

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Université Ibn Khaldoun –Tiaret–**

**Faculté Sciences de la Nature et de la Vie**

**Département de Biologie**



## **THESE**

En vue de l'obtention du diplôme DOCTORAT 3ème cycle LMD

**Domaine:** Sciences de la Nature et de la Vie

**Filière:** Sciences Biologiques

**Spécialité:** Biotechnologie Alimentaire

**Présentée par :**

**Hanae RAIS**

Soutenue publiquement le .....

### *Thème*

**Caractérisation et valorisation des lactosérums bruts et  
traités dans les mousses alimentaires**

**Devant le Jury composé de :**

<b>Président :</b>	Redouane MILOUA	Professeur	Université de Tiaret
<b>Directeur de thèse :</b>	Kamel ACEM	Professeur	Université de Tiaret
<b>Examineur :</b>	Mohamed ZIANE	Professeur	Université d'Ain Témouchent
<b>Examineur :</b>	Abdelkader CHOUAIH	Professeur	Université de Mostaganem
<b>Examineur :</b>	Mohamed Abdelhak ABBES	Maître de conférences A	Université de Tiaret
<b>Examinatrice :</b>	Khaldia ZAZOU LAARADJ	Maître de conférences A	Université de Tiaret

**Année universitaire 2025-2026**

## Remerciements

Mes remerciements sont d'abord destinés à "Dieu", le tout puissant de m'avoir donné la force, le courage et la patience de faire ce travail et de continuer pour voir le fruit de ma longue période de recherche.

Tout d'abord, je tiens à remercier ceux grâce à qui notre formation de troisième cycle a pu exister ; je remercie particulièrement Pr. Koula DOUKANI, enseignante chercheuse à l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret et directrice d'option de notre doctorat qui n'a jamais hésité à m'aider, à me conseiller et à m'orienter.

Je remercie particulièrement Pr. Redouane MILOUA, professeur et enseignant chercheur à l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret pour avoir honoré de sa présence à ce jury en acceptant de le présider.

J'exprime ma gratitude et reconnaissance au Pr. Kamel ACEM qui a accepté de m'encadrer, d'avoir dirigé durant mon cursus académique et à la réalisation de ma thèse, et de n'avoir jamais décliné les démarches entreprises pour l'avancement de mes recherches. Je lui dois une immense reconnaissance et un très grand respect.

Je voudrais également adresser ma profonde reconnaissance aux membres de jury pour avoir accepté de consacrer leurs temps pour examiner ce modeste travail à savoir : Pr.Mohamed ZIANE ; Pr. Abdelkader CHOUAÏH, Dr.Mohamed Abdelhak ABBES et Dr.Khaldia ZAZOU LAARADJ d'avoir accepté de lire et de se déplacer afin d'enrichir, et d'améliorer via leurs commentaires la qualité du présent manuscrit.

J'exprime mes plus vifs remerciements, et ma reconnaissance aux personnels des laboratoires de recherche : « Biodiversité, Santé et Valorisation des Ressources Biologiques » et particulièrement à son directeur Pr. Kamel ACEM et mes vifs remerciements au Pr.Hebib AGGAD chargé de la direction du laboratoire de recherche «Hygiène et Pathologie Animale » et ainsi aux personnels des laboratoires pédagogiques (Laboratoire des Sciences Alimentaires et de Microbiologie) de la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie à l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret.

Ma reconnaissance et mes remerciements vont également à l'encontre de toute personne qui a participé de près ou de loin, à la réalisation de ce modeste travail.

## **Dédicaces**

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mon cher père et ma chère mère, pour leur amour, leur soutien et  
leur sacrifice;*

*Mon cher époux pour son soutien sans faille, sa compréhension,  
son encouragement et sa contribution à la réalisation de ce  
travail ;*

*L'ensemble des personnes qui, de près ou de loin, ont permis  
l'avancée et l'aboutissement de ce travail ;*

*À tous ceux qui me sont chers.*

## Table des Matières

Remerciements.....	I
Dédicaces.....	II
Table des Matières .....	III
Liste des abréviations .....	VIII
Liste des tableaux.....	IX
Liste des figures .....	X
Introduction .....	1

### Chapitre I

#### Synthèse Bibliographique

1. Le lactosérum.....	6
1.1. Définition .....	6
1.2. Types de lactosérum .....	6
1.2.1. Lactosérum acide.....	6
1.2.2. Lactosérum doux.....	7
1.3. Composition .....	7
1.3.1. Protéines .....	8
1.3.1.2. Classification.....	11
1.3.1.2.1. Protéines majeures .....	11
1.3.1.2.1.1. $\beta$ -lactoglobuline .....	11
1.3.1.2.1.2. $\alpha$ -lactalbumine( $\alpha$ -LA).....	14
1.3.1.2.2. Protéines mineures .....	15
1.3.1.2.2.1. Immunoglobulines.....	15
1.3.1.2.2.2. Sérum albumine bovin.....	15
1.3.1.2.2.3. Glycomacropéptide .....	16
1.3.1.2.2.4. Protéoses-peptones.....	16
1.4. Propriétés techno-fonctionnelles des protéines .....	16
1.4.1. Propriétés moussantes .....	17
1.4.2. Solubilité.....	17
1.4.3. Propriétés émulsifiantes.....	18
1.5. Mécanismes et effets de modification des protéines .....	19
1.5.1. pH.....	20

1.5.2.Matière sèche .....	21
1.5.3.Chlorure de sodium .....	21
1.5.4.Traitement mécanique .....	22
1.5.5.Traitement thermique .....	22
1.5.6. Ultrasons .....	24
1.6. Lactose .....	26
1.7.Minéraux .....	26
1.8. Valorisation et utilisation du lactosérum .....	27
1.9.Marché du lactosérum.....	28
1.10.Pouvoir polluant du lactosérum.....	31
1.11. Procédés et produits de traitement du lactosérum .....	32
1.12.Modes d'utilisation .....	35
2. La mousse alimentaire .....	38
2.1. Généralités.....	38
2.2. Définition et classification .....	38
2.3.Structure et mécanismes de formation.....	40
2.4. Stabilité et déstabilisation d'une mousse alimentaire .....	43
2.4.1. Taille des bulles et le procédé de foisonnement utilisé .....	43
2.4.2. pH.....	43
2.4.3. Concentration et l'activité de surface des protéines.....	43
2.4.4.Viscosité .....	44
2.5.Déstabilisation de la mousse alimentaire .....	44

## **Chapitre II**

### **Matériel et Méthodes**

1. Matériel.....	46
1.1. Lactosérums bruts .....	46
1.2. Lactosérums bruts traités.....	46
1.3. Sucres de table .....	46
1.4. Sel de table .....	46
1.5. Blanc d'œuf cru .....	46
1.6. Présure.....	46
1.7. Matériel du laboratoire.....	47
2.Méthodes d'analyses .....	47

2.1. Protocole expérimental .....	47
2.2. Méthodes préparatives .....	49
2.2. 1.Lactosérum acide brut .....	49
2.2. 2.Lactosérum doux brut .....	49
2.2.3. Lactosérums bruts traités par chauffage conventionnel .....	49
2.2.4. Lactosérums bruts traités par ultrasons .....	49
2.2.5. Lactosérums bruts traités par thermosonication.....	50
2.3.Caractérisation des lactosérums bruts et traités .....	50
2.3.1.Caractérisation physique.....	50
2.3.1.1.Densité .....	50
2.3.1.2.Indice de réfraction et degré Brix .....	51
2.3.1.3.Cendres .....	51
2.3.1.4.Viscosité.....	52
2.3.1.5.pH .....	53
2.3.1.6.Conductivité électrique .....	53
2.3.2.Caractérisation chimique .....	54
2.3.2.1.Acidité titrable .....	54
2.3.2.2.Dosage des protéines .....	54
2.3.2.3.Dosage du lactose .....	55
2.3.3.Caractérisation des propriétés moussantes .....	56
2.3.3.1.Capacité moussante .....	56
2.3.3.2. Diamètre moyen des bulles d'air .....	57
2.4. Application dans le domaine pâtissier .....	58
2.4.1. Optimisation des ingrédients de la meringue .....	58
2.4.2.Formulation et production des meringues .....	58
2.4.2.1. Caractérisation microbiologique .....	59
2.4.2.3. Caractérisation sensorielle .....	62

### **Chapitre III**

#### **Résultats et Discussion**

1. Caractérisation physicochimique .....	66
1.1. Lactosérums bruts et traités par chauffage conventionnel .....	66
1.2. Lactosérums bruts et traités par ultrasons .....	68
1.3. Lactosérums bruts et traités par thermosonication .....	70

2. Caractérisation fonctionnelle .....	74
2.1. Lactosérums bruts et traités par chauffage conventionnel .....	74
2.1.1. Capacité moussante .....	74
2.1.2. Diamètre des bulles d'air .....	78
2.2. Lactosérums bruts et traités par ultrasons .....	83
2.2.1. Capacité moussante .....	83
2.2.2. Diamètre des bulles d'air.....	87
2.3. Lactosérums bruts et traités par thermosonication .....	92
2.3.1. Capacité moussante .....	92
2.3.2. Diamètre des bulles d'air .....	95
3. Optimisation de la meringue.....	108
3.1. Effet du blanc d'œuf .....	108
3.1.1. Capacité moussante .....	108
3.1.2. Diamètre des bulles d'air .....	112
3.2. Effet du sucre de table.....	116
3.2.1. Effet du sucre blanc .....	116
3.2.1.1. Capacité moussante .....	116
3.2.1.2. Diamètre des bulles d'air .....	120
3.2.2. Effet du sucre roux .....	124
3.2.2.1. Capacité moussante .....	124
3.2.2.2. Diamètre des bulles d'air .....	128
3.3. Effet du sel de table .....	132
3.3.1. Capacité moussante .....	132
3.3.2. Diamètre des bulles d'air .....	136
3.4. Effet du sucre et sel de table.....	140
3.4.1. Effet du sucre blanc et du sel de table .....	140
3.4.1.1. Capacité moussante .....	140
3.4.1.2. Diamètre des bulles d'air .....	144
3.4.2. Effet du sucre roux et du sel de table .....	148
3.4.2.1. Capacité moussante .....	148
3.4.2.2. Diamètre des bulles d'air .....	152
4. Caractérisation de la meringue.....	165
4.1. Caractérisation microbiologique.....	165

4.2. Caractérisation sensorielle.....	166
Conclusion.....	172
Références bibliographiques.....	178
Annexes	
Résumés	



## Liste des abréviations

CM : Capacité moussante

DS : Durée de stabilité

LSAB : Lactosérum acide brut

LSDB : Lactosérum doux brut

LSABBOC5% : Le mixte du lactosérum acide brut et du blanc d'œuf cru à 5%

LSABBOC100% : Le mixte du lactosérum acide brut et du blanc d'œuf cru à 100%

LSDBBOC5% : Le mixte du lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru à 5%

LSDBBOC100% : Le mixte du lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru à 100%

LSABBOC100%+200%SB ou SR+0,5%ST : Le mixte du lactosérum acide brut et du blanc d'œuf cru à 100% avec du sucre blanc ou du sucre roux (200%) et du sel de table (0,5%)

LSABBOC100%+200%SB ou SR +1%ST : Le mixte du lactosérum acide brut et du blanc d'œuf cru à 100% avec du sucre blanc ou du sucre roux (200%) et du sel de table (1%)

LSABBOC100%+5%SB ou SR +0,5%ST : Le mixte du lactosérum acide brut et du blanc d'œuf cru à 100% avec du sucre blanc ou du sucre roux (5%) et du sel de table (0,5%)

LSABBOC100%+5%SB ou SR +1%ST : Le mixte du lactosérum acide brut et du blanc d'œuf cru à 100% avec du sucre blanc ou du sucre roux (5%) et du sel de table (1%)

LSDBBOC100%+200%SB ou SR +0,5%ST : Le mixte du lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru à 100% avec du sucre blanc ou du sucre roux (200%) et du sel de table (0,5%)

LSDBBOC100%+200%SB ou SR +1%ST : Le mixte du lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru à 100% avec du sucre blanc ou du sucre roux (200%) et du sel de table (1%)

LSDBBOC100%+5%SB ou SR +0,5%ST : Le mixte du lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru à 100% avec du sucre blanc ou du sucre roux (5%) et du sel de table (0,5%)

LSDBBOC100%+5%SB ou SR +1%ST : Le mixte du lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru à 100% avec du sucre blanc ou du sucre roux (5%) et du sel de table (1%)

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1</b> : Composition moyenne du lactosérum doux et acide .....	7
<b>Tableau2</b> : Récapitulatif des différentes structures protéiques.....	8
<b>Tableau 3</b> : Acides aminés essentiels (g/100g) .....	10
<b>Tableau 4</b> : Teneur en composés protéiques du lactosérum.....	11
<b>Tableau 5</b> : Applications des protéines de lactosérum.....	37
<b>Tableau6</b> : Composition centésimale des ingrédients de la meringue en terme de formule optimisée.....	58
<b>Tableau 7</b> : Caractéristiques physicochimiques moyennes des lactosérums bruts et traités par chauffage au bain marie à 40 et 60°C pendant 5 et 25min.....	66
<b>Tableau8</b> : Caractéristiques physicochimiques moyennes des lactosérums bruts et traités par ultrasons à 40kHz pendant 5 et 15min. ....	68
<b>Tableau9</b> : Caractéristiques physicochimiques moyennes des lactosérums bruts et traités par thermosonication.....	70
<b>Tableau10</b> : Aspects microscopiques des mousses des lactosérums bruts et traités par chauffage au bain marie à 40 et 60 °C pendant 5 et 25 min (G :x100).....	82
<b>Tableau 11</b> : Aspects microscopiques des mousses des lactosérums bruts et traités par ultrasons pendant 5 et 15 min (G :x100).....	91
<b>Tableau 12</b> : Aspects microscopiques des mousses des lactosérums bruts et traités par thermosonication (G :x100).....	98
<b>Tableau 13</b> : Aspects microscopiques des mousses (G :x100) des lactosérums bruts dans un système individuel et mixte (cas du blanc d’œuf, sucre blanc, sucre roux et du sel de table). .....	156
<b>Tableau 14:</b> Qualité microbiologique des meringues produites dans leur état frais.....	165
<b>Tableau 15</b> : Caractéristiques sensorielles des nouveaux produits pâtisseries (meringues) à base du mixte (lactosérum doux brut et blanc d’œuf cru), sucres de table (blanc et roux) et sel de table (NaCl).....	166

## Liste des figures

<b>Figure1</b> : Structure tridimensionnelle de la $\beta$ -Lg selon.....	12
<b>Figure 2</b> : Les différentes formes de la $\beta$ -lactoglobuline .....	13
<b>Figure3</b> : Etats polymériques de la $\beta$ -Lg en fonction du pH.....	14
<b>Figure4</b> : Méthodes de modification des protéines .....	20
<b>Figure 5</b> : Evolution des exportations mondiales de lactosérum .....	28
<b>Figure6</b> : Evolution des principaux importateurs mondiaux de lactosérum.....	29
<b>Figure7</b> : Production mondiale des ingrédients de lactosérum.....	30
<b>Figure8</b> : Les différents pays exportateurs et importateurs dans le monde .....	31
<b>Figure9</b> : Les différents procédés utilisés dans le traitement du lactosérum et les produits finis obtenus.....	33
<b>Figure10</b> : Utilisation commerciale de lactosérum de lait.....	36
<b>Figure11</b> : Panorama des différentes mousses alimentaires .....	39
<b>Figure 12</b> : Représentation schématique des mécanismes intervenant lors de la formation et de la stabilisation d'une mousse par des protéines sériques.....	41
<b>Figure13</b> :Morphologie des bulles de gaz dans une mousse .....	42
<b>Figure14</b> : Représenttion de la structure d'une mousse à différentes échelles .....	42
<b>Figure 15</b> : Le protocole expérimental de l'étude.....	48
<b>Figure 16</b> : Schéma de préparation de série de dilutions .....	60
<b>Figure 17</b> : Schéma montrant les étapes d'isolement de Salmonella.....	62
<b>Figure 18</b> : Moussabilité (a) à t=0min et stabilité de la mousse (b) du lactosérum acide brut et traité par chauffage au bain marie à 40 et 60°C pendant 5 et 25min au cours du temps. ...	76
<b>Figure 19</b> : Moussabilité (a) à t=0min et stabilité de la mousse (b) du lactosérum doux brut et traité par chauffage au bain marie à 40 et 60°C pendant 5 et 25min au cours du temps. ...	77
<b>Figure 20</b> : Diamètre des bulles d'air (a) à t=0min et sa cinétique (b) du lactosérum acide brut et traité par chauffage au bain marie à 40 et 60°C pendant 5 et 25min au cours du temps. ....	80

<b>Figure 21</b> : Diamètre des bulles d'air (a) à t=0min et sa cinétique (b) du lactosérum doux brut et traité par chauffage au bain marie à 40 et 60°C pendant 5 et 25min au cours du temps. ....	81
<b>Figure 22</b> : Moussabilité (a) à t=0min et stabilité de la mousse (b) du lactosérum acide brut et traité par ultrasons pendant 5 et 15min au cours du temps. ....	85
<b>Figure 23</b> : Moussabilité (a) à t=0min et stabilité de la mousse (b) du lactosérum doux brut et traité par ultrasons pendant 5 et 15min au cours du temps. ....	86
<b>Figure 24</b> : Diamètre des bulles d'air (a) à t=0min et sa cinétique (b) du lactosérum acide brut et traité par ultrasons pendant 5 et 15min au cours du temps. ....	89
<b>Figure 25</b> : Diamètre des bulles d'air (a) à t=0min et sa cinétique (b) du lactosérum doux brut et traité par ultrasons pendant 5 et 15min au cours du temps. ....	90
<b>Figure 26</b> : Moussabilité (a) à t=0min et stabilité de la mousse (b) des lactosérums bruts et traités par thermosonication au cours du temps. ....	94
<b>Figure 27</b> : Diamètre des bulles d'air (a) à t=0min et sa cinétique (b) des lactosérums bruts et traités par thermosonication au cours du temps. ....	97
<b>Figure 28</b> : Moussabilité (a) à t=0min et stabilité de la mousse (b) du lactosérum acide brut dans un système individuel et mixte (cas du blanc d'œuf cru) au cours du temps. ....	110
<b>Figure 29</b> : Moussabilité (a) à t=0min et stabilité de la mousse (b) du lactosérum doux brut dans un système individuel et mixte (cas du blanc d'œuf cru) au cours du temps. ....	111
<b>Figure 30</b> : Diamètre des bulles d'air (a) à t=0min et sa cinétique (b) du lactosérum acide brut dans un système individuel et mixte (cas du blanc d'œuf cru) au cours du temps. ....	114
<b>Figure 31</b> : Diamètre des bulles d'air (a) à t=0min et sa cinétique (b) du lactosérum doux brut dans un système individuel et mixte (cas du blanc d'œuf cru) au cours du temps. ....	115
<b>Figure 32</b> : Moussabilité (a) à t=0min et stabilité de la mousse (b) du mixte (lactosérum acide brut et blanc d'œuf cru) dans un système individuel et mixte (cas du sucre blanc) au cours du temps. ....	118
<b>Figure 33</b> : Moussabilité (a) à t=0min et stabilité de la mousse (b) du mixte (lactosérum doux brut et blanc d'œuf cru) dans un système individuel et mixte (cas du sucre blanc) au cours du temps. ....	119

<b>Figure 34</b> : Diamètre des bulles d'air (a) à t=0min et sa cinétique (b) du lactosérum acide brut dans un système individuel et mixte (cas du sucre blanc) au cours du temps.....	122
<b>Figure 35</b> : Diamètre des bulles d'air (a) à t=0min et sa cinétique (b) du lactosérum doux brut dans un système individuel et mixte (cas du sucre blanc) au cours du temps.....	123
<b>Figure 36</b> : Moussabilité (a) à t=0min et stabilité de la mousse (b) du mixte (lactosérum acide brut et blanc d'œuf) dans un système individuel et mixte (cas du sucre roux) au cours du temps.....	126
<b>Figure 37</b> : Moussabilité (a) à t=0min et stabilité de la mousse (b) du mixte (lactosérum doux brut et blanc d'œuf) dans un système individuel et mixte (cas du sucre roux) au cours du temps. ....	127
<b>Figure 38</b> : Diamètre des bulles d'air (a) à t=0min et sa cinétique (b) du lactosérum acide brut dans un système individuel et mixte (cas du sucre roux) au cours du temps. ....	130
<b>Figure 39</b> : Diamètre des bulles d'air (a) à t=0min et sa cinétique (b) du lactosérum doux brut dans un système individuel et mixte (cas du sucre roux) au cours du temps. ....	131
<b>Figure 40</b> : Moussabilité (a) à t=0min et stabilité de la mousse (b) du mixte (lactosérum acide brut et blanc d'œuf) dans un système individuel et mixte (cas de sel de table) au cours du temps.....	134
<b>Figure 41</b> : Moussabilité (a) à t=0min et stabilité de la mousse (b) du mixte (lactosérum doux brut et blanc d'œuf) dans un système individuel et mixte (cas de sel de table) au cours du temps.....	135
<b>Figure 42</b> : Diamètre des bulles d'air (a) à t=0min et sa cinétique (b) du lactosérum acide brut dans un système individuel et mixte (cas du sel de table) au cours du temps. ....	138
<b>Figure 43</b> : Diamètre des bulles d'air (a) à t=0min et sa cinétique (b) du lactosérum doux brut dans un système individuel et mixte (cas du sel de table) au cours du temps. ....	139
<b>Figure 44</b> : Moussabilité (a) à t=0min et stabilité de la mousse (b) du mixte (lactosérum acide brut et blanc d'œuf) dans un système individuel et mixte (cas du sucre blanc et du sel de table) au cours du temps. ....	142
<b>Figure 45</b> : Moussabilité (a) à t=0min et stabilité de la mousse (b) du mixte (lactosérum doux brut et blanc d'œuf) dans un système individuel et mixte (cas du sucre blanc et du sel de table) au cours du temps. ....	143

<b>Figure 46</b> : Diamètre des bulles d'air (a) à t=0min et sa cinétique (b) du lactosérum acide brut dans un système individuel et mixte (cas du sucre blanc et du sel de table) au cours du temps. ....	146
<b>Figure 47</b> : Diamètre des bulles d'air (a) à t=0min et sa cinétique (b) du lactosérum doux brut dans un système individuel et mixte (cas du sucre blanc et du sel de table) au cours du temps. ....	147
<b>Figure 48</b> : Moussabilité (a) à t=0min et stabilité de la mousse (b) du mixte (lactosérum acide brut et blanc d'œuf) dans un système individuel et mixte (cas du sucre roux et du sel de table) au cours du temps. ....	150
<b>Figure 49</b> : Moussabilité (a) à t=0min et stabilité de la mousse (b) du mixte (lactosérum doux brut et blanc d'œuf) dans un système individuel et mixte (cas du sucre roux et du sel de table) au cours du temps. ....	151
<b>Figure 50</b> : Diamètre des bulles d'air (a) à t=0min et sa cinétique (b) du lactosérum acide brut dans un système individuel et mixte (cas du sucre roux et du sel de table) au cours du temps. ....	154
<b>Figure 51</b> : Diamètre des bulles d'air (a) à t=0min et sa cinétique (b) du lactosérum doux brut dans un système individuel et mixte (cas du sucre roux et du sel de table) au cours du temps. ....	155
<b>Figure 52</b> : Caractéristiques sensorielles en termes d'acceptabilité générale, de couleur, de goût, de texture et d'odeur des deux nouveaux produits de la meringue.....	167

# Introduction

---

## Introduction

Le lactosérum est la phase aqueuse résultant de la coagulation du lait (**Zadow, 2012 ; Kosseva et Kent, 2013**). Sa couleur jaune-verte (**Pires et al., 2021 ; Bintsis et Papademas, 2023**) est due à la présence de riboflavine (**Pires et al., 2021**). De plus, le lactosérum contient environ 65 g de matières sèches totales par litre (**Pires et al., 2021**) et constitue une source de nutriments tels que le lactose (4,5 %-6 %), les protéines (0,6 %-1,1 %), l'eau (93 %-94 %) ainsi que d'autres micronutriments (**Carvalho et al., 2013**).

Il existe deux principaux types de lactosérum, classés selon la méthode de coagulation du lait (**Kaur et al., 2020 ; Rocha-Mendoza et al., 2021**). Le lactosérum doux est la forme la plus courante de lactosérum, produit par coagulation à la présure lors de la fabrication du fromage (à pâte dure, mi-dure et molle). Il présente un pH d'environ 6-7 (**Siso, 1996 ; Argenta et Scheer, 2019**), contient 6-10 g/L de protéines, 5-6 g/L de matières grasses, 46-52 g/L de lactose et 2,5-4 g/L de minéraux. Il est issu de la production de la plupart des fromages ou de certains produits à base de caséine (**Ryan et Walsh, 2016 ; Guo et Wang, 2019**).

Or, le lactosérum acide est produit par acidification à l'aide de bactéries lactiques ou d'autres agents acidifiants. La coagulation induite par l'acide augmente les taux de calcium et de minéraux par rapport au lactosérum doux grâce à la conversion du phosphate de calcium. Le lactosérum acide présente un pH plus faible (< 5,6) et une acidité et une teneur en minéraux plus élevées (4,3 à 7,2 g/L), en lactose (44 à 46 g/L) et en protéines (6 à 8 g/L) (**Guo et Wang, 2019 ; Buchanan et al., 2023 ; Mulcahy, 2017 ; Monnier et Schlienger, 2018**).

**Mollea et al. (2013)** ont rapporté que la production mondiale totale de lactosérum s'élève à environ 180 à 190 millions de tonnes par an. Parmi les principaux producteurs figurent l'Union européenne et les États-Unis, qui contribuent à environ 70 % de la production mondiale. De plus, on estime que la production mondiale atteindra 200 millions de tonnes par an (**Domingos et al., 2017**). Le lactosérum représente 85 à 95 % du volume de lait utilisé dans la production fromagère (**Ryan et Walsh, 2016**).

De ce fait, la demande biologique en oxygène (DBO) et la demande chimique en oxygène (DCO) du lactosérum sont très élevées, variant respectivement entre 35 à 60 g/L et 50 à 102 g/L (**Remon et al., 2016**), ce qui entraîne de graves problèmes environnementaux (**Acem et al., 2019 ; Kaur et al., 2020**).



Depuis son apparition comme coproduit de l'industrie fromagère et compte tenu de ses propriétés polluantes pour l'environnement, le lactosérum est considéré comme un produit de base de l'industrie fromagère. Sa valorisation n'a cessé de se développer dans divers domaines d'intérêt (**De La Fuente et al., 2002 ; Christensen et al., 2011; Saleh, 2012; Božanić et al., 2014 ;Kadam et al., 2018 ;Boey et al., 2021; Sarkar et al., 2023**).

D'après la littérature ; les recherches ont porté sur le traitement du lactosérum, l'extraction et la purification de ses molécules nobles en vue d'étudier leurs différentes propriétés (**Bosco et al., 2018 ; Kaur et al., 2020 ; Acem et al., 2020 ; Pires et al., 2021 ; Soumati et al., 2023**).

Par exemple, les protéines de lactosérum possèdent plusieurs propriétés fonctionnelles : elles retiennent l'eau, agissent comme agent moussant et/ou émulsifiant et forment des agrégats (ou gels) (**Kinsella et Whitehead, 1989**). Leur capacité de rétention d'eau est exploitée dans les pâtisseries et la charcuterie, et leur action émulsifiante est utilisée pour la mousse et dans la formulation de boissons, tandis que sa capacité à former des gels est exploitée dans les desserts (**Kinsella et Whitehead, 1989**).

Selon **Damodaran et Paraf (1997) et Wouters et al. (2018)**, la mousse est définie comme une dispersion de gaz (bulles d'air) dans une phase continue telle que l'eau. La capacité moussante s'explique par la capacité et la stabilité de la mousse ; tandis que la capacité moussante est liée à la quantité d'interface formée par les protéines, la stabilité de la mousse est associée à la capacité des protéines à résister à la gravité et aux contraintes mécaniques (**Damodaran et al., 2008**). Les mousses alimentaires apportent texture et structure à de nombreux produits alimentaires tels que les gâteaux, les mousses et les meringues (**Foegeding et al., 2006 ; Akkouche et al., 2019**). Les meringues, un élément fondamental de l'art culinaire, sont composées de blanc d'œuf battu et de sucre et contiennent environ 80 % de phase aérienne (**Licciardello et al., 2012**). En pâtisserie, les meringues sont à la base de nombreux produits tels que le tiramisu, le gâteau des anges, les soufflés, les mousses et les macarons (**Vega et Sanghvi, 2012**).

Les mousses sont des systèmes colloïdaux formés par l'agglomération de bulles de gaz séparées les unes des autres par de minces films liquides (**Damodaran et Paraf, 1997**). En tant que systèmes thermodynamiquement instables, elles sont sujettes à un processus de déstabilisation. Les mousses ont suscité un vif intérêt dans l'industrie agroalimentaire et les arts culinaires en raison de leur texture et de leur texture uniques. Dans notre quotidien, de

nombreux produits alimentaires ont été élaborés à partir de mousses, comme la bière, les glaces, le pain et les gâteaux, les soufflés, les mousses, les boissons gazeuses et les guimauves. Les qualités de ces produits sont étroitement liées à la formation et à la stabilité de la mousse. De nombreux travaux ont exploré les mécanismes sous-jacents aux propriétés moussantes des ingrédients alimentaires et différentes approches pour améliorer les propriétés moussantes ont été étudiées (**Exerova et Kryglyakov 1998 ; Hagolle et al. 2000 ; Bals et Kulozik 2003 ; ; Carp et al. 2004 ; Davis et al. 2004 ; Davis et Foegeding 2004 ; Davis et Foegeding 2007** ).

L'amélioration de la capacité des protéines à former et à stabiliser la mousse peut être obtenue par des traitements chimiques (**Tunick et al.,2016**), enzymatiques et physiques (**Du et al.,2022**). Parmi ceux-ci, la méthode physique est privilégiée en raison de la préférence pour les produits naturels par rapport à ceux synthétisés chimiquement ou enzymatiquement (**Mohanan et al.,2020 ; Acharjee et al.,2023**). De nombreuses études ont démontré les effets bénéfiques de divers traitements physiques, tels que la chaleur, les décharges diélectriques de plasma froid (**Jahromi et al.,2020 ; Acharjee et al.,2023**) et les ultrasons (**Chandrapala et al.,2011**), sur les caractéristiques des protéines. De plus, il a été démontré que le traitement thermique améliore les propriétés moussantes des protéines et a gagné en popularité grâce à sa simplicité et à son évolutivité (**Saneei et al.,2024**).

Le traitement thermique est l'une des principales méthodes traditionnelles de transformation pour prolonger la durée de conservation des produits (**Ragab et al.,2019**). Cependant, de nombreux défauts ont été observés lors de ce processus, notamment la dénaturation et la modification des protéines (**Lan et al., 2010**), l'équilibre minéral (**Seiquer et al., 2010**) et le changement de couleur (**Bermúdez-Aguirre et al., 2009a**).

Récemment, la tendance vers l'utilisation de technologies modernes et sûres pour la santé, limitant les risques pour les ingrédients nutritionnels et prolongeant la durée de conservation des produits, est encouragée pour remplacer le processus thermique conventionnel (**Ragab et al.,2019**).

Le développement de technologies non thermiques prend en compte la relation entre alimentation, régime alimentaire et santé et vise à utiliser des ingrédients naturels, à améliorer la qualité et les performances, à assurer la stabilité fonctionnelle et à réduire la consommation d'énergie. Ces technologies comprennent le champ électrique pulsé, la haute pression

hydrostatique, l'irradiation, le champ magnétique oscillant, le plasma froid et les ultrasons (Sotelo-Lara et al.,2023 ; Kumar et al.,2023 ; Wang et al.,2023).

Selon Shokri et al.,(2022),les propriétés techno-fonctionnelles des protéines, notamment leur pouvoir moussant, leur capacité de rétention d'eau, leur solubilité, leurs propriétés émulsifiantes et leur gélification, jouent un rôle important dans les technologies de transformation des aliments et contribuent de manière significative au développement de nouveaux produits alimentaires. Ces dernières années, des recherches ont démontré que les ultrasons peuvent influencer les propriétés techno-fonctionnelles des protéines en modifiant leur structure moléculaire.

Selon Sotelo-Lara et al., (2024), le traitement ultrasonore et la thermosonication , grâce à leur durabilité, ils sont conformes aux normes environnementales et ouvrent la voie à de futures applications commerciales favorisant les objectifs écologiques et industriels.

Dans ce cadre, le présent projet s'inscrit dans les notions de la sécurité alimentaire, de l'économie circulaire et du développement durable, et ce par la recherche d'un nouveau ingrédient biologique alternatif aux ovoproduits (blanc d'œuf cru) en vue de sa valorisation dans le domaine de la pâtisserie. A cet effet, la présente thèse est une stratégie portant sur la caractérisation physicochimique et technofonctionnelle (propriétés moussantes) des lactosérums bruts (acide et doux) et traités d'une part et l'optimisation, la production et la caractérisation d'un nouveau produit pâtissier dit meringue d'autre part.

# Chapitre I

---

## Synthèse Bibliographique

## 1. Le lactosérum

### 1.1. Définition

Le procédé de fabrication du lait nécessite une étape de coagulation de la caséine par une acidification du lait obtenu par ajout de ferments lactiques ou par action de la présure. L'opération qui suit l'étape de coagulation consiste à séparer la phase coagulée du reste du lait au cours d'une opération d'égouttage ; la fraction liquide ainsi recueillie s'appelle le lactosérum (**Bergel et al . ,2004**).

Le lactosérum ; également appelé (petit lait) ; est un liquide jaune verdâtre translucide qui se sépare du caillé après la coagulation du lait, contenant une quantité importante de protéines de lait environ 20% et riche en éléments nutritifs (**Muller et al.,2003**) ; la production de 10L de lait permet d'obtenir 1Kg de fromage et 9L de lactosérum soit 600g de poudre de lactosérum (**Boudry et al.,2012**).

### 1.2. Types de lactosérum

Le lactosérum est le liquide qui reste après la précipitation et l'élimination de la caséine du lait au cours de la fabrication du fromage, il est considéré comme un sous-produit de l'industrie laitière (**Smithers et al.,1996**). Selon le type de fromage et la technologie mise en œuvre pour sa production, on distingue généralement deux types de lactosérum :

#### 1.2.1. Lactosérum acide

Il est le sérum provenant des caséineries et de la fabrication des fromages à pâte fraîche et à pâte molle obtenue par coagulation lactique ou mixte (**Boudier et Luquet,1989**).il est obtenu après la coagulation du lait par précipitation des caséines à leur pH isoélectrique de 4.6 par ajout d'acide fort ou d'acide lactique (**Violleau,1999**). Le pH de ce lactosérum peut aller de 3.8 à 4.6 et le degré d'acidité est supérieur à 18°D. Lorsque la protéine est combinée à des sels de calcium, l'acidification entraîne sa déminéralisation qui fait passer dans le sérum une part importante d'éléments minéraux notamment le calcium et le phosphore (**Sottiez ,1990**).

Les lactosérums acides sont moins riches en lactose et plus riche en minéraux. Ils sont aussi plusensemencés en germes lactiques et moins sujets à des fermentations que les lactosérums doux (**Moletta, 2002**). Les teneurs élevées en acide lactique et en minéraux posent des difficultés pour la déshydratation ; aussi les lactosérums acides sont souvent utilisés à l'état liquide alors que les sérums doux sont généralement déshydraté (**Moletta ,2002**).

### 1.2.2. Lactosérum doux

Est un sérum obtenu après la coagulation de la caséine sous l'action de la présure sans acidification préalable. On obtient alors un sérum doux pauvre en sels minéraux et riche en lactose et en protéines. En plus des protéines solubles du lait, ce type de lactosérum contient une glycoprotéine qui provient de l'hydrolyse de la caséine Kappa par la présure (**De La Fuente et al.,2002**). Ce dernier est utilisé dans la fabrication des fromages à pâte pressée cuite ou non. Le pH de ce lactosérum varie entre 5.2 et 6.7 et son degré d'acidité est inférieur à 18°D, il se caractérise par une plus grande richesse en lactose et une faible teneur en calcium et phosphore (**Adrian et al.,1995**).Lorsque le lactosérum de fromagerie n'est pas traité avec toutes les précautions nécessaires, la poursuite de la fermentation naturelle augmente son acidité. Ce type est issu de la fabrication de fromage à pâte pressée cuite ou non cuite (Emmenthal, Saint Paulin, Edam...etc) (**Morr et al.,1993**).

### 1.3. Composition

Les caractéristiques des différents types de sérum dépendent de la qualité du lait mis en œuvre, de la technologie fromagère utilisée et des traitements subis par le sérum après séparation, ainsi que des conditions de collecte, de stockage et de transport (**Chaput,1981**). Le tableau 1 présente la composition moyenne des lactosérums doux et acides.

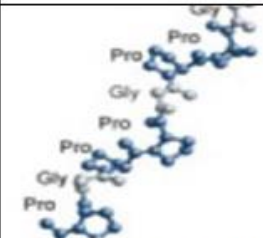
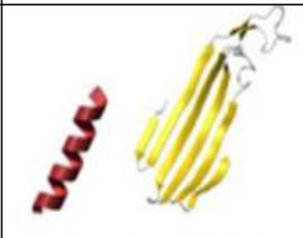
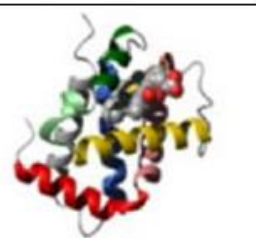
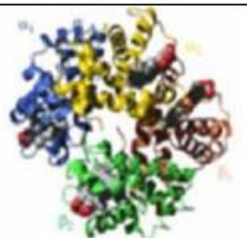
**Tableau 1 :** Composition moyenne du lactosérum doux et acide (**Linden et Lorient,1994 ;Morr et Ha ,1993**)

Paramètres (%)	Lactosérum doux	Lactosérum acide
pH	6,3	4,6
Eau	93	93,5
Lactose	4,77	4,71
Protéines	0,82	0,75
MG	0,07	0,03
Acide lactique	0,15	0,55
Cendres	0,53	0,69
Calcium	0,05	0,13
Sodium	0,07	0,06
Potassium	0,13	0,15
Phosphore	0,06	0,09

### 1.3.1. Protéines

Les protéines sont des chaînes polypeptidiques ayant quatre niveaux de structure différents. La structure primaire correspond à l'enchaînement des acides aminés, reliés entre eux par des liaisons peptidiques. Les protéines comportent des régions ordonnées périodiquement dans lesquelles la chaîne polypeptidique linéaire présente une structure tridimensionnelle régulière de type hélices  $\alpha$  ou feuillets  $\beta$ . Ces différentes régions, dont l'organisation est maintenue par des liaisons hydrogène entre acides aminés, constituent la structure secondaire de la protéine. Notons que certaines régions protéiques ne sont pas structurées dans ce type de conformation, leurs formes irrégulières constituant des boucles. La structure tertiaire correspond à une organisation tridimensionnelle des éléments de la structure secondaire : elle résulte d'interactions essentiellement non-covalentes mais aussi parfois de ponts disulfures. La structure quaternaire se définit par l'état d'oligomérisation de la protéine (tableau2), c'est-à-dire par l'état d'association des différentes sous unités de la structure tridimensionnelle.

**Tableau2** : Récapitulatif des différentes structures protéiques (Pierre et al,2008).

Structure primaire	Structure Secondaire	Structure tertiaire	Structure quaternaire
			
Séquence des acides aminés	Motifs que forment les acides aminés. On distingue principalement les structures en hélices $\alpha$ et en feuillets $\beta$ .	Cette structure se rapporte aux relations dans l'espace des différentes structures secondaires, hélices et feuillets.	Les protéines qui contiennent plus d'une chaîne polypeptidique présentent un niveau supplémentaire d'organisation : on parle de structure quaternaire.

La structure dite « native » d'une protéine correspond à une conformation cœur/surface thermodynamiquement stable dans un environnement donné (pH et force ionique modérés, température ambiante). Elle résulte d'un repliement qui met en jeu de nombreuses interactions inter et intramoléculaires. D'un point de vue thermodynamique, l'énergie libre de

l'état natif est plus basse que celle de l'état déplié. La différence d'énergie libre ( $\Delta G$ ) entre les deux états correspond à la mesure de la stabilité conformationnelle des protéines et elle est égale à :

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \dots\dots\dots \text{Equation 1}$$

La variation d'entropie ( $\Delta S$ ) peut être reliée aux changements de configuration des groupements polaires et apolaires de la protéine et des molécules d'eau. La variation d'enthalpie ( $\Delta H$ ) est fonction de l'énergie nécessaire à ces changements de conformation. Tout facteur affectant les interactions du système modifie la stabilité de la protéine. D'après l'Equation 1, on voit que la température (T) affecte directement l'équilibre thermodynamique, bien qu'elle intervienne aussi dans les valeurs de  $\Delta H$  et  $\Delta S$ . Parmi les autres paramètres qui régissent cette équation, le pH joue sur les interactions électrostatiques et de Van der Waals ainsi l'addition de sels solubles modifie les interactions électrostatiques et hydrophobes de la protéine. Les sels peuvent ainsi altérer la solubilité de la protéine. On distingue deux effets du sel sur la conformation :

- Effet de «*salting-in*» : à faibles concentrations en sels, les répulsions électrostatiques entre les protéines diminuent du fait de l'écrantage des charges, ce qui entraîne une augmentation de solubilité de la protéine. L'efficacité des différents sels sur la stabilité des macromolécules suit la série d'Hoffmeister (**Damodaran,1989**).
- Effet de «*salting-out*» : au-delà d'une certaine concentration en ions, un écrantage total des répulsions électrostatiques a lieu conduisant à une précipitation de la protéine (**Relkin,1996**).

Le changement de conformation des protéines entraîne des modifications à la fois de leurs propriétés physico-chimiques et technofonctionnelles, telles que leurs propriétés émulsifiantes ou moussantes, et également gélifiantes.

Les protéines ne forment pas la fraction la plus abondante du lactosérum, mais elle est la plus intéressante sur le plan économique et nutritionnel qui est supérieurs aux protéines du blanc d'œuf ; prise comme protéines de référence. Leurs compositions en acide aminé très riche (**Sottiez ,1990**) (voir tableau 3).



**Tableau 3** : Acides aminés essentiels (g/100g) (Moletta,2002).

Acides aminés essentiels	Protéines du lactosérum	Caséines
Tryptophane	1.38	1.22
Lysine	10.9	8.81
Méthionine	1.95	3.07
cystéine	1.35	0.57
Leucine	7.09	9.8
Isoleucine	4.06	4.8
Phénylalanine	3.47	5.18
Valine	5.54	3.55
Thréonine	5.03	4.7

Les protéines du lactosérum constituent 20% de la totalité des protéines contenues dans le lait (de Wit,1981 ; Morr,1982).Elles sont composés de plusieurs types de protéines qui diffèrent significativement dans leurs propriétés moléculaires , physiques et fonctionnelles .Cependant, ces protéines possèdent certaines similitudes comme leur structure globulaire et leur solubilité à pH 4.6 (Swartz et Wong, 1985).

Deux grandes familles de protéines entrent dans la composition du lait ; la première est constituée de caséines qui représentent environ 80% des protéines totales du lait. La seconde famille les protéines solubles constituée essentiellement de  $\beta$  lactoglobuline ( $\beta$ -LG), $\alpha$  lactalbumine ( $\alpha$ -LA), l'albumine sérique bovine( BSA) , les immunoglobulines (Ig) et les protéoses peptones( voir tableau 4) (De Wit,1981 ;De Wit et Hontelez,1981 ;De Wit,1989).

**Tableau 4 :** Teneur en composés protéiques du lactosérum (*De Wit, 1981*)

Composés protéiques	Masse moléculaire(KDa)	Teneur(%)	Point isoélectrique
<b>Protéines</b>			
β-LG	18,362	50	5,2
α-LA	14 ,147	22	4,5-4,8
BSA	69.000	5	4,7-4.9
Ig	150,000-1000 ,000	12	5.5-8.3
Lactoferrine	80 ,000	<1	8 ,4-9,0
<b>Enzymes</b>			
Lactoperoxydases	78,000	<1	9,5
Lysosyme	18,000	<1	9,5
Phosphatase alcaline	160,000-190,000	<1	Nd
Catalase	60,000	<1	5,7
Sulphydryle oxydase	89,000	<1	Nd
Plasmine	Nd	<1	Nd
<b>Peptide</b>			
Protease-peptones	Nd	Nd	Nd
Glycomacropeptides	7,000	10	Nd

Nd : non déterminée

### 1.3.1.2. Classification

#### 1.3.1.2.1. Protéines majeures

La β-lactoglobuline et l'α-lactalbumine sont les protéines majeures du lactosérum. Les autres protéines du lactosérum sont considérées comme mineurs. Contrairement à le sérum albumine bovine et aux immunoglobulines qui proviennent du compartiment sanguin. Ces deux protéines du lait sont synthétisées par la glande mammaire de la vache (**de Wit,1981 ; Cayot,1998**)

##### 1.3.1.2.1.1. β-lactoglobuline

La β-lactoglobuline est la protéine la plus abondante et la plus étudiée du lactosérum (**de Wit,2009**),il s'agit d'une protéine globulaire de structure compacte, composée de 162 résidus d'acide aminés et dont la masse moléculaire relative est de 18.3 KDa (**Roufik et al. ,2007**) ;

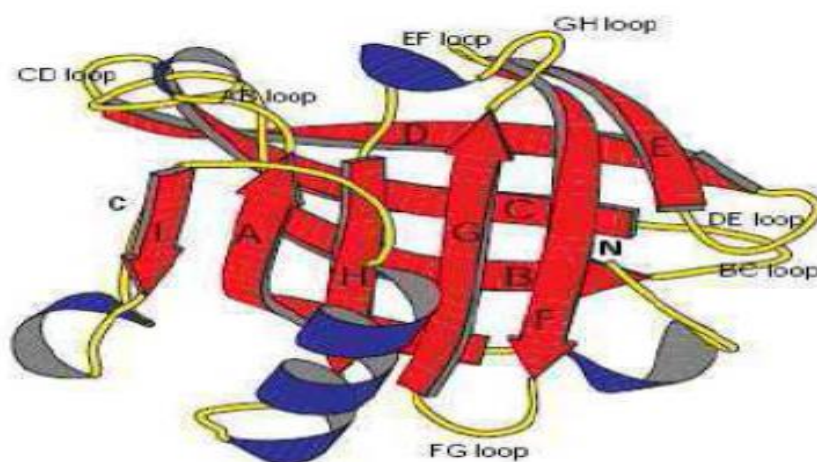
elle représente environ 2 à 4g/l, ce qui correspond à 50% des protéines totales du lactosérum (Eugenia et al., 2006 ; Roufik et al., 2007).

Cette protéine existe sous forme dimère (36,7 KDa) à pH au dessus de son pH isoélectrique (5,2) et à des pH inférieur à 3,5 et supérieur à 7,5, le dimère va se dissocier pour donner deux monomères, et entre 3,5 et 5,2, le dimère va se polymériser en octamère (147KDa). La température de dénaturation de cette protéine est au dessus de 65°C associée aux transitions conformationnelles de groupements SH et  $\epsilon$ -NH<sub>2</sub> (Morr et al., 1993).

La séquence primaire de la  $\beta$ -Lg bovine comporte 162 acides aminés pour une masse molaire calculée de 18600 g/mol. Elle possède deux ponts disulfures et un groupement sulfhydryle libre (Cayot & Lorient, 1998).

La  $\beta$ -Lg contient 10% d'hélices  $\alpha$ , 50% de feuillets  $\beta$ , 8% de coudes  $\beta$  et 35% de régions désordonnées (Qi et Coll., 1997). La structure tertiaire de la  $\beta$ -Lg, native et complexée, a été résolue en RMN et diffraction des rayons X jusqu'à 1,8 Å par Brownlow et al., (1997).

La protéine présente une structure en calice lui conférant son appartenance à la famille des lipocalines. Le monomère, est formé par 9 feuillets  $\beta$  antiparallèles enroulés dont 8 forment le cœur de la molécule (figure 1)

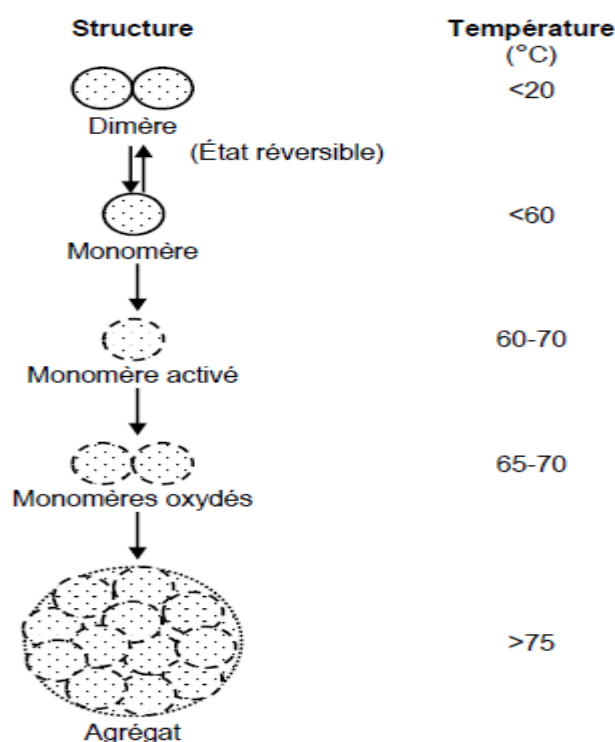


**Figure 1** : Structure tridimensionnelle de la  $\beta$ -Lg selon Brownlow et al., (1997).

La  $\beta$ -Lg présente une large gamme de structures quaternaires traduites par différents stades d'oligomérisation en fonction du pH du milieu. La concentration en protéines, la force

ionique et la température peuvent modifier les proportions de monomères, de dimères et d'octamères (Ananthanarayan et al., 1998).

Lorsque la température augmente, les sous-unités se dissocient, peu importe le pH du milieu. après dissociation et jusqu'à 60°C, seulement quelques ponts hydrogènes intramoléculaires sont rompus, mais la protéine conserve la grande majorité de sa structure tertiaire. les modifications pouvant survenir en dessous de 60°C seraient pour la majorité réversibles (de Wit, 2009). la figure 2, adaptée de Wit, 2009, décrit les différentes formes de la  $\beta$ -lactoglobuline.



**Figure 2 :** Les différentes formes de la  $\beta$ -lactoglobuline adaptée de Wit(2009).

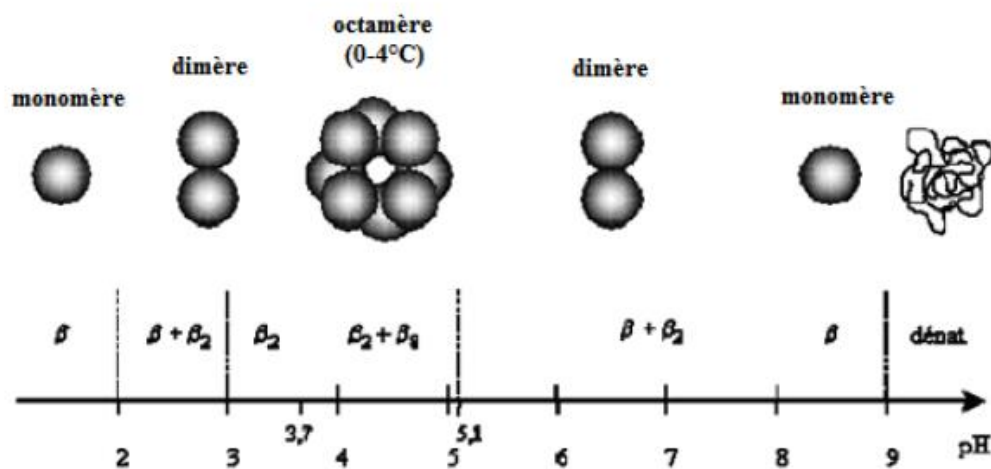
Un certain nombre de changements conformationnels réversibles de faible ampleur accompagne l'oligomérisation de la protéine lorsque l'on augmente ou que l'on diminue le pH (Ananthanarayan et al., 1998) et il a été possible d'établir par RMN les différents degrés d'association des monomères de la  $\beta$ -Lg (figure 3).

\*De pH 3 à 7,5 à température ambiante, la  $\beta$ -Lg existerait vraisemblablement sous la forme d'un ensemble dimérique à l'aspect pseudo-cyclique avec un diamètre de 3.6 nm et une hauteur de 6,93nm (Timasheff & Townend ,1964). L'implication de liaisons hydrogènes entre groupements carboxyles serait à l'origine de cette structure (Creamer et al.,1983) .

Cependant, à basse température (0-4°C) entre pH 3,7 et 5,1, et pour une concentration supérieure à 1,5%, le dimère se tétramérise pour former un octamère (Townend et al.,1960).

\*Si le pH augmente au-delà de 7,5 ou diminue en deçà de 2, les dimères de la  $\beta$ -Lg se dissocient en monomères. Cette monomérisation serait due à l'augmentation de la charge nette de la protéine et à l'accroissement des forces électrostatiques répulsives qui en résulte. Il s'effectue sans changement majeur de conformation (Swaisgood,1982).

\* Pour des pH extrêmes (pH>9), la protéine est dénaturée.



**Figure 3 :** Etats polymériques de la  $\beta$ -Lg en fonction du pH selon Hambling et al.,(1992).

Selon le pH, les monomères( $\beta$ ) s'associent par deux ( $\beta_2$ ) ou par huit( $\beta_8$ ) et pour des pH extrêmes, la protéine est dénaturée.

Le point isoélectrique de la  $\beta$ -Lg Q est de 5,2. a pH 7, la charge nette de la protéine a été évaluée à 7,8 (Renard & Lefebvre, 1992).

La  $\beta$ -lactoglobuline dont la fonction dans le lait n'est pas encore entièrement élucidée, joue un rôle important dans l'assimilation de la vitamine A1 (Bergel et al.,2004) .

#### 1.3.1.2.1.2. $\alpha$ -lactalbumine( $\alpha$ -LA)

L' $\alpha$ -lactalbumine est une autre protéine fonctionnelle très intéressante par sa composition riche en tryptophane, qui en fait une base de fabrication de peptides destinés à l'alimentation diététique ou alicamenteuse (Bergel et al.,2004) ; elle est la protéine la plus importante dans le lactosérum l'une des plus petites de toutes les protéines avec 123 résidus d'acides aminés (de Wit et Hontelez-Backx,1981) ;il s'agit d'une métallo-protéine dont la structure est fortement

ordonnée par des ponts disulfure au nombre de 4, et rigidifiée par la présence d'un ion calcium associé au cœur de la protéine (**Roufik,2001**).

le rôle de l' $\alpha$ -lactalbumine dans les caractéristiques fonctionnelles du lactosérum est moins important, entre autres, à cause de son grand pouvoir de régénération après chauffage, ce qui fait d'elle la protéine du lactosérum la plus stable envers les traitements thermiques mais sa résistance peut, toutefois, être affectée par la présence de la  $\beta$ -lactoglobuline pendant le chauffage (**de Wit,1981**).

La stabilité thermique de l' $\alpha$ -lactalbumine peut aussi être attribuée à la forme cyclique de la molécule (**Cheftel & Lorient, 1982**).

#### **1.3.1.2.2. Protéines mineures**

La lactoferrine, la lactoperoxydase, la phosphatase alcaline, la catalase, la sulfhydryle oxydase, le lysozyme, la plasmine, les immunoglobulines, la sérum albumine bovine(BSA), les protéoses-peptones et le GMP font tous partie des constituants protéiques mineurs du lactosérum.les quatre derniers composés protéiques mineurs du lactosérum sont traités plus en détail à cause de leur importance relative par rapport aux autres (**Cayot,1998**).

##### **1.3.1.2.2.1. Immunoglobulines**

L'immunoglobuline se réfère à une famille hétérogène des glycoprotéines.s'étend de 150 à 1000KDa et partage l'activité commune d'anticorps (**Eigel et al.,1984**) qui ont des rôles biologiques différents comme le transport membranaire et la liaison à divers antigènes (**Kinsella et Whitehead ,1989**).les quatre classes d'immunoglobulines retrouvées dans le lait de vache : IgA ,IgG,IgM et IgE ont une structure semblable qui a pour origine la combinaison de quatre chaînes peptidiques (**Vermeer et Norde,2000**) sont des monomères de deux chaînes polypeptide de 20 KDa et deux chaînes polypeptide de 50 à 70KDa qui sont liées par des ponts disulfide (**Brunner,1977**). Cette protéine est caractérisée par un plus haut dévoilement thermique et parmi les protéines les plus sensibles à la dénaturation thermique (**Thapon ,2005**).

##### **1.3.1.2.2.2. Sérum albumine bovin**

La BSA est une protéine de grande taille caractérisée par 582acides aminés, sa structure primaire est principalement repliée en structure secondaire d'hélices  $\alpha$  (**Morr et Ha,1993**)étant donné sa taille,sa structure tertiaire est beaucoup plus complexe que les deux autres protéines tels que la  $\beta$ -lactoglobuline et l' $\alpha$ -lactalbumine et est définie par régions

(Kinsella et Whitehead,1989) ,représente 0,1 à 0,4g/l des protéines de lait, a un poids moléculaire de 69KDa, les liaisons d'acides gras stabilisent la molécule de protéine contre la dénaturation par la chaleur (Gumpens et al.,1979). La sérum albumine bovine est soluble jusqu'à 35% à température de 3°C dans l'eau distillé, mais subit une précipitation extensive à la température ambiante dans la gamme de 40 à 45°C. (Lin et al.,1976) ; vu sa faible concentration dans le lait, ses incidences technologiques sont moins évidentes que pour la  $\beta$ -lactoglobuline (De Wit,1981).

#### 1.3.1.2.2.3. Glycomacropéptide

Le GMP peut représenter jusqu'à 25%des protéines du lactosérum (Martinez et al.,2010).il est un fragment de caséine qui est issu de l'hydrolyse de la caséine  $\kappa$  par la chymosine.il est donc également absent du lactosérum acide puisqu'aucune enzyme n'est utilisé lors de la fabrication d'un caillé acide.sa concentration dans le lactosérum doux varie en fonction du type de fromage dont il provient puisque les concentrations utilisées de chymosine et les temps de réaction varient selon le fromage produit(Martinez,Farias,et Pilosof,2010).

Contrairement aux autres protéines du lactosérum, on ne lui attribue pas de structure complexe. c'est plutôt une chaîne peptidique de 64 acides aminés issue de l'extrémité carboxylique de la caséine  $\kappa$  (Abd El-Salam et al.,2009).il aurait plutôt un effet promoteur d'agrégation grâce à ses caractéristiques amphiphiles qui peuvent également être mises à profit pour la stabilisation de mousses (Martinez et al.,2011).

#### 1.3.1.2.2.4. Protéoses-peptones

Ce sont des peptides issus de la protéolyse de la caséine  $\beta$  par la plasmine (Debry,2001), ils font partie d'une fraction formée par un mélange de composés azotés thermostables et solubles à leurs point isoélectrique (Roufik,2001).du point de vue de la technologie, on reconnaît à cette fraction un excellent pouvoir moussant, lequel se manifeste quand, au terme d'un chauffage, les protéines du lactosérum dénaturées se trouvent éliminées (Cayot,1998).

### 1.4. Propriétés techno-fonctionnelles des protéines

Les propriétés techno-fonctionnelles des protéines sont catégorisées en fonction de leurs mécanismes d'action, telles que les propriétés liées à l'hydratation comme la solubilité, la capacité de rétention d'eau et de l'huile, ainsi que des propriétés liées à la structure , comme la gélification et la viscosité, et les propriétés de surface comme le pouvoir moussant et

émulsifiant (**Boukid et al., 2021**). Ces propriétés jouent un rôle important dans le développement de formulations alimentaires et produits finis. En raison de l'intérêt croissant pour l'utilisation des protéines de lactosérum au sein des systèmes alimentaires, il est impératif de développer une compréhension de leurs caractéristiques surtout liées à la  $\beta$  lactalbumine puisqu'elle représente la grande fraction protéique dans le lactosérum, lesquelles seront expliquées dans les sections suivantes :

#### 1.4.1. Propriétés moussantes

Les aliments sous forme de mousse sont des dispersions instables thermodynamiquement, dont la stabilité relative dépend des propriétés des composants tensioactifs présents dans le système. Ainsi, dans les produits alimentaires, les mousses sont principalement stabilisées par des protéines (**Corzo-Martínez et al., 2012**).

Les protéines en raison de leur nature amphiphile, se concentrent à l'interface entre l'air et l'eau lors de la formation de la mousse. Leurs parties hydrophobes s'orientent vers l'air tandis que leurs parties hydrophiles se dirigent vers l'eau. Cette organisation forme une structure lamellaire où les protéines forment des couches minces autour des bulles d'air, agissant comme des barrières pour empêcher la coalescence des bulles et empêchant de leur fusion. Ainsi, les protéines stabilisent l'interface air-eau, assurant la stabilité et la durabilité de la mousse (**Amagliani et al., 2021; Moll et al., 2022**).

Les protéines, de par leur nature amphiphile, se distinguent par leurs bonnes propriétés interfaciales et moussantes. Ainsi, la formation de mousse est influencée par l'adsorption des protéines à l'interface air-eau et leur capacité à réduire la tension interfaciale du système. Par conséquent, les protéines du lait, et plus particulièrement la  $\beta$ -Ig qui représente environ 55% de la totale des protéines de lactosérum, est largement utilisée en raison de sa grande capacité à être adsorbée à l'interface air-eau, à diminuer la tension superficielle et à construire l'interface réseaux élastiques. Cette protéine est connue pour former d'épaisses couches interfaciales proches de son point isoélectrique (**Moro et al., 2011; Perez et al., 2012**).

#### 1.4.2. Solubilité

La solubilité est une propriété clé car elle influe directement d'autres propriétés technofonctionnelles des protéines telles que l'émulsification, la gélification et la capacité moussante (**Barac et al., 2015**). Généralement, la solubilité des protéines dépend de facteurs intrinsèques tels que la composition et la structure des acides aminés, la taille et la structure



des protéines, ainsi que de facteurs extrinsèques, notamment le pH, la force ionique, la température, la concentration des protéines et le choix du solvant (**Gravel & Doyen, 2020**).

En effet, les interactions entre les protéines et l'eau déterminent leur solubilité. Dans l'eau, les acides aminés hydrophiles et polaires ont tendance à se positionner près de l'interface avec le solvant augmentant la solubilité, tandis que les acides aminés hydrophobes et non polaires sont en grande partie enfouis à l'intérieur de la structure protéique pour minimiser l'énergie libre et donc, diminuer la solubilisation. Néanmoins, la persistance de résidus hydrophobes en surface crée des zones d'hydrophobicité qui peuvent compromettre la solubilité de la protéine (**Lam et al., 2018; Shanthakumar et al., 2022**).

Plusieurs facteurs peuvent modifier la solubilité des protéines tels que la température et le pH

La température du milieu environnant peut également affecter la solubilité des protéines. Plusieurs protéines alimentaires subissent une dénaturation thermique à une température inférieure à 80 °C, qui perturbe les forces intramoléculaires non covalentes stabilisant les structures protéiques d'ordre supérieur. Le dépliage thermique peut conduire à une exposition accrue des résidus hydrophobes, facilitant les interactions protéine-protéine possibles qui entraînent l'agrégation des protéines et une précipitation éventuelle (**Mulvihill & Donovan, 1987**).

La solubilité des protéines augmente à des valeurs de pH supérieurs ou inférieurs du point isoélectrique (pI) grâce à la répulsion électrostatique induite par les charges nettes positives et négatives à la surface de la protéine (**Hall, 1996**). La charge nette d'une protéine native est déterminée par les constantes de dissociation (pK) des groupes aminés ionisables et le pH de la solution protéique. Au pI, la charge nette de la protéine est nulle, ce qui correspond à une solubilité minimale de la protéine. En dessous et au-dessus du pI, la charge nette de la protéine est respectivement positive et négative. Au niveau du pI, les protéines ont une charge nette nulle, ce qui privilège les forces d'attraction entre les protéines, limitant ainsi leur solubilité et pouvant conduire à une précipitation (**Zayas & Zayas, 1997**).

### 1.4.3. Propriétés émulsifiantes

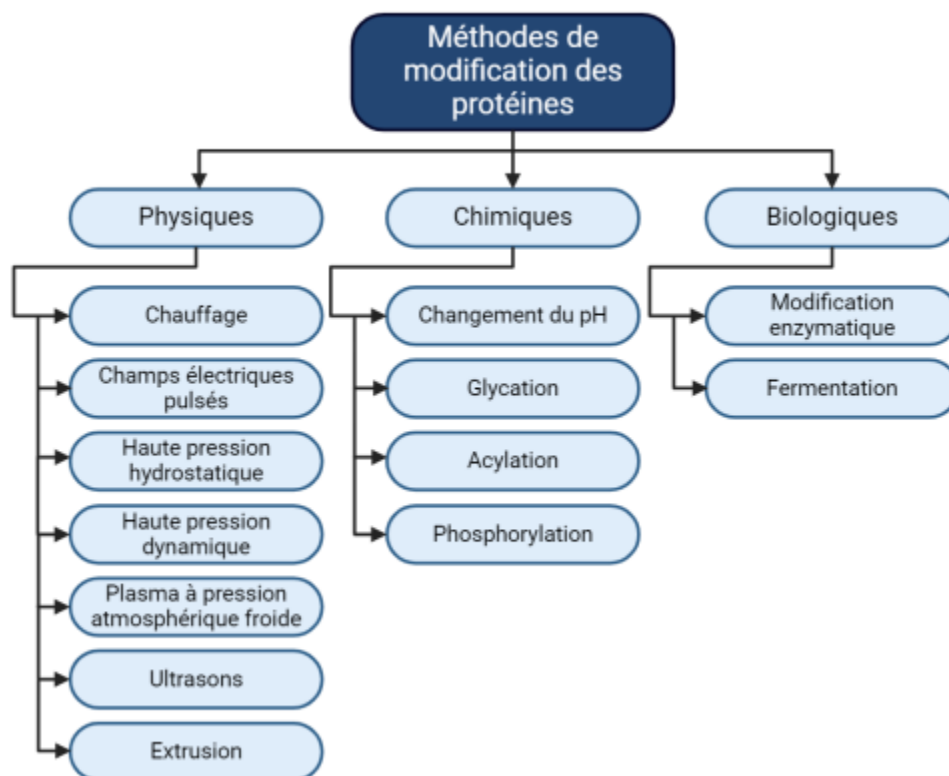
Une émulsion se compose de deux liquides non miscibles (généralement de l'huile et de l'eau), dont l'un se disperse sous forme de petites gouttelettes sphériques dans l'autre (**Mcclements, 2005, 2008**). La substance qui compose les gouttelettes dans une émulsion est appelée phase dispersée ou discontinue, tandis que la substance composant le liquide

environnant est appelée phase continue (**Dickinson & Hong, 1994; McClements, 2005, 2008**).

Les protéines de lactosérum jouent un rôle important au cours du processus d'homogénéisation des deux phases. En effet, les protéines génèrent des forces répulsives électrostatiques et stériques entre les gouttelettes qui les empêchent de se rapprocher, ainsi que la formation d'une membrane viscoélastique résistante à la rupture. Les protéines de lactosérum facilitent également la stabilisation des gouttes contre la coalescence. Par ailleurs, après qu'une émulsion ait été créée, il est important qu'elle conserve ses propriétés pendant l'entreposage. Ainsi, le terme stabilité d'émulsion est utilisé pour décrire la capacité d'une émulsion à résister aux changements de ses propriétés avec le temps. Plusieurs études ont démontré que la  $\beta$ -lg possède de très bonnes propriétés émulsifiantes et est utilisée dans diverses formulations alimentaires comme les crèmes de pâtisserie, les mayonnaises etc. (**Kelly, 2018; McClements, 2005**). En effet, durant l'homogénéisation, la  $\beta$ -lg agissant comme émulsifiant joue plusieurs rôles. Premièrement, elle diminue la tension interfaciale entre les phases huile et eau, réduisant ainsi la quantité d'énergie nécessaire pour déformer et perturber les gouttelettes. Deuxièmement, elle forme un revêtement protecteur autour des gouttelettes qui les empêche de coalescer les unes avec les autres à l'intérieur et à l'extérieur de l'homogénéisateur (**McClements, 2008**).

### **1.5.Mécanismes et effets de modification des protéines**

Des modifications de la structure des protéines de pois peuvent être appliquées (**Ge et al., 2020**) par des méthodes physiques, chimiques, biologiques ou combinés (figure 4) (**Shanthakumar et al., 2022**).



**Figure4** : Méthodes de modification des protéines

La dénaturation des protéines entraîne des modifications de leur structure secondaire, tertiaire et quaternaire sans altérer leur structure primaire. Cela permet de modifier leurs propriétés techno-fonctionnelles et le développement d'ingrédients d'intérêt pour diverses formulations alimentaires (Nasrabadi et al., 2021; Ustunol, 2014). Parmi les méthodes de modification physiques, le traitement thermique est généralement le plus couramment utilisé (Peng et al., 2016).

### 1.5.1. pH

Les protéines sériques sont particulièrement sensibles à la dénaturation thermique et aux interactions entre les ions  $\text{Ca}^{2+}$  et les protéines. Elles sont susceptibles de s'agréger et de précipiter à cause des interactions électrostatiques à des pH voisins de 4,5 et 4,6. A ces pH, donc près du point isoélectrique (pI) des protéines sériques, la b-Lg et l'a-La dénaturées thermiquement forment des agrégats insolubles par des liaisons électrostatiques, des interactions hydrophobes et des forces de Van der Waals. À son pHI, une protéine a une charge nette égale à zéro : elle comporte des groupements chargés négativement et positivement qui peuvent se lier aux groupements des autres protéines et ainsi s'agréger et précipiter (Galani et Owusu Apenten, 1996). Lorsque le pH s'éloigne du pI, il y a une

augmentation des charges répulsives suivie d'un déplissement de la protéine. Il n'y a donc pas d'agrégation car le déplissement de la protéine est favorisé grâce aux répulsions électrostatiques (**Galani et Owusu Apenten, 1996**).

### 1.5.2.Matière sèche

Un autre facteur influençant la vitesse de dénaturation est la concentration en matières sèches. (**Nielsen et al., (1973)**) ont étudié ce facteur et rapporté que la concentration en solides totaux, qui sont principalement constituées de lactose, affecte fortement la vitesse relative de dénaturation de chacune des protéines sériques prises individuellement dans un lactosérum doux concentré sous vide. Le pourcentage de protéines dénaturées en chauffant le lactosérum pendant 20 minutes à 80°C baisse de 80 à 40% lorsque les solides totaux passent de 9 à 44%. Ces auteurs suggèrent que les protéines de lactosérum sont plus sensibles à la chaleur lorsque la concentration en lactose est faible.

### 1.5.3.Chlorure de sodium

La force ionique joue un rôle important sur la stabilité thermique des protéines. En général tous les sels, au dessus d'une certaine concentration, favorisent l'agrégation en accroissant l'influence des interactions hydrophobes par une diminution des répulsions électrostatiques (**Cayot et Lorient, 1998**).

Le chlorure de sodium (NaCl) est un ingrédient très utilisé dans l'industrie alimentaire. Deux effets opposés sur la dénaturation des protéines qui lui ont été attribués :

\*un effet protecteur du NaCl vis-à-vis de la dénaturation thermo-induite de la protéine a été rapporté par **Xiong et al., (1993), Renard et al., (1998) et Verheul et al., (1998)**.

**Renard et coll. (1998)** expliquent la capacité du NaCl à stabiliser la  $\beta$ -lactoglobuline par l'aptitude de ces ions à favoriser la formation de dimères de la protéine : la première étape de la dénaturation étant la dissociation des dimères protéiques en monomères, le NaCl ralentit cette étape, d'où cet effet stabilisateur.

\* toutefois, il semblerait que le NaCl entraîne également l'augmentation de la taille des agrégats formés : il s'agirait d'une augmentation de la taille des agrégats constante dans le temps et dans les conditions de la manipulation. Il est aussi possible que le NaCl augmente la solubilité des protéines dans la solution, ce qui provoquerait une augmentation de leur déplissement d'où une agrégation facilitée. Dans le même ordre d'idée, **Aymard et coll. (1996)** constatent qu'à pH 2, une augmentation de la force ionique par addition de NaCl de 0 à 30 mM permet d'augmenter le taux de branchement et la flexibilité des agrégats linéaires formés à ce pH.

La majorité des études semblent en accord pour affirmer qu'il existe une concentration optimale de NaCl permettant d'obtenir les meilleures conditions d'agrégation possibles et que cette concentration dépend fortement des autres propriétés du milieu et des conditions opératoires (pH, concentration en  $\beta$ -lactoglobuline, température et durée de traitement...) (Gaucheron, 2004).

#### 1.5.4. Traitement mécanique

Un traitement mécanique appliqué à une solution protéique en absence de tout autre traitement (chauffage ou une modification des conditions de milieu) n'entraîne généralement pas de dénaturation, ni d'agrégation des protéines. Cependant, Sanchez et Paquin (1997), Considine et al., (2007) et Bouaouina et al., (2006) ont rapporté une dénaturation et une agrégation partielle des protéines lorsque la vitesse de cisaillement appliquée excède une valeur critique. Lorsqu'un traitement mécanique est appliqué simultanément ou postérieurement à un traitement thermique qui diminue la solubilité des protéines, il va favoriser leur agrégation.

En effet, lors d'un traitement thermique sans agitation, la fréquence des collisions entre les objets n'est liée qu'au mouvement brownien et au nombre d'objets. Au contraire, le cisaillement induit une augmentation de la fréquence des collisions, conduisant ainsi à une agrégation plus rapide (McClements, 1999). Pour les protéines de lactosérum, ce mécanisme a déjà été observé par Renard et al. (2002) à pH 7 et par Hill et al. (2006) à pH 2. Dans les deux cas, un traitement thermique suivi d'un traitement mécanique à cisaillement constant appliqué à froid dans un rhéomètre conduit à la formation d'agrégats de grande taille ( $> 1 \mu\text{m}$ ) à pH neutre et à la formation de fibrilles à pH acide.

#### 1.5.5. Traitement thermique

Le traitement thermique est une technologie de référence couramment utilisée dans l'industrie agroalimentaire, notamment l'industrie laitière pour des applications variées (pasteurisation, séparation de composés d'intérêt, etc.) (Guo, 2019; Toepfl et al., 2006; Wang et al., 2008).

Le traitement thermique des produits riches en protéines modifie le degré de dénaturation et d'agrégation, conduisant à un produit final avec des propriétés physicochimiques différentes. En effet, le traitement thermique induit des interactions entre les protéines et le degré de force et ainsi que la nature de ces interactions dépend de la structure moléculaire et de la conformation de chaque protéine (Malik et Saini, 2019; Triani et Foegeding, 2019).

Ainsi, lors du traitement thermique des protéines, il se produit une altération de la structure secondaire, conduisant à leur dénaturation partielle ainsi qu'à la modification de leurs propriétés telles que le changement du point isoélectrique, l'augmentation de l'hydrophobicité de surface, la formation d'agrégats, l'augmentation de l'élasticité et de la viscosité, etc. En d'autres termes, les modifications structurelles induites par les traitements thermiques sont favorables à l'amélioration non seulement des propriétés fonctionnelles de protéines prétraitées mais également des rendements d'hydrolyse enzymatique (**Chanasattru et al., 2007; Moro et al., 2011, 2013; Sullivan et al., 2009**).

Ainsi, plusieurs études ont démontré dans la littérature que dans certaines conditions (température et durée de prétraitement), certaines propriétés fonctionnelles de diverses protéines alimentaires ainsi que leur susceptibilité à l'hydrolyse enzymatique peuvent être améliorées, à la suite d'un prétraitement thermique. Par exemple, **Lam et Nickerson (2015)** ont démontré dans leur étude que les prétraitements thermiques ont amélioré les propriétés émulsifiantes des isolats protéiques de lactosérum, tandis que **Kim et al. ; (2005)** ont rapporté une amélioration des propriétés rhéologiques, notamment les propriétés moussantes de la  $\beta$ -lg prétraitée thermiquement. **Moro et al., (2011)** ont aussi rapporté une amélioration des propriétés moussantes de la  $\beta$ -lg prétraitée thermiquement. **Chanasattru et al., (2007)** ont rapporté quant à eux, que les propriétés gélifiantes de la  $\beta$ -lg ont été améliorées après les prétraitements thermiques en présence comme en absence de cosolvants. Cependant, il est rapporté également que dans certaines conditions (température et durée de prétraitement), les prétraitements thermiques réduisent certaines propriétés fonctionnelles de différentes protéines (ex. le blanc d'œuf), notamment la gélification et les propriétés moussantes, qui sont souvent des propriétés souhaitables pour les formulations alimentaires (**Jovanović et al., 2016**). Par exemple, **Lam & Nickerson (2014)** ont rapporté une altération des propriétés émulsifiantes de la  $\beta$ -lg prétraitée thermiquement, tandis que **Moro et al., (2011)** ont constaté une diminution des propriétés moussantes de la  $\beta$ -lg soumis à un prétraitement thermique conventionnel. De même, **Dissanayake et Vasiljevic (2009)** ont rapporté une diminution des propriétés fonctionnelles (moussantes et émulsifiantes) des protéines du lactosérum prétraitées thermiquement, tandis que **Resch et al., (2005)** ont rapporté une altération des propriétés gélifiantes de la  $\beta$ -lg prétraitée thermiquement. Par ailleurs, plusieurs études ont montré que les prétraitements thermiques dans une certaine mesure peuvent améliorer l'hydrolyse des protéines du lactosérum. Par exemple, **Mullally et al., (1998)**, **Lung et al., (1991)**, **Leeb et al., (2011)**, ainsi que **Cheison et al., (2010; 2011)**, ont rapporté une

amélioration de l'hydrolyse enzymatique de la  $\beta$ -lg soumise à un prétraitement thermique (à des températures de 80-90 ° C).

Sous l'effet de traitements thermiques ou thermomécaniques, les protéines sériques se dénaturent, puis s'agrègent (**Clark, 1998 ; Clark et coll., 2001 ; Gosal et al., 2000**). L'agrégation thermique des protéines sériques a fait l'objet d'un grand nombre d'études (par exemple, **de la Fuente et al.,(2002)** et en particulier l'agrégation de la b-Lg qui a souvent été utilisée comme protéine modèle représentative (**Aymard et al., 1996 ; Verheul et al., 1998**).

La chaleur est l'un des principaux agents physiques induisant la dénaturation des protéines. La dénaturation d'une protéine native se définit comme un changement dans sa structure tridimensionnelle, qu'il concerne le niveau secondaire, tertiaire ou quaternaire. La structure des protéines peut être affectée de façon réversible ou irréversible.

Une dénaturation irréversible se déroule en deux étapes. La première est réversible et consiste en une rupture des liaisons intramoléculaires de l'état natif de la protéine. Cela correspond à la disparition d'une partie de la structure tridimensionnelle de la protéine. La seconde étape est le déplissement de la protéine qui mène à un ou plusieurs états dénaturés (**Galani et OwusuApenten, 1996**).

Un traitement thermique doux (par exemple à près de 60°C) permet le déplissement des protéines sériques et une exposition des groupements -SH, alors qu'un traitement thermique supérieur à 65°C mène à la dénaturation et à l'agrégation des protéines du lactosérum. L'ordre de dénaturation des différentes protéines sériques est le suivant:

immunoglobuline > sérum albumine bovine > b-lactoglobuline > a-lactalbumine (**Morr et Ha, 1993**). La vitesse de dénaturation est également influencée par le pH, l'environnement minéral et la concentration en solides.

#### 1.5.6. Ultrasons

La technologie des ultrasons est une méthode de traitement physique émergente athermique qui peut entraîner des changements significatifs de certaines propriétés physicochimiques et fonctionnelles des protéines (**Stefanović et al., 2014**). Les ultrasons sont composés d'ondes sonores de grande intensité (10 -1000 W/cm<sup>2</sup>) et de basse fréquence (entre 20-100 kHz) dépassant la limite de l'audition humaine (**Guo, 2019; Jiang et al., 2018; Jovanović et al., 2016; Stefanović et al., 2014**).

En fonction de leur intensité, les ultrasons peuvent être divisés en ultrasons à faible intensité et en ultrasons à haute intensité. Les ultrasons de faible intensité ont des fréquences supérieures à 100 kHz et des intensités inférieures à 1 W/cm<sup>2</sup>, ce qui est non invasif et non destructif. Quant aux ultrasons de haute intensité (supérieure à 1 W/cm<sup>2</sup>), ils ont une fréquence de 20-100 kHz (**Guo, 2019; Jiang et al., 2018; Ma et al., 2018; Stefanović et al., 2014**).

Les ultrasons de haute intensité ont suscité un grand intérêt non seulement en raison de leur faible impact sur les propriétés fonctionnelles des protéines, mais aussi pour leur utilisation comme prétraitement des protéines avant hydrolyse enzymatique. Par exemple, **Ma et al., (2018)** ont démontré un changement de la structure de la  $\beta$ -lg et l'amélioration de ses propriétés antioxydantes à la suite d'un prétraitement par ultrasons à haute intensité (durant 20 min, fréquence de 20 kHz, intensité de 60 W/cm<sup>2</sup>). **Sun et al., (2014)** ainsi que **Jiang et al.,(2018)** ont démontré l'amélioration des propriétés physico-chimiques et fonctionnelles des concentrés protéiques du lait et des isolats protéiques de lactosérum, respectivement. De même, **Stefanovic et al., (2017)** ont rapporté une amélioration de la solubilité ainsi que des propriétés moussantes et émulsifiantes des protéines du blanc d'œuf prétraitées par les ultrasons de haute intensité (fréquence 20 kHz, amplitude 40%, durant 2-20 min). D'autres études ont démontré l'amélioration des propriétés moussantes des protéines de lactosérum, l'inactivation des enzymes et des bactéries après l'application des ultrasons à haute intensité (**Guo, 2019**). Cependant, certains auteurs ont rapporté une altération de certaines propriétés fonctionnelles des protéines alimentaires. C'est le cas notamment de **Arzeni et al.,( 2012)**, qui ont montré que la solubilité de la protéine de blanc d'œuf était diminuée à la suite des prétraitements par ultrasons (20 kHz, 20 min). De même, **Sun et al., (2014)** ont rapporté une diminution de certaines propriétés rhéologiques, en l'occurrence la viscosité des concentrés protéiques du lait.

Les effets des ondes ultrasonores sur les protéines sont très complexes et une augmentation ou une diminution de la sensibilité des protéines à l'hydrolyse peut avoir lieu en fonction des conditions et de l'intensité du prétraitement, ainsi que de la nature de la protéase ou de la protéine utilisée (**Guo, 2019; Ma et al., 2018**). En effet, les changements dans les molécules de protéines provoqués par l'énergie ultrasonique pourraient être expliqués par les phénomènes de cavitation, l'agitation dynamique, les contraintes de cisaillement pouvant conduire à la rupture des liaisons covalentes, la génération de peptides de petits poids moléculaires et la fragmentation de gros agrégats en particules plus petites qui altère les propriétés fonctionnelles des protéines (**Stefanović et al., 2014**). De plus, les ultrasons



peuvent produire des radicaux libres hautement réactifs à partir de molécules d'eau entraînant des réactions avec d'autres molécules (Guo, 2019; Jovanović et al., 2016; Zhao et al., 2019).

En résumé, la technologie des ultrasons a suscité une grande attention au cours des dernières années, car comparée aux technologies conventionnelles, elle constitue une alternative rapide, efficace, fiable et une faible consommation d'énergie. Elle a également le potentiel pour une grande variété d'applications, notamment pour le développement de nouveaux produits ayant une fonctionnalité distinctive (Guo, 2019; Jiang et al., 2018; Stefanović et al., 2014). Il n'en demeure pas moins que cette technologie peut avoir des effets indésirables sur certaines propriétés fonctionnelles des protéines, comme vu précédemment.

### 1.6. Lactose

Il est le principal constituant du lactosérum de fromagerie ; c'est un diholoside constitué par l'union d'une molécule de  $\alpha$  ou  $\beta$ -D- glucose et d'une molécule de  $\beta$ -D-galactose, ce qui est à l'origine de la présence de deux lactoses stéréo-isomères réducteurs (Luquet et Fracois,1990). Cette richesse en lactose en fait un auxiliaire dans le brunissement non enzymatique ou la réaction de Maillard quand il est associé aux protéines du sérum, mais surtout il constitue un très bon support d'arome et absorbeur de pigments (Luquet,1990) ; le lactose est caractérisé par une solubilité limitée et un pouvoir sucrant faible. Il est le seul sucre présentant une importance biologique déterminante pour la vie de l'être humain et de nombreux autres animaux et contribue à stabiliser le pH intestinal (Visser et al.,1988), comme il intervient dans la fixation du calcium et sa consommation permet par conséquent de lutter contre le rachitisme (Visser et al.,1988). Ainsi l'hydrolyse du lactose présente un intérêt nutritionnel évident pour les individus alactasique. En outre elle présente un intérêt technologique qui permet l'amélioration du pouvoir sucrant ; l'augmentation de la solubilité qui se traduit par la facilité de conservation ainsi que la simplification des techniques de concentration et de séchage puisqu'il n'y a plus à contrôler une éventuelle cristallisation du lactose (Kadri,1985 ;Ryder 1988).

### 1.7.Minéraux

Selon certaines pratiques fromagères, il y a ajout de sel, ce dernier avec toutes les matières minérales en solution dans le lait se retrouve dans le lactosérum. Les 8 à 10% des matières salines de l'extrait sec de sérum sont constitués pour plus de 50% de chlorures de sodium et de potassium et pour le reste de différents sels de calcium, principalement sous forme de phosphate de calcium (Vrignaud,1983) ; ces sels minéraux constituent les éléments

indésirables du sérum (Mereo,1971) ,en effet, il semblerait qu'une quantité relativement élevée constitue un obstacle à l'utilisation du lactosérum dans l'alimentation humaine et surtout l'alimentation infantile, il est donc avantageux de déminéraliser le sérum partiellement grâce à des techniques physico-chimiques telle que l'électrodialyse (Linden et l'orient,1994).

### 1.8. Valorisation et utilisation du lactosérum

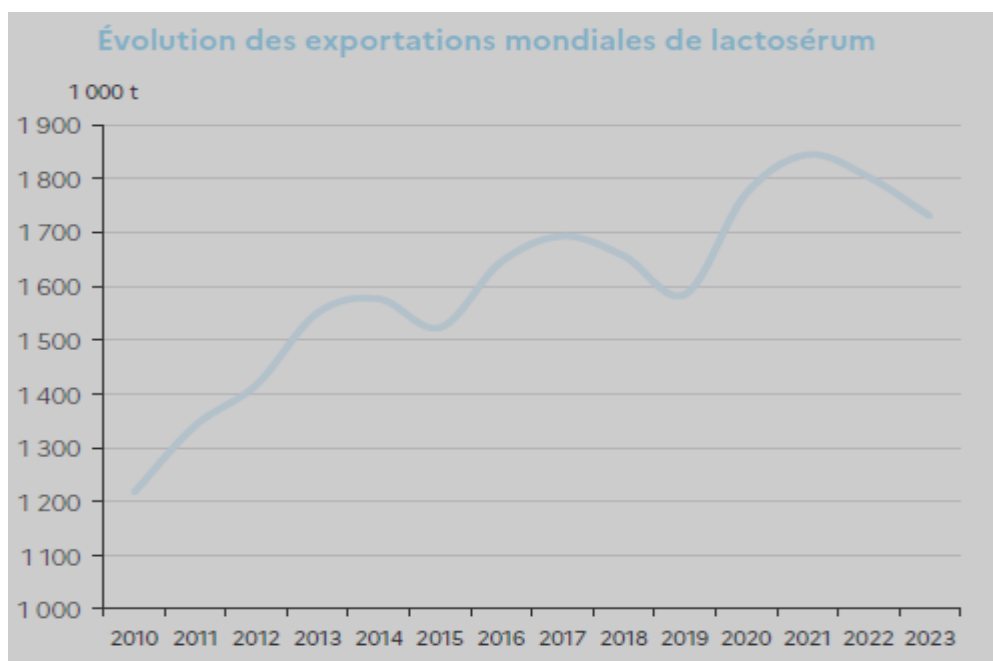
Le lactosérum engendre d'importants problèmes environnementaux et sanitaires en raison de sa production en grand volume et de sa forte teneur en matières organiques. En effet, d'après plusieurs auteurs, lors de la fabrication d'un kilogramme de fromage, environ neuf litres de lactosérum sont générés (Guimarães et al., 2010; Hausjell et al., 2019a; Yadav et al., 2015). Il est à noter que le déversement et l'élimination du lactosérum dans les égouts municipaux ont été prohibés par des restrictions législatives en vigueur dans plusieurs pays. En effet, le déversement incontrôlé du lactosérum sur la terre crée de graves problèmes de pollution environnementale, affectant les caractéristiques physicochimiques du sol. Conséquemment, cela provoque une diminution des rendements des cultures (Panesar et al., 2007; Smithers, 2008; Yadav et al., 2015). De plus, lorsqu'il est rejeté dans les plans d'eau, le lactosérum réduit l'oxygène dissout, empêche la biodégradabilité et constitue ainsi un risque majeur pour la vie aquatique, de même que pour la santé humaine (Yadav et al., 2015). Cela constitue une préoccupation majeure pour les industries laitières, notamment à cause des fortes demandes biologique et chimique en oxygène, qui conduisent à la nécessité d'installations de traitement coûteuses (Chandrapala et al., 2016; Prazeres et al., 2012), Cependant, une quantité importante du lactosérum produit reste encore inutilisée. En effet, il a été estimé qu'environ seulement 50% de la quantité globale (dans le monde entier) du lactosérum est transformé en divers produits alimentaires (Guimarães et al., 2010; Mollea et al., 2013; Yadav et al., 2015).

De ces produits issus de la transformation du lactosérum, environ 45% sont utilisés directement sous forme liquide, 30% sous forme de lactosérum en poudre, 15% comme lactose et divers sous-produits, et le reste sous forme de concentrés de protéines de lactosérum (Chatzipaschali & Stamatis, 2012; Kosseva et al., 2009; Yadav et al., 2015). Toutefois, ce pourcentage de lactosérum valorisé devrait augmenter au fil des années, notamment par la poursuite des efforts de recherche dans le domaine de l'utilisation du lactosérum

### 1.9. Marché du lactosérum

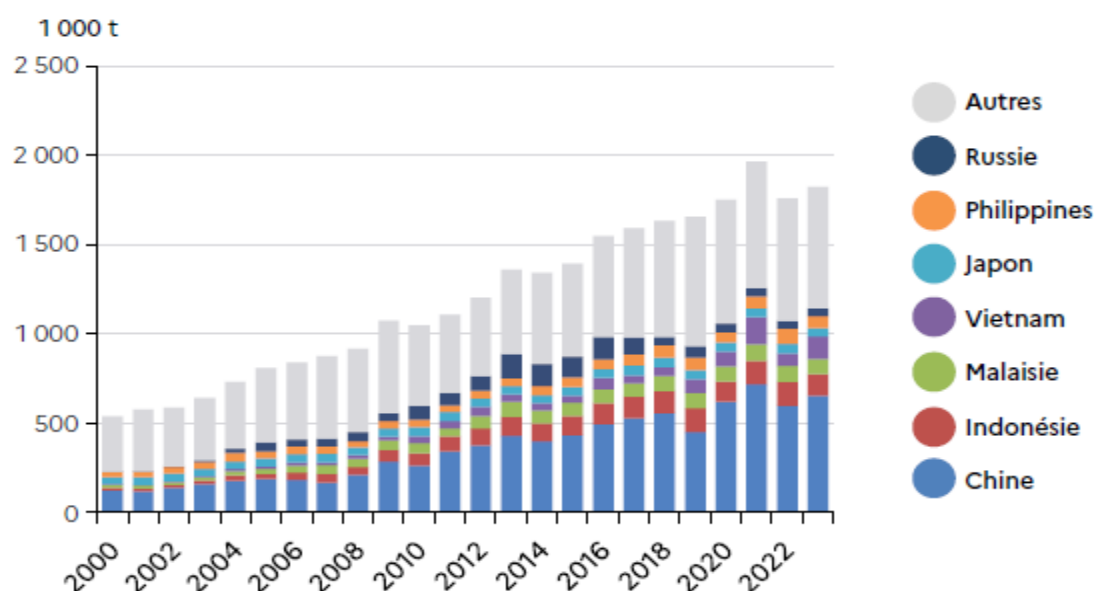
Le marché du lactosérum doux a connu une croissance significative en raison de plusieurs facteurs, tels que la prise de conscience croissante des avantages pour la santé offerts par les constituants du lactosérum et l'augmentation de la conscience sanitaire des consommateurs (Tip, 2020).

Alors que les statistiques internationales récentes montrent que les exportations mondiales de lactosérum ont grossi de 42,2 % entre 2010 et 2023. Elles ont atteint un pic en 2021 avec près de 1,85 million de tonnes exportées, échanges intracommunautaires non compris. Le rythme de croissance des exportations a néanmoins ralenti depuis 2013 : en effet, entre 2010 et 2013, les envois mondiaux avaient grossi de 27,4 %, pour n'augmenter que de près de 11,6 % entre 2013 et 2023. Cette progression est par ailleurs beaucoup moins linéaire depuis 2013. Les exportations se sont repliées en 2015 puis en 2019 et enfin en 2022 et 2023. Ces années correspondent également à des périodes de baisse des cotations du lactosérum en poudre (figure 5); (FranceAgriMer d'après douanes via Trade Data Monitor)



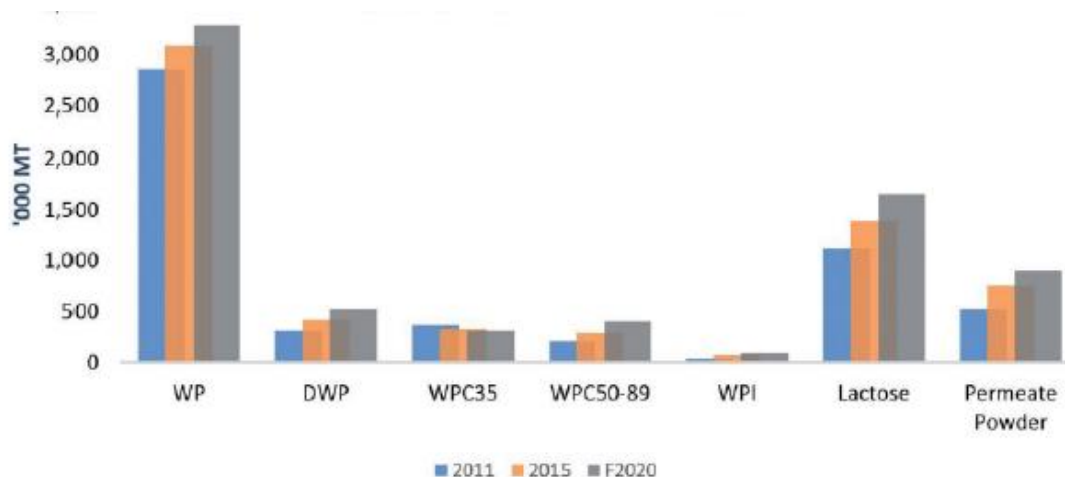
**Figure 5:** Evolution des exportations mondiales de lactosérum (FranceAgriMer d'après douanes via Trade Data Monitor)

Les importations mondiales (hors pays de l'Union européenne) sont largement dominées par les achats asiatiques et en particulier chinois. Sur les graphiques présentés ci-dessous, les achats chinois représentent entre 20 à 35 % des importations globales (hors UE). La Chine est le principal importateur sur toute la période étudiée. Les débouchés qui complétaient le podium ont bien changé depuis 2000. L'Indonésie et la Malaisie sont désormais des importateurs majeurs (figure6).



**Figure6 : Evolution des principaux importateurs mondiaux de lactosérum (FranceAgriMer d'après douanes via Trade Data Monitor)**

Les principaux ingrédients issus du lactosérum sont dominés par les poudres de lactosérum suivi du lactose et du perméat puis viennent les autres produits avec des taux moins importants mais qui tendent à augmenter (Affertsholt et Pedersen, 2017); cela est illustré dans la figure7.

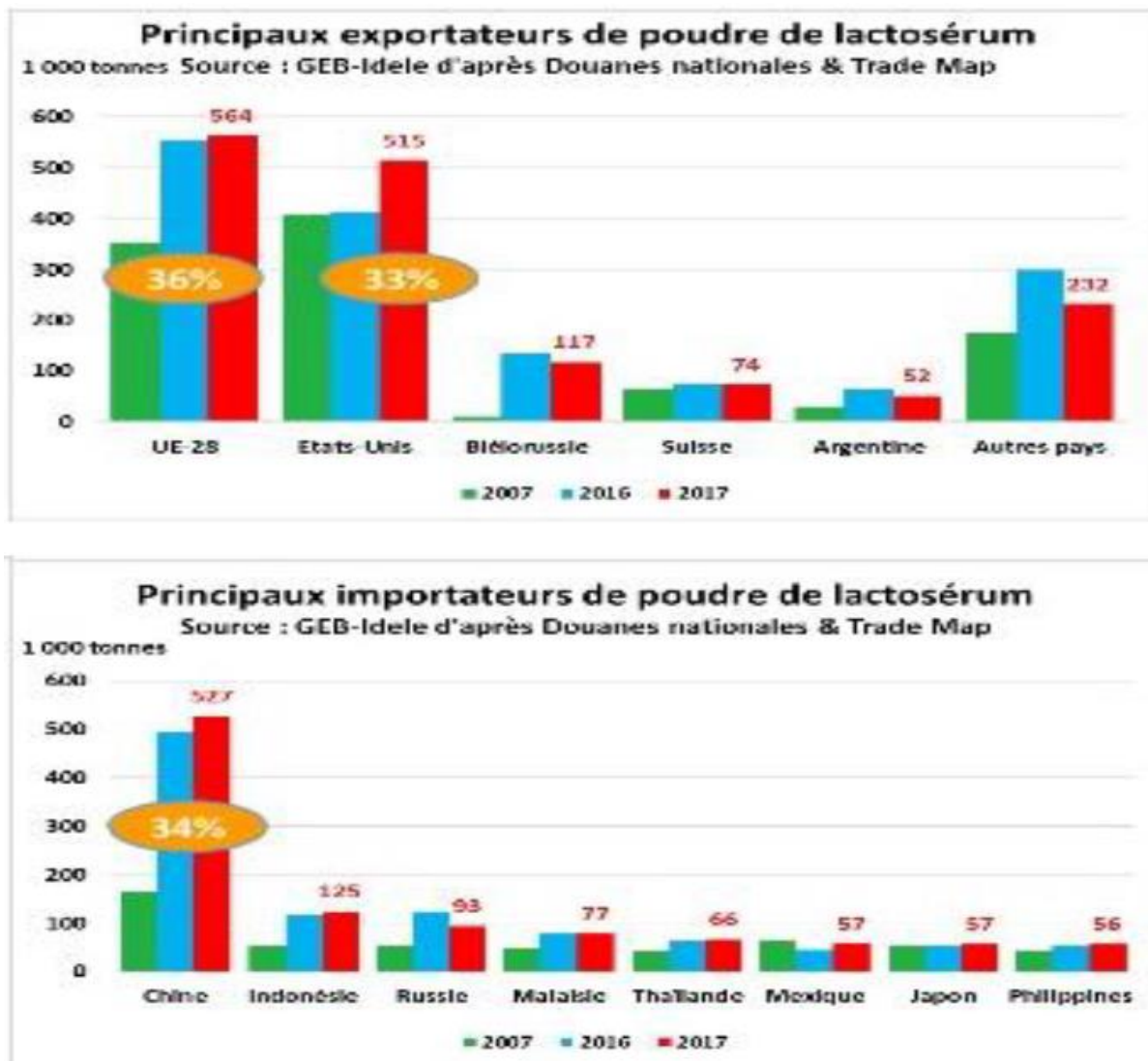


**Figure7 : Production mondiale des ingrédients de lactosérum (Affertsholt et Pedersen, 2017)**

En ce qui concerne les statistiques au niveau national; depuis 2013, la production Algérienne de fromage est de 1540 tonnes , ce qui se traduit par une production d'environ 14 millions de litres de lactosérum (FAO-ONU,2017).

L'Algérie a importé en 2017 environ 2343tonnes de poudre de lactosérum avec une facture de deux millions d'euro (Belattar, 2018).

Au niveau international, les cinq pays exportateurs de poudre de lactosérum fournissent 85% de ce produit. Les deux principaux exportateurs sont l'union européen et les USA. Alors que les 10 pays importateurs sont situés en Asie avec la chine en tete de classement.ils importent 75% de lactosérum (You, 2018). La figure8 présente les différents pays exportateurs et importateurs dans le monde.



*Figure8 : Les différents pays exportateurs et importateurs dans le monde.*

Les principaux acteurs du marché sont Eurosérum, Lactalis ingrédients, Wheyco, Leprino Food, Saputo ingrédients, Agropur, Arla Food, Hilmar ingrédients, Milky whey..(Tip,2020)

### 1.10.Pouvoir polluant du lactosérum

Pendant longtemps, le lactosérum a constitué un effluent de l'industrie fromagère. Par sa composition riche en matière organique, son rejet dans l'environnement constitue une source de pollution à cause de sa demande biochimique en oxygène qui est très élevée.

La DCO du lactosérum est de 100 000 mg d'O<sub>2</sub>/l et la DBO varie entre 40 000 et 60 000 mg d'O<sub>2</sub>/l (Yorgun et al., 2008). Cela génère une diminution du contenu en oxygène dissous et

provoque des problèmes de toxicité et de modification des propriétés physicochimiques des écosystèmes aquatiques (**Valencia et al., 2009 ; Cordoba,2013**).

Le lactosérum engendre une pollution organique importante soit : 1litre correspond a environ 85% de la pollution journalière générée par habitant (**Laplanche et al.,2006**).

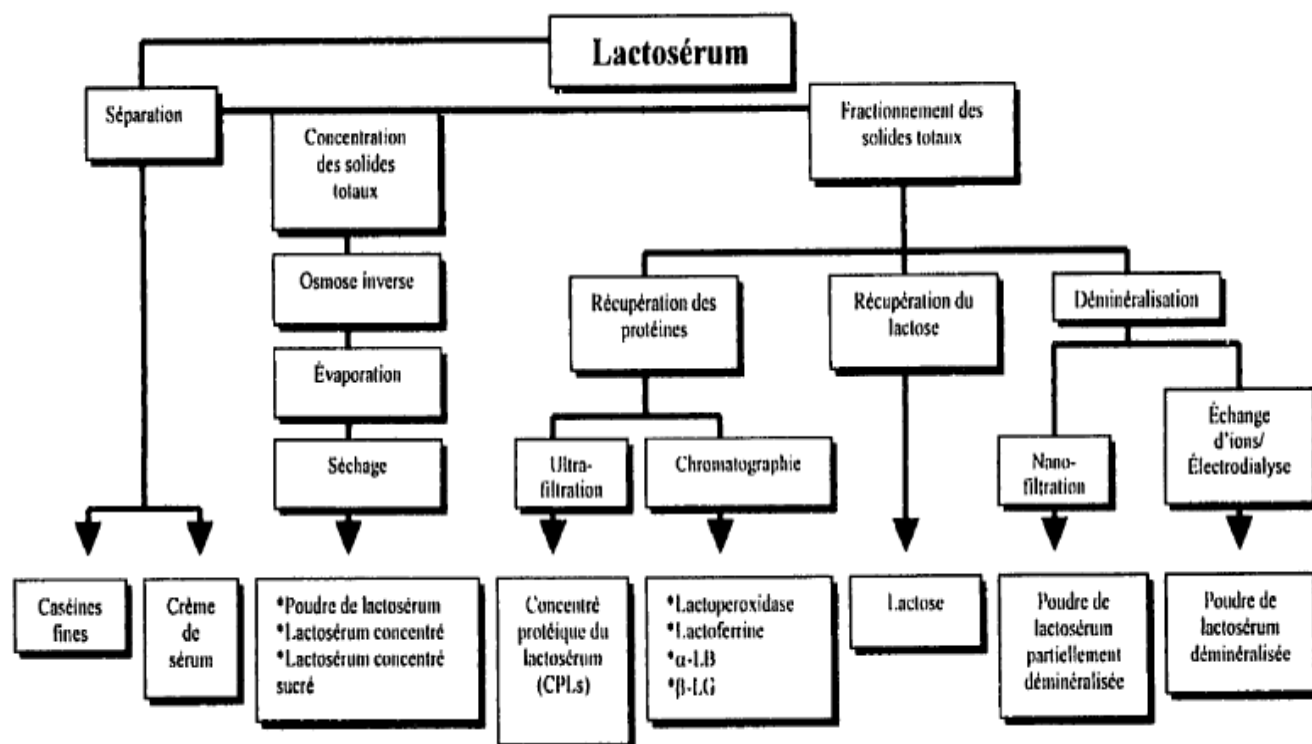
Les quantités massives produites de lactosérum le rendent un polluant majeur pour l'environnement.10 L du lait donne 1 Kg du fromage et environ 9 L de lactosérum (**Essadaoui, 2012**). En effet, l'industrie fromagère rejette 47 % du lactosérum produit dans les cours d'eau et les rivières (**Papademas et Kotsaki, 2019**).

Depuis 2013, la production algérienne de fromage est estimée à 1540 tonnes, ce qui se traduit par une production d'environ 14 millions de litres de lactosérum (**FAO, 2017**).

Le cout de traitement de lactosérum en satation d'épuration élève le prix de revient des spécialités fromagères issues du lait. L'épandage est également une destination envisagée mais les volumes annuels produit (on parle de 14millions de tonnes de lactosérum produit annuellement en France et de 100millions dans le monde) saturent vite cette solution. Enfin si on se réfère à la composition du lactosérum. On y retrouver des composés d'interet : d'où la possibilité de valorisation (**Bergel et al.,2004**).

### **1.11. Procédés et produits de traitement du lactosérum**

Même si le lactosérum contient des nutriments de grande valeur.c'est seulement au cours des dernières années que de nouveaux procédés industriels furent développés pour la fabrication de produits sériques de haute qualité. Le diagramme illustré dans la figure9 : résume les différents procédés utilisés dans le traitement du lactosérum et les produits finis obtenus (**dairy processing handbook ,1995**).



**Figure9** : Les différents procédés utilisés dans le traitement du lactosérum et les produits finis obtenus (by dairy processing handbook ,1995).

La valorisation du lactosérum en alimentation humaine et en industrie chimique et pharmaceutique est rendue possible grâce aux crackage pour obtenir , par fractionnement des composés protéiques et glucidiques(Moletta,2002 ;Chistansen et al.,2004) du fait que sa température et sa composition favorisent la croissance bactérienne, le lactosérum est soit soumis aux procédés industriels tout de suite après collecte, soit il est rapidement refroidit à 5°C pour arrêter temporairement la croissance bactérienne (Dairy processing handbook,1995).

#### a. Elimination de l'eau

L'eau, principal constituant du lactosérum est éliminé soit par concentration, qui se fait par évaporation sous vide ou osmose inverse (Thomas et al.,2008) et le séchage qui se fait avec deux types de procédés : le séchoir à cylindres ou le séchage par atomisation (DeWit,2001).

#### b. Extraction des protéines sériques

Elle se fait généralement par ultrafiltration qui retient principalement les protéines sériques et les lipides, d'où l'intérêt de délipider d'abord le lactosérum par microfiltration. Le retentat



d'ultrafiltration après séchage donne lieu à des concentrés de protéines sériques (CPL) contenant de 40 à 80% de protéines (**Chen et al.,2020**).alors que la chromatographie échangeuse d'ions donne après séchage par atomisation des isolats de protéines sériques (IPL) contenant 95% de protéines (**Goulding et al.,2020**). Le perméat issu de la concentration des protéines du lactosérum doit être traité car il contient 85% de lactose (**Tyagi et al.,1990**).

#### **c. Elimination des minéraux**

La déminéralisation partielle du lactosérum se fait par nanofiltration. Bien que cette dernière soit la technologie la plus économique pour la déminéralisation du lactosérum, un degré plus élevé de déminéralisation nécessite l'électrodialyse ou l'échange d'ions (**Chen et al.,2019**).

#### **d. Extraction du lactose**

Elle peut se faire par un procédé de cristallisation. Cette dernière permet d'isoler le lactose sous forme de cristaux. La première étape consiste à concentrer le lactosérum par évaporation.une fois concentré, ce dernier est soumis à une cristallisation par refroidissement. Les cristaux de lactose obtenus sont séparés puis broyés ( ils peuvent parfois être soumis à un raffinage) et séchés afin d'obtenir une poudre uniforme (**Bardy et al.,2016**).

La valorisation des différents constituants du lactosérum a permis d'obtenir différents produits : les poudres de lactosérum, les concentrés de protéines de lactosérum, des isolats de protéines de lactosérum, des hydrolysats de protéines de lactosérum, du lactose et des protéines individuelles (**Kosseva et al.,2009 ; Macwan et al.,2016**).

#### **e.Poudre de lactosérum**

La poudre de lactosérum est simplement obtenue par séchage du concentré de lactosérum, son utilisation est limitée à cause de sa faible teneur en protéines et une forte teneur en minéraux (**Dattatreya et al.,2007**).

#### **f.Concentrés de protéines sériques(CPL) et isolats de protéines sériques(IPL)**

Les protéines du lactosérum peuvent être concentrées jusqu'à 80% des solides totaux par ultrafiltration. Il y a production de divers concentrés de protéines : des concentrés CPL34, CPL60, CPL80 qui contiennent successivement 34%,60%,80% de protéines (**Guo,2019**).

Les concentrés protéiques obtenus par techniques de chromatographie sont appelés isolats de protéines de lactosérum(IPL) et ont une teneur en protéines d'environ 90%. Ils sont complètement délactosés et ont une charge minérale faible (**Considine et al.,2011**).

#### **g.Hydrolysats protéiques du lactosérum(HPL)**

Les hydrolysats sont des protéines de lactosérum prédigérées et partiellement hydrolysées qui, par conséquent, sont plus facilement absorbées, mais leur cout est généralement plus élevé (**Foegeding et al.,2002**). Le processus d'hydrolyse décompose les chaines de protéines en petites fractions appelées peptides et le lactosérum fortement hydrolysé peut-etre moins allergène que d'autre formes de lactosérum (**Tunick,2008**).

#### **h. Les protéines individuelles**

L'extraction et la purification des protéines majeurs et des protéines mineurs pour une meilleure exploitation des propriétés des protéines (**Vignola,2002**).

#### **i. Lactose**

c'est l'ingrédient le plus abondant obtenu par la cristallisation du lactosérum ou du perméat du lactosérum.il est utilisé dans la formulation d'aliments infantiles, en confiserie, en boulangerie, et dans les produits pharmaceutiques (**Holsinger,1988**).

### **1.12.Modes d'utilisation**

Les différents modes d'élimination et d'utilisation du lactosérum ont présenté un défi pour l'homme depuis qu'il a commencé à fabriquer du fromage. Ces modes de valorisation et d'élimination ont été décrits dans plusieurs publications (**Mawson,1994 ;Siso,1994 ; Smithers,2008**) et peuvent être illustrés dans trois catégories :

#### **\*Utilisation directe**

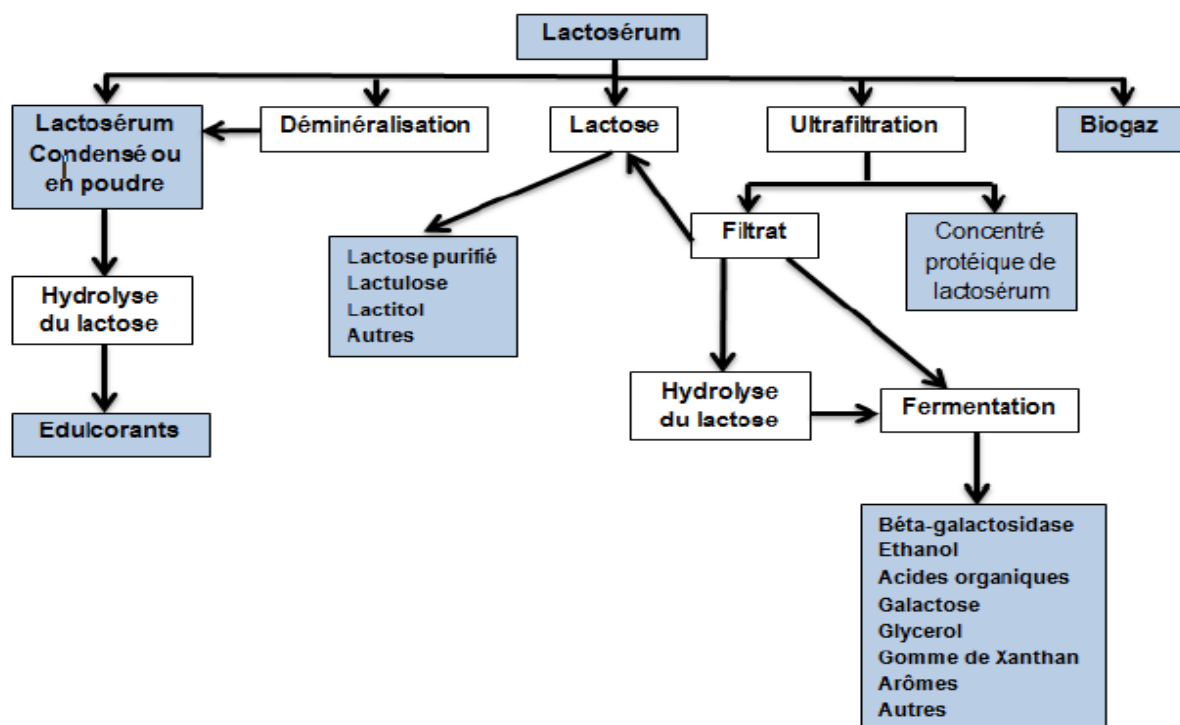
le lactosérum est utilisé avec peu ou sans traitement ultérieur. Cela comprend l'utilisation traditionnelle du lactosérum comme ingrédient alimentaire pour les animaux d'élevage et comme engrais pour l'agriculture. l'inconvénient avec cette utilisation est relié à la trop forte demande en oxygène du lactosérum (**Mawson,1994**) .

### \*Stabilisation du lactosérum

Le lactosérum est traité par des moyens physiques et/ou chimiques afin de le rendre beaucoup plus stable et résistant à la dégradation microbienne. Parmi les techniques utilisées, on trouve : la récupération des protéines par ultrafiltration, la dénaturation des protéines par la chaleur, la concentration par osmose inverse et/ou évaporation suivie d'une cristallisation du lactose, et la transformation du lactosérum en poudre. Dans certains de ces procédés, le lactose et les sels du lait retenus dans le produit sont également manipulés pour étendre les possibilités d'exploitation de ces produits (Mawson,1994).

### \*Processus de conversion

Le lactose du lactosérum est converti en un autre composé par les activités de micro-organismes (bioconversion) ou par une réaction chimique. Ces procédés sont actuellement exploités à l'échelle commerciale (Mawson,1994) comme c'est indiqué dans la figure 10 suivante qui représente l'utilisation commerciale de lactosérum de lait.



*Figure 10 : Utilisation commerciale de lactosérum de lait.*

Les protéines, en particulier les albumines présentent un intérêt par leurs propriétés fonctionnelles comme la solubilité sur une large gamme de pH, un pouvoir moussant ou texturant ; capacité de rétention d'eau, et aptitude à la gélification. en plus de leur haute

valeur nutritionnelle liée en particulier à la présence de protéines riche en acides aminés essentiels dont la lysine le tryptophane (Marshall et al.,1998 ; Firebaugh et al.,2005 ;Morr et Ha.,1993 ;Bergel et Joel.,2004).

Les propriétés nutritionnelles et fonctionnelles des protéines du lactosérum ont rendu son utilisation possible dans de nombreux domaines de l'industrie agroalimentaire (Moletta,2002 :Damodaran,1997)(voir tableau 5).

**Tableau 5** : Applications des protéines de lactosérum (Linden et al.,1994).

Produits	Fonctions
Produits de boulangerie-biscuiterie	Apport protéique, rétention d'eau, gélifiant, texture(interaction avec gluten)
Pates alimentaires	Apport protéique , texture
Pâtisserie (meringue, génoise)	Emulsifiant, moussant , rétention d'eau, gélifiant
Confiserie (caramel, nougats...) Chocolat au lait	Emulsifiant, arôme, texture, dispersibilité
Potages, sauces	Epaississant (interaction avec amidon), émulsifiant
Plats cuisinés	Epaississant, émulsifiant, rétention d'eau
Farines lactés	Apport protéique, solubilité
Boissons lactées ou fruitées	Soluble à chaud ou /et pH acide Epaississant
Aliments diététiques et infantiles (alimentation entérale)	Apport protéique, solubilité, épaisissant
Fromages naturels et fondus	Emulsifiant, épaisissant , gélifiant
« imitation cheese, dip », pates à tartiner, coffee whitener, crèmes glacées	Emulsifiant, épaisissant
Crèmes desserts, flans, yaourts	Emulsifiant, épaisissant, gélifiant
Produits carnés (saucisse,pates,hamburgers)	Emulsifiant, épaisissant, liant , gélifiant, rétention d'eau et de matières grasses.

## 2. La mousse alimentaire

### 2.1. Généralités

Avec le développement industriel des mousses, les fabricants ont mis au point des gammes très complètes de systèmes foisonnés, de structure et de texture variées ; pour offrir au consommateur un éventail de produits, toujours plus innovants tant sur le plan organoleptique que nutritionnel. L'enjeu consiste à mettre au point la formulation des mousses industriels qui sont considérés comme produits fragiles par rapport aux produits artisanaux qui se consomment tout de suite après leur fabrication ; les mousses se sont développées rapidement avec l'évolution de notre mode de vie, doivent d'abord pouvoir être stockées et transportées en gardant leur stabilité initiale, à titre d'exemple ; les mousses laitières sont particulièrement sensibles à la rupture de la chaîne du froid et aux chocs mécaniques lors du transport (**l'actualité chimique-2005- n°288**).

### 2.2. Définition et classification

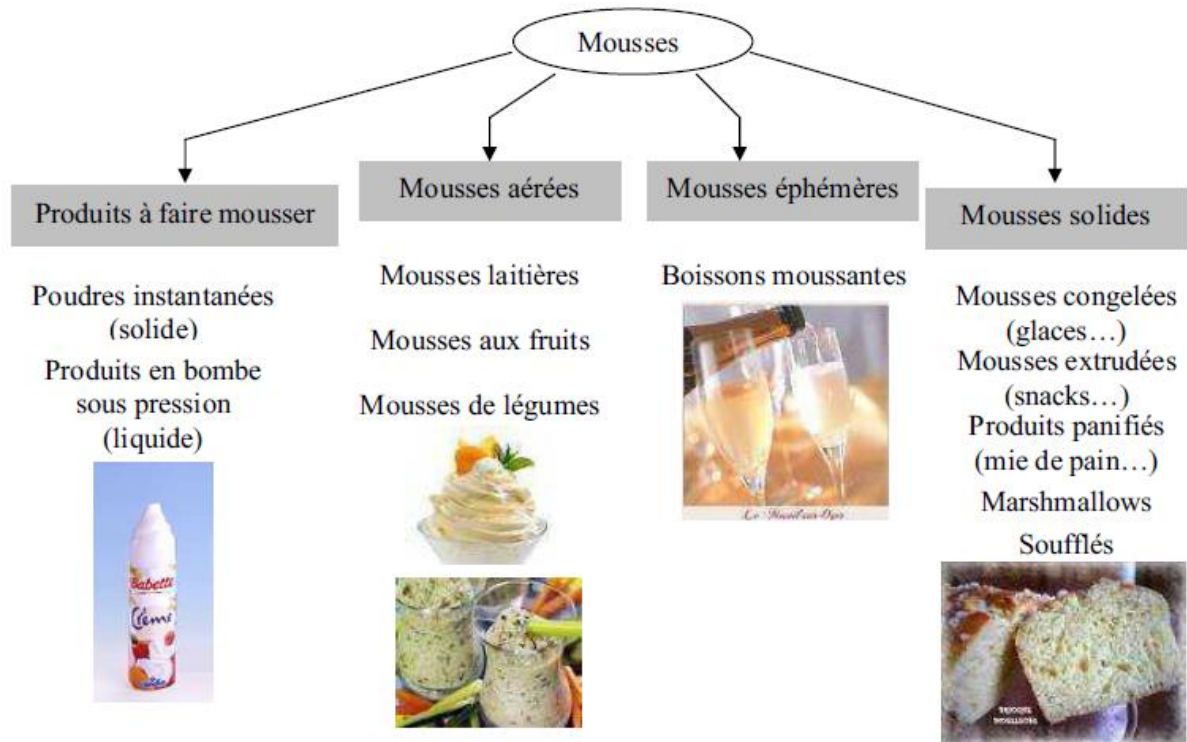
Par définition, une mousse est une dispersion homogène de bulles de gaz (comme l'azote, le dioxyde de carbone, du protoxyde d'azote ou l'air) dans une phase continue aqueuse, semi-solide ou solide. Une mousse est une dispersion de bulles de gaz dans une phase continue liquide ou semi-solide ; elle s'agit donc dans le cas le plus simple d'un système biphasique avec un mélange de deux phases non-miscibles (**Dickinson, 1992**). Il existe une grande variété de mousses alimentaires de textures très diverses, telles que les mousses de foie, de viande ou de poisson, la meringue et les blancs en neige, ou encore celles issues de l'industrie laitière, comme la crème fouettée et les crèmes glacées, etc.

Les mousses peuvent être classées selon des critères différents, en fonction de leurs propriétés physiques, morphologiques et leur stabilité.

\*La distinction mousse liquide/ mousse solide est la plus évidente : elle est directement liée à l'état physique de la phase continue. Les mousses solides proviennent généralement de mousses liquides « transformées » soit par un simple changement d'état ou de phase de la matrice (cas des crèmes glacées par congélation), soit par une réaction chimique irréversible (cas des meringues pontage lors de la cuisson des œufs en neige).

\* La différenciation morphologique des mousses, typiquement bulles sphériques/bulles hexagonales, coïncide sensiblement avec la distinction mousse humide/mousse sèche, dans la mesure où elle est étroitement liée à la fraction volumique de gaz contenue dans la

mousse\*La stabilité constitue un critère pratique de classification des mousses liquides particulièrement important sans entrer dans les détails de l'évolution d'une mousse au cours du temps, une différence notable apparaît entre des mousses « durables » et des mousses « éphémères ou transitoires » tels que la bière et la champagne (figure 11 : Roustel, 2000).



**Figure 11 : Panorama des différentes mousses alimentaires (Roustel, 2000).**

Les mousses peuvent être aussi classées en plusieurs variétés, en fonction de plusieurs critères :

\*La dimensionnalité : l'empilement des bulles peut s'effectuer dans un plan, ce qui donne les mousses à deux dimensions (2D) ou bien dans un espace à trois dimensions (3D).

\*La symétrie : si l'empilement des bulles est décrit par un motif répétitif, on parle de mousses ordonnées ; sinon de mousses désordonnées.

\*La distribution de tailles de bulles : d'un point de vue théorique, les bulles peuvent être toutes de taille identique (mousse dite monodisperses), mais elles présentent souvent une grande variété de dimensions (mousses dites polydisperses). Les mousses monodisperses sont rares, même si l'on sait les produire expérimentalement, et elles constituent essentiellement

un outil pour les travaux théoriques (**Rosa,2002**) au contraire.la polydispersité est le critère caractérisant la largeur et la non-uniformité de la distribution de tailles de bulles dans une mousse.

\*La fraction volumique de gaz contenue dans la mousse, notée  $\varphi$  : elle doit être supérieure à une valeur caractéristique  $\varphi_c$  proche de 64% pour que la structure de mousse liquide résiste aux contraintes statiques . une mousse est appelée « humide » lorsque  $\varphi$  se rapproche de  $\varphi_c$  et elle est dite « sèche » lorsque  $\varphi$  est proche de 100%

### **2.3.Structure et mécanismes de formation**

Les deux méthodes fréquemment utilisés pour générer une mousse sont celles par bullage et par battage ; la première consiste à former la mousse par injection de gaz dans une solution d'agents de surface à travers des orifices (tube capillaire, disque poreux,..). Dans la deuxième méthode, un appareillage mécanique (agitateur, fouet, mixer..) permet d'introduire des bulles de gaz au sein du liquide. Dans ce cas, au début de l'agitation, de grosses bulles sont formées, puis, elles sont fragmentées en plus petites bulles sous l'action prolongée de l'agitation. Dans l'industrie agroalimentaire, l'élaboration des mousses se fait en utilisant cette méthode.

Il existe d'autres modes de production de mousse comme par condensation (exemple des mousses à raser) ou par réaction chimique (exemple du champagne et de la majorité des bières, où les bulles sont formées par le gaz carbonique produit durant les procédés de fermentation et gardé sous pression jusqu'à la détente et l'ouverture de la bouteille) .Concerant les étapes principales de la formation d'une mousse se résumant en trois phases :

#### **a-Migration des protéines vers l'interface**

les protéines sériques vont venir se localiser à la surface des bulles en migrant vers celles-ci depuis la phase aqueuse, cette étape est influencée par l'état de solubilité des protéines sériques (**Turgeon, 1991**).

#### **b-Adsorption et déplissement des protéines à la surface des bulles**

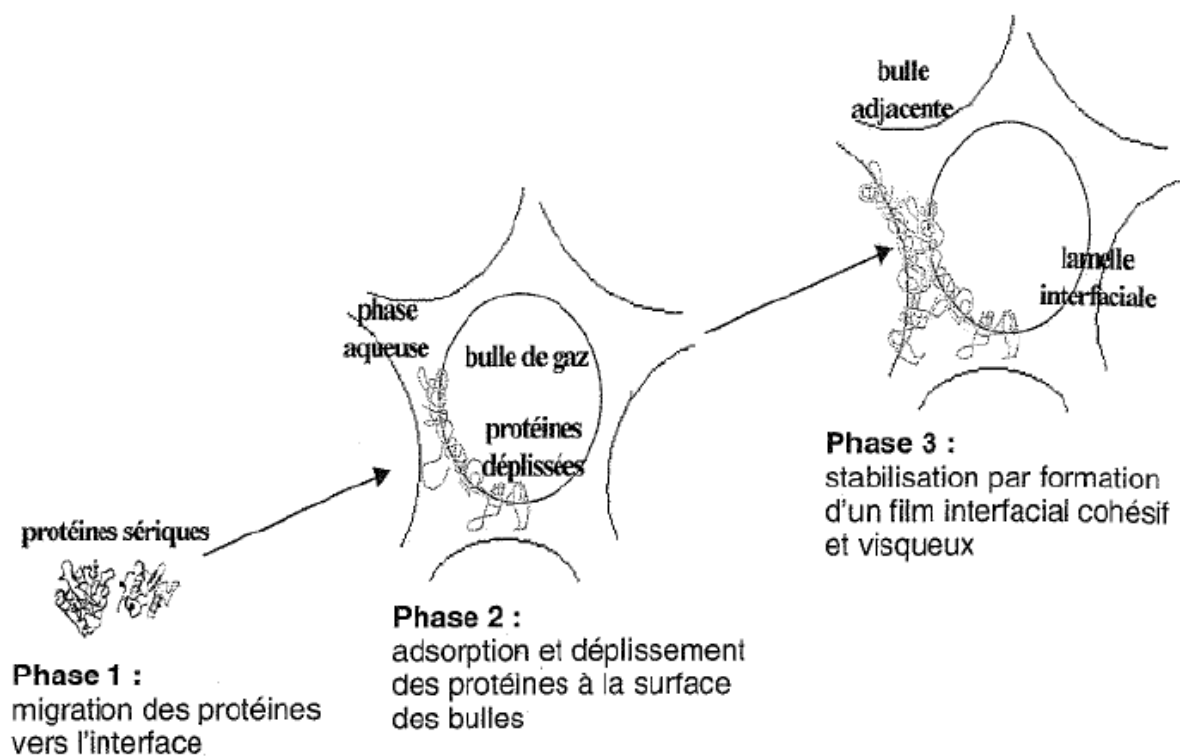
Les protéines vont s'adsorber à l'interface et s'y déplisser. Contrairement à ce qui se produit dans le cas de certaines émulsions, ces phénomènes de migration et d'adsorption sont quasi-spontanés en raison de la très grande tension de surface au niveau des films inter faciaux. l'adsorption des protéines est généralement partielle et les fragments non adsorbés d'une protéine vont interagir avec d'autres fragments de protéines sériques adjacentes également adsorbés (échange de ponts disulfures selon le pH, liaisons hydrophobes, etc.), la formation

du film cohésif qui en résulte permet l'encapsulation des bulles d'air. Ce film protéique doit toutefois conserver un certain degré d'élasticité pour obtenir la texture recherchée (de Wit et al.,1988 ; Philips et al., 1994 ; Dickinson,1997 ; Cayot,1998)

### c-Stabilisation par formation d'un film interfacial cohésif et visqueux

Le film protéique formé permet dans un troisième temps à la mousse d'être stable en diminuant le drainage gravitationnel de la phase aqueuse et en réduisant les échanges gazeux entre les bulles.

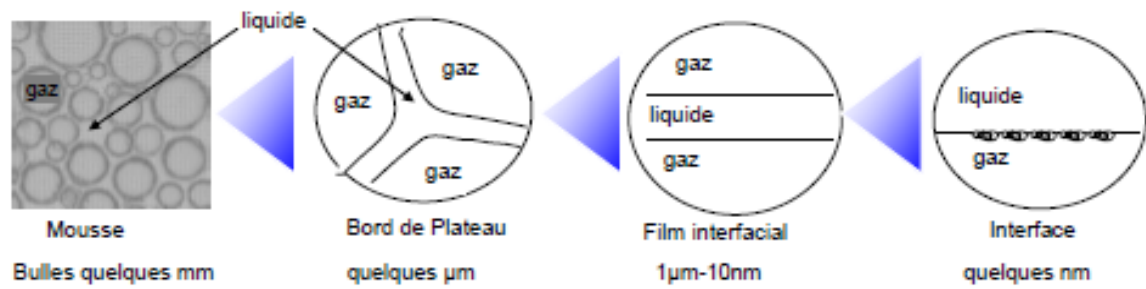
La figure 12 mis en évidence les mécanismes de la fabrication de la mousse ;



**Figure 12 :** Représentation schématique des mécanismes intervenant lors de la formation et de la stabilisation d'une mousse par des protéines sériques (Gaucheron,2004) .

la mousse est un système thermodynamiquement instable parce que l'énergie libre associée à la mousse est supérieure à celle du système liquide-gaz séparé. Dès sa formation, la mousse évolue afin de minimiser l'énergie libre interfaciale comme s'est illustré dans la figure 13.

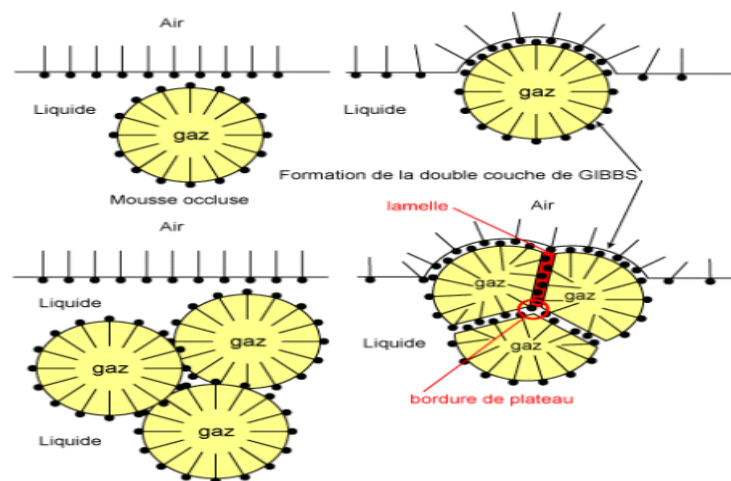




**Figure13 :** Morphologie des bulles de gaz dans une mousse

La mousse est un système multi-échelle c'est-à-dire présente différents niveaux d'organisation comme l'illustre la figure14 associée alors qu'elle peut être considéré :

- \*dans son ensemble (mousse 3D- échelle macroscopique)
- \*au niveau des bords de Plateau qui séparent trois bulles de gaz
- \*au niveau des films interfaciaux qui séparent deux bulles de gaz
- \*au niveau des interfaces eau/air qui composent le film interfacial.



**Figure14 :** Représenttion de la structure d'une mousse à différentes échelles

## 2.4. Stabilité et déstabilisation d'une mousse alimentaire

### 2.4.1. Taille des bulles et le procédé de foisonnement utilisé

La taille des bulles varie selon la méthode de production de la mousse. Dans le cas d'une mousse faite par bullage, la taille est imposée par le tube capillaire ou le disque poreux à travers lequel est injecté le gaz, tandis que dans le cas d'une mousse produite par battage, la taille de bulles est imposée par la force d'agitation du batteur. La mousse est d'autant plus stable que la taille des bulles est petite. Les bulles de petite taille offre une surface spécifique très grande, la surface spécifique étant définie comme le rapport de la surface d'une bulle et de son volume. Accroître la surface spécifique des bulles permet d'augmenter le taux de couverture d'agent de surface à l'interface, et ainsi de renforcer la stabilité des mousses.

### 2.4.2. pH

Le pH joue également un rôle clé sur la formation et la stabilité d'une mousse. En général, la formation d'une mousse est difficile au pI, même si la stabilité de la mousse devrait y être optimale. **Thakur et al., (2003)** ont étudié l'effet du pH sur la production en continu d'une mousse pour une formulation modèle (de type viande) stabilisée par des caséinates de sodium (pI 4,6). Leurs résultats montrent que le pH de la formulation a une influence sur le diamètre moyen des bulles. A pH 4,6, ces diamètres sont plus élevés, mais la mousse présente une meilleure stabilité. **Ragab et al (2004)** ont également montré que le chlorure de sodium favorise en général la formation des mousses préparées à base de protéines, mais réduit leur stabilité.

### 2.4.3. Concentration et l'activité de surface des protéines

Les protéines ont toutes, plus ou moins, la capacité d'abaisser la tension de surface; le pouvoir moussant dépend surtout des cinétiques d'adsorption et de réarrangement des protéines à l'interface, **Cuvelier et Michon (2003)** ont ainsi montré que les protéines qui migrent rapidement aux interfaces présentent un pouvoir moussant très important, indépendamment de la tension de surface, la vitesse de migration des protéines dépendant principalement de la taille de ces macromolécules et de leur flexibilité, ainsi que de leur hydrophobicité de surface Selon **Halling (1981)**, la concentration en protéines joue également sur la formation et la stabilité des mousses : leur domaine d'utilisation est en général compris entre 2-8% (p/v) de protéines. Au-delà (10%), la stabilité de la mousse s'accroît encore, parfois au détriment de son volume. Un autre facteur qui joue un rôle essentiel sur la formation des mousses est l'intensité du battage : si une vitesse d'agitation élevée favorise en général la formation de la mousse, une agitation trop intense peut favoriser la recalescence

des bulles. Ainsi, **Thakur et al (2003)** ont montré que le diamètre des bulles ne diminuait qu'assez faiblement lors d'une augmentation de la vitesse d'agitation de 200 à 1000 tpm.

#### 2.4.4. Viscosité

Si le liquide s'écoule lentement dans la mousse, le drainage de la mousse est ralenti et la mousse est plus stable. Il est largement admis que la viscosité est inversement proportionnelle à la vitesse de drainage il est important de distinguer la viscosité de la phase liquide et celle de surface des bulles, même si l'augmentation de ces deux paramètres conduisent à renforcer la stabilité d'une mousse, la viscosité au niveau de la surface des bulles étant davantage à relier avec la nature de l'agent de surface et la mobilité des interfaces.

#### 2.5. Déstabilisation de la mousse alimentaire

Les trois principaux mécanismes de déstabilisation des mousses sont :

- le disproportionnement qui est un mûrissement( mûrissement d'Ostwald) fait que le gaz des petites bulles se déverse lentement dans les grandes jusqu'à la disparition des petites bulles. Autrement dit, le nombre de bulles diminue et les bulles tendent vers une taille moyenne dû à la solubilité du gaz (**Dickinson, 1992**) ; celui-ci joue un rôle important dans le cas du CO<sub>2</sub>, alors qu'il est réduit pour l'azote par rapport à l'air ;
- le crémage des bulles et le drainage par gravité du liquide dans le cas des mousses humides Le liquide contenu dans une mousse s'écoule à travers les nœuds, les bords de Plateau et les films interfaciaux sous l'effet de la gravité et des forces capillaires auxquelles s'opposent les forces visqueuses. Ces écoulements constituent le phénomène appelé drainage.
- la coalescence irréversible des bulles qui fait suite au crémage des bulles ou au drainage du liquide (**Sagis et al, 2001**) ,le processus de rupture se déclenche lorsque la fraction volumique de gaz devient supérieure à une valeur seuil qui dépend du tensioactif et de sa concentration.

# Chapitre II

---

## Matériel et Méthodes

## 1. Matériel

### 1.1. Lactosérums bruts

Deux types sérums du lait ont été préparés au niveau du laboratoire selon les modes opératoires citées dans la partie méthodes d'analyse ( §2.2) à savoir : lactosérum acide brut et lactosérum doux brut.

### 1.2. Lactosérums bruts traités

Au niveau du laboratoire, trois sortes de traitement ont été appliquées sur les deux types des lactosérums bruts (acide et doux) à savoir : traitement par chauffage au bain marie, traitement par ultrasons et la thermosonication ; et ce en suivant leurs protocoles décrites dans la partie méthodes d'analyse (§2.2).

### 1.3. Sucres de table

Deux sucres de table ont été achetés du commerce et utilisés dans la phase d'optimisation et de la formulation de nouveaux produits pâtisseries (meringues) ; il s'agit du sucre blanc cristallisé (marque :SKOR cevital :100% sucre de canne ;produit le :05/12/21 à 03 :54,Expiration :04/12/23 ;LT :81211205E,Algérie) et du sucre roux cristallisé (marque : SKOR cevital :100% sucre de canne ;produit le :06/12/20 à 10 :49,Expiration :05/12/22 ;LT :H2201206T7,Algérie).

### 1.4. Sel de table

Un seul type du sel de table a été acheté du commerce et utilisé dans la phase d'optimisation et de la formulation de nouveaux produits pâtisseries (meringues) ; il s'agit du sel de table (marque :Sel de table raffiné iodé ,Chams Rafie ;Enasel ;poduit le 02/06/20 à 10 :12 ;Expiration :02/06/22 ;Lot :54 ,Algérie) .

### 1.5. Blanc d'œuf cru

Le blanc d'œuf cru a été obtenu à partir des œufs frais achetés du commerce, et il est utilisé dans la phase d'optimisation et de la formulation de nouveaux produits pâtisseries (meringues).

### 1.6. Présure

La présure utilisée est une présure industrielle d'origine animale de force 1/100000, marque HANSEN : CHY-MAX, DENMARK

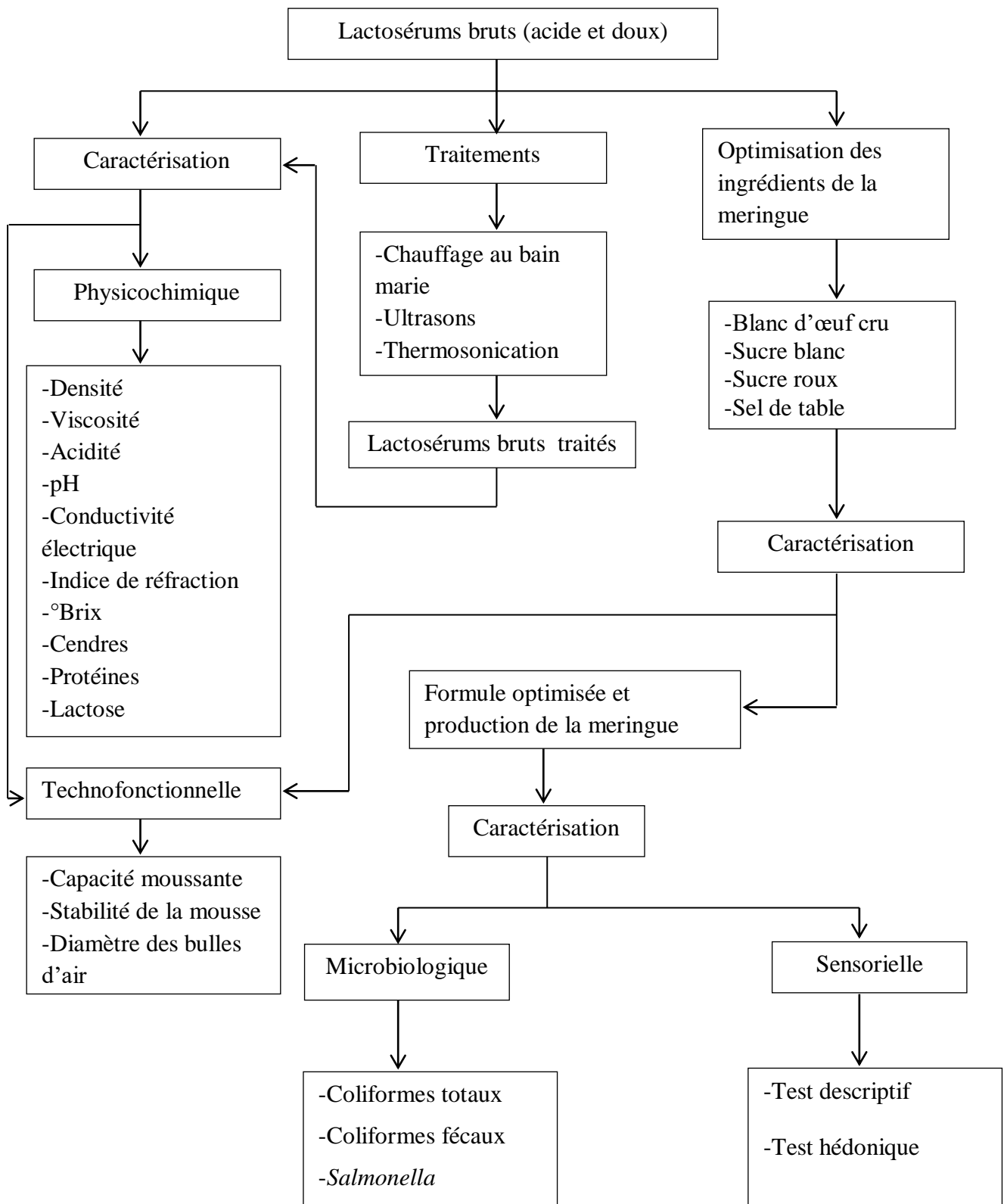
### **1.7. Matériel du laboratoire**

Le matériel du laboratoire en matières appareillage, verreries et produits chimiques utilisés dans la phase d'expérimentation est indiqué dans la partie annexe (annexe 1).

## **2.Méthodes d'analyses**

### **2.1. Protocole expérimental**

Le protocole expérimental réalisé durant notre expérimentation est montré par la figure15.



*Figure 15 : Le protocole expérimental de l'étude*

## 2.2. Méthodes préparatives

### 2.2. 1.Lactosérum acide brut

La préparation du lactosérum acide brut a été réalisée selon les étapes suivantes (**Acem et Choukri,2012**) :

- Etalonner le pH mètre à l'aide des solutions tampons ;
- Préparer le lait écrémé (0%MG) reconstitué à 10% dans l'eau distillée;
- Homogénéiser la solution par une agitation magnétique ;
- Mettre l'électrode de pH-mètre dans la solution, et verser goutte à goutte de HCl avec le maintien de l'agitation jusqu'à l'obtention d'un pH=4,6;
- Recouvrir le bécher avec le papier aluminium, et le conserver à 4°C pendant 1 à 2 heures;
- Séparer le lactosérum par centrifugeuse (4500tr/min pendant 10min);
- Conserver le produit à 4°C.

### 2.2. 2.Lactosérum doux brut

La préparation du lactosérum acide brut a été réalisée selon les étapes suivantes (**Acem et Choukri,2012**) :

- Préparer un lait écrémé (0%MG) reconstitué à 10% dans l'eau distillée;
- Chauffer le lait à 35°C, à l'aide d'un agitateur magnétique chauffant;
- Ajouter 2 ml de solution de présure préparée à 1% ;
- Maintenir l'agitation à 35°C pendant 40 min ;
- Recouvrir le bécher avec du papier aluminium, et le conserver à 4°C pendant 12 à 24h ;
- Séparer le lactosérum doux brut par centrifugation (4500tr/min pendant 10min);
- Le conserver à 4°C.

### 2.2.3. Lactosérums bruts traités par chauffage conventionnel

20ml de chaque type des lactosérums bruts (acide et doux) sont transposés dans des tubes à essais en verre PYREX à fond plat ,bouchonnés et portés sur un support en matériaux inoxydables et ont été soumis à un chauffage conventionnel (bain marie) selon les coordonnées de températures/temps suivantes :40°C/5 et 25min ;60°C/5 et 25min .

### 2.2.4. Lactosérums bruts traités par ultrasons

Les deux types des lactosérums bruts (acide et doux) ont subi un traitement ultrasonore par immersion un bécher en verre (type DURAN SCHOTT MAINZ JENA



GLAS) contenant 100ml du sérum du lait brut dans l'appareil (Bandelin Sonorex ISOLAB,f 40 kHz); dont il est légèrement submergé dans le liquide de traitement (Tickopur R33, Labor,BANDELINelectronic) ;le traitement a été réalisé à une fréquence fixée à 40kHz/5 et 15min.

### 2.2.5. Lactosérums bruts traités par thermosonication

Le traitement par thermosonication est une combinaison de traitement par chauffage et de traitement par ultrasons. Dans notre étude, la thermosonication des lactosérums bruts était comme suit :

- a) Thermosonication du lactosérum acide brut a été réalisée selon les étapes suivantes:
  - Chauffage au bain marie à température 60°C pendant 25 minutes.
  - Laisser refroidir à température ambiante 20°C.
  - Sonication à 40kHz pendant 15 minutes.
- b) Thermosonication du lactosérum doux brut a été réalisée selon les étapes suivantes:
  - Chauffage au bain marie à température 40°C pendant 5 minutes.
  - Laisser refroidir à température ambiante 20°C.
  - Sonication à 40kHz pendant 15 minutes.

## 2.3.Caractérisation des lactosérums bruts et traités

### 2.3.1.Caractérisation physique

#### 2.3.1.1.Densité

##### A. Principe

La densité du lactosérum est le rapport des masses du même volume du lactosérum et de l'eau à 20°C. La détermination précise de la masse volumique des corps se fait à l'aide d'un pycnomètre selon les méthodes usuelles (**Mathieu ,1998**).

##### B. Mode opératoire

La densité est calculée à 20°C selon les étapes suivantes :

- Peser le pycnomètre vide (P0) et plein d'eau distillée (P1).
- Sécher le pycnomètre, puis le remplir avec l'échantillon et le peser (P2).

##### C. Calcul

Les résultats sont donnés par la formule suivante :  $D = \frac{P2 - P0}{P1 - P0}$

**D'où :**

- **D** : densité de l'échantillon
- **P<sub>0</sub>** : poids du pycnomètre vide en g.
- **P<sub>1</sub>** : poids du pycnomètre rempli de l'eau distillée en g
- **P<sub>2</sub>** : poids du pycnomètre rempli d'échantillon en g.

### 2.3.1.2. Indice de réfraction et degré Brix

#### A. Principe

Selon **Roger (1974)**, l'indice de réfraction permet de connaître le degré de pureté d'un liquide ou de connaître la concentration de solide présent dans une solution.

C'est la mesure de pouvoir réfringent au moyen d'un réfractomètre par rapport à la raie D du spectre de sodium (**Champetrier, 1974**).

#### B. Mode opératoire

L'indice de réfraction a été déterminé par un réfractomètre à une température fixée à 19 à 20°C, nous avons utilisé la méthode de **AFNOR, (1986)**. Qui consiste à :

- Etalonner le réfractomètre avec l'eau distillée dont l'indice de réfraction est égal à 1,333 et 0% pour °Brix.
- Déposer entre les prismes de l'appareil quelques gouttes d'échantillon, ensuite ajuster les deux zones claire et sombre et lire directement l'indice de réfraction et le % en matière sèche de l'échantillon sur les échelles.

### 2.3.1.3. Cendres

#### A. Principe

D'après **Amaraglio (1986)**. Les cendres représentent la quantité de la matière minérale contenue dans un volume donné de lactosérum après incinération.

#### B. Mode opératoire

- Peser une capsule vide.
- Placer 5ml du lactosérum dans une capsule.
- Mettez la capsule dans un four à température de 550°C pendant 2 à 3 heures.

- Refroidir la capsule dans un dessiccateur puis peser la capsule.

### C. Calcul

Les résultats sont donnés par la formule suivante :

$$C = (M_1 - M_0) \times (1000/V)$$

D'où :

- **C** : Teneur en cendres en g/l.
- **M<sub>0</sub>** : Masse de la capsule vide en g.
- **M<sub>1</sub>** : Masse de la capsule et le résidu après la dessiccation et le refroidissement.
- **V** : Volume de la prise d'essais en ml.

#### 2.3.1.4. Viscosité

##### A. Principe

La viscosité résulte du frottement des molécules, elle se traduit par la résistance plus ou moins grande des liquides à l'écoulement, la viscosité absolue s'exprime usuellement en centipoise, la viscosité absolue se mesure par le calcul du temps de chute d'une petite boule dans une colonne (**viscosimètre d'Höppler,**) fondé sur la loi de poiseuille (**Boubezari,2010**).

##### B. Mode opératoire

- Remplir le tube avec l'échantillon.
- Fixer la température désirée.
- Lorsque l'équilibre de température est atteint.
- Choisir une bille pour laquelle son écoulement à travers l'échantillon dans le tube viscosimètre, doit être aussi lent que possible.
- Laisser ensuite la bille s'écouler librement et lorsqu'elle atteint le repère de la partie supérieure, mettre le chronomètre en marche.
- Lorsque la bille atteint le repère situé à la partie inférieure du tube viscométrique, noter le temps de chute de bille.

### C. Calcul

Le calcul de la viscosité se fait selon la formule suivante :

$$\eta = t \times (D_0 - D_1) \times K$$

D'où :

- **V** : Viscosité en centipoise (cP).
- **t** : Temps de chute de la bille en secondes (s).
- **D<sub>0</sub>** : Densité de la bille.
- **D<sub>1</sub>** : Densité de l'échantillon.

### 2.3.1.5. pH

#### D. Principe

Le pH est mesuré par un pH- mètre dont sa valeur est en fonction de la concentration des ions hydronium présents dans la solution (**Geoffrey, 2011**).

#### E. Mode opératoire :

- Etalonner le pH-mètre par des solutions tampons à (pH=7 ; pH=4), le rinçage de l'électrode s'effectue par l'acétone et le nettoyage par le papier absorbant.
- Mettre l'électrode du pH-mètre dans un volume suffisant de l'échantillon (lactosérum acide et doux) lire le pH indiqué sur l'écran d'affichage du pH-mètre.

### 2.3.1.6. Conductivité électrique

#### A. Principe

La conductivité électrique exprime l'aptitude de la solution aqueuse à conduire un courant électrique, elle est en corrélation avec la teneur en sels solubles (**Rodier, 1997**).

#### B. Mode opératoire

- Etalonner l'appareil à l'aide d'eau distillée
- Laver l'électrode du conductimètre à l'acétone et essuyer avec un papier hygiénique.
- Chauffer les échantillons à 20°C.
- Plonger l'électrode dans le bécher qui contient l'échantillon et lire directement la conductivité électrique du l'échantillon étudié à 20°C.

### 2.3.2. Caractérisation chimique

#### 2.3.2.1. Acidité titrable

##### A. Principe

Selon la méthode **d'AFNOR-NF04- (1986)**, l'acidité du lactosérum est déterminée par titrage à l'hydroxyde de sodium NaOH (N/9), en présence d'un indicateur coloré la phénolphtaléine, elle est exprimée en gramme par litre (g/l) ou en degré doronic (°D).

##### B. Mode opératoire

D'après **Mathieu(1998)**, l'acidité des lactosérums est déterminée en appliquant la méthode suivante :

- Dans un bécher mettre 10ml du lactosérum.
- Ajouter 2 à 3 gouttes de phénolphtaléine.
- Titrer avec la solution de NaOH (N/9) jusqu'au virage de la couleur vers le rose.
- Lire le volume de NaOH versé.

##### C. Calcul

L'acidité du lactosérum est donnée par la formule suivante :

$$A = 10 \times (V_1/V_0)$$

D'où :

- **A** : Acidité titrable de l'échantillon en g/l.
- **V<sub>0</sub>** : Volume en ml de la prise d'essai.
- **V<sub>1</sub>** : Volume en ml de NaOH versé.

NB : 1Degré doronic =0,1g d'acide lactique par litre.

#### 2.3.2.2. Dosage des protéines

##### A. Principe

Selon **Lowry et al.,(1951)**, le principe de base est fondé sur la résultante de deux réactions, dans le premier temps, la présence de sulfate de cuivre en milieu alcalin entraîne la formation d'un complexe entre l'ion cuivrique et la liaison peptidique avec l'apparition d'une coloration violette proportionnelle à la quantité d'acides aminés présents dans le milieu (réaction de Biuret), la deuxième réaction résulte de la réduction de tyrosine et tryptophane présents dans les protéines par le constituant actif du réactif de Folin- Ciocalteu l'acide phosphomolybdo- tungstique pour donner

naissance à un complexe bleu.

### B.Réactifs

- Solution A : 2%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  anhydre dans la soude 0.1N.
- Solution B<sub>1</sub> : 5%  $\text{CuSO}_4$ .
- Solution B<sub>2</sub> : 10% tartrate double de K et Na.
- Solution E : Folin-Ciocalteu dilué au 1 /2 de l'eau distillé.
- Solution F : solution mère de BSA (sérum albumine bovine) à 100  $\mu\text{g}/\text{ml}$  pour la courbe d'étalonnage.
- Réactif B : 1 ml de solution B<sub>1</sub>+1ml de solution B<sub>2</sub> + 8 ml de l'eau distillée.
- Réactif C : 1 ml de réactif B et 50 ml de solution A.

### C.Mode opératoire

- 1 ml d'échantillon à doser (1 ml de lactosérum) ;
- Ajouter 5 ml de réactif C ;
- Laisser 10 mn à température ambiante.
- Ajouter 0.5ml de la solution E (la coloration devient bleue) après agitation rigoureuse;
- Laisser 30 mn à l'obscurité ;
- Faire la lecture de l'absorbance à 750 nm à partir de la courbe d'étalonnage préalablement établi (annexe4).

#### 2.3.2.3.Dosage du lactose

##### A.Principe

Selon la méthode de **Dubois et al., (1956)**,le principe repose sur la réaction suivante :

L'acide sulfurique concentré provoque à chaud le départ de plusieurs molécules d'eau à partir des oses, cette déshydratation s'accompagne par la formation d'un hydroxyméthylfurfural (HMF) dans le cas d'hexose et d'un furfural dans le cas d'un pentose, ces composés se condensent avec le phénol pour donner des complexes colorés (jaune ; orangé ), l'intensité de la coloration est proportionnelle à la concentration des oses , la densité optique est mesurée à 488 nm à l'aide d'un spectrophotomètre.

**B.Réactif**

- Solution mère de lactose à 100 µg/ml pour la courbe étalon du lactose.
- Solution de phénol à 5% dans l'eau distillée.
- Acide sulfurique à 95% de pureté et de densité  $D=1,83$ .

**C.Mode opératoire**

Nous avons suivi le mode opératoire suivant :

- Prendre 1ml de lactosérum dilué ( $10^{-1}$ ) + 1ml du phénol à 5% + 5ml de l'acide sulfurique
- Après agitation par l'appareil vortex, laisser reposer 10 min à température ambiante.
- Incubation dans un bain-Marie à 30°C pendant 30 min.
- Lier l'absorbance au spectrophotomètre à 488 nm.
- Lire la teneur du lactose à partir de la courbe d'étalonnage préalablement établi (annexe3).

**2.3.3.Caractérisation des propriétés moussantes****2.3.3.1.Capacité moussante****A. Principe**

La mousse est constituée de bulles d'air dispersées dans un solide ou un liquide, la mousse a très peu de liquide ou de solide et beaucoup de bulles d'air (bulles), c'est ce qui lui donne sa densité(Verger,2005).

**B.Mode opératoire**

Nous avons adopté le mode opératoire décrite par **Acem et al.,(2019) et Rais et al.,(2024)** :

- Transposer 50ml ( $V_0$ ) du lactosérum (brut et traité) dans un bécher en verre d'une capacité de 600 ml.
- Foisonner au batteur électrique (Batteur à main :Bomann, STABMIXER SM 354 CB, Allemagne) à température ambiante pendant 1 min avec une vitesse 18000 tour/min
- Recouvrir le bécher avec du papier aluminium
- Lire le volume maximal de mousse ( $V_m$ ) chaque 5min.
- Prise de photos à temps  $t=0$ min.

### C.Calcul

Les résultats sont donnés par la formule suivantes :

$$CM (\%) = (V_m / V_0) \times 100$$

D'où :

- CM : Capacité moussante en %.
- V<sub>m</sub> : Volume de la mousse en ml.
- V<sub>0</sub> : Volume de l'échantillon en ml.

#### 2.3.3.2. Diamètre moyen des bulles d'air

##### A.Principe

Selon les travaux de **Acem et al.,(2019)** et **Rais et al.,(2024)** ;l'estimation du diamètre moyen des globules gras repose sur une détermination au hasard et statistique à l'aide d'un microscope optique.

##### B. Mode opératoire

- Grâce à une spatule, prélever un volume de mousse préparée et déposer sur une lame en verre sans couvrir par lamelle,
- La préparation est ainsi prête en observation microscopique,
- Le diamètre moyen des bulles d'air de lactosérum est déterminé microscopiquement à l'aide d'un microscope optique.
- Nous avons utilisé un micromètre oculaire gradué du 0 à 10 µm dont les graduations sont distantes les unes des autres de 0,1 µm.Pour avoir une répartition statistique, on se déplace au Hazard sur la surface du rectangle en réalisant 10 déterminations successive sous l'objectif 40.

##### C.Calcul

Le diamètre moyen est calculé par la formule suivante :

$$\Phi = K. \sum_{i=0}^{i=10} D_i / 10$$



D'où :

- **K** : Coefficient oculaire ( $G \times 40$ ) constant ( $K = 2,41$ ).
- **$\Phi$**  : Diamètre des bulles d'air en  $\mu\text{m}$ .
- **i** : Nombre de bulles d'air fixée hazard.

## 2.4. Application dans le domaine pâtissier

### 2.4.1. Optimisation des ingrédients de la meringue

Pour étudier les effets des ingrédients de la meringue sur les propriétés moussantes des lactosérums bruts, nous avons sélectionné trois ingrédients classiques de la meringue qui sont : le blanc d'œuf cru, le sucre de table (blanc et roux) et le sel de table. Dans ce contexte, nous avons déterminé le rapport optimal lactosérum brut / blanc d'œuf cru qui ont manifesté par des meilleures propriétés moussantes, puis nous avons étudié son comportement en présence des sucres de table et du sel de table. Pour étudier l'effet combiné du sel de table et du sucre de table, nous avons appliqué un plan d'expérience avec deux facteurs à deux niveaux. Les parts minimales et maximales des ingrédients utilisés dans ces expériences étaient : le blanc d'œuf cru (5 et 100%), le sucre de table (5 et 200%) et le sel de table (0,5 et 1%).

Les données expérimentales sont analysées statistiquement par le logiciel R (test ANOVA à un facteur au niveau de signification de 5%).

### 2.4.2. Formulation et production des meringues

La composition centésimale de la formule optimisée de la meringue est donnée par le tableau 6 .

**Tableau6** : Composition centésimale des ingrédients de la meringue en terme de formule optimisée.

Ingrédients	Apport(%)
Lactosérum	90 à 100
Blanc d'œuf cru	90 à 100
Sucre blanc	190 à 200
Sucre roux	190 à 200
NaCl	0,25 à 0,5

Une série d'expériences a été réalisée pour évaluer et optimiser le pouvoir moussant de deux types des lactosérums : lactosérums bruts (acide et doux) et lactosérums mixtes (des

lactosérums bruts et du blanc d'œuf) en absence et en présence des ingrédients dits classiques et nouveaux recommandés et incorporés dans la formulation de la meringue.

Deux formules de meringue ont été préparés et produites : une à base du sucre blanc et du sel de table, et une autre à base du sucre roux et du sel de table. Dans des conditions stériles ; nous avons procédé le mode opératoire suivant :

1. Dans un bol ; des blancs d'œufs, du sérum du lait et du sel de table ont été incorporés, puis le tout a été mixé et fouetté à l'aide d'un batteur électrique jusqu'à l'obtention d'une neige ;

2. Ensuite, le sucre a été ajouté progressivement et continuellement dont le tout a été mixé et foisonné jusqu'à la formation d'un bec d'oiseau ;

3. La phase dite moulage a été réalisée grâce à une poche à douille sur un papier cuisson d'un plat métallique, puis il est mis au four à 80°C pendant une heure à deux heures ;

4. Les deux types de meringues cuites ont été refroidit graduellement à la température ambiante et mises dans des caissettes à gâteau en papier et conservées des boites en plastique de qualité alimentaire et stockés à la température ambiante.

#### **2.4.2.1. Caractérisation microbiologique**

##### **➤ Objectif de l'analyse microbiologique**

L'objectif de l'analyse microbiologique de la meringue est de contrôler sa salubrité ; c'est-à-dire l'absence d'action toxique et les germes d'altération dans le produit fini au cours de leur conservation jusque à la consommation.

##### **➤ Echantillonnage**

L'étude a été faite sur deux échantillons de meringues (une à base du sucre blanc et une autre à base du sucre roux).

##### **➤ Préparation de l'échantillon pour essai**

Les parties aliquotes de chaque composant de l'échantillon ont été prélevées à proximité de bec bunsen allumé. Cette prise d'essai est utilisée pour la préparation de solution mère (JORA, 2016). Les meringues étant des produits solides, elles feront donc l'objet de dilutions décimales.

➤ **Germes recherchés**

Lors de l'analyse on recherche deux germes :

- Les coliformes totaux et fécaux.
- Les salmonelles

➤ **Préparation de la solution mère (NF V08-010)**

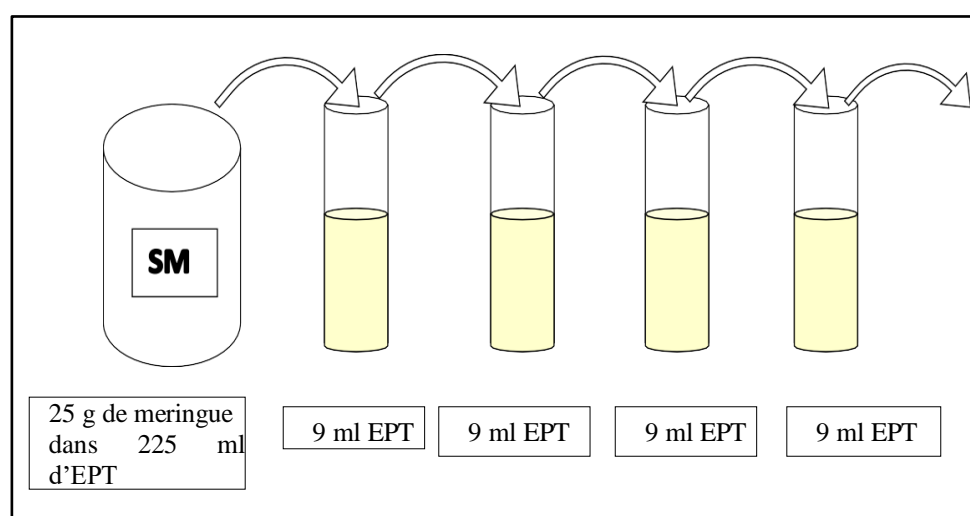
Un fragment de 25 g de chaque échantillon de meringue a été prélevé de façon aseptique et placé dans un tube à essai contenant 225 ml d'EPT(eau péptonnée tamponnée), ensuite mélangé et laissé au repos 30min pendant 1h à la température du laboratoire pour assurer la revivification des germes. La solution mère de dilution ( $10^{-1}$ ) est ainsi constituée.

➤ **Préparation des dilutions décimales**

A partir de la solution mère, des dilutions plus grandes sont réalisées pour faciliter les dénombrements (figure 16). Les dilutions successives sont obtenues en introduisant 1ml de la solution mère à l'aide d'une pipette stérile dans un tube à essai contenant 9ml d'EPT. On a mis :

- 1 ml de la solution  $10^{-1}$  dans 9 ml d'EPT pour obtenir la solution  $10^{-2}$ .
- 1 ml de la solution  $10^{-2}$  dans 9ml d'EPT pour obtenir la dilution  $10^{-3}$ .
- 1 ml de la solution  $10^{-3}$  dans 9ml pour obtenir la dilution  $10^{-4}$ .

L'opération a été poursuivie jusqu'à ce qu'on ait obtenu de dilution  $10^{-5}$ . Chaque solution a été homogénéisée à l'aide d'un vortex pour être prêt à l'emploi.



*Figure 16: Schéma de préparation de série de dilutions (NF V08-010).*

➤ **Recherche et dénombrement des germes**

**a. Recherche et dénombrement de coliformes totaux (NM ISO 4832, 2003) et fécaux (NM 08.0.124, 2004)**

Nous avons déposé 1 ml de chaque dilution décimale ( $10^{-2}$  jusqu' à  $10^{-5}$ ) dans une boîte de Pétri stérile, ensuite 15 ml de Désoxycholate lactose (DCL) ont été coulés et mélangés avec l'inoculum par la suite, nous avons incubé les boîtes de Pétri pendant 24h à 37°C (pour les coliformes totaux) et à 44°C (pour les coliformes fécaux). Les colonies caractéristiques sont rouge brique d'un diamètre de 0,5mm.

**b. Recherche et dénombrement de *Salmonella***

La méthodologie employée est subdivisée en quatre étapes : le pré-enrichissement, l'enrichissement, l'isolement et l'identification (NM 08.0.116, 2004). Les étapes de la recherche et dénombrement de *Salmonella* sont illustrées par la figure 17.

- **Pré enrichissement en milieu non sélectif**

La solution mère qui a été préparée à partir de 25g de l'échantillon et 225ml de L'EPT a été incubée à 37°C, pendant 24h. Cette étape consiste en la revivification.

- **Enrichissement en milieu sélectif**

Les cultures de pré enrichissement sontensemencées dans un milieu nutritif contenant des agents inhibiteurs actifs sur les germes qui font concurrence avec *Salmonella*. Pour cela ; à l'aide d'une pipette stérile ; 0,1 ml de la culture de pré enrichissement a été transféré dans 10 ml de bouillon Rappaport-Vassiliadis (RV) puis incubé à 44°C pendant 24h.

- **Isolement**

Des stries ont été appliquées sur de la gélose *Salmonella-Shigella* (S.S.) , puis incubé à 37°C  $\pm$  0,5 pendant 18 à 24 h (Al-Jafaeri et al, 2013). Cela permet de visualiser les colonies caractéristiques, dont le nombre aura été considérablement augmenté durant les phases précédentes. L'étape de confirmation, qui suit l'isolement, consiste en la sélection d'une ou plusieurs colonies caractéristiques en vue de leur purification. L'identité des colonies doit être confirmée en fonction de caractéristiques biochimiques (Korsak et al., 2004).

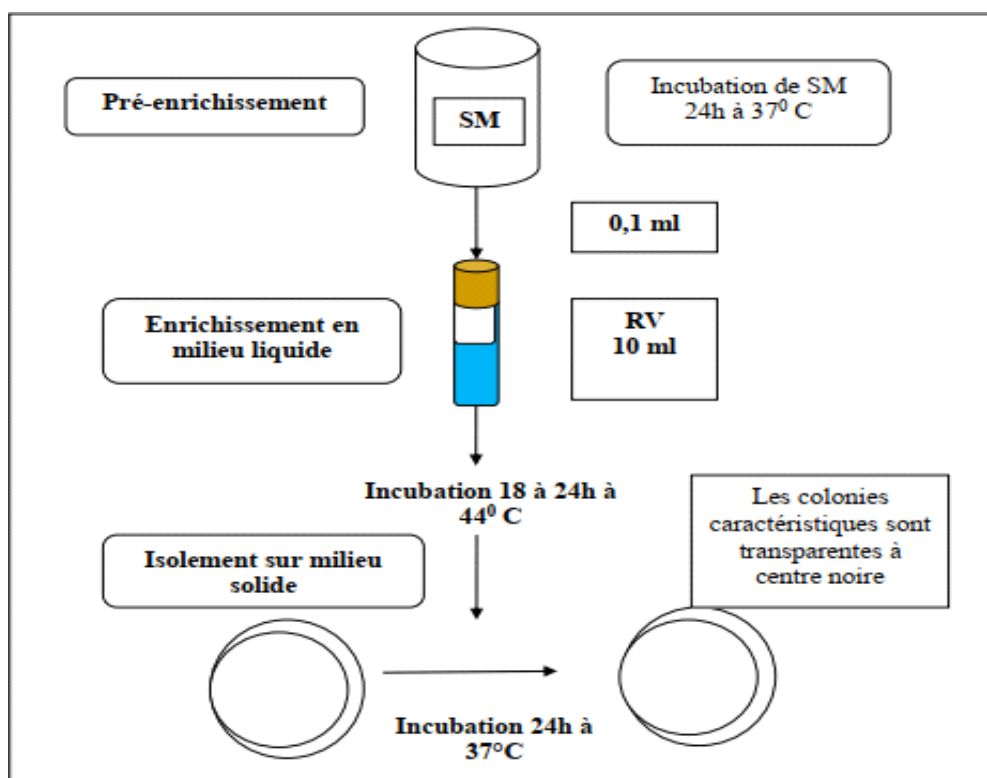


Figure 17: Schéma montrant les étapes d'isolement de *Salmonella* (Korsak et al., 2004).

### 2.4.2.3. Caractérisation sensorielle

#### ➤ Principe

L'analyse sensorielle consiste à analyser les propriétés organoleptiques des produits par les organes de sens, c'est une science multidisciplinaire qui fait appel à des dégustateurs et à leurs sens de la vue, de l'odorat, du goût, et de l'œil pour mesurer les caractéristiques sensorielles et l'acceptabilité des produits alimentaires d'une façon extrêmement objective pour estimer le degré d'acceptabilité du nouveau produit par les consommateurs (Zikoui, 2013 ; Siar, 2014).

#### ➤ Objectif

Le but de l'analyse sensorielle est de comparer et analyser les caractéristiques des produits que les consommateurs aiment ou n'aiment pas, l'analyse sensorielle contribue à en saisir les aspects positifs et négatifs et à les adapter pour mieux répondre aux goûts des consommateurs.

L'évaluation sensorielle d'un produit permet, soit la mesure de ses caractéristiques sensorielles, soit la mesure du plaisir qu'il procure au consommateur (Lefebvre et Bassereau, 2003).

Dix dégustateurs ont été sélectionnés pour cette évaluation sensorielle où l'analyse est menée en suivant la procédure décrite par Meilgaard et al.,(1999).

La qualité sensorielle des meringues a été évaluée à l'aide d'une approche hédonique et descriptive. L'analyse sensorielle des meringues produites a été déterminée par l'évaluation de l'acceptabilité générale. L'acceptabilité générale des meringues a été évaluée en considérant deux profils : visuel et gustatif (Seczyk et al., 2016). Le profil visuel comprenait des attributs tels que la couleur et l'acceptabilité générale, et le profil gustatif comprenait le goût, la texture et l'odeur.

#### ➤ **Test descriptif**

Pour l'analyse descriptive, des descripteurs ont été choisis pour évaluer le profil visuel et gustatif des différentes meringues. Les descripteurs utilisés étaient : la couleur (blanc, blanc clair, blanc neige, beige, beige clair et beige foncé), le goût (légèrement sucré, sucré, très sucré et acide), l'odeur (blanc d'œuf, blanc d'œuf de faible intensité et blanc d'œuf de forte intensité), et la texture (craquante, lisse, collante au fond et granuleuse).

#### ➤ **Test hédonique**

Au cours du processus d'évaluation hédonique, les dégustateurs ont goûté chaque échantillon de meringue et ont donné un nombre compris entre 0 et 5 : chaque attribut est mesuré selon une échelle d'acceptabilité universelle de points, 0 : désagréable et 5 : très agréable.

Pour réaliser l'analyse, une échelle hédonique à 6 points a été utilisée. Chaque échelle correspondait à une perception afin de faciliter le traitement des données comme suit : 0 : désagréable, 1 : peu désagréable, 2 : ni désagréable ni agréable, 3 : peu agréable, 4 : agréable et 5 : très agréable.

L'analyse sensorielle a été réalisée à la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Département de Nutrition et de Technologie Agroalimentaire, Université de Tiaret, Algérie. Le panel de dégustateurs était composé de dix adultes en bonne santé âgés de 20 à 50 ans et qualifiés pour évaluer les propriétés sensorielles des aliments.

Les participants à l'étude étaient des personnes ayant de l'expérience et des compétences en analyse sensorielle, y compris des enseignants et des étudiants qui ont étudié et enseigné la matière de contrôle de qualité des aliments. Les panélistes ont été invités à évaluer chaque échantillon pour les paramètres évalués. Les panélistes ont reçu les échantillons à tour de rôle afin de diminuer la similitude et l'interdépendance entre les échantillons, avec un repos de 5 minutes avant chaque dégustation d'échantillon.

Les deux échantillons de meringues ont été codés et présentés dans des assiettes en plastique jetables aux dégustateurs dans une pièce éclairée et l'analyse a été réalisée entre 1 et 4 heures après le petit-déjeuner à une température ambiante d'environ 20 °C (+/- 3 °C). Avant et après chaque analyse, les panélistes se rinçaient la bouche avec de l'eau potable (eau minérale) et inhalaient une poudre de café présentée dans une assiette en plastique jetable. Le consentement de chaque panéliste était requis.

# Chapitre III

---

## Résultats et Discussion



## 1. Caractérisation physicochimique

### 1.1. Lactosérums bruts et traités par chauffage conventionnel

Le tableau 7 donne les caractéristiques physicochimiques moyennes des lactosérums bruts et traités par chauffage conventionnel (bain marie) à 40 et 60°C pendant 5 et 25min.

**Tableau 7 :** Caractéristiques physicochimiques moyennes des lactosérums bruts et traités par chauffage au bain marie à 40 et 60°C pendant 5 et 25min.

Paramètres	Lactosérums bruts		Lactosérums bruts traités par chauffage au bain marie							
			LSABTC (°C/min)				LSDBTC (°C/min)			
	LSAB	LSDB	60/5	60/25	40/5	40/25	40/5	40/25	60/5	60/25
Densité à 20°C	1,0289	1,0296	1,027	1,019	1,0259	1,0239	1,0275	1,0269	1,0248	1,0231
Viscosité (cP à 20°C)	1,0552	2,1118	1,4397	1,5489	1,2172	1,3278	2,1143	2,1153	2,1191	2,1221
Acidité (°D)	53	13	60,5	62,7	57,5	59	13,18	13,20	13,48	13,51
pH à 20°C	4,6	6,5	4,49	4,39	4,54	4,52	6,38	6,35	6,27	6,22
Conductivité électrique (µS/cm)	8,64	5,60	11,22	11,33	9,15	9,28	6,76	6,99	7,64	7,93
Indice de réfraction à 20°C	1,3440	1,3445	1,3450	1,3455	1,3445	1,3449	1,3448	1,3450	1,3452	1,3455
°Brix (%) à 20°C	6,5	7,2	7,93	8,38	7,28	7,34	7,58	7,63	8,29	8,5
Cendres (g/l)	7,82	6,12	7,95	7,96	7,91	7,92	6,19	6,20	6,25	6,27
Protéines (%)	6	8,53	11,07	11,19	8,5	9	7,53	7,23	6,69	6,30
Lactose (g/l)	30,52	38,35	27,63	26,38	30,06	29,47	33,94	30,92	25,52	23,02

D'après le tableau 7, nous avons observé qu'une variabilité a été marquée pour les valeurs des paramètres des lactosérums bruts traités par rapport à celles notées dans les lactosérums bruts.

Une légère diminution a été enregistrée pour les valeurs de la densité dans les lactosérums bruts traités ; elle varie du 1,0289 à 1,027 ; 1,019 ; 1,0259 et 1,0239 et du 1,0296 à 1,0275 ; 1,0269 ; 1,0248 et 1,0231 respectivement pour le lactosérum acide brut et traité

(LSAB et LSABTC) et le lactosérum doux brut et traité (LSDB et LSDBTC) à 40 et 60 °C pendant 5 et 25 min.

Même constat a été manifesté pour les valeurs du pH; elle varie du 4,6 à 4,49 ; 4,39 ; 4,54 et 4,52 et du 6,5 à 6,38 ; 6,35 ; 6,27 et 6,22 respectivement pour le lactosérum acide brut et traité (LSAB et LSABTC) et le lactosérum doux brut et traité (LSDB et LSDBTC) à 40 et 60 °C pendant 5 et 25 min.

Ainsi ; le chauffage au bain marie des lactosérums bruts à 40 et 60 °C pendant 5 et 25 min a diminué leurs teneurs en lactose, cette diminution varie du 30,52 à 27,63 ; 26,38 ;

30,06 et 29,47 g/l et du 38,35 à 33,94 ; 30,92 ; 25,52 et 23,02 g/l respectivement pour le lactosérum acide brut et traité (LSAB et LSABTC) et le lactosérum doux brut et traité (LSDB et LSDBTC).

Or une fluctuation a été notée pour les teneurs en protéines des lactosérums bruts et traités ; le lactosérum acide traité s'est caractérisé par une augmentation des teneurs en protéines qui varie du 6 à 11,07 ; 11,19 ; 8,5 et 9 g/l par rapport à celles observées dans le lactosérum doux traité qui sont caractérisées par une diminution qui oscille du 8,53 à 7,53 ; 7,23 ; 6,69 et 6,30 g/l.

En revanche, le chauffage au bain marie des lactosérums bruts à 40 et 60 °C pendant 5 et 25 min a provoqué une augmentation relative de leurs teneurs en viscosité, acidité, conductivité électrique, cendres, indice de réfraction et °Brix ; à savoir :

-La viscosité : elle varie du 1,0552 à 1,4397 ; 1,5489 ; 1,2172 et 1,3278 cP et du 2,1118 à 2,1143 ; 2,1153 ; 2,1191 et 2,1221 cP respectivement pour le lactosérum acide brut et traité (LSAB et LSABTC) et le lactosérum doux brut et traité (LSDB et LSDBTC) ;

-L'acidité : elle varie du 53 à 60,5 ; 62,7 ; 57,5 et 59°D et du 13 à 13,18 ; 13,20 ; 13,48 et 13,51°D respectivement pour le lactosérum acide brut et traité (LSAB et LSABTC) et le lactosérum doux brut et traité (LSDB et LSDBTC) ;

-La conductivité électrique : elle varie du 8,64 à 11,22 ; 11,33 ; 9,15 et 9,28 µS/cm et du 5,60 à 6,76 ; 6,99 ; 7,64 et 7,93 µS/cm respectivement pour le lactosérum acide brut et traité (LSAB et LSABTC) et le lactosérum doux brut et traité (LSDB et LSDBTC) ;

-Les cendres : elle varie du 7,82 à 7,95 ; 7,96 ; 7,91 et 7,92 g/l et du 6,12 à 6,19 ; 6,20 ; 6,25 et 6,27 g/l respectivement pour le lactosérum acide brut et traité (LSAB et LSABTC) et le lactosérum doux brut et traité (LSDB et LSDBTC) ;

-L'indice de réfraction : elle varie du 1,3440 à 1,3450 ; 1,3455 ; 1,3445 et 1,3449 et du 1,3445 à 1,3448 ; 1,3450 ; 1,3452 et 1,3455 respectivement pour le lactosérum acide brut et traité (LSAB et LSABTC) et le lactosérum doux brut et traité (LSDB et LSDBTC) ;

-Le degré Brix (°Brix) : elle varie du 6,5 à 7,93 ; 8,38 ; 7,28 et 7,34% et du 7,2 à 7,58 ; 7,63 ; 8,29 et 8,5% respectivement pour le lactosérum acide brut et traité (LSAB et LSABTC) et le lactosérum doux brut et traité (LSDB et LSDBTC).

## 1.2. Lactosérums bruts et traités par ultrasons

Le tableau 8 donne les caractéristiques physicochimiques moyennes des lactosérums bruts et traités par ultrasons à 40kHz pendant 5 et 15min.

Les ultrasons appliqués (40kHz pendant 5 et 14 min) aux lactosérums bruts (acide et doux) ont modifié légèrement leurs caractéristiques physicochimiques moyennes.

Une diminution relative a été enregistrée pour les valeurs de la densité ; elle varie du 1,0289 à 1,0285 et 1,0280 et du 1,0296 à 1,0279 et 1,0283 respectivement pour le lactosérum acide brut et traité (LSAB et LSABUS) et le lactosérum doux brut et traité (LSDB et LSDBUS).

**Tableau 8 :** Caractéristiques physicochimiques moyennes des lactosérums bruts et traités par ultrasons à 40kHz pendant 5 et 15min.

Paramètres	Lactosérums bruts		Lactosérums bruts traités par ultrasons à 40kHz			
			LSABUS		LSDBUS	
	LSAB	LSDB	5min	15min	5min	15min
Densité à 20°C	1,0289	1,0296	1,0285	1,0280	1,0279	1,0283
Viscosité (cP à 20°C)	1,0552	2,1118	1,1873	1,0567	2,7741	2,8005
Acidité (°D)	53	13	54	56	16	17
pH à 20°C	4,6	6,5	4,5	4,47	6,35	6,31
Conductivité électrique (µS/cm)	8,64	5,60	8,75	8,84	5,63	6
Indice de réfraction à 20°C	1,3440	1,3445	1,3445	1,3442	1,3450	1,3450
°Brix (%) à 20°C	6,5	7,2	7,75	7,25	8	8
Cendres (g/l)	7,82	6,12	7,96	7,88	6,66	6,78
Protéines (%)	6	8,53	5,88	5,8	8,46	7,61
Lactose (g/l)	30,52	38,35	29,93	30,92	38,68	39,27

Même remarque a été notée pour les valeurs du pH ; elle varie du 4,6 à 4,5 et 4,47 et du 6,5 à 6,35 et 6,31 respectivement pour le lactosérum acide brut et traité (LSAB et LSABUS) et le lactosérum doux brut et traité (LSDB et LSDBUS) par ultrasons à 40kHz pendant 5 et 15 min.

En outre, même observation a été marquée pour les valeurs des protéines ; elle varie du 6 à 5,88 et 5,8% et du 8,53 à 8,46 et 7,61% respectivement pour le lactosérum acide brut et traité (LSAB et LSABUS) et le lactosérum doux brut et traité (LSDB et LSDBUS) par ultrasons à 40kHz pendant 5 et 15 min.

Pour les teneurs en lactose, une fluctuation a été notée pour les lactosérums bruts traités par rapport aux lactosérums bruts ; elle varie du 30,52 à 29,93 et 30,92 g/l et du 38,35 à 38,68 et 39,27g/l respectivement pour le lactosérum acide brut et traité (LSAB et LSABUS) et le lactosérum doux brut et traité (LSDB et LSDBUS) par ultrasons à 40kHz pendant 5 et 15 min.

En revanche, les ultrasons appliqués (40kHz pendant 5 et 14 min) aux lactosérums bruts (acide et doux) ont provoqué une augmentation relative de leurs teneurs en viscosité, acidité, conductivité électrique, cendres, indice de réfraction et °Brix ; à savoir :

-La viscosité : elle varie du 1,0552 à 1,1873 et 1,0567cP et du 2,1118 à 2,7741 et 2,8005 cP respectivement pour le lactosérum acide brut et traité (LSAB et LSABUS) et le lactosérum doux brut et traité (LSDB et LSDBUS) ;

-L'acidité : elle varie du 53 à 54 et 56°D et du 13 à 16 et 17°D respectivement pour le lactosérum acide brut et traité (LSAB et LSABUS) et le lactosérum doux brut et traité (LSDB et LSDBUS) ;

-La conductivité électrique : elle varie du 8,64 à 8,75 et 8,84μS/cm et du 5,60 à 5,63 et 6 μS/cm respectivement pour le lactosérum acide brut et traité (LSAB et LSABUS) et le lactosérum doux brut et traité (LSDB et LSDBUS) ;

-Les cendres : elle varie du 7,82 à 7,96 et 7,88g/l et du 6,12 à 6,66 et 6,78g/l respectivement pour le lactosérum acide brut et traité (LSAB et LSABUS) et le lactosérum doux brut et traité (LSDB et LSDBUS) ;

-L'indice de réfraction : elle varie du 1,3440 à 1,3445 et 1,3442et du 1,3455 à 1,3450 et 1,3450 respectivement pour le lactosérum acide brut et traité (LSAB et LSABUS) et le lactosérum doux brut et traité (LSDB et LSDBUS) ;

-Le degré Brix (°Brix) : elle varie du 6,5 à 7,75 et 7,25% et du 7,2 à 8 % respectivement pour le lactosérum acide brut et traité (LSAB et LSABUS) et le lactosérum doux brut et traité (LSDB et LSDBUS).

### 1.3. Lactosérums bruts et traités par thermosonication

Le tableau9 indique les caractéristiques physicochimiques moyennes des lactosérums bruts et traités par thermosonication.

**Tableau9** : Caractéristiques physicochimiques moyennes des lactosérums bruts et traités par thermosonication.

Paramètres	Lactosérums bruts		Lactosérums bruts traités par thermosonication	
	LSAB	LSDB	LSABTS	LSDBTS
			60°C/5min-US/15min	40°C/5min-US/15min
Densité à 20°C	1,0289	1,0296	1.0377	1.0293
Viscosité (cP à 20°C)	1,0552	2,1118	1.4498	2.9147
Acidité (°D)	53	13	57	17
pH à 20°C	4,6	6,5	4.27	6.32
Conductivité électrique (µS/cm)	8,64	5,60	9.59	6.14
Indice de réfraction à 20°C	1,3440	1,3445	1.3445	1.3450
°Brix (%) à 20°C	6,5	7,2	7	7.5
Cendres (g/l)	7,82	6,12	8.2	6.43
Protéines (%)	6	8,53	4.3	6.9
Lactose (g/l)	30,52	38,35	28.81	35.92

D'après le tableau9; les lactosérums bruts traités par thermosonication ont ainsi subis des modifications dans leur caractéristiques physicochimiques.

Une augmentation a été enregistrée pour les teneurs en viscosité, acidité, conductivité électrique, cendres, indice de réfraction, °Brix et densité ; à savoir :

-La viscosité : elle varie du 1,0552 à 1.4498 cP et du 2,1118 à 2.9147cP respectivement pour le lactosérum acide brut et traité (LSAB et LSABTS) et le lactosérum doux brut et traité (LSDB et LSDBTS) ;

-L'acidité : elle varie du 53 à 57°D et du 13 à 17°D respectivement pour le lactosérum acide brut et traité (LSAB et LSABTS) et le lactosérum doux brut et traité (LSDB et LSDBTS) ;

-La conductivité électrique : elle varie du 8,64 à 9,59 $\mu$ S/cm et du 5,60 à 6,14  $\mu$ S/cm respectivement pour le lactosérum acide brut et traité (LSAB et LSABTS) et le lactosérum doux brut et traité (LSDB et LSDBTS) ;

-Les cendres : elle varie du 7,82 à 8,2g/l et du 6,12 à 6,43g/l respectivement pour le lactosérum acide brut et traité (LSAB et LSABTS) et le lactosérum doux brut et traité (LSDB et LSDBTS) ;

-L'indice de réfraction : elle varie du 1,3440 à 1,3445 et du 1,3445 à 1,3450 respectivement pour le lactosérum acide brut et traité (LSAB et LSABTS) et le lactosérum doux brut et traité (LSDB et LSDBTS) ;

-Le degré Brix ( $^{\circ}$ Brix) : elle varie du 6,5 à 7% et du 7,2 à 7,5 % respectivement pour le lactosérum acide brut et traité (LSAB et LSABTS) et le lactosérum doux brut et traité (LSDB et LSDBTS) ;

-La densité : elle varie du 1,0289 à 1,0377 notée pour le lactosérum acide brut et traité (LSAB et LSABTS).

En revanche, une diminution a été enregistrée pour les teneurs en pH, protéines, lactose et densité ; à savoir :

-Le pH : elle varie du 4,6 à 4.27 et du 6,5 à 6.32 respectivement pour le lactosérum acide brut et traité (LSAB et LSABTS) et le lactosérum doux brut et traité (LSDB et LSDBTS) ;

-Les protéines : elle varie du 6 à 4,3% et du 8,53 à 6,9 % respectivement pour le lactosérum acide brut et traité (LSAB et LSABTS) et le lactosérum doux brut et traité (LSDB et LSDBTS) ;

-Le lactose : elle varie du 30,52 à 28.81g/l et du 38,35 à 35.92 g/l respectivement pour le lactosérum acide brut et traité (LSAB et LSABTS) et le lactosérum doux brut et traité (LSDB et LSDBTS) ;

-La densité : elle varie du 1,0296 à 1.0293 notée pour le lactosérum doux brut et traité (LSDB et LSDBTS).

La composition du lactosérum dépend du lait utilisé au départ et du type de coagulation dont il est issu (**Acem et Choukri,2012**).Lactosérum acide est le produit de la fabrication des fromages à pâtes fraîche ou à pâtes molles, soit de la fabrication de la caséine lactique ou acide dont l'acidité est supérieure à 18 °D ;or le lactosérum doux résulte de la coagulation par la présure des laits non acides; il est produit par les fromageries de pâtes pressées et pâtes cuites et les fabricants de caséine présure dont l'acidité est inférieure à 18°D (**Adrian et al.,1995**).

Selon **Acem et al.,(2017)**, les valeurs des paramètres physicochimiques du lactosérum doux brut sont supérieures à celles trouvées dans le lactosérum acide brut notamment : protéines, lactose, densité et viscosité .

**Adrian et al., (1995)** rapporte que le lactosérum acide se caractérise par un pH plus bas et une teneur plus élevée en cendres par rapport au lactosérum doux.

D'après **Adrian et al.,(1981)**, la viscosité dépend de la température, de la nature du solvant, de la taille, de la forme, de la concentration ,de la charge électrique des particules dispersées et de leur affinité pour le solvant. Selon **Lorient et al., (1985)**, la viscosité de la plupart des protéines augmente en milieu alcalin. Selon **Boudier et Luquet (1980)**, la densité dépend de la teneur en matière sèche, matière grasse et ainsi que de la température.

La teneur en protéines du lactosérum doux est supérieure à celle trouvée dans le lactosérum acide, ces résultats sont légèrement identiques à ceux trouvés par **Linden et Lorient (1994)** ; qui ont trouvée 0,9 à 13% pour le lactosérum doux et de 0,7 à 10.5% pour le lactosérum acide.

Les teneurs en lactose dans les lactosérums bruts sont inférieures à celles trouvées par **Croguennec et al.,(2008)** qu'ils ont trouvé des valeurs suivantes :une valeur du lactose de 50g/l pour lactosérum doux et pour lactosérum acide de fromagerie ,sa teneur égale à 44g/l or 50g/l du lactose est enregistrée pour lactosérum acide de caséinerie.

Selon **Mathieu (1998) et Jeantet et al.,(2008)**, l'évolution de l'acidité due à la présence de divers acides organiques, l'acide lactique le plus abondant provient de la dégradation du lactose lors de la réaction de Maillard.

Le pH est une fonction décroissante avec l'acidité, ce dernier évolue avec la composition et la teneur élevée en substances acides (**Mathieu, 1998**).

**Saulnier et al., (1995)** révèlent que la teneur en calcium des lactosérums (acide et doux) varie selon les traitements de modification (concentration) ;en plus **Pouliot et al., (1990)** notent que sur une zone du pH comprise entre 6,6 et 8,0, à 25 et 50 °C, il est apparu que les conditions pH 8,0 et 50 °C provoquaient la précipitation la plus complète, soit 61% du calcium et 32% du phosphate solubles, où la variabilité de valeurs de la conductivité électrique est due principalement à la composition minérale des divers sérums et la force ionique ( **Tardat Henry et Beaudry,1992**).

Selon **Mathieu (1998)**, les propriétés physiques telles que la densité dépendent de tous les constituants des molécules et des ions du produit concerné, et selon **Cheftel et Cheftel (1977)**, la diminution de la densité est due à la dénaturation thermique des protéines et à la consécutive à une solubilisation (formation d'agrégats).

Le degré de Brix (°Brix) et l'indice de réfraction varie suivant la température et la composition du lactosérum (**Acem et al.,2019**).

Les résultats obtenus sont comparables à ceux obtenus par **Jambrak et al.,(2008)**,un traitement avec un bain à 40 kHz pendant 15 minutes a eu un impact majeur, il a affecté et diminué la conductivité électrique de l'échantillon de protéines, augmentant ainsi la solubilité et la capacité moussante des protéines, les ultrasons de 500 kHz n'ont pas eu d'impact sur les propriétés fonctionnelles des protéines du lactosérum, telles que la capacité moussante, mais ont affecté la solubilité et la conductivité électrique.

De nombreux rapports ont démontré la formation de radicaux hydroxyles lors de la sonication (**Makino et al., 1983 ; Hart et Henglien, 1985 ; Petrier et al., 1992**), ce qui entraîne une augmentation de la conductivité électrique.

Le traitement ultrasonore des lactosérums bruts à 35kHz durant 5,10 et 15min n'a pas modifié leurs caractéristiques physicochimiques or il a amélioré leur comportement



interfacial (émulsifiant) au cours du temps par rapport aux lactosérums bruts et modifiés non traités dont la stabilité des émulsions dépend de la nature des lactosérums (Acem et al.,2017).

## 2. Caractérisation fonctionnelle

### 2.1. Lactosérums bruts et traités par chauffage conventionnel

#### 2.1.1. Capacité moussante

Les figures 18 et 19 montrent les résultats de la moussabilité (a) à  $t=0\text{min}$  et de la stabilité de la mousse (b) des lactosérums bruts (acide et doux) et traités par chauffage au bain marie à 40 et 60°C pendant 5 et 25min au cours du temps.

Selon les figures 18 et 19 (a) ; en terme de moussabilité ; le comportement moussant des lactosérums bruts (acide et doux) et traités se diffère selon le type du lactosérum et le barème de traitement thermique appliqué (température/temps) :

-A temps  $t=0\text{min}$  ; le lactosérum doux brut a enregistré une capacité moussante qui est deux fois supérieure à celle exprimée par le lactosérum acide brut (200 contre 100%).

-Les lactosérums bruts traités sont manifestés par des capacités moussantes supérieures comparativement à celles trouvées dans les lactosérums bruts (acide et doux) à savoir:

-Par rapport au lactosérum acide brut (CM=100%) ; les capacités moussantes supérieures sont celles obtenues par le lactosérum acide brut traité respectivement à 60°C/25min (CM=120%) et à 60°C/5min (CM= 115%) ;

-Contrairement au lactosérum doux brut (CM=200%) ; les capacités moussantes supérieures sont celles obtenues par le lactosérum doux brut traité respectivement à 40°C/25min (CM=220%) et à 40°C/5min (CM= 200%).

Selon les figures et (b) ; en terme de stabilité de la mousse ; les cinétiques de stabilité des mousses ont des allures décroissantes au cours du temps :

- Au cours du temps, nous avons constaté que la diminution de la capacité moussante pour les lactosérums bruts et traités par chauffage conventionnel était progressive avec des rythmes différents ;dont la déstabilisation totale de la mousse pour le lactosérum acide brut a été observée à 100min dont elle a évolué du 100 à 6,66% à 95min, cette durée de stabilité est légèrement inférieure à celle marquée pour la mousse du lactosérum doux brut, elle atteint 110min et elle varie du 200 à 6,66% à 105min ;

-Par rapport à la durée de la déstabilisation totale de la mousse enregistrée pour le lactosérum acide brut (DS=100min) ; les durées des stabilités inférieures sont celles marquées dans le lactosérum acide brut traité respectivement à 40°C/5min (DS=95min ; CM=60 à 10% à 90min) et 60°C/25min (DS=90min ; CM=120 à 10% à 85min) ;

-Comparativement à la durée de la déstabilisation totale de la mousse enregistrée pour le lactosérum doux brut (DS=110min) ; les durées des stabilités supérieures sont celles marquées dans le lactosérum doux brut traité respectivement à 40°C/5min (DS=150min ; CM=200 à 15% à 145min) et 40°C/25min (DS=120min ; CM=220 à 6% à 115min).

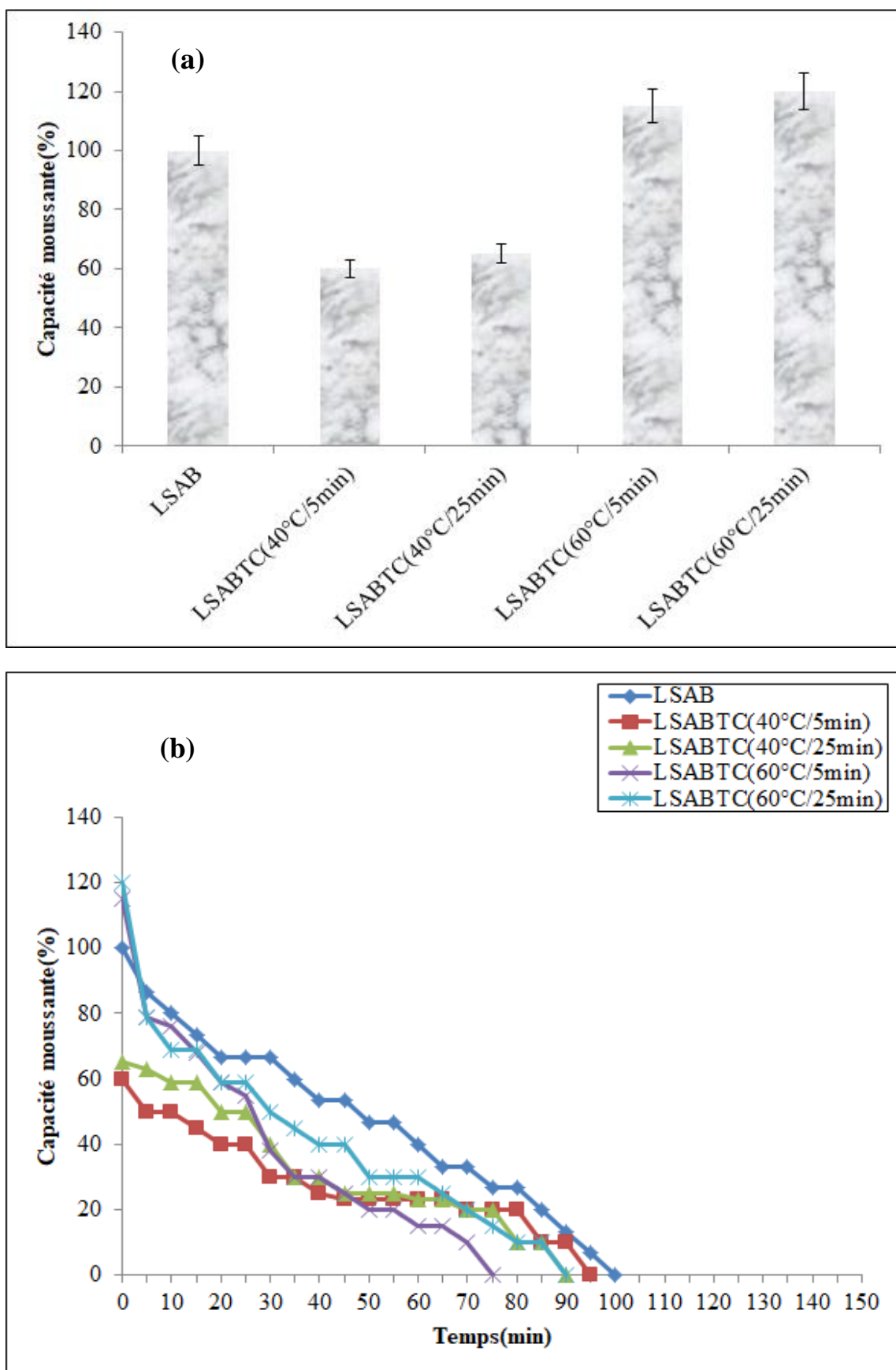
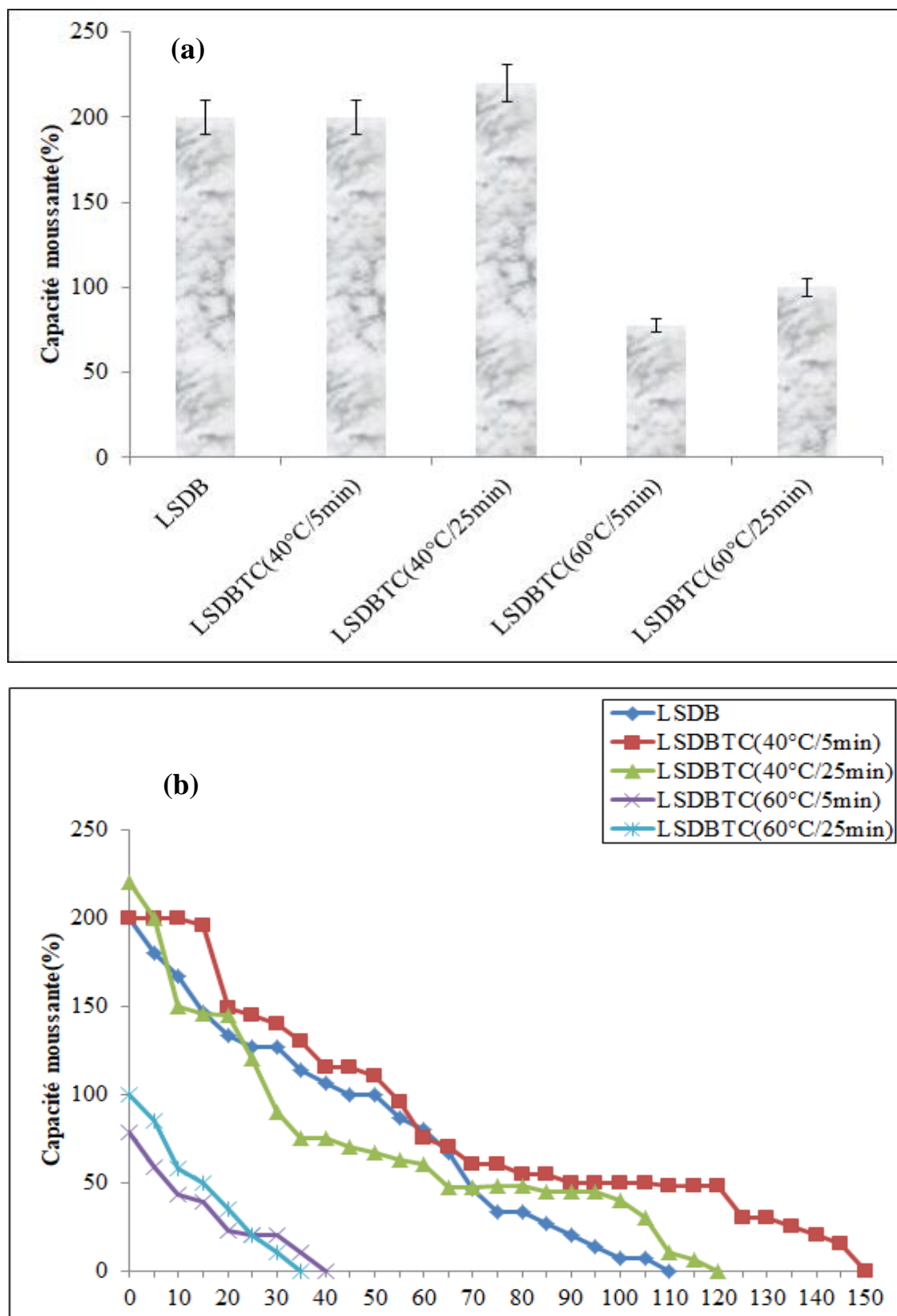


Figure 18 : Moussabilité (a) à t=0min et stabilité de la mousse (b) du lactosérum acide brut et traité par chauffage au bain marie à 40 et 60°C pendant 5 et 25min au cours du temps.



**Figure 19** : Moussabilité (a) à  $t=0\text{min}$  et stabilité de la mousse (b) du lactosérum doux brut et traité par chauffage au bain marie à 40 et 60°C pendant 5 et 25min au cours du temps.

### 2.1.2. Diamètre des bulles d'air

Les figures 20 et 21 montrent les résultats du diamètre moyen des bulles d'air des mousses (a) à  $t=0\text{min}$  et de sa cinétique (b) des lactosérums bruts (acide et doux) et traités par chauffage au bain marie à 40 et 60°C pendant 5 et 25min au cours du temps.

Selon les figures 20 et 21 (a) ; le diamètre moyen des bulles d'air des mousses des lactosérums bruts (acide et doux) et traités se diffère selon le type du lactosérum et le barème de traitement thermique appliqué (température/temps) :

-A temps  $t=0\text{min}$  ; le lactosérum doux brut a enregistré une valeur du diamètre des bulles d'air supérieure à celle exprimée par le lactosérum acide brut (15,67 contre 13,74  $\mu\text{m}$ ).

-Les mousses des lactosérums bruts traités sont manifestés par des valeurs des diamètres moyens variables comparativement à celles trouvées dans les lactosérums bruts (acide et doux) à savoir:

-Par rapport au lactosérum acide brut ( $\text{Ø}=13,74\mu\text{m}$ ) ; les valeurs des diamètres moyens supérieures sont celles obtenues par le lactosérum acide traité respectivement à 40°C/5min ( $\text{Ø}= 20 \mu\text{m}$ ) ; 40°C/25min ( $\text{Ø}= 17 \mu\text{m}$ ) ; 60°C/5min ( $\text{Ø}=18 \mu\text{m}$ ) ; 60°C/25min ( $\text{Ø}= 17 \mu\text{m}$ ) ;

-Contrairement au lactosérum doux brut ( $\text{Ø}=15,67\mu\text{m}$ ) ; les valeurs des diamètres moyens stables et inférieures sont celles obtenues par le lactosérum doux traité respectivement à 40°C/5min ( $\text{Ø}=15,67\mu\text{m}$ ) et 40°C/25min ( $\text{Ø}= 15\mu\text{m}$ ).

Selon les figures 20 et 21 (b) ; en terme de stabilité de la mousse ; les cinétiques de diamètre moyen des mousses ont des allures croissantes au cours du temps :

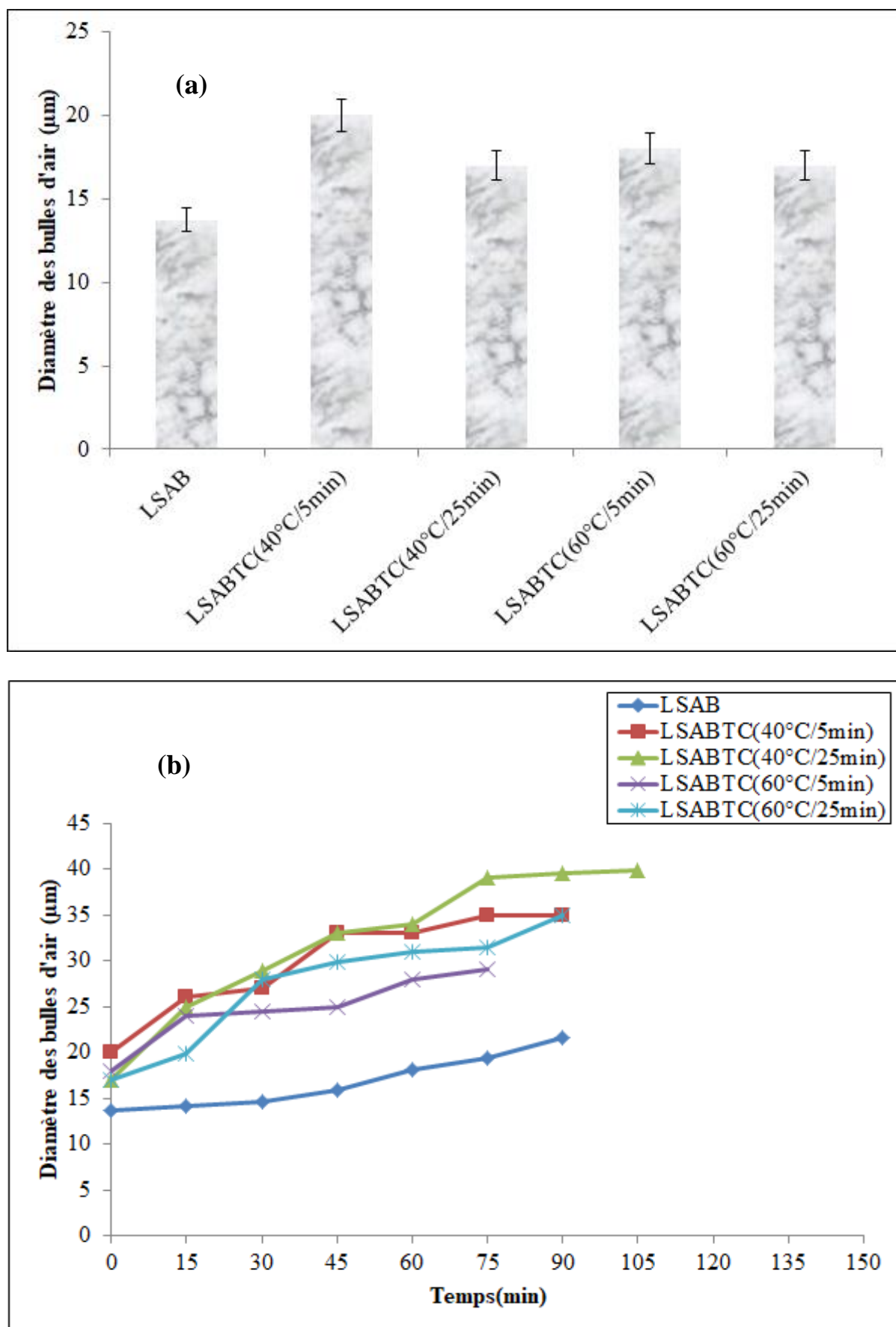
- Au cours du temps, nous avons constaté que les cinétiques de l'évolution des diamètres moyens des bulles d'air notées pour les lactosérums bruts et traités par chauffage conventionnel étaient progressives avec des rythmes différents ;dont le diamètre moyen des mousses du lactosérum acide brut a passé du 13,74 à 21,69 $\mu\text{m}$  après une durée de stabilité des mousses égale à 90min, par contre, celui noté pour les mousses du lactosérum doux brut a évolué du 15,67 à 28,32 $\mu\text{m}$  à temps  $t=105\text{min}$  ;

-Par rapport au rythme de l'évolution du diamètre moyen des bulles d'air des mousses enregistré pour le lactosérum acide brut ( $\text{Ø}= 13,74$  à 21,69 $\mu\text{m}$  à 90min) ; les diamètres moyens supérieurs sont ceux marqués dans le lactosérum acide brut traité respectivement à

40°C/5min ( $\emptyset$ = 20 à 35 $\mu$ m à 90min) ; 40°C/25min ( $\emptyset$ = 17 à 39,9 $\mu$ m à 105min) ; 60°C/5min ( $\emptyset$ = 18 à 29 $\mu$ m à 75min) et 60°C/25min ( $\emptyset$ = 17 à 35 $\mu$ m à 90min) ;

-Comparativement au rythme de l'évolution du diamètre moyen des bulles d'air des mousses enregistré pour le lactosérum doux brut ( $\emptyset$ =15,67 à 28,32 $\mu$ m à 105min) ; les diamètres moyens supérieurs sont ceux marqués dans le lactosérum doux brut traité respectivement à 40°C/5min ( $\emptyset$ = 15,67 à 38 $\mu$ m à 90min) ; 40°C/25min ( $\emptyset$ = 15 à 40 $\mu$ m à 105min) ; 60°C/5min ( $\emptyset$ = 20 à 34 $\mu$ m à 75min) et 60°C/25min ( $\emptyset$ = 20 à 36 $\mu$ m à 90min) .

Le tableau 10 illustre les aspects microscopiques des mousses des lactosérums bruts et traités par chauffage au bain marie à 40 et 60 °C pendant 5 et 25 min.



**Figure 20** : Diamètre des bulles d'air (a) à t=0min et sa cinétique (b) du lactosérum acide brut et traité par chauffage au bain marie à 40 et 60°C pendant 5 et 25min au cours du temps.

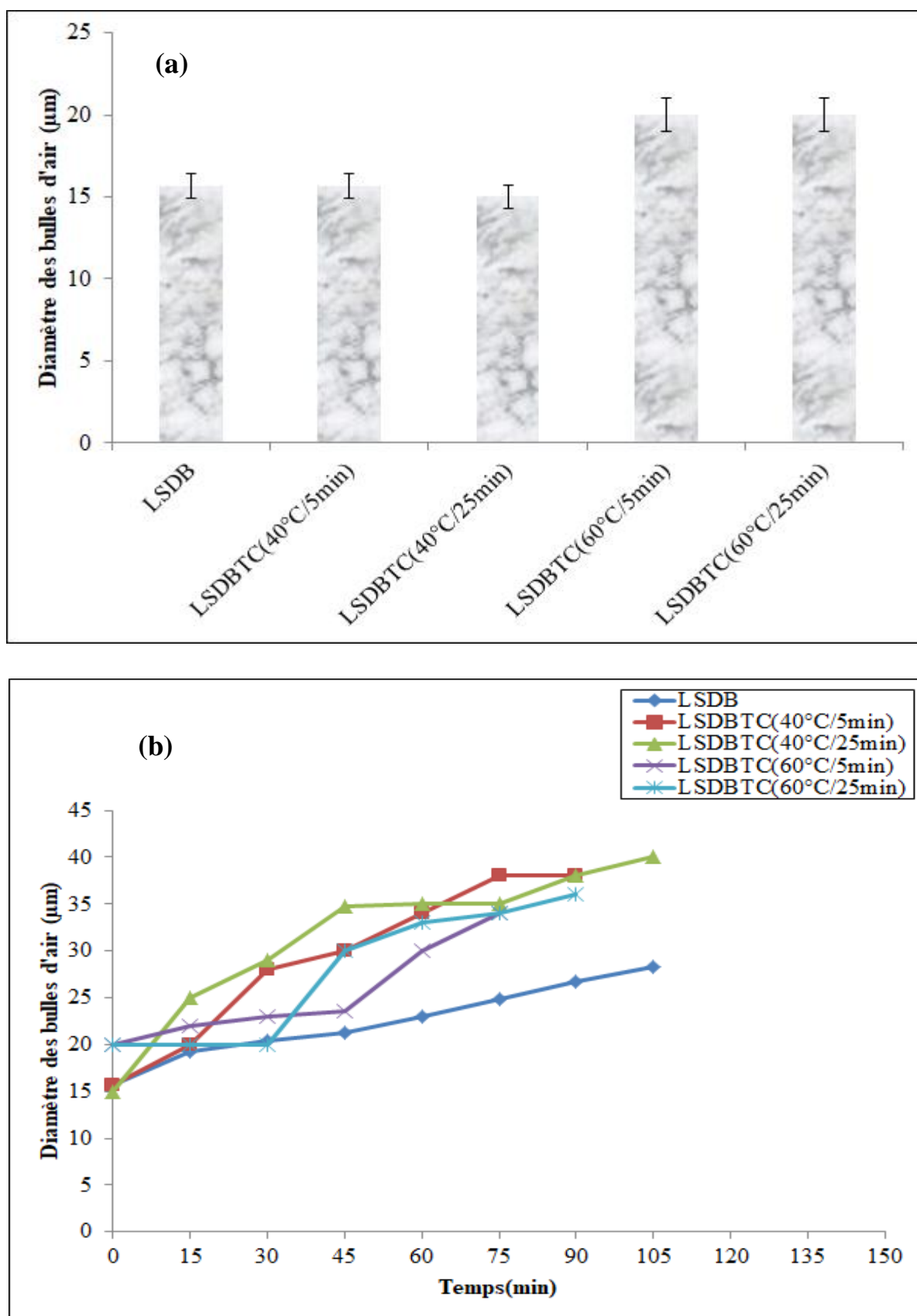
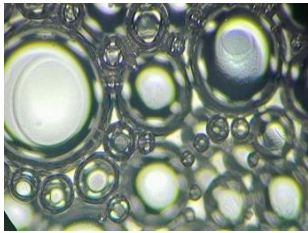
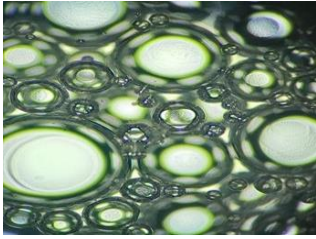
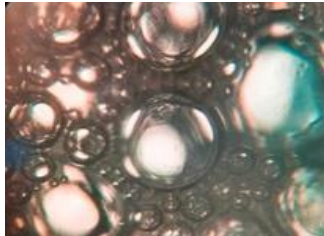
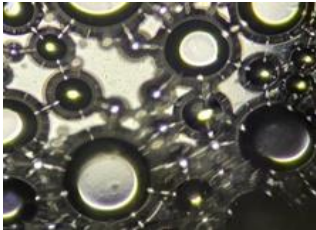
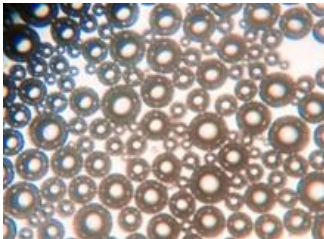
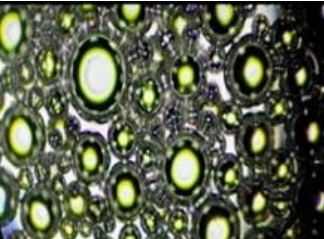

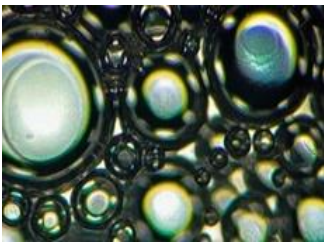
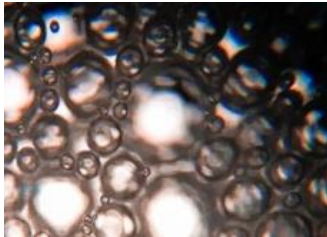
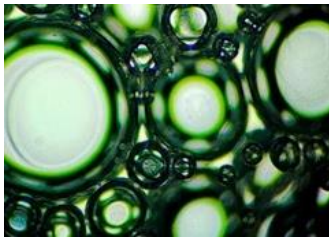


Figure 21 : Diamètre des bulles d'air (a) à t=0min et sa cinétique (b) du lactosérum doux brut et traité par chauffage au bain marie à 40 et 60°C pendant 5 et 25min au cours du temps.



**Tableau10** : Aspects microscopiques des mousses des lactosérums bruts et traités par chauffage au bain marie à 40 et 60 °C pendant 5 et 25 min (G :x100).

Matrice des mousses	Photos à temps t=t <sub>0</sub>	Matrice des mousses	Photos à temps t=t <sub>0</sub>
LSAB		LSDB	
LSABTC (40°C/5min)		LSDBTC (40°C/5min)	
LSABTC (40°C/25min)		LSDBTC (40°C/25min)	
LSABTC (60°C/5min)		LSDBTC (60°C/5min)	
LSABTC (60°C/25min)		LSDBTC (60°C/25min)	

## 2.2. Lactosérums bruts et traités par ultrasons

### 2.2.1. Capacité moussante

Les figures 22 et 23 montrent les résultats de la moussabilité (a) à  $t=0\text{min}$  et de la stabilité de la mousse (b) des lactosérums bruts (acide et doux) et traités par ultrasons pendant 5 et 15min au cours du temps.

Selon les figures 22 et 23 (a) ; en terme de moussabilité ; le comportement moussant des lactosérums bruts (acide et doux) et traités se diffère selon le type du lactosérum et le barème de traitement thermique appliqué (fréquence/temps) :

-A temps  $t=0\text{min}$  ; le lactosérum doux brut a enregistré une capacité moussante qui est deux fois supérieure à celle exprimée par le lactosérum acide brut (200 contre 100%).

-Les lactosérums bruts traités sont manifestés par des capacités moussantes variables comparativement à celles trouvées dans les lactosérums bruts (acide et doux) à savoir:

-Par rapport au lactosérum acide brut (CM=100%) ; les capacités moussantes supérieures sont celles obtenues par le lactosérum acide brut traité respectivement à 40kHz/5min (CM=133,33%) et à 40kHz/15min (CM= 153,33%) ;

-Contrairement au lactosérum doux brut (CM=200%) ; les capacités moussantes inférieures sont celles obtenues par le lactosérum doux brut traité respectivement à 40kHz/5min (CM=113,33%) et à 40kHz/15min (CM= 86,66%).

Selon les figures 22 et 23 (b) ; en terme de stabilité de la mousse ; les cinétiques de stabilité des mousses ont des allures décroissantes au cours du temps :

- Au cours du temps, nous avons constaté que la diminution de la capacité moussante pour les lactosérums bruts et traités par ultrasons était progressive avec des rythmes différents ; dont la déstabilisation totale de la mousse pour le lactosérum acide brut a été observée à 100min dont elle a évolué du 100 à 6,66% à 95min, cette durée de stabilité est légèrement inférieure à celle marquée pour la mousse du lactosérum doux brut, elle atteint 110min et elle varie du 200 à 6,66% à 105min ;

-Par rapport à la durée de la déstabilisation totale de la mousse enregistrée pour le lactosérum acide brut (DS=100min) ; les durées de la stabilité inférieure et de la stabilité supérieure sont celles marquées dans le lactosérum acide brut traité respectivement à

40kHz/5min (DS=75min ; CM= 133,33 à 6,66 à 70min) et 40kHz/15min (DS=130min ; CM=153,33 à 6,66% à 125min) ;

-Comparativement à la durée de la déstabilisation totale de la mousse enregistrée pour le lactosérum doux brut (DS=110min) ; les durées des stabilités supérieures sont celles marquées dans le lactosérum doux brut traité respectivement à 40kHz/5min (DS=120min ; CM= 113,33 à 6,66% à 115min) et 40kHz/15min (DS=150min ; CM=86,66 à 6,66% à 145min).

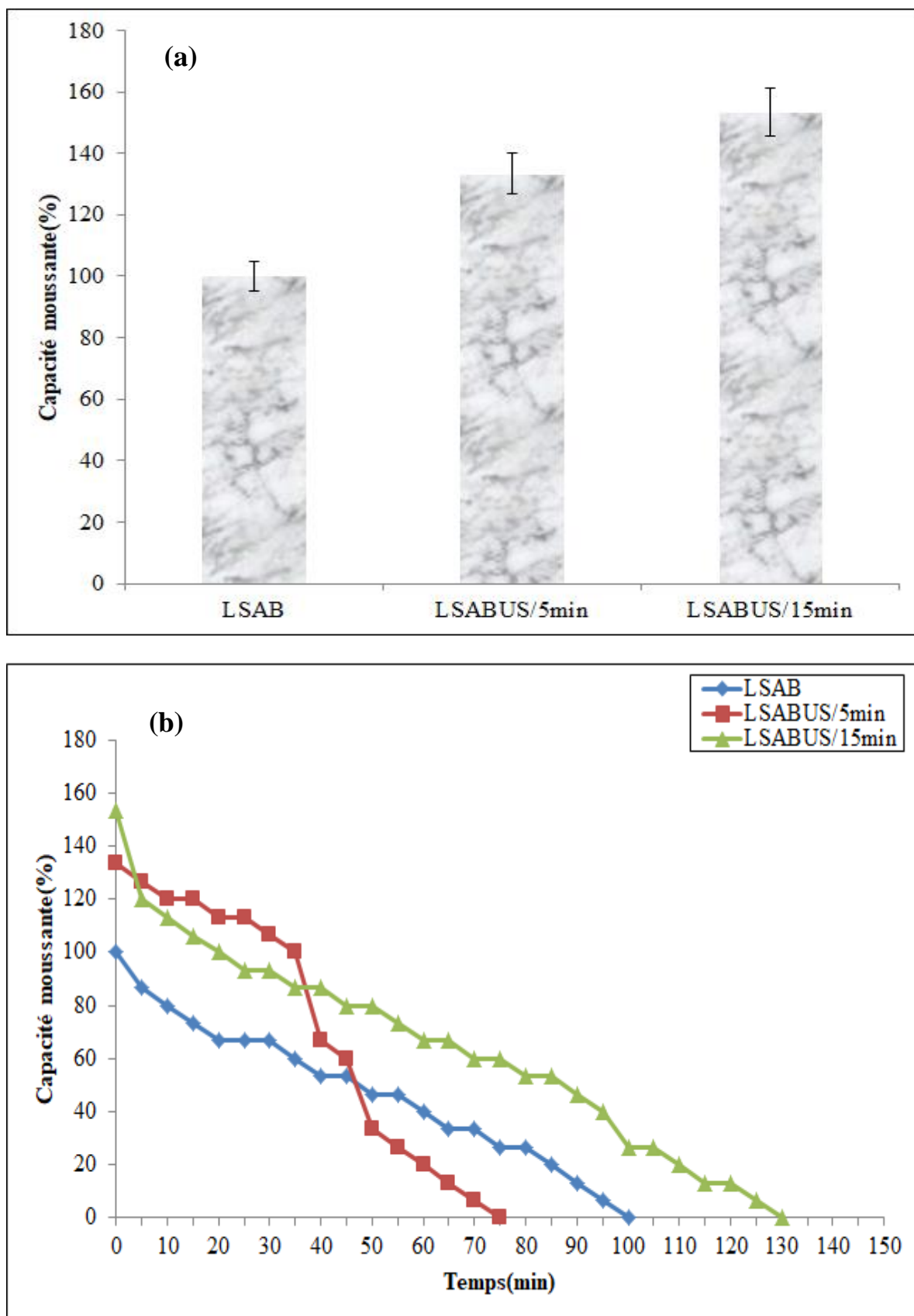


Figure 22 : Moussabilité (a) à  $t=0\text{min}$  et stabilité de la mousse (b) du lactosérum acide brut et traité par ultrasons pendant 5 et 15min au cours du temps.

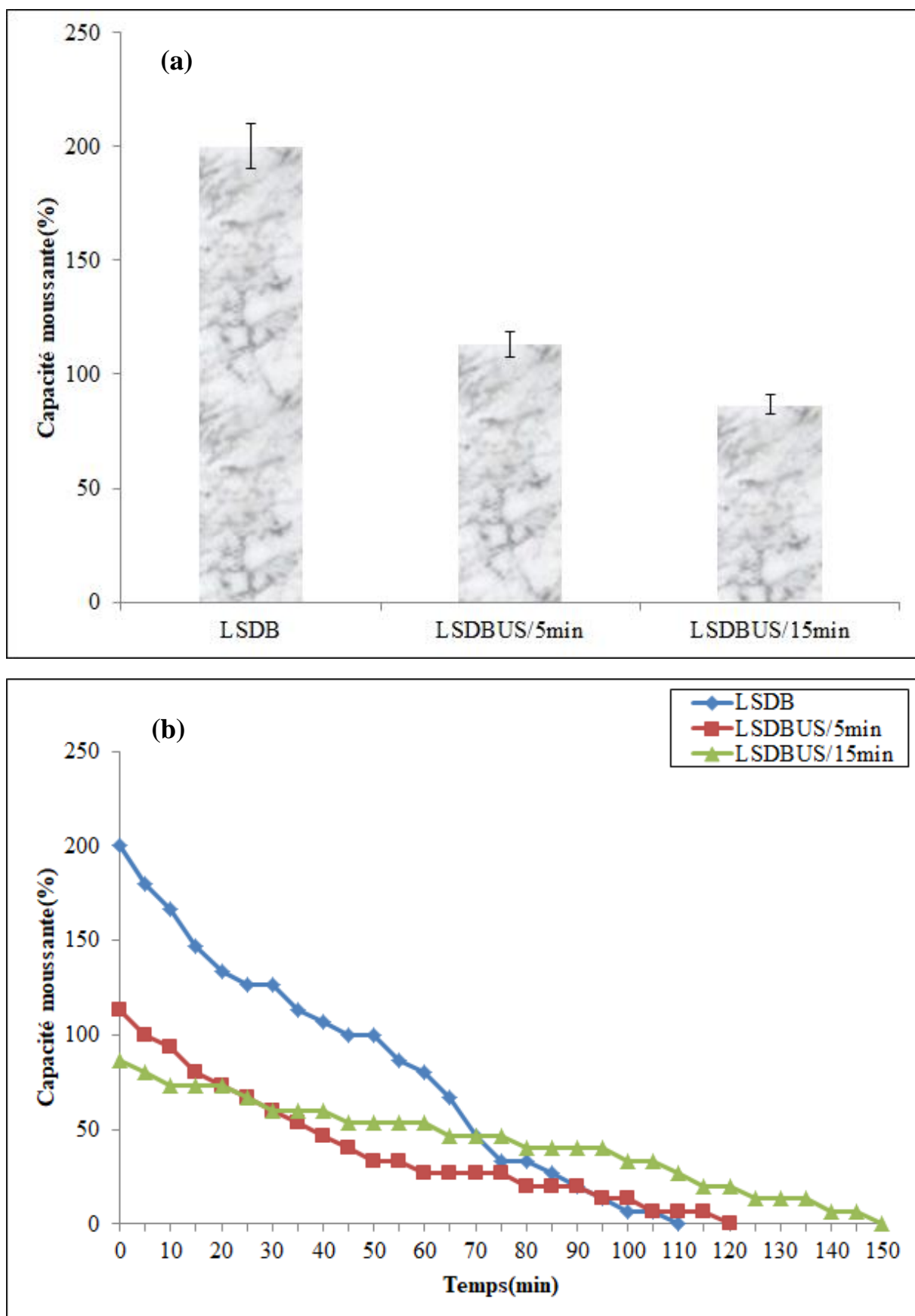


Figure 23 : Moussabilité (a) à  $t=0\text{min}$  et stabilité de la mousse (b) du lactosérum doux brut et traité par ultrasons pendant 5 et 15min au cours du temps.

### 2.2.2. Diamètre des bulles d'air

Les figures 24 et 25 montrent les résultats du diamètre moyen des bulles d'air des mousses (a) à  $t=0\text{min}$  et de sa cinétique (b) des lactosérums bruts (acide et doux) et traités par ultrasons pendant 5 et 15min au cours du temps.

Selon les figures 24 et 25 (a) ; le diamètre moyen des bulles d'air des mousses des lactosérums bruts (acide et doux) et traités se diffère selon le type du lactosérum et le barème de traitement ultrasonore appliqué (fréquence/temps) :

-A temps  $t=0\text{min}$  ; le lactosérum doux brut a enregistré une valeur du diamètre des bulles d'air supérieure à celle exprimée par le lactosérum acide brut ( $15,67$  contre  $13,74\ \mu\text{m}$ ).

-Les mousses des lactosérums bruts traités sont manifestés par des valeurs des diamètres moyens supérieures comparativement à celles trouvées dans les lactosérums bruts (acide et doux) à savoir:

-Par rapport au lactosérum acide brut ( $\varnothing=13,74\mu\text{m}$ ) ; les valeurs des diamètres moyens supérieures sont celles obtenues par le lactosérum acide traité respectivement à  $40\text{kHz}/5\text{min}$  ( $\varnothing= 27,11\ \mu\text{m}$ ) et  $40\text{kHz}/15\text{min}$  ( $\varnothing= 32,26\ \mu\text{m}$ ) ;

-Contrairement au lactosérum doux brut ( $\varnothing=15,67\mu\text{m}$ ) ; les valeurs des diamètres moyens supérieures sont celles obtenues par le lactosérum doux traité respectivement à  $40\text{kHz}/5\text{min}$  ( $\varnothing=26,75\mu\text{m}$ ) et  $40\text{kHz}/15\text{min}$  ( $\varnothing= 27,60\mu\text{m}$ ).

Selon les figures 24 et 25 (b) ; en terme de stabilité de la mousse ; les cinétiques de diamètre moyen des mousses ont des allures croissantes au cours du temps :

- Au cours du temps, nous avons constaté que les cinétiques de l'évolution des diamètres moyens des bulles d'air notées pour les lactosérums bruts et traités par ultrasons étaient progressives avec des rythmes différents ; dont le diamètre moyen des mousses du lactosérum acide brut a passé du  $13,74$  à  $21,69\mu\text{m}$  après une durée de stabilité des mousses égale à  $90\text{min}$ , par contre, celui noté pour les mousses du lactosérum doux brut a évolué du  $15,67$  à  $28,32\mu\text{m}$  à temps  $t=105\text{min}$ ;

-Par rapport au rythme de l'évolution du diamètre moyen des bulles d'air des mousses enregistré pour le lactosérum acide brut ( $\varnothing= 13,74$  à  $21,69\mu\text{m}$  à  $90\text{min}$ ) ; les diamètres moyens supérieurs sont ceux marqués dans le lactosérum acide brut traité respectivement à

---

40kHz/5min ( $\emptyset= 27,11$  à  $47,72\mu\text{m}$  à 75min) et 40kHz/15min ( $\emptyset= 32,26$  à  $51,82\mu\text{m}$  à 120min) ;

-Comparativement au rythme de l'évolution du diamètre moyen des bulles d'air des mousses enregistré pour le lactosérum doux brut ( $\emptyset=15,67$  à  $28,32\mu\text{m}$  à 105min) ; les diamètres moyens supérieurs sont ceux marqués dans le lactosérum doux brut traité respectivement à 40kHz/5min ( $\emptyset= 26,75$  à  $47,24\mu\text{m}$  à 120min) et 40kHz/15min ( $\emptyset= 27,59$  à  $50,37\mu\text{m}$  à 150min).

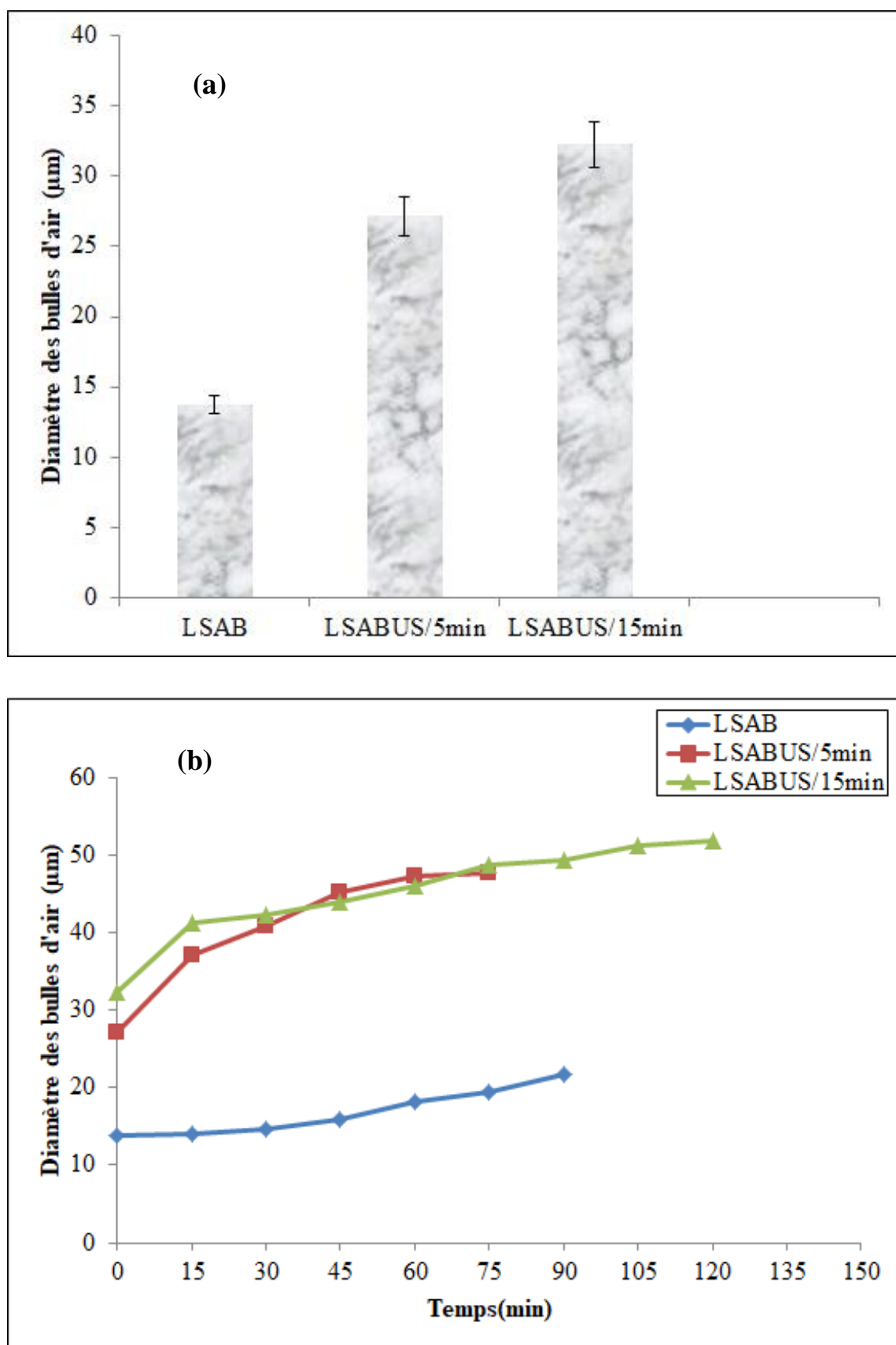
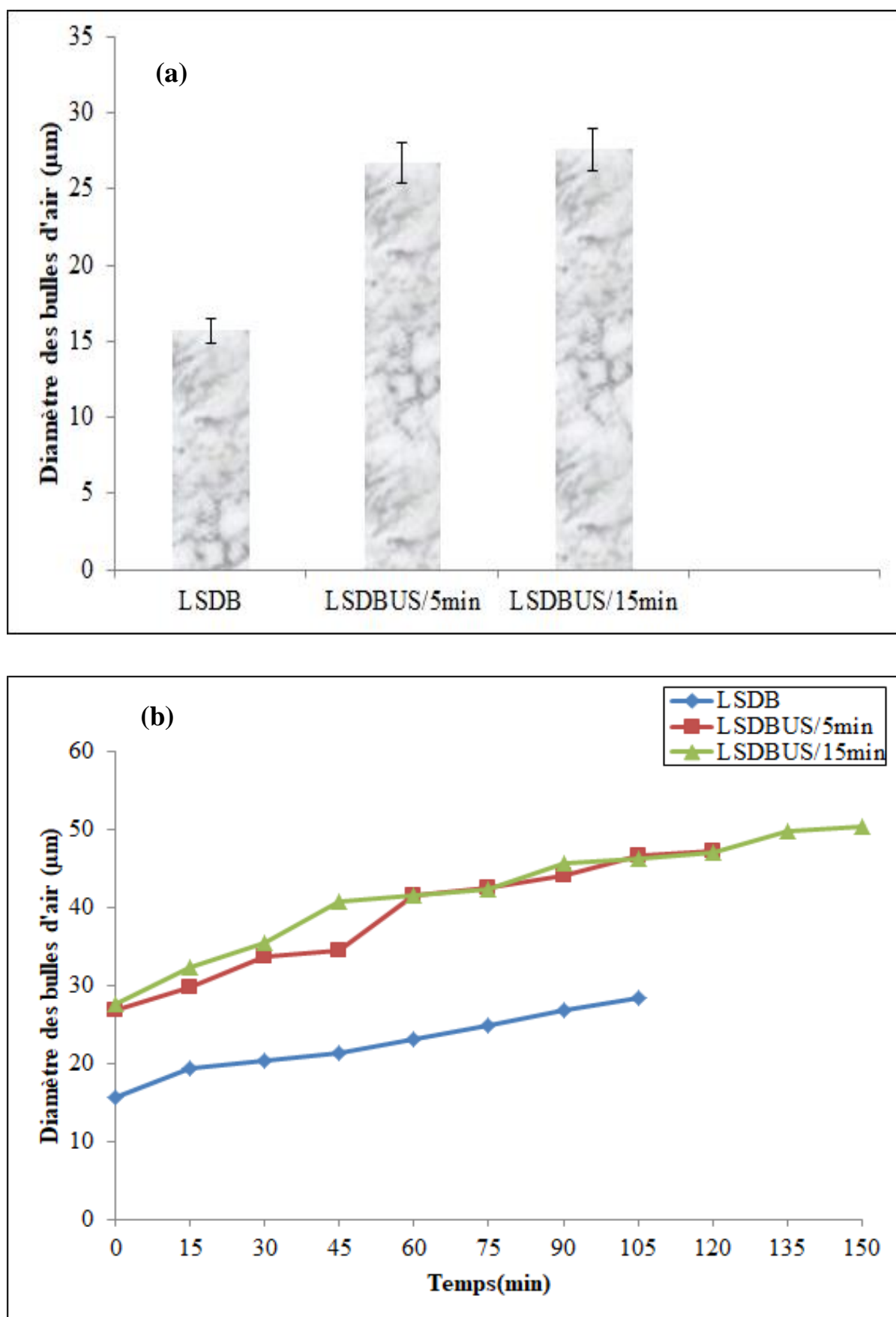


Figure 24 : Diamètre des bulles d'air (a) à  $t=0\text{min}$  et sa cinétique (b) du lactosérum acide brut et traité par ultrasons pendant 5 et 15min au cours du temps.

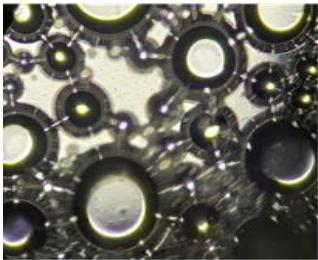
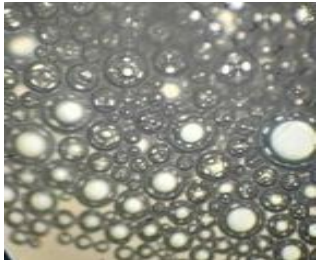
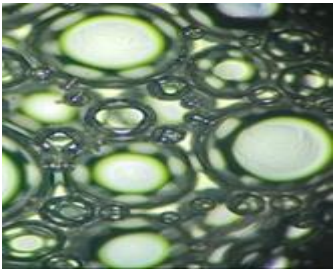
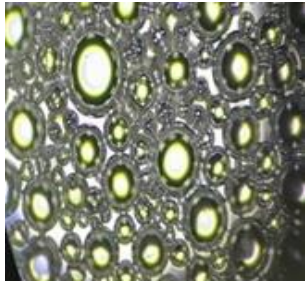
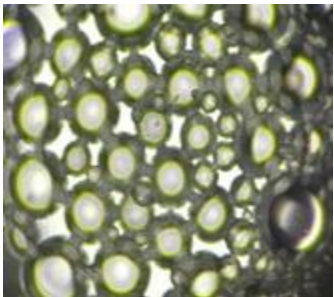
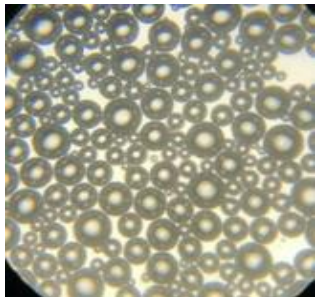




**Figure 25** : Diamètre des bulles d'air (a) à  $t=0\text{min}$  et sa cinétique (b) du lactosérum doux brut et traité par ultrasons pendant 5 et 15min au cours du temps.

Le tableau 11 indique les aspects microscopiques des mousses des lactosérums bruts et traités par ultrasons pendant 5 et 15 min.

**Tableau 11** : Aspects microscopiques des mousses des lactosérums bruts et traités par ultrasons pendant 5 et 15 min (G :x100).

Matrice des mousses	Photos à temps $t=t_0$	Matrice des mousses	Photos à temps $t=t_0$
LSAB		LSDB	
LSABUS (40kHz/5min)		LSDBUS (40kHz/5min)	
LSABUS (40kHz/15min)		LSDBUS (40kHz /15min)	

## 2.3. Lactosérums bruts et traités par thermosonication

### 2.3.1. Capacité moussante

La figure 26 montre les résultats de la moussabilité (a) à  $t=0\text{min}$  et de la stabilité de la mousse (b) des lactosérums bruts (acide et doux) et traités par thermosonication au cours du temps.

Selon la figure 26 (a) ; en terme de moussabilité ; le comportement moussant des lactosérums bruts (acide et doux) et traités se diffère selon le type du lactosérum et les conditions des traitements combinés appliqués (traitement thermique et ultrasons) :

-A temps  $t=0\text{min}$  ; le lactosérum doux brut a enregistré une capacité moussante qui est deux fois supérieure à celle exprimée par le lactosérum acide brut (200 contre 100%).

-Les lactosérums bruts traités par thermosonication sont manifestés par des capacités moussantes similaires comparativement à celles trouvées dans les lactosérums bruts (acide et doux) à savoir:

-Par rapport au lactosérum acide brut ( $CM=100\%$ ) ; la capacité moussante du lactosérum acide brut traité par thermosonication ( $60^\circ\text{C}/5\text{min}-40\text{kHz}/15\text{min}$ ) est estimée à  $CM=100\%$  ;

-Même constat a été marquée pour lactosérum doux brut ( $CM=200\%$ ) ; dont la capacité moussante du lactosérum doux brut traité par thermosonication ( $40^\circ\text{C}/5\text{min}-40\text{kHz}/15\text{min}$ ) est estimée à  $CM=200\%$

Selon la figure 26 (b) ; en terme de stabilité de la mousse ; les cinétiques de stabilité des mousses ont des allures décroissantes au cours du temps :

- Au cours du temps, nous avons constaté que la diminution de la capacité moussante pour les lactosérums bruts et traités par thermosonication était progressive avec des rythmes différents ; dont la déstabilisation totale de la mousse pour le lactosérum acide brut a été observée à 100min dont elle a évolué du 100 à 6,66% à 95min, cette durée de stabilité est légèrement inférieure à celle marquée pour la mousse du lactosérum doux brut, elle atteint 110min et elle varie du 200 à 6,66% à 105min ;

-Par rapport à la durée de la déstabilisation totale des mousses enregistrée pour le lactosérum acide brut ( $DS=100\text{min}$ ) ; la durée de la stabilité supérieure des mousses est celle marquée dans le lactosérum acide brut traité par thermosonication fixée à  $60^\circ\text{C}/5\text{min}-40\text{kHz}/15\text{min}$  ( $DS=165\text{min}$  ;  $CM= 100$  à  $15$  à  $150\text{min}$ ) ;

-Comparativement à la durée de la déstabilisation totale de la mousse enregistrée pour le lactosérum doux brut (DS=110min) ; la durée de la stabilité inférieure des mousses est celle marquée dans le lactosérum doux brut traité par thermosonication fixée à 40°C/5min-40kHz/15min (DS=60min ; CM= 200 à 40 à 45min).

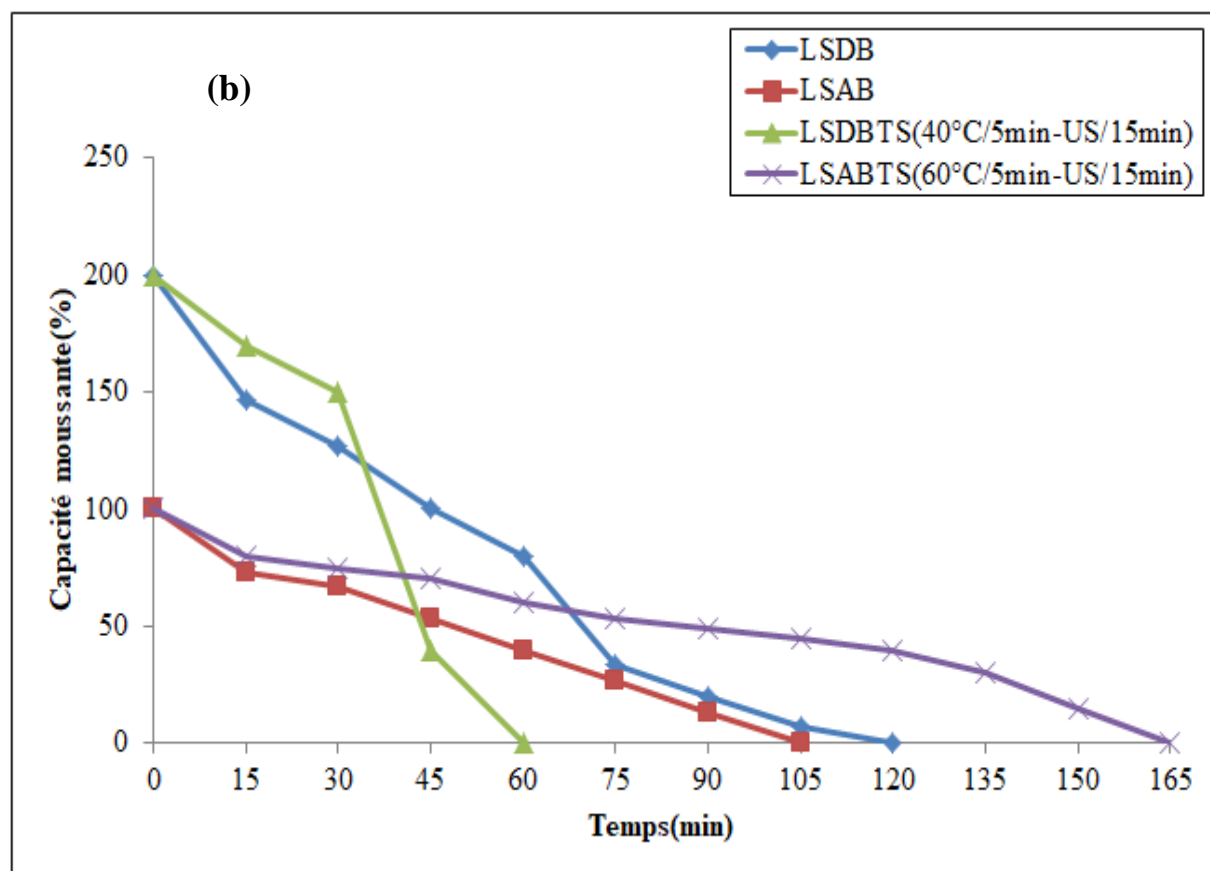
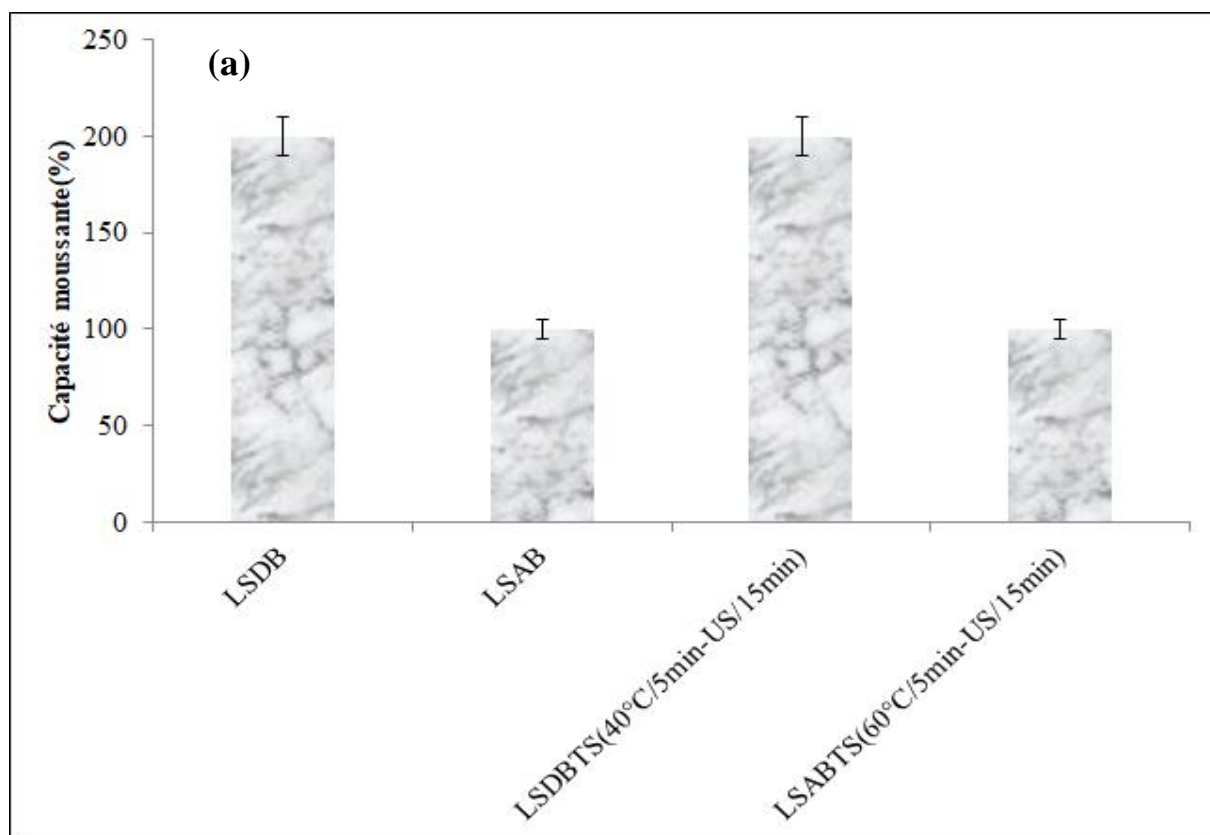


Figure 26 : Moussabilité (a) à  $t=0\text{min}$  et stabilité de la mousse (b) des lactosérums bruts et traités par thermosonication au cours du temps.

### 2.3.2. Diamètre des bulles d'air

La figure 27 montre les résultats du diamètre moyen des bulles d'air des mousses (a) à  $t=0\text{min}$  et de sa cinétique (b) des lactosérums bruts (acide et doux) et traités par thermosonication au cours du temps.

Selon la figure 27 (a) ; le diamètre moyen des bulles d'air des mousses des lactosérums bruts (acide et doux) et traités se diffère selon le type du lactosérum et les conditions des traitements combinés appliqués (traitement thermique et ultrasons) :

- A temps  $t=0\text{min}$  ; le lactosérum doux brut a enregistré une valeur du diamètre des bulles d'air supérieure à celle exprimée par le lactosérum acide brut (15,67 contre 13,74  $\mu\text{m}$ ).

- Les mousses des lactosérums bruts traités sont manifestés par des valeurs des diamètres moyens variables comparativement à celles trouvées dans les lactosérums bruts (acide et doux) à savoir:

- Par rapport au lactosérum acide brut ( $\emptyset=13,74\mu\text{m}$ ) ; la valeur du diamètre moyen supérieure est celle obtenue par le lactosérum acide traité par thermosonication fixée à  $60^{\circ}\text{C}/5\text{min}-40\text{kHz}/15\text{min}$  ( $\emptyset= 23 \mu\text{m}$ ) ;

- Contrairement au lactosérum doux brut ( $\emptyset=15,67\mu\text{m}$ ) ; la valeur du diamètre moyen inférieure est celle obtenue par le lactosérum doux traité par thermosonication fixée à  $40^{\circ}\text{C}/5\text{min}-40\text{kHz}/15\text{min}$  ( $\emptyset= 15 \mu\text{m}$ ).

Selon la figure 27 (b) ; en terme de stabilité de la mousse ; les cinétiques de diamètre moyen des mousses ont des allures croissantes au cours du temps :

- Au cours du temps, nous avons constaté que les cinétiques de l'évolution des diamètres moyens des bulles d'air notées pour les lactosérums bruts et traités par thermosonication étaient progressives avec des rythmes différents ; dont le diamètre moyen des mousses du lactosérum acide brut a passé du 13,74 à 21,69 $\mu\text{m}$  après une durée de stabilité des mousses égale à 90min, par contre, celui noté pour les mousses du lactosérum doux brut a évolué du 15,67 à 28,32 $\mu\text{m}$  à temps  $t=105\text{min}$ ;

- Par rapport au rythme de l'évolution du diamètre moyen des bulles d'air des mousses enregistré pour le lactosérum acide brut ( $\emptyset= 13,74$  à 21,69 $\mu\text{m}$  à 90min) ; le diamètre moyen

---

supérieur est celui marqué dans le lactosérum acide brut traité par thermosonication fixée 60°C/5min-40kHz/15min ( $\emptyset$ = 23 à 46 $\mu$ m à 150min) ;

- Comparativement au rythme de l'évolution du diamètre moyen des bulles d'air des mousses enregistré pour le lactosérum doux brut ( $\emptyset$ =15,67 à 28,32 $\mu$ m à 105min) ; le diamètre moyen inférieur est celui marqué dans le lactosérum doux brut traité par thermosonication fixée à 40°C/5min-40kHz/15min ( $\emptyset$ = 15 à 24,5  $\mu$ m à 45min).

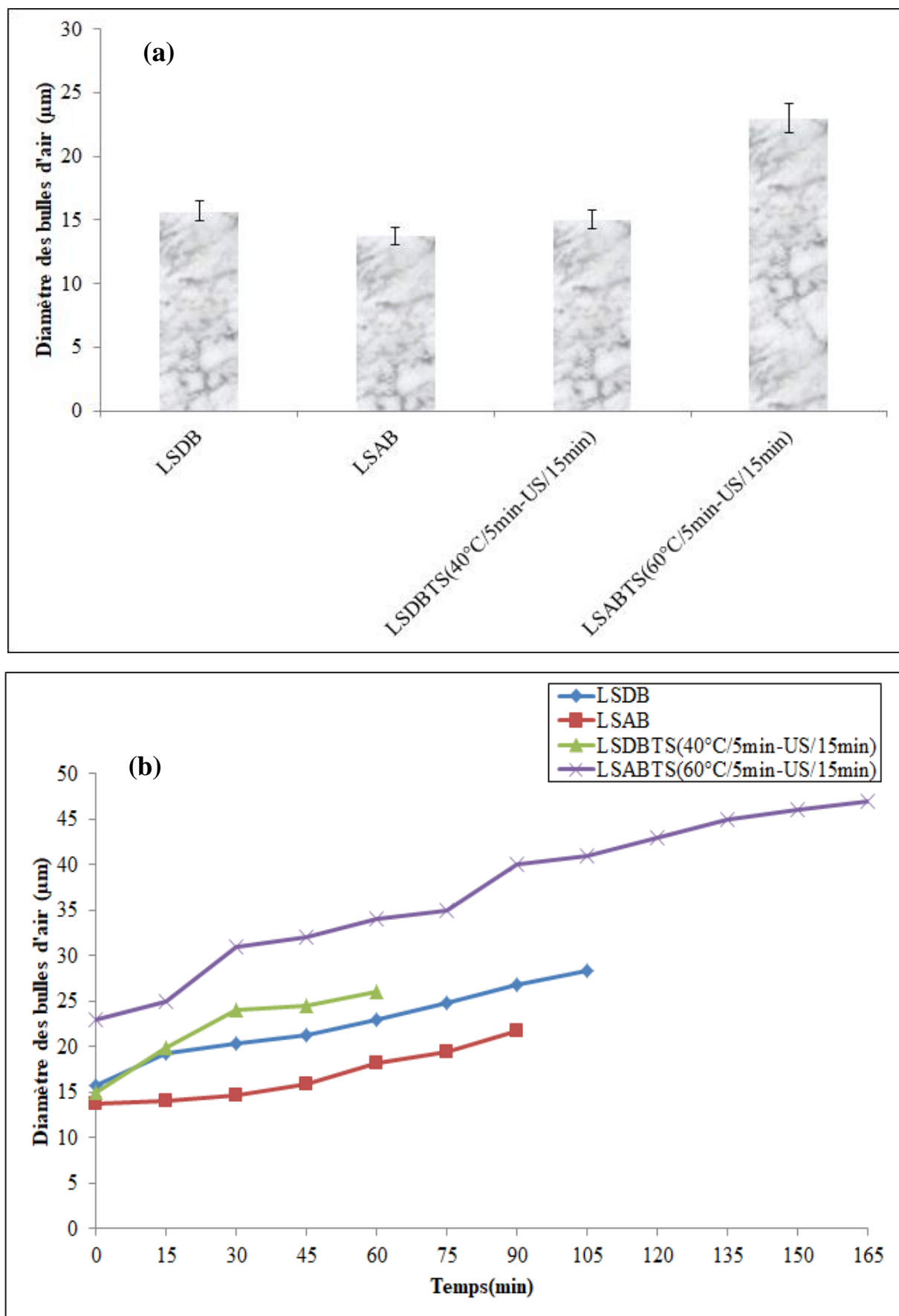
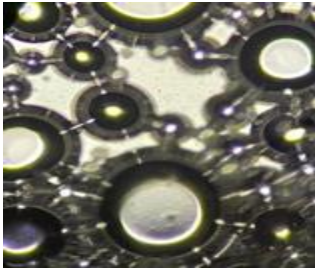
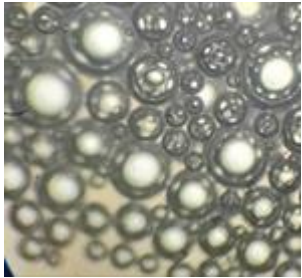
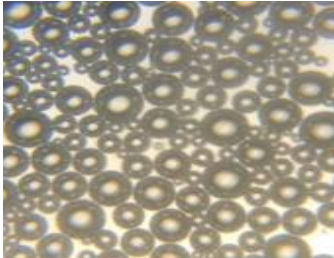
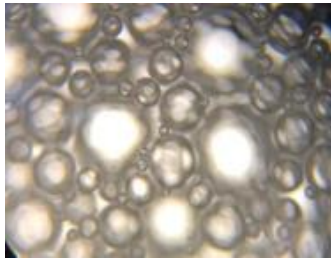


Figure 27 : Diamètre des bulles d'air (a) à  $t=0$ min et sa cinétique (b) des lactosérums bruts et traités par thermosonication au cours du temps.



Le tableau 12 montre les aspects microscopiques des mousses des lactosérums bruts et traités par thermosonication.

**Tableau 12 :** Aspects microscopiques des mousses des lactosérums bruts et traités par thermosonication (G :x100).

Matrice des mousses	Photos à temps t=t <sub>0</sub>	Matrice des mousses	Photos à temps t=t <sub>0</sub>
LSAB		LSDB	
LSABTTS (60°C/25min et 40kHz/15min)		LSDBTTS (40°C/5min et 40kHz/15min)	

Il ressort de ces résultats que les propriétés moussantes des lactosérums bruts (acide et doux) et traités à savoir la capacité moussante, le diamètre des bulles d'air et leurs stabilités au cours du temps dépendent de type du lactosérum mis en contrôle, de procédé et de la formule de traitement appliquée en termes de température /temps, de fréquence /temps et de leur combinaison (température /temps-fréquence /temps).

En revanche, les résultats obtenus sont ainsi liés à la viscosité de la matrice protéique, son degré de dénaturation et son environnement physicochimique et biologique.

Les mousses sont des systèmes colloïdaux formés par l'agglomération de phases dispersées (gaz) dans une phase continue (**Damodaran et Paraf, 1997**). Les protéines, en tant que macromolécules amphiphiles, sont considérées comme des agents moussants car elles ont la capacité de se déployer et de s'adsorber aux interfaces entre les phases dispersée et

continue (**Borcherding et al., 2008 ; Tamm et al., 2012**) et de former une couche adsorbée viscoélastique (**Wilde, 2000**).

Selon les travaux de **Lajnaf et al.,(2017)**,les propriétés moussantes du lactosérum dépendent du pH, de la composition protéique et de son degré de dénaturation après traitement thermique, dont les solutions de lactosérum qui ont présenté la meilleure moussabilité sont celles dotées d'une valeur de pH à proximité du point isoélectrique de  $\beta$ -Lg et  $\alpha$ -La (pH autour de 4-5), quelle que soit la température de chauffage. Un traitement thermique à 70 °C pendant 30 minutes améliore les propriétés moussantes des lactosérums acides de bovin et de camelin, tandis que la stabilité de la mousse n'est considérablement améliorée que pour le lactosérum acide de camelin (**Lajnaf et al.,2017**).

Le traitement thermique peut induire des modifications de la structure secondaire et tertiaire des protéines, ce qui affecte leur adsorption et la formation d'un film viscoélastique (**Wilde, 2000**). Chauffer les protéines à une température supérieure à 60 °C peut augmenter leur hydrophobicité et leur activité de surface, améliorant ainsi leur capacité d'adsorption et diminuant leur tension superficielle, contribuant ainsi à une meilleure moussabilité (**Raikos et al., 2007**).

Pour les lactosérums du lait camelin et du lait de vache, le comportement des protéines à l'interface air-eau est une conséquence du changement de leur conformation, de leurs structures tertiaires et quaternaires, vers des états de structure moins régulière (**Cases et al., 2005**). En effet, les protéines présentent les meilleures propriétés moussantes à des pH où elles sont moins compactes et plus flexibles (**Zhang et al., 2004**).

Les protéines de lactosérum restent solubles à faible pH (acide) malgré la charge négative la plus faible (**Anandharamakrishnan et al., 2008**).Ainsi, **Marinova et al. (2009)** ont constaté que les couches adsorbées de protéines de lactosérum à l'interface air-eau sont plus denses, avec une répulsion électrostatique minimale entre les molécules, à un pH compris entre 4 et 4,5. Par conséquent, les mousses créées par les protéines de lactosérum à pH acide sont plus stables que celles à pH neutre (**Lajnaf et al.,2017**).

Les protéines du lactosérum jouent un rôle essentiel dans la formation et la stabilisation de la mousse de lait, ce qui est dû à leurs propriétés interfaciales étroitement liées à leur structure ; cette structure dépend fortement de l'environnement chimique et du traitement thermique appliqué (**Lajnaf et al.,2017**). En effet, après un traitement thermique proche de

60 °C, à pH neutre et faible force ionique, la  $\beta$ -Lg se dissocie de sa structure dimérique native en monomères natifs. Sa dénaturation thermique s'est produite à une température de 78 °C, permettant des réactions d'échange thiol/disulfure et donc la formation d'agrégats (**Kazmierski & Corredig, 2003**). Pour l' $\alpha$ -La, un comportement de dénaturation thermique différent a été observé, cette métalloprotéine monomérique présentant la température de dénaturation la plus basse des protéines du lactosérum (~ 64 °C) à pH neutre ; à cette température, il ne s'agrège pas en raison de l'absence de groupes thiol libres, bien qu'il contienne quatre ponts disulfures enfouis. L'initiation de l'échange thiol/disulfure commence à 85 °C, principalement par la formation de la liaison disulfure C6-C120, considérée comme la plus réactive (**Livney et al.,2003 ; Doi et al.,1983**). Par la suite, les groupes thiol libres forment des agrégats intermoléculaires de ponts disulfures (**Chaplin et Lyster, 1986**).

Ainsi, les protéines de lactosérum dénaturées à pH neutre peuvent polymériser pour former des agrégats, en fonction de la température de chauffage et de la force ionique (**Lajnaf et al.,2017**). Les propriétés interfaciales et moussantes résultantes résulteront donc d'une adsorption compétitive complexe entre les protéines natives, les protéines dénaturées agrégées et non agrégées (**Schmitt et al., 2007**).

Comparativement à l'étude réalisée sur le lait écrémé par **Borcherding et al.,(2008)**, les mousses les plus stables étaient celles préparées à une température de moussage comprise entre 50 et 60 °C. À ces températures, les taux de diffusion et d'adsorption des protéines, facteurs importants de la formation de mousse, ainsi que du dépliement des protéines, sont accrus. Ce dépliement entraîne une exposition accrue des groupes hydrophobes des protéines du lactosérum. À des températures inférieures à 40 °C, ces derniers sont dissimulés à l'intérieur des structures globulaires de la protéine. Les interactions de ces groupes hydrophobes stabilisent les bulles d'air, ce qui entraîne des bulles plus petites et donc des mousses plus stables (**Borcherding et al.,2008**).

Les résultats trouvés sont comparables à ceux notés par **Borcherding et al.,(2008)** en termes de la capacité moussante et du diamètre des bulles d'air ; dont la mousse de lait écrémé préparée à 30-60 °C qui était de plus en plus stable et pouvait être évaluée après 1 et 20 minutes de drainage , or les résultats du diamètre des bulles d'air ont présenté des valeurs inférieures à celles obtenus dans la mousse du lait écrémé dont le diamètre moyen après 20 minutes de drainage était compris entre 0,32 et 0,27 mm respectivement pour la mousse préparée à 30 et 60 °C .

Il a été démontré que des traitements thermiques doux (environ 60 °C) peuvent améliorer les propriétés moussantes des protéines de lactosérum, tandis que des conditions plus fortes (supérieures à 60 °C) peuvent avoir un impact négatif ; la transformation des protéines de leur état naturel à leur état dénaturé implique diverses modifications de leurs structures secondaires, tertiaires et quaternaires, ainsi que des modifications des liaisons constitutives telles que les liaisons hydrogène, les interactions hydrophobes, les liaisons électrostatiques et les ponts disulfures (**Gharbi et Labbafi, 2019**).

L'augmentation de la stabilité de la mousse est due à une augmentation de la vitesse de diffusion et d'adsorption des protéines du lait à la surface (**Damodaran et Paraf, 1997 ; Dickinson, 2003**) et, dans une moindre mesure, à une diminution de la viscosité apparente et de la tension superficielle des protéines du lait (**Borcherding et al.,2008**).

La chaleur améliore la capacité moussante et la stabilité des protéines de lactosérum et de blanc d'œuf grâce à la dénaturation et au dépliement des chaînes protéiques qui améliorent les propriétés interfaciales (**Van der Plancken et al.,2007 ;Haque et al.,2019**).

Des températures plus élevées entraînent une augmentation du nombre d'interactions hydrophobes (**Jelen et Rattray, 1995 ;Erdem, 2006** ). Ceci est dû à l'exposition de groupes hydrophobes cachés dans les structures globulaires des protéines du lactosérum à des températures inférieures à 40 °C (**Dupont, 1965 ; Kella et Kinsella, 1988**).

Les bulles de mousse diffèrent également par leur forme (**Borcherding et al.,2008**). Lors du moussage, des bulles de forme sphérique se forment. Cependant, lors du stockage, ces bulles coalescent en raison du drainage du liquide du film lamellaire lorsque les bulles se rapprochent, ce qui entraîne un amincissement et une rupture du film (**Damodaran, 2005**). Par conséquent, la stabilité de la mousse est inversement proportionnelle au taux de disproportion et de coalescence des bulles (**Borcherding et al.,2008**).

Selon **Hatakeyama et al.,(2018)**,le drainage de la mousse est un paramètre indiquant sa stabilité ;les mousses très stables peuvent retenir une quantité importante d'eau, ce qui entraîne un faible drainage.Le drainage des mousses a fortement diminué avec l'augmentation du degré de dénaturation de la  $\beta$ -lactoglobuline et a été complètement retardé à une dénaturation supérieure à 70 %, mais à des niveaux de dénaturation plus élevés (> 80 %), la rigidité de la mousse a fortement diminué (**Bals & Kulozik, 2003**).

De nombreux auteurs ont rapporté que la tension superficielle dynamique est le principal facteur déterminant, directement associé aux propriétés moussantes des protéines (**Lajnaf et al.,2017**).Globalement, une diminution rapide de la tension superficielle indique une adsorption rapide des protéines et une stabilisation des bulles d'air contre la coalescence (**Marinova et al., 2009**).

Les propriétés moussantes des protéines sont dues à leur capacité à : (1) absorber à l'interface air/eau, ce qui entraîne une diminution de la tension superficielle ; (2) se déployer à l'interface avec orientation des groupes hydrophiles et hydrophobes respectivement en phase aqueuse et non aqueuse ; et (3) former un film grâce aux interactions de protéines partiellement dénaturées (**Zayas, 1997**). Comme d'autres propriétés fonctionnelles des protéines, le comportement moussant est déterminé par des caractéristiques compositionnelles, structurelles et physiques, telles que la masse molaire, la composition et la séquence en acides aminés, la structure tertiaire, la charge de surface et l'hydrophobicité. **De Jongh et al. (2004)** ont constaté que l'hydrophobicité des protéines, en particulier, accélère l'adsorption à l'interface air/eau. De plus, la formation de mousse dépend du type de protéine utilisée, du prétraitement, du procédé de fabrication et de facteurs environnementaux, notamment la composition minérale, la force ionique, le degré de dénaturation et le pH (**Lorenzen, 2000**).

Nombreux travaux ont été étudiés et publiés sur l'effet du traitement thermique sur les propriétés structurelles et chimiques des protéines de lactosérum, communément appelé la dénaturation, dont la conformation native des chaînes polypeptidiques des protéines réagit à la chaleur par une modification structurelle prononcée et une exposition des groupes hydrophobes (**Kinsella et Whitehead, 1989; Phillips et Kinsella, 1990; Phillips, Whitehead et al.,1994; Damodaran, 1994**).

Selon les travaux de **Bals et al .,(2003)**,le traitement thermique des solutions de protéines de lactosérum a amélioré leurs propriétés fonctionnelles, dont les molécules de protéines de lactosérum partiellement dépliées étaient plus tensioactives et capables de former des films interfaciaux gaz/liquide stables.

Pour des degrés de dénaturation plus élevés (> 80 % de protéines totales), la viscosité de la solution augmentait encore et l'incorporation des bulles devenait plus difficile et le foisonnement des mousses ainsi obtenues diminuait, tout comme leur stabilité, d'où, une proportion hétérogène de protéines de lactosérum natives, dépliées et dénaturées semble

nécessaire pour obtenir de bonnes propriétés moussantes et une stabilité élevée de la mousse **Bals et al.,(2003)**.

**Halling (1981)** a affirmé que la dénaturation des protéines du lactosérum, en particulier de la  $\beta$ -lactoglobuline ( $\beta$ -lg), par traitement thermique, améliorait leurs propriétés fonctionnelles. Il a également été démontré que la capacité de la  $\beta$ -lg à former des mousses pouvait être améliorée par dénaturation (**Walstra et Jenness, 1984 ; Lee et al., 1992**).

Selon les travaux de **Schmitt et al.,(2007)**, les agrégats de l'isolat de protéines de lactosérum traité thermiquement à 85 °C pendant 15 minutes à un pH compris entre 6,0 et 7,0 en présence de NaCl afin de générer la plus grande quantité possible d'agrégats solubles avant que l'insolubilité ne survienne, présentaient la plus grande moussabilité et la plus grande stabilité du liquide moussant et une taille des bulles d'air dans la mousse était la plus faible à pH 7,0.

En outre, d'après une étude de littérature menée par **Tosi et al.,(2007)** sur les effets du traitement thermique sur les fractions protéiques du lactosérum en système aqueux individuel et mixte à savoir  $\beta$ -lactoglobulin (**Aymard et al., 1999; Bauer et al., 2000; Kitabatake et al., 2001; Le Bon et al., 1999; Photchanachai et Kitabatake, 2001;**),  $\beta$ -lactoglobulin et  $\alpha$ -lactoalbumin (**Dagleish et al.,1997; Schokker et al., 2000**) et aussi avec une solution aqueuse ternaire de  $\beta$ -lactoglobulin,  $\alpha$ -lactoalbumin and bovine serum albumin (**Havea et al.,2001**) ; ces études concordent pratiquement sur le fait qu'à des températures comprises entre 68 et 75 °C, une première étape de dissociation des dimères avec formation de monomères se produit, et que la présence de dimères et d'autres oligomères est vérifiée avec l'augmentation de la température et de la durée du traitement. De plus, lorsque la température de traitement était supérieure à 75 °C, des polymères et des copolymères étaient présents.

**Damodaran (1997)** a rapporté que la capacité du lactosérum doux à former et à stabiliser des mousses est due à la relation entre les espèces monomériques et polymères.

Les premières espèces contribueraient à la capacité moussante, tandis que les espèces polymères contribueraient à la stabilisation de la mousse. Les espèces polymères forment un film interfacial élastique augmentant les propriétés viscoélastiques du film, stabilisant la mousse contre la force gravitationnelle et la diffusion gazeuse lors du bullage. Les films protéiques formés par les espèces monomériques ne semblent pas posséder les propriétés viscoélastiques nécessaires à la stabilisation des mousses. La relation protéine monomère/polymère dépend du pH de la solution, de la température et de la durée des

traitements thermiques. Ces derniers produisent un degré de dénaturation permettant d'obtenir un degré de polymérisation et une viscosité satisfaisants, garantissant ainsi la rigidité et la cohésion du film interfacial sans agglomération de protéines due à une dénaturation excessive (**Damodaran ,1997**).

Les valeurs de la stabilité les plus élevées seraient la conséquence de l'atteinte d'un certain degré de dénaturation et de la formation de polymères de  $\beta$ -lactoglobuline et de ses copolymères avec l' $\alpha$ -lactoalbumine (**Damodaran ,1997 ;Bals et Kulozik 2003**).

La composition moléculaire de la  $\beta$ -lg, principale protéine du lactosérum, contient deux ponts disulfures (SS) au niveau des liaisons Cys66-Cys160 et Cys106-Cys119, ainsi qu'un groupe sulfhydryle libre (SH) au niveau de la Cys121. Ces ponts sont tous enfouis à l'intérieur de la  $\beta$ -lg globulaire tant qu'elle est à l'état natif et non chauffé (**Sawyer et al.,1971 ; Brownlow et al.,1997**). Les changements conformationnels induits par la chaleur de la structure tertiaire (températures  $> 60$  °C) et secondaire (températures  $> 85$  °C) de la  $\beta$ -lg sont caractérisés par l'exposition des zones hydrophobes internes et des groupes sulfhydryle libres (**Manderson et al.,1999 ; Delahaije et al.,2016**). Lors des changements conformationnels de la  $\beta$ -lg induits par la chaleur, le groupe sulfhydryle libre favorise les réactions d'échange SH/SS intra- et intermoléculaires, principalement au niveau de la liaison Cys66-Cys160 (**Creamer et al.,2004 ; Sava et al.,2005**). De plus, des intermédiaires réactifs peuvent se former à des températures comprises entre 60 et 70 °C et ces intermédiaires peuvent s'agréger avec des protéines natives ou un autre intermédiaire réactif pour former de petites particules (**Verheul et al.,1998**).

Les propriétés moussantes sont ainsi liées au temps de maintien du chauffage ; dont la stabilité accrue pour des temps de chauffage  $\leq 10$  min était liée à un drainage plus lent résultant d'une augmentation de la viscosité de la solution protéique due à la présence d'agrégats de  $\beta$ -lg dénaturés de tailles hydrodynamiques élevées (**Foegeding et al.,2006**). Ainsi, les agrégats formés par un chauffage de  $\beta$ -lg jusqu'à 10 min ont conduit à des mousses plus stables, ralentissant le déplissement grâce à la formation de films plus rigides qui résistent à la compression et peuvent réduire le transport de gaz. Cependant, un chauffage de 15 min a diminué la stabilité de la mousse, suivie d'un effondrement rapide de celle-ci, ce qui a également été observé par d'autres auteurs ayant étudié le comportement moussant de grands agrégats fractals (**Rullier et al.,2008 ; Moro et al.,2011**). Les agrégats plus gros, sujets à la sédimentation, nuisent à la moussabilité et à la stabilité de la mousse, produisant un

empêchement stérique, ce qui conduit à un film interfacial ouvert et plus fragile (**Moro et al.,2011**). De plus, les gros agrégats de protéines (en l'absence de monomères) ne peuvent résister au flux hydrodynamique à l'intérieur du film et sont expulsés vers la périphérie, laissant un film mince susceptible de se rompre (**Grossmann et al.,2019**).

En outre, les propriétés moussantes dépendent ainsi à la technique appliquée pour la production des mousses, selon **Grossmann et al.,(2019)**,les mousses alimentaires sont généralement préparées selon trois méthodes différentes : (i) l'injection, (ii) l'agitation (fouettage) et (iii) le barbotage.

Or, les méthodes d'incorporation d'air ou de gaz dans les structures alimentaires peuvent être classées en quatre catégories : agitation/fouettage mécanique, injection, sursaturation et fermentation (**Cmpbell et Mougeot 1999 ;Jimenez-Junca et al., 2011**).

Dans ce contexte ; selon les travaux publiés par **Grossmann et al.,(2019)** ;les mousses fouettées présentaient une stabilité accrue (demi-vie plus longue) par rapport aux mousses préparées par barbotage. Ceci est probablement lié aux faibles taux de diffusion des microparticules, qui empêchent une adsorption rapide pendant le barbotage. L'étape limitante du fouettage est l'adsorption à la surface, et non le transport à proximité de celle-ci en raison des conditions convectives. Il en résulte une adsorption plus rapide et donc une capacité et une stabilité de la mousse supérieures. De plus, l'apport énergétique plus important du fouettage mécanique pourrait avoir entraîné la désintégration des agrégats, qui s'adsorbent ensuite plus rapidement à la surface. Pendant le fouettage, deux processus se produisent simultanément, car la quantité d'air n'est pas limitée comme pendant le barbotage : (i) de nouvelles bulles sont créées par incorporation d'air neuf, et (ii) les bulles existantes sont fragmentées en bulles plus petites. Ainsi, les protéines ont plus de temps pour se réorganiser le long de la surface nouvellement créée pendant toute la durée du traitement. Cela produit également des bulles plus petites qui peuvent empêcher la sédimentation des microparticules grâce à un réseau de bulles plus dense (**Grossmann et al.,2019**) .

**Jambrak et al.,(2008)**,ont constaté que l'utilisation des ultrasons dans la transformation des aliments présente plusieurs avantages, tels qu'une meilleure solubilité des protéines et une meilleure capacité moussante. Cependant, l'utilisation des ultrasons sans tester la puissance adéquate pendant la durée du traitement peut présenter des inconvénients, ce qui peut entraîner des effets destructeurs, comme la dénaturation des protéines (**Jambrak et al.,2008**).



Les résultats trouvés sont comparables à ceux obtenus par **Jambrak et al.,(2008)** ;dont les ultrasons de fréquence 40 kHz ont eu moins d'effet sur les protéines du lactosérum que la sonde 20 kHz. Un traitement avec un bain à 40 kHz pendant 15 minutes a eu un impact majeur, il a affecté et diminué la conductivité électrique de l'échantillon de protéines, augmentant ainsi la solubilité ,la capacité moussante des protéines et la stabilité de la mousse, les ultrasons de 500 kHz n'ont pas eu d'impact sur les propriétés fonctionnelles des protéines du lactosérum, telles que la capacité moussante, mais ont affecté la solubilité et la conductivité électrique (**Jambrak et al.,2008**) .

D'après **Jambrak et al.,(2008)**,les effets des ultrasons améliorants les propriétés moussantes du lactosérum peuvent être expliqués par l'effet d'homogénéisation des ultrasons qui disperse généralement les particules de protéines et de matières grasses de manière plus uniforme, ce qui peut améliorer la propriété moussante. Lors du traitement par ultrasons, les protéines ont probablement subi un déplissement partiel de leur structure, ce qui accompagne l'augmentation du pouvoir moussant lors de la création ultérieure de la mousse au mélangeur (**Jambrak et al.,2008**) .

Le traitement ultrasonique de haute intensité et de basse fréquence, qui génère des ondes acoustiques mécaniques produisant des cycles oscillants de compression et de raréfaction en milieu liquide (**Silventoinen et Sozer,2020**). Sous l'effet de ces cycles de compression, les petites bulles de gaz présentes dans le milieu liquide grossissent et atteignent finalement une taille critique, provoquant leur effondrement, un processus appelé cavitation (**Chandrapalaet al.,2011**). Cela peut entraîner la formation de particules protéiques plus petites et plus uniformes, améliorant ainsi la moussabilité et la stabilité des mousses protéiques (**Zhao et al.,2022**).

Les ultrasons ont été largement utilisés pour renforcer la capacité moussante de diverses protéines, telles que les protéines de lactosérum (**Meng et al.,2021**) et les protéines d'isolat de soja (**Morales et al.,2015**). Les ultrasons ont induit la protéine à exposer les régions hydrophobes et ont amélioré sa capacité moussante (**Xiong et al.,2015**).

Selon **Wang et al.,(2023)**,les ultrasons perturbent la structure du matériau en eau, affectant la taille des particules et augmentant la répulsion électrostatique entre les molécules, affectant ainsi la viscosité de l'échantillon.

Le traitement par ultrasons a réduit la taille globale des particules et la plage de distribution granulométrique des particules en phase liquide, ce qui a amélioré la capacité moussante (**Arredondo-Parada et al.,2020**). La teneur réduite en hélice  $\alpha$  a conduit à une augmentation de la flexibilité des protéines et, par conséquent, à une amélioration des propriétés moussantes. Une réduction supplémentaire de la viscosité apparente a amélioré la mobilité d'adsorption des protéines à l'interface et la capacité moussante (**Ding et al.,2022**).

L'amélioration des propriétés moussantes des suspensions protéiques par ultrasons peut être due à la dénaturation partielle des protéines, qui entraîne une interface de diffusion air-eau plus élevée en raison d'une augmentation de la cohésion et de la flexibilité des mousses (**Higuera-Barraza et al., 2016**).

Les ultrasons de haute intensité sont une technologie couramment utilisée dans l'industrie agroalimentaire (**Sotelo-Lara et al.,2024**). Leur principal effet repose sur le phénomène de cavitation acoustique, qui se produit lorsque des ondes ultrasonores pénètrent dans un milieu liquide et modifient la pression, provoquant une chute de la pression du liquide en dessous de la pression de vapeur et la formation de bulles. Les bulles de cavitation sont formées par des noyaux de gaz dissous dans le milieu liquide, qui commencent à grossir sous l'effet de la compression et de la décompression des ondes de haute intensité jusqu'à atteindre une taille critique provoquant leur effondrement (**Fu et al.,2020**). Lorsque les bulles de cavitation implosent, elles génèrent une accumulation d'énergie localisée, créant des zones de très haute pression et de température qui produisent des ondes d'énergie de cisaillement et de turbulence (**Sarangapany al.,2022 ; . Rojas al.,2022 ; Khan al.,2022**) .

Les zones de stérilisation localisées créées par traitement par ultrasons peuvent atteindre des températures de 5 000 K et des pressions de 100 MPa en quelques microsecondes, ce qui peut inactiver les micro-organismes. La cavitation peut également entraîner la formation de radicaux hydroxyles et d'atomes d'hydrogène, générés en réponse à la vapeur d'eau qui se désintègre sonochimiquement lorsque les bulles éclatent. Ces substances jouent un rôle majeur dans la destruction des micro-organismes car elles contiennent des radicaux libres et des espèces électroniquement excitées qui causent les dommages. De plus, les composés oxydants peuvent provoquer des dommages sublétaux aux parois cellulaires (**Atalar et al., 2019**). Pour produire un produit stérilisé, une combinaison de sonication et de chaleur a été utilisée dans un procédé appelé thermosonication (**Atalar et al., 2019 ; Manzoor et al.,2021**).

La thermosonication (TS) est une méthode combinant thermosonication et chaleur dont le produit est soumis simultanément à la thermosonication et à une chaleur modérée (**Rani et al.,2020**). Cette méthode produit un effet plus important sur l'inactivation des micro-organismes que la chaleur seule (**Villamiel et Jong ,2000**).

Les ultrasons, définis comme des ondes de pression de fréquences supérieures à 20 kHz, induisent la formation de microbulles par cavitation dans le système alimentaire (**Anaya-Esparza et al.,2017 ; Sarangapany et al.,20222 ;Sotelo-Lara et al.,2023**). L'association des ultrasons à une chaleur modérée (50-60 °C), également appelée thermosonication, s'est avérée efficace pour l'inactivation microbienne et la réduction de l'activité enzymatique (**Anaya-Esparza et al.,2017 ; Sarangapany et al.,20222 ;Sotelo-Lara et al.,2023**). De plus, les ultrasons ont montré leur potentiel pour réduire la taille des particules et améliorer la stabilité physique (**Rojas et al.,2022**).

La thermosonication implique l'effet synergique du traitement thermique initial et du traitement par rayonnement par l'énergie américaine combinée, ce qui est plus efficace que le processus thermique (**Silva, 2015**).

De plus, la thermosonication à faible puissance est considérée comme une méthode non thermique intéressante, car elle permet de surmonter les problèmes liés aux traitements thermiques, tels que les modifications physiques et chimiques, les pertes nutritionnelles et les modifications des propriétés organoleptiques (**Abdullah et LingChin ,2014**).

### **3. Optimisation de la meringue**

#### **3.1. Effet du blanc d'œuf**

##### **3.1.1. Capacité moussante**

Les figures 28 et 29 montrent les résultats de la moussabilité (a) à t=0min et stabilité de la mousse (b) des lactosérums bruts (acide et doux) dans un système individuel et mixte (cas du blanc d'œuf cru) au cours du temps.

Selon les figures 28 et 29 (a) ; en terme de moussabilité ; le comportement moussant des lactosérums bruts (acide et doux) dans un système individuel et mixte (cas du blanc d'œuf cru) au cours du temps se diffère selon le type du lactosérum, l'apport et le type du blanc d'œuf :

- Dans un système individuel et à temps  $t=0\text{min}$  ; le lactosérum doux brut a enregistré une capacité moussante qui est deux fois supérieure à celle exprimée par le lactosérum acide brut (200 contre 100%).

- Dans un système mixte ; les lactosérums bruts (acide et doux) sont manifestés par des capacités moussantes variables comparativement à celles trouvées dans les lactosérums bruts (acide et doux) à savoir:

- Par rapport au lactosérum acide brut (CM=100%) ; la capacité moussante supérieure est celle obtenue par le lactosérum acide brut dans un système mixte (cas du blanc d'œuf cru à 100%) avec une CM= 106,66% ;

- Contrairement au lactosérum doux brut (CM=200%) ; la capacité moussante supérieure est celle obtenue par le lactosérum doux brut dans un système mixte (cas du blanc d'œuf cru à 5%) avec une CM=222,22%.

Selon les figures 28 et 29 (b) ; en terme de stabilité de la mousse ; les cinétiques de stabilité des mousses ont des allures décroissantes au cours du temps :

- Au cours du temps, nous avons constaté que la diminution de la capacité moussante pour les lactosérums bruts dans leur système individuel et mixte était progressive et stable avec des rythmes différents ; dont la déstabilisation totale de la mousse pour le lactosérum acide brut a été observée à 100min dont elle a évolué du 100 à 6,66% à 95min, cette durée de stabilité est légèrement inférieure à celle marquée pour la mousse du lactosérum doux brut, elle atteint 110min et elle varie du 200 à 6,66% à 105min ;

- Par rapport à la durée de la déstabilisation totale de la mousse enregistrée pour le lactosérum acide brut (DS=100min) ; les durées de la stabilité supérieures sont celles marquées dans le système mixte du lactosérum acide brut (cas du blanc d'œuf cru) qui sont respectivement le mixte LSABBOC5% (DS=125min ; CM= 83,3 à 5,55% à 120min) et le mixte LSABBOC100% (DS  $\geq$  255min ; CM=106,66 à 26,66% à 255min au minimum) ;

- Comparativement à la durée de la déstabilisation totale de la mousse enregistrée pour le lactosérum doux brut (DS=110min) ; les durées de la stabilité supérieures sont celles marquées dans le système mixte du lactosérum doux brut (cas du blanc d'œuf cru) qui sont respectivement le mixte LSDBBOC5% (DS $\geq$ 255min ; CM= 222,22 à 66,66% à 255min au minimum) et le mixte LSDBBOC100% (DS  $\geq$  255min ; CM=200 à 123,33% à 255min au minimum).

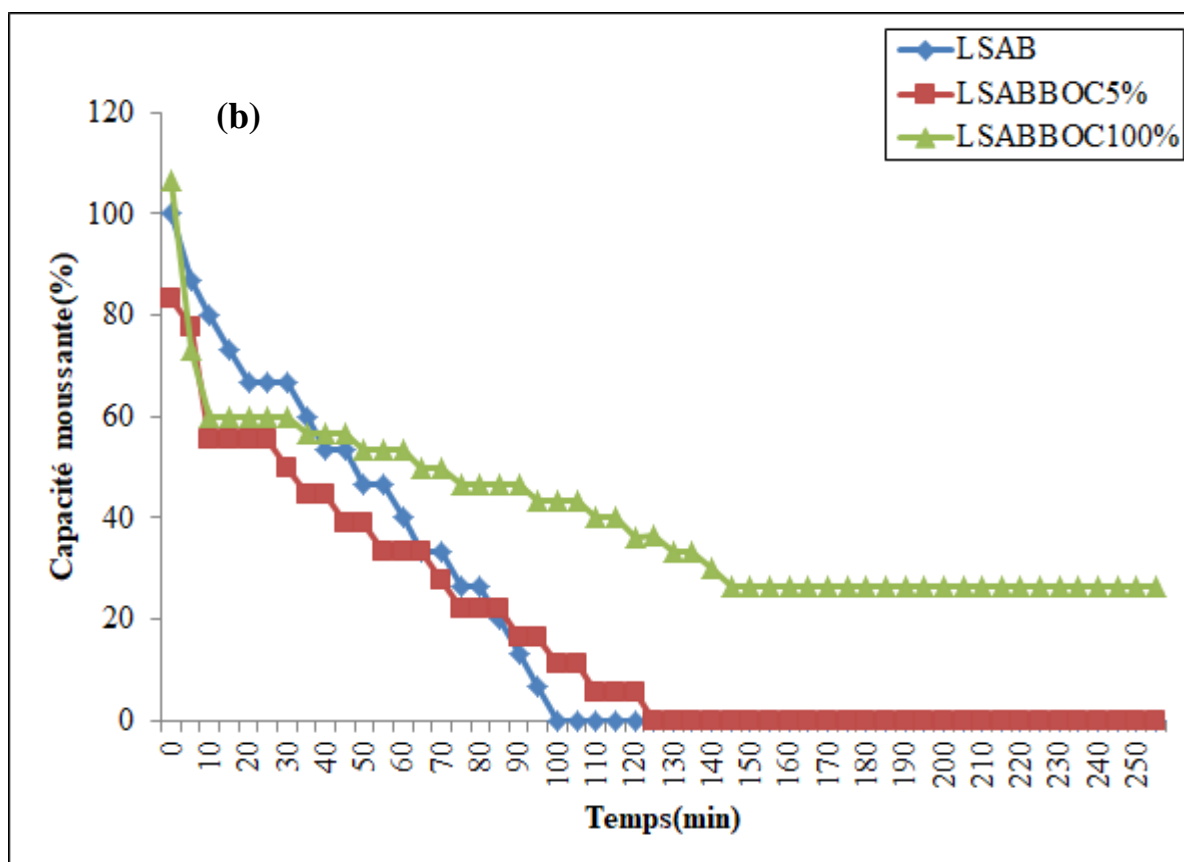
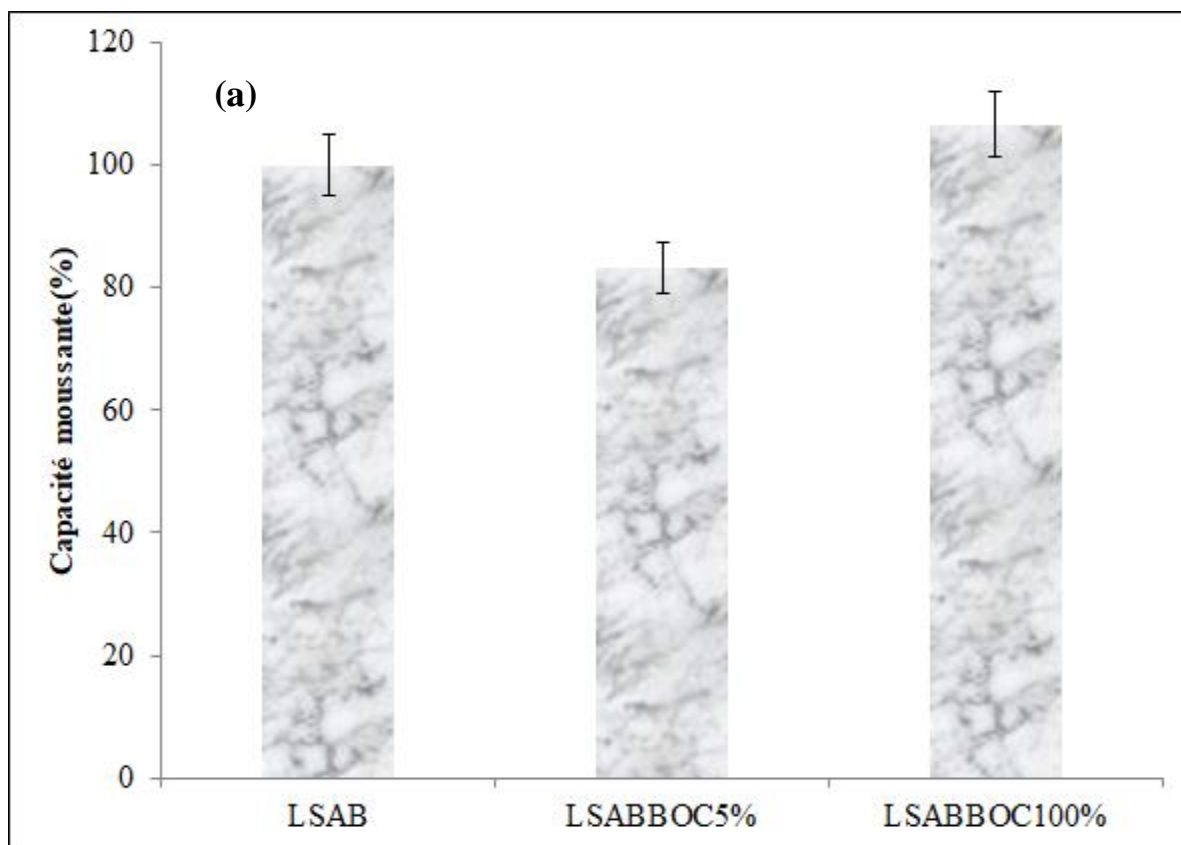


Figure 28 : Moussabilité (a) à  $t=0\text{min}$  et stabilité de la mousse (b) du lactosérum acide brut dans un système individuel et mixte (cas du blanc d'œuf cru) au cours du temps.

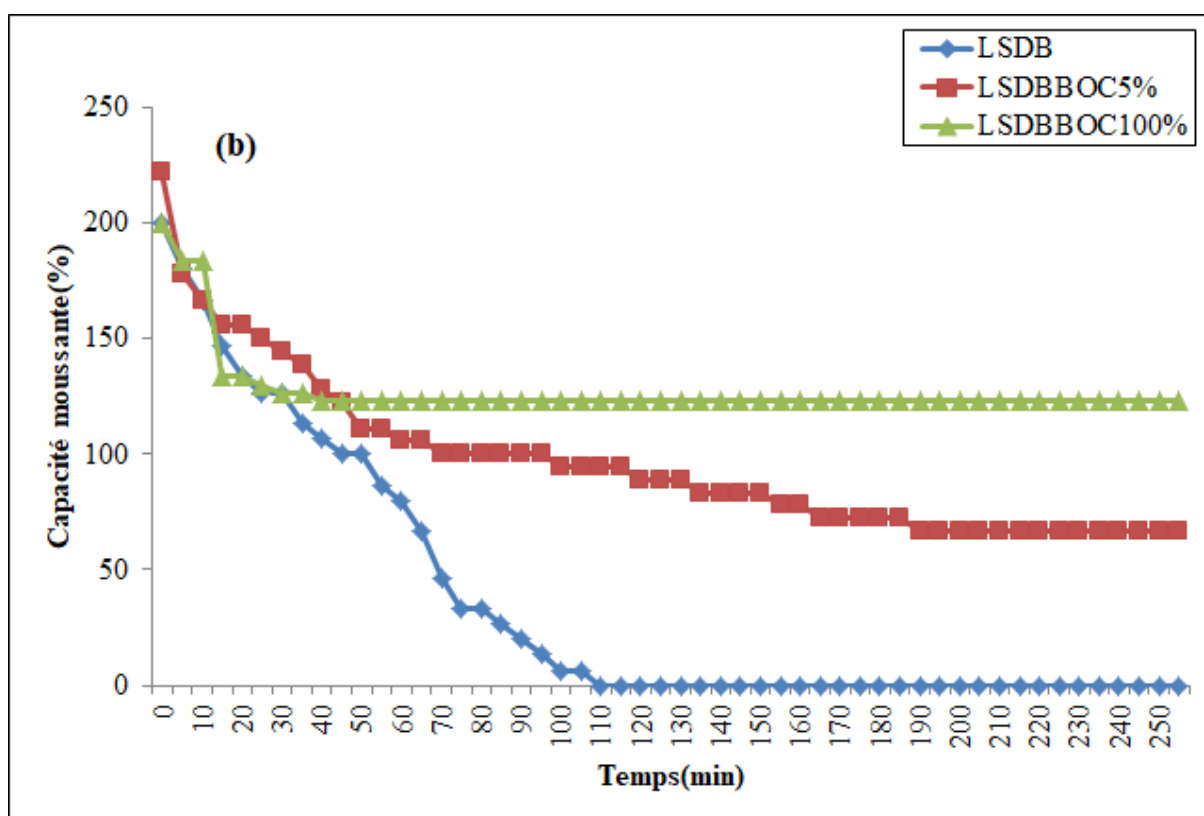
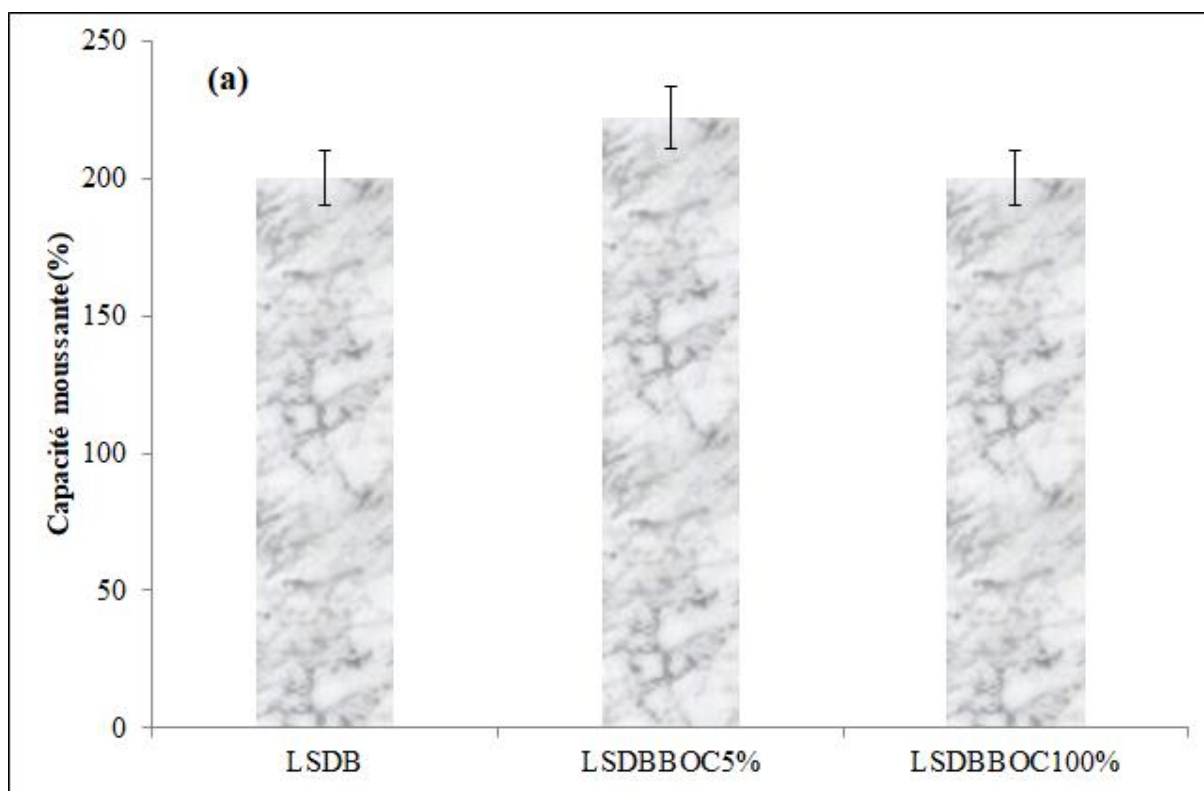


Figure 29 : Moussabilité (a) à t=0min et stabilité de la mousse (b) du lactosérum doux brut dans un système individuel et mixte (cas du blanc d'œuf cru) au cours du temps.

### 3.1.2. Diamètre des bulles d'air

Les figures 30 et 31 montrent les résultats du diamètre moyen des bulles d'air des mousses (a) à  $t=0\text{min}$  et de sa cinétique (b) des lactosérums bruts (acide et doux) dans un système individuel et mixte (cas du blanc d'œuf cru) au cours du temps.

Selon les figures 30 et 31 (a) ; le diamètre moyen des bulles d'air des mousses des lactosérums bruts (acide et doux) dans un système individuel et mixte (cas du blanc d'œuf cru) au cours du temps se diffère selon le type du lactosérum, l'apport et le type du blanc d'œuf :

- Dans un système individuel et à temps  $t=0\text{min}$  ; le lactosérum doux brut a enregistré une valeur du diamètre des bulles d'air supérieure à celle exprimée par le lactosérum acide brut (15,67 contre 13,74  $\mu\text{m}$ ).

- Dans un système mixte ; les mousses des lactosérums bruts (acide et doux) sont manifestés par des valeurs des diamètres moyens inférieures comparativement à celles trouvées dans les lactosérums bruts (acide et doux) à savoir:

-Par rapport au lactosérum acide brut ( $\emptyset=13,74\mu\text{m}$ ) ; les valeurs des diamètres moyens inférieures sont celles obtenues par le lactosérum acide dans un système mixte (cas du blanc d'œuf cru) qui sont respectivement le mixte LSABBOC5% ( $\emptyset=9\mu\text{m}$ ) et le mixte LSABBOC100% ( $\emptyset=7,76\mu\text{m}$ ) ;

-Contrairement au lactosérum doux brut ( $\emptyset=15,67\mu\text{m}$ ) ; les valeurs des diamètres moyens inférieures sont celles obtenues par le lactosérum doux dans un système mixte (cas du blanc d'œuf cru) qui sont respectivement le mixte LSDBBOC5% ( $\emptyset=11,49\mu\text{m}$ ) et le mixte LSDBBOC100% ( $\emptyset=9,71\mu\text{m}$ ).

Selon les figures 30 et 31 (b) ; en terme de stabilité de la mousse ; les cinétiques de diamètre moyen des mousses ont des allures croissantes au cours du temps :

- Au cours du temps, nous avons constaté que les cinétiques de l'évolution des diamètres moyens des bulles d'air notées pour les lactosérums bruts dans leur système individuel et mixte étaient progressives et stables avec des rythmes différents ;dont le diamètre moyen des mousses du lactosérum acide brut a passé du 13,74 à 21,69 $\mu\text{m}$  après une durée de stabilité des mousses égale à 90min, par contre, celui noté pour les mousses du lactosérum doux brut a évolué du 15,67 à 28,32 $\mu\text{m}$  à temps  $t=105\text{min}$ ;

-Par rapport au rythme de l'évolution du diamètre moyen des bulles d'air des mousses enregistré pour le lactosérum acide brut ( $\emptyset= 13,74$  à  $21,69\mu\text{m}$  à  $90\text{min}$ ) ; les diamètres moyens inférieurs sont ceux marqués dans le lactosérum acide dans un système mixte (cas du blanc d'œuf cru) qui est le mixte LSABBOC5% ( $\emptyset=9$  à  $11,51\mu\text{m}$  à  $255$  min au minimum) ;

-Comparativement au rythme de l'évolution du diamètre moyen des bulles d'air des mousses enregistré pour le lactosérum doux brut ( $\emptyset=15,67$  à  $28,32\mu\text{m}$  à  $105\text{min}$ ) ; les diamètres moyens inférieurs sont ceux marqués dans le lactosérum doux dans un système mixte (cas du blanc d'œuf cru) qui est le mixte LSDBBOC100% ( $\emptyset=9,71$  à  $20,89\mu\text{m}$  à  $255$  min au minimum).



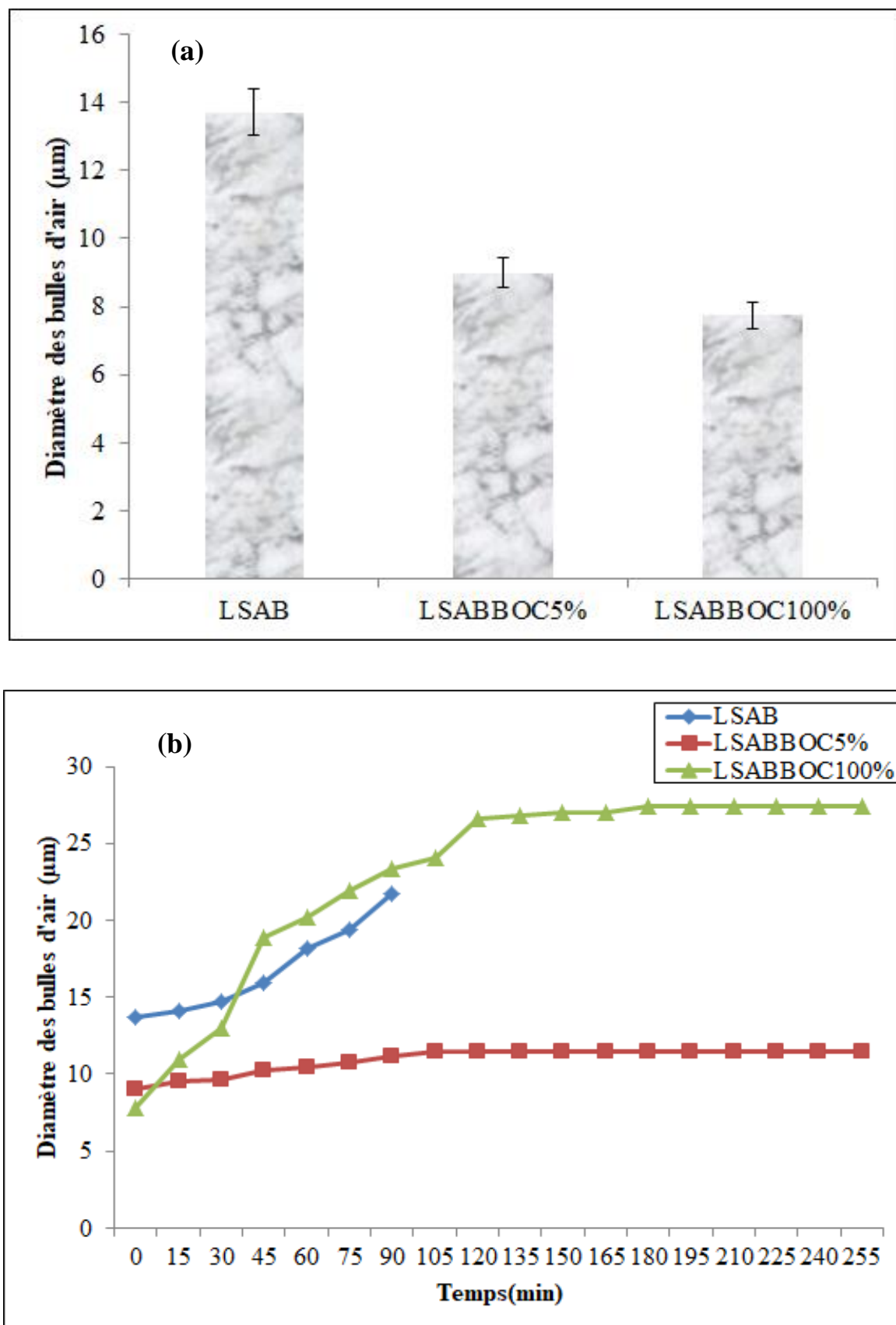


Figure 30 : Diamètre des bulles d'air (a) à  $t=0\text{min}$  et sa cinétique (b) du lactosérum acide brut dans un système individuel et mixte (cas du blanc d'œuf cru) au cours du temps.

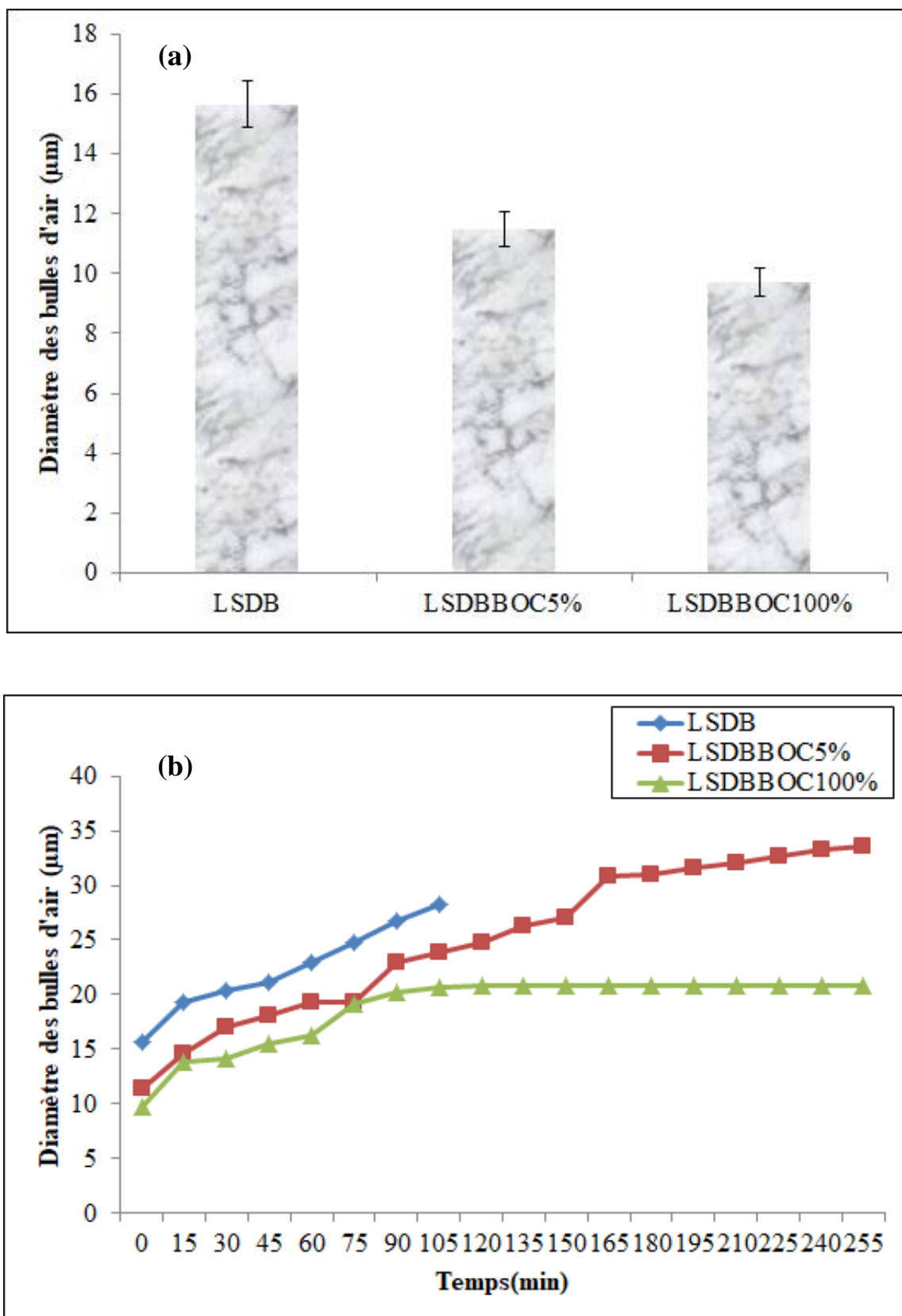


Figure 31 : Diamètre des bulles d'air (a) à t=0min et sa cinétique (b) du lactosérum doux brut dans un système individuel et mixte (cas du blanc d'œuf cru) au cours du temps.

## 3.2. Effet du sucre de table

### 3.2.1. Effet du sucre blanc

#### 3.2.1.1. Capacité moussante

Les figures 32 et 33 montrent les résultats de la moussabilité (a) à  $t=0\text{min}$  et stabilité de la mousse (b) des mixtes (lactosérums bruts et blanc d'œuf cru à 100%) dans un système individuel et mixte (cas du sucre blanc) au cours du temps.

Selon les figures 32 et 33 (a) ; en terme de moussabilité ; le comportement moussant des mixtes (lactosérums bruts et blanc d'œuf cru à 100%) dans un système individuel et mixte (cas du sucre blanc) au cours du temps se diffère selon le type du lactosérum, l'apport et le type du sucre de table :

-Dans un système individuel et à temps  $t=0\text{min}$  ; le mixte (LSDBBOC100%) a enregistré une capacité moussante qui est deux fois supérieure à celle exprimée par le mixte (LSABBOC100%) (200 contre 106,66%).

-Dans un système mixte ; les mixtes (LSABBOC100% +5%SB, LSABBOC100% +200%SB, LSDBBOC100% +5%SB et LSDBBOC100% +200%SB) sont manifestés par des capacités moussantes similaires et supérieures comparativement à celles trouvées dans les mixtes des lactosérums bruts (acide et doux) et du blanc d'œuf cru à 100%(LSABBOC100% et LSDBBOC100%) à savoir:

-Par rapport à la capacité moussante ( $CM= 106,66\%$ ) du mixte (LSABBOC100%) ; la capacité moussante supérieure est celle obtenue par le lactosérum acide brut et le blanc d'œuf cru à 100% dans un système mixte (cas du sucre blanc à 200%) avec une  $CM= 200\%$  ;

-Contrairement au mixte du lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru à 100% ( $CM=200\%$ ) ; la capacité moussante supérieure est celle obtenue par le lactosérum doux brut et le blanc d'œuf cru à 100% dans un système mixte (cas du sucre blanc à 200%) avec une  $CM=243,33\%$ .

Selon les figures 32 et 33 (b) ; en terme de stabilité de la mousse ; les cinétiques de stabilité des mousses ont des allures décroissantes au cours du temps :

- Au cours du temps, nous avons constaté que la diminution de la capacité moussante pour les mixtes (LSABBOC100% et LSDBBOC100%) dans leur système individuel et mixte était progressive et stable avec des rythmes différents ; dont la stabilisation totale de la

mousse pour le mixte (LSABBOC100%) a été observée à 255min au minimum dont elle a évolué du 106,66 à 26,66% à 145min au minimum , cette durée de stabilité est similaire à celle marquée pour la mousse du mixte (LSDBBOC100%), elle atteint 255 min au minimum et elle varie du 200 à 123,33% à 40min au minimum ;

-Par rapport à la durée de la stabilisation totale ( $DS \geq 250$ min au minimum) de la mousse enregistrée pour le mixte du lactosérum acide brut et du blanc d'œuf cru à 100% (LSABBOC100%) ; les durées de la stabilité supérieure et inférieure sont celles marquées dans le système mixte du lactosérum acide brut et du blanc d'œuf cru à 100% (cas du sucre blanc) qui sont respectivement le mixte LSABBOC100%+5%SB ( $DS \geq 255$ min ; CM= 116,66 à 50% à 160min au minimum) et le mixte LSABBOC100%+200%SB ( $DS \geq 255$ min ; CM=200 à 160% à 25min au minimum) ;

-Comparativement à la durée de la stabilisation totale ( $DS \geq 250$ min au minimum) de la mousse enregistrée pour le mixte du lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru à 100% (LSDBBOC100%); les durées de la stabilité supérieures sont celles marquées dans le système mixte du lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru à 100% (cas du sucre blanc) qui sont respectivement le mixte LSDBBOC100%+5%SB ( $DS \geq 255$ min ; CM= 200 à 96,66% à 100min au minimum) et le mixte LSDBBOC100%+200%SB ( $DS \geq 255$ min ; CM=243,33 à 120% à 45min au minimum) .

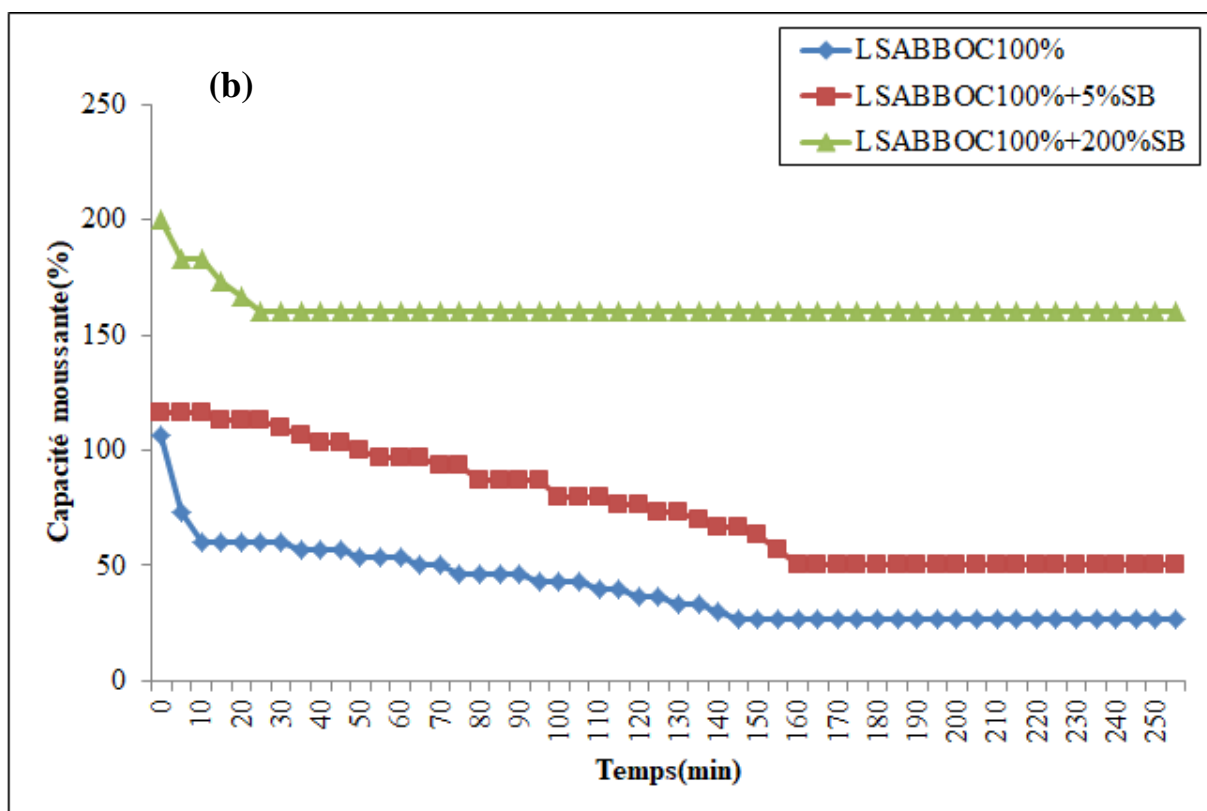
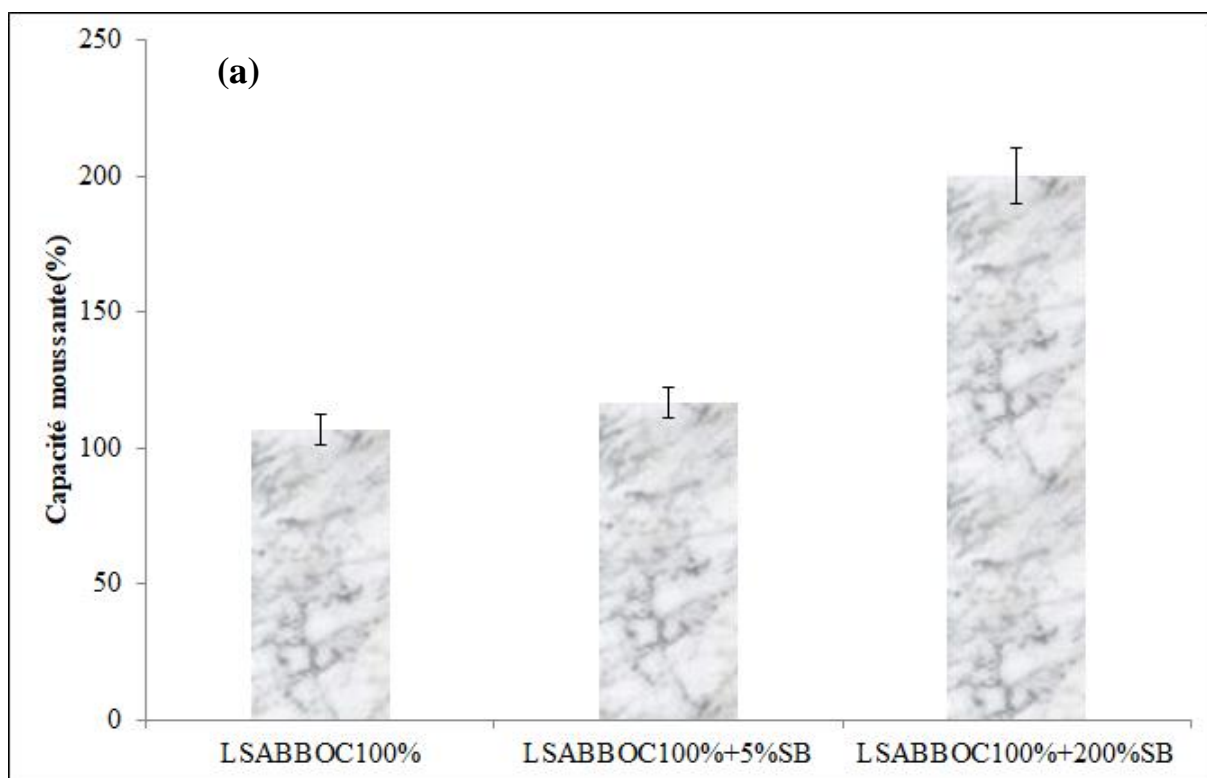


Figure 32 : Moussabilité (a) à  $t=0$ min et stabilité de la mousse (b) du lactosérum acide brut et du blanc d’œuf cru dans un système individuel et mixte (cas du sucre blanc) au cours du temps.

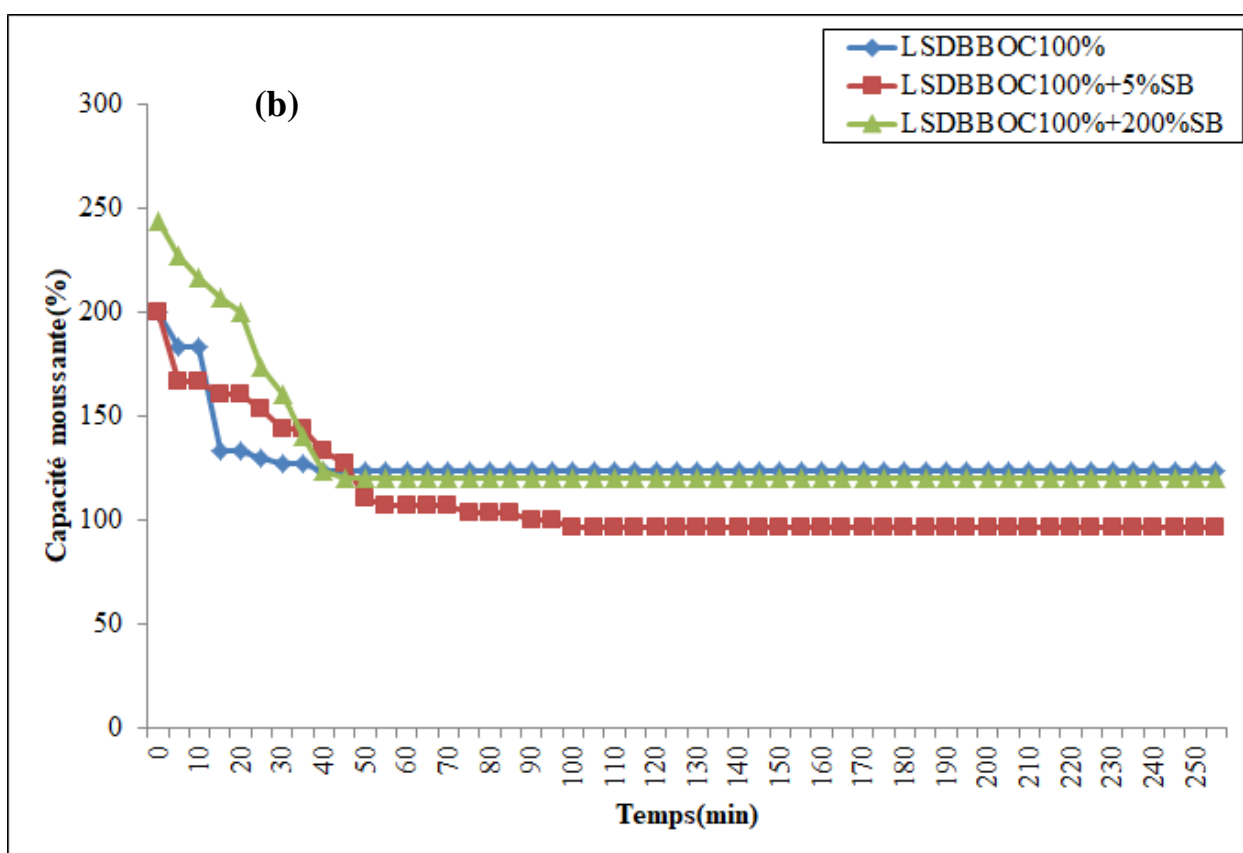
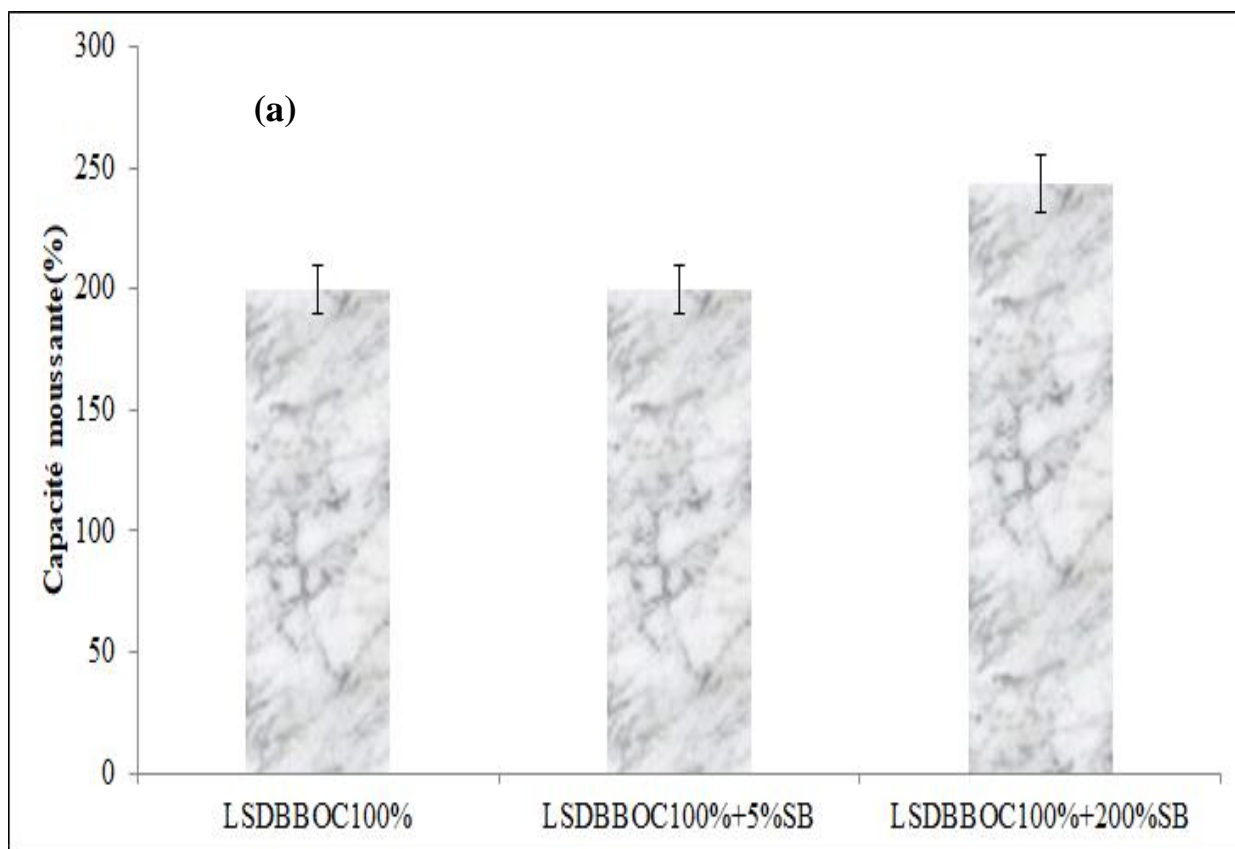


Figure 33 : Moussabilité (a) à  $t=0\text{min}$  et stabilité de la mousse (b) du lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru dans un système individuel et mixte (cas du sucre blanc) au cours du temps.

### 3.2.1.2. Diamètre des bulles d'air

Les figures 34 et 35 montrent les résultats du diamètre moyen des bulles d'air des mousses (a) à  $t=0\text{min}$  et de sa cinétique (b) des mixtes (lactosérums bruts et blanc d'œuf cru à 100%) dans un système individuel et mixte (cas du sucre blanc) au cours du temps.

Selon les figures 34 et 35 (a) ; le diamètre moyen des bulles d'air des mousses des mixtes (lactosérums bruts et blanc d'œuf cru à 100%) dans un système individuel et mixte (cas du sucre blanc) au cours du temps se diffère selon le type du lactosérum, l'apport et le type du sucre de table :

- Dans un système individuel et à temps  $t=0\text{min}$  ; le mixte (LSDBBOC100%) a enregistré une valeur du diamètre des bulles d'air légèrement supérieure à celle exprimée par le mixte (LSABBOC100%) (9,71 contre 9  $\mu\text{m}$ ).

- Dans un système mixte ; les mousses des mixtes (LSABBOC100% +5%SB, LSABBOC100% +200%SB, LSDBBOC100% +5%SB et LSDBBOC100% +200%SB) sont manifestés par des valeurs des diamètres moyens supérieures comparativement à celles trouvées dans les mixtes des lactosérums bruts (acide et doux) et du blanc d'œuf cru à 100% (LSABBOC100% et LSDBBOC100%) à savoir:

- Par rapport au diamètre moyen ( $\varnothing=9\mu\text{m}$ ) du mixte (LSABBOC100%) ; les valeurs des diamètres moyens supérieures sont celles obtenues par le lactosérum acide brut et du blanc d'œuf cru à 100% dans un système mixte (cas du sucre blanc) qui sont respectivement le mixte LSABBOC100%+5%SB ( $\varnothing=12,45\mu\text{m}$ ) et le mixte LSABBOC100%+200%SB ( $\varnothing=15,16\mu\text{m}$ ) ;

- Contrairement au mixte du lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru à 100% ( $\varnothing=9,71\mu\text{m}$ ) ; les valeurs des diamètres moyens supérieures sont celles obtenues par le lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru à 100% dans un système mixte (cas du sucre blanc) qui sont respectivement le mixte LSDBBOC100%+5%SB ( $\varnothing=22,41\mu\text{m}$ ) et le mixte LSDBBOC100%+200%SB ( $\varnothing=13,09\mu\text{m}$ ).

Selon les figures 34 et 35 (b) ; en terme de stabilité de la mousse ; les cinétiques de diamètre moyen des mousses ont des allures croissantes au cours du temps :

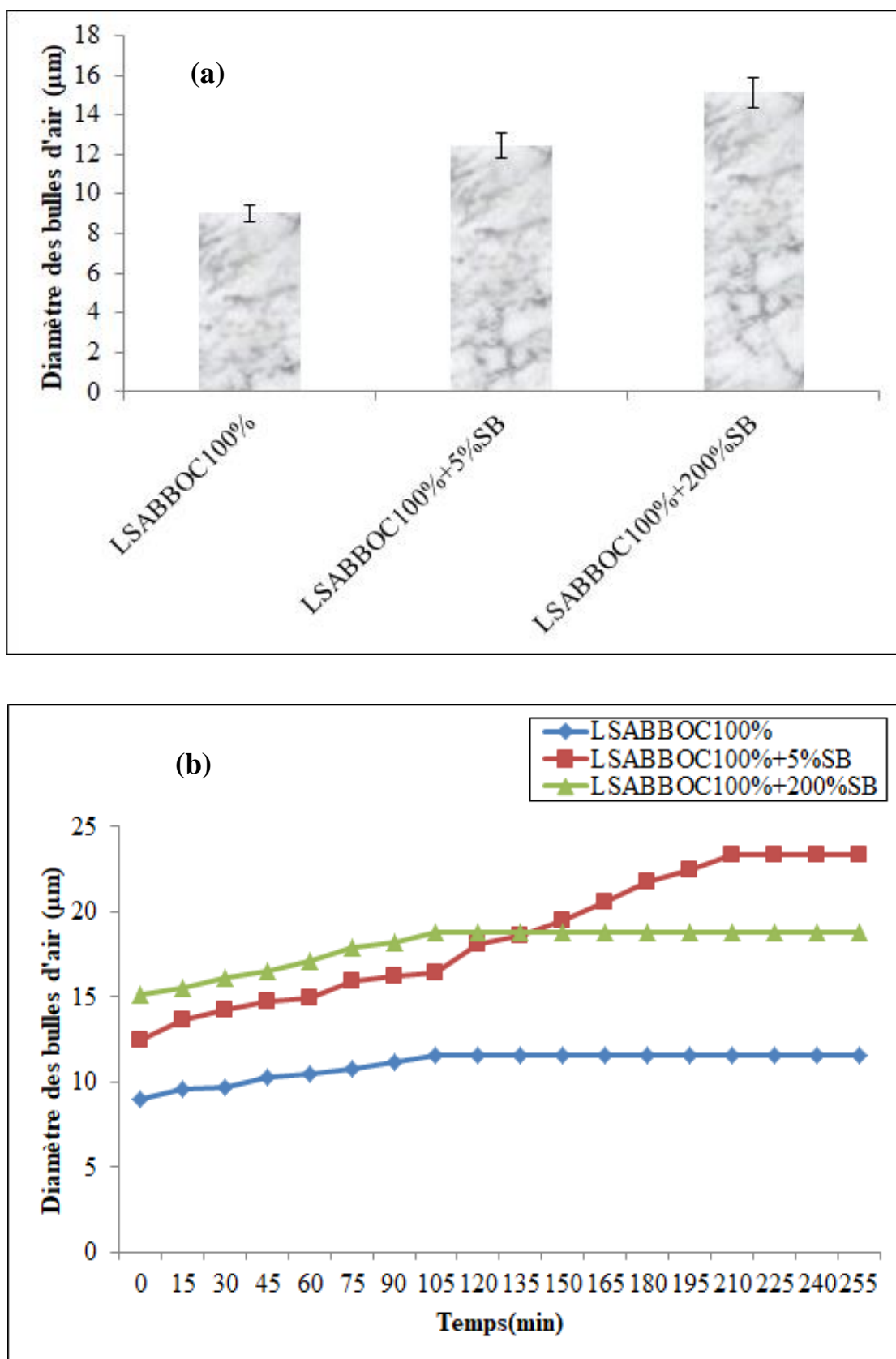
- Au cours du temps, nous avons constaté que les cinétiques de l'évolution des diamètres moyens des bulles d'air notées pour les mixtes (LSABBOC100% et LSDBBOC100%) dans

leur système individuel et mixte étaient progressives avec des rythmes différents ; dont le diamètre moyen des mousses du mixte LSABBOC100% a passé de 9 à 11,51 $\mu\text{m}$  après une durée de stabilité des mousses égale à 105min au minimum, par contre, celui noté pour les mousses du mixte LSDBBOC100% a évolué de 9,71 à 20,89 $\mu\text{m}$  à temps  $t=120\text{min}$  au minimum;

-Par rapport au rythme de l'évolution du diamètre moyen des bulles d'air des mousses enregistré pour le mixte LSABBOC100% ( $\emptyset=9$  à 11,51 $\mu\text{m}$  à 105min au minimum) ; les diamètres moyens supérieurs sont ceux marqués dans le mixte LSABBOC100% dans un système mixte (cas du sucre blanc) qui sont respectivement le mixte LSABBOC100%+5%SB ( $\emptyset=12,45$  à 23,37 $\mu\text{m}$  à 210 min au minimum) et le mixte LSABBOC100%+200%SB( $\emptyset=15,16$  à 18,77 $\mu\text{m}$  à 105 min au minimum);

-Comparativement au rythme de l'évolution du diamètre moyen des bulles d'air des mousses enregistré pour le mixte LSDBBOC100% ( $\emptyset=9,71$  à 20,49 $\mu\text{m}$  à 120min au minimum) ; les diamètres moyens supérieurs sont ceux marqués dans le mixte LSDBBOC100% dans un système mixte (cas du sucre blanc) qui est le mixte LSDBBOC100%+5%SB ( $\emptyset=22,41$  à 30,98 $\mu\text{m}$  à 150 min au minimum).





**Figure 34** : Diamètre des bulles d'air (a) à  $t=0\text{min}$  et sa cinétique (b) du lactosérum acide brut et du blanc d'œuf cru dans un système individuel et mixte (cas du sucre blanc) au cours du temps.

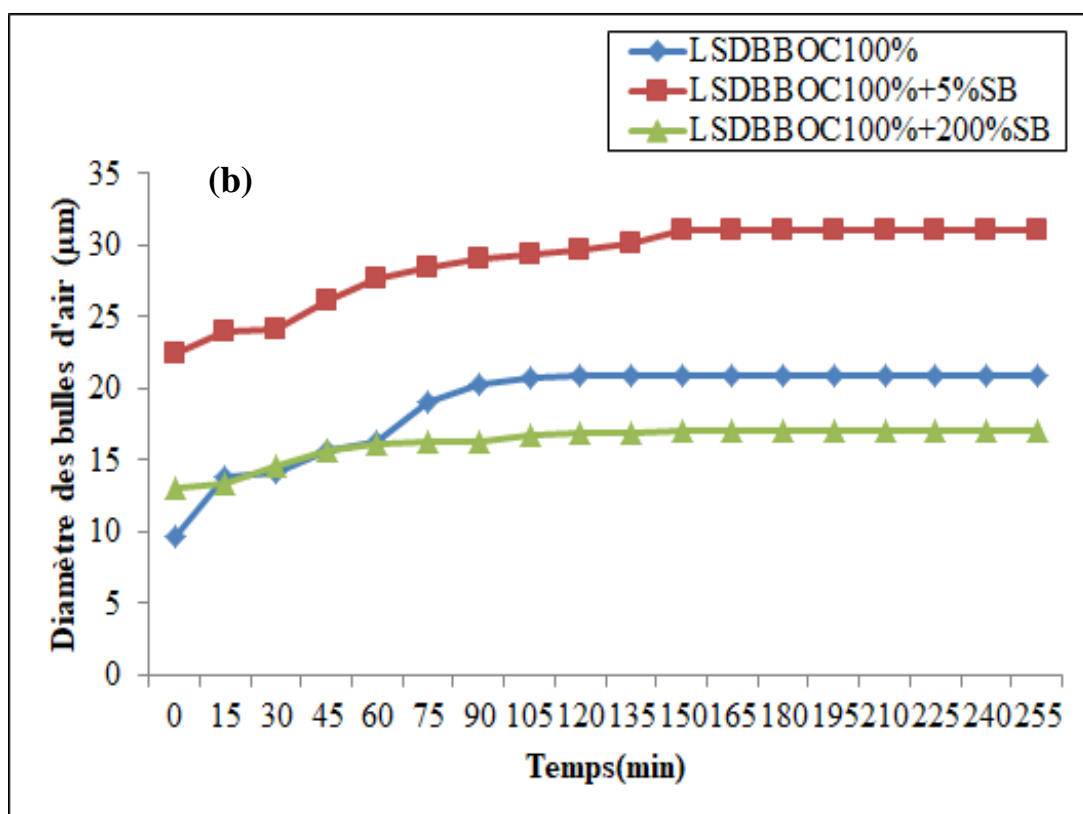
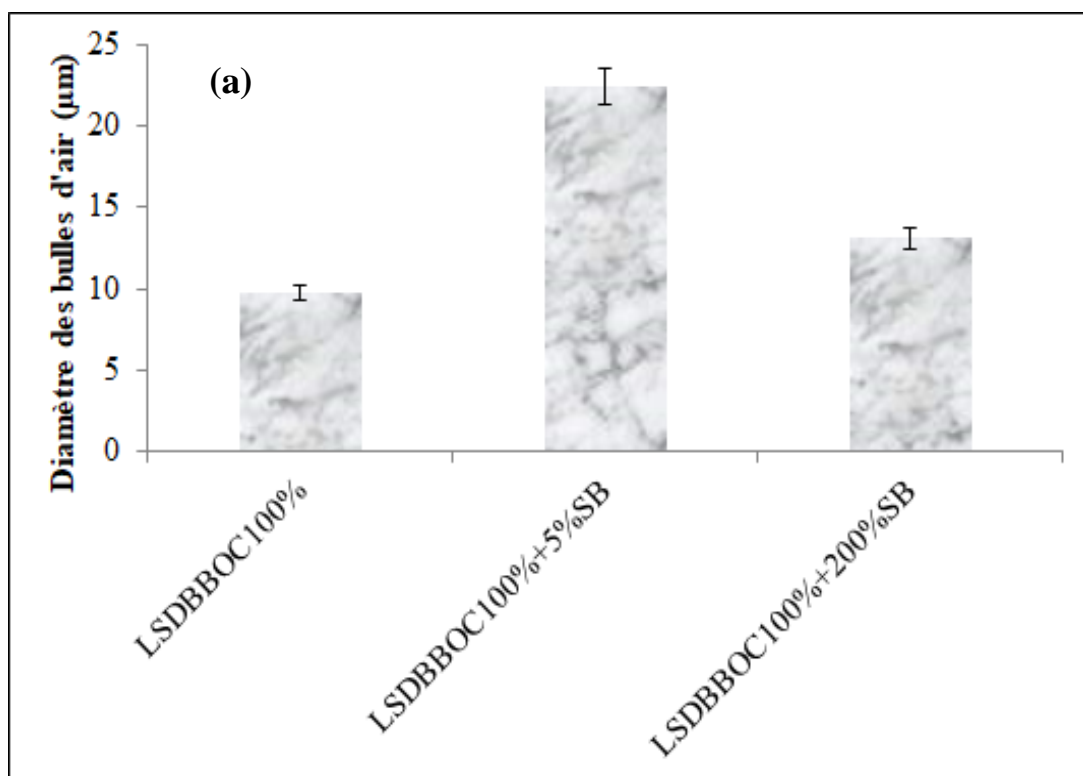


Figure 35 : Diamètre des bulles d'air (a) à  $t=0$ min et sa cinétique (b) du lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru dans un système individuel et mixte (cas du sucre blanc) au cours du temps.

### 3.2.2. Effet du sucre roux

#### 3.2.2.1. Capacité moussante

Les figures 36 et 37 montrent les résultats de la moussabilité (a) à  $t=0\text{min}$  et stabilité de la mousse (b) des mixtes (lactosérums bruts et blanc d'œuf cru à 100%) dans un système individuel et mixte (cas du sucre roux) au cours du temps.

Selon les figures 36 et 37 (a) ; en terme de moussabilité ; le comportement moussant des mixtes (lactosérums bruts et blanc d'œuf cru à 100%) dans un système individuel et mixte (cas du sucre roux) au cours du temps se diffère selon le type du lactosérum, l'apport et le type du sucre de table :

- Dans un système individuel et à temps  $t=0\text{min}$  ; le mixte (LSDBBOC100%) a enregistré une capacité moussante qui est deux fois supérieure à celle exprimée par le mixte (LSABBOC100%) (200 contre 106,66%).

- Dans un système mixte ; les mixtes (LSABBOC100% +5%SR, LSABBOC100% +200%SR, LSDBBOC100% +5%SR et LSDBBOC100% +200%SR) sont manifestés par des capacités moussantes variables comparativement à celles trouvées dans les mixtes des lactosérums bruts (acide et doux) et du blanc d'œuf cru à 100%(LSABBOC100% et LSDBBOC100%) à savoir:

- Par rapport à la capacité moussante ( $CM=106,66\%$ ) du mixte (LSABBOC100%) ; la capacité moussante supérieure est celle obtenue par le lactosérum acide brut et le blanc d'œuf cru à 100% dans un système mixte (cas du sucre roux à 200%) avec une  $CM=166,66\%$  ;

- Contrairement au mixte du lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru à 100% ( $CM=200\%$ ) ; la capacité moussante inférieure est celle obtenue par le lactosérum doux brut et le blanc d'œuf cru à 100% dans un système mixte (cas du sucre roux à 5%) avec une  $CM=166,66\%$ .

Selon les figures 36 et 37 (b) ; en terme de stabilité de la mousse ; les cinétiques de stabilité des mousses ont des allures décroissantes au cours du temps :

- Au cours du temps, nous avons constaté que la diminution de la capacité moussante pour les mixtes (LSABBOC100% et LSDBBOC100%) dans leur système individuel et mixte était progressive et stable avec des rythmes différents ; dont la stabilisation totale de la mousse pour le mixte (LSABBOC100%) a été observée à 255min au minimum dont elle a

évolué du 106,66 à 26,66% à 145min au minimum , cette durée de stabilité est similaire à celle marquée pour la mousse du mixte (LSDBBOC100%), elle atteint 255 min au minimum et elle varie du 200 à 123,33% à 40min au minimum ;

- Par rapport à la durée de la stabilisation totale ( $DS \geq 250$ min au minimum) de la mousse enregistrée pour le mixte du lactosérum acide brut et du blanc d'œuf cru à 100% (LSABBOC100%) ; les durées de la stabilité inférieure sont celles marquées dans le système mixte du lactosérum acide brut et du blanc d'œuf cru à 100% (cas du sucre roux) qui sont respectivement le mixte LSABBOC100%+5%SR ( $DS \geq 255$ min ; CM= 146,66 à 63,33% à 25min au minimum) et le mixte LSABBOC100%+200%SR ( $DS \geq 255$ min ; CM=166,66 à 83,33% à 30min au minimum) ;

- Comparativement à la durée de la stabilisation totale ( $DS \geq 250$ min au minimum) de la mousse enregistrée pour le mixte du lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru à 100% (LSDBBOC100%); les durées de la stabilité inférieure sont celles marquées dans le système mixte du lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru à 100% (cas du sucre roux) qui sont respectivement le mixte LSDBBOC100%+5%SB ( $DS \geq 255$ min ; CM= 166,66 à 93,33% à 25min au minimum) et le mixte LSDBBOC100%+200%SB ( $DS \geq 255$ min ; CM=190 à 120% à 30min au minimum).

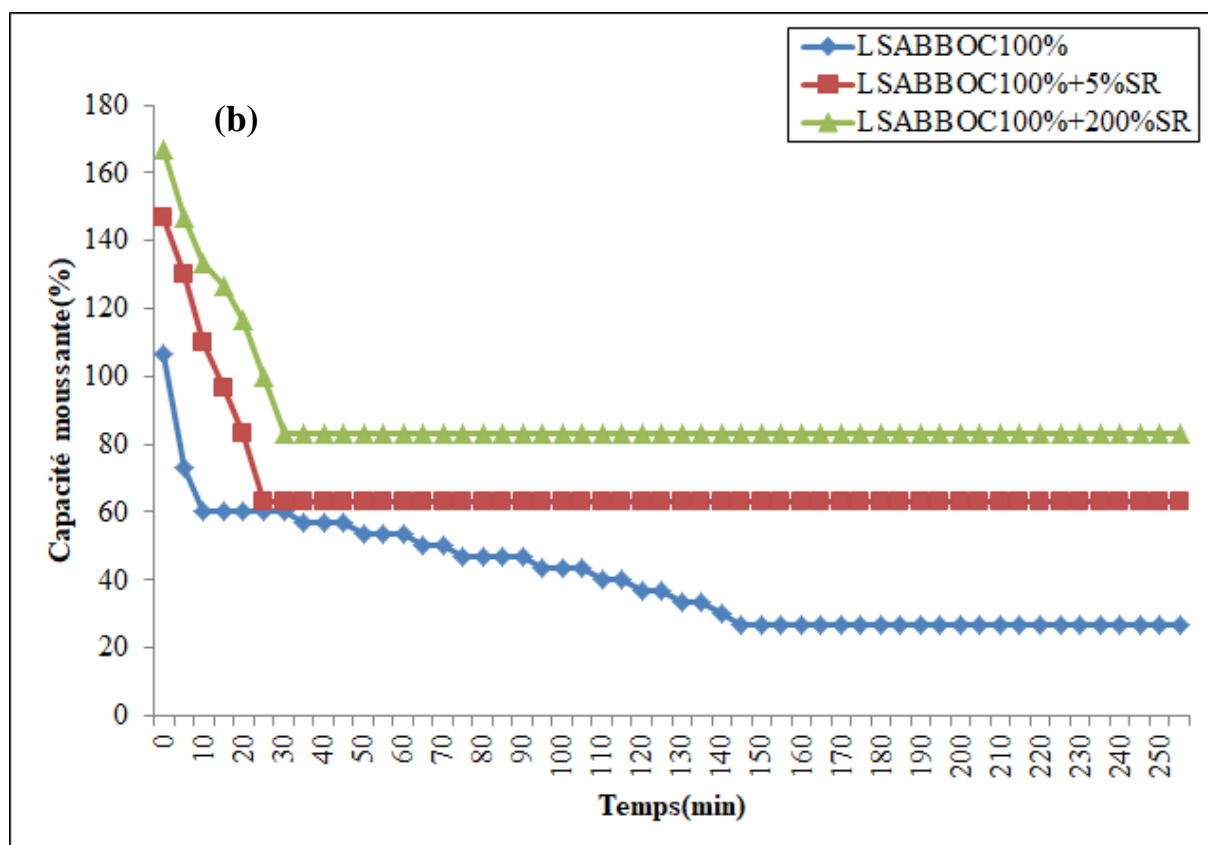
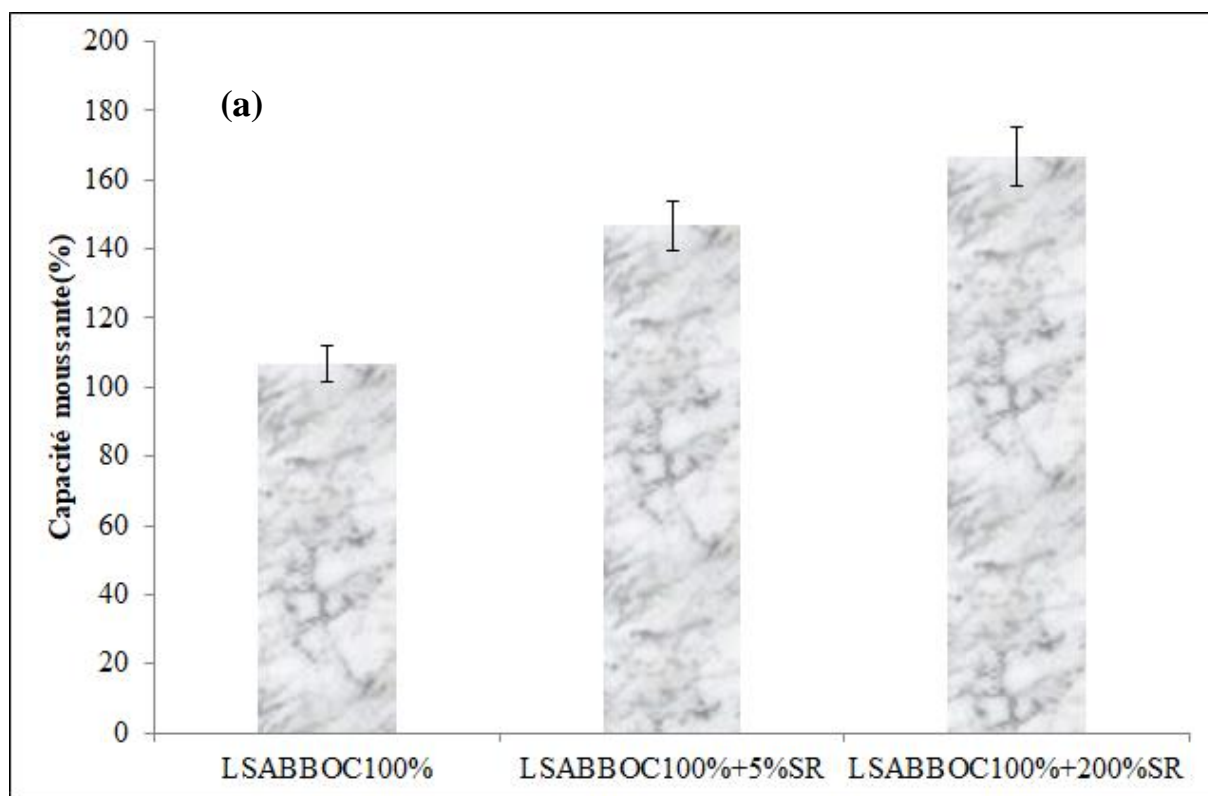


Figure 36 : Moussabilité (a) à t=0min et stabilité de la mousse (b) du lactosérum acide brut et blanc d’œuf cru dans un système individuel et mixte (cas du sucre roux) au cours du temps.

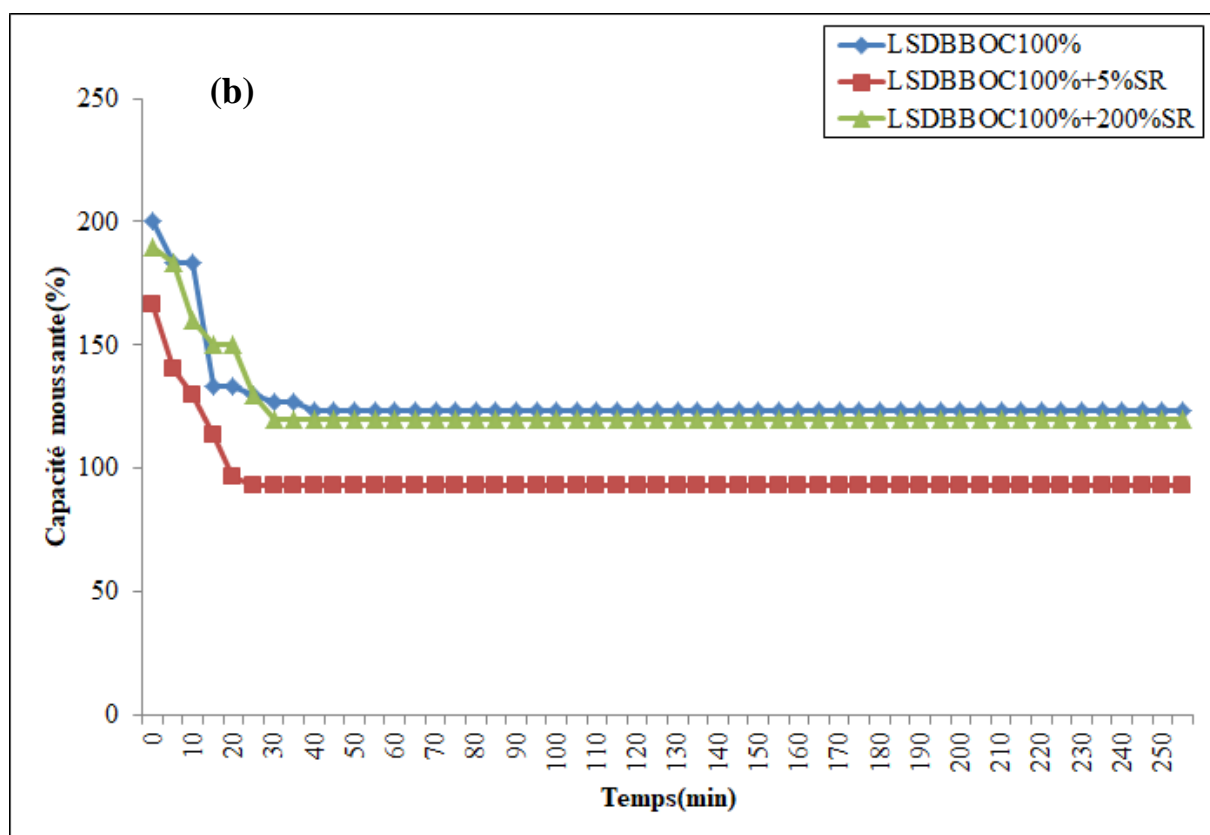
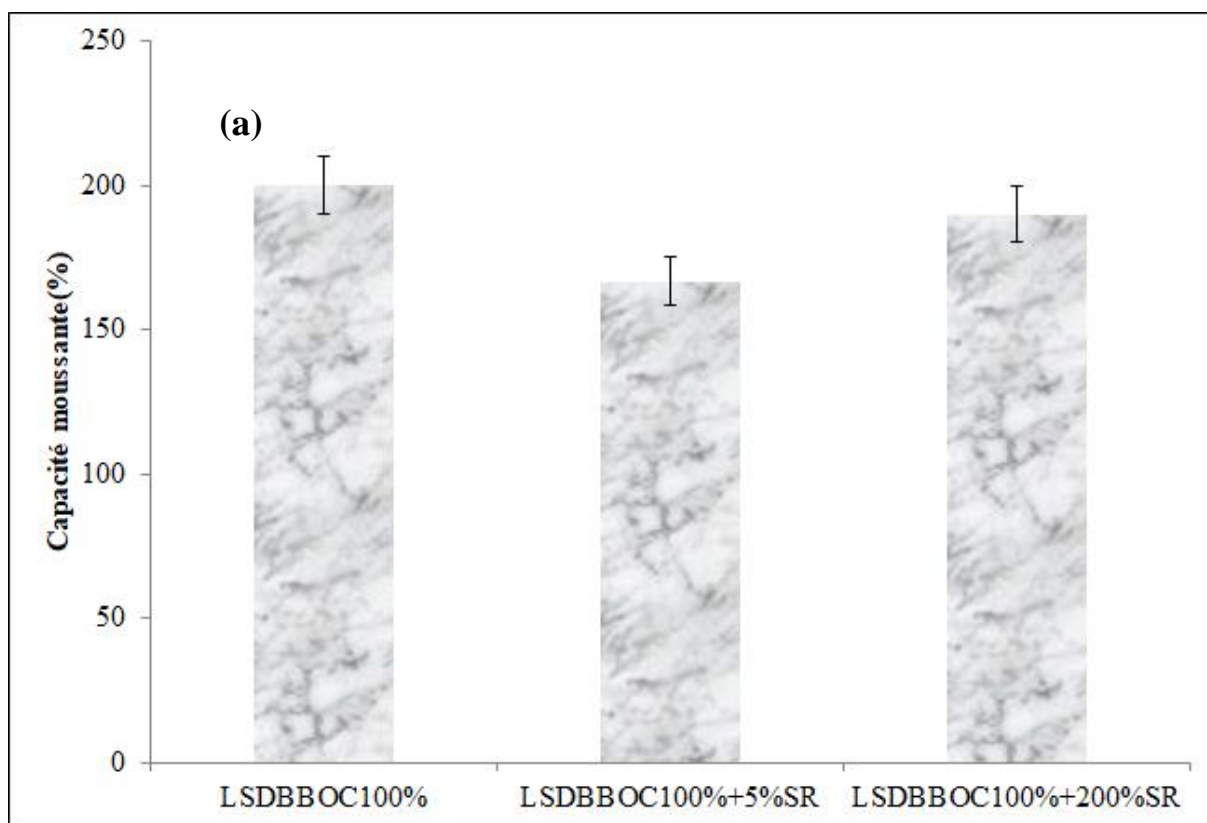


Figure 37 : Moussabilité (a) à  $t=0\text{min}$  et stabilité de la mousse (b) du lactosérum doux brut et du blanc d’œuf cru dans un système individuel et mixte (cas du sucre roux) au cours du temps.

### 3.2.2.2. Diamètre des bulles d'air

Les figures 38 et 39 montrent les résultats du diamètre moyen des bulles d'air des mousses (a) à  $t=0\text{min}$  et de sa cinétique (b) des mixtes (lactosérums bruts et blanc d'œuf cru à 100%) dans un système individuel et mixte (cas du sucre roux) au cours du temps.

Selon les figures 38 et 39 (a) ; le diamètre moyen des bulles d'air des mousses des mixtes (lactosérums bruts et blanc d'œuf cru à 100%) dans un système individuel et mixte (cas du sucre roux) au cours du temps se diffère selon le type du lactosérum, l'apport et le type du sucre de table :

- Dans un système individuel et à temps  $t=0\text{min}$  ; le mixte (LSDBBOC100%) a enregistré une valeur du diamètre des bulles d'air légèrement supérieure à celle exprimée par le mixte (LSABBOC100%) (9,71 contre 9  $\mu\text{m}$ ).

- Dans un système mixte ; les mousses des mixtes (LSABBOC100% +5%SR, LSABBOC100% +200%SR, LSDBBOC100% +5%SR et LSDBBOC100% +200%SR) sont manifestés par des valeurs des diamètres moyens supérieures comparativement à celles trouvées dans les mixtes des lactosérums bruts (acide et doux) et du blanc d'œuf cru à 100% (LSABBOC100% et LSDBBOC100%) à savoir:

- Par rapport au diamètre moyen ( $\varnothing=9\mu\text{m}$ ) du mixte (LSABBOC100%) ; les valeurs des diamètres moyens supérieures sont celles obtenues par le lactosérum acide brut et du blanc d'œuf cru à 100% dans un système mixte (cas du sucre roux) qui sont respectivement le mixte LSABBOC100%+5%SR ( $\varnothing=16,41\mu\text{m}$ ) et le mixte LSABBOC100%+200%SR ( $\varnothing=21,37\mu\text{m}$ ) ;

- Contrairement au mixte du lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru à 100% ( $\varnothing=9,71\mu\text{m}$ ) ; les valeurs des diamètres moyens supérieures sont celles obtenues par le lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru à 100% dans un système mixte (cas du sucre roux) qui sont respectivement le mixte LSDBBOC100%+5%SR ( $\varnothing=12,62\mu\text{m}$ ) et le mixte LSDBBOC100%+200%SR ( $\varnothing=19,4\mu\text{m}$ ).

Selon les figures 38 et 39 (b) ; en terme de stabilité de la mousse ; les cinétiques de diamètre moyen des mousses ont des allures croissantes au cours du temps :

- Au cours du temps, nous avons constaté que les cinétiques de l'évolution des diamètres moyens des bulles d'air notées pour les mixtes (LSABBOC100% et LSDBBOC100%) dans

leur système individuel et mixte étaient progressives avec des rythmes différents ; dont le diamètre moyen des mousses du mixte LSABBOC100% a passé de 9 à 11,51 $\mu\text{m}$  après une durée de stabilité des mousses égale à 105min au minimum, par contre, celui noté pour les mousses du mixte LSDBBOC100% a évolué de 9,71 à 20,89 $\mu\text{m}$  à temps  $t=120\text{min}$  au minimum;

- Par rapport au rythme de l'évolution du diamètre moyen des bulles d'air des mousses enregistré pour le mixte LSABBOC100% ( $\varnothing=9$  à 11,51 $\mu\text{m}$  à 105min au minimum) ; les diamètres moyens supérieurs sont ceux marqués dans le mixte LSABBOC100% dans un système mixte (cas du sucre roux) qui sont respectivement le mixte LSABBOC100%+5%SR ( $\varnothing=16,41$  à 23,22 $\mu\text{m}$  à 120 min au minimum) et le mixte LSABBOC100%+200%SR ( $\varnothing=21,37$  à 27,32 $\mu\text{m}$  à 105 min au minimum);

- Comparativement au rythme de l'évolution du diamètre moyen des bulles d'air des mousses enregistré pour le mixte LSDBBOC100% ( $\varnothing=9,71$  à 20,49 $\mu\text{m}$  à 120min au minimum) ; les diamètres moyens supérieurs sont ceux marqués dans le mixte LSDBBOC100% dans un système mixte (cas du sucre roux) qui est le mixte LSDBBOC100%+200%SR ( $\varnothing=19,4$  à 25,99 $\mu\text{m}$  à 105 min au minimum).



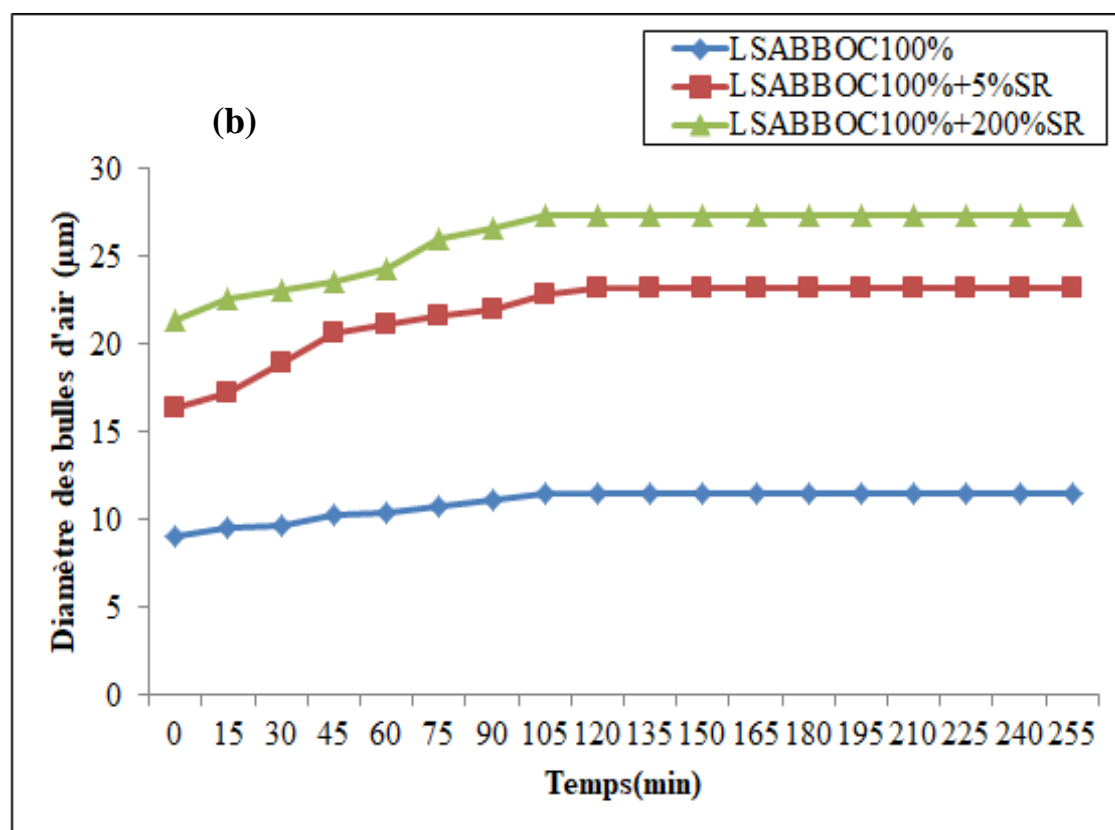
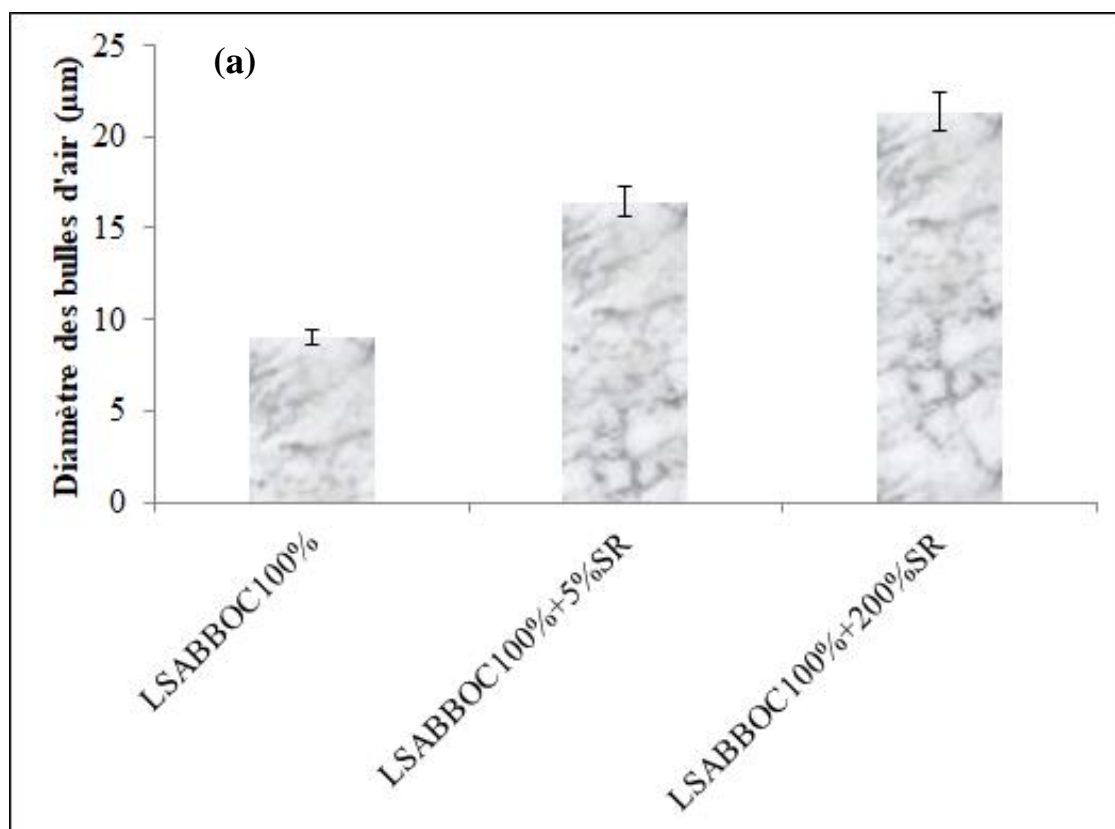


Figure 38 : Diamètre des bulles d'air (a) à t=0min et sa cinétique (b) du lactosérum acide brut et du blanc d'œuf cru dans un système individuel et mixte (cas du sucre roux) au cours du temps.

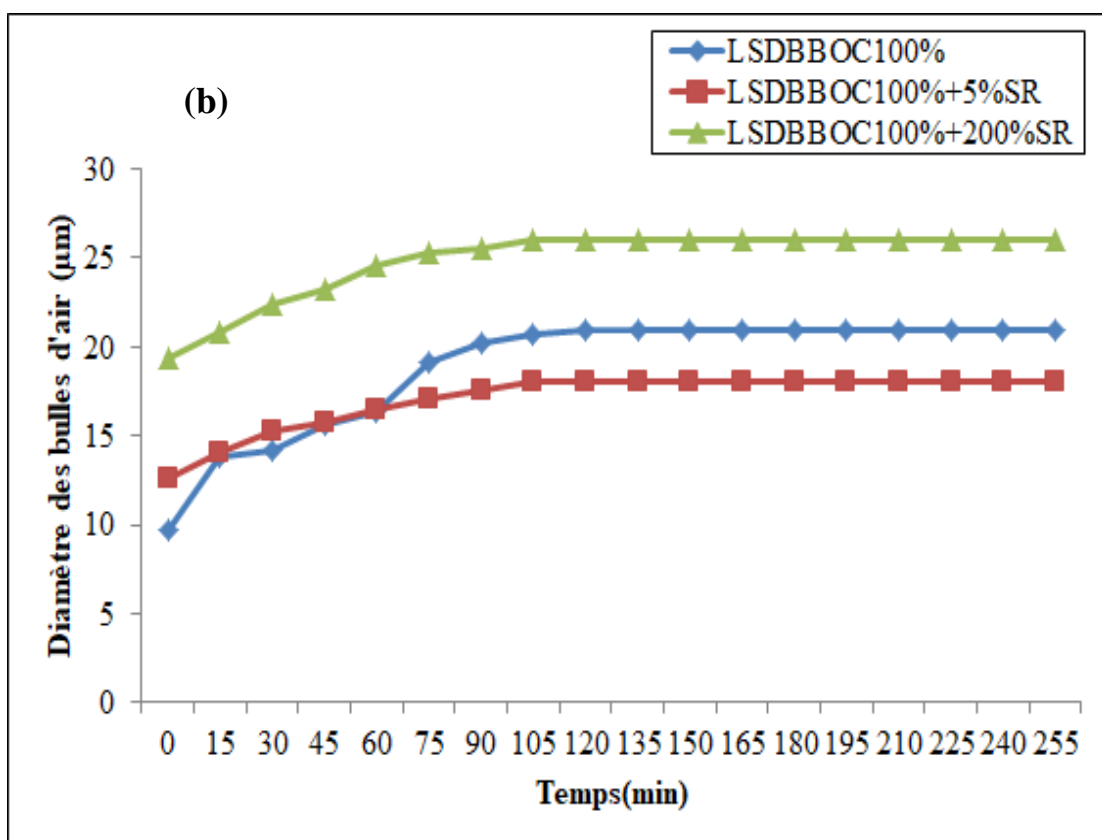
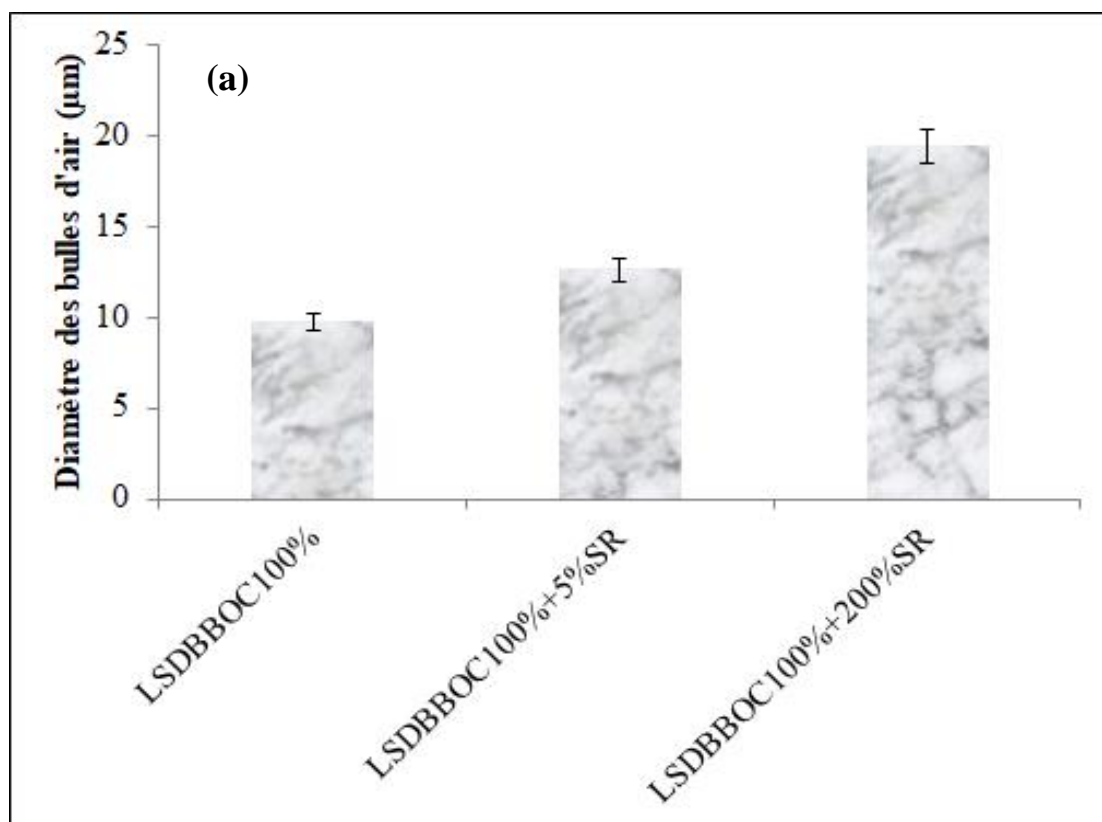


Figure 39 : Diamètre des bulles d'air (a) à  $t=0\text{min}$  et sa cinétique (b) du lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru dans un système individuel et mixte (cas du sucre roux) au cours du temps.

### 3.3. Effet du sel de table

#### 3.3.1. Capacité moussante

Les figures 40 et 41 montrent les résultats de la moussabilité (a) à  $t=0\text{min}$  et stabilité de la mousse (b) des mixtes (lactosérums bruts et blanc d'œuf cru à 100%) dans un système individuel et mixte (cas du sel de table) au cours du temps.

Selon les figures 40 et 41 (a) ; en terme de moussabilité ; le comportement moussant des mixtes (lactosérums bruts et blanc d'œuf cru à 100%) dans un système individuel et mixte (cas du sel de table) au cours du temps se diffère selon le type du lactosérum, l'apport et le type du sel de table :

-Dans un système individuel et à temps  $t=0\text{min}$  ; le mixte (LSDBBOC100%) a enregistré une capacité moussante qui est deux fois supérieure à celle exprimée par le mixte (LSABBOC100%) (200 contre 106,66%).

-Dans un système mixte ; les mixtes (LSABBOC100% +0,5%ST, LSABBOC100% +1%ST, LSDBBOC100% +0,5%ST et LSDBBOC100% +1%ST) sont manifestés par des capacités moussantes inférieures et similaires comparativement à celles trouvées dans les mixtes des lactosérums bruts (acide et doux) et du blanc d'œuf cru à 100%(LSABBOC100% et LSDBBOC100%) à savoir:

-Par rapport à la capacité moussante ( $CM= 106,66\%$ ) du mixte (LSABBOC100%) ; la capacité moussante supérieure est celle obtenue par le lactosérum acide brut et le blanc d'œuf cru à 100% dans un système mixte (cas du sel de table à 0,5%) avec une  $CM=103,33\%$  ;

-Contrairement au mixte du lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru à 100% ( $CM=200\%$ ) ; la capacité moussante similaire est celle obtenue par le lactosérum doux brut et le blanc d'œuf cru à 100% dans un système mixte (cas du sel de table 0,5 et 1%) avec une  $CM=200\%$ .

Selon les figures 40 et 41 (b) ; en terme de stabilité de la mousse ; les cinétiques de stabilité des mousses ont des allures décroissantes au cours du temps :

- Au cours du temps, nous avons constaté que la diminution de la capacité moussante pour les mixtes (LSABBOC100% et LSDBBOC100%) dans leur système individuel et mixte était progressive et stable avec des rythmes différents ; dont la stabilisation totale de la mousse pour le mixte (LSABBOC100%) a été observée à 255min au minimum dont elle a

évolué du 106,66 à 26,66% à 145min au minimum , cette durée de stabilité est similaire à celle marquée pour la mousse du mixte (LSDBBOC100%), elle atteint 255 min au minimum et elle varie du 200 à 123,33% à 40min au minimum ;

-Par rapport à la durée de la stabilisation totale ( $DS \geq 250$ min au minimum) de la mousse enregistrée pour le mixte du lactosérum acide brut et du blanc d'œuf cru à 100% (LSABBOC100%) ; les durées de la stabilité inférieure sont celles marquées dans le système mixte du lactosérum acide brut et du blanc d'œuf cru à 100% (cas du sel de table) qui sont respectivement le mixte LSABBOC100%+0,5%ST ( $DS \geq 255$ min ; CM= 103,33 à 66,66% à 20min au minimum) et le mixte LSABBOC100%+1%ST ( $DS \geq 255$ min ; CM=93,33 à 46,66% à 10min au minimum) ;

-Comparativement à la durée de la stabilisation totale ( $DS \geq 250$ min au minimum) de la mousse enregistrée pour le mixte du lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru à 100% (LSDBBOC100%); les durées de la stabilité supérieure sont celles marquées dans le système mixte du lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru à 100% (cas du sel de table) qui sont respectivement le mixte LSDBBOC100%+0,5%ST ( $DS \geq 255$ min ; CM= 200 à 93,33% à 65min au minimum) et le mixte LSDBBOC100%+1%ST ( $DS \geq 255$ min ; CM=200 à 93,33% à 65min au minimum).

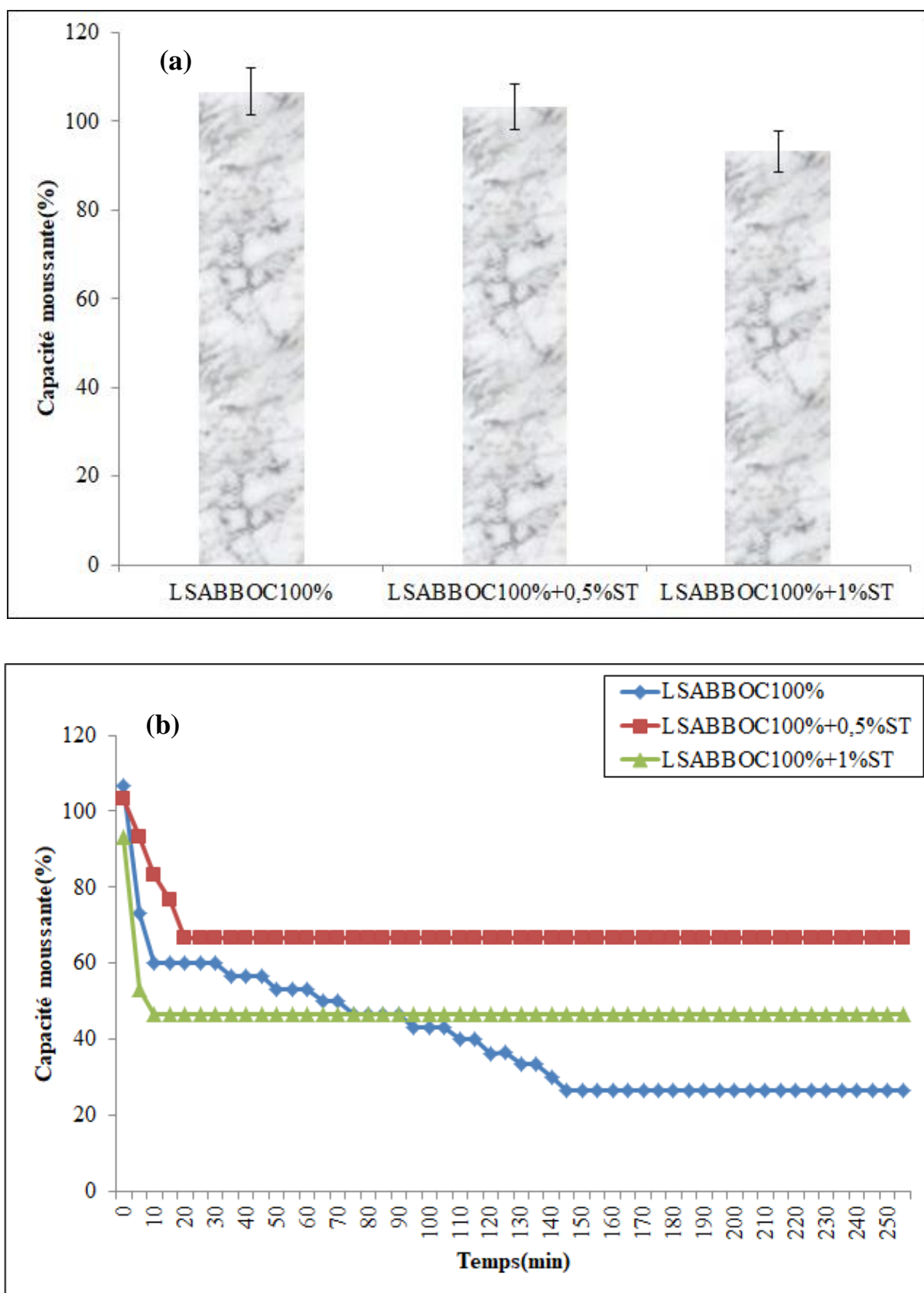


Figure 40 : Moussabilité (a) à t=0min et stabilité de la mousse (b) du lactosérum acide brut et du blanc d'œuf cru dans un système individuel et mixte (cas de sel de table) au cours du temps.

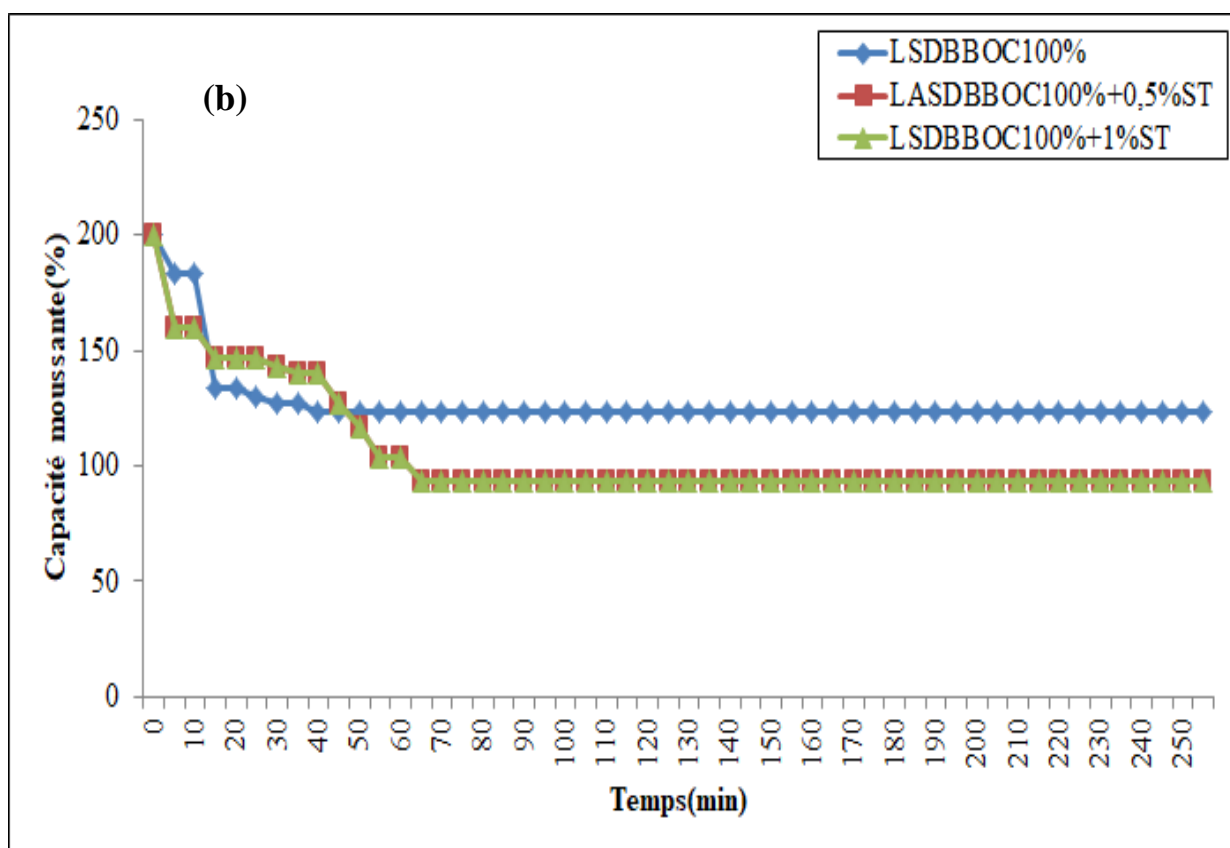
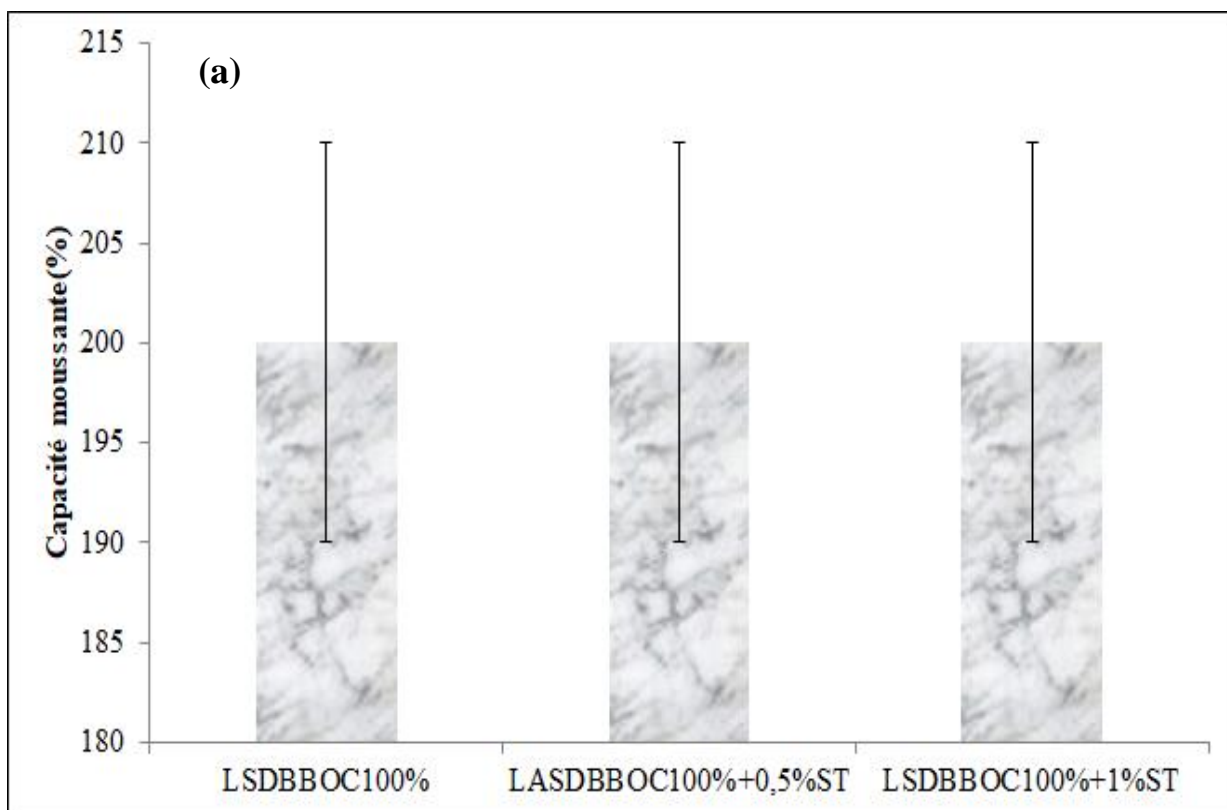


Figure 41 : Moussabilité (a) à  $t=0\text{min}$  et stabilité de la mousse (b) du lactosérum doux brut et du blanc d’œuf cru dans un système individuel et mixte (cas de sel de table) au cours du temps.

### 3.3.2. Diamètre des bulles d'air

Les figures 42 et 43 montrent les résultats du diamètre moyen des bulles d'air des mousses (a) à  $t=0\text{min}$  et de sa cinétique (b) des mixtes (lactosérums bruts et blanc d'œuf cru à 100%) dans un système individuel et mixte (cas du sel de table) au cours du temps.

Selon les figures 42 et 43 (a) ; le diamètre moyen des bulles d'air des mousses des mixtes (lactosérums bruts et blanc d'œuf cru à 100%) dans un système individuel et mixte (cas du sel de table) au cours du temps se diffère selon le type du lactosérum, l'apport et le type du sel de table :

- Dans un système individuel et à temps  $t=0\text{min}$  ; le mixte (LSDBBOC100%) a enregistré une valeur du diamètre des bulles d'air légèrement supérieure à celle exprimée par le mixte (LSABBOC100%) (9,71 contre 9  $\mu\text{m}$ ).

- Dans un système mixte ; les mousses des mixtes (LSABBOC100% +0,5%ST, LSABBOC100% +1%ST, LSDBBOC100% +0,5%ST et LSDBBOC100% +1%ST) sont manifestés par des valeurs des diamètres moyens supérieures comparativement à celles trouvées dans les mixtes des lactosérums bruts (acide et doux) et du blanc d'œuf cru à 100% (LSABBOC100% et LSDBBOC100%) à savoir:

- Par rapport au diamètre moyen ( $\varnothing=9\mu\text{m}$ ) du mixte (LSABBOC100%) ; les valeurs des diamètres moyens supérieures sont celles obtenues par le lactosérum acide brut et du blanc d'œuf cru à 100% dans un système mixte (cas du sel du table) qui sont respectivement le mixte LSABBOC100%+0,5%ST ( $\varnothing=11,73\mu\text{m}$ ) et le mixte LSABBOC100%+1%ST ( $\varnothing=14,17\mu\text{m}$ ) ;

- Contrairement au mixte du lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru à 100% ( $\varnothing=9,71\mu\text{m}$ ) ; les valeurs des diamètres moyens supérieures sont celles obtenues par le lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru à 100% dans un système mixte (cas du sel de table) qui sont respectivement le mixte LSDBBOC100%+0,5%ST ( $\varnothing=16,62\mu\text{m}$ ) et le mixte LSDBBOC100%+1%ST ( $\varnothing=17,37\mu\text{m}$ ).

Selon les figures 42 et 43 (b) ; en terme de stabilité de la mousse ; les cinétiques de diamètre moyen des mousses ont des allures croissantes au cours du temps :

- Au cours du temps, nous avons constaté que les cinétiques de l'évolution des diamètres moyens des bulles d'air notées pour les mixtes (LSABBOC100% et LSDBBOC100%) dans

leur système individuel et mixte étaient progressives avec des rythmes différents ; dont le diamètre moyen des mousses du mixte LSABBOC100% a passé de 9 à 11,51 $\mu\text{m}$  après une durée de stabilité des mousses égale à 105min au minimum, par contre, celui noté pour les mousses du mixte LSDBBOC100% a évolué de 9,71 à 20,89 $\mu\text{m}$  à temps  $t=120\text{min}$  au minimum;

-Par rapport au rythme de l'évolution du diamètre moyen des bulles d'air des mousses enregistré pour le mixte LSABBOC100% ( $\emptyset=9$  à 11,51 $\mu\text{m}$  à 105min au minimum) ; les diamètres moyens supérieurs sont ceux marqués dans le mixte LSABBOC100% dans un système mixte (cas du sel de table) qui sont respectivement le mixte LSABBOC100%+0,5%ST ( $\emptyset=11,73$  à 17,03 $\mu\text{m}$  à 105 min au minimum) et le mixte LSABBOC100%+1%ST( $\emptyset=14,17$  à 17,93 $\mu\text{m}$  à 90 min au minimum);

-Comparativement au rythme de l'évolution du diamètre moyen des bulles d'air des mousses enregistré pour le mixte LSDBBOC100% ( $\emptyset=9,71$  à 20,49 $\mu\text{m}$  à 120min au minimum) ; les diamètres moyens supérieurs sont ceux marqués dans le mixte LSDBBOC100% dans un système mixte (cas du sel de table) qui sont respectivement le mixte LSDBBOC100%+0,5%ST ( $\emptyset=16,62$  à 21,02 $\mu\text{m}$  à 105 min au minimum) et le mixte LSDBBOC100%+1%ST( $\emptyset=17,37$  à 24,97 $\mu\text{m}$  à 105 min au minimum).



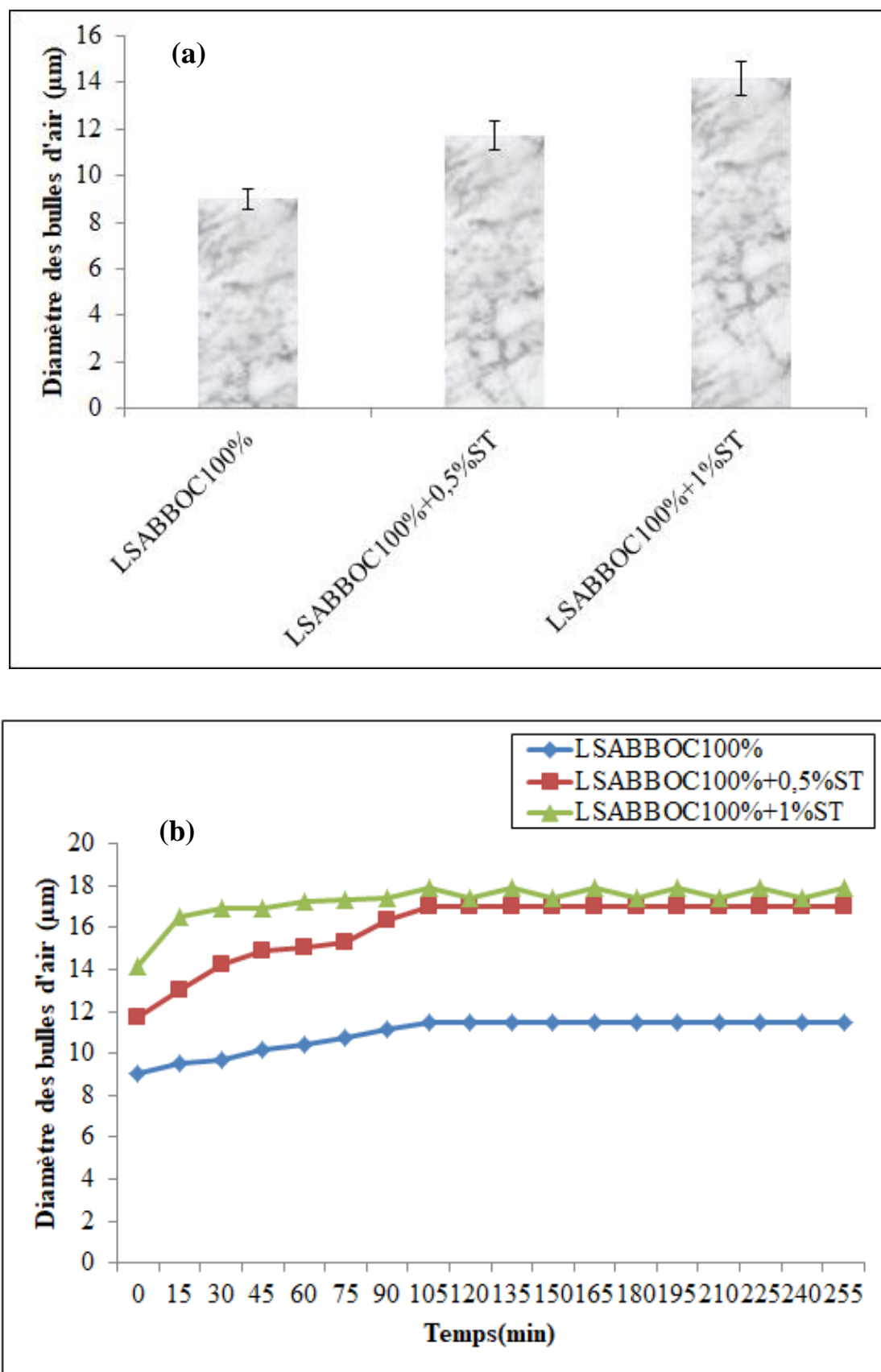
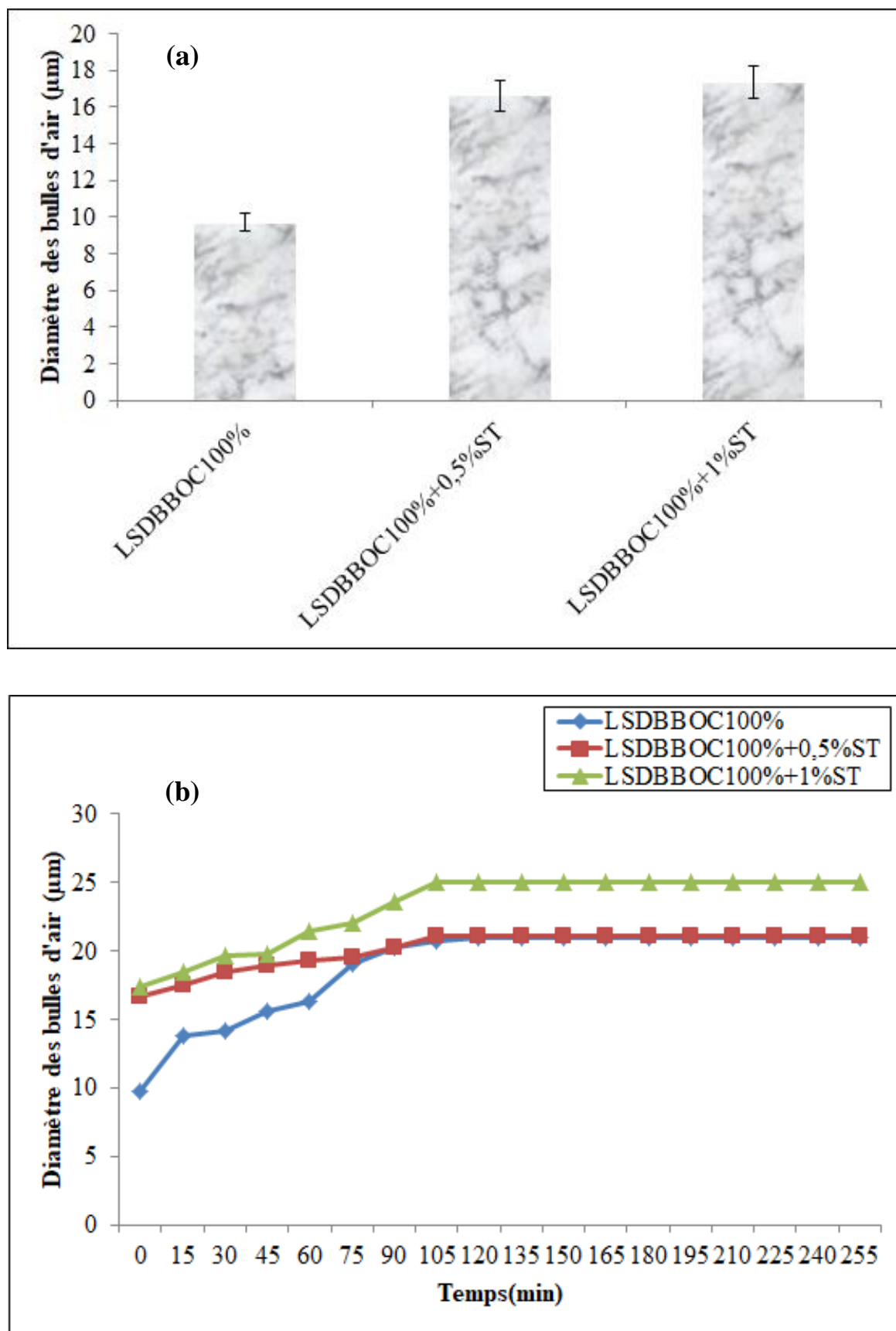


Figure 42 : Diamètre des bulles d'air (a) à  $t=0\text{min}$  et sa cinétique (b) du lactosérum acide brut et du blanc d'œuf cru dans un système individuel et mixte (cas du sel de table) au cours du temps.



**Figure 43** : Diamètre des bulles d'air (a) à t=0min et sa cinétique (b) du lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru dans un système individuel et mixte (cas du sel de table) au cours du temps.

### 3.4. Effet du sucre et du sel de table

#### 3.4.1. Effet du sucre blanc et du sel de table

##### 3.4.1.1. Capacité moussante

Les figures 44 et 45 montrent les résultats de la moussabilité (a) à  $t=0\text{min}$  et stabilité de la mousse (b) des mixtes (lactosérums bruts et blanc d'œuf cru à 100%) dans un système individuel et mixte (cas du sucre blanc et du sel de table) au cours du temps.

Selon les figures 44 et 45 (a) ; en terme de moussabilité ; le comportement moussant des mixtes (lactosérums bruts et blanc d'œuf cru à 100%) dans un système individuel et mixte (cas du sucre blanc et du sel de table) au cours du temps se diffère selon le type du lactosérum, l'apport et le type du sucre et du sel de table :

-Dans un système individuel et à temps  $t=0\text{min}$  ; le mixte (LSDBBOC100%) a enregistré une capacité moussante qui est deux fois supérieure à celle exprimée par le mixte (LSABBOC100%) (200 contre 106,66%).

-Dans un système mixte ; les mixtes à base des lactosérums bruts (acide et doux), du blanc d'œuf cru à 100%, du sucre blanc (5 et 200%) et du sel de table (0,5 et 1%) sont manifestés par des capacités moussantes variables comparativement à celles trouvées dans les mixtes des lactosérums bruts (acide et doux) et du blanc d'œuf cru à 100% (LSABBOC100% et LSDBBOC100%) à savoir:

-Par rapport à la capacité moussante ( $CM=106,66\%$ ) du mixte (LSABBOC100%) ; la capacité moussante supérieure est celle obtenue par le lactosérum acide brut et le blanc d'œuf cru à 100% dans un système mixte (cas du sucre blanc à 200% et du sel de table à 0,5%) avec une  $CM=196,66\%$  ;

-Contrairement au mixte du lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru à 100% ( $CM=200\%$ ) ; la capacité moussante supérieure est celle obtenue par le lactosérum doux brut et le blanc d'œuf cru à 100% dans un système mixte (cas du sucre blanc à 200% et du sel de table à 0,5%) avec une  $CM=200\%$ .

Selon les figures 44 et 45 (b) ; en terme de stabilité de la mousse ; les cinétiques de stabilité des mousses ont des allures décroissantes au cours du temps :

- Au cours du temps, nous avons constaté que la diminution de la capacité moussante pour les mixtes (LSABBOC100% et LSDBBOC100%) dans leur système individuel et mixte

était progressive et stable avec des rythmes différents ; dont la stabilisation totale de la mousse pour le mixte (LSABBOC100%) a été observée à 255min au minimum dont elle a évolué du 106,66 à 26,66% à 145min au minimum , cette durée de stabilité est similaire à celle marquée pour la mousse du mixte (LSDBBOC100%), elle atteint 255 min au minimum et elle varie du 200 à 123,33% à 40min au minimum ;

-Par rapport à la durée de la stabilisation totale ( $DS \geq 250$ min au minimum) de la mousse enregistrée pour le mixte du lactosérum acide brut et du blanc d'œuf cru à 100% (LSABBOC100%) ; les durées de la stabilité inférieure sont celles marquées dans le système mixte du lactosérum acide brut et du blanc d'œuf cru à 100% (cas du sucre blanc et du sel de table) qui sont respectivement le mixte LSABBOC100%+200%SB+0,5%ST ( $DS \geq 255$ min ;  $CM = 196,66$  à  $126,66\%$  à 45min au minimum) , le mixte LSABBOC100%+200%SB+1%ST ( $DS \geq 255$ min ;  $CM = 150$  à  $83,33\%$  à 25min au minimum), le mixte LSABBOC100%+5%SB+0,5%ST( $DS \geq 255$ min ;  $CM = 123,33$  à  $63,33\%$  à 25min au minimum) et le mixte LSABBOC100%+5%SB+1%ST( $DS \geq 255$ min ;  $CM = 130$  à  $60\%$  à 30min au minimum) ;

-Comparativement à la durée de la stabilisation totale ( $DS \geq 250$ min au minimum) de la mousse enregistrée pour le mixte du lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru à 100% (LSDBBOC100%); les durées de la stabilité inférieure sont celles marquées dans le système mixte du lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru à 100% (cas du sucre blanc et du sel de table) qui sont respectivement le mixte LSDBBOC100%+200%SB+0,5%ST ( $DS \geq 255$ min ;  $CM = 200$  à  $166,66\%$  à 35min au minimum) , le mixte LSDBBOC100%+200%SB+1%ST ( $DS \geq 255$ min ;  $CM = 183,33$  à  $153,33\%$  à 30min au minimum), LSDBBOC100%+5%SB+0,5%ST( $DS \geq 255$ min ;  $CM = 176,66$  à  $103,33\%$  à 25min au minimum) et LSDBBOC100%+5%SB+1%ST( $DS \geq 255$ min ;  $CM = 160$  à  $93,33\%$  à 20min au minimum) .

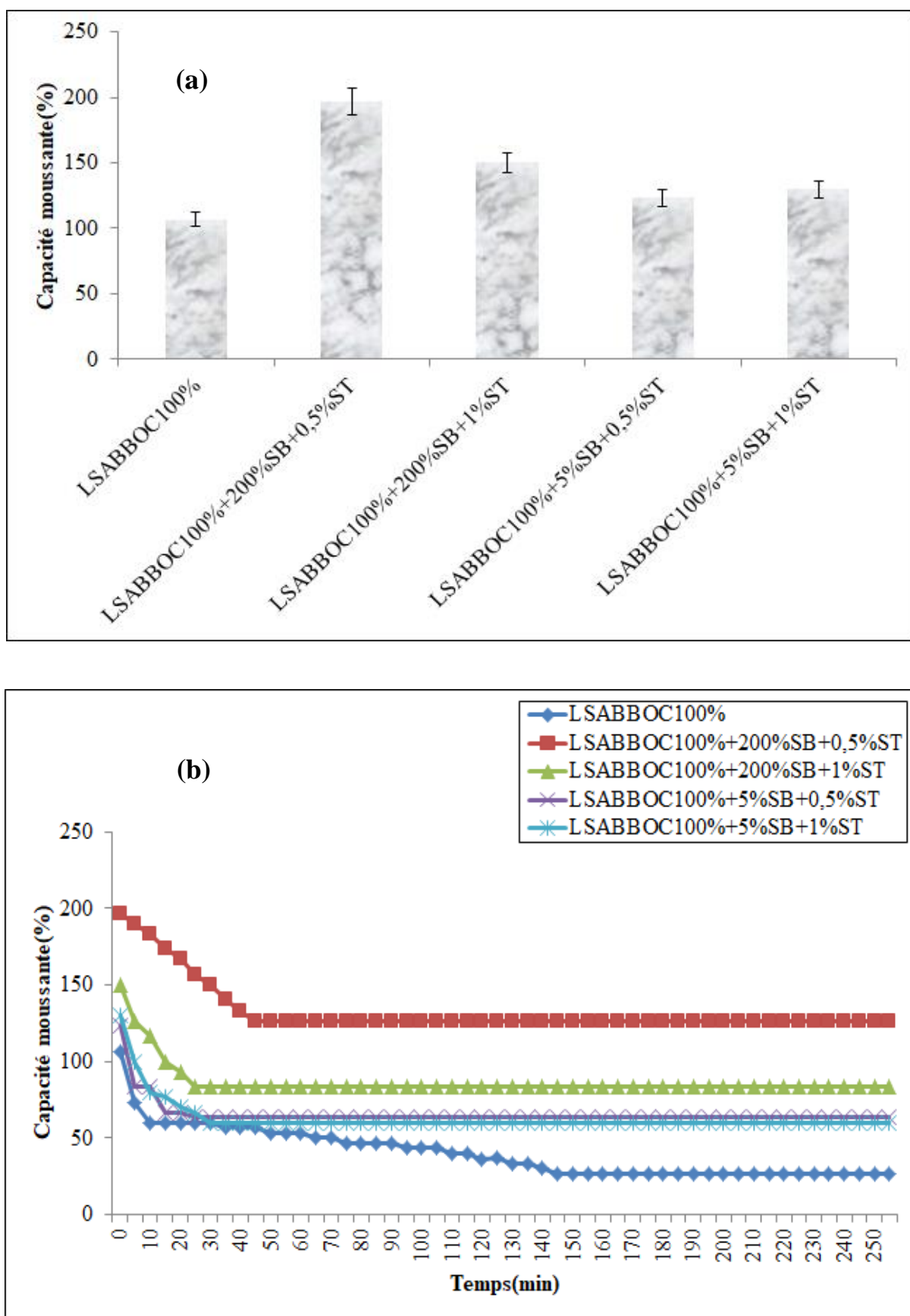


Figure 44 : Moussabilité (a) à t=0min et stabilité de la mousse (b) du lactosérum acide brut et du blanc d’œuf cru dans un système individuel et mixte (cas du sucre blanc et du sel de table) au cours du temps.

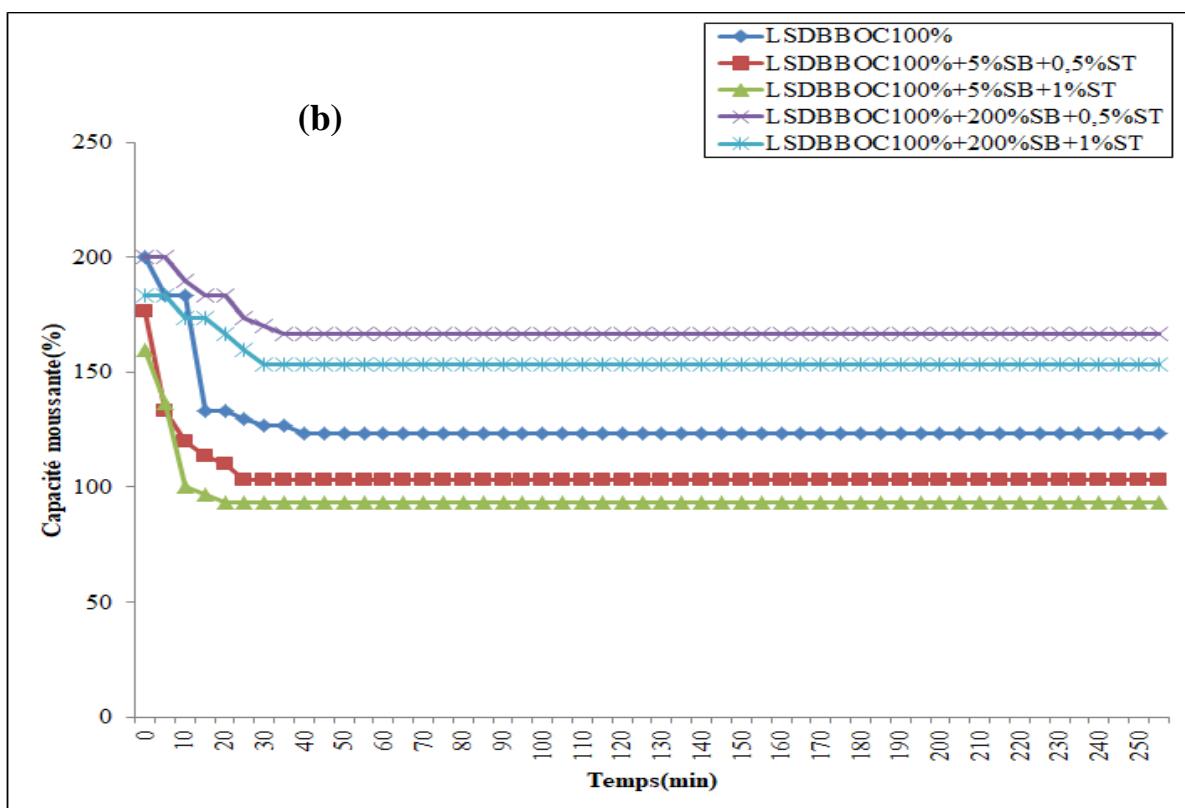
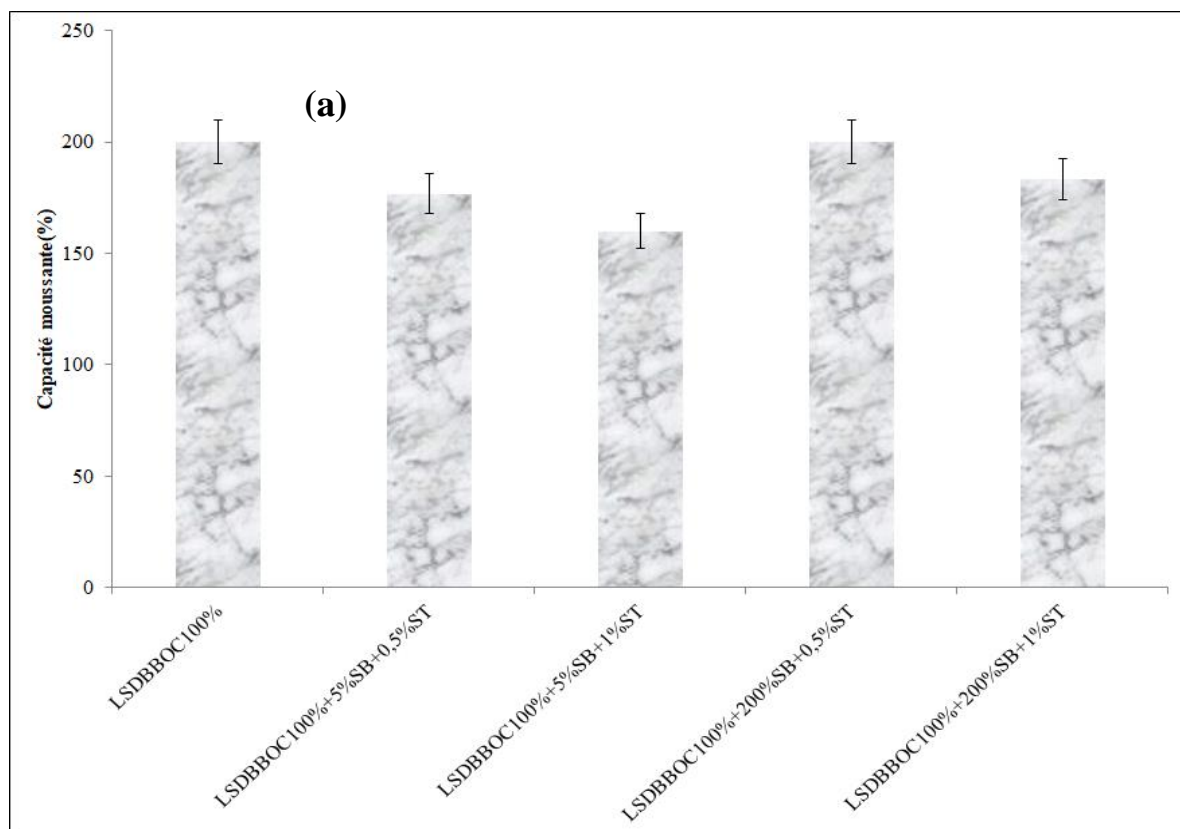


Figure 45 : Moussabilité (a) à t=0min et stabilité de la mousse (b) du lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru dans un système individuel et mixte (cas du sucre blanc et du sel de table) au cours du temps.

### 3.4.1.2. Diamètre des bulles d'air

Les figures 46 et 47 montrent les résultats du diamètre moyen des bulles d'air des mousses (a) à  $t=0\text{min}$  et de sa cinétique (b) des mixtes (lactosérums bruts et blanc d'œuf cru à 100%) dans un système individuel et mixte (cas du sucre blanc et du sel de table) au cours du temps.

Selon les figures 46 et 47 (a) ; le diamètre moyen des bulles d'air des mousses des mixtes (lactosérums bruts et blanc d'œuf cru à 100%) dans un système individuel et mixte (cas du sucre blanc et du sel de table) au cours du temps se diffère selon le type du lactosérum, l'apport et le type du sucre et du sel de table :

- Dans un système individuel et à temps  $t=0\text{min}$  ; le mixte (LSDBBOC100%) a enregistré une valeur du diamètre des bulles d'air légèrement supérieure à celle exprimée par le mixte (LSABBOC100%) (9,71 contre 9  $\mu\text{m}$ ).

- Dans un système mixte ; les mousses des mixtes à base des lactosérums bruts (acide et doux), du blanc d'œuf cru à 100%, du sucre blanc (5 et 200%) et du sel de table (0,5 et 1%) sont manifestés par des valeurs des diamètres moyens supérieures comparativement à celles trouvées dans les mixtes des lactosérums bruts (acide et doux) et du blanc d'œuf cru à 100% (LSABBOC100% et LSDBBOC100%) à savoir:

- Par rapport au diamètre moyen ( $\varnothing=9\mu\text{m}$ ) du mixte (LSABBOC100%) ; les valeurs des diamètres moyens supérieures sont celles obtenues par le lactosérum acide brut et du blanc d'œuf cru à 100% dans un système mixte (cas du sucre blanc et du sel de table) qui sont respectivement le mixte LSABBOC100%+200%SB+0,5%ST ( $\varnothing=15,88\mu\text{m}$ ), LSABBOC100%+200%SB+1%ST ( $\varnothing=17,76\mu\text{m}$ ), le mixte LSABBOC100%+5%SB+0,5%ST ( $\varnothing=13,80\mu\text{m}$ ) et le mixte LSABBOC100%+5%SB+1%ST ( $\varnothing=14,89\mu\text{m}$ ) ;

- Contrairement au mixte du lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru à 100% ( $\varnothing=9,71\mu\text{m}$ ) ; les valeurs des diamètres moyens supérieures sont celles obtenues par le lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru à 100% dans un système mixte (cas du sucre blanc et du sel de table) qui sont respectivement le mixte LSDBBOC100%+200%SB+0,5%ST ( $\varnothing=16,07\mu\text{m}$ ), le mixte LSDBBOC100%+200%SB+1%ST ( $\varnothing=15,01\mu\text{m}$ ), le mixte LSDBBOC100%+5%SB+0,5%ST ( $\varnothing=14,53\mu\text{m}$ ) et le mixte LSDBBOC100%+5%SB+1%ST ( $\varnothing=16,34\mu\text{m}$ ) .

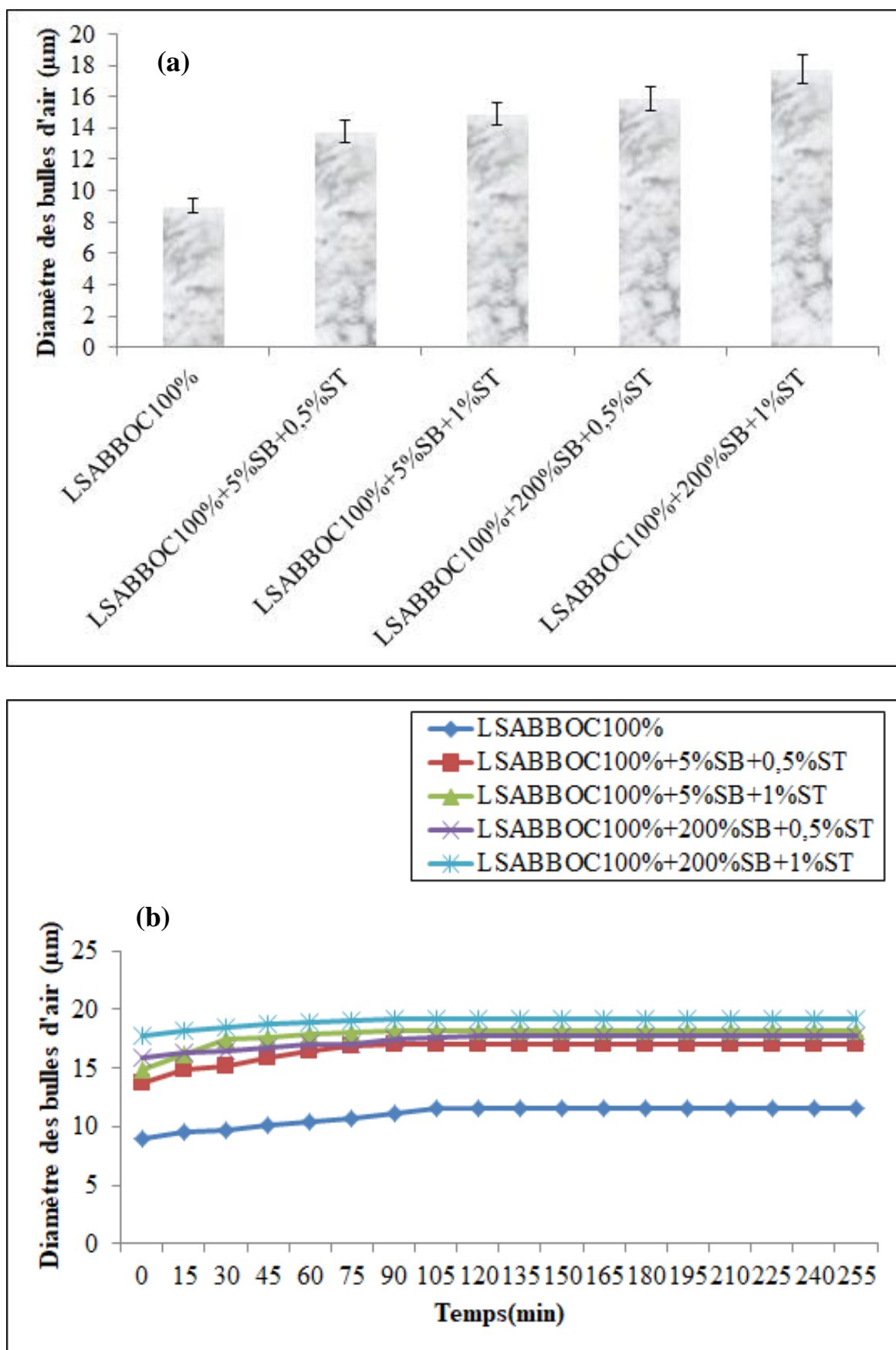
Selon les figures 46 et 47 (b) ; en terme de stabilité de la mousse ; les cinétiques de diamètre moyen des mousses ont des allures croissantes au cours du temps :

- Au cours du temps, nous avons constaté que les cinétiques de l'évolution des diamètres moyens des bulles d'air notées pour les mixtes (LSABBOC100% et LSDBBOC100%) dans leur système individuel et mixte étaient progressives avec des rythmes différents ; dont le diamètre moyen des mousses du mixte LSABBOC100% a passé de 9 à 11,51 $\mu\text{m}$  après une durée de stabilité des mousses égale à 105min au minimum, par contre, celui noté pour les mousses du mixte LSDBBOC100% a évolué de 9,71 à 20,89 $\mu\text{m}$  à temps  $t=120\text{min}$  au minimum;

- Par rapport au rythme de l'évolution du diamètre moyen des bulles d'air des mousses enregistré pour le mixte LSABBOC100% ( $\varnothing=9$  à 11,51 $\mu\text{m}$  à 105min au minimum) ; les diamètres moyens supérieurs sont ceux marqués dans le mixte LSABBOC100% dans un système mixte (cas du sucre blanc et du sel de table) qui sont respectivement le mixte LSABBOC100%+200%SB+0,5%ST ( $\varnothing=15,88$  à 17,78 $\mu\text{m}$  à 105 min au minimum) ; le mixte LSABBOC100%+200%SB+1%ST ( $\varnothing=17,76$  à 19,24 $\mu\text{m}$  à 90 min au minimum), ; le mixte LSABBOC100%+5%SB+0,5%ST ( $\varnothing=13,80$  à 17,04 $\mu\text{m}$  à 90 min au minimum) et le mixte LSABBOC100%+5%SB+1%ST ( $\varnothing=14,89$  à 18,25 $\mu\text{m}$  à 90 min au minimum) ;

- Comparativement au rythme de l'évolution du diamètre moyen des bulles d'air des mousses enregistré pour le mixte LSDBBOC100% ( $\varnothing=9,71$  à 20,49 $\mu\text{m}$  à 120min au minimum) ; les diamètres moyens inférieurs sont ceux marqués dans le mixte LSDBBOC100% dans un système mixte (cas du sucre blanc et du sel de table) qui sont respectivement le mixte LSDBBOC100%+200%SB+0,5%ST ( $\varnothing=16,07$  à 17,90 $\mu\text{m}$  à 105 min au minimum) ; le mixte LSDBBOC100%+200%SB+1%ST ( $\varnothing=15,01$  à 16,68 $\mu\text{m}$  à 90 min au minimum), ; le mixte LSDBBOC100%+5%SB+0,5%ST ( $\varnothing=14,53$  à 17,72 $\mu\text{m}$  à 90 min au minimum) et le mixte LSDBBOC100%+5%SB+1%ST ( $\varnothing=16,34$  à 18,79 $\mu\text{m}$  à 90 min au minimum) .





**Figure 46** : Diamètre des bulles d'air (a) à  $t=0\text{min}$  et sa cinétique (b) du lactosérum acide brut et du blanc d'œuf cru dans un système individuel et mixte (cas du sucre blanc et du sel de table) au cours du temps.

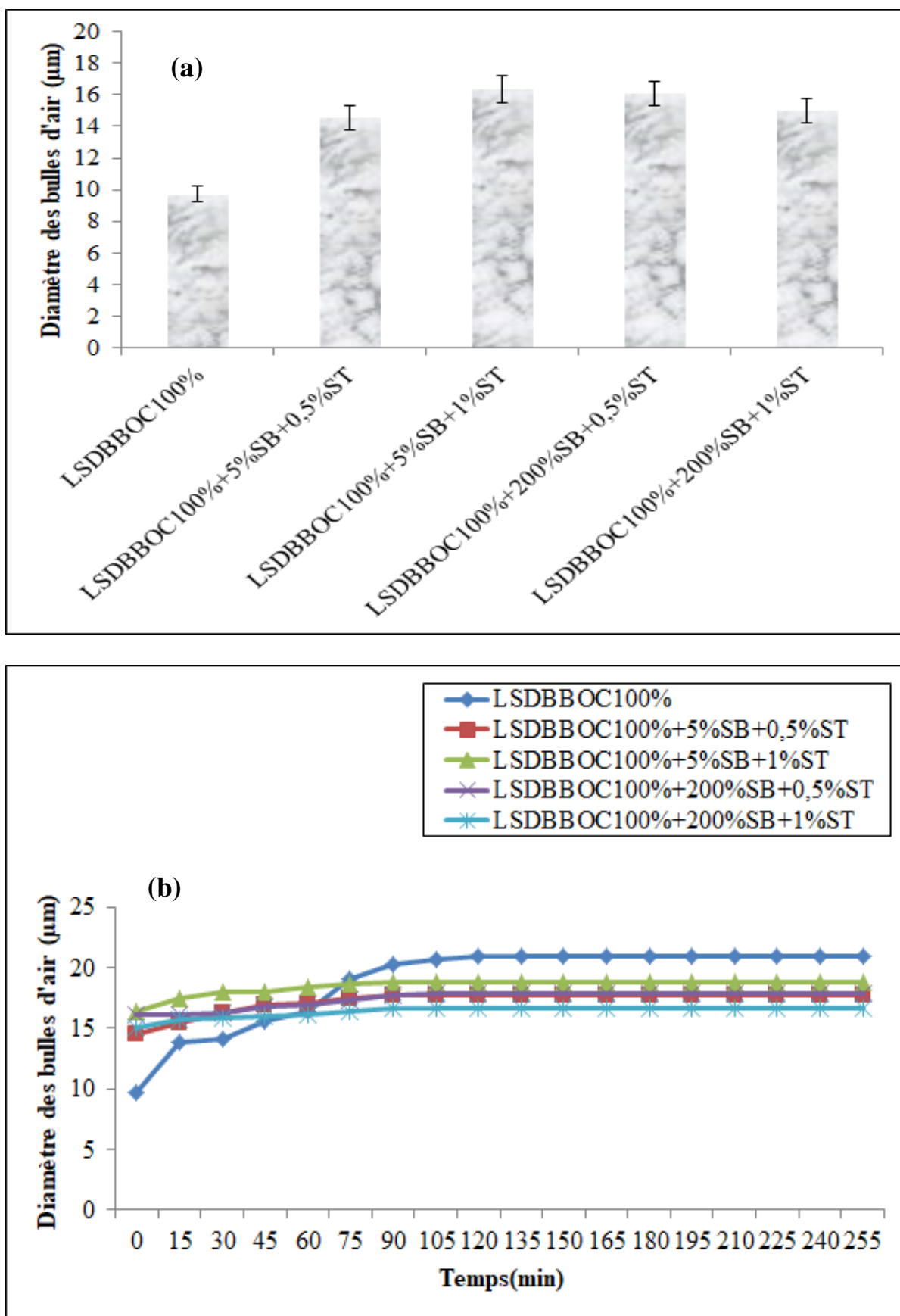


Figure 47 : Diamètre des bulles d'air (a) à  $t=0\text{min}$  et sa cinétique (b) du lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru dans un système individuel et mixte (cas du sucre blanc et du sel de table) au cours du temps.

### 3.4.2. Effet du sucre roux et du sel de table

#### 3.4.2.1. Capacité moussante

Les figures 48 et 49 montrent les résultats de la moussabilité (a) à  $t=0\text{min}$  et stabilité de la mousse (b) des mixtes (lactosérums bruts et blanc d'œuf cru à 100%) dans un système individuel et mixte (cas du sucre roux et du sel de table) au cours du temps.

Selon les figures 48 et 49 (a) ; en terme de moussabilité ; le comportement moussant des mixtes (lactosérums bruts et blanc d'œuf cru à 100%) dans un système individuel et mixte (cas du sucre roux et du sel de table) au cours du temps se diffère selon le type du lactosérum, l'apport et le type du sucre et du sel de table :

- Dans un système individuel et à temps  $t=0\text{min}$  ; le mixte (LSDBBOC100%) a enregistré une capacité moussante qui est deux fois supérieure à celle exprimée par le mixte (LSABBOC100%) (200 contre 106,66%).

- Dans un système mixte ; les mixtes à base des lactosérums bruts (acide et doux), du blanc d'œuf cru à 100%, du sucre roux (5 et 200%) et du sel de table (0,5 et 1%) sont manifestés par des capacités moussantes variables et inférieures comparativement à celles trouvées dans les mixtes des lactosérums bruts (acide et doux) et du blanc d'œuf cru à 100% (LSABBOC100% et LSDBBOC100%) à savoir:

- Par rapport à la capacité moussante ( $CM=106,66\%$ ) du mixte (LSABBOC100%) ; les capacités moussantes supérieures sont celles obtenues par le lactosérum acide brut et le blanc d'œuf cru à 100% dans un système mixte (cas du sucre roux et du sel de table) qui sont respectivement le mixte LSABBOC100%+200%SR+0,5%ST ( $CM=166,66\%$ ) et le mixte LSABBOC100%+5%SR+0,5%ST ( $CM=166,66\%$ );

- Contrairement au mixte du lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru à 100% ( $CM=200\%$ ) ; les capacités moussantes inférieures sont celles obtenues par le lactosérum doux brut et le blanc d'œuf cru à 100% dans un système mixte (cas du sucre roux et du sel de table ) qui sont respectivement le mixte LSDBBOC100%+200%SR+0,5%ST ( $CM=183,33\%$ ), le mixte LSDBBOC100%+200%SR+1%ST ( $CM=96,66\%$ ), le mixte LSDBBOC100%+5%SR+0,5%ST ( $CM=150\%$ ) et le mixte LSDBBOC100%+5%SR+1%ST ( $CM=133,33\%$ ).

Selon les figures 48 et 49 (b) ; en terme de stabilité de la mousse ; les cinétiques de stabilité des mousses ont des allures décroissantes au cours du temps :

- Au cours du temps, nous avons constaté que la diminution de la capacité moussante pour les mixtes (LSABBOC100% et LSDBBOC100%) dans leur système individuel et mixte était progressive et stable avec des rythmes différents ; dont la stabilisation totale de la mousse pour le mixte (LSABBOC100%) a été observée à 255min au minimum dont elle a évolué du 106,66 à 26,66% à 145min au minimum , cette durée de stabilité est similaire à celle marquée pour la mousse du mixte (LSDBBOC100%), elle atteint 255 min au minimum et elle varie du 200 à 123,33% à 40min au minimum ;

- Par rapport à la durée de la stabilisation totale ( $DS \geq 250$ min au minimum) de la mousse enregistrée pour le mixte du lactosérum acide brut et du blanc d'œuf cru à 100% (LSABBOC100%) ; les durées de la stabilité inférieure sont celles marquées dans le système mixte du lactosérum acide brut et du blanc d'œuf cru à 100% (cas du sucre roux et du sel de table) qui sont respectivement le mixte LSABBOC100%+200%SR+0,5%ST ( $DS \geq 255$ min ; CM= 166,66 à 43,33% à 30min au minimum) , le mixte LSABBOC100%+200%SR+1%ST ( $DS \geq 255$ min ; CM=56,66 à 30% à 25min au minimum), le mixte LSABBOC100%+5%SR+0,5%ST( $DS \geq 255$ min ; CM= 166,66 à 80% à 15min au minimum) et le mixte LSABBOC100%+5%SR+1%ST( $DS \geq 255$ min ; CM= 96,66 à 50% à 15min au minimum) ;

- Comparativement à la durée de la stabilisation totale ( $DS \geq 250$ min au minimum) de la mousse enregistrée pour le mixte du lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru à 100% (LSDBBOC100%); les durées de la stabilité inférieure sont celles marquées dans le système mixte du lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru à 100% (cas du sucre roux et du sel de table) qui sont respectivement le mixte LSDBBOC100%+200%SR+0,5%ST ( $DS \geq 255$ min ; CM= 183,33 à 106,66% à 25min au minimum) , le mixte LSDBBOC100%+200%SR+1%ST ( $DS \geq 255$ min ; CM=96,66 à 50% à 20min au minimum), le mixte LSDBBOC100%+5%SR+0,5%ST( $DS \geq 255$ min ; CM= 150 à 90% à 10min au minimum) et le mixte LSDBBOC100%+5%SR+1%ST( $DS \geq 255$ min ; CM= 133,33 à 83,33% à 20min au minimum) .

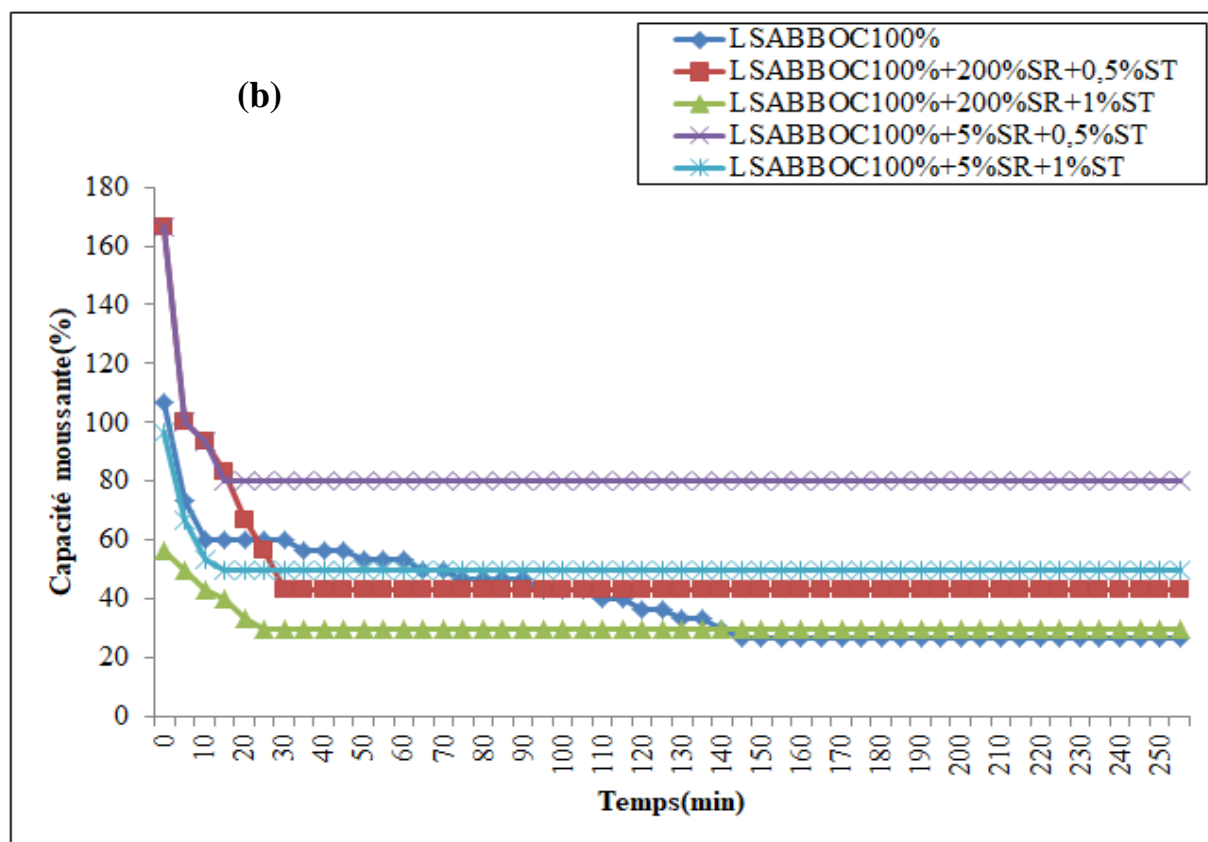
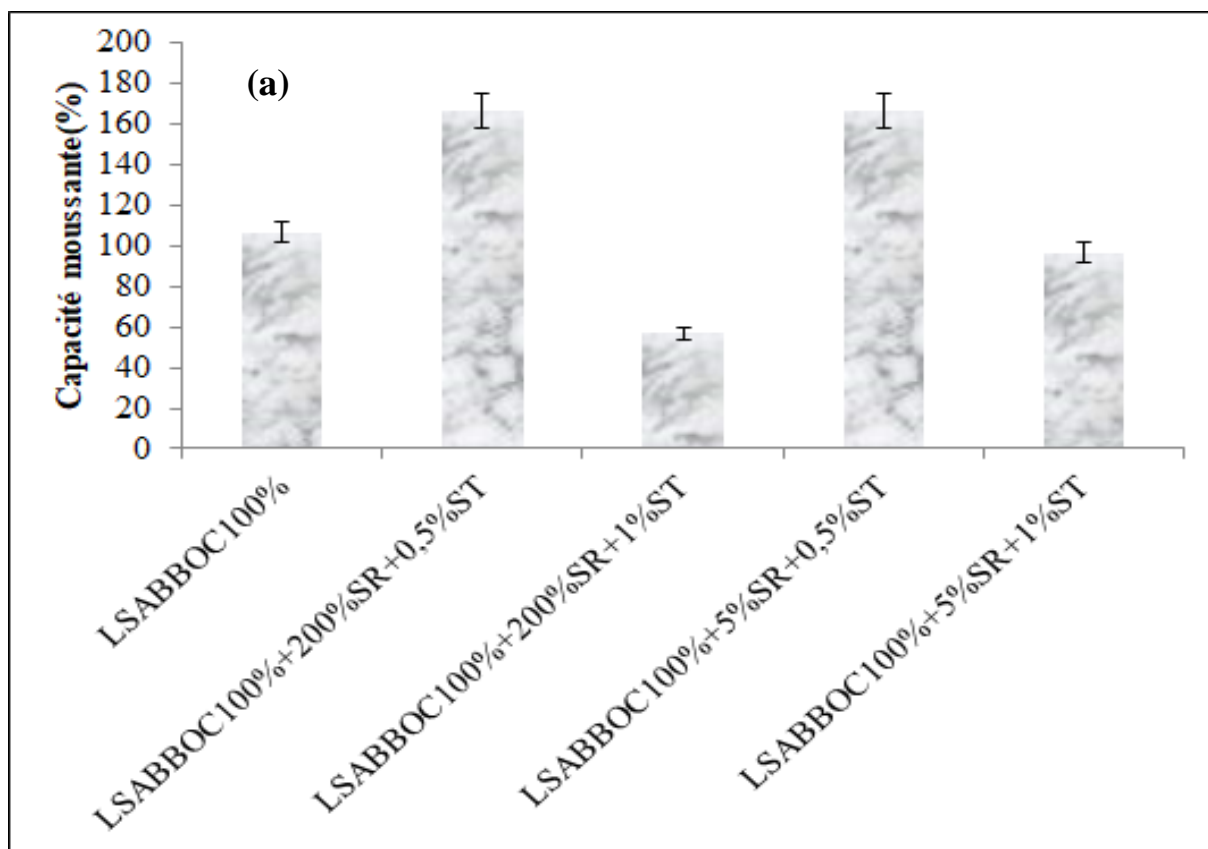
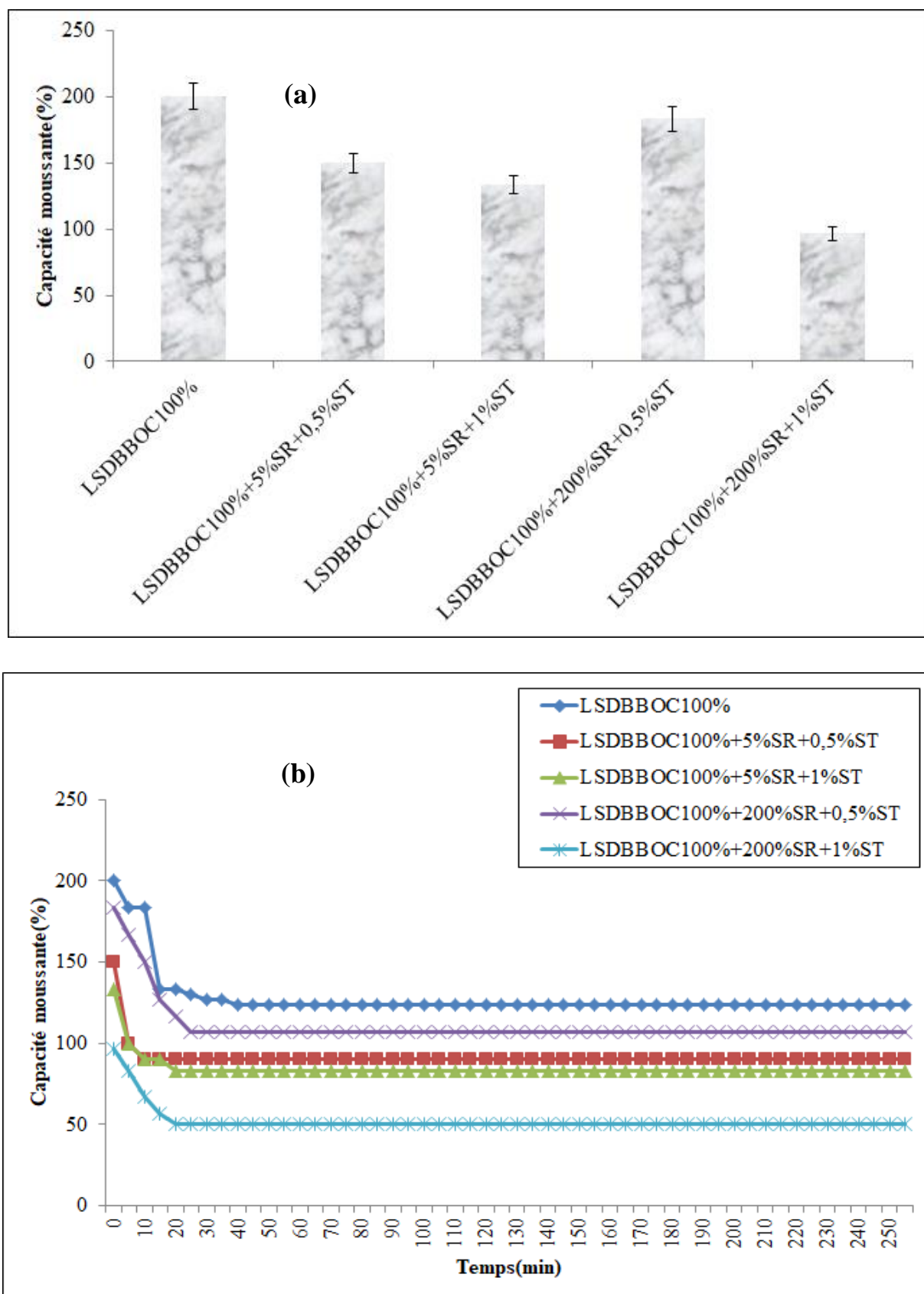


Figure 48 : Moussabilité (a) à t=0min et stabilité de la mousse (b) du lactosérum acide brut et du blanc d’œuf cru dans un système individuel et mixte (cas du sucre roux et du sel de table) au cours du temps.



**Figure 49** : Moussabilité (a) à  $t=0$ min et stabilité de la mousse (b) du lactosérum doux brut et blanc d'œuf cru dans un système individuel et mixte (cas du sucre roux et du sel de table) au cours du temps.

### 3.4.2.2. Diamètre des bulles d'air

Les figures 50 et 51 montrent les résultats du diamètre moyen des bulles d'air des mousses (a) à  $t=0\text{min}$  et de sa cinétique (b) des mixtes (lactosérums bruts et blanc d'œuf cru à 100%) dans un système individuel et mixte (cas du sucre roux et du sel de table) au cours du temps.

Selon les figures 50 et 51 (a) ; le diamètre moyen des bulles d'air des mousses des mixtes (lactosérums bruts et blanc d'œuf cru à 100%) dans un système individuel et mixte (cas du sucre roux et du sel de table) au cours du temps se diffère selon le type du lactosérum, l'apport et le type du sucre et du sel de table :

-Dans un système individuel et à temps  $t=0\text{min}$  ; le mixte (LSDBBOC100%) a enregistré une valeur du diamètre des bulles d'air légèrement supérieure à celle exprimée par le mixte (LSABBOC100%) (9,71 contre 9  $\mu\text{m}$ ).

-Dans un système mixte ; les mousses des mixtes à base des lactosérums bruts (acide et doux), du blanc d'œuf cru à 100%, du sucre roux (5 et 200%) et du sel de table (0,5 et 1%) sont manifestés par des valeurs des diamètres moyens supérieures comparativement à celles trouvées dans les mixtes des lactosérums bruts (acide et doux) et du blanc d'œuf cru à 100% (LSABBOC100% et LSDBBOC100%) à savoir:

-Par rapport au diamètre moyen ( $\emptyset=9\mu\text{m}$ ) du mixte (LSABBOC100%) ; les valeurs des diamètres moyens supérieures sont celles obtenues par le lactosérum acide brut et du blanc d'œuf cru à 100% dans un système mixte (cas du sucre roux et du sel de table) qui sont respectivement le mixte LSABBOC100%+200%SR+0,5%ST ( $\emptyset=15,22\mu\text{m}$ ), le mixte LSABBOC100%+200%SR+1%ST ( $\emptyset=12,92\mu\text{m}$ ), le mixte LSABBOC100%+5%SR+0,5%ST ( $\emptyset=16\mu\text{m}$ ) et le mixte LSABBOC100%+5%SR+1%ST ( $\emptyset=12,74\mu\text{m}$ ) ;

-Contrairement au mixte du lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru à 100% ( $\emptyset=9,71\mu\text{m}$ ) ; les valeurs des diamètres moyens supérieures sont celles obtenues par le lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru à 100% dans un système mixte (cas du sucre roux et du sel de table) qui sont respectivement le mixte LSDBBOC100%+200%SR+0,5%ST ( $\emptyset=16,44\mu\text{m}$ ), LSDBBOC100%+200%SR+1%ST ( $\emptyset=16,51\mu\text{m}$ ), le mixte LSDBBOC100%+5%SR+0,5%ST ( $\emptyset=14,39\mu\text{m}$ ) et le mixte LSDBBOC100%+5%SR+1%ST ( $\emptyset=15,64\mu\text{m}$ ) .

Selon les figures 50 et 51 (b) ; en terme de stabilité de la mousse ; les cinétiques de diamètre moyen des mousses ont des allures croissantes au cours du temps :

- Au cours du temps, nous avons constaté que les cinétiques de l'évolution des diamètres moyens des bulles d'air notées pour les mixtes (LSABBOC100% et LSDBBOC100%) dans leur système individuel et mixte étaient progressives avec des rythmes différents ; dont le diamètre moyen des mousses du mixte LSABBOC100% a passé de 9 à 11,51 $\mu\text{m}$  après une durée de stabilité des mousses égale à 105min au minimum, par contre, celui noté pour les mousses du mixte LSDBBOC100% a évolué de 9,71 à 20,89 $\mu\text{m}$  à temps  $t=120\text{min}$  au minimum;

-Par rapport au rythme de l'évolution du diamètre moyen des bulles d'air des mousses enregistré pour le mixte LSABBOC100% ( $\emptyset=9$  à 11,51 $\mu\text{m}$  à 105min au minimum) ; les diamètres moyens supérieurs sont ceux marqués dans le mixte LSABBOC100% dans un système mixte (cas du sucre roux et du sel de table) qui sont respectivement le mixte LSABBOC100%+200%SR+0,5%ST ( $\emptyset=15,22$  à 17,33 $\mu\text{m}$  à 75 min au minimum) ; le mixte LSABBOC100%+200%SR+1%ST ( $\emptyset=12,92$  à 15,97 $\mu\text{m}$  à 90 min au minimum), ; le mixte LSABBOC100%+5%SR+0,5%ST ( $\emptyset=16$  à 18,02 $\mu\text{m}$  à 90 min au minimum) et le mixte LSABBOC100%+5%SR+1%ST ( $\emptyset=12,74$  à 15,57 $\mu\text{m}$  à 75 min au minimum) ;

-Comparativement au rythme de l'évolution du diamètre moyen des bulles d'air des mousses enregistré pour le mixte LSDBBOC100% ( $\emptyset=9,71$  à 20,49 $\mu\text{m}$  à 120min au minimum) ; les diamètres moyens inférieurs sont ceux marqués dans le mixte LSDBBOC100% dans un système mixte (cas du sucre roux et du sel de table) qui sont respectivement le mixte LSDBBOC100%+200%SR+0,5%ST ( $\emptyset=16,44$  à 18,60 $\mu\text{m}$  à 75 min au minimum) ; le mixte LSDBBOC100%+200%SR+1%ST ( $\emptyset=16,51$  à 18,07 $\mu\text{m}$  à 75 min au minimum), ; le mixte LSDBBOC100%+5%SR+0,5%ST ( $\emptyset=14,39$  à 16,02 $\mu\text{m}$  à 90 min au minimum) et le mixte LSDBBOC100%+5%SR+1%ST ( $\emptyset=15,64$  à 18,02 $\mu\text{m}$  à 90 min au minimum) .

Le tableau 13 révèle les aspects microscopiques des mousses des lactosérums bruts dans un système individuel et mixte (cas du blanc d'œuf, sucre blanc, sucre roux et du sel de table).



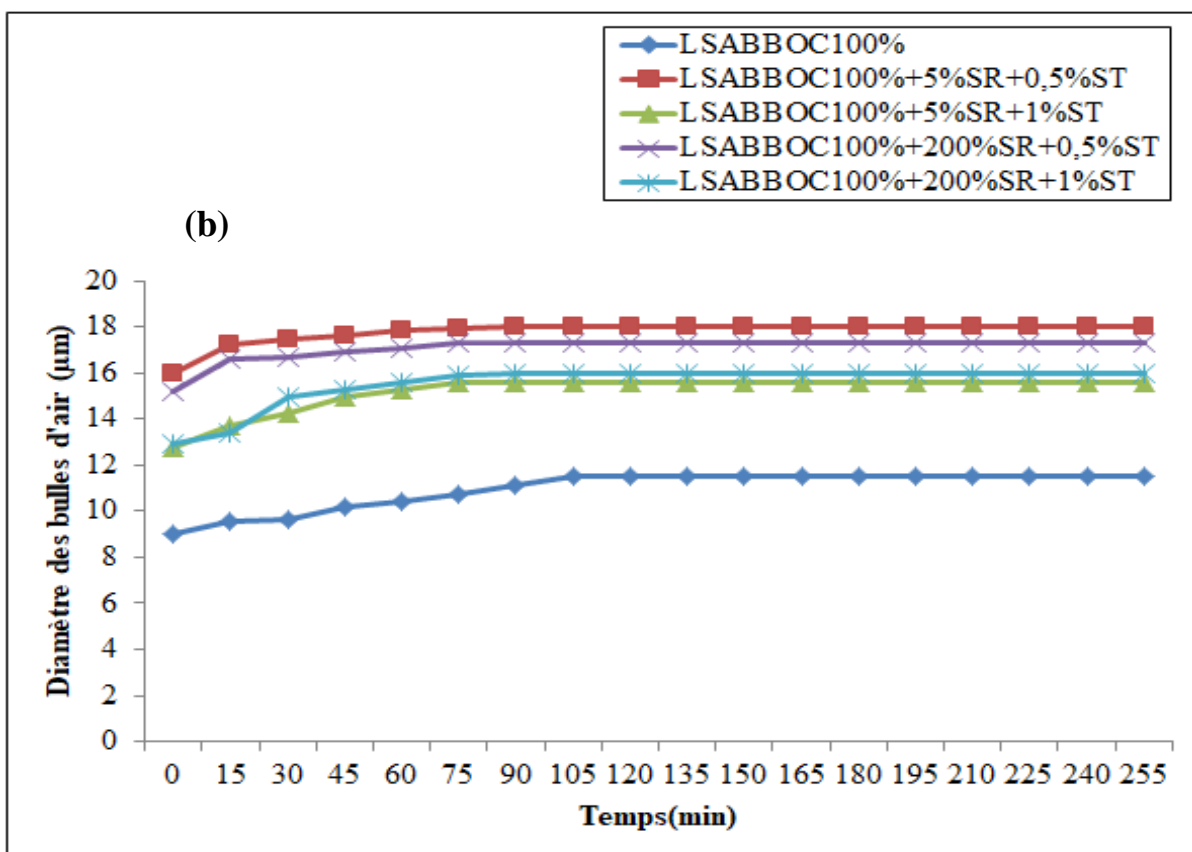
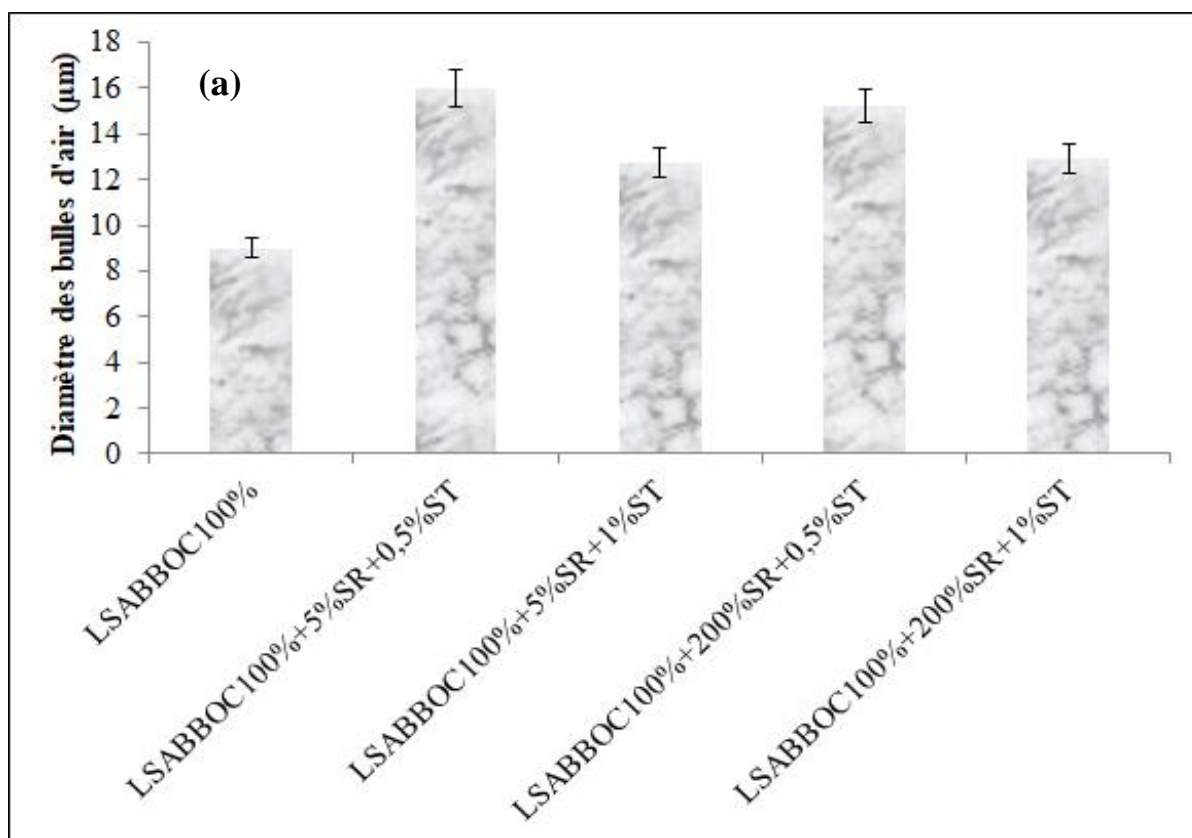


Figure 50 : Diamètre des bulles d'air (a) à t=0min et sa cinétique (b) du lactosérum acide brut et du blanc d'œuf cru dans un système individuel et mixte (cas du sucre roux et du sel de table) au cours du temps.

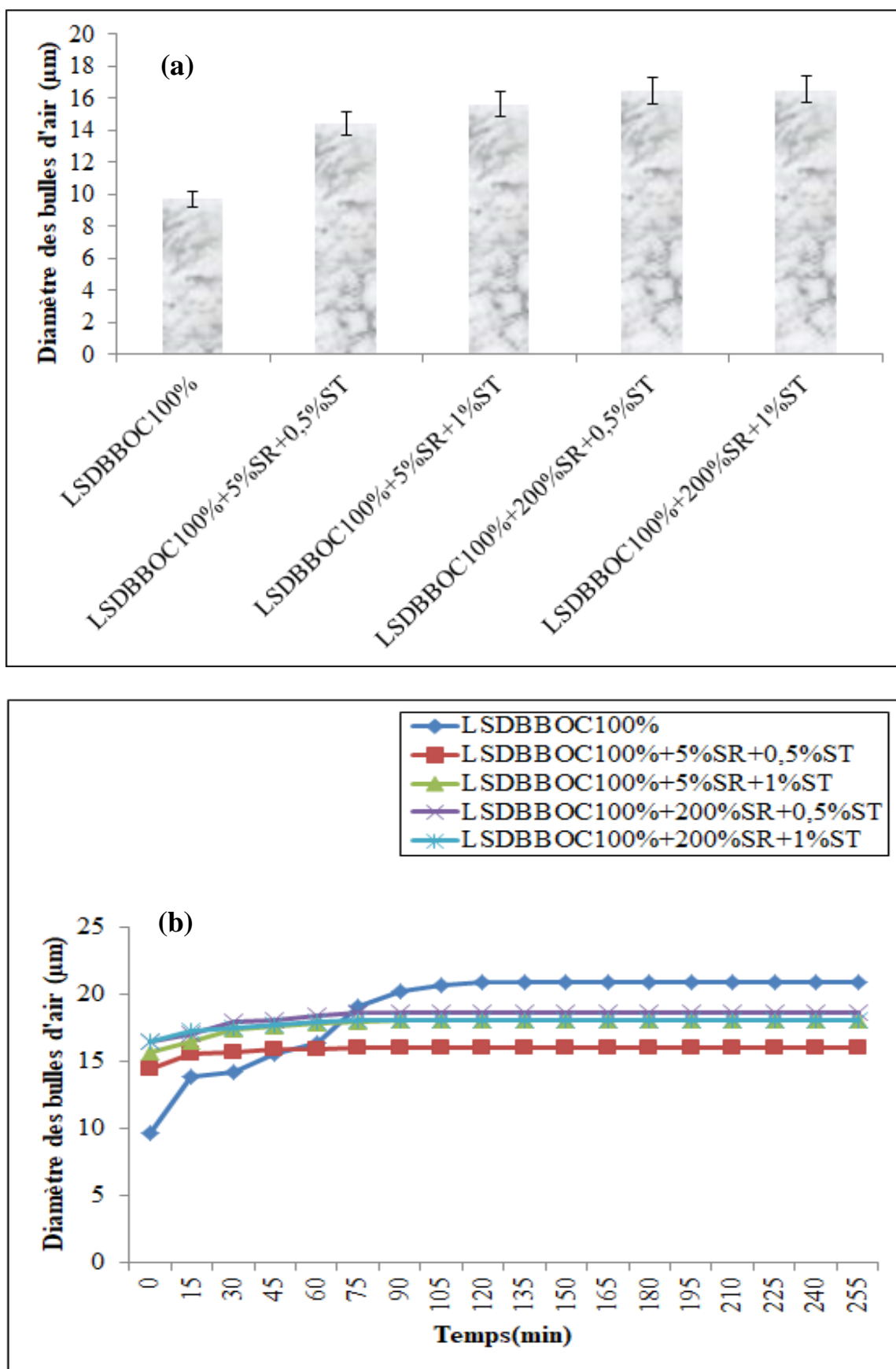
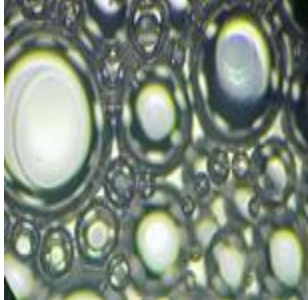
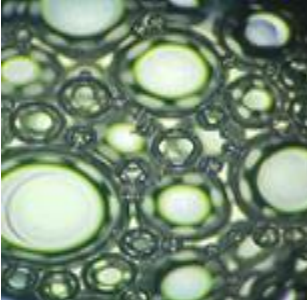

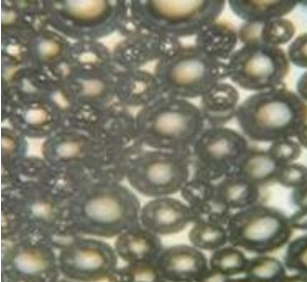
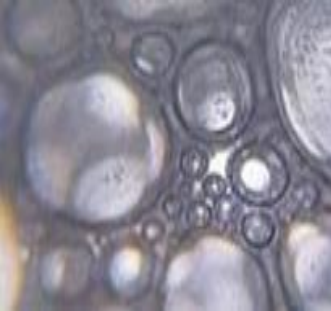
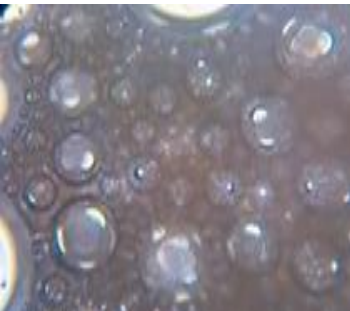




Figure 51 : Diamètre des bulles d'air (a) à  $t=0\text{min}$  et sa cinétique (b) du lactosérum doux brut et du blanc d'œuf cru dans un système individuel et mixte (cas du sucre roux et du sel de table) au cours du temps.

**Tableau 13 :** Aspects microscopiques des mousses (G :x100) des lactosérums bruts dans un système individuel et mixte (cas du blanc d’œuf, sucre blanc, sucre roux et du sel de table).

Matrice des mousses	Photos à temps t=t <sub>0</sub>	Matrice des mousses	Photos à temps t=t <sub>0</sub>
LSAB		LSDB	
LSABBOC100%		LSDBBOC100%	
LSABBOC100% + 200% SB + 0,5 %ST		LSDBBOC100% + 200% SB + 0,5 %ST	
LSABBOC100% + 200% SR + 0,5 %ST		LSDBBOC100% + 200% SR + 0,5 % ST	

Selon **Walstra (2003a)**, **Ellis et Lazidis (2018)**, les mousses sont des systèmes thermodynamiquement instables et leur stabilité a généralement une durée de vie de plusieurs heures. Le drainage de la mousse, sa coalescence et sa disproportionation ou son grossissement constituent trois mécanismes principaux par lesquels la structure de la mousse change au fil du temps, entraînant son effondrement global : l'écoulement du liquide à travers le volume de la mousse sous l'effet de la gravité, connu sous le nom de drainage de la mousse, la rupture du film entre les bulles voisines entraînant la coalescence et la diffusion gazeuse entre les bulles adjacentes, ce qui provoque un grossissement des bulles, connu sous le nom de disproportionation ou de grossissement.

Ces mécanismes d'instabilité se produisent simultanément et peuvent donc se renforcer mutuellement (**Dickinson, 2010**). Par exemple, le grossissement entraîne la formation de bulles plus grosses et donc de films plus grands, ce qui accélère le drainage (**Walstra, 2003a**).

De plus, le pH, la force ionique, la température et la modification des protéines comptent parmi les facteurs qui influencent les propriétés moussantes des protéines (**Ellis et Lazidis, 2018**).

Selon **Murray (2002)**, les protéines sont de bons agents moussants pour trois raisons : elles s'adsorbent fortement à l'interface gaz-eau, elles assurent une stabilisation stérique et électrostatique lorsque les conditions environnementales (pH et concentration en sel) le permettent, et les films contenant des protéines adsorbées présentent une certaine cohérence structurelle due aux interactions entre les molécules adsorbées, ce qui se traduit par des modules rhéologiques de surface élevés. Les protéines d'œuf sont considérées comme la référence en matière de protéines aux propriétés moussantes améliorées, ce qui s'explique par leur large application en cuisine, notamment dans les meringues, les gâteaux et les soufflés (**Ellis et Lazidis, 2018**).

La concentration en protéines, l'âge du blanc d'œuf, le temps et la température de fouettage, le traitement thermique, la teneur en sucre et l'acidité jouent un rôle important dans les propriétés moussantes, telles que la capacité et la stabilité du moussage (**Özer et Ağan, 2020**).

L'ovalbumine et le lysozyme sont les principales fractions des protéines du blanc d'œuf (**Ellis et Lazidis, 2018**). Selon **Lechevalier et al. (2003)**, l'ovalbumine, protéine dominante

du blanc d'œuf, lorsqu'elle est utilisée dans les mousses, semble former des structures particulières à l'interface eau/eau, avant même que les bulles ne commencent à se rétracter. Il a été démontré que les interactions entre les cinq principaux composants de l'ovalbumine sont responsables de la formation d'agrégats, induits par la formation de ponts disulfures entre les molécules, sur la lamelle (**Damodaran, 2005**). **Murray et Ettelaie (2004)** ont rapporté que la capacité du blanc d'œuf à former un réseau continu à l'interface s'explique par sa capacité accrue à former des mousses stables, ce qui justifie probablement son choix comme agent moussant dans de nombreux produits culinaires. Par conséquent, pour former une forme ultra-stable, la protéine doit pouvoir coaguler à l'interface et former un réseau rigide (**Martin et al., 2002 ; Walstra, 2003b**). Ce comportement de l'ovalbumine peut expliquer que les mousses de blanc d'œuf présentent une limite d'élasticité ( $\tau$ ) plus élevée que les mousses de protéines de lactosérum, pour les mêmes fractions d'air et les mêmes distributions de tailles de bulles (**Pernell et al., 2002**).

Le lysozyme est également une protéine présente dans le blanc d'œuf, caractérisée par une stabilisation de la mousse moins efficace. Ce résultat a été démontré par l'absence de structure secondaire en hélice  $\alpha$  dans le lysozyme et sa tendance à s'adsorber de manière indéterminée sur les interfaces (**Ellis et Lazidis, 2018**). Selon **Lechevalier et al. (2003)**, contrairement à l'ovalbumine, lorsque le lysozyme s'adsorbe à l'interface air/eau, il ne subit aucune modification structurelle.

En général, la composition et les propriétés physiques des œufs sont corrélées à la race et à l'âge de la poule, au type de ration alimentaire, au milieu d'élevage, à la saison de récolte et à la durée de conservation des œufs (**Kavimughil et al., 2023**). Ces facteurs diversifient la quantité de protéines, de matières grasses et d'enzymes présentes dans l'œuf, ce qui influence à son tour ses propriétés nutritionnelles et fonctionnelles.

D'autre part, les propriétés fonctionnelles du lactosérum sont liées à ses protéines ( $\beta$ -lactoglobuline ( $\beta$ lg),  $\alpha$ -lactalbumine ( $\alpha$ -la), albumine sérique bovine (BSA), immunoglobulines (IgG), lactoferrine (LF), lactoperoxydase (LP), protéose-peptones et certaines enzymes). La plupart des propriétés du lactosérum sont déterminées par la plus grande fraction (68 %) des deux principales protéines du lactosérum :  $\beta$ -lg et  $\alpha$ -la (**Ellis et Lazidis, 2018**). La  $\beta$ -lactoglobuline ( $\beta$ -lg) constitue la fraction la plus élevée (environ 58 %) des protéines du lactosérum du lait bovin (**Kilara et Vaghela, 2004**). Elle est composée de 162 acides aminés et présente un poids moléculaire de 18,3 kDa sous sa forme monomérique,

mais elle est généralement présente sous forme de dimère à des pH compris entre 5,5 et 7,5 (**Mulvihill et Donovan, 1987**).

Selon **Dombrowski et al. (2016)**, en raison de sa structure tertiaire et quaternaire distincte, la  $\beta$ -lactoglobuline ( $\beta$ -lg) est considérée comme l'une des protéines laitières les plus tensioactives, tant sous sa forme native que sous forme de particules agrégées.

Ses propriétés moussantes sont étroitement liées à sa structure et à son pH ; **Lazidis et al. (2016)** et **Lech et al. (2016)** ont rapporté que les octamères qui se forment à un pH proche de 3 ont un effet positif sur la stabilité des mousses formées. Alors qu'à un pH d'environ 5 (proche du pI), la charge des protéines est proche de zéro, le tassement interfacial à l'interface est élevé, formant des films plus rigides. Néanmoins, à des pH supérieurs à 7, les dimères présents possèdent une charge significative qui inhibe les interactions électrostatiques, ce qui entraîne un épaissement des films autour des bulles et une augmentation de la viscosité aux bords du plateau, ce qui a un effet positif sur la stabilité de la mousse.

L' $\alpha$ -lactalbumine ( $\alpha$ -lac) est la deuxième protéine la plus riche présente dans le lactosérum bovin (13 % du lactosérum) (**Kilara et Vaghela, 2004**). Composée de 123 acides aminés, elle est compacte et sphérique et possède un poids moléculaire de 14,0 kDa (**Mulvihill et Donovan, 1987**). L' $\alpha$ -lactalbumine ( $\alpha$ -lac) est un stabilisateur de mousse efficace grâce à sa capacité à s'adsorber de manière ordonnée en formant des hélices  $\alpha$  (**Cheung, 2017**).

L'albumine sérique bovine (BSA) est une protéine de la famille du lactosérum bovin et représente environ 10 % de la fraction totale du lactosérum. Elle est globulaire et de grande taille (66 kDa) et se compose de 580 résidus d'acides aminés (**Kinsella et Whitehead, 1989**). Elle a la capacité de stabiliser l'interface air/eau, principalement en formant des structures gélatineuses lors de l'adsorption, constituées d'agrégats qui se développent grâce à l'interaction des groupes hydrophiles exposés lors du dépliage à l'interface (**Li et al., 2017**).

Selon **Glaser et al. (2007)**, les mousses préparées avec 1 % en poids de solutions de BSA à pH neutre présentent des distributions de taille de bulles étroites, qui dépendent fortement de la méthode de moussage utilisée, et une faible stabilité.

Plusieurs études indiquent que les protéines natives contribuent de manière significative à la formation de mousse car elles sont plus petites et plus flexibles, et peuvent diffuser

rapidement et s'adsorber à la surface lors de la formation de la mousse (**Ellis et Lazidis, 2018**).

La structure typique des meringues est basée sur l'air emprisonné dans les blancs d'œufs battus (**Nastaj et al., 2020**). Lorsque les blancs d'œufs sont montés en neige, du saccharose est ajouté et incorporé comme ingrédient sec (**Hao et al., 2016**). Le saccharose est un ingrédient essentiel des meringues ; il apporte de la douceur et stabilise la mousse avant la cuisson en augmentant la viscosité et la capacité de rétention d'air (**Wilderjans et al., 2013 ; Sadahira et al., 2018**).

De plus, les propriétés moussantes sont influencées par le type de sucre incorporé à la formule de la meringue. Selon **Lekjing et al. (2022)**, parmi les meringues préparées avec du blanc d'œuf de cane salé et différents sucres (blanc cristallisé, sucre de canne, sucre de palme et sucre de coco) à diverses concentrations (25, 50, 75 et 100 %), la meringue préparée avec du sucre de coco à 75 % a montré des qualités supérieures aux autres types ou concentrations de sucre.

L'étude de **Sari et al. (2022)** sur les effets du type d'émulsifiant et de son ingrédient sur la stabilité de la mousse de meringue a montré que le sucre cristallisé présente une granulométrie plus importante que le sucre glace et que l'augmentation de la granulométrie du sucre améliore la vitesse de mouillage des poudres de sucre avec la matrice de mousse. **Varadaraj et al. (1994)** ont conclu que plus la poudre est grosse, plus la tension superficielle de l'interface air-liquide est réduite, et plus elle est facile à dissoudre en solution. Ainsi, plus la granulométrie est importante, plus la mouillabilité est élevée.

Selon **Sari et al. (2022)**, sans ajout de sucre, la formation de mousse à partir de gélatine est inférieure à celle du blanc d'œuf. En revanche, l'ajout de sucre dans la composition n'a pas d'effet significatif sur le volume de mousse (650 à 800 ml). **Yang et Foegeding (2010)** ont également conclu qu'une augmentation de la concentration en saccharose (0-63,3 g/100 ml) diminuait progressivement le débordement de la mousse de la solution d'isolat de protéines de lactosérum et augmentait sa stabilité. En présence de saccharose, la viscosité volumique et la vitesse d'adsorption des protéines à l'interface air/eau augmentent (**Zayas, 1997**). Il a été démontré que le saccharose diminue le volume de la mousse d'œuf, mais augmente sa stabilité (**Raikos et al., 2007**). Des facteurs tels que le pH, la teneur en oligo-éléments et les sulfites ont un impact sur la fonctionnalité des protéines du blanc d'œuf (**Lomakina et Mikova 2006**).

Il a été démontré que plusieurs composés affectent la stabilité des mousses de blanc d'œuf. **Raikos et al. (2007)** ont observé une amélioration de la capacité moussante du blanc d'œuf de poule après l'ajout de sel (NaCl), de sulfate de cuivre (**Phillips et al., 1987**), de fer et d'aluminium (**Cotterill et al., 1992**). Les travaux de **Ghanimah et Ibrahim (2018)** sur l'effet du pH, des glucides et du NaCl sur les propriétés fonctionnelles des protéines de lactosérum ont confirmé que l'ajout de NaCl augmentait significativement les propriétés moussantes des solutions d'isolat et de concentré de protéines de lactosérum.

Selon **Kulmyrzaev et al. (2000)**, les variations de pH et de force ionique (type et concentration de sel) ont un impact majeur sur les propriétés fonctionnelles des protéines de lactosérum. De plus, le volume et la stabilité de la mousse de l'isolat de protéines de lactosérum ont augmenté lorsque la concentration en NaCl passait de 0 à 0,05 M et ont diminué avec l'augmentation de la concentration (**Ercelebi et Ibanoglu, 2009**). Dans ce cas, l'ajout de NaCl peut altérer les interactions électrostatiques et affecter la diffusion et le dépliement des protéines à l'interface (**Zayas, 1997**). L'amélioration des performances de moussage par l'ajout de NaCl peut s'expliquer par la modification de la charge nette des protéines, l'augmentation de l'adsorption des protéines à l'interface grâce à la diminution des répulsions de surface entre les protéines adsorbées et non adsorbées, et la diminution de la dénaturation des protéines lors de la formation de la mousse (**Hailing, 1981**). **Davis et al. (2004)** ont conclu que l'ajout de NaCl dans des solutions de protéines de lactosérum, à un pH inférieur ou supérieur au  $p_i$ , entraînait une adsorption protéique plus élevée en termes de tension superficielle et un film plus iscoélastique.

De plus, la moussabilité et la stabilité de la mousse sont également des paramètres liés à la technique et à la méthode de production de mousse, par exemple un mélangeur de cuisine (**Camacho et al., 1998 ; Carp et al., 2001 ; Acem et al., 2020**), des turbines/hélices (**Hu et al., 2003 ; Thakur et al., 2003**), un rotor-stator (**Hanselmann et Windhab, 1999 ; Muller-Fischer et Windhab, 2005**) et un échangeur de chaleur à surface raclée (**Djelveh et al., 1994 ; Djelveh et Gros, 1995**). Ces résultats peuvent s'expliquer par ce principe, la vitesse et la durée de la technique de fouettage et de cisaillement, notamment la forme du mélangeur, qui influencent la taille des bulles et leur stabilité dans le temps.

De plus, la diffusion du tensioactif aux interfaces et l'incorporation des bulles dans la mousse sont entravées par l'augmentation de la viscosité due à la dénaturation. **Grinberg et al., (1993)** ont obtenu des résultats similaires pour l'ovalbumine, une protéine globulaire



présente dans le blanc d'œuf ; la capacité moussante était plus élevée si l'ovalbumine était partiellement dépliée et la formation de mousse était réduite à des degrés de dénaturation élevés (> 60 % de protéines totales).

Les isolats des protéines du lactosérum (IPL) présentent une excellente moussabilité, ce qui permet de les envisager comme un substitut potentiel aux protéines de blanc d'œuf (**Berry et al., 2009 ; Yang et Foegeding, 2011**). Cependant, le manque de stabilité de la mousse, notamment à la cuisson, limite leur utilisation comme agents moussants (**Foegeding et al., 2006 ; Yang et Foegeding, 2011**). Les facteurs qui influencent les propriétés moussantes des protéines comprennent des facteurs intrinsèques, tels que la flexibilité moléculaire (**Martin et al., 2002 ; Engelhardt et al., 2013**) et des facteurs environnementaux tels que le pH, la force ionique, les conditions de chauffage et d'autres ingrédients (**Phillips et al., 1990 ; Zhu et Damodaran, 1994 ; Clark et al., 1994 ; Phillips et al., 2006 ; Raikos et al., 2007 ; Phillips et al., 2008**). Il a été démontré que le chauffage des isolats des protéines du lactosérum (IPL) pour former un polymère de protéines de lactosérum soluble (pIPL) modifie ses propriétés moussantes. Des mesures de surface ont montré que, bien que le polymère de protéines de lactosérum soluble (pIPL) s'adsorbe plus lentement que les isolats des protéines du lactosérum (IPL) non chauffé, l'élasticité interfaciale (principal indicateur de la résistance des mousses à la déformation) augmente lorsque 50 % du IPL non chauffé est remplacé par du pWPI (**Davis et Foegeding, 2004**).

Les mousses sont thermodynamiquement instables, ce qui limite leur durée de conservation et leur qualité. Par conséquent, la plupart des aliments aérés, comme les boissons au café, ont une durée de conservation relativement courte. Les mécanismes de déstabilisation de la mousse ont été largement étudiés et sont généralement liés à trois aspects (drainage, disproportionation et coalescence) après la formation des mousses (**Wang et al., 2015**).

Drainage causé par la force gravitationnelle et la régénération marginale (**Dickinson 2003 ; Murray 2007**). En raison de la pression plus faible des bords du plateau par rapport au film adjacent (**Exerova et Kryglyakov 1998**), une « aspiration de bord de plateau » se forme. Par conséquent, le liquide de la phase continue s'écoule du film adjacent vers le bord du plateau. Enfin, sous l'effet de la force gravitationnelle, le liquide s'écoule à travers le réseau du bord du plateau (**Prud'homme et Khan 1995**). Le drainage peut se faire vers le bas ou vers le haut, selon la différence de densité entre la phase continue et la phase dispersée.

Le processus de disproportionation (maturation d'Ostwald) est une autre cause majeure de déstabilisation de la mousse. Il est lié à la diffusion gazeuse entre les bulles et vers l'atmosphère (**Dutta et al., 2004**). La pression de Laplace dans la petite bulle est supérieure à celle dans la grande bulle, ce qui entraîne une plus grande solubilité du gaz (**Yang et Foegeding, 2011**). Ainsi, la petite bulle rétrécit puis disparaît, tandis que la grande bulle grossit, ce qui entraîne une diminution du volume de mousse au fil du temps (**Dutta et al., 2004**). De ce point de vue, plus la taille des bulles est uniforme, moins l'effet de disproportionation est important.

Le dernier mécanisme de déstabilisation est la coalescence, qui se traduit par la rupture du film liquide mince de deux bulles adjacentes (**Carrier et Colin, 2003**). Lors de la coalescence, deux bulles ou plus forment une grande bulle. Il s'agit d'un processus irréversible ; Cependant, plusieurs approches techniques ont été développées pour rendre la mousse plus résistante à ce processus, notamment en améliorant les caractéristiques du film en augmentant la viscosité et l'élasticité interfaciale, ainsi qu'en augmentant les répulsions entre les bulles (**Walstra 2003 ; Damodaran 2005 ; Wilde 2000a**).

La stabilité de la mousse est généralement exprimée en termes de drainage  $\frac{1}{2}$  vie, ce qui correspond au temps nécessaire pour que la moitié de la masse pré-mousse s'écoule des mousses (**Davis et Foegeding 2007 ; Davis et Foegeding 2004 ; Phillips et al. 1990**). Un drainage  $\frac{1}{2}$  vie plus long reflète une meilleure stabilité de la mousse. Une autre façon de déterminer la stabilité de la mousse consiste à mesurer la variation de volume de la mousse à un certain temps après sa formation (**Miquelim et al. 2010**).

D'autres ingrédients ajoutés à la solution de pré-mousse ou pendant la formation de la mousse ont également une grande influence sur les propriétés moussantes. L'ajout de saccharose a entraîné une diminution de la taille initiale des bulles de mousse des isolats des protéines du lactosérum (IPL), ce qui était lié à une plus grande stabilité de la mousse et à une fraction de phase aérienne réduite (**Yang et Foegeding 2011**). Des résultats similaires ont également été obtenus par **Raikos et al., (2007)** selon lesquels le sucre réduisait l'excès de protéines. **Herceg et al., (2007)** ont rapporté que l'ajout de glucose, d'amidon et d'inuline améliorait la stabilité de la mousse par rapport à l'isolat de protéines de lactosérum seul, tandis que les effets sur la moussabilité étaient différents. L'ajout de glucose a montré une meilleure expansion de la mousse que le groupe témoin, tandis que l'ajout d'amidon et d'inuline a entraîné une moussabilité plus faible (**Wang et al., 2015**).

La modification du pH peut influencer les propriétés moussantes des protéines de lactosérum. Il a été rapporté qu'une meilleure stabilité de la mousse est obtenue à un pH proche du pI grâce à la formation de films interfaciaux épais et plus élastiques dans ces conditions (Zayas,1997 ;Zhang et al. 2004 ; Borcharding et al. 2009 ). En revanche, des résultats contradictoires ont été rapportés concernant l'effet du pH sur la moussabilité. La moussabilité des protéines peut être maximisée lorsque le pH est proche du pI (Hailing et Walstra 1981 ;Zhang et al. 2004 ), tandis qu'un surdosage plus important de protéines du lait a été observé avec une augmentation du pH dans la plage  $\text{pH} > \text{pI}$  (Borcharding et al. 2009).

La force ionique joue un rôle important dans la détermination des propriétés moussantes en affectant la solubilité des protéines et les propriétés électrostatiques. Le foisonnement de 5 % d'IPL était en corrélation positive avec la concentration en NaCl (de 0 à 1 M). Avec l'augmentation de la force ionique, la stabilité atteignait un pic puis diminuait (Mott et al., 1999). Une amélioration de la moussabilité et de la stabilité de la mousse avec 0,02 % d'IPL a été constatée à faible concentration en NaCl (0,05 M) en raison d'une solubilité accrue des protéines, tandis qu'à concentration plus élevée, les propriétés moussantes diminuaient en raison de la diminution de la solubilité (ErÇElebi et Ibanoglu, 2009). Zhu et Damodaran (1994) ont rapporté que la stabilité de la mousse atteignait sa valeur maximale en présence d'une faible concentration de  $\text{CaCl}_2$  (20 mM), puis diminuait à une concentration plus élevée de  $\text{CaCl}_2$ .

## 4. Caractérisation de la meringue

### 4.1. Caractérisation microbiologique

Le tableau 14 donne l'évaluation de la qualité microbiologique des meringues produites dans leur état frais.

**Tableau 14:** Qualité microbiologique des meringues produites dans leur état frais.

Catégories des meringues	Résultats de l'analyse microbiologique		
	Coliformes totaux	Coliformes fécaux	<i>Salmonella</i>
Meringue au sucre blanc	absence de colonies	absence de colonies	absence de colonies
Meringue au sucre roux	absence de colonies	absence de colonies	absence de colonies
Normes	Catégories des denrées alimentaires	Micro- organismes	Limites microbiologiques (ufc/g ou ufc/ml)
Journal officiel de la republique algerienne N° 39 du 2 juillet 2017	Préparations pour gâteaux contenant des œufs	<i>Salmonella</i>	Absence dans 25 g
	Œufs liquides pasteurisés, poudre d'œufs et d'albumen, autres œufs transformés	Coliformes totaux	10 <sup>2</sup>

Les résultats de contrôle de la qualité microbiologique des meringues fraîches (meringue au sucre blanc et meringue au sucre roux) sont conformes aux normes citées par **JORA(2017)**.



En revanche, nous avons trouvé une absence des coliformes totaux, des coliformes fécaux et de la *Salmonella* dans les différentes meringues mises en contrôle.

Ces résultats traduits que les meringues fraîches mises en contrôle ont présenté une qualité microbiologique satisfaisante et une bonne qualité hygiénique et cela est dû pratiquement aux effets positifs des conditions opératoires mises dans la production des meringues et ainsi l'impact de la nature et les doses des ingrédients mis en œuvre.

#### 4.2. Caractérisation sensorielle

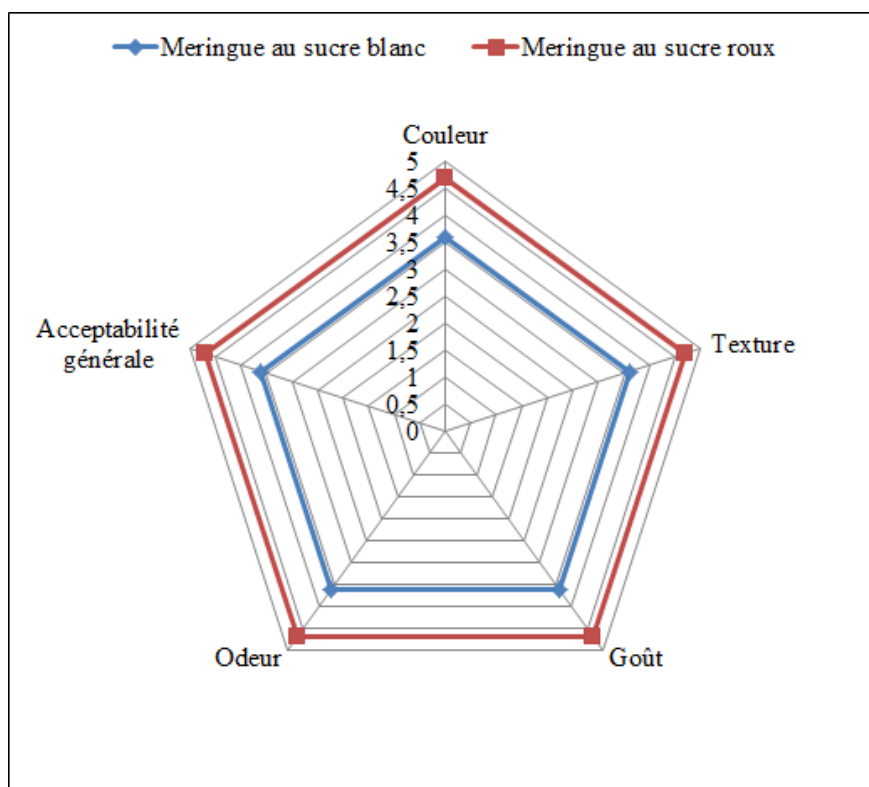
Le tableau 15 et la figure 52 résument les caractéristiques sensorielles des nouveaux produits pâtisseries (meringues) à base du mixte (lactosérum doux brut et blanc d'œuf cru), sucres de table (blanc et roux) et sel de table (NaCl).

**Tableau 15** : Caractéristiques sensorielles des nouveaux produits pâtisseries (meringues) à base du mixte (lactosérum doux brut et blanc d'œuf cru), sucres de table (blanc et roux) et sel de table (NaCl).

Classement des meringues par ordre de préférence	Aspect macroscopique	Caractères sensoriels
Meringue au sucre roux		<p>Le nouveau produit pâtisseries (meringue) au sucre roux est caractérisée par :</p> <p><b>Couleur</b> : Beige (100%).</p> <p><b>Texture</b> : Craquante (100%), lisse (100%), collante au fond (100%).</p> <p><b>Odeur</b> : Blanc d'œuf (100%).</p> <p><b>Saveur</b> : Sucré (100%).</p> <p>L'appréciation globale par les bénévoles a été de 4,7.</p>
Meringue au sucre blanc		<p>Le nouveau produit pâtisseries (meringue) au sucre blanc est caractérisée par :</p> <p><b>Couleur</b> : Blanc (100%).</p> <p><b>Texture</b> : Collante au fond (100%), granuleuse (100%), craquante (100%).</p> <p><b>Odeur</b> : Blanc d'œuf (100%).</p> <p><b>Saveur</b> : Sucré (100%).</p> <p>L'appréciation globale par les bénévoles a été de score moyen 3,6.</p>

Selon les résultats de l'analyse sensorielle des meringues fraîches ; les deux produits ont été classés par les dégustateurs selon un ordre de préférence en termes de couleur, texture, odorat, saveur et appréciation générale (figure 52).

Selon le degré préférentialité ; les meilleures meringues sont classées comme suit : la meringue au sucre roux en premier rang (avec un score moyen estimé à 4,7) et la meringue au sucre blanc en deuxième rang (avec un score moyen estimé à 3,6).



**Figure 52** : Caractéristiques sensorielles en termes d'acceptabilité générale, de couleur, de goût, de texture et d'odeur des deux nouveaux produits de la meringue.

Les résultats de l'évaluation de l'analyse sensorielle descriptive des meringues produites sont caractérisés comme suit : la meringue au sucre roux : couleur (100% beige), goût (100% sucré), texture (100% craquante , 100% lisse , 100% collante au fond ) et odeur (100% blanc d'œuf ) ,quant à la meringue au sucre blanc : couleur (100% blanc), goût (100% sucré), texture (100% craquante , 100% granuleuse , 100% collante au fond ) et odeur (100% blanc d'œuf).

Les ingrédients riches en protéines sont largement utilisés par l'industrie agroalimentaire dans les produits alimentaires formulés en raison de leur pertinence nutritionnelle et de leurs

propriétés techno-fonctionnelles utiles (**Kazmierski et Corredig, 2003**). Les ingrédients riches en protéines de lactosérum, tels que l'isolat de protéines de lactosérum, sont considérés comme des composants clés de la formulation alimentaire en raison de leur grande solubilité, de leur bonne activité interfaciale et de leur production à grande échelle (**de Castro et al., 2017 ; Kilian et al., 2020 ; Leon et al., 2018 ; Nunes et Tavares, 2019**). La  $\beta$ -lactoglobuline ( $\beta$ -LG) et l' $\alpha$ -lactalbumine ( $\alpha$ -LA) sont les principales WP, représentant respectivement environ 55 % et 20 % de la teneur totale en protéines du lactosérum (Nunes et Tavares, 2019). La  $\beta$ -LG a une masse moléculaire de 18,3 kDa et une température de dénaturation d'environ 75 °C, tandis que l' $\alpha$ -LA a une masse moléculaire de 14,2 kDa et une température de dénaturation d'environ 60 °C (forme holo) (**Croguennec et al., 2017**).

Les œufs sont composés de nombreuses protéines fonctionnelles, présentant des caractéristiques fonctionnelles remarquables, l'équilibre et la diversité des nutriments, ainsi que leur grande digestibilité et leur prix abordable, font des œufs un produit phare (**Nurliyani et al., 2023**).

Des études récentes ont montré que les aliments de sevrage à base de protéines d'œuf peuvent constituer un moyen rentable et efficace de lutter contre la malnutrition chez les enfants des pays en développement (**Naeem et al., 2022**). Cependant, les nutritionnistes suggèrent de limiter la consommation d'œufs pour réduire l'incidence des maladies cardiovasculaires. Alors que la plupart des études expérimentales, cliniques et épidémiologiques concluent à une corrélation nulle entre le cholestérol alimentaire des œufs et l'augmentation du cholestérol plasmatique total, il existe des preuves solides que les œufs contiennent également de nombreuses substances bioactives non observées, qui pourraient être très utiles pour prévenir ou guérir certaines maladies (**Réhault-Godbert et al., 2019**).

En outre, la digestibilité et la valeur biologique des protéines de lactosérum sont supérieures à celles des protéines d'œuf (**Smithers, 2008**).

Le blanc d'œuf, ou albumen, représente 60 % du poids total des œufs. Il est principalement composé d'eau et de protéines, suivis des glucides, des cendres et de traces de lipides (1 %). Il est composé d'eau (88 %) et de protéines (11 %), le reste étant constitué de glucides, de cendres et de traces de lipides (1 %). Les principales protéines du blanc d'œuf sont l'ovalbumine (54 %), l'ovotransferrine (12 %), l'ovomucoïde (11 %), le lysozyme (3,5 %) et l'ovomucine (3,5 %), étroitement liées à la viscosité de l'albumen. Les protéines mineures sont l'avidine (0,05 %), la cystatine (0,05 %), l'ovomacroglobuline (ovostatine) (0,5

%), l'ovoflavoprotéine (0,8 %), l'ovoglycoprotéine (1,0 %) et l'ovoinhibiteur (1,5 %) (**Mine et Kovacs-Nolan, 2005 ; Abeyrathne et al., 2013**).

La flaveur de l'œuf et des ovoproduits est également un critère important pour le consommateur. Un œuf frais à une flaveur douce, légère, sucrée. Les composants responsables de la flaveur de l'œuf sont nombreux. **MacLeod et Cave (1975, 1976)** ont ainsi pu identifier plus de cent composés aromatiques volatiles dans l'œuf. Parmi les plus concentrés, ils retrouvent le n-pentadécane, le 5-heptadécène, le toluène et l'indole. Quelques aldéhydes, cétones et composés soufrés sont également présents. **Sato et al. (1968)** notent aussi la présence de composés basiques comme l'ammoniac ou les méthylamines dans le blanc d'œuf frais. Une revue de **Maga (1982)** a conclu qu'on peut attribuer les saveurs caractéristiques de l'œuf à aucun composant en particulier, et que l'alimentation des poules est le premier critère influençant la flaveur des œufs crus.

Comparativement aux résultats de cette étude, **Sun et al.,(20222)** ont décrit l'effet du sucre ajouté sur l'impact de la taille des bulles de mousse, avec une diminution du nombre de grosses bulles (allant de 250 à 400  $\mu\text{m}$ ) et une augmentation du nombre de minuscules bulles (allant de 100 à 200  $\mu\text{m}$ ).

Le sucre roux, également appelé « sucre non centrifugé » (SNC), est un produit sucrier traditionnel produit sans extraction de la mélasse (**Liu et al.,2020**).

Par rapport au sucre blanc, les effets du sucre roux induits dans la formulation des aliments sont liés à sa qualité nutritionnelle et sensorielle. Selon **Liu et al.,(2020)**, 37 composés aromatiques actifs ont été identifiés dont des cétones, des pyrazines, des alcanes, des phénols, des alcools, des acides, des benzènes et un composé contenant du soufre, contribuant aux notes sucrées, caramélisées et fruitées du sucre roux. Parmi eux, le furfural, le benzèneacétaldéhyde, le 2,3-butanedione, le  $\beta$ -damascénone, le 2-méthoxyphénol, le dihydro-2-méthyl-3(2H)-furanone, le 2-furanméthanol et la butyrolactone, qui pourraient significativement améliorer le goût sucré des solutions sucrées grâce à la consistance de leur arôme et de leur sucrosité.

Le sucre roux est apprécié pour sa forte sucrosité, son arôme attrayant et sa richesse nutritionnelle. Outre le saccharose, le jus de canne à sucre est également riche en sucres réducteurs, protéines, acides aminés, minéraux, alcools gras à longue chaîne, aldéhydes gras à longue chaîne, flavonoïdes et autres substances bénéfiques (**Weerawatanakorn et al., 2016**).



Lors des traitements thermiques, tels que l'évaporation et la concentration, la caramélisation et la réaction de Maillard sont inévitables, ce qui confère au sucre roux un arôme agréable.

Les sucres, tels que le sucre roux et le sucre raffiné, sont généralement traités de manière séquentielle : lavage, extraction, purification, cristallisation, séchage et conditionnement. En raison de sa grande pureté, le sucre raffiné a une faible valeur nutritionnelle et, par conséquent, des calories vides (**Lee et al., 2018**).

En revanche, le sucre roux présente des teneurs en composés phénoliques plus élevées que le sucre raffiné. Par exemple, la teneur totale en composés phénoliques du sucre roux de canne varie de 108,1 µg à 259,6 µg d'équivalent acide gallique (EAG)/g d'échantillon (**Payet et al., 2005**). Les composés phytochimiques jouent un rôle important dans le maintien de la santé physique (**Azlan et al., 2020**).

Cependant, les composés phytochimiques du sucre roux sont faibles. Outre leur goût sucré et leur apport énergétique supplémentaire, les composés phytochimiques du sucre de canne contribuent à améliorer la santé et à réduire le risque de maladies métaboliques (**Guimarães et al., 2007 ; Payet et al., 2005**).

Le sucre roux brut contient environ 92 % du sucre total, dont 84,5 % de saccharose (**Jaffé, 2015**). Selon l'étude menée par **Azlan et al., (2020)** ; par rapport au sucre raffiné, le sucre roux est riche en fibres alimentaires ,cendres ,protéines ,matières grasses ,glucides ,minéraux (calcium,fer,potassium sodium,magnésium, manganèse et chrome ) et en vitamines groupes B(B1, B2,B3,B6 etB9).

Le sel, communément appelé « sel commun », est un composé chimique de chlorure de sodium (NaCl) ; c'est un ingrédient essentiel de l'alimentation humaine, animale et végétale, il est ajouté pour rehausser la saveur et sert de conservateur à de nombreux aliments transformés et frais afin d'inhiber la croissance des bactéries pathogènes et d'altération (**Onwuka et al., 2023**). Une plus faible proportion de carbonate de sodium est utilisée pour attendrir les aliments pendant la cuisson (**Cheraghali et al., 2010 ; Zarei et al., 2011**). Le sel de table est un additif alimentaire et un excellent vecteur de divers micronutriments (**Amorin et Ferreiri , 2005**).

La couleur et la saveur du sel peuvent être influencées par des substances autres que le chlorure de sodium (**Nguyen et al., 2023**).

Bien que le principal composant du sel soit le NaCl, certaines impuretés telles que le  $MgSO_4$  et le  $CaSO_4$  peuvent être présentes selon la provenance des matières premières ou les méthodes de préparation (**Al-Rajhi ,2014**).

La consommation régulière de sels alimentaires reconstitue les réserves de l'organisme en ions minéraux essentiels qui produisent de l'acide chlorhydrique, qui facilite la digestion. De plus, il favorise l'absorption du potassium, transporte le dioxyde de carbone dans le sang et maintient l'équilibre acido-basique de l'organisme (**Zuha et al.,2011**).

Par conséquent, la teneur en chlorure de sodium ne doit pas être inférieure à 97 %, et la teneur en iode, humidité, calcium, magnésium, matières insolubles dans l'eau, fer, cuivre et plomb ne doit pas dépasser respectivement 40 mg/kg, 1 %, 0,3 %, 0,3 %, 0,12 %, 10 mg/kg, 2 mg/kg et 2 mg/kg. Par conséquent, les différents types de sel diffèrent selon leur composition minérale (**NAFDAC ,2019**).

# **Conclusion**

---

L'augmentation de la production laitière a dynamisé le marché des produits laitiers, entraînant une hausse de la production de sous-produits, dont l'élimination représente un défi. Le lactosérum, sous-produit du fromage, augmente également chaque année, et son rejet dans les cours d'eau est responsable de la pollution des eaux et constitue donc un enjeu pour le secteur laitier. Dans ce contexte, des recherches approfondies sont menées pour valoriser ce sous-produit et créer des solutions alternatives pour éliminer la charge organique du lactosérum plutôt que de le jeter.

La présente thèse est une approche et une introduction à la valorisation du lactosérum dans le domaine alimentaire (domaine de la pâtisserie), et ce par l'évaluation des propriétés physicochimiques des lactosérums bruts (aigre et doux) et étude de leur comportement physicochimique et moussant vis-à-vis des procédés de traitement ; un dit procédé conventionnel (chauffage au bain marie) et les autres dits des procédés non conventionnels (ultrasons et thermosonication) d'une part, et optimisation et production d'un produit pâtissier ledit la meringue à base du blanc d'œuf cru, sucres (sucre blanc et sucre roux) et du sel de table d'autre part.

A l'issue de cette thèse, des résultats encourageants et satisfaisants ont été obtenus tant sur le plan physicochimique que sur le plan fonctionnel des lactosérums bruts et traités.

Sur le plan physicochimique, le comportement des lactosérums bruts traités s'est manifesté par une variabilité par rapport aux lactosérums bruts :

Le chauffage au bain marie a provoqué une légère diminution pour les valeurs de la densité et celles du pH respectivement pour le lactosérum aigre brut et traité (LSAB et LSABTC) et le lactosérum doux brut et traité (LSDB et LSDBTC) à 40 et 60 °C pendant 5 et 25 min ;

Ainsi ; le chauffage au bain marie des lactosérums bruts à 40 et 60 °C pendant 5 et 25 min a diminué leurs teneurs en lactose et en protéines, respectivement pour le lactosérum aigre brut et traité (LSAB et LSABTC) et le lactosérum doux brut et traité (LSDB et LSDBTC) ;

Or une fluctuation a été notée pour les teneurs en protéines des lactosérums bruts et traités ; le lactosérum aigre traité s'est caractérisé par une augmentation des teneurs en protéines ;

En revanche, le chauffage au bain marie des lactosérums bruts à 40 et 60 °C pendant 5 et 25 min a provoqué une augmentation relative de leurs teneurs en viscosité, acidité, conductivité électrique, cendres, indice de réfraction et °Brix ;

Les ultrasons appliqués (40kHz pendant 5 et 15 min) aux lactosérums bruts (acide et doux) ont modifié légèrement leurs caractéristiques physicochimiques moyennes à savoir la densité, le pH, les protéines, le lactose) ;

Par contre, les ultrasons appliqués (40kHz pendant 5 et 14 min) aux lactosérums bruts (acide et doux) ont provoqué une augmentation relative de leurs teneurs en viscosité, acidité, conductivité électrique, cendres, indice de réfraction et °Brix ;

Pour mes lactosérums bruts traités par thermosonication ; une augmentation a été enregistrée pour les teneurs en viscosité, acidité, conductivité électrique, cendres, indice de réfraction, °Brix et densité ;

En revanche, une diminution a été enregistrée pour les teneurs en pH, protéines, lactose et une légère stabilité pour la densité.

Même constat a été remarqué pour la fonctionnalité des protéines ; le comportement moussant des lactosérums bruts traités s'est caractérisé par une variabilité comparativement à celui enregistré dans les lactosérums bruts non traités :

Les lactosérums bruts traités par chauffage au bain marie sont manifestés par des capacités moussantes supérieures comparativement à celles trouvées dans les lactosérums bruts (acide et doux), dont les valeurs des diamètres moyens de leurs mousses sont variables comparativement à celles trouvées dans les lactosérums bruts (acide et doux) ;

Les lactosérums bruts traités par ultrasons sont manifestés par des capacités moussantes variables comparativement à celles trouvées dans les lactosérums bruts (acide et doux), dont les valeurs des diamètres moyens de leurs mousses sont supérieures comparativement à celles trouvées dans les lactosérums bruts (acide et doux) ;

Les lactosérums bruts traités par thermosonication sont manifestés par des capacités moussantes similaires comparativement à celles trouvées dans les lactosérums bruts (acide et doux), dont les valeurs des diamètres moyens de leurs mousses sont variables comparativement à celles trouvées dans les lactosérums bruts (acide et doux)

En outre, l'étude de l'optimisation et de la formulation de la meringue a indiqué que la nature et la dose des ingrédients (blanc d'œuf cru, sucre blanc, sucre roux et sel de table) ont impacté le comportement moussant des lactosérums bruts (acide doux) :

Dans un système mixte ; les lactosérums bruts (acide et doux) sont manifestés par des capacités moussantes variables comparativement à celles trouvées dans les lactosérums bruts (acide et doux), dont les valeurs des diamètres moyens de leurs mousses sont inférieures comparativement à celles trouvées dans les lactosérums bruts (acide et doux) ;

Les mixtes (LSABBOC100% +5%SB, LSABBOC100% +200%SB, LSDBBOC100% +5%SB et LSDBBOC100% +200%SB) sont manifestés par des capacités moussantes similaires et supérieures comparativement à celles trouvées dans les mixtes des lactosérums bruts (acide et doux) et du blanc d'œuf cru à 100%(LSABBOC100% et LSDBBOC100%), dont les valeurs des diamètres moyens de leurs mousses sont supérieures comparativement à celles trouvées dans les mixtes des lactosérums bruts (acide et doux) et du blanc d'œuf cru à 100%(LSABBOC100% et LSDBBOC100%) ;

Les mixtes (LSABBOC100% +5%SR, LSABBOC100% +200%SR, LSDBBOC100% +5%SR et LSDBBOC100% +200%SR) sont manifestés par des capacités moussantes variables comparativement à celles trouvées dans les mixtes des lactosérums bruts (acide et doux) et du blanc d'œuf cru à 100%(LSABBOC100% et LSDBBOC100%) ,dont les valeurs des diamètres moyens de leurs mousses sont supérieures comparativement à celles trouvées dans les mixtes des lactosérums bruts (acide et doux) et du blanc d'œuf cru à 100%(LSABBOC100% et LSDBBOC100%) ;

Les mixtes (LSABBOC100% +0,5%ST, LSABBOC100% +1%ST, LSDBBOC100% +0,5%ST et LSDBBOC100% +1%ST) sont manifestés par des capacités moussantes inférieures et similaires comparativement à celles trouvées dans les mixtes des lactosérums bruts (acide et doux) et du blanc d'œuf cru à 100%(LSABBOC100% et LSDBBOC100%) ,dont les valeurs des diamètres moyens de leurs mousses sont supérieures comparativement à celles trouvées dans les mixtes des lactosérums bruts (acide et doux) et du blanc d'œuf cru à 100%(LSABBOC100% et LSDBBOC100%) ;

Les mixtes à base des lactosérums bruts (acide et doux), du blanc d'œuf cru à 100%, du sucre blanc (5 et 200%) et du sel de table (0,5 et 1%) sont manifestés par des capacités moussantes variables comparativement à celles trouvées dans les mixtes des lactosérums

bruts (acide et doux) et du blanc d'œuf cru à 100%(LSABBOC100% et LSDBBOC100%) , dont les valeurs des diamètres moyens de leurs mousses sont supérieures comparativement à celles trouvées dans les mixtes des lactosérums bruts (acide et doux) et du blanc d'œuf cru à 100%(LSABBOC100% et LSDBBOC100%) ;

Les mixtes à base des lactosérums bruts (acide et doux), du blanc d'œuf cru à 100%, du sucre roux (5 et 200%) et du sel de table (0,5 et 1%) sont manifestés par des capacités moussantes variables et inférieures comparativement à celles trouvées dans les mixtes des lactosérums bruts (acide et doux) et du blanc d'œuf cru à 100%(LSABBOC100% et LSDBBOC100%) ,dont les valeurs des diamètres moyens de leurs mousses sont supérieures comparativement à celles trouvées dans les mixtes des lactosérums bruts (acide et doux) et du blanc d'œuf cru à 100%(LSABBOC100% et LSDBBOC100%).

Par ailleurs, les deux produits pâtisseries (meringues) sont caractérisés par une qualité microbiologique conforme à la norme et une qualité sensorielle acceptable par les consommateurs.

La thématique abordée constitue une approche et un apport dans l'élaboration d'une base de données prévue dans les mousses alimentaires à base du lactosérum. En perspective, nous suggérons une étude complémentaire concernant l'étude de la stabilité du produit fini vis-à-vis son conditionnement et sa conservation et avec une étude dite marketing management. En outre, ce travail mérite d'être reconduit et élargit sur d'autres types des lactosérums bruts traités avec application d'autres techniques de caractérisation plus approfondies à savoir : la microscopie électronique, la microscopie confocal et analyseur de mousse.

# Références Bibliographiques

---



## Références bibliographiques

**Abd El-Salam, M. H., El-Shibiny, S., & Salem, A. (2009).** Factors Affecting the Functional Properties of Whey Protein Products: A Review. *Food Reviews International*, 25(3), 251-270

**Abdullah N, LingChin N. 2014.** Application of thermosonication treatment in processing and production of high quality and safe-to-drink fruit juices. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 2:320-327.

**Abeyrathne, E. D. N. S., Lee, H. Y., & Ahn, D. U. 2013.** Egg white proteins and their potential use in food processing or as nutraceutical and pharmaceutical agents: a review. *Poultry Science*, 92(12), 3292- 3299. <http://dx.doi.org/10.3382/ps.2013-03391>. PMID:24235241

**Acem K. , Choukri A. , Bejar S., Gargouri Y. , Hadj-Taib N. , Bassem J., Moulai-Mostefa N.2017.** Effet des ultrasons sur les propriétés émulsifiantes de protéines des lactosérums bruts et modifiés, *Revue Agrobiologia* ,7(2): 610-622

**Acem, K., and Choukri, A.2012.** Study of the emulsifying properties of whey proteins in crude and modified environments, *J Appl Sci Res*, 8(7), 3293-3303.

**Acem, K., Choukri, A., Saouidet, N., Tergou, S., and Trari, H. 2018.** Demineralization effect on the Physicochemical and Interfacial Properties of Sweet Whey. *Proceedings of the Third International Symposium on Materials and Sustainable Development*, 516-526. doi:10.1007/978-3-319-89707-3\_56

**Acem, K., Fersi C., & Yahia, A.2020.** Evaluation of some physicochemical properties, foamability and foam stability of crude acid whey concentrated by ultrafiltration. *Ponte*. 76(3/1) .DOI: 10.21506/j.ponte.2020.3.3

**Acem, K., Saadi, T., and Benali, N.2019.** Influence of biological removal of lactose on the physical and chemical parameters of crude sweet whey. *ASN*, 6(2), 123 - 129. DOI: 10.2478/asn-2019-0023

**Acharjee, A.; Dabade, A.; Kahar, S.; Annapure, U.2023.** Effect of atmospheric pressure non-thermal pin to plate cold plasma on structural and functional properties of pea protein isolate. *J. Agric. Food Res*, 14, 100821.

**Adrian, J., G. Legrand, R. Franrue, 1981.** Dictionnaire de biochimie alimentaire et de nutrition. Tec et Doc Lavoisier, Paris, 233.

**Adrian. J, Potus .J, Frangne. R, 1995 .** La science alimentaire de A à Z, 2<sup>ème</sup> édition, Tec et Doc. Lavoisier. Paris.p477.

**AFNOR.1980.** Méthodes d'analyses du lait et ses produits laitiers, recueil de normalisation française, 2ème édition, pp.580.

**Akkouche, Z., Rendueles, M., and Idoui, T.2019.** Effect of selected phenolics on egg white proteins subjected to heat treatment. Journal of Food Processing and Preservation, 43(11), e14189. doi:10.1111/jfpp.14189

**Alonso, S., Rendueles, M., and Di´az, M.2011.** Efficient lactobionic acid production from whey by Pseudomonas taetrolens under pH-shift conditions.Bioresour. Technol., 102 (20), 9730- 9736.

**Al-Rajhi MA.2014.** Study of some heavy metals and trace elements. Journal of Physics International; 5(2): 128-131. <https://doi.org/10.3844/pisp.2014.128.131>

**Amorin FAC, Ferreiri SLC.2005.** Determination of cadmium and lead in table salt by sequential multielement flame atomic absorption spectrometry. Talanta; 64(4): 960-964. <https://doi.prg/10.1016/j.talanta.2004.08.027>

**Anand, S., Chenchaiyah, M., and SomNath, K. 2013.** Whey and whey products. In: Park, Y.W., Haenlein, G.F.W. (Eds.), Milk and Dairy Products in Human Nutrition: Production, Composition and Health. John Wiley & Sons, Oxford, pp. 477-492.

**Anandharamakrishnan, C., Rielly, C. D., & Stapley, A. G. F. (2008).** Loss of solubility of  $\alpha$ - lactalbumin and  $\beta$ -lactoglobulin during the spray drying of whey proteins. *LWT-Food Science and Technology*, 41(2), 270-277.

**Ananthanarayan et Paniker’s ;** Textbook of microbiology,17.8.1913-6.2.1998.

**Anaya-Esparza LM, Velázquez-Estrada RM, Roig AX, García-Galindo HS, Sayago-Ayerdi, SG, Montalvo-González E. 2017.**Thermosonication: An alternative processing for

fruit and vegetable juices. *Trends Food Sci Tech.* 61:26-37.  
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.11.020>

**Argenta, A.B., and Scheer, A.D.P.2019.** Membrane separation processes applied to whey: A review. *Food Rev. Int.*, 36, 1-30.

**Arredondo-Parada I, Torres-Arreola W, Suárez-Jiménez GM, Juan C, Juárez-Onofre RE, Rodríguez-Félix F, et al.2020.** Effect of ultrasound on physicochemical and foaming properties of a protein concentrate from giant squid (*Dosidicus gigas*) mantle. *LWT.* 121:108954. doi: 10.1016/j.lwt.2019.108954

**Atalar I, Gul O, Saricaoglu FT, Besir A, Gul LB, Yazici F.2019.** Influence of thermosonication (TS) process on the quality parameters of high pressure homogenized hazelnut milk from hazelnut oil by-products. *J Food Sci Technol.* 56(3):1405-15.

**Aymard, D., Nicolai, T., Durand, D., & Clark, A. (1999).** Static and dynamic scattering of  $\beta$ -lactoglobulin aggregates formed after heatinduced denaturation at pH 2. *Macromolecules*, 32, 2542-2552.

**Aymard, P., Gimel, J.C., Nicolai, T., & Durand, D. (1996).** Experimental evidence for a two-step process in the aggregation of  $\beta$ -lactoglobulin at pH 7. *Journal de Chimie Physique*, 93, p.987–997.

**Azlan A, Khoo HE, Sajak AAB, et al.2020.** Antioxidant activity, nutritional and physicochemical characteristics, and toxicity of minimally refined brown sugar and other sugars. *Food Sci Nutr* ; 8:5048-5062. [https:// doi.org/10.1002/fsn3.1803](https://doi.org/10.1002/fsn3.1803)

**Bals A., Kulozik U.2003.** Effect of pre-heating on the foaming properties of whey protein isolate using a membrane foaming apparatus, *International Dairy Journal* ,13 903-908.

**Bardy S., Bentz M., Bussière T., Chatras J., Fontaine L., Gaugler M., Lechat L., Lengronne O. (2016, mai).** (En ligne). Valorisation du lactosérum. Disponible sur : [http://ensaia.univ-lorraine.fr/telechargements/rapport\\_final\\_lactoserum2.pdf](http://ensaia.univ-lorraine.fr/telechargements/rapport_final_lactoserum2.pdf).

**Bauer, R., Carrota, R., Rischel, C., & Øgendal, L. (2000).** Characterization and isolation on intermediate in  $\beta$ -lactoglobulin heat aggregation at high pH. *Biophysical Journal*, 79, 1030-1038.

**Benoit, S.M., Nor Afizah, M., Ruttarattanamongkol, K., and Rizvi, S.S.H.2013.**Effect of pH and temperature on the viscosity of texturized and commercial whey protein dispersions. *International Journal of Food Properties*, 16(2), 322-330, DOI: 10.1080/10942912.2011.552015

**Bensmail, S. , Boudjema, K., Naimi-Fazouane, F., Bensmail, S.,Djouahra-Fahem, D., Ferhoum, F., and Bourfis, N .2023.** Factors affecting acid protease production by *Mucor circinelloides* MG603064.1 through SmF process:characterization and fromage frais making. *BioTechnologia*, 104 (4) ,333-349. <https://doi.org/10.5114/bta.2023.132770>

**Bergel, D., Feron,A, Mollicia.(2004).** Créso–Université De CAEN ESO -UMR 6590 CNRS n° 21

**Bermudez-Aguirre D, Corradini MG, Mawson R, Barbosa-Ca´novas GV.2009.** Composition properties, physicochemical characteristics and shelf life of whole milk after thermal and thermosonication treatments. *J Food Qual* 32(3):283-302

**Berry TK, Yang X, Foegeding EA. 2009.** Foams prepared from whey protein isolate and egg white protein: 2. Changes associated with angel food cake functionality. *J Food Sci* 74(5):E269-77.

**Bintsis, T., and Papademas, P. 2023.** Sustainable Approaches in Whey Cheese Production: A Review. *Dairy*, 4(2), 249-270. <https://doi.org/10.3390/dairy4020018>

**Boey, J.Y., Mohamad, L., Khok, Y.S., Tay, G.S., Baidurah, S. 2021.** A Review of the Applications and Biodegradation of Polyhydroxyalkanoates and Poly (lactic acid) and Its Composites. *Polymers*, 13(10), 1544. <https://doi.org/10.3390/polym13101544>

**Borcherding K, Lorenzen PC.HR, Hoffmann W. 2009.** Effect of protein content, casein-whey protein ratio and pH value on the foaming properties of skimmed milk. *International Journal of Dairy Technology* 62(2):161-9.

**Borcherding K., Chr Lorenzen P., Hoffmann W., Schrader K.2008.** Effect of foaming temperature and varying time/temperature-conditions of pre-heating on the foaming properties of skimmed milk, *International Dairy Journal* ,18 349-358

**Bosco F., Carletto R.A., and Marmo L., 2018.** An integrated cheese whey valorization process. *Chemical Engineering Transactions*, 64, 379-384 DOI: 10.3303/CET1864064

**Bouaouina, H., Desrumaux, A., Loisel, C., & Legrand, J. (2006).** Functional properties of whey proteins as affected by dynamic high-pressure treatment. *International Dairy Journal*, 16, p.275–284.

**Boudier ,J.F. et Luquet F.M. 1989.** Utilisation des lactosérums en Alimentation Humaine et Animale. N° 21, LABCODRA, FNSIA, Douai. 1-113.

**Boudier, J.F., F. Luquet, 1980.** Utilisation de lactosérum en alimentation humaine et animale. Série synthèse bibliographique, 21, APRIA, Paris, 96.

**Božanić, R., Barukčić, I., Lisak Jakopović, K., Tratnik, L. 2014.** Possibilities of Whey Utilisation. *Austin Journal of Nutrition and Food Science*, 2(7), 7.

**Brandelli, A., Daroit, D.J., and Correˆa A.P.F. 2015.** Whey as a source of peptides with remarkable biological activities. *Food Res, Int.*, 73, 149-161.

**Brownlow S, Cabral J.H.M. , Cooper R, Flower D.R., Yewdall S.J., Polikarpov I, et al.,1997.** Bovine  $\beta$ -lactoglobulin at 1.8 Å resolution — still an enigmatic lipocalin, *Structure* 5 (4) 481-495, [https://doi.org/10.1016/S0969-2126\(97\)00205-0](https://doi.org/10.1016/S0969-2126(97)00205-0).

**Brunner,J.R.1977.** milk proteins in food proteins. Whitaker,J.R and Tannenbaum .S.R.,AVI PUBL.,WEST PORT CT,175.

**Buchanan, D., Martindale, W., Romeih, E., Hebishy, E. 2023.** Review: Recent advances in whey processing and valorisation: Technological and environmental perspectives. *International Journal of Dairy Technology*, 76(2), 291-312. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12935>

**Camacho, M.M., Martinez-Navarrete, N., and Chiralt, A.1998.** Influence of locust bean gum/gamma-carrageenan mixture of whipping and mechanical properties and stability of dairy creams. *Food Res. Int.*, 31,653-58

**Campbell G, Mougeot E. 1999.** Creation and characterisation of aerated food products. *Trends in Food & Technology* 10:283-96.

**Carp DJ, Baeza RI, Bartholomai GB, Pilosof AMR. 2004.** Impact of proteins-κcarrageenan interactions on foam properties. *LWT-Food Science and Technology* 37(5):573-80.

**Carp, D.J., Bartholomai, G.B., Relkin, G.B., and Pilosof, A.M.R. 2001.** Effect of denaturation on soy protein-xanthan interactions: comparison of a whipping-rheological and bubbling method. *Colloids Surf B*, 21,163-71

**Carrier V, Colin A. 2003.** Coalescence in draining foam. *Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids* 19(11):4.

**Carrier, V. and A. Colin.2003** Coalescence in draining foams. *Langmuir*,. 19: p. 4535-4538.

**Carvalho, F., Prazeres, A.R., and Rivas, J. 2013.** Cheese whey wastewater: characterization. *Sci. Total. Environ.*, 445-446, 385y-396.

**Cases, E., Rampini, C., & Cayot, P. (2005).** Interfacial properties of acidified skim milk. *Journal of Colloid and Interface Science*, 282(1), 133-141.

**Cayot, P. 1998.** Structures et technofonctions des protéines du lait. In : *Arilait Recherches*, Technique and documentation.

**Cayot, P., & Lorient, D.1998.** Structures et technofonctions des protéines du lait. Lavoisier Technique et Documentation, Paris, France.

**Chandrapala, J.; Zisu, B.; Palmer, M.; Kentish, S.; Ashokkumar, M.2011.** Effects of ultrasound on the thermal and structural characteristics of proteins in reconstituted whey protein concentrate. *Ultrason. Sonochem*, 18, 951-957

**Chaplin, L. C., & Lyster, R. L. J. (1986).** Irreversible heat denaturation of bovine α-lactalbumin. *Journal of Dairy Research*, 53, 249-58.

**Chaput. G.1981.** Problèmes techniques et économiques posés par le stockage, le séchage du lacosérum. *Revue laitière Fr.n°952*.pp/25-28.

**Cheftel J. C., Et Cheftel H., 1977.** Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments. Ed. Lavoisier, Vol 2, Paris,p400.

**Cheftel, J.C., & Lorient, D. 1982.** Les propriétés fonctionnelles des protéines laitières et leur amélioration. *Le Lait*, 62, p.435-483.

**Chen, G. Q., Leong, T. S. H., Kentish, S. E., Ashokkumar, M., & Martin, G. J. O.2019.** Membrane Separations in the Dairy Industry. Separation of Functional Molecules in Food by Membrane Technology, 267-304. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815056-6.00008-5>

**Cheraghali AM, Kobarfard F, Faeizy N.2010.** Heavy metals contamination of table salt consumed in Iran. *Iranian Journal of Pharmaceutical Research*; 9(2): 129-132.

**Cheung, D.L.2017.** Adsorption and conformations of lysozyme and  $\alpha$ -lactalbumin at a water/octane interface. *J Chem Phys.*, 147(19),195101. <https://doi.org/10.1063/1.4994561>

**Christensen, A.D., Kádár, Z., Oleskowicz-Popiel, P., Thomsen, M.H. 2011.** Production of bioethanol from organic whey using *Kluyveromyces marxianus*. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 38(2), 283–289. <https://doi.org/10.1007/s10295-010-0771-0>

**Chuekittisak, R. 2016.** Physico-chemical properties, wax composition, aroma profiles, and antioxidant activity of granulated non-centrifugal sugars from sugarcane cultivars of Thailand. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 53(11), 4084-4092.

**Clark DC, Wilde PJ, Marion D. 1994.** The protection of beer foam against lipid-induced destabilization. *J Inst Brewing* 100(1):23-6.

**Clark, A.H., Kavanagh,G.M., and Murray,S.B.2001.** Globular protein gelation -theory and experiment. *Food hydrocolloids*. 15: p. 383-400.

**Clark, A.H.1998.** Functional properties of food macromolecules. Vol. 1., Gaithersbourg, Maryland: Aspen publishers, Inc. 77-142.

**Considine, T., Noisuwan, A., Hemar, Y., Wilkinson, B., Bronlund, J., Kasapis, S., 2011.** Rheological investigations of the interactions between starch and milk proteins in model dairy systems: A review. *Food Hydrocolloids* 25(8), 2008-2017.

**Cotterill, O.J., Chang, C.C., McBee, L.E., and Haymann, H. 1992.** Metallic cations affect functional performance of spray-dried heat-treated egg white. *J. Food Sci.*, 57(6):1321.

**Creamer L.K., Bienvenue, Nilsson H., Paulsson M., van Wanroij M., Lowe E.K., et al., 2004.** Heat-induced redistribution of disulfide bonds in milk proteins. 1. Bovine  $\beta$ -lactoglobulin, *J. Agric. Food Chem.* 52 (25) (2004) 7660-7668, <https://doi.org/10.1021/jf049388y>.

**Creamer, L.K., Parry, D.A.D., & Malcom, G.N. 1983.** Secondary structure of bovine  $\beta$ -lactoglobulin B. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 227, p.98-105.

**Croguennec T, Tavares GM and Bouhallab S. 2017.** Heteroprotein complex coacervation: A generic process. *Advances in Colloid and Interface Science* 239: 115-126.

**Croguennec T., Jeantet R., Brule G., 2008 .** Fondements physicochimiques de la technologie laitière, Tec et Doc Lavoisier, 161.

**Dalglish, D., Senaratne, V., & Francois, S. (1997).** Interactions between  $\alpha$ -lactoalbumin and  $\beta$ -lactoglobulin in the early stages of heat denaturation. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 45, 3459-3464.

**Damodaran S, Paraf A. 1997.** Protein-stabilized Foams and Emulsions. In: Damodaran S and Paraf A, editors. *Food proteins and their applications*. New York: CRC Press. p 57-105.

**Damodaran S. 2005.** Protein stabilization of emulsions and foams. *Journal of Food Science* 70:R54-64.

**Damodaran, S. (1994).** Structure-function relationship of food proteins. In N. S. Hettiarachy, & G. R. Ziegler (Eds.), *Protein functionality in food systems*. New York: Marcel Dekker

**Damodaran, S. (1997).** Protein stabilized foams and emulsions. In S. Damodaran & A. Paraf (Eds.), *Food proteins and their applications* (pp. 77-94). New York: Marcel Dekker Inc.

**Damodaran, S. (2005).** Protein stabilization of emulsions and foams. *Journal of Food Science*, 70, R54-R66.

**Damodaran, S. 1989.** Influence of protein conformation on its adaptability under chaotropic conditions. *International Journal of Biological Macromolecules*, 11, p.2-8.

**Damodaran, S., & Paraf, A. (1997).** *Food proteins and their applications*. New York, NY, USA: Marcel Dekker



**Damodaran, S., and Paraf, A. 1997.** Protein-stabilized foams and emulsions. In: Damodaran S. and Paraf A., editors. Food proteins and their applications. New York: CRC Press. pp. 57- 105.

**Damodaran, S., Parkin, K. L., and Fennema, O. R.2008.** Fennema's food chemistry (pp. 277- 281, 836-842). Boca Raton, FL: CRC Press.

**Damodaran, S.2005.** Protein stabilization of emulsions and foams. J Food Sci., 70(3):R54-R66.<https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.tb07150.x>

**Dattatreya, A., Etzel, M. R., & Rankin, S. A. 2007.** Kinetics of browning during accelerated storage of sweet whey powder and prediction of its shelf life. International dairy journal, 17(2), 177-182

**Daufin, G., René, F., and Aimar, P. 1998.** Les separations par membrane dans les procédés de l'industrialimentaire. Collection Sciences et Techniques Agroalimentaires, Paris, France.

**Davis JP, Foegeding EA, Hansen FK. 2004.** Electrostatic effects on the yield stress of whey protein isolate foams. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces 34(1):13-23.

**Davis JP, Foegeding EA. 2004.** Foaming and interfacial properties of polymerized whey protein isolate. Journal of Food Science 69: C404-10.

**Davis JP, Foegeding EA. 2007.** Comparisons of the foaming and interfacial properties of whey protein isolate and egg white proteins. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces 54(2):200-10.

**Davis, J.P., Foegeding, E.A., and Hansen, F.K.2004.** Electrostatic effects on the yield stress of whey protein isolate foams. Colloids Surf B Biointerfaces., 34(1) ,13-23. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2003.10.014>

**de Castro RJS, Domingues MAF, Ohara A, Okuro PK, dos Santos JG, BrexS RP, et al. 2017.** Whey protein as a key component in food systems: Physicochemical properties, production technologies and applications. Food Structure 14: 17-29.

**De Jongh, H. H. J., Kusters, H. A., Kudryashova, E., Meinders, M. B. J., Trofimova, D., & Wierengaofimova, P. A. (2004).** Protein adsorption at air-water interfaces: A combination of details. Biopolymers, 74,131-135.

**De La Fuente, M.A., Hemar, Y., Tamehana, M., Munro, P.A., Singh, H. 2002.** Process-induced changes in whey proteins during the manufacture of whey protein concentrates. *International Dairy Journal*, 12(4), 361-369. [https://doi.org/10.1016/S0958-6946\(02\)00031-6](https://doi.org/10.1016/S0958-6946(02)00031-6)

**De la Fuente, M.A., Singh, H., & Hemar, Y. 2002.** Recent advances in the characterization of heat-induced aggregates and intermediates of whey proteins. *Trends in Food Science & Technology*, 13, p.262-274.

**De Wit, J. N. 2009.** Thermal behaviour of bovine  $\beta$ -lactoglobulin at temperatures up to 150°C. a review. *Trends in Food Science & Technology*, 20(1), 27-34.

**De Wit, J.N., & Hontelez-Backx, E. 1981.** Les propriétés fonctionnelles des protéines du lactosérum: conséquences des traitements thermiques. *Technique Laitière*, 952, p.19-22.

**De Wit, J.N. 1981.** Structure and functional behavior of whey proteins netherlands milk and dairy journal, 35, 47-64.

**De Wit, J.N. 1989.** the use of whey proteins products, in developments in dairy chemistry, Fox, P.F. Ed. Elsevier applied science, New York, Vol 4, pp 323.

**Debry, G. 2001.** Lait, nutrition et santé, Tec et Doc, Paris : 21 (566 pages).

**Delahaije R.J.B.M., Gruppen H., van Eijk-van Boxtel E.L., Cornacchia L., Wierenga P.A., 2016.** Controlling the ratio between native-like, non-native-like, and aggregated  $\beta$ -Lactoglobulin after heat treatment, *J. Agric. Food Chem.* 64 (21) 4362-4370, <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b00816>.

**Dickinson E. 2003.** Hydrocolloids at interfaces and the influence on the properties of dispersed systems. *Food Hydrocolloids* 17:25-39.

**Dickinson, E. (2003).** Interfacial, emulsifying and foaming properties of milk proteins. In 3rd ed. P. F. Fox, & P. L. H. McSweeney (Eds.), *Advanced dairy chemistry*, vol. 1: Proteins, pp. 1229-1260). New York, NY, USA: Kluwer Academic/Plenum Publishers.

**Dickinson, E. 1992.** An introduction to food colloids. Oxford science publications, Oxford University Press, Oxford. Traduit par Courthadon J.L. et Le Meste M. 1996. *Les colloïdes alimentaires*. Masson, Paris.

**Dickinson, E.1992.** Food colloïds – An overview. *Colloïds and Surfaces*, 42, p.191-204.

**Dickinson, E.2010.**Food emulsions and foams: stabilization by particles. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*,Volume 15, 1-2, 40-49.

**Ding L, Xia M, Zeng Q, Zhao Q, Cai Z, Zhu Z.2022.** Foaming properties and aggregation mechanism of egg white protein with different physical treatments. *LWT*. 153:112505. doi: 10.1016/j.lwt.2021.112505

**Dissanayake, M., & Vasiljevic, T. 2009.** Functional properties of whey proteins affected by heat treatment and hydrodynamic high-pressure shearing. *J Dairy Sci*, 92(4), 1387-1397.

**Djelveh, G., and Gros, J.B. 1995.** Estimation of physical properties of foamed foods using energy dissipation in scraped-surface heat exchangers. *J. Food Eng.*, 26,45-56.

**Djelveh, G., Bacati,O., and Gros, J.B.1994.** Mechanical aspects of gas dispersion in continuous foaming food processes using scraped surface heat exchangers. *J. Food Eng.*, 23,213-23.

**Doi, H., Tokuyama, T., Fong-Huang, K. U. O., Ibuki, F., & Kanamori, M. (1983).** Heat-induced complex formation between  $\kappa$ -casein and  $\alpha$ -lactalbumin. *Agricultural and Biological Chemistry*, 47(12), 2817-2824.

**Dombrowski, J., Johler, F., Warncke, M., and Kulozik, U.2016.**Correlation between bulk characteristics of aggregated  $\beta$ -lactoglobulin and its surface and foaming properties. *Food Hydrocoll.*, 61,318-328. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.05.027>

**Domingos, J.M.B., Martinez, G.A., Scoma, A., Fraraccio, S., Kerckhof, F.M., Boon, N., and al. 2017.** Effect of operational parameters in the continuous anaerobic fermentation of cheese whey on titers, yields, productivities and microbial community structure. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 5(2), 1400-1407.

**Du, H.; Zhang, J.; Wang, S.; Manyande, A.; Wang, J.2022.** Effect of high-intensity ultrasonic treatment on the physicochemical, structural, rheological, behavioral, and foaming properties of pumpkin (*Cucurbita moschata* Duch.)-seed protein isolates. *LWT* , 155, 112952.

**Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.A., and Smith, F. 1956.** Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*,28,350-356.<http://dx.doi.org/10.1021/ac60111a017>

**Dupont, M. (1965).** A study of reversibility in the thermodenaturation of bovine  $\beta$ -lactoglobulin A. *Biochimica et Biophysica Acta*, 102, 500-513.

**Durand, M., and D. Langevin.2002.** Physicochemical approach to the theory of foam drainage. *The European Physical Journal E: Soft Matter and Biological Physics*,7: p. 35-44

**Dutta A, Chengara A, Nikolov AD, Wasan DT, Chen K, Champbell B. 2004.** Destabilization of aerated food products: effects of Oswald ripening and gas diffusion *Journal of Food Engineering* 62: 177-184.

**Ehlayel, M., Bener, A., Abu Hazeima, K., and Al-Mesaifri, F. 2011.** Camel milk is a safer choice than goat milk for feeding children with cow milk allergy. *ISRN Allergy*, 2011, 1-5.

**Eigel ,W.N .,Butter,J.E.,Ernstron,C.A.,Forrel,H.M.,;Harwalkar,V.R ;Jenness,R ;and Whitney ,R. Mel.1984.;**Nomenclature of proteins of cow's milk :Fifth revision,*J.Dairy sci-* 67,pp1599.

**Ellis, A.L., and Lazidis, A. 2018.** Foams for food applications. In: Gutiérrez, T. (eds) *Polymers for Food Applications* . Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-94625-2\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-94625-2_11)Eng. 5, pp. 1400-1407.

**Engelhardt K, Lexis M, Gochev G, Konnerth C, Miller R, Willenbacher N, Peukert W, Braunschweig B. 2013.** pH effects on the molecular structure of beta-lactoglobulin modified air-water interfaces and its impact on foam rheology. *Langmuir* 29(37):11646-55.

**ErÇElebi EA, Ibanoglu E. 2009.** Effects of ionic strength on the foaming properties of whey protein isolate and egg white in the presence of polysaccharides. *Journal of Food Processing and Preservation* 33(4):513-26.

**Erdem, Y. K. (2006).** Modification of casein micelle structure caused by ultrafiltration and heat treatment: A spectrofluorimetric and kinetic approach. *Journal of Food Engineering*, 74, 536-541.

**Eugenialucena, M., Alvarez, S., Menendez, Carlos, F., Riera, A., Alvarez, R. 2006.** B-Lactoglobuline removal from whey protein concentrates production of milk derivatives as a base of infant formulas ;separation and purification technology 52, pp310-316

**Exerova D, Kryglyakov P. 1998.** Foam drainage. In: Exerova DR. Kryglyakov PM. editors. Foam and foam films: teory, experiment, application. New York: Elsevier. p 381-446.

**Foegeding E.A., Luck P.J., Davis J.P., 2006.** Factors determining the physical properties of protein foams, Food Hydrocoll. 20 (2) 284-292, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2005.03.014>.

**Foegeding, E. A., Davis, J. P., Doucet, D., & McGuffey, M. K. 2002.** Advances in modifying and understanding whey protein functionality. Trends in Food Science & Technology, 13(5), 151-159. FranceAgriMer d'après douanes via Trade Data Monitor

**Fu X, Belwal T, Cravotto G, Luo Z. 2020.** Sono-physical and sono-chemical effects of ultrasound: Primary applications in extraction and freezing operations and influence on food components. Ultrason Sonochem. 60:104726. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104726>

**Galani, D., & Owusu Apentm, R.K. 1996.** The effect of heat on whey proteins. Food Science and Technology Today. 10, p.163-168.

**Ganju, S., and Gogate, P.R. 2017.** A review on approaches for efficient recovery of whey proteins from dairy industry effluents. J. Food Eng., 215,84-96.

**Gaucheron, F. 2003.** Minéraux et produits laitiers. Editions Tec & Doc Lavoisier, Paris.

**Ghanimah M.A., and Ibrahim E.M. 2018.** Effect of pH, Carbohydrates, and NaCl on Functional Properties of Whey Proteins. J. Sus. Agric. Sci, 44 (2), 93 – 99.

**Gharbi, N.; Labbafi, M. 2019.** Influence of treatment-induced modification of egg white proteins on foaming properties. *Food Hydrocoll* , 90, 72-81.

**Glaser, L.A., Paulson, A.T., Speers, R.A., Yada, R.Y., and Rousseau, D. 2007.** Foaming behavior of mixed bovine serum albumin–protamine systems. Food Hydrocoll, 21(4):495-506. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2006.05.008>

**Goulding, D. A., Fox, P. F., & O'Mahony, J. A. 2020.** Milk proteins : An overview. *Milk Proteins*, 21-98. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815251-5.00002-5>.

**Grinberg, V. Y., Burova, T. V., Grinberg, N. V., & Mashkevick, A. Y. (1993).** On the effect of the denaturation degree of food proteins on their functional properties. In K. D. Schwenke, & R. Mothes (Eds.), *Food proteins, structure and functionality* (pp. 40-47). Weinheim: VCH-Verlag.

**Grossmann L., Beicht M., Reichert C., Weiss J.,2019.** Foaming properties of heat-aggregated microparticles from whey proteins, *Colloids and Surfaces A* 579 (2019) 123572

**Guimarães, C. M., Gião, M. S., Martinez, S. S., Pintado, A. I., Pintado, M. E., Bento, L. S., & Malcata, F. X. 2007.** Antioxidant activity of sugar molasses, including protective effect against DNA oxidative damage. *Journal of Food Science*, 72, C039-C043. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2006.00231.x>

**Guimaraes, P. M., Teixeira, J. A., & Domingues, L. 2010.** Fermentation of lactose to bioethanol by yeasts as part of integrated solutions for the valorisation of cheese whey. *Biotechnol Adv*, 28(3), 375-384.

**Gumpen S., Hegg P.O. et Martens M.1979.** Thermal stabilization of fatty acidserum Albumin complexes studied by differential scanning calorimetry, *biochim. □ Biophys. Acta*, 574, 189

**Guo, M. 2019.** *Whey Protein Production, Chemistry, Functionality, and Applications* (1re éd.). Wiley.

**Guo, M., and Wang, G.2019.** History of whey production and whey protein manufacturing. In *Whey Protein Production, Chemistry,Functionality, and Applications*; Guo, M., Ed.; JohnWiley & Sons: Hoboken, NJ, USA,pp. 1-12.

**Hagolle N, Relkin P, Popineau Y, Bertrand D. 2000.** Study of the stability of egg white protein-based foams: effect of heating protein solution. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 80(8):1245-52

**Hailing PJ, Walstra P. 1981.** Protein-stabilized foams and emulsions. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition* 15(2):155-203.

**Hanselmann, W., and Windhab E. 1999.** Flow characteristics and modelling of foam generation in a continuous rotor/stator mixer. *J. Food Eng*, 38,393-405.

**Halling, P. J. (1981).** Protein-stabilized foams and emulsions. *CRC- Critical Review in Food Science and Nutrition*, 155, 155-203.

**Hao, Y., Wang, F., Huang, W., Tang, X., Zou, Q., Li, Z., and Ogawa ,A. 2016.** Sucrose substitution by polyols in sponge cake and their effects on the foaming and thermal properties of egg protein. *Food Hydrocolloids*, 57, 153- 159.<https://doi.org/10.12911/22998993/169505>

**Haque, M.A.; Haque, M.M.; Sarker, M.S.H.; Adhikari, B.2019.** Measurement of Heat and Pressure Induced Denaturation of Whey Protein Isolate Using Reversed-Phase HPLC and FTIR-Spectroscopy. *Trends Pept. Protein Sci*, 4, e11.

**Harmbling S.G., Mcalpine A., Sawyer L.,1992.**B-lactoglobulin.In: *Advanced Dairy Chemistry - 1*. P.F. Fox (Ed), Elsevier Applied Science, London and New York, chap. 4, pp. 141-179.[https:// www .topsante .com / nutrition et recettes / bien - choisir-ses aliments /nutrition –tout-savoir –sur –la-présure –des –fromages -73065](https://www.topsante.com/nutrition-et-recettes/bien-choisir-ses-aliments/nutrition-tout-savoir-sur-la-présure-des-fromages-73065)

**Hart, E.J., Henglien, A., 1985.** Free radical and free atom reactions in the sonolysis of aqueous iodide and formate solutions. *J. Phys. Chem.* 89, 4342-4347.

**Hatakeyama, S., Akiyama, M., Yoneyama, R., Watanabe, K., Koizumi, R., Miyaji, K., Mizota, Y., Ikeda, M., Wakao, S.2018.** Effects of manufacturing conditions on the foaming properties of milk and sensory characteristics of foamed milk, *LWT - Food Science and Technology*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.082>.

**Havea, P., Singh, H., & Creamer, L. (2001).** Characterization of heatinduced aggregates of  $\beta$  lactoglobulin,  $\alpha$  lactoalbumin and bovine serum albumin in a whey protein concentrate environment. *Journal of Dairy Research*, 68, 483-97.

**Herceg Z, Režek A, Lelas V, Krešić G, Franetović M. 2007.** Effect of carbohydrates on the emulsifying, foaming and freezing properties of whey protein suspensions. *Journal of Food Engineering* 79(1):279-86.

**Higuera-Barraza O.A., Del Toro-Sanchez C.L., Ruiz-Cruz S. and Márquez-Ríos, E. 2016.** Effects of high-energy ultrasound on the functional properties of proteins. *Ultrason. Sonochem.* 31:558-562.

**Hill, E.K., Krebs, B., Goodall, D.G., Howlett, G.J., & Dunstan, D.E. 2006.** Shear flow induces amyloid formation by  $\beta$ -lactoglobulin. *Biomacromolecules*, 7, p.10-13.

**Holsinger, V. H. 1988.** Lactose. In *Fundamentals of dairy chemistry* (pp. 279-342). Springer, Boston.

**Hu, B, Nienow, A.V., and Pacek, A.W. 2003.** The effect of sodium caseinate concentration and processing conditions on bubble sizes and their break-up and coalescence in turbulent batch air/aqueous dispersions at atmospheric and elevated pressures. *Colloids and Surfaces. B: Biointerfaces*, 31, 3-11

**Jaffé, W. R. (2015).** Nutritional and functional components of non-centrifugal cane sugar: A compilation of the data from the analytical literature. *Journal of Food Composition and Analysis*, 43, 194-202.

**Jahromi, M.; Niakousari, M.; Golmakani, M.; Ajalloueiian, F.; Khalesi, M. 2020.** Effect of dielectric barrier discharge atmospheric cold plasma treatment on structural, thermal and techno-functional characteristics of sodium caseinate. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 66, 102542.

**Jambrak A. R. , Mason T .J., Lelas V., Herceg Z., Herceg I L. 2008.** Effect of ultrasound treatment on solubility and foaming properties of whey protein suspensions, *Journal of Food Engineering* ,86 , 281-287.

**Jeandet, P.** Effervescence et mousse du champagne. Le Vigneron champenois ISSN 0049-

**Jeante R, Croguennec T, Mahaut M, Schuck P, Et Brule G., 2008.** les produits laitiers ,2e édition tec et doc-Lavoisier, paris ,p185.

**Jelen, P., & Rattray, W. (1995).** Thermal denaturation of whey proteins. In P. F. Fox (Ed.), *Heat-induced changes in milk* (2nd ed, pp. 66-80). Brussels, Belgium: International Dairy Federation.



**Jimenez-Junca CA, Gumy JC, Sher A, Niranjana K. 2011.** Rheology of milk foams produced by steam injection. *Journal of Food Science* 76(9):E569-75.

**Kadam, B., Ambadkar, R., Rathod, K., Landge, S. 2018.** Health Benefits of Whey: A Brief Review. *International Journal of Livestock Research*, 8(5), 31-49. <https://doi.org/10.5455/ijlr.20170411022323>

**Kadri,A.1985.** Le lactose hydrolysé alésienne ou serpent de mer.revue laitière FR,n°437 ,pp :43-48.

**Kaur R., Panwar, D., and Panesar P.S.2020.** Chapter 13 - Biotechnological approach for valorization of whey for value-added products in Food Industry Wastes (Second Edition),Assessment and Recuperation of Commodities.pp.275-302. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817121-9.00013-9>

**Kavimughil, M., Dutta, S.,Moses, J.A., and Anandharamakrishnan, C.2023.** Sonication of egg and its effect on foaming behavior. *Sustainable Food Technol*, 1, 511-527.

**Kazmierski, M., & Corredig, M. (2003).** Characterization of soluble aggregates from whey protein isolate. *Food Hydrocolloids*, 17(5), 685-692.

**Kella, N. K., & Kinsella, J. E. (1988).** Enhanced thermodynamic stability of  $\beta$ -lactoglobulin at low pH-a possible mechanism. *Biochemical Journal*, 255, 113-118.

**Khan SA, Dar AH, Bhat SA, Fayaz J, Makroo HA, Dwivedi M.2022.** High intensity ultrasound processing in liquid foods. *Food Rev Int.*38:1123-48. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1768404>

**Kilara, A., and Vaghela, M.N.2004.**Whey proteins. In: Yada RY (ed) *Proteins in food processing*. Woodhead, Cambridge, pp. 72-100.

**Kilian J, Aparecida Fernandes I, Luize Lupatini Menegotto A, Steffens C, Abirached C, Steffens J, et al. 2020.** Interfacial and emulsifying properties of whey protein concentrate by ultrafiltration. *Food Science and Technology International* 26(8): 657-665.

**Kim, D.A., Cornec, M., & Narsimhan, G. 2005.** Effect of thermal treatment on interfacial properties of  $\beta$ -lactoglobulin. *Journal of Colloid and Interface Science*, 285, p.100-109.

**Kinsella, J. E., and Whitehead, D. M. 1989.** Proteins in whey: chemical, physical, and functional properties. *Advances in Food and Nutrition Research*, 33, 343-438. [https://doi.org/10.1016/S1043-4526\(08\)60130-8](https://doi.org/10.1016/S1043-4526(08)60130-8)

**Kitabatake, N., Wada, R., & Fujita, Y. (2001).** Reversible conformational change in  $\beta$ -lactoglobulin A modified with N-ethylmaleimide and resistance to molecular aggregation on heating. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 49, 4011-4018.

**Kosseva, M. R., Panesar, P. S., Kaur, G., & Kennedy, J. F. 2009.** Use of immobilised biocatalysts in the processing of cheese whey. *International Journal of Biological Macromolecules*, 45(5), 437-447.

**Kosseva, M.R., and Kent, C.A. 2013.** Thermophilic aerobic bioprocessing technologies for food industry wastes and wastewater. In: Kosseva, M.R.,Webb, C. (Eds.), *Food Industry Wastes*. Academic Press, pp. 171-189.

**Kulmyrzaev, A., Bryant, C., and McClements, D.2000.**Influence of sucrose on the thermal denaturation, gelation, and emulsion stabilization of whey proteins. *J. Agric. Food Chem*, 48,1593-1597.

**Kumar S, Pipliya S, Srivastav PP.2023.** Effect of cold plasma processing on physicochemical and nutritional quality attributes of kiwifruit juice. *J Food Sci*. 88(4):1533-52. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16494>

**Lagerge, S.2002.** Les mousses : moussage et démoussage. Vol. 9., Paris.

**Lajnaf, R., Picart-Palmade, L., Cases, E., Attia, H., Marchesseau, S., Ayadi, M.A.,2017.** The foaming properties of camel and bovine whey: the impact of pH and heat treatment, *Food Chemistry* (2017), doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.064>

**Lan XY, Wang JQ, Bu DP, Shen JS, Zheng N, Sun P. 2010.** Effects of heating temperatures and addition of reconstituted milk on the heat indicators in milk. *J Food Sci* 75(8):653-658

**Langevin, D.2000.** Influence of interfacial rheology on foam and emulsion properties. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2000. 88 p. 209-222

**Laplanche ,J., Ducognon,V.,Trevisan, D.2006.**Traitement du lactosérum par filtration sur compost ensemencé de vers, épuration of lactosérum in a copost filter with worms, syndicat des apagistes,fruits communs et vendeur direct de Savoie,Maison de l’agriculture -73/90 SAUT BALDOPH.

**Lazidis, A., Hancocks, R.D., Spyropoulos, F., Kreuss, M., Berrocal, R., and Norton, I.T. 2016.**Whey protein fluid gels for the stabilisation of foams. *Food Hydrocoll*, 53 , 209-217.<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.02.022>

**Le Bon, C., Nicolai, T., & Durand, D. (1999).** Growth and structures of aggregates of heat-denatured  $\beta$ -lactoglobulin. *International Journal of Food Science and Technology*, 34, 451-466.

**Lech, F.J., Delahaije, R.J.B.M., Meinders, M.B.J., Gruppen, H., & Wierenga, P.A.2016.** Identification of critical concentrations determining foam ability and stability of  $\beta$ -lactoglobulin. *Food Hydrocoll*, 57,46-54. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.01.005>

**Lechevalier, V., Croguennec, T., Pezenec, S., Guérin-Dubiard, C., Pasco, M., and Nau, F. 2003.** Ovalbumin, ovotransferrin, lysozyme: three model proteins for structural modifications at the air-water interface. *J Agric Food Chem*,51(21):6354-6361. <https://doi.org/10.1021/jf034184n>

**Lee, J. S., Ramalingam, S., Jo, I. G., Kwon, Y. S., Bahuguna, A., Oh, Y. S., Kim, M. 2018.** Comparative study of the physicochemical, nutritional, and antioxidant properties of some commercial refined and non-centrifugal sugars. *Food Research International*, 109, 614–625. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.04.047>

**Lee, S.Y., Morr, C. V., & Ha, E. Y. W. (1992).** Structural and functional properties of caseinate and whey protein isolate as affected by temperature and pH. *Journal of Food Science*, 57(5), 1210-1213.

**Lekjing, S., Keawpeng, I., Venkatachalam, K., and Karrila, S.2022.**Impact of different sugar types and their concentrations on salted duck egg white based meringues. *Foods*, 11, 1248. <https://doi.org/10.3390/foods11091248>

**Leon AM, Medina WT, Park DJ and Aguilera JM. 2018.** Properties of microparticles from a whey protein isolate/ alginate emulsion gel. *Food Science and Technology International* 24(5): 414-423.

**Li, R., Chen, X., Chang, Y., Zhang, L., Zhang, Y., Zhu, Y., and Wang, T.2017.**Increase of bubble size playing a critical role in foam-induced protein aggregation: aggregation of BSA in foam fractionation.*Chem Eng Sci*, 174,387-395.  
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2017.09.036>

**Licciardello, F., Frisullo, P., Laverse, J., Muratore, G., and Del Nobile, M. A. 2012.** Effect of sugar, citric acid and egg white type on the microstructural and mechanical properties of meringues. *Journal of Food Engineering*, 108(3), 453-462. doi:10.1016/j.jfoodeng.2011.08.021

**Lin,V.J. C., and Koenig, J.,Raman,L., 1976.** Studies of bovine serum albumin, biopolymers,p:15,203.

**Linden G., Lorient D, 1994.** Biochimie agro-industrielle : valorisation alimentaire de la production agricole. Masson, Paris, p367

**Liu, J., Wan, P., Xie, C., Chen, D-W., 2020.**Key aroma-active compounds in brown sugar and their influence on sweetness, *Food Chemistry*, doi:  
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128826>

**Livney, Y. D., Verespej, E. & Dalglish, D. G. (2003).** Steric effects governing disulfide bond interchange during thermal aggregation in solutions of  $\beta$ -Lactoglobulin B and  $\alpha$ -Lactalbumin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51, 8098-8106

**Lomakina, K., and Mikova, K., 2006.** A study of the factors affecting the foaming properties of egg white - a review. *Czech Journal of Food Science*, 24(3), 110-118.  
<https://doi.org/10.17221/3305-CJFS>

**Lorenzen, P. Chr. (2000).** Verfahren zur modifizierung von Milcheiweiß. *Kieler Milchwirtschaftliche Forschungsberichte*, 52, 47-59.

**Lorient D., Luquet J., Cheftel J. C., 1985 .** Protéines alimentaires. Tech et Doc Lavoisier. Paris. 309.

**Lowry, O.H., Rosebrough, N.J., Farr, A.L., and Randall, R.J. 1951.** Protein measurement with folin phenol reagent. *Journal of Biological Chemistry*, 193, 256-275.

**Luquet ,J.,et Francois,M.1990.** lait et les produits laitiers, vache, brebis, chèvre. TomeII.techniques et documentation –Lavoisier,621p.

**Mac Leod AJ, Cave SJ. 1975.** Volatile flavour components of eggs. *J Sci Food Agric*, 26 : 351-360.

**Mac Leod AJ, Cave SJ. 1976.** Variation in volatile flavour components of eggs. *J Sci Food Agric*, 27 : 799-806.

**Madureira, A.R., Pereira, C.I., Gomes, A.M.P., Pintado, M.E., and Malcata, F.X.2007.** Bovine whey proteins-overview on their main biological properties. *Food Res. Int*, 40, 1197-1211.

**Maga AJ. 1982.** Egg and egg product flavor. *J Agric Food Chem*, 30 : 9-14.

**Makino, K., Mossoba, M.M., Riesz, P., 1983.** Chemical effects of ultrasound an aqueous solutions. Formation of hydroxyl radicals and hydrogen atoms. *J. Phys. Chem.* 87, 1369.

**Manderson G.A., Hardman M.J., Creamer L.K.,1999.** Effect of heat treatment on bovine  $\beta$ - lactoglobulin a, B, and C explored using thiol availability and fluorescence, *J. Agric. Food Chem.* 47 (9) 3617-3627, <https://doi.org/10.1021/jf990591g>.

**Manzoor MF, Siddique R, Hussain A, Ahmad N, Rehman A, Siddeeg A, et al.2021.** Thermosonication effect on bioactive compounds, enzymes activity, particle size, microbial load, and sensory properties of almond (*Prunus dulcis*) milk. *Ultrason Sonochem.*78:105705. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105705>

**Marinova, K. G., Basheva, E. S., Nenova, B., Temelska, M., Mirarefi, A. Y., Campbell, B., & Ivanov, I. B. (2009).** Physico-chemical factors controlling the foamability and foam stability of milk proteins : Sodium caseinate and whey protein concentrates. *Food Hydrocolloids*, 23(7), 1864-1876.

**Martin, A.H., Grolle, K., Bos, M.A., Stuart, M.A.C., and Van Vliet, T.2002.** Network forming properties of various proteins adsorbed at the air/water interface in relation to foam stability. *J Colloid Interface Sci*, 254(1),175-183. <https://doi.org/10.1006/jcis.2002.8592>

**Martínez, K.D., Ganesan, V., Pílosof, A.M., and Harte, F.M.2011.** Effect of dynamic highpressure treatment on the interfacial and foaming properties of soy protein isolatehydroxypropylmethylcelluloses systems. *Food Hydrocolloids*, 25(6), 1640-1645 .

**Martinez, M.J., Farías, M. E., & Pílosof, A. M, R. 2011.** Casein glycomacropeptide pH-driven self-assembly and gelation upon heating. *Food Hydrocolloids*, 25(5), 860-867

**Martinez, M.J., Farías, M. E., & Pílosof, A., M, R. 2010.** The dynamics of heat gelation of casein glycomacropeptide –  $\beta$ -lactoglobulin mixtures as affected by interactions in the aqueous phase.*International Dairy Journal*, 20(9), 580-588.

**Mathieu J., 1998 .**Initiation à la physicochimie du lait, Tec et Doc, Lavoisier, Paris.

**Mawson, A.J., 1994.** Bioconversions for whey utilization and waste abatement. *Bioresource Technology* 47 (3), 195-203.

**McClements, D.J. 1999.** Food emulsions principles, practice and techniques. New York,NY (USA), *CRC Press*, p. 9.McClements, 2005, 2008 measurements and applications. 1995

**Meng Y, Liang Z, Zhang C, Hao S, Han H, Du P, et al.2021.** Ultrasonic modification of whey protein isolate: implications for the structural and functional properties. *LWT*. 152:112272. doi: 10.1016/j.lwt.2021.112272

**Mereo ,M.1971.**les utilisations industrielles du sérum de fromagerie.ind,agro-alim,pp :817-823.

**Merina, U., Bernsteina, S., Bloch-Damtib, A., Yagilb, R., Van Creveldb, C., Lindnera, P., and al. 2001.** A comparative study of milk serum proteins in camel (*Camelus dromedarius*) and bovine colostrum. *Livest. Prod. Sci.*, 67, 297-301.

**Mine, Y., & Kovacs-Nolan, J. 2005.** Biologically active peptides derived from egg proteins. In *European Symposium on the Quality of Eggs and Egg Products*. Netherlands: World's Poultry Science Association.

**Miquelim JN, Lannes S, Mezzenga R. 2010.** pH Influence on the stability of foams with protein–polysaccharide complexes at their interfaces. *Food Hydrocolloids* 24(4):398-405.

**Mohanan, A.; Tang, Y.R.; Nickerson, M.T.; Ghosh, S.2020.** Oleogelation using pulse protein-stabilized foams and their potential as a baking ingredient. *RSC Adv*, 10, 14892-14905.

**Mohanty, D.P., Mohapatra, S., Misra, S., and Sahu, P.S. 2016.** Milk derived bioactive peptides and their impact on human health \_ a review. *Saudi J. Biol. Sci.*, 23, 577-583.

**Mollea, C., Marmo, L., and Bosco, F. 2013.** Valorisation of cheese whey, a by-product from the dairy industry. In: *Food industry*. Intech Open, London. DOI: 10.5772/53159

**Monahan, F.J., German, J.B., and Kinsella, J.E.1995.** Effect of pH and temperature on protein unfolding and thiol/disulfide interchange reactions during heat-induced gelation of whey proteins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* , 43, 46-52.

**Monnier, L., Schlienger, J.L. 2018.** *Whey Processing, Functionality and Health Benefits*. Elsevier Health Sciences, USA.

**Morales R, Martínez KD, Ruiz-Henestrosa VMP, Pilosof AMR.2015.** Modification of foaming properties of soy protein isolate by high ultrasound intensity: particle size effect. *Ultrason Sonochem.* 26:48-55. doi: 10.1016/j.ultsonch.2015.01.011

**Moro A., Báez G.D., Busti P.A., Ballerini G.A., Delorenzi N.J.,2011.** Effects of heat-treated  $\beta$ -lactoglobulin and its aggregates on foaming properties, *Food Hydrocoll.* 25 (5) 1009-1015, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2010.09.021>.

**Morr,C.V., & Ha, E. Y. 1993.** Whey protein concentrates and isolates: processing and functional properties. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 33(6), 431-476.

**Mott CL, Hettiarachchy NS, Qi M. 1999.** Effect of xanthan gum on enhancing the foaming properties of whey protein isolate. *JAOCS* 76(11):1383-6.

**Mulcahy EM. 2017.** Preparation, characterisation and functional applications of whey protein-carbohydrate conjugates as food ingredients. PhD Thesis, University College Cork, Ireland. <https://hdl.handle.net/10468/4007>

**Muller-Fischer,N., and Windhab, E.J. 2005.** Influence of process parameters on microstructure of food foam whipped in a rotor-stator device within a wide static pressure range. *Colloids Surf. A.*, 263,353-62

**Mulvihill, D.M., & Donavan, M. 1987.** Whey proteins and their thermal denaturation. A review. *Irish Journal of Food Science and Technology*. 11, p.43–75. Nasrabadi et al., 2021; *Ustunol*, 2014

**Murray B. 2007.** Stabilization of bubbles and foams. *Current Opinion in Colloid & Interface Science* 12:232-41.

**Murray, B.S., and Ettelaie, R.2004.** Foam stability: proteins and nanoparticles. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, Volume 9, 5, 314-320.

**Murray, B.S.2002.** Interfacial rheology of food emulsifiers and proteins. *Curr Opin Colloid Current Opinion in Colloid & Interface Science*, Volume 7,5–6, 426-431.

**Naeem, M., Un-Nisa, M., Ahmad, N., Imran, M., Anwar, H., & Manzoor, M. F. 2022.** Preparation of weaning foods by replacing plant proteins with egg protein. *Food Science and Technology (Campinas)*, 42, 1-9. <http://dx.doi.org/10.1590/fst.44920>

**Nastaj, M.,Solowiej, B.G.,Terpilowski, K., and Mleko, S.2020.** Effect of erythritol on physicochemical properties of reformulated high protein meringues obtained from whey protein isolate. *International Dairy Journal*, 105, 104672.

**National Agency for Food and Drug Administration and Control (NAFDAC).2019.** Food grade (table or cooking) salt regulations. Nigeria.

**Nguyen HLan, Nguyen TNH, Pham HT, Doan NTT, Lai QD, Nguyen HD. 2023.** Salt origin and their saltiness: A timeintensity sensory characterization. *Vietnam Journal of Science and Technology*; 61(1): 36-46.

**Nielson, M.A., Coulter, S.T., Morr, C.V., & Rosenau J.R. 1973.** Four factor response surface experimental design for evaluating the role of processing variables upon protein denaturation in heated whey systems. *Journal of Dairy Science*, 56, p.76–83.

**Nunes L .,Tavares GM. 2019.** Thermal treatments and emerging technologies: Impacts on the structure and techno-functional properties of milk proteins. *Trends in Food Science & Technology* 90: 88-99.



**Nurliyani., Erwanto y , RumiyaI , Sukarno AS .2023.** Characteristics of protein and amino acid in various poultry egg white ovomucoid, *Food Sci. Technol*, Campinas, 43, e101722, 2023

**Onwuka JC. , Usman A., Ambo AI. , Estella JE, Ayomide LH .2023.** Quality assessment of refined table salts and locally processed unrefined salts consumed in Nasarawa State (north-central Nigeria), *Journal of Human, Health and Halal Metrics*; 4(2): 58-69  
<https://doi.org/10.30502/jhhhm.2023.421069.1078>

**Otter, D. 2003.** Milk: physical and chemical properties. In: Trugo, L., Finglas, P.M. (Eds.), *Encyclopedia of Food Science and Nutrition*. Academic Press, Elsevier, USA, pp. 3957- 3963.

**Özer, C., and Ağan, C.2020.** The influence of aging egg on foaming properties of different meringue types. *Journal of Culinary Science & Technology*,1-10,DOI: 10.1080/15428052.2020.1790073

**Panesar, P.S., and Kennedy, J.F. 2012.** Biotechnological approaches for the value addition of whey. *Crit. Rev. Biotechnol*, 32 (4), 327-348.

**Payet, B., Sing, A. S. C., & Smadja, J.2005.** Assessment of antioxidant activity of cane brown sugars by ABTS and DPPH radical scavenging assays: Determination of their polyphenolic and volatile constituents. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53, 10074-10079.

**Pernell, C.W., Foegeding, E.A., Luck, P.J., and Davis, J.P.2002.** Properties of whey and egg white protein foams. *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*, 204(1-3),9- 21.  
[https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(01\)01061-5](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(01)01061-5)

**Petrier, C., Jeunet, A., Luche, J.L., Reverdy, G., 1992.** Unexpected frequency effects on the rate of oxidative processes induced by ultrasound. *J. Am. Chem. Soc.* 114, 3148.

**Phillips L, Schulman W, Kinsella JE. 1990.** pH and heat treatment effects on foaming of whey protein isolate. *J Food Sci* 55:1116-9.

**Phillips L, Yang S, Kinsella J. 2006.** Neutral salt effects on stability of whey protein isolate foams. *J Food Sci* 56(2):588-9.

**Phillips L, Yang S, Schulman W, Kinsella J. 2008.** Effects of lysozyme, clupeine, and sucrose on the foaming properties of whey protein isolate and  $\beta$ -lactoglobulin. *J Food Sci* 54(3):743-7.

**Phillips LG, Schulman W, Kinsella JE. 1990.** pH and heat treatment effects on foaming of whey protein isolate. *Journal of Food Science* 55:1116-9.

**Phillips, L. G., & Kinsella, J. E. (1990).** Structure function relationships in food proteins, film and foaming behaviour. In J. E. Kinsella, & W. G. Soucie (Eds.), *Food proteins*. Phoenix: American Oil Chemist's Society.

**Phillips, L. G., Whitehead, D. M., & Kinsella, J. E. (1994).** Structure function properties of food proteins. San Diego: Academic Press

**Phillips, L.G., Haque, Z., and Kinsella, J.E. 1987.** A Method for the Measurement of Foam Formation and Stability. *J. Food Sci*, 52(4),1074-7.

**Photchanachai, S., & Kitabatake, N. (2001).** Heating of b-lactoglobulin A solution in a closed system at high temperature. *Journal of Food Science*, 66, 647-652.

**Pires, A.F., Marnotes, N.G.,Rubio, O.D., Garcia, A.C., and Pereira,C.D.2021.**Dairy By-Products: A review on the valorization of whey and second cheese whey. *Foods*,10, 1067. <https://doi.org/10.3390/foods10051067>

**Pouliot Y., Landry J., Giasson J., 1990 .** Induction de la précipitation phosphocalcique dans le perméat de lactosérum de fromagerie, *le lait*, 71 : 313-320

**Prud'homme RK, Khan SA. 1995.** Structure, drainage, and coalescence of foams and concentrated emulsions. In: Prud'homme RK. Khan SA. editors. *Foams: Theory, Measurements, and Applications*. New York: Marcel Dekker. p 99-188.

**Qi, X.L., C. Holt, D. McNulty, D.T. Clarke, S. Brownlow, G.R. Jones, Effect of temperature on the secondary structure of  $\beta$ -lactoglobuline at pH 6,7 , as determined by CD and IR Spectroscopy : a test of the molten globule hypothesis. *Biochemistry Journal*, 1997. 324: p.341-346.**

**R.K., and S.A. Khan, Foams in personal care products, in *Foams : Theory,***

**Ragab E S., Lu J., Pang X Y., Nassar K S., Yang B Y., Zhang S W., Lv J P.2019.** Effect of thermosonication process on physicochemical properties and microbial load of goat's milk, *J Food Sci Technol* , 56(12):5309-5316

**Raikos, V., Campbell, L., and Euston, S.R.2007.** Effects of sucrose and sodium chloride on foaming properties of egg white proteins. *Food Res Intern*, 40(3), 347-355.

**Rani M., Sood M.,Bandraj J D., Bhat A., and Gupta I.2020.** Thermosonication technology and its application in food industry, *International Journal of Chemical Studies*; 8(3): 922-928

**Rattray, W., and Jelen, P.1995.** Viscous behavior of whey protein concentrate dispersions. *International Dairy Journal* , 5, 673-684.

**Réhault-Godbert, S., Guyot, N., & Nys, Y. 2019.** The golden egg: nutritional value, bioactivities, and emerging benefits for human health. *Nutrients*, 11(3), 1-26. <http://dx.doi.org/10.3390/nu11030684>. PMID:30909449.

**Relkin, P. 1996.** Thermal unfolding of  $\beta$ -Lactoglobulin,  $\beta$ -Lactalbumin, and bovine serum albumine. A thermodynamic approach. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 36,p.565–601.

**Remon, J., Garcí'a, L., and Arauzo, J. 2016.** Cheese whey management by catalytic steam reforming and aqueousphase reforming. *Fuel Process.Technol*,154, 66-81.

**Renard, D., & Lefebvre, J. 1992.** Gelation of globular proteins: Effect of pH and ionic strength on the critical concentration for gel formation a simple model and its application to  $\beta$ lactoglobulin heat-induced gelation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 14,p.287-291.

**Renard, D., Lavenant, L., Sanchez, C., Hemar, Y., & Horne, D. 2002.** Heat-induced flocculation of microparticulated whey proteins (MWP); consequences for mixed gels made of MWP and  $\beta$ -lactoglobulin. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 24, p.73–85.

**Renard, D., Lefebvre, J., Griffin, M.C.A., & Griffin, W.G. 1998.** Effects of pH and salt environment on the association of  $\beta$ -lactoglobulin revealed by intrinsic fluorescence studies.*International Journal of Biological Macromolecules*, 22, p.41–49.

**Rene M.2002.**Gestion des problèmes environnementaux dans les IAA.*Paris : Tech et Doc 2002 ;xx-600p.*

**Rocha-Mendoza, D., Kosmerl, E., Krentz, A., Zhang, L., Badiger, S., Miyagusuku-Cruzado, G., Mayta- Apaza, A., Giusti, M., Jiménez-Flores, R., and García- Cano, I. 2021.** Invited review: Acid whey trends and health benefits. *Journal of Dairy Science*, 104(2), 1262-1275. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19038>

**Rojas ML, Kubo MT, Miano AC, Augusto PE.2022.** Ultrasound processing to enhance the functionality of plant-based beverages and proteins. *Curr Opin in Food Sci.* 48:100939.<https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100939>

**Rosa, M.E., M.A,Fortes., and M.F, Vaz.2002.** Deformation of three-dimensional monodisperse liquid foams. *The European Physical Journal E: Soft Matter and Biological Physics.*, 7 (2): p. 129-140.

**Roustel, S. 2000.** Ca gaze pour les mousses !, *revues ENILBIO*, 229, p.7–11.

**Rullier B., Novalés B., Axelos M.A.V.,2008.** Effect of protein aggregates on foaming properties of  $\beta$ -lactoglobulin, *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 330 (2) 96-102, <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2008.07.040>.

**Rullier.B.2009** ,role des agrégats de protéines dans la formation et la stabilisation des mousses.

**Ryan, M.P., and Walsh, G.2016.**The biotechnological potential of whey. *Rev. Environ. Sci. Bio Technol*,15, 479-498.

**Sadahira, M. S., Rodrigues, M. I., Akhtar, M., Murray, B. S., and Netto, F. M.2018.** Influence of pH on foaming and rheological properties of aerated high sugar system with egg white protein and hydroxypropyl methylcellulose. *LWT-Food Science and Technology*, 89, 350- 357.

**Saleh, H.E.-D.M. 2012.** Polyester. InTech, Croatia

**Sanchez, C., & Paquin, P. 1997.** En *Food Proteins and their applications in foods.* Damodaran, S., Paraf, A., Eds., Marcel Dekker: New York, p. 503–528.

**Saneei, M.; Goli, S.A.H.; Shekarchizadeh, H.; Rahimmalek, M.; Szumny, A.2024.** Effect of Physical Treatments on Functional Properties of Whey and Soy Protein Isolates in Oleogel Production Through Foam Template Method. *Molecules*, 29, 5415.<https://doi.org/10.3390/molecules29225415>

**Sarangapany AK, Murugesan A, Annamalai AS, Balasubramanian A, Shanmugam A.2022.** An overview on ultrasonically treated plant-based milk and its properties – A Review. *Appl Food Res.* 2(2):100130. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100130>

**Sari, B.W., Hayuningtyas, A., Jitphongsaikul, P., Chherti, V., and Hamad, A.2022.** Effects of emulsifier type and ingredient on the foam stability of meringue. *RiCE: Research in Chemical Engineering*,1(2), 64 - 69.

**Sarkar, S., Gupta, S., Shaw, A.K. 2023.** Emerging Technology and Management Trends in Environment and Sustainability: Proceedings of the International Conference, EMTES-2022. Taylor & Francis, Abingdon.

**Sato Y, Watanabe K, Tanaka Y. 1968.** Chemical studies on smelling compounds in hen's egg. Part 1. Volatile carbonyl and basic compounds in egg white. *Agric Biol Chem*, 32 : 405-411.

**Saulnier F., Ferrero F., Bottero J.Y ., Linden G., 1995 .** Variations de composition et nature de la fraction insoluble des lactosérums industriels. *Le lait*; 75 : 93-100.

**Sava N., Van der Plancken I., Claeys W., Hendrickx M.,2005.** The kinetics of heat-induced structural changes of  $\beta$ -lactoglobulin, *J. Dairy Sci.* 88 (5) 1646-1653, [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)72836-8](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)72836-8).

**Sawyer W.H., Norton R.S., Nichol L.W., McKenzie G.H.,1971.** Thermodenaturation of bovine  $\beta$ -lactoglobulin: kinetics and the introduction of  $\beta$ -structure, *Biochim. Biophys. Acta (BBA) - Protein Struct.* 243 (1) 19-30, [https://doi.org/10.1016/0005-2795\(71\)90032-8](https://doi.org/10.1016/0005-2795(71)90032-8).

**Schmitt C., Bovay C.,Rouvet M.,Shojaei-Rami S., & Kolodziejczyk E.2007.** Whey protein soluble aggregates from heating with NaCl: physicochemical, interfacial, and foaming properties, *Langmuir*, 23, 4155-4166.

**Schokker, E., Singh, H., Pinder, D., & Creamer, L. (2000).** Heat-induced aggregation of  $\beta$  lactoglobulin A and B with  $\alpha$  lactoalbumin. *International Dairy Journal*, 10, 843-853.

**Schorsch, C. (2005).** Formulaion des mousses laitières.

**Seiquer I, Delgado-Andrade C, Haro A, Navarro MP. (2010).** Assessing the effects of severe heat treatment of milk on calcium bioavailability: in vitro and in vivo studies. *J Dairy Sci* 93(12):5635-5643

**Shokri S. , Javanmardi F., , Mohammadi M., Khaneghah AM., (2022).** Effects of ultrasound on the techno-functional properties of milk proteins: A systematic review , *Ultrasonics Sonochemistry*, 83, 105938

**Silva FVM. (2015).** Thermosonication versus thermal processing of skim milk and beef slurry: modeling the inactivation kinetics of psychrotrophic *Bacillus cereus* spores. *Food Res Int* 67:67-74

**Silventoinen, P.; Sozer, N. (2020).** Impact of ultrasound treatment and pH-shifting on physicochemical properties of protein-enriched barley fraction and barley protein isolate. *Foods*, 9, 1055.

**Siso, M.G. (1996).** The biotechnological utilization of cheese whey: A review. *Bioresour. Technol*, 57, 1-11.

**Smithers, G. W. (2008).** Whey and Whey proteins-From 'gutter-to-gold'. *Int. Dairy J*, 18(7), 695–704. DOI: [10.1016/j.idairyj.2008.03.008](https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2008.03.008).

**Smithers, G.W. (2008).** Whey and whey proteins—From 'gutter-to-gold'. *International Dairy Journal* 18 (7), 695-704

**Smithers, G.W., John Ballard, F., Copeland, A.D., de Silva, K.J., Dionysius, D.A., Francis, G.L., Goddard, C., Grieve, P.A., McIntosh, G.H., Mitchell, I.R., Pearce, R.J., Regester, G.O., (1996).** New Opportunities from the Isolation and Utilization of Whey Proteins. *Journal of Dairy Science* 79 (8), 1454-1459.

**Sotelo-Lara D M. , Amador-Espejo G G. , Álvarez-Araiza D F. , Cordero-Rivera A K , Millán-Quintero K G , Campos-Vega R and Velázquez-Estrada R M. (2024).** Ultrasound

and thermosonication as promising technologies for processing plant-based beverages: a review, *Food Technol. Biotechnol.* 62 (4) 538-552 .

**Sotelo-Lara DM, Amador-Espejo GG, Zamora-Gasga VM, Gutiérrez-Martínez P, Velázquez-Estrada RM. 2023.**Effect of thermosonication on bioactive compounds, enzymatic and microbiological inactivation in nectar with strawberry by-products. *J Food Sci Technol.*60(5):1580-9.<https://doi.org/10.1007/s13197-023-05700-8>

**Sottiez P.1990** ;Produit derives des fabrications fromagères, lait et produits laitiers, tome2.Ed ;Lavoisier ,Paris,pp 357-392.

**Soumati, B., Atmani,M., Benabderrahmane, A., and Benjelloun, M.2023.** Whey valorization - innovative strategies for sustainable development and value-added product creation. *Journal of Ecological Engineering*, 24(10), 86-104.<https://doi.org/10.12911/22998993/169505>

**Sun J., Chang C., Su Y.,Gu L., Yang Y., Li J.,2022.** Impact of saccharides on the foam properties of egg white: correlation between rheological, interfacial properties and foam properties, *Food Hydrocolloids*, 122 , 107088, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107088>

**Swaigood, H.E. 1982.** Chemistry of milk proteins. En *Developments in dairy chemistry - I.Proteins*. Editeur: Fox, P.F., London, Applied Science Publishers, p.1-59.

**Tamm F, Sauer G, Scampicchio M, Drusch S. 2012.** Pendant drop tensiometry for the evaluation of the foaming properties of milk-derived proteins. *Food Hydrocoll* 27(2):371-7.

**Tardat Henry M ., Beaudry J .P., 1992 .** Chimie des eaux édition le GRIFFON d'arigide, sainte foy (québec), canada, 537.

**Thakur, R.K., Vial, C., & Djelveh, G. 2003.** Influence of operating conditions and impeller design on the continuous manufacturing of food foams. *Journal of Food Engineering*, 60, p.9-20.

**Thakur, R.K., Vial, C., Nigam, K.D., Nauman, E.B., & Djelveh, G. 2003.** Static mixers in the process industries. A review. *Institution of Chemical Engineers (IChemE)*, 81, p.787-826.

**Thakur, R.K., Vial, C.H., and Djelveh, G.2003.** Influence of operating conditions and impeller design on the continuous manufacturing of food foams. *J. Food Eng*, 60,9-20

**Tosi E., Canna L., Lucero H., Re E. 2007.** Foaming properties of sweet whey solutions as modified by thermal treatment, *Food Chemistry* 100 (2007) 794-799.

**Tunick, M. H. 2008.** Whey protein production and utilization: a brief history. Whey processing, functionality and health benefits, 1-13

**Tunick, M.H.; Thomas-Gahring, A.; Van Hekken, D.L.; Iandola, S.K.; Singh, M.; Qi, P.X.; Ukuku, D.O.; Mukhopadhyay, S.; Onwulata, C.I.; Tomasula, P.M. 2016.** Physical and chemical changes in whey protein concentrate stored at elevated temperature and humidity. *J. Dairy Sci*, 99, 2372-2383.

**Turgeon, S. 1991.** Amélioration des propriétés interfaciales et émulsifiantes d'un concentré protéique de lactosérum par traitement thermique et/ou enzymatique. Thèse de doctorat des sciences, Université de Laval, Quebec.

**Van der Plancken, I.; Van Loey, A.; Hendrickx, M.E. 2007.** Foaming properties of egg white proteins affected by heat or high pressure treatment. *J. Food Eng*, 78, 1410-1426.

**Varadaraj, R., Bock, J., Brons, N., and Zushma, S. 1994.** Influence of surfactant structure on wettability modification of hydrophobic granular surfaces, *J. Colloid Interface Sci*, 167(1), 207-210.

**Vega, C., and Sanghvi, A. 2012.** Cooking literacy: Meringues as culinary scaffoldings. *Food Biophysics*, 7(2), 103-113. doi:10.1007/s11483-011-9247-7

**Verheul M., Roefs S.P.F.M., de Kruif K.G., 1998.** Kinetics of heat-induced aggregation of  $\beta$ -lactoglobulin, *J. Agric. Food Chem.* 46 (3) 896-903, <https://doi.org/10.1021/jf970751t>.

**Vermeer, A. W. P., & Norde, W. 2000.** The Thermal Stability of Immunoglobulin: Unfolding and Aggregation of a Multi-Domain Protein. *Biophysical Journal*, 78, 394-404.

**Vignola, CL. 2002.** Science et technologie du lait; transformation du lait, école polytechnique de montréal, 571p.

**Villamiel M, de Jong P. 2000.** Influence of high-intensity thermosonication and heat treatment in continuous flow on fat, proteins, and native enzymes of milk. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*. 48:472-78



**Violleau ,V.1999.** valorization du lactosérum par électrodialyse. Thèse de doctorat.Montpellier .

**Visser, R.A., Nan Den Bos, M.J., FergusonW.P.1988.** Lactose and its chemical derivatives, bullets of I.D.F, N°233, PP: 33-44.

**Vrignaud ,Y.1983.,**valorization du lactosérum , une longue histoire.revue laitière française n°422,41-46.

**Walstra P. 2003.** Formation of emulsions and foams. In: Walstra P. editor. Physical Chemistry of Foods. New York: Marcel Dekker. p 355-90.

**Walstra, P. 2003a.**Physical chemistry of foods. CRC, Boca Raton, FL.

**Walstra, P., & Jenness, R. (1984).** Dairy chemistry and physics. New York: Wiley.

**Walstra, P.2003b.**Studying food colloids: past, present and future. In: Dickinson E, Van Vliet T (eds) Food colloids, biopolymers and materials. Royal Society of Chemistry, Cambridge, pp. 391-400. <http://ebook.rsc.org/?DOI=10.1039/9781847550835-00391>

**Wang X, Dong L, Ma C, Wang Z, Hu X, Chen F.2023.** Impact of high-hydrostatic pressure and thermal processing on the antioxidant profiles and capacity of tomato juice during storage. Food Innov Adv.2(2):124-34. <https://doi.org/10.48130/FIA-2023-0016>

**Wang Z, Zhao H, Tao H, Yu B, Cui B and Wang Y .2023.** Ultrasound improves the physicochemical and foam properties of whey protein microgel. *Front. Nutr.* 10:1140737. doi: 10.3389/fnut.2023.1140737

**Wang Z., Zhang S., Vardhanabhuti B.,2015.** Foaming Properties of Whey Protein Isolate and  $\lambda$ -Carrageenan Mixed Systems, Journal of Food Science ,Vol. 80, Nr. 8.

**Weaire,D.,S,Hutzler.1999.**the physics of foams, ed C.press,Oxford.

**Weerawatanakorn, M., Asikin, Y., Takahashi, M., Tamaki, H., Wada, K., Ho, C. T., &**

**Wilde P. 2000.** Interfaces: their role in foam and emulsion behavior. *Curr Opin Colloid Interface Sci* 5(3):176-81.

**Wilde P. 2000.** Interfaces: their role in foam and emulsion behavior. *Current Opinion in Colloid & Interface Science* 5(3):176-81.

**Wilderjans, E., Luyts, A., Brijs, K., and Delcour, J. A. 2013.** Ingredient functionality in batter type cake making. *Trends in Food Science & Technology*, 30, 6-15.

**Wouters, A. G., Rombouts, I., Fierens, E., Brijs, K., Blecker, C., Delcour, J. A., and Murray, B. S. 2018.** Foaming and air-water interfacial characteristics of solutions containing both gluten hydrolysate and egg white protein. *Food Hydrocolloids*, 77, 176-186. doi:10.1016/j. foodhyd.2017.09.033

**Xiong T, Xiong W, Ge M, Xia J, Li B, Chen Y. 2018.** Effect of high intensity ultrasound on structure and foaming properties of pea protein isolate. *Food Res Int.* (2018) 109:260-7. doi: 10.1016/j.foodres.2018.04.044

**Xiong, Y.L., Dawson, K.A. & Wan, L. 1993.** Thermal aggregation of  $\beta$ -lactoglobulin : Effect of pH, ionic environment, and thiol reagent. *Journal of Dairy Science*, 76, p.71–77.

**Yang X, Foegeding EA. 2011.** The stability and physical properties of egg white and whey protein foams explained based on microstructure and interfacial properties. *Food Hydrocolloids* 25(7):1687-701.

**Yang, X., and Foegeding, E. 2010.** Effects of sucrose on egg white protein and whey protein isolate foams : factors determining of wet and dry foams (cakes). *Food Hydrocoll*, 24,227-238.

**Zadow, J.G. 1992.** Lactose hydrolysis: In: *Whey and Lactose Processing*. Elsevier Applied Science, London, and New York. pp.157-194, 367- 408.

**Zadow, J.G. 2012.** *Whey and lactose processing*. Csiro, Division of food processing, Victoria, Australia.

**Zarei M, Eskandari MH, Pakfetrat S. 2011.** Determination of heavy metals content of refined table salts. *American Eurasian Journal of Toxicological Science*; 3(2): 59-62.

**Zayas JF. 1997.** Foaming properties of proteins. *Functionality of Proteins in Food*:260-309.

**Zayas, J. F. (1997).** Foaming properties of proteins. In J. F. Zayas (Ed.), *Functionality of proteins in food* (pp. 261-309). New York, NY, USA:Springer.

**Zhang, Z., Dagleish, D. G., & Goff, H. D. (2004).** Effect of pH and ionic strength on competitive protein adsorption to air/water interfaces in aqueous foams made with mixed milk proteins. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 34, 113-121.

**Zhao, X.; Fan, X.; Shao, X.; Cheng, M.; Wang, C.; Jiang, H.; Zhang, X.; Yuan, C.2022.** Modifying the physicochemical properties, solubility and foaming capacity of milk proteins by ultrasound-assisted alkaline pH-shifting treatment. *Ultrason. Sonochem*, 88, 106089.

**Zhu H, Damodaran S. 1994.** Effects of calcium and magnesium ions on aggregation of whey protein isolate and its effect on foaming properties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 42:856-62.

**Ziegler, E.E., and Fomon, S.J. 1983.** Lactose enhances mineral absorption in infancy. *J.Pediatr. Gastroenterol.*, 2, 288-294.

**Zuha BS, Saha ML, Mumtaz T, Haque S, Khan MR.2011.** Mineral composition and microbial association of a local condiment 'Beat Ladan' (Black Salt). *International Journal of Microbiology Research*; 2(1): 93-100.

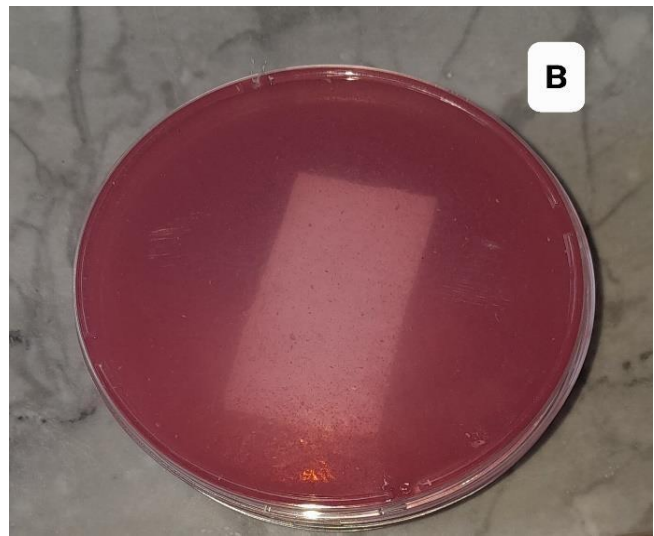
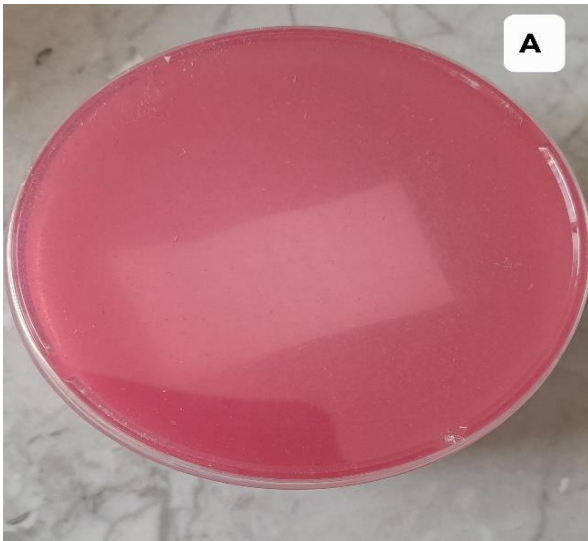
# **Annexes**

---

## Annexe 1 : Matériel et produits chimiques utilisés

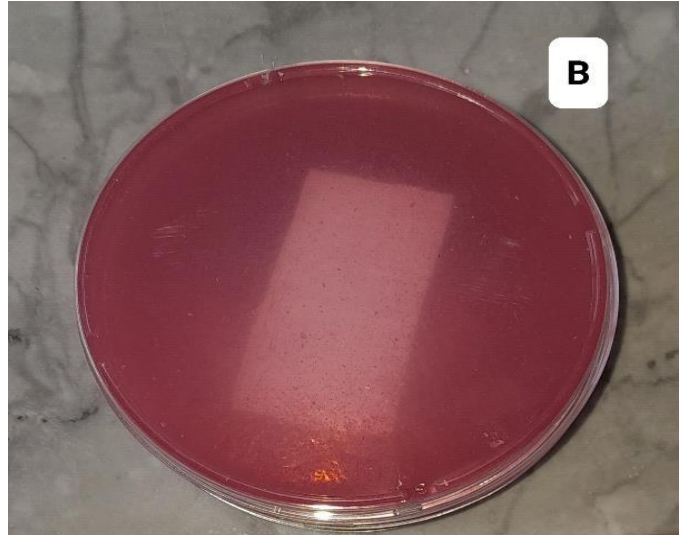
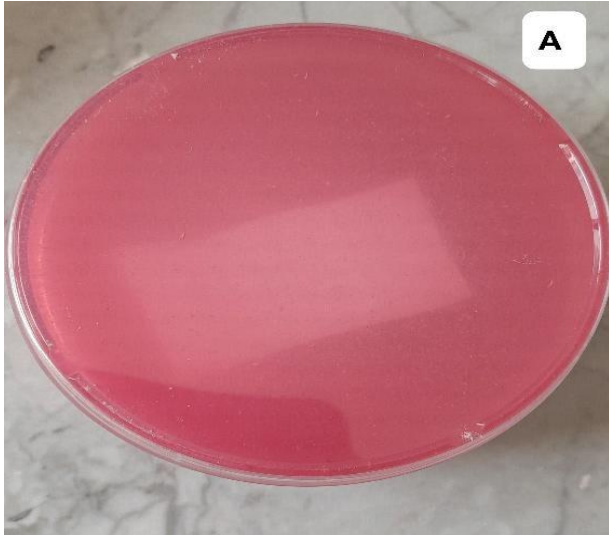
<b>Matériel</b>	Appareillages	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Agitateur magnétique chauffant (Daihan scientific)</li> <li>-Bain-marie avec une pompe (HAAKE V FISIONS)</li> <li>-Balance de précision (OHAUS PIONEER)</li> <li>-Etuve (Wisd)</li> <li>-Four à moufle (Heraeus instruments)</li> <li>-pH mètre (HANNA instruments)</li> <li>-Spectrophotomètre (DLAB Scientific SP- UV1100)</li> <li>- Microscope optique : B-350 OPTIKA.</li> <li>- Centrifugeuse (type SIGMA).</li> <li>-Réfractomètre (type d'Abbe)</li> <li>-Viscosimètre à chute de bille (THERMO scientific)</li> <li>-Bain à ultrasons (Bandelin Sonorex ISOLAB, f 40 kHz)</li> <li>-Conductimètre (BANTE instrument)</li> <li>- Batteur à main (Bomann, STABMIXER SM 354 CB)</li> </ul>
	Verreries	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Béchers ;Eprouvettes graduée ;Creusets ;Entonnoirs ;Erlenmeyer ;Fioles jaugées ;Tubes à essai ;Dessiccateur ;Burette graduée ;Matras</li> </ul>
<b>Produits</b>	Réactifs	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Acétone (<math>C_3H_6O</math>)</li> <li>-Acide chlorhydrique (HCl)</li> <li>-Acide sulfurique (<math>H_2SO_4</math>) concentré 95%</li> <li>-Bleu de méthylène</li> <li>-Hydroxyde de potassium (KOH)</li> <li>-Hydroxyde de sodium (NaOH)</li> <li>-Phénol 5% (<math>C_6H_6O</math>)</li> <li>-Lactose anhydre(<math>C_{12}H_{22}O_{11}</math>)</li> <li>- <math>Na_2CO_3</math> <math>CuSO_4</math></li> <li>-Tartrate double de K et Na</li> <li>- Folin-Ciocalteu</li> <li>-BSA</li> </ul>

**Annexe 2 : Résultats de l'analyse microbiologique des meringues fraîches.**



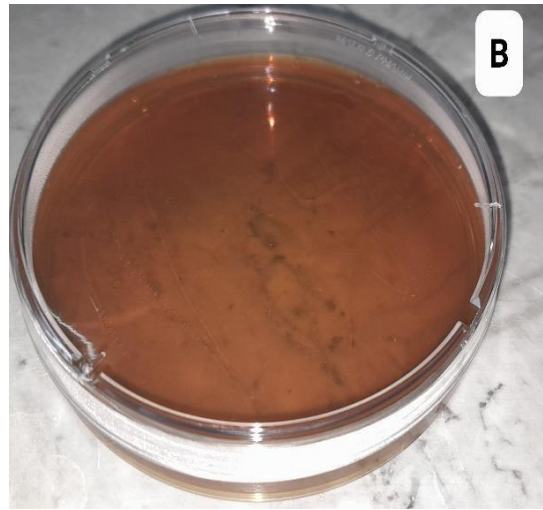
**Annexe2a : Résultats de recherche des coliformes totaux sur DLC.**

A : avant l'incubation ; B : après l'incubation (absence de colonies)/l'absence des colonies en rouge brique.



**Annexe2b : Résultats de recherche des coliformes fécaux sur DLC**

A : avant l'incubation ; B : après l'incubation (absence de colonies)/ l'absence des colonies en rouge brique.



**Annexe2c** : Résultat de recherche de Salmonella sur RV.

A : avant l'incubation ; B : après l'incubation (absence de colonies)/ l'absence de colonies transparentes avec un centre noir.

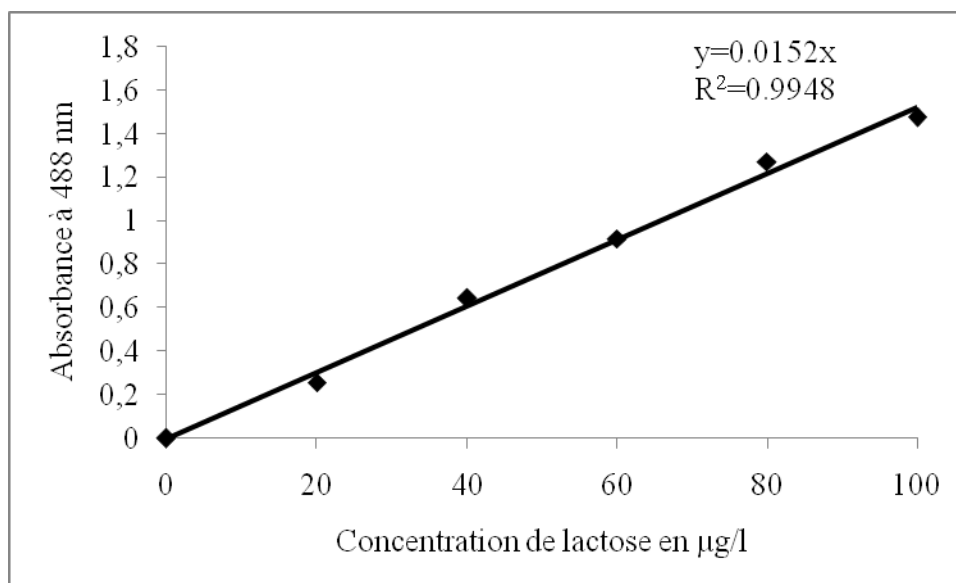
### Annexe 3 : Expression des résultats pour le dosage du lactose par la méthode de Dubois et al, (1956).

La gamme-étalon de la courbe a été établie à partir de solution mère de lactose à des concentrations comprises entre 0 et 100 µg/ml, la gamme-étalon est donnée dans le tableau (annexe 3a) .

**Annexe 3a :** Gamme d'étalonnage de la courbe de dosage de lactose :

<b>Concentration de lactose (µg/ml)</b>	0	20	40	60	80	100
<b>Solution mère (ml)</b>	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
<b>Eau distillée (ml)</b>	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0
<b>Phénol à 5% (ml)</b>	1	1	1	1	1	1
<b>Acide sulfurique (ml)</b>	5	5	5	5	5	5

La figure (annexe3b ) représente la courbe d'étalonnage de lactose.



**Annexe 3b:** Courbe d'étalonnage du lactose



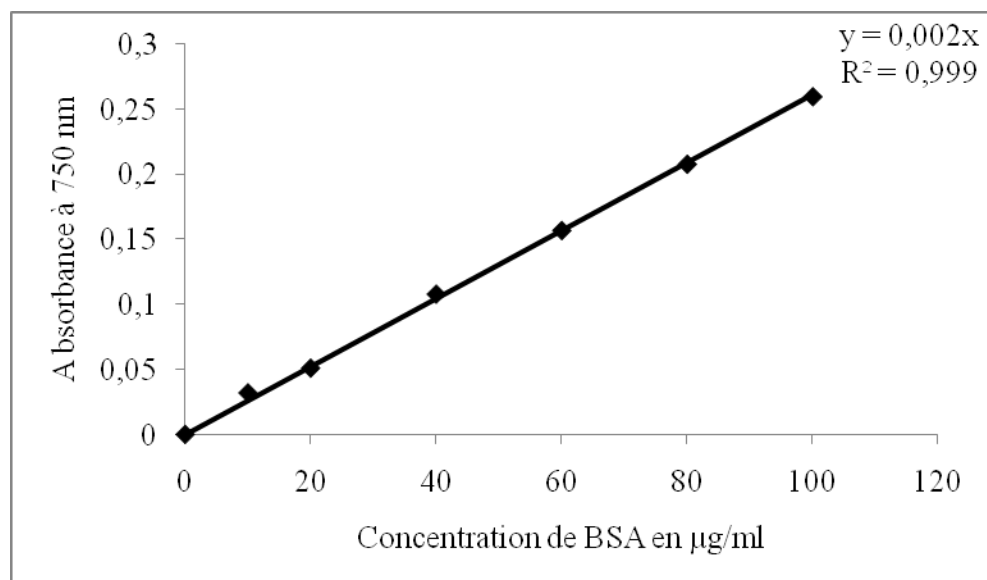
**Annexe 4 : Expression des résultats pour le dosage des protéines par la méthode de Lowry et al ;(1951).**

La gamme-étalon est établie à partir d'une solution mère de BSA dont les concentrations sont comprises entre 0 et 100 µg/ml. Le mélange réactionnel de différentes concentrations est préparé selon le tableau (annexe 4a).

**Annexe 4a:** Gamme d'étalonnage de la courbe de dosage des protéines.

<b>Concentration de BSA (µg /ml)</b>	0	10	20	40	60	80	100
<b>Solution BSA (ml)</b>	0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1
<b>Eau distillée (ml)</b>	1	0.9	0.8	0.6	0.4	0.2	0
<b>Réactif C (ml)</b>	5	5	5	5	5	5	5
<b>Solution E (ml)</b>	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

La figure (annexe 4b) représente la courbe d'étalonnage des protéines.



**Annexe 4b :** Courbe d'étalonnage des protéines

**Annexe 5 : Production scientifique (communication et publication internationales)**



<https://doi.org/10.48047/AFJBS.6.16.2024.3625-3648>



African Journal of Biological Sciences

Journal homepage: <http://www.ajbs.com>



Research Paper

Open Access

## Physicochemical characterisation and evaluation of meringue ingredients effects on foaming properties of crude sweet whey

Hanae Rais<sup>1</sup>, Kamel Acem<sup>1\*</sup>, Farida Horabi<sup>2</sup>, Hadjer Lachleh<sup>2</sup>, Achoura Kasdi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Biodiversity, Health and Valorisation of Biological Resources. Department of Nutrition and Agri-Food Technology. Faculty of Nature Sciences and Life. University of Tiaret.BP 78.Tiaret 14000. Algeria.

<sup>2</sup>Faculty of Nature Sciences and Life. University of Tiaret.BP 78.Tiaret 14000. Algeria.

\*Corresponding author: [kamel\\_acem@yahoo.fr](mailto:kamel_acem@yahoo.fr)

Volume 6, Issue 16, Dec 2024

Received: 15 Oct 2024

Accepted: 25 Nov 2024

Published: 09 Dec 2024

[doi:10.48047/AFJBS.6.16.2024.3625-3648](https://doi.org/10.48047/AFJBS.6.16.2024.3625-3648)

### Abstract:

The present study focused on evaluating the effect of meringue ingredients on the foaming properties of crude sweet whey. The experimental part included the preparation and physicochemical characterisation of crude sweet whey (pH, ash, proteins, lactose, dynamic viscosity, soluble solids), then the evaluation of the effect of meringue ingredients (crude white egg, table sugar and table salt) on the foaming properties of crude sweet whey by analysing its foaming capacity and air bubble diameter. On the physicochemical level, the physicochemical parameters of crude sweet whey are strongly linked to its origin and the operating modes of their analysis methods. On the functional level and in comparison to those obtained in crude sweet whey alone and mixed (crude sweet whey and 5% crude egg white), the best foaming properties (foaming capacity and foam stability) are those noted in the mixture which is composed of crude sweet whey and 100% crude egg white. The addition of table salt (0.5 and 1% NaCl) to the mixture (crude sweet whey and 100% crude egg white) reduced its foaming power (foam stability) over time. Compared to the 5% dose of table sugar, the addition of table sugar (200% sucrose) to the mixture (crude sweet whey and 100% crude egg white) improved its foaming power (foaming capacity and foam stability) over time. Thus, the addition of table sugar (200% sucrose) and table salt (0.5%NaCl) to the mixture (crude sweet whey and 100% crude egg white) simultaneously has improved its foaming power (foaming capacity and foam stability) over time. In conclusion, we can conclude on the one hand that the foaming properties of crude sweet whey are linked to its native physicochemical environment (individual system) and modified (mixed system: case of meringue ingredients), and on the other hand that crude sweet whey can constitute a key ingredient in the formulation of a new pastry product (meringue).

**Keywords:** Cheese waste, foam, protein, optimisation, valorisation.

# Résumés

---

## ملخص

تهدف هذه الأطروحة إلى دراسة إمكانيات تثمين أمصال الحليب الخام والمعالجة في مجال الرغوات الغذائية من خلال صياغة منتجات جديدة من الحلويات تُعرف باسم المارينغ. شمل البروتوكول التجريبي تحليلًا فيزيائيًا وكيميائيًا ووظيفيًا للأمصال الحليب الخام والمعالجة بالتسخين التقليدي، الموجات فوق الصوتية، والمعالجة المزدوجة بالحرارة و بالموجات فوق الصوتية، دراسة وظيفية في نظام فردي ومختلط للخواص الرغوية للأمصال الحليب الخام فيما يتعلق بمكونات المارينغ (بياض البيض النيء، السكر الأبيض، السكر البني، وملح الطعام)، تحسين، إنتاج، ومراقبة جودة المارينغ. أظهرت النتائج أن الخصائص الفيزيائية، الكيميائية والرغوية للأمصال الحليب الخام والمعالجة مرتبطة بأصل مصل الحليب الخام، طبيعة وشروط عملية المعالجة المستخدمة، شروط إنتاج الرغوة، وكذلك طريقة التحليل المستخدمة. ومع ذلك، فإن الخواص الرغوية للأمصال الحليب الخام في وجود مكونات المارينغ (بياض البيض النيء، السكر الأبيض، السكر البني وملح الطعام) متعلقة أيضا بمصدر مصل الحليب الخام، طبيعة، كميات وخصائص المكونات المستخدمة، شروط إنتاج الرغوة ، وكذلك طريقة التحليل المستخدمة. تميزت المنتجات الجديدة من الحلويات (المارينغ) بجودة صحية مطابقة للمعايير وبجودة حسية مقبولة تختلف من منتج إلى آخر؛ وفقًا لدرجة التفضيل، فإن أفضل مارينغ هي تلك المنتجة من السكر البني مقارنة بتلك المصنوعة من السكر الأبيض.

**الكلمات المفتاحية:** مصل الحليب الحامض الخام، مصل الحليب الحلو الخام، رغوة، رغوة غذائية، منتج حلواني، مارينغ، مكون، تسخين تقليدي ، موجات فوق صوتية ، معالجة حرارية وصوتية، سلامة غذائية، اقتصاد دائري، تنمية مستدامة.

## **Abstract**

This thesis aims to study the possibilities of valorising the crude and treated whey in the field of food foams by formulating new pastry products called meringues. The experimental protocol included a physicochemical and functional characterisation of crude and treated wheys using conventional heating, ultrasound, and thermosonication; a characterisation in an individual and mixed system of the foaming properties of crude wheys in relation to meringue ingredients (crude egg white, white sugar, brown sugar, and table salt); and optimisation, production, and quality control of meringues. The results showed that the physicochemical and foaming properties of crude and treated wheys are related to the origin of the crude wheys, the nature and operating conditions of the treatment process used, the operating conditions of expansion, and thus the analytical method used. However, the foaming properties of crude whey in the presence of meringue ingredients (crude egg white, white sugar, brown sugar, and table salt) are thus dependent on the origin of the crude whey, the nature, doses, and properties of the ingredients used, the operating conditions for expansion, and thus the analytical method used. The newly developed pastry products (meringues) exhibited a sanitary quality that complied with the standard and an acceptable sensory quality that differed from one product to another; depending on the degree of preference, the best meringue was the one produced with brown sugar compared to the one made with white sugar.

**Keywords:** Crude acid whey, crude sweet whey, foam, food foam, pastry product, meringue, ingredient, ultrasound, bain-marie heating, thermosonication, food safety, circular economy, sustainable development.

## **Résumé**

Cette thèse vise à étudier les possibilités de la valorisation des lactosérums bruts et traités dans le domaine des mousses alimentaires par formulation des nouveaux produits pâtisseries dits meringues. Le protocole expérimental a comporté une caractérisation physicochimique et fonctionnelle des lactosérums bruts et traités par chauffage conventionnel, ultrasons et thermosonication, une caractérisation dans un système individuel et mixte les propriétés moussantes des lactosérums bruts en relation avec les ingrédients de la meringue (blanc d'œuf cru, sucre blanc, sucre roux et sel de table), optimisation, production et contrôle de qualité des meringues. Les résultats ont montré que les propriétés physicochimiques et moussantes des lactosérums bruts et traités sont liées à l'origine des lactosérums bruts, à la nature et aux conditions opératoires du procédé de traitement mis en œuvre, aux conditions opératoires de foisonnement et ainsi à la méthode d'analyse utilisée. Or, les propriétés moussantes des lactosérums bruts en présence des ingrédients de la meringue (blanc d'œuf cru, sucre blanc, sucre roux et sel de table) sont ainsi dépendants à l'origine des lactosérums bruts, à la nature, les doses et aux propriétés des ingrédients mis en œuvre, aux conditions opératoires de foisonnement et ainsi à la méthode d'analyse utilisée. Les nouveaux produits pâtisseries élaborés (meringues) ont présenté une qualité sanitaire conforme à la norme et une qualité sensorielle acceptable qui diffère d'un produit à un autre ; selon le degré de préférentialité la meilleure meringue est celle produite à base du sucre roux par rapport à celle fabriquée à base du sucre blanc.

**Mots clés:** Lactosérum acide brut, lactosérum doux brut, mousse, mousse alimentaire, produit pâtisseries, meringue, ingrédient, chauffage conventionnel, ultrasons, thermosonication, sécurité alimentaire, économie circulaire, développement durable.