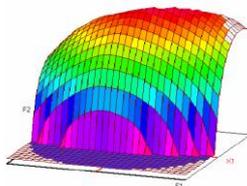


Année Universitaire : 2021-2022



Master Sciences et Techniques CAC Ageq
Chimométrie et Analyse Chimique : Application à la gestion de la qualité

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

*Optimisation des paramètres de la machine de
conditionnement ARCIL par la méthodologie des plans
d'expériences*

Présenté par:

KHAZAZA Ilham

Encadré par:

Pr. ALILOU El Houssine /FST Fès

Mr. BOUHADRIA Khalid / Centrale Danone

Soutenu Le 21 Juin 2022 devant le jury composé de:

- **Pr. ALILOU El Houssine**
- **Pr. MELIANI Abdessalam**
- **Pr. FARAH Abdellah**

Stage effectué à : Centrale Danone de Meknès

Table des matières

<i>Dédicace</i>	3
<i>Remerciements</i>	4
<i>I. Introduction</i>	10
<i>II. Chapitre 1 Etude bibliographique</i>	11
A. Historique.....	11
1. Etapes marquantes de création de la Centrale Danone.....	11
B. Présentation générale de la société.....	13
C. Site de production de la centrale Danone au Maroc.....	13
D. Fiche technique.....	14
E. Organisation du personnel.....	14
F. Unité Centrale Danone de Meknès.....	15
G. Laboratoire contrôle qualité et Service conditionnement.....	15
Service laboratoire :.....	15
1. Poste de contrôle de la matière première :.....	15
2. Service organoleptique :.....	15
3. Poste des analyses physico-chimiques :.....	18
4. Poste des contrôles microbiologiques :.....	19
5. Service de conditionnement.....	19
H. Processus de fabrication des produits laitiers.....	20
<i>III. Chapitre 2 généralités sur le thermoformage</i>	30
A. Présentation de thermoformage.....	30
B. Description du procédé de thermoformage assisté par poinçon.....	31
C. Le semi-produit.....	32
D. Chauffage de la feuille.....	33
E. Fromage.....	33
<i>IV. Chapitre 3 Optimisation des paramètres de la machine de conditionnement ARCIL</i>	35
<i>V. Chapitre 4 application de la méthode des plans d'expériences</i>	40
A. Généralités sur les plans d'expériences.....	40
1. Définition.....	40
2. Les avantages de cette méthode sont notamment :.....	40

3. Etapes de réalisation des plans d'expériences.....	40
4. On peut donc résumer les objectifs des plans d'expériences en cinq grand thèmes : ...	41
5. Plans factoriels complets a deux niveaux	42
6. Plan factoriel à deux facteurs :.....	42
7. Méthode des surfaces de réponse	43
8. Plan composite à faces centrées.....	43
B. Partie pratique :.....	44
1. Etude descriptive en utilisant le plan factoriel complet	44
2. Etude prédictive.....	46
<i>Conclusion</i>	<i>51</i>
<i>ANNEXES</i>	<i>52</i>
<i>Références</i>	<i>54</i>

Dédicace

A mes chers parents, en reconnaissance aux sacrifices consentis pour mon éducation votre amour et vos encouragements m'ont permis de surmonter tous les obstacles.

C'est avec profonde gratitude et respect que je dédie ce travail à mes parents, que Dieu leur prête longue vie pour que je puisse leur combler à mon tour.

Je dédie aussi ce travail à ma sœur, mes frères, mes amis et tous les personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

Remerciements

En premier lieu, Je tiens à remercier toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

*Tout d'abord à mon encadrant Pr. **ALLOU EL. HOUSSENE**, qui a supervisé mon travail, et qui a fait preuve de professionnalisme mais aussi de bonté.*

*De même, je tiens à remercier Mr. **BOUHADRIA KHALID**, Responsable qualité au sein de Centrale **DANONE**, pour son chaleureux accueil, sa disponibilité et pour son temps consacré afin de m'orienter et me donner toutes informations nécessaires pour l'élaboration de ce travail.*

*Je remercie aussi Mr. **EL ASRI MOHAMMED** pour sa disponibilité, leur généreuse contribution et leur grand aide qu'il m'a apporté.*

*Je remercie également l'équipe de laboratoire et particulièrement Mr. **NACHAT REDOUANE** pour leur soutien et leur collaboration à la réussite de ce projet*

Un grand merci à ma mère et ma sœur, pour leurs conseils ainsi que leur soutien inconditionnel.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers les amis et collègues qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel. Merci de m'avoir toujours encouragée et soutenue. Je ne vous remercierai jamais assez.

Liste des figures

Figure 1: organigramme de l'entreprise

Figure 2 : Milko scan

Figure 3 : pH mètre

Figure 4 : Dessiccateur

Figure 5 : viscosimètre Anton Paar

Figure 6 : lait pasteurisé

Figure 7 : fromage frais (Jockey et Danino)

Figure 8 : schéma décrivant l'étape de la stérilisation de la crème sucrée

Figure 9 : schéma résumant les différentes étapes de fabrication de dessert lacté

Figure 10 : préparation de dessert DANNETTE

Figure 11 : produit fini Raibi jamila

Figure 12 : produit fini flan idéal (vanille/fraise)

Figure13 : Schéma de principe du procédé de thermoformage assisté par poinçon dans l'industrie de l'emballage alimentaire de produits frais : chauffage, formage, remplissage et scellage en ligne dans des conditions stériles.

Figure14 : thermoformage négatif

Figure 15 : appareil de la résistance à la compression verticale

Figure 16 : Les meilleurs emplacements des points expérimentaux sont les sommets du domaine (A, B, C, D) d'étude lorsque le modèle postulé est du premier degré.

Figure 17 : points expérimentaux d'un plan CCF pour K=2 facteurs

Figure 18 : histogramme des effets

Figure 19 : diagrammes des interactions

Figure 20 : histogramme des épaisseurs

Figure 21 : droite de Henry fournie par nemrodw

Liste des tableaux

Tableau 1 : Fiche technique de la Centrale Danone

Tableau 2 : Quelques analyses effectuées au service organoleptique

Tableau 3 : des principales classes de polymères utilisées en thermoformage, leur plage de mise en forme (plage de formage) et leurs températures caractéristiques (température de transition vitreuse, T_g , ou de fusion, T_f).

Tableau 4 : mesures de la RCV à différente température

Tableau 5 : mesures de la RCV à différente prise de la course des poinçons

Tableau 6 : matrice d'expériences pour un plan CCF pour $k = 2$ facteurs

Tableau 7 : matrice d'expérience du plan factoriel

Tableau 8 : matrice d'expérience d'un PCC fournie par nemrodw

Tableau 9 : les coefficients de modèle mathématique fournis par nemrodw

Tableau 10 : tableau d'analyse de la variance

SIGLES ET ABRECIATIONS

CDM : centrale Danone Meknès

PS : polystyrène

RCV : résistance à la compression verticale

TP : Taux protéique

MP : matière première

pH : potentiel hydrogène

STEP : station d'épuration des eaux usées

TS : tank de stockage

MPE : méthodologie des plants d'expériences

CCF : composite à face centrée

Liste des courbes

Courbe 1 : RCV en fonction de la température

Courbe 2 : RCV en fonction de la course des poinçons

Courbe 3 : la carte de contrôle des épaisseurs

Courbe 4 : les courbes isoréponses de la résistance en fonction des deux
Paramètres.

I. Introduction

L'aspect et plus particulièrement la qualité visuelle des produits laitiers est l'un des critères le plus important pour qu'un consommateur puisse les acheter puis les consommer.

Dans ce sens, les pots produits par la Centrale Laitière peuvent parfois présenter des déformations physiques à cause de la faible résistance d'emballage, ce qui génère par la suite des pots non-conformes.

Et donc c'est impératif de recenser toutes les sources de déformations possibles tout en se basant sur les facteurs qui influencent la machine qui est responsable dans la fabrication des pots tels que la température.

L'objectif primordial de cette étude consiste d'une part à identifier les paramètres qui a un impact direct sur la résistivité des pots produits au final. D'autre part, à optimiser ces paramètres de façon à obtenir une résistance optimale tout en les variant dans chaque expérience qu'on va effectuer réellement par la suite.

Pour bien détailler ce travail, on distingue trois chapitres :

Le premier chapitre concernera une étude bibliographique comportant un historique et une présentation générale de la Centrale Danone.

Le deuxième va comporter des notions générales de thermoformage et le procédé de thermoformage par poinçon.

Dans le troisième chapitre, on applique la méthode utilisée par la société pour optimiser les paramètres qu'on a.

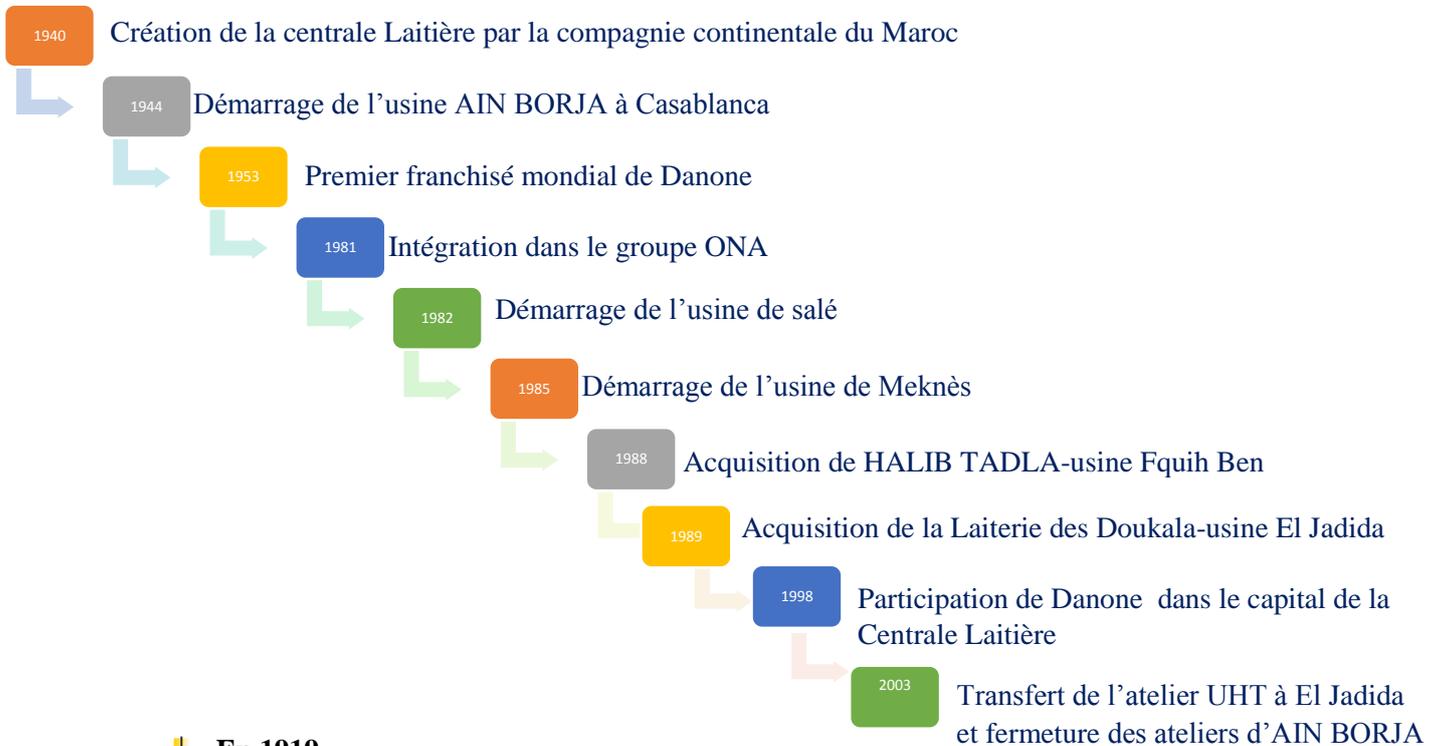
Et le quatrième sera consacré pour la partie pratique en appliquant la méthodologie des plans d'expériences et plus particulièrement un domaine expérimental (Surface de Réponse) et certains outils statistiques, afin de réaliser une optimisation tout en variant les paramètres pertinents influençant sur la résistance des pots.

Finalement on va conclure ce rapport en donnant une interprétation générale des résultats trouvés.

II. Chapitre 1 : Etude bibliographique

A. Historique

1. Etapes marquantes de création de la Centrale Danone



✚ En 1919

Naissance De Danone A Barcelone, Espagne

Isaac Carasso vit à Barcelone au début du XXIème siècle Il constate que de nombreux enfants espagnols souffrent d'infections intestinales. Conscient des recherches faites par le Prix Nobel et Directeur de l'Institut Pasteur Ilya Mechkinov, Isaac décide d'introduire sur le marché espagnol un produit connu dans les Balkans pour ses bénéfices sur la santé : le yaourt. Il lance la marque Danone en 1919, inspiré par le prénom de son fils, Daniel, dont le surnom était "Danon". La preuve que Danone était engagé dans de bonnes pratiques alimentaires depuis le départ !

✚ En 1940

Creation De L'entreprise Centrale Laitiere Au Maroc

Depuis plus de 60 ans, Centrale laitière fabrique des produits laitiers frais, sains et accessibles pour des générations de familles marocaines que nous avons la fierté d'avoir accompagnées et fait grandir.

 **1966**

Lancement De Raibi Jamila

Consommé par tous les Marocains depuis plus de 50 ans, Jamila est un produit mythique élaboré à partir de lait frais et de grenade. A son lancement, Raibi Jamila se vendant particulièrement bien dans le quartier Jamila, à Casablanca, il fut décidé de baptiser le produit selon le quartier de son premier succès populaire. C'est ainsi que Raibi Jamila vu le jour. Et son succès ne s'est plus démenti depuis, auprès des marocains d'ici et d'ailleurs.

 **1972**

Quand De Grands Esprits Se Rencontrent

L'histoire de la fusion BSN - Gervais se résume à la rencontre deux visionnaires en 1972, en les personnes de Daniel Carasso et d'Antoine Riboud.

Daniel Carasso souhaite faire grandir Danone à l'international et voit en Antoine Riboud un entrepreneur d'un indubitable talent. La fusion entre les deux entreprises est annoncée en décembre 1972 et voit la naissance d'un géant de l'industrie alimentaire.

 **2000**

Bien Plus Qu'une Compétition De Football

La Danone Nations Cup (DNC) est la plus grande compétition de football pour les enfants âgés de 10 à 12 ans. Danone est très fier d'avoir créé et organisé cette compétition au cours des 16 dernières années, tout en inspirant les rêves et aspirations de millions d'enfants de par le monde. Cette compétition est devenue une des composantes essentielles de la culture de l'entreprise. En 2015, Le Maroc, pays organisateur, gagne la 1ère place du podium. En 2017, il renouvelle l'exploit en se qualifiant en 3ème position sur plus de 30 équipes en lice !

 **2015**

Centrale Laitière Devient Centrale Danone

En avril 2013, Danone devient actionnaire majoritaire dans le capital de Centrale Laitière. Ce changement d'actionnariat sera suivi, en 2015, par le fait de sceller matériellement leur union avec le changement de raison sociale de l'entreprise et un nouveau logo qui lie physiquement les deux entités en une nouvelle : Centrale Danone, filiale d'un groupe international avec des racines marocaines fortes et solides.

 **2017**

Danone Renforce Sa Gouvernance Et Son Organisation

Emmanuel Faber nommé Président-Directeur Général. M. Faber succède à Franck Riboud en qualité de Président.

M. Riboud devient Président d'Honneur de Danone, il reste Administrateur de l'entreprise et membre du Comité stratégique du Conseil. La Centrale Danone est une filiale du groupe français Danone spécialisée dans la production des produits laitiers. [1]

B. Présentation générale de la société

Centrale Danone, anciennement **Centrale laitière**, c'est une entreprise marocaine filiale de la multinationale française Danone, spécialisée dans les produits laitiers.

Centrale laitière est créée en 1939, puis elle a démarré la production en 1944, à l'usine de Casablanca. En 1957, elle a commencé à travailler sur les produits dérivés. Le 24 octobre 2015, Danone a acquis 95% du capital, pour cela la société change de nom et devient Centrale Danone, alors qu'aujourd'hui, la société dispose d'une implantation nationale comporte quatre unités de production situées à **Salé, Meknès, El Jadida et Fquih Ben Saleh**, chaque site est chargé de l'approvisionnement du marché nationale avec des produits laitiers frais.

Les produits pour chaque site de production :

-**Salé** : yaourts ferme, yaourts brassé, yaourts à boire.

-**El Jadida** : Lait pasteurisé, lait UHT, lait fermenté, dessert lacté, fromage frais et fondu.

-**Meknès** : Elle se charge de la production du lait pasteurisé, des fromages frais et des Yaourts portant les noms « Danino », « Yawmy Jockey », « Raibi » et du dessert «Danette ». -

Fquih Ben Saleh : Lait pasteurisé, beurre, lait en poudre. [3]

C. Site de production de la centrale Danone au Maroc

Répartis sur 4 sites au Maroc (El Jadida, Salé, Meknès et Fkih Ben Salah), les sites de production de Centrale Danone partagent un point commun : des standards de qualité rigoureux et des certifications internationales. [2]

D. Fiche technique

<i>Dénomination</i>	Centrale Danone
<i>Forme juridique</i>	Société anonyme
<i>Siège social</i>	Bd Sidi Mohamed Ben Abdellah, Marina 20030 Casablanca
<i>Direction</i>	Nathalie Alquier (PDG)
<i>Actionnaires</i>	Danone (99.7%)
<i>Secteur d'activité</i>	Agroalimentaire
<i>Produits commercialisés</i>	Centrale, Gervais, Danone, Assiri, Danao, Raibi Jamila, Danette, Dan'up, Lait de croissance
<i>Effectif</i>	3600
<i>Site web</i>	www.corporate.danone.ma

Tableau 1 : Fiche technique de la Centrale Danone [4]

E. Organisation du personnel

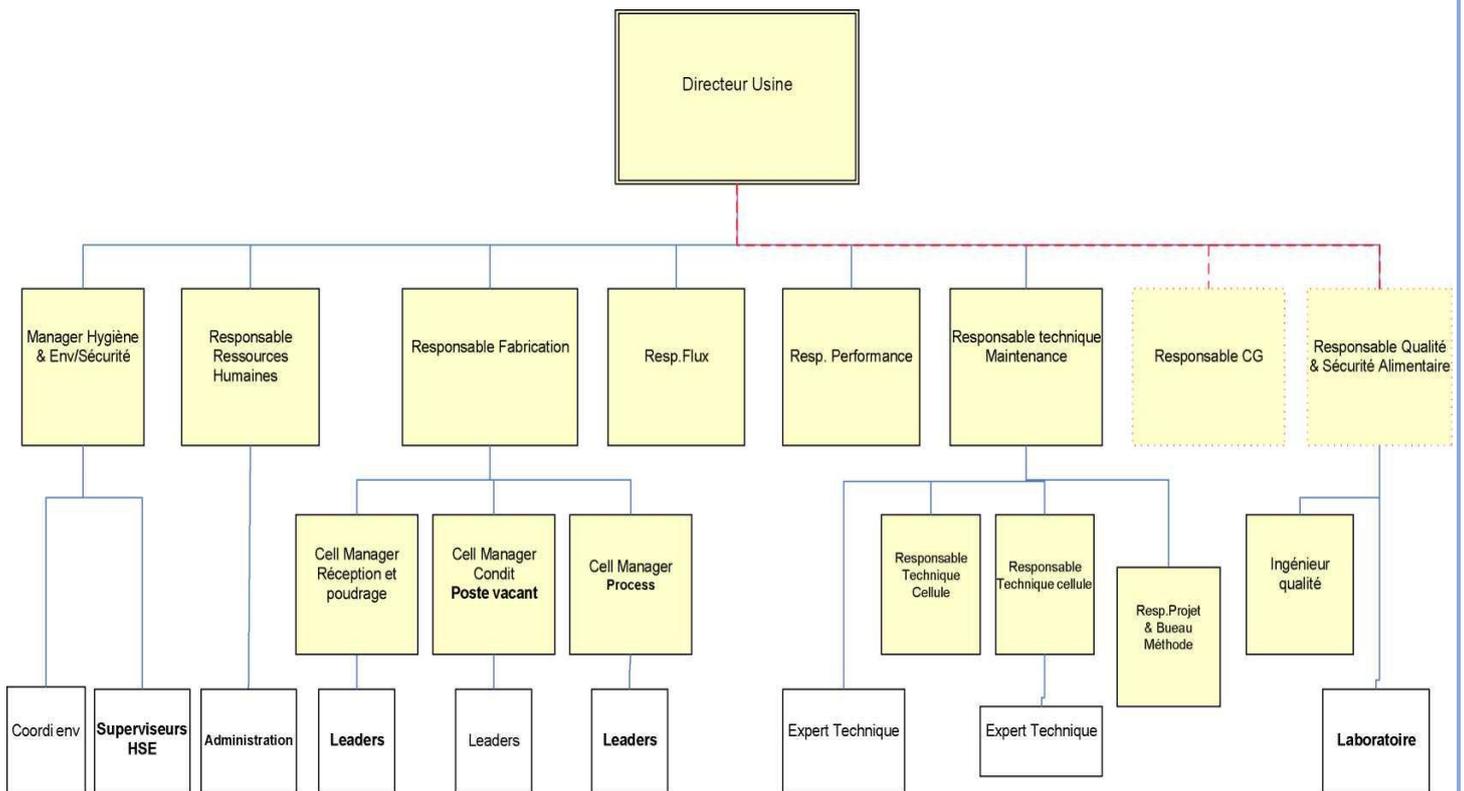


Figure 1: organigramme de l'entreprise

F. Unité Centrale Danone de Meknès

Etant une région 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, et est notamment reconnue pour son fort potentiel en production de lait.

C'est donc très logiquement que le CDM s'est implanté en 1985 dans l'agglomération rurale de Sidi Slimane, à une dizaine de Kilomètres de Meknès.

Lors de son démarrage, l'activité de l'entreprise était limitée à la production du lait pasteurisé (50T/j), et c'est qu'en 1992 que l'usine commence à diversifier ces produits par la fabrication des fromages frais (150T/j) et par celle des desserts lactés (100T/j). La production s'élève en 2010 à 160 000 T/j.

Pour assurer un haut niveau de qualité de ses produits, le département qualité et par le biais du laboratoire de l'usine, veille au respect des normes nationales de qualité et d'hygiène, au niveau de chaque stade de fabrication depuis la réception des matières jusqu'à l'emballage. [5]

G. Laboratoire contrôle qualité et Service conditionnement

Service laboratoire :

L'objectif de laboratoire de la centrale Danone est d'appliquer les mesures de la démarche qualité à l'intérieur du système de management intégré, tout en respectant la sécurité du consommateur à travers le système HACCP; il est constitué de quatre services principaux:

1. Poste de contrôle de la matière première :

Le contrôle de toute matière première destinée à la fabrication est assurée dès sa réception : ingrédients, emballages, arômes et les lessives, ainsi que le contrôle des fluides secondaires (soude, acide..).

Ce contrôle se fait à travers une gestion documentaire, réalisé par le responsable matières premières.

Concernant le contrôle du Polystyrène « PS » à la réception, plusieurs contrôles, on note :

- Le contrôle d'épaisseur.
- Le contrôle de la Résistance à Compression Verticale RCV.

2. Service organoleptique :

Dans ce poste Les analyses effectuées, sur les fromages et les desserts lactés, sont les suivantes

Taux de matières grasses, acidité, taux d'extrait sec et viscosité, et les tests concernant le goût, l'aspect et la consistance.

Paramètre		Commentaire
Consistance	Texture en bouche	Légèrement sableuse Peu consistant ou pâteux Fuyante Granuleuse Lisse Onctueuse
	Texture à la cuillère	Peu épais Liquide Épais (oppose une résistance au passage de la cuillère)
Odeur		Reconnaissable Peu reconnaissable Non reconnaissable
Goût		Intense, naturel Absence ou présence d'arrière goût Gout acide, levure, moisi, amer, ...

Tableau 2 : quelques analyses effectuées au service organoleptique

L'appareil qui mesure le TP :

Méthode rapide sur le « Milko Scan » : le Milko Scan est un appareil, qui permet de mesurer les propriétés organique des produits en 30 secondes environ. Cette méthode a l'avantage d'être très rapide, mais n'est destinée que pour des substances proches du produit conforme. Sa précision diminue considérablement pour les autres substances.



Figure 2 : Milko scan

On a utilisé un pH mètre pour mesurer l'acidité :



Figure 3 : pH mètre

Un dessiccateur pour mesurer le taux d'extrait sec :



Figure 4 : Dessiccateur

Et finalement un viscosimètre pour la mesure de la viscosité :



Figure 5 : viscosimètre Anton Paar

3. Poste des analyses physico-chimiques :

Nombreuses tests et analyses sont effectués à toutes les étapes de la fabrication depuis la réception du lait étant matière première jusqu'au produit fini :

a) Test d'ébullition :

Le lait est porté à ébullition 100°C au bain marie pendant 5 à 10 minutes, s'il y a apparition d'une certaine stabilité, le lait est dit stable c'est-à-dire la qualité protéique est meilleure, et il reste homogène, sinon il présente une coagulation.

b) Test de l'antibiotique

Réalisé sur le lait qui a destination à fabriquer les fromages. Il consiste à détecter la présence des inhibiteurs de la fermentation lactique. C'est un test spécifique pour la recherche des lactamines.

c) Stabilité aux alcools :

Il consiste à préparer un mélange de lait et d'alcool éthylique à 80% dans un tube et à détecter la présence ou l'absence d'une floculation. S'il y a aucune floculation, le test est dit négatif. [6]

d) Détermination du taux de matières grasses

C'est grâce à la méthode rapide présentée au laboratoire appelée MILKOSCAN on peut déterminer le taux de matière grasse rapidement.

La méthode Officielle est celle de GERBER, qui est une méthode officielle utilisant des tubes appelés des butyromètres, et qui consiste en l'extraction de la matière grasse sous forme d'une couche claire et transparente. Elle utilise de l'acide sulfurique pour dissoudre les éléments organiques à l'exception de la matière grasse et de l'alcool iso amylique pour séparer cette matière grasse.

e) Détermination du taux d'extrait sec

L'extrait sec du lait est l'un des paramètres primordial dans la fabrication car il nous informe sur la consistance et la viscosité du produit.

Le taux d'extrait sec est mesuré par deux méthodes : la méthode rapide : Le Milko scan, et la méthode usuelle: Méthode gravimétrique.

4. Poste des contrôles microbiologiques :

Vu que le lait est riche en glucides, lipides et protéines, en plus de son pH (6,4-6,8), légèrement acide proche à la neutralité, donc il va constituer un milieu favorable pour que les microorganismes puissent se développer, ce qui rend un suivi microbiologique nécessaire et indispensable.

Les tests microbiologiques sont effectués sur le produit fini et les produits intermédiaires à tous les niveaux de fabrication ainsi, les germes totaux sont recherchés sur les produits non fermentés (lait pasteurisés, crèmes, sirops et fruits), les levures et les moisissures sont recherchées sur tous les produits à l'exception (les lait pasteurisés) et finalement les coliformes sur tous les produits sans exception.

5. Service de conditionnement

Avant de décrire ce service, on va parler d'abord sur la machine qui effectue ce conditionnement .il s'agit de la machine ARCIL qui a débuté ses activités en 1978 près de Paris en qualité de prestataire de services après-vente de machines de thermoformage. La première FFS ARCIL pour l'industrie des produits laitiers frais a été produite en 1988.

La mission d'ARCIL consiste à créer des solutions rentables pour les produits de portions individuelles servies à la cuillère destinés aux industries de l'agroalimentaire et des produits laitiers frais, à l'aide de machines de conditionnement form-fill-seal. [7]

Dès que la bobine de plastique (Polystyrène) s'installe sur la conditionneuse, il y a eu une aspiration ionisante à cause de la charge électrostatique portée par les bandes plastiques, et cela pour éliminer les poussières et la majorité des corps étrangers. Ceux qui en ont échappé sont décoché de la raclette neutralisés par l'ionisateur, captés par les buses d'aspiration et piégés dans le sac d'aspirateur. Ensuite, les bandes de plastiques vont passer à travers une boîte à chauffe constituée par quatre plaques chauffantes arrivant à l'étape de formage ou il y a transformation des bandes plastiques en pots par une opération qui s'appelle le moulage.

L'étape qui suit est le remplissage des pots par le produit fini en utilisant des buses doseurs puis, les pots vont être couverts par un plastique complexe, stérilisé par rayonnement et comportant la date de péremption du produit.

Ensuite, il vient l'étape de découpage des pots sous forme des barquettes comportant quatre ou six pots.

Finalement, les barquettes seront transportées par un convoyeur pour qu'elles s'installent dans des caisses et transportées vers les chambres froides.

H. Processus de fabrication des produits laitiers

La CDM comporte quatre chaînes de production différentes, chacune d'elle vise la fabrication d'un produit donné :

- Lait pasteurisé.
- Fromages frais (JOCKEY et DANINO fraise et nature).
- Desserts : DANNETTE (flan, caramel et chocolat).
- Raïbi Jamila (grenadine/panache).

a) Réception de la matière première

* Gestion de la matière première.

Toutes les entrées de matière première (poudre de lait écrémé, sucre, amidon, arômes...) convergent vers le magasin de MP où les ingrédients ainsi que les emballages (opercules, décors, PEHT, polystyrène...) sont stockés en attendant leur utilisation.

La gestion de la MP se fait de la manière suivante :

✓ Selon les besoins proches, les demandes d'achats sont envoyées à la direction des achats au siège à Casablanca qui s'occupe des commandes et les traite directement avec les fournisseurs. Une fois la commande est effectuée, une copie des bons d'achats est envoyée au magasin de MP. A la réception, certaines MP (comme les emballages) subissent un contrôle préliminaire (poids et état de livraison) avant d'être stockées en attendant l'intervention du laboratoire. Ce dernier envoie une fiche de conformité ou de non-conformité suite à l'état de la MP. Si cette dernière n'est pas conforme, le lot doit être marqué et une fiche de renvoi Fournisseur sera renvoyée à celui-ci.

✓ Le flux interne de la matière première entre les différents secteurs de production est régi par la loi du FIFO (First In First Out). A chaque sortie de la MP, un bon de mouvement de stock est rempli. Le flux de la MP, aussi bien interne qu'externe, est enregistré journalièrement dans un logiciel de gestion spécialement conçu pour la firme Centrale Danone Maroc Lait. Ce logiciel est relié via un réseau à toutes les autres filiales de la CD et permet donc d'avoir les données relatives à l'état de stock de n'importe quel produit dans n'importe quelle filiale

b) Pour ce qui concerne la fabrication industrielle de lait pasteurisé on note :



Figure 6 : lait pasteurisé

(a) La pasteurisation

Conservé dans d'énormes tanks de stockage pouvant contenir 100 000 litres de lait cru, le lait doit passer par une première étape importante, la pasteurisation permettant d'éliminer les micro-organismes indésirables pour l'homme.

Elle s'effectue grâce au contact de plaques chaudes. Le lait est ainsi chauffé à 72°C pendant 15 secondes.

(b) L'écémage

Une fois pasteurisé, le lait est écémé à l'aide d'une écèmeuse. Cette dernière sépare la crème et le lait en faisant tourner le lait à toute allure. Cela peut paraître paradoxal, mais après l'écémage du lait, celui-ci passe par le tank mélangeur afin de lui rajouter de la crème. Le but de la manœuvre est de pouvoir ensuite rajouter la quantité de crème souhaitée selon le type de lait désiré.

Aussi, on obtient alors trois types de lait :

Le lait entier qui contient 3,5% de matière grasse par litre. Identifiable en magasin grâce à la couleur rouge de la brique.

Le lait demi-écémé qui contient 1,5 à 1,8% de matière grasse par litre. Identifiable en magasin grâce à la couleur bleue de la brique.

Le lait écémé, sans matière grasse. Identifiable en magasin par la couleur verte de la brique.

(c) La stérilisation

Il est chauffé grâce à de la vapeur d'eau et atteint une température de 140°C durant 2 secondes. Tous les micro-organismes sont ainsi détruits. On parle de stérilisation UHT, c'est-à-dire Ultra Haute température.

(d) L'emballage

Le lait est prêt à être emballé dans des briques ou des bouteilles en le laissant à l'abri de l'air et de la lumière, afin de le conserver au mieux. Stocké, il peut ensuite être acheminé vers les épiceries et supermarchés. [8]

c) Pour la fabrication de fromage on note différentes étapes qui sont [9]



Figure 7 : fromage frais (Jockey et Danino)

Le lait destiné à l'industrie fromagère doit être de qualité supérieure. Il doit répondre à certaines caractéristiques, dont la richesse en protéines, la faible teneur en bactéries, le goût...

La section suivante, ne décrira que les étapes non décrites dans ce qui a précédé.

(a) Poudrage

L'étape de poudrage consiste à ajouter les différents suppléments, en poudre, (arôme, sucre...) à la crème, de façon à avoir un mélange homogène. L'opération s'effectue dans un circuit fermé, où la poudre est aspirée d'une trémie, par l'effet de venturi et mélangée au flux du produit traversant la « poudreuse ».

(b) Stérilisation de la crème sucrée

La stérilisation 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 produit stérilisé doit être conservé dans un emballage étanche.

Pour réaliser ce traitement thermique, le produit est pompé du bac de lancement vers la section du préchauffage de l'échangeur de chaleur à plaque, il passe ensuite dans une homogénéisation. A la sortie de ce dernier, la crème 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 à environ 78°C dans

l'échangeur de chaleur à plaque, puis gagne directement une machine de remplissage aseptique ou une cuve aseptique avant son conditionnement.

La figure 8 décrit en image l'étape de la stérilisation de la crème sucrée.

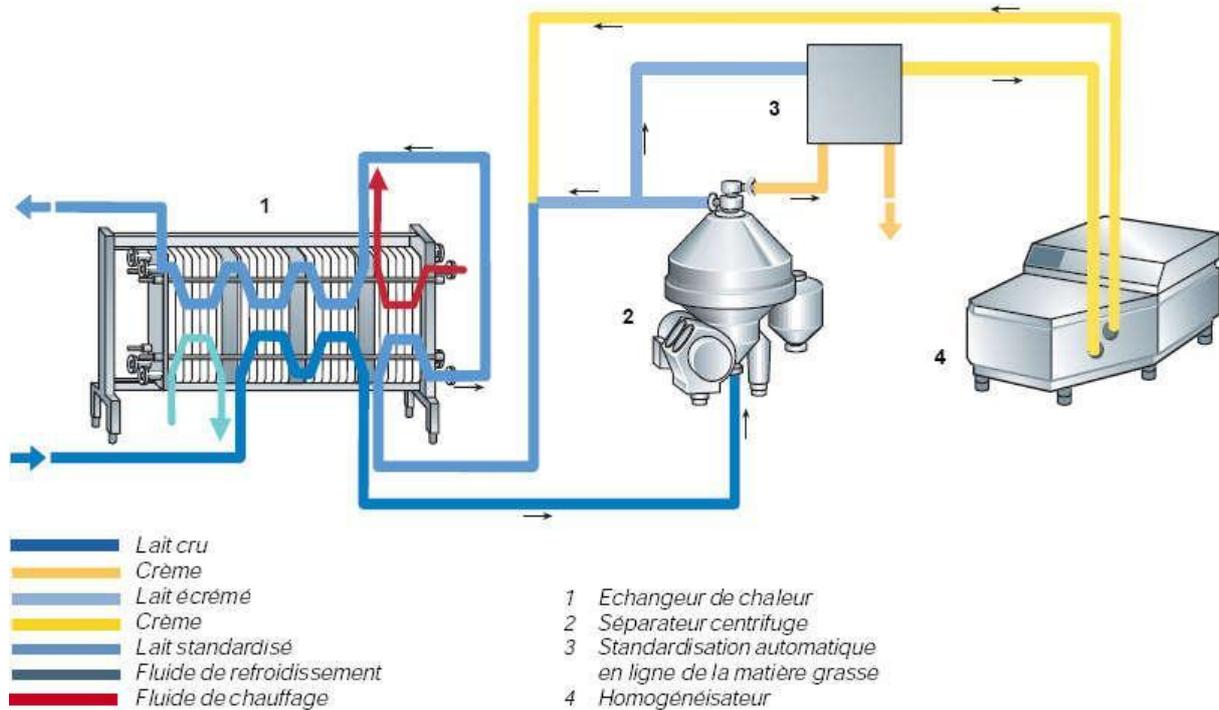


Figure 8 : Schéma décrivant l'étape de la stérilisation de la crème sucrée

(c) . Injection de ferments

A partir d'une fermentation exclusivement lactique, il consiste à faire coaguler la caséine du lait sous l'effet de l'acide lactique avec ajout d'un peu de présure dont l'effet coagulant est limité.

Après la pasteurisation du lait écrémé à une température de 95 °C, le lait est stocké dans les tanks de maturation pour la fermentation.

On y ajoute les ferments et l'ensemble est soumis à une agitation. Les ferments abaissent le pH du milieu par la production d'acide lactique, condition qui favorisera l'action présure. On y additionne ensuite le chlorure de calcium, qui, de par ses charges positives va jouer un rôle important dans le caillage en interagissant avec les para-caséines (protéine).

Juste avant la fin de la pasteurisation, la présure est ajoutée. Cette dernière sépare les caséines en para-caséines chargées négativement. Son action nécessite un milieu stable et acide, une température entre 26° et 30°C et la présence de calcium. Après quoi, vient l'étape de la maturation.

La maturation dure environ 18h et doit produire une acidité de 56 à 57°D et un pH<4,5 ; l'évolution de la fermentation est suivie par mesure du pH sur quelques échantillons.

(d) La séparation

A la sortie du thermisteur, et après filtration des corps étrangers, le coagulum passe dans une centrifugeuse (KDB) afin d'être séparée en pâte maigre et lactosérum. Ce dernier est drainé vers la station d'épuration (STEP), le débit du séparateur est réglé de façon à contrôler la teneur en extrait sec.

(e) Mélange de pâte maigre et crème sucré

Une fois la pâte maigre est obtenue, elle est mélangée avec la crème sucré de façon à obtenir un taux déterminé de matière grasse. La crème ainsi standardisée est homogénéisée sous pression.

(f) Conditionnement

Le conditionnement se fait en deux machines l'une appelée CMA destinée aux pots de 80g et l'autre appelée ARCIL réservé aux pots de 45g. Cette phase s'exécute selon les étapes suivantes

- ❖ Le thermoformage des pots à partir des films plastiques.
- ❖ Le dosage du produit fini dans des pots sous protection bactériologique que confère la hotte
- ❖ La fermeture hermétique des pots par thermocollage.
- ❖ L'impression et le marquage de la date limite de consommation ainsi que le cisailage pour l'obtention des barquettes. [8]

d) Desserts lactés

La fabrication des desserts s'effectue en deux grandes étapes, à savoir le poudrage et la stérilisation.

La figure 9 présente ces deux étapes de fabrication

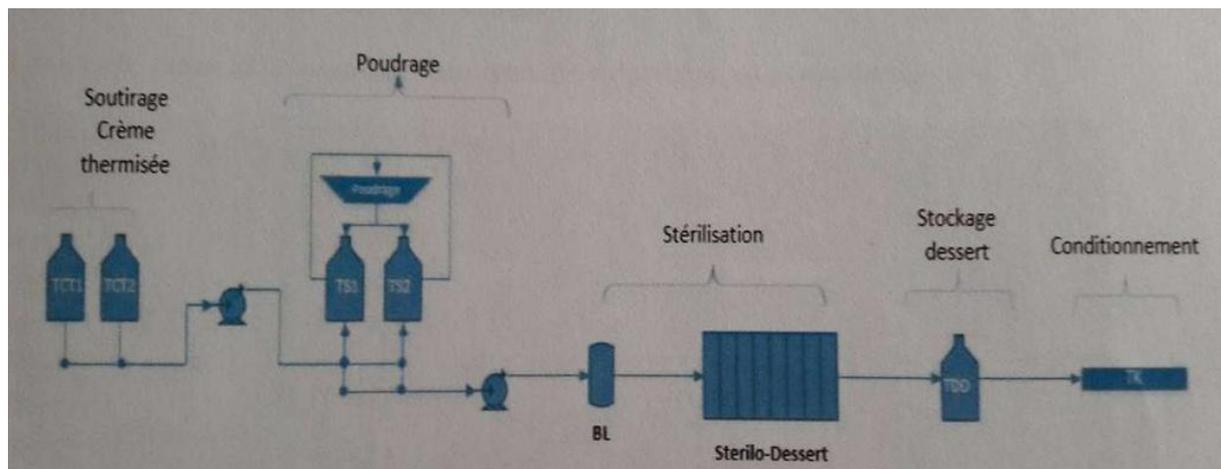


Figure 9: Schéma résumant les différentes étapes de fabrication de dessert lacté

(a) Poudrage

La première étape de la fabrication des desserts lactés, type Danette, est la préparation du MIX au niveau de la poudreuse. Cette phase consiste à introduire l'ensemble des ingrédients (eau, sucre, poudre de lait, arôme, colorant, stabilisant, gélifiant, etc.) dans une trémie. Le mélange circule en circuit fermé entre la poudreuse et le tank de stockage (TS) pour assurer un bon malaxage de l'ensemble des ingrédients. La crème est ensuite injectée dans le TS. Le mélange obtenu (MIX gras) est soutiré vers le bac de lancement de la stérilisation.

(b) Conditionnement

Le conditionnement du dessert s'effectue sur la machine TK. Celle-ci dispose du même principe de fonctionnement que CMA et ARCIL.

Il est à noter que dans le cas d'une chute de température en cours de fabrication, ou bien une chute de pression, le produit est acheminé vers une cuve de récupération pour qu'il subisse à nouveau le traitement. Ainsi toute l'installation subit alors un rinçage à l'eau et une désinfection avant sa remise en marche.

La préparation lactière

Lait écrémé concentré
et/ou en poudre et/ou
perméat de petit lait en poudre



Et des saveurs pour tous les goûts

Arômes et/ou chocolat et cacao
maigres et/ou caramel et/ou
colorants et/ou stabilisant



On mélange
puis on chauffe, on refroidit
et on met dans les pots



→ Votre crème dessert
Danette !

Figure 10 : préparation de dessert DANNETTE

e) Pour la fabrication de Raïbi Jamila on note les étapes suivantes :



Figure 11 : produit fini Raïbi jamila

(a) Et voici toutes les étapes du «Process». [10]

- ✓ Arrivée du lait dans les camions de collecte.
- ✓ Dès réception, prélèvement d'échantillons pour de 1ères analyses en laboratoire.
- ✓ Si aucune anomalie n'est détectée, dépotage (extraction de la citerne) et filtration.
- ✓ Puis, refroidissement et stockage à une température de 4°.
- ✓ Second filtrage et homogénéisation du produit.
- ✓ Injection du ferment (le seul secret jamais révélé de la formule Raïbi Jamila). Pur jus de grenadine et pas de conservateur, une autoprotection étant assurée par le traitement thermique.
- ✓ Fermentation du lait (maintenu pendant 5 heures à 43°)
- ✓ Après la fermentation, refroidissement du produit à 5°.
- ✓ Stockage du produit, prêt pour le conditionnement (stockage renouvelé chaque 2 heures, en intermittence avec le nettoyage systématique des cuves).
- ✓ Phase de conditionnement: les petits pots roses qui contiennent Raïbi Jamila doivent prendre forme et être remplis

(b) Conditionnement

Le conditionnement se fait sur différentes machines :

- Pour le fromage frais : CMA (pots de 80g) et ARCIL D (pots de 45g).
- Pour le dessert lacté : ARCIL C.
- Pour Raïbi Jamila : ARCIL A et B.
- Pour Aassiri : Thimonnier et TetraPac.

f) Le procédé de fabrication du Flan idéal :

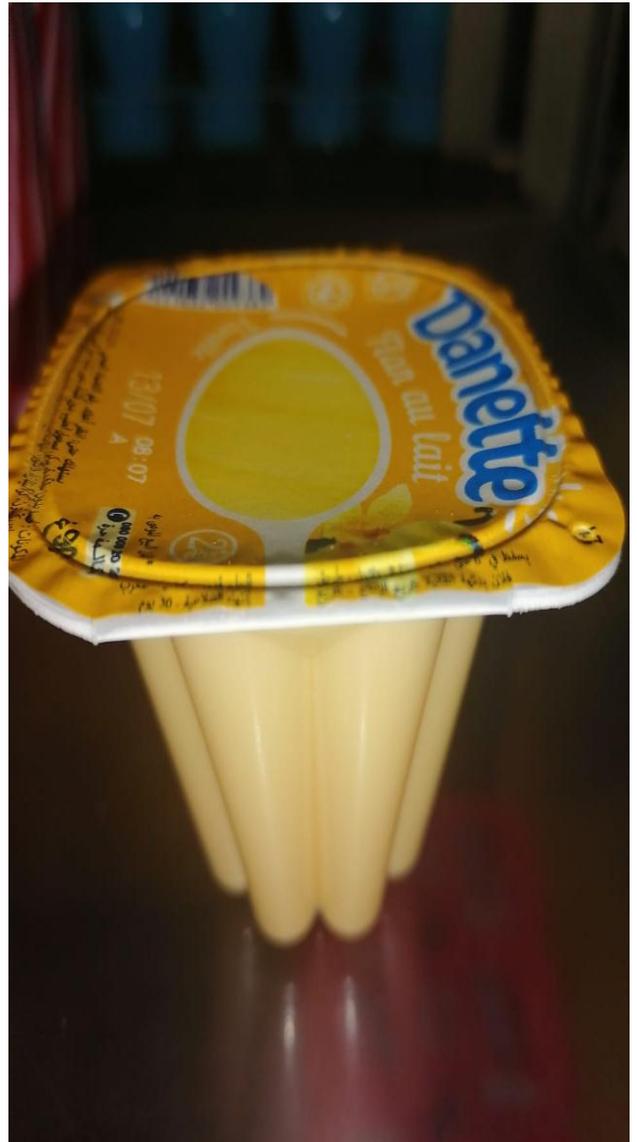


Figure 12 : produit fini flan idéal (vanille/fraise)

Poudrage

Dans la poudreuse on met de l'eau

+lait

+ Gélifiant (qui donne la consistance au produit fini)

+Stabilisant

Ensuite il faut attendre 30 min pour que les ingrédients soient bien homogénéiser

Ajout
d'amidon
+arôme et
le colorant

On effectue des analyses physicochimiques (extrait sec
Le pH) pour le mélange obtenu.

Ajout de la
crème
fraîche

On maintient l'agitation de produit tout en contrôlant la température.

Obtention d'un semi produit

Ensuite on refait les analyses physicochimiques mais cette fois ci on prend en considération le taux de la matière grasse

Stérilisation

Ajout de la matière végétale pour atteindre la norme demandée

Obtention de
produit fini

On refait les analyses

Conditionnement

Refroidissement

Commercialisation

III. Chapitre 2 généralités sur le thermoformage

A. Présentation de thermoformage

Le thermoformage est l'un des grands procédés de mise en forme des polymères permettant de réaliser, à partir de feuilles ou plaques généralement extrudées ou calandrées, des objets concaves d'épaisseurs et de dimensions diverses. Il consiste à chauffer une feuille de polymère jusqu'à une température permettant sa déformation, puis à la mettre en forme dans ou sur un moule. Après refroidissement, on obtient l'objet désiré.

Le principal secteur d'application du thermoformage est l'emballage, qui représente près des trois quart du marché. Ses autres grands débouchés sont l'électroménager, le sanitaire et l'automobile. Dans ce secteur, le thermoformage se trouve en concurrence avec deux autres procédés de mise en forme : l'injection et, dans une moindre mesure, l'extrusion-soufflage. Les applications où elles sont le plus en concurrence sont les barquettes et les gobelets pour l'injection, et les flacons pour l'extrusion soufflage.

La différence majeure entre le thermoformage et ces deux procédés tient à la gamme de température de mise en forme et donc à l'état physique de la matière. Injection et extrusion soufflage utilisent directement la matière première (résine), qui est transformée à l'état fondu, alors que le thermoformage nécessite un semi-produit (feuille généralement extrudée) à l'état caoutchoutique. L'injection permet un contrôle plus précis des épaisseurs de l'objet fini, mais demande en revanche des outillages beaucoup plus chers du fait des pressions auxquelles le moule doit résister. Le thermoformage permet quant à lui de travailler dans des conditions de température et de pression nettement inférieures aux procédés fondus (de l'ordre de 0,1 MPa contre 10 à 100 MPa en injection), et ainsi de diminuer les coûts d'outillages et de fonctionnement. Les cadences de production sont en outre élevées et les outillages bon marché, ce qui compense le coût de la matière première, nécessairement plus élevée du fait d'une première transformation (semi-produit). [11]

Polymère	Abréviation	Type	T _g (°C)	T _f (°C)	Plage de formage (°C)
Polystyrène	PS	A	90	-	130 - 182
Poly(chlorure de vinyle)	PVC	A	90	-	100 - 155
Poly(acryl butadiène styrène)	ABS	A	90 - 120	-	130 - 180
Poly (méthylméthacrylate)	PMMA	A	100	-	150 - 190
Polycarbonate	PC	A	150	-	170 - 200
Polypropylène	PP	SC	5	165	150 - 165
Polyéthylène téréphtalate	PET	SC	70	255	120 - 180
Polyéthylène haute densité	PEhd	SC	-110	134	130 - 185

Tableau 3: des principales classes de polymères utilisées en thermoformage, leur plage de mise en forme (plage de formage) et leurs températures caractéristiques (température de transition vitreuse, T_g, ou de fusion, T_f).

B. Description du procédé de thermoformage assisté par poinçon

Le procédé de thermoformage négatif assisté par poinçon est largement utilisé dans l'industrie de l'emballage alimentaire de produits laitiers frais. Au niveau industriel, les étapes de remplissage et de scellage des pots produits sont souvent intégrées dans une machine qui suit donc un séquençement en cinq étapes, décrites figure 10

- le déroulement et l'acheminement automatisé de la feuille depuis la bobine ou directement en sortie d'extrudeuse,
- son chauffage (poste de chauffe),
- sa mise en forme à proprement parler (poste de formage),
- le remplissage en ligne des produits laitiers dans les emballages formés, le mélange lait, arômes et ferments étant introduit dans chaque pot par un doseur aseptique,
- le scellage du pot avec un film d'opercule (complexe papier/aluminium recouvert d'un vernis acrylique) soudé sur le pot par contact avec un mors en acier à haute température (environ 160 °C).

Les pots de yaourts sont ensuite transportés et conditionnés en palettes avant de séjourner un temps contrôlé en salle d'incubation où se produit la fermentation. [12]

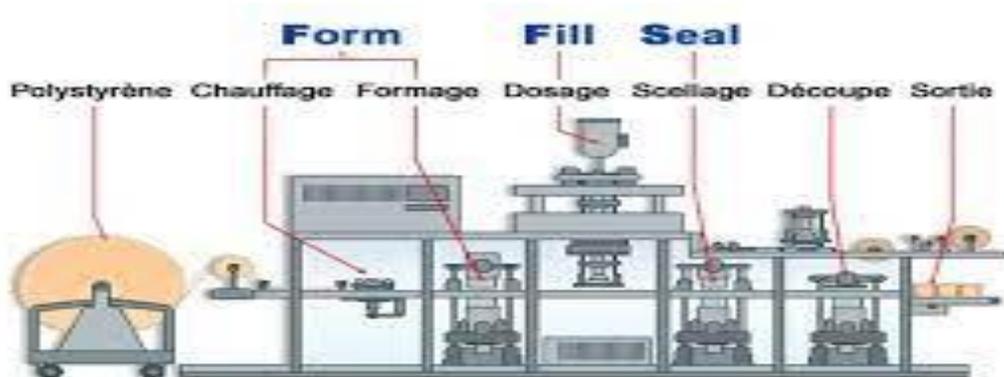


Figure13 : Schéma de principe du procédé de thermoformage assisté par poinçon dans l'industrie de l'emballage alimentaire de produits frais : chauffage, formage, remplissage et scellage en ligne dans des conditions stériles

C. Le semi-produit

Le thermoformage n'utilise pas directement les granulés de polymère mais un semi-produit (feuille, d'épaisseur de 0,2 à 2 mm, ou plaque pour des épaisseurs allant jusqu'à 25 mm) dont la qualité conditionne pour une bonne part la qualité finale de l'objet thermoformé. Les feuilles sont généralement obtenues par extrusion dans une filière plate avec refroidissement en calandre avant d'être enroulées en bobine. Elles peuvent donc présenter des orientations et/ou contraintes résiduelles figées au cours du refroidissement.

Les spécifications du cahier des charges demandé au fournisseur de feuille concernent généralement :

- l'épaisseur de la feuille et la tolérance d'épaisseur,
- sa largeur et sa tolérance,
- les taux de retrait longitudinaux et transversaux à la température de formage.

En effet, si la feuille initiale présente une irrégularité d'épaisseur, son chauffage va être hétérogène et pourra conduire à des localisations importantes de la déformation lors du formage. Pour le thermoformage de pots destinés à l'emballage de produits laitiers, les feuilles les plus couramment employées sont des mélanges de polystyrènes. En effet, le polystyrène atactique, couramment nommé **polystyrène cristal** car transparent, est trop fragile. De ce fait, il ne peut être travaillé à partir de bobines car la feuille ne résiste pas au transport à froid sur les machines de thermoformage. Utilisé seul, il doit donc être thermoformé directement en sortie d'extrudeuse (thermoformage en ligne).

Pour pallier ce problème technologique et pour améliorer les propriétés mécaniques des produits finis (résistance aux chocs en particulier), on le mélange fréquemment à du **polystyrène choc**, dont la matrice polystyrène est renforcée par des nodules d'élastomère (polybutadiène). Le **polystyrène choc** est un matériau opaque, moins fragile que le **polystyrène cristal**.

D. Chauffage de la feuille

La feuille est chauffée à une température permettant sa déformation, c'est à dire à une température telle qu'elle soit flexible et étirable mais encore suffisamment rigide pour résister à son propre poids.

L'étape de chauffage, fondamentale pour la qualité finale de l'objet thermoformé, est souvent l'étape limitante d'une installation. On cherche généralement à avoir, le plus rapidement possible, une température bien définie et homogène sur la surface mais aussi dans l'épaisseur de la feuille. Toute hétérogénéité de température peut en effet conduire à des déchirements et/ou à des hétérogénéités importantes de la déformation.

Les systèmes de chauffage sont principalement de deux types : à infrarouge ou par contact.

Les systèmes de chauffage à infrarouge, utilisant la faculté des polymères à absorber le rayonnement infrarouge, sont les plus fréquents en thermoformage.

Deux types de lampes infrarouges sont principalement utilisés : les **céramiques** et les lampes à **quartz**. Elles diffèrent par la gamme spectrale émise (la céramique émet des longueurs d'onde plus hautes que le quartz) mais aussi par leur durée de vie, leur coût et leur temps de réponse. Les céramiques sont moins onéreuses et de plus grande durée de vie que le quartz qui est cependant préféré lorsque des temps de réponses courts sont nécessaires. L'homogénéité de la température dans l'épaisseur est améliorée en utilisant un chauffage simultané des deux faces. Ce type de chauffage permet une mise en chauffe plus rapide de la feuille, mais peut poser des problèmes de surchauffe en surface. **Le chauffage par boîte à contact** est fréquemment employé pour les films et feuilles peu épais thermoformés à « basse » température. Il est donc classiquement utilisé en thermoformage de pots de yaourts en polystyrène. Par contre, il est peu utilisé pour les polymères semi-cristallins qui sont mis en forme au voisinage de leur zone de fusion, ce qui peut poser des problèmes d'adhérence avec les boîtes de chauffes. Il permet un bon contrôle de la température et limite les problèmes de surchauffe. Le gradient thermique dans l'épaisseur de la feuille est minimisé si les temps de chauffage sont suffisamment longs. On utilise fréquemment des boîtes de chauffe à empreintes permettant de chauffer uniquement les zones de la feuille qui seront déformées.

E. Formage

On distingue généralement deux modes principaux de formage : **le formage positif**, pour lequel la feuille est drapée sur un moule en relief, et **le formage négatif** pour lequel le moule est creux. La feuille est alors plaquée contre lui et en épouse la forme sous l'action d'une différence de pression entre ses deux faces. Nous nous intéressons ici au thermoformage négatif de pot profond.

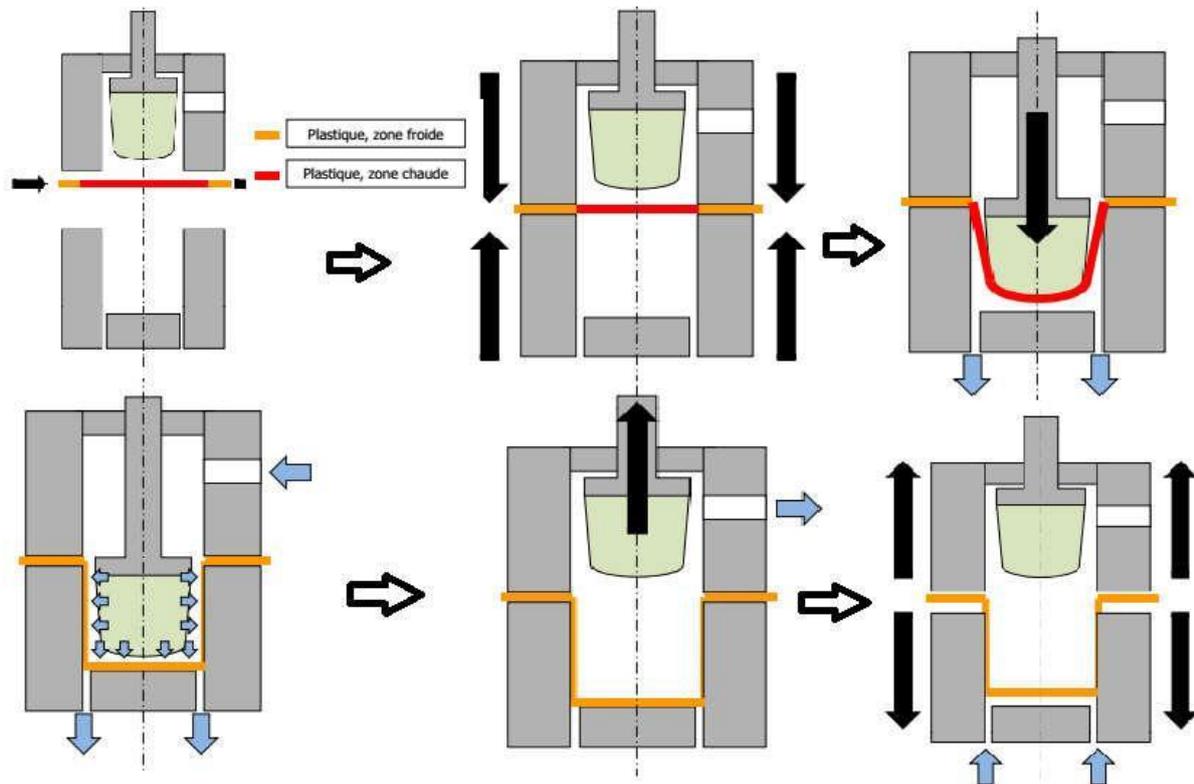


Figure14 :thermoformage négatif

La déformation de la feuille est ensuite complétée par l'action d'une pression d'air qui va plaquer la feuille contre un moule froid. L'action de la pression se fait généralement lorsque le poinçon arrive en fin de course, pour que ce dernier agisse pleinement. Pour éviter l'augmentation de pression dans le moule au cours du formage, celui-ci est muni d'évents qui permettent l'évacuation de l'air emprisonné entre la feuille et le moule. On cherche à obtenir une trempe rapide du pot lorsque celui-ci entre en contact avec les parois du moule afin de figer sa forme. Les moules sont donc choisis pour leurs propriétés de bons conducteurs thermiques (aluminium ou en acier) et ils sont généralement régulés par un circuit de refroidissement pour être beaucoup plus froids que la feuille. L'ordre de grandeur de la température du moule est de 10 à 40 °C.

Dans certains cas, on dispose une étiquette en plastique ou en papier dans le moule afin d'obtenir des pots banderoles. L'étiquette est munie d'une couche d'adhésif qui agit par contact avec la feuille thermoformée chaude. Elle est généralement perforée afin d'éliminer toute trace d'air entre feuille et étiquette et assurer une bonne adhésion. L'adjonction d'une banderole va fortement améliorer les propriétés mécaniques du pot et en particulier sa résistance à la compression verticale, ce qui permet de diminuer les épaisseurs de polymère. [12]

IV. Chapitre 3 Optimisation des paramètres de la machine de conditionnement ARCIL

Après le processus de thermoformage, les pots doivent avoir une certaine dureté qui est suffisante pour résister aux conditions de remplissage et de transport.

La CDM reçoit beaucoup de réclamations concernant le conditionnement de produit Flan Idéal, il présente des déformations qui s'appellent « squeeze » au niveau de la totalité de l'emballage et qui va donc pénaliser la qualité visuelle de produit fini.

Notre étude sera concerner surtout le produit idéal et afin de vérifier sa conformité il faut vérifier d'abord son aspect visuel puis on va passer à la mesure de la résistance à la compression verticale (RCV) qui est par définition la force nécessaire pour écraser un pot. Plus la valeur est élevée, plus le pot supportera le transport.



Figure 15 : appareil de la résistance à la compression verticale

Une meilleure RCV signifie qu'on a une meilleure répartition de la matière plastique dans le pot entier et donc traduit aussi qu'il y a une certaine homogénéité entre les épaisseurs dans tous les points de l'emballage.

Nombreux facteurs peuvent influencer sur notre réponse qui est la résistance à la compression verticale et qui ne sont autre que :

- La température
- La course des poinçons
- La pression de l'air de formage
- Le centrage de la boîte de chauffe
- Pression d'eau de refroidissement
- Epaisseur de polystyrène ...

Alors les paramètres qu'on peut jouer avec sont seulement la température et la course des poinçons.

Cette étude a pour but d'optimiser ces deux paramètres liés à la variabilité de la température et la course des poinçons pour l'obtention d'une meilleure résistance des pots après formage.

Afin d'optimiser notre résistance, on va fixer un paramètre et varier l'autre.

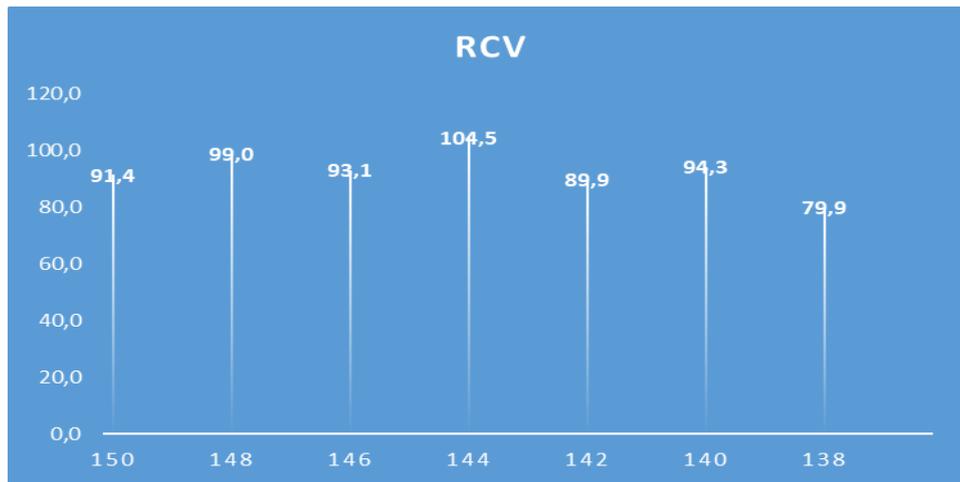
Commençant d'abord par la variation de la température dans un intervalle qui est compris entre 138 et 150°C.

On va fixer la course des poinçons à 98 mm.

Le tableau suivant comporte les différentes mesures de la RCV à différente température.

temperature	ECHT	RCV	moy
150	5-6-11-12	83,872	91,4
	17-18-23-24	99,08	
	3-4-9-10	92,059	
	15-16-21-22	101,196	
	1-2-7-8	94,595	
	13-14-19-20	77,531	
148	5-6-11-12	102,485	99,0
	17-18-23-24	94,427	
	3-4-9-10	96,452	
	15-16-21-22	89,884	
	1-2-7-8	106,229	
	13-14-19-20	104,54	
146	5-6-11-12	92,766	93,1
	17-18-23-24	91,549	
	3-4-9-10	90,058	
	15-16-21-22	86,264	
	1-2-7-8	99,162	
	13-14-19-20	98,936	
144	5-6-11-12	105,222	104,5
	17-18-23-24	106,525	
	3-4-9-10	98,008	
	15-16-21-22	108,987	
	1-2-7-8	99,076	
	13-14-19-20	109,058	
142	5-6-11-12	89,228	89,9
	17-18-23-24	101,942	
	3-4-9-10	74,2	
	15-16-21-22	100,078	
	1-2-7-8	88,355	
	13-14-19-20	85,585	
140	5-6-11-12	79,443	94,3
	17-18-23-24	98,663	
	3-4-9-10	97,867	
	15-16-21-22	103,473	
	1-2-7-8	86,527	
	13-14-19-20	99,577	
138	5-6-11-12	72,072	79,9
	17-18-23-24	98,233	
	3-4-9-10	72,106	
	15-16-21-22	74,889	
	1-2-7-8	84,844	
	13-14-19-20	77,424	

Tableau 4 : mesures de la RCV à différente température



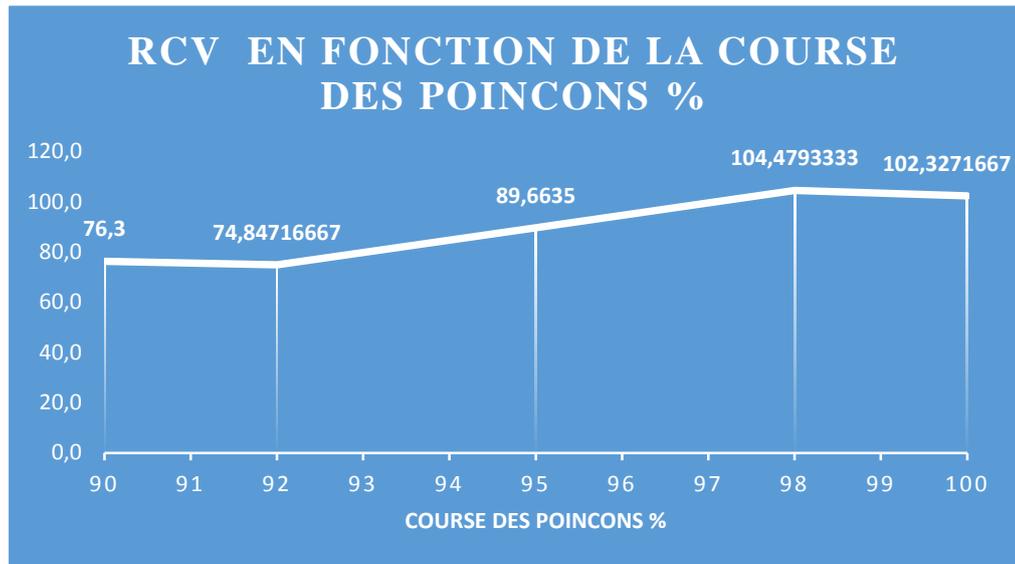
Courbe 1 : RCV en fonction de la température

Ce qu'on peut déduire à partir de cette courbe c'est que la résistance prend son maximum à 144°C.

Maintenant on va fixer la température à 144°C et on va varier la course des poinçons entre 90 et 100.

course des poinçons	ECHT	RCV	moy
90	5-6-11-12	78,19	76,3
	17-18-23-24	83,612	
	3-4-9-10	73,41	
	15-16-21-22	73,456	
	1-2-7-8	65,588	
	13-14-19-20	83,605	
92	5-6-11-12	73,382	74,8
	17-18-23-24	82,253	
	3-4-9-10	43,658	
	15-16-21-22	89,881	
	1-2-7-8	89,875	
	13-14-19-20	70,034	
95	5-6-11-12	78,239	89,7
	17-18-23-24	93,301	
	3-4-9-10	96,12	
	15-16-21-22	100,21	
	1-2-7-8	90,443	
	13-14-19-20	79,668	
98	5-6-11-12	105,222	104,5
	17-18-23-24	106,525	
	3-4-9-10	98,008	
	15-16-21-22	108,987	
	1-2-7-8	99,076	
	13-14-19-20	109,058	
100	5-6-11-12	102,964	102,3
	17-18-23-24	101,744	
	3-4-9-10	103,587	
	15-16-21-22	101,681	
	1-2-7-8	99,687	
	13-14-19-20	104,3	

Tableau 5 : mesures de la RCV à différente prise de la course des poinçons



Courbe 2 : RCV en fonction de la course des poinçons

D'après la courbe, on constate que la résistance à la compression verticale prend son maximum lorsqu'on fixe la course des poinçons à 98 mm.

Donc pour conclure cette étude on peut dire que lorsqu'on optimise les paramètres d'une manière séparée, on doit fixer la température à 144°C et la course des poinçons à 98 mm. et on.

- On va répéter la même étude mais cette fois-ci on va cerner les valeurs de la température dans un intervalle de 140 à 146°C et les valeurs de la course des poinçons entre 98 et 100. On va jouer aussi avec les deux facteurs en même temps.
- Pour établir cette étude, on va appliquer **la méthodologie des plans d'expériences**.

V. Chapitre 4 application de la méthode des plans d'expériences

A. Généralités sur les plans d'expériences

1. Définition

La méthodologie des plans d'expériences (MPE) est une stratégie de planification d'expériences scientifiques et industrielles dans le but de retirer l'information correspondant à l'objectif que l'on s'est préalablement fixé. L'analyse de l'information recueillie fait appel aux méthodes statistiques.

Le terme plan d'expériences vient de l'anglais « Design of Experiments » qui se traduit par planification des expériences. En fait la méthode englobe aussi bien la définition de la séquence d'essais à réaliser pour étudier un problème donné que l'analyse statistique multivariée des résultats de ces essais.

2. Les avantages de cette méthode sont notamment :

- Une diminution du nombre d'essais,
- Un nombre plus important de facteurs étudiés,
- Une détection des interactions entre facteurs,
- Une meilleure précision sur les résultats,
- Une détection des optimums ainsi qu'une optimisation et une modélisation des résultats.

Elle peut s'appliquer à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on cherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt (Y) et des variables (xi).

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$$

L'étude du phénomène se ramène à déterminer la fonction f qui lie la réponse Y aux différents facteurs (x₁, x₂, ..., x_k).

3. Etapes de réalisation des plans d'expériences

- ✓ Identification de l'objectif à atteindre : c'est une étape clé qui consiste à formuler les questions auxquelles on veut répondre.
- ✓ Choix de la ou des réponses à mesurer : Il est important d'apporter le plus grand soin au choix de la ou les réponses, un choix inapproprié peut conduire à une analyse inutilement compliquée des résultats de l'expérimentation ou à une expérimentation inutilement longue.
- ✓ Choix des facteurs d'intérêt et leurs niveaux de variations : Les facteurs peuvent être qualitatifs ou quantitatifs. Le nombre de facteurs, le nombre de niveaux de chaque facteur et les interactions éventuelles sont des critères déterminants pour la sélection du plan.
- ✓ Choix du plan d'expériences : il doit être adéquat à l'objectif fixé.
- ✓ Génération du plan d'expériences en utilisant des matrices d'expériences issues de la théorie des plans d'expériences. (Plans factoriels complets ou fractionnaires, etc.)
- ✓ Réalisation des essais en faisant varier les facteurs selon les indications fournies par la matrice d'expériences choisie.

- ✓ Analyse des résultats des essais : Les résultats obtenus à l'issue des essais permettent de calculer les coefficients d'un modèle empirique quantifiant l'effet de chacun des facteurs et des interactions retenues, sur chacune des réponses étudiées. L'analyse de la variance et la régression sont des méthodes d'analyse couramment utilisées.
- ✓ Confirmation des conclusions trouvées par des essais supplémentaires.
- ✓ Interprétation des résultats et prise de décision, si l'objectif est atteint, sinon réitération à partir des étapes 1, 2, 3 ou 4 selon le niveau d'insatisfaction.

4. On peut donc résumer les objectifs des plans d'expériences en cinq grands thèmes :

Identification de facteurs influents : Criblage ou screening

L'objectif est de déterminer, parmi un grand nombre de facteurs, les plus influents sur le système étudié et l'ordre de grandeur de l'effet de chacun. Cette technique peut être une fin en soi ou une étape préliminaire à une modélisation ou une optimisation.

Quantification de l'influence des facteurs : Modélisation

Dans cette étude, les facteurs sont étudiés plus finement en prenant en compte les effets d'interaction possibles entre les différents facteurs.

Détermination des configurations optimales : Optimisation

Les études d'optimisation consistent à rechercher les meilleures conditions de fonctionnement d'un système. Il s'agit donc de trouver les valeurs à donner aux facteurs pour que les réponses satisfassent à des conditions prédéfinies.

Minimisation de l'influence des facteurs bruits : Robustesse

L'expérimentation de robustesse a en général pour objectif de trouver les réglages qui donnent une performance satisfaisante du système tout en demeurant insensible aux facteurs bruit qui sont non ou mal maîtrisés. Lorsque le système est déjà défini, le plan d'expériences n'a pour but que de valider les réglages pour garantir que les bruits n'induisent pas une variabilité trop importante des réponses au point de rendre le système inacceptable pour l'utilisateur.

Optimisation des propriétés d'un mélange : Etude de Formulation

Ces études cherchent à établir des lois de mélange en étudiant l'influence de la composition d'un mélange sur la (ou les) propriété(s) de ce mélange.

Les facteurs d'étude des plans de mélange sont les proportions des constituants du mélange. Or, ces constituants ne sont pas indépendants les uns des autres. La somme des proportions d'un mélange est toujours égale à 100%. Le pourcentage du dernier constituant est imposé par la somme des pourcentages des premiers composés. C'est la raison pour laquelle les plans de mélange sont traités à part.

5. Plans factoriels complets a deux niveaux

Ces plans sont les plus utilisés car les plus simples, les plus rapides à mettre en œuvre et forment la base de tous les débuts d'étude. Ces plans possèdent un nombre de niveaux limité à deux pour chaque facteur. Toutes les combinaisons de niveaux sont effectuées au cours de l'expérimentation. Le nombre d'expériences à réaliser se calcule par nombre d'expériences = 2^p Le nombre 2 indique le nombre de niveaux et le p en exposant indique le nombre de facteurs à étudier.

L'avantage des plans factoriels en comparaison avec des plans classiques (un paramètre à la fois) réside en ce que justement tous les paramètres sont variés simultanément, mais de manière structurée. Le seul reproche à leur faire est le nombre élevé d'expériences lorsque le nombre facteur augmente. Pour par exemple 7 facteurs, il faudrait exécuter 128 essais. Pour diminuer le nombre des essais, d'autres plans peuvent être utilisés (plans fractionnaires à deux niveaux).

6. Plan factoriel à deux facteurs :

Le plan complet à deux facteurs est noté 2^2 . Le domaine d'étude est un carré où chaque point de ce domaine représente des conditions opératoires possibles donc une expérience que l'opérateur pourrait réaliser.

Le meilleur emplacement des points expérimentaux se situe aux sommets du carré représentant le domaine d'étude : points A, B, C, D. la Figure 14 illustre les expériences à réaliser et le domaine d'étude. [13]

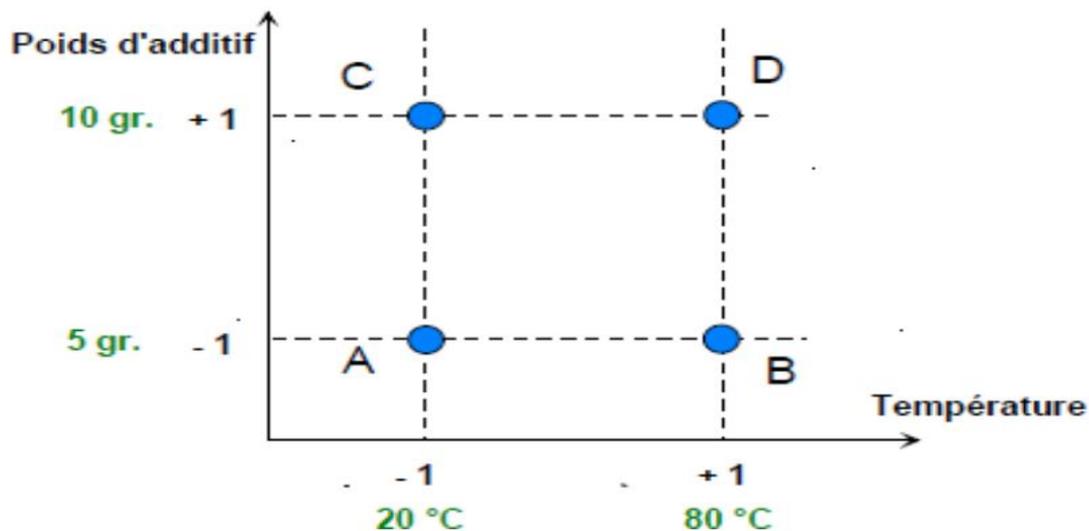


Figure 16 : Les meilleurs emplacements des points expérimentaux sont les sommets du domaine (A, B, C, D) d'étude lorsque le modèle postulé est du premier degré.

7. Méthode des surfaces de réponse

La méthode des surfaces de réponse nécessite d'abord l'obtention d'un modèle mathématique. Ce modèle peut être une fonction polynomiale du premier degré (plans factoriels complets, plans factoriels incomplets ...) ou du second degré (plans composites centrés, par exemple). Lorsque le modèle postulé est validé, il permet de décrire en tout point du domaine expérimental couvert, la surface de réponse. Cette surface de réponse, dans le cas de l'étude de l'influence de deux facteurs sur la réponse, peut aisément être représentée par un « relief géographique ».

8. Plan composite à faces centrées

Dans ce type de plans, le domaine expérimental est un domaine cubique, chaque facteur nécessite 3 niveaux qui sont -1, 0, et 1 (voir figure 15). Ces plans sont utilisés dans le cas où l'on ne connaît aucun point de fonctionnement du dispositif, le domaine expérimental est limité par un carré, ce qui donne la possibilité de trouver les optima qui se situent à côté des valeurs extrêmes des facteurs (ce qui n'est pas possible dans un domaine sphérique). la valeur de α est égale à 1, les sommets du domaine sont des combinaisons avec les valeurs -1 et 1 des facteurs d'entrée, ce qui explique le nombre de niveaux de chaque facteur qui est limité à 3.

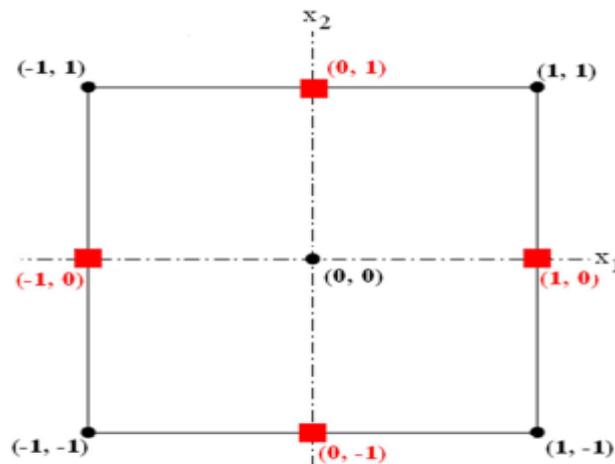


Figure 17 : points expérimentaux d'un plan CCF pour K=2 facteurs

La matrice d'expériences pour un plan CCF est constituée aussi de 3 parties comme le montre le tableau 5.

PCC	Numéro d'expériences	X1	X2
Plan factoriel complet	1	-1	-1
	2	1	-1
	3	-1	1
	4	1	1
points en étoile	5	1	0
	6	-1	0
	7	0	1
	8	0	-1
Point au centre du domaine	9	0	0

Tableau 6 : matrice d'expériences pour un plan CCF pour $k = 2$ facteurs

Un plan composite centré à k facteurs est composé de :

- Nf essais d'un plan factoriel complet
- 2 essais en étoile sur les axes à une distance α du centre du domaine
- N0 essais au centre du domaine

Modèle associé :

Modèle quadratique

Formule : $N=2^k+2K+N0$

B. Partie pratique :

Nous allons procéder à une étude séquentielle. Nous démarrerons par un modèle de premier degré avec interaction pour une étude descriptive suivie d'un modèle de second degré pour une autre prédictive. Dans le premier cas nous avons choisi le plan factoriel complet, tant que dans le second notre choix s'est porté sur un plan composite centré.

1. Etude descriptive en utilisant le plan factoriel complet

La matrice d'expérience d'un plan factoriel complet qui nous a permis de générer le plan d'expérience est la suivante :

N°exp	température	course des poiçons	RCV
1	140	98	88,56
2	146	98	83,14
3	140	100	99,79
4	146	100	98,73

Tableau 7 : matrice d'expérience du plan factoriel

Le modèle obtenu est le suivant :

$$\text{RCV} = 92,554 - 1,621 \text{ température} + 6,704 \text{ course des poinçons} + 1,088 \text{ température} * \text{course des poinçons}$$

Etude graphique des effets fournis par le logiciel :

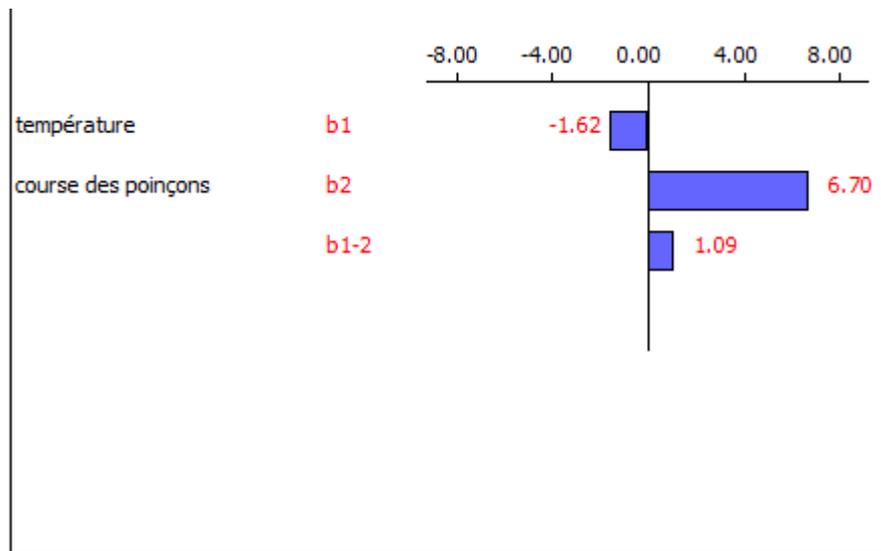
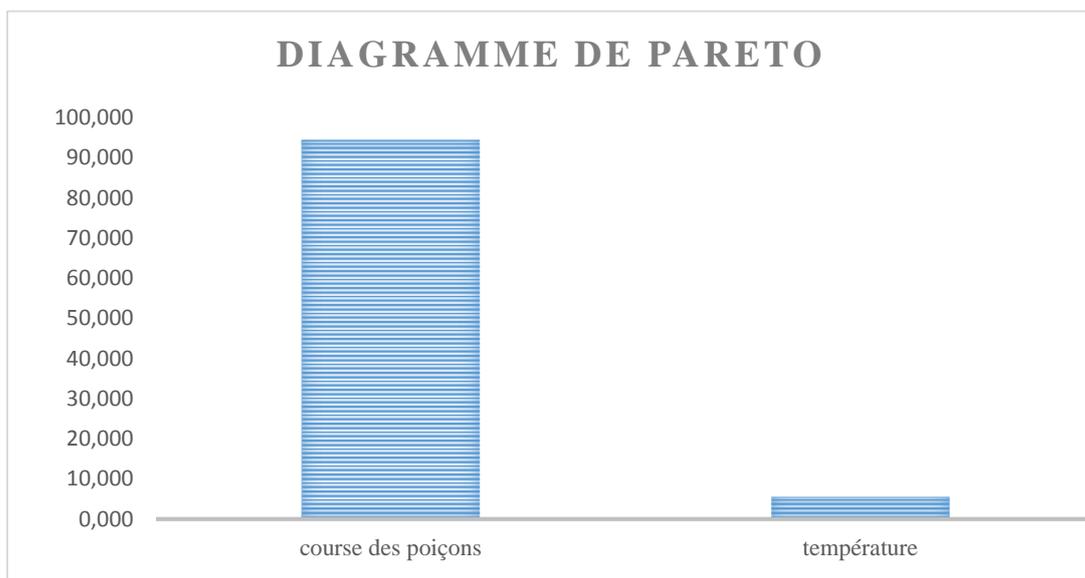


Figure 18 : histogramme des effets



D'après l'étude graphique on constate que seule la course des poinçons a un grand effet sur la réponse. On note également que cet effet est positif. Plus la course des poinçons est grande plus la réponse augmente.

On note également que la température a un effet très négligeable sur la réponse. L'interaction entre la température et la course des poinçons est aussi négligeable.

2. Etude prédictive

En appliquant la formule suivante : $2^K + 2K + N_0$, avec K c'est le nombre des facteurs et N_0 c'est le nombre des points au centre pour valider notre prochain modèle et je vais mettre 2 points, donc On va effectuer 10 expériences.

facteur	unité	centre	pas
temperature	°C	143	3
course des poinçons	mm	99	1

Création de la matrice d'expérience d'un PCC par nemrodw :

N°exp	temperature	course des poinçons	RCV
1	140	98	88,559
2	146	98	83,141
3	140	100	99,791
4	146	100	98,726
5	140	99	96,215
6	143	98	84,857
7	143	100	93,258
8	143	99	92,546
9	143	99	90,079
10	143	99	88,422

Tableau 8 : matrice d'expérience d'un PCC fournie par nemrodw

La colonne de la RCV représente la moyenne de la RCV d'un nombre significatif des échantillons (6 échantillons et chaque échantillon comporte 4 pots de notre produit idéal) que j'ai pris pour chaque expérience. (Voir annexe 1)

- Avant d'appliquer cette méthodologie, je devrais savoir quelle est la meilleure résistance avec laquelle je pourrais juger la conformité des pots de notre produit idéal.
- Pour avoir ça, je vais faire une étude des épaisseurs que je vais les mesurer à l'aide d'un appareil qui s'appelle **Olympus (voir annexe 2)** des pots dans les mêmes conditions des expériences mentionnées dans la matrice en fonction de la température en utilisant **l'histogramme et la carte de contrôle**.

Elaboration de l'histogramme

Pour les trois niveaux de température on va prendre deux pots pour chaque température et on va mesurer leurs épaisseurs dans les cinq zones exigées par le technicien. (Voir annexe 3)

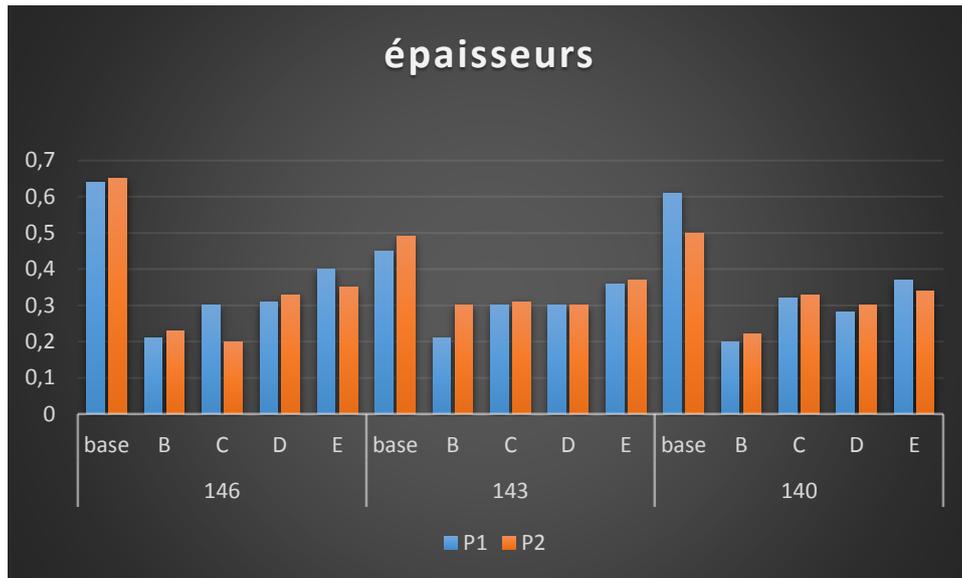
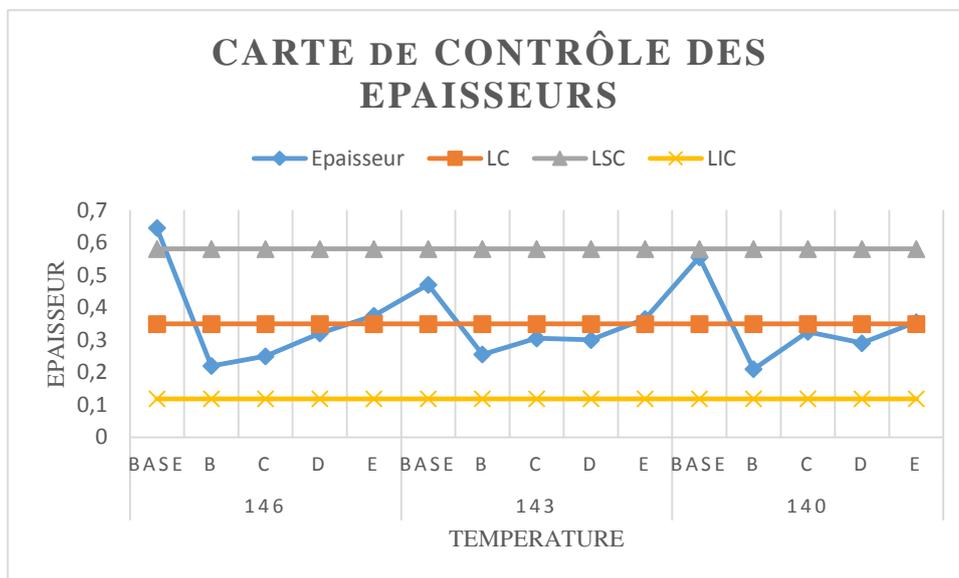


Figure 20 : histogramme des épaisseurs

La carte de contrôle

On va tracer maintenant une carte de contrôle mais cette fois ci j'ai pris un seul échantillon pour chaque température. (Voir annexe 4)



Courbe 3 : la carte de contrôle des épaisseurs

Il apparaît clairement dans cette carte qu'il y a une certaine homogénéité des épaisseurs pour une température qui est comprise entre 140 et 143°C.

D'après la matrice d'expériences qui précède on a pour une température qui varie entre ces deux valeurs, la RCV est entre 90 et 100.

Alors l'objectif de cette étude par un PCC est d'optimiser les deux paramètres que j'ai mentionnés au début pour avoir une résistance qui est comprise entre 90 et 100.

Après exécution du plan composite centrée nous avons obtenu le modèle suivant :

Création du modèle mathématique :

$$RCV = 89,832 - 1,961 \text{température} + 5,870 \text{course des poiçons} + 3,062 \text{température}^2$$

Nom	Coefficient	F.Inflation	Ecart-Type	t.exp.	Signif. %
b0	89.832		0.9395834	95.61	< 0.01 ***
b1	-1.961	1.02	0.95895829	-2.04	8.7
b2	5.870	1.00	0.85771837	6.84	0.0479 ***
b1-1	3.062	1.02	1.3425416	2.28	6.3

Tableau9 : les coefficients de modèle mathématique fournis par nemrodw

- ✓ Avant toute utilisation de ce modèle il faut impérativement le valider statistiquement.
- ✓ A ce sujet nous allons vérifier : l'ANOVA, R2, R2ajusté et la normalité des résidus.

✚ Commencent par ANOVA :

Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carré moyen	Rapport	Signif
Régression	254.9970	3	84.9990	19.2563	0.176 **
Résidus	26.4845	6	4.4141		
Validité	17.8715	4	4.4679	1.0375	54.5
Erreur	8.6130	2	4.3065		
Total	281.4815	9			

Tableau 10 : tableau d'analyse de la variance

- ✓ D'après le tableau ANOVA on note qu'on a une pente significative (Pvalue=0,176% <<<5%).
- ✓ Et concernant le manque d'ajustement on a trouvé que (pvalue=54% >>>>>5%) donc on peut déduire que l'erreur de modèle est inférieure à l'erreur expérimentale.
- ✚ Vérification de la valeur de coefficient de détermination et d'ajustement :

R ²	0,906
R ² _{ajt}	0,859

✓ Comme on a $R^2 > 0,8$ et $R^2_{ajt} > 0,7$ alors le modèle explique 90% de notre réponse.

✚ analyse des résidus :

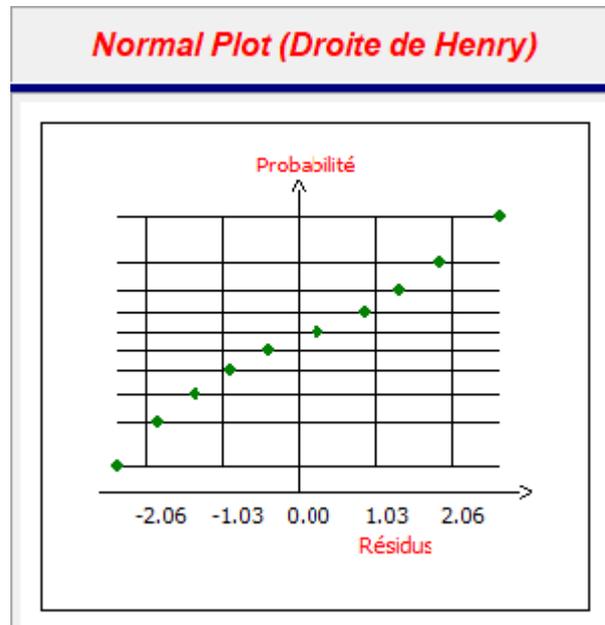
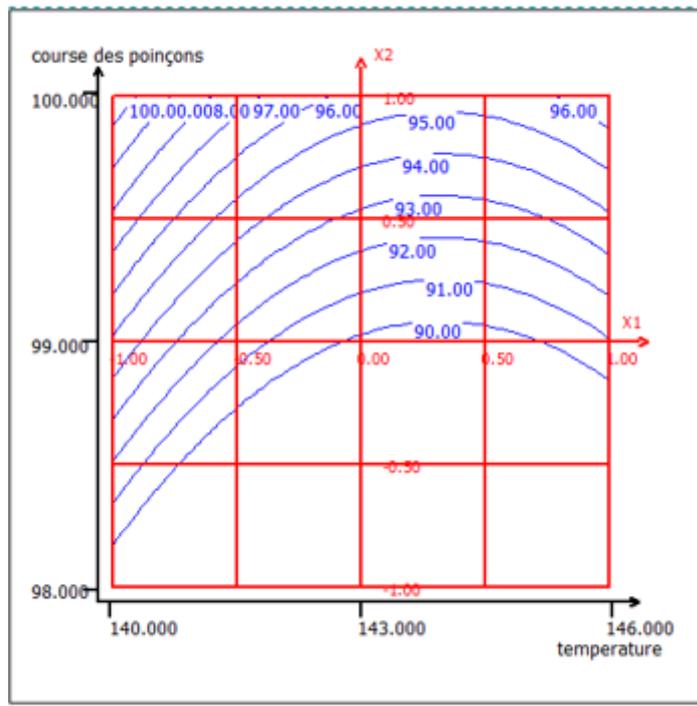


Figure 21 : droite de Henry fournie par nemrodw

Chaque point représente la valeur de résidu en un point du plan d'expériences. Puisque les points sont presque alignés alors on peut déduire que les résidus suivent une distribution normale.

- ✓ Le modèle étant validé statistiquement nous pouvons maintenant procéder à l'exploitation du modèle.

- La courbe ci-dessous représente la surface de réponse sur le plan température et course des poinçons.



Courbe 4 : les courbes isoréponses de la résistance en fonction des deux paramètres

- ✓ Nous remarquons clairement que l'objectif d'avoir une résistance plus de 90 peut être largement atteinte dans une large gamme de réglage.

Conclusion

L'intérêt porté à la production basée sur la qualité et la sécurité des produits alimentaires est en constante augmentation durant ces dernières années pour donner au consommateur des produits sains et de qualité irréprochable. C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail réalisé au sein de la société centrale DANONE. Celui-ci consiste à optimiser les paramètres de la RCV pour avoir un emballage conforme au flan Idéal.

Si on compare les deux études (classiques et les plans d'expériences), on trouve qu'elles donnent des résultats presque similaires mais la deuxième méthode reste la plus efficace par rapport à l'autre puisqu'elle nous a fourni un modèle mathématique que l'on a validé et qui va servir l'entreprise de faire la prédiction.

Malgré qu'on ait trouvé les paramètres optimaux correspondant à la meilleure RCV, le problème de « SQUEEZ » demeure encore. Ce qui nous a poussés à chercher, les autres facteurs de ce défaut qui influencent négativement sur l'aspect visuel de l'emballage.

Les probabilités possibles sont :

- Une hypothèse liée aux facteurs non étudiés et qui ne sont autre que la pression de l'air de formage, le centrage de la boîte à chauffe, la pression d'eau de refroidissement et l'épaisseur de polystyrène c'est-à-dire il se peut que leurs réglages ne sont pas bons ce qui peut générer par la suite un manque de dureté de l'emballage.
- Une hypothèse thermodynamique liée à un changement brusque d'état c'est-à-dire qu'après le conditionnement à chaud, les pots sont transférés vers les chambres froides. Ce choc thermique (du chaud au froid) permet au volume d'air placé à l'intérieur du pot de se dilater et il y'aura une dépression, d'où l'emballage se rétrécit et il y'aura l'apparition du phénomène « SQUEEZ ».

En effet, Le stage que j'ai effectué au sein de la Centrale Danone Meknès s'est révélé très intéressant. Il m'a permis d'exploiter, d'approfondir plusieurs connaissances théoriques et techniques par le volet pratique et d'explorer le monde de l'industrie et de me familiariser avec le monde de travail, avec son développement ainsi que le rôle important qui revête la gestion des entreprises pour une bonne marche du travail.

ANNEXES

Annexe 1 : tableau des valeurs obtenues de la RCV pour N échantillons.

	exp 1	exp2	exp3	exp4	exp5	exp6	exp7	exp8	exp9	exp10
	89,48	74,80	108,87	109,06	103,98	88,45	84,63	87,32	77,68	59,98
	76,61	109,03	90,40	89,76	105,33	72,72	89,00	89,47	61,87	86,50
	95,62	92,21	103,66	88,30	100,48	94,53	95,21	100,00	109,18	89,13
	91,11	9,23	109,01	108,89	78,46	70,55	105,09	90,34	90,16	108,93
	87,98	109,15	95,87	105,18	92,00	90,54	92,22	93,47	108,76	101,89
	90,56	104,44	90,94	91,18	97,05	92,35	93,40	94,68	92,83	84,11
moyenne	88,56	83,14	99,79	98,73	96,22	84,86	93,26	92,55	90,08	88,42

Annexe 2 : Appareil de mesure des épaisseurs olympus



Annexe 3 : tableau des mesures des épaisseurs dans les trois niveaux de température

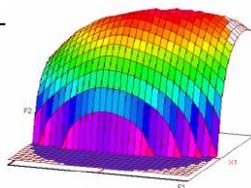
temperature	position	P1	P2
146	base	0,64	0,65
	B	0,21	0,23
	C	0,3	0,2
	D	0,31	0,33
	E	0,4	0,35
143	base	0,45	0,49
	B	0,21	0,3
	C	0,3	0,31
	D	0,3	0,3
	E	0,36	0,37
140	base	0,61	0,5
	B	0,2	0,22
	C	0,32	0,33
	D	0,28	0,3
	E	0,37	0,34

Annexe 4 : tableau des mesures des épaisseurs avec ses limites de contrôle supérieur et inférieur.

temperature	position	Epaisseur	LC	LSC	LIC
146	base	0,645	0,349	0,580	0,118
	B	0,22	0,349	0,580	0,118
	C	0,25	0,349	0,580	0,118
	D	0,32	0,349	0,580	0,118
	E	0,375	0,349	0,580	0,118
143	base	0,47	0,349	0,580	0,118
	B	0,255	0,349	0,580	0,118
	C	0,305	0,349	0,580	0,118
	D	0,3	0,349	0,580	0,118
	E	0,365	0,349	0,580	0,118
140	base	0,555	0,349	0,580	0,118
	B	0,21	0,349	0,580	0,118
	C	0,325	0,349	0,580	0,118
	D	0,29	0,349	0,580	0,118
	E	0,355	0,349	0,580	0,118

Références

- [1] Danone Morocco-One planet,One health-Centrale Danone
[<https://corporate.danone.ma/fr/pour-tous/danone-au-maroc/lhistoire-de-centrale-danone/>]
- [2]Centrale Danone –CDA-Maroc-CDG Capital Bourse
<https://www.cdgcapitalbourse.ma/trader/market/MA0000012049/XCAS/ISIN/>
- [3] AKHRIF I, El IDRISSE A, OUADIE M. Rapport de stage : Amélioration des pertes de polystyrène. Facultés des sciences et techniques de Fès 2016/17. pp : 8-17
- [4]Diagnostic, optimisation et amélioration de l'efficacité de la machine de conditionnement ARCIL par la méthode Lean Six Sigma,OUIAM BOUKHRITA Rapport de stage,FST Fès 2021.
- [5] Optimisation du thermoformage des pots à la Centrale Danone Meknès,MOUBARIK SAMAH Rapport de fin d'étude,F ST Fès 2016
- [6] Mémoire online. https://www.memoireonline.com/01/12/5176/m_Analyse-physicochimique-et-microbiologie-de-lait-UHT-demi-ecreme23.html [en ligne] 20 Mai 2018
- [7] synerlink,a barry- wehmiller packaging company
[<https://www.synerlink.com/brand/dairypack/>]
- [8] Milk planet,le le lait,le lait ,son circuit de fabrication
[<https://www.produits-laitiers.com/le-lait-un-produit-varie-avec-differentes-saveurs/>]
- [9] passion culinaire.fr,cuisine en ligne et compagnie, fabrication du fromage
[<https://www.passionculinaire.fr/dossier-fromage-fabrication.php>]
- [10] le reporter .ma : Si vous saviez comment est fait Raïbi Jamila...
[<https://www.lereporter.ma/si-vous-saviez-comment-est-fait-raibi-jamila/>]
- [11] JAMMET, J. C., Thermoformage, Techniques de l'ingénieur, 1998, AM, AM3660.
- [12] BILE, B., Comportement mécanique de mélanges à matrice polystyrène renforcés au choc. Thèse Doct. Sciences des Matériaux, Lille : Université des Sciences et Technologies, 1999
- [13] AFNOR, FD X 06-081 : juin 2003. Plans d'expériences Guide pour le choix d'un plan d'expériences



Master ST CAC Ageq

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

Nom et prénom : **KHAZAZA Ilham**

Année Universitaire : **2021/2022**

Titre: Optimisation des paramètres de la machine de conditionnement ARCIL par la méthodologie des plans d'expériences

Résumé

Ce présent rapport rassemble le travail réalisé dans le cadre du projet de fin d'année effectué au sein de la filiale Centrale Danone situé à Meknès. Ce projet a pour objectif l'optimisation des paramètres de la machine de conditionnement de produit idéal.

La première partie du rapport est réservée à une étude bibliographique concernant les étapes marquantes de la création de la société Danone et une description générale des services de l'usine centrale Meknès.

Ce rapport va comporter principalement les procédés de fabrication des différents produits de la société Danone et aussi on va consacrer un chapitre pour parler sur le thermoformage qui est un point essentiel pour comprendre le fonctionnement de la machine de conditionnement.

Le but de ce travail est l'identification des différents paramètres optimaux lors de la variation de la température pour obtenir une meilleure résistance des pots d'idéal formés.

Cette étude a permis l'optimisation des paramètres de la résistance à la compression verticale en fonction de la température de thermoformage pour avoir un produit idéal (Vanille / fraise) avec un meilleur emballage c'est-à-dire dur et conforme.

Pour réaliser cette optimisation nous avons procédé à deux méthodes différentes, la première est une étude statistique classique tout en variant un seul facteur et en fixant l'autre et la deuxième est une application de la méthodologie des plans d'expériences.

Mots clés:

Thermoformage, Résistance à la compression verticale, L'emballage des pots, méthodologie des plans d'expériences, thermoformage.