



Année Universitaire : 2014-2015

**Filière ingénieurs
Industries Agricoles et Alimentaires**



Rapport de stage de fin d'études

**Suivi de la viscosité de raïbi selon un plan d'expériences
/ Contribution à la modélisation pour prédire la
viscosité de raïbi.**

Réalisé par:

-Mlle. MAMOUNI Fatima

Encadré par:

- Mme. RHOUL Ghalia
- Professeur Mr. LAZRAQ Abderrahim

Présenté le 30 juin 2015 devant le jury composé de:

- Professeur Mr. A. LAZRAQ
- Professeur Mr. A. BOULAHNA
- Professeur Mme. A. AZZOUZI

Stage effectué à : Centrale laitière Meknès

Dédicaces

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut . . . Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance. . . Aussi, c'est tout simplement que je dédie ce projet de fin d'études...

A Dieu le tout-puissant, le Clément, le glorieux, le juste et le gracieux qui a éclairé ma voie par le savoir, et qui m'a armé par la foi et la patience.

*A mes **chers parents**: autant de phrases et d'expressions aussi éloquentes soient-elles ne sauraient exprimer ma gratitude et ma reconnaissance.*

Vous avez su m'inculquer le sens de la responsabilité, de l'optimisme et de la confiance en soi face aux difficultés de la vie. Vos conseils ont toujours guidé mes pas vers la réussite. Votre patience sans fin, votre compréhension et votre encouragement sont pour moi le soutien indispensable que vous avez toujours su m'apporter. Je vous dois ce que je suis aujourd'hui et ce que je serai demain et je ferai toujours de mon mieux pour rester votre fierté et ne jamais vous décevoir. Que Dieu, le tout-puissant, vous préserve, vous accorde santé, bonheur, qui étudie de l'esprit et vous protège de tout mal.

*A mes **frères**: les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous. Mes anges gardiens et mes fidèles compagnons dans les moments les plus délicats.*

Puisse Dieu vous garder et vous protéger et que l'amour et la fraternité nous unissent à jamais.

*A mes **grands-parents**, mes **tantes**, mes **oncles** et à toute **ma famille**, je vous remercie pour vos encouragements, soutiens et bienveillances, je vous dédie ce modeste travail preuve de mon estime et ma reconnaissance.*

*A tous mes **enseignants** tout au long de mes études : Permettez-moi de vous témoigner tout le respect que vous méritez ainsi que ma profonde affection.*

*A mes très **chers amis** : pour tous les moments magnifiques et inoubliables que j'ai passés avec vous. Pour tout l'amour, le soutien que vous m'avez offert, de votre affection je ne peux me surpasser, je vous remercie très fort et je ne vous oublierai jamais. Que Dieu le tout-puissant vous préserve tous et vous procure sagesse et bonheur.*

A tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

*Et c'est pour la **postérité** que je livre ce modeste travail quand je ne serais plus là, pour **ceux** qui m'ont tenu la main et **ceux** qui l'ont lâchée, pour **ceux** qui firent ma joie et **ceux** qui l'ont gâché.*

MAMOUNI Fatima

Remerciement

Loin d'être une tradition d'adresser des remerciements dans tout projet de fin d'études, aux personnes ayant contribué à sa réalisation, il s'agit pour nous, d'un devoir spontané de reconnaissance et de gratitude envers toutes les personnes qui, à leurs manières et à des degrés différents nous ont fourni une assistance technique, une confiance en soi et un amour incomparable.

Nous remercions en premier lieu, **ALLAH** le tout-puissant, de nous avoir donné le foie, le courage et la confiance en nous-mêmes pour pouvoir mener à terme ce présent travail.

Nos vifs remerciements vont conjointement à **Mr. Anas ARHBAL**, Directeur de la Centrale.

Laitière -usine de Meknès- de nous avoir accordé ce projet de fin d'études.

Nous témoignons notre profond respect à **Mr. Abderrahim LAZRAQ**, Professeur encadrant à la FST FES, pour ses directives précieuses et ses conseils pertinents.

Nous sommes particulièrement redevables envers notre parrain industriel **Mme. G. RHOUL**, ingénieur qualité, pour sa disponibilité, son orientation avisée ainsi que pour les conseils qu'elle n'a cessé de nous prodiguer et qui ont contribué à l'accomplissement de ce travail.

Nous aimerions également remercier très particulièrement et solennellement tous **les membres du jury**, **Mme. A. AZZOUZI** et **Mr. A. BOULAHNA** pour l'honneur qu'ils nous ont accordé en acceptant de juger mon travail.

Nous adressons nos remerciements les plus sincères à **tout le personnel de la CENTRALE LAITIAIRE -usine de Meknès-** pour son accueil chaleureux, sa sympathie, durant la période du projet.

Enfin, nous remercions **toutes les personnes** qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce modeste travail.

Liste des abréviations :

TP : tank de poudrage

TS : tank de stockage

TT : tank de thermisation

TM : tank de maturation

MB : masse blanche

TP : taux protéique

MG : matière grasse

ES : extrait sec

ESD : extrait sec dégraissé

MM : mix maigre

MG : mix gras

J+1 : un jour plus

ZNC : zone de non-conformité

ZCC inf : zone inférieure

ZCC sup : zone supérieure

Liste des figures :

Figure 1: Organigramme de la centrale laitière Meknès	14
Figure 2:Schéma du circuit fermé.....	20
Figure 3:Fermentation du lactose.....	22
Figure 4: Processus de préparation du Raïbi.....	22
Figure 5:Diagramme de fabrication de raïbi	24
Figure 6:Diagramme d'Ishikawa	27
Figure 7:Plan d'action	28
Figure 8: Installation de l'étude	30
Figure 9:Choix de l'objectif	31
Figure 10: choix de la matrice d'expérience	31
Figure 11: Choix de modèle.....	32
Figure 12: Choix de type de la matrice d'expérience	32
Figure 13:Choix de matrice.....	33
Figure 14:Choix d nombre d'expériences	33
Figure 15: Construction de la matrice d'expériences	33
Figure 16:Déscription des facteurs à tesser	35
Figure 17:Enregistrement du réponse	37
Figure 18: Sélection de la modification	37
Figure 19:Choix du nombre de réponse	37
Figure 20:Description de réponse	37
Figure 21:Choix de désirabilité.....	38
Figure 22: Initialisation des désirs	38
Figure 23:Désirabilité viscosité	38
Figure 24:Préparation de la représentation graphique	40
Figure 25:Surface de réponse X1 durée de circuit fermé, X3 Vitesse de décaillage.....	40
Figure 26:Cercle de corrélation.....	45
Figure 27:Histogramme des résidus.....	47

Liste des tableaux :

Tableau 1: la fiche signalétique de la centrale laitière	12
Tableau 2: la composition moyenne du lait de vache en (g/L)	15
Tableau 3 : Tableau récapitulatif des valeurs des facteurs	29
Tableau 4 : Matrice d'expérience codée	34
Tableau 5: Matrice d'expérience réelle	36
Tableau 6: Matrice réelle avec les réponses quantitative	38
Tableau 7: Tableau de corrélation.....	45
Tableau 8: Estimation statistique des coefficients	46
Tableau 9 : Tableau de coefficient de détermination / détermination ajusté	47

Sommaire

Introduction	9
Chapitre 1 : Secteur laitier Marocain et présentation de l'entreprise d'accueil	10
I) Secteur laitier Marocain	10
1) Plan laitier.....	10
2) La filière dans le plan Maroc vert.....	10
II) Centrale laitière	11
1) Présentation	11
2) Fiche signalétique.....	12
III) Centrale laitière Meknès	12
1) Historique.....	12
2) Situation géographique.....	13
3) Produits fabriqués dans l'usine de Meknès	14
4) Organigramme de la centrale laitière Meknès.....	14
Chapitre 2 : Processus de fabrication de raïbi	15
I) Généralités sur le lait de la vache.....	15
II) Généralité sur le yaourt brassé	17
1) Définition et législation	17
2) Structure et texture du yaourt brassé.....	17
III) Processus de fabrication de raïbi	18
1) processus de réception et d'obtention du lait écrémé	18
2) Préparation du mix.....	19
3) Pasteurisation.....	20
4) Maturation	21
5) Décaillage et brassage.....	22
6) Préparation du sirop.....	23
7) Mélange de la masse blanche avec le sirop et l'arome.....	23
8) conditionnement.....	23
9) Diagramme de fabrication de raïbi	24
IV) Contrôle qualité de raïbi	25
Chapitre 3 : suivi de la viscosité selon un plan d'expériences	27
I) Outils et matériels	27
1) Outils d'analyse	27
2) Outils laboratoire	28

II) le cadre expérimentale.....	29
1) Détermination des facteurs d'influence	29
2) Principe du plan d'expériences	30
3) l'élaboration du plan d'expériences.....	30
4) Conclusion de l'étude.....	41
Chapitre 4 : Modélisation de la viscosité de raïbi (formule 100% lait)	42
I) Principe de la régression linéaire multiple.....	42
1) Modèle de régression linéaire multiple	42
2) Evaluation de la qualité du modèle.....	43
II) Modélisation de la viscosité de raïbi à l'aide d'un modèle mathématique	44
1) collecte de données	44
2) Outils d'analyse statistique	44
3) Etude des variables	44
4) Modélisation	46
III) Modélisation de la viscosité de raïbi à l'aide d'un modèle mathématique	46
1) Examen des résidus.....	46
2) Coefficients de détermination	47
Conclusion et perspectives	48
Références bibliographique.....	49
Liste des annexes	50

Introduction

L'industrie laitière Marocaine se distingue par un marché potentiel de croissance élevé. La demande grandissante en lait et produits dérivés (fromages, yaourt, beurre, glaces...) se justifie par la forte démographie, l'urbanisation et l'amélioration du pouvoir achat du consommateur.

Par conséquent, les produits laitier peuvent atteindre des marchés inespérés et y rester plus longtemps qu'auparavant. La concurrence ne cesse donc de s'accroître et de devenir de plus en plus forte et les consommateurs disposent de plus de choix vu le nombre croissant de fournisseurs de produits alimentaires [1].

Les yaourts, et face à cette concurrence, se doivent d'être de qualité. Les industriels laitiers partout dans le monde, et particulièrement au Maroc, restent attentifs aux réactions du marché et essayent d'adapter au fil du temps la qualité de leurs produits aux désirs des consommateurs.

De ce fait, la Centrale Laitière, usine de Meknès, (CL-M) est amenée à améliorer la production, en vue de trouver un compromis entre la qualité organoleptique et la valeur nutritive du produit fini. Dans cette optique, le service qualité de la Centrale Laitière usine de Meknès a proposé ce projet de fin d'études intitulé : «Suivi de la viscosité de raïbi selon un plan d'expériences / Contribution à la modélisation pour prédire la viscosité de raïbi » et qui consiste d'une part à faire un suivi de la viscosité avec variation des niveaux des paramètres des facteurs susceptibles d'influencer la viscosité pour arriver finalement à une surface de réponse optimale, dont la viscosité est proche à la valeur cible, et d'autre part, l'élaboration d'un modèle mathématique moyennant la régression linéaire multiple et finalement l'évaluation de la qualité du modèle et son adoption pour la prédiction de la viscosité de raïbi.

Le présent rapport comporte quatre chapitres, présentant le détail des travaux qui ont été mené pour améliorer la qualité du produit fini raïbi.

- **Le premier chapitre** présente le contexte général du projet, suivi par un bref aperçu sur Le secteur laitier marocain et présentation de l'entreprise d'accueil.
- **Le deuxième chapitre** est consacré au processus de fabrication de raïbi.
- **Le troisième chapitre** concerne le Suivi de la viscosité de raïbi effectué selon un plan d'expérience.
- **Le quatrième chapitre** est consacré à la prédiction de la viscosité du produit fini à partir d'un modèle mathématique proposé.

I) Secteur laitier Marocain:

L'industrie de la transformation alimentaire au Maroc est l'une des principales industries du pays. Il s'agit d'une industrie stratégique, capable de répondre aux besoins alimentaires d'une population en croissance rapide et de générer une activité économique importante grâce à l'exportation. Actuellement, cette industrie génère un chiffre d'affaire d'environ 5,6 [2] milliards de dollars. Toutes les filières de l'industrie se sont développées y compris celle de la fabrication de produits laitiers.

L'Etat a mis en place un nouveau plan pour la période 2000-2020 qui s'articule autour de la spécialisation des régions en systèmes de production, la poursuite de l'amélioration génétique du troupeau, l'encouragement de partenariat entre les professionnels du secteur et l'amélioration de la qualité du lait de la production à la commercialisation.

1) Plan laitier

Depuis 1975, année du premier « Plan Laitier », le secteur laitier marocain a connu un grand essor. Ce plan reposait sur sept principaux axes : 1) le développement des cultures fourragères, 2) l'amélioration de la composition génétique par l'importation du bétail laitier à haute valeur génétique, 3) la création des étables pépinières et le croisement, 4) l'organisation professionnelle des éleveurs, 5) l'encouragement { la production par l'octroi de subventions aux éleveurs, 6) l'organisation du circuit de commercialisation et la multiplication des usines de transformation, et 7) l'encadrement sanitaire du cheptel. Avec ce plan, la production laitière est passée de 581 millions de litres en 1975 à 1,2 milliards de litres en 2000. Cependant, et même avec ce résultat, le plan n'a pas atteint ses objectifs, en particulier le niveau de consommation de produits laitiers par la population marocaine.

C'est la raison pour laquelle l'Etat a élaboré un nouveau plan pour la période « 2000-2020 » dont les principaux axes s'articulent sur : l'insertion prioritaire du secteur laitier avec toutes ses composantes dans la politique de développement agricole, la spécialisation des régions en systèmes de production.

2) La filière dans le Plan Maroc Vert

Le Plan Maroc Vert a prévu un développement massif de la filière laitière pour atteindre des standards internationaux.

Plusieurs améliorations ont été prévues, dont l'augmentation des revenus des éleveurs (+20-50%), la mise en place sur la base d'un contrat programme entre l'Etat et les opérateurs existants, la création de projets intégrés autour de fermes productrices, l'augmentation massive des volumes produits au niveau du modèle de production des petites et moyennes fermes agrégées, avec un objectif de doublement de 2,5 à 5 Mds de litres à l'horizon 2020 [3]. Il est également prévu d'améliorer la race de vaches laitières pour passer à 100% à l'horizon 2020, de mettre place une application stricte des normes d'hygiène et de santé à travers des mécanismes de contrôle adéquats [3].

II) La centrale laitière :

1) Présentation :

Créée en 1940, Centrale Laitière est un groupe de sociétés spécialisé dans l'industrie des produits laitiers et dérivés. Filiale du Groupe ONA depuis 1981 et en partenariat avec le Groupe Danone, Centrale Laitière innove de façon continue en créant des produits sains et équilibrés qui répondent aux besoins et aux attentes du consommateur.

Avec 2200 collaborateurs, 4 sites de production, 80 000 éleveurs regroupés en 700 centres de collecte répartis en 6 zones et ses 50 000 points de ventes desservis quotidiennement par 450 camions de distribution, la centrale laitière est le premier producteur national du lait conditionné et de produits laitiers frais.

La densité de son réseau de distribution permet à chaque marocain de trouver, en tout endroit et à tout moment, ses produits laitiers préférés. La centrale laitière a fait avec ses clients le véritable levier de son développement.

Le succès de la centrale laitière et sa prépondérance s'appuie sur un savoir-faire reconnu, une innovation continue en matière de produits laitiers, une connaissance des attentes des consommateurs, la compétence de ses ressources humaines et la modernisation continue de son outil de production ainsi qu'une contribution avec le centre de recherche et développement de Danone qui lui a permis une expertise dans le domaine de la nutrition et la santé.

La démarche qualité s'est concrétisée en 2005, notamment à travers la reconduction de la certification ISO 9001 version 2000 pour les usines de Meknès et Salé.

2) Fiche signalétique :

Tableau 1: la fiche signalétique de la centrale laitière

forme juridique	Société Anonyme
Date de création	1940
Siège	Tour A, 3ème Etage, Twin Center Maârif
Ville	Casablanca
Président	Jack PONTY
Directeur général	Jack PONTY
Les produits commercialisés	lait pasteurisé et UHT, yaourts, fromage frais, boissons et desserts lactés
Marques commercialisés	DANONE, CENTRALE LAITIERE
Marchés des services	Local

III) La centrale laitière Meknès :

1) Historique

Créée en 1985, l'évolution de l'usine de Meknès a été assez régulière, elle se résume en une augmentation croissante des volumes de lait traités (la Centrale traitait 80 000L/jour de lait en 1985, elle en traite environ 300 000 à 420 000 L/Jour aujourd'hui) et en une diversification des produits réalisés (en 1985, l'usine de Meknès ne réalisait que du lait pasteurisé, en 1992 l'atelier fromage est créé, la fabrication des petits suisses Gervais (DANINO) a commencé (nature et aromatisé aux fruits) ainsi que celles des fromages blancs jockey (nature sucré et à la fraise) .

En 1998, une diversification est mise en place avec la production de "DANY" et dernièrement, vers la fin de 2002, il y'a l'apparition de "DANETTE" avec trois arômes (vanille, caramel et chocolat) et enfin la production de Raïbi qui était transformer de Salé à Meknès.

2) Situation géographique

Situé à 140 Km de Rabat et à 60 Km de Fès, en bordure du Moyen atlas, Meknès est une ville d'environ 740 000 habitants. C'est une ville prospère qui bénéficie d'un certain dynamisme économique. Entourée par les plaines fertiles qui précèdent le massif du Moyen atlas, la région de

Meknès tire essentiellement ses ressources de l'agriculture. C'est donc très logiquement que la Centrale s'est implantée dans l'agglomération rurale de Hajj kaddour à une dizaine de kilomètres de Meknès.

La localisation de l'usine s'explique donc par le fort potentiel de production de lait de la région, par les facilités de transport mais aussi par la position stratégique de Meknès, très proche de Fès, Kenitra, et il constitue aussi une porte vers le Sud et l'Est du pays (certaines tournées vont jusqu'à Midelt ou Arfoud).

3) Produits fabriqués dans l'usine de Meknès

✚ Lait pasteurisé & Drink : CENTRALE et RAIBI JAMILA



✚ Fromage frais : DANINO et JOCKEY



✚ Desserts Lactés : DANETTE



4) Organigramme de la Centrale Laitière Meknès

La structure de l'organigramme est une structure fonctionnelle qui lie l'ensemble des différentes activités, permettant une circulation de l'information qui assure une certaine coordination tout en minimisant les défauts et les dysfonctionnements internes. La figure suivante montre les fonctions de l'organisation de la Centrale Laitière :

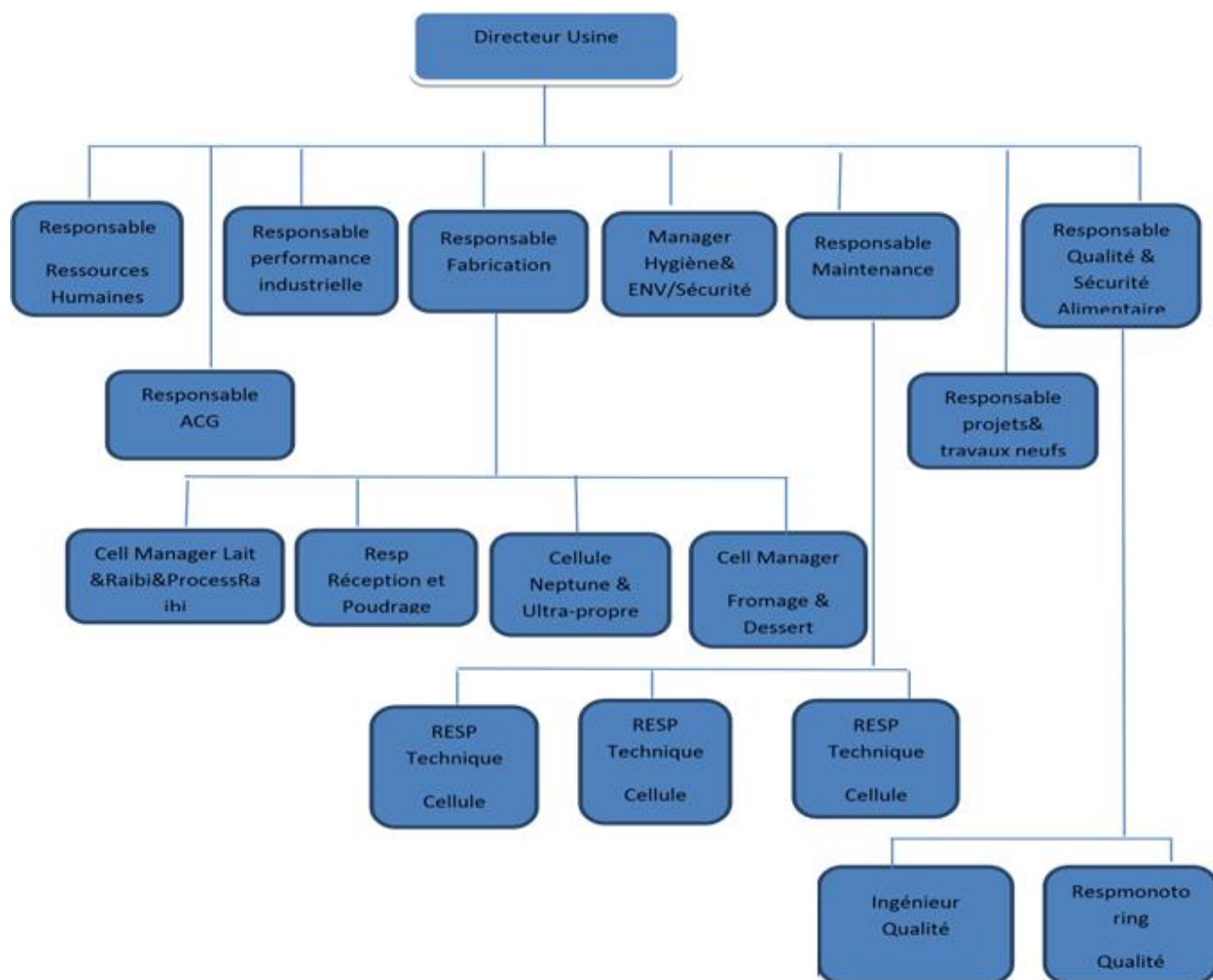


Figure 1: Organigramme de la centrale laitière Meknès

I) Généralités sur le lait de la vache

La vache assure la plus grande part de la production mondiale (90%). Ce lait est de tous le plus connu et les données qui le caractérisent sont sans doute les plus exactes. Il est logiquement aussi le produit laitier le plus consommé et étudié en nutrition humaine [4].

1) Composition moyenne des principaux constituants du lait de vache (g/l) [12]:

Les principales constantes physiques du lait sont reprises dans le tableau suivant :

Tableau 2: la composition moyenne du lait de vache en (g/L)

Constituants	Moyenne
Matières azotées	34
Lactose	48
Matières salines	9
Extrait sec dégraissé	91
Matières grasses	37
Extrait sec total	128
Eau libre (solvant) et liée	902

2) Matières azotées et protéines :

Les matières azotées, protides ou protéines du lait constituent un ensemble complexe dont la teneur totale avoisine 35 g/litre. Ce taux est élevé en comparaison des quantités présentes dans le lait de femme (environ 12 g/litre).

Les protéines représentent 95 % environ des matières azotées et sont constituées soit d'acides aminés seulement (β -lactoglobuline, alfa lactalbumine), soit d'acides aminés et d'acide phosphorique (caséines α et β -) avec parfois encore une partie glucidique (caséine K)[5].

☞ Caséines

Les caséines sont des polypeptides phosphorés associés surtout à des constituants minéraux, en particulier le calcium, mais aussi le phosphate, le magnésium et le citrate, de manière à former des micelles de phosphocaséinate de calcium [6].

☞ **Protéines solubles ou protéines du lactosérum :**

Les protéines solubles représentent environ 20 % des protéines totales du lait de vache (alors que, dans le lait maternel, plus de 70 % de l'apport protéique est solubilisé dans cette fraction). Elles flocculent difficilement en présence d'acide ou de présure.

Les protéines du lactosérum ont une valeur nutritive majeure en nutrition humaine, car elles sont riches en acides aminés essentiels [7].

3) Lipides :

La composition lipidique du lait regroupe deux entités: les lipides simples (les glycérides) et les lipides complexes (phospholipides).

Les triglycérides qui représentent plus de 97% des lipides et pour un faible part de diglycérides, de phospholipides et de substances insaponifiables [8].

4) Glucides :

Le lactose est le seul glucide libre du lait présent en quantités importantes (de 45 à 50 g/litre). Sa faible contribution à l'apport énergétique du lait (30 %), ne fait pas de ce dernier un aliment équilibré en termes de répartition calorique v(les recommandations théoriques prônent un apport de 50 à 60 % de calories glucidiques). Le lactose joue un rôle nutritionnel particulier et intervient également comme élément de fermentescibilité [8].

5) Minéraux du lait :

Le lait de vache est riche en Calcium et en Phosphore, plus précisément on y trouve les minéraux suivants : calcium, phosphore, magnésium, potassium, Fer, Sodium et d'autres [8].

6) Vitamines :

Le lait de vache contient des vitamines A, D, EK, PP, B2, B12[8].

7) Enzymes :

Une soixantaine d'enzymes ont été répertoriées dans le lait, mais leur rôle n'est pas toujours clairement établi. Certaines de ces enzymes n'existent d'ailleurs pas (ou à peine) dans le lait humain, comme le lactoperoxydase, la xanthine oxydase ou la ribonucléase [8].

8) Champignons :

☞ **Levures**

Etant donné leur grande capacité d'adaptation à de nombreux substrats, les levures sont très largement répandues dans l'environnement et se retrouvent de façon normale dans le lait.

On compte notamment parmi elles *Geotrichumcandidum*, *Saccharomyces cerevisiae* [8].

☞ **Moisissures**

Tout comme les levures, les moisissures peuvent être véhiculées par l'environnement et se retrouver dans le lait et dans le fromage, le lait peut contenir des particules virales appelés bactériophages [8].

II) Généralités sur le yaourt brassé

1) Définition et législation

Selon la législation marocaine, la dénomination Yaourt ou Yoghourt est réservé au lait fermenté obtenu, selon les usages loyaux constants, par le développement des seules bactéries lactiques thermophiles spécifiques dites *Lactobacillus bulgaricus* et *Streptococcus thermophilus* qui doivent être ensemencées simultanément et se trouve vivantes dans le produit fini à raison d'au moins dix millions de bactéries par gramme rapportées à la partie lactée ([4],[9]). Le yaourt, au moment de la vente au consommateur, ne doit pas contenir moins de 0,8 g d'acide lactique pour 100 g [10].

Selon la technologie de fabrication, on distingue entre :

Yaourts fermes ; la fermentation a lieu en pot ;

Yaourts brassés ; la fermentation a lieu en cuve avant le conditionnement.

2) Structure et texture du yaourt brassé

La maîtrise du comportement rhéologique du yaourt est nécessaire pour appréhender la qualité en termes de texture des produits finis. En effet, lors des étapes de fabrication, le yaourt subit des contraintes (cisaillement lors des brassages, pompages, variation de température etc.) qui vont influencer sa structure et ses propriétés rhéologiques et qui doivent être maîtrisées.

Le yaourt brassé est constituée d'une dispersion concentrée d'agrégats protéiques qui détermine sa structure. Il est défini comme un gel viscoélastique[10]. Son comportement rhéologique est non-newtonien : c'est-à-dire qu'il n'obéit pas à la loi de Newton présentée ci-après :

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \text{constante}$$

Où :

- μ est la viscosité (Pa.s),
- τ est la contrainte de cisaillement (Pa)
- Et $\dot{\gamma}$ est la vitesse de cisaillement (s⁻¹).

Les propriétés physiques des yaourts peuvent être influencées par de nombreux facteurs : la composition du mixe laitier (en protéine mais également en matière grasse) et les traitements physiques thermique et d'homogénéisation, les ferments, les conditions de fermentation, le traitement mécanique lors du refroidissement (incluant brassage, pompage et conditionnement), ainsi que la reprise en texture au cours du stockage.

III) Processus de fabrication de RAIBI

Pour fabriquer le Raïbi on peut utiliser trois formules.

- 100% lait
- 100% poudre
- 50% lait et 50% poudre.

1) Process de réception et d'obtention du lait écrémé:

1.1) Approvisionnement en lait cru

Cette tâche est assurée par le service *Production laitière* ; il s'occupe du ramassage du lait cru des différentes coopératives de la région de Gharb et Sais et La mission d'encadrement se manifeste dans la sensibilisation et l'incitation des agriculteurs à l'amélioration de la qualité de leur lait en leur apportant le soutien et l'aide nécessaires.

☞ **Dépotage :**

Chaque jour, le lait cru est ramené au site dans des camions-citernes contenant 4 à 5 compartiments de capacité différente, avant de les dépoter, le responsable prend des échantillons de chaque compartiment pour effectuer les analyses physico-chimiques (acidité, test d'alcool, extrait sec, matière grasse). Si le lait est conforme, l'opérateur passe au dépotage. Le lait ensuite sera débarrassé des substances volatiles en passant dans un dégazeur, puis il est aspiré par une pompe centrifuge et passe par un compteur volumétrique tout en traversant un filtre qui retient les impuretés macroscopiques : cheveux, poils, poussière.

☞ **Refroidissement et stockage :**

Pour freiner la prolifération microbienne, on amène le lait à une température de 4°C en utilisant un échangeur à plaques à contre-courant où l'eau glacée entre à 0°C et le lait à 20°C puis l'en stocke dans des tanks isothermes équipés d'un agitateur qui empêche la formation de la crème. La capacité de stockage de lait cru est de l'ordre de 420 000 litres.

1-2) Processus d'obtention du lait écrémé

La fabrication du raïbi nécessite l'utilisation du lait écrémé pour éviter le problème du barattage de la matière grasse (l'agglomération des globules gras), et la crème va être ajoutée par suite. Par conséquent l'obtention du lait écrémé se fait selon les étapes suivantes :

☞ **Thermisation :**

La thermisation a pour but d'augmenter la température du lait entier afin d'obtenir une séparation par la suite.

Dans la section du préchauffage, le lait est chauffé à une température de 50°C avant d'être séparé ; après le lait est ramené au séparateur centrifuge. La crème à un poids inférieur à celui du lait écrémé, se déplace dans des canaux vers l'extérieur tandis que le lait écrémé à une densité plus élevée dépose rapidement vers l'extérieur.

Dès leur sortie du séparateur La crème va être pasteurisée à 95°C pendant 5 minutes puis refroidie à 4°C et enfin stockée, et le lait va subir une pasteurisation pour éviter la prolifération microbienne.

☞ **Pasteurisation du lait écrémé :**

Après une correction de protéine (32g/l) le lait écrémé est pompé, à travers la section du préchauffage, vers la section de pasteurisation de l'échangeur de chaleur et de nouveau chauffé à 95°C. Le lait passe ensuite une durée de chambrage de 5 minutes. Après la pasteurisation, le lait est refroidi, tout d'abord dans la section de récupération et ensuite avec de l'eau, à la température d'ensemencement souhaitée, habituellement de 28°C.

☞ **Chambrage :** c'est une étape qui consiste à passer le lait dans un chambreur qui est un tube calorifuge dont le volume permet, selon le débit, de maintenir la température de pasteurisation durant le temps nécessaire.

2) Préparation du MIX :

☞ **Préparation du Mix Maigre :**

La première étape de fabrication de Raïbi est la préparation du MIX au niveau de la poudreuse, C'est l'étape où les ingrédients sont mélangés avec le lait écrémé afin de lui donner l'aspect final du produit voulu dont le goût et la texture.

Le mélange circule en circuit fermé (figure 2) entre la poudreuse et le tank de stockage (TS) pour assurer un bon malaxage de l'ensemble des ingrédients. Le lait écrémé et stockés des

tanks à une température d'environ $6\pm 2^{\circ}\text{C}$ est acheminé vers la poudreuse en passant par des filtres en vue d'éliminer les impuretés et par des échangeurs à plaques pour éviter toute montée de température. Il est additionné de différents ingrédients tels que le sucre.

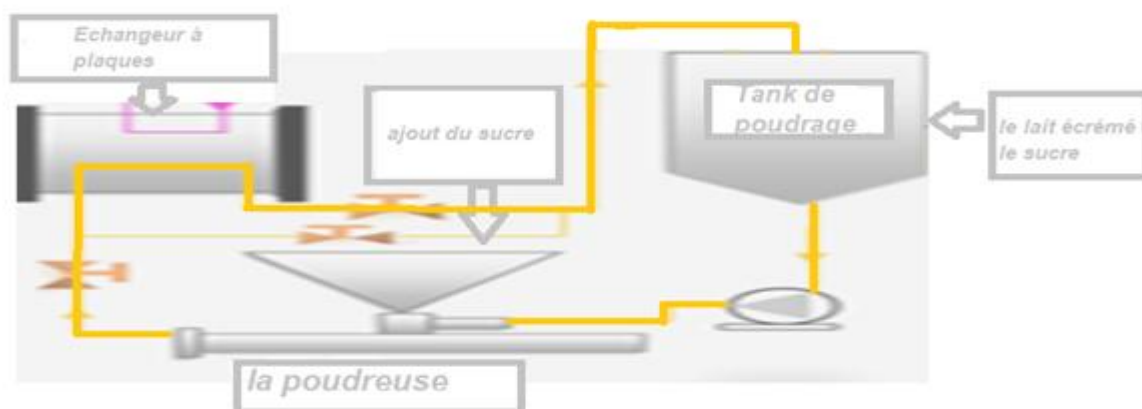


Figure 2 : schéma du circuit fermé

☞ Préparation du Mix Gras :

La crème est ensuite injectée dans le TS (on n'ajoute pas la crème au début de la préparation, pour éviter le barattage de la matière grasse cela veut dire que les particules de matière grasse s'agglomèrent alors peuvent former des grains de beurre). Le mélange obtenu (MIX gras) est soutiré vers un bac de lancement pour qu'il soit stérilisé par la suite. L'ajout de la matière grasse a pour effet de donner au produit une certaine onctuosité, de garantir une sensation de douceur en bouche et de masquer les goûts acides et la perception d'eau dans le produit.

☞ Addition de poudres de lait et de lactosérum

L'enrichissement en poudre de lait permet d'incorporer au mélange des caséinates et des protéines sérique (MCP) alors que l'ajout de poudre de lactosérum fournit des protéines sériques ne pouvant être dénaturées que par la chaleur, cette étape est réservé juste pour les formules 100% poudre et 50% lait 50% poudre.

3) Pasteurisation :

La pasteurisation est un traitement thermique qui vise à débarrasser le produit de tous germes vivants, toutes toxines microbiennes, toutes enzymes microbiennes dont la présence ou la prolifération pourrait altérer ou rendre impropre à la consommation humaine. Le barème le plus couramment utilisé est de $90\pm 2^{\circ}\text{C}$ pendant 5 minutes. Ce traitement a de multiples effets non

seulement sur la flore microbienne mais aussi sur les propriétés physico-chimiques et fonctionnelles du lait. Le lait traité subit également une homogénéisation qui vise essentiellement une meilleure dispersion de l'émulsion et une réduction de la taille des globules gras pour une meilleure digestibilité du produit laitier, sous une température d'environ 70°C et en appliquant une pression d'environ 180 bars, l'homogénéisation a principalement des effets sur deux composantes du lait : la matière grasse et les protéines. Elle permet une répartition uniforme des globules gras dans le mélange et empêche la séparation entre le gras et le reste des constituants. Elle a aussi un effet sur la stabilité des protéines.

Pour réaliser ce traitement thermique, le produit est pompé du bac de lancement vers la section du préchauffage de l'échangeur de chaleur à plaques, après, il passe dans un homogénéisateur, à la sortie de ce dernier, le MIX gras rejoint l'échangeur pour élever sa température jusqu'à 95°C. Le produit est maintenu à la température du traitement dans un premier chambreur pendant quelques secondes, avant de subir une augmentation de température à 135°C et passer dans le deuxième chambreur. Le produit est refroidi jusqu'à une température de 43±2°C, C'est la température de développement optimal des deux bactéries lactiques lactiques, *Lactobacilles bulgaricus* et *Streptococcus thermophilus*, Cette tâche est réalisée grâce à un échange de chaleur entre le produit (lait pasteurisé) et l'eau glacée, et par suite le produit gagne directement les TM pour la fermentation toute en gardant la température 43±2°C.

4) *Maturation :*

La maturation se fait dans des tanks calorifiques (tanks de maturation), Elle dure environ 5heures, une fois Les deux espèces lactiques *Lactobacilles bulgaricus* et *Streptococcus thermophilus* sont injectées dans le lait commencent à décomposer le lactose selon la voie de Meyerhof-Emden, voie anaérobie de la glycolyse (figure 2). En effet, le lactose est initialement hydrolysé en D-glucose et en D-galactose. Ces deux monosaccharides subissent les onze réactions de la glycolyse pour former chacun deux molécules d'acide pyruvique. Ensuite, chaque molécule d'acide pyruvique se transforme en acide lactique. Au total, chaque molécule de lactose donne naissance à quatre molécules d'acide lactique.

Après les 5 heures de fermentations, puis à toutes les heures qui suivront, on évalue le pH et l'acidité jusqu'à l'obtention des valeurs optimales.

Le coagulum subit alors une agitation à grande vitesse destinée d'une part, à arrêter la fermentation et d'autre part à homogénéiser davantage le milieu.

A la fin de la maturation le mélange aura une température de 43°C, après on le refroidit jusqu'à 7°C.

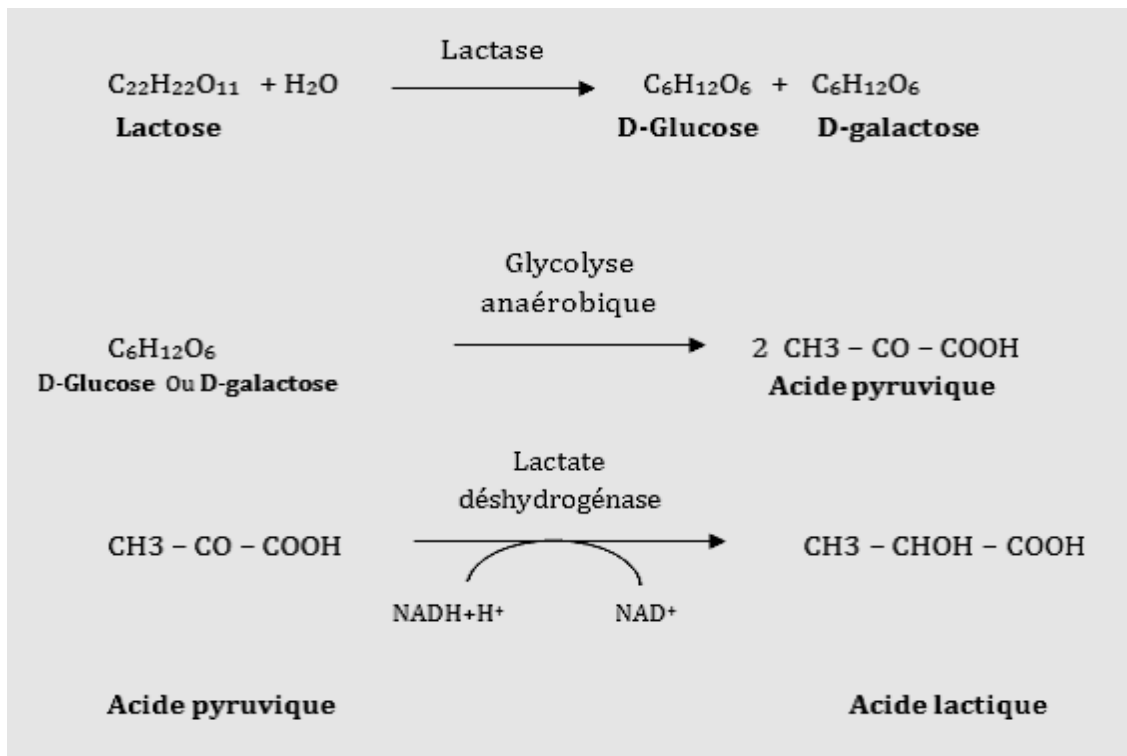


Figure 3 : Fermentation du lactose

5) Décaillage, brassage:

Après que la fermentation se termine, en passant au décaillage pour homogénéiser le mélange à l'aide d'une agitation de 15tr/min pendant 5 minutes après en passe à 18tr/min, le mélange homogénéisé on l'appelle la masse blanche ensuite en le refroidi jusqu'au 7°C pour le soutirer au tank de thermisation du lait (TT) et le schéma ci-dessous résume la préparation.

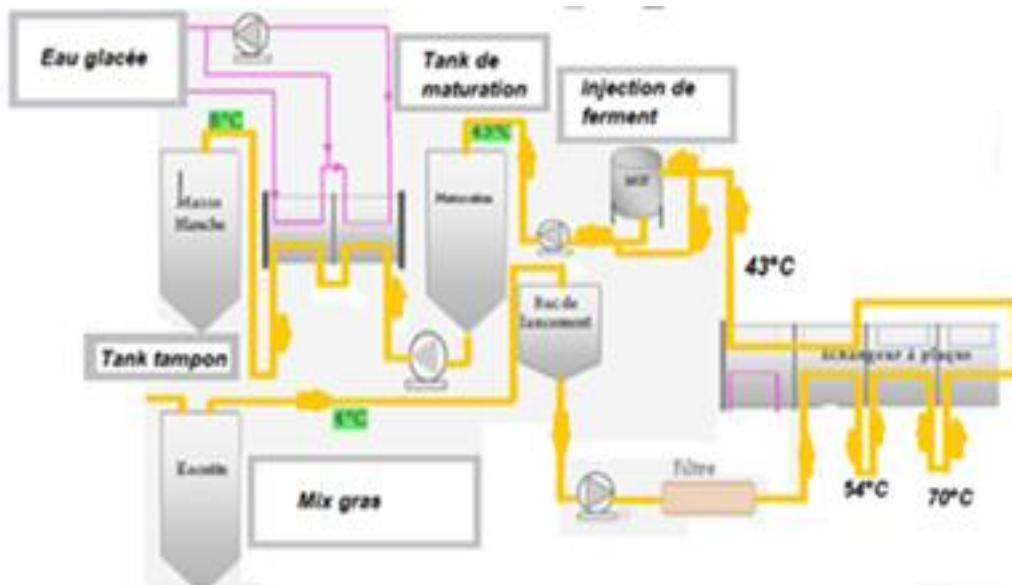


Figure 4 : Processus de préparation de raïbi

6)Préparation du sirop

On a les mêmes étapes que la masse blanche sauf pour le sirop on n'aura pas la maturation et le refroidissement, dont en mettre tous les ingrédients en circuit fermé pendant 1 heure à 1 heure et demi à une température de 10°C, sachant que la température au début est de 21°C et le circuit ne commence qu'après la baisse de la température de 21°C à 10°C, ensuite le mélange passe à la pasteurisation 95°C pendant 5 minutes pour qu'il soit stocké dans les TS.

7) Mélange de la masse blanche avec le sirop et l'arôme

Il se fait dans un mélangeur statique, qui tourne à une vitesse de 20% où la masse blanche et le sirop arrivent à des vitesses d'écoulement différentes et l'arôme GRENADINE sont mélangés afin d'avoir un mélange homogène et d'aspect normal avant le conditionnement, dont le pourcentage du sirop 20%, de la masse blanche 79.8%-79.9 % et 0.1%-0.2% d'arôme.

8) Conditionnement :

Elle s'effectue à l'aide des machines assurant à la fois le thermoformage des pots à partir des films plastiques et le dosage du produit fini dans des pots sous protection bactériologique que confère la hotte.

La fermeture hermétique des pots se fait par thermocollage ainsi que l'impression et le marquage de la date limite de consommation.

NB : durant mon stage j'ai travaillé qu'avec la formule 100% lait, vu que ma période de stage se coïncide avec la période de haute lactation.

9) Diagramme de fabrication de RAIBI JAMILA

Le schéma ci-dessous résume les étapes de fabrication de raïbi :

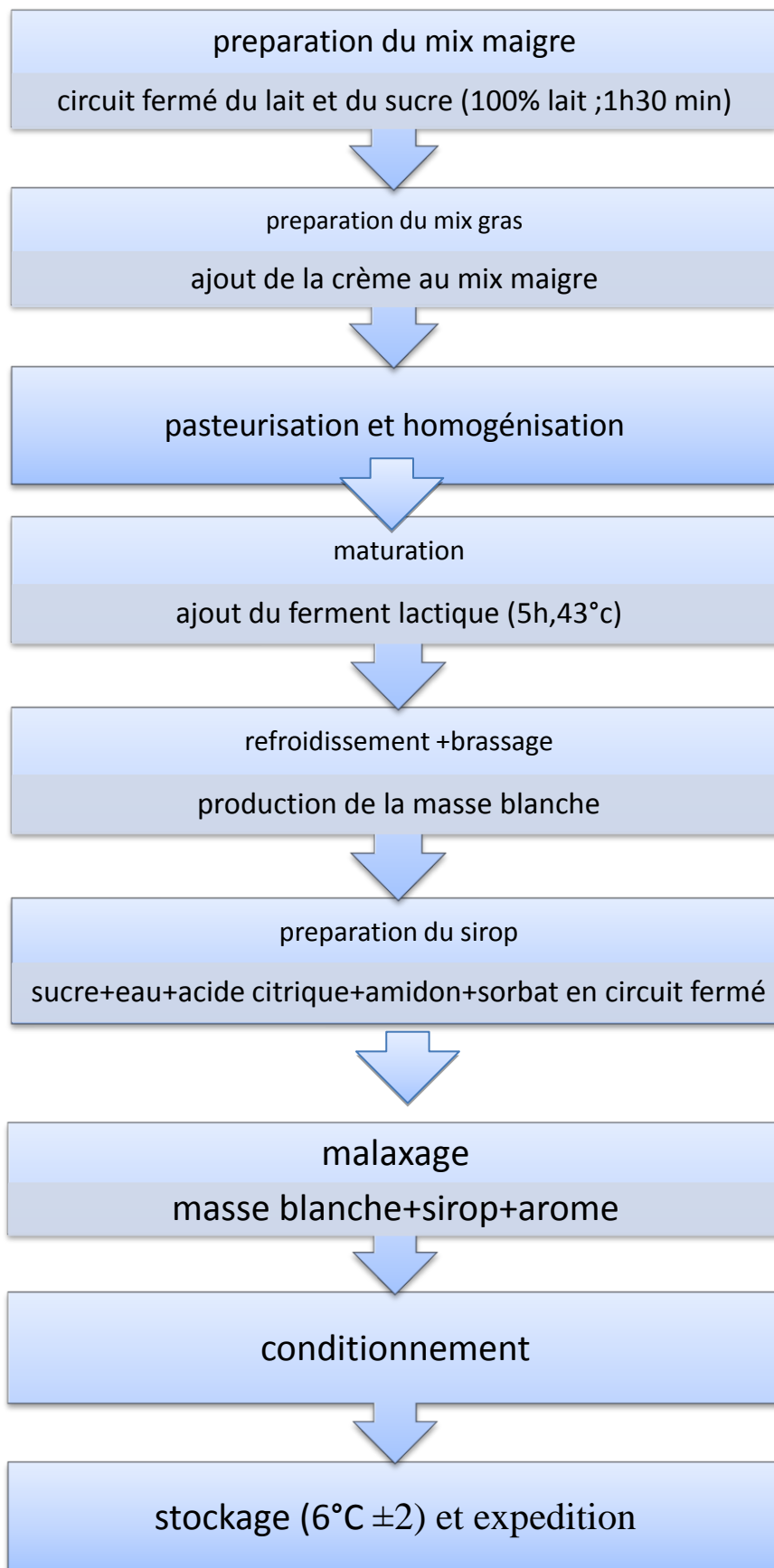


Figure 5 : Diagramme de fabrication de raïbi

IV) Contrôle qualité de raïbi

Dans le cadre de sa politique d'assurance qualité et dans l'objectif d'être continuellement conforme aux normes nationales et internationales en matière d'hygiène et de qualité, la Centrale Laitière dispose d'un laboratoire d'analyses physico-chimiques et microbiologiques performant.

Ce laboratoire est équipé d'outils d'analyses physico – chimiques et microbiologiques de pointe. Il intervient à la réception de la matière première et tout au long du processus de fabrication, pour contrôler tous les points critiques susceptibles de causer une contamination microbienne ou porter atteinte à la qualité nutritionnelle ou organoleptique des produits de l'usine.

La plupart des analyses physico – chimiques ; à savoir l'ESD, la teneur en MG, l'acidité et le pH, la teneur en protéines et en glucides, sont faites par un seul appareil appelé MILKOSCAN.

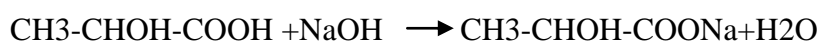
Pour les analyses microbiologiques, le laboratoire est équipé en tout le matériel nécessaire (milieux de culture, réactifs chimiques, verrerie, microscope, étuve ...).

1) Analyses physico-chimiques :

Plusieurs tests et analyses sont effectués à tous les niveaux de la fabrication depuis la réception du lait jusqu'au produit fini :

☞ Acidité titrable :

Composée de l'acidité naturelle et de l'acidité développée qui est due à l'apparition des acides organiques notamment l'acide lactique. Le dosage est basé sur le principe de neutralisation complète de deux molarités égales de solutions d'acide et base :



L'indicateur coloré utilisé est la phénolphthaléine qui est incolore en milieu acide et qui développe une coloration rose en milieu alcalin.

☞ L'acidité potentiométrique :

Mesurée par un pH-mètre, sa valeur égale à moins le logarithme de base de la concentration des ions H⁺ en solution.

A noter que la valeur du pH et celle de l'acidité sont inversement proportionnelles.

☞ Détermination du taux d'extrait sec :

L'extrait sec du lait est un facteur important dans la fabrication car il conditionne la consistance et la viscosité du produit. Le taux d'extrait sec est mesuré par trois méthodes :

Le Milkoscan, le four à micro-ondes, et la méthode officielle.

☞ **Détermination du taux protéique :**

La teneur en protéine est déterminée selon la méthode officielle dite de Kjeldahl où l'azote total ainsi que l'azote non protéique du yaourt sont dosés par titrimétrie après minéralisation et distillation.

☞ **Détermination de la teneur en matière grasse**

La matière grasse du lait est mesurée par la méthode dite de Gerber ou acido-butyrométrique. Le principe de la méthode consiste en une séparation de la matière grasse du yaourt, par centrifugation, après avoir dissous les protéines par l'acide sulfurique.

☞ **Détermination de la viscosité apparente**

Différents appareils sont utilisés, tels que le viscosimètre Brookfield, les rhéomètres rotatifs, les pénétromètres, ou encore l'entonnoir de Posthumus. D'une manière générale, les viscosimètres permettent de mesurer uniquement les propriétés visqueuses, c'est-à-dire la viscosité apparente. Les rhéomètres, quant à eux, mesurent les propriétés viscoélastiques.

Une fois l'appareil mis en marche, les paramètres Brookfield dont la Vitesse (100%), le temps de lecture (10s), le facteur de conversion et la dimension du module sont à consulter en fonction du produit à analyser le résultat obtenu est en centiPoise.

L'objet de cette partie est d'expliquer la démarche adoptée pendant le suivi de la viscosité de raïbi effectué selon un plan d'expériences, ce plan d'expériences permet une variation des niveaux des paramètres des facteurs susceptibles d'influencer la viscosité, pour arriver à une surface de réponse optimale dont les valeurs de viscosité proche de la valeur cible(Annexe 1)

I) Outils et matériels

1) Outils d'analyses

☞ *Diagramme d'Ishikawa :*

C'est un outil qui permet à identifier les causes d'un problème. On a une vision globale des causes génératrices d'un problème avec une représentation structurée de l'ensemble des causes qui produisent un effet. Il y a une relation hiérarchique entre les causes et on est en mesure d'identifier les racines des causes d'un problème.

Le diagramme d'Ishikawa (ou diagramme en arête de poisson, diagramme cause-effet ou 5M) permet de limiter l'oubli des causes et de fournir des éléments pour l'étude des solutions. Cette méthode permet d'agir sur les causes pour corriger les défauts et donner des solutions en employant des actions correctives.

Ce diagramme se structure habituellement autour du concept des 5 M, il recommande de regarder en effet l'événement sous cinq aspects différents.

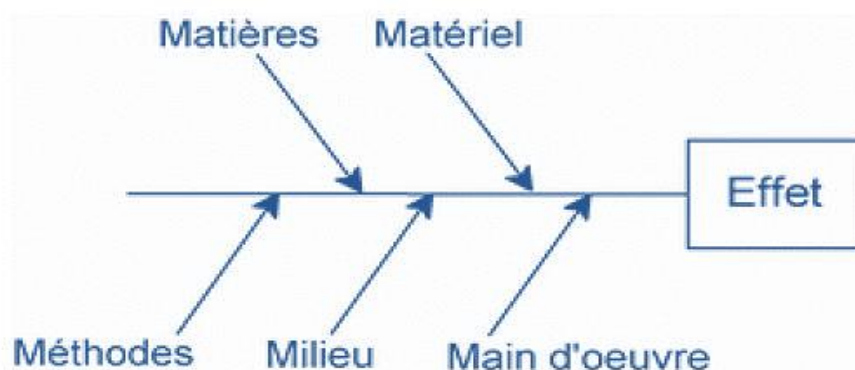


Figure 6 : Diagramme d'Ishikawa

1. **Matière** : les matières et matériaux utilisés et entrant en jeu, et plus généralement les entrées du processus.

2. **Matériel** : l'équipement, les machines, le matériel informatique, les logiciels et les technologies.
3. **Méthode** : le mode opératoire, la logique du processus et la recherche et développement.
4. **Main-d'œuvre** : les interventions humaines.
5. **Milieu** : l'environnement, le positionnement, le contexte.

1) Plan d'action

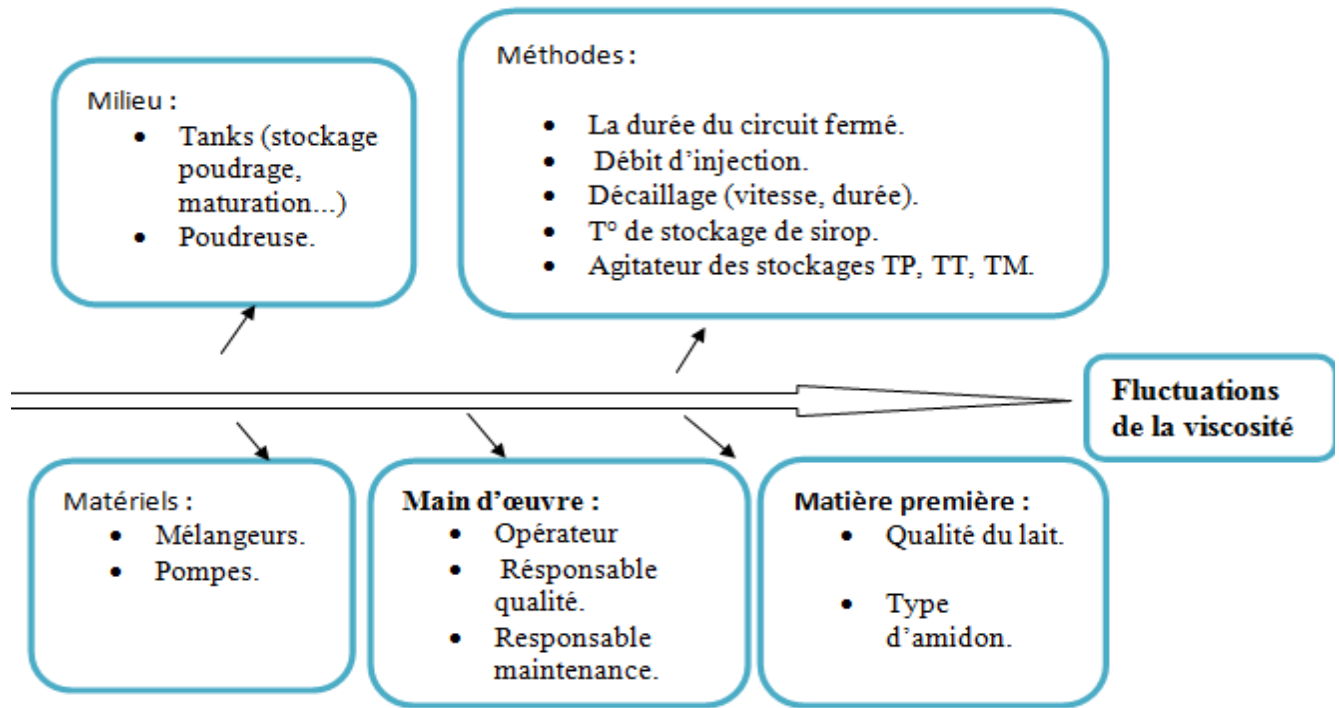


Figure 7 : Plan d'action

2) Outils laboratoire

☞ Viscosimètre:

Les viscosimètres permettent de mesurer uniquement les propriétés visqueuses, c'est-à-dire la viscosité apparente. Les rhéomètres, quant à eux, mesurent les propriétés viscoélastiques.

Le laboratoire de la société « Centrale Laitière » utilise en routine le viscosimètre Brookfield, un appareil relativement simple qui détermine la viscosité d'un fluide alimentaire (RAIBI dans notre cas) à partir de la déformation exercée sur un ressort créé par la rotation d'un disque ou d'un croisillon dans ce fluide. Les mesures sont très dépendantes des dimensions du module de l'appareil et du récipient de yaourt utilisé.

Une fois l'appareil mis en marche, les paramètres Brookfield dont la Vitesse (100%), le temps de lecture (10s) et la dimension du module sont à consulter en fonction du produit à analyser. La résistance du produit au mouvement rotatoire du module détermine sa viscosité. Le résultat obtenu en centipoises.

☞ *Milkoscan* :

Le MILKOSCAN est un appareil automatique formé d'un microprocesseur à contrôle infrarouge pour la détermination des constituants nutritifs du lait, de la crème ou d'autres produits laitiers liquides. L'appareil utilisé permet d'obtenir les dosages de la matière grasse, du taux protéique, de l'extrait sec dégraissé et du lactose. Principe de fonctionnement : Un rayon d'infrarouge proche traverse successivement les filtres infrarouges et l'échantillon pour atteindre enfin le détecteur d'infrarouge. L'énergie détectée va être alors amplifiée, transformée sous forme digitale et calculée en résultats par le microprocesseur. Le Milkoscan est connecté {un PC équipé d'un logiciel, les résultats sont affichés en pourcent sur l'écran et peuvent être sauvegardés sur le disque dur.

II) le cadre expérimental

1) Détermination des facteurs qui influencent la viscosité du produit fini

Pour savoir quels sont les facteurs qui influencent la viscosité du produit fini, j'ai fait un suivi de la viscosité du produit fini tout en variant les paramètres intervenant dans la fabrication de raïbi, afin de détecter les facteurs pilotes qui donnent des bonnes valeurs de viscosités. Les pistes soupçonnées sur les quels j'ai travaillé sont les suivant, au niveau du poudrage : la durée du circuit fermé, au niveau du process : la durée et la vitesse du décaillage, ainsi que la température de stockage de sirop et enfin au niveau du conditionnement : la vitesse du mélangeur. Le tableau ci-dessous présente les facteurs qui influencent la viscosité.

Tableau 3:Tableau récapulatif des valeurs des facteurs

Facteur	Le niveau bas	Le niveau haut
La durée de circuit fermé	Une heure et demi	Une heure
La durée de décaillage	5 minutes	3 minutes
La vitesse de décaillage	18tr/ min	15 tr/min
La température de stockage de sirop	10°C	20°C
La vitesse du mélangeur	18 tr /min	36 tr / min

Afin de trouver les paramètres idéaux qui assurent des bonnes valeurs de viscosité, j'ai fait des suivis de viscosité en présence de cinq variables à 2 niveaux, ce qui donne 2^5 expériences ce qui est difficile à réaliser, mais grâce à un plan d'expériences et un logiciel approprié, je suis arrivée à diminuer ce nombre à 27 (voir explication dans principes du plan d'expériences).

2) Principe du plan d'expériences

La méthodologie des plans d'expériences correspond à une série d'essais définis à partir d'une stratégie optimale permettant la prédiction d'une réponse avec le minimum d'erreurs et un minimum d'essais sur la base d'un modèle postulé, le logiciel utilisé donne cette matrice optimale après la définition du plan d'expériences.

Selon la norme [ISO 3534-3] : les plans d'expériences constituent essentiellement une planification d'expériences afin d'obtenir des conclusions solides et adéquates de manière efficace et économique.

La répartition des essais n'est pas une sélection au hasard ou à l'intuition, elle respecte des critères statistiques.

3) L'élaboration du plan d'expériences

L'élaboration du plan d'expériences consiste à suivre les instructions de l'application du logiciel utilisé, en fonction des paramètres qu'on veut tester, les images suivantes illustrent son fonctionnement :

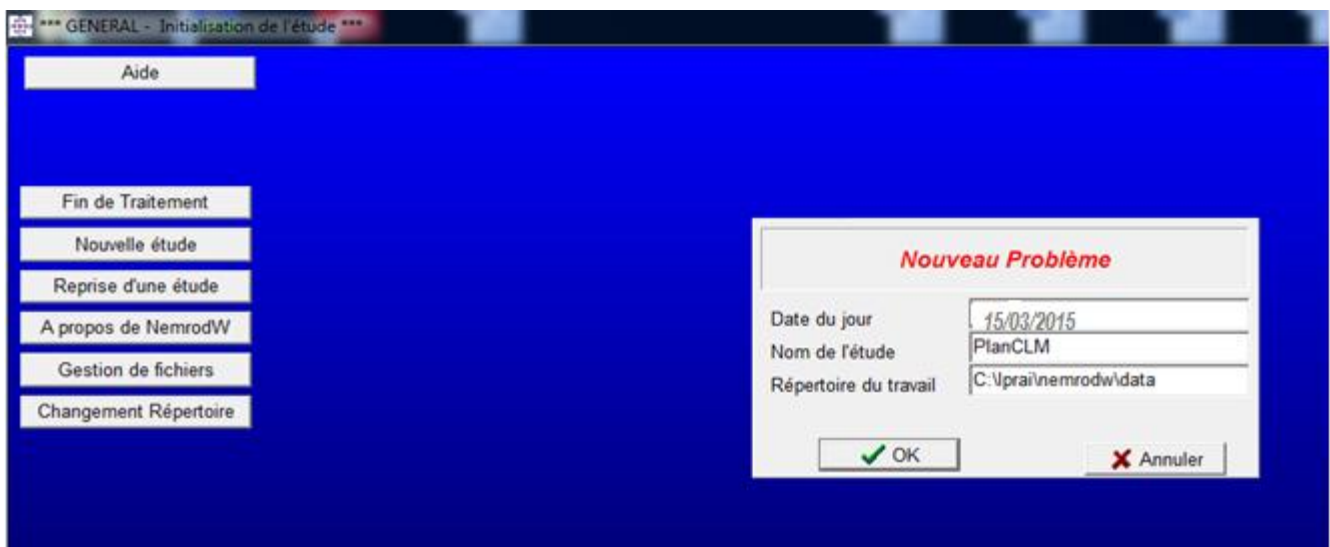


Figure 8 : Installation de l'étude

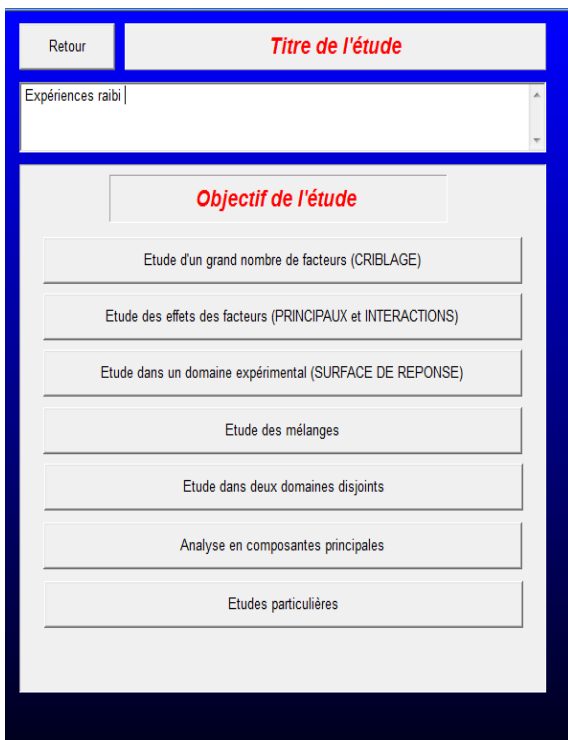


Figure 9 : Choix de l'objectif



Figure 10 : choix de la matrice d'expérience

Une fois l'application du logiciel est ouverte sur pc (Figure 8), une fenêtre est affichée pour entrer les informations générales sur le plan d'expériences qu'on souhaite réaliser. On détermine l'objectif de l'étude, dans notre cas on souhaite avoir une surface de réponse (Figure9),

Juste après on clique sur le choix de la matrice d'expérience pour définir les paramètres avec lesquels on souhaite travailler (Figure 10).

Ensuite, on doit choisir le modèle du plan d'expérience (Figure 11), et dans notre cas on a cinq facteurs ou paramètres, pour le choix de la forme du domaine, j'ai choisi le domaine cubique car je maîtrise plus son interprétation.

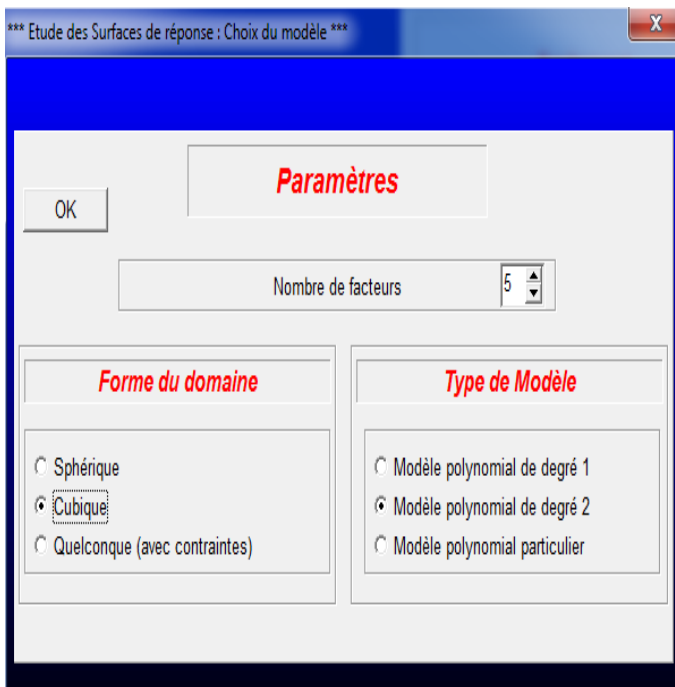


Figure 11 : Choix de modèle

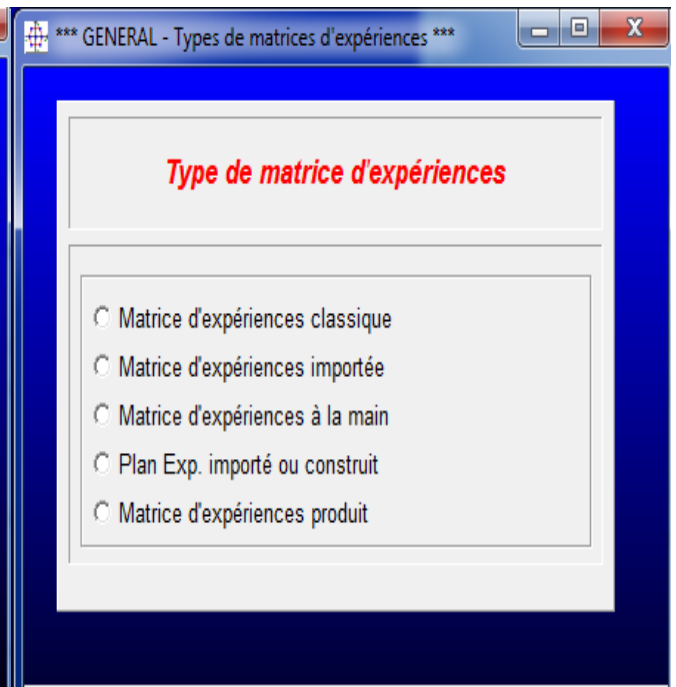


Figure 12 : Choix du type de la matrice d'expérience

Dans une autre étape, on choisit la matrice classique comme type de matrice pour que le plan d'expériences soit défini par l'application du logiciel (Figure 12).

A ce stade, une nouvelle fenêtre est affichée, pour nous proposer de choisir une matrice avec certains indicateurs, comme je vais travailler sur 3 niveaux pour chaque paramètres, j'ai choisi alors la matrice composite qui donne 27 expériences au centre (Figures 13 et 14).

Les expériences au centre ont pour objet la vérification des résultats obtenus. Si la différence entre les résultats de ces expériences est significative, on déduit une ou des erreurs au cours de la manipulation.



Figure 13: Choix de la matrice

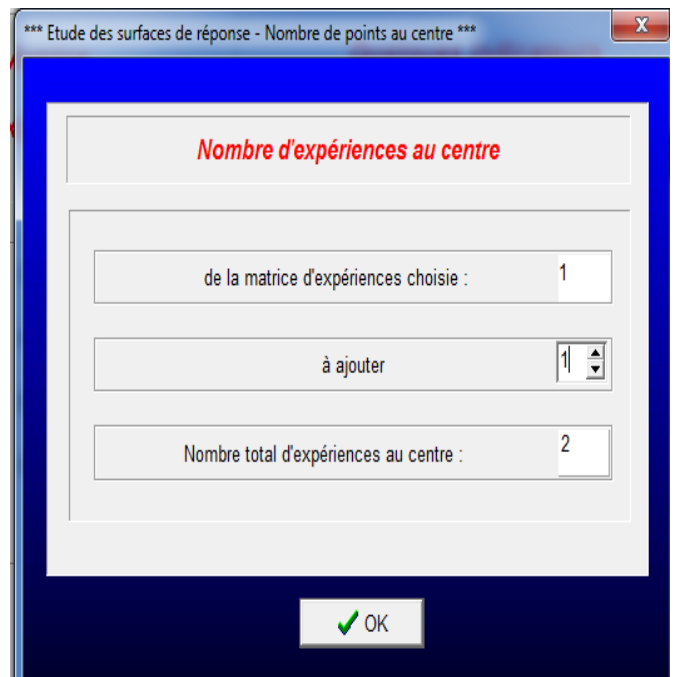


Figure 14: Choix des nombres des expériences au centre

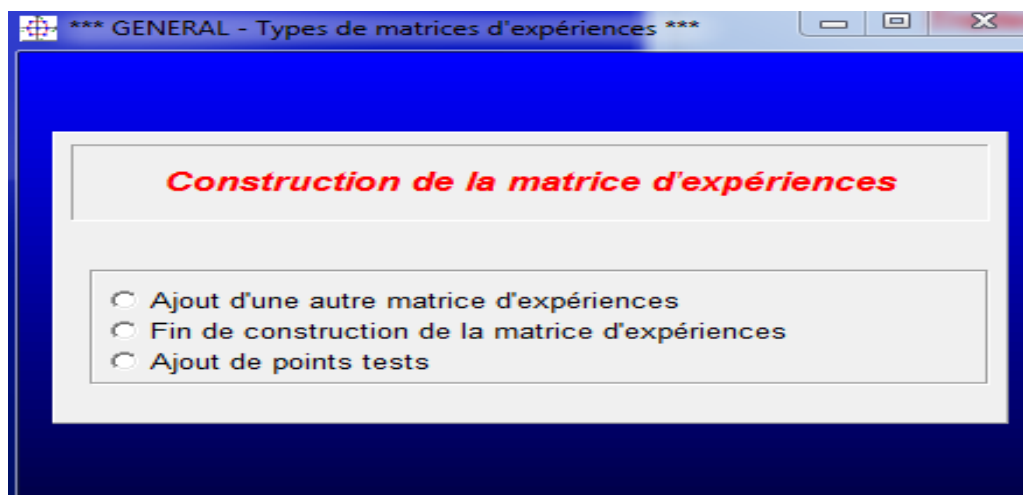


Figure 15 : Construction de la matrice d'expérience

Une fois on clique sur fin de la construction de la matrice d'expérience (Figure 15) le tableau ci-dessous est affiché sur la fenêtre, ce tableau comporte la matrice d'expériences codée. Le -1 c'est le niveau bas, 0 c'est la moyenne et +1 c'est le niveau haut.

Tableau 4: Matrice d'expérience codée

N°Exp	Repet	X1	X2	X3	X4	X5
1	0	-1.00000	-1.00000	-1.00000	-1.00000	1.00000
2	0	1.00000	-1.00000	-1.00000	-1.00000	-1.00000
3	0	-1.00000	1.00000	-1.00000	-1.00000	-1.00000
4	0	1.00000	1.00000	-1.00000	-1.00000	1.00000
5	0	-1.00000	-1.00000	1.00000	-1.00000	-1.00000
6	0	1.00000	-1.00000	1.00000	-1.00000	1.00000
7	0	-1.00000	1.00000	1.00000	-1.00000	1.00000
8	0	1.00000	1.00000	1.00000	-1.00000	-1.00000
9	0	-1.00000	-1.00000	-1.00000	1.00000	-1.00000
10	0	1.00000	-1.00000	-1.00000	1.00000	1.00000
11	0	-1.00000	1.00000	-1.00000	1.00000	1.00000
12	0	1.00000	1.00000	-1.00000	1.00000	-1.00000
13	0	-1.00000	-1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
14	0	1.00000	-1.00000	1.00000	1.00000	-1.00000
15	0	-1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	-1.00000
16	0	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
17	0	-1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
18	0	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
19	0	0.00000	-1.00000	0.00000	0.00000	0.00000
20	0	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000
21	0	0.00000	0.00000	-1.00000	0.00000	0.00000
22	0	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000
23	0	0.00000	0.00000	0.00000	-1.00000	0.00000
24	0	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000
25	0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	-1.00000
26	0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000
27	1	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
28	2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

En continuant notre travail sur l'application, on commence à ce stade à décrire les facteurs influents (Figure 16), un par un, avec leurs unités, la centre du domaine, et le pas de variation qui détermine le niveau bas et le niveau haut un pas de variation de 10 veut dire que le niveau bas est le centre moins 10 et le niveau haut c'est le centre plus 10).



Figure 16 : Description des facteurs

Tableau 5: Matrice d'expérience réelle

N°Exp	Durée de circuit fermé	Durée de décaillage	Vitesse de décaillage	T° de stockage sirop	Vitesse de mélangeur
	minutes	minutes	tr/ min	°C	tr/min
1	60	3	15.0	10	36
2	90	3	15.0	10	18
3	60	5	15.0	10	18
4	90	5	15.0	10	36
5	60	3	18.0	10	18
6	90	3	18.0	10	36
7	60	5	18.0	10	36
8	90	5	18.0	10	18
9	60	3	15.0	20	18
10	90	3	15.0	20	36
11	60	5	15.0	20	36
12	90	5	15.0	20	18
13	60	3	18.0	20	36
14	90	3	18.0	20	18
15	60	5	18.0	20	18
16	90	5	18.0	20	36
17	60	4	16.5	15	27
18	90	4	16.5	15	27
19	75	3	16.5	15	27
20	75	5	16.5	15	27
21	75	4	15.0	15	27
22	75	4	18.0	15	27
23	75	4	16.5	10	27
24	75	4	16.5	20	27
25	75	4	16.5	15	18
26	75	4	16.5	15	36
27	75	4	16.5	15	27
28	75	4	16.5	15	27

Une fois les facteurs sont introduits dans l'application, le tableau ci-dessous est affiché sur l'écran du pc. Ce tableau (Tableau5) définit la matrice réelle d'expérience et qui donne les expériences qui compose la matrice optimale. On a réalisée des suivis de viscosité selon les niveaux de paramètres proposés par la matrice une par une, en respectant les valeurs de chaque paramètres, Les valeurs de viscosité correspondant à chaque combinaison sont enregistrés dans la matrice réelle selon l'enchaînement suivant :

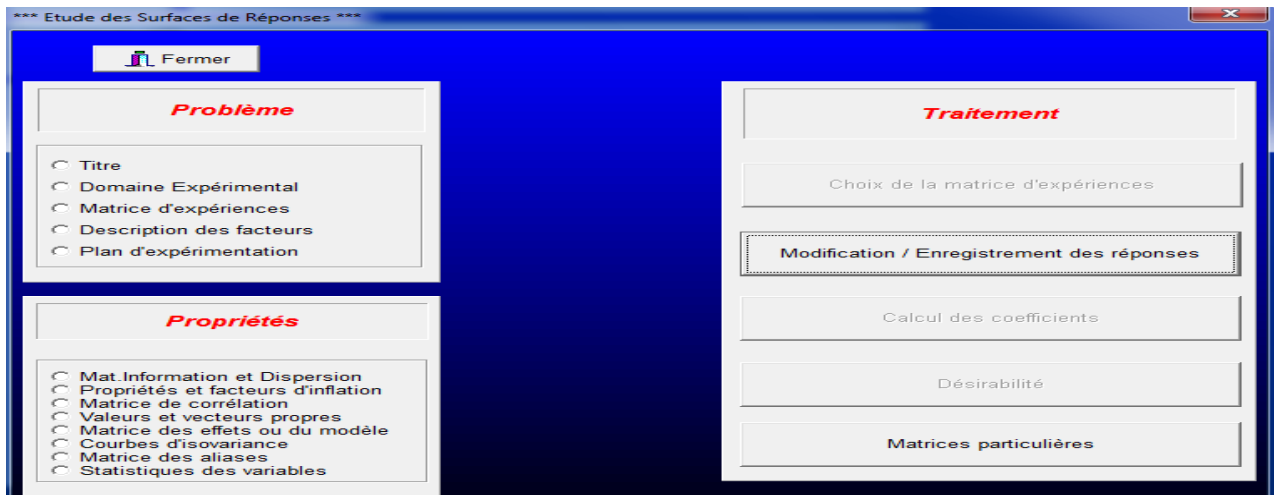


Figure 17:Enregistrement des réponses

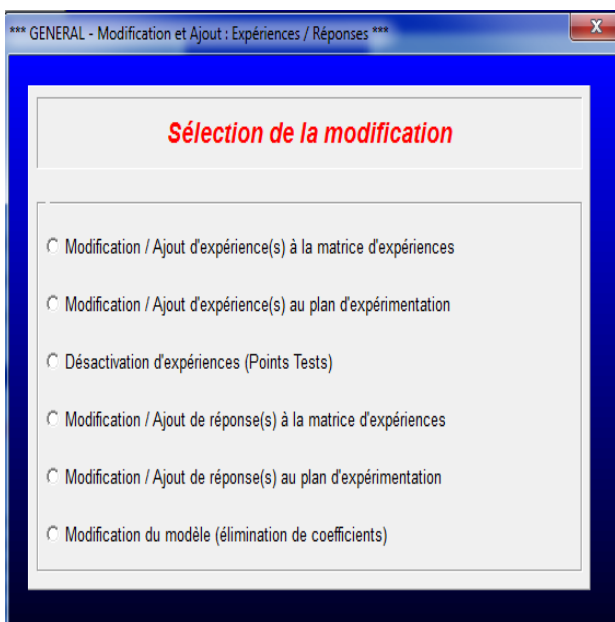


Figure 18 : Sélection de la modification

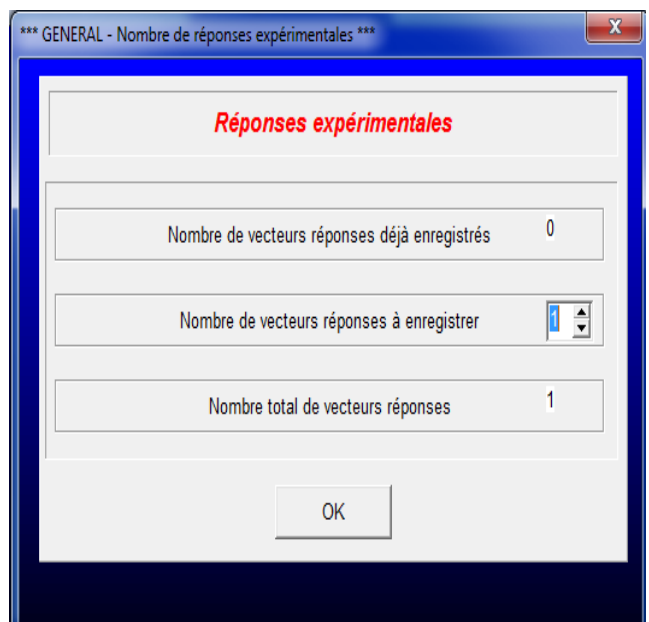


Figure 19 : Choix du nombres de réponse

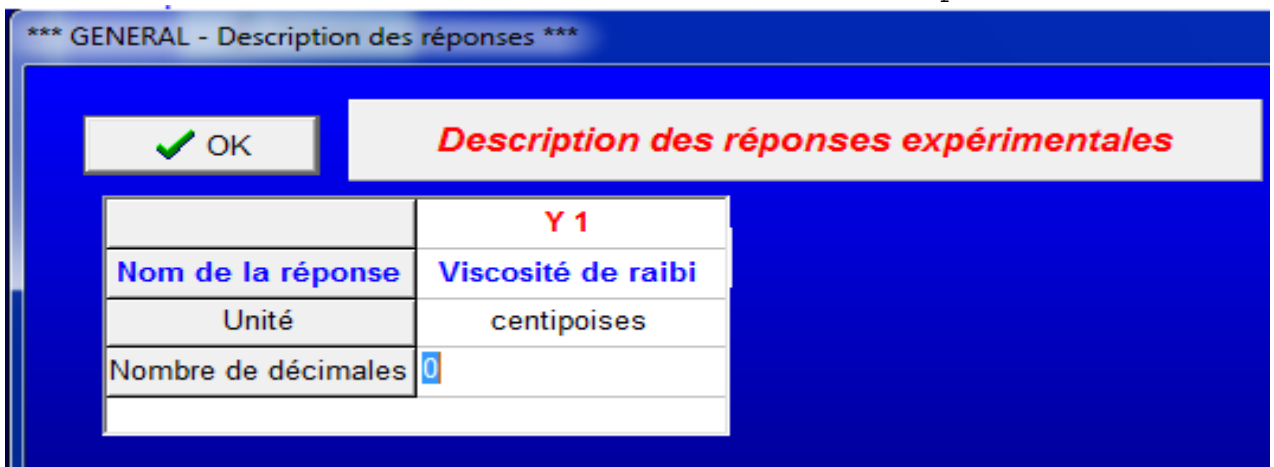


Figure 20 : Description du réponse

Tableau 6 : Matrice réelle avec les réponses quantitatives

N°Exp	Durée de circuit fermé	Durée de décaillage	Vitesse de décaillage	T° de stockage sirop	Vitesse de mélangeur	Viscosité de raïbi
	min	min	tr/ min	°C	tr/min	cP
1	60	3	15.0	10	36	576
2	90	3	15.0	10	18	687
3	60	5	15.0	10	18	583
4	90	5	15.0	10	36	567
5	60	3	18.0	10	18	559
6	90	3	18.0	10	36	602
7	60	5	18.0	10	36	620
8	90	5	18.0	10	18	582
9	60	3	15.0	20	18	569
10	90	3	15.0	20	36	577
11	60	5	15.0	20	36	673
12	90	5	15.0	20	18	570
13	60	3	18.0	20	36	610
14	90	3	18.0	20	18	571
15	60	5	18.0	20	18	623
16	90	5	18.0	20	36	612
17	60	4	16.5	15	27	598
18	90	4	16.5	15	27	569
19	75	3	16.5	15	27	602
20	75	5	16.5	15	27	612
21	75	4	15.0	15	27	579
22	75	4	18.0	15	27	584
23	75	4	16.5	10	27	587
24	75	4	16.5	20	27	584
25	75	4	16.5	15	18	567
26	75	4	16.5	15	36	573
27	75	4	16.5	15	27	586
28	75	4	16.5	15	27	586

Avant d'avoir notre surface de réponse, c'est-à-dire la zone où le produit est de bonne viscosité, il nous reste de donner au logiciel la désirabilité, c'est-à-dire qu'elles sont les réponses acceptables.

On clique sur désirabilité (Figure 21), puis sur initialisation des désirs élémentaires (Figure 22), pour la viscosité on choisit l'unilatéral car notre cible est une réponse qui possède une valeur de 620 Cp (Figure 23).

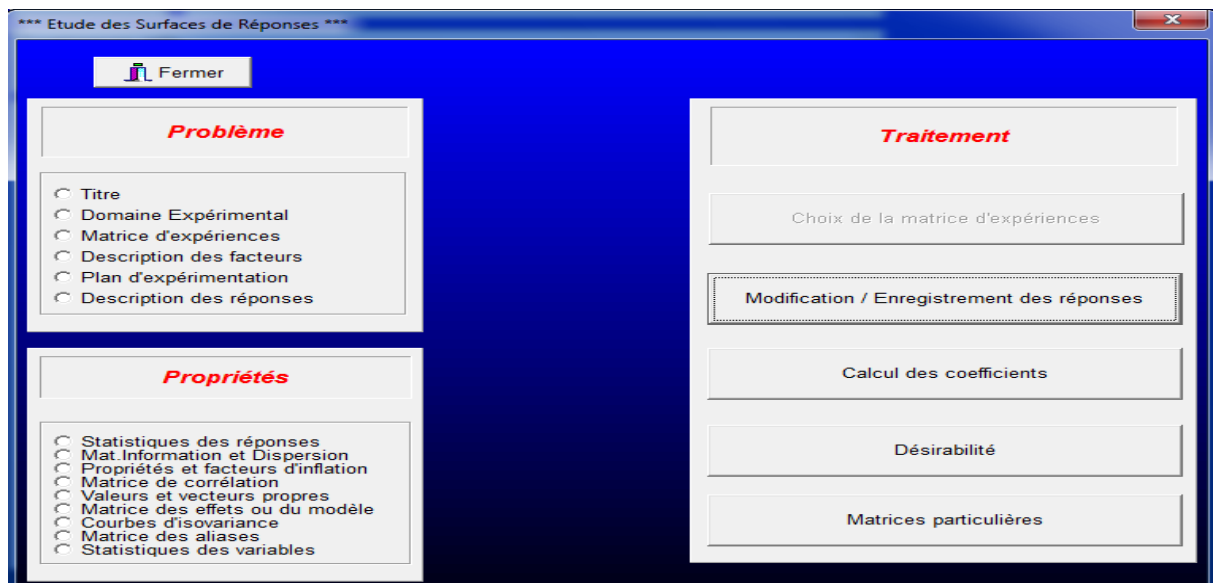


Figure 21 : choix de la désirabilité

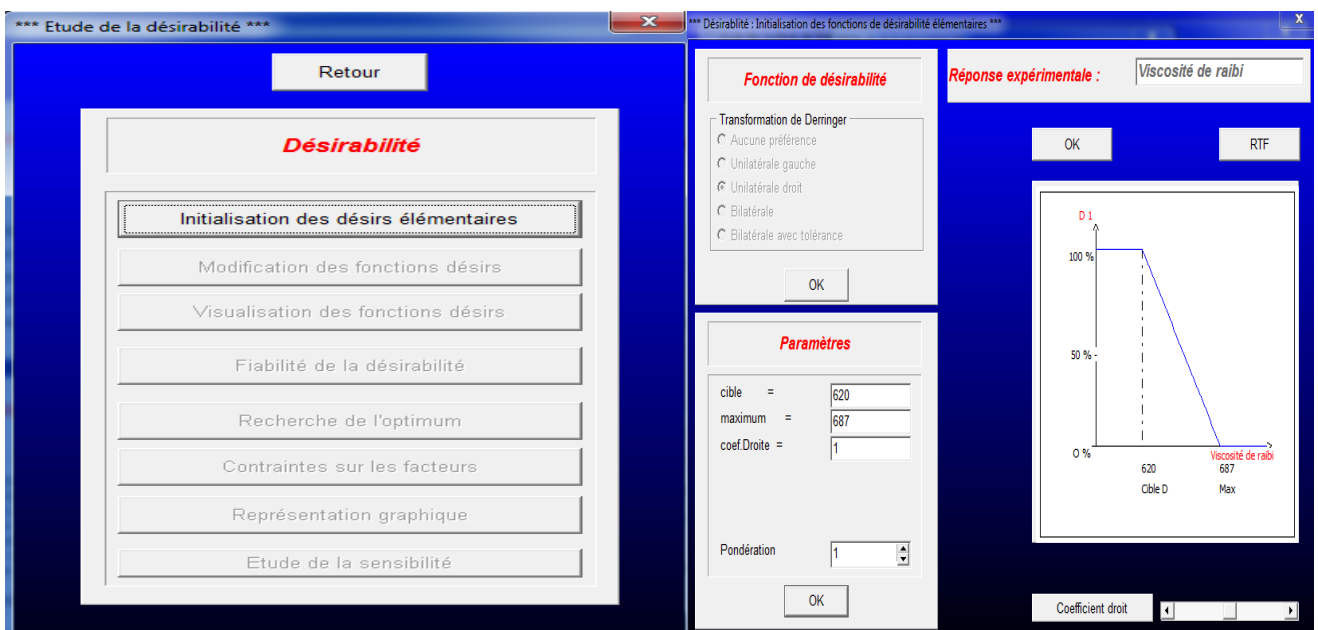


Figure 22 : Initialisation des désirs

Figure 23 : Désirabilité viscosité

Une fois la désirabilité est définie, une dernière étape avant d'avoir notre surface de réponse est de réparer la présentation graphique, j'ai choisis une représentation en 2D pour avoir la surface de réponse sur deux axes seulement ce qui facilite l'interprétation (Figure 24), on fixe trois paramètres, qui sont durée de circuit fermé, vitesse de mélangeur, et température de stockage sirop on n'a pas détecté une influence sur la réponse (la viscosité de raïbi) en variant les axes.

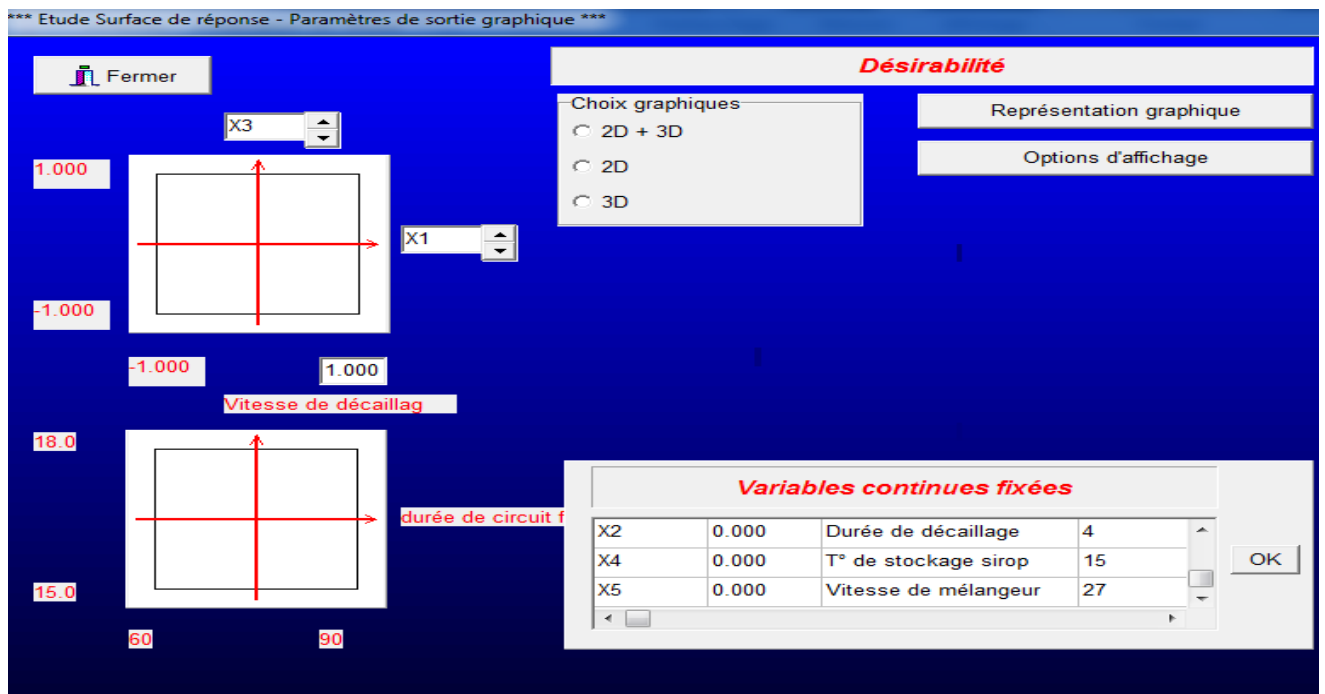


Figure 24: Préparation de la représentation graphique

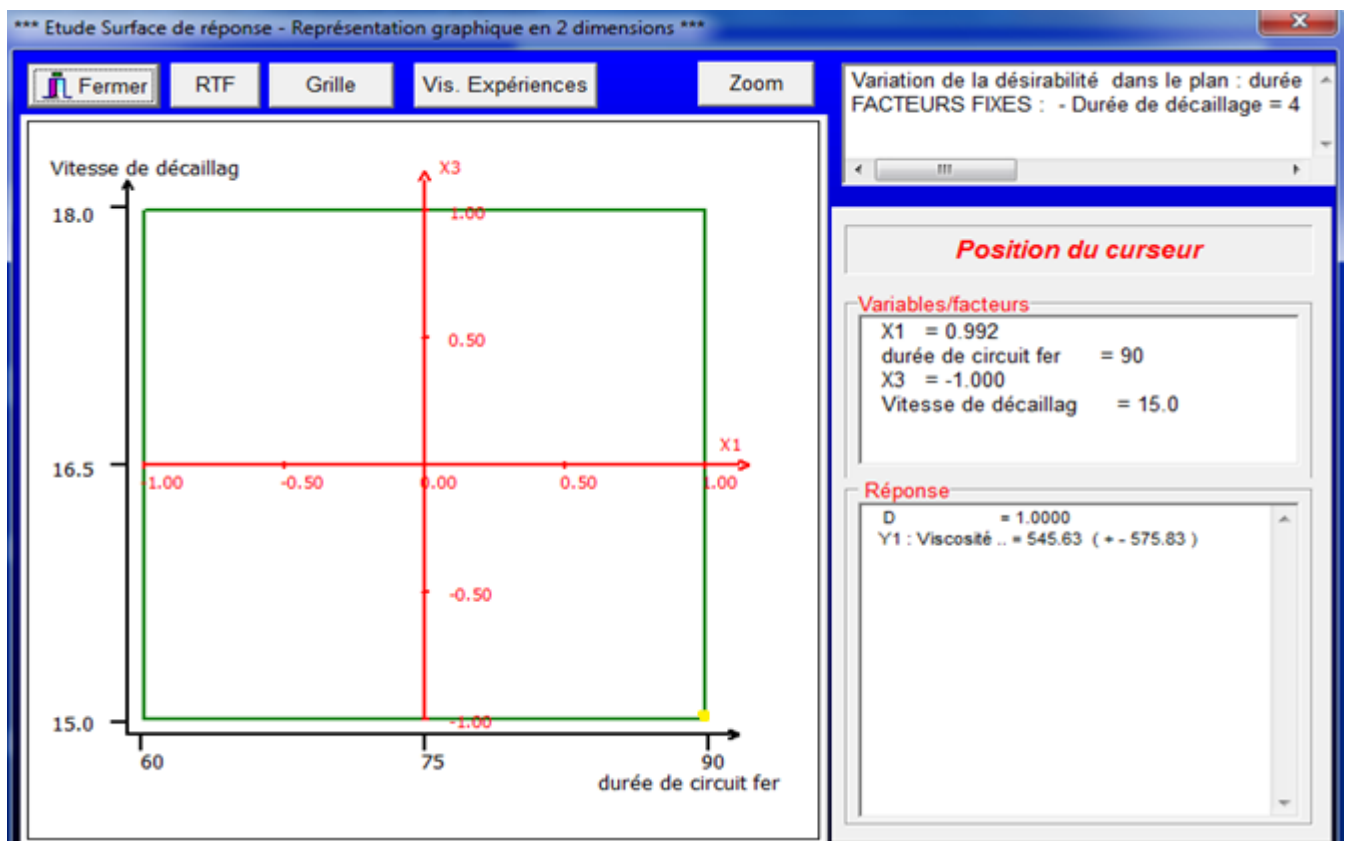


Figure 25:surface de réponse X1 durée de circuit fermé, X3 vitesse de décaillage

4) Conclusion de l'étude

Selon la position du curseur dans la surface de réponse, l'application du logiciel donne pour chaque point, les valeurs des paramètres avec lesquelles on peut travailler ainsi que la valeur de la réponse qui correspond à ces paramètres (Figure 25).

On a cinq facteurs d'influence, trois facteurs à fixer, alors on peut avoir 10 surfaces de réponses, la surface présentée dans la figure 25 est la surface optimale qui permet d'avoir des valeurs de viscosités plus proches à la valeur cible, cependant La surface de réponse qui est présentée en jaune, donne la valeur maximale qui est 545,63 cp, pour que cette valeur soit atteinte dans le domaine expérimentale, il faut fixer les facteurs, durée de décaillage, vitesse de mélangeur, et température de stockage sirop aux valeurs centrées, et travailler avec une durée de circuit fermé de 90 minutes et une vitesse de décaillage de 15 tr/min, dans ces conditions la viscosité de raïbi égale à 545 cp, cette valeur correspond à la valeur maximale.

I). Principe de la régression linéaire multiple

L'analyse descriptive des données repose sur une démarche en plusieurs étapes. On définit tout d'abord les caractéristiques des variables prises une à une (analyse univariée), puis on observe les liens qui les caractérisent deux par deux (analyse bivariée) pour finir par l'observation des structures multiples liant plusieurs variables (analyse multivariée). On distingue alors deux familles principales, la première consiste à observer les liens unissant une variable avec plusieurs autres ($1 \rightarrow n$), la seconde considère simultanément les structures multiples liant différentes variables ($n \rightarrow n$) analyse factorielle).

Toute méthode faisant appel aux régressions repose sur l'acceptation des hypothèses fondatrices de la statistique paramétrique (La statistique paramétrique repose essentiellement sur l'hypothèse que les données sont des variables indépendantes distribuées selon une loi normale. =) et la notion d'ajustement par les moindres carrés. La moyenne arithmétique d'une variable est par conséquent considérée comme un centre de gravité et la notion des moindres carrés consiste à minimiser la somme des résidus élevés à la puissance deux entre la valeur observée et celle extrapolée [11].

But :

La régression multiple est une généralisation de la régression simple. Son but est d'exprimer une variable quantitative (variable expliquée) (y) en fonction d'autres variables quantitatives (variables explicatives) (x_i) indépendantes comme on l'admet généralement. Elle est généralement utilisée pour trouver la meilleure équation linéaire prévisionnelle (modèle) et en évaluer la précision et la signification [11].

La statistique paramétrique repose essentiellement sur l'hypothèse que les données sont des variables indépendantes distribuées selon une loi normale.

1) *Modèle de régression linéaire multiple*

☞ **Choix des variables**

Pour choisir les variables du modèle de régression, on peut adopter l'une des approches suivantes :

- **Approche descendante:** ou l'élimination progressive des variables. Les variables indépendantes sont toutes introduites, puis on commence à retirer celles qui ne sont pas significatives.
- **Approche ascendante** ou l'introduction progressive des variables. Les variables indépendantes significatives sont introduites une par une.

- **Approche pas à pas:** C'est une combinaison entre l'ascendante et la descendante. Les variables sont introduites une par une. Si une variable n'est plus significative suite {l'ajout d'une autre, alors elle est retirée.

☞ Génération des données

Les variables y et x_i étant supposées avoir une relation linéaire entre elles, on se permet d'écrire :

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p + \varepsilon(x)$$

Où : β_i représentent les coefficients de la régression, p est le nombre de variables explicatives et $\varepsilon(x)$, l'erreur aléatoire de moyenne nulle et de variance $\sigma\varepsilon^2$, contient la variation non expliquée par les x .

Les données expérimentales servant pour l'élaboration du modèle sont constituées de n mesures y_i , $i = 1, 2, \dots, n$, pour n jeux de valeurs des variables explicatives [11] :

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_p x_{ip} + \varepsilon(x)_i$$

Les β_i sont des nombres fixes, mais inconnus et les $\varepsilon(x)_i$ sont des réalisations de $\varepsilon(x)$.

☞ Modèle de RLM

La Régression Linéaire Simple cherche {expliquer les valeurs d'une variable y par les valeurs d'une autre variable x et cherche aussi à faire passer une droite "au mieux" (au sens des Moindres Carrés) à travers le nuage de points représentant les données dans le plan (x, y) .

Il en est de même pour la Régression Linéaire Multiple. Lorsque le nombre de variables explicatives est réduit à deux (x_1 et x_2), la Régression Linéaire Multiple va alors faire passer "au mieux" un plan à travers le nuage de points représentant les données dans l'espace (x_1, x_2, y) .

2) *Evaluation de la qualité du modèle*

Quand le modèle s'établit, on s'attend généralement {ce que les observations s'y ajustent [11]. Autrement dit, les écarts e_i entre la variable observée et la variable estimée devraient être faibles. L'ajustement du modèle peut être jugé par l'ordre de grandeur du coefficient de détermination et l'examen des résidus.

☞ Coefficient de détermination

Le coefficient de détermination (R^2), est le carré du coefficient de corrélation. Il renseigne sur la part de la variation expliquée par le modèle de régression établi. Il est calculé par la relation suivante

[11] :

$$R^2 = \left(\frac{\text{cov}(y, \hat{y})}{\sqrt{\text{var}(y) \cdot \text{var}(\hat{y})}} \right)^2 = \frac{\text{Variation de } y \text{ expliquée par la régression}}{\text{Variation totale de } y}$$

Pour une meilleure appréciation de la qualité du modèle, on utilise le coefficient de détermination ajusté ($R^2_{\text{ajusté}}$), qui tient compte du nombre de variables explicatives du modèle de régression. Il est calculé à partir de la formule suivante [11]: Où :

$$R^2_{\text{ajusté}} = 1 - \frac{(n-1)}{(n-p-1)} (1 - R^2)$$

- n est le nombre d'observation ;
- p est le nombre de variables explicatives.

☞ Examen des résidus

Les résidus observés (e_i) sont des estimations de l'erreur théorique inobservable [11]. Il s'agit de la différence entre les valeurs observées et les valeurs estimées par le modèle.

Lors de l'élaboration du modèle, on suppose que les résidus sont indépendants, de moyenne nulle, de variances égales et suivent une loi normale. Cet examen a donc pour objectif de vérifier certaines de ces hypothèses.

II) la modélisation de la viscosité à l'aide d'un modèle mathématique :

On se propose de développer un modèle mathématique permettant la prédiction de la valeur de la viscosité de raibi 24 heures après la production, en ayant comme facteurs d'influence les paramètres de caractérisation des yaourts.

1) Collecte de données

Un suivi de trois mois (Mars, Avril et Mai) a été mené où nous avons prélevé les résultats d'analyses physico-chimiques de 129 fabrications depuis la préparation du mix jusqu'au produit fini. Les résultats pris en considération sont ceux du taux protéique du produit fini, sa teneur en matière grasse, son extrait sec dégraissé et sa viscosité un jour après J+1. (Annexe 2) présente ces différents résultats.

2) Outils d'analyse statistique

L'analyse des données et la régression linéaire ont été effectuées à l'aide du logiciel Nemrodw, Il s'agit d'un outil statistique puissant qui permet de tester des hypothèses et d'effectuer les plans d'expériences.

3) Etude des variables

La sélection des variables a abouti au modèle comportant les trois variables suivantes : TP, MG, ESD.

Les variables de base sont corrélées entre elle et dès lors il y a une redondance de l'information. Bien que cela n'ait qu'un but descriptif, une Analyse en Composantes Principales (ACP) a été exécutée sur les 3 variables initiales (TP, ESD, MG). La matrice de corrélation obtenue (Tableau 7) confirme la redondance et la corrélation entres ces caractéristiques de base. En effet, plusieurs corrélations ont été jugées significatives (valeurs écrites en gras). Ainsi, entre le TP et l'ESD, la corrélation de 0,19 est

considérée comme importante et indique que les deux variables évoluent dans le même sens. Par contre la corrélation (-0,15) entre l'ESD et la MG montre qu'un lien existe entre ces deux caractéristiques et que celles-ci évoluent en sens contraire.

Tableau 7 : Tableau de corrélation

Variables	TP	MG	ESD
TP	1	0,049	0,198
MG	0,049	1	-0,154
ESD	0,198	-0,154	1

Cette présence de lien entre les caractéristiques nous renseigne sur le fait que l'on peut les remplacer par des composantes principales. On remarque que le plan factoriel explique 75% de la variabilité totale de même que la projection des variables les place près du cercle de corrélation (Figure 26).

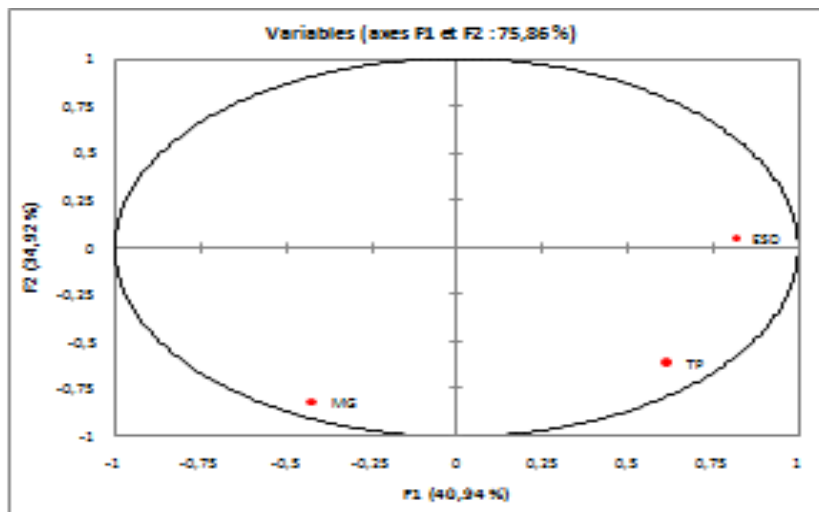


Figure 26 : cercle de corrélation

On remarque que l'axe 1 oppose les yaourts riches en TP, et en ESD mais faibles en MG. L'axe 2, quant à lui, oppose les yaourts riches ESD mais faibles en TP et en MG.

4) Modélisation

☞ Estimation statistique des coefficients

Une régression linéaire multiple est donc effectuée en vue d'estimer les coefficients. Le résultat obtenu est représenté sur.

Tableau 8:estimation statistique des coefficients

Nom	Coefficient	Ecart-Type
b0	-1.9828477	18.344968
b1	33.903193	5.4851827
b2	-20.771416	4.7499224
b3	1.0732484	0.71889837

Ces résultats permettent d'écrire le modèle donnant la viscosité J+1 en fonction des paramètres qui l'influent le plus de point de vue statistique :

$$\mu (J+1) = -1.9828477 + 33.903193 * X_1 - 20.771416 * X_2 + 1.0732484 * X_3$$

Tel que :

- X1 est le taux protéique (TP)
- X2 est La matière grasse (MG)
- X3 est l'extrait sec dégraissé(ESD);

Elle apparait dans un premier temps sous forme quadratique avec un coefficient très hautement significatif. Ceci veut dire qu'elle agit principalement pour les grandes valeurs de viscosité (J+1) où elle a tendance à les ramener à leur niveau d'acceptabilité. Elle apparait également en combinaison avec l'extrait sec dégraissé avec un signe positif ce qui veut dire que l'augmentation de l'extrait sec dégraissé entraine une augmentation de la viscosité J+1.

Le modèle révèle également que l'augmentation du taux protéique entraine l'augmentation de la viscosité. Il en est de même pour la matière grasse.

III) Evaluation de la qualité du modèle

La qualité du modèle peut être évaluée moyennant le coefficient de détermination et l'examen des résidus.

1) Examen des résidus

Ils sont calculés par différence entre les valeurs des viscosités J+1 réelles observées et les valeurs des viscosités J+1 prédites par modélisation (annexe 3). Lors de l'élaboration du modèle, il a été supposé que ces résidus sont de distribution normale, indépendants, de moyenne nulle et de même variance. Cet examen a donc pour objectif de vérifier certaines hypothèses émises au préalable.

☞ Normalité des résidus

Nous avons réalisé un histogramme en vue d'apprécier visuellement la normalité des résidus

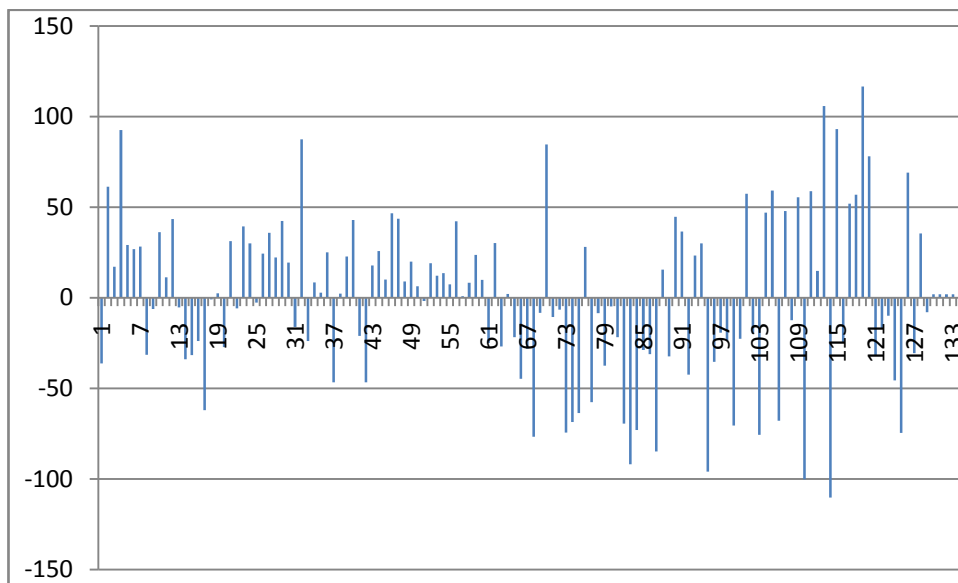


Figure 27 : Histogramme des résidus

D'après l'historgramme des résidus, le postulat de la normalité est respecté.

2) Coefficient de détermination

Tableau 9: tableau de coefficient de détermination / détermination ajusté

R2	0.878
R2Ajusté	0.876

Dans 87% des cas, le modèle nous assure une prédiction fiable de la viscosité J+1. Dans les 13% des cas restants, la décision serait à tord.

- ✓ Les machines utilisées pour le conditionnement du produit diffèrent entre elles par l'effet de cisaillement qu'elles génèrent. Une machine neuve a éventuellement moins d'effet qu'une machine ancienne.
- ✓ Les conditions qui règnent dans les tanks tampons, dans lesquels le produit est stocké juste avant son conditionnement, sont très variées (Pression, niveau de remplissage, brassage...).
- ✓ Les conditions du soutirage du produit depuis les tanks tampons vers les conditionneuses diffèrent aussi. En effet, on peut assister à un soutirage simple, c'est-à-dire, un seul tank tampon alimente une seule machine moyennant une seule pompe, comme on peut avoir un soutirage double où l'on a deux machines qui soutirent du même tank tampon avec deux pompes différentes. Ceci agit négativement sur les propriétés rhéologiques du produit.

Conclusion et perspectives

Le présent travail a été élaboré, dans une première étape à améliorer la qualité organoleptique de raïbi avec des moyens appropriés, pour ces raisons j'ai effectué un suivi de la viscosité selon un plan d'expériences tout en variant des niveaux des paramètres suivant la matrice d'expériences proposée pour arriver finalement à des niveaux des facteurs susceptibles de donner des valeurs de viscosité optimales.

Dans une seconde étape, je vais répondre à un problème de décision portant sur la viscosité de raïbi. Le but était donc d'élaborer un modèle mathématique permettant la prédiction de la valeur de la viscosité au jour J+1. Plusieurs facteurs influencent la viscosité de raïbi. L'étude a démontré qu'ils appartiennent au bloc composition dont principalement les protéines, l'extrait sec dégraissé et la matière grasse et le bloc traitement dont la fermentation, le brassage, le refroidissement, le pompage, et le cisaillement lors du conditionnement. La température et le temps de stockage sont aussi des paramètres qu'il ne faudrait pas sous-estimer. Dans cette étude, nous nous sommes limités aux données du bloc composition. La sélection exécutée pour ces données a abouti au modèle comportant les 3 variables suivantes :

- ✓ Taux protéique
- ✓ Matière grasse
- ✓ Extrait sec dégraissé

Le coefficient de détermination assure que le modèle de prédiction est fiable dans 87% des cas. Pour compléter ce travail et améliorer la qualité du modèle et sa fiabilité dans la prise de décision concernant la qualité de raïbi en matière de viscosité, on recommande de prendre en considération les éléments suivants :

- ✓ Eliminer l'effet de l'échantillonnage et du mesurage des différents paramètres de caractérisation des yaourts par les différentes équipes de travail;
- ✓ Prendre en considération l'effet de cisaillement du produit lors des différentes étapes de traitement subi.

Pour mettre fin à ce projet enrichissant en matière de formation professionnelle, nous tenons à soulever quelques remarques que nous jugeons très importantes, Ce stage a pour objectif principal de contribuer à mon ouverture sur le monde du travail et d'acquérir le pouvoir de travail en équipe. Il me permet également d'approfondir mes connaissances théoriques par des applications expérimentales et ceci en abordant un sujet ou une problématique d'intérêt pour cet établissement.

Références bibliographiques

[1] : Barnes D.L., Harper S.J., Bodyfelt F.W. et M.R. McDaniel, 1991. Prediction of consumer acceptability of yogurt by sensory and analytical measures of sweetness and sourness. *Journal of Dairy Science*, 74, 3746 – 3754.

[2] : l'Agroalimentaire : un secteur pilier de l'économie marocaine [en ligne]. Disponible sur : www.marocagriculture.com

[3] : Anonyme, 2010. Focus sur les contrats-programmes. Ministère de l'agriculture et de la pêche maritime. Direction de Développement des Filières de Production : les Filières de Production Agricole.

[4] : Décret n° 2-00-425 du 10 ramadan 1421 (7 décembre 2000) relatif au contrôle de la production et de la commercialisation du lait et produits laitiers. Disponible sur <http://www.onssa.gov.ma>

[5] : AMIOT J., FOURNIER S., LEBEUF Y., PAQUIN P. et R. SIMPSON. Science et technologie du lait. Transformation du lait. Chapitre 1 : composition, propriétés physicochimiques, valeurs nutritives, qualité technologique et techniques d'analyses du lait.

[6] : Anonyme. Manuel de transformation du lait. Chapitre 2 : Chimie et composition du lait.

[7] : LANEUVILLE BALLESTER S.I., 2004. Etude de l'interaction associative entre la β -lactoglobuline et le xanthane natif ou le xanthane traité aux hautes pressions hydrodynamiques. Faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation. Université Laval. Québec.

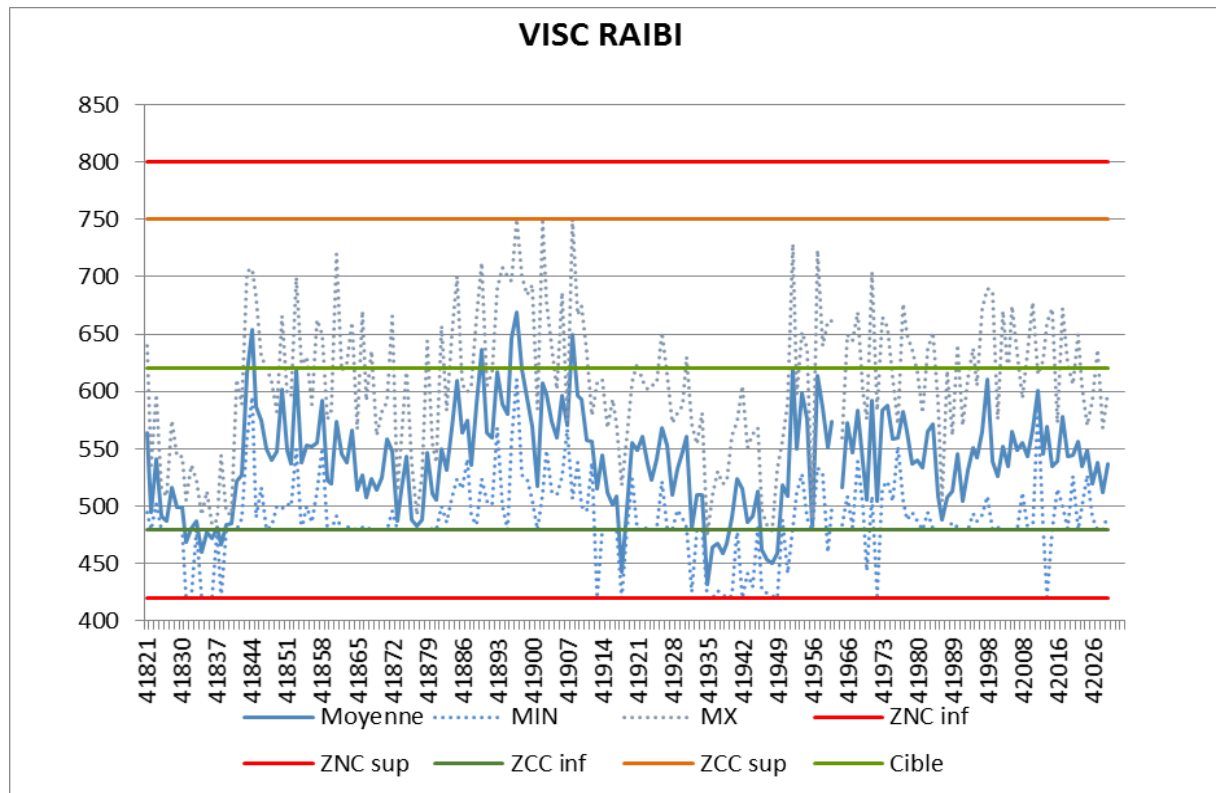
[8] ABI AZAR R., 2007. Complexation des protéines laitières par les extraits de gousses vertes de caroubier ; Propriétés technologiques des coagulums obtenus. Thèse de doctorat. Ecole doctorale ABIES: AGROPARISTECH, 196p.

[9] : Norme Codex pour les laits fermentés ; Codex Standard 243 – 2003. Inc.

[10] : FAVIER J.C., 1991. Composition du yaourt. Inc.

[11] : LAFFLY D., 2006. Régression multiple : principes et exemples d'application. Université de Pau et des Pays de l'Adour.

Annexe1 : carte de contrôle de la viscosité de raibi



Annexe 2 : Résultats des suivis menés

N°Exp	TP(g/Kg)	MG(g/Kg)	ESD(g/Kg)	La viscosité J+1 (Cp)
1	23.90000	23.10000	185.20000	491
2	23.50000	22.20000	189.20000	598
3	22.90000	22.50000	182.50000	520
4	21.90000	20.80000	183.50000	598
5	23.90000	23.90000	179.80000	534
6	24.20000	21.50000	189.30000	602
7	24.90000	22.30000	186.10000	607
8	23.80000	24.60000	183.10000	459
9	24.40000	22.30000	181.80000	551
10	21.90000	20.50000	180.00000	544
11	22.90000	20.70000	184.70000	554
12	23.10000	21.70000	180.90000	568
13	24.50000	20.60000	181.30000	590
14	23.80000	20.50000	186.20000	545
15	23.80000	21.90000	186.00000	518
16	23.90000	22.30000	187.10000	522
17	23.30000	21.90000	184.40000	469
18	24.20000	22.80000	190.10000	548
19	24.40000	21.60000	187.20000	580
20	24.00000	21.60000	182.80000	532
21	25.10000	22.30000	181.70000	612
22	24.30000	20.90000	186.40000	582
23	25.00000	21.60000	189.80000	640
24	24.70000	21.90000	193.20000	618
25	24.40000	22.60000	183.40000	550
26	24.80000	22.90000	185.90000	587
27	25.00000	20.80000	188.80000	652
28	25.20000	21.30000	175.00000	620
29	25.20000	22.30000	184.80000	630
30	24.80000	22.20000	184.40000	595
31	24.10000	20.80000	187.30000	568
32	25.80000	21.30000	193.10000	725
33	24.10000	21.90000	181.40000	531
34	24.70000	21.30000	182.20000	597
35	24.40000	22.90000	186.00000	552
36	24.80000	21.60000	188.00000	617
37	23.70000	21.90000	180.80000	494
38	24.70000	22.30000	177.40000	565
39	24.90000	22.50000	182.90000	594
40	25.10000	22.10000	188.30000	635
41	24.30000	22.60000	176.60000	521
42	23.80000	21.50000	178.30000	503
43	24.80000	21.90000	183.70000	599

44	25.00000	20.90000	183.30000	634
45	24.60000	21.30000	185.80000	599
46	25.20000	22.60000	186.80000	630
47	25.20000	21.90000	186.20000	641
48	24.70000	21.80000	182.00000	587
49	24.80000	22.00000	184.70000	600
50	24.60000	22.60000	182.60000	565
51	24.60000	22.50000	178.10000	554
52	24.80000	21.90000	184.50000	601
53	24.60000	21.60000	186.80000	596
54	24.60000	22.90000	186.30000	570
55	24.60000	22.50000	183.50000	569
56	24.50000	22.60000	186.90000	602
57	25.10000	22.60000	180.30000	574
58	24.60000	21.90000	181.30000	580
59	24.60000	21.80000	182.70000	599
60	24.80000	21.60000	181.60000	595
61	24.80000	22.10000	183.70000	552
62	24.40000	22.30000	182.30000	588
63	24.80000	22.20000	181.80000	546
64	24.10000	21.30000	182.80000	571
65	24.30000	20.90000	182.60000	562
66	24.30000	21.60000	184.00000	526
67	24.10000	21.90000	179.80000	525
68	24.00000	21.60000	180.50000	480
69	23.80000	23.00000	179.90000	512
70	24.10000	22.80000	180.60000	620
71	24.90000	21.50000	185.40000	584
72	24.60000	21.60000	182.70000	573
73	24.50000	21.50000	181.10000	502
74	23.70000	21.40000	180.40000	482
75	23.70000	22.30000	179.10000	467
76	22.90000	22.60000	176.00000	522
77	23.90000	21.30000	180.50000	502
78	23.00000	22.30000	177.00000	496
79	22.90000	21.50000	175.80000	479
80	23.00000	22.50000	176.40000	495
81	23.70000	22.60000	176.70000	500
82	23.80000	21.30000	176.10000	482
83	23.80000	22.50000	177.40000	436
84	23.30000	22.80000	178.60000	433
85	23.40000	22.90000	175.30000	475
86	23.70000	22.60000	178.90000	493
87	23.60000	20.90000	176.90000	469
88	23.50000	21.80000	177.50000	548
89	24.10000	20.60000	179.10000	547
90	24.10000	21.50000	184.30000	611
91	24.70000	21.60000	188.90000	626
92	24.90000	20.80000	182.90000	564
93	24.30000	21.30000	182.80000	599

94	24.70000	21.90000	186.80000	611
95	24.90000	21.30000	180.90000	498
96	23.70000	22.90000	188.70000	493
97	24.00000	21.60000	181.90000	539
98	24.30000	21.90000	180.50000	537
99	24.40000	22.30000	185.80000	491
100	23.90000	22.50000	183.30000	515
101	23.80000	22.10000	178.70000	595
102	24.30000	22.60000	182.80000	529
103	24.10000	21.50000	180.80000	487
104	23.90000	21.90000	173.80000	587
105	23.90000	21.60000	180.00000	612
106	24.70000	22.30000	187.90000	506
107	23.90000	20.60000	178.60000	620
108	23.90000	22.90000	178.70000	512
109	24.50000	21.80000	187.90000	633
110	24.80000	22.10000	189.60000	483
111	23.90000	22.50000	182.80000	596
112	24.90000	21.80000	187.10000	605
113	23.90000	22.00000	181.60000	652
114	24.90000	21.00000	186.50000	496
115	23.70000	22.60000	181.50000	620
116	24.80000	22.30000	185.20000	550
117	25.30000	22.40000	173.80000	629
118	25.60000	22.10000	179.10000	656
119	24.10000	22.60000	174.00000	649
120	25.40000	22.30000	175.20000	662
121	24.70000	21.90000	169.70000	531
122	25.50000	23.00000	179.90000	561
123	25.70000	22.80000	181.90000	581
124	25.40000	22.60000	187.10000	545
125	25.80000	22.50000	179.10000	523
126	24.30000	22.50000	179.30000	616
127	24.60000	21.90000	176.50000	536
128	25.10000	22.80000	174.30000	598
129	24.50000	22.10000	175.50000	550

Annexe 3 : la viscosité réelle et la viscosité prédite par le modèle

N°Exp	Viscosité réelle	Viscosité J+1 Prédite par le modèle (cp)	résidu
1	491	527.24	-36.24
2	598	527.25	61.32
3	520	502.91	17.08
4	598	505.39	92.60
5	534	504.83	29.16
6	602	575.05	26.94
7	607	578.73	28.26
8	459	490.44	-31,44
9	551	557.16	-6,16
10	544	507.86776	36.132245
11	554	542.66093	11.339067
12	568	524.59181	43.408189
13	590	595.33414	-5.3341391
14	545	578.93796	-33.937962
15	518	549.64333	-31.64333
16	522	545.90566	-23.905656
17	469	530.97454	-61.974536
18	548	548.91065	- 0.91065087
19	580	577.50457	2.4954312
20	532	559.221	-27.220999
21	612	580.79395	31.206053
22	582	587.79564	-5.7956422
23	640	600.63693	39.363069
24	618	587.88359	30.116408
25	550	552.65481	-2.6548088
26	587	562.66778	24.332218
27	652	616.18082	35.819185

28	620	597.76492	22.235082
29	630	587.51134	42.488664
30	595	575.5979	19.402099
31	568	584.05807	-16.058069
32	725	637.53263	87.46737
33	531	554.87735	-23.877346
34	597	588.54071	8.4592901
35	552	549.21383	2.7861703
36	617	591.92444	25.075555
37	494	540.67212	-46.672119
38	565	562.6177	2.3822984
39	594	571.14692	22.853077
40	635	592.03167	42.968331
41	521	541.9664	-20.966401
42	503	549.68788	-46.687884
43	599	581.07805	17.921948
44	634	608.20081	25.799192
45	599	589.01408	9.9859153
46	630	583.42641	46.573592
47	641	597.32245	43.67755
48	587	577.94035	9.0596479
49	600	580.07416	19.925841
50	565	558.57685	6.4231512
51	554	555.82437	-1.8243728
52	601	581.93665	19.063349
53	596	583.85591	12.144092
54	570	556.31644	13.683557
55	569	561.61991	7.3800861
56	602	559.8015	42.198503
57	574	573.05997	0.94002577
58	580	571.72162	8.2783827
59	599	575.30131	23.698693
60	595	585.05566	9.9443446
61	552	576.92377	-24.923769
62	588	557.70566	30.294339
63	546	572.80746	-26.807455
64	571	568.84274	2.157257
65	562	583.7173	-21.717298
66	526	570.67985	-44.679855
67	525	553.16015	-28.160148

68	480	556.75253	-76.752528
69	512	520.24796	-8.2479571
70	620	535.32447	84.675528
71	584	594.60146	-10.60146
72	573	579.45559	-6.4555899
73	502	576.42521	-74.425215
74	482	550.62853	-68.628528
75	467	530.53903	-63.53903
76	522	493.85798	28.142019
77	502	559.59363	-57.593633
78	496	504.55297	-8.5529736
79	479	516.49189	-37.491889
80	495	499.75474	-4.7547414
81	500	521.73181	-21.73181
82	482	551.48102	-69.481021
83	436	527.95054	-91.950544
84	433	506.05542	-73.055421
85	475	503.82688	-28.826879
86	493	524.09296	-31.092956
87	469	553.86755	-84.867548
88	548	532.4269	15.573097
89	547	579.41172	-32.411715
90	611	566.29833	44.701668
91	626	589.50005	36.499951
92	564	606.45833	-42.458331
93	599	575.62338	23.376618
94	611	581.0148	29.985197
95	498	593.92613	-95.926126
96	493	528.37936	-35.379365
97	539	558.25508	-19.255075
98	537	560.69206	-23.692061
99	491	561.46203	-70.46203
100	515	537.67303	-22.673029
101	595	537.65433	57.345666
102	529	548.62054	-19.62054
103	487	562.54196	-75.541963
104	587	539.94002	47.059981
105	612	552.82558	59.174416
106	506	573.88681	-67.886809
107	620	572.09445	47.905547
108	512	524.42752	-12.42752

109	633	577.49188	55.508121
110	483	583.25593	-100.25593
111	596	537.1364	58.863595
112	605	590.19456	14.805443
113	652	546.23421	105.76579
114	496	606.16774	-110.16774
115	620	526.8834	93.116598
116	550	574.37936	-24.379358
117	629	577.01878	51.981218
118	656	599.10938	56.890619
119	649	532.39532	116.60468
120	662	583.98879	78.01121
121	531	562.66226	-31.662256
122	561	577.88339	-16.883386
123	581	590.9648	-9.9648043
124	545	590.52902	-45.529021
125	523	597.58145	-74.581453
126	616	546.94131	69.058687
127	536	566.57003	-30.570025
128	598	562.4662	35.533799
129	550	557.95217	-7.9521743