

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A. MIRA – BEJAIA

Faculté de Technologie

Département de Génie des procédés



Mémoire de Fin de Cycle

En vue de l'obtention du diplôme de master en Génie des procédés

Spécialité : Génie Alimentaire

Thème

Optimisation et caractérisation d'une préparation
laitière industrielle (Yaourt brassé)

Présenté par :

AIT ABDELMALEK Karima

DJELLOULI Dyhia

Commission du jury :

Encadrant : Mr. FATMI

Président : Mr. AZZOUG

Examinatrice : Mme. CHIBANI

Année universitaire : 2020/2021

Remerciements

Au terme de ce modeste travail, nous tenons à exprimer nos remerciements les plus sincères tout d'abord au bon DIEU de nous avoir donné le courage, la santé et toute la patience qui nous ont été utiles tout au long de notre parcours.

Nos remerciements les plus spéciaux vont à Mr FATMI qui a très volontiers accepté d'être notre promoteur.

Nos profonds respects vont au président du jury Mr AZZOUG de nous avoir fait l'honneur d'évaluer notre travail.

Nous exprimons aussi nos reconnaissances à Mme CHIBANI pour avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Nos remerciements les plus sincères s'adressent à M^{lle} IGHIT, notre co-promotrice, à l'unité HAMMADITES d'elkseur, pour ses remarques pertinentes et ses précieux conseils, sans oublier l'ensemble du personnel ainsi que ceux du Laboratoire d'Analyse & Contrôle de Qualité FATMI de nous avoir bien accueilli et de nous avoir compté parmi eux.

Merci à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.



Dédicaces

Que ce travail témoigne de mes respects :

A mes **parents** :

Spéciale dédicace à l'esprit de mon père : **Malek** et ma mère : **Mima**.

Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études.

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux.

Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.

A ma sœur **Nina** et à mes frères **Mehdi** et **Badis**.

A la famille **Djellouli** et **Laloufi**.

Ils vont trouver ici l'expression de mes sentiments de respect et de reconnaissance pour le soutien qu'ils n'ont cessé de me porter.

A tous mes enseignants :

Leur générosité et leur soutien m'oblige de leurs témoigner mon profond respect et ma loyale considération.

A mes chères copines : **Karima** et **Nadjet**.

Ils vont trouver ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié infinie.

DYHIA



Dédicaces

Que ce travail témoigne de mes respects :

A mes **parents** :

Spéciale dédicace à l'esprit de mon père : **Djamel** et ma mère : **Zina**.

Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études.

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux.

Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.

A mes chères sœurs **Wassila** et **Kenza** et à mon frère **Imad** et à mon petit cousin **Samy** et mes petits neveux : **Islam** et **Racim**.

A la famille **Ait Abdelmalek** et **Kara**.

Ils vont trouver ici l'expression de mes sentiments de respect et de reconnaissance pour le soutien qu'ils n'ont cessé de me porter.

A tous mes enseignants :

Leur générosité et leur soutien m'oblige de leurs témoigner mon profond respect et ma loyale considération.

A ma chère binôme : **Dyhia**

Ils vont trouver ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié infinie.

KARIMA

Figure 1	Streptococcus Thermophilus	11
Figure 2	Lactobacillus bulgaricus.	11
Figure 3	Diagramme de fabrication du yaourt brassé.	17
Figure 4	Eléments indispensables à toute optimisation.	26
Figure 5	Déroulement d'une optimisation	28
Figure 6	Logo de l'entreprise LES HAMMADITES.	31
Figure 7	Technique de recherche et dénombrement des Salmonelles dans le produit fini.	39
Figure 8	Les réponses mesurées et prédites relatif à l'EST des échantillons.	42
Figure 9	Les réponses mesurées et prédites relatif à la viscosité des échantillons.	43
Figure 10	Coefficients et variables de l'équation mathématique.	44
Figure 11	Estimation des coefficients du modèle relatif à l'EST.	44
Figure 12	Etude graphique des effets de la réponse Y ₁ [EST].	45
Figure 13	Estimation des coefficients du modèle relatif à la Viscosité.	45
Figure 14	Etude graphique des effets de la réponse Y ₂ [Viscosité].	46
Figure 15	Représentation graphique des effets relatifs à l'EST et la viscosité du yaourt produit selon le plan factoriel.	46
Figure 16	Surface de réponse de la PDL et d'amidon sur l'EST du yaourt.	47
Figure 17	Surface de réponse de la PDL et d'amidon sur la viscosité du yaourt.	47
Figure 18	Courbe de régression linéaire relative à l'EST du yaourt.	48
Figure 19	Histogramme représentatif des EST et ESD des échantillons.	50
Figure 20	Histogramme représentatif des viscosités des échantillons.	51
Figure 21	Valeur de la formule optimale.	51
Figure 22	Histogramme représentatif des viscosités de la formule optimale, Danone et Soummam.	53
Figure 23	Les résultats de dégustation concernant l'odeur.	54
Figure 24	Les résultats de dégustation concernant la couleur.	55
Figure 25	Les résultats de dégustation concernant la texture.	55
Figure 26	Les résultats de dégustation concernant le goût.	56

Tableau 1	Composition générale du lait de vache.	3
Tableau 2	Composition du lait de vache (données au litre).	4
Tableau 3	Paramètres physico-chimiques du lait.	4
Tableau 4	Caractéristiques de streptococcus Thermophilus.	11
Tableau 5	Caractéristiques de Lactobacillus bulgaricus.	11
Tableau 6	Différents types du yaourt et leurs caractéristiques.	13
Tableau 7	Principaux défauts de goût (A), de texture (B) et d'apparence (C) rencontrés dans la fabrication des yaourts.	20
Tableau 8	Normes microbiologiques pour les yaourts.	22
Tableau 9	Matrice d'expérience.	32
Tableau 10	Analyses microbiologiques effectuées sur les produits obtenus.	35
Tableau 11	Matrice d'essai et résultats obtenus.	41
Tableau 12	Résultats d'analyses physico-chimiques des essais de fabrication du yaourt.	49
Tableau 13	Résultats d'analyses physico-chimiques du produit fini.	52
Tableau 14	Résultats des analyses microbiologiques du produit fini.	53

JORA : Journal Officiel de la République Algérienne

pH : Potentiel Hydrogene

°D : Degré Dornic

MGLA : Matière grasse laitière anhydre

J.-C : Jésus Christ

FIL : Fédération Internationale du Lait.

EPS : exopolysaccharides

Lb : Lactobacillus bulgaricus

St : Streptococcus thermophilus

MG : Matière grasse

MP : Matières premières

PDL : Poudre de lait

T : Température

t : Temps

°C : Degré Celsius

h : Heure

min : Minute

DLC : Date limite de consommation

LNSP : Laboratoire National de Santé Publique

FASONORM : Organisme burkinabé de normalisation.

MSD : Matière sèche dégraissée

MPE : Méthode des plans d'expériences

MSR : Méthodologie de surface de réponse

EST : Extrait sec total

ESD : Extrait sec dégraissé

V : Volume

F.M.A.T : Flore Totale Aérobie Mésophile

PCA : *Plate Conte Agar*

VRBL : Gélose Lactosée Biliée au Cristal Violet et au Rouge neutre

OGA : Oxytetracycline glucose Agar

SM : suspension mère

TSE : Tryptone-Sel-Eau

UFC : Unité Formant Colonies

ml : millilitre

g : gramme

AFNOR : Association Française de Normalisation

Abs : Absence

% : Pourcentage



Introduction

Il est bien connu que les produits laitiers frais fermentés, comme le yaourt, sont des aliments de grande consommation dans tous les pays[1].

Avec les progrès technologiques, le yaourt apparait comme un produit laitier très digeste qui possède une grande valeur nutritionnelle et qui est apprécié pour son goût et sa texture [2]. C'est un produit consommé la plupart du temps comme un dessert, par une large tranche d'âge [3].

En 2007, en Algérie d'après une étude réalisée par l'une des plus grande entreprise Algérienne de fabrication de produits laitiers : Danone Djurdjura, a montré que la consommation moyenne de l'Algérien en yaourt oscille entre 5 et 6 kg/an, cette consommation augmente chaque année et cette hausse se justifie par la forte démographie, l'urbanisation et le pouvoir d'achat limité de la population. Mais qu'en est-il de la fabrication et de la qualité des produits fabriqués ? [3].

Bien que la fabrication et la consommation des laits fermentés remonte à l'antiquité, les progrès réalisés dans l'élaboration, la standardisation et la diversification des yaourts correspondent pour la plupart aux efforts de recherche entrepris au cours du siècle dernier. D'autant plus que toute variation de la composition de l'aliment et des procédés de fabrications entraine une modification de sa structure et de ses propriétés rhéologiques, qui déterminent largement l'acceptabilité des produits. C'est un des rôles essentiels des scientifiques que de fournir une information précise, aussi bien en amont aux fabricants qu'en aval aux consommateurs [3].

Les répercussions de ces paramètres sur la qualité hygiénique, physico-chimique, nutritionnelle et organoleptique du yaourt ont fait l'objet de nombreux travaux de par le monde qui ont montré la relation très étroite qui existe entre la nature de la matière première ainsi que les procédés technologiques utilisés pour l'obtention d'un produit élaboré répondant aux normes requises et aux exigences de plus en plus aiguisées du consommateur. L'un des moyens de relier les paramètres influençant la fabrication du yaourt et les normes exigées de qualités du produit fini est l'expression mathématique du procédé. Il s'agit d'associer des mesures classiques et des modèles mathématiques afin d'estimer et/ou de prédire les grandeurs clés caractéristiques du produit et des procédés.

Ce travail s'inscrit dans cette démarche qui a pour principal objectif de développer des modèles mathématiques capables d'optimiser et de prédire en fonction des conditions de fabrication du yaourt brassé en utilisant les plans d'expériences. En effet, une matrice de type factorielle sera réalisée, en étudiant l'effet de deux facteurs à savoir : la quantité de la poudre de lait 0 % et de l'amidon (épaississant).

Hormis l'introduction et la conclusion le manuscrit de ce travail se compose de trois chapitres principaux :

Dans ce sens, nous avons présenté dans la première partie :

- Un premier chapitre qui consiste à présenter des généralités sur le lait.
- Un second chapitre est consacré à une mise au point bibliographique sur le yaourt, la fabrication et la caractérisation du produit cible de cette étude.
- Un troisième chapitre qui présente la méthode des plans d'expériences appliquée afin d'optimiser les paramètres de fabrication du yaourt brassé.

Dans la deuxième partie sont présentés les méthodes et matériels utilisés dans le cadre du travail expérimental. A la fin les résultats sont ensuite développés et discutés.



Chapitre I : Généralités sur le lait

I.1 Définition

En 1909 le lait a été défini par le congrès international de la répression des fraudes comme suit : « Le lait est le produit intégral de la traite totale ininterrompue d'une femelle laitière bien portante, bien nourrie et non surmenée, il doit être recueilli proprement et ne pas contenir de colostrum » [4].

Selon le JORA (Journal Officiel de la République Algérienne) N° 69-1993, la dénomination lait est réservée exclusivement au produit de la sécrétion mammaire normale, obtenue par une ou plusieurs traites, sans aucune addition ni soustraction et n'ayant pas été soumis à un traitement thermique.

Le mot lait sans indication de l'espèce animale de provenance est réservé au lait de vache. Tout lait provenant d'une femelle laitière autre que la vache, doit être désigné par la dénomination (lait) suivi de l'indication de l'espèce animale dont il provient [5].

I.2. Composition et valeur nutritionnelle

Le lait est un mélange très complexe et très instable. Sa composition montre une forte proportion d'eau 87% environ. Le reste constitue l'extrait sec qui représente 130 g par litre, dont 35 à 40 g de matière grasse. Les autres composants principaux sont du lactose, des protéines et des matières minérales. Il contient aussi des vitamines, surtout les vitamines du groupe B. Vu cette composition, le lait est un produit facilement altérable, car il constitue un milieu favorable à la prolifération microbienne [6].

La composition générale du lait de vache est résumée dans le tableau 1.

Tableau 1 : Composition générale du lait de vache [7].

Constituants majeurs	Limites de variations (%)	Valeur moyenne(%)
Eau	85,5 -89,5	87,5
Matière grasse	2,9 -5,5	3,7
Protéines	2,9 -5,0	3,2
Glucides	3,6 -5,5	4,6
Minéraux	0,7 -0,9	0,8
Constituants mineurs : enzymes, vitamines, cellules diverses, gaz.		

Le lait contient la source unique de lactose dans la nature [8]. Sa présence dans le tube digestif favorise l'implantation d'une flore de putréfaction, il favorise également l'assimilation du calcium et des matières azotés.

Le lait est une source majeur de Vitamine B2, de calcium, de vitamine A et de vitamine D. Il n'est déficitaire qu'en fer et en vitamine C et dans certaines conditions en acides gras essentiels.

La valeur protéique du lait est excellente grâce à un très bon équilibre en acides aminés indispensables et à une bonne digestibilité des acides aminés.

Tableau 2 : Composition du lait de vache (données au litre) [9].

Composants	
Energie	450 kcal
Eau	900 ml
Protides	35 g
Lipides	38 g
Glucides	50 g
Dont Lactose	50 g
Calcium	1,25 g

I.3. Propriétés physico-chimiques

Les propriétés physico-chimiques du lait sont résumées dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Paramètres physico-chimiques du lait [10].

Densité du lait à 20°C	1.028 à 1.034
pH à 20°C	6.6 à 6.8
Acidité titrable (°D)	15à 17
Activité de l'eau à 20°C	0.99
Point d'ébullition (°C)	100.5
Point de congélation (°C)	-0.530 à -0.555

➤ La densité

La densité absolue du lait n'est pas une valeur constante, deux facteurs de variation opposent sa détermination :

- ✓ La concentration des éléments dissous et en suspension : la densité varie proportionnellement à cette concentration ;
- ✓ La proportion de la matière grasse : celle-ci ayant une densité absolue inférieure à 1,103 kg/dm³, donc plus un produit est gras, plus sa densité augmente [11].

Pour le lait de vache, la densité à 15°C varie de 1,028 à 1,036 avec une valeur moyenne de 1,032 [5,12, 13].

➤ Le pH

Le pH renseigne précisément sur l'état de fraîcheur du lait, il mesure la concentration d'ion H⁺ en solution. Le pH de lait frais se situe entre 6,6 et 6,8 [5].

➤ L'Acidité titrable

L'acidité titrable est exprimée conventionnellement en degré Dornic (°D). Un degré Dornic (1°D) correspond à 0.1 g d'acide lactique par litre de lait ou de lait fermenté.

En effet, il s'agit de la neutralisation par la soude des composants acides du lait en présence de phénol phtaléine comme indicateur coloré [5].

Un lait frais, lait dont le lactose n'a pas été transformé en acide lactique, s'acidifie spontanément et progressivement [14].

➤ Point d'ébullition

C'est la température atteinte lorsque la pression de la vapeur de la substance ou la solution est égale à la pression appliquée. Le point d'ébullition du lait est de 100,1 °C, il est en fonction du nombre de particules en solution, et par conséquent il augmente avec la concentration du lait et diminue avec la pression [15].

➤ Point de congélation

Le point de congélation du lait est légèrement inférieur à celui de l'eau, puisque la présence de solides solubilisés abaisse le point de congélation. Il peut varier de -0,530°C à -

0.575°C. Un point de congélation supérieur à -0,530°C permet de soupçonner une addition d'eau au lait [11].

➤ **Chaleur spécifique**

La chaleur spécifique est exprimée en nombre de calories nécessaires pour élever de 1°C la température de 1 g de substance, cette dernière est une valeur importante à connaître dans l'industrie laitière [16].

➤ **La viscosité**

Le lait est plus visqueux que l'eau grâce à la présence des constituants colloïdaux notamment, les macromolécules protéiques et la matière grasse.

La matière grasse diminue avec l'élévation de la température, à 20°C elle n'est que la moitié. La modification de la viscosité du lait peut être d'origine microbienne ou non. Le lait visqueux, d'origine non microbienne ; est dû à la présence de fibrine et de leucocytes qui passent dans le lait pendant la traite [15].

I.4. Qualité

I.4.1. Qualité organoleptique

Les propriétés organoleptiques du lait sont la couleur, l'odeur et la saveur :

a. Couleur

Le lait est d'une couleur blanche mate porcelaine, en raison de la diffusion de la lumière à travers les micelles de colloïdes. Sa richesse en matières grasses lui confère une teinte un peu jaunâtre (selon la teneur de la matière grasse en bêta-carotène) [17].

b. Odeur

Le lait est caractéristique grâce à la matière grasse qu'il contient, il fixe des odeurs animales. Ces dernières sont liées à l'ambiance de la traite, à l'alimentation de l'animal et à la conservation du lait [13].

c. Saveur

La saveur du lait varie en fonction de la température de dégustation et de l'alimentation de l'animal [13].

I.4.2. Qualité microbiologique

Le lait est un produit alimentaire très riche en nutriments. Pour cette raison, il peut favoriser la croissance de plusieurs microorganismes [18].

Les microorganismes peuvent être répartis dans le lait selon leur importance, en deux grandes classes : la flore originelle ou indigène et la flore de contamination qui est subdivisée en deux sous-classes, la flore d'altération et la flore pathogène [12].

I.4.2.1. La flore originelle ou indigène

Le lait contient peu de microorganismes lorsqu'il est prélevé dans de bonnes conditions à partir d'un animal sain (moins de 10³ germes /ml), il s'agit essentiellement de germes saprophytes du pis et des canaux galactophores : Microcoques, Streptocoques lactiques et Lactobacilles [19].

Le lait cru est protégé contre les bactéries par des substances inhibitrices appelées lacténines, avec une action de très courte durée (1 heure environ). D'autres microorganismes peuvent se trouver dans le lait lorsqu'il est issu d'un animal malade, il peut s'agir d'agents de mammite ou de germes d'infection générale, qui peuvent passer dans le lait et sont généralement pathogènes et dangereux [20].

I.4.2.2. La flore de contamination

La flore de contamination est l'ensemble des microorganismes ajoutés au lait, de la collecte jusqu'à la consommation, elle est composée de deux flores principales :

a. Flore d'altération

Selon VIGNOLA et al [12] la flore d'altération cause des défauts sensoriels et réduit la durée de conservation du lait. Les principaux genres identifiés comme flore d'altération sont *Pseudomonas sp*, *Proteus sp*, les coliformes (principalement les genres *Escherichia* et *Enterobacter*), les sporulées telles *Bacillus sp* et *Clostridium sp*, et certaines levures et moisissures.

b. Flore pathogène

D'après AIT ABDELOUAHAB et al [19], la présence de microorganismes pathogènes dans le lait peut avoir comme source : les fèces, les téguments de l'animal, sol, eau, air,

équipement de traite et de stockage du lait, insectes et l'homme. Les principaux microorganismes pathogènes associés au lait sont : *Salmonella sp*, *Staphylococcus aureus*, *Clostridium botulinum*, *Clostridium perfringens*, *Bacillus cereus*, *Escherichia coli*, etc.

I.5. Production et consommation

I.5.1. Dans le monde

La consommation mondiale de lait a augmenté de 1,8 % entre 2013 et 2016, passant d'environ 212 milliards de litres à 223 milliards de litres, dépassant ainsi l'augmentation de 1,2 % enregistrée au cours de la période 2010-2013. Cependant, l'augmentation attendue de la demande en provenance de pays tels que l'Inde, la Chine, le Moyen-Orient et l'Afrique a peu de chance d'être satisfaite par la production locale, dont la progression est plus lente.

De plus, l'offre des pays traditionnellement exportateurs de lait aura du mal à suivre le rythme de cette demande croissante, ce qui créera un écart entre l'offre et la demande dans les prochaines années. Durant cette période, les producteurs laitiers devraient continuer de jouir d'opportunités majeures de croissance. Cependant, la demande croissante pour des produits sains, nutritifs et pratiques, ainsi que la pression sur les réserves de lait et l'inévitable hausse des prix en résultant, souligne le besoin d'innover d'avantage en termes de produits [21].

I.5.2. En Algérie

Considéré à juste titre, comme un produit de base dans le modèle de consommation algérien ; le lait occupe une place importante dans la ration alimentaire de la population. Les besoins sont estimés à 3,2 milliard de litres et une consommation moyenne de l'ordre de 100 à 110 l/habitant/an. La production nationale, estimée à 1,6 milliard de litres par an, ne couvre que 40% des besoins. Le reste est importé sous forme de poudre de lait et de matière grasse laitière anhydre (MGLA) auxquels il faut rajouter d'autres ingrédients de fabrication (levains, enzymes coagulantes, arômes, etc.).

Ce déficit fait en sorte que les structures des unités de transformation étatiques et privées, fonctionnent en majeure partie grâce au traitement du lait reconstitué à partir de poudre de lait et de MGLA importées. Néanmoins, ces dernières années, des tonnages sans cesse croissants en lait collecté à travers plusieurs fermes d'élevages nationales, sont utilisés ou mélangés au lait reconstitué dans les fromageries et yaourtières [22].



Chapitre II : Généralités sur le yaourt

II.1. Historique

Originnaire d'Asie, le mot yaourt (yoghourt ou yogourt) provient de « yoghurmark » qui signifie « épaissir » [23].

Les écrits les plus anciens relatifs aux yaourts sont attribués à Pline l'Ancien, celui-ci ayant remarqué que certaines tribus savaient « épaissir le lait en une matière d'une agréable acidité ». Il existe des preuves de l'existence de produits laitiers fermentés dans un but alimentaire depuis au moins le III^e millénaire av. J.-C [24]

Dans le sillage des découvertes de Louis Pasteur sur la fermentation lactique, de nombreux chercheurs s'intéressent aux micro-organismes présents dans le lait. En 1905, le Bulgare Stamen Grigorov a découvert, la bactérie *Lactobacillus bulgaricus* qui confère l'acidité au yaourt [24].

Les yaourts et les produits fermentés frais, identifiés comme aliments bénéfiques pour la santé, sont aujourd'hui des produits de grande consommation. Ainsi, selon une enquête du Centre National Interprofessionnel de l'Economie Laitière CNIEL, la production de yaourt et d'autres laits fermentés ne cesse d'augmenter. La dynamique actuelle de ce marché oblige donc les industriels à formuler sans cesse de nouveaux produits laitiers frais [25].

II.2. Définition et réglementation

Selon le Codex Alimentarius, le yaourt est un produit laitier coagulé obtenu par la fermentation lactique grâce à *Lactobacillus delbrueckii* sous-espèce *bulgaricus* et *Streptococcus salivarius* sous espèce *thermophilus* à partir du lait frais, ainsi que du lait pasteurisé (ou concentré, partiellement écrémé, enrichi en extrait sec) avec ou sans addition de lait en poudre, poudre de lait ...). Les microorganismes doivent être viables et abondants. Les bactéries lactiques doivent êtreensemencées simultanément et trouvées vivantes dans le produit à raison d'au moins 10⁷ bactéries/g.

Lors de la mise en consommation, la quantité d'acide lactique libre contenue dans le yaourt ne doit pas être inférieure 0,8g pour 100g de produit [26].

Les critères pris en compte par le Codex Alimentarius dans la réglementation du yaourt sont les suivants [27] :

II. Généralités sur le yaourt

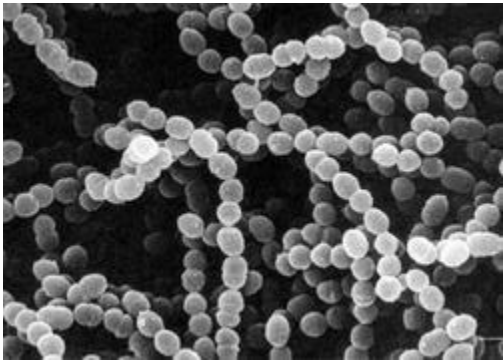
- ✓ **Dénomination du produit** : elle varie selon les langues, mais les termes les plus utilisés sont "yoghurt" ou "yoghurt "ou "yaourt".
- ✓ **Le type de produit** : il est défini souvent en fonction de teneur en matière grasse ou de l'ajout éventuelle d'ingrédients (yoghurt partiellement écrémé ou maigre, yoghurt écrémé, le yoghurt sucré et le yoghurt nature).
- ✓ **Le type de ferment utilisé** : la dénomination "yaourt" nécessite l'utilisation obligatoire et exclusive des deux ferments caractéristiques *Streptococcus thermophilus* et *Lactobacillus bulgaricus*.
- ✓ **La quantité de ferment contenue dans le produit fini** : la FIL fixe la quantité de ferments vivants, égale à 10⁷ bactéries par gamme apportés à la partie lactée jusqu'à la date limite de consommation.
- ✓ **La viabilité de la flore lactique** : flore viable pendant toute la durée de vie.
- ✓ **Ingrédients laitiers** : lait pasteurisé, congelé, écrémé, concentré, en poudre, crème et caséines, etc.
- ✓ **Ingrédients non laitiers** : une multitude d'ingrédients peut être incorporée dans le yaourt. Il peut s'agir par exemple de fruits sous différents forme (purée, jus, pulpe, sirop, etc.), de céréales, de légumes ou de sucre. La quantité d'ingrédients non laitiers est fixée par le codex alimentarius, la FIL et la plupart des pays à moins de 30% en poids du produit fini.
- ✓ **pH** : La FIL préconise une teneur de 0,7% d'acide lactique .Cette valeur est respectée dans certains pays avec une variabilité de 0,6% à 15%. Certaines normes imposent un pH inférieur à 4,5 ou 4,6.
- ✓ **Taux de matière grasse** : Il doit être minimum, inférieur à 3%(m/m) dans le cas des yaourts (nature sucre ou aromatisé) compris entre 0,5 et 3% dans le cas des yaourts partiellement écrémés et 0,5% dans les yaourts écrémés.
- ✓ **Teneur en protéines** : elle est égale à 2,8% dans le produit fini.

II.3.Bactéries caractéristiques du yaourt

II.3.1Caractéristiques générales des bactéries du yaourt

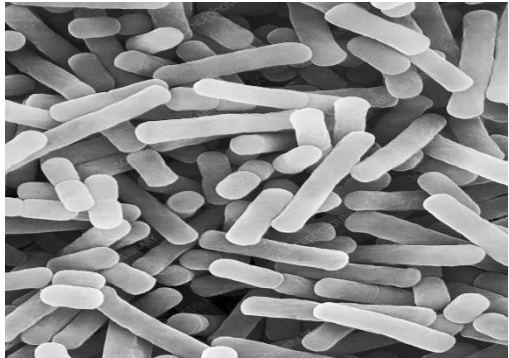
II.3.1.1 Streptococcus Thermophilus

Tableau 4 : Caractéristiques de streptococcus Thermophilus [28, 29, 30,31].

Caractéristique	Figure 1 : Streptococcus Thermophilus
<p>Cocci, Gram+, anaérobie facultative, non mobile, dépourvue d’antigène du groupe D, thermorésistante, sensible au bleu de méthylène (0.1%) et aux antibiotiques, température optimale de croissance 40-50°C, homofermentaire, fermente le lactose du lait en acide lactique, pouvoir acidifiant, augmente la viscosité du lait.</p>	

II.3.1.2 Lactobacillus bulgaricus

Tableau 5 : Caractéristiques de Lactobacillus bulgaricus [32, 33, 34, 35,36].

Caractéristique	Figure 2 : Lactobacillus bulgaricus.
<p>Bacille, Gram +, non sporulé, immobiles, bâtonnets à bords arrondis, diplobacilles ou en longues chaînes, petites formes bacillaires dans les jeunes cultures et de longs filaments dans les cultures âgées, taille de 4-6µm, se développe à 45°, GC% 49-51%</p>	

II.3.2 Intérêt et fonction des bactéries du yaourt

II.3.2.1 Activité acidifiante

La production d'acide lactique est une des principales fonctions des bactéries lactiques en technologie laitière, ce dernier permet de concentrer et de conserver la matière sèche du lait, en intervenant comme coagulant et antimicrobien [37]. L'importance de l'acide lactique durant la fabrication du yaourt peut se résumer comme suite :

- Il conduit à la formation du gel par déstabilisation des micelles des caséines ;
- Il donne au yaourt son goût distinct et caractéristique, comme il contribue à la saveur et l'aromatisation du yaourt antimicrobien [38,39].
- Il inhibe la croissance des microorganismes indésirables et pathogènes [40,41]. De ce fait, elle agit comme conservateur des produits fermentés et comme préventif des infections intestinales [42,43].

II.3.2.2 Activité protéolytique

La protéolyse se traduit par la libération de peptides et d'acides aminés qui sont d'importants substrats d'une grande variété de réactions cataboliques produisant des composés volatils essentiels à la flaveur, la texture et à la saveur [44].

Le système protéolytique permet d'une part, la dégradation des caséines du lait pour assurer leur nutrition azotée. D'autre part, il joue un rôle important dans l'industrie laitière, car il participe à la modification de la texture [45,46].

II.3.2.3 Activité aromatique

Les bactéries lactiques produisent des composés aromatiques qui participent largement au développement des caractéristiques organoleptiques des produits fermentés frais [47].

II.3.2.4 Activité texturant

Certains souches, dites épaississantes, produisent des exopolysaccharides (EPS) qui augmentent la viscosité du lait au cours de la croissance de ces germes, et améliorent ainsi la texture du yaourt [48]. Il est couramment admis que dans les laits fermentés cette fonction est exercée par *Streptococcus thermophilus* [37].

La production des EPS est un caractère très important, notamment dans la fabrication des laits fermentés. En effet ;

- Ils sont responsable de la viscosité élevée et de la texture épaisse et agréable de ces produits [49,50,51].
- Ces molécules reliées en micelles des caséines, protègent le caillé lactique contre les traitements mécaniques durant la fabrication [52,50].
- En séquestrant l'eau, il augmente le pouvoir de rétention d'eau du caillé, retardant ainsi la synérèse[53].
- Enfin, les EPS peuvent être utilisés dans l'industrie alimentaire entant qu'additifs (épaississants) [54].

II.4 Les différents types du yaourt

Il existe une très grande variété de yaourt qui diffère par leur composition chimique, leur technologie de fabrication ainsi que leur saveur. Le tableau résume les différentes catégories de yaourt.

Tableau 6 : Différents types du yaourt et leurs caractéristiques [12].

Les différents types	Caractéristiques
a) Selon la teneur en matière grasse :	
Yaourt entier	MG minimum 3%
Yaourt partiellement écrémé	MG moins de 3% et plus de 0.5%
Yaourt écrémé	MG maximale 0.5%
b) Selon la technologie de fabrication	
Yaourt étuvé ou ferme	Ce sont des yaourts nature ou aromatisé, qui ont une texture ferme à surface lisse incubé et refroidi en pot.
Yaourt brassé	Il présente une texture presque fluide, amené à une consistance crémeuse après coagulation, incubé en cuve et refroidi avant le conditionnement.
Yaourt à boire	

	Similaire au type brassé mais dont le coagulum est réduit à l'état liquide avant conditionnement.
c) Selon les additifs alimentaires	
Yaourt aromatisé	addition de l'arôme
Yaourt fruité	addition de fruit
Yaourt light	addition d'édulcorant

En technologie, trois types de yaourts, différents selon la consistance ou non du gel formé peuvent être fabriqués : yaourts liquides (ou à boire), brassé ou fermes.

Le yaourt à boire ou liquide est battu après avoir été brassé puis conditionné et stocké au froid. Le yaourt brassé est préparé en vrac. Le caillé subit un brassage puis un refroidissement, avant d'être conditionné dans des pots qui seront stockés au froid. Le yaourt ferme est conditionné en pots après mélange des ingrédients, passage à l'étuve à 45°C puis en chambre froide afin d'arrêter l'acidification [7].

II.5.Valeur nutritionnelle

Au cours de la fermentation, le lait subit un certain nombre de modifications dont certaines en font un produit de meilleures valeurs nutritionnelles et thérapeutiques [26].

Parmi ses intérêts on peut citer :

✓ **Amélioration de l'absorption du lactose**

La consommation du yaourt peut atténuer les symptômes liés à la mauvaise digestion du lactose, ceci est dû aux ferments lactiques qui synthétisent la β -galactosidase capable d'hydrolyser le lactose [55].

✓ **Amélioration de la digestibilité des protéines**

Le yaourt est deux fois plus digeste que le lait, il renferme des acides aminés libres indispensables à l'organisme. Ceci résulte de l'activité protéolytique des bactéries lactiques au cours de la fermentation du lait [26].

✓ **Activité antimicrobienne**

Les bactéries lactiques produisent des substances antimicrobiennes ; l'effet antimicrobien principal exercé par ces bactéries résulte de la production d'acides organiques principalement l'acide lactique, qui conduit à la diminution du pH. Cette baisse de pH inhibe le développement de microorganismes pathogènes et contribue à la conservation des produits laitiers fermentés [56].

En plus de l'acide lactique, les bactéries lactiques ont la capacité de synthétiser d'autres métabolites ou substances antagonistes notamment le peroxyde d'hydrogène, le diacétyle et les bactériocines.

✓ **Stimulation du système immunitaire**

Les bactéries lactiques présentent une action stimulante sur le système immunitaire de l'hôte, en agissant sur les cellules impliquées dans l'immunité spécifique ou non spécifique [57].

✓ **Action préventive contre les cancers**

De nombreuses études ont mis en évidence l'existence d'une relation entre la consommation de laits fermentés et le risque réduit du cancer. Les bactéries lactiques ont un effet inhibiteur sur la prolifération des cellules tumorales la consommation de substances procarcinogènes contenues dans l'alimentation peut être particulièrement responsable de l'initiation de tumeurs. Les nitrites utilisés en technologie alimentaire peuvent être convertis en nitrosamines qui seraient impliquées par conséquent dans la cancérogenèse colique [58].

Une diminution du taux de nitrites et de leur conversion en nitrosamines a été démontrée chez *Lactobacillus delbrueckii ssp bulgaricus* par l'action du nitrate réductase [59].

✓ **Action hypocholestérolémiant**

Le taux élevé de cholestérol dans le plasma est souvent associé à l'apparition de maladies cardio-vasculaires. L'effet des bactéries lactiques sur le métabolisme du cholestérol est controversé. Plusieurs études rapportent que le taux de cholestérol sérique diminue suite à la consommation de produits laitiers fermentés, malgré un apport alimentaire important en cholestérol. L'une des hypothèses proposée, pour expliquer cette diminution est l'absorption du cholestérol par les bactéries lactiques [60].

II.6. Qualité

II.6.1. Organoleptique

Le yaourt doit répondre aux caractéristiques suivantes :

- ✓ couleur franche et uniforme ;
- ✓ gout franc et parfum caractéristique ;
- ✓ texture homogène (pour le yaourt brassé) et ferme (yaourt étuvé).

II.6.2. Hygiénique

Selon la norme nationale de 1998, N°35 parue au Journal Officiel, les yaourts ne doivent contenir aucun germe pathogène.

Le traitement thermique appliqué sur le lait avant fabrication du yaourt est suffisant pour détruire les micro-organismes non sporulés pathogènes ou non. Leur présence dans le yaourt ne peut être que de manière accidentelle. Le pH acide du yaourt le rend hostile aux germes pathogènes, comme pour la plupart des autres germes indésirables.

Les levures et les moisissures peuvent se développer dans le yaourt. Ces dernières proviennent principalement de l'air ambiant dont la contamination se situe au stade du conditionnement [61].

II.7. Technologie de fabrication

La chaîne de fabrication du yaourt brassé suit un procédé plus-ou-moins complexe. Concernant le processus de fabrication du yaourt brassé, il est résumé par le diagramme suivant :

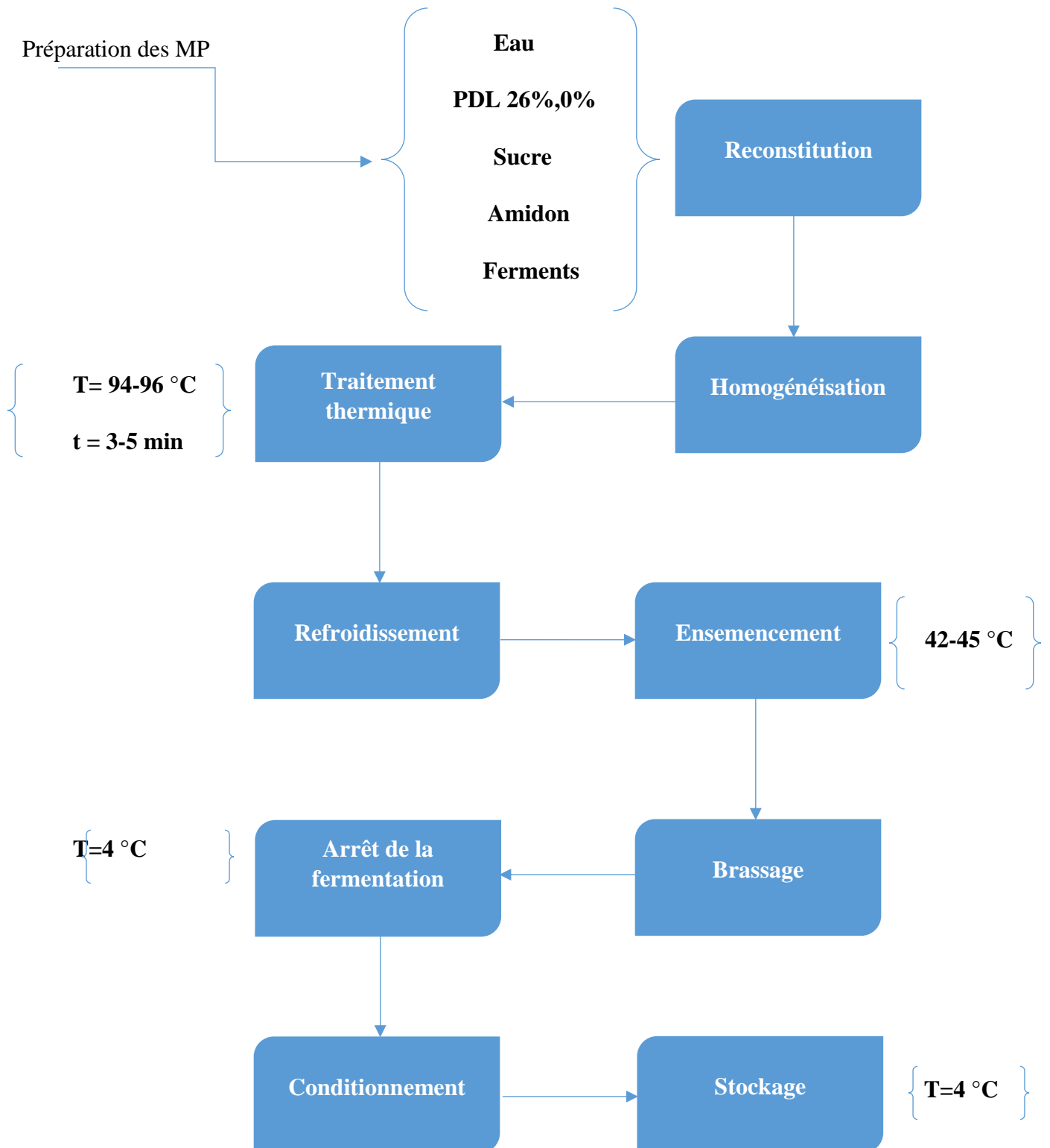


Figure 3 : Diagramme de fabrication du yaourt brassé.

II.7. 1. Préparation des matières premières

L'ensemble des matières premières : la poudre de lait, les additifs, le sucre et les arômes sont, après avoir été préalablement pesés, versés successivement dans la cuve de reconstitution ou "blender" pour y être hydratés et mélangés. De l'eau sera ajoutée à ce mélange afin de reconstituer le lait [63].

II.7. 2. Reconstitution

En fabrication du yaourt, il est nécessaire de standardiser le lait en matière grasse et de l'enrichir en matière protéique pour répondre aux spécifications nutritionnelles et organoleptique du produit [27].

Le gras joue un rôle dans la concentration en matière sèches ainsi que dans la qualité organoleptique du produit, car il a un effet sur l'onctuosité et la sensation de douceur en bouche, masque l'acidité et améliore la saveur [64].

II.7. 3. Homogénéisation

L'homogénéisation est généralement combinée avec le traitement thermique. Elle améliore la consistance du lait, accroît sa blancheur et rend les lipides plus digestes. Il donne au lait une saveur et une texture plus douce, plus onctueuse pour la même teneur en matière grasse [65].

II.7. 4. Traitement thermique

Après homogénéisation, le lait enrichi subira ensuite un traitement thermique, le plus couramment utilisé est une pasteurisation de 95 °C, pendant 5 min [5]. Ce traitement a pour but :

- De détruire les germes pathogènes et indésirables (bactéries, levures et moisissures) ;
- De favoriser le développement de la flore lactique spécifique (*Streptococcus thermophilus*) par la formation d'acide formique qui est un facteur de croissance ;
- L'amélioration de la texture de yaourt par la dénaturation de plus de 85% des protéines solubles qui se fixent ainsi sur les molécules de caséines.

II.7. 5. Refroidissement

Après le Traitement thermique, le lait recombinaé est refroidi à une température (45 °C) de développement des bactéries lactiques qui ont assurées une bonne fermentation [66].

II.7. 6. Ensemencement

Le mélange préparé est ensuite ensemencé exclusivement avec les deux bactéries lactiques du yaourt *Streptococcus thermophilus* et *Lactobacillus bulgaricus*, sous forme lyophilisée et simultanément, pour assurer une bonne acidification [67, 26].

Au niveau des tanks de maturation brassé, la fermentation s'effectue à une température de 39 °C pendant 5 à 6 h. C'est au cours de cette étape qu'une partie de lactose se transforme en acide lactique [68].

II.7. 7. Brassage

Après maturation du produit au niveau de tank de maturation brassé, ce dernier subit un d'écaillage par agitation pendant 10 min afin d'assurer une répartition homogène des ferments. Le brassage se réalise avant le refroidissement, il permet de rendre le caillé plus onctueux par la destruction du gel [26].

II.7. 8. Arrêt de la fermentation

Se fait par le refroidissement à 4 °C ; qu'est une étape critique de la production du yaourt. Il est appliqué dès que le caillé a atteint l'acidité désiré. Son but est de limiter l'activité des levains le plus rapidement possible afin d'éviter une sur acidification [66].

II.7. 9. Conditionnement

Lorsque la température optimale pour le conditionnement est atteinte, les yaourts, encore en bacs, sont acheminés de la chambre froide vers la salle de conditionnement pour être conditionnés [67]. Cette étape assure :

- La stérilisation des pots ;
- Le remplissage des pots ;
- La fermeture hermétique des pots par thermoscellage ;
- Le marquage de la date limite de consommation DLC ;
- La confection des lots.

Enfin, ils sont expédiés après analyse bactériologique et physico-chimique.

II.7. 10. Stockage

Les yaourts sont groupés par lot de vente, ils passent enfin dans les chambres froides de stockage à une température de 4 °C. Le yaourt doit être au frais, sa consommation doit intervenir avant la DLC figurant sur l'emballage. Lorsqu'un pot est ouvert, il convient de consommer son contenu rapidement pour éviter l'installation des moisissures favorisées par l'acidité [69].

II.8. Défauts et altérations du yaourt

Comme l'élaboration du yaourt fait intervenir plusieurs étapes clés où la fermentation et la formation du gel doivent être minutieusement dirigées et surveillées, il est fréquent que des altérations de goût, d'apparence et de texture (résumés dans le tableau) apparaissent et dont certaines sont préjudiciables à la qualité finale du produit[5].

Tableau 7 : Principaux défauts de goût (A), de texture (B) et d'apparence (C) rencontrés dans la fabrication des yaourts [5].

NATURE	CAUSES
Classe A	
Amertume	Trop longue conservation ; Activité protéolytique trop forte des ferments ; Contamination par des germes protéolytiques.
Goût levuré, fruité,	Contamination par des moisissures ; Fruits de mauvaises qualités pour les yaourts aux fruits.
Goût plat, absence d'arôme	Mauvaise activité des levains (déséquilibre de la flore, incubation trop courte ou à trop basse température), teneur en matière sèche trop faible
Manque d'acidité	Mauvaise activité des levains (taux d'ensemencement trop faible, incubation trop courte ou à basse température, inhibiteurs dans le lait, bactériophages).
Trop d'acidité	Mauvaise conduite de la fermentation (taux d'ensemencement trop fort, incubation trop longue ou à température trop élevée ; Refroidissement pas assez poussé, trop lent ; Conservation a trop haute température
Rancidité	Contamination par les germes lipolytiques et traitement thermique trop faible.
Goût farineux, de poudre	Poudrage trop poussé.

II. Généralités sur le yaourt

Goût oxydé	Mauvaise protection contre la lumière (pots en verre surtout) ; Présence de métaux (fer, cuivre)
Goût de cuit	Traitement thermique trop sévère.
Gout aigre	Mauvaise conduite des levains (contamination par une flore lactique sauvage–coliformes).
Goût gras	Teneur en matière grasse trop élevée
Classe B	
Déculottage	Agitation ou vibration pendant le transport faisant suite à un refroidissement mal conduit en chambre froide (pour le yaourt ferme).
Manque de fermeté (pour yaourt étuvé)	ensemencement trop faible ; Mauvaise incubation (temps et ou température trop faible) ; Agitation avant complète coagulation ; Matière sèche trop faible.
Trop liquide (pour le yaourt brassé)	Brassage trop violent ; Mauvaise incubation (temps trop faible) ; Matière sèche trop faible ; Mauvais ferments (pas assez épaississants) ; Fruits ou arômes pas assez concentrés
Trop filant	Mauvais ferment (trop filant) ; Température d'incubation trop faible
Texture sableuse	Chauffage du lait trop important ; Homogénéisation à température trop élevée ; Poudrage trop fort ; Mauvais brassage ; Acidification irrégulière et trop faible
Texture granuleuse	Mauvais brassage ; Teneur en matière grasse trop élevée ; Mauvais choix des ferments.
Classe C	
Décantation, synérèse	Suracidification ou post acidification (mauvaise conduite de la fermentation) ; Température trop élevée pendant le stockage ; Conservation trop longue ; Refroidissement trop faible ; Agitation trop poussée et admission exagérée d'air (pour le yaourt brassé) ; Mauvaise adjonction des fruits ou des pulpes de fruits Agitation des yaourts (yaourt ferme) ; Teneur en matière sèche
Production de gaz	Contamination par des levures et des coliformes.
Colonies en surface	Contamination par des levures et moisissures.

Couche de crème	Mauvaise ou absence d'homogénéisation
Produit sur le couvercle	Mauvaise manutention
Produit non homogénéisé	Mauvaise agitation (dans le cas des yaourts aux fruits)

II.9. Normes microbiologiques

Le LNSP s'appuie sur les normes FASONORM basées sur les normes françaises. Ces normes servent d'appui au contrôle et sont utilisées pour l'application des lois et règlements relatifs au contrôle des aliments. Elles imposent aux industriels une dure contrainte mais constituent le gage [5].

D'assurance qualité hygiénique et commerciale des produits. Les normes microbiologiques portant sur les germes recherchés sont mentionnées dans le tableau ci-après.

Tableau 8 : Normes microbiologiques pour les yaourts [5].

GERMES	NORMES (UFC/ g)
Bactéries lactiques	< 10 ⁸
Coliformes totaux	<10
Coliformes thermo tolérants	<1
E. coli	<10

II.10. Facteurs influant sur la qualité du yaourt

De nombreux facteurs doivent être contrôlés avec attention pendant le procédé de fabrication dans le but de produire un yaourt de haute qualité qui ait le goût, l'arôme, la viscosité, la consistance et l'apparence requis, qui ne soit pas sujet à une synérèse accrue et qui ait une longue durée de conservation [12].

➤ **Choix du lait**

Le lait destiné à la production de yaourt doit être d'une bonne qualité bactériologique. Il doit avoir une faible teneur exempte de bactéries et substances susceptibles d'empêcher le développement du levain du yaourt. Le lait ne doit pas contenir d'antibiotiques, bactériophages, résidus de solutions de nettoyage ou d'agents de stérilisation. En fin le lait doit être analysé très soigneusement à la centrale laitière.

➤ **Standardisation du lait**

La teneur du lait en matière grasse et en matière sèche est généralement standardisée suivant les normes et les principes d'usage.

➤ **Matière grasse**

Le yaourt peut avoir une teneur en matière grasse de 0 à 10%. Toutefois, le taux de matière grasse le plus courant est de 0,5 à 3,5%. En effet et suivant ce taux on peut distinguer différents types de yaourt cités précédemment.

➤ **Matière sèche**

Selon le Codex alimentarius (2004), la teneur minimale en matière sèche est de 10%. Une augmentation de la teneur totale en matière sèche, notamment du pourcentage de caséine et de protéines de lactosérum, donnera lieu à un coagulum de yaourt plus ferme et atténuera la tendance à la séparation du lactosérum. Les procédés d'ajustement de la teneur en matière sèche les plus pratiqués sont :

- ✓ Evaporation (10-20% du volume de lait est normalement évaporé) ;
- ✓ Addition de poudre de lait écrémé, habituellement jusqu'à 3% ;
- ✓ Addition de lait concentré ;
- ✓ Addition de retentât d'ultrafiltration de lait écrémé.

➤ **Additifs laitiers**

Du sucre ou des édulcorants, des stabilisateurs et des conservateurs peuvent être utilisés comme additifs dans la production de yaourt. Cet aspect sera traité ultérieurement.

➤ **Dégazage**

Le taux d'air dans le lait utilisé pour fabriquer des produits laitiers de culture en générale doit être le plus bas possible. Quelque mélange d'air est toutefois inévitable si la teneur en MSD

(MSD) est accrue par addition de poudre de lait. Le cas échéant, une phase du procédé consiste à dégazer le lait. Lorsque la teneur en M.S.D. est accrue par évaporation, le dégazage fait partie de ce procédé. Le dégazage offre les avantages suivants :

- ✓ Conditions favorables pour la fermentation ;
- ✓ Amélioration de la stabilité et de la viscosité du yaourt ;
- ✓ Élimination des goûts atypiques volatiles (désodorisation) ;
- ✓ Moins de risques d'engorgement pendant le traitement thermique.

➤ **Homogénéisation**

Le lait destiné à la production de yaourt est homogénéisé principalement pour prévenir la formation de crème pendant la période d'incubation et pour assurer une répartition homogène de la matière grasse du lait par éclatement de globule gras. L'homogénéisation améliore aussi la stabilité et la consistance du produit fini. Néanmoins l'homogénéisation peut présenter l'inconvénient de favoriser la lipolyse par libération d'acides gras.

➤ **Traitement thermique**

Le lait est soumis à un traitement thermique avant d'être inoculé avec le levain en vue de :

- ✓ Améliorer les propriétés du lait en tant que substrat pour la culture des bactéries ;
- ✓ Garantir que le coagulum du yaourt fini sera ferme ;
- ✓ Réduire le risque de séparation du lactosérum dans le produit final.

Un traitement thermique à 90-95°C et un chambrage d'environ 05 min permettent d'obtenir un résultat optimal. Cette combinaison température/temps altère environ 70-80% des protéines lactosériques. Notamment, la β -lactoglobuline, qui est la protéine lactosériques principale, interagit avec la k-caséine, contribuant ainsi à donner au yaourt un "corps" stable.

➤ **Choix de levain**

L'obtention d'un yaourt doux et aromatique avec une consistance épaisse et homogène nécessite l'utilisation d'un levain convenable, comportant des souches ayant des propriétés intéressantes. Cependant, arriver à trouver des souches rassemblant tous les paramètres technologiques désirés, n'est pas facile, puisque chaque caractéristique varie grandement d'une souche à une autre à l'intérieur d'une même espèce [70].



Chapitre III : Modélisation

III.1. Introduction à la modélisation

Un modèle peut être défini comme étant un système physique mathématique ou logique représentant les structures essentielles d'une réalité et capable d'en expliquer ou d'en reproduire dynamiquement le fonctionnement ; c'est une représentation sous une forme quelconque d'un objet, d'un processus ou d'un système [71]. Et selon la définition du National Research Council (1990), un modèle mathématique est une tentative systématique de traduire la compréhension conceptuelle d'un système réel en des termes mathématiques.

Cette expression mathématique est conçue dans un but bien défini [72,71, 73] qui peut être : la connaissance structurelle, la simulation exploratoire, l'explication des phénomènes complexes, la détermination des grandeurs non mesurées à partir de mesures indirectes, la prédiction d'un comportement et l'exploitation des connaissances, la conduite et l'optimisation d'un procédé afin d'améliorer ses performances. Ainsi, il est possible de catégoriser les modèles en fonction de leur objectif en modèles prédictifs, modèles explicatifs, modèles de stockage de la connaissance et modèles associés à l'automatique [71].

Selon la nature des connaissances introduites deux approches majeures de la modélisation peuvent être adoptées :

- L'approche empirique ou boîte noire qui permet d'établir des modèles donnant une corrélation statistique linéaire ou non entre différentes grandeurs mesurées, sans prendre en considération les phénomènes impliqués. C'est cette approche là que nous avons choisie pour mener notre étude.
- L'approche mécanistique basée sur les lois biologiques, physiques, chimiques régissant le comportement du processus considéré.

Commençons d'abord par définir quelques notions de base :

III.2. Définition des modèles

Nous nous intéressons ici aux modèles mathématiques qui représentent les relations entre les entrées et les sorties du processus par des équations. Si ces équations sont algébriques le modèle est dit statique, par contre si elles sont des équations différentielles ou des équations aux différences récurrentes le modèle est dit dynamique respectivement à temps continu ou à temps discret [75].

III. Modélisation et optimisation par les plans d'expérience

Un modèle est caractérisé par son domaine de validité c'est-à-dire par le domaine de l'espace des entrées dans lequel l'accord entre les valeurs des sorties du processus calculées par le modèle et leurs valeurs mesurées est considéré comme satisfaisant, compte tenu de l'utilisation que l'on fait du modèle [75].

III.3. Buts d'une modélisation

Un modèle peut être utilisé soit [75]. :

- ✓ Pour simuler un processus à des fins pédagogiques, de détection d'anomalies de fonctionnement, de diagnostic de pannes, de conception assistée par ordinateur, etc ;
- ✓ Pour effectuer la synthèse d'une loi de commande, ou pour être incorporé dans un dispositif de commande.

III.4.Éléments d'optimisation

Pour mener à bien une optimisation, plusieurs éléments sont indispensables et conditionnent la solution trouvée. La figure 4 présente les quatre éléments essentiels à la résolution d'un problème d'optimisation [75].

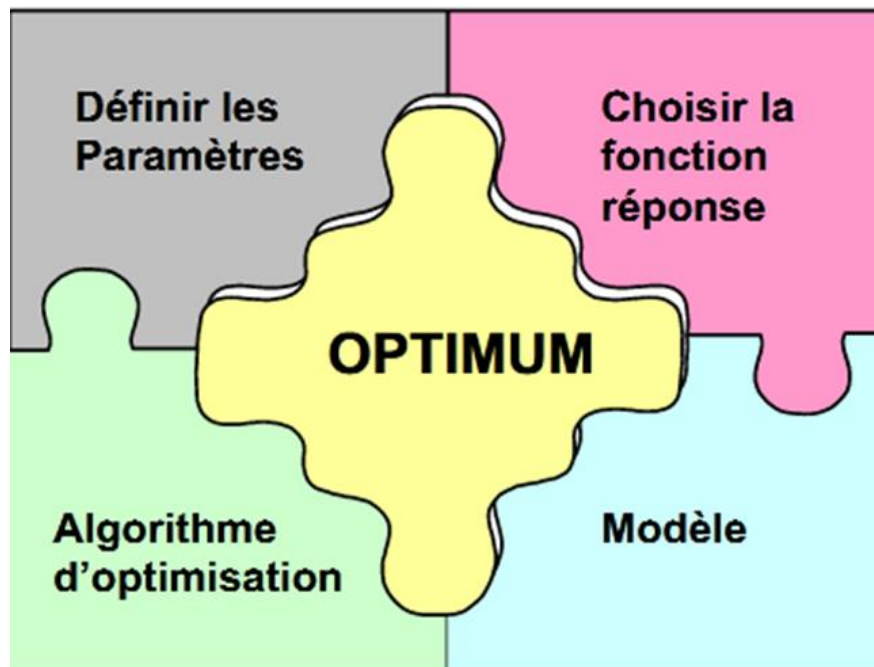


Figure 4 : Éléments indispensables à toute optimisation [75].

III. Modélisation et optimisation par les plans d'expérience

En général, un grand nombre de paramètres sont disponibles, il faut être capable de définir les paramètres utiles à l'optimisation. Certains paramètres ont une influence sur la fonction réponse, d'autres pas. Etant donné le coût des simulations, seuls les paramètres influents sont à retenir [75].

- Une **fonction réponse** définit l'objectif à atteindre. La définition de la fonction réponse est en fait le problème le plus délicat. Car le problème de conception doit être reformulé en un problème d'optimisation par l'intermédiaire de la fonction réponse. C'est elle qui est au centre de l'optimisation, c'est donc d'elle que dépend la pertinence de la solution.
- Un **modèle** précis robuste et malléable du système étudié est indispensable. Ce modèle doit être utilisable sur un domaine d'étude le plus large possible.
- Un **algorithme d'optimisation** multidimensionnel permet de trouver la solution.

III.5. Les étapes de la conception d'un modèle

La résolution d'un problème d'optimisation est itérative. La première étape consiste à définir le domaine de variation des paramètres retenus, ainsi que la fonction réponses. Le modèle est ensuite testé périodiquement par l'algorithme d'optimisation, jusqu'à l'obtention de l'optimum. La fonction réponse est calculée à chaque simulation. L'évaluation de la fonction réponse est de loin l'étape qui nécessite le plus de temps de calcul. En effet, sur une station de travail Risc6000, il faut approximativement 20 minutes pour réaliser une simulation dynamique par éléments finis et donc pour estimer la fonction réponse. La figure 5 présente le déroulement d'une optimisation [75].

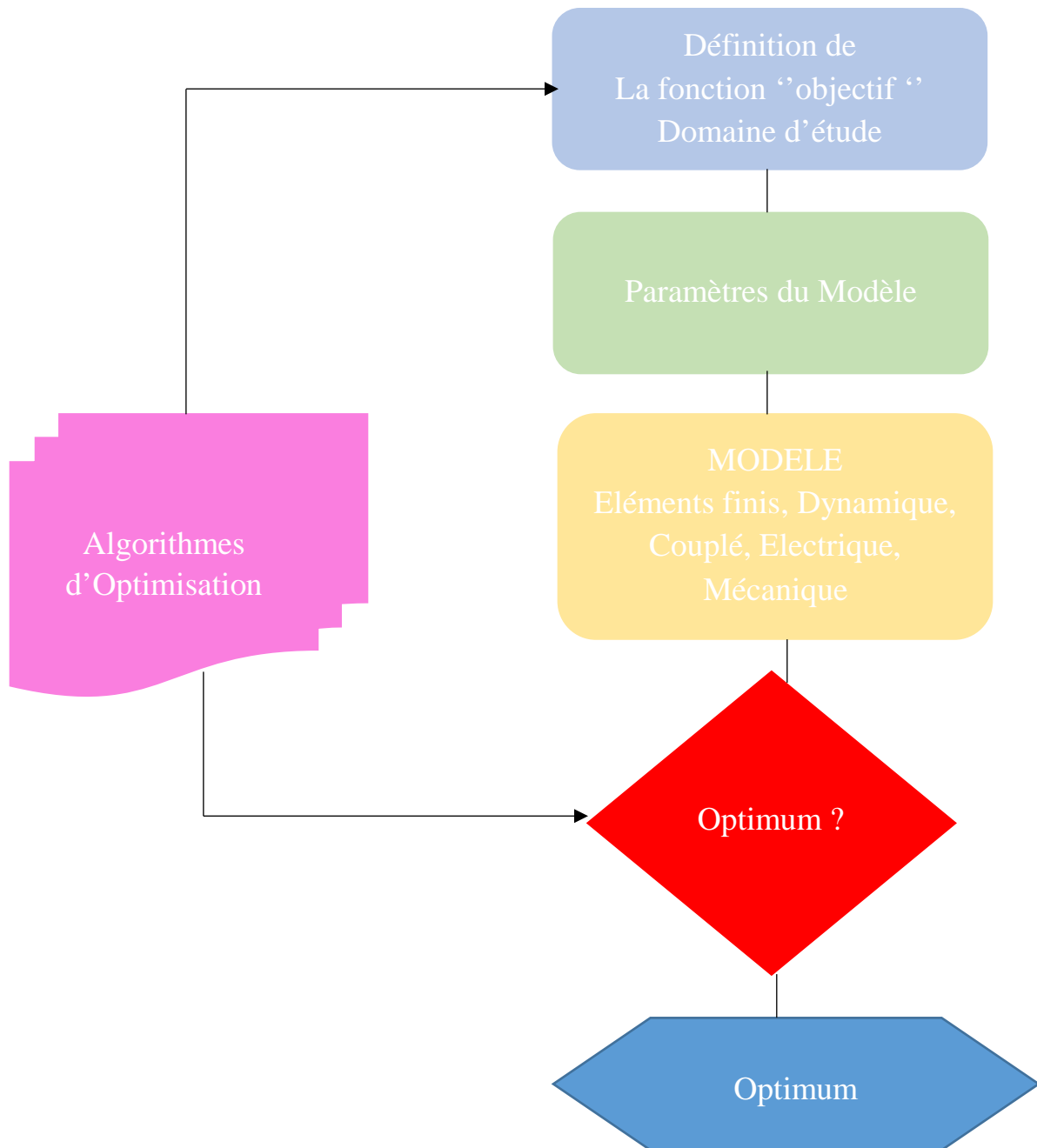


Figure 5 : Déroulement d'une optimisation [75].

III.6. Modélisation par la méthode des plans d'expériences

A l'époque actuelle bon nombre de procédés de fabrication ou d'expériences en laboratoire deviennent de plus en plus complexes car ils dépendent d'un grand nombre de variables difficiles à régler intuitivement.

Seule la réalisation d'expériences va permettre d'appréhender et de modéliser de tels phénomènes complexes. Si ces expériences sont effectuées sans une méthodologie rigoureuse

III. Modélisation et optimisation par les plans d'expérience

il est fort probable qu'elles vont soit conduire à des impasses (modèle impossible à ajuster, résultats incohérents, etc...), soit à des résultats de qualité décevante c'est là qu'interviennent les plans d'expériences permettant d'organiser au mieux les essais afin d'optimiser ce type de démarche [76].

L'objectif principal de cette méthode peut être résumé par la devise :

”Obtenir un maximum d’information en un minimum d’expériences ” [77].

En d'autres termes la méthode des plans d'expériences (MPE) cherche à déterminer une relation entre 2 types de grandeurs : la réponse qui correspond à la grandeur physique étudiée (la sortie pour le modèle) et les facteurs qui correspondent aux grandeurs physiques modifiables par l'expérimentateur et censés influencer sur les variations de la réponse (les entrées pour le modèle) [77].

La méthode des plans d'expériences peut être utilisée dans deux types d'investigations :

- Les études de criblage ou screening,
- Les études de surface de réponse (MSR).

La technique du screening permet de déterminer parmi les facteurs recensés par l'expérimentateur ceux qui ont une influence statistiquement non négligeable sur les variations de la réponse. On procède ainsi implicitement à une simplification du problème. On recherche pourquoi la réponse varie (en fonction de quels facteurs). En plus des facteurs influents il est également possible d'identifier les interactions de facteurs qui auront une influence significative sur la réponse [77].

Dans une application de la méthodologie de surface de réponse (MSR) les variations de la réponse sont calculées en fonction des facteurs et interactions précédemment jugés influents. Cette étude est davantage quantitative le but étant de déterminer comment la réponse varie.

Une dépendance fondamentale existe entre l'objectif recherché (screening ou MSR) et la définition du plan d'expériences. Cependant, dans les deux cas les étapes de la démarche se déroulent dans un ordre similaire à savoir [77] :

- Définition des objectifs et des réponses
- Choix d'une stratégie expérimentale,
- Définition des facteurs,
- Définition du domaine expérimental,
- Définition du modèle empirique,
- Construction du plan d'expériences,

III. Modélisation et optimisation par les plans d'expérience

- Expérimentation,
- Analyse globale des résultats d'essais,
- Analyse mathématique des résultats d'essais,
- Analyse statistique du modèle,
- Analyse graphique du modèle,
- Validation du modèle et des informations obtenues,

Nous cherchons dans ce travail à définir les conditions optimales pour avoir un bon yaourt. Pour cela nous utiliserons la méthode des plans d'expérience pour l'étude des surfaces de réponses qui nous permettra d'obtenir des modèles de la forme suivante [78].

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^K \beta_i x_i + \sum_{i=1}^K \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{K-1} \sum_{j=i+1}^K \beta_{ij} x_i x_j$$

Dans lequel β représente les coefficients du modèle à identifier (β_0 la constante, β_i les coefficients associés aux facteurs, β_{ii} les coefficients associés aux termes quadratiques et β_{ij} les coefficients associés aux interactions d'ordre (1), k désigne le nombre de facteurs x_i pris en considération dans le modèle [78].

III.7. Matrice factorielle complète 2^k

Dans ces plans, les facteurs ne peuvent prendre que deux niveaux distincts notés -1 et +1 en variable codées. Le nombre d'expériences à réaliser est $N = 2^k$.

Toutes les colonnes commencent par -1, on alterne les -1 et +1 toutes 2^{j-1} ème lignes pour la j ème colonnes. On ajoutera ensuite une colonne ou plusieurs colonnes pour reporter les résultats expérimentaux (réponse notée Y_i) [79].

Les plans 2^k sont simples à concevoir et riches en informations : ils permettent de décrire quantitativement tous les effets des facteurs et de toutes les interactions, le seul inconvénient est dès que le nombre de facteurs augmente, leur mise en œuvre devient lourde et coûteuse, car le nombre des essais devient vite très important [80].



Matériel et méthodes

Ce chapitre décrit le matériel ainsi que les méthodes nécessaires pour l'optimisation du yaourt brassé. Afin de caractériser notre produit, plusieurs paramètres physicochimiques ont été étudiés, à savoir : le pH, l'acidité titrable, la teneur en MG, l'EST et L'ESD, la viscosité ainsi que les analyses microbiologiques.

IV.1. Préambule

Ce présent travail est réalisé en grande partie à la laiterie HAMMADITES, située dans la zone industrielle d'El Kseur, wilaya de BEJAIA, durant la période qui s'est étalée du mois d'Avril 2021 jusqu'au mois de Juin 2021. Nous avons estimé nécessaire de présenter une fiche technique succincte sur cette unité, afin de mieux cerner le attendu de ce travail et les essais expérimentaux réalisés.

IV.2. Présentation de la laiterie HAMMADITES



Figure 6 : Logo de l'entreprise LES HAMMADITES.

De création relativement récente (Janvier 2016), la laiterie « HAMMADITES » ou SARL Etoile Service est spécialisée dans la production et commercialisation d'une gamme variée de produits dont : lait entier pasteurisé, yaourt brassé, beurre cru, l'ben à base de poudre de lait (26% et 0%), raïb à base de poudre de lait, cherbet pour approvisionner le marché local.

La laiterie « HAMMADITES » est subdivisée en quatre services : service commercial, service de comptabilité, service de ressources humaines, service collecte, service qualité dont un laboratoire d'analyses physicochimiques. Dans l'atelier de production, on trouve des cuves de capacités différentes, pasteurisateur, des conditionneuses, une chambre froide, une chambre de fermentation et une bêche à eau.

IV.3. Objectif de l'étude

Ce travail a pour principal objectif de développer des modèles mathématiques capables d'optimiser et de prédire les conditions de fabrication d'un yaourt brassé de qualité. Aussi, il est question d'évaluer les paramètres physico-chimiques et microbiologiques des produits optimisés.

IV.4. Optimisation de la fabrication du yaourt par les plans d'expériences

IV.4.1. Résultats après application de la méthode de criblage

Après avoir défini l'objectif et les réponses recherchées lors de notre étude qui sont la viscosité et l'EST du yaourt et après avoir déterminé les facteurs jugés influençant la fabrication du yaourt, nous avons défini le domaine expérimental, ensuite nous avons construit la matrice d'expérience (base de travail, tableau 9).

Tableau 9 : Matrice d'expérience.

Exp No	Exp Name	Run Order	PDL 0 % (%)	Amidon (%)	EST (%)	Viscosité (mPa /s)
1	N1	2	55	10	17.9	13
2	N2	11	62.5	10	19	15
3	N3	4	70	10	20	20
4	N4	10	55	15	19.1	30
5	N5	6	62.5	15	19.1	44
6	N6	5	70	15	20	65
7	N7	8	55	20	20.1	60
8	N8	7	62.5	20	21.5	69.15
9	N9	3	70	20	22.5	92.2
10	N10	9	62.5	15	19.1	48.75
11	N11	1	62.5	15	19.1	48.75

IV.5. Matières premières

- ✓ La poudre de lait (26% et 0 % de MG).
- ✓ L'eau de process.
- ✓ les ferments lactiques utilisés proviennent du laboratoire HAMMADITES à l'état lyophilisé.
- ✓ Arôme industrielle de différents goûts.
- ✓ Le sucre utilisé est du saccharose de marque Cevital.
- ✓ L'amidon.

IV.6. Appareillage, produits chimiques et réactifs (voir annexe1)

IV.7. Analyses physicochimiques du produit fini

IV.7.1. Mesure du pH et de la température

Le principe consiste à la mesure de la différence de potentiel entre une électrode de mesure et une électrode de référence réunies en un système d'électrode combiné. Le pH et la température sont déterminés directement en utilisant un pH- mètre électronique et ce, après avoir plongé l'électrode dans un bêcher contenant un échantillon du yaourt brassé frais à analyser.

➤ Mode opératoire

Calibrage de l'électrode du pH mètre :

- ✓ Rincer l'électrode avec de l'eau distillée puis l'essuyer ;
- ✓ Plonger l'électrode dans une solution à pH4 puis rincer à l'eau distillée et essuyer ;
- ✓ Plonger l'électrode dans une solution à pH 7 ;
- ✓ Lire les résultats sur l'afficheur du pH mètre.

IV.7.2. Détermination de l'acidité titrable (Dornic)

Cette méthode (voir **annexe 2**) permet le dosage de l'acidité d'un échantillon du lait de 10 ml par titrimétrie avec la soude 0,1N.

➤ Expression des résultats

Le résultat est exprimé en °D : 1 °D correspond à 0,1 g d'acide lactique, elle est donnée par la formule suivante :

$$\text{Où : } \mathbf{A (^{\circ}D)} = \mathbf{V \cdot 10}$$

A (°D) : Acidité titrable en degré Dornic (°D).

V : volume en ml de la solution sodique utilisée pour le titrage.

IV.7.3 Détermination de la teneur en matière grasse par la méthode acidobutyrométrique de GERBER

La détermination est basée sur l'ajout de l'acide sulfurique qui dissout les protéines du lait. La séparation de la matière grasse des autres constituants est réalisée après centrifugation du butyromètre en présence d'alcool iso-amylique. Le mode opératoire est détaillé en **annexe 3**.

➤ Lecture et expression des résultats

Tout en tenant le butyromètre verticalement, on examine le plan inférieur de la colonne. On l'amène en coïncidence avec une manœuvre du bouchon et on effectue la lecture directement sur les graduations du butyromètre. La teneur en matière grasse est exprimée en pourcentage.

IV.7.4 Détermination de l'extrait sec totale (EST) et l'extrait sec dégraissé (ESD)

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

Le principe consiste en une dessiccation par évaporation d'un certain volume du produit à analyser et une pesée du résidu obtenu. Alors que l'ESD est l'extrait sec total privé de la matière grasse, soit $ESD = EST - MG$ voir **annexe 4**.

IV.7.5. Mesure des propriétés rhéologiques et suivi de la viscosité

Le yaourt étant un fluide viscoélastique rhéofluidifiant, toute manipulation énergétique modifie ses propriétés rhéologiques. De ce fait une attention particulière est portée aux échantillons de yaourts destinés à la mesure de la viscosité voir **annexe 5**.

IV.8. Analyses microbiologiques du produit fini

Les analyses microbiologiques sont indispensables, voire obligatoire, pour apprécier la qualité microbiologique d'un produit alimentaire. Elles permettent de détecter les microorganismes existant dans les produits alimentaires notamment les pathogènes afin de garantir pour le consommateur, une sécurité hygiénique et un niveau appréciable de qualité organoleptique.

Tableau 10 : Analyses microbiologiques effectuées sur les produits obtenus.

Germes recherchés	Milieux de culture utilisés	Type d'ensemencement	Température d'incubation	Durée d'incubation
F.M.A.T	PCA	En profondeur	30°C	72h
Coliformes totaux	VRBL	En profondeur	37°C	24h
Coliformes fécaux	VRBL	En profondeur	44°C	24h
Levures et moisissures	OGA	En surface	25 – 30 °C	3 à 5 jours

➤ **Préparation de la suspension mère**

Peser aseptiquement 25g de produit finis et les introduire dans 225 ml d'eau peptonée. Le mélange obtenu est homogénéisé et constitue la suspension mère (SM), qui correspond à la dilution 1/10.

➤ **Préparation de la série de dilutions décimales**

Nous avons préparé à partir de la SM, une série de dilutions décimales allant de 10⁻² jusqu'à 10⁻⁴, comme suit : Introduire aseptiquement 1 ml de la SM dans 9 ml de TSE (Tryptone-Sel-Eau) stérile qui correspond à la dilution 10⁻².

Après homogénéisation, 1ml de la dilution 10⁻² est prélevé puis introduit dans 9 ml de TSE qui correspond à la dilution 10⁻³.

Ensuite, 1ml de la dilution 10⁻³ est prélevé puis introduit dans 9 ml de TSE qui correspond à la dilution 10⁻⁴.

IV.8.1 Recherche et dénombrement de la flore mésophile aérobie totale

Les germes aérobies mésophiles sont représentés par l'ensemble des germes saprophytes et pathogènes, aptes à se multiplier à l'air libre avec une croissance optimale à une température entre 25 à 45°C.

➤ **Principe**

Les germes aérobies mésophiles totaux peuvent se développer dans un milieu nutritif gélosé exempt d'inhibiteur et d'indicateur défini (PCA) à 30°C pendant 72 heures. Après incubation ils apparaissent sous forme de colonies lenticulaires en masse.

➤ Mode opératoire

- Noter sur des boîtes de Pétri : la date, la dilution, le nom du produit et le milieu de culture.
- A partir des dilutions décimales, porter aseptiquement 1 ml de chaque produit et l'ensemencer dans la boîte de Pétri correspondante vide et stérile.
- Compléter ensuite avec environ 15 ml de gélose PCA fondue puis refroidie à 45°C.
- Faire des mouvements circulaires en forme de « 8 » pour permettre à l'inoculum de se mélanger puis laisser solidifier, rajouter après une deuxième couche d'environ 5 ml.
- Incubation des boîtes de Pétri avec le couvercle en bas à 30°C pendant 72 heures, en faisant une lecture chaque 24 heures.

➤ Lecture

Retenir les boîtes contenant un nombre de colonies compris entre 30 et 300.

Les résultats sont exprimés en UFC par (g) de produit selon la formule suivante :

$$X = N \cdot 1 / D \cdot 1 / V$$

X : nombre de germes par ml ou g de produit

N : nombre de colonies

V : volume de l'inoculum

D : facteur de dilution ou la dilution considérée

IV.8.2. Recherche et dénombrement des Coliformes totaux Fécaux

En microbiologie alimentaire, on appelle coliformes les Entérobactéries fermentant le lactose, il s'agit des germes : *Escherichia*, *Citrobacter*, *Enterobacter* et *Klebsella*, lorsqu'ils sont en nombre élevé, ils peuvent provoquer des toxi-infections alimentaires [81].

Le dénombrement des coliformes dans le lait permet de mettre en évidence, une pollution fécale et donc la possibilité d'une contamination par les entérobactéries pathogènes.

Ces bactéries sont sensibles à la chaleur. Elles sont donc un bon témoin de l'efficacité de traitements thermiques et/ou d'une recontamination. De plus, elles sont en elles-mêmes un facteur de mauvaise conservation ou d'accidents de fabrication [82].

➤ Principe

Les coliformes sont capables de se multiplier en présence de sels biliaries et capable de fermenter le lactose avec production d'acide et de gaz en 24 à 48 heures à une température de 37°C. Le milieu utilisé est le milieu (VRBL), contenant les sels biliaries, le cristal violet et le rouge neutre comme agents sélectifs, qui inhibent la croissance de la flore secondaire Gram+.

➤ Mode opératoire (idem que la FMAT)

IV.8.3. Recherche et dénombrement des levures et moisissures

Les levures et les moisissures sont des champignons microscopiques. Dont la présence dans les produits alimentaires est indésirable, car ils détruisent leur qualité organoleptique et chimique [83].

Le dénombrement de cette flore permet d'estimer l'efficacité du traitement thermique appliqué et l'état de conservation de l'aliment [84].

➤ Principe

Il repose sur l'emploi d'un milieu de culture solide rendu sélectif par acidification et/ou avec l'addition d'un antibiotique (Oxytétracycline pour l'OGA) qui inhibe le développement de la flore bactérienne.

➤ Mode opératoire

A partir de la dilution décimale 10⁻¹, porter aseptiquement deux gouttes dans une boîte de Pétri contenant de la gélose OGA. Etaler les gouttes à l'aide d'un râteau stérile, puis incuber à 25°C pendant 5 jours. Dans le souci de ne pas se trouver face à des boîtes envahies soit par les levures soit par les moisissures, on doit effectuer des dénombrements tous les jours.

➤ Lecture

Les colonies de levures ressemblent à des bactéries, elles sont brillantes rondes et bombées, de couleurs différentes alors que celles des moisissures ont un aspect velouté et sont plus grandes de couleur blanche ou pigmentées. Par ailleurs, étant donné qu'on a travaillé avec la dilution 10⁻¹, il faut multiplier le nombre de colonies trouvées par l'inverse de la dilution correspondante. Les résultats sont exprimés en UFC par (g) de produit.

IV.8.4. Recherche de Salmonella

La recherche des salmonella nécessite une prise d'essai à part (Voir **figure 1**).

➤ Jour 1 : Pré- enrichissement

Prélever 25 ml ou 25 gr de produit à analyser dans 1 sachet stérile de type Stomacher contenant 225ml d'eau peptonée tamponnée.

Broyer cette suspension dans un broyeur de type Stomacher, la transposer dans un flacon stérile que nous incubons à 37°C pendant 18h.

➤ Jour 2 : Enrichissement

L'enrichissement doit s'effectuer sur le milieu sélectif à savoir :

- le milieu de Sélénite - Cystéine réparti à raison de 100 ml par flacon.

L'enrichissement proprement dit, se fait donc à partir du milieu de pré-enrichissement de la façon suivante :

- 10 ml en double pour les flacons de Sélénite Cystéine ;
- Incubation ;
- Le premier flacon de Sélénite sera incubé à 37°C pendant 24 h ;
- Le deuxième flacon de Sélénite sera incubé à 42°C pendant 24 h.

➤ Jour 3 : Isolement

Chaque tube et chaque flacon fera l'objet d'un isolement sur deux milieux gélosés différents à savoir :

- Le milieu gélosé Hektoen ;
- Le milieu gélosé Bilié lactosé au vert brillant et au rouge de phénol.

Toutes les boites ainsiensemencées seront incubées à 37°C pendant 24 h.

➤ Jour 4 : Lecture des boites et identification.

Les Salmonella se présentent comme des colonies le plus souvent gris bleu à centre noir sur gélose Hektoen.

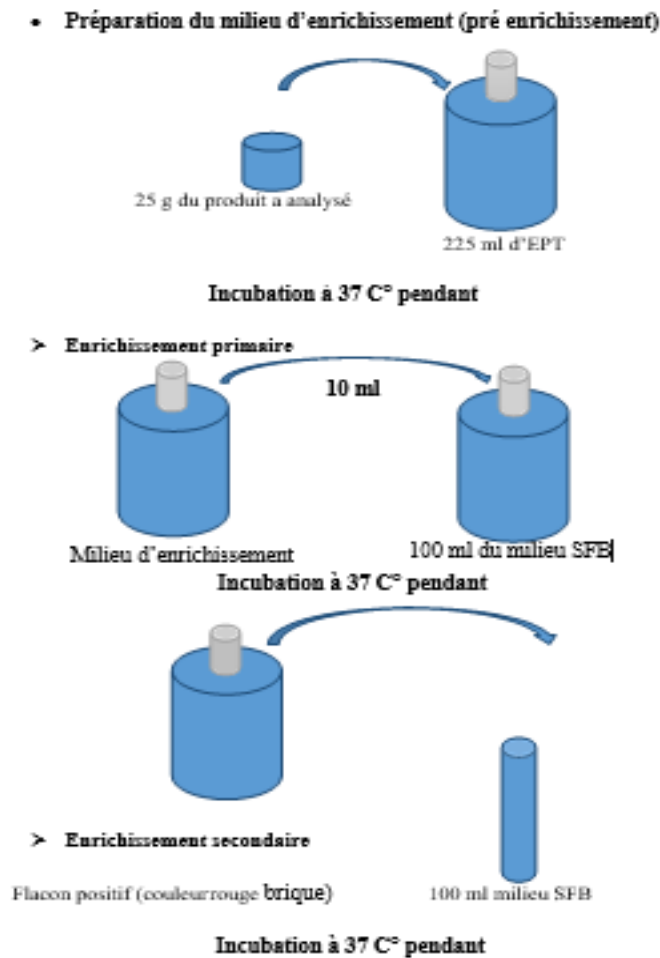


Figure 7 : Technique de recherche et dénombrement des Salmonelles dans le produit fini.

IV.9. Analyses sensorielles du produit fini

IV.9.1. Règles générales de la conduite de la dégustation

➤ Les dégustateurs

L'évaluation sensorielle demande de faire appel à plusieurs sujets pour conduire à des résultats significatifs.

Le groupe de dégustateurs ayant participé à notre analyse sensorielle est composé de 10 personnes entre enseignants, étudiant et personnels de la laiterie HAMMADITES.

D'après NICOD (1998) [84] ces sujets sont choisis selon les critères suivants :

- ✓ Ils doivent être volontaires et motivés ;

- ✓ Ils ne doivent présenter aucune aversion vis-à-vis du produit à étudier ;
- ✓ Ils ne doivent pas fumer au moins deux heures avant le test ;
- ✓ Les sujets malades ne sont pas concernés, donc la prise de médicament est contre indiquée ;
- ✓ Ils doivent avoir une bonne vision des couleurs ;
- ✓ L'honnêteté des dégustateurs est un critère important.

➤ **Présentation des échantillons**

- ✓ L'échantillon est enlevé de la glacière dix minutes avant le début de la séance de dégustation ;
- ✓ L'échantillon est servi à une température de 8 à 10 °C ;

➤ **Recueil des résultats**

Le recueil des résultats est effectué sur une fiche (voir **annexe 6**).

➤ **Traitement des résultats**

Les résultats du test sensoriel obtenus, sont illustrés dans des secteurs pour tous les paramètres analysés dans la partie résultats et discussion.

IV.9. Analyses économiques du produit fini :

L'évaluation économique du produit fini est détaillée dans la partie résultats et discussion.



Résultats et discussion

Dans cette partie sont donnés les résultats de l'optimisation intégrée aux plans d'expériences ainsi que la caractérisation par l'étude des paramètres physicochimiques et microbiologiques du yaourt brassé et enfin des analyses sensorielles et économiques.

V.1. Optimisation de la fabrication du yaourt par l'application des plans d'expériences

V.1.1. Analyse globale des résultats

Après avoir défini l'objectif et les réponses recherchées lors de notre étude qui sont la viscosité et l'EST du yaourt et après avoir déterminé les facteurs influençant la fabrication du yaourt, nous avons défini le domaine expérimental, ensuite nous avons construit le plan d'expérience que nous avons suivi pour conduire chaque essai selon les valeurs réelles de chaque facteur.

Le plan d'expérimental ainsi que les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 11 : Matrice d'essais et résultats obtenus.

Exp No	Exp Name	Run Order	PDL 0 % (g)	Amidon (g)	EST (%)	Viscosité (mPa /s)
1	N1	2	55	10	17.9	13
2	N2	11	62.5	10	19	15
3	N3	4	70	10	20	20
4	N4	10	55	15	19.1	30
5	N5	6	62.5	15	19.1	44
6	N6	5	70	15	20	65
7	N7	8	55	20	20.1	60
8	N8	7	62.5	20	21.5	69.15
9	N9	3	70	20	22.5	92.2
10	N10	9	62.5	15	19.1	48.75
11	N11	1	62.5	15	19.1	48.75

V.1.2 Analyse statistique des résultats

Les résultats d’essai ont été traités par le logiciel “MODDE 6.0” afin de déterminer les effets des deux facteurs sur les deux réponses, ainsi que le calcul de p value qui permet de juger si les facteurs ont une influence statistiquement significative sur les réponses.

Si $p < 0,05$ alors le facteur a une influence statistiquement significative sur la réponse

Après avoir introduit les valeurs des deux paramètres : EST et Viscosité dans le logiciel ce dernier nous a permis de comparer entre les colonnes “Observed” (réponses mesurées) et “predicted” (réponses prédites par le modèle) et précise que l’ajustement est de bonne qualité.

Les autres colonnes proposées par ce logiciel évaluent la différence entre les réponses mesurées et celles prédites (colonne “obs-pred”) et font subir un certain nombre de transformations à ces valeurs, afin de les rendre statistiquement plus faciles à interpréter

Le coefficient de corrélation linéaire multiple quantifié pour les deux réponses témoigne de la bonne qualité et de la robustesse du modèle ($R^2 = 0.96$ pour l’EST et $R^2 = 0.98$ pour la viscosité), la valeur de R^2 s’approche de 1 le modèle est de bonne qualité.

	1	2	3	4	5
1	EST	Observed	Predicted	Obs - Pred	Conf. int(±)
2	1	17,9	18,0623	-0,162273	0,503075
3	2	19	18,8421	0,157894	0,402738
4	3	20	19,9956	0,00438881	0,503075
5	4	19,1	18,7754	0,32456	0,402738
6	5	19,1	19,2053	-0,105263	0,289647
7	6	20	20,0088	-0,0087719	0,402738
8	7	20,1	20,2623	-0,162281	0,503075
9	8	20,5	20,3421	0,157894	0,402738
10	9	20,8	20,7956	0,00438499	0,503075
11	10	19,1	19,2053	-0,105263	0,289647
12	11	19,1	19,2053	-0,105263	0,289647
13					
14	N = 11	Q2 =	0,722	Cond. no. =	3,0822
15	DF = 5	R2 =	0,966	Y-miss =	0
16		R2 Adj. =	0,931	RSD =	0,2196
17				Conf. lev. =	0,95

Figure 8 : Les réponses mesurées et prédites relatif à l’EST des échantillons.

	1	2	3	4	5
1	viscosité	Observed	Predicted	Obs - Pred	Conf. int(±)
2	1	13	10,7272	2,27282	10,9153
3	2	15	14,4123	0,587718	8,73824
4	3	20	22,8605	-2,86052	10,9153
5	4	30	36,3623	-6,36228	8,73824
6	5	44	46,3474	-2,34736	6,2845
7	6	65	61,0956	3,90438	8,73824
8	7	60	55,9105	4,08947	10,9153
9	8	69,15	72,1956	-3,04561	8,73824
10	9	92,2	93,2439	-1,04386	10,9153
11	10	48,75	46,3474	2,40263	6,2845
12	11	48,75	46,3474	2,40263	6,2845
13					
14	N = 11	Q2 =	0,834	Cond. no. =	3,0822
15	DF = 5	R2 =	0,982	Y-miss =	0
16		R2 Adj. =	0,964	RSD =	4,7657
17				Conf. lev. =	0,95

Figure 9 : Les réponses mesurées et prédites relatif à la viscosité des échantillons.

D’après ces résultats on peut remarquer que les réponses obtenues du 5^{ème} 7^{ème} essaie sont intéressantes, donc on peut prétendre qu’il y a une possibilité que l’optimum soit obtenu à des valeurs proches de ces combinaisons des facteurs de ces essais.

V.3. Analyse mathématique et statistique des résultats

L’analyse mathématique consiste essentiellement à identifier les β (coefficients du modèle) à partir des résultats des expériences réalisées, en plus des réponses estimées ou prédites, ces résultats ont été générés grâce au logiciel MODDE 6.0 par calcul matriciel.

Les coefficients du modèle permettent d’écrire l’équation qui relie la réponse aux deux facteurs étudiés donnant la valeur maximale des réponses choisies, nous facilitant ainsi le calcul de toutes les réponses du domaine d’étude sans être obligés de faire les expériences.

L’équation s’écrit comme suit :

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2$$

Avec :

x1 : PDL

x2 : Amidon

$x1^2$: PDL*PDL

$x2^2$: ami*ami

$x1 x2$: PDL*ami

	1	2	3	
1		Full Name	Abbreviation	
2	1	Constant	Cst	
3	2	poudre de lait 0%	PDL	x1
4	3	amidon	ami	x2
5	4	poudre de lait 0%*poudre de lait 0%	PDL*PDL	$x1^2$
6	5	amidon*amidon	ami*ami	$x2^2$
7	6	poudre de lait 0%*amidon	PDL*ami	$x1 x2$

Figure10 : Coefficients et variables de l'équation mathématique.

Pour l'EST :

$$y = 19.2053 + 0.616666 x1 + 0.70002 x2 + 0.186841 x1^2 + 0.386841 x2^2 - 0,35 x1 x2.$$

	1	2	3	4	5
1	EST	Coeff. SC	Std. Err.	P	Conf. int(±)
2	Constant	19,2053	0,112677	1,31894e-010	0,289647
3	PDL	0,616666	0,0896711	0,000994575	0,230507
4	ami	0,750002	0,0896711	0,000399888	0,230507
5	PDL*PDL	0,186841	0,138001	0,233743	0,354744
6	ami*ami	0,386841	0,138001	0,0378515	0,354744
7	PDL*ami	-0,35	0,109824	0,024349	0,282313
8					
9	N = 11	Q2 = 0,722		Cond. no. = 3,0822	
10	DF = 5	R2 = 0,966		Y-miss = 0	
11		R2 Adj. = 0,931		RSD = 0,2196	
12				Conf. lev. = 0,95	

Figure 11 : Estimation des coefficients du modèle relatif à l'EST.

On prend en considération juste les facteurs qui ont une influence statistiquement significative l'équation s'écrit comme suit :

Pour l'EST :

$$y = 19.2053 + 0.616666 x1 + 0.750002 x2 + + 0.386841 x2^2 - 0,35 x1 x2.$$

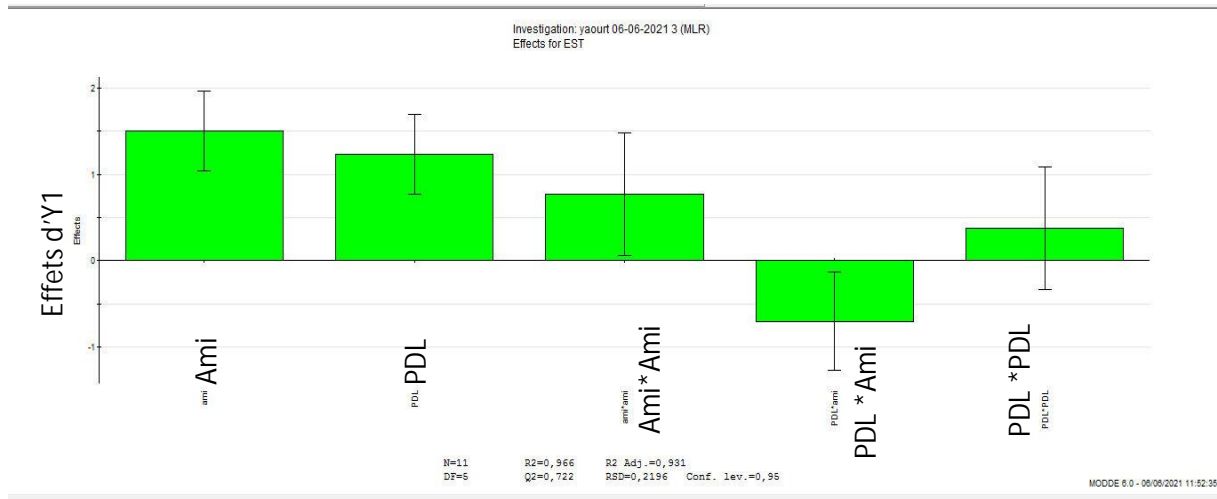


Figure 12 : Etude graphique des effets de la réponse Y₁ (EST).

Pour la viscosité :

$$y = 46.34374 + 12.3667 x_1 + 28.8917 x_2 + 2.38158 x_1^2 - 3.04342 x_2^2 + 6.3 x_1 x_2.$$

	1	2	3	4	5
1	viscosité	Coeff. SC	Std. Err.	P	Conf. int(±)
2	Constant	46,3474	2,44477	7,52503e-006	6,28449
3	PDL	12,3667	1,9456	0,00142405	5,00134
4	ami	28,8917	1,9456	2,50518e-005	5,00134
5	PDL*PDL	2,38158	2,99422	0,462456	7,6969
6	ami*ami	-3,04342	2,99422	0,356057	7,6969
7	PDL*ami	6,3	2,38287	0,0457623	6,12537
8					
9	N = 11	Q2 = 0,834		Cond. no. = 3,0822	
10	DF = 5	R2 = 0,982		Y-miss = 0	
11		R2 Adj. = 0,964		RSD = 4,7657	
12				Conf. lev. = 0,95	

Figure 13 : Estimation des coefficients du modèle relatif à la Viscosité.

On prend en considération juste les facteurs qui ont une influence statistiquement significative l'équation s'écrit comme suit :

$$y = 46.34374 + 12.3667 x_1 + 28.8917 x_2 + 6.3 x_1 x_2.$$

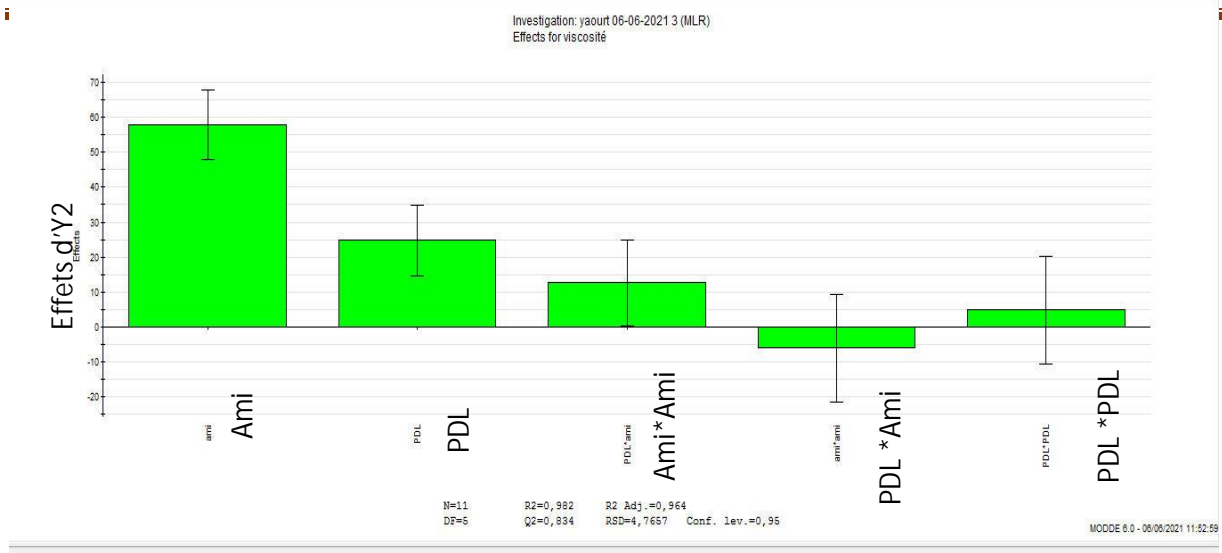


Figure 14 : Etude graphique des effets de la réponse Y₂ [Viscosité].

V.1.4. Analyse graphique des résultats

L'analyse graphique des résultats d'essais permet une restitution plus visuelle des résultats d'essais et de leur analyse.

V.1.4.1. Diagrammes des coefficients

La figure représente les résultats mathématiques et statistiques obtenus, à savoir les coefficients des deux modèles relatifs aux deux réponses choisies.

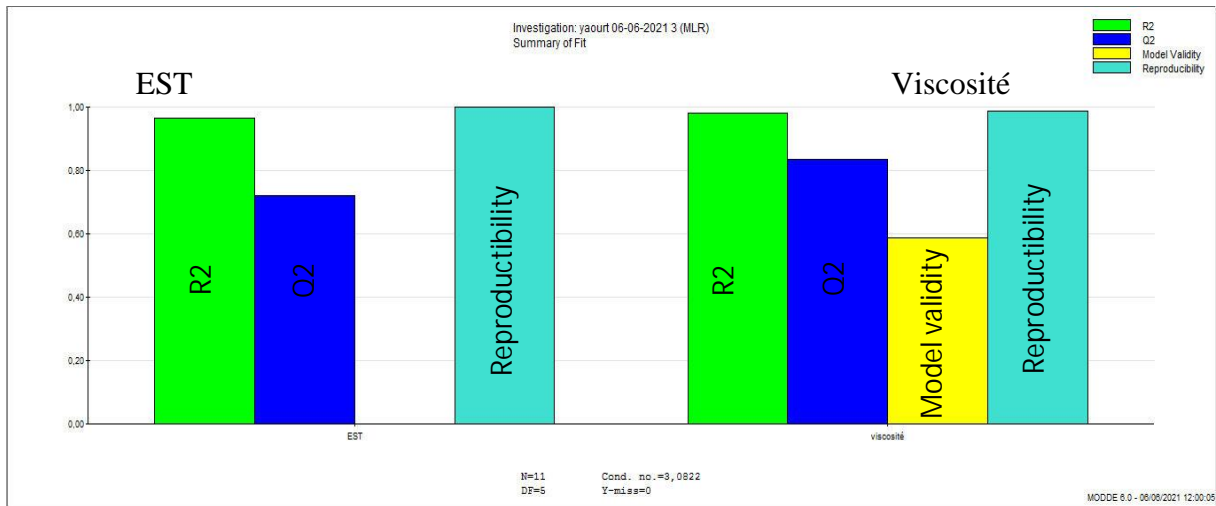


Figure 15 : Représentation graphique des effets relatifs à l'EST et la viscosité du yaourt produit selon le plan factoriel.

V.1.4.2. Analyse graphique des résultats par l'utilisation de la méthode de surface de réponse

L'équation du modèle mathématique nous permet de visualiser la variation de la réponse sous forme de surface dans l'espace tracée dans un repère à deux axes. Les figures 18 et 19 illustrent la variation de chaque réponse Y1 et Y2 en fonction des deux facteurs cette représentation est obtenue par le logiciel MODDE 6.0.

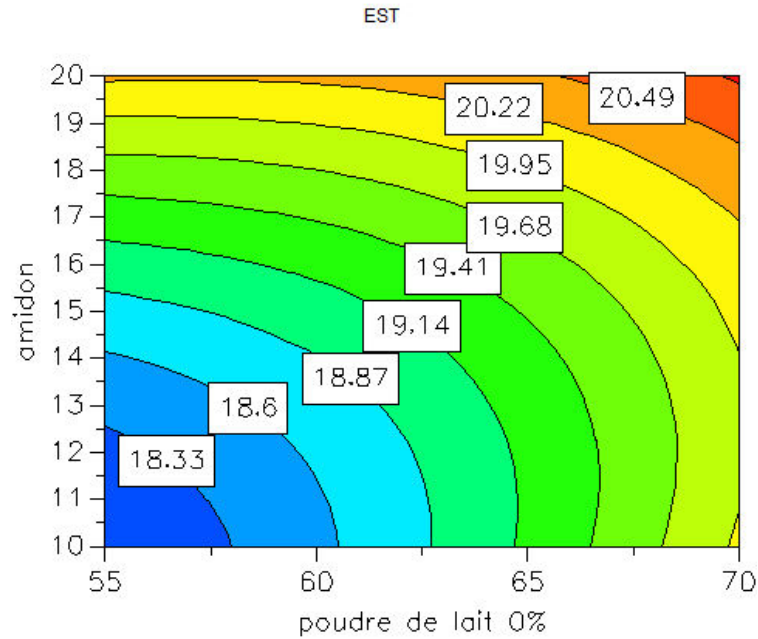


Figure 16 : Surface de réponse de la PDL et d'amidon sur l'EST du yaourt.

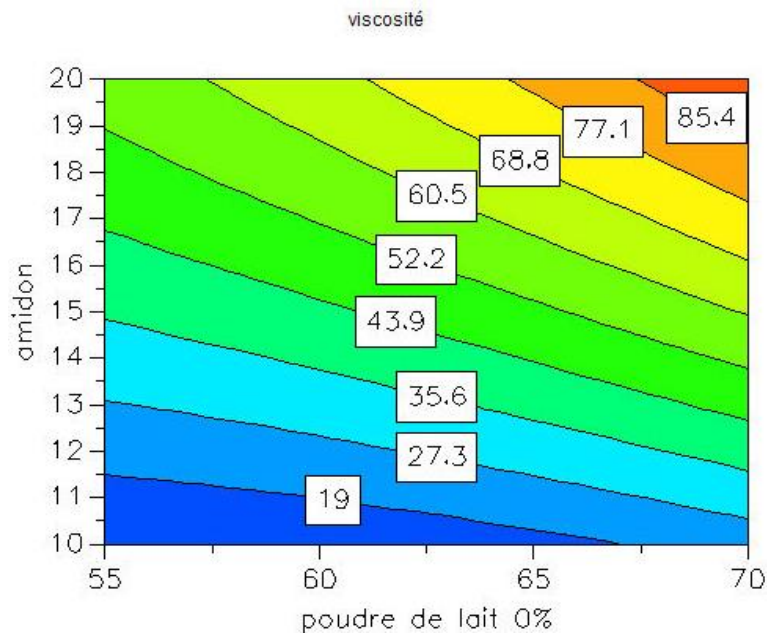


Figure 17 : Surface de réponse de la PDL et d'amidon sur la viscosité du yaourt.

Les surfaces réponses montrent clairement que quel que soit l'avance enregistrée, l'augmentation du taux de PDL et d'amidon incorporés fait augmenter les valeurs de l'EST et de la viscosité.

À titre d'exemple pour un taux de PDL = 55g et amidon = 10g les valeurs de l'EST et de la viscosité sont : 17.9% et 13Cp respectivement et pour des valeurs de PDL = 62.5g et amidon = 15g on a enregistré les valeurs suivantes : EST=19.1% et viscosité = 44 Cp.

Les variables considérées dans cette étude sont reconnues pour être parmi les plus importantes pour déterminer la qualité et les caractéristiques organoleptiques d'un yaourt brassé.

L'utilisation d'un plan d'expérience factoriel est une méthode valable pour analyser les effets individuels et combinés des variables sélectionnées et d'optimiser les caractéristiques technologiques et de production du yaourt afin d'obtenir un produit final avec les caractères désirés.

V.1.4.3. Analyse globale des résultats avec l'utilisation des courbes de régression linéaires

Afin d'évaluer la robustesse de notre modèle nous avons comparé les résultats expérimentaux aux résultats prédits par le logiciel, cette comparaison a été faite à l'aide de la courbe de régression linéaire, la droite qui représente l'évolution des réponses d'équilibre. Plus les valeurs expérimentales seront proches de la droite de régression linéaire, plus le modèle sera pertinent et le R^2 sera élevé.

Sur ces deux graphes nous notons que l'alignement des nuages de points est très proche de la droite (représentée en trait plein), ce qui témoigne de la robustesse du modèle, avec un $R^2 = 0.996$ pour le modèle de l'EST et $R^2 = 0.982$ le modèle de la viscosité du yaourt

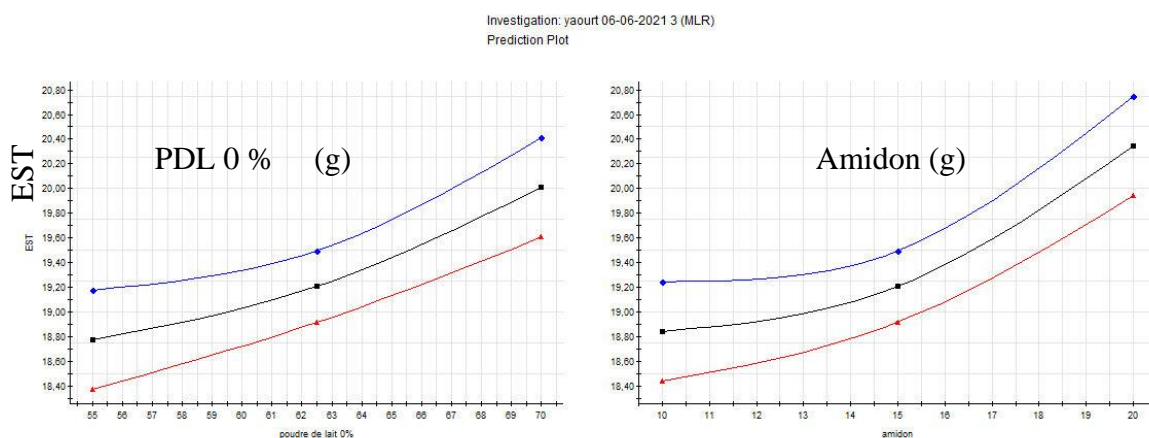


Figure 18 : Courbe de régression linéaire relative à l'EST du yaourt

V.1.5. Résultats des analyses physico-chimiques des essais de fabrication du yaourt

Chaque essai a été conduit comme indiqué sur le tableau du plan d'expérience, en respectant les valeurs de chaque facteur. Les mixtures du yaourt ont été préparées en mélangeant les ingrédients selon le plan d'expérience et les résultats des analyses physico-chimiques des essais de fabrication du yaourt sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 12 : Résultats d'analyses physico-chimiques des essais de fabrication du yaourt.

Echantillon / Paramètres	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	Normes (AFNOR, 1986)
pH	4.67	4.64	4.68	4.65	4.64	4.66	4.68	4.68	4.67	4.64	4.6 – 4.7
Acidité (°D)	65	75	74	72	71	83	75	70	68	71	60 - 90
MG (%)	0.4	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5 - 3
EST (%)	17.9	19	20	19.1	19.1	20	20.1	21.5	22.5	19.1	18 - 20
ESD (%)	17.5	18.7	19.5	18.7	18.7	19.6	19.7	21.1	22.1	18.7	18 - 20
Viscosité (CP)	13	15	20	42.25	48.75	65	60	92	30.4	48.75	*10 - 100

* : Valeur empirique

D'après les résultats obtenus, nous constatons que les valeurs des paramètres mesurés se rapprochent des normes adoptées par AFNOR (1986).

✓ pH

Les valeurs de pH obtenues pour les yaourts fabriqués sont de 4.66 ± 0.02 , ces valeurs sont conformes à la norme AFNOR (1986).

✓ Acidité

L'acidité des yaourts fabriqués et analysés est comprise entre 65 °D et 83 °D ; cette dernière se rapproche beaucoup de la limite de tolérance de la norme AFNOR (1986) qui est de 60 °D à 90 °D.

Une bonne acidité indique la fraîcheur du produit ainsi que le respect du taux d'ensemencement et aussi la présence des facteurs favorables (hygiène, température, etc.).

✓ MG

La teneur en MG obtenue est 0.4% qui est légèrement inférieure à la norme, qui est de 0.5 – 3% pour tous les échantillons ce qui nous fait dire qu'elle n'est pas conforme à la norme AFNOR (1986), mais qu'elle peut être acceptée, mis à part l'échantillon E3 qui est de 0.5 % cette légère hausse s'expliquerait de la teneur de poudre de lait ajoutée.

✓ EST

Les valeurs de l'EST testé sur 10 échantillons du yaourt préparés au laboratoire, oscillent entre 17.9 % qui est légèrement inférieure à la norme fixée par AFNOR (1986) et 22.5 (max) pour l'échantillon 9 qui est supérieure à cette dernière.

Cette baisse de l'EST s'expliquerait par le fait que le lait utilisé n'a pas subi une standardisation en matière sèche. Le lait reconstitué doit être enrichi avec de la poudre de lait 26 % pour augmenter l'EST et ainsi former un yaourt consistant et exempt de synérèse.

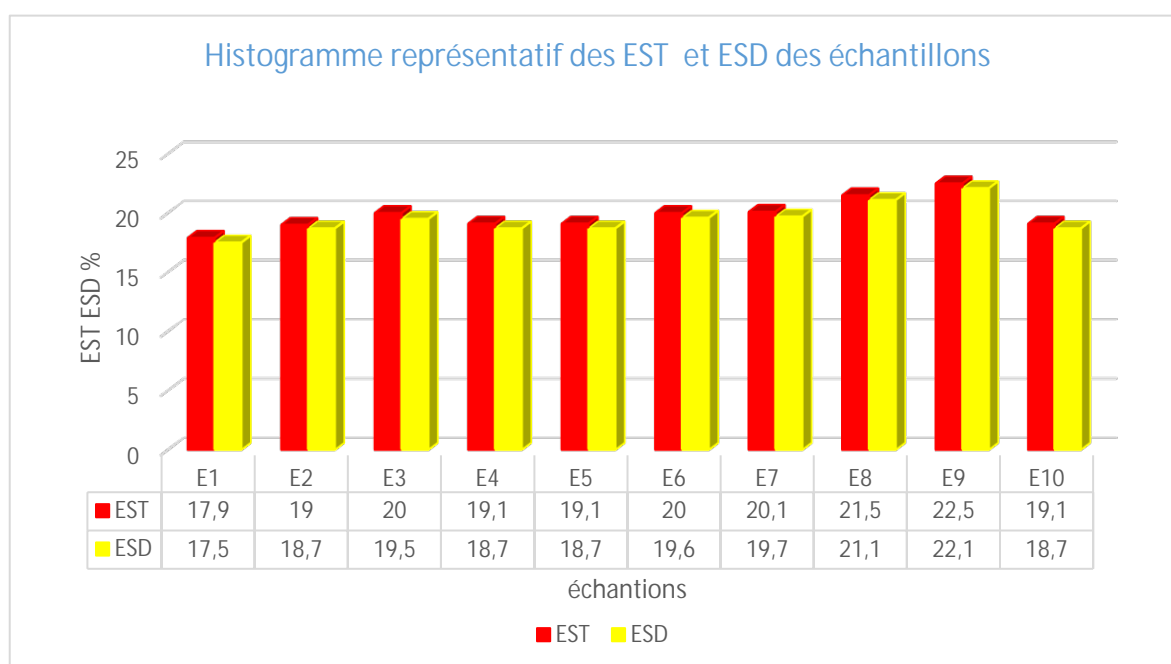


Figure 19 : Histogramme représentatif des EST et ESD des échantillons.

✓ Viscosité

Les valeurs de la viscosité des différents échantillons, oscillent entre 13 et 92.2 Cp, ce qui fait que ces résultats sont satisfaisants par rapport à la valeur empirique.

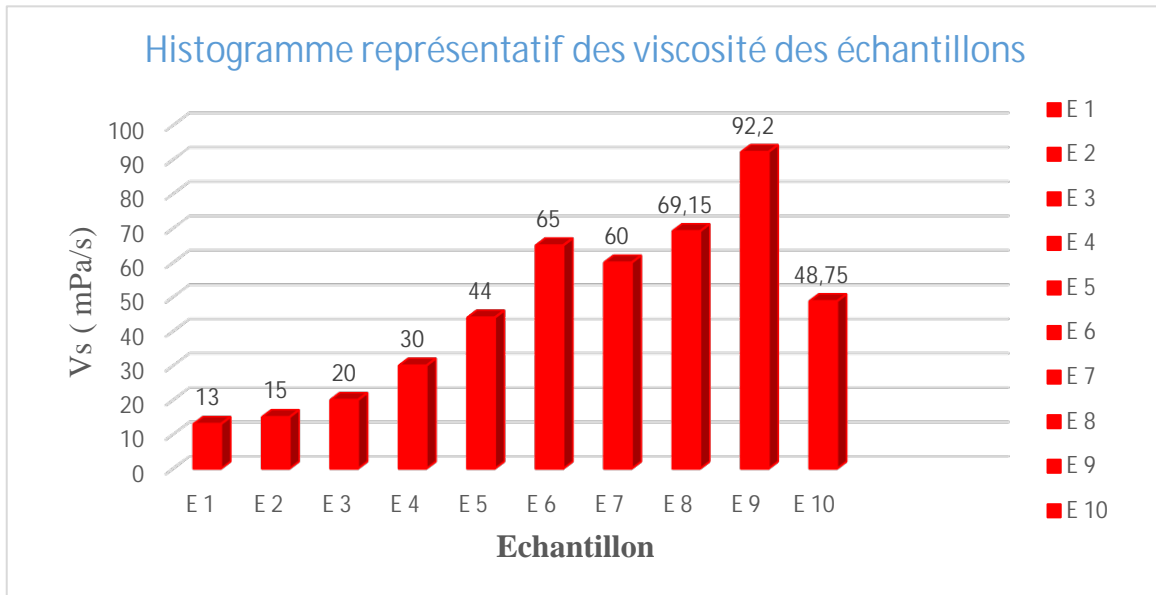


Figure 20 : Histogramme représentatif des viscosités des échantillons.

E : Echantillon, Vs : Viscosité en milli pascal/seconde (mPa/s)

De plus, une relation proportionnelle est observée, la variation des valeurs de la viscosité engendre une augmentation des taux d'incorporation de la poudre de lait et de l'amidon. Plus le produit est riche en PDL et amidon plus il est visqueux.

V.2. Essai de validation

Dans les conditions optimales nous avons abouti à un produit économique, de bonne qualité sensorielle et qui répond aux normes AFNOR.

	1	2	3	4	5	6
	poudre de lait 0%	amidon	EST	viscosité	iter	log(D)
1	55,0001	11,3001	18,1733	17,9786	70	1,6693
2	67,2688	17,9815	20,125	73,7082	41	1,5622
3	61,8983	16,3065	19,3867	52,5802	40	1,4627
4	69,9997	19,4552	20,6723	90,0357	61	1,7067
5	59,0258	15,4344	19,0419	43,3634	36	1,4736
6	55,0001	11,3001	18,1733	17,9786	70	1,6693
7	55,0001	13,703	18,5161	30,2973	81	1,5486
8	69,9997	19,4552	20,6723	90,0357	61	1,7067

Figure 21 : Valeurs de la formule optimale.

V.2.1. Résultats des analyses physico-chimiques de la formule optimale

Les résultats des analyses physico-chimiques du produit fini sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 13 : Résultats d’analyses physico-chimiques du produit fini.

Paramètres \ Echantillon	E final	Normes (AFNOR, 1986)
pH	4.67	4.6 – 4.7
Acidité (°D)	67	60 - 90
MG (%)	0.6	0.5 - 3
EST (%)	19.5	18 - 20
ESD (%)	19	18 - 20
Viscosité (CP)	48	*10 - 100

* : Valeur empirique.

Les résultats de l’analyse de l’échantillon final du yaourt brassé ont révélé une bonne qualité physico-chimique.

- L’analyse du produit fini présente un pH de 4.67 et une acidité de 67°D conforme à la norme, produite par les bacilles lactiques qui sont utilisés systématiquement dans l’industrie laitière ;
- La valeur de la MG est conforme à la norme dans notre échantillon analysé. Ce qui traduit la richesse de la poudre de lait utilisée dans le processus de fabrication de ce produit en matière grasse ;
- L’analyse de l’EST du produit fini a montré que l’échantillon analysé est conforme à la norme ce qui traduit le respect de la quantité d’eau utilisée pour la reconstitution de la poudre de lait utilisée dans cette fabrication.
- Après avoir mesuré la viscosité de deux produits commercialisés “Danone” et “Soummam” on constate que les résultats obtenus pour la formule optimale, est satisfaisante.

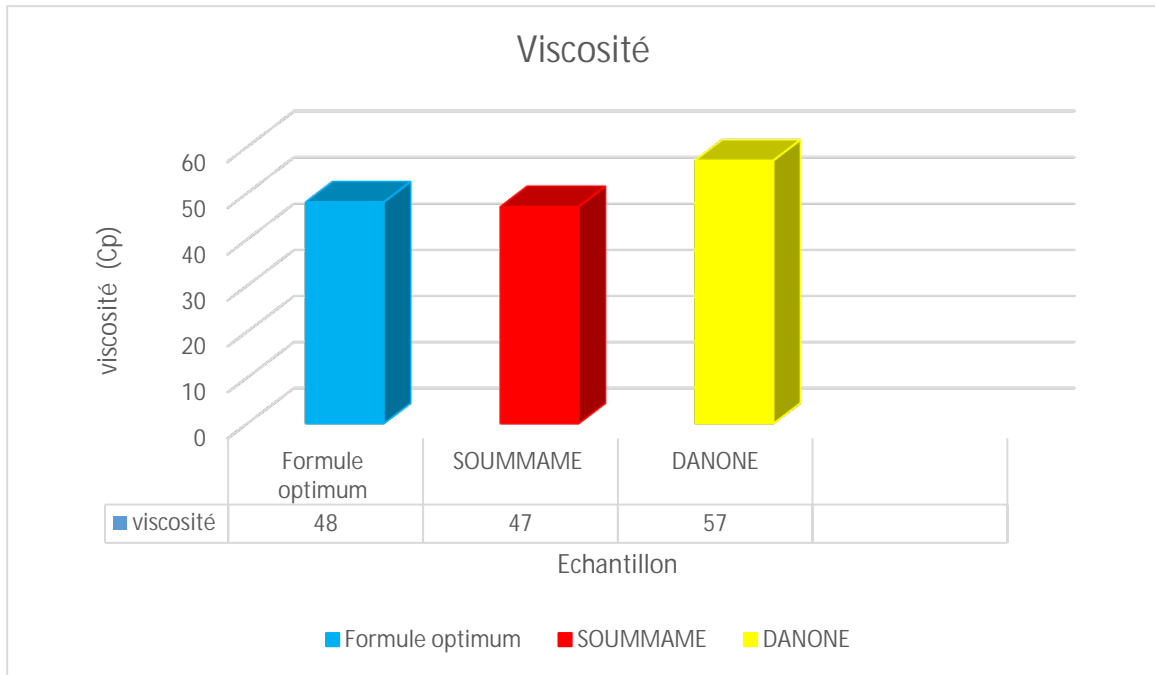


Figure 22 : Histogramme représentatif des viscosités de la formule optimale, Danone et Soummame.

V.2.2. Résultats des analyses microbiologiques de la formule optimale

Les résultats des analyses microbiologiques du produit fini sont rapportés dans le tableau suivant :

Tableau 14 : Résultats des analyses microbiologiques du produit fini.

Germes recherchés	Résultats UFC*/g	Normes de références -JO : 35/1998
FTAM (UFC/g)	46	3.10^4
Coliformes totaux (UFC/g)	Abs	10 germes / g
Coliformes fécaux (UFC/g)	Abs	1 germe / g
Levures et Moisissures (UFC/g)	Abs	$< 10^2$
Salmonella	Abs	Abs / 25 g

Il ressort du tableau que la flore mésophile aérobie totale (FTAM) est conforme à la norme J.O.R.A.

Les coliformes totaux et fécaux sont totalement absents dans notre produit, ce qui est conforme aux normes établies. L'absence de ces flores microbiennes est due au bon respect des règles d'hygiène lors des manipulations.

Quant aux levures et moisissures, les résultats obtenus indiquent leur absence, elles sont conformes aux normes de J.O.R.A, ceci est dû aux bonnes pratiques d'hygiène et au traitement thermique appliqué.

La conformité des résultats aux normes prouve le respect des conditions d'hygiène et de préparation des matières premières lors de la manipulation.

V.2.3. Résultats des analyses sensorielles

Les résultats du test de la dégustation du produit, pour les caractères : odeur, couleur, texture et goût sont donnés respectivement dans les schémas.

a. L'odeur

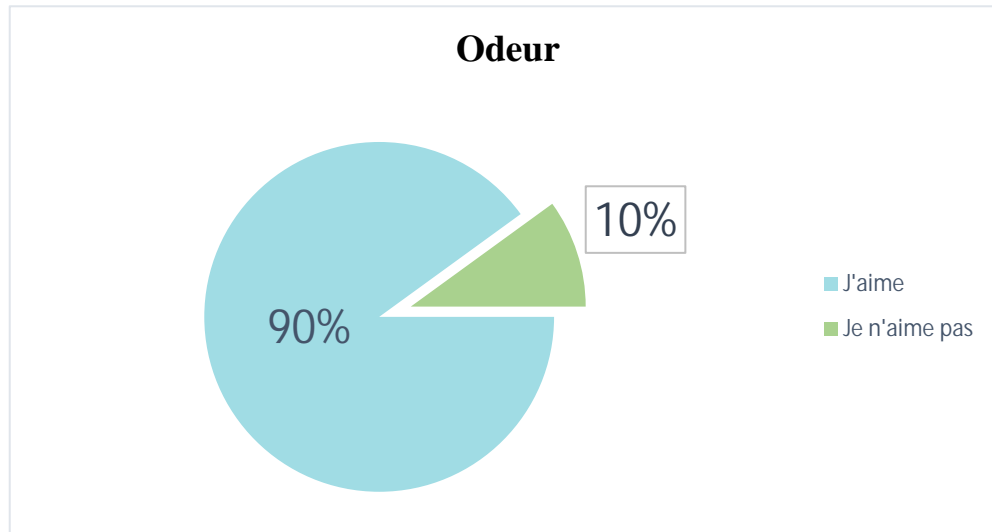


Figure 23 : Les résultats de dégustation concernant l'odeur.

D'après la figure 23, il est clair que notre yaourt présente une odeur agréable avec 90% de dégustateurs. Donc nous pouvons conclure que l'arôme ajouté au produit confère une bonne odeur, ceci a été confirmé par les dégustateurs.

b. La couleur

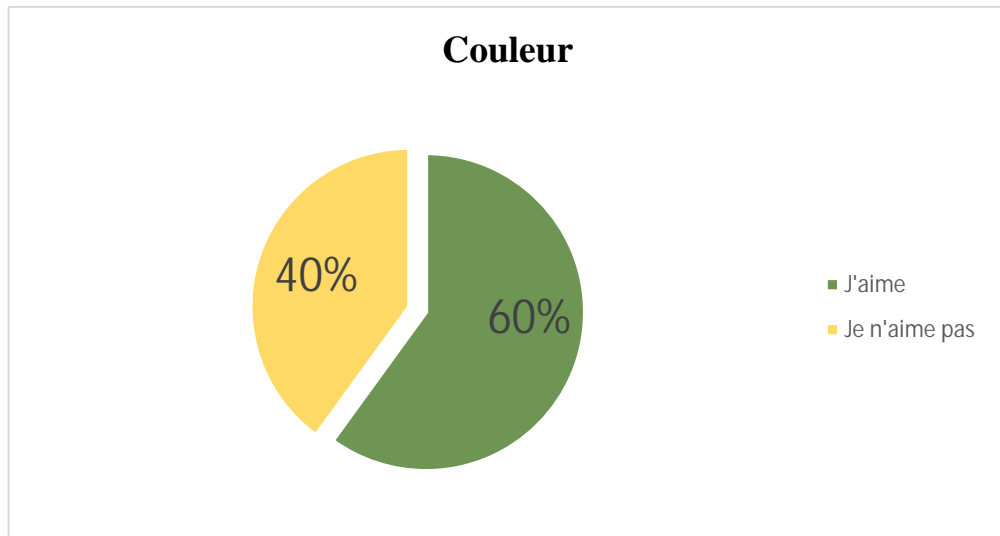


Figure 24 : Les résultats de dégustation concernant la couleur.

D'après les résultats représentés dans figure 24, on déduit que la couleur de notre produit est acceptable. 60% des dégustateurs ont aimé la couleur et 40% trouvent que la couleur est intense, la couleur notée est jaune due à l'arôme et colorant utilisé (goût banane).

c. La texture

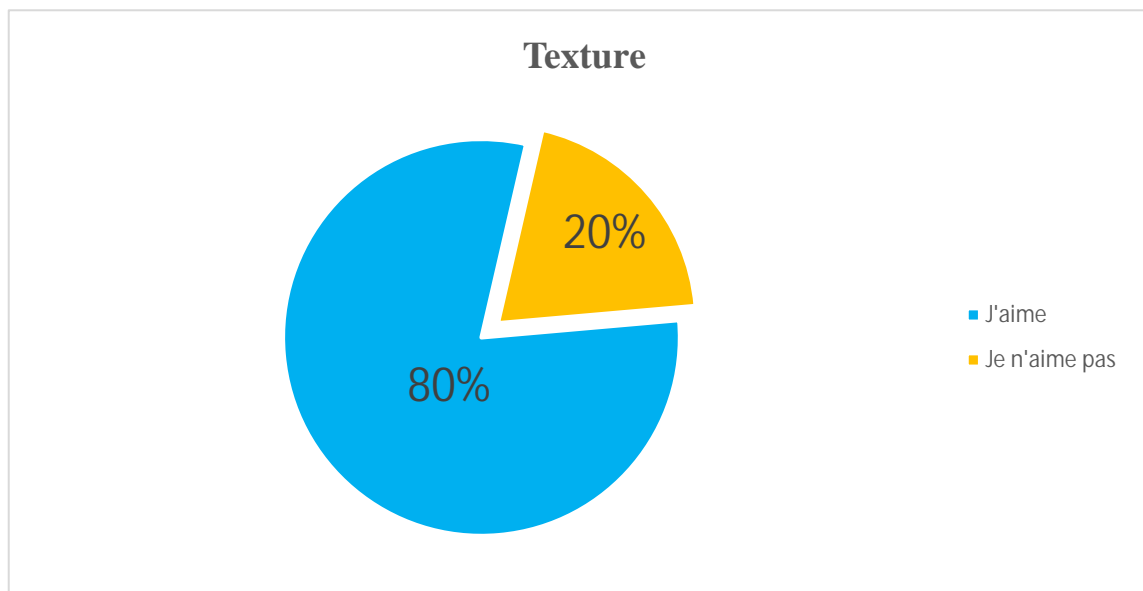


Figure 25 : Les résultats de dégustation concernant la texture.

D'après la figure 25, les résultats obtenus montrent que la majorité des dégustateurs trouvent le yaourt comme étant visqueux et légèrement liquide ce qui signifie l'acceptabilité générale de sa texture.

d. Le goût

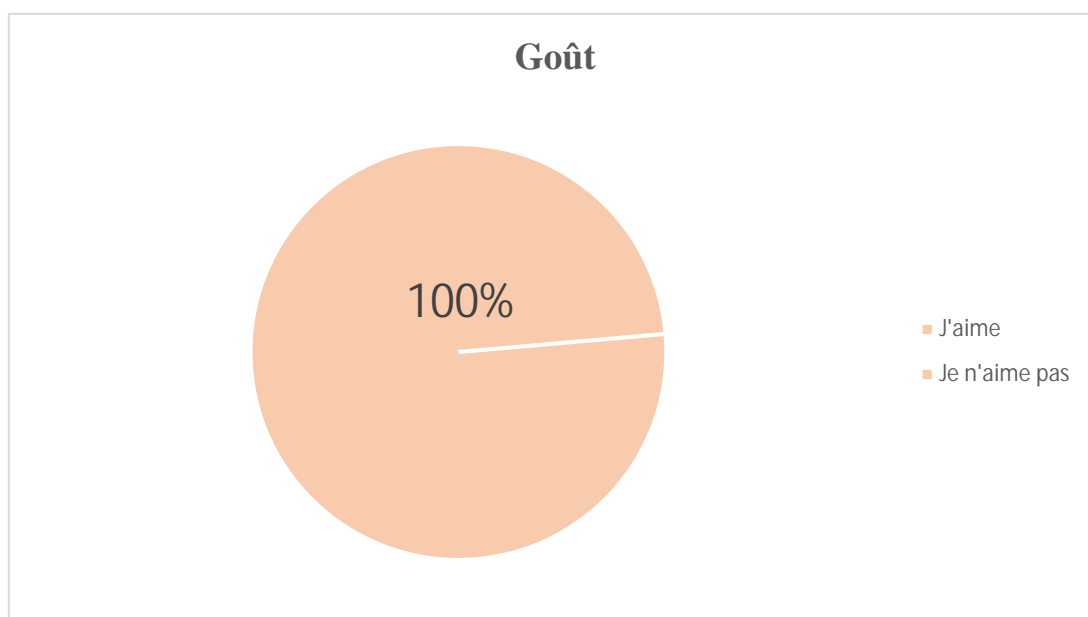


Figure 26 : Les résultats de dégustation concernant le goût.

D'après la figure 26, on observe que tous les dégustateurs apprécient le goût de notre yaourt fabriqué.

En résumé, sur le plan sensoriel, dans l'ensemble on peut dire que notre produit a été jugé acceptable par les panélistes d'après les résultats obtenus dans le test sensoriel.

V.2.4. Résultats de l'évaluation économique du produit fini

Une approche économique consistant en une estimation du pourcentage que la formule optimale nous fait gagner par rapport à la formule initiale de l'industrie est faite comme complément à notre étude.

En comparant les valeurs de la PDL et d'amidon incorporées à notre produit à celle de la préparation de l'industrie, on trouve que cette dernière nous fait gagner 1 % dans chaque litre

V.3. Discussion

Durant toute l'expérimentation en fonction des taux de poudre de lait incorporés variables de (55 g et 70g) et du taux d'amidon variables de (10 g et 20g), le pH des produits ne connaît pas vraiment des variations significatives.

La fonction acidifiante est la plus recherchée des bactéries lactiques, qui a pour effet une production importante d'acide lactique conduisant à une acidification rapide et durable. Etant riche en principaux composés nutritionnels et en facteurs de croissance, l'élévation du taux de

poudre de lait dans les produits a sans doute favorise une plus ample prolifération et donc la fermentation des germes lactiques spécifiques du yaourt.

La texture et l'onctuosité constituent, pour le consommateur, d'importants éléments d'appréciation de la qualité du yaourt. Certaines souches bactériennes produisent, à partir du glucose, des exopolysaccharides qui, en formant des filaments pouvant se lier à la caséine, limitent l'altération du gel par le traitement mécanique et influence la viscosité du yaourt.

L'augmentation de la viscosité est en générale attribuée à la production de ces exopolysaccharides (EPS) qui, selon une étude portant sur plusieurs souches serait essentiellement composé de rhamnose, arabinose et mannose [40].

Par ailleurs, il est couramment admis dans le yaourt que la production d'EPS est le résultat de l'action exercée surtout par *St. thermophilus*. Mais d'après Tamine, 1999 *L. bulgaricus* possède aussi une aptitude à produire des EPS composés de galactose, glucose rhamnose à des rapports de 4/1/1. Les yaourts à boire additionnés de poudre de lait écrémé sont nettement plus visqueux.

L'amidon apporte de nombreuses fonctionnalités essentielles au yaourt, il apporte de la viscosité et améliore la texture, accroît l'onctuosité, et assure la stabilité pendant la durée de conservation et tout ceci de façon économique [26].

Cette viscosité s'avère élevé avec l'augmentation des taux de poudre et d'amidon incorporés dans le produit [26]. Au cours l'expérimentation, il est apparu donc que plus le taux d'incorporation de la poudre de lait ainsi que d'amidon sont élevés, plus le yaourt est visqueux

Ces réponses sont certainement dues à l'effet de facteurs nutritionnel de la poudre ajoutée, qui s'avèrent capables de favoriser la production par les germes spécifiques du yaourt ensemencé d'EPS responsables de la viscosité des produits [12].

Enfin pour les autres critères organoleptiques dont la couleur, le gout, la texture. Les dégustateurs ont également bien apprécié le yaourt préparé à 32.28% de poudre de lait et de 8.50% d'amidon et qui semble envisageable pour une valorisation à l'échelle industrielle, surtout que cette préparation est plus économique par rapport à la préparation initiale de l'industrie.



Conclusion

L'objectif visé par notre étude expérimentale, consiste à optimiser une préparation laitière industrielle (Yaourt brassé). Ce travail a été réalisé à l'aide de la méthodologie des plans d'expériences.

La première étape du travail a consisté à établir une base de données expérimentale indispensable pour l'établissement et la validation du modèle mathématique.

La deuxième étape constitue une approche empirique qui a été adoptée pour construire le modèle mathématique.

Les mesures obtenues lors des essais réalisés nous ont permis la détermination des modèles prédictifs de l'EST et de la viscosité (indicateurs de qualité du Yaourt brassé). Des corrélations entre les diverses réponses expérimentales ont été établies afin de minimiser le nombre d'essais caractérisant un bon yaourt. Les modèles développés peuvent être employés pour sélectionner les mélanges les plus économiques, tout en évitant de réaliser un grand nombre d'essais pour un mélange optimal et qui répond aux cahiers de charges.

L'ensemble des analyses physico-chimiques et microbiologiques, montrent la conformité de notre produit optimal. Ceci témoigne du contrôle rigoureux de toutes les matières premières entrant dans la fabrication, ainsi que le respect des bonnes pratiques de fabrication.

De plus, le test sensoriel effectué par l'ensemble de dégustateurs sur le yaourt exprime d'une manière générale une qualité satisfaisante. De ce fait, nous pouvons dire que notre produit répond aux attentes du consommateur (panel étudié).

Une approche économique consistant en une estimation du prix du yaourt est faite comme complément à notre étude, permettant de conclure qu'il est possible de produire un yaourt brassé tout en gardant ses bienfaits nutritionnels et thérapeutiques avec un prix raisonnable.

En perspective, il serait intéressant de valider les résultats obtenus d'un point de vue expérimental et il serait judicieux d'examiner comment prendre en considération lors de futurs travaux de modélisation la contribution des différentes activités technologiques telles que l'homogénéisation et la quantité des ferments dans l'élaboration des propriétés organoleptiques du yaourt. Ceci présente une difficulté non négligeable mais pourrait faire l'objet d'une évaluation globale dont l'intérêt est évident.



Références bibliographiques

- [1] Nakasaki, K., Yanagisawa, M., Kobayashi, K. (2008). Microbiological quality of fermented milk produced by repeated-batch culture. *Journal of Bioscience and bioengineering*, 105(1): 73, 76.
- [2] Rohman, A., Riyanto, S., Yuniarti, N., Saputra, W.R., Utami, R et Mulatsih, W. (2010). Antioxidant activity, total phenolic, and total flavonoid of extracts and fractions of red fruit (*Pandanusconoides Lam*). *International Food Research Journal*, 17, 97-106.
- [3] Nagai, T., Makino, S., Ikegami, S., Itoh, H., Yamada, H. (2011). Effects of oral administration of yogurt fermented with *Lactobacillus delbrueckii ssp. Bulgaricus* OLL1073R-1 and its exopolysaccharides against influenza virus infection in mice. *International Immunopharmacology* 11, 2246-2250.
- [4] Romain Jeantet, Thomas Croguennec, Michel Mahaut, Pierre Schuck, Gérard Brulé. *Les produits laitiers*, Edition Tec & Doc, Paris, France.
- [5] LUQUET F.M., 1985. *Lait et produits laitiers ; Vache Brebis et Chèvre*, Edition Techniques et Documentation, Lavoisier. Paris, France, P61-233.
- [6] CHEFTEL J., CHEFTEL H., 1980. *Introduction à la Biochimie et à la Technologie des aliments*, Edition Technique et Documentation, Lavoisier, Paris.
- [7] CAROLE et VIGNOLA L., 2002. *Science et technologie du lait*. Ecole polytechnique de Monreal.
- [8] DEBRY G., 2001. *Lait, nutrition et santé*. Ed : Tec et Doc.
- [9] Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments, *Tables CIQUAL 2008* [en ligne], 2008, <http://www.afssa.fr/TableCIQUAL/index.htm>, (consulté le 13/10/09)
- [10] MARTIN M., 2002. *Technologie du lait de consommation*. Ed. ENILY –Canada Direction Développement Technique. 135p.
- [11] AMIOT J., FOURNIER S., LEBEUF Y. et SIMPSON R., 2002. *Composition, Propriété Physicochimique, Valeur Nutritive, Qualité Technologique et Analyse du lait* In «Science et Technologie du lait : Transformation du lait». Coord. CAROLEL., Edition Presses Internationales Polytechniques, Québec.
- [12] VIGNOLA L., 2002. *Science et Technologie du lait*, Edition Polytechnique, Canada.
- [13] FREDOT E., 2005. *Connaissance des Aliments; Bases Alimentaire et Nutritionnelle de la diététique*. 5ème tirage. Ed Tec et Doc. Lavoisier, Paris, P 9 -11
- [14] MATIEU J., 1998. *Initiation à la Physicochimie du lait*, Guide Technologique des IAA Collection sous la direction de J.Y Malgeant. P 1 –6

Références bibliographiques

- [15] BOURGEOIS C.M. et LARPENT J.P., 1996. La fermentation alimentaire. Tome 2. Ed: Tec et Doc, Lavoisier-Paris.
- [16] GOSTA, 1995. Lait long conservation. In manuel de transformation du lait. Ed : Tétrapacks Processing Systems A.B, Sweden.442p.
- [17] MATINE M., 2000. Technologie des laits de consommation. Ed : ENILAIT. Canada Direction Développement Technique.135p.
- [18] OTENG K., 1984. Microbiologie Alimentaire, Introduction à la microbiologie alimentaire dans les pays chauds, 1ère édition, Tec et Doc, Lavoisier, Paris, 260p.
- [19] AIT ABDELOUAHAB N., 2001. Microbiologie Alimentaire, Office des Publication Universitaire, Alger.
- [20] GUIRAUD J., 1998. Microbiologie Alimentaire, Edition Dunod, Paris.652 P.
- [21] Anonyme3, 2014. Consommation du lait dans le monde, Devenir du lait entre 2007 et 2020 [http : www.idele.fr](http://www.idele.fr)
- [22] YAKHLEE H., MADANI T., GHOZLANE F. et BIR B., 2010. Rôle du matériel animal et de l'environnement dans l'orientation des Systems d'élevages bovins en Algérie ; in : « la filière lait en Algérie ». Communication aux 8èmes journées des Sciences Vétérinaires, 18 et 19 avril. Ecole National Supérieure Vétérinaire d'Alger.
- [23] Tamime, A.Y., Deeth, H.C. (1980). Yogurth: technology and biochemistry. Journal of Food protection, 43, 12, 939-977
- [24] Lablondel, C. (2007). Les laits fermentés : vos alliés pour une meilleure santé. Pp. 3
- [25] Enkelejda, P. (2004). Interactions physico-chimiques et sensorielles dans le yaourt brassé aromatisé : quels impacts respectifs sur la perception de la texture et de la flaveur. Thèse de doctorat en Science des Aliments. Institut national agronomique paris grignon.
- [26] Mahaut, M., Jeantet, R., Brulé, G., Schuck, P. (2000). Les produits industriels laitiers. Tech & Doc, Lavoisier, Paris.
- [27] Luquet, F. M., Carrieu, G. (2005). Bactéries lactiques et probiotiques. Collection sciences et techniques agroalimentaires, Ed Lavoisier tec et Doc, Paris, Pp 307.
- [28] Roussel Y, Pebay M, Guedon G, Simonet JM et Decaris B.(1994).Physical and genetic map of Streptococcus thermophilusA054. Journal of Bacteriology176Suppl 24: 7413-7422.
- [29] Dellaglio F, De Roissart H, Torriani S, Curk MC et Janssens D. (1994).Caractéristiques générale des bactéries lactiques. In : De Roissart H et Luquet M. Bactéries lactiques (Eds.), Tec et Doc, Lavoisier. Paris,

Références bibliographiques

- [30] Lamoureux L. (2000). Exploitation de l'activité β -galactosidase de culture de bifidobactéries en vue d'enrichir des produits laitiers en galacto- oligosaccharides. Mémoire de maîtrise. Université de Laval, Canada.
- [31] <https://www.indiamart.com/proddetail/streptococcus-thermophilus-19238643348.html>
(Consulter le : 22/05/2021)
- [32] Terre S. (1986). Propriétés technologiques, nutritionnelles et physiologiques Streptococcus thermophilus et Lactobacillus bulgaricus. Techniques laitières et marketing
- [33] Malonga M. (1985). Etude de la fabrication des yaourts en république populaire du Congo. Essais d'amélioration. Mémoire de Doctorat des sciences alimentaires. Université de Clermont II, 167p g.1008, 26-36.
- [34] Dellaglio F. (1989). Characteristics of thermophilic lactic acid bacteria. Les laits fermentés. Actualité de la recherche. 83, 11-18
- [35] Steele CM. (1997). A threat in the air: How stereotype shape the intellectual identities and performance of women and african-americans. American psychology. 69, 797-811.
<https://www.sciencephoto.com/media/873993/view/lactobacillus-bulgaricus-yogurt-bacterium-sem> (Consulter le : 22/05/2021)
- [36] Schmidt J.L., Tourneur C. & Lenoir J. (1994). Fonction et choix des bactéries lactiques laitières. In bactéries lactiques. pp. 37-46. Ed. De Roissart, H. et Luquet, F.M., II, Loriga, paris.
- [37] Tamime and Robinson, R.K., 1999. Yagourt science and technology. 2nd Ed. Combridge: Woodhead Publishing.
- [38] Singh Sudheer K., Ahmed Syed U. & Ashkor P. (2006). Yogurt science and technology, 2nd Ed. Cambridge, Woodhead Publishing.
- [39] Terre S. (1986). Propriétés technologiques, nutritionnelles et physiologiques Streptococcus thermophilus et Lactobacillus bulgaricus. Techniques laitières et marketing. 1008, 26-36. ;
- [40] Casala D, Requeat T et Gomoz R. (1996). Antimicrobial activity of lactic acid bacteria isolated from goat's milk and artisanal cheeses: Characteristics of a bacteriocin produced by Lactobacillus curvatus IFPL 105. The society for applied bacteriology. 81, 35-41
- [41] Desmazeaud M. (1996). Les bactéries lactiques dans l'alimentation humaine : Utilisation et Innocuité. Cahier Agriculture. 5 Suppl 5 : 331-342.

Références bibliographiques

- [42] Jacobson NS, Dobson KS, Truax ME, Koerner K, Gollan JK, Gortner E et Prince SE. (1996). A component analysis of cognitive-behavioural treatment for depression. *Journal of Consulting and Clinical Psychology*.64, 295-304
- [43] Mc Sweney PLH ET Sousa MJ. (2000). Biochemical pathways for the production of flavour compounds in cheeses during ripening. *Lait. Dairy Science and Technology*.
- [44] Shahbal S, Hemme D ET Renault P. (1993). Characterization of a cell envelope-associated proteinase activity from *Streptococcus thermophilus* H-strains. *Applied and Environmental Microbiology*.59Suppl 1 : 177-182.
- [45] Bouton Y, Guyot P, Dasen A et Grappin R. (1994). Activité protéolytique de souches de lactobacilles thermophiles isolées de levains et de comté.II. Application en sites industriels.*Lait*.74Suppl 1: 33-46
- [46] Chamba JF, Duong C, Fazal A et Prost F.(1994). Sélection des souches de bactéries lactiques. In : De Roissart H et Luquet F.M. *Bactéries lactiques*. (Eds.), Loriga I, Paris, pp.499-521
- [47] Zourrari A, Roger S, Chabanet C et Desmazeaud MJ. (1991). Caractérisation des bactéries lactiques thermophiles isolées de yaourts artisanaux grecs. I. Souches de *Streptococcus salivarius* subsp *thermophilus*. *Le lait* .71Suppl 4:463-482
- [48] Grobber GJ, Sikkema J, Smith MR ET Bont JAM. (1995). Production of extracellular polysaccharides by *Lactobacillus delbrueckii* ssp *bulgaricus* NCFB 2722 grown in chemically defined medium. *The society for applied bacteriology*.
- [49] Bouzar F, Cerning J ET Desmazeaus JM. (1996). Exopolysaccharides production in milk by *Lactobacillus delbrueckii* ssp *bulgaricus* CNRZ 1187 and by two colonial variants. *Dairy Sci*.79, 205-211
- [50] Hess SJ, Roberts RF et Ziegler GR. (1996). Rheological properties of non-fat yogurt stabilized using *Lactobacillus delbrueckii* ssp.*bulgaricus* producing exopolysaccharides or using commercial stabilizer systems. *Journal of Dairy science*.80Suppl 2: 252-263
- [51] Loones A. (1994). Lait fermentés par les bactéries lactiques. In *Bactéries lactiques*. pp. 37-151. Ed. De Roissart, H. et Luquet, F.M., II, Loriga, paris.
- [52] Perry DB, Mc Mahon DJ ET Oberg CJ. (1997). Effect of exopolysaccharide-producing cultures on moisture relation in low fat Mozzarella cheese. *Journal of Dairy Science*.
- [53] Looijesteijn PJ, Beols IC, Kleerebezem M , Hugenholtz J. (1999). Regulation of exopolysaccharide production by *Lactococcus lactis* sub sp. *Cremoris* by the sugar source. *Applied and Environmental Microbiology*, 65Suppl 11: 5003-5008.

Références bibliographiques

- [54] SALOFF-COSTE C. J., 1995. Yoghurt as a calcium source. DANONE world newsletter. N°4 1-12 pp.
- [55] HERREROS.M., 2005 et VEISSEYRE, R., 1979 : Technologie du lait : Constitution Récolte, Traitement et Transformation du lait, 3e Edition, La maison Rustique, Paris France, 714 p.
- [56] MARTEAU PH., POCHART PH., BOUHNİK Y. et RAMBEAU. 1994. Survie et effets de lactobacilles acidophiles et bifidobactéries des produits laitiers fermentés dans le tube digestif de l'homme. Cahier de la nutrition et de diététique. 321-384 pp
- [57] FERNANDES C. F. et SHAHANI K. M., 1990. Anticarcinogenic and immunological properties of dietary Lactobacilli. J. Food Prot. 8:704-710 pp
- [58] ABSOLONNE J., 1989. Les yaourts : adaptation aux objectifs nutritionnels. Les laits fermentés-actualité de la recherche.135-159 pp.
- [59] DROUAULT S. et CORTIER G. 2001. Effets des bactéries lactiques ingérées avec des laits fermentés sur la santé. Veres. 32 :101-117 pp.
- [60] LARPENT et BOURGEOIS C.M., 1989. Les bactéries lactiques, Les microorganismes de fermentations.
- [61] Lompo L., Niculescu N., Broutain C., (2006). Démarche d'élaboration d'un guide de bonnes pratiques d'hygiène : Maîtrise de la qualité dans la transformation laitière. – Ouagadougou : GRET44p.- Compte rendu atelier sous régional de restitution.
- [62] Boubchir-Ladj K. (2011). Effets de l'enrichissement (avec des concentrés de protéines laitières) et des paramètres technologiques sur la qualité du yaourt fabriqué à laiterie Soummam d'Akbou. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Magister de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou Algérie.
- [63] Lamontagne, M. (2002). Produits laitiers fermentés. Science et technologie du lait.
- [64] Eck A. & Gillis J.C. (1997). Le fromage—de la science à l'assurance-qualité. Eck A.,Gillis J. (Eds.). Lavoisier. New York.
- [65] Malonga M. (1985). Etude de la fabrication des yaourts en république populaire du Congo. Essais d'amélioration. Mémoire de Doctorat des sciences alimentaires. Université de Clermont II, 167p.
- [66] BOUDIER J.F. (1990) Produits frais. In laits et produits laitier. Vache – Brebis –Chèvre. Luquet, F.M. (Eds) Technique et Documentation, Lavoisier, Paris, p : 35-66.
- [67] BRULE, G., LENOIR J (2003). La coagulation du lait. In Eck A : Laits et produits laitiers. 2^{ème} Ed. TEC et DOC. Lavoisier. Paris. Pp : 1-20.

Références bibliographiques

- [68] DUPIN H, CUP J.L., MALEVIK M.I, LEYNAUD- ROUAUD C. ET BERTHIER A.M., 1992. Alimentation et nutrition humaine. Ed : esf, paris, 1515p.
- [69] GHEBBI et al.1997
- [70] Hubert P. (1996). Définition du modèle. Dictionnaire français d'hydrologie. Comité National Français des Sciences Hydrologiques (Ed.)
- [71] Walter E., Pronzato L. (1994). Identification of parametric models. Communications and Control Engineering Series. Springer-Verlag, Berlin.
- [72] Viennet R., (1997). Nouvelle méthodologie de planification expérimentale pour l'optimisation multicritères de procédés. Thèse. Institut National Polytechnique de Lorraine
- [73] Bernard O. (2004). La modélisation des systèmes biologiques : Aller-retour le long des fleuves qui circulent entre l'océan du réel et le lac des modèles. Thèse Pour l'obtention de l'habilitation à diriger des recherches. Université de Nice-Sophia- Antipolis.
- [74] Frédéric GILLON, MODELISATION ET OPTIMISATION PAR PLANS D'EXPERIENCES D'UN MOTEUR A COMMUTATIONS ELECTRONIQUES, 1997, UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE, France
- [75] Goupy J. (2001). Introduction aux Plans d'expériences. Dunod (Ed.), Paris.
- [76] Box G.E.P., Hunter W.G. & Hunter J.S. (2005). Statistics for Experimenters. John Wiley and Sons (Ed.). New-York.
- [77] Goupy J. (1999). Plan d'expériences pour surface de réponse. Dunod (Ed.), Paris.
- [78] IBOUKHOULEF H., Traitement des margines des huileries d'olive par les procédés d'oxydation avancée basés sur le système Fenton-Like (H₂O₂/Cu). Thèse de doctorat : Chimie des matériaux. Université de Mouloud Mammeri. 2014. Tizi-Ouzou.
- [79] CLOUDE H., Les plans factoriels fractionnaires, 2009, UFR de pharmacie de tours.
- [80] VIRLIGN E. 2001. Aliment et boisson ; Technologie et Aspects Réglementaires, Science des Aliment, 2eme Edition Science et techniques, Doin, Paris, France.
- [81] GUIRAUD J., 1998. Microbiologie Alimentaire, Edition Dunod, Paris.652 P.
- [82] THURIAUX P., 2004. Les Organismes Modèles ; Les Levures, Edition Belin.
- [83] GUIRAUD J., 1998. Microbiologie Alimentaire, Edition Dunod, Paris.652 P.
- [84] NICOD H., 1998. L'organisation pratique de la mesure sensorielle. In évaluation sensorielle« manuel méthodologique ». Ed. Tec et Doc – Lavoisier, Paris.



Annexes

Annexe 1 : Réactifs, milieux de cultures, appareillage et petit matériel**Tableau 15 :** Liste des réactifs et milieux de culture utilisés.

Réactifs	Milieux de culture
Alcool iso amylique	Bouillon d'eau peptonée tamponnée (EPT) OGA PCA VRBL
Acide sulfurique	
Acide phosphorique	
Eau distillée	
Ethanol	
Hydroxyde de sodium (NaOH)	
Phénolphtaléine	

Tableau 16 : Appareillage et matériel utilisés.

Appareillage	Matériel
Agitateur magnétique	Béchers Boite de Pétri Burette graduée Eprouvette Pipettes graduée Spatules Tubes à essais
Autoclave	
Balance analytique	
Bec Bunsen	
Butyromètre de GERBER	
Centrifugeuse	
Dessiccateur	
Etuve	
pH-mètre (LOVIBOND)	
Thermomètre électronique	

Annexe 2 : Détermination de l'acidité titrable

❖ Solutions

- Solution de phénolphtaléine à 1% ;
- Solution de soude (NaOH 0.111N).

❖ Mode opératoire

Un volume de 10 ml du yaourt brassé est prélevé comme échantillon. Ajouter 3 à 4 gouttes de phénolphtaléine, puis titrer par la solution de l'hydroxyde de sodium (NaOH 0.1N) jusqu'à l'apparition du virage de la couleur rose pale. Quand la couleur persiste au moins 10 seconde, arrêter l'ajout de la soude et lire la chute de la burette.



Figure 27 : Détermination de l'acidité.

❖ Expression des résultats

Le résultat est exprimé en °D : 1 °D correspond à 0,1 g d'acide lactique, elle est donnée par la formule suivante :

Où :

$$A (\text{°D}) = V * 10$$

A (°D) : Acidité titrable en degré Dornic (°D).

V : volume en ml de la solution sodique utilisée pour le titrage.

Annexe 3 : Détermination de la teneur en matière grasse par la méthode acidobutyrométrique de GERBER(1975)

❖ Mode opératoire

- Introduire 10 ml d'acide sulfurique à 1.83 N dans un butyromètre ;
- Ajouter 11 ml du yaourt brassé en le versant sur la paroi du butyromètre ;
- Rajouter 1 ml d'alcool iso-amylique ;
- Boucher le butyromètre avec un bouchon et agiter manuellement le contenu du butyromètre ;
- Mettre le butyromètre dans une centrifugeuse (1200 tours/ seconde pendant 5 minutes)

❖ Expression des résultats

Le plan inférieur de la colonne est ramené en coïncidence avec une graduation par manœuvre du bouchon puis, le résultat est lu directement sur la graduation du butyromètre.

La concentration de la matière grasse est exprimée en g/l.

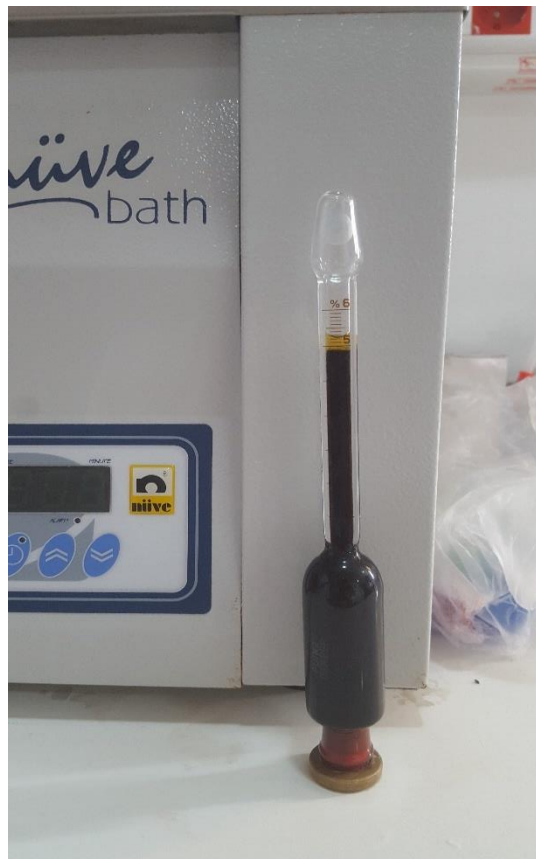


Figure 28 : Détermination de la MG.

Annexe 4 : Détermination de l'EST

❖ Principe de fonctionnement

La mesure du taux d'extrait sec total est réalisée par un dessiccateur infrarouge de marque SARTORIUS MA 45 (**figure 5**). C'est une dessiccation à 105°C pendant 15 min jusqu'à l'obtention d'une valeur d'un poids constant pour le produit semi fini et à 105°C/10 min pour le produit fini.

❖ Mode opératoire

- Allumer l'appareil avec la touche START ;
- Placer la coupelle sur la balance du dessiccateur ;
- Tarer;
- Peser 3g de l'échantillon de cette coupelle ;
- bien étaler l'échantillon et enfin baisser le capot de l'appareil ;
- Appuyer sur la touche START pour démarrer l'analyse.
- Expression des résultats
- Les résultats sont exprimés en pourcentage (masse/masse).



Figure 29 : Détermination de l'EST.

Annexe 5 : Mesure des propriétés rhéologiques et suivi de la viscosité

Nous avons réalisé la mesure de la viscosité à l'aide d'un viscosimètre HAAKE VT 500, muni d'un dispositif de mesure SV-DIN (vitesse de cisaillement de 139.1 tours par minute).

❖ Mode opératoire

- Placer le mobile sur le viscosimètre ;
- Placer 50 ml du yaourt à analyser sur le support et centrer le par rapport au mobile ;
- Régler les paramètres pour mener la vitesse jusqu'à 139.1 tour/s ;
- On appuie sur la touche START pour enclencher le déroulement
- Après 45s lire la valeur indiquée sur l'échelle.

❖ Expression des résultats

Le résultat obtenu est exprimé en centpoises.



Figure 30 : Détermination de la viscosité.

Annexe 6 : Fiche d'appréciation pour le test de dégustation (Analyse sensorielle)**Test des consommateurs****Identité****Sexe :****Age :**

Veillez donner vos appréciations pour chaque échantillon, en mettant une croix (X) dans la case qui convient.

	Couleur	Odeur	Goût	Texture
J'aime				
Je n'aime pas				

Observation personnelle :

.....

.....

.....

.....

Merci pour votre participation

Résumé

La qualité et la texture du yaourt change en fonction de facteurs chimiques, physiques et microbiologiques, à savoir la température, le rapport entre les deux souches utilisées dans la fabrication (streptocoques/lactobacilles), ainsi que le taux de sucre ou d'amidon et de lait en poudre ajouté. La modélisation par plans d'expériences, nous a permis dans un premier temps de sélectionner les facteurs ayant une influence statistiquement significative sur le procédé de fabrication en suivant un plan d'expérience dit : factoriel composite centré. L'analyse graphique et mathématique des modèles obtenus nous a permis d'avancer que le taux de PDL optimale de la fabrication du yaourt gravite aux alentours de 32.28% et que le pourcentage d'amidon ajouté était aux alentours de 8.50%, respectivement. L'analyse statistique des modèles a témoigné de leur robustesse avec un coefficient de régression proche de 1 pour les deux modèles. De plus les résultats issus des essais ayant servi à l'ajustement des paramètres sont similaires à ceux calculés par le modèle.

Mots clés : Yaourt, Plan d'expérience, taux d'amidon, PDL.

The quality and texture of yoghurt changes according to chemical, physical and microbiological factors, namely temperature, the ratio between the two strains used in the manufacturing process (streptococci/lactobacilli), as well as the rate of sugar or starch and milk powder added. The modelling by design of experiments allowed us to select the factors with a statistically significant influence on the manufacturing process by following a design of experiment known as: centred composite factorial. The graphical and mathematical analysis of the models obtained allowed us to suggest that the optimal PDL rate for yoghurt production was around 32.28% and that the percentage of added starch was around 8.50%, respectively. The statistical analysis of the models showed their robustness with a regression coefficient close to 1 for both models. Moreover, the results from the trials used to fit the parameters were similar to those calculated by the model.

Key words: Yoghurt, experimental design, starch content, PDL.