ROYAUME DU MAROC
Université Sidi Mohamed Ben Abdellah
Faculté des Sciences et Techniques Fès

PROJET DE FIN D'ETUDES DE TROISIEME CYCLE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME MASTER SCIENCES ET TECHNIQUES EN GENIE DES MATERIAUX ET DES PROCEDES

OPTIMISATION DES PARAMETRES DE SCELLAGE AU COURS DU CONDITIONNEMENT DES FROMAGES FRAISFONDUS

Présenté et soutenu publiquement par :

Mr. Ahmed Houssni ABCHIR

Devant le jury composé de :

Mme O.SQUALLI	**FST FES**
Mr K.MISBAHI	**FST FES**
Mr J.E.HAZM	**FST FES**

juin 2013

1 REMERCIEMENTS

Mes plus vifs remerciements vont aux personnes qui m'ont soutenu et qui sont intervenues dans la réussite de ce projet de fin d'étude.

En premier lieu, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Madame ***SQUALLI HOUSSAINI Ouafae,*** *pour son encadrement pédagogique très consistant ainsi que pour l'intérêt avec lequel elle a suivi la progression de mon travail, pour ses conseils efficients et ses judicieuses directives tout au long de ma période de projet. Je ne saurais oublier ses conseils avisés et la disponibilité constante dont elle a toujours fait preuve.*

Remerciements chaleureux et profonde gratitude vont également aux membres de l'entreprise Bel Maroc, et plus particulièrement ceux du service production Sialim II, avec lesquels j'ai passé la totalité de la durée du stage. Je n'oublierai pas l'atmosphère de sérieux et de détente mêlés qu'ils ont su entretenir, créant ainsi des conditions idéales de recherche.
Je voudrais plus particulièrement exprimer ma reconnaissance envers : Monsieur ***Mohammed BENMANSOUR*** *mon parrain industriel de stage pour m'avoir donné l'opportunité de traiter un sujet d'une grande importance, pour ses directives et conseils dont il m'avait fait jouir à chaque fois qu'il a été sollicité, et aussi pour son hospitalité et sa confiance.*
Mademoiselle ***CHAIRI Ihsane*** *avec qui une collaboration scientifique fructueuse s'est très vite établie, pour sa disponibilité, son suivi pas à pas tout au long de mon stage et ses précieux conseils.*

C'est avec sincérité que je salue les membres du jury. J'exprime ainsi toute ma reconnaissance à Monsieur ***MISBAHI Khalid****, Monsieur* ***HAZM Jamal Eddine****, professeurs du département de chimie à la FST de FES, pour avoir accepté d'examiner mon travail et de le juger. Je les remercie de l'intérêt réel qu'ils ont manifesté sur la teneur de ce rapport.*

Il m'est agréable avant de clôturer cette page de remerciements de m'acquitter d'une dette de reconnaissance envers mes parents, ma petite famille, mes amis et tous ceux avec qui, j'ai passé ces dernières années, je leur suis très redevable.

2 GLOSSAIRE

- ADSL : (amélioration dynamique sans limite) projet d'optimisation de la production appliqué au sein de l'entreprise
- Lean Manufacturing : ensemble d'outils et méthodes appliqués à l'échelle industriel dont le but est la diminution des pertes.
- panéliste Euromonitor International : organisme international spécialisé dans les statistiques.
- Thermoscellage : soudure de l'opercule sur le pot
- Pelabilitè : facilité d'ouverture des opercules
- Opercule : couvercle découpé dans film en plastique qui ferme l'ouverture des pots.
- Caséines : La caséine est une substance protéique (protéine) qui constitue la majeure partie des composants azotés du lait
- Submicelles : micelle qui résulte de l'association des caséines α, β et κ
- FIFO : L'acronyme FIFO est l'abréviation de l'expression anglaise First In, First Out, que l'on peut traduire par « premier arrivé, premier sorti ».
- Pot jarre : bocaux en plastique alimentaire destiné à contenir les produits jarre
- Capsule : couvercle métallique
- Induction : transfert de chaleur reposant sur l'induction électromagnétique
- Conduction : transfert de chaleur par le contact
- NEMRODW : logiciel de génération des matrices d'expériences en fonction des objectifs et traitement des réponses expérimentales
- L'edam : communément appelé « Fromage rouge » au Maroc, est un fromage des Pays-Bas, traditionnellement vendu sous forme d'une boule de fromage jaune pâle enveloppée dans une pellicule épaisse de paraffine rouge.
- Waldner : Thermoscelleuse utilisée pour scellée les pots
- Film perforé : Le film étirable est utilisé dans l'emballage et le conditionnement des produits des palettes
- Brain storming : technique de résolution créative de problème sous la direction d'un animateur
- FBM : Fromagerie Bel Maroc

1 REMERCIEMENTS I

2 GLOSSAIRE II

INTRODUCTION 1

CONTEXTE DU PROJET 2

1. **Problématique** 2
2. **OBJECTIFS** 2
3. **CONTRAINTES** 3
4. **DEMARCHE** 3

CHAPITRE I : LE SECTEUR FROMAGER MAROCAIN 4

1. **Diagnostic Du Marché** 4
2. **Consommation Nationale** 5
3. **PRESENTATION DU GROUPE BEL** 6
4. **FROMAGERIES BEL MAROC** 7
   - 4.1 Historique 7
   - 4.2 Fiche technique 9
   - 4.3 Production de l'entreprise 10
   - 4.4 Organigramme de l'entreprise: 11

CHAPITRE II : PROCEDES DE FABRICATION DES FROMAGES FRAIS FONDUS 12

1. **PRESENTATION** 12
2. **THEORIE DE LA FONTE DES FROMAGES** 12
   - 2.1 Transformation du lait en fromage 13
   - 2.2 Du fromage au fromage fondu 14

3. Description de la chaine de fabrication du fromage frais fondu au sein de la FBM 15

- 3.1 Préparation de la crème 15
- 3.2 Objectifs des différentes opérations 17
- 3.3 Ligne de conditionnement 18
- 3.4 Lavage hygiénique de La fin de production 21

CHAPITRE III : PARTIE PRATIQUE 23

1. **INTRODUCTION** 23
2. **PRESENTATION DE LA PROBLEMATIQUE** 23
   - 2.1 Généralités 23
   - 2.2 Problème de la pellabilité des opercules 24
   - 2.3 Solution Proposée 25
3. **PLANS D'EXPERIENCES** 26
   - 3.1. Généralités sur les plans d'expériences 26
   - 3.2. Plans expérimentaux utilisés pour cette étude 27
   - 3.2.1. Plans de criblage 27
   - 3.2.2. Plans de Box-Behnken 27
   - 3.2.3. Recherche Du Point Optimal : Meilleur Compromis Entre Plusieurs Réponses 27

3 **CHOIX DU FORMAT A ETUDIER** 28

4 ETUDE DU SCELLAGE ____ 30
4.1 Introduction ____ 30
4.2 Criblage Des Facteurs ____ 30
4.3 Domaine expérimental ____ 31
4.4 Plan d'expérimentation ____ 32
4.5 Réalisation des essais et obtention des résultats ____ 32
4.6 Résultats du plan de criblage et discussion ____ 33
4.7 Conclusion ____ 37
5 Modélisation du scellage par un plan d'optimisation ____ 38
5.1 Caractéristiques du plan de modélisation ____ 38
1.2.1. Domaine expérimental ____ 38
1.2.2. Plan d'expérimentation ____ 39
1.2.3. Résultats du plan d'optimisation. ____ 39
1.2.4. Validation des modèles mathématiques postulés : ____ 40
6 Conclusion ____ 43

CONCLUSION GENERALE ____ 44
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES & WEBOGRAPHIQUES ____ 46
ANNEXE

INTRODUCTION

Dans l'important secteur des produits laitiers, le marché des fromages est aujourd'hui un élément qui compte, grâce à une consommation en hausse, quoique peu diversifiée et ancrée particulièrement sur le fromage fondu, présent dans tous les foyers marocains.

Avec l'avènement des fromages d'importation et la création de nouvelles entreprises fromagères nationales, le secteur fromager marocain vivra une concurrence accrue.

Pour améliorer sa compétitivité, répondre aux besoins du marché et accompagner les tendances des consommateurs, la société Bêl Maroc suit une stratégie de modernisation et de développement au niveau de sa chaine de fabrication. En effet, des efforts considérables sont déployés par des projets de développement et d'amélioration continue qui rentrent dans le cadre du programme ADSL.

L'objectif de ce programme est l'amélioration de la qualité, qui commence dès le premier maillon de la chaîne de production. Il ne faut pas nier que les acquis scientifiques encouragent et participent fortement au rehaussement de la qualité.

Plusieurs projets d'études visant à maitriser et à optimiser le processus de fabrication au sein des différents départements ont été lancés. C'est dans cette optique que s'inscrit ce projet de fin d'études.

Dans le présent travail, nous avons tenté de résoudre un problème étroitement lié à l'amélioration de la performance industrielle de la ligne JARRE au sein de la société Fromagerie Bel Maroc, précisément sur la chaine de conditionnement ou la non maitrise du thermoscellage des pots entraine des pertes alarmantes.

Sur ce rapport on trouvera d'abord une première partie comportant une présentation de la problématique du sujet, les objectifs, les contraintes et la démarche suivie. Puis une revue bibliographique dans laquelle sera présentée les étapes de la production du fromage notamment celles du conditionnement.

En deuxième partie expérimentale sera présentée, les plans d'expérience adoptés au cours de cette étude, la détermination des facteurs influents sur le thermoscellage et la pellabilité. Un modèle mathématique sera également proposé par un plan de Box–Behnken. La détermination des paramètres de performance de la machine Waldner sera finalement réalisée par l'application de la méthodologie des plans d'optimisation et l'étude de désirabilité.

Apres l'achèvement de ce travail nous avons fixé en perspective une poursuite de la démarche d'amélioration continue par l'application de ce savoir-faire sur un deuxième format de 230g touché par le problème de scellage puis sur la ligne de conditionnement Kiri Douceur de Jben.

CONTEXTE DU PROJET

1. Problématique

Le thermoscellage ou l'operculage est une opération qui consiste à sceller par la chaleur un opercule découpé dans un film à base de plastique. Cet opercule est ensuite pelable et jeté après ouverture du pot.

Le thermoscellage ne constitue pas seulement un critère de qualité, mais aussi un paramètre technologique essentiel.

En effet, le thermoscellage est important dans la mesure où c'est un facteur décisif pour le stockage et la conservation des qualités organoleptiques et nutritionnelles du produit ainsi que sa protection jusqu'à sa date limite d'utilisation optimum qui est de 39 semaines au froid à 6°C.

L'opercule utilisé dans cette démarche est conçue pour assurer une fermeture étanche et économique du récipient, cependant, il doit aussi permettre une ouverture facile sans se déchirer ni obliger le consommateur à effectuer l'ouverture en plusieurs étapes, au risque de se tacher et de disperser plusieurs fractions d'opercule peu esthétiques.

Ces deux opérations exigent un réglage adéquat des paramètres de marche de la machine, de telle sorte à éviter un sur-scellage, qui entraine la difficulté de la pellabilité des pots ou un faible scellage qui induit des risques de contamination.

Devant l'exigence de ses clients, ainsi que la nécessité d'assurer la conservation de ses produits, une maîtrise du processus de conditionnement des pots devient donc indispensable.

2. OBJECTIFS

C'est dans l'optique d'optimiser le fonctionnement de la machine à sceller ou la Thermoscelleuse (WALDNER II) que le service production SIALIM II de la Fromagerie Bel Maroc m'a confié ce projet. A travers ce travail, on vise

l'identification des paramètres du scellage et d'une pelabilitè maîtrisée, ainsi que la recherche des modalités optimales pour ces paramètres dans le but d'atteindre :

- ✓ 0% en taux des pots mal scellés sur la totalité de la production en format 600g;
- ✓ un taux de pelabilitè difficile des opercules pouvant varier dans une fourchette de 0 à 2%.

3. CONTRAINTES

Le scellage des opercules est l'étape la plus importante du conditionnement. Il dépend essentiellement des paramètres de marche de la machine, du format des pots ainsi que d'autres facteurs non contrôlables tels que la qualité des emballages, le centrage des pots et l'apport uniforme des calories sur la surface de contact des résistances chauffantes nommées (tête de scellage).

4. DEMARCHE

Au sein de la Fromagerie Bel Maroc la ligne du conditionnement JARR produit trois types de fromage frais fondu qui sont ALJARRA, GOLD et WHITE sous plusieurs formats 140g, 230g, 450g et 600g. A la fin de la chaine de production les formats 230g et 600g sont ceux qui présentent plus de produits non conformes.

Au cours de ce projet on s'est penché essentiellement sur l'optimisation des paramètres de marche de la ligne de conditionnement du format 600g du fait que ce format représente environ 65% de la totalité de la production de l'usine.

Pour déterminer les paramètres influents sur le scellage un suivi du processus du conditionnement était nécessaire. En suite un brainstorming s'est avéré essentiel au près des conducteurs machine, de la salle de conditionnement et des dirigeants de l'usine.

Un plan de criblage nous a permis d'évaluer les paramètres à forte influence sur le scellage et la pellabilité. Ces facteurs serviront à la modélisation mathématique du scellage qui permettra la recherche d'un point optimal, par les plans d'expériences, satisfaisant ainsi les objectifs fixés.

CHAPITRE I : LE SECTEUR FROMAGER MAROCAIN

Dans l'important secteur des produits laitiers, le marché des fromages est aujourd'hui un élément qui compte, grâce à une consommation qui va croissante, quoique peu diversifiée et ancrée particulièrement sur le fromage fondu, produit-phare des fromages, présent dans tous les foyers marocains. Les opérateurs mettent tout en œuvre pour améliorer les niveaux de consommation en diversifiant leur offre.

1. Diagnostic Du Marché

Vendus au rayon ou à la coupe, les fromages se déclinent en une large panoplie. Or, malgré la diversification de l'offre fromagère sur le marché, la consommation des Marocains en matière de fromage reste limitée, en raison de leurs habitudes culinaires. En effet, avec un peu plus de 1 kg/an/ habitant, le Maroc est dépassé non seulement par l'Algérie ou la Tunisie, mais aussi par l'Egypte et les pays du Golfe.

Le consommateur marocain reste limité quant à son choix, avec en premier lieu le fromage fondu, l'edam (la fameuse « boule rouge ») et les fromages frais (Figure 1). Selon le panéliste Euromonitor Internationalle fromage fondu domine largement, avec un volume global estimé à environ 30.000 Tonnes, suivent les fromages à pâte pressée, autour de 8.000 T, dont 4.500 à 5.000 T d'edam, et enfin les fromages à pâte fraîche et molle (4.700 T), avec en tête la mozzarella [1].

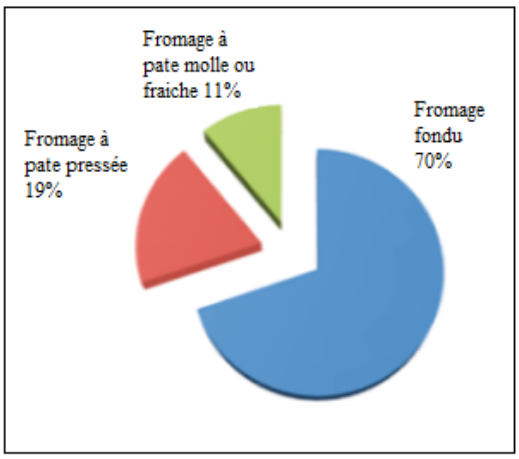


Figure 1 : Répartition du marché en volume par catégorie [2]

La croissance en volume du marché des fromages était de 6,4% en 2010, contre une moyenne de 3,8% par an entre 2005 et 2010. Cette croissance a bénéficié à toutes les catégories de façon à peu près équivalente, sauf pour le fromage fondu en

tranches (+ 3,2% seulement) et, dans une moindre mesure, pour le frais (+ 5,7%). La croissance en valeur (Figure 2) suit la même tendance, avec + 6,2% en 2010, contre une moyenne de 4,5% par an ces 5 dernières années. A noter que le segment des fromages à pâte pressée croît moins en valeur qu'en volume, du fait d'une baisse des prix.

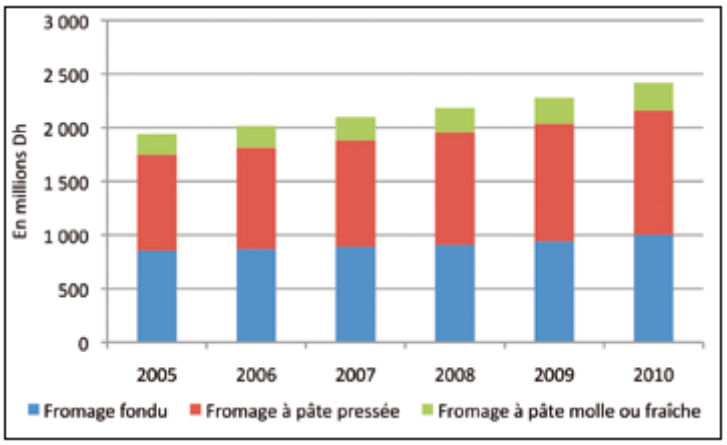


Figure 2 : Evolution du marché en valeur [2]

Comme tout secteur alimentaire, le marché des fromages au Maroc connaît quelques difficultés, en commençant par la production, notamment en termes de matériel, car peu de sociétés proposent des équipements de Fromagerie, en termes de conditions de fabrication (température et humidité), de formation du personnel et de commercialisation (respect de la chaîne du froid). A cela s'ajoute le coût des matières premières [1].

2. Consommation Nationale

Le fromage le plus consommé au Maroc reste le fromage fondu (ou à tartiner). Si autrefois le marocain ne consommait que les fromages fabriqués traditionnellement par les femmes, tels le Jben, manière de valoriser leur surplus de lait, il n'a pas mis longtemps à adopter les fromages fondus en portions individuelles, à l'image des célèbres triangles enveloppés dans du papier aluminium du groupe Bel, sous la marque « La Vache Qui Rit » qui ont fait le tour du monde.

D'abord importé, ce fromage est produit au Maroc à partir de 1977. Aujourd'hui, le marché du fromage fondu reste dominé par cet opérateur historique qui revendique 60 à 70% de parts de marché sur le fondu, avec « La Vache Qui Rit », « Kiri », « Mini Babybel » (import) et la marque locale « Les enfants ».

Le reste du marché se partage essentiellement entre deux opérateurs locaux. En 1997, Fromagerie des Doukkala, née d'un partenariat entre Centrale Laitière et le groupe Bongrain, avec sa marque de fromage fondu « Cœur de Lait ». Margafrique investit également ce segment en 2006 avec sa marque « La Hollandaise » [1].

Avec une consommation qui ne fait qu'augmenter, le marché du fromage au Maroc connaît une évolution notable ponctuée par une demande croissante en produits de qualité. Néanmoins, il demeure axé sur le fondu, principalement en portion. Or, le marché du fromage fondu étant désormais arrivé à maturité – il a pénétré quasiment tous les foyers marocains - les fromagers doivent développer les niveaux et les fréquences de consommation. Pour cela, ils rivalisent de créativité et s'intéressent de plus en plus aux diverses déclinaisons de ce fameux produit laitier afin de proposer les meilleurs fromages en terme de qualité nutritionnelle et organoleptique.

3. PRESENTATION DU GROUPE BEL

Bel est un groupe familial internationale, d'origine française, spécialisé dans L'élaboration et la fabrication de fromages de marque de qualité, originaux et accessibles à tous. Présent dans plus de 120 pays à travers des marques internationales fortes comme La vache qui rit, Mini Babybel, Kiri, Leerdammer, Apéricube et de nombreuses marques régionales bien implantées. Le groupe emploie près de 12 000 salariés animés par des valeurs partagées d'éthique, d'innovation, d'enthousiasme, de compétence et de cohésion. Avec un chiffre d'affaires consolidé de plus de 2.2 milliard d'euros en 2008 et environ 80% des ventes en volume réalisées hors de France (Figure 3), Bel poursuit sa stratégie de croissance durable fondée sur une rentabilité et un leadership forts sur chacun de ses marchés.

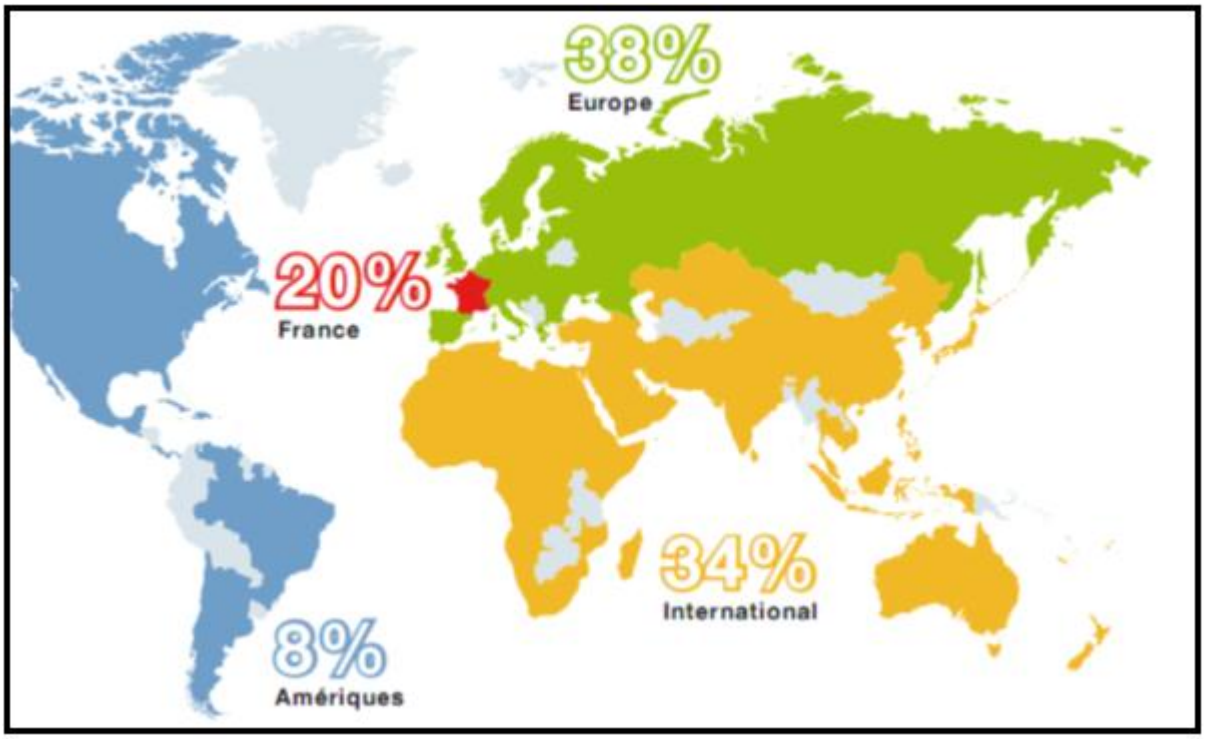


Figure 3 : Répartition du groupe Fromageries Bel dans le monde

L'organisation de Bel en 4 zones géographiques (Tableau 1) lui permet d'être plus proche de ses consommateurs et d'adopter sur chaque grand marché la meilleure approche pour maximiser ses opportunités.

Europe	Afrique	Asie	Amérique
France, Suisse, Belgique, Pays-Bas, Autriche, Allemagne, Royaume Uni, Suède, République Tchèque, Slovaquie, Pologne, Italie, Grèce, Portugal, Espagne.	Maroc, Algérie, Egypte, Tunisie.	Turquie, Liban, Syrie, Iran, Chine, Vietnam, Japon	États Unis, Canada

Tableau 1 : Organisation géographique du groupe Bel [1]

4. FROMAGERIES BEL MAROC

4.1 Historique

L'aventure du fromage fondu est récente. Jusqu'en 1971, les produits Bel étaient distribués par un grossiste-importateur de Casablanca. Le tonnage annuel ne dépassait guère 200 tonnes.

En 1972, les Fromageries Bel ouvrent une succursale à Casablanca. C'est le début de leur véritable implantation au Maroc. Le marché des fromages est alors inexistant si l'on excepte les grandes villes. En trente mois, les tonnages passent de 378 à 570 tonnes, soit une progression de 50%.

En 1974, la marocanisation a amené la succursale à fermer le 31 mai. Le lendemain, le 1er juin, la Compagnie Fromagère Franco-Marocaine (COFRAMA),

filiale crée par les Fromageries Bel, prend le relais. Avec 14 personnes, venues pour la plupart de la succursale, et un capital de 250.000 Dirhams, l'activité de COFRAMA redémarre [3].

En janvier 1977, les Fromageries Bel s'associent avec des hommes d'affaires marocains à la tête desquels se trouve Abdelwahab Laraki pour créer la Société Sialim, Il s'agit de créer à Tanger une Fromagerie capable de produire 500 tonnes de fromage fondu par an, puis de monter ensuite à 800 tonnes en deux équipes. C'est ainsi qu'en novembre 1977, les premières boîtes de La Vache Qui Rit " made in Morocco" sont fabriquées par Sialim et commercialisées par COFRAMA. Le reste des dates marquantes de la vie de la société sont les suivantes :

- En 1979 lancement de la belle vache et prolongement de la journée de production par la création d'une deuxième équipe de travail ;
- En 1981 lancement de Kiri ;
- Entre 1980 et 1983 construction de la nouvelle usine à la zone industrielle Moghogha ;
- En 1984 lancement du produit les enfants ;
- En 1995 démarrage de l'export vers le Moyen Orient et l'Afrique subsaharienne et mise en place d'une troisième équipe de production la nuit ;
- En 1999 acquisition de la 1ère partie des locaux de la Société Zycsa et construction du bâtiment du service technique, le nouveau atelier de la cartonnerie, le magasin des pièces détachées, la salle de préparation et de fabrication de la pâte, la salle de lavage et le laboratoire ;
- En 2001 certification ISO 9001 version 2000 ;
- En 2003 acquisition de la 2ème partie des locaux de la Société Zycsa et extension de SIALIM, qui deviendra par la suite Fromageries Bel Maroc ;
- En 2004 début des constructions du nouveau site et déménagement des services administratifs vers le nouveau bâtiment sur l'allée N°1 au mois d'octobre de la même année.
- En 2007 : Interdiction du tabac sur toute l'usine de Tanger, Obtention de la certification du système de management de la sécurité alimentaire ISO22000,
- En 2009 : Intégration du progiciel SAP (Systems, Applications, and Products for data Processing) qui est un logiciel de gestion et de planification de la production.

- En 2010 : Obtention de la certification OHSAS 18001 de la santé et sécurité au travail,
- En 2011 : Obtention de la certification 14001 de l'environnement et Conformité Sociale.

  Les plus importantes certifications obtenues par l'entreprise sont représentés sur la figure 4.

Figure4: Les certifications obtenues par Fromageries Bel Maroc

4.2 Fiche technique

Raison social	Fromagerie Bel Maroc
Forme juridique	société anonyme (SA)
Siège social de l`usine	Zone industrielle de Moghogha Tanger
Siège commercial et administratif des ventes	rue sidi Bennour - Ain Borja Casablanca
Capital social	46.200.000 DH
Superficie	12000 m2
Registre commercial	Tanger n 2813
C.N.S.S	1752915
Identification fiscale	4902802
Patente	57220200
Téléphone	+212 039 32 94 00
Fax (Tanger)	+212 039 32 94 01
E-MAIL	fromageriesbelmaroc@groupe-bel.com
Effectif	1400
Banques	SGMB/Crédit du Maroc/BMCI/BMCE
Régime de TVA	taxe en vigueur au Maroc

Tableau 2: fiche technique de l'entreprise [3]

4.3 Production de l'entreprise

L'usine de Tanger fabrique une diversité de produits, qui sont destinées aussi bien à l'export qu'au marché national, le tableau 3 représente les différents produits fabriqués :

Kiri : Nature : Fromage frais fondu.	
Kiri douceur de jben : Nature : Fromages frais fondus	
KIRI Al Jarra : Nature : Fromage frais fondu	
La vache qui rit en pot : Nature : Fromage fondu	
Picon & Régal Picon (Abou Lwalad) Nature : Fromage fondu	
La vache qui rit Nature : Fromage fondu.	
Les enfants : Nature : Fromage fondu	

Tableau 3: liste des produits fabriqués au sein des Fromageries Bel Maroc [3]

4.4 Organigramme de l'entreprise:

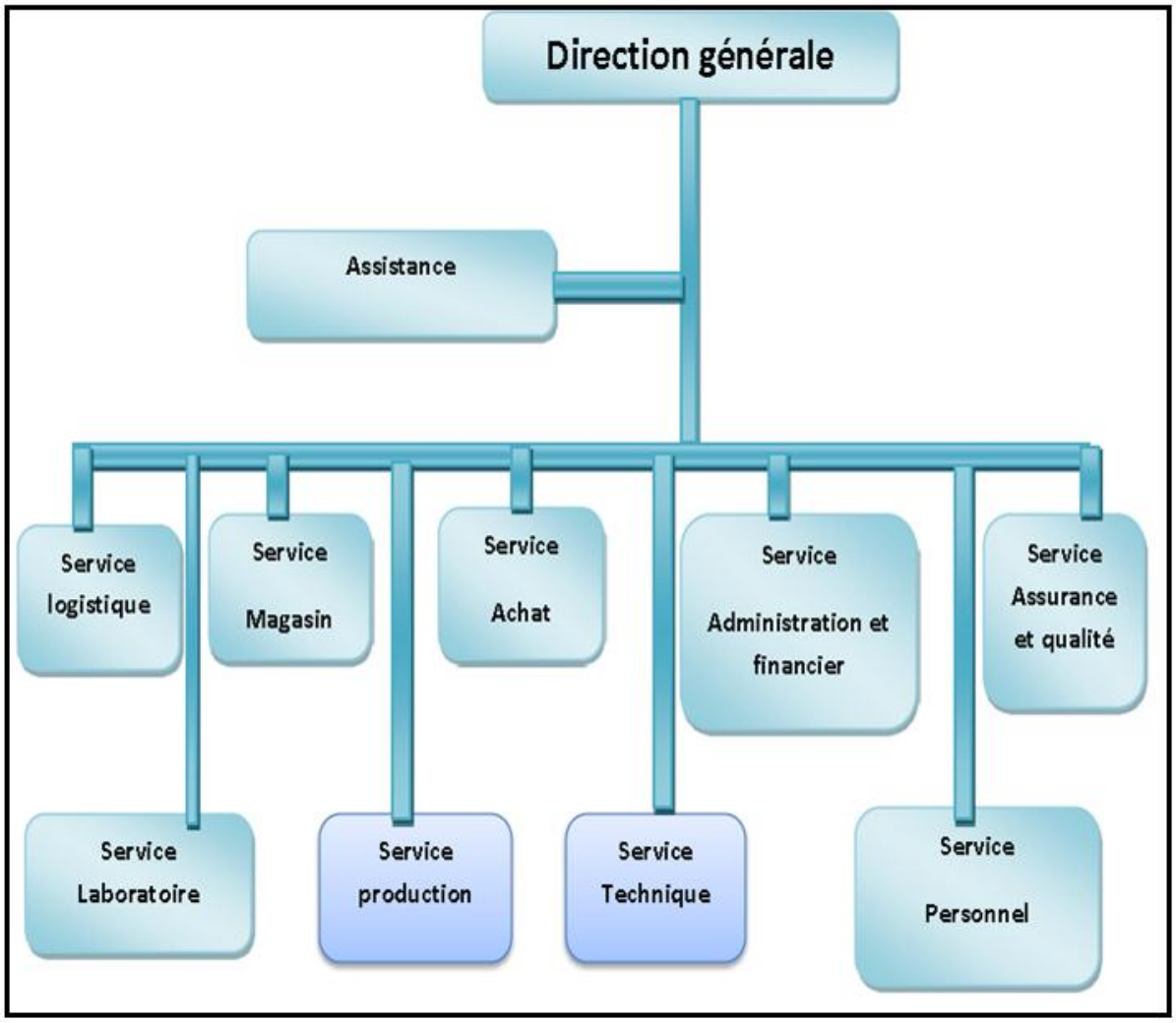


Figure 5: Organigramme des Fromageries Bel Maroc[3]

CHAPITRE II : PROCEDES DE FABRICATION DES FROMAGES FRAIS FONDUS

1. PRESENTATION

La dénomination « fromage fondu » est réservée au produit de la fonte du fromage ou d'un mélange de fromages, éventuellement additionné d'autres produits laitiers. Sa teneur minimale en matière sèche est de 43 g pour 100 g de produit fini, et sa teneur minimale en gras sur sec (masse en grammes de matière grasse pour 100 g de produit après complète dessiccation) est de 40 g.

En réalité, il s'agit plus d'une dissolution suivie d'une dispersion de protéines dans l'eau que d'une fonte qui, correspond au sens physico-chimique du terme, à la désintégration d'une structure solide cristalline par l'apport d'énergie thermique ou l'exercice d'une pression. [4]

Ces produits issus de la fonte de fromages peuvent être regroupés en cinq familles classées ici par ordre chronologique d'apparition sur le marché mondial.

- Fromage fondu type « bloc »
- Fromage fondu type « coupe »
- Fromage fondu toastable (pour refonte)
- Fromage fondu thermostable
- Fromage fondu tartinable

Le fromage frais fondu tartinable doit ses caractéristiques au processus de crémage qui permet en partie de régler la consistance du produit fini et de lui conférer une certaine tartinabilité. Cette famille représente la majeure partie du marché français. Ces produits peuvent être aromatisés et conditionnés en emballages souples (portions) ou rigides (pots, barquettes) [4].

2. THEORIE DE LA FONTE DES FROMAGES

Le fromage fondu est un produit de seconde transformation dans la mesure où il est issu du fromage, lui-même issu du lait. Afin de bien comprendre les principes mis en œuvre et les réactions obtenues durant la fonte des fromages, il est indispensable de rappeler quelques notions relatives à la transformation du lait en fromage.

2.1 Transformation du lait en fromage

Les micelles de caséine représentent la substance clé de la Fromagerie, leur composition et leur comportement revêtent une importance primordiale durant le processus de fonte. La caséine dans le lait est présente à raison de 26 g/kg et se compose en fait de quatre caséines différentes, dont chacune possède une série de variantes génétiques, en l'occurrence les caséines as1, as2, ß et k. Ces caséines disposent d'une structure spatiale bien définie, et contrairement à la plupart des autres protéines, elles ne peuvent pas se déployer en structures ordonnées.

En raison de leur concentration dans le lait, ces molécules protéiques sont agglutinées sous forme de micelles grâce à leurs parties hydrophobes.

Quant aux parties hydrophiles, elles sont positionnées en surface, ce qui les rend hydrosolubles. Cependant, ces micelles sont des structures dynamiques qui évoluent en permanence au gré des modifications du milieu, et notamment des variations de pH. Par exemple, lorsque le pH diminue, elles perdent leur caractère hydrophile et leur capacité de rétention en eau décroît.

Ces micelles sont composées de sous-unités appelés submicelles, résultant d'une association de dix à cent molécules de caséine d'un diamètre de 10 à 15 nm, voir 20 nm, et d'une masse molaire comprise entre 250 000 et 2 000 000 dalton (1 dalton = $1{,}65 \cdot 10^{-24}$ g/mol). Dans le lait, c'est le phosphate de calcium colloïdal qui, comme un ciment, entraîne des réticulations, c'est-à-dire l'agglutination des submicelles en micelles.

Plusieurs voies sont possibles pour obtenir du caillé puis du fromage à partir du lait, ce qui justifie partiellement la grande diversité des produits finis obtenus.

Cela dit, la grande majorité des fromages est produite par coagulation avec de la présure et même si, le plus souvent, on réalise une fermentation lactique durant la fabrication, celle-ci est relativement limitée. Par conséquent, les caséines conservent la majeure partie du calcium et de leur structure micellaire. Ainsi, les teneurs en calcium s'échelonnent de 0,7 à 11,0 g/kg selon les fromages.

La présure extraite de la caillette de veau contient une enzyme, la chymosine, qui, compte tenu des conditions du milieu, entraîne une hydrolyse spécifique de la caséine k présente en surface des micelles.

Cette action enzymatique sépare le glycomacropeptide, fraction hydrophile, et libère ainsi la partie intérieure hydrophobe. Lorsque près de 97 % du macropeptide

d'une micelle de caséine est séparé, les interactions hydrophobes sont plus fortes que les forces de répulsion électrostatique, et quand plus de 85 % des micelles de caséine du lait sont ainsi modifiées, on observe la formation d'un gel visible. Ce gel est un réseau tridimensionnel de micelles de caséine regroupées qui renferme de grands espaces à l'intérieur desquels le lactosérum est piégé. Avec la coalescence croissante des éléments, le gel développe une certaine tension qui aboutit finalement à une rétraction avec expulsion de lactosérum, c'est le phénomène de synérèse. La coagulation est suivie par toute une série d'opérations qui concourent toutes à une élimination plus ou moins importante de lactosérum. L'égouttage débute par le décaillage qui vise à découper la masse de caillé en grains plus ou moins fins de manière à créer des surfaces d'exsudation du lactosérum. Ensuite, le mélange de caillé et de lactosérum est brassé et dans certains cas un chauffage plus ou moins sévère est appliqué afin d'intensifier la synérèse. Après le moulage, éventuellement assorti d'un pressage pour certains types de fromages afin de poursuivre l'égouttage dans les moules, les fromages sont démoulés. Ceux-ci peuvent être salés dans la masse avant le moulage, traités en saumure ou encore avec du sel sec après démoulage [4].

2.2 Du fromage au fromage fondu

Il existe deux grandes étapes qui président au processus de fonte des fromages : l'échange d'ions et le crémage. (Voir annexe 1)

Les mécanismes mis en œuvre lors de la fabrication des fromages fondus sont nombreux et complexes et on peut tenter de les représenter schématiquement sur un plan physique (Tableau 4). Ainsi, on pourra constater qu'en partant du lait pour aboutir au fromage fondu, en passant par le fromage, on assiste à une succession d'inversions des phases dispersées et dispersantes. Le fromage fondu est un système physico-chimique hybride, donc hautement instable, dans lequel :

- ✓ la matière grasse est toujours dispersée ;
- ✓ les protéines sont plus ou moins gélifiées selon la texture recherchée pour le produit fini [4].

Étape	Phénomènes	Structures des Protéines
Fromage	Gel de paracaséinate de calcium ou réseau tridimensionnel de protéines : — plus ou moins minéralisées selon l'égouttage ; — plus ou moins protéolysées selon l'affinage.	**Gel**
Facteurs de fonte	Sels de fonte + eau + chaleur + cisaillement (action mécanique)	
Échange d'ions	Destructuration du gel : — réseau protéique micelles : déréticulation — micelles submicelles : peptisation Libération de fonctions hydrophiles : hydratation et fluidification	
Fromage fondu non crémé	Mise en solution partielle des protéines dans la phase aqueuse	**Sol**
Crémage (Kremage, Creaming	Absorption de caséine en périphérie des globules gras : émulsification Fixation sur les protéines Hydratation et gonflement Épaississement d'anions de phosphates des protéines polyvalents Pontages intermicellaires Gélification	
Fromage fondu Crémé	Poursuite du phénomène jusqu'à une température de 20 °C, avec anticipation nécessaire car le crémage continue pendant le stockage.	
Facteurs de Fonte	Exagération des facteurs : — physiques : chaleur (température élevée) — mécaniques : cisaillement (vitesse des couteaux et des agitateurs) + durée d'application — chimiques : sels de fonte (type et doses)	
Fromage fondu surécrémé	Destructuration très poussée des submicelles : dissolution excessive. Coagulation des protéines avec séparation des phases (protéines/eau/huile). Texture cassante.	**Gel**

Tableau 4: Principales étapes du processus de fonte des fromages [4]

3. Description de la chaine de fabrication du fromage frais fondu au sein de la FBM

3.1 Préparation de la crème

Le fromage frais est un fromage à pâte molle non affiné qui, selon la norme FAO/ OMS(C 31), possède un goût crémeux ou acide peu prononcé et l'arôme

caractéristique d'un produit laitier issu d'une culture à base d'acide lactique et de bactéries spécifiques. Le fromage frais est facile à tartiner et à mélanger à d'autres aliments. Le fromage «frais ou non affiné» est du fromage qui est prêt à la consommation peu de temps après la fabrication[5].

Le procédé suivi lors de la préparation de ce type de fromage est résumé sur la figure 6:

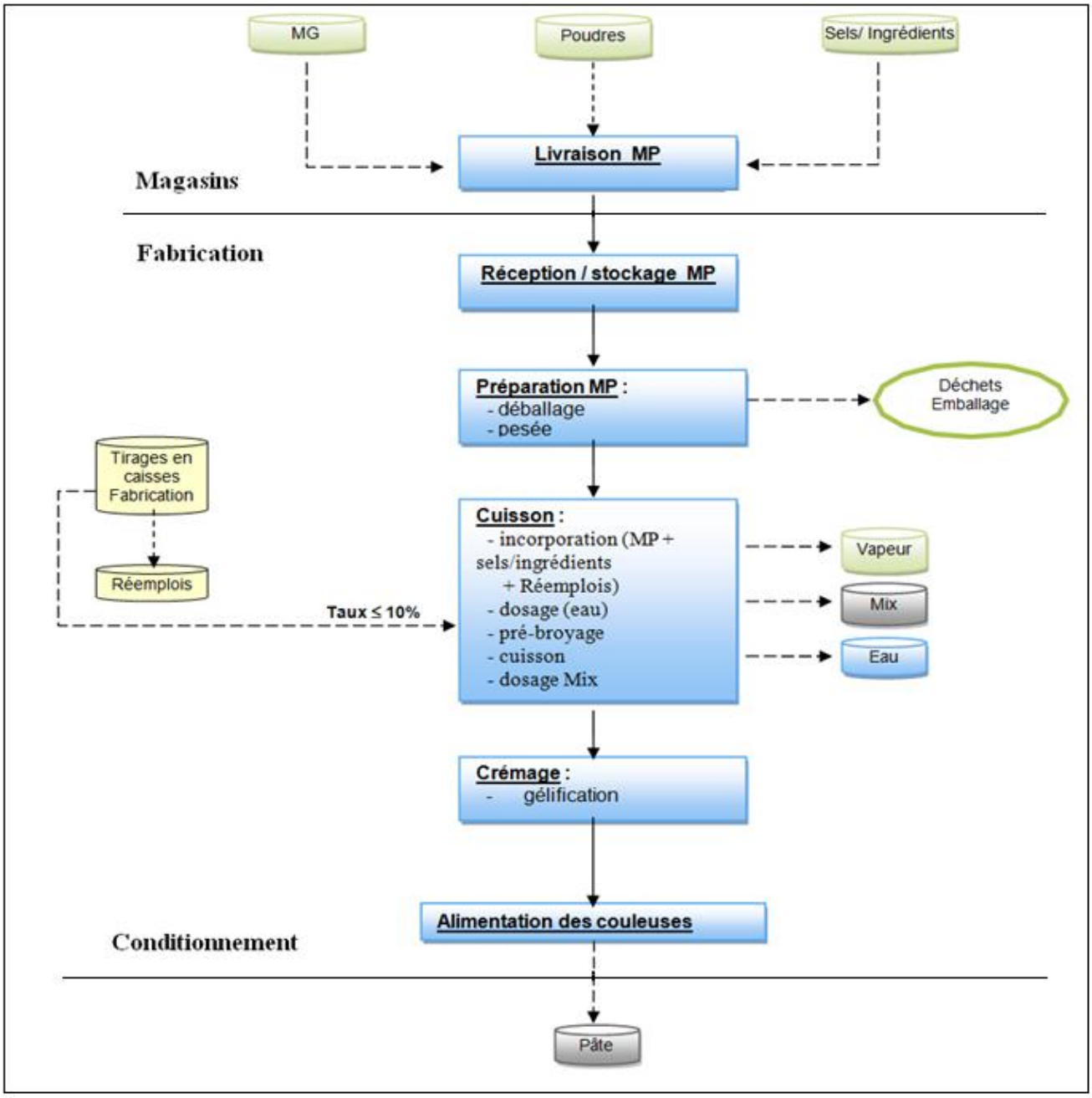


Figure6 : Schéma simplifié du procédé de la fabrication de fromage frais fondu

3.2 Objectifs des différentes opérations

a. Livraison des matières premières (MP) :

Approvisionner l'atelier de fabrication en matières premières:

- acceptées après les contrôles de réception.
- livrées en temps utile en respectant la conformité des quantités et conditions d'utilisation aux programmes de production.

b. Réception/ Stockage MP :

- Vérifier les quantités et la qualité des matières premières livrées.
- Mettre à la disposition de la fabrication les matières premières nécessaires à la réalisation du programme de production.
- Maintenir les matières premières dans des conditions optimales d'hygiène et de conservation.

c. Préparation MP :

- Déballage :
  - Séparer les matières premières de leur contenant (et éliminer les déchets d'emballage).
  - Garantir une rotation FIFO (First In, First Out) des matières premières au sein du stock fabrication.
  - Vérifier la bonne qualité gustative des matières premières à l'utilisation.
- Préparation des Réemplois: Récupérer la pâte issue des tirages en caisse fabrication pour l'incorporer comme réemploi dans les prochaines fabrications. (pour la formule al jarra il n'y a pas d'utilisation du Réemplois)
- Pesée: Peser les poudres, sels de fonte, beurre et réemplois selon la formule en respectant les tolérances de pesée.

d. Cuisson :

- Broyer les matières premières.
- Fondre les constituants et cuir le produit (garantir une charge microbiologique compatible).

e. Crémage :

Assurer la restructuration du réseau protéique pour l'obtention d'une pâte homogène, dont la viscosité doit être compatible avec les normes de texture et de coupe à froid du produit final.

f. Alimentation de la couleuse :

Garantir une alimentation suffisante des couleuses à pâte, adaptée aux variations de fonctionnement des machines.

3.3 Ligne de conditionnement

Après préparation des crèmes le produit arrive au stade du conditionnement composé par les étapes suivantes :

a. Remplissage du Chargeur pot : WALDNER

Les pots sont déversés dans une trémie (Figure 7), puis remontés dans la trieuse par un convoyeur.

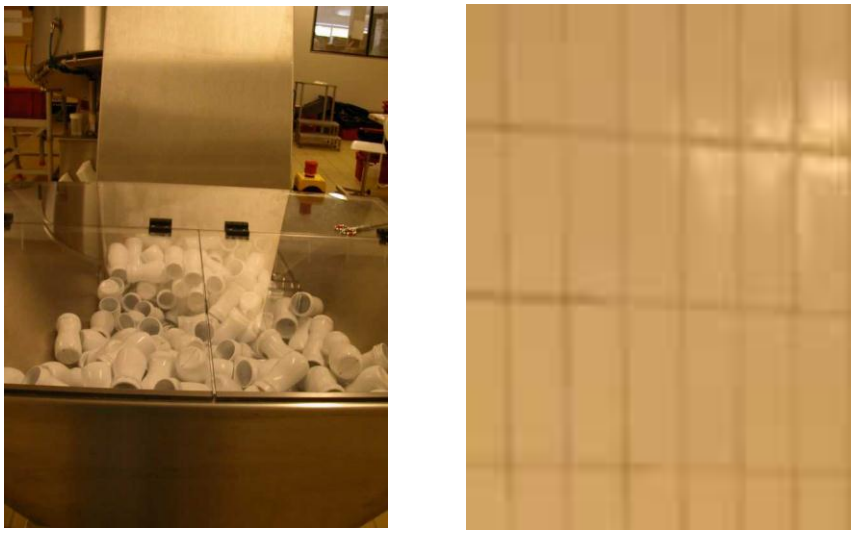


Figure 7 : Chargeur pot WALDNER

b. Mise en verticale automatique des pots

Une trieuse automatique(Figure 8) se charge d'ordonner les pots et de les présenter « ouverture vers le haut ». Ensuite les pots sont convoyés vers la zone dosage.

Figure8 : Trieuse pot WALDNER

c. Remplissage des pots par le doseur:

Deux becs (Figure 9) dosent Par un mouvement « monte et baisse » simultanément dans deux pots. Avec une ré-aspiration en fin de dosage.

Une étoile met les pots « au pas » pour garantir une distance constante entre deux pots, égale à l'écartement des deux becs de dosage. Les premiers pots dosés sont destinés au contrôle laboratoire.

Figure 9 : Doseur WALDNER

d. Scellage opercule en surpression

Une operculeuse sous pression, INTAMAC-WALDNER (Figure 10) scelle sous pression à partir d'une bobine de film, un nombre de pots variable en fonction des formats en production.

Figure 10 : Operculeuse sous pression INTAMAC-WALDNER

e. Capsulage

- Chargement capsule dans le réservoir.
- Redressement automatique des capsules.
- Capsulage par une machine Capsuleuse ZALKIN (Figure 11).
- Convoyage vers le marqueur de date.

Figure 11: Capsuleuse ZALKIN

f. Marquage jet d'encre de la capsule

- Marquage sur la capsule par la technologie VIDEOJET, avec double codage des pots, en arabe sur un côté et en français sur l'autre.

g. Mise manchon sleeve

- A partir d'un rouleau rotatif la machine (Figure 12) découpe puis dépose sur les pots un manchon de sleeve contenant le nom, le logo et les informations du produit. Ces pot son convoyés vers le four de vapeur placé en avale assurant ainsi la Rétraction du sleeve.

Figure 12: Dépose manchon et four Rétraction manchon SCHEIDDEGGER

h. Passage au refroidissement technologique en frigo :

Le produit doit être amené à 6 °C en 24 h maximum. Ce refroidissement conditionne la texture du produit : un refroidissement trop lent donne des textures trop fermes (hors objectif).

i. Mise en caisse manuelle après 24h de refroidissement à 6 °C

j. Palettisation manuelle

Le conditionnement ainsi terminé les palettes sont acheminés vers le stock en attente de leur livraison vers les clients.

3.4 Lavage hygiénique de La fin de production

Apres chaque jours de production un nettoyage des machines et conduites et impérativement réalisé selon le protocole suivant :

a. Prélavage :

- Objectif de l'opération : maximiser l'efficacité de la soude en éliminant le maximum de matière organique.
- Paramètres à maîtriser : Température et temps

b. Lavage alcalin :

- Eliminer toutes traces de matière organique

Pousse à l'eau, après vidange pour maximiser l'efficacité du rinçage.

- Paramètres à maîtriser : Temps, Température, Concentration en solution.

c. Rinçages :

- Eliminer les traces de soude, d'acides et de désinfectant avant un démarrage de production ou entre deux phases de lavage si les produits ne sont pas compatibles

- Paramètres à surveiller ou à maîtriser : en fin de rinçage soude:

  - Déboucher la vanne d'alimentation, les raccordements buses et boisseau, brosser les raccords et nettoyer les joints.
  - Avant redémarrage de la production, contrôler visuellement la propreté des points de contrôles.

d. Lavage Acide :

- Eliminer les dépôts de minéraux.
- Pousse à l'eau après vidange pour maximiser l'efficacité du rinçage.

e. Désinfection :

- Détruire la flore résiduelle.
- Paramètres à maîtriser : Temps, Température, Concentration en solution.

Fréquence des lavages :

- A la fin de chaque journée de production.
- Une désinfection à chaud en début de semaine avant le démarrage.
- Un lavage des locaux (sols, murs, plafonds, …) tous les deux jours.

CHAPITRE III : PARTIE PRATIQUE

1. INTRODUCTION

Apres préparation des crèmes selon les normes fixées par le cahier de charge, le produit est acheminé vers la salle de conditionnement pour sa transformation en produit fini près à être livré. Le conditionnement est composé de plusieurs étapes. Parmi elles figure le thermoscellage.

Le thermoscellage ou operculage est une opération qui consiste à sceller par la chaleur un opercule découpé dans un film à base de plastique, d'aluminium ou de papier et muni d'une couche thermocollante (laque, film plastique) sur un support compatible (plastique, verre traité, ...). Cet opercule est ensuite pelé et jeté après ouverture du pot. L'exemple plus commun est l'opercule de laiterie qui ferme les yaourts ou bien encore celui des bocaux de chocolat tartinable. Mais les opercules sont utilisés dans de nombreux autres domaines industriels comme l'industrie cosmétique, pharmaceutique, ou encore chimique[6].

2. PRESENTATION DE LA PROBLEMATIQUE

2.1 Généralités

Le thermoscellage est mené par conduction ou par induction avec des thermoscelleuses, par conséquent nécessite l'apport de chaleur et donc de calories qui vont faire fondre la couche thermocollante de l'opercule. Lors d'un scellage par conduction, les calories sont apportées par une tête de scellage métallique qui vient s'appliquer sur l'opercule à la manière d'un fer à repasser [6]. La conduction est le plus souvent la technologie utilisée pour le scellage d'opercules sur des contenants en plastique ce qui est le cas de la chaine de conditionnement étudiée.

L'opération de scellage ou operculage est assurée par une machine Thermoscelleuse montée sur la chaine de conditionnement des produits jarre nommée INTAMAC-WALDNER (Figure 13), cette opération de criticité élevée est subdivisée en sous étapes contrôlées par le temps, ces étapes sont les suivantes :

- **fermeture hermétique de la chambre de scellage** : Les flacons sont thermoscellés sous gaz protecteur. Pour cela, ils sont mis dans une chambre hermétiquement isolée.
- **alimentation en pression** : Cette chambre est ensuite mise sous pression utilisant du gaz protecteur.

- **scellage** : pendant cette étape les têtes de scellage entrent en contact avec le film d'opercules et le colle du pot pour transférer les calories nécessaires au thermocollage de ces deux derniers. Le contact entre les têtes collantes et le film d'opercule entraine sa découpe aux dimensions des pots à sceller.
- **aération** : réouverture de la chambre de scellage et retour à la pression atmosphérique.

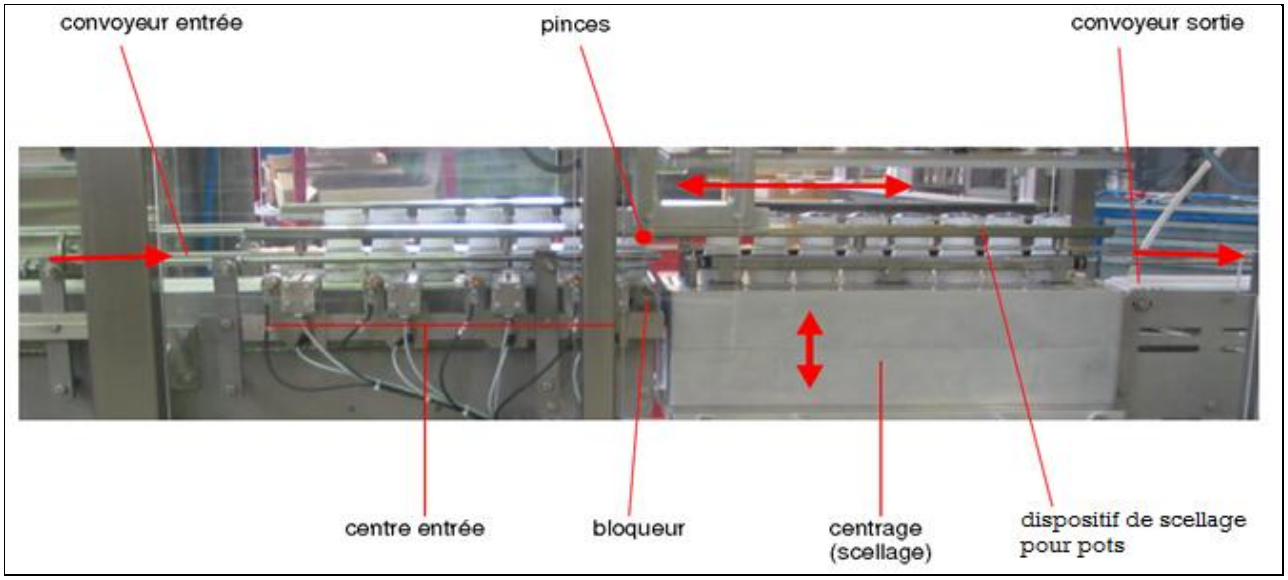


Figure13 : machine intamac-waldner

Ces machines sont utilisées pour le thermoscellage d'opercules sur tous types d'emballage (pots, flacons, boites, bidons, bouteilles) quelle que soit leur matière (plastique, verre, métal).

Ces thermoscelleuses sont très polyvalentes et peuvent être équipées d'une ou plusieurs têtes de thermoscellage suivant la cadence désirée. Ces machines assurent en une seule opération la prise, le depot et le scellage d'opercule. Le rouleau de film opercules est monté sur un axe rotatif qui assure une alimentation continue de la machine, les changements de formats sont simples et très rapides [7].

2.2 Problème de la pellabilité des opercules

Un opercule est conçu pour assurer une fermeture étanche et économique du récipient, cependant, il doit aussi permettre une ouverture facile sans se déchirer ni obliger le consommateur à effectuer l'ouverture en plusieurs étapes, au risque de se tacher et de disperser plusieurs fractions d'opercule peu esthétiques.

Ce problème est quantifié par deux indicateurs numériques qui sont le taux des pots mal scellé et le taux de pots difficilement pelable.

L'entreprise s'est efforcée de résoudre ce problème en recherchant des produits thermocollants d'adhérence suffisante, mais minimale, pour permettre un décollage facile. On connaît ainsi de nombreux mélanges de produits adhésifs de propriétés variées soigneusement dosées, mais dont le prix et la disponibilité posent problème.

La difficulté de l'ouverture est encore plus difficile dans le cas des pots de grand format. L'opercule adhère à la paroi du récipient, du fait que le temps de contact entre la tête de scellage et le l'embouchure du récipient est relativement élevé (par nécessité). Suite à cela, pour enlever l'opercule le consommateur n'a pas à séparer deux surfaces planes, mais deux surfaces tourmentées.

Enfin, on ne peut utiliser certains produits à faible pouvoir adhérent au risque qu'ils seraient eux-mêmes chassés par la forte pression qui s'exerce le long du colle.

2.3 Solution Proposée

L'objet de la présente étude est de trouver une solution qui satisfera les deux objectifs fixés préalablement celui de la fermeture étanche, ainsi que l'ouverture facile des opercules minces.

Au lieu de rechercher un produit thermocollant de pouvoir adhésif limité, et bien dosé, on s'intéressera aux paramètres de marche de la machine, aussi appelé paramètres de scellage.

Ces facteurs sont connus par leur impact direct sur la qualité de la soudure, certains réglages permettent l'obtention d'une étanchéité irréprochable mais présentent des difficultés intolérables lors de l'ouverture ; d'autres assurent l'ouverture facile mais entrainent un taux de pots mal scellés dépassant les limites de tolérances.

La solution à ce problème consiste à réaliser par la méthodologie des plans d'expériences, une étude sur tous les paramètres suspectés, cette étude permettra de déterminer en première phase les facteurs les plus influents et la nature de leurs influences sur le taux des pots mal scellés et le taux des pots difficilement pelables.

En deuxième phase on réalisera une étude plus approfondie sur les facteurs qui s'avèrent hautement influents ou qui présentent des effets de natures différentes, cette étude conduira à une détermination d'un réglage optimale qui mettra fin à ce problème.

3. PLANS D'EXPERIENCES

3.1. Généralités sur les plans d'expériences

Le plan d'expériences est un plan d'organisation des essais expérimentaux dans le but de connaître le comportement du résultat (réponse) à partir de la variation des facteurs choisis. Un bon plan permet une diminution notable du nombre d'essais tout en donnant une bonne précision dans la détermination des résultats. Pour réaliser un bon plan d'expériences, on doit respecter les étapes suivantes.

• **Formalisation du problème :**Pour cela, il est nécessaire de recueillir un maximum d'informations sur le phénomène étudié permettant ainsi de définir les facteurs à faire varier ainsi que leur niveau de variation.

• **Choix et construction du plan retenu :** Pendant cette étape on doit choisir un plan qui convient à notre étude en se basant sur le nombre d'essai proposé par chaque plan ainsi que la possibilité de réaliser les essais sollicités.

• **Réalisation des essais**. Elle doit se faire en respectant les conditions expérimentales. Les facteurs doivent être bien aux niveaux préconisés. La réponse doit être donnée avec la plus grande précision. En cas de répétitions, les mesures doivent être réalisées de préférence par le même expérimentateur.

• **Traitements statistiques** : calculs des effets des facteurs étudiés et de leurs interactions, modélisation,... Le choix du logiciel ainsi que sa maîtrise est très déterminant pour la précision et l'interprétation des résultats statistiques. Le conseil d'un statisticien semble nécessaire.

• **Interprétation des résultats.** L'effet propre de chaque facteur est relativement simple à interpréter mais l'effet interaction est parfois délicat à expliquer car les causes ne sont pas toujours explicites [8].

De manière générale, la méthode des plans d'expériences cherchera à déterminer et à établir les liens existant entre 2 types de variables :

La réponse : grandeur physique étudiée ;

Les facteurs : grandeurs physiques modifiables par l'expérimentateur, sensées influé sur les variations de la réponse.

Plus précisément, elle vise aussi à bien comprendre les relations liant la réponse avec les facteurs, que les facteurs entre eux.

Pour cela, la solution proposée consiste dans tous les cas à établir un modèle, exprimant la réponse en fonction des facteurs.

Pour bâtir ce modèle, il faut appréhender ces variations. Celles-ci sont déduites des résultats des séries d'expériences, c'est-à-dire de plusieurs configurations pour lesquelles les valeurs des facteurs sont différentes.

Il s'agit ici de la notion de plan d'expériences (PE), correspondant à la réalisation d'une série de N expériences, qui sont toutes déterminées a priori obligatoirement réalisables et indépendantes entre elles [9].

3.2. Plans expérimentaux utilisés pour cette étude

3.2.1. Plans de criblage

Ce sont des plans fractionnaires permettent d'étudier beaucoup de facteurs, sans étudier leurs interactions, et de déterminer ceux qui sont influents. Les modèles employés ne comportant que les facteurs principaux au premier degré ou des interactions d'ordre 2 suivant les objectifs de l'étude [11].

Les modèles mathématiques des réponses sont plus simples. La réponse (y) est en fonction de :

- ✓ a_0 : la valeur calculée de la réponse au centre du domaine d'étude ;
- ✓ a_i : l'effet du facteur i ;
- ✓ x_i : le niveau attribué au facteur i

$$y = a_0 + \sum a_i * x_i$$

L'analyse atteint rarement la modélisation mathématique des réponses [11].

3.2.2. Plans de Box-Behnken

Ces plans permettent d'établir directement des modèles du second degré. Tous les facteurs ont trois niveaux : -1, 0 et +1. Ces plans sont faciles à mettre en œuvre et possèdent la propriété de séquentialité. On peut entreprendre l'étude des k premiers facteurs en se réservant la possibilité d'en ajouter de nouveaux sans perdre les résultats des essais déjà effectués [11].

Pour 3 facteurs, le plan de Box-Behnken est construit sur un cube possédant 12 arêtes. 3 points d'expériences sont normalement ajoutés au centre du domaine. Toutefois, avec 4 points au centre, le plan obtenu répond au critère de presque-orthogonalité [11].

3.2.3. Recherche Du Point Optimal : Meilleur Compromis Entre Plusieurs Réponses

Quand on a plus d'une seule réponse, les conditions expérimentales qui optimisent une d'entre elles ne sont pas forcément les mêmes que celles qui optimisent l'autre. Il est donc essentiel de trouver un compromis entre ces réponses ; d'où le recours à la fonction désirabilité.

Désirabilité individuelle : fonction désirabilité appliquée à une seule réponse.

Il s'agit d'une fonction qui varie de 0 à 1, où la valeur 1 correspond à une satisfaction maximale, la valeur 0 à un refus complet [11].

Désirabilité globale : désirabilité appliquée à plusieurs réponses

La fonction de désirabilité permet de trouver le meilleur compromis entre plusieurs réponses par l'introduction de la désirabilité globale dg, qui prend en considération, à la fois, des exigences sur toutes les réponses. C'est la moyenne géométrique des désirabilités individuelles d_i :

$$d_G = \sqrt[n]{\prod d_i}$$

La désirabilité globale est égale à 1 lorsque tous les objectifs sont atteints.

- La désirabilité globale est égale à 0 si l'un au moins des objectifs n'est pas atteint.
- La désirabilité globale est comprise entre 0 et 1 quand certains objectifs sont complètement atteints et d'autres partiellement seulement.

Le meilleur compromis est obtenu pour la plus forte valeur de la désirabilité globale [11].

3 CHOIX DU FORMAT A ETUDIER

Sur la chaine de production des produits jarre objet de l'étude, sont conditionnés sous 5 formats différents 140, 230, 450 et 600g. D'un format à un autre les paramètres de marche sont modifiés

Les anomalies perçues pendant le conditionnement, sont enregistrés chaque jour, par l'entreprise sous forme de base de donné. L'estimation des pourcentages des pots qui présentent des difficultés d'ouverture (tableau 5) a été calculée sur la base des échantillons contrôlés par le laboratoire de l'entreprise.

Le calcul des pourcentages des pots mal scellés est effectué sur la totalité de la production vue que leur contrôle est exécuté à la sortie de la machine et concerne tous les pots produits.

Le traitement statistique effectué sur ses enregistrements nous a permis de dresser les tableaux (5, 6, 7 et 8) suivants :

Format	Taux des pots difficilement pelables
230g	**9,32 %**
450g	**4,04%**
600g	**15,29%**

Tableau 5:Pourcentage des pots difficilement pelable en 2012 [3].

Format	Taux des pots difficilement pelables
140g	**1,13%**
230g	**10,19%**
450g	**3,73%**
600g	**13,83%**

Tableau 6:Pourcentage des pots difficilement pelable en 2013 [3].

format	taux des pots mal scellés
140g	**0,17%**
230g	**1,31%**
450G	**0,78%**
600g	**2,01%**

Tableau 7 : Pourcentage de pots mal scellés en 2012 [3]

Format	taux des pots mal scellés
140g	**0,13%**

230g	**1,51 %**
450g	**0,52%**
600g	**2,2%**

Tableau 8 : Pourcentage des pots mal scellés en 2013 [3]

L'analyse de ces données (tableau 5, 6, 7,8) montre que le format 600g est le plus touché par les phénomènes de mal scellage et de pellabilité difficile de l'opercule.

Une maîtrise du processus de conditionnement d'abord des pots jarre format 600g est donc d'une grande nécessité. L'étude sera étalée ultérieurement sur les autres formats et les autres lignes de conditionnement.

4 ETUDE DU SCELLAGE

4.1 Introduction

L'étude du scellage est réalisée en 3 étapes, une étape de criblage des paramètres sélectionnés, une modélisation mathématique des réponses par un plan Box-Behnken et la recherche d'un point dans le domaine expérimental satisfaisant les exigences fixées pour le bon scellage et la pelabilitè soit 0% en taux de pots mal scellés et moins de 2% en taux des pots difficilement pelables.

4.2 Criblage Des Facteurs

Pour réaliser le plan de criblage pour la Thermoscelleuse WALDNER, nous avons réalisé un Brain storming au près des employés en liaison directe avec le problème on cite les conducteurs machine, le régleur machine, le chef du service. Les résultats obtenus sont :

- La temporisation des paramètres de scellage (durée d'attente avant alimentation en pression; durée d'alimentation en pression; durée d'attente avant le scellage; durée de scellage ; durée d'attente avant l'aération ; durée d'aération)
- La température de scellage
- La pression du poinçon
- la qualité des emballages (pots)
- le centrage des pots
- l'apport uniforme des calories sur la surface de contact

Après sélection des paramètres non réglables et détermination des facteurs bruit. Nous avons retenu comme facteurs à étudier :

a. **La température de scellage :** consigne de dégré de température entrée à la machine.
b. **L'attente avant l'alimentation en pression** : durée d'attente entre la fermeture de la chambre de scellage et le début du gazage.
c. **L'alimentation en pression** : durée d'afflux de gaz dans la chambre. Il faut tenir compte du fait que le contenu d'oxygène résiduel dans la tête des flacons dépend de cette durée d'afflux.
d. **L'attente avant le scellage** : durée d'attente après le gazage et avant le début du scellage.
e. **Le temps de scellage** : durée du contact entre la tête de scellage et le col du pot
f. **L'attente avant l'aération** : durée d'attente après la fin du scellage et avant l'aération de la chambre de scellage.
g. **L'aération** : durée d'aération avant que la chambre de scellage reviens a la pression atmosphérique.
h. **La pression du poinçon** : pression exerces par la tête du scellage sur les pots.

4.3 Domaine expérimental

En fonction des limites d'utilisation du matériel et des intérêts exprimés par l'entreprise les niveaux hauts et bas de chaque facteurs ont été déterminés ainsi nous avons pu obtenir Le domaine expérimental du plan de criblage suivant (Tableau 9):

Facteurs	Niveau bas	Niveau haut
T (°C)	160	175
Attendre avant alimentation en pression (s)	0.1	0.3
Alimenter en pression (s)	0	0.1
Attendre avant scellage (s)	0.1	0.3
Scellage (s)	1	1.5
Attendre avant aérer (s)	0.3	0.5
Aérer (s)	0.3	0.7
Pression (Bar)	3	4

Tableau 9:domaine expérimental

4.4 Plan d'expérimentation

La matrice d'expérimentation obtenue pour un plan de criblage de 8 facteurs est une matrice d'Hadamard de 12 essais (Tableau 10).

N°Exp	Température	Attente Avant Alimentation en pression	Alimentation en pression	Attente Avant Scellage	Temps de Scellage	Attente Avant Aération	Aération	Pression de Poinçon
	C°	S	S	S	S	S	S	Bar
1	175	0,3	0	0,3	1,5	0,5	0,3	3
2	160	0,3	0,1	0,1	1,5	0,5	0,7	3
3	175	0,1	0,1	0,3	1	0,5	0,7	4
4	160	0,3	0	0,3	1,5	0,3	0,7	4
5	160	0,1	0,1	0,1	1,5	0,5	0,3	4
6	160	0,1	0	0,3	1	0,5	0,7	3
7	175	0,1	0	0,1	1,5	0,3	0,7	4
8	175	0,3	0	0,1	1	0,5	0,3	4
9	175	0,3	0,1	0,1	1	0,3	0,7	3
10	160	0,3	0,1	0,3	1	0,3	0,3	4
11	175	0,1	0,1	0,3	1,5	0,3	0,3	3
12	160	0,1	0	0,1	1	0,3	0,3	3

Tableau 10: Matrice d'expérimentation [12].

4.5 Réalisation des essais et obtention des résultats

Ces 12 essais ont été réalisés sur la thermoscelleuse Waldner au cours de la production, des pots jarre format 600g, conformément au plan d'expérimentation préalablement préparé.

Pour chaque réglage proposé, les taux de pots mal scellés et difficilement pelable sont portée sur les 50 pots produits. Le tri est d'abord visuel en effet les pots ayant un opercule concave (bien scellés) subissent seulement un test de pellabilité. Les autres pots sont soupçonnés être mal scellés et par conséquent leurs scellage doit être vérifier par la méthode de la cloche à vide.

La cloche à vide, est un procédé expérimental, qui se s'accomplis par à un dispositif nommé « Caisson CTE ».

Le test consiste en la submersion du produit a contrôlé (pot) dans du liquide (eau), ensuite la fermeture hermétique du caisson, le départ du cycle préréglé commence par la création du vide jusqu'à une pression donnée ensuite, on effectue un test visuel (échappement des bulles), si ce test s'avère négatif, les pots séjournent pendant 20 min à l'intérieur. À la fin du cycle la machine calcule la différence de pression entre le départ et la fin de l'opération si l'écart est nul donc les pots sont bien scellés.

Apres vérification du scellage on procède à l'ouverture des pots pour évaluer leur facilité d'ouverture si l'opercule se déchire en lambeau ou présente une résistance élevé à l'ouverture il est qualifié de difficilement pelable.

Le taux de pots mal scellé et difficilement pelable et calculé en divisant le nombre d'unité qui présentent des anomalies sur le nombre totale des pots produits.

4.6 Résultats du plan de criblage et discussion

Les résultats obtenus pour le plan de criblage des paramètres de scellage de la Waldner II sont regroupés dans le tableau 11 :

N°Exp	% des pots mal scellés	% des pots difficilement Pelable

1	0,00%	18,00%
2	4,17%	2,08%
3	6,00%	4,00%
4	0,00%	18,00%
5	0,00%	14,00%
6	16,67%	1,85%
7	4,00%	42,00%
8	0,00%	6,00%
9	2,00%	2,00%
10	4,00%	4,00%
11	0,00%	12,00%
12	22,45%	0,00%

Tableau 11: Résultats du plan de criblage

L'analyse est développée dans ce qui suit :

- **Pourcentage des pots mal scellé (PPMS)**
  - ❖ Etude graphique des effets de la réponse PPMS

L'étude graphique (figure 14) des effets représente l'effet de chaque facteur sur la réponse étudiée (pourcentage des pots mal scellés). Elle permet de dégager les facteurs les plus influents sur le PPMS ainsi que leurs sens de variation.

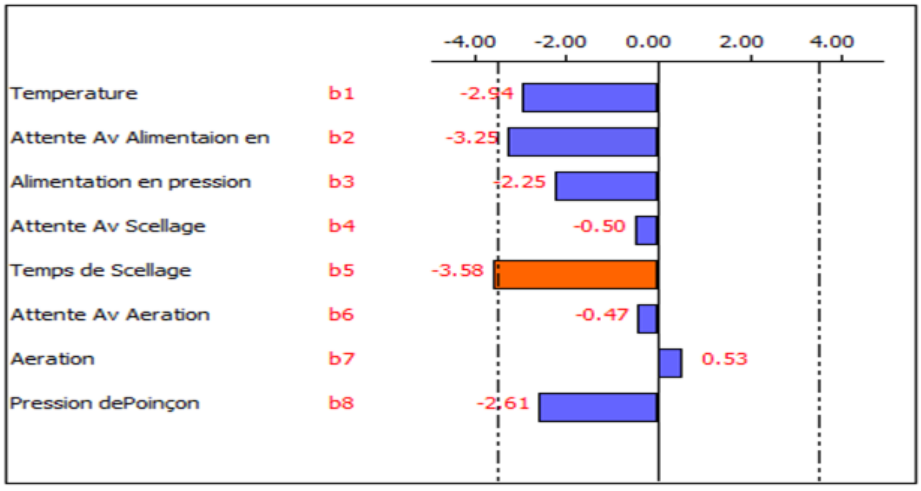


Figure 14: Etude graphique des effets pour Le PPMS

L'étude graphique montre que le temps de scellage est le facteur qui influe le plus le pourcentage des pots mal scellé, suivi de l'attente avant alimentation en

pression. Ainsi, afin d'avoir un PPMS de valeur basse, il faudrait augmenter le temps de scellage, l'attente avant l'alimentation en pression, la pression du poinçon ou encore diminuer le temps d'aération.

❖ Effets Pareto individuels et cumulés de la réponse PPMS

La loi de Pareto dit que 80% des effets sont dus à 20% des causes. Le diagramme de Pareto classe donc les facteurs selon leur contribution dans la variation de la réponse pour faire ressortir les 20 % de facteurs à forte influence sur la réponse.

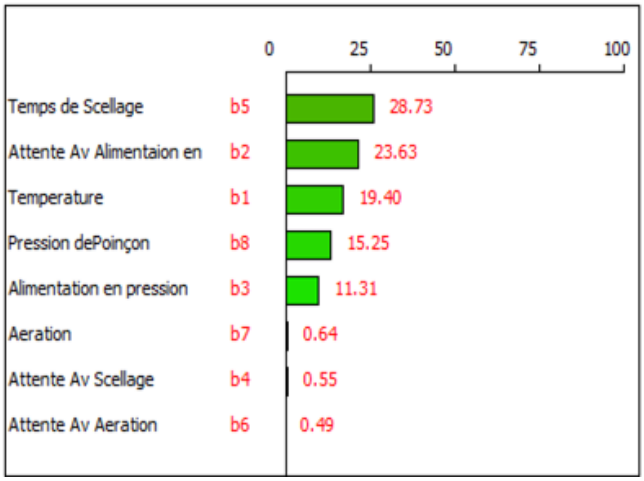


Figure 15: Effets Pareto individuels pour le PPMS

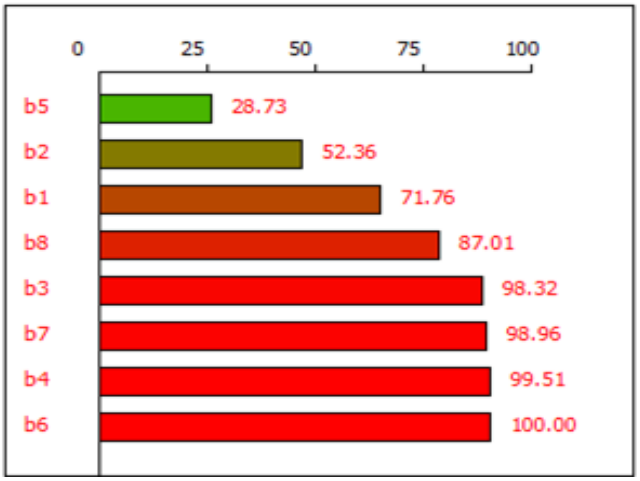


Figure 16: Effets Pareto cumulés pour le PPMS

Ainsi, le temps de scellage, l'attente avant alimentation en pression et la température de scellage s'avèrent être les facteurs qui influent le plus le pourcentage des pots mal scellés.

- **Pourcentage des pots difficilement pelable(PPDP)**
  - ❖ Etude graphique des effets de la réponse PPDP

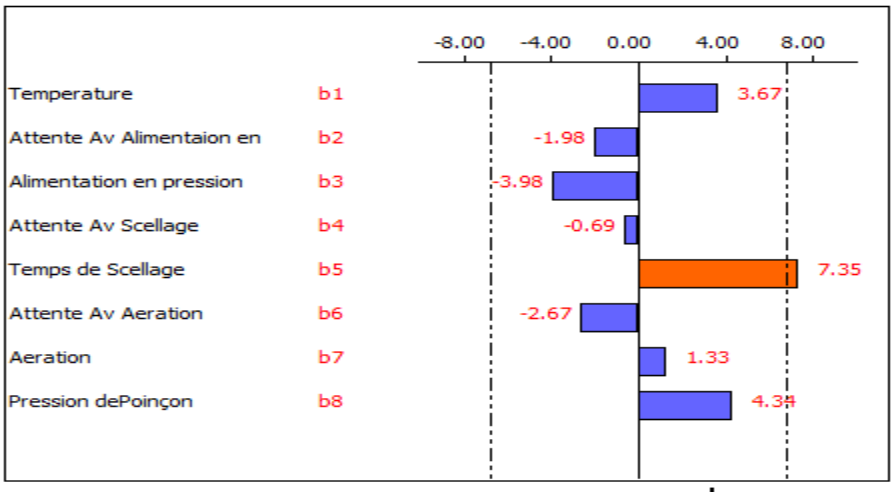


Figure 17: Etude graphique des effets pour Le PPDP

Le temps de scellage apparaît comme le facteur qui participe le plus à la variation du PPDP. En effet, pour diminuer le PPDP, il faudrait diminuer Le temps de scellage, la température et pression du poinçon, ainsi que d'augmenter tous les paramètres restant.

❖ Effets Pareto individuels et cumulés de la réponse PPDP

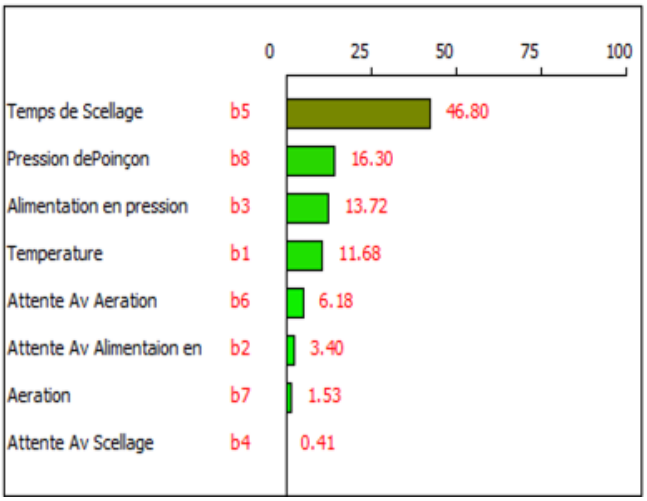


Figure 18: Effets Pareto individuels pour le PPDP

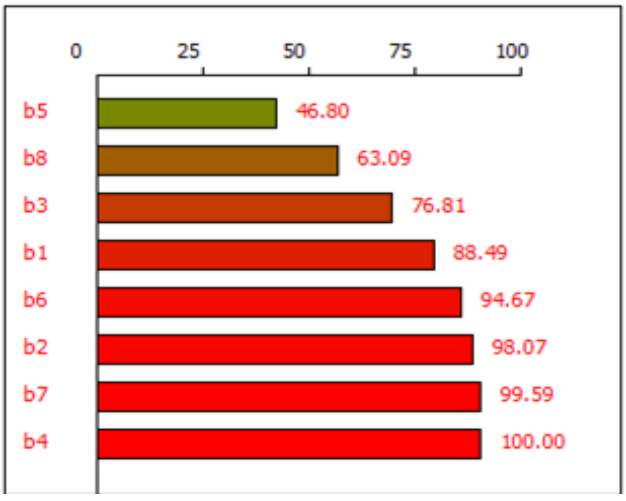


Figure 19: Effets Pareto cumulés pour le PPDP

La loi de Pareto appliquée pour le PPDP permet de déduire que les facteurs qui régissent cette réponse sont le temps de scellage, la pression du poinçon, l'alimentation en pression et légèrement la température.

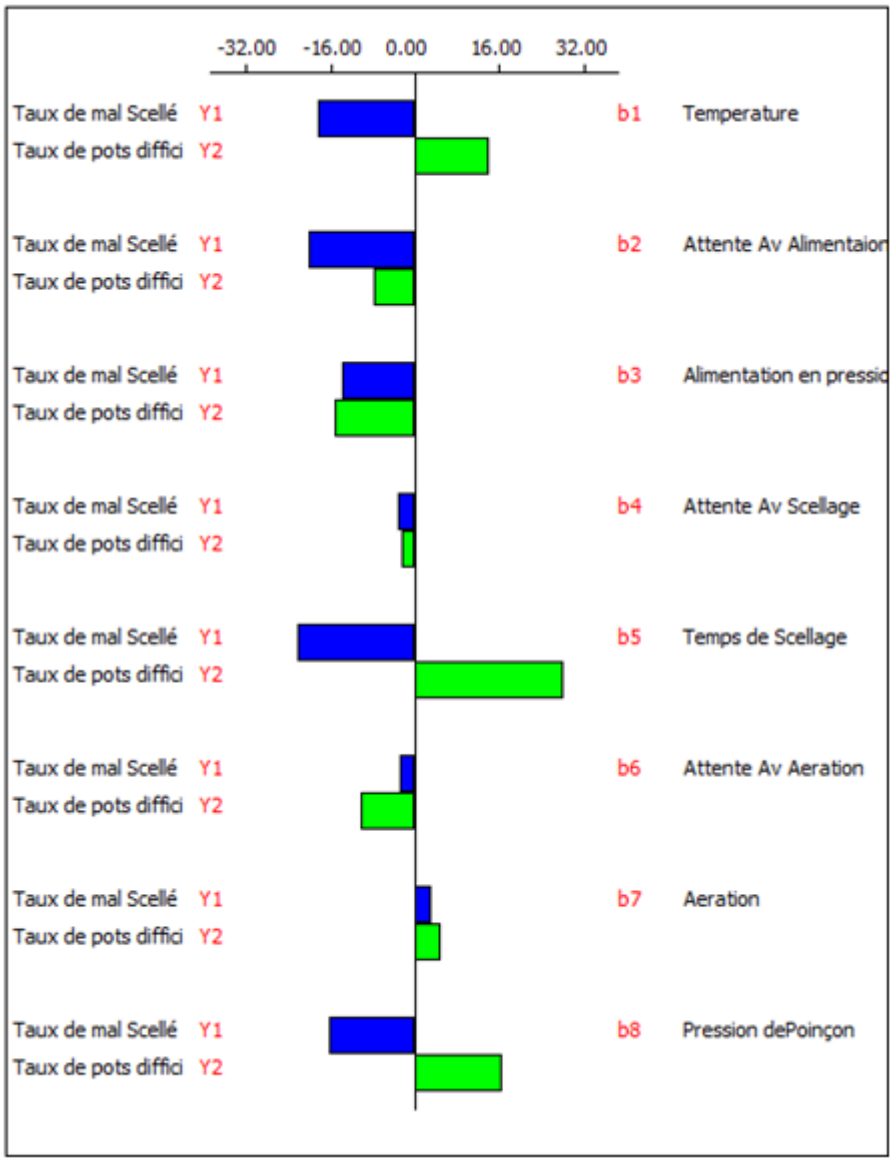


Figure 20 : récapitulation des effets Pareto cumulé pour le PPDP et le PPMS

4.7 Conclusion

Les essais réalisés dans cette partie nous ont permis de montrer que pour minimiser le PPMS et le PPDP il faut fixer au niveau bas le temps d'aération et au niveau haut les paramètres suivants :

- le temps d'attente avant l'alimentation en pression ;
- Le temps d'alimentation en pression ;
- Le temps d'attente avant le scellage ;
- Le temps d'attente avant l'aération.

On déduit également, à partir du plan de criblage, que la température de scellage, le temps de scellage ainsi que la pression poinçon ont une grande influence

sur les deux réponses et donc sur la qualité du scellage. Leurs effets sont de nature différente.

Ces trois facteurs seront retenus pour le plan de modélisation aussi que la recherche de l'optimum.

5 Modélisation du scellage par un plan d'optimisation

5.1 Caractéristiques du plan de modélisation

Le temps de scellage (facteur 1), la température de scellage (facteur 2) et la pression du poinçon (facteur 3) sont les paramètres retenus pour la modélisation du scellage par la Waldner 2.

Pour réaliser ces expériences, on prend en considération les tendances des cinq facteurs qui présentent des effets de mêmes natures selon le plan de criblage réalisé.

Ceci nous ramène à fixer leurs modalités de façon à minimiser le PPMS et le PPDP (tableau 12).

Facteurs	**Modalités**
Attente Av Alim en pression	0.3 S
Alimentation en pression	0.1 S
Attente Av Scellage	0.3 S
Attente Av Aération	0.5 S
Aération	0.3 S

Tableau 12 : Modalités optimales d'après le plan de criblage

1.2.1. Domaine expérimental

Le domaine expérimental du plan box-behnken (tableau 13) définie les plages de variation des trois facteurs retenus.

Facteur	**Unité**	**Centre du domaine**	**Pas de variation**
Température de scellage	°C	167 ,5	7 ,5
Temps de scellage	S	1,25	0,25
Pression poinçon	Bar	3,5	0,5

Tableau 13 : domaine expérimental étudié

1.2.2. Plan d'expérimentation

La matrice d'expérimentation obtenue pour un plan de Box-Behnken de 3 facteurs est une matrice de 15essais (Tableau 14).Les trois dernières expériences sont des essais au centre, ils sont pris en compte lors du calcul des coefficients.

N°Exp	Température **(C°)**	Temps de Scellage **(s)**	Pression poinçon **(Bar)**
1	160.0	1.0	3.5
2	175.0	1.0	3.5
3	160.0	1.50	3.5
4	175.0	1.50	3.50
5	160.0	1.25	3.0
6	175.0	1.25	3.0
7	160.0	1.25	4.0
8	175.0	1.25	4.0
9	167.50	1.0	3.0
10	167.50	1.50	3.0
11	167.50	1.0	4.0
12	167.50	1.50	4.0
13	167.50	1.25	3.50
14	167.50	1.25	3.50
15	167.50	1.25	3.50

Tableau 14 : matrice d'expérimentation du plan d'optimisation

1.2.3. Résultats du plan d'optimisation.

Pour chaque essai le taux des pots mal scellés et difficilement pelables a été déterminé. Les résultats sont regroupés dans le tableau 15.

N°Exp	% de pots mal scellés Y1	% des pots difficilement pelable Y2
1	43.33	0
2	0	8.82
3	15.00	2.50
4	0	6.67
5	46.67	0
6	0	10.00
7	8.82	2.94
8	0	10.26
9	17.24	0
10	0	16.67
11	0	8.57
12	0	40.00
13	0	4.55
14	0	12.53
15	0	2.56

Tableau 15: Résultats du Plan d'expérimentation

1.2.4. Validation des modèles mathématiques postulés :

a) Calcul des coefficients du modèle et test d'influence des facteurs sur la réponse Y1(taux de pots mal scellés).

Les coefficients calculés par le logiciel Nemrodw [12] (tableau16) permettent d'écrire l'expression mathématique du modèle proposé.

Nom	Coefficient	F.Inflation	Ecart-Type	t.exp.	Signif. %
b0	5.0601884		2.1521807	0.00	100.0
b1	-14.2275	1.00	1.3179361	-10.80	0.0118 ***
b2	-5.69625	1.00	1.3179361	-4.32	0.756 **
b3	-6.88625	1.00	1.3179361	-5.23	0.340 **
b1-1	12.0725	1.01	1.9399494	6.22	0.157 **
b2-2	2.51	1.01	1.9399494	1.29	25.2
b3-3	1.8	1.01	1.9399494	0.93	39.6
b1-2	7.0825	1.00	1.8638431	3.80	1.26 *
b1-3	9.4625	1.00	1.8638431	5.08	0.384 **
b2-3	4.31	1.00	1.8638431	2.31	6.9

Tableau 16 : les coefficients du modèle

$$\text{Taux des pots mal scellés} = -14.22\,X_1 - 5.69\,X_2 - 6.88\,X_3 + 12.07\,X_1^2 + 7.08\,X_1X_2 + 9.46\,X_1X_3$$

L'examen de ces coefficients montre que

- La température de scellage et la pression du poinçon, influencent de manière significative sur le taux de pots mal scellé.
- Les interactions entre température de scellage / pression de poinçon et température de scellage / temps de scellage semblent être significativement influents.

❖ *Analyse de la régression pour la réponse Y1*

Le tableau17généré par le logiciel Nemrodw ci-dessous donne les résultats de l'analyse de la variance en regroupant les différentes sources de variation :

- La variation due à la régression
- La variation résiduelle

Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carré moyen	Rapport	Signif
Régression	3.44099	9	3.82333	27.5146	0.0977 ***
Résidus	6.94782	5	1.38956		
Total	3.51047	14			

Tableau 17: Analyse de Variance (ANOVA 1 et ANOVA 2) [12]

L'analyse de la variance montre que :

- ANOVA 1 validé (P=0.09<5%), donc le modèle est **descriptif.**
- ANOVA 2 ne peut pas être calculé suite à sa valeurs significativement différente de la norme donc le modèle **n'est pas prédictif**.

Cela signifie que notre modèle ne peut pas être utilisé pour prédire la réponse de la machine pour des réglages autres que ceux testé expérimentalement.

b) *Calcul des coefficients du modèle et test d'influence des facteurs pour la réponse Y2 (taux de pots difficilement pelable).*

Nom	Coefficient	F.Inflation	Ecart-Type	t.exp.	Signif. %
b0	6.5466667		5.4527861	1.20	28.4
b1	3.78875	1.00	3.3391359	1.13	30.8
b2	6.05625	1.00	3.3391359	1.81	12.9
b3	4.3875	1.00	3.3391359	1.31	24.6
b1-1	-6.2795833	1.01	4.915075	-1.28	25.7
b2-2	4.2304167	1.01	4.915075	0.86	42.9
b3-3	5.5329167	1.01	4.915075	1.13	31.1
b1-2	-1.1625	1.00	4.7222513	-0.25	81.5
b1-3	-0.67	1.00	4.7222513	-0.14	89.3
b2-3	3.69	1.00	4.7222513	0.78	47.0

Tableau 18 : Estimation et statistique des coefficients [12]

Les coefficients calculés (tableau 18) ne sont pas significatif par conséquent l'équation mathématique sera de cette forme

Taux de mal scellé = 0

L'analyse de la variance pour la réponse Y2

Le tableau 19 donne les résultats de l'analyse de la variance en regroupant les différentes sources de variation :

Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carré moyen	Rapport	Signif
Régression	9.72464	9	1.08051	1.2114	43.8
Résidus	4.45993	5	8.91986		
Validité	3.90313	3	1.30104	4.6732	18.1
Erreur	5.56805	2	2.78402		
Total	1.41846	14			

Tableau 19 : Analyse de Variance (ANOVA 1 et ANOVA 2) réponse Y2

L'analyse de la variance montre que :

ANOVA 1 n'est validé (P=43.8>5%), donc le modèle n'est pas descriptif.

ANOVA 2 est validé (P=18.1>5%), donc le modèle est prédictif.

Cela signifie que notre modèle adopté, en se basant sur le plan de Box Behnken des facteurs influents, ne peut pas être utilisé pour décrire la réponse de la machine pour des réglages théorique. Les facteurs non contrôlables détectés au départ peuvent être à l'origine de la défaillance de ce modèle. Ses facteurs aux effets

importants et non étudiés entrainent une variation des réponses non quantifiées et par conséquent, rend impossible l'exploitation de ce plan d'optimisation.

6 Conclusion

Les études menées par l'application des plans d'expériences pour optimiser la qualité du scellage des pots jarre format 600g, ont été effectué en deux parties.

La première, vise le criblage des facteurs et a amené à évaluer les influences sur chacune des deux réponses (Y1 : taux des pots mal scellé et Y2 : pourcentage des pots difficilement pelable). Ceci a permis de prédire les modalités optimales de ses 5 facteurs: temps d'attente avant l'alimentation en pression, temps d'alimentation en pression, temps d'attente avant scellage, temps d'attente avant aération, temps d'aération,

La deuxième avait pour objectif l'étude par les plans d'optimisation des 3 trois facteurs à effets inversés sur les deux réponses.

Après avoir traité les résultats des essais obtenus par le plan de Box-Behnken il s'est avéré que le modèle postulé la réponse Y1 est descriptif mais pas prédictif et le modèle postulé pour la réponse Y2 est prédictif mais pas descriptif ce qui empêche de les utilisés pour la recherche de l'optimum par la méthode de désirabilité.
Ceci est probablement causé par l'influence des facteurs non contrôlables identifiés au départ de l'étude. Entrainent une variation des réponses non quantifiées et par conséquent, rend impossible l'exploitation des plan d'optimisation.

Il est à noter que la moyenne des résultats obtenus par les trois essais au centre (13,14 ,15 tableau 15),représente une optimisation notable soit un taux des pots mal scellés de 0% et un taux de pots difficilement pelable avoisinant les 5 %.
Sur le plan pratique l'obtention de ses résultats reviens a adoptés le réglage suivant

- ✓ une température de scellage de 167.50 °C,
- ✓ un temps de scellage de 1,25 S
- ✓ une pression de poinçon de 3,5 bars ;

CONCLUSION GENERALE

L'objet de ce travail a été d'améliorer la qualité du scellage des pots dans la ligne de conditionnement des produits jarre de format 600 g. Le taux de pots mal scellés moyen devait être de l'ordre de 0 % à la sortie de la machine et un pourcentage de pots mal scellés variant entre 0 et 2 %.

Le criblage des facteurs température de scellage (b1), temps d'attente avant l'alimentation en pression (b2), temps d'alimentation en pression(b3), temps d'attente avant scellage (b4), temps de scellage (b5), temps d'attente avant aération (b6), temps d'aération (b7),pression de poinçon (b8), a démontré que la température de scellage, le temps de scellage, la durée d'attente avant l'alimentation en pression et la pression du poinçon sont des facteurs à grande influence sur la qualité de scellage.

L'application du plan de criblage et d'optimisation sur la thermoscelleuse Waldner a permis de trouver les modalités des paramètres donnant un pourcentage de pots mal scellé et de pots difficilement pelable répondant aux objectifs fixés préalablement. Ainsi, on recommande à la fromagerie de travailler avec :

- ✓ une température de scellage de 167.50 °C,
- ✓ un temps de scellage de 1,25 S
- ✓ une pression de poinçon de 3,5 bars ;
- ✓ une durée d'attente avant l'alimentation en pression de 0.3 S,
- ✓ une durée l'alimentation en pression de 0.1 S,
- ✓ une durée d'attente avant scellage de 0.3 S,
- ✓ une durée d'attente avant aération de 0.5 S
- ✓ une durée d'aération 0.3 S.

Ce nouveau réglage obtenu permettra à l'entreprise :

- ➢ Une économie d'énergie et de temps en évitant le re-scellage des pots ;
- ➢ L'obtention de produit d'une qualité régulière répondant aux besoins des clients ;
- ➢ une diminution des contrôles de la qualité de scellage à la chaine de conditionnement.

Afin d'avoir une meilleure qualité de scellage, on recommande également à l'entreprise de prendre en considération les éléments suivants :

- l'entretient du dispositif de centrage des pots ;
- Le nettoyage régulier des têtes de scellage ;
- l'exigence de la qualité des pots au près du fournisseur.

Apres l'achèvement de ce travail nous avons fixé en perspective, pour la ligne jarre une deuxième étude dans un domaine plus élargie pour les facteurs contrôlable. Ensuite la poursuite de la démarche d'amélioration continue par l'application de ce savoir-faire sur un deuxième format de 230g touché par le problème de scellage puis sur la ligne de conditionnement Kiri Douceur de Jben, ceci pendant un stage d'été prévue en début du mois.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES & WEBOGRAPHIQUES

[1] « food magazine » n° 35 du 15 juill au 15 sept 11.

[2] « operateurs, euromonitor international».

[3] « documents internes de la Fromageries Bel Maroc ».

[4] « fabrication du fromage fondu » techniques de l'ingénieur, traité agroalimentaire (f6 310) par Jean-luc Boutonnier

[5] « le lait et les produits laitiers dans la nutrition humaine » archives de documents de la FAO chapitre 6 fromages.

[6] « tout sur le thermoscellage»
http://www.embatherm.com/accueil.html(18/03/2013)

[7] « thermoscelleuse automatique pour scellage d'opercules pre-decoupes : série 180»
http://www.usinenouvelle.com/expo/thermoscelleuse-automa-p144235.html(le18/03/2013)

[8] techniques de l'ingénieur, traite analyse et caractérisation Rachid sabre p2

[9] Stéphane vivier, thèse doctorale « stratégies d'optimisation par la méthode des plans d'expériences et application aux dispositifs électrotechniques modélises par éléments finis » - chapitre 1 - Ecole Centrale de Lille Université des Sciences et Technologies de Lille 2002.

[10]goupy j. plans d'expériences. p230, traité analyses et caractérisations, les techniques de
L'ingénieur 1997.

[11] goupy j, creighton l. introduction aux plans d'expériences. 3ième édition Paris : dunod, 2006, 324 p.

[12] logiciel Nemrodw version 2007_03

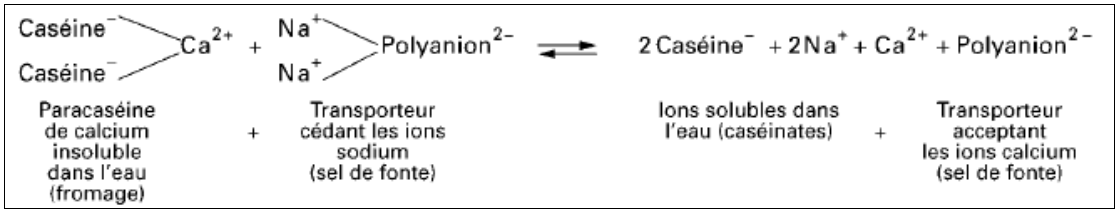
ANNEXE 1

➢ L'échange d'ions

Le mélange est difficile à obtenir car d'une part, le réseau protéique qu'est le fromage est insoluble dans l'eau et d'autre part, l'eau et l'huile ne sont pas miscibles. Par ailleurs, on sait que les molécules de caséine natives sont des émulsifiants naturels qui perdent leur pouvoir tensioactif dans le fromage uniquement par pontage avec des ions bivalents tels que le calcium et le magnésium.

Par conséquent, afin que la caséine puisse jouer parfaitement son rôle d'abaissement de la tension à l'interface entre l'eau et l'huile, il faut d'abord la solubiliser dans l'eau. Cette solubilisation nécessite un processus d'échange d'ions bivalents, agents de pontage des chaînes protéiques, par des cations monovalents de base plus forte, de telle sorte que les points de liaison du calcium soient ionisés et hydratés dans les zones plus hydrophiles de la molécule de caséine. C'est ainsi qu'avec un apport de sodium sous forme de citrates, d'orthophosphates ou de polyphosphates notamment, on génère l'apparition d'ions caséinates qui sont d'excellents émulsifiants« huile dans eau » fabriqués à partir des matières premières en présence.

Le mécanisme chimique est le suivant : le sel dissous pénètre dans les espaces inter micellaires remplis de phosphate de calcium colloïdal, il abaisse la concentration en calcium (Ca^{2+} +HPO_4^{2-} –›$CaHPO_4$) et il neutralise avec les ions sodium les charges négatives des caséinates de calcium qui ainsi se libèrent. L'échange de cations polyvalents réticulant (Ca^{2+}) contre des cations monovalents (Na+) déclenche la séparation des chaînes peptidiques ou des submicelles de paracaséine. Chacun des ions sodium s'entoure d'un cortège de molécules d'eau, de même que les groupes carboxyles polaires. Alors, l'eau éventuellement disponible passe entre les submicelles de caséine k, c'est-à-dire que les sels de fonte exercent sur le système protéique une action peptisante et dispersante [4].



➢ Le Crémage

Les réseaux formés par les micelles de caséine qui se sont regroupées se dissolvent sous l'action des sels de fonte et sont décomposés en particules dont la taille est voisine de celles des submicelles de caséine. Par la suite, celles-ci sont dispersées dans la phase aqueuse. Le fromage perd donc une partie de sa structure, il est transformé de gel en sol (solution colloïdale).

Au cours de la fonte, la teneur en eau libre commence par diminuer en raison de l'affinité croissante des protéines pour l'eau, puis elle augmente à nouveau du fait de l'affaiblissement du pouvoir d'hydratation des groupes hydrophiles aux températures élevées.

Dans les cas extrêmes, il y a formation d'émulsions grasses dans des solutions de paracaséinate et dans ce cas, les nouvelles micelles produites doivent théoriquement être plus grandes que les submicelles de caséine parce que le rapport surface hydrophile/surface hydrophobe a été diminué par la séparation de la fraction glycomacropeptide lors de l'emprésurage.

Dans la pratique, on n'atteint que très rarement ce stade. En effet, un système dans lequel les liaisons entre les submicelles de paracaséine seraient entièrement dissoutes ne serait plus constitué que par une émulsion de matière grasse concentrée et homogène entre des submicelles de paracaséinate et des globules gras intacts, avec inclusions de sels, fragments de protéines, etc. Par conséquent, un tel système conduirait à une pâte très « courte » sans aucune ressemblance à un fromage. Ce phénomène de dissolution excessive bien connu des professionnels est appelé le surcrémage.

Le processus de crémage est lié à une modification de plus en plus rapide de la viscosité de la fonte. Si, durant la fabrication du fromage fondu, les globules de matière grasse sont de plus en plus fragmentés par action mécanique et si leur surface s'en trouve ainsi augmentée et émulsifiée par une couche de caséinate en liaison avec la phase aqueuse, alors la viscosité de la fonte changera. Il en va de même pour la coagulation et la séparation des phases auxquelles il faut s'attendre en cas de surcrémage.

Étant donné que les interactions hydrophobes sont très importantes dans le système du fromage fondu, il faut s'attendre à ce qu'il présente des structures et des viscosités très particulières dans des plages de températures élevées, il ne se produit

plus d'interactions hydrophobes dans les systèmes protéine/eau. C'est ce qui explique l'extrême fluidité du fromage fondu obtenu après une stérilisation UHT (ultra-haute température). Pour cette raison, on positionne après le refroidissement postérieur au traitement UHT une phase de post-crémage permettant de redonner à la pâte une consistance plastique et lisse, par le biais du rétablissement à plus basse température d'interactions hydrophobes. Dans le cas de fromages fondus tartinable, la pâte doit crémer lors de la fonte mais seulement de façon limitée et contrôlée.

Ce processus de dissolution et de dispersion des micelles de paracaséine en submicelles doit être prolongé jusqu'au point où la masse devient crémeuse mais non pas « courte ». La possibilité d'une intervention chimique à ce niveau réside dans le bon choix des sels de fonte ; on a remarqué ainsi que les mélanges de phosphates et de citrates avaient un pouvoir de dissolution du gel inférieur aux phosphates utilisés seuls [4].