

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*  
Université A. MIRA – Bejaïa.

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie.  
Département des Sciences Alimentaires.  
Spécialité : production et transformation laitière.



Réf : .....

Mémoire de Fin de Cycle  
En vue de l'obtention du diplôme  
**MASTER**

## *Thème*

**Effet de la formulation et du procédé de  
foisonnement sur la qualité de la crème  
glacée**

Présenté par :

**Saichi saliha & Ismail chahrazed**

Soutenue le : 14 septembre 2020

Devant le jury composé de :

**M<sub>me</sub>** Chougui. N                      présidente

**M<sub>me</sub>** Boubchir. K                      Examinatrice

**M<sub>me</sub>** Boudjou. S                      promotrice

**Année universitaire : 2019/2020**

# Remerciements

Nous remercions tout d'abord le DIEU tout puissant pour nous avoir donné force et courage d'avancer le long de notre cursus.

Nous tenons à remercier tous les membres de nos familles SAICHII et ISMAIL qui, par leurs supports et encouragements, nous ont permis de nous investir entièrement dans nos études.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre promotrice Mme Boudjou Souhila d'avoir bien voulu diriger ce travail et de nous avoir donné de ses suggestions, nous les remercions également pour son attention et ses remarques pertinentes et constructives, ses conseils précieux et encouragement. Nous aimons particulièrement souligner ses qualités humaines. Mme Boudjou, merci d'être ce que vous êtes.

Nous remercions les membres de jury qui ont accepté d'examiner ce travail : Mme chougui. N et Mme Boubchir. K

Nos remerciements les plus sincères à tous les professeurs qui se sont sacrifiés pour nous donner le meilleur enseignement.

Nous remercions tous ceux qui ont apporté de près ou de loin une aide morale ou physique pour la réalisation de ce mémoire de fin d'études.



**Saliha et chahrazed**

## Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A la mémoire de mon chère grand père qui a été un père pour moi, aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour toi. Tu as été toujours à mes côtés. Que DIEU le tout puissant t'accorde dans son paradis éternel.

A mon cher papa, Ce travail est le fruit des sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation, tu as sacrifié ta noble existence sans jamais se plaindre pour bâtir la mienne et tu as contribué à ma réussite, papa tu es mon exemple et mon héros, tous mes respects pour toi je t'aime.

A celle qui m'a offert la tendresse, et qui a été toujours là pour moi, à celle qui me donne l'image de la femme forte qui peut franchir tous les obstacles, à ma mère.

A mes adorables frères : Sofiane et Yanis que j'aime tant.

A ma tante « Yaya » qui a été comme une mère pour moi, ses enfants Idir et Amina et son mari. Merci pour tout ce que tu as fait pour moi.

A mes oncles et ma grand-mère.

A la personne que j'estime et je respecte, qui m'a encouragé, qui m'a fait sentir l'amour et l'envie d'aller plus loin Elhacen.

A ma camarade chahrazed et sa famille.

A ma promotrice Mme Boudjou et sa famille.

A tous mes amis sans exception.

A toute la promotion Master 2 production et transformation laitière 2019/2020

*Saliha.*

## Dédicaces

*Ce travail modeste est dédié à mon chère **papa**, qui a sacrifié sa noble existence pour bâtir la mienne et a contribué à ma réussite, et ceux qui méritent toute mon affection, mon respect et ma reconnaissance*

*A la mémoire de ma mère, j'aurais aimé qu'elle soit présente aujourd'hui devant moi, que Dieu le tout puissant vous accueille dans son vaste paradis 'paix à son âme'*

*A mes très chers frères et sœurs : **Toufik, Meriem, Zouzou, Mouloud**.*

*A Mon fiancée **Hamid** ainsi à toute la famille.*

*A ma camarade **Saliha** ainsi qu'à toute la famille.*

*A ma promotrice **Mme Boudjou** et sa famille.*

*A tous mes oncles, tantes, cousins et cousines et surtout **Khalti NADIA** et **Khali MUSTAPHA***

*A toutes mes copines **Mima, Kika, Ascia**.*

*A toute la promotion Master 2 production et transformation laitière 2019/2020*

**Chahrazed**

## Table des matières

|   |    |
|---|----|
| Liste d'abréviation   |    |
| Liste des figures   |    |
| Liste des tableaux  |    |
| Introduction : .....  | 1  |
| Chapitre I : Généralité sur la crème glacée                                       |    |
| I-1- Définition : .....   | 3  |
| I-2 - Structure de la crème glacée : .....  | 3  |
| I-3- Grandes règles de la formulation .....                                       | 4  |
| I-4- La fonction des ingrédients de la crème glacée : .....                       | 6  |
| I-4-1-Lait : .....  | 7  |
| I-4- 2- Matière grasses : .....   | 7  |
| I-4-3- Solides de lait : .....  | 8  |
| I-4-4- Edulcorants : .....  | 8  |
| I-4-5- Emulsifiants : .....   | 9  |
| I-4-6- Stabilisants : .....   | 9  |
| I-4-7- Colorants et arômes : .....  | 9  |
| I-4-8- Air .....  | 9  |
| I-4-9-Eau .....   | 10 |
| I-5- Procédé de fabrication de la crème glacée : .....                            | 11 |
| I-5-1- Pasteurisation : .....   | 12 |
| I-5-2- Homogénéisation : .....  | 12 |
| I-5-3- Maturation : .....   | 12 |
| I-5-4- Foisonnement et congélation : .....  | 13 |
| I-5-6- Durcissement : .....   | 13 |
| I-5-7- Stockage : .....   | 14 |
| I-6- Microbiologie de la crème glacée : .....                                     | 14 |
| I-7- Effet de la congélation sur les microorganismes dans la crème glacée : ..... | 15 |
| I-8- Valeur nutritionnelle de la crème glacée : .....                             | 15 |

|  |    |
|--|----|
| I-9-Effet de la crème glacée sur la santé : .....                          | 15 |
| Chapitre II : Foisonnement   |    |
| Etape1 : phénomènes interfaciaux : .....                                   | 16 |
| II-1-1 : L'émulsion du mix : .....   | 16 |
| II-1-2 : Déstabilisation du mix et formation de la structure aérée : ..... | 16 |
| II-1-3 - Effets de la formulation : .....                                  | 17 |
| II-1-4 : Effets des conditions de procédé : .....                          | 20 |
| Etape2 : foisonnement : .....  | 20 |
| II-2-1- Définition : .....   | 20 |
| II-2-2 : Les procédés de foisonnement : .....                              | 21 |
| II-2-3- Définition et propriétés d'une mousse : .....                      | 24 |
| II-2-4- Formation d'une mousse : .....                                     | 25 |
| II-2-5 : Rhéologie des mousses .....                                       | 26 |
| II-2-6- Stabilité d'une mousse : .....                                     | 26 |
| II-2-7- Effet des conditions de foisonnement : .....                       | 27 |
| Etape3 : Caractérisations du produit finis : .....                         | 27 |
| II-3-1- Taux de foisonnement : .....                                       | 27 |
| II-3-2- Texture : .....  | 28 |
| II-3-3- Stabilité dans le temps : .....                                    | 29 |
| II-3-4- Distribution spatiale du gaz : .....                               | 29 |
| II-3-5 : Effet du foisonnement : .....                                     | 30 |
| Etape4 : Rhéologie et aspect visuel des crèmes glacées : .....             | 30 |
| II-4-1- Rhéologie des crèmes glacées : .....                               | 30 |
| II-4-2- Aspect visuel des crèmes glacées : .....                           | 31 |
| Conclusion : .....   | 32 |
| Références bibliographiques  |    |

## Liste d'abréviation

**MG** : Matière grasse

**ESDL** : Extrait sec dégraissé lactique

**pH** : Potentiel d'hydrogène

**G'** : Module de conservation ou élastique (Pa)

**G''** : Module de perte ou visqueux (Pa)

**ESR** : Echangeur a surface raclée

**H/E** : Huile/ Eau

## Liste des figures

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure 01</b> : Structure d'une crème glacée.....   | 3  |
| <b>Figure 02</b> : Rhéologie d'une crème glacée .....  | 4  |
| <b>Figure 03</b> : Diagramme de fabrication de la crème glacée.....  | 11 |
| <b>Figure 04</b> : Phénomène observé à l'interface gaz liquide.....  | 14 |
| <b>Figure 05</b> : Schéma descriptif d'un échangeur à surface raclée.....                                    | 24 |
| <b>Figure 06</b> : Représentation schématique d'un dispositif rotor-stator Haas Mondomix<br>Netherlands..... | 25 |



## Liste des tableaux

**Tableau I** : Composition des crèmes glacées.....5

**Tableau II** : Teneur des crèmes glacées en minéraux.....5

**Tableau III** : Teneur des crèmes glacées en vitamines.....6

# ***Introduction***

### INTRODUCTION

Les attentes des consommateurs à l'égard de la qualité des produits alimentaires ont augmenté au cours de la dernière décennie (**Ahmad *et al.*, 2019**).

La crème glacée est une source riche en macroéléments (**Champagne *et al.*, 2018 ; Goral *et al.*, 2018a, b**) et se caractérise par une digestibilité élevée. Avec sa texture douce et son goût sucré, ce produit est accepté par tous les groupes d'âge de consommateurs (**Cruz *et al.*, 2009**).

La complexité de la crème glacée, qui contient nombre d'éléments structurels comme les cristaux de glace, les bulles d'air, les globules gras, des micelles de protéines, des polymères en solution, etc., est ainsi redécouverte et les multiples connexions entre la formulation, la texture, la structure, les conditions de fabrication et l'appréciation du consommateur sont de mieux en mieux éclairées (**Bruno et Montes, 2002**).

Le foisonnement est une opération technologique complexe et la mousse est un produit fragile. Une dispersion des bulles de gaz dans une matrice liquide est un système compressible instable, dont les propriétés sont en partie déterminées lors du mélange dynamique des deux fluides, il vise à inclure des bulles de gaz dans un produit liquide ou pâteux afin de lui conférer des propriétés nouvelles (**Gilles, 2011**). La présence du gaz induit une meilleure sensation dans la bouche et développe de nouvelles propriétés de texture : légèreté et tartinabilité (**Campbell *et al.*, 1999**).

Les mousses alimentaires constituent en fait un sous-ensemble des aliments connus sous la dénomination de produit foisonné ou produit aéré (**Dickinson, 1996 ; Campbell et Mougeot, 1999**). Nous nous intéresserons dans ce travail aux aspects du procédé et de la formulation, ainsi aux opérations clé de la construction de la structure du produit, à savoir le foisonnement, et mettrons l'accent sur l'aspect rhéologie, science qui étudie la déformation des matériaux et d'une certaine façon leur structure (**Bruno et Montes, 2002**).

L'objet de cette étude est donc de mieux comprendre le processus de structuration d'un produit par le procédé de foisonnement, en reliant les paramètres opératoires (procédé et produit) aux propriétés des mousses formées (**Gilles, 2001**).

## **Introduction**

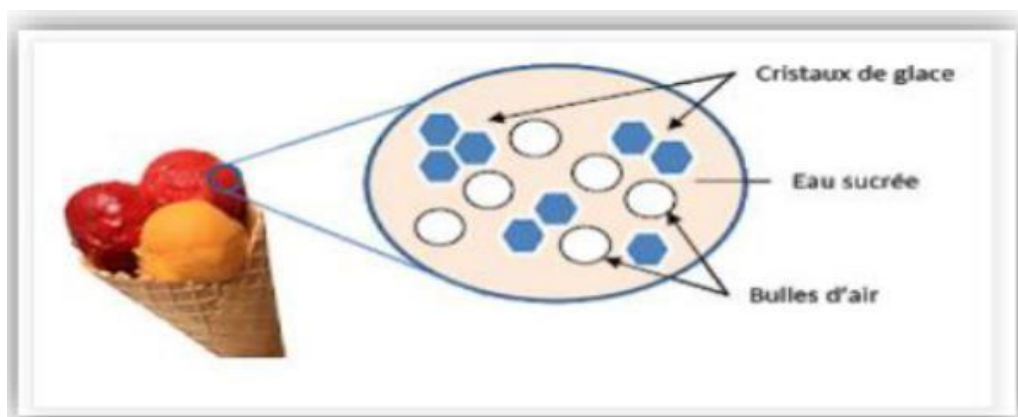
Ce travail bibliographique nous a permis de faire une étude sur l'état des connaissances sur les approches théoriques de la formation et la stabilisation d'une mousse ainsi ses caractéristiques et sa rhéologie.

***Généralités sur la crème  
glacée***

## I-1- Définition

D'après **Kuijer (1954)**, la crème glacée gagne une importance toujours croissante en tant que produit laitier. Sa popularité auprès du consommateur s'explique par ses qualités rafraîchissantes et sa grande valeur nutritive, et auprès du fabricant par les bénéfices qu'offre ce produit rationnellement fait. En outre, le producteur sera satisfait de voir s'ouvrir de nouveaux marchés pour son lait.

Selon **Bourgoin (1924)**, la crème glacée (figure 1) est le produit glacé fait avec de la crème et du sucre, avec ou sans essence naturelle et contenant au moins 1.4% de matière grasse de beurre. Des ingrédients fonctionnels, tels que les stabilisants et les émulsifiants, sont souvent inclus dans le produit pour favoriser une texture appropriée et améliorer la saveur (**Alvarez, 2009**).

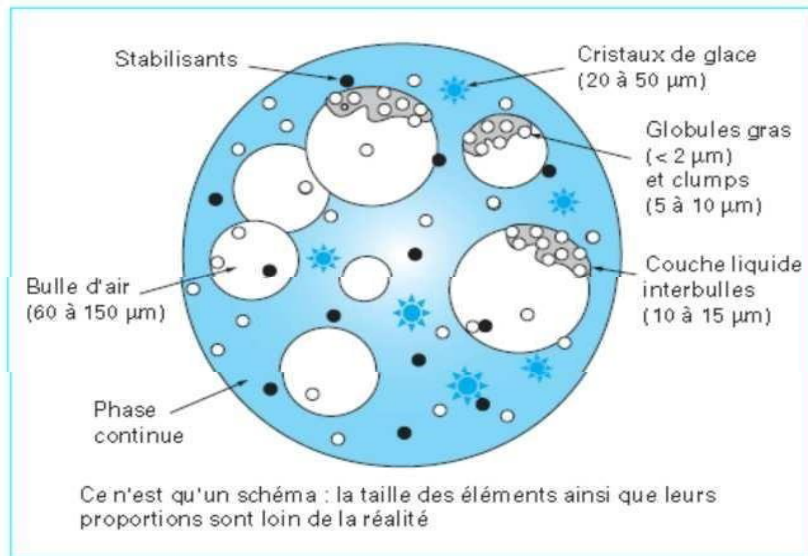


**Figure 1.** Structure de la crème glacée (**Dudez et al., 2017**).

## I-2 - Structure de la crème glacée

Selon **Pashley et karaman (2005)**, la crème glacée est une dispersion colloïdale complexe constituée de particules de crème glacée et de bulles d'air, c'est une émulsion (ou dispersion) de graisse semi-solide, d'agrégats de protéines, de sucres et de modificateurs de viscosité (polysaccharide). L'émulsion stabilisée par les protéines est rapidement refroidie de sorte que la graisse commence à cristalliser et à devenir des particules semi-solides.

Les éléments structurels de la crème glacée sont des cristaux de glace de diamètre de 50  $\mu\text{m}$ , de bulles d'air de 60-150  $\mu\text{m}$  de diamètre, des globules gras de 5-10  $\mu\text{m}$ . La matière grasse est principalement attachée aux bulles d'air. Les bulles d'air ont une fonction triple : ils réduisent la valeur nutritionnelle, ramollissent le produit et empêchent une forte sensation de froid pendant la consommation (**Belitz et al., 2009**).



**Figure 02** : Rhéologie d'une crème glacée (**Mahaut et al., 2008**).

### I-3- Grandes règles de la formulation

Le raisonnement consiste, dans un premier temps, à fixer les objectifs recherchés pour chaque type de produit fini, puis dans un deuxième temps à traduire ces objectifs en caractéristiques pour le mix à préparer (mélange dans le jargon professionnel) et enfin dans un troisième temps à sélectionner les ingrédients à mettre en œuvre en fonction du cahier des charges (**Boutonnier, 2002**).

**Tableau I : Composition des crèmes glacées (Madden, 1989 ; Evington, 1991; Marshall et Arbuckle, 1996 ; Andresen et Nielsen, 1998).**

| Constituants                 | en masse (°/°) | Moyenne (°/°) |
|------------------------------|----------------|---------------|
| Solides du lait              | 9-11,5         | 10            |
| Sucre                        | 12-16          | 14            |
| Matière grasse               | 7-12           | 10            |
| Sirop de glucose ou fructose | 4-6            | 4             |
| Emulsifiant + stabilisant    | 0,45-0,65      | 0,5 (0,2+0,3) |
| Arôme+ colorant              | <0,2           | <0,2          |
| Solides totaux               | 34-38          | 38            |
| Eau                          | 60- 62         | 62            |
| Air                          | 45-55          | 50            |

➤ **La teneur des crèmes glacée en minéraux et en vitamine**

**Tableau II : Teneur des crèmes glacées en minéraux (FAO, 1995).**

| <b>Les minéraux</b> | <b>La teneur (g/Kg)</b> |
|---------------------|-------------------------|
| Calcium             | 1,3                     |
| Phosphore           | 1,0                     |
| Sodium              | 0,8                     |
| Potassium           | 1,35                    |
| Magnésium           | 0,14                    |
| Zinc                | 8,0                     |
| Manganèse           | 0,6                     |
| Cuivre              | 0,25                    |



**Tableau III** : Teneur des crèmes glacées en vitamines (FAO, 1995).

| Vitamines                | La teneur (mg/Kg) | Vitamines           | La teneur(mg/Kg) |
|--------------------------|-------------------|---------------------|------------------|
| Carotène                 | 1,96              | Folate              | 0,08             |
| Vitamine A               | 11,4              | Acide Pantothénique | 5                |
| Vitamine B <sub>1</sub>  | 0,42              | Biotine             | 0,02             |
| Vitamine B <sub>2</sub>  | 2,0               | Vitamine C          | 5                |
| Vitamine B <sub>6</sub>  | 0,55              | Vitamine D          | 10               |
| Acide Nicotinique        | 1,25              | Vitamine E          | 1,2              |
| Vitamine B <sub>12</sub> | Traces            | Vitamine K          | 2,1              |

Une portion de 125ml de glace (soit environ 2 boules) apporte en moyenne 150 calories, 7 g de matières grasses, 20 g de glucides et 100 mg de calcium. L'apport calorique peut toutefois monter en flèche selon le type de glace, si on ne s'en tient pas à une portion raisonnable, ou si on l'agrémente de sauce au chocolat, de bonbons ou crème chantilly (Aouissi *et al*, 2007).

#### I-4- La fonction des ingrédients de la crème glacée

Les ingrédients de la crème glacée peuvent être classés en trois groupes différents (Colten, E., Peters, M., 2013) :

- **Composants majeurs** : sont présents en quantités substantielles, comme le lait, le sucre, les graisses et l'eau.
- **Composants mineurs** : sont présents en petites quantités tels que les émulsifiants, les stabilisants, les colorants et les arômes.
- **Ingrédients extra** : comme le chocolat, les gaufrettes, les morceaux de fruits, les noix, etc.

## I-4-1-Lait

De nombreuses sources lactées sont possibles, elles peuvent être regroupées en deux catégories en fonction de leur utilisateur (**Boutonnier, 2002**) :

- **Échelle artisanale et semi-industrielle** : le lait frais pasteurisé est le plus souvent employé par les fermiers ou encore les pâtisseries-glacières, parfois on rencontre la mise en œuvre de lait de vache issu de l'agriculture biologique, voire de lait de chèvre ou de brebis.
- **Échelle industrielle** : pour ce qui est des gros fabricants, les sources sont variables selon les cours des matières premières et les niveaux de qualité recherchés pour tel ou tel produit fini. C'est ainsi que l'on privilégie souvent le lait écrémé en poudre, et dans certains cas le lait concentré, tout en recourant, en tant que substitution partielle, à des produits élaborés que sont les lacto-remplaceurs, eux-mêmes d'origine majoritairement laitière.

## I-4-2- Matière grasses

La matière grasse, laitière ou végétale, contribue au goût du produit mais surtout au développement de la structure et à l'apparence sèche du produit (**Andreasen et Nielsen, 1998 ; Madden, 1989**). Elle se trouve dispersée sous forme de globules gras partiellement solidifiés et coalescés par le refroidissement et le cisaillement du procédé de congélation. Ces globules gras se concentrent autour des bulles d'air pour les stabiliser (**Marshall et Arbuckle, 1996 ; Andreasen et Nielsen, 1998**).

Les conditions de température et d'agitation pendant la congélation, les propriétés de congélation des matières grasses et les interactions avec d'autres constituants (émulsifiants, protéines, air) doivent donc être contrôlées pour obtenir un produit de bonne texture (**Marshall et Arbuckle, 1996 ; Andreasen et Nielsen, 1998**).

La présence de matière grasse dans une crème glacée présente de nombreux avantages tels que la réduction de la vitesse de foisonnement, la stabilisation de la mousse, l'amélioration de la texture, du corps et de la saveur du produit fini, ainsi que l'accroissement de sa valeur énergétique (**Boutonnier, 2002**).

Par contre, trois inconvénients majeurs limitent son taux d'incorporation, tout d'abord, la matière grasse étant un composé anti-moussant, sa présence réduit le taux de foisonnement du mix, ensuite une augmentation de matière grasse diminue d'autant la teneur en extrait sec dégraissé lactique, afin de respecter l'extrait sec total de la formulation. Enfin, un pourcentage excessif de matière grasse peut entraîner une texture pâteuse voire collante (**Boutonnier, 2002**).

### I-4-3- Solides de lait

Les solides de lait regroupent les protéines laitières (38%) caséines et de lactosérum.

Le lactose (50%) et des sels (7%), les solides de lait participent à la viscosité, diminuent le point de congélation du mix et améliorent la résistance thermique du produit (**Marshall et Arbuckle, 1996**).

Les protéines sont actives aux interfaces et contribuent à la stabilité de l'émulsion et de la mousse (**Madden 1989 ; Marshall et Arbuckle 1996, Andreasen et Niel sen 1998**)

Le lactose, accompagnant inévitablement les solides de lait, contribue au goût sucré mais il limite l'usage des solides de lait, dont il représente la plus grande partie, car en excès il cristallise et produit une texture sableuse désagréable, un grave défaut de qualité, les sels en moindre quantité jouent un rôle secondaire pour les interactions protéiques et arrondissent le goût (**Madden 1989 ; Marshall et Arbuckle 1996, Andreasen et Niel sen 1998**).

### I-4-4- Edulcorants

Naturellement, les édulcorants fournissent le goût sucré, modérant le goût de la matière grasse et rehaussant les arômes de fruit (**Keeney, 1982 ; Madden, 1989 ; Marshall et Arbuckle, 1996 ; Andreasen et Nielsen, 1998**).

Le mélange de sucre et de sirop de maïs contribue à la viscosité et contrôle le point de congélation commençante du mix, donc la quantité de glace formée, ce qui sera essentiel pour la qualité du produit durant le stockage et sa texture finale (**Keeney, 1982 ; Madden, 1989 Marshall et Arbuckle, 1996 ; Andreasen et Nielsen, 1998**).

### I-4-5- Emulsifiants

Les émulsifiants favorisent ainsi le phénomène dit de "coalescence partielle" des globules autour des bulles d'air (**Keeney, 1982 ; Xalabarder, 1994 ; Goff, 1997b ; Andreasen et Nielsen, 1998**). Ce phénomène est à l'origine de l'aspect sec désirable de la glace, de l'amélioration de la capacité de foisonnement, du corps, de la texture et de la résistance au choc thermique (**Xalabarder, 1994 ; Hervé et Toursel, 1997 ; Andreasen et Nielsen, 1998**).

### I-4-6- Stabilisants

Les stabilisants sont en fait des épaississants, pour la plupart des polysaccharides (**Madden, 1989**). Ils sont appelés ainsi dans le milieu industriel des glaces car leur recours a pour objectif principal celui de contrôler la taille finale des cristaux de glace dans le produit fini, en d'autres mots, celui de le stabiliser. Pour profiter de leur synergie, deux ou plusieurs hydrocolloïdes stabilisants sont habituellement utilisés dans la fabrication de la crème glacée. Principaux responsables de la viscosité du mix, ils contribuent au foisonnement, et améliorent consistance et résistance aux fluctuations de température (**Madden, 1989 ; Goff et al., 1993**).

Toutefois, comme nous venons de l'évoquer, la principale raison de leur usage est leur capacité de contrôler la taille de cristaux de glace pendant la congélation et le stockage -par des mécanismes méconnus- ce qui est très important pour la texture finale du produit (**Moore et Shoemaker, 1981 ; Keeney, 1982; Madden, 1989; Marshall et Arbuckle, 1996 ; Hervé et Toursel, 1997 ; Andreasen et Nielsen, 1998**).

### I-4-7- Colorants et arômes

Toute une série de substances sont autorisées afin de renforcer les couleurs des produits du jaune au noir, en passant par l'orange, le rouge, le vert, le bleu et le marron. Les quantités minimales d'arômes à employer pour la fabrication des glaces sont variables. En outre, ceux-ci peuvent être utilisés seuls ou en complément pour renforcer la saveur des fruits (**Boutonnier, 2002**).

### I-4-8- Air

Selon **Boutonnier, (2002)** ; l'air, qui est incorporé à débit variable dans le mix, a été préalablement filtré. Remplit plusieurs rôles principaux dans les glaces. C'est ainsi que lorsque

le taux de foisonnement augmente, on constate une réduction de la taille des cristaux de glace et des bulles d'air, ce qui contribue à une amélioration de la texture du produit fini. La présence d'air dans les glaces permet d'alléger la valeur énergétique de celles-ci, de même que leur prix de revient. C'est la raison pour laquelle la glace est un des rares produits alimentaires solides vendus au litre. L'air étant un isolant thermique, il confère à la glace une meilleure résistance à la fonte lors d'une élévation de température et procure une moindre sensation de froid, qui est désagréable lors de la dégustation. Enfin, il faut souligner car, c'est remarquable, que les crèmes glacées ou les sorbets sont les seuls produits surgelés que l'on peut mettre en œuvre, tant au niveau industriel (formage par extrusion) qu'au niveau ménager (réalisation de tranches et de boules), à une température négative et que l'on peut consommer sans décongélation préalable.

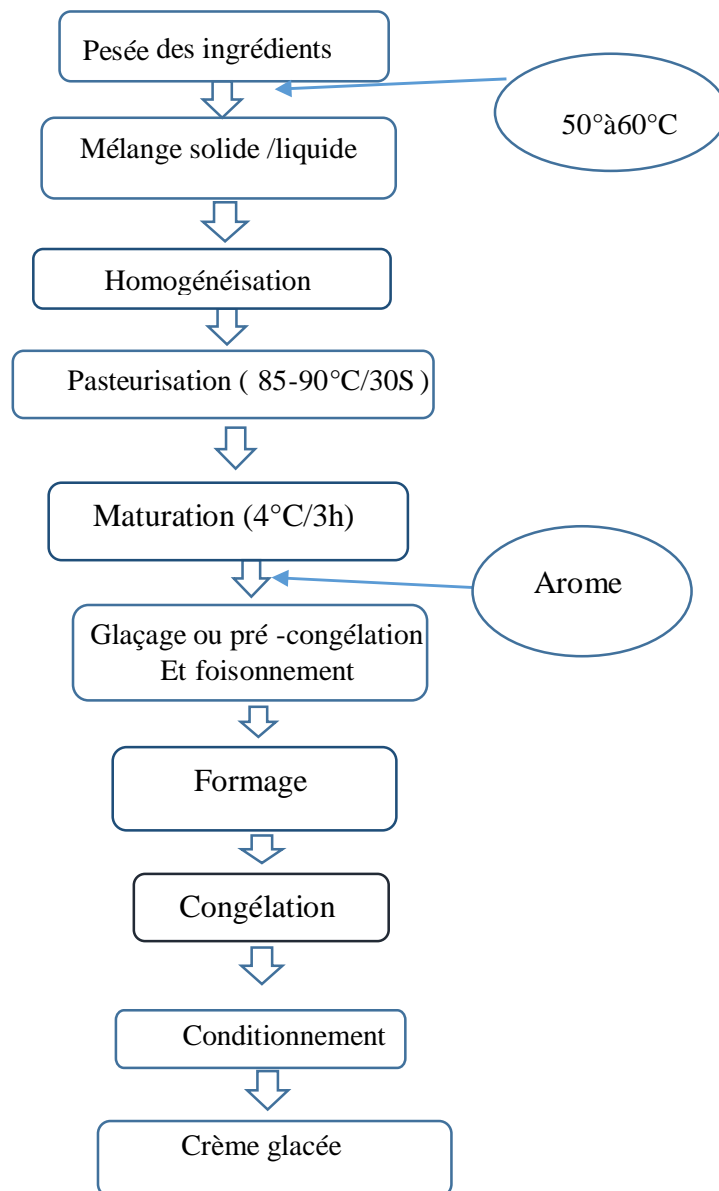
### I-4-9-Eau

Celle-ci est également indispensable, car son rôle de solvant permet à l'eau (55 à 65% en masse) de solubiliser l'extrait sec dégraissé lactique ainsi que les sucres, ensuite son rôle de dispersant facilite l'émulsification de la matière grasse. En outre, son passage partiel de l'état liquide à l'état solide et la création de réseaux solides cristallins permet une stabilisation de la structure physico-chimique complexe des glaces. Par ailleurs, elle doit être d'excellente qualité bactériologique afin de ne pas véhiculer de germes microbiens (**Boutonnier, 2001**).

Néanmoins, une quantité d'eau excessive dans le mix va affecter de manière significative, à la fois la qualité organoleptique (sensation granuleuse due à une taille importante de cristaux de glace, et sensation aqueuse lors de la fonte en bouche) et la stabilité du produit fini (accélération de la vitesse de fonte en raison d'une quantité d'eau libre excessive). Le lait concentré, tout en recourant, en tant que substitution partielle, à des produits élaborés que sont les lacto-remplaceurs, eux-mêmes d'origine majoritairement laitière (**Boutonnier, 2001**).

### I-5- Procédé de fabrication de la crème glacée

L'ensemble du processus de fabrication de crème glacée est présenté étape par étape ci-dessous :



**Figure 3** : Diagramme de fabrication de la crème glacée (Mahaut et al., 2000).

### I-5-1- Pasteurisation

Après le mélange des ingrédients du mix, celui-ci est pasteurisé. La pasteurisation est le point critique de contrôle biologique, destiné à éliminer les bactéries pathogènes et à diminuer la quantité de micro-organismes qui peuvent détériorer le produit (**Goff et al., 1995**).

Traditionnellement réalisée à 69°C/30 min, elle se fait le plus souvent en continu à plus haute température et temps plus court, toute particule du produit devant être maintenue à une température minimale durant un temps minimum (**Goff et al., 1994**). Mais un traitement excessif peut donner de mauvais goûts de cuit ou de Caramel (**Andreasen et Nielsen ; 1998**).

### I-5-2- Homogénéisation

Généralement réalisée en deux étapes afin d'éviter la recalescence de la matière grasse et tout de suite après la pasteurisation (pour profiter de ce que le mix chaud (50 à 60°C) est moins visqueux), l'homogénéisation consiste à appliquer au mix un sévère traitement mécanique, en l'obligeant à passer à travers un orifice avec une différence de pression amont/aval de 8 à 18 MPa (80 à 180 bars). Le but est de créer une émulsion stable de matière grasse, dispersée en globules de moins de 1µm (**Thomas, 1981 ; Goff et al., 1995 ; Russell et Gerrard, 1996**).

On cherche à « disperser au maximum les globules gras et faciliter la création, entre les protéines et les stabilisants, d'un réseau qui retiendra l'air injecté et permettra d'obtenir la spongiosité recherchée » (**Xalabarder, 1994**). Elle sert aussi à incorporer les stabilisants peu solubles (**Goff et al., 1994**). L'efficacité de l'homogénéisation est variable selon la température, la pression, le type d'homogénéisateur et la composition du mix (**Andreasen et Nielsen, 1998**).

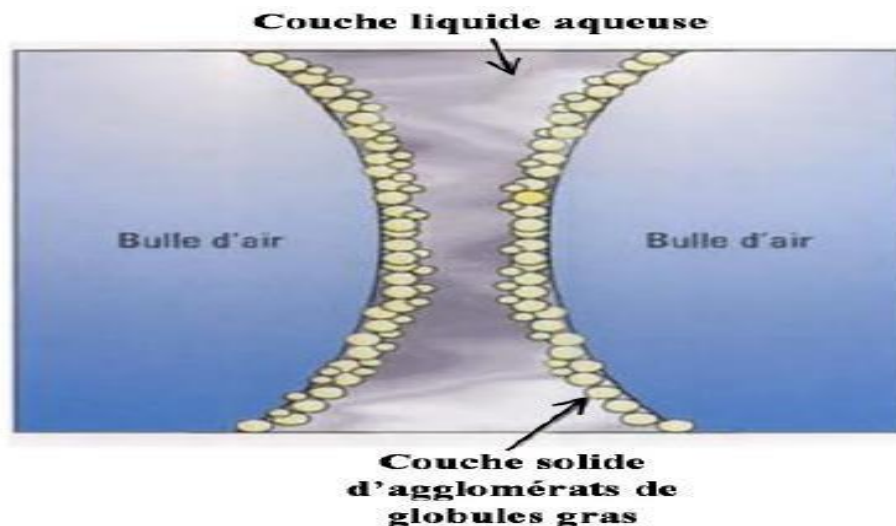
### I-5-3- Maturation

Après refroidissement jusqu'à 4 °C, le produit est maintenu à cette température au moins deux heures, souvent une nuit. A ce stade la matière grasse cristallise partiellement, les biopolymères sont mieux hydratés, les protéines interagissent avec les émulsifiants et la viscosité augmente (**Marshall et Arbuckle, 1996 ; Andreasen et Nielsen, 1998 ; Goff et al., 1995**).

#### I-5-4- Foisonnement et congélation

L'injection d'air et le refroidissement s'effectuent simultanément dans un échangeur de chaleur à surface raclée pour obtenir en quelques dizaines de secondes une crème glacée molle, fluide et plus ou moins visqueuse, typiquement à  $-4^{\circ}\text{C}$  et 100% de taux de foisonnement (le double de volume par rapport au volume initial de mix). La dispersion d'air produira la texture légère et spongieuse, la sensation crémeuse en bouche, la résistance à la fonte et la stabilité durant le stockage (**Andreasen et Nielsen, 1998**).

Environ 50% de l'eau est congelée, et si le refroidissement est rapide, plus nombreux et petits seront les cristaux de glace, et plus le produit sera stable au stockage et de texture moelleuse (**Hartel, 1996 ; Marshall et Arbuckle, 1996 ; Andreasen et Nielsen, 1998**). En même temps, l'émulsion de la matière grasse est déstabilisée, ce qui est en fait bénéfique puisque cela apporte stabilité à la mousse d'air, l'aspect sec recherché, et une texture crémeuse (**Madden, 1989 ; Andreasen et Nielsen, 1998**).



**Figure 4** : Phénomène observé à l'interface gaz liquide (**Boutonnier et Tirard-Collet, 2002**).

#### 5-6- Durcissement

Dans des chambres ou tunnels où passe à une vitesse de 5 à 10 m/s un courant d'air très froid ( $-45$  à  $-25^{\circ}\text{C}$ ) ou sur des plaques réfrigérantes (plate freezer) plus performantes, jusqu'à 80% de l'eau finit par congeler, et la température au cœur du produit atteint  $-10^{\circ}\text{C}$  (**Everington, 1991 ; Goff et al., 1995 ; Andreasen et Nielsen, 1998**).



### 5-7- Stockage

Selon les besoins, il s'effectue à -18°C pour un stockage court ou -30°C pour une conservation plus longue. Il faut rappeler qu'après le durcissement, la qualité de la crème glacée ne peut être améliorée, et sa conservation dépendra exclusivement des conditions post-process, du strict respect de la chaîne du froid lors du transport et la commercialisation. En dessous de 25°C, la crème glacée est stable à long terme sans danger de croissance de cristaux de glace, mais au-dessus de cette limite, la croissance de cristaux de glace est possible et dépend de la température de stockage, ce qui restreint la durée de vie du produit (Goff et al., 1995).

### I-6- Microbiologie de la crème glacée

La crème glacée est un produit à base du lait, est un bon support pour la croissance microbienne en raison de la valeur nutritive élevée, pH voisin de la neutralité (pH ~ 6-7) et la longue durée de conservation (FEHD, 2001 ; Mahmud-Hossain, 2012). Les principales sources de contamination microbienne des crèmes glacées incluent l'eau et le lait cru, alors que les sources secondaires incluent les agents aromatisants, la manipulation des ustensiles. De nombreux psychrophiles et microorganismes psychotolérants comme *listeria monocytogens*, *Salmonella* (Mahmudhossain, 2012 et Pal et al., 2015), *staphylococcus aureus*, *Bacillus*, *Shigella*, *Streptococcus*, *Pseudomonas*, *Campylobacter*, *Brucella*) et *Yersinia enterocolitica* sont généralement présents dans la crème glacée et peuvent survivre dans les aliments mêmes à basse température. (Mahmud hossain, 2012)

#### ▪ Indicateurs de la non-conformité microbiologiques des crèmes glacées

Les paramètres à contrôler sont généralement les micro-organismes responsables d'une altération de la qualité hygiénique (germes témoins de contamination fécale, germes pathogènes de contamination des produits manipulés) et les micro-organismes responsables d'une altération de la qualité marchande ou d'une perte de rendement qui doivent être recherchés du début de la fabrication (matières premières) jusqu'au produit fini (Ndayo Wouafo, 1994).

D'après Ndayo-Wouafo (1994) les aliments peuvent être les agents de transmission de divers micro-organismes infectieux ou de leurs métabolites susceptibles de provoquer des intoxications chez l'homme.

### I-7- Effet de la congélation sur les microorganismes dans la crème glacée

Selon **Marshall, (2001)**, les conditions de congélation mettent des contraintes sévères sur les microorganismes dans le mélange. Les facteurs qui affectent la survie des microorganismes pendant la congélation et le stockage comprennent le type et l'état physiologique des cellules, la composition de l'aliment, le traitement de l'aliment avant la congélation, de congélation, et les conditions de stockage.

Les crèmes glacées autour des cellules microbiennes réduisent la quantité d'eau libre et la formation de la glace à l'intérieur des cellules ce qui provoque la lyse cellulaire, en conduisant à la mort cellulaire. En général, les bacilles Gram négatifs et les cellules végétatives des levures et des moisissures sont plus facilement tuées que les bactéries Gram positives et les spores bactériennes et fongiques. En plus, les bactéries capsulées survivent mieux que les mêmes souches acapsulées.

### I-8- Valeur nutritionnelle de la crème glacée

La crème glacée est un aliment complet a la même valeur nutritionnelle du lait avec quelques calories supplémentaires liées à l'ajout de sucre, de fruits et d'autres ingrédients. En termes de volume, la crème glacée est constituée principalement de l'air, ce qui réduit le taux de calories par volume. En plus, le plaisir de manger de la crème glacée doit également être pris en compte pour le bien être, entre autres, la crème glacée est un aliment que les États-Unis rendent disponible à son personnel de service presque partout dans le monde (**Patton, 2004**).

### I-9-Effet de la crème glacée sur la santé

Les facteurs de risques trouvés comme étant impliqués significativement dans le cancer du côlon, incluent les aliments et boissons contenant du saccharose autres que les crèmes et le lait. Ce qui suggère une hypothèse selon laquelle le calcium pourrait avoir un effet protecteur des risques du saccharose (**Bostick et al. 1993**).

La céphalée de la crème glacée et maux de tête passager survenant suite à la consommation de ce produit, autres produits congelés et les boissons congelées (**David off, 2002**).

L'enrichissement de la crème glacée avec des fibres alimentaires améliore efficacement son aspect nutritionnel, physiologique et ses fonctionnalités en influençant les propriétés rhéologique et thermiques du produit fini (**Soukoulis et al., 2008**)

***Foisonnement***

### Etape1 : phénomènes interfaciaux

La qualité, la structure et la texture de la crème glacée se construisent durant les étapes de fabrication selon la formulation choisie et les conditions de procédé de fabrication. Comment le mix qui est qu'un mélange du lait gras, sucré, et parfumé, franchis les étapes de procédé de fabrication avec les différents obstacles et risques d'échec, pour construire un produit foisonné, bien moussant, onctueux, savoureux et congelé pour satisfaire le consommateur.

#### II-1-1 : L'émulsion du mix

Le mix est une émulsion de 8 à 12% de matière grasse laitière, issue du procédé d'homogénéisation (Goff, 2001). La phase dispersée est représentée par des globules gras, de taille d'environ 1  $\mu\text{m}$  et partiellement cristallisés à température de réfrigération, entourés d'une couche inter faciale de protéines et d'émulsifiants adsorbés au hasard juste après homogénéisation (Goff, 2001).

La taille des globules gras dépend des conditions d'homogénéisation qui peuvent influencer la texture finale du produit (Schmidt et Smith, 1989 ; Koxholt et al., 2001).

La phase aqueuse continue contient en solution des sucres, les protéines de lactosérum non adsorbées, les sels et les polysaccharides, ainsi que des micelles de caséine non adsorbées en suspension (Goff, 2001). Pendant l'étape de maturation, les émulsifiants ajoutés déplacent les protéines de la surface des globules gras en diminuant d'avantage la tension de surface (Buchheim, 1997). Cette désorption de protéines est une condition nécessaire au phénomène de déstabilisation de l'émulsion lorsqu'elle sera congelée, donc très importante pour la texture finale de la crème glacée. Elle dépend très fortement de la nature et de la concentration des émulsifiants choisis dans la formulation (Gelin et al., 1996a).

#### II-1-2 : Déstabilisation du mix et formation de la structure aérée

C'est pendant le passage du mix mûré avec l'air dans un échangeur à surface raclée, pour le foisonnement et la congélation, qu'à lieu la déstabilisation (*dumping*) de l'émulsion de matière grasse, ce qui aura des effets bénéfiques pour la texture finale du produit (Sherman, 1966 ; Keeney, 1982 ; Goff, 1997b). Cette "désémulsion" est la conséquence de la rupture de la membrane protéine-émulsifiant fragilisée des globules, en raison de l'application d'une vitesse ou contrainte de cisaillement et d'un refroidissement très important. La désémulsion se manifeste, d'après Goff et al., 1999, par trois phénomènes différents : Le premier de ces

phénomènes est la coalescence proprement dite des globules gras, le deuxième est la floculation, qui peut être réversible, et le troisième est la coalescence partielle. Celle-ci peut être considérée comme une floculation irréversible où les globules gras gardent leur identité individuelle.

La déstabilisation de la matière grasse est étroitement liée à la stabilisation de la structure aérée créée dans l'échangeur à surface raclée (**Goff, 1997b**).

Selon **Boutonnier, (2001)**, dans la première étape de la fabrication des crèmes glacées, autrement dit élaboration du mix, on doit réaliser une émulsion dans laquelle la phase aqueuse doit disperser la phase grasse. Pour cela, il faut trouver dans le milieu des agents tensioactifs très hydrophiles, c'est le cas des protéines laitières et de la lécithine de jaune d'œuf. Ensuite lors de la transformation du mix en crème glacée dans le freezer, on recherche une déstabilisation partielle de cette émulsion, de manière d'une part à faciliter lors du foisonnement la dispersion de l'air dans la phase liquide sous forme de fines bulles, et d'autre part, à floculer la phase grasse par agglomération partielle des globules gras, cela afin de stabiliser la dispersion d'air dans le mix.

- La réussite de l'opération de foisonnement est basée sur une formulation adaptée et des conditions de procédé.

### **II-1-3 - Effets de la formulation**

Selon **Gilles Mary, (2011)**, l'aération d'un liquide ne conduira à la formation d'une mousse stable que si un agent tensioactif est présent. Le rôle de l'espèce tensio-active étant de stabiliser les bulles de gaz dans la matrice liquide en s'adsorbant à l'interface gaz-liquide.

La réduction de taille d'une bulle et la présence de tensioactifs dans le milieu sont donc étroitement liées.

La microstructure de la mousse (taille des bulles) élaborée au cours du foisonnement résulte de l'adsorption concurrentielle des différentes espèces tensio-actives au niveau des bulles en formation et conditionne les propriétés finales des mousses (notamment texture et stabilité) (**Exerowa et Kruglyakov, 1998**).

Le pouvoir tensioactif d'une espèce varie selon sa nature et est lié aux mécanismes d'adsorption des molécules à l'interface. Les propriétés des films interfaciaux dépendent de

plusieurs paramètres tels que la force d'adsorption du tensioactif à la surface liquide gaz, l'élasticité du film, la perméabilité gazeuse du film et les conditions externes de température et de pression (**Bos et van Vliet, 2001**).

La vitesse de migration des espèces tensioactives est directement liée à leur coefficient de diffusion, fonction de la taille des molécules et de la qualité du solvant (**Gilles Mary, 2011**). Des tensioactifs de faible poids moléculaire auront la capacité de migrer plus rapidement aux interfaces que des protéines de haut poids moléculaire. En contrepartie les surfaces stabilisées par des espèces protéiques seront beaucoup plus structurées et résistantes vis à vis des contraintes exercées par le liquide environnant (**Prins, 1999**).

### II-1-3 – 1. Effet des Emulsifiants

Il faut savoir que la déstabilisation de l'émulsion n'a lieu qu'en présence d'émulsifiants (**Keeney, 1982 ; Gelin et al., 1996b**). Toutefois, l'excès d'émulsifiants provoque du barattage et la coalescence des bulles d'air (**Pelan et al., 1997**).

En effet il a été montré que les émulsifiants déplacent les protéines aussi à l'interface air/eau, par un mécanisme « orogénique ». Et la présence d'émulsifiant mobile aux interfaces, serait propice au drainage, ce qui conduirait au collapse de la mousse (**Leser et Michel, 1999**).

### II-1-3 – 2. Effets des protéines

Les protéines sont considérées comme des agents moussants efficaces pour les formulations alimentaires en termes de stabilité, et parmi elles, ce sont celles de lait et d'œuf (notamment de lactosérum et de blanc d'œuf) qui sont le plus souvent utilisées pour jouer ce rôle (**dickinson, E, 1996 ; Mathieu, J, 1998**).

Quand l'air est introduit dans le mix, les bulles sont rapidement entourées par une membrane de protéines adsorbées, composée principalement de  $\beta$ -caséine,  $\alpha$ -lactalbumine et  $\beta$ lactoglobuline (**Stainsby, 1986 ; Madden, 1989 ; Goff, 1997a**).

La dispersion d'air sous forme de bulles dans un milieu aqueux est possible grâce à la diffusion des protéines vers l'interface où elles s'adsorbent, puis se déploient, peuvent se dénaturer et interagissent entre elles pour former un film viscoélastique autour des bulles (**Britten et Lavoie, 1992 ; Phillips et al., 1995 ; Huang et al., 1997**). Leurs propriétés de surface permettent également la réduction de la tension interfaciale (**Huang et al., 1997**).

Les protéines diffusent lentement vers les interfaces, mais une fois adsorbées elles subissent des réarrangements structuraux et exposent leurs parties hydrophobes à l'air. L'interaction avec les molécules voisines provoque la génération d'une couche cohésive viscoélastique à la surface, ce qui rend improbable la désorption des protéines et stabilise la mousse (**Clark et al., 1989**).

### **II-1-3 – 3. Effet des stabilisants**

D'après **Tirard-collet, (1996)**, les stabilisants sont des hypocycloïdes c'est-à-dire des polymères qui se dispersent dans l'eau et qui ont comme principale propriété d'absorber une partie importante de l'eau libre. Certains sont des polysaccharides ou dérivés, d'autres sont des protéines ou des aminés. Ces hypocycloïdes (longues molécules linéaires) vont se déplier, s'hydrater et construire un réseau qui détruit la mobilité de peau restante et donc épaissir le système (eau, stabilisant).

Comme pour les émulsions, la stabilisation à long terme d'un produit foisonné nécessite l'adjonction d'agents texturants ; leur fonction peut être d'augmenter la viscosité « agent viscosifiant » ou le caractère élastique (« agent gélifiant ») de la phase continue ; En pratique, il s'agit de biopolymères tels que la gélatine, mais aussi de polysaccharides (**dickinson, E, 1996 ; Mathieu, J, 1998**).

L'addition de stabilisants, tels que les polysaccharides, dans la formulation augmente la viscosité de la phase aqueuse des mix et permet de limiter après foisonnement, le phénomène de drainage des mousses (**Vega et al., 2005**).

### **II-1-3 – 4. Effet de la matière grasse**

La présence de la matière grasse dans une crème glacée présente de nombreux avantages tels que la réduction de la vitesse de foisonnement, et la stabilisation de la mousse, (**Boutonnier, 2001**).

L'amélioration de la texture du corps et de la saveur du produit fini, ainsi que l'accroissement de la valeur énergétique... (**Boutonnier, 2001**).

La matière grasse est connue pour avoir un effet déstabilisant sur le foisonnement lorsqu'elle est présente en faible quantité, par exemple dans les génoises grasses ou la crème allégée fouettée (**Van Aken, 2001**).

Dans les émulsions plus concentrées, elle peut avoir un rôle de stabilisant par coalescence partielle. Ce phénomène se traduit par une agglomération de globules gras

(McClements, D.J, 1999 ; Van Aken, 2001) qui gardent leur individualité, mais sont liés les uns aux autres par la fusion irréversible de cristaux localisés aux interfaces H/E (McClements, D.J, 1999 ; Van Aken, 2001). De plus, la capacité à stabiliser les bulles de la matière grasse dépend de son état (degré de cristallisation, formes allotropiques...) (McClements, D.J, 1999 ; Riaublanc, A et al., 2005).

#### II-1-4 : Effets des conditions de procédé

Refroidissement, cisaillement et foisonnement simultanés sont les trois conditions nécessaires pour la déstabilisation de la matière grasse (Goff, 1997a ; Koxholt, 2001).

La température du procédé de congélation doit être contrôlée car elle détermine le ratio liquide/solide de la matière grasse (Goff, 1997b). Les protubérances cristallines observées dans les globules gras à basse température pourraient pénétrer les films de globules voisins et provoquer l'agrégation (Goff, 1997a). Kokubo (1994) observa ainsi que les basses températures fragilisaient la membrane des globules gras. De plus, si la température de sortie du foisonneur-congélateur diminue, la phase non-congelée où se trouvent les globules devient très concentrée, ce qui favorise les interactions entre eux (Gelin *et al.*, 1994 ; Sakurai *et al.*, 1996), d'autre part les nombreux cristaux créés contribuent au cisaillement des globules (Goff, 1997a).

### Etape 2 : Foisonnement

#### II-2-1- Définition

Selon Dudez *et al.*, (2017), le foisonnement consiste à aérer le mix afin de lui donner juste avant la congélation, une structure de type mousse. On obtient :

- Soit par l'incorporation d'air au-dessus du mélange et l'activité modérée d'un racleur rotatif, c'est ce que permet une turbine discontinue ou sorbetière.
- Soit par l'injection d'air en continu grâce à une pompe et l'activité intense d'un batteur rotatif, c'est ce que permet un freezer continu -Une dispersion biphasique est appelée "mousse" si la phase dispersée dans la phase continue liquide est un gaz. Pour qu'une mousse soit durablement stable.

La phase continue doit contenir des agents moussants ou surfactants pour stabiliser l'interface des bulles (Helier et Kuntamukkula, 1987). Les nombreux bienfaits des bulles, comme la procuration d'une texture agréable et légère ou la certitude d'absence de calories, font



souvent oublier au consommateur qu'il paye de l'air en achetant du pain ou de la crème glacée, qui peut contenir jusqu'à 50% d'air en volume (**Campbell et Mougeot, 1999**).

Cette opération, qui se déroule au freezer consiste à injecter de l'air filtré sous pression, se réalise avec un débit régulé automatiquement de façon à maîtriser le taux de foisonnement et par conséquent la masse volumique du produit fini (**Boutonnier, 2001**).

D'après **Narchi, (2009)**, lors de l'étape d'aération au cours de laquelle une phase gaz est dispersée dans l'aliment, les interactions complexes entre ces variables et paramètres permettent de définir un large panel de microstructures, c'est-à-dire d'organisations des ingrédients aux échelles moléculaires et microscopiques, qui vont régir des propriétés fondamentales de l'aliment, telles que sa stabilité dans le temps, sa tenue en bouche, ainsi que la libération des arômes lors de sa consommation.

### **II-2-2 : Les procédés de foisonnement**

Différents moyens mécaniques de dispersion sont décrits dans la littérature : des batteurs de type ménager (**van Aken, 2001 ; Segall et al., 2002**), des pilotes de type rotor-stator (**Hanselmann et Windhab, 1999, Müller-Fischer et coll., 2005 ; Balerin et al., 2007 ; Indrawati et al., 2008**), des pilotes de type échangeur à surface raclée (**González-Méndez et al., 1993, Djelveh et al., 1994, 1998 et 1999**). Le type de système de dispersion doit être choisi en fonction de la microstructure désirée pour la mousse (**Issa narchi, 2008**).

L'énergie mécanique transmise par l'agitateur permet de vaincre les forces de cohésion (notamment la tension de surface) et d'augmenter considérablement l'aire interfaciale gaz liquide (**Narchi, 2008**).

Il y a deux principales catégories d'équipements industriels pour la réalisation de l'opération foisonnement (**Narchi, 2008**) :

- une production en batch ou discontinu qui correspond au battage ;
- une opération en continue utilisant l'injection de l'air

#### **II-2-2-1 : Les procédés discontinus ou en « batch »**

Le foisonnement en batch est une méthode de production de mousse dans un récipient ouvert à pression atmosphérique ou dans une cuve fermée à haute pression, en injectant du gaz ou en l'aspirant par le ciel (**Gilles Mary, 2011**). Elle est peu satisfaisante car dans ces

conditions, il est difficile de maîtriser la quantité d'air incorporé dans la phase continue et elle repose sur la maîtrise de la durée de foisonnement (**Bimbenet et Trystram, 1992**).

Cette quantité d'air augmente de façon continue jusqu'à un volume maximal de mousse qui dépend de la formulation utilisée et des conditions opératoires (**Gilles Mary, 2011**).

**Van Aken (2001)** montre que la vitesse de battage influe sur la formation de la mousse. Une vitesse optimale est requise pour que les premières bulles d'air apparaissent et plus la vitesse de battage est élevée, plus la mousse est formée rapidement et a une viscosité élevée (**Gilles Mary, 2011**).

La quantité d'air incorporée est liée à la géométrie de l'appareil, aux propriétés physicochimiques du produit subissant l'aération et au temps de battage (**Prins, 1988**).

A chaque instant, au cours de l'opération de foisonnement, la fraction volumique de gaz incorporé et la distribution de taille des bulles dépend d'un équilibre entre les taux d'entraînement et de désentraînement du gaz au niveau de l'interface entre l'espace de tête et la phase continue (**Campbell et Mougeot, 1999**).

La pression de l'air au niveau de l'espace de tête, la vitesse de rotation du fouet et le temps de battage sont les paramètres clés qui contrôlent la qualité finale de la mousse produite (**Gilles Mary, 2011**).

L'augmentation de la pression au niveau de l'espace de tête permet souvent de réduire le temps nécessaire pour atteindre le taux d'incorporation visé (**Massey et al., 2001 ; Cullen, 2009**).

Dans l'alimentaire, les systèmes de foisonnement discontinus sont souvent utilisés pour l'élaboration de faibles quantités de produits (productions artisanales) (**Narchi, 2008**).

### **II-2-2-2 : Les procédés continus**

Dans l'industrie, deux principaux types de dispositifs sont utilisés pour la conduite de l'opération de foisonnement en continu : l'échangeur à surface raclée et le foisonneur rotorstator à dents (**Narchi, 2008**).

#### **II-2-2-2-a : Echangeur a surface raclée**

Les ESR s ont permis le passage en continu et l'automatisation des procédés et remplacé progressivement les cuves de refroidissement et les cuiseurs traditionnels (**Härröd, 1986**).

Malgré l'importance du foisonnement de la crème glacée, l'utilisation des ESR s comme foisonneur industriel est restée en retrait par rapport aux systèmes rotor-stator à dents, bien que leur aptitude à produire des émulsions foisonnées ait été démontrée dans de nombreux cas, tels que ceux des mousses de foie de volailles et de poissons (González Méndez, 1990 ; 1993), de fruits et de légumes, voire même de toppings de desserts lactés (Labbafi *et al.*, 2005).

Le rôle des ESR est dans le domaine du transfert thermique dans la plupart des industries de transformation, y compris l'alimentaire (Narchi, 2008).

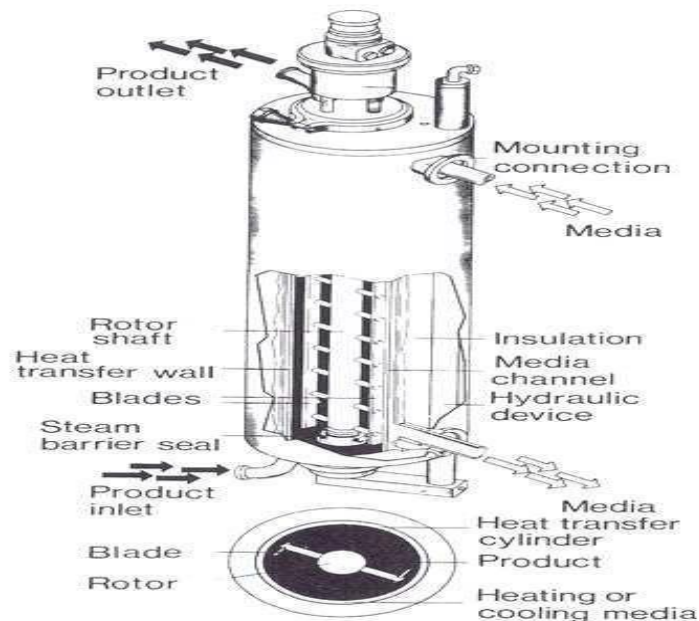


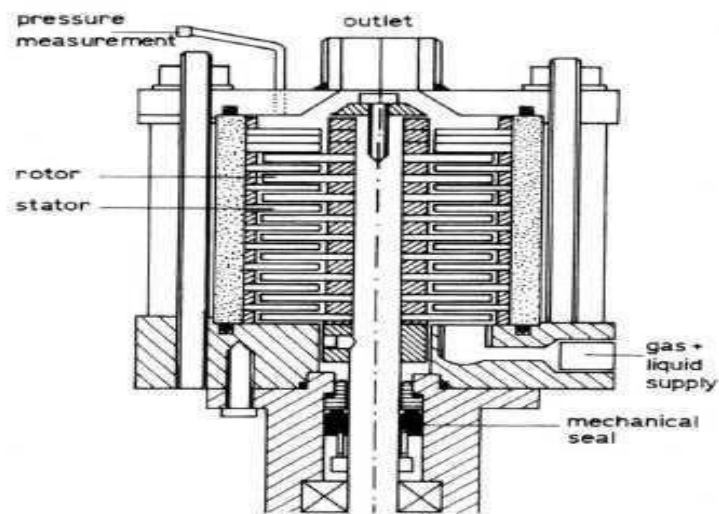
Figure 5 : Schéma descriptif d'un échangeur à surface raclée (Härröd, 1986)

#### II-2-2-2-b : Système rotor-stator à dents

Ce sont les systèmes les plus répandus dans l'industrie pour la réalisation de l'opération unitaire de foisonnement (agro-alimentaire, textile, revêtements...). Différents équipementiers tels que Kinematica (Müller-Fischer *et al.*, 2007b), Haas- Mandomix (Kroezen et Wassink, 1986; Hanselmann et Windhab, 1998 ; Balerin *et al.*, 2007).

On trouve également des colonnes de foisonnement développées par certains laboratoires dans le but d'étudier l'opération de foisonnement (Djelveh *et al.*, 1994 ; Djelveh & Gros, 1995 ; Mezdour *et al.*, 2008 ; Thakur *et al.*, 2003b).

Les unités rotor-stator radiales sont les systèmes plus répandus pour la production en continu de mousses dans l'industrie agroalimentaire (Narchi, 2008).



**Figure 6** : Représentation schématique d'un dispositif rotor-stator Haas Mondomix Netherlands (Kroezen et al., 1988)

### II-2-3- Définition et propriétés d'une mousse

Selon Gilles Mary, (2011), une mousse se définit comme une structure biphasique où l'une des deux phases, le gaz, est dispersée sous forme de bulles dans une phase continue. Les éléments de base d'une mousse sont les bulles et les films liquides, stabilisés par des tensioactifs pouvant être des petites molécules de type émulsifiant ou des macromolécules telles que des protéines. Du fait de leur contenu en gaz, les mousses ont une très faible densité et sont compressibles.

De plus, cette structure composite confère aux mousses des propriétés (thermiques, mécaniques, organoleptiques...) que les éléments liquides et gazeux pris séparément ne possèdent pas (Choplin et Salager, 2008).

Par essence, une mousse se trouve toujours dans un état métastable, c'est-à-dire instable sous l'angle thermodynamique (Prins, 1988). Sa durée de vie peut être modulée en ayant recours à des adjuvant physico-chimiques (stabilisation de l'interface et/ou gélification de la matrice par le biais de la formulation) adaptés aux technologies utilisées (foisonnement, cycle pression/détente, température...) (Gilles Mary, 2011).

Cette adaptation des formulations aux technologies ne fait que retarder le retour à l'équilibre, c'est-à-dire à la démixtion de la phase gazeuse, marquée par l'affaissement de la mousse (**Gilles Mary, 2011**).

Les mousses alimentaires constituent un sous-ensemble des aliments connus sous la dénomination de produit foisonné ou produit aéré (**Dickinson, E, 1996 ; Campbell, G et Mougeot, E, 1999**).

Les propriétés des mousses dépendent largement de leur microstructure, de leur teneur en gaz (taux de foisonnement ou fraction volumique de gaz) et également de la taille et la distribution des tailles de bulles (**Stanley et al., 1996**).

La présence du gaz induit une meilleure sensation dans la bouche et développe de nouvelles propriétés de texture : légèreté et tartinabilité (**Campbell et al., 1999**).

Généralement deux propriétés principales sont évaluées dans les mousses (**Dickinson, 1989 ; Le Mes te et al., 1990 ; Huang et al., 1997 ; Raymundo et al., 1998**) :

1. **La capacité de foisonnement** : la capacité de la phase continue de retenir l'air et développer le volume de mousse, et des substances tensioactives d'adsorber et stabiliser l'interface.
2. **La stabilité** : la résistance à l'écoulement gravitationnel du liquide se trouvant entre les bulles (drainage), à la perte de volume et à la coalescence des bulles.

#### **II-2-4- Formation d'une mousse**

La fabrication d'une mousse suppose la dispersion de gaz dans la phase continue dans la fabrication industrielle de la crème glacée, ce processus a lieu dans l'échangeur de chaleur à surface raclée, d'habitude en régime laminaire avec cisaillement important et haute viscosité de la phase continue, ce qui favorise la formation de petites bulles d'air, bien que cela exige de très grandes quantités d'énergie (**Djelveh et al., 1995a**). Quand l'air est introduit dans le mix, les bulles sont rapidement entourées par une membrane de protéines adsorbées, composée principalement de « caséine, a-lactalbumine et lactoglobuline » (**Stainsby, 1986 ; Madden, 1989 ; Goff, 1997a**).

La taille et la distribution des bulles au sein de la phase continue qui définissent la microstructure de la mousse et la stabilité du produit foisonné au cours du temps qui sont en rapport direct avec la qualité finale de la mousse (**Narchi, 2008**).

Les mousses peuvent être fabriquées par diverses méthodes qui se veulent « standard »: par battage avec des batteurs domestiques (**Phillips et al., 1990**), ou par agitation (**Huang et al., 1997**), ou par bullage. Ce dernier consiste à injecter de l'air par la base d'une colonne contenant la solution de phase continue (**Le Mes te et al., 1990 ; Guillerme et al., 1993**).

### II-2-5 : Rhéologie des mousses

L'air confère à la crème glacée le caractère moelleux et la texture légère qui plaît tant aux consommateurs ; Cette "spongiosité" ressentie est une conséquence de la réponse mécanique et thermique du produit dans la bouche (**Bruno ; Montes, 2002**).

Les facteurs qui affectent la rhéologie des mousses sont énumérés par **Helier et Kuntamukkula (1987)** :

- ✓ Le rapport taille des bulles
- ✓ La dimension de la conduite de l'écoulement
- ✓ La distribution spatiale de la taille des bulles
- ✓ Les interactions phase continue- parois (adsorption, glissement) ✓ La géométrie et le débit de l'écoulement.
- ✓ La fraction volumique de gaz ( $\phi_g$ ).
- ✓ Les propriétés des phases (masse volumique, viscosité, composition).
- ✓ La pression absolue (car les compressibilités des deux phases sont différentes).
- ✓ La nature et la concentration des surfactants.
- ✓ Les propriétés rhéologiques des interfaces.
- ✓ Les variations de structure au cours du temps (instabilités).

### II-2-6- Stabilité d'une mousse

D'après **Gilles Mary, (2011)**, les mousses, comme les émulsions, sont des systèmes à très grandes surfaces interfaciales et sont donc thermodynamiquement instables ; Leur déstabilisation est inévitable (on ne peut agir que sur la cinétique) et s'opère via différents mécanismes que sont la diffusion gazeuse, la ségrégation gravitationnelle (crémage dans le cas d'une émulsion) et la rupture du film inter facial conduisant à la coalescence. Si la plupart des mécanismes sont communs aux mousses et aux émulsions, leur importance respective diffère selon le système considéré.

La stabilité d'une mousse est favorisée par une faible teneur en phase dispersée, une réduction de la taille des bulles, une augmentation de la viscosité et de l'élasticité de la phase continue (**Zúñiga et Aguilera, 2008**).

Deux mécanismes interviennent dans la formation d'une mousse stable (**Windhab et Bolliger, 1995**) :

- 1) Stabilisation interfaciale (air/liquide), grâce à des molécules tensioactives (émulsifiants, protéines) ou des réseaux de globules gras agglomérés.
  
- 2) Stabilisation lamellaire (phase continue), entre bulles d'air la stabilisation se fait grâce à un réseau macromoléculaire (polysaccharides, protéines) ou des composants dispersés mais fixés dans la phase liquide (cristaux de glace).

### **II-2-7- Effet des conditions de foisonnement**

Les conditions de foisonnement, à savoir le type de foisonneur (**Labbafi et al., 2005**), la durée du foisonnement (**Van Aken, 2001**), mais aussi la température (**Stanley et al., 1996 ; Shamsi et al., 2002 ; Schorsch, 2007**) sont connus pour leurs effets sur le taux de foisonnement et la stabilité des mousses.

Une température inférieure à 10 °C est généralement recommandée pour réaliser l'opération de foisonnement, alors qu'une température plus élevée entraîne une teneur en MG liquide supérieure, ce qui est défavorable au foisonnement (**Riaublanc et al., 2005**).

## **Etape3 : Caractéristiques du produit finis**

### **II-3-1- Taux de foisonnement**

La détermination du taux de foisonnement présente de nombreuses difficultés en raison des faits suivants : (**J. PITRE et J. OBATON (1), 1968**)

- La fusion de la crème glacée le diminue très fortement et le rend instable.
- Toute pénétration dans la masse, en vue du prélèvement, ou toute pression, en vue d'introduire le prélèvement dans un récipient, le diminuent par compression.
- Il s'agit d'un produit dur et cassant à la température de garde, pâteux à la température la plus fréquente de commercialisation, dont il est de toute façon impossible de remplir correctement un récipient quelconque sans inclure des poches d'air qui viendront

augmenter artificiellement le taux de foisonnement mesuré par l'intermédiaire de la masse volumique apparente du produit.

- Il est nécessaire de connaître la masse volumique du produit initial.
- Toute modification de température fait varier le foisonnement, car il intervient sur la masse volumique des constituants et sur le pourcentage d'eau à l'état de glace. Mais ceci n'entraîne que des variations inférieures à la limite de précision des méthodes d'évaluation du taux de foisonnement.
- Les gaz occlus dans la masse solide ne peuvent en effet subir les variations de volume prévisibles d'après la loi de la dilatation des gaz.

La valeur nutritive varie en fonction du foisonnement, les glaces ayant des taux de foisonnement différents, ce sont les produits finaux de même volume prêts à être consommés (une part moyenne équivaut à 125 ml) qu'il faudra comparer pour apprécier les apports nutritifs réels.

**(Berthier 1990).**

### **II-3-2- Texture**

#### **a- Analyse d'images**

**Guillerm *et al.*, (1993)** ont pu comparer par l'analyse d'images les textures de mousses de protéines et les tailles de bulles et proposèrent leur technique comme outil complémentaire.

#### **b- Diffractométrie laser (appareil type Malvern)**

**Benabdeljalil (1996)** a utilisé un liquide dispersant qui conservait la taille et la forme des bulles, une solution de pyrophosphate de sodium (H4P207) à 0,10% et d'octylphénol 13 fois éthoxylé à 0,05%.

Dans cette solution la répulsion électrostatique entre les bulles empêchait la coalescence et l'adhésion de bulles aux parois

#### **c- Air inter faciale**

Par des mesures de réflexion de la lumière, l'aire interfaciale créée par les bulles d'air peut être estimée, et de celle-ci on peut déduire la taille moyenne des bulles et le taux de foisonnement (**Benabdeljalil, 1996**). Et la technique de microscopie (**Bruno ; Montes, 2002**). D'autres techniques plus sophistiquées comme l'imagerie par résonance magnétique se révèlent très prometteuses (**German et McCarthy, 1989 ; McCarthy et Kerr, 1998**).



### II-3-3- Stabilité dans le temps

- Mesure directe du volume de liquide drainé (**Bruno ; Montes,2002**).
- Conductimétrie, qui donne une mesure du volume de liquide drainé (**Pittia et al., 1996 ; Baniel et al, 1997**) et peut être assistée par analyse vidéo, afin de suivre les changements structurels qui accompagnent la dégradation du système (**Guillerme et al., 1993**).
- Rhéologie (**Carp et al., 1997**).

### II-3-4- Distribution spatiale du gaz

D'une manière générale, seulement l'effet de la viscosité de la matrice sur la dispersion de gaz a été étudié (**Balerin et al., 2007**), tandis que l'influence de l'élasticité de la matrice n'a suscité que peu d'attention, bien que les données de la littérature aient mis l'accent sur un effet important de l'élasticité de la matrice sur la rupture (**Flumerfelt, 1972 ; Mighri et al., 1998**) et la coalescence (**de Kee et al., 1990**) des gouttelettes dans les milieux newtoniens.

Les espèces tensioactives peuvent également modifier la rhéologie de l'interface gaz liquide en augmentant la viscosité et l'élasticité interfaciales (**Issa Narchi, 2008**).

L'opération de dispersion de gaz semble être principalement régie par la cinétique des phénomènes interfaciaux, plutôt que par la thermodynamique des interfaces (**Issa Narchi, 2008**).

Même sans agents tensioactifs, l'influence des aspects cinétiques est clairement illustrée par les résultats de **Grace (1982)** qui a observé que la rupture d'une simple gouttelette en régime laminaire nécessitait une durée minimale qui était une fonction de la vitesse de cisaillement appliqué à l'interface.

En présence d'espèces tensioactives, les principaux mécanismes sont d'une part le contrôle de la diffusion et le transport des agents tensioactifs vers et sur l'interface (**Edwards et al., 1991**), et d'autre part l'adsorption compétitive entre les protéines et les agents tensioactifs de faible poids moléculaire et la formation des réseaux interfaciaux (**Dickinson, 1992 ; Chen et Dickinson, 1995**).

### II-3-5 : Effet du foisonnement

L'air donne du caractère élastique à la crème glacée ; bien que les deux modules  $G'$  et  $G''$  augmentent avec le foisonnement, cette augmentation de l'élasticité est résultat de la prédominance de l'effet de l'air à mesure qu'il est incorporé (**Goff *et al.*, 1995**).

Mais l'air rend aussi la crème glacée plus facile à déformer (par pénétration) (**Goff *et al.*, 1995**). Ceci n'est pas contradictoire avec l'augmentation des modules viscoélastiques par le foisonnement car les tests dynamiques sont non destructifs et représentatifs de la microstructure, tandis que la pénétration est un test destructif lié à la macrostructure (**Goff *et al.*, 1995**).

## Etape 4 : Rhéologie et aspect visuel des crèmes glacées

### II-4-1- Rhéologie des crèmes glacées

La rhéologie est l'étude de l'écoulement et de la déformation de la matière. La crème glacée présente à la fois les propriétés d'un solide et d'un liquide. Elle est considérée comme une émulsion viscoélastique (**Liew *et al.*, 2001**).

Les propriétés rhéologiques de la crème glacée sont considérablement influencées par sa microstructure (**Fox et Mc Seeney, 2006**).

Elle est très complexe : elle dépend du nombre, de la taille et de la forme de la glace en suspension, de la concentration des sucres, protéines et polysaccharides, mais aussi de la température (**Clarke, 2004**)

L'étude de la rhéologie de la crème glacée commence par la connaissance de la viscosité des mix, plus elle est élevée plus l'énergie nécessaire à la congélation est importants et elle doit atteindre une valeur assez élevée pour permettre une bonne rétention d'air, en revanche, la capacité au fouettage diminue avec cette viscosité (**Roudot, 2002**).

**Shama F., Sherman P. (1966)** avancèrent que le caractère élastique provenait des bulles d'air, du réseau de cristaux de glace, et de la phase non congelée (contenant des stabilisants), et que le côté visqueux du produit était plus difficile à interpréter puisqu'il était le résultat des interactions entre les entités structurelles du produit.

La température a un grand impact sur la rhéologie de la crème glacée car la glace fond lorsque la température augmente et donc dilue la phase non congelée (**Bruno ; Montes, 2002**).

La détermination des propriétés rhéologiques des produits alimentaires est d'une grande importance car elle permet de prévoir leur comportement mécanique non seulement au cours des différentes étapes de l'élaboration de l'aliment, mais également au cours de son stockage (Scher, 2006).

#### **II-4-2- Aspect visuel des crèmes glacées**

D'après Benazouz, (1984), l'aspect visuel de la glace alimentaire joue un rôle certain dans son appétibilité, elle n'est que d'évoquer chatoyement de couleur, de forme ou d'autres compositions. La température froide, principale caractéristique de la glace par rapport aux autres aliments, est non seulement un stimulus sensoriel important ce qui est évident, mais elle influe également sur les valeurs sensorielles des modalités mécaniques et gustatives, qui résultent d'une stimulation de la cavité buccale par la texture et consistance des aliments ingérés

# ***Conclusion***

### Conclusion

Dans ce travail nous avons présenté une synthèse bibliographique abordant les principales caractéristiques des crèmes glacées. Ayant présenté dans un premier temps la composition et le procédé de fabrication des crèmes glacées ainsi que sa microbiologie et son effet sur la santé.

Nous avons traité dans le second chapitre le foisonnement, qui est la partie importante de notre travail, c'est un facteur essentiel dans la modulation de consistance des crèmes glacées. En effet, la création d'une mousse et sa caractérisation sont liés à la composition de la matière première et aux conditions de procédé qui peuvent avoir une influence sur la stabilité de la structure aérée de la crème glacée.

Par ailleurs, l'air est un constituant fondamental dans le procédé du foisonnement, qui est incorporé à débit variable dans le mix ; il contribue à une amélioration de la texture du produit fini et permet d'alléger la valeur énergétique de la crème glacée.

Nous avons dédié la dernière partie de ce chapitre à l'aspect visuel et à la rhéologie ; les propriétés rhéologiques des mousses et de la crème glacée.

La production de la crème glacée repose dans un premier temps sur une formulation appropriée, en contrôlant les propriétés physico-chimiques des ingrédients qui composent le produit et leurs rôles, et du procédé de foisonnement qui joue un rôle dans la dispersion de la phase gazeuse dans la phase continue.

La crème glacée gagne une importance toujours croissante, sa popularité auprès du consommateur s'explique par ses qualités rafraichissantes et sa grande valeur nutritive.

***Références  
bibliographiques***

### A

**A.C.F. Kuije. 1954.** A Crème glacée. Le lait. INRA Editions, 34 (338), pp.500-513.

**Ahmad T., Butt M.Z., Aadil R.M., Inam-ur-Raheem M., Bekhit A.E.D., Guimarães J.T., Balthazar C.F., Rocha R.S., Esmerino E.A., Freitas M.Q., Silva M.C., Sameen A. et Cruz A.G. 2019.** Impact of nonthermal processing on different milk enzymes. Int. J. Dairy Technol. 72 (4),pp. 481–495.

**Alvarez V.B. 2009.** Ice Cream and Related Products, in : Clark, S., Costello, M., Drake, M.A. (Ed.), The Sensory Evaluation of Dairy Products. Floyd Bodyfelt, pp.271-331

**Andreasen T. G et Nielsen H. 1998.** Ice cream and aerated desserts. Dans R. Early (ed.), The technology of dairy products, Blackie-Academic & Professional- Thomson Science., G. B., pp. 301-326.

**Aouissi A., Fouzari A. et Meziane N. (2007).** Qualité bactériologique de l'eau d'Oued Seybouse. Mémoire d'ingénieur. Université 8 Mai 1945 Guelma. 57p

### B

**Banie1 A., Fains A. et Papineau Y. 1997.** Foaming properties of egg albumen with a bubbling apparatus compared with whipping. Journal of Food Science, 62 (2) pp. 377-381.

**Balerin C., Aymard P., Ducept F., Vaslin S. et Cuvelier G. 2007.** Effect of formulation and processing factors on the properties of liquid food foams. Journal of Food Engineering, 78: 802–809

## Références bibliographiques

**Belitz H.D., Grosch W. et Schieberle P., 2009.** Food chemistry. Springer Science & Business Media

**Benabdeljalil K. (1996).** Contribution à l'étude du transfert gazeux interbulles à l'intérieur de mousses soumises au drainage gravitationnel de leurs films liquides. Thèse de doctorat. Université de Pau et des Pays de L'adour. 181 p.

**Benazzouz D. 1984.** Contrôle Bactériologique et Physico-chimique des Crèmes glacées. Mémoire d'ingénieur. I.N.A. El-Harrach, Algérie

**Berthier A.-M. 1990.** Fondre de plaisir avec les glaces. Revue laitière Française. 494 : 42.

**Bos M. A. et van Vliet, T. 2001.** Interfacial rheological properties of adsorbed protein layers and surfactants: a review. Advances in Colloid and Interface Science, 91: 437 – 471.

**Boutonnier J. L. et Tirard-collet P., 2002.** Produits laitiers glacés, in : Lapointe-Vignola, C.

**Boutonnier J-L. 2001.** Crèmes glacées, glaces et sorbets : formulation et fabrication. Technique de L'Ingénieur. 10p. (Ed.), Science et technologie du lait : transformation du lait. Presses Inter Polytechnique, Fondation de Technologie Laitière du Québec. pp. 417-442.

**Branger A., (2007).** Alimentation et processus technologiques. Educagri Editions. 293p.

**Britten M. et Lavoie L. 1992.** Foaming properties of proteins as affected by concentration. Journal of food science, 57 (5) pp. 1219-1241

**Bruno Edgar Chavez Montes. 2002.** Effets de la formulation et des conditions de foisonnement et congélation sur la rhéologie et la structure de la crème glacée. Alimentation et Nutrition. Institut National Polytechnique de Lorraine, Français. NNT : 2002INPL038N. tel-01749879

**Buchheim W. 1997.** Interfacial structures in emulsions and foams. Proceedings - 1 st International Symposium of Food Rheology and Structure, Zurich. pp. 37-39.



### C

**Campbell G. M. et Mougeot E. 1999.** Creation and characterisation of aerated food products. Trends in Food Science & Technology, 10 (9) pp. 283-296.

**Champagne C.P., da Cruz A.G., Daga M. 2018.** Strategies to improve the functionality of probiotics in supplements and foods. Curr. Opin. Food Sci. 22, 160–166.

**Carp D. J., J. Wagner G.B Bartholomai. A. M. R. P. 1997.** Rheological method for kinetics of drainage and disproportionation of soy proteins foams. Journal of Food Science, 62 (2) pp. 377-381.

**Chen J. et Dickinson E. 1995.** Protein/surfactant interfacial interactions. III: Competitive adsorption of protein + surfactant in emulsions. Colloids and surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 101, 77–85. Fig. 10. Evolution of the bubble size distribution in 2% whey proteins + 0.01% PAA glucose syrup solutions as a function of N for: (a) G/L = 10/30; (b) G/L = 20/30. 1078 I. Narchi et al. /Food Research International 40(2007)1069–1079

**Colten E. et Peters M. 2013.** Ice cream uncultivated the possibilities of ingredient pairing. In: Vega, C., Ubbink, J., van der Linden, E. (Ed.), The kitchen as laboratory: Reflections on the science of food and cooking. Columbia University Press, pp. 123-134.

**Clarck C. 2004.** The science of ice cream, Edition: The Royal Society of Chemistry.

**Choplin L. et Salager J. L. (2008).** Mousses - Formation, formulation et propriétés. Techniques de l'ingénieur.

**Cullen P. 2009.** Food Mixing: Principles and Applications. Wiley-Blackwell.

**Cruz A.G., Antunes A.E., Sousa A.L.O., Faria J.A. et Saad S.M. 2009.** Ice-cream as a probiotic food carrier. Food Res. Int. 42, 1233–1239

### *D*

- Davidaff R.-A. 2002.** Maigraine: Manifestation, Pathogenesis and management Contemporary Neurology Series (CNS). Second edition: Oxford University press.
- De Kee D., Chhabra R.P. et Dajan A. 1990.** Motion and coalescence of gas bubbles in non-Newtonian polymer solutions. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 37: 1–18
- Dickinson E. 1992.** An introduction to food colloids. Oxford (UK): Oxford
- Dickinson E. 1996.** Les Colloïdes Alimentaires, Éditions Masson, Paris,
- Djelveh G., Bacati O. et Gros J. B. 1994.** Mechanical aspects of gas dispersion in continuous foaming food processes using scraped surface heat exchangers. Journal of Food Engineering, 23: 213 – 223
- Djelveh G. et Gros J. B. 1995.** Estimation of physical properties of foamed foods using energy dissipation in scraped-surface heat exchangers. Journal of Food Engineering, 26 (1) pp. 45-56. University Press. p.207.
- Djelveh G., Gros J.B. et Cornet J.F. 1998.** Foaming process analysis for a stirred column with a narrow annular region, Chem. Eng. Sci., 53 : 3157-3160
- Djelveh G., Cornet J.F. et Gros J.B. 1999.** Combined effects of substrate and process parameters in food foaming processes, In Bubbles in food (éditeurs G.M. Campbell, C. Webb, S. Pandiello & K. Niranjana), Eagan Press, St. Paul (MN), USA. pp. 75-82,
- Dudez P., François M. et Raiffaud C. 2017.** Transformer les produits laitiers frais à la ferme : 3e édition mise à jour. Educagri Editions. 126p.

### *E*

- Everington D. W. 1991.** The special problems of freezing ice cream. Dans W. B. Bald (ed.), Food freezing: today and tomorrow. Springer-Verlag, pp. 134-142

## Références bibliographiques

**Exerowa D. et Kruglyakov P. 1998.** Foam and Foam Films, Volume 5: Theory, Experiment, Application (Studies in Interface Science). Elsevier.

### *F*

**FAO. 1995.** Le lait et les produits laitiers dans la nutrition humaine. V28. Edition Food et agriculture Organisation. : 225- 226p.

**Fehd. 2001 et Mahmud-Hossain. 2012.** Microbiological risk assessment of ice-cream. Risk Assessment Studies. Report No: 7. Food and Environmental Hygiene Department (FEHD), HKSAR. Hong Kong.

**Flume felt R.W. 1972.** Dropbreakupinsimpleshearfieldsof viscoelastic fluids. Industrial &EngineeringChemistryFundamentals, 11: 312–318.

**Fox P.F. et McSweeney P.L.H. 2006.** Advanced Dairy Chemistry. Volume 2: Lipids, chapter 12. Third edition Springer US.441.

### *G*

**Gelin J. L., Poyen L., Rizzotti R., Meste M. L., Courthaudon J. L. et Lorient D. 1996a.** Interactions between food components in ice cream. Part 1: unji-ozen emulsions. Food Hydrocolloids, 10 (4) pp. 385-393.

**Gelin J. L., Poyen L., Rizzotti R., Dacremont C., Meste M. L. et Lorient D. 1996b.** Interactions between food components in ice cre am 11 : structure-texture relationships. Journal of Texture Studies, 27 pp. 199-215.

**Gelin J. L., Poyen L., Courthaudon J. L., Meste M. L. et Lorient D. 1994.** Structural changes in oil-in-water emulsions during the manufacture of ice cream. Food Hydrocolloids, 8 (3-4) pp. 299-308.

**German J. B. et McCarthy M. J. 1989.** Stability of aqueous foams: analysis using magne tic resonance imaging. J Agric. Food Chem., 37 pp. 1321-1324.

## Références bibliographiques

- Gilles Mary. 2011.** Prise en compte des effets du produit et du procédé au cours de l'opération de foisonnement par battage en continu - Analyse dimensionnelle. Autre. AgroParisTech, Français. NNT: 2011AGPT0054. pastel-00780633
- Goff H. D. 2001.** Ice cream under control. Dairy Industries International, 66 (1) pp. 26 -30.
- Goff H. D., Verespej E. et Smith A. K. 1999.** A study of fat and air structures in ice cream. International Dairy Journal, 9 (II) pp. 817-829.
- Goff H. D. 1997a.** Colloidal aspects of ice cream- a review. International Dairy Journal, 7 pp. 363-373.
- Goff H. D. 1997b.** Instability and partial coalescence in whippable dairy emulsions. Journal of Dairy Science, 80 pp. 2620-2630.
- Goff H. D., Frelson B., Sahagian M. E., Hauber T D., Stone A. P. et Stanley D. W. 1995.** Structural development in ice cream. Dynamic rheological measurements. Journal of Texture Studies, 26 (5) pp. 517-536.
- Goff H. D., Davidson V. J. et Cappi E. 1994.** Viscosity of ice cream mix at pasteurization temperatures. Journal of Dairy Science, 77 (2207-2213).
- Goff H. D. 1993.** Interactions and contributions of stabilizers and emulsifiers to development of structure in ice cream. Dans D. Walstra (ed.), Food Colloids and Polymers: Stability and Mechanical Properties. Royal Society of Chemistry, pp. 71-74.
- González Méndez N. (1990).** Mise en œuvre d'un procédé de foisonnement en continu en échangeurs de chaleur à surface raclée. Elaboration de mousses de viande et de poisson. Thèse de doctorat de l'université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand,
- González Méndez N., Djelveh G. et Gros J.B. 1993.** Performance of scraped surface heat exchangers in foaming food processes, LWT, 26: 538-543

## Références bibliographiques

**Goral M., Kozłowicz K., Pankiewicz U., Goral D. 2018a.** Magnesium enriched lactic acid bacteria as a carrier for probiotic ice cream production. *Food Chem.* 239: 1151–1159.

**Goral M., Kozłowicz K., Pankiewicz U., Goral D., Kluza F. et Wojtowicz A. 2018b.** Impact of stabilizers on the freezing process, and physicochemical and organoleptic properties of coconut milk-based ice cream. *LWT* 92: 516–522.

**Grace H.P. 1982.** Dispersionphenomenainhighviscosityimmiscible fluid systemsandapplicationofstaticmixersasdispersiondevicesin such systems. *Chemical EngineeringCommunications*, 14: 225–277.

**Guillerme C., Loisel W., Bertrand D. et Papineau Y. 1993.** Study of foam stability by video image analysis: relationship with the quantity of liquid in the foams. *Journal of Texture Studies*, 24 pp. 287-302.

## *H*

**Hanselmann W. et Windhab E. 1999.** Flow characteristics and modelling of foam generation in a continuous rotor stator mixer, *J. Food Eng.*, 38: 393-405

**Härröd M. 1986.** Scraped surface heat exchangers. A literature survey of flow patterns, mixing effects, residence time distribution, heat transfer and power requirements, *J Food Process Eng.*, 9: 1-62

**Hartel R. W. 1996.** Ice crystallization during the manufacture of ice cream. *Trends in Food Science and Technology*, 7 (10) pp. 315-321.

**Helier J. P. et Kuntamukkula M. S. 1987.** Critical review of the foam rheology literature. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 26 (2) pp. 318-325.

**Hervé M. et Toursel P. 1997.** Stabilisants pour crèmes glacées : l'envers de la réduction des coûts. *Process*, (1126) pp. 30-31.

**Huang X. L., Catignani G. L. et Swaisgood H. E. 1997.** Micro-sclle method for determining foaming properties of prote in. *Journal of Food Science*, 62 (5) pp. 1028-1030, 1060.

## Références bibliographiques

**Hunter T. N., Pugh R. J., Franks G. V. et Jameson G. J. 2008.** The role of particles in stabilising foams and emulsions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 137: 57 – 81.

### I

**Issa Narchi. 2008.** Etude du procédé de foisonnement en continu des milieux modèles : interaction formulation-procédé sur les propriétés du produit fini. *Alimentation et Nutrition*. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2008. Français. tel-00731308).

**Indrawati L., Wang Z., Narsimhan G. et Gonzalez J. 2008.** Effect of processing parameters on foam formation using a continuous system with a mechanical whipper, *J. Food Eng.*, 88: 65-74

### J

**J. Pitre. et J. Obaton. 1968.** Etude comparative de diverses méthodes de détermination du taux de foisonnement des crèmes glacées. *Le lait*, INRA Editions, 48 (473\_474), pp.155-165. Hal-00928451

**Jean-Luc Boutonnier. 2001.** Professeur à l'École nationale des industries du lait et des biotechnologies (ENILBIO de Poligny)

### K

**Keeney P. G. 1982.** Development of frozen emulsions. *Food Technology*, 36 (11) pp. 65 70.

**Kokubo S. 1994.** Physicochemical properties of ice cream. *European Dairy Magazine*, (1) pp. 16-20.

**Koxholt M. M. R., Eisenmann B. et Hinrichs J. 2001.** Effect of the fat globule sizes on the meltdown of ice cream. *Journal of Dairy Science*, 84 (1) pp. 31-37.

**Kroezen A. B. J., Wassink J. G. et Bertlein E. 1988.** Foam generation in a rotor-stator mixer: schaumzeugung in einem rotor-stator mischer. *Chemical Engineering and Processing*, 24 : 145 – 156.

### *L*

**Labbafi M., Bouaouina H., Vial Ch., Djelveh G., Picgirard L., Casalinho J. et Schorsch C. 2005.** Impact des technologies et des conditions opératoires du foisonnement sur l'élaboration de mousses laitières de type « topping », *Sci Aliments*, 25 : 381-395

**Le-Meste M., B. Colas ; C. S. B., Closs J-L. et Courthaudon D. Lorient 1990.**

Contribution of protein flexibility to the properties tease in. *Journal of food science*, 55 (5) pp. 1445-1447.

**Leser M. E. et Michel M. 1999.** Aerated milk prote in emulsions - new microstructural aspects. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 4 (3) pp. 239 244.

**LIEW MYB., GHAZALI H.M., YAZID A.M and LAI O.M. 2001.** Rheological properties of ice cream emulsion prepared from lipase-catalized trances terified palm kernel olein: anhydrous milk fat mixture. Faculty of Food Science and Biotechnology University Putra Malaysia Palm, Oil Research Institute of Malaysia Agriculture Research and development Institute.

**Louis Bourgoïn. 1924.** La fabrication industrielle de la crème glacée (Icecream). *Le lait*, INRA Editions, 4 (33), pp.177-188.

**Luquet F M. 1990.** Laits et produits laitiers : Vache, Brebis, Chèvre, 2e édition : les Produits laitiers, transformation set technologie, Edition Tec-Doc Lavoisier. 505,507.

### *M*

**Massey A., Khare A. et Niranjana K. 2001.** Air inclusion into a model cake batter using a pressure whisk: Development of gas hold-up and bubble size distribution.

*Journal of Food Science*, 66: 1152–1157.

**Madden J. K. 1989.** Ice cream. Dans A. J. Wilson (ed.), *Foams: physics, chemistry and structure*. SpringerVerlag, pp. 185-196.

## Références bibliographiques

**Mahaut H., Jeantet R., Brulet G., Schuck P. et Croguennec T. 2008.** Les produits laitiers, 2e Edition : Tec-Doc Lavoisier : 87, 88, 89, 99,100.

**Marshall R. T. et Arbuckle W. S. 1996.** ice cream. 5 ed., Chapman & Hall, New York

**Marshall R.T. 2001.** Frozen Desserts, in: Marth, E. H., Steele, J. (Ed.). applied dairy microbiology. CRC Press, pp. 93-126.

**Mathieu J.1998.** *Initiation à la Physicochimie du Lait*, Lavoisier, Paris

**McCarthy K. L., Kerr W. L. 1998.** Rheological characterization of a model suspension during pipe flow using MRI. Journal of Food Engineering, 37 (1) pp. 11-23.

**McClements D.J. 1999.** Food emulsions: Principles, Practice and Techniques, CRC Press, Boca Raton,

**Mezdour S., Balerin C., Aymard P., Cuvelier G. et Ducept F. 2008.** Effect of the rheology of the continuous phase on foaming processes: viscosity temperature impact. In D. L. P. Grant M. Campbell, Martin G. Scanlon (Ed.), Bubbles in food 2 chapter 18: pp. 175 – 18.

**Mighri F., Carreau P.J., &Aji A. 1998.** Influence of elastic properties on drop deformation and breakup in shear flow. Journal of Rheology, 45, 227–236.

**Moore L. J. et Shoemaker C. F. 1981.** Sensory textural properties of stabilized ice cream . Journal of Food Science, 46 (2) pp. 399-402, 409.

**Müller-Fischer N. et Windhab E.J. 20055.** Influence of process parameters on microstructure of food foam whipped in a rotor-stator device within a wide static pressure range, Coll. Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects, 263: 353-362

**Murray B. S. 2007.** Stabilization of bubbles and foams. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 12: 232 – 241.



### *N*

**Narchi I. 2009.** Etude du procédé de foisonnement en continu des milieux modèles : Interaction formulation-procédé sur les propriétés du produit fini. Contexte de l'étude de Doctorat de Génie Alimentaire, Ecole doctorale Sciences de la Vie et de la Santé.

**Ndayo-Wouafo M. (1994).** Qualités microbiologiques des glaces et des crèmes glacées produites dans deux métropoles du Cameroun : Douala et Yaoundé. Université des sciences et technologies de Lille. 111p.

### *P*

**Patton S. 2004. Milk:** Its Remarkable Contribution to Human Health and Well-Being. Transaction Publishers.

**Pashley R., Karaman k. 2005.** Applied colloid and surface chemistry

**Pelan B. M. C., Watts K. M., Campbell I. J. et Lips A. 1997.** The stability of aerated milk prote in emulsions in the presence of small molecule surfactants. Journal of dairy Science, 80 (10) pp. 2631-2638.

**Phillips L. G., Hawks S. E. et German J. B. 1995.** Structural characteristics and foaming properties of lacto globulin: effects of shear rate and temperature. J of Agricultural and food chemistry, 43 (3) pp. 613-619.

**Pittia P., Wilde P. J. et Clark D. C. (1996).** The foaming properties of native and pressure treated {3-casein. Food Hydrocolloids, 10 (3) pp. 335-342.

## Références bibliographiques

**Prins A. 1988.** Principles of foam stability. Advances in food emulsions and foams, pp. 91–122.

**Prins A. 1999.** Stagnant surface behaviour and its effect on foam and film stability. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 149, 467 – 473.

**Pilhofer, G.M., Lee, H.C., McCarthy, M.J., Tong, P.S., German, B.J. 1994.** Functionality of milk fat in foam formation and stability, J. Dairy Sci., 77: 55-63.

## R

**Riaublanc A., Anton M., Mariette F., George C., Gravier E., Drelon N., Omari A. et**

**Leal- Calderon F. 5005.** Impact des cristaux de matière grasse sur l’aptitude au foisonnement et la stabilité des émulsions laitières foisonnées, Sci. Aliments, 25 : 427-441

**RODOT A.C. 2002.** Rhéologie et analyse de la texture des aliments. Edition Techniques et Documentation.

**Russell A., Gerrard A. 1996.** A colet con~tort. The Chemical Engineer, (613) pp. 15 17.

## S

**Shama F., Sherman P. 1966.** The texture ice cream 2. Rheological properties of frozen ice cream. Journal of Food Science, 31 pp. 699-706.

**Sakurai K., Kokubo S., Hakamata K. 1996.** Effect of production conditions on ice cream melting resistance and hardness. Milchwissenschaft, 51 (8) pp. 451-454.

**Schmidt K. A., Smith D. E. 1989.** Effects on varying homogenization pressure on the physical properties of vanilla ice cream. Journal of Dairy Science, 72 (2) pp. 378-384.

**Schorsch C., 2007.** Formulation des mousses laitières. Tech. Ing., *article [J 2 268]*.

## Références bibliographiques

- Shamsi K., Che Man Y.B., Yusoff M.S.A. et Jinap S., 2002.** A comparative study of dairy whipping cream and palm oil-based whipping cream in terms of FA composition and foam stability. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, **79**(6), 583-588.
- Scher J., 2006.** Rhéologie, texture et texturation des produits alimentaires. *Tech. Ing.*, article [F 3 330].
- Sherman P. 1966.** The texture ice cream 3. Rheological properties of mix and melted ice cream. *Journal of Food Science*, 31 pp. 707-716.
- SOUKOULIS C., LEBESI D. et TZIA C., 2008.** Enrichment of ice cream with dietary fiber: Effects on rheological properties, ice crystallization and glass transition phenomena. *Food Chemistry*. Volume 115, Issue 2, 15 July 2009. Edition Elsevier: 665- 671.
- Stains G. 1986.** Foaming and emulsification. Dans J. R. Mitchell and D. A. Ledward (ed.), *functional properties of food molecules*. Elsevier Applied Science Publishers LTD, England, pp.
- Stanley D.W., Goff H.D. et Smith A.K., 1996.** Texture-structure relationship in foamed dairy emulsions. *Food Res. Int.*, 29(1), 1-13.
- Syrbe A., Bauer, W., Klostermeyer H. 1998.** Polymer science concepts in dairy systems. An overview of milk proteins and food hydrocolloids interaction, *Int. Dairy J.*, 8, 179-193.

## T

- Thakur R.K., Vial Ch. et Djelveh G. 2003a.** Influence of operating conditions and impeller design on the continuous manufacturing of foam food, *J Food Eng*, 60: 9-20
- Thakur R.K., Vial Ch. et Djelveh G. 2003b.** Foaming of commercial grade food products in a continuous stirred column, *Chem Eng Res Des*, **81**, 1083-1089
- Thomas E. L. 1981.** Structure and properties of ice cream emulsions. *Food Technology*, 35 (1) pp. 41-48

## Références bibliographiques

**TIRARD-COLLET P. 1996.** La Technologie des desserts congelés. Institut de technologie agro-alimentaire de Saint-Hyacinthe et le centre d'Innovation Technologique Agroalimentaire

### V

**Van Aken G.A. 2001.** Aeration of emulsions by whipping. *Colloids Surf., A*, 190, 333-354.

**Vega C., Dagleish D.G. et Goff H.D. 2005.** Effect of  $\kappa$ -carrageenan addition to dairy emulsions containing sodium caseinate and locust bean gum. *Food Hydrocolloids*, 19: 187195.

### W

**Windhab E., Boiliger S. 1995.** Combined aerator 1 freezer for ice cream manufacture. *European Dairy Magazine*, 7 (1) pp. 28-34.

### X

**Xalabarder R. 1994.** Les applications des émulsifiants. *Industries Alimentaires et Agricoles*, (9) pp. 561-562.

### Z

**Zúñiga R.N. et Aguilera J.M. 2008.** Aerated food gels: fabrication and potential applications, *Trends Food Sci. Technol.*, 19 : 176-187.

## **Résumé**

Le travail réalisé est basé sur l'importance du foisonnement qui s'agit de l'incorporation de l'air dans le produit, et son effet sur la structure de la crème glacée, dont on s'est intéressées sur les paramètres clés du foisonnement tel que la formulation et les procédés utilisés, qui conduisent à la formation d'une mousse bien onctueuse et moelleuse.

Le foisonnement joue un rôle important dans la rhéologie et la structure finale de la crème glacée.

Mots clés : foisonnement, formulation, procédés, mousse, rhéologie, crème glacée.

## **Abstract**

The work carried out is based on the importance of the expansion, which is the incorporation of air into the product, and its effect on the structure of the ice cream, of which we were interested in the key parameters of the expansion such as the formulation and the processes used, which lead to the formation of a very smooth and soft foam.

The expansion plays an important role in the rheology and the final structure of the ice cream.

Keywords: expansion, formulation, processes, foam, rheology, ice cream.