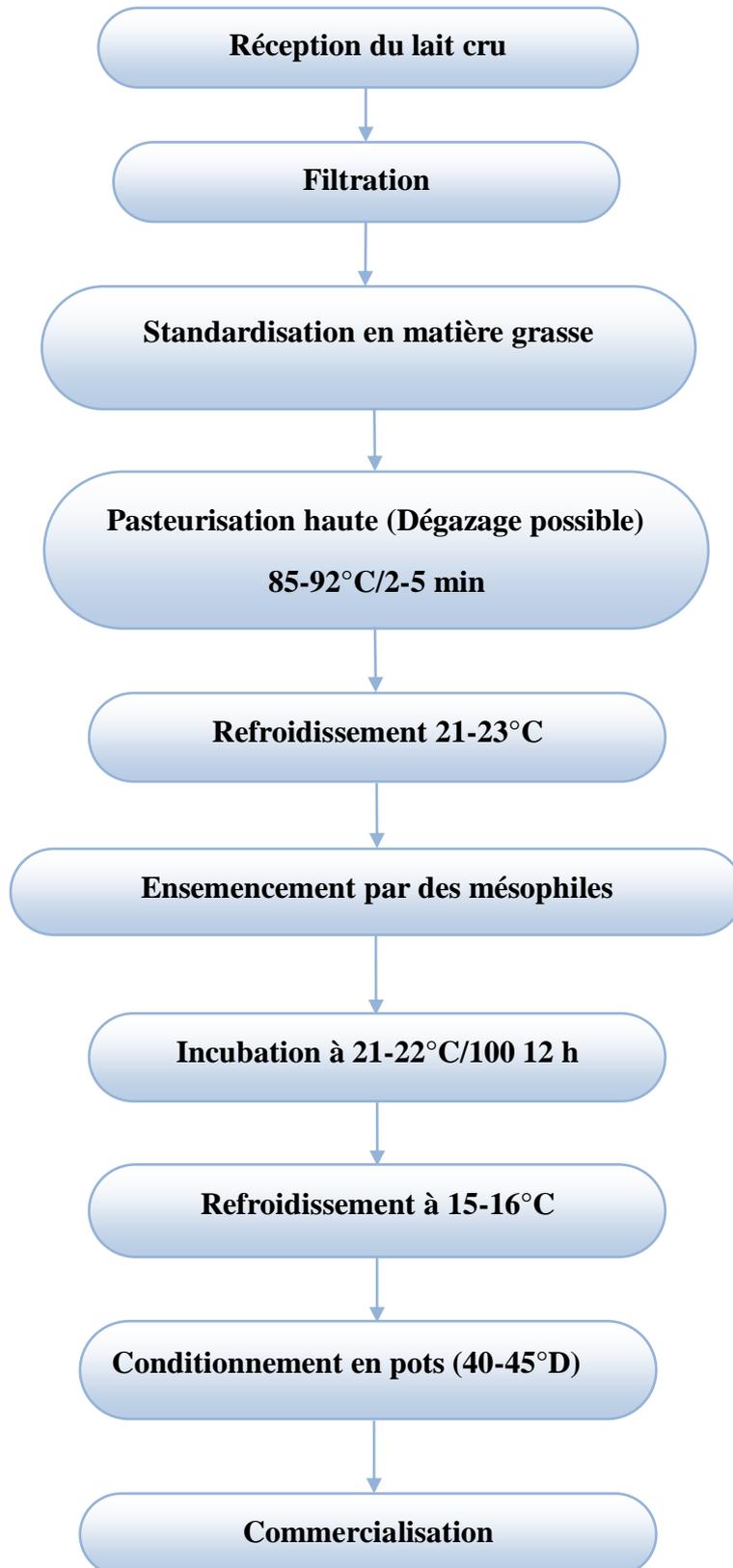


Figure I.6 : Diagramme de fabrication du crème fraîche à l'unité Numidia.

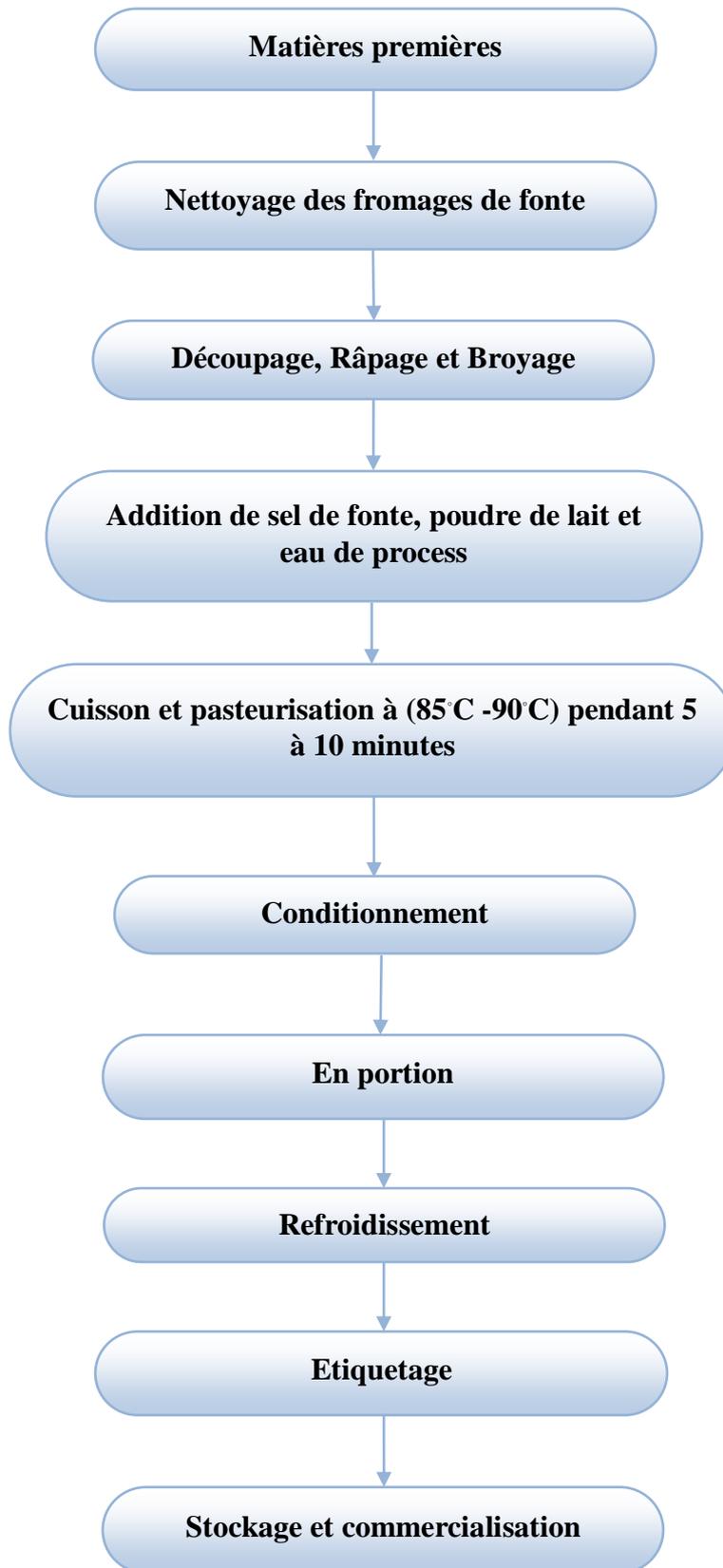


Figure I.7 : Diagramme de fabrication du fromage fondu ^[40].

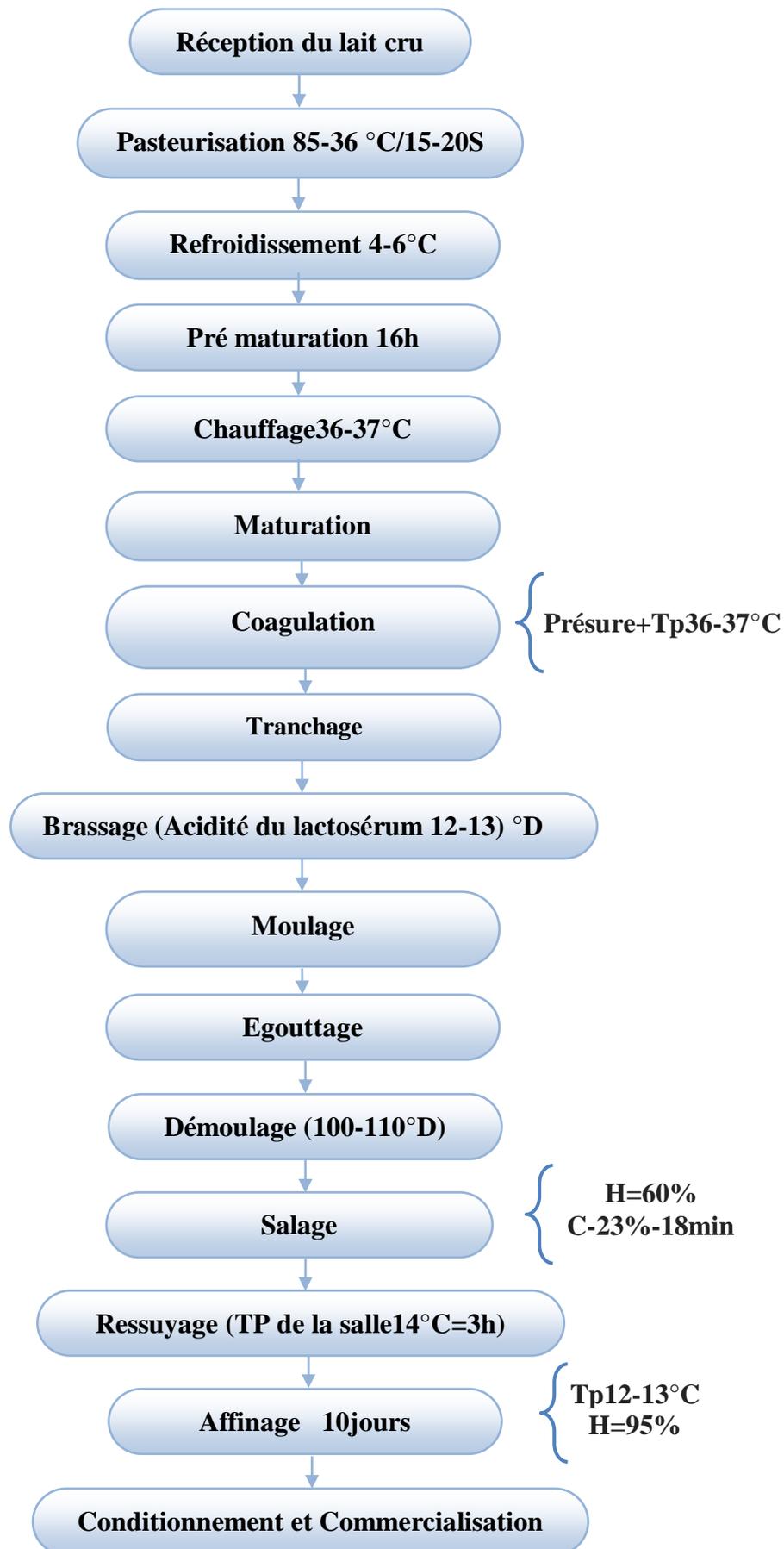


Figure I.8 : Diagramme de fabrication du Camembert à l'unité Numidia.

Références

- [1] **Pougheon S et Goursaud J**, « Le lait et ses constituants caractéristiques physicochimiques », In lait nutrition et santé, Ed, Tec et Doc, Lavoisier Paris, pages : 4-41, 2001.
- [2] **Vignola C**, « Science et technologie du lait, transformation du lait », Ecole polytechnique de Montréal Canada, pages : 3-91, 2002.
- [3] **Alais C, Linden G, Miclo L**, « Biochimie alimentaire. 6ème édition », Edition : Dunod, Paris, pages : 86-88, 2008.
- [4] **Mahaut M, Jeantet R, Brulé G et Schuck P**, « Les produits industriels laitiers », Éditions Lavoisier, Paris, 2005.
- [5] **Guiraud J.P**, « Microbiologie alimentaire », Edition : Dunod. Paris, pages : 136-140, 1998.
- [6] **Guiraud J.P**, « Microbiologie alimentaire », Edition : Dunod. Paris, 2003.
- [7] **Vesseyre R**, « Technologie du lait : constitution récolte, traitement et transformation du lait », Editions la maison rustique, Paris, 1979.
- [8] **Vierling E**, « aliment et boisson-filière et produit », 2ème édition, doin éditeurs, centre régional de la documentation pédagogique d'aquitaine, Editions doin France, 2003.
- [9] **Leseur R, Melik N**, « Lait de consommation In luquee f.m, Laits et produits laitiers vache brebis chèvre », Éditions Lavoisier, Paris, 1999.
- [10] **Jora**, « Journal Officiel République Algérienne », 2021.
- [11] **Jeantet R, Coll T**, « Les produits laitiers », Éditions Lavoisier, Paris, 2008.
- [12] **Fredot**, « Connaissance des aliments-Bases alimentaires et nutritionnelles de la diététique », Tec et Doc, Lavoisier : 25, page : 397, 2006.
- [13] **Michel J.C, Pouliot M, Richard J**, « Science et technologie du lait », Edition : Tec et toc, Lavoisier, Paris, page : 600, 2002.
- [14] **Site web** : https://etab.ac-poitiers.fr/lycee-hotelier-la-rochelle/sites/lycee-hotelier-la-rochelle/IMG/pdf/Les_produits_laitiers_MG.pdf. Consulté le: 10/03/2023.
- [15] **Codex Alimentaire Commission**, « Codex standard for creams and prepared creams, Codex Stan. A-9-1976 », Rev. 1-2003, FAO/WHO, Rome. P : 7, 2003.
- [16] **Vierling E**, « Aliment et boisson-science des aliments, doin éditeurs, centre régional de la documentation pédagogique d'Aquitaine », Editions doin France, 1999.

- [17] **GRET**, « Groupe de recherche et d'échange technologiques Transformer les produits laitiers frais à la ferme », Ed. Educagri, réseau produits fermiers du ministère de l'agriculture et de la pêche, France, page : 237, 2002.
- [18] **Jeantet R, Croguennec T, Mahaut M, Schuck P et Brule G**, « Les produits laitiers. 2ème édition », Tec et Doc, Lavoisier, pages : 5-40-185, 2008.
- [19] **GEM RCN**, « Groupe d'étude des marchés de restauration collective et de nutrition Spécification technique de l'achat public laits et produits laitiers », N°2009-03 du 30 juillet 2009 du comité exécutif de l'OEAP, Ministère de l'économie de l'industrie et de l'emploi de la république française. Page : 47, 2009.
- [20] **Site web** : <https://foodandstyle.com/homemade-creme-fraiche/>. Consulté le : 12/03/2023.
- [21] **Reumont P**, Licencié Kinésithérapie, <http://www.medisport.be>, 2009.
- [22] **Fredot E**, « Connaissance des aliments - Bases alimentaires et nutritionnelles de la diététique », Tec et Doc, Lavoisier : 10-14, 2005.
- [23] **Roussel**, « Fromage fondu physico - chimie du processus de fonte article est issu de Procédés chimie - bio - agro / Agroalimentaire, vol 15, pages : 2-15, 2014.
- [24] **Site web** : <https://www.silverson.fr/fr/mediatheque/rapports-dapplication/fabrication-de-fromage-fondu>. Consulté le : 14/03/2023.
- [25] **Feiberg**, « Répertoire générale des aliments ». Tome 2 : Produits laitiers, 2ème Édition. Tech & doc, Lavoisier, Paris, 2002.
- [26] **Codex Alimentaire (codex Stan 283-1978.Amendé en 26)**, « Norme générale codex pour le fromage- méthode d'échantillonnage d'analyse ».
- [27] **Site web** : <https://observatoire-des-aliments.fr/qualite/camembert-de-normandie-une-louche-pasteurisation>. Consulté le : 15/03/2023.
- [28] **Mietton B**, « Incidence de la composition des fromages au démoulage et des paramètres d'environnement sur l'activité des agents de l'affinage », Revue des ENIL, Pages : 189, 19-27, 1995.
- [29] **Dillon et Berthier**, « Le fromage dans l'alimentation ; in « le fromage », Edition technique et documentation », Lavoisier, Paris. Page : 713, 1997.
- [30] **Adrian J, Potus J, et Frange R**, « La science alimentaire de A à Z, Lavoisier, 3ème édition », Page : 549, 2003.
- [31] **Poillot M**, « Transformer les produits laitiers frais à la ferme », Educagri éditions, 2ème édition. Pages : 98-102, 2010.

- [32] **Lubin D**, « Le lait et les produits laitiers dans la nutrition humaine », <http://www.fao.org/docrep/t4280f/T4280F00.htm>, 1998.
- [33] **Mahaut M, Jeantet R, Brûlé G et Schuck P**, « Les produits industriels laitiers », Editions Technique & documentation, Lavoisier. Pages : 42, 43, 45, 2000.
- [34] **Dudez P, Simon D, François M**, « Transformer les produits laitiers frais à la ferme », Educagri éditions. Pages : 91, 94, 95, 96, 2002.
- [35] **Chambre M, et Daurelles J**, « Le fromage fondu », In : Eck A. et Gillis : Le fromage. Ed. Lavoisier, Pages : 691-708, 1997.
- [36] **Gaucheron F**, « Minéraux et produits laitiers », Ed Tee et Doc, Lavoisier. Paris, vol 922, pages : 474,476, 2004.
- [37] **Lenoir J, Lambert G, Schmiodt J.L**, « L'élaboration d'un fromage L'exemple du Camembert », Pour la Science. 69, pages : 30-42, 1983.
- [38] **Bertrand F**, « Le fromage grand œuvre des microbes », *Revue générale de froid*. 78, pages : 519-527, 1988.
- [39] **Eck et Gillis J.C**, « Le fromage », Lavoisier, 3eme édition, Paris. Page : 874, 2006.
- [40] **Luquet F-M**, « Lait et produits laitiers Vache, Brebis, Chèvre », Transformation et Technologies. Tome 2. Tech & doc. Lavoisier, paris, 1990.

Chapitre II

*Principes de base de la science
rhéologique*

II.1. Introduction

La rhéologie a été introduite en 1928 par le physicien français Eugene Bingham, qui a étudié les propriétés rhéologiques des fluides non-newtoniens. Depuis lors, la rhéologie a été étendue à d'autres matériaux tels que les solides, les pâtes, les gels et les polymères ^[1]. Dans ce travail, nous avons traité de l'étude du comportement rhéologique des produits laitiers. Cette étude est une approche importante qui permet de mieux comprendre les propriétés physiques et fonctionnelles des produits laitiers. Elle est utilisée pour optimiser les processus de fabrication et pour développer de nouveaux produits laitiers avec des propriétés spécifiques.

II.2. Définitions

II.2.1. La rhéologie

La rhéologie est la science qui étudie le comportement mécanique des matériaux sous l'effet de contraintes ou de déformations. Elle concerne principalement l'étude des propriétés de la matière en mouvement, qu'il s'agisse de fluides, de solides ou de matériaux viscoélastiques. Elle étudie notamment la façon dont les matériaux réagissent aux forces appliquées, la manière dont ils se déforment, se cassent ou se dégradent, ainsi que les phénomènes de frottement et de viscosité. Elle peut s'appliquer à de nombreuses industries, comme la fabrication de matériaux de construction, les industries pétrolière et alimentaire, la cosmétique, la médecine, etc ^[2].

II.2.2. Le rhéomètre

Un rhéomètre est un instrument de laboratoire utilisé pour mesurer la façon dont un liquide, un mélange ou une suspension s'écoule sous l'action de forces externes. Il est utilisé pour les fluides qui ne peuvent pas être définis avec une seule valeur de viscosité et nécessitent donc plus de paramètres qu'un viscosimètre ne peut fournir. Mesurer la rhéologie du fluide est la rhéométrie qui est une quantification expérimentale des propriétés rhéologiques des matériaux (viscosité, module de rigidité, etc.). Contrairement à un viscosimètre, qui ne peut mesurer la viscosité d'un liquide que dans une gamme limitée de conditions, un rhéomètre est capable de mesurer la viscosité et l'élasticité de matériaux non newtoniens dans une large gamme de conditions ^[3].

II.2.2.1 Principe de rhéomètre

Le principe de base du rhéomètre est de mesurer la réponse d'un matériau soumis à une force ou à une déformation. Cette réponse est ensuite analysée pour déterminer les propriétés rhéologiques du matériau. Pour chaque fluide, il est possible de tracer des courbes,

appelées rhéogrammes. La rhéogramme est un graphique qui représente la relation entre la contrainte de cisaillement et la déformation ou la vitesse de déformation d'un matériau en réponse à une force de cisaillement appliquée, donc il caractérise le comportement rhéologique d'un matériau. Le fonctionnement du rhéomètre peut varier en fonction du type de rhéomètre utilisé^[4].

II.2.2.2 Types de rhéomètre rotationnel

Le rhéomètre rotationnel représente le modèle classique de rhéomètre rotatif. Ce matériel est très polyvalent. Il est adapté à de nombreuses études rhéologiques, allant d'une simple mesure de viscosité, à la détermination du seuil d'écoulement. Il permet également d'analyser divers types de produits fluides^[5,6].

- **Le rhéomètre à cylindres coaxiaux (Couette)** : il utilise un système de fonctionnement basé sur l'écoulement de Couette. Le produit à étudier est placé entre deux cylindres, dont l'un en rotation et l'autre fixe. Ce type de rhéomètre est idéal pour l'analyse de liquides de très faible viscosité.
- **Le rhéomètre cône-plan (ou CP)** : cet instrument de mesure est constitué par un disque et un cône, animé par un mouvement rotatif autour de leur axe commun. L'angle de cône θ (voir schéma) est très faible ($\leq 4^\circ$) pour obtenir un taux de cisaillement vertical constant dans le volume de mesure ; nettoyage rapide.
- **Le rhéomètre à plateaux parallèles (plan-plan ou PP)** : ce matériel est formé de deux disques coaxiaux, placés l'un au-dessus de l'autre. Il utilise une petite quantité de liquide lors de l'analyse. Celui-ci sert à l'étude de produit à particules, ou chargés, comme les polymères fondus. Il se nettoie et s'installe aisément.
- **Le rhéomètre à torsion rectangulaire** : il fonctionne en appliquant une torsion à un échantillon de matériau, généralement sous forme de plaque ou de fil, et en mesurant la réponse de l'échantillon à la contrainte appliquée.

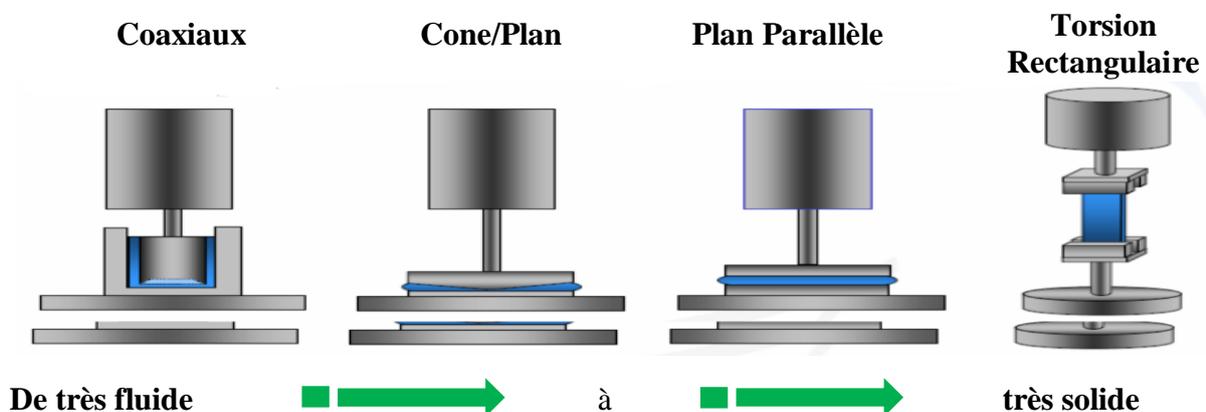


Figure II.1: Types de rhéomètre rotationnel.

II.3. Utilité de la rhéologie

Les études rhéologiques sont utiles pour caractériser les propriétés mécaniques des matériaux, en particulier leur comportement sous contrainte. Les principales utilisations courantes des études rhéologiques sont ^[7] :

- **Conception de produits** : les études rhéologiques peuvent aider à la conception de produits en déterminant les propriétés viscoélastiques des matériaux, tels que les polymères, les suspensions, les crèmes, les gels, les pâtes, etc. Ces propriétés peuvent influencer les performances du produit, comme la texture, la stabilité, la fluidité, la viscosité, etc.
- **Optimisation de procédés** : les études rhéologiques peuvent être utilisées pour optimiser les procédés de fabrication de produits. Par exemple, les propriétés rhéologiques des matériaux peuvent être ajustées en modifiant les paramètres de processus tels que la température, le taux de cisaillement, la concentration, etc.
- **Contrôle qualité** : les études rhéologiques peuvent aider à garantir la qualité des produits en mesurant et en comparant les propriétés rhéologiques des échantillons à des normes de référence.
- **Compréhension des mécanismes de déformation** : les études rhéologiques peuvent fournir des informations sur les mécanismes de déformation des matériaux, tels que l'élasticité, la viscosité, la plasticité, l'écoulement, la rupture, etc. Ces informations peuvent être utiles pour mieux comprendre les propriétés mécaniques des matériaux et leur comportement sous contrainte.
- **Développement de modèles mathématiques** : les études rhéologiques peuvent aider à développer des modèles mathématiques pour prédire le comportement des matériaux sous différentes contraintes. Ces modèles peuvent être utilisés pour optimiser les propriétés des matériaux ou pour concevoir des produits.

II.4. Régimes de mesures rhéologiques

En rhéologie, il existe deux régimes de mesures principaux : le régime permanent et le régime oscillatoire.

II.4.1. Régime permanent

Le régime permanent est également appelé régime de cisaillement continu ou régime de déformation continue, est une méthode de mesure en rhéologie qui consiste à appliquer une contrainte constante sur un matériau pendant une période prolongée de temps, généralement jusqu'à ce que le matériau atteigne un état stationnaire. Dans ce régime, la déformation (ou le taux de cisaillement) varie, mais la contrainte appliquée est maintenue constante.

Ce régime est utilisé pour caractériser les propriétés de viscosité et de plasticité des matériaux, ainsi que leur comportement sous différentes contraintes. Les propriétés de viscosité sont importantes pour comprendre la capacité d'un matériau à s'écouler ou à résister à l'écoulement, tandis que les propriétés de plasticité sont importantes pour comprendre la capacité d'un matériau à subir une déformation permanente [8].

La figure ci-dessous illustre une expérience idéale également connu sous le nom de modèle à deux plaques, est une méthode courante de mesure en rhéologie pour le régime permanent de cisaillement. Il s'agit d'un dispositif de cisaillement dans lequel un échantillon de matériau est placé entre deux plaques parallèles qui sont maintenues à une distance fixe l'une de l'autre. L'une des plaques est fixe, tandis que l'autre est mobile, et peut être déplacée à une vitesse constante pour appliquer une contrainte de cisaillement constante sur l'échantillon.

L'ensemble des forces (F) appliquées sur l'échantillon induit une contrainte de cisaillement (σ) qui est parallèle à la surface de la couche du produit (A). La variation de déplacement des couches de matériau les unes sur les autres correspond à la déformation γ . Sa dérivée par rapport au temps est le gradient de vitesse, autrement appelé taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ [9], tel que :

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

$$\gamma = \frac{\Delta L}{h}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt}$$

(1)

(2)

(3)

σ : Contrainte de cisaillement (N/m² ou Pa).
 A : Surface élémentaire de l'entité considérée (m²).
 F : Force appliquée (N).
 γ : Déformation, $\dot{\gamma}$: Taux de cisaillement (s⁻¹)

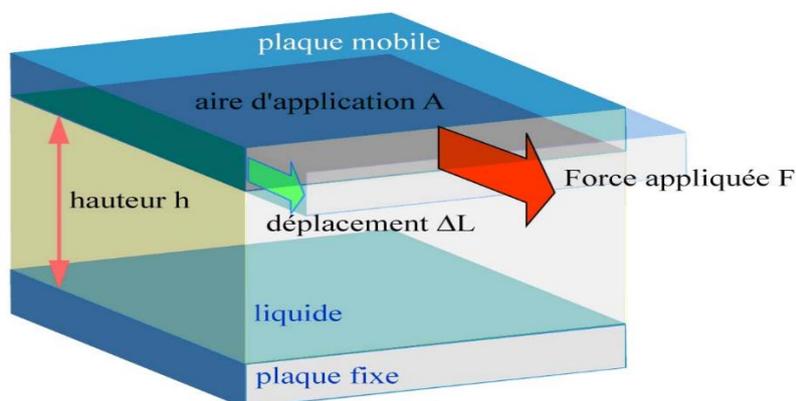


Figure II.2: Cisaillement dans le cas du modèle à deux plaques [10].

La relation entre la contrainte de cisaillement et la vitesse de cisaillement donne les informations nécessaires pour reconnaître le type de fluide et son comportement pendant le traitement.

Un paramètre primordial dans l'étude rhéologique d'un fluide est la viscosité dynamique (apparente) (η) qui exprime l'effet de retard entre deux couches adjacentes d'un même fluide pendant son écoulement. La viscosité dynamique représente donc la résistance à l'écoulement d'un système soumis à une contrainte tangentielle, elle est donnée par la relation suivante ^[11] :

$$\eta = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}} \quad (Pa.s) \quad (4)$$

II.4.2. Régime oscillatoire

Contrairement au régime permanent qui applique une contrainte de cisaillement constante, le régime oscillatoire applique une force de cisaillement qui varie dans le temps sous forme d'une onde sinusoïdale. Dans ce régime, l'échantillon de matériau est soumis à une contrainte de cisaillement qui varie périodiquement en amplitude et en fréquence. La force de cisaillement est appliquée par une sonde oscillante qui est placée dans l'échantillon de matériau et qui vibre à une fréquence donnée. Les propriétés rhéologiques du matériau, telles que la viscosité, l'élasticité et la plasticité, peuvent être mesurées en fonction de l'amplitude et de la fréquence de la force de cisaillement appliquée ^[12].

Les mesures oscillatoires permettent d'obtenir des informations sur la capacité du matériau à stocker de l'énergie élastique à travers le module élastique G' et sur son caractère dissipatif à l'aide du module visqueux G'' . Elles consistent à faire osciller les géométries avec une amplitude de déformation et une fréquence choisie. Elle permet de déterminer les propriétés viscoélastiques d'un matériau (module de conservation G' et de perte G'') en appliquant à l'échantillon une déformation sinusoïdale de pulsation ω (en rad. s^{-1}), et donc, de fréquence $f = \omega/2\pi$ (Hz) (5)

➤ *Module de conservation (G')*

Le module de conservation (ou module de stockage) est une mesure de la capacité d'un matériau à stocker de l'énergie sous forme d'élasticité lorsqu'il est soumis à une contrainte de cisaillement. Il est représenté par la lettre G' et est souvent mesuré en régime oscillatoire. Il est défini comme le rapport de l'amplitude de la force de cisaillement à l'amplitude de la déformation élastique résultant.

➤ *Module de perte (G'')*

Le module de perte est une mesure de la capacité d'un matériau à dissiper de l'énergie sous forme de chaleur lorsqu'il est soumis à une contrainte de cisaillement oscillatoire. Il est

représenté par la lettre G'' et est souvent mesuré en régime oscillatoire. Le module de perte est défini comme le rapport de l'amplitude de la force de cisaillement à l'amplitude de la déformation visqueuse résultante.

➤ **Facteur de perte**

C'est le rapport entre le module de perte et le module de conservation (G''/G') est appelé ($\tan \delta$), qui est souvent utilisé comme indicateur de l'amortissement du matériau.

Les tests oscillatoires habituellement utilisés sont des tests de balayage en déformation, de balayage en fréquence et des tests en fonction du temps ou de la température.

II.4.2.1 Balayage en déformation

En général, les tests oscillatoires commencent par un balayage en déformation. Normalement, la mesure d'un balayage en déformation se caractérise par une augmentation logarithmique de la déformation y de 0,01 % à 100 % et une fréquence angulaire constante de 10 rad/s. La plage viscoélastique linéaire (LVE) correspond à la courbe parallèle de G' et G'' le long de l'axe x . La courbe parallèle de G' et G'' signifie que la structure de l'échantillon n'est pas détruite par la déformation exercée. La plage LVE renseigne également sur la nature structurelle de l'échantillon. Si G' domine G'' , l'échantillon est un solide viscoélastique ; si G'' domine G' , l'échantillon est un fluide viscoélastique. Etant donné que le module de conservation G' quantifie l'énergie de déformation conservée, il reflète aussi la résistance structurelle de l'échantillon. A déformation croissante, les modules G' et G'' commencent à dévier de leur courbe parallèle à un point précis appelé le seuil d'écoulement ^[13].

II.4.2.2 Balayage en fréquence

Les balayages en fréquence sont utilisés pour observer le comportement à long terme et à court terme d'un échantillon au cours d'une même mesure. Le comportement à long terme est représenté par les résultats à basses fréquences tandis que les résultats à hautes fréquences montrent le comportement à court terme.

Comme avec le balayage en déformation, la forme de la courbe et le rapport de G' et G'' donnent des informations plus détaillées sur la structure de l'échantillon ^[13].

II.5. La rhéologie alimentaire

La rhéologie alimentaire est l'étude des propriétés rhéologiques des aliments, c'est-à-dire la consistance et l'écoulement des aliments dans des conditions strictement spécifiées. La rhéologie est un domaine important dans l'industrie alimentaire car elle permet de caractériser et de comprendre les propriétés mécaniques des aliments, qui peuvent affecter la texture, la consistance et la stabilité des produits alimentaires. Les études rhéologiques peuvent aider à optimiser les processus de fabrication et à améliorer la qualité des produits alimentaires. Par

exemple, la mesure de la viscosité d'un mélange peut aider à déterminer le moment optimal pour ajouter certains ingrédients. De même, la caractérisation des propriétés mécaniques d'un produit alimentaire peut aider à déterminer la meilleure méthode de traitement, de stockage et de transport pour assurer la qualité du produit.

La rhéologie est utilisée dans de nombreuses applications alimentaires, notamment dans la production de produits laitiers, de produits de boulangerie, de produits de viande et de plats cuisinés. Elle est également utilisée pour mesurer la texture des aliments pour bébés, des aliments pour animaux de compagnie et des produits diététiques ^[14].

II.5.1. La rhéologie des produits laitiers

La rhéologie joue un rôle important dans la production et la qualité des produits laitiers. Les produits laitiers sont des aliments complexes qui ont des propriétés viscoélastiques, c'est-à-dire qu'ils peuvent se comporter à la fois comme des fluides et des solides, en fonction des conditions physiques et chimiques. La mesure des propriétés rhéologiques des produits laitiers permet de comprendre comment les ingrédients interagissent, comment les produits sont transformés et comment les produits se comportent lorsqu'ils sont stockés, transportés et consommés. En particulier, la rhéologie peut aider à caractériser la texture, la consistance et la stabilité des produits laitiers. L'analyse rhéologique est une mesure importante pour comprendre les propriétés viscoélastiques complexes des produits laitiers et pour optimiser les processus de fabrication afin de produire des produits avec la texture, la consistance et la stabilité souhaitées ^[15].

Références

- [1] **Bernard P, Dragos R**, « RHÉOLOGIE », Encyclopædia Universalis, [en ligne]. URL : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/rheologie/>. Consulté le 10/04/2023.
- [2] **Groupe Français de Rhéologie**, « Dictionnaire de rhéologie », page : 56,1990.
- [3] **Site web** : <https://www.aquaportail.com/definition-4682-rheometre.html>. Consulté le 20/03/2023.
- [4] **Nithin C, Sarathchandran C, Sabu T**, « Chapter 1- Introduction to rheology », Rhology of polymer blend and nanocomposite, 2020.
- [5] **Collyer A. A**, «Rheology: Concepts, Methods, and Applications», 2019.
- [6] **François G**, « Rhéologie des mousses de fluides complexes », thèse de doctorat, 2017.
- [7] **Mason T.G and Weitz D. A**, «Rheology of complex fluids», in Physics Today, vol. 51, no. 7, p: 33-38, 1998.
- [8] **Paul R, Amigoni S**, « La rhéologie un outil précieux pour la formulation cosmétique », 2008.
- [9] **Gareche M**, « Caractérisation mécanique d'un fluide complexes », Thèse de magister I.N.H. 1997.
- [10] **Site web**: <https://nitifilter.com/faq-huile-risque-cisaillement/>. Consulté le 25/03/2023.
- [11] **Site web** : <https://labomat.eu/fr/faq/586-bases-theoriques-de-la-mesure-de-viscosite.html>, Consulté le 25/03/2023.
- [12] **Boudrahem N**, « Analyse du comportement hydrodynamique global de particules fluidisées par un fluide non-newtonien », Mémoire de magister de l'Université A. Mira (Bejaia), 2012.
- [13] **Site web** : <https://www.francebeaute.fr/realisation/rheologie-des-epaississements-dans-les-prod-uits-pharmaceutiques>. Consulté le 15/04/2023.
- [14] **Joël S**, « Rhéologie, texture et texturation des produits alimentaires », 2006.
- [15] **Yogesh K, Bhagwat S.K**, « Rheology of Dairy Products», Centre of Advanced Faculty Training in Dairy Processing ,2018.

Chapitre III

Matériels et Méthodes

III.1. Présentation de la laiterie ‘NUMIDIA’

Laiterie « Numidie » de Constantine est une unité affiliée au complexe laitier GIPLAIT, la deuxième unité de production laitière de l'est algérien après celle d'Annaba. Située à 4 Km au sud de Constantine dans la zone industrielle « Chaab Arsas », occupant une superficie de 5 hiktar et se répartissent comme suit :

- ✓ La laiterie.
- ✓ La fromagerie et beurrière.
- ✓ Un centre de collecte du lait cru.
- ✓ Locaux de liquéfaction des matières premières (lait cru, poudre, matière grasse).
- ✓ Bâtiment administratif.
- ✓ Deux laboratoires d'analyse et de contrôle de qualité physico-chimiques et bactériologiques.
- ✓ Une installation automatique de nettoyage et désinfection (CIP).
- ✓ Une centrale de traitement des eaux.
- ✓ Les chambres froides de stockage des produits finis. Services de traitement des eaux et chaudière.

La laiterie produit :

- | | |
|--|-------------------------------------|
| - Du lait pasteurisé conditionné (L.P.C). | - Beurre. |
| - Du lait de vache conditionné (L.V.C). | - Crème Camembert. |
| - Du lait fermenté conditionné (L.F.C) appelé leben. | - Fromage à pâte molle (Camembert). |
| - Crème fraîche conditionnée (C.F.C). | - Petit constantinois. |
| - Fromage à pâte pressée (edam, gouda et maazdam). | - Yaourt |
| - Fromage fondu (portion, barre et barquette). | |



Figure III.1 : Laiterie « Numidia ».

III.2. Caractérisation des produits laitiers

Dans notre étude, nous avons effectué des analyses physico-chimiques au niveau du laboratoire d'analyses Numidia -Constantine-, tandis que les analyses rhéologiques ont été réalisées au niveau du laboratoire d'analyses industrielles et génie des matériaux LAIGM de l'université de Guelma. Ce chapitre présente les différentes méthodologies de mesures et d'analyses qui ont été effectuées dans l'ensemble des travaux expérimentaux.

III.2.1. Analyses physico-chimiques

Ces analyses ont été effectuées dans le but de tester les différents paramètres ; la densité, la recherche d'antibiotique, l'acidité, la température, le pH, la teneur en matière grasse, l'extrait sec et l'humidité, ceci pour la matière première (lait) et pour les produits finis (crème fraîche, fromage fondu et fromage à pâte molle type Camembert).

III.2.1.1 Matière première

❖ Détermination de la densité

La densité du lait est une grandeur sans dimension qui désigne le rapport entre la masse d'un volume donné de lait à 20°C et la masse du même volume d'eau. La densité est déterminée à l'aide d'un lactodensimètre, elle est d'environ 1,030 à 20°C [1].

• Mode Opérateur :

- Remplir l'éprouvette avec du lait
- Introduire le lactodensimètre dans l'éprouvette, après la stabilisation de l'appareil, lire directement la valeur de la densité sur les graduations du lactodensimètre.

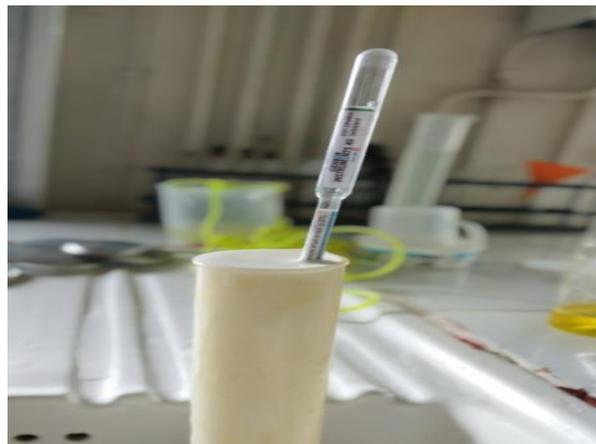


Figure III.2 : Mesure de la densité du lait de vache par lactodensimètre [2].

❖ Recherche d'antibiotique

Les antibiotiques se définissent comme des molécules antibactériennes synthétiques ou naturelles (d'origine biologique) capables d'inhiber la croissance des bactéries ou les détruire^[3]. Ils ont une toxicité sélective ; ils sont toxiques pour les bactéries, mais pas pour l'organisme cible^[4].

- **Mode Opérateur :** la recherche d'antibiotique est déterminée par le test Beta star combo selon les étapes suivantes :
 - Prélever 0,3 ml de lait cru à l'aide d'une pipette et le verser dans les petites bouteilles.
 - Mélanger l'échantillon et incuber à 47,5°C pendant 3 min.
 - Placer une bandelette qui capte les récepteurs d'antibiotiques dans l'échantillon après 1 min d'incubation.
 - Après 2 min, on retire la bandelette et on interprète les résultats comme suite :

La lecture se fait selon la coloration de la 4^{ème} bande en rose :

- Présence de la bande : absence des antibiotiques.
- Absence de la bande : présence des antibiotiques correspondant à la bande.



Figure III.3 : Test d'antibiotique.

❖ Détermination de l'acidité titrable

La détermination de l'acidité d'un lait permet d'apprécier la quantité d'acide produite par les bactéries^[5]. L'acidité est dosée par titration avec une solution de NaOH et exprimée en degré Dornic. La présence de phénophtaléine, comme indicateur coloré, indique la limite de la neutralisation par changement de couleur (rose pâle).

L'unité de mesure est degré Dornic (°D) où : 1°D représente 0,1 g d'acide lactique dans un litre de lait^[6].

- **Mode Opérateur**

- Introduire dans un Becher 10 ml/10g l'échantillon à analyser.
- Ajouter 3 gouttes de l'indicateur coloré (phénolphtaléine).
- Titrer avec une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) et mélanger manuellement jusqu'à l'apparition d'une couleur rose pâle.
- Lire le volume de NaOH sur la burette.

$$AT = V \times 10 \text{ (}^\circ\text{D)}.$$

AT: Acidité titrable

V: Volume



Figure III.4 : Mesure d'acidité titrable en °D pour le lait de vache.

- ❖ **Détermination de la température**

La détermination de la température se fait en introduisant soit le thermomètre ou bien le thermo-lacto-densimètre dans l'échantillon à analyser.

Au moment de la lecture, l'œil doit être au niveau du point de lecture d'une façon horizontale, en attendant jusqu'à la stabilité du niveau du Mercure.

III.2.1.2 Produits laitiers

- ❖ **Détermination de la matière grasse**

La teneur en matière grasse est déterminée par la méthode acido-butyrométrique de Gerber. Les constituants du lait, autre que la matière grasse sont dissous par l'acide sulfurique. L'ajout d'une petite quantité de l'alcool iso-amylique ^[7] et la force centrifuge permettent de dissoudre la matière grasse, cette dernière se sépare et monte au sommet du butyromètre ^[8].

Le principe est basé sur la séparation de la matière grasse par centrifugation dans un butyromètre, la séparation de cette dernière en une couche claire transparente est favorisée par l'addition d'une petite quantité d'alcool iso amylique.

- **Mode Opérateur**

- Prélever 11ml de l'échantillon dans un butyromètre.
- Ajoute 10ml d'acide sulfurique.
- Ajouter 1 ml d'alcool iso-amylque.
- Fermer le butyromètre et bien homogénéiser.
- Le butyromètre est placé par la suite dans une centrifugeuse, enfin en centrifuge pendant 6 minutes à 1200 tours / min.
- Après centrifugation, effectuer la lecture.
- La teneur de matière grasse est exprimée en masse, en pour-cent ou en gramme par litre.



Figure III.5 : Centrifugeuse de Gerber.



Figure III.6 : Butyromètre.

- ❖ **Détermination de pH**

Le pH est une mesure de l'activité des ions (H^+) contenus dans une solution, sa valeur est un indicateur de l'état de fraîcheur ou sur la stabilité de lait mesuré à l'aide d'un pH-mètre à une température de 20 C°.

- **Mode Opérateur**

Il s'agit de potentiométrie avec un pH-mètre.

- Etalonner le pH-mètre à l'aide des solutions tampon à pH=7.
- Régler la température de l'appareil à 20°C.
- Introduire l'électrode dans la pâte.
- Attendre la stabilisation du pH pour effectuer la lecture.
- La lecture des résultats se fait directement à partir de l'affichage sur le cadran du pH-mètre.



Figure III.7 : pH mètre durant l'analyse de l'échantillon de Camembert.

❖ **Détermination de l'extrait sec totale (EST%)**

La teneur en matière sèche totale du lait est le produit résultant de la dessiccation de ce lait. Elle est exprimée en g/l ou en % massique.

• **Mode opératoire**

- Allumer l'appareil.
- Placer la capsule sur la balance du dessiccateur et tarer.
- Peser 5g d'échantillon.
- Etaler bien l'échantillon et baisser le capot de l'appareil.
- Placer la capsule dans l'étuve et attendez que l'appareil sonne.



Figure III.8 : Le dessiccateur infrarouge.

❖ **Détermination de l'extrait sec dégraissé (ESD%)**

Le taux de l'extrait sec dégraissé exprime la teneur en éléments secs débarrassés de la matière grasse, beaucoup plus constante que la matière sèche totale, elle est presque toujours

voisine de 90 g/l^[9]. La teneur en extrait sec dégraissé est déterminée par la soustraction de la teneur en matière grasse à l'EST. Elle est calculée comme suit :

$$\text{ESD} = \text{EST} - \text{MG}$$

ESD : Extrait sec dégraissé ;

EST : Extrait sec total ;

❖ Détermination de l'Humidité (H%)

La valeur de l'humidité est déterminée par la soustraction du pourcentage l'EST à 100%. La valeur de H% est calculée comme suit :

$$\text{H}\% = 100 - \text{EST}$$

III.2.2. Analyses rhéologiques

La caractérisation rhéologique des produits laitiers consiste à mesurer les propriétés qui déterminent leur comportement sous l'effet des contraintes mécaniques, telles que la viscosité et les modules G' et G'' . Cette caractérisation est effectuée au niveau de laboratoire LAIGM, l'outil de mesure utilisé est un rhéomètre de type Bohlin CVO.

III.2.2.1 Dispositifs expérimentaux

Les dispositifs expérimentaux utilisés dans les analyses rhéologiques (figure IV.9) sont les suivants :

➤ Rhéomètre Bohlin CVO

Le rhéomètre Bohlin CVO (Continuous Shear Viscosity Oscillation) est un instrument de mesure, utilisé pour caractériser les propriétés rhéologiques des matériaux. Cet instrument est particulièrement adapté à l'étude des matériaux viscoélastiques, tels que les polymères, les gels, les suspensions, les crèmes et les pâtes.

Le principe de fonctionnement du rhéomètre Bohlin CVO est basé sur la mesure de la réponse du matériau à une sollicitation oscillatoire dans une géométrie en cisaillement continu. Le matériau est placé entre deux plaques parallèles qui sont soumises à un mouvement oscillatoire de va-et-vient, créant ainsi un cisaillement continu dans le matériau.

À partir des mesures réalisées à l'aide de rhéomètre Bohlin CVO, il est possible de déterminer les propriétés viscoélastiques du matériau, telles que le module de cisaillement (ou module d'élasticité), la viscosité dynamique, l'amortissement, etc.

L'avantage du rhéomètre Bohlin CVO est qu'il permet de mesurer les propriétés viscoélastiques d'un matériau sur une large plage de fréquences, ce qui permet d'obtenir une information complète sur le comportement rhéologique du matériau. De plus, grâce à la géométrie en cisaillement continu, cet instrument permet de mesurer les propriétés rhéologiques des matériaux même à des taux de cisaillement très faibles.

- **Compresseur** : un dispositif électrique qui sert à comprimer le gaz.
- **Régulateur (unité de chaleur Peltier)** : un instrument pour contrôler la température.
- **Un logiciel** : permet la programmation et le contrôle des paramètres d'essai [déformation, temps, fréquence, isotherme, paliers, rampe ou profil de température (association de rampes et de paliers), contrainte de cisaillement ou gradient de vitesse dans le fluide, etc.], la sauvegarde et le traitement des données.



Figure III.9 : Dispositif expérimental de l'étude rhéologique.

III.2.2.2 Principe de rhéomètre

Le rhéomètre Bohlin CVO, c'est un rhéomètre rotatif, la gamme de gradients de vitesse accessibles avec cet appareil est comprise entre $0,0716$ et 5012 s^{-1} pour la géométrie cône-plan dont nous disposons.

Les spécifications techniques du rhéomètre sont :

- Déformation : $1,432 \cdot 10^{-5}$ - $1,432 \cdot 10^{10}$.
- Contrainte : $0,02984$ à 5968 Pa
- Fréquence d'oscillation : $7,5 \cdot 10^{-7}$ à 628 Hz
- Contrôle de la température : -180°C à 550°C

Le principe de rhéomètre comporte les étapes suivantes :

- Préparation de l'échantillon : L'échantillon doit être préparé de manière appropriée avant la mesure, en fonction de sa nature. Par exemple, pour un gel ou une crème, l'échantillon doit être bien mélangé pour obtenir une consistance homogène.

- Montage de l'échantillon : L'échantillon est ensuite placé entre deux plaques parallèles du rhéomètre Bohlin CVO. La quantité d'échantillon doit être suffisante pour remplir l'espace entre les plaques, mais pas trop pour éviter les fuites.
- Réglage des paramètres : Les paramètres de mesure tels que la fréquence, l'amplitude et la température sont réglés en fonction de la nature de l'échantillon et de la plage de propriétés viscoélastiques attendues.
- Calibration : Avant de procéder à la mesure, le rhéomètre doit être calibré en utilisant une substance de référence de propriétés connues. Cela permet de s'assurer que l'appareil est bien réglé et d'obtenir des mesures précises.
- Mesure : Une fois le rhéomètre calibré et l'échantillon monté, la mesure peut être lancée. Le rhéomètre effectue des mesures de contrainte et de déformation pour chaque fréquence sélectionnée, en généralement de manière automatique. Les données de mesure sont ensuite collectées et enregistrées.
- Analyse des données : Les données collectées peuvent ensuite être analysées à l'aide d'outils de traitement de données pour calculer les propriétés rhéologiques telles que le module de cisaillement, la viscosité dynamique, l'amortissement, etc.
- Nettoyage : Après la mesure, le rhéomètre et les accessoires doivent être nettoyés et séchés soigneusement pour éviter les contaminations lors des prochaines mesures.

Il est important de suivre les procédures de manipulation appropriées pour obtenir des mesures précises et reproductibles avec le rhéomètre Bohlin CVO.

Références

- [1] **Pointurier H**, « La gestion matière dans l'industrie laitière », Tec et Doc, Lavoisier, France : 64, page : 388, 2003.
- [2] **Kabir A**, « Contraintes de la production laitière en Algérie », Thèse de doctorat de l'Université Ahmed Ben Bella, Oran, 2015.
- [3] **Helali A**, « Pharmacologie fondamentale et clinique à l'usage des étudiants en médecine », Édition ENG, page : 135, 1999.
- [4] **Merad M et Merad R**, « Toxicité des antibiotiques », Médecine du Maghreb 2001, n°91, page : 17, 2001.
- [5] **Joffin C et Joffin J.N**, « Microbiologie alimentaire 5^{ème} édition collection Biologie Technique », page : 211, 1999.
- [6] **Mathieu J**, « Initiation à la physicochimie du lait », Edition technique et documentation Lavoisier. Paris, Page : 220, 1998.
- [7] **Ghaoues S**, « Evaluation de la qualité physico - chimique et organoleptique de cinq marques des laits reconstitués partiellement écrémés commercialisés dans l'est Algérien », Mémoire de Magister, Université Mentouri- Constantine, Page : 14,38, 2011.
- [8] **Afnor**, « Contrôle de la qualité des produits alimentaires : Lait et produits laitiers, analyses physicochimiques », Paris La Défense, 4 éd, page : 581, 1993.
- [9] **Veisseyre R**, « Technologie du lait : Constitution, Récolte, Traitement et Transformation du lait », 3^{ème} édition. Rustique. Page : 1-3, 1975.

Chapitre IV

Résultats et Discussions

IV.1. Introduction

Dans cette partie, nous allons examiner les résultats des analyses physico-chimiques et rhéologiques des produits laitiers sélectionnés (le lait, la crème fraîche, le fromage fondu et le Camembert) afin d'étudier la conformité de ces aliments et de connaître ses comportements rhéologiques.

IV.2. Analyses physico-chimiques

IV.2.1. Matière première

Les résultats des analyses physico-chimiques (acidité, température, matière grasse, densité et test d'antibiotique) effectuées sur cinq échantillons du lait de vache sont rapportés dans le tableau suivant :

Tableau IV.1 : Analyses physico-chimiques de lait cru de vache.

Echantillon	Acidité(°D)	T(°C)	MG(g/l)	Densité	Antibiotique
Ech1	16	5	30	1,028	Abs
Ech2	17	5	32	1,028	Abs
Ech3	16	5	31	1,029	Abs
Ech4	18	7	31	1,028	Abs
Ech5	17	5	28	1,028	Abs
Norme	15-18	<10	>28	1,0127-1,032	Abs

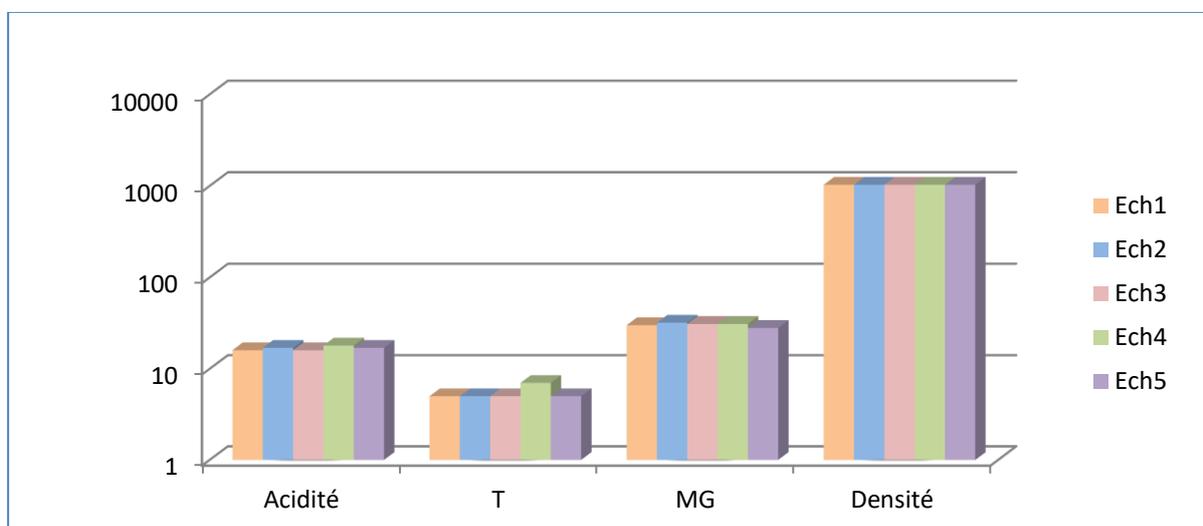


Figure IV.1 : Résultats des analyses physico-chimiques de cinq échantillons du lait de vache.

D'après les résultats obtenus, on peut conclure que ;

- Les valeurs de la densité des cinq échantillons sont variées entre 1,028 et 1,030, donc ces échantillons sont conformes aux normes algériennes (JORA N°35 2017), qui exigent que la valeur de la densité doive être située entre 1,0127-1,032.

- La température des échantillons de lait cru est inférieure à la valeur minimum exigée par JORA ($< 10\text{ C}^\circ$), donc les valeurs de la température assurent sa conformité.
- Selon la norme algérienne, les valeurs d'acidité doivent être comprises entre 15 et 18°D . Par conséquent, les valeurs d'acidité des échantillons sont en bonne conformité.
- La teneur en matière grasse du lait cru est supérieure à la valeur maximum exigée ($> 28\text{g/l}$), ces échantillons sont conformes à la norme algérienne.
- Les résultats négatifs des tests d'antibiotiques pour tous les échantillons de lait cru renseignent sur l'absence totale de résidus d'antibiotiques et donc sur la conformité de sa qualité sanitaire.

IV.2.2. Les produits finis

IV.2.2.1 Crème fraîche

Les résultats des analyses physico-chimiques effectuées sur les cinq échantillons de la crème fraîche sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau IV.2 : Analyses physico-chimiques de la crème fraîche.

Echantillon	Acidité ($^\circ\text{D}$)	T($^\circ\text{C}$)	MG(g/l)	EST(%)	ESD(%)
Ech1	42	15	35	39,13	4,13
Ech2	43	13	37	42,64	5,64
Ech3	46	16	39	41,22	2,22
Ech4	43	16	36	38,61	2,61
Ech5	43	18	37	39,49	2,49

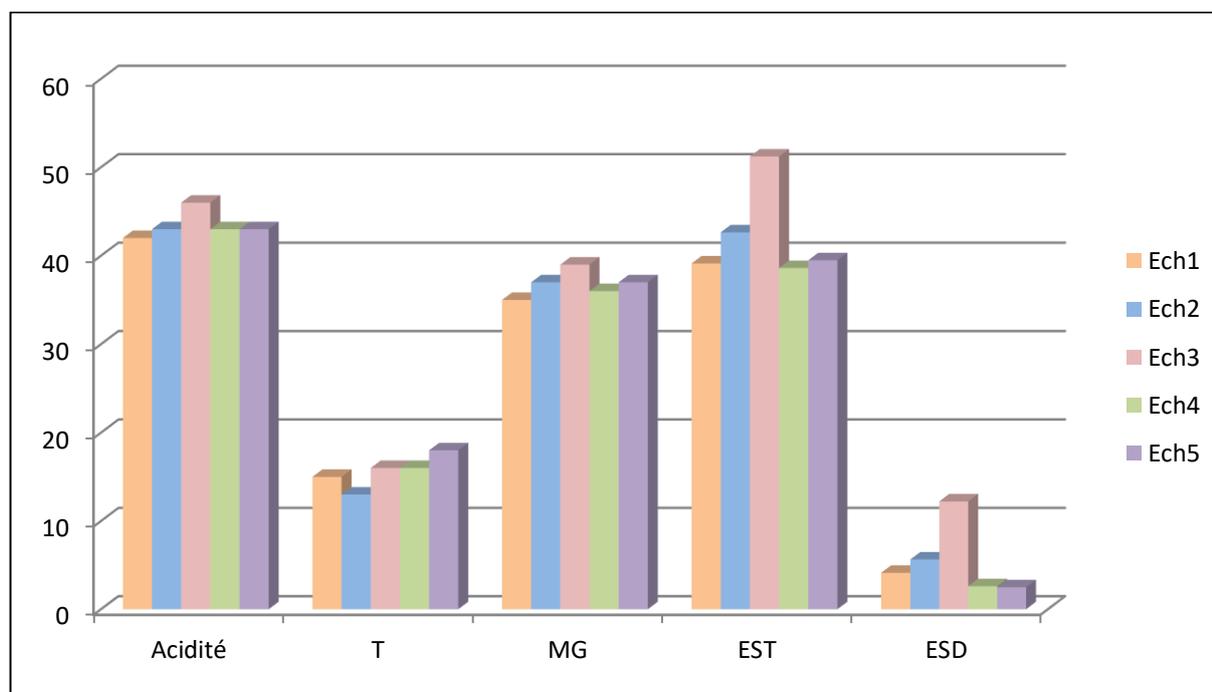


Figure IV.2 : Résultats des analyses physico-chimiques de cinq échantillons de la crème fraîche.

D'après les résultats obtenus on conclure que :

- L'acidité de la crème fraîche varie entre 42 et 46 °D, ces résultats sont conformes aux normes. Ce paramètre est un indicateur important de la fraîcheur de la crème.
- La teneur en matière grasse des différents échantillons se situe entre 35 et 39 g/l, ce qui est conforme aux normes.
- La température de la crème fraîche est conforme aux exigences établies.
- Les valeurs de l'extrait sec total des échantillons varient entre 43 et 46 g/l. Ce qui est conforme aux normes.
- La crème fraîche présente un taux d'extrait sec dégraissé de 2,49% et de 2,22%. Ces résultats sont conformes aux normes requises.

IV.2.2.2 Fromage fondu

Les résultats des analyses physico-chimiques réalisées sur les cinq échantillons de fromage fondu sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau IV.3 : Analyses physico-chimiques de fromage fondu.

Echantillon	PH	MG(g/l)	EST(%)	ESD(%)	Humidité (%)
Ech1	5,67	14,5	40,93	26,43	59,07
Ech2	5,68	13,5	40,44	26,94	59,56
Ech3	5,61	14	38,82	24,82	61,18
Ech4	5,64	13,5	40,17	26,67	59,83
Ech5	5,66	13,5	40,05	26,55	59,95

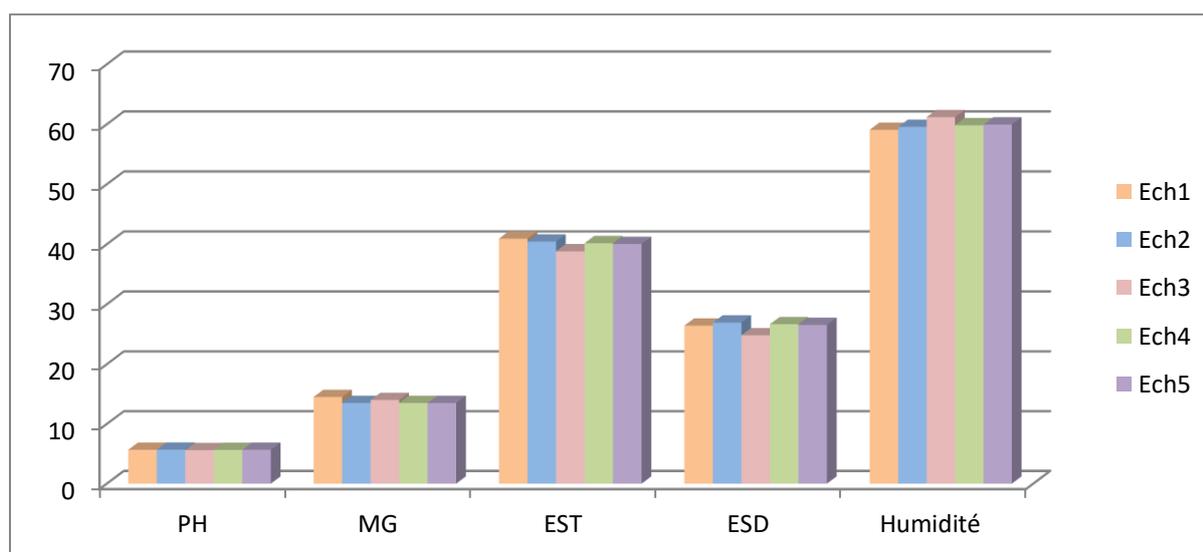


Figure IV.3 : Résultats des analyses physico-chimiques de cinq échantillons de fromage fondu.

D'après les résultats des analyses physico-chimiques effectuées sur le fromage, les observations sont les suivantes :

- Les résultats expérimentaux de pH des cinq échantillons testés sont conformes, ils sont variés entre 5,61 et 5,68. L'ajustement du pH permet d'obtenir un produit homogène et de maintenir la saveur souhaitée.
- Le taux de matière grasse des échantillons de fromage se situe entre 13,5 et 14,5 g/L, ce qui est en conformité avec les normes établies.
- Les valeurs de l'extrait sec total mesurées varient entre 38,82 et 40,93 g pour 100 g de fromage, ce qui correspond à une teneur en matière humide comprise entre 59,07% et 61,18%. Ces valeurs respectent les normes qui exigent que tout type de fromage contienne au moins 23 g de matière sèche pour 100 g de fromage.
- La teneur en extrait sec dégraissé varie entre 24,82 et 26,94, ce qui est conforme à la norme.

IV.2.2.3 Le Camembert

Le tableau IV.4 montre les résultats des analyses physico-chimiques effectuées sur 5 échantillons du Camembert.

Tableau IV.4 : Analyses physico-chimiques de Camembert.

Echantillon	PH	MG (g/l)	EST (%)	ESD (%)	Humidité (%)
Ech1	5,14	20,50	46,02	25,52	53,98
Ech2	5,14	19	43,61	24,61	56,39
Ech3	5,16	20	43,66	23,66	56,34
Ech4	5,16	20	44,32	24,32	55,68
Ech5	5,30	20	46,45	26,45	53,55

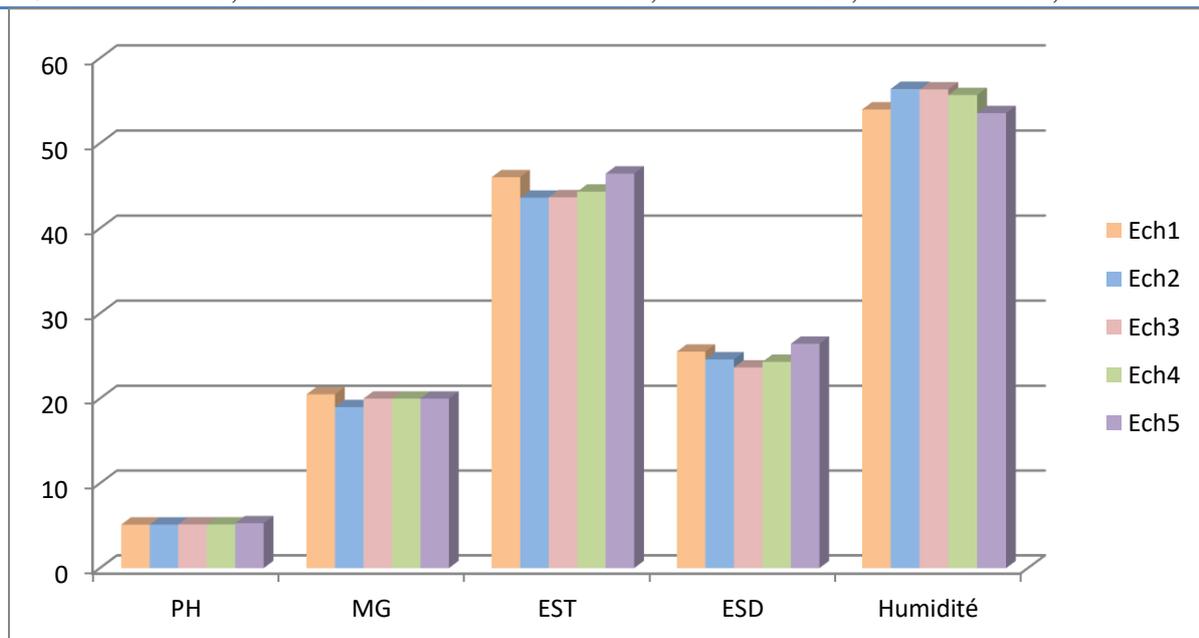


Figure IV.4 : Résultats des analyses physico-chimiques de cinq échantillons de Camembert.

La conformité des échantillons de Camembert testés est déterminée en fonction de la validité des résultats des analyses physico-chimiques par rapport aux normes nationales. Les résultats obtenus montrent ce qui suit :

- Les valeurs de pH des échantillons varient entre 5,14 et 5,30, ce qui est conforme aux normes établies.
- La teneur en matière grasse des échantillons se situe entre 19 et 20,5 g/l. Cette gamme de matière grasse témoigne de la bonne qualité du produit fini.
- Les valeurs de l'extrait sec total (qui inclut les valeurs d'humidité) et de l'extrait sec dégraissé des échantillons sont conformes aux normes.

D'après les résultats obtenus, on peut conclure que le fromage à pâte molle de type Camembert présente une meilleure qualité organoleptique.

IV.3. Analyse rhéologique

IV.3.1. La viscosité

Dans le régime permanent, on va déterminer la viscosité des trois produits laitiers (la crème fraîche, le fromage fondu et le Camembert) en fonction du taux de cisaillement. La relation entre la viscosité et le taux de cisaillement est représentée dans un rhéogramme sous forme de courbe de cisaillement.

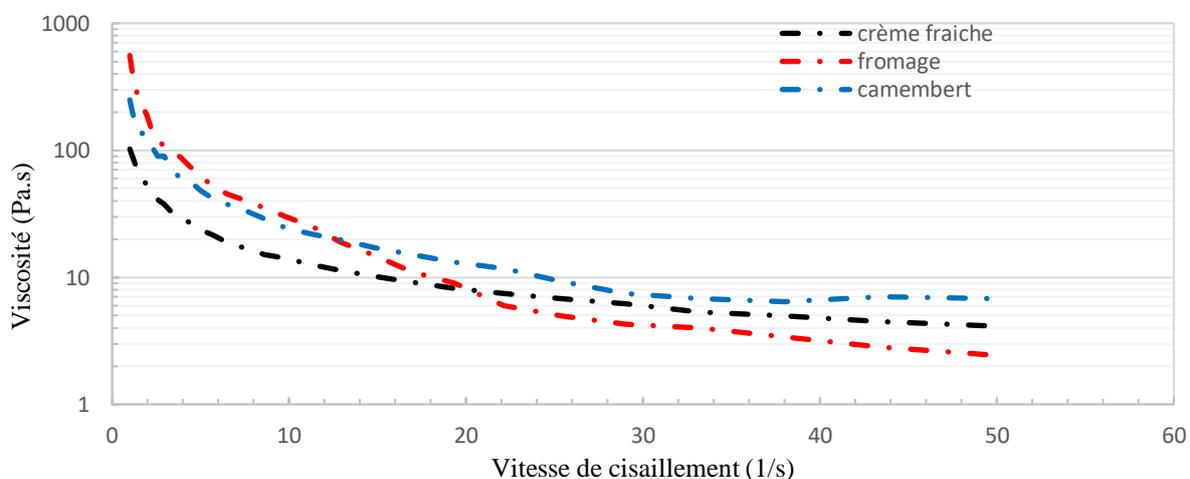


Figure IV.5 : Viscosité des produits laitiers en fonction du taux de cisaillement.

Les valeurs de la viscosité des trois produits laitiers en fonction du taux de cisaillement appliqué sont présentées dans la figure IV.5. Cet essai est réalisé dans les conditions suivantes : $T=25^{\circ}\text{C}$ et $\dot{\gamma}$ est variée entre $[1-50] \text{ s}^{-1}$. D'après ce rhéogramme la viscosité diminue à mesure que le taux de cisaillement augmente. Cela est dû à l'effet de cisaillement sur les micelles de graisse et sur les interactions entre les protéines et les stabilisants dans les produits laitiers.

Lorsque le produit est soumis à une vitesse de cisaillement élevée, les liaisons entre les molécules se brisent, ce qui peut entraîner une diminution de la viscosité. De plus, les interactions entre les protéines et les stabilisants peuvent être perturbées, ce qui peut également contribuer à la diminution de la viscosité.

IV.3.2. Régime oscillatoire

Pour étudier la nature viscoélastique des produits laitiers, deux paramètres ont été mesurés : le module élastique (G') et le module visqueux (G''). Le terme de module élastique (G') indique la capacité du matériau à stocker l'énergie, tandis que le terme de module visqueux (G'') indique la capacité du matériau à dissiper l'énergie qui a été utilisée par la suite pendant l'écoulement. Les tests dynamiques commencent avec un balayage en déformation pour déterminer la plage viscoélastique linéaire (Linear Viscoelastic Region, LVER), puis d'autres tests peuvent être utilisés pour déterminer les caractéristiques supplémentaires du comportement viscoélastique.

IV.3.2.1 La crème fraîche

➤ Balayage en déformation

Le rhéogramme suivant montre la variation des modules (G') et (G'') en fonction de la déformation pour une valeur de fréquence de 1Hz.

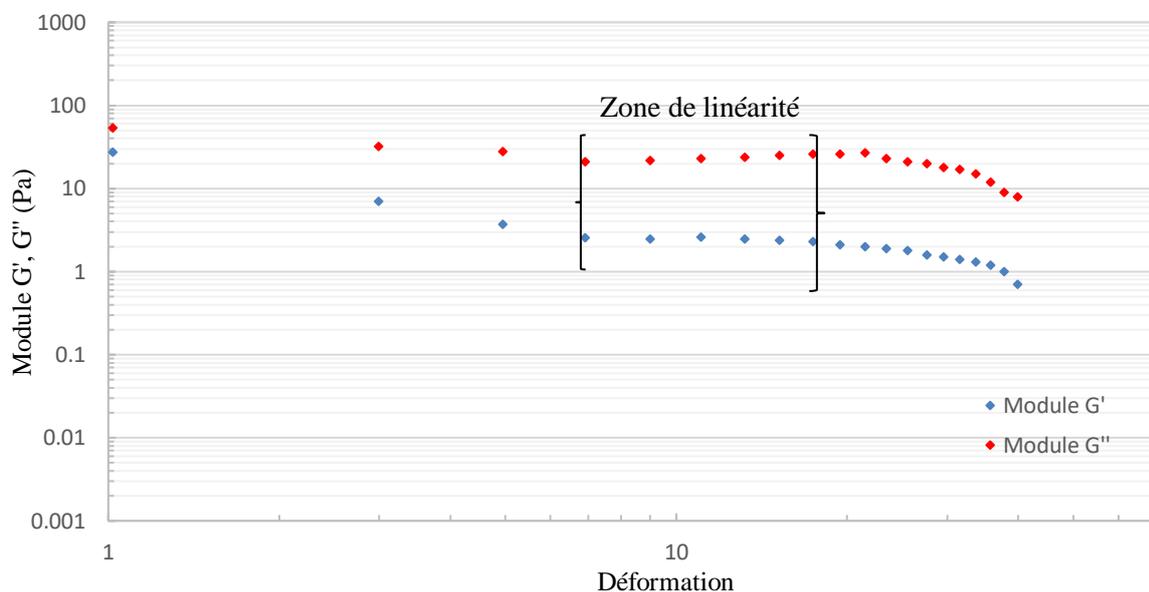


Figure IV.6 : Modules G' et G'' de la crème fraîche en fonction de la déformation.

La figure IV.6 représente l'effet de la déformation sur les valeurs de G' et G'' , ce rhéogramme montre que dans l'intervalle de déformation entre 8 et 20 les valeurs des deux modules sont indépendantes de la déformation appliquée, c'est-à-dire dans cette gamme de

déformation, on a un comportement viscoélastique linéaire et on a déterminé la valeur de la contrainte correspondant à cette région.

- **Balayage en fréquence**

Dans la zone de linéarité, la valeur de la contrainte est égale à 380Pa. L'essai de balayage en fréquence doit être effectué à cette valeur de contrainte afin d'éviter les conditions du viscoélastique non linéaire.

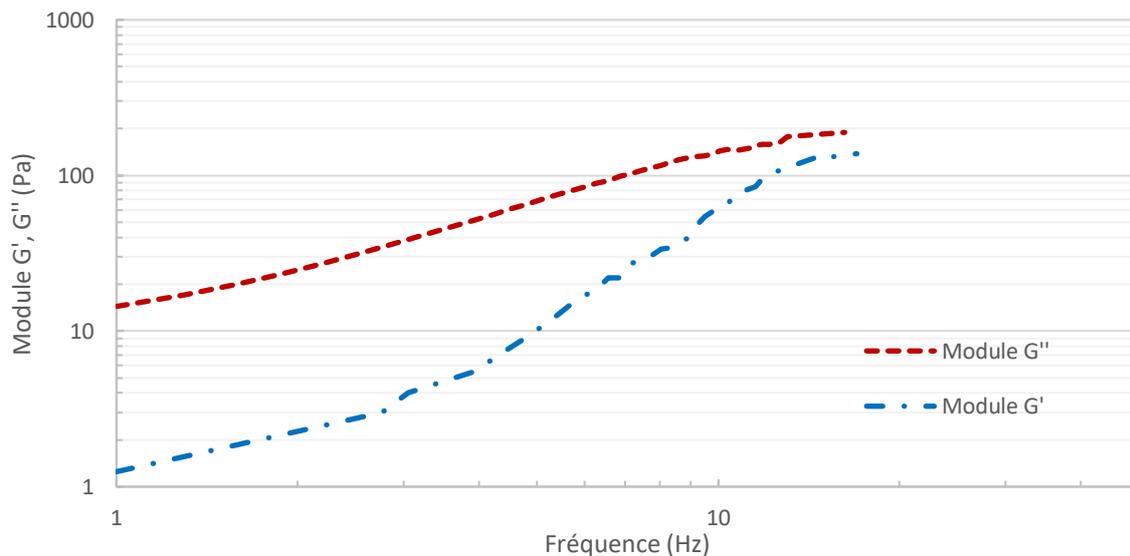


Figure IV.7 : Modules G' et G'' de la crème fraîche en fonction de la fréquence.

La crème fraîche est un fluide viscoélastique qui est caractérisé par ses modules de stockage (G') et de perte (G''). La figure IV.7 montre que le module de perte G'' est plus élevé que le module de stockage G' cela est signifié que la crème fraîche est plus visqueuse, c'est-à-dire que la dissipation d'énergie est plus importante que la capacité de stockage d'énergie lorsqu'elle est soumise à une contrainte. Et cela est dû à la nature la plus douce et crémeuse au toucher de la crème fraîche.

IV.3.2.2 Le fromage fondu

- **Balayage en déformation**

La figure IV.8 montre que les modules (G') et (G'') sont indépendants de la déformation dans l'intervalle [4-13] à fréquence égale à 1Hz et la valeur de la contrainte appliquée pour le balayage en fréquence est déterminée dans cette région.

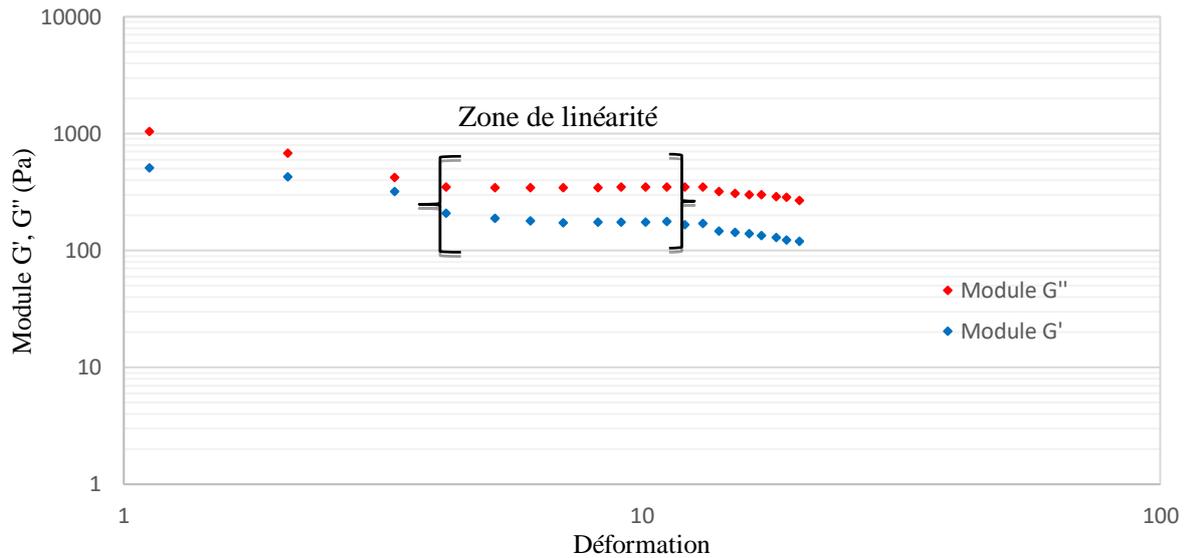


Figure IV.8 : Modules G' et G'' du fromage fondu en fonction de la déformation.

➤ Balayage en fréquence

Dans la plage viscoélastique linéaire (LVE) correspond à la courbe parallèle de G' et G'' la contrainte est égale à 400Pa. L'essai de balayage en fréquence doit être effectué à cette valeur pour assurer que la structure de l'échantillon n'est pas détruite par la déformation exercée.

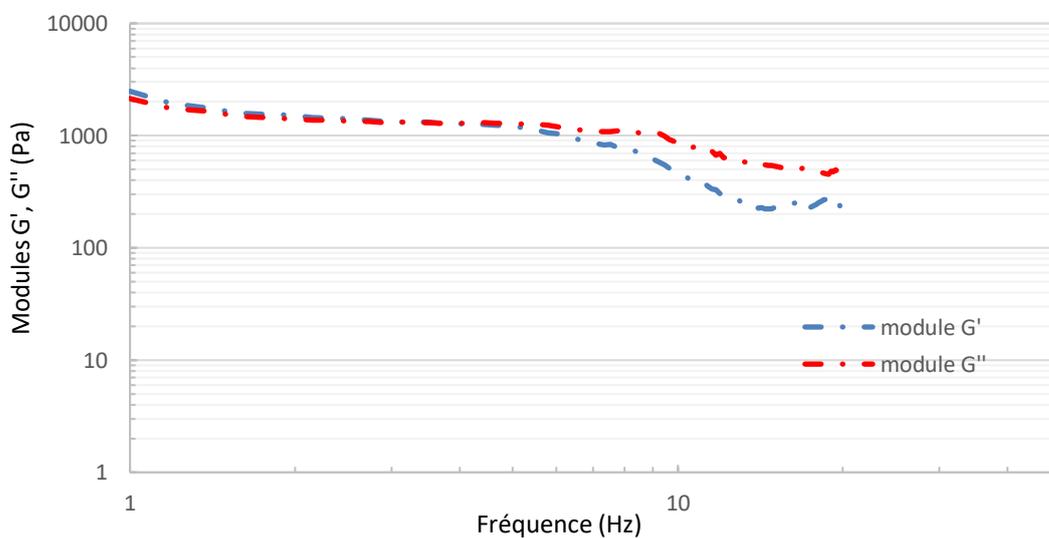


Figure IV.9: Modules G' et G'' du fromage fondu en fonction de la fréquence.

La figure ci-dessus représente la mesure des modules de stockage (G') et de perte (G'') qui décrit la réponse viscoélastique du matériau. A faible fréquence, on remarque que les modules G' et G'' sont presque superposés, ce qui suggère que le fromage présente une réponse viscoélastique équilibrée entre sa composante élastique (G') et sa composante

visqueuse (G''). Cela peut indiquer que la structure du fromage est rigide, mais qu'il possède également une certaine capacité à dissiper de l'énergie de manière visqueuse.

Avec l'augmentation de la fréquence, les modules de stockage (G') et de perte (G'') ont tendance à diminuer. Cela peut être dû à des facteurs tels que la déformation de la structure de la matrice du fromage et la libération de l'eau ou de l'huile de la matrice.

Lorsque G'' devient supérieur à G' à des fréquences plus élevées, cela indique que le matériau commence à dissiper davantage d'énergie de manière visqueuse que de stocker de l'énergie de manière élastique. Ceci est dû à la rupture de certaines liaisons moléculaires dans le matériau, ce qui entraîne une augmentation de la viscosité et une diminution de l'élasticité.

Il convient de noter que la réponse viscoélastique du fromage dépend de nombreux facteurs tels que sa composition, sa teneur en eau, sa texture et son traitement thermique. Par conséquent, la mesure de la viscoélasticité peut varier considérablement en fonction de ces facteurs et des conditions expérimentales spécifiques.

IV.3.2.3 Le Camembert

➤ Balayage en déformation

Nous représentons sur le rhéogramme suivant (figure IV.10) la variation des modules (G') et (G'') en fonction de la déformation.

La zone LVE pour l'échantillon de Camembert à une fréquence de 1Hz est restreinte entre les valeurs de déformation de 4 à 12 et la valeur de la contrainte dans cette zone est égale à 600Pa.

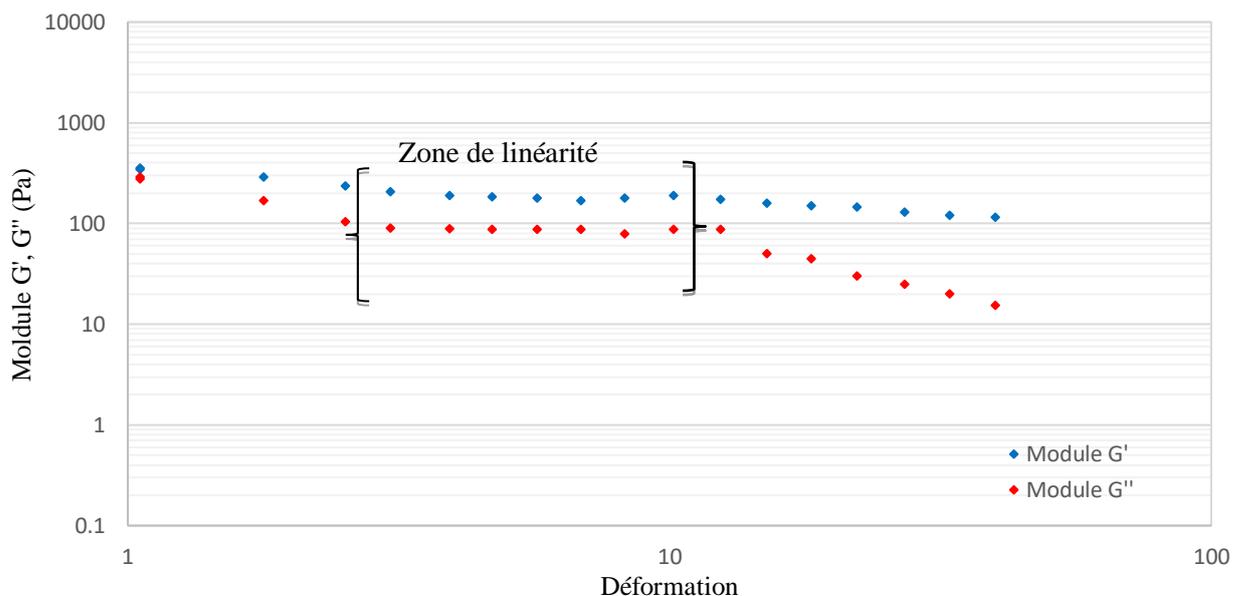


Figure IV.10 : Modules G' et G'' du Camembert en fonction de la déformation.

➤ Balayage en fréquence

Les valeurs de G' et G'' sont déterminées dans un intervalle de fréquence allant de 1 à 20 Hz. D'après le rhéogramme ci-dessous, le Camembert présente un comportement solide viscoélastique, avec un G' plus élevé que G'' . Cela indique que le Camembert est capable de résister aux contraintes de cisaillement sans se déformer, et sa réponse viscoélastique est principalement dominée par sa composante élastique. Ce comportement est principalement dû à la structure solide de la croûte de fromage.

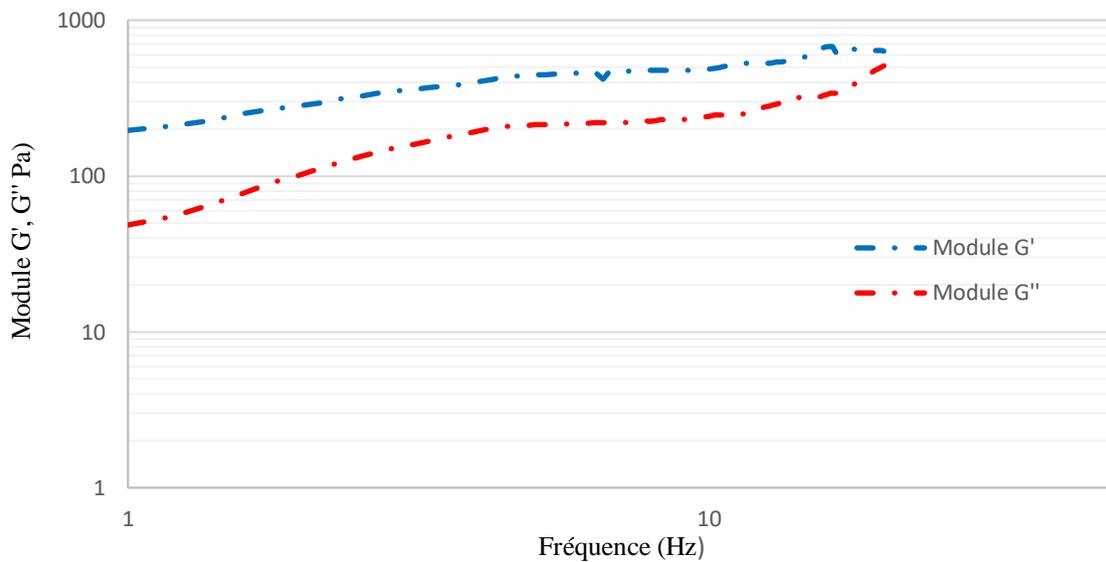


Figure IV.11: Modules G' et G'' du Camembert en fonction de la fréquence.

Chapitre V

Docking moléculaire

V.1. Introduction

La cristallographie aux rayons X (X-ray) et la résonance magnétique nucléaire (RMN) sont deux techniques majeures permettant de décrire à un niveau de résolution atomique comment deux molécules interagissent. Ces méthodes expérimentales ont toutefois chacune leurs limitations et restent difficiles et coûteuses à mettre en place. L'amarrage moléculaire, ou Docking, est une approche informatique représentant une alternative complémentaire à ces méthodes expérimentales [1].

Le Docking (ou "amarrage moléculaire") est une approche numérique de modélisation moléculaire. Il cherche à identifier la meilleure orientation entre deux molécules sur la base de leurs coordonnées dans des états pris séparément. Le but du Docking moléculaire est de prédire la conformation tridimensionnelle optimale de la liaison entre le ligand (petite molécule) et le récepteur (protéine), ainsi que de prédire les forces et l'affinité de cette interaction [2].

Ce chapitre porte sur une étude *in silico* basée sur le Docking moléculaire, qui permet d'analyser les différentes interactions entre deux types de ligands (les acides gras et les polyphénols) et l'alpha-caséine, qui est la protéine principale présente dans le lait. Le complexe formé par alpha-caséine et les ligands choisis vise à améliorer la qualité et la stabilité des produits laitiers, tout en offrant des avantages pour la santé. L'utilisation de techniques de Docking moléculaire permet de mieux comprendre les mécanismes de cette interaction et de prédire la conformation la plus stable de ces ligands lorsqu'ils se lient à l'alpha-caséine.

V.2. Docking moléculaire

Le Docking (ancrage ou amarrage) est l'expression donnée aux simulations moléculaires dans lesquelles différentes approches chimique, physique et biologique sont combinées pour étudier au niveau atomique les interactions entre deux molécules :

- L'une, la cible, une protéine possédant un ou plusieurs sites actifs spécifiques avec une structure tridimensionnelle connue.
- L'autre, le ligand, une petite molécule flexible [3].

Une simulation de Docking comprend essentiellement deux étapes : le Docking proprement dit et le scoring (figure V.1) [4].

- Le Docking (la première étape) est l'étape de sélection, consistant à placer le ligand dans le site actif de la protéine et à échantillonner les conformations, positions et

orientations (poses) possibles, en ne retenant que celles qui représentent les modes d'interactions les plus favorables.

- Le scoring (la deuxième) est l'étape de classement, qui consiste à évaluer l'affinité entre le ligand et la protéine et de donner un score aux poses obtenues lors de la phase de Docking. Ce score permettra de retenir la meilleure pose parmi toutes celles proposées^[4].

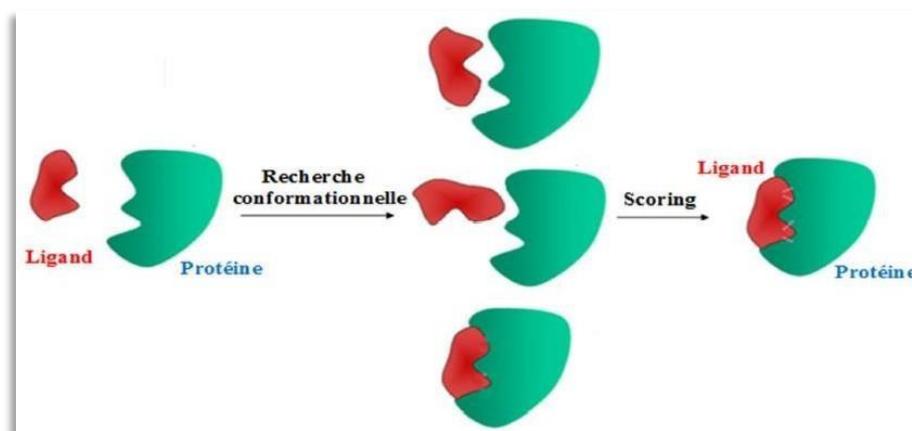


Figure V.1 : Représentation schématique des étapes du Docking moléculaire ^[5].

A présent, un bon nombre de programmes du Docking moléculaire (commerciaux ou non) est disponible. Les plus fréquemment cités sont respectivement Autodock (27%), Gold (15%), FlexX (11%), Dock (6%) ou encore IcmDocking (6%) ^[6].

V.2.1. Programmes de Docking

Les programmes utilisés pour réaliser la partie pratique sont ^[7] :

- « **Chemoffice** » version 2014 : est un logiciel largement utilisé dans le domaine de la chimie pour la conception et la modélisation des molécules (ligands).
- « **AutoDock** » : Un programme d'amarrage d'un ligand à une protéine cible, outil précise rapide. Dans cette étude, l'outil qui a été utilisé est AutoDock Vina.
- « **BIOVIA Discovery Studio Visualizer** » : Une application de modélisation moléculaire gratuite et riche en fonctionnalités pour l'affichage, le partage et l'analyse des données sur les protéines et les petites molécules

V.2.2. Le récepteur

Dans le domaine du Docking moléculaire, le récepteur fait référence à la cible protéique à laquelle une petite molécule, appelée ligand, se lie. Le récepteur peut être une protéine isolée, un fragment de protéine, ou même un complexe protéique impliqué dans une interaction spécifique. Dans cette étude, nous nous intéressons à la caséine en tant que

récepteur, plus précisément à l' α -caséine (figure V.2) qui représente le pourcentage le plus élevé parmi les différents types de caséine (β , κ et γ). La caséine est l'une des principales protéines constituant la majeure partie des composants azotés du lait. La quantité de caséines présentes dans le lait varie en fonction des espèces animales, représentant par exemple 82 % des protéines dans le lait de vache [8].

La première grande voie d'étude et de conception de molécules bioactives par modélisation moléculaire est celle qui se fonde sur la structure des récepteurs. Cette approche est basée sur l'exploitation de la structure moléculaire tridimensionnelle de la protéine cible. L'une des méthodes expérimentales qui permet aujourd'hui de déterminer la structure des protéines est la cristallographie par rayons X, cette technique est responsable de la majorité des structures présentes dans une base de données de structures appelée la Protéine Data Bank (PDB) [9].

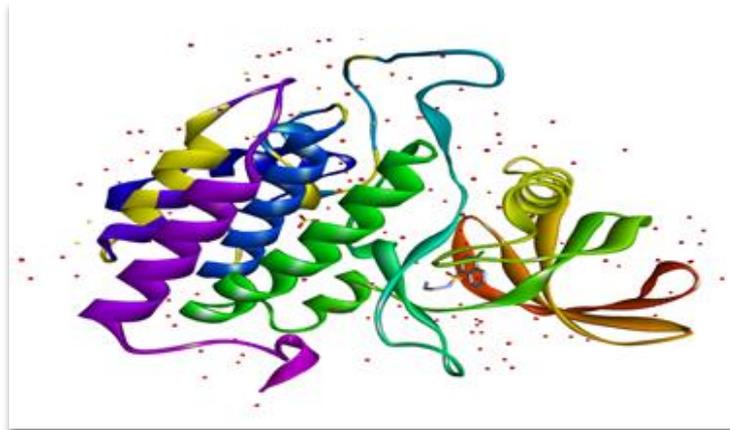


Figure V.2 : La structure de l' α -caséine (pdb ID : 1CSN).

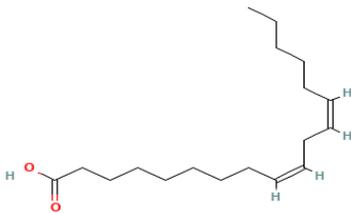
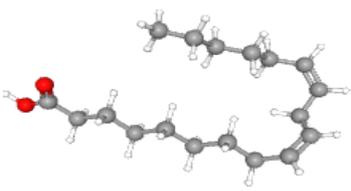
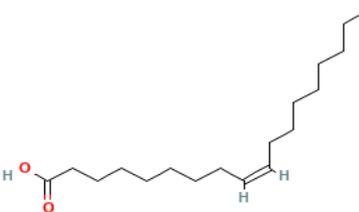
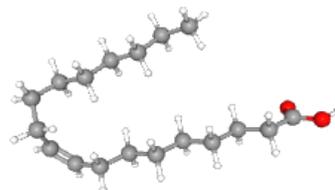
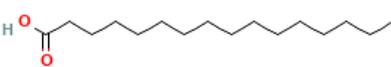
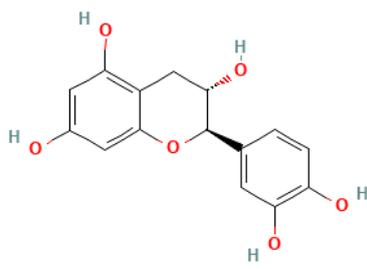
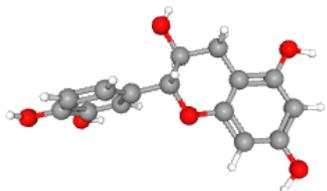
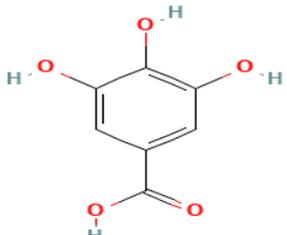
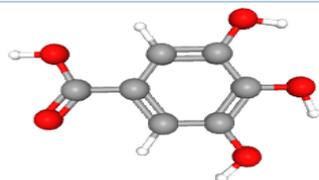
V.2.3. Le ligand

Un ligand est un atome, un ion ou une molécule portant des fonctions chimiques lui permettant de se lier à un ou plusieurs atomes ou ions centraux. Le terme de ligand est le plus souvent utilisé en chimie de coordination et en chimie organométallique (branches de la chimie inorganique). Un ligand se lie de manière réversible à une macromolécule ciblée (protéine), jouant généralement un rôle fonctionnel : stabilisation structurale, catalyse, modulation d'une activité enzymatique, transmission d'un signal.

L'énergie associée aux interactions intermoléculaires formées entre la protéine et son ligand permet d'améliorer ce changement de conformation. Cette modification structurale peut ainsi moduler éventuellement son état fonctionnel et son activité [10].

Dans cette étude, deux types de ligand sont choisis : les acides gras et les polyphénols, le tableau ci-dessous montre les ligands étudiés et leurs structures.

Tableau V.1 : Représentation de la structure des ligands en 2D et 3D [11].

Ligands		Structure 2D	Structure 3D
Acide gras	Linoléique		
	Oléique		
	Palmitique		
Polyphénols	Catéchine		
	Acide gallique		

V.2.4. Grid Box

Afin d'effectuer une recherche conformationnelle du ligand au sein du site actif d'une structure protéique, les codes de Docking moléculaires doivent définir cet espace. C'est ce qu'on appelle le GRID BOX, qui permettant d'augmenter la vitesse d'évaluation de l'énergie d'interaction ligand/récepteur. Le site actif ou la zone à explorer du récepteur est englobée dans une grille tridimensionnelle dont les paramètres sont définis de manière à permettre la libre orientation de chaque composé étudié. Ainsi, chaque ligand est docké dans cet espace délimitant le site de liaison dans l'alpha-caséine. Cette grille, ayant pour centre (-24, 77, 64), présente un volume égal à 25^3 \AA^3 . L'espacement entre chaque point de la grille est de 1 \AA (Figure V.3).

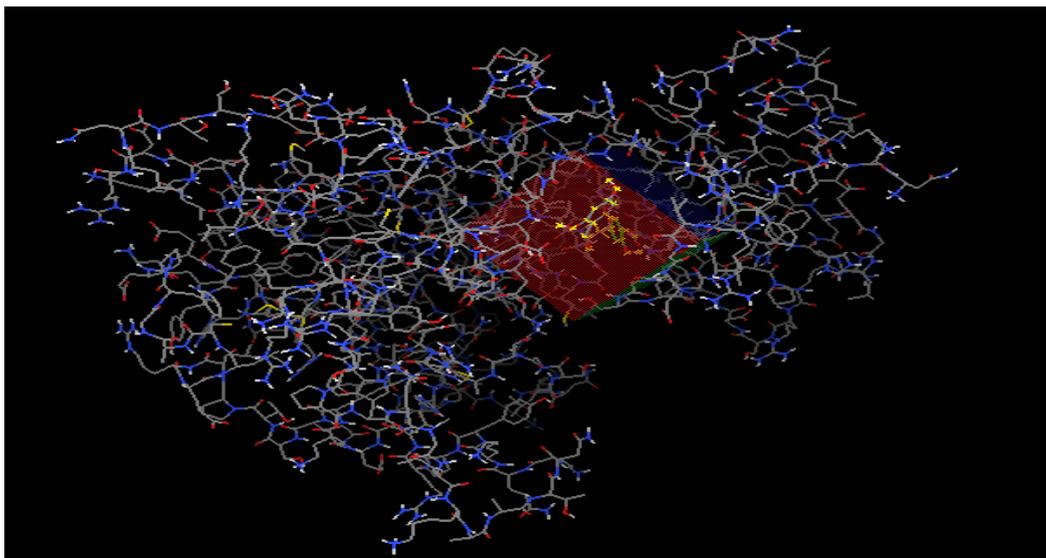
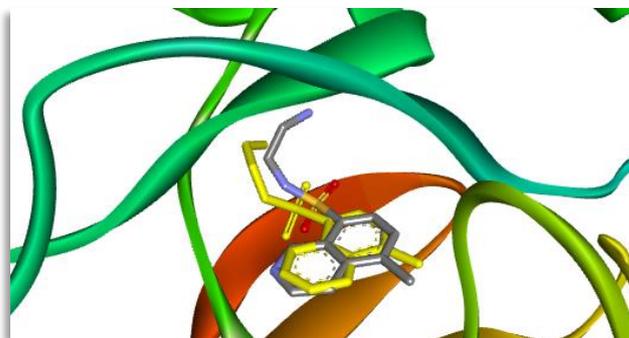


Figure V.3 : Position de GRID BOX dans le site actif de l'alpha-caséine.

V.2.5. Calcul de RMSD

La déviation quadratique moyenne (RMSD) est une mesure de distance qui exprime la différence de conformation et de position entre une pose et une molécule de référence (ref). Elle a été calculée pour comparer les conformations et positions des poses, que ce soit entre elles deux à deux ou par rapport à un ligand expérimental.

Le "re-Docking" a été utilisé pour valider le protocole. Selon [Sen et al. 2020], une pose a été considérée comme reproduisant le mode d'interaction natif si son RMSD était inférieure ou égale à 2Å. Ce seuil correspond à une valeur standard couramment utilisée dans les applications de Docking protéine-ligand. Après l'achèvement de ce processus, la meilleure pose sur sa conformation cristallographique originale a été comparée par superposition, et une nouvelle valeur de RMSD a été calculée (figure V.4). Le RMSD calculé est égal à 1,1417 Å, ce qui est dans les limites acceptables.



Pose 1 : RMSD=1,1417 Å

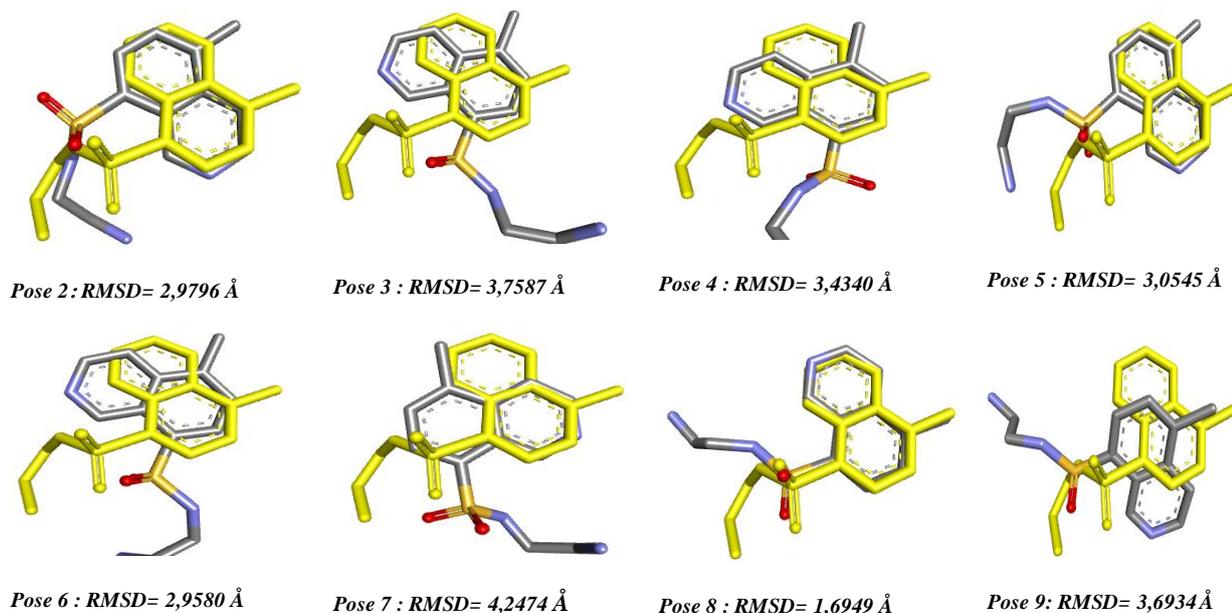


Figure V.4 : Validation de re-Docking couleur jaune X-ray, gris résultat Dock.

V.2.6. Energie de liaison de Docking moléculaire

Les énergies de liaison obtenues à partir du Docking de l'alpha-caséine avec tous les ligands (linoléique, oléique, palmitique, catéchine et gallique) étaient respectivement de : -6,6, -6,3, -5,9, -8,9 et -6,5Kcal/mol (Tableau V.2). Cette énergie a été estimée comme suit [12] :

$$\Delta G_{Binding} = \Delta G_{Complexe} - \Delta G_{Ligand} - \Delta G_{Proteine}$$

L'analyse de Docking a révélé le potentiel d'attraction des ligands étudiés, classés par ordre d'affinité. Catéchine > Linoléique > Gallique > Oléique > Palmitique (l'énergie de liaison la plus faible correspond à l'affinité du ligand la plus élevée).

Tableau V.2 : Energie de liaison, $\Delta G_{binding}$ (kcal/mol), prédites par AutoDock Vina des composés étudiés.

Molécules	$\Delta G_{binding}$ (kcal/mol)
Acide linoléique	-6,6
Acide oléique	-6,3
Acide palmitique	-5,9
Catéchine	-8,9
Acide gallique	-6,5

Dans le cas général, les interactions établies entre le ligand et le récepteur (protéine) sont faibles, telles que les liaisons de Van der Waals, les interactions électrostatiques et les liaisons hydrogène. Afin de comprendre le type d'interaction entre ces cinq ligands et l'alpha-caséine, nous avons analysé les interactions obtenues.

V.2.7. Interactions protéine/ligand

Dans le domaine de Docking moléculaire, le plus intéressant est la connaissance des différentes interactions mises en jeu entre les deux entités chimiques et le meilleur positionnement pour chaque composé dans le site actif (les acides aminés). Les figures ci-dessous schématisent les différentes interactions obtenues lors de la simulation.

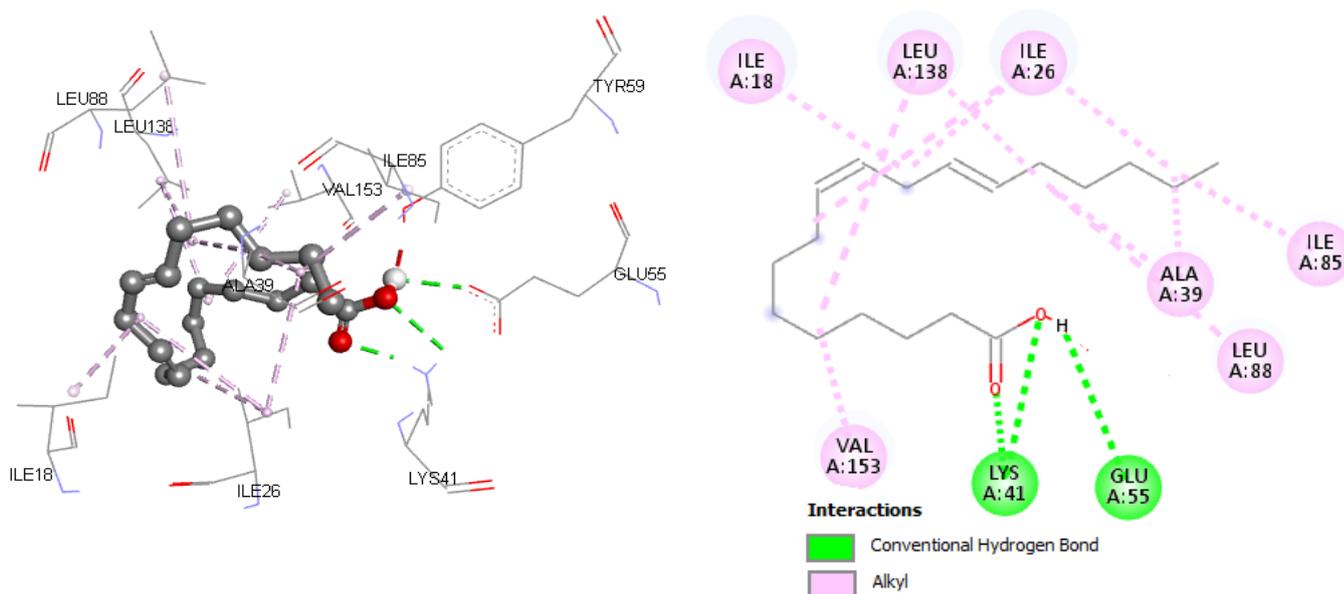


Figure V.5: Les interactions entre les sites actifs de la caséine et linoléique.

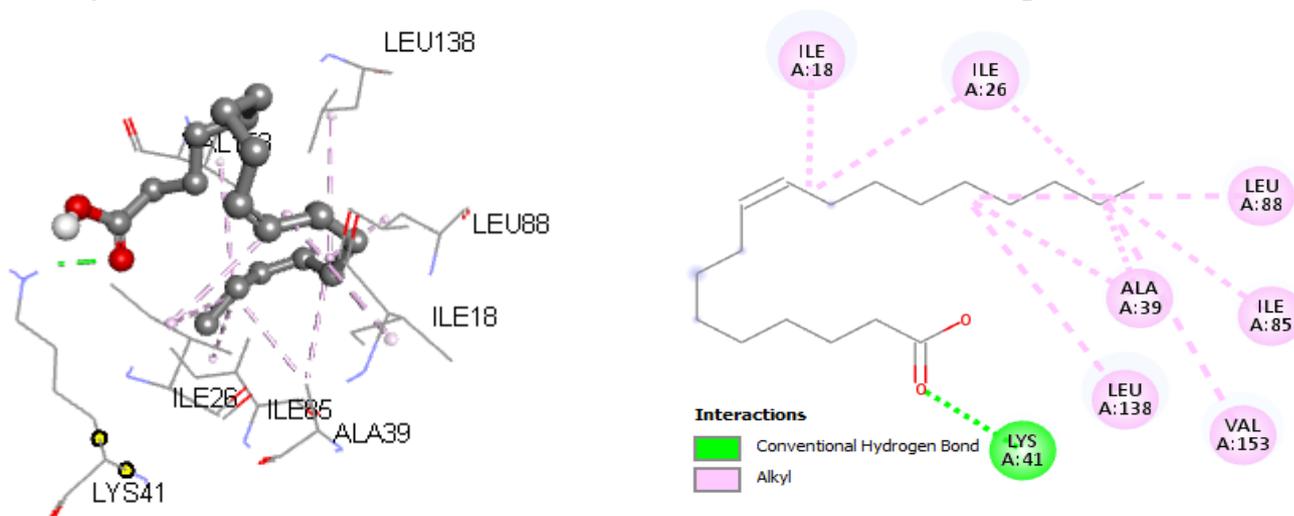


Figure V.6 : Les interactions entre les sites actifs de l'alpha-caséine et oléique.

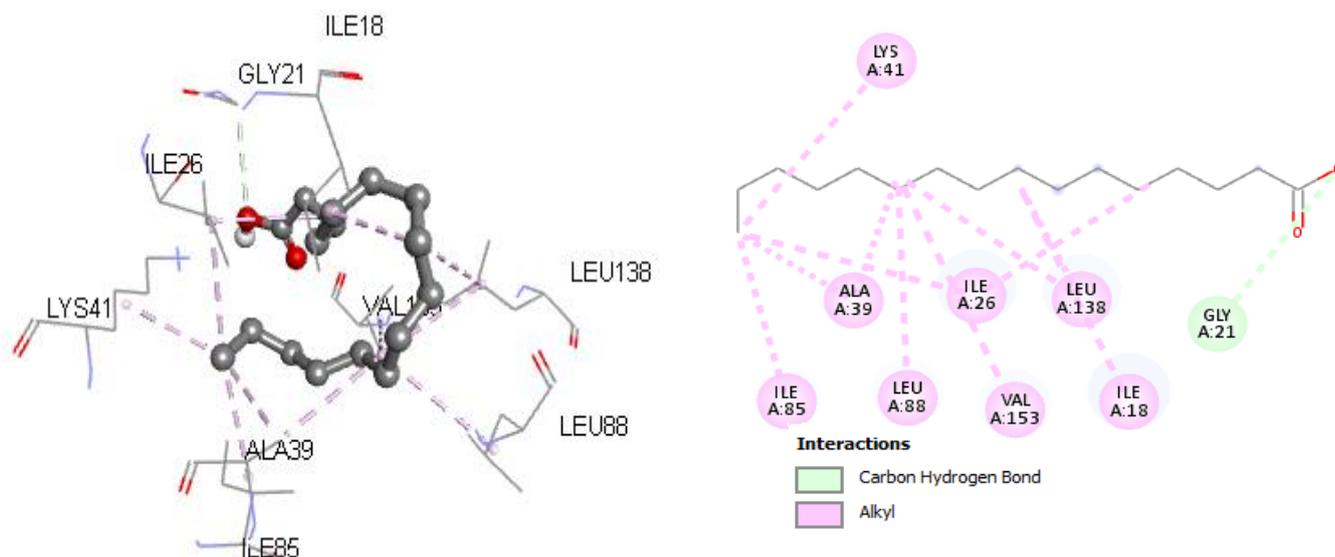


Figure V.7: Les interactions entre les sites actifs de la caséine et palmitique.

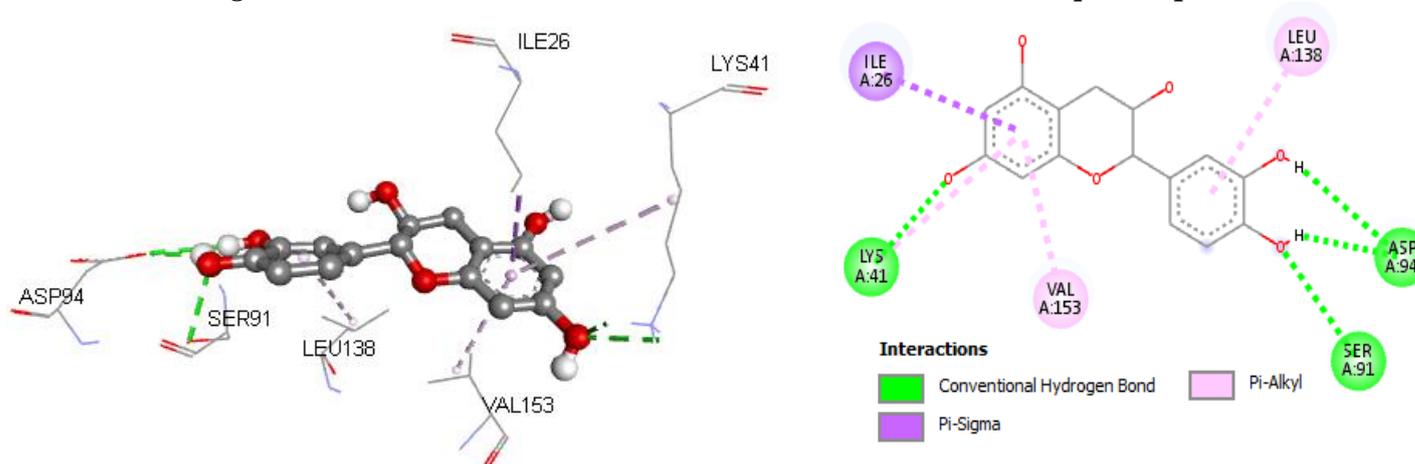


Figure V.8: Les interactions entre les sites actifs de la caséine et catéchine.

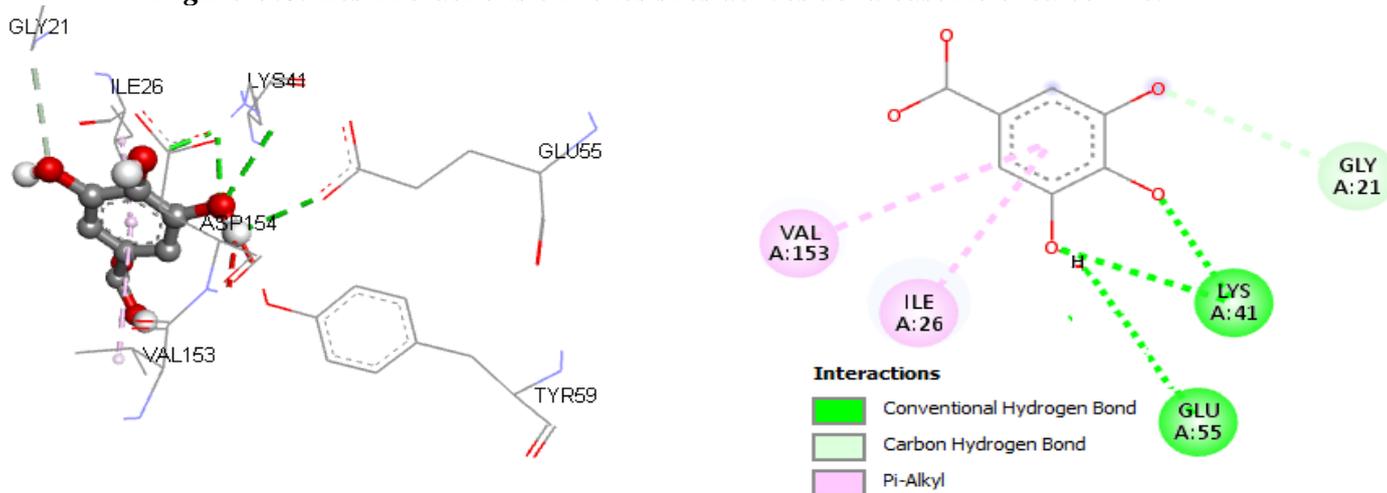


Figure V.9: Les interactions entre les sites actifs de la caséine et gallique.

Nous résumons dans le tableau V.3 les interactions les plus significatives en termes de liaisons hydrogène et d'interactions hydrophobes entre les composés étudiés et l'alpha-caséine.

Tableau V.3: Les interactions hydrophobiques et hydrogènes du alpha-caséine avec les ligands.

Interactions hydrophobiques				
Ligands	Acides aminés	Distance	Acides aminés	Distance
Linoléique	Ala39	4,02938	Ala39	3,66071
	Val153	4,80878	Ile18	4,12208
	Ile26	5,03624	Ile26	4,41273
	Leu88	5,28585	Leu138	5,15267
	Ile26	4,5513	Ile85	4,12772
	Leu138	4,69881	/	/
Oléique	Ile18	4,62777	Leu88	4,76302
	Ile26	4,38255	Leu138	4,93017
	Ala39	4,16447	Ile26	4,75786
	Ala39	3,68716	Ile85	4,32036
	Val153	5,19437	/	/
Palmitique	Ile26	4,08215	Ile18	4,96679
	Ala39	4,0524	Leu138	4,54829
	Ala39	3,9618	Leu88	4,70093
	Val153	5,41442	Leu138	4,97082
	Ile26	4,08514	Lys41	3,87494
	Ile85	4,02488	/	/
Catéchine	Ile26	3,94568	Lys41	5,38004
	Val153	4,48548	Leu138	5,31139
Gallique	Val153	4,42954	Ile26	4,22935
Interactions hydrogens				
Ligands	Acides aminés	Distance	Acides amines	Distance
Linoléique	Lys41	2,84227	Lys41	2,03914
	Glu55	2,35268	/	/
Oléique	Lys41	2,17436	/	/
Palmitique	Gly21	3,75964	/	/
Catéchine	Lys41	2,7578	Lys41	2,15518
	Ser91	2,74292	Asp94	2,13856
	Asp94	2,61492	/	/
Gallique	Lys41	2,79343	Lys41	2,19824
	Glu55	2,4652	Gly21	3,52416

L'analyse des résultats montre que :

- Le meilleur complexe est celui de l'alpha-caséine/catéchine, avec une énergie de liaison de -8,9 kcal/mol. Ce complexe est donc le plus stable grâce à quatre liaisons hydrophobes avec les résidus suivants : Ile26 de type Pi-sigma, Lys41, Val153 et

Leu138 de type Pi-alkyl. Et cinq liaisons hydrogène avec les résidus Lys41, Ser91 et Asp94.

- Tous les ligands étudiés interagissent avec le site actif Lysine (Lys41) de l'alpha-caséine (ce résultat est démontré expérimentalement par Hanks et al [13]).
- Le ligand le plus actif parmi les trois acides gras est l'acide linoléique, avec une énergie de liaison $\Delta G = -6,6\text{kcal/mol}$.
- Les mêmes acides aminés de l'alpha-caséine forment des interactions de type liaisons hydrophobe avec les acides gras, qui sont : Ile26, Ala39, Val153, Ile85, Leu88, Leu138 et Ile18.

La figure ci-dessous représente le nuage de rôle accepteur-donneur entre les sites actifs de l'alpha-caséine et un ligand parmi les composés étudiés, qui est la catéchine.

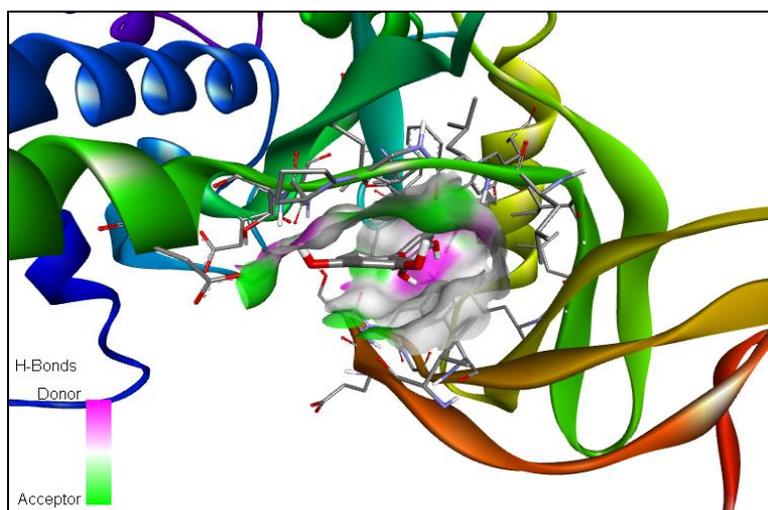


Figure V.10 : Liaisons hydrogène donneur-accepteur.

Le schéma des liaisons hydrogène donneur-accepteur représente la localisation des atomes donneurs et accepteurs d'hydrogène dans la catéchine et l'alpha-caséine. Un atome donneur d'hydrogène possède un hydrogène lié à un atome d'oxygène, tandis qu'un atome accepteur d'hydrogène est un atome d'oxygène, d'azote qui possède une paire libre d'électrons. Lorsque le ligand s'approche du site actif de la protéine, des liaisons hydrogène peuvent se former entre les atomes donneurs et accepteurs correspondants, permettant ainsi une reconnaissance moléculaire spécifique. Ces interactions H-bond stabilisent le complexe ligand-protéine et contribuent à la force de liaison entre les deux.

Références

- [1] **Chevrollier N**, « Développement et application d'une approche de Docking par fragments pour modéliser les interactions entre protéines et ARN simple-brin », Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay, 2019.
- [2] **Kévin C**, « Docking Inverse et Deep : Learning affinement de méthodologies in silico pour le développement de stratégies thérapeutiques innovantes appliquées à la matrice extracellulaire », Thèse en Info – Informatique, 2020.
- [3] **Haridi A, Naili R**, « Etude in silico de l'inhibition de la cyclooxygénase -2 », Mémoire Master, 2019.
- [4] **Bendib S**, « Docking moléculaire : Quercétine – SARS-CoV2 », Mémoire Master, 2021.
- [5] **Boudjizza M**, « Etude comparative de l'efficacité de deux programmes de Docking et application à l'inhibition de la MAOB », Mémoire Master, 2019.
- [6] **Bouchagra S**, « modélisation des intractionsproteine-petites molécules : étude de la relation structure-fonction dans le cas lipases », Thèse de doctorat, 2018.
- [7] **Kerboua L.A**, « Docking moléculaire in silico et propriétés ADMET de certains composants d'huile de graines de Lepidum Sativum contre L'Acétylcholinestérase pour le traitement de la maladie d'Alzheimer », Mémoire Master, 2021.
- [8] **Site web**: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Cas%C3%A9ine>. Consulté le : 01/05/2023.
- [9] **Krid A**, « Modélisation de nouvelles molécules biologiques actives liées au stress Oxydant », Thèse de magister d'université : chimie théorique. Constantine : Université Mentouri de Constantine. Algérie, 2008.
- [10] **Leacha.R**, « Molecular modelling: Principles and application », Pearson education canada. 582. Pages : 10-6, 2001.
- [11] **Site web** : <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>. Consulté le 12/05/2023.
- [12] **Bencheikh B**, « In Silico Study of Selected Natural Products as SARS-CoV-2 M Pro Binder: Molecular Docking and Molecular Dynamics Simulation » journal of Polycyclic Aromatic Compounds, 2022.
- [13] **Hanks S.K, Quinn A.M and Hunter T**, « The protein kinase family: conserved features and deduced phylogeny of the catalytic » domains Science, 241, 42-52. 1988.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Au cours de cette étude, nous avons abordé deux axes cruciaux. Dans le premier, nous avons cherché à approfondir notre compréhension des caractéristiques physico-chimiques et rhéologiques de certains produits laitiers (le lait, la crème fraîche, le fromage fondu et le fromage à pâte molle de type Camembert). Dans cette partie, nous avons effectué des analyses expérimentales afin de suivre les différentes étapes de production de ces produits et d'évaluer leur qualité et leur conformité aux normes requises. Dans le second axe, nous avons utilisé une approche *in silico*, en réalisant des études de Docking moléculaire, pour étudier l'affinité de complexe alpha-caséine/ligand d'après la détermination de l'énergie de liaison ainsi que les différentes interactions entre les deux composants.

Les résultats des analyses physico-chimiques réalisées au laboratoire de l'industrie Numidia mettent en évidence la conformité des caractéristiques physico-chimiques des produits laitiers étudiés. Tous les paramètres, tels que la densité, l'acidité, la teneur en matière grasse, la température, le pH, l'extrait sec dégraissé, l'extrait sec total et l'humidité, respectent les normes exigées.

Les tests rhéologiques effectués ont permis de caractériser le comportement rhéologique des trois produits laitiers étudiés (crème fraîche, fromage fondu et Camembert). Les résultats de ces analyses nous ont conduits à formuler les conclusions suivantes :

- La viscosité des trois produits laitiers diminue à mesure que le taux de cisaillement augmente.
- La crème fraîche se caractérise par une dissipation d'énergie plus importante que sa capacité de stockage lorsqu'elle est soumise à une contrainte.
- Les modules G' et G'' du fromage sont quasiment superposés, ce qui suggère une réponse viscoélastique équilibrée entre la composante élastique (G') et la composante visqueuse (G'') à faible fréquence.
- Le Camembert est résisté aux contraintes de cisaillement sans se déformer, il a une réponse viscoélastique dominée par la partie élastique.

Dans la phase de modélisation, nous avons d'abord calculé la déviation quadratique moyenne afin de valider le protocole de l'Autodock Vina. Les résultats des calculs ont révélé un RMSD parfaitement conforme aux normes établies, avec une valeur inférieure à 2 Å. Les résultats du Docking moléculaire démontrent que la meilleure affinité est observée entre l'alpha-caséine et la catéchine, avec une énergie d'interaction de -8,9 kcal/mol. Les acides

aminés de l'alpha-caséine établissent des interactions hydrophobes et hydrogènes avec les ligands, ce qui assure la stabilité du complexe protéine/ligand. L'étude de l'interaction entre l'alpha-caséine et les ligands choisis dans les produits laitiers est essentielle pour garantir la stabilité, la texture, les propriétés sensorielles et la valeur nutritionnelle des produits finis.

Annexe

1. Les interactions Protéine- ligand (complexe protéine-ligand)

La reconnaissance moléculaire est un critère essentiel impliquant une complémentarité spatiale entre le ligand et son récepteur. Cette complémentarité est importante car elle permet de laisser entrer le ligand mais elle ne suffit pas pour qu'il reste au sein de la protéine. Dans ce contexte, une complémentarité chimique Protéine-ligand est indispensable faisant intervenir le plus souvent des interactions non covalentes telles que : la liaison hydrogène, ionique, hydrophobes...etc.

Les liaisons non covalentes sont des liaisons qui se produisent sur de plus grandes distances que les liaisons covalentes. Bien que ce type d'interactions soit énergétiquement beaucoup plus faible par rapport à une liaison covalente (C-C ou C-N par exemple), leur portée est bien plus grande car assurant l'évolution des biomolécules, et notamment les changements conformationnels. En effet, les liaisons non covalentes peuvent être créées et rompues plus facilement.

1.1 Les liaisons hydrogènes

Cette liaison intervient lorsqu'un atome d'hydrogène lié à un atome électronégatif (le donneur) est attiré par un autre atome électronégatif (l'accepteur). Elle agit à très courte distance (0,8 à 2,8 Å). Les liaisons hydrogènes sont peu nombreuses et s'adaptent très bien à la flexibilité.

1.2 Les interactions de Van Der Walls

Elles résultent de l'interaction des nuages électroniques de deux atomes adjacents conduisant à la Présence d'une force attractive pour des distances de 3-4 Å. Les interactions de Van Der Walls sont généralement faibles. Leur importance provient du nombre cumulé de liaisons créées.

1.3 Les interactions hydrophobes

Les molécules dépourvues de groupes chargés ou d'atomes capables de former des liaisons hydrogène ne peuvent donc pas s'hydrater, pour cette raison, on les nomme substances hydrophobes. L'effet hydrophobe est la tendance qu'ont ces groupes à se rassembler par coalescence.

2. Les programmes et logiciels

2.1 Autodock tools

Est une interface graphique permettant de configurer et d'exécuter AutoDock - un logiciel d'accueil automatisé conçu pour prédire comment des petites molécules, telles que des substrats ou des candidats médicaments, se lient à un récepteur de structure 3D connue.

<http://mgltools.scripps.edu/>.

2.2 Autodock vina

AutoDock Vina est un programme open source pour faire de l'amarrage moléculaire. Pour son entrée et sa sortie, Vina utilise le même format de fichier de structure moléculaire PDBQT utilisé par AutoDock, les fichiers PDBQT peuvent être générés et visualisés à l'aide de MGLTools.

<http://vina.scripps.edu/download.html>.

2.3 PDB :(protein-data-bank)

La Protéin Data Bank (PDB) est l'unique archive mondiale de données structurales de macromolécules biologiques. Il comprend des données obtenues par cristallographie aux rayons X et spectrométrie de résonance magnétique nucléaire (RMN) soumises par des biologistes et des biochimistes du monde entier. Actuellement, PDB est sous la tutelle de la WorldwideProtein Data Bank (wwPDB), un réseau de quatre organisations – Research Collaboratory for Structural Bioinformatics (RCSB) PDB. <https://www.rcsb.org/>.

2.4 PubChem

PubChem est la plus grande collection au monde d'informations chimiques librement accessibles. Recherchez des produits chimiques par nom, formule moléculaire, structure et autres identifiants. Trouvez des propriétés chimiques et physiques, des activités biologiques, des informations sur la sécurité et la toxicité, des brevets, des citations de la littérature et plus encore. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>

3. Liste des acides aminés étudiés

Symbole	Nom	Structure chimique
Ala	Alanine	$C_3H_7NO_2$
Asp	Aspartique	$C_4H_7NO_4$
Glu	Glutamique	$C_5H_9NO_4$
Gly	Glycine	$C_2H_5NO_2$
Ile	Isoleucine	$C_6H_{13}NO_2$
Leu	Leucine	$C_6H_{13}NO_2$
Lys	Lysine	$C_6H_{14}N_2O_2$
Ser	Serine	$C_3H_7NO_3$
Val	Valine	$C_5H_{11}NO_2$

4. Energie de liaison

L'énergie de liaison est une mesure de la stabilité de l'interaction entre le ligand et la cible. Elle est généralement calculée à partir des forces de van der Waals, des interactions électrostatiques et des énergies de solvation impliquées dans la formation du complexe moléculaire.