

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية
Université de Ghardaïa



كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie

N° d'enregistrement

/...../...../...../...../.....

Département d Sciences et de la Technologie

République Algérienne Démocratique et populaire

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Master

Domaine : : Sciences et Technologie
Filière : Electromécanique
Spécialité : Maintenance industrielle

Thème

Etude et simulation des performances d'un pasteurisateur de lait par un échangeur

Thermique à plaques

Laiterie ALOUANI SAFI SAID – Belghanem - Ghardaïa

Présenté par : Mousselmal Yahia / Kerrouchi Hadj Nacer

Devant le jury composé de :

BOUSNANE Toufik	MCB	Univ. Ghardaïa	Président(e)
KHEIRANES Massoud	MCA	Univ. Ghardaïa	Examineur
BELAGUITH Abdelhakim	MCB	Univ. Ghardaïa	Examineur
ZITANI Brahim	MCB	Univ. Ghardaïa	Encadreur

Année universitaire 2024/2025

الملخص:

تمثل هذه المذكرة بحث علمي ونظري حول أداء مبادل حراري لוחي يُستخدم في بسترة الحليب في شركة العلواني-صافي للألبان في غرداية. بالتزامن مع عمليات المحاكاة الرقمية باستخدام برنامجي COMSOL Multiphysics 6.3 و Aspen HYSYS، تغطي مفاهيم نظرية المتعلقة بطرق وتقنيات البسترة وأنواع المبادلات الحرارية.

صُمم نموذج ثلاثي الأبعاد للمبادل الحراري باستخدام COMSOL، لدراسة تحليل توزيع درجة الحرارة، وخطوط التدفق، والضغوط الداخلية. كما أُجريت محاكاة حرارية مفصلة باستخدام HYSYS للتنبؤ باستهلاك الطاقة وكفاءة استعادة الحرارة في النظام.

الكلمات المفتاحية:

الحليب، البسترة، المبادل الحراري اللوح، شركة الألبان العلواني صافي – غرداية، المحاكاة الرقمية COMSOL Multiphysics و Aspen HYSYS، توزيع درجة الحرارة، خطوط التدفق، الضغوط الداخلية، استهلاك الطاقة، كفاءة استرجاع الحرارة.

Résumé :

Cette thèse présente une étude scientifique et théorique des performances d'un échangeur de chaleur à plaques utilisé pour la pasteurisation du lait à la laiterie Al-Alouani-Safi de Ghardaïa. Associé à des simulations numériques utilisant COMSOL Multiphysics 6.3 et Aspen HYSYS, il aborde les concepts théoriques liés aux méthodes et techniques de pasteurisation et aux types d'échangeurs de chaleur.

Un modèle tridimensionnel de l'échangeur de chaleur a été conçu avec COMSOL pour étudier la distribution de température, les lignes d'écoulement et les pressions internes. Une simulation thermique détaillée a également été réalisée avec HYSYS afin de prédire la consommation énergétique et l'efficacité de récupération de chaleur du système.

Mots-clés :

Lait, Pasteurisation, Échangeur de chaleur à plaques, Laiterie Alouani Safi – Ghardaïa, Simulation numérique, COMSOL Multiphysics 6.3, Aspen HYSYS, Distribution de température, Lignes d'écoulement, Pressions internes, Consommation énergétique, Efficacité de récupération de chaleur

Abstract:

This thesis presents a scientific and theoretical study of the performance of a plate heat exchanger used for milk pasteurization at the Al-Alouani-Safi dairy in Ghardaïa. Combined with numerical simulations using COMSOL Multiphysics 6.3 and Aspen HYSYS, it addresses theoretical concepts related to pasteurization methods and techniques, as well as heat exchanger types.

A three-dimensional model of the heat exchanger was designed using COMSOL to study the temperature distribution, flow paths, and internal pressures. A detailed thermal simulation was also performed using HYSYS to predict the system's energy consumption and heat recovery efficiency.

Keyword:

Milk, Pasteurization, Plate heat exchanger, Al-Alouani-Safi dairy – Ghardaïa, Numerical simulation, COMSOL Multiphysics 6.3, Aspen HYSYS, Temperature distribution, Flow paths, Internal pressures, Energy consumption, Heat recovery efficiency

Remerciement

Avant de présenter ce travail, nous tenons à remercier ALLAH tout puissant, de nous avoir permis d'arriver à ce niveau d'étude, et aussi pour nous avoir donné beaucoup de patience et de courage sans oublier nos parents qui n'ont lésiné sur aucun problème pour nous apporter toute l'aide nécessaire pour atteindre ce niveau qui nous permettra d'assurer notre avenir.

A travers cette modeste thèse nous tenons à présenter nos sincères remerciements et notre profonde reconnaissance à notre aimable encadreur Mr. ZITANI Brahim Qui a bien voulu nous encadrer.

Je tiens à transmettre mes remerciements les plus chaleureux à Monsieur le président jury et également à tous les membres du jury pour avoir accepté de participer à l'évaluation de ce modeste travail.

Nous exprimons nos reconnaissances à tous les enseignants de la faculté des Sciences et de la Technologie pour la bonne formation de base que nous avons bénéficiés auprès de vous.

Dédicace

Nous dédions cet acte modeste en particulier à :

Nos parents, qui ont consacré leur vie pour nous, pour leur soutien, leur patience et leur tendresse.

A nos frères et sœurs bien-aimés qui nous ont encouragés tout au long de nos études. Et à tous ceux qui nous sont liés. A tous nos amis proches.

A tous nos collègues du Département de génie mécanique, notamment dans le domaine électromécanique.

CHAPITER I : Généralités sur le stage pratique dans laiterie El Alouani Saïd – Safi.....	14
I.1. Définition de la Laiterie EL Alouani- SAFI :	17
I.2.La structure organisationnelle de la laiterie El Alouani-SAFI :	17
I.3.production :	20
I.4.Emploi :	21
I.5. Description de stage pratique dans laiterie EL Alouani :	23
I.6.Le processus de fabrication :	23
I.6.1. Collecte et transport du lait :	23
I.6.2. Prétraitement du lait cru :	23
I.6.3. Pasteurisation :	24
I.6.4. Contrôle qualité et sécurité alimentaire :	24
I.6.5. Produits finis : Lait, fromage et laits spéciaux :	24
CHAPITER II: Généralités sur la pasteurisation	24
II.1. Définition de la pasteurisation :	25
II.2. Les Types de pasteurisation :	26
II.2.1. Pasteurisation haute température courte durée (HTST) :	26
II.2.2. Pasteurisation longue durée à basse température (LTLT) :	27
II.2.3. Ultra-Pasteurisation (UHT) :	27
II.2.4 Autre type de pasteurisation :	28
II.3. Paramètres de pasteurisation :	28
II.3.1. Lait pasteurisé :	28
II.4. Fabrication du lait pasteurisé :	28
II.4.1. Reconstitution :	29
II.4.2. Recombinaison :	29
II.4.3. Conditionnement :	29
II.4.4. Conservation :	29
II.5. Applications de la pasteurisation :	31

II.5.1. Industrie alimentaire :	31
II.5.2. Industrie pharmaceutique :	32
II.5.3. Industrie cosmétiques :	32
II.6. Échangeurs thermiques à plaques :	32
II.6.1. Définition :	32
II.6.2. La structure d'un échangeur a plaque :	33
II.6.3. Principe de fonctionnement d'un échangeur à plaques :	34
II.6.4. Types d'échangeurs de chaleur à plaques :	36
II.6.4.1 Échangeurs de chaleur à plaques brasées :	36
II.6.4.2 Échangeurs de chaleur à plaques soudées :	39
II.6.4.3 Échangeurs de chaleur à plaques et joints :	40
II.7. Analyse comparative des échangeurs de chaleur :	41
II.7.1. Échangeur de chaleur à plaques :	41
II.7.2. Échangeur tubulaire (Tube-in-Tube ou Shell-and-Tube) :	42
II.7.3. Échangeur de chaleur à surface raclée :	42
II.7.4. Échangeur de chaleur multitubulaire.....	43
CHAPITER III: Simulation d'échangeur à plaque sur COMSOL Multiphysics 6.3.....	42
III.8. Présentation sur logiciel COMSOL Multiphysics :	45
III.8.1. Domaines principaux :	45
III.8.1.1. Électromagnétisme :	45
III.8.1.2. Mécanique des structures :	45
III.8.1.3. Acoustique :	46
III.8.1.4. Mécanique des fluides numérique (MFN) :	46
III.8.1.5. Transfert de chaleur :	46
III.8.1.6. Electrochimie et génie chimique :	46
III.8.1.7. Interactions multiphysiques :	46
III.8.2. Exemples sur les domaines :	47

III.9. Modalisation de l'échangeur :	48
III.9.1. Dessin de L'échangeur de chaleur :	48
III.9.2. Ajouter des matériaux :	50
III.9.3. Transfers de chaleur des fluides:	52
III.9.3.1.Interface physique utilisée :	52
III.9.3.2Propriétés thermo physiques des fluides :	51
III.9.3.3. Conditions aux limites (Bondaroy Conditions) :	53
III.9.4. Flux Laminar (LAMINAR FLOW) :	54
III.9.4.1Écoulement laminaire (LAMINAR FLOW) :	54
III.9.5. Maillage d'application (MESH) :	55
III.9.6. Les résultats de simulation :	56
CHAPITER IV: Simulation dans logiciel HYSYS.....	58
IV.1. Définition du logiciel Aspen HYSYS :	61
IV.1.2. Présentation du logiciel Aspen HYSYS :	61
IV.1.3. Domaines d'application.....	61
IV.1.4. Les Exemples de Simulation	62
I.V.2 La simulation de système de pasteurisation :	63
IV.2.1. Hypothèses et données de base.	63
IV.2.2 Données principale extraites d'HYSYS :	64
IV.2.3. Calcul de l'énergie thermique par zone :	64
IV.2.4. Importance et utilité de ces calculs :	66
V.1. Analyse thermique du système :	68
V.2. Étude des contraintes mécaniques et de l'écoulement :	68
V.3. Optimisation de la géométrie de l'échangeur de chaleur :	69
V.4. Impact économique et énergétique :	69
. V.5. Impact de l'amélioration COMSOL sur l'efficacité globale :	70

LISTE DES FIGURES

Fig01 : Organigramme de la laiterie de EL ALOUANI-SAFI.....	14
Fig02 : Soutien à la production.....	17
Fig03 : Représente la pasteurisation du lait.....	21
Fig04 : Diagramme de fabrication du lait pasteurisé.....	26
Fig05 : Échangeur thermique à plaque.....	28
Fig06 : : la structure de la plaque.....	30
Fig07 : : Représentation schématique du pasteurisateur.....	31
Fig08 : Échangeurs à plaques brasées.....	34
Fig09 : Échangeur à plaque soudée.....	35
Fig10 : Échangeur à plaque et joint.....	36
Fig11 : visualisation 3D d'un engrenage dans COMSOL.....	42
Fig12 : simulation thermique 3D d'un moteur électrique dans COMSOL.....	42
Fig13 : domaine de travail.....	43
Fig14 : première plaque de l'échangeur.....	43
Fig15 : les orifices d'entrée et des sorties.....	44
Fig16 : le vide crée.....	44
Fig17 : la forme finale de la plaque.....	45
Fig18 : les plaques après fonction ARRAY.....	45
Fig19 : présente les matériaux (eau et lait).....	46
Fig20 : Présente les transferts de chaleur des fluides.....	47
Fig21 : Laminar flux de l'échangeur.....	49
Fig22 : Maillage de l'échangeur.....	50
Fig23 : comparaison de la pression sur les surfaces supérieure et inférieur.....	51

Fig24 : contours isothermes de la température à l'intérieur de l'échangeur	51
Fig25 : le champ de vitesse avant optimisation.....	52
Fig26 : carte de l'optimisation de la géométrie de l'échangeur.....	52
Fig27 : lignes de courant de fluide dan l'échangeur.....	53
Fig28 : schéma de structure générale de Aspen HYSYS.....	54
Fig29 : Simulation dynamique d'une colonne de distillation avec Aspen HYSYS.....	57
Fig30 : Simulation de la distillation atmosphérique du pétrole brut dans Aspen HYSYS Analyse des rendements et des coupes.....	57
Fig31 : Schéma HYSYS du système de pasteurisation.....	58

LISTE DES TABLEAUS

Tableau 01 : Quantité de produits fabriqués quotidiennement Quantité produite.....	15
Tableau 02 : Quantités collectées et capacité journalière conditionnée.....	16
Tableau 03 : Montre le nombre de travailleurs et la production matérielle au cours de la période de 2013 à 2021.....	16
Tableau 04 : Représente les pourcentages et les quantités de distribution de lait dans les communes de Ghardaïa et des wilayas voisines.....	16
Tableau 05 : Représente les pourcentages et les quantités de distribution du lait naturel de vache dans les communes de Ghardaïa et des wilayas voisines.....	17
Tableau 06 : Différents barèmes de la pasteurisation.....	22
Tableau 07 : Durée de vie du lait en fonction des traitements thermiques.....	27
Tableau 08 : Propriétés de l'eau chaude (à 80°C)	46
Tableau 09 : Propriétés du lait (à 10°C)	46
Tableau 10 : caractéristique thermique et flux de chaleur des liquides.....	58
Tableau 11 : données principale extraites de HYSYS.....	63

LISTE DES GRANDEUR PHYSIQUE

Masse= kg

Longueur= m

Temps= s

Vitesse= m/s

Accélération= m/s²

Température (degrés Celsius)= °C

Température absolue (Kelvin)= K

Débit volumique= L/s

Débit massique =kg/s

Énergie (Joule) =J

Énergie (kilowattheure) =kWh

Puissance =W

Puissance (kilowatt)= kW

Chaleur spécifique =J/kg·K

Chaleur spécifique (kilojoule par kg par Kelvin) =kJ/kg·K

Viscosité dynamique= Pa·s

Densité= kg/m³

Conductivité thermique =W/m·K

Pression= Pa

Pression (kilopascal)= kPa

Surface= m²

Coefficient global de transfert thermique =W/m²·K

Différence de température ΔT =(°C)

Épaisseur / diamètre =mm

Introduction Générale

La consommation de produits laitiers pasteurisés est aujourd'hui une nécessité sanitaire incontournable. Le lait, en tant que produit hautement nutritif, est également très périssable et sensible à la contamination microbienne. Pour garantir sa sécurité tout en préservant ses qualités nutritionnelles, la pasteurisation constitue une étape cruciale dans la chaîne de transformation du lait.

Dans ce contexte, les échangeurs de chaleur à plaques sont largement utilisés dans l'industrie laitière pour leur efficacité en matière de transfert thermique, leur faible encombrement et leur facilité d'entretien. Ces systèmes permettent un traitement thermique rapide et contrôlé du lait, avec une consommation énergétique optimisée.

Le présent projet de fin d'études, réalisé dans le cadre d'un stage au sein de la laiterie Alouani, porte sur la modélisation et la simulation 3D d'un échangeur de chaleur à plaques pour la pasteurisation du lait, à l'aide du logiciel **COMSOL Multiphysics 6.3**. Ce travail vise à analyser les transferts de chaleur et les écoulements internes afin d'optimiser les performances thermiques de l'équipement.

L'objectif principal est d'optimiser l'efficacité thermique de l'échangeur via une simulation COMSOL, tout en maintenant les propriétés nutritionnelles de lait.

Le rapport est structuré en plusieurs chapitres. Les trois premiers, présentés ci-dessous, posent les bases du travail réalisé.

Chapitre I : Présentation générale de la laiterie Alouani

Ce premier chapitre introduit le cadre industriel du projet. Il présente la laiterie Alouani, ses activités principales, son organisation, ses équipements et sa stratégie de production. Une attention particulière est accordée à la chaîne de transformation du lait, de la réception jusqu'au conditionnement des produits finis (lait pasteurisé, fromage, yaourt, etc.).

Le chapitre met également en évidence le rôle du stagiaire dans les différentes étapes du traitement thermique, avec une immersion pratique dans les procédés de pasteurisation et dans l'utilisation des échangeurs de chaleur à plaques.

Chapitre II : Généralités sur la pasteurisation et les échangeurs de chaleur.

Ce chapitre développe les fondements théoriques liés au traitement thermique du lait. Il explique les objectifs de la pasteurisation, les températures et durées typiques utilisées

(ex : 72 °C pendant 15 secondes), ainsi que ses effets sur la flore microbienne et les propriétés du lait.

La seconde partie est consacrée aux échangeurs de chaleur à plaques : principe de fonctionnement, structure, types de plaques, caractéristiques thermiques et hydrauliques. Les avantages de cette technologie dans l'industrie laitière sont soulignés, notamment en termes d'efficacité énergétique, de compacité et de maintenance.

Chapitre III : Étude de la modélisation d'un échangeur de chaleur à plaques

Ce chapitre constitue le cœur scientifique du projet. Il présente la démarche de modélisation d'un échangeur de chaleur à plaques en 3D, Les propriétés physiques du lait et du fluide caloporteur sont définies.

ainsi que les hypothèses de modélisation (écoulement laminaire ou turbulent, conditions aux limites, etc.). La géométrie de l'échangeur est également introduite, pour modélisation dans COMSOL Multiphysics

Chapitre IV : Simulation dans logiciel HYSYS

Ce chapitre a analysé les résultats obtenus par la simulation d'un échangeur thermique à plaques utilisé pour la pasteurisation du lait. L'objectif principal est d'évaluer la capacité de l'équipement à élever la température du lait jusqu'au seuil de pasteurisation tout en optimisant le rendement énergétique et la répartition des flux internes.

Chapitre V : Discussion des résultats.

Ce chapitre vise à analyser en profondeur les résultats issus des simulations menées dans les chapitres III et IV, respectivement via COMSOL Multiphysics 6.3 et Aspen HYSYS. À travers cette analyse comparative, nous mettrons en lumière les forces, limites et complémentarités de chaque approche, ainsi que leur pertinence industrielle pour le dimensionnement et l'optimisation d'un échangeur à plaques dédié à la pasteurisation du lait.

L'objectif de ce travail est d'étudier, à travers la modélisation numérique et la simulation thermique, l'efficacité d'un échangeur de chaleur à plaque utilisé dans la pasteurisation du lait, afin de proposer des pistes d'amélioration énergétique et structurelle.

Le but est de contribuer à la réduction de la consommation énergétique tout en maintenant la qualité de produit laitier.

Chapitre I : Généralités sur le stage pratique dans laiterie El Alouani Saïd – Safi.

I.1. Définition de la Laiterie EL Alouani- SAFI :

La Laiterie Al Safi est une unité de production et de commercialisation haut de gamme située dans la ville de Ghardaïa, spécialisée dans la production de lait et de produits laitiers. L'idée de créer une entreprise laitière est née d'une situation de pénurie de lait à laquelle la population est confrontée. L'entreprise espère répondre aux besoins locaux et devenir autonome à l'échelle provinciale [1].

- Date de création : L'organisation a été créée en 2003.
- Localisation : Située dans le district de Belghanem El Quorti, ville de Ghardaïa.
- Superficie de la zone de production laitière : 4 000 m².
- Certificat sanitaire : 47/08/05.
- Elle emploie actuellement 50 employés permanents et 9 cadres (3 techniciens, 3 chimistes, 3 administrateurs).
- Numéro de téléphone :

Tél. : 029.23.51.54 / Mobile : 06.61.61.61.71.

- La laiterie dispose de trois camions citernes de 3 000 litres pour le transport du lait des producteurs à la laiterie, et de huit camions frigorifiques pour la livraison et la distribution des produits aux détaillants. Deuxième exigence : la structure organisationnelle de la laiterie Al Safi [1].

I.2. La structure organisationnelle de la laiterie El Alouani-SAFI :

- **Directeur général** : Il est responsable des services de l'établissement. Il prend les décisions après consultation de son conseiller et dispose de pouvoirs étendus.
- **Directeur Général adjoint** : Il est l'adjoint du directeur général et a un rang hiérarchique inférieur à celui-ci. Ses pouvoirs sont limités.
- **Directeur** : Il exécute les décisions du directeur général et de son adjoint et donne des instructions aux employés et aux superviseurs.
- **Service de la production** : Il est responsable de la coordination et de la gestion de la fabrication des produits et de la fluidité des opérations entre les différentes lignes de production.

- **Service des finances** : Il est responsable de la gestion des livres et comptes financiers.
- **Service des fournisseurs** : Il est responsable de l'importation du lait des producteurs laitiers dans les exploitations agricoles.
- **Service commercial** : Responsable de la gestion des ventes, de l'étude de la demande, du suivi des commandes clients et de leur livraison.
- **Service administratif** : Responsable des relations avec les employés et du suivi des questions administratives.
- **Service contrôle qualité** : Responsable du suivi et du contrôle dans le laboratoire la qualité des produits et leur conformité aux standards et spécifications sanitaires et sécurité alimentaires.
- **Service maintenance** : Responsable du suivi et de l'entretien des équipements de l'usine.

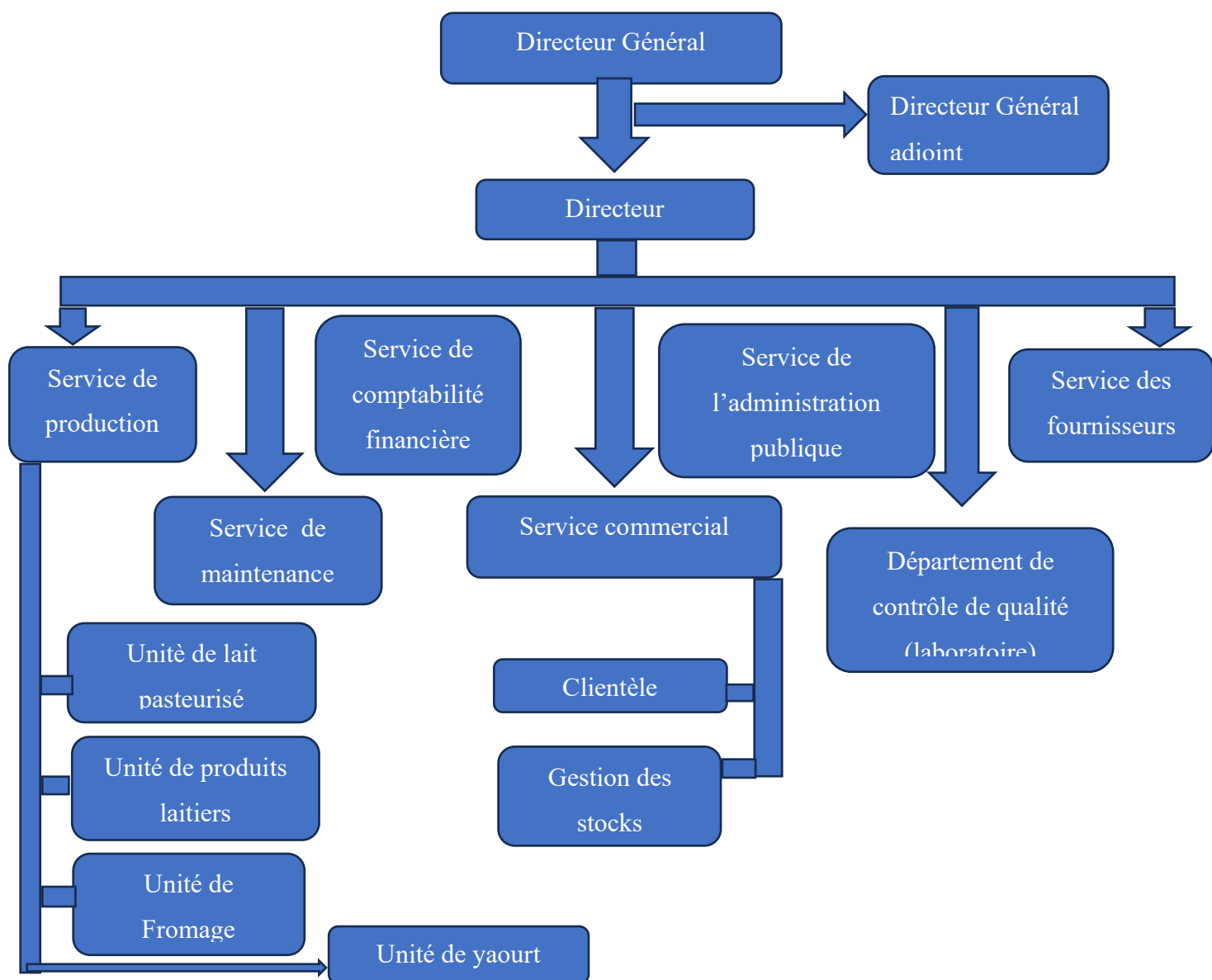


Fig01 : Organigramme de la laiterie de EL ALOUANI-SAFI.

I.3.production :

Tableau 01 : Quantité de produits fabriqués quotidiennement Quantité produite [1]

Produit	Quantité
lait entier pasteurisé	18000 L/Jour
lait partiellement écrémé pasteurisé	4000 L/Jour
lait entier (de chèvre) pasteurisé	3000L/Jour
lait reconstitué pasteurisé	30000L/Jour
RAIB nature conditionné pasteurisé	6000 L/Jour
LBEN nature conditionné pasteurisé	6000 L/Jour
beurre fermier naturel pasteurisé	500kg/Jour
beurre blanc naturel	100kg/Jour
fromage blanc (Kamaria)	120kg/Jour
Ghee fermière	100kg/Jour
crème fraîche	120kg/Jour
yaourt conditionné	1200pot/Jour
lait de chamelle	200L/Jour
Camembert	200L/Jour

Tableau 02 : Quantités collectées et capacité journalière conditionnée.

Variable	Quantité
capacité journalière de conditionnement	120000L/Jour
Ajustement moyen réalisé	60000L/Jour
lait total collecté	18000L/Jour
lait de chèvre collecté	3000L/Jour
lait de vache	15000L/Jour

I.4.Emploi :

Tableau 03 : Montre le nombre de travailleurs et la production matérielle au cours de la période de 2013 à 2021.

L' année	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Production	9299176	6534060	5410781	5108171	5636302	6378108	6353193	6993336	8203524
Employés	55	45	48	38	42	45	45	48	55

Tableau 04 : Représente les pourcentages et les quantités de distribution de lait dans les communes de Ghardaïa et des wilayas voisines.

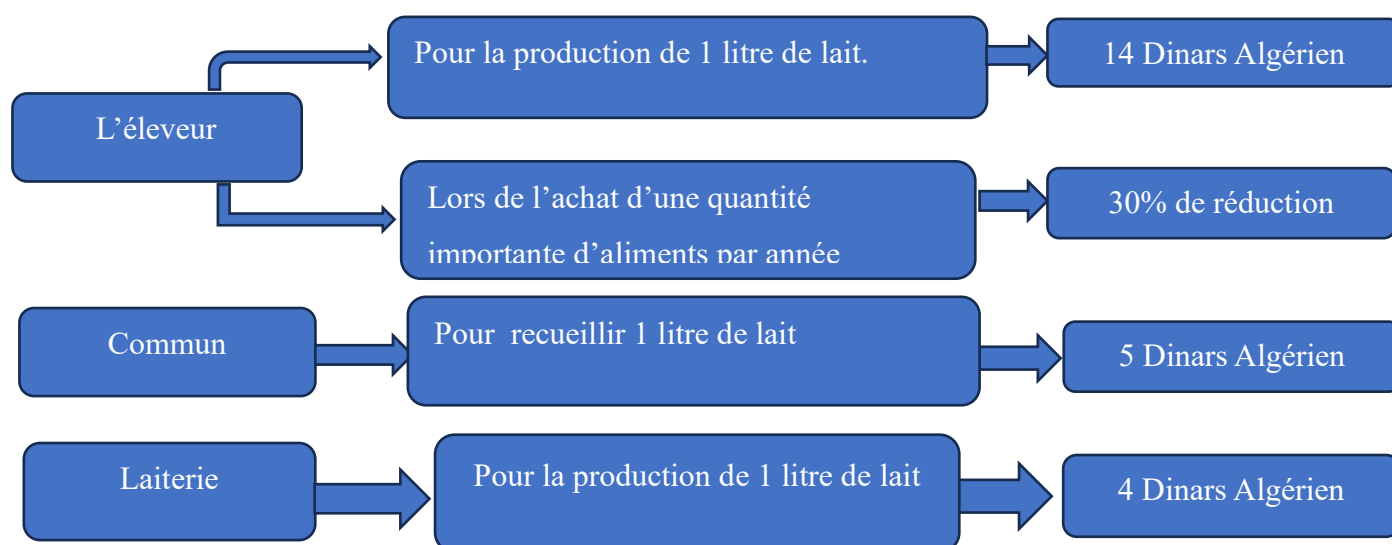
Distribution Du Lait		
Wilaya / Municipalité	Pourcentage	Quantité L/M
(BEREAU) GHARDAIA	29.90	739
GHARDAIA	9.90	245
BOUNOURA	10.50	259
EL ATAF	7.00	173
BERRIANE	12.50	309
MATLILI	6.20	153
ZALFANA	3.00	74

GUERARA	3.00	74
MNEA	0.00	0
WERGLA	18.00	445
TOTAL	100.00	2471

Tableau 05 : Représente les pourcentages et les quantités de distribution du lait naturel de vache dans les communes de Ghardaïa et des wilayas voisines.

Distribution Du Lait de vache		
Wilaya / Municipalité	Pourcentage	Quantité L/M
(BEREAU) GHARDAIA	29.90	99,778
GHARDAIA	9.90	33,037
BOUNOURA	10.50	35,039
EL ATAF	7.00	23,359
BERRIANE	12.50	41,713
MATLILI	6.20	20,690
ZALFANA	3.00	10,011
GUERARA	3.00	10,011
MNEA	0.00	0
WERGLA	18.00	60,067
TOTAL	100.00	333,705

Fig02 : Soutien à la production



I.5. Description de stage pratique dans laiterie EL Alouani :

Lors d'un stage à la laiterie EL Alouani, nous avons appris les bases du travail laitier depuis le début de la collecte du lait auprès d'un groupe de fermes et d'éleveurs de vaches jusqu'à la fabrication du lait et des produits laitiers comme produit final (lait de vache, lait de chèvre, lait de chamelle, fromages, etc.)

I.6. Le processus de fabrication :

Le processus de fabrication du lait implique une série d'opérations, et cela se déroule dans l'ordre suivant :

I.6.1. Collecte et transport du lait :

Tout commence par la collecte du lait auprès des éleveurs partenaires. Le lait est directement transféré dans des cuves réfrigérées pour éviter la prolifération bactérienne. Le lait est ensuite transporté jusqu'à l'usine dans des véhicules isothermes équipés de dispositifs de réfrigération.

Contrôle à la réception :

- Température
- Acidité (pH)
- Densité
- Test antibiotique
- Test organoleptique (odeur, couleur)

I.6.2. Prétraitement du lait cru :

Avant la pasteurisation, le lait subit plusieurs étapes préparatoires :

Filtration : Élimination des impuretés physiques.

Écrémage/Standardisation : Ajustement du taux de matière grasse pour obtenir le produit souhaité.

Homogénéisation : Réduction de la taille des globules gras pour éviter la séparation.

Ces traitements améliorent la stabilité du lait et sa qualité microbiologique.

I.6.3. Pasteurisation :

La pasteurisation est un traitement thermique doux visant à détruire les micro-organismes pathogènes (Salmonella, Listeria, Brucella, etc.) sans compromettre la valeur nutritionnelle du lait. Ce transfert de chaleur est assuré par un échangeur thermique à plaque.

I.6.4. Contrôle qualité et sécurité alimentaire :

La laiterie dispose d'un plan HACCP pour garantir la qualité. Des contrôles réguliers sont effectués :

- Examens microbiologiques (avant et après pasteurisation)
- Surveillance continue de la température
- Analyse des résidus (antibiotiques, produits d'entretien)
- Traçabilité totale des lots, de la collecte au produit fini

I.6.5. Produits finis : Lait, fromage et laits spéciaux :

Après pasteurisation, le lait peut être transformé de différentes manières :

1-Conditionnement direct :

en sachets, bouteilles ou briques.

2- Transformation :

- En fromage (coagulation, égouttage, affinage)
- En yaourt (ajout de bactéries lactiques)
- En laits spéciaux (chèvre, chamelle)
- Lait de chèvre : plus digeste, contient des acides gras à chaîne courte
- Lait de chamelle : apprécié pour ses propriétés thérapeutiques (antidiabétique, anti-inflammatoire)

Chapitre II : Généralité sur

La PASTEURISATION

II.1. Définition de la pasteurisation :

La pasteurisation est un procédé thermique utilisé pour réduire la charge microbienne des aliments liquides. Inventée par Louis Pasteur en 1862, la pasteurisation est un procédé de traitement thermique permettant de détruire les micro-organismes présents dans les aliments afin de prolonger leur conservation. La pasteurisation a révolutionné l'industrie agroalimentaire en garantissant la sécurité sanitaire des produits tout en préservant leur qualité.

Le contrôle de l'efficacité de la pasteurisation repose sur la détermination de l'activité de la phosphatase alcaline, une enzyme thermolabile détruite à des températures supérieures à 60 °C [1].

Le processus de fabrication du lait pasteurisé consiste en une série d'opérations strictement contrôlées visant à éliminer les bactéries pathogènes du lait cru et à préserver ses caractéristiques nutritionnelles et organoleptiques. Ces opérations comprennent le chauffage du lait à une température spécifique, suivi d'un refroidissement rapide, garantissant ainsi la sécurité alimentaire des consommateurs. [2]

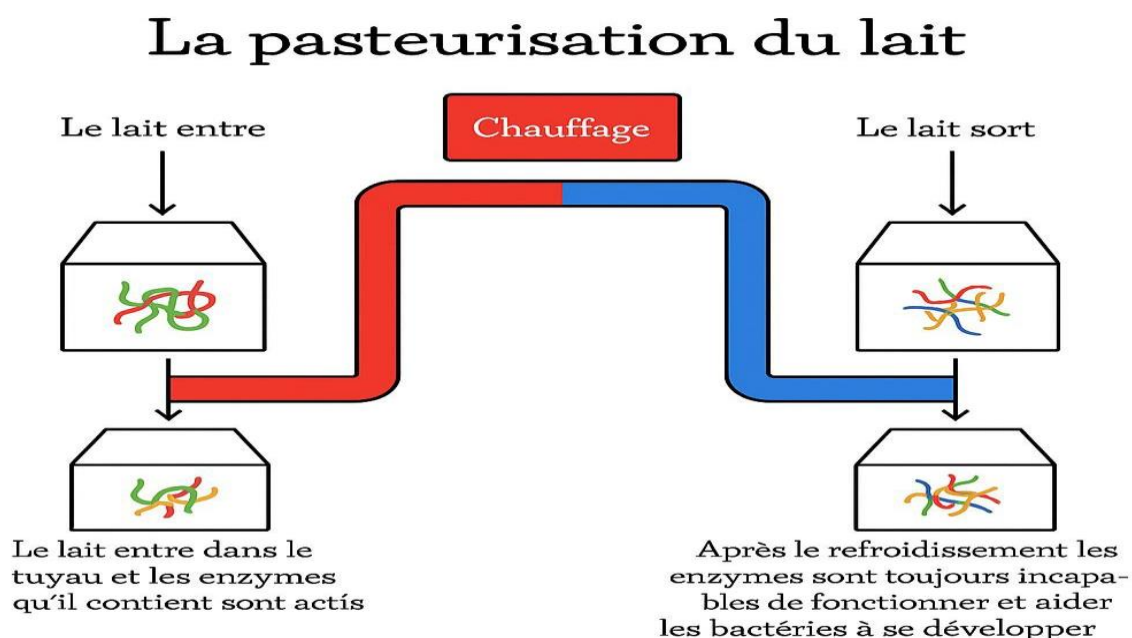


Fig03 : Représente la pasteurisation du lait

Température (°C)	Temps
63	30 minutes
72	15 secondes
89	1.0 s
90	0.5 s
94	0.1 s
96	0.05 s
100	0.01 s

Tableau 06 : Différents barèmes de la pasteurisation [3]

Remarque : Il ressort du tableau que l'augmentation de la température réduit la durée de conservation en raison de la destruction d'un plus grand nombre de bactéries, mais peut affecter la valeur nutritionnelle.

II.2. Les Types de pasteurisation :

II.2.1. Pasteurisation haute température courte durée (HTST) :

Description : Elle consiste à chauffer le lait à une température comprise entre 72 °C et 85 °C pendant 15 à 20 secondes. Elle est largement utilisée car elle permet d'éliminer les mauvaises bactéries, mais pas le goût du lait [4].

Avantages :

- Efficacité énergétique : Elle est plus économe en énergie que la pasteurisation basse température longue durée.
- Stockage : Elle permet de prolonger la durée de conservation des aliments lorsqu'ils sont conservés au réfrigérateur.
- Qualité du produit : Elle préserve la qualité et les caractéristiques nutritionnelles des aliments mieux que les autres méthodes de traitement thermique. [4]

Applications :

La pasteurisation HTST est généralement utilisée dans l'industrie agroalimentaire, notamment pour le lait, les jus de fruits et autres aliments liquides. Elle est particulièrement adaptée aux usines de transformation continue, où de grandes quantités de produits sont traitées dans un espace restreint.

II.2.2. Pasteurisation longue durée à basse température (LTLT) :

Définition : Elle consiste à chauffer le lait à 63 °C pendant 30 minutes. Bien que moins répandue de nos jours, elle est encore utilisée dans certains cas.[5]

Avantages :

- Conservation des qualités organoleptiques : La pasteurisation LTLT préserve plus efficacement les saveurs et les textures des aliments, car elle évite l'application d'une chaleur extrême, susceptible d'altérer ces propriétés.
- Impact nutritionnel réduit : Elle permet de conserver davantage de nutriments thermolabiles que les traitements à haute température.[5]

Applications :

La pasteurisation LTLT est essentiellement utilisée pour les produits laitiers et certains jus de fruits. Elle est peu utilisée dans l'industrie agroalimentaire contemporaine en raison de son inefficacité énergétique et de sa durée. [5]

II.2.3. Ultra-Pasteurisation (UHT) :

Définition : L'ultra-pasteurisation est une méthode de stérilisation du lait par traitement thermique à une température comprise entre 140 °C et 150 °C pendant 2 à 5 secondes. Ce procédé permet une conservation prolongée en l'absence de réfrigération. [6].

Avantages :

- Durée de conservation : Les produits UHT se conservent longtemps et peuvent être conservés à température ambiante pendant plusieurs mois sans réfrigération, ce qui est particulièrement avantageux pour la distribution et le stockage [7].
- Qualité préservée : Malgré une chaleur intense, la très courte durée du traitement préserve relativement bien les qualités nutritionnelles et organoleptiques du produit [7].

- Sécurité alimentaire : L’UHT élimine pratiquement tous les micro-organismes pathogènes, améliorant ainsi la sécurité alimentaire [7].

Utilisations :

L’ultra-pasteurisation est largement utilisée dans la transformation du lait, des jus de fruits et d’autres aliments liquides. Il est particulièrement adapté aux produits qui doivent être stockés pendant de longues périodes sans réfrigération [7].

II.2.4 Autre type de pasteurisation :

Stérilisation :

Le terme « lait stérilisé » désigne le lait préalablement conditionné dans un récipient hermétique, puis pasteurisé pendant 15 à 20 minutes à une température comprise entre 115 et 120 °C afin de détruire tous les germes susceptibles de s’y développer. Le lait est refroidi très rapidement. Il peut être conservé à température ambiante si le récipient n’est pas ouvert [8].

II.3. Paramètres de pasteurisation :

La conception des lignes de transformation du lait pasteurisé commercial varie considérablement d’un pays à l’autre, voire d’une laiterie à l’autre, en fonction de la législation locale. La standardisation des matières grasses peut être effectuée avant, après ou même pendant la pasteurisation [9].

II.3.1. Lait pasteurisé :

Le lait pasteurisé peut être obtenu à partir de lait animal naturel ou de lait reconstitué. Le lait pasteurisé est un lait soumis à un traitement thermique modéré (pasteurisation), détruisant plus de 90 % de la flore microbienne du lait [10].

II.4. Fabrication du lait pasteurisé :

La technologie utilisée pour la pasteurisation du lait n'est pas complexe ; sa production, et surtout sa commercialisation, sont soumises à des normes strictes afin de garantir l'absence de détérioration et de préjudice pour le consommateur [10].

Pour le lait pasteurisé produit à partir de poudre, des procédés supplémentaires sont inclus dans le schéma de production (Figure 2).

Les étapes de fabrication du lait recombiné sont les suivantes :

- Le lait en poudre est un produit microbiologiquement stable, dont l'activité de l'eau est comprise entre 0,3 et 0,4, ce qui est trop faible pour favoriser la croissance des micro-organismes. La croissance microbienne est favorisée par le lait reconstitué [11].

La matière grasse laitière anhydre est un produit obtenu exclusivement à partir de lait, de beurre ou de crème, par des procédés entraînant la quasi-élimination de l'eau et de la matière sèche non grasse. L'eau utilisée pour la fabrication du lait recombiné doit être potable et répondre aux normes bactériologiques, en plus des autres critères de potabilité de l'eau [12].

II.4.1. Reconstitution :

La reconstitution consiste à mélanger du lait en poudre et de l'eau pour rétablir le rapport eau/matière sèche initial [13].

II.4.2. Recombinaison :

La recombinaison consiste à mélanger du lait reconstitué et de la matière grasse laitière anhydre (MGLA) pour obtenir un produit aux propriétés similaires à celles du lait de vache. Le mélange de matière grasse et de lait reconstitué est homogénéisé à une température comprise entre 60 et 65 °C pour empêcher la remontée de la matière grasse dans le produit, puis le lait doit être pasteurisé et réfrigéré [12].

II.4.3. Conditionnement :

L'étape la plus critique est le conditionnement. En effet, le risque d'infection du lait pasteurisé par des microbes est élevé si les règles d'hygiène générales ne sont pas respectées et si le conditionnement n'est pas effectué rapidement. Le lait pasteurisé fermente, perd son goût ou coagule. [14].

II.4.4. Conservation :

La conservation prolongée du lait pasteurisé à des températures de réfrigération favorise la prolifération des bactéries psychrotrophes, ce qui peut entraîner de graves défauts de qualité dans l'industrie laitière. *Pseudomonas* a été identifié comme l'espèce bactérienne dominante contaminant le lait pasteurisé en fin de conservation, lorsqu'il est conservé à une température de 4 °C [15].

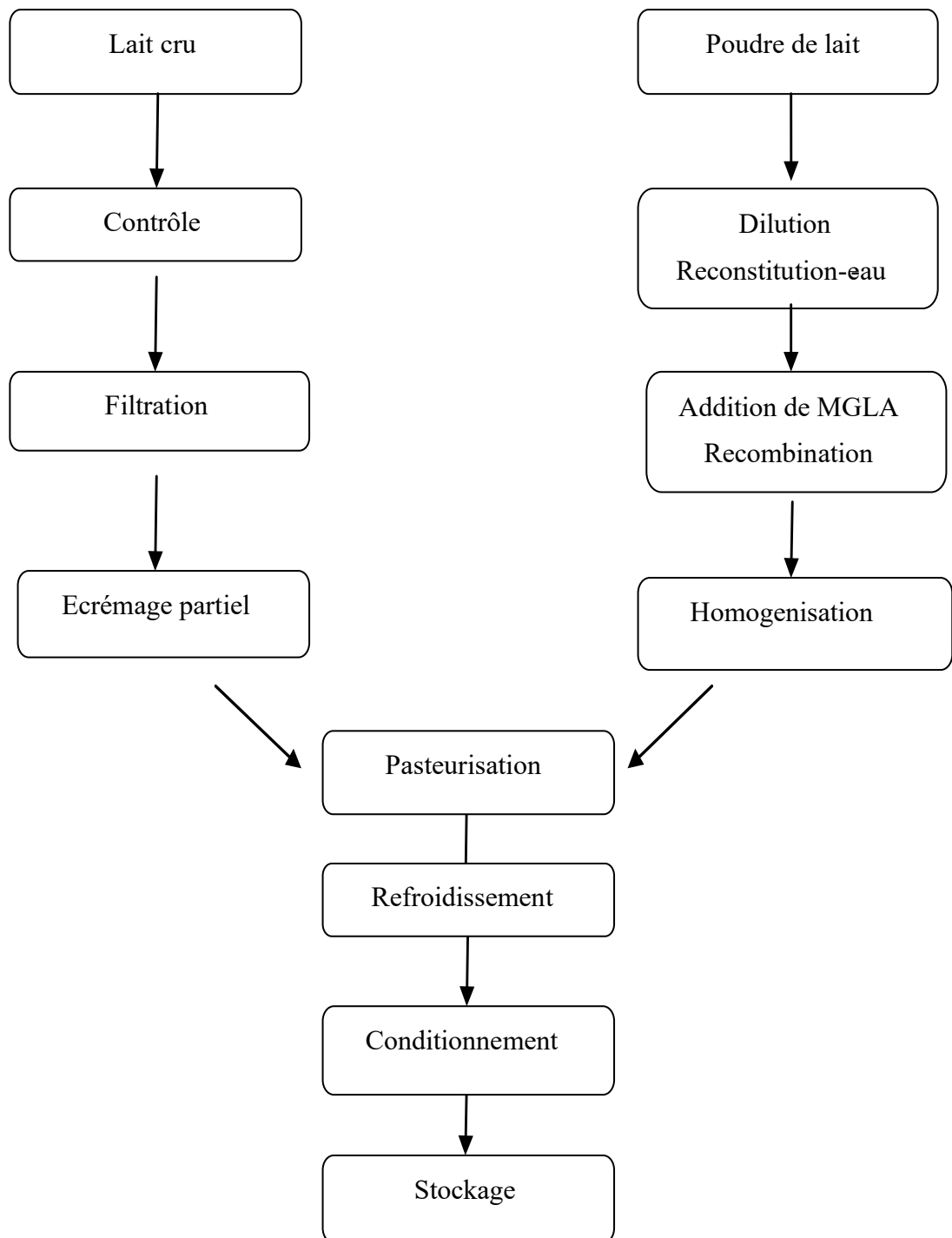


Fig04 : Diagramme de fabrication du lait pasteurisé

Type du lait	Types de traitements thermiques	Caractéristiques
Lait cru	Pas de traitement thermique ou de chauffage à plus de 40°C°	Il se conserve 48h avant l'ouverture du réfrigérateur
Lait pasteurisé	Chauffé à une température inférieure à 100°C puis refroidi rapidement	Il se conserve 7 jours au réfrigérateur avant ouverture
Lait UHT (ultra haute température)	Chauffé à une température entre 130 et 150°C pendant 2 secondes	Durée de conservation +1-4 mois à température ambiante
Lait stérilisé	Chauffé à une température entre 100 °C et 115°C pendant 20 minutes	Durée de conservation +1- 6 mois à température ambiante
Lait en Poudre	Déshydratation qui permet de réduire la teneur en eau à 3 %	Durée de conservation 2 ans à température ambiante

Tableau 07 : Durée de vie du lait en fonction des traitements thermiques.[16].

D'après le tableau, la température joue un rôle positif sur la durée de conservation du lait, car chaque fois qu'on augmente la température on obtient une prolongation du délai de conservations de ce produit fini.

II.5. Applications de la pasteurisation :

La pasteurisation est un traitement thermique utilisé dans plusieurs industries pour sécuriser les produits sans altérer leurs qualités organoleptiques et nutritionnelles.

II.5.1. Industrie alimentaire :

- Produits laitiers : lait, crème, yaourt, fromage (certains fromages nécessitent du lait pasteurisé).
- Jus et boissons : jus de fruits, jus de légumes, cidre, bière, vin.
- Œufs et ovoproduits : œufs liquides pour l'industrie alimentaire.
- Produits carnés : certains produits de charcuterie et plats préparés.
- Sauces et condiments : ketchup, mayonnaise industrielle, sauces.[17]

II.5.2. Industrie pharmaceutique :

- Médicaments et vaccins : certains produits biologiques doivent être pasteurisés afin d'éliminer les micro-organismes pathogènes sans altérer l'efficacité des principes actifs.[18]

II.5.3. Industrie cosmétiques :

- Produits de soins personnels : Certains produits cosmétiques contenant des ingrédients sensibles à la contamination microbienne peuvent être pasteurisés pour gagner en stabilité, par exemple les crèmes, les émulsions et les masques de beauté... [19]

II.6. Échangeurs thermiques à plaques :

II.6.1. Définition :

Un échangeur de chaleur à plaques, comme tout autre échangeur de chaleur, est un système ou un dispositif qui transfère l'énergie d'un fluide chaud à un fluide froid, sans les mélanger, à travers une paroi directe sans contact. L'échange thermique s'effectue sur la surface d'échange.

On distingue la récupération de chaleur à haute température (supérieure à 90 °C) provenant de la vapeur d'échappement ou des gaz de combustion, et la récupération de chaleur à basse température (inférieure à 60 °C) provenant des systèmes de refroidissement par eau, des eaux usées ou des effluents de procédé, de l'air chaud de séchage ou de compression, ou d'une mauvaise isolation des parois [20].



Fig05 : Échangeur thermique a plaque.

L'échangeur de chaleur à plaques est l'échangeur de chaleur le plus courant. Les échangeurs de chaleur à fils fins de conception récente assurent des échanges eau/air avec des différences de

température extrêmement faibles pour le chauffage ou le refroidissement. L'échangeur de chaleur conditionne l'eau pour permettre une injection optimale dans la chaudière. [20]

Ils sont de plus en plus utilisés dans l'industrie et le génie climatique. Ils sont constitués d'une multitude de plaques en mille-feuilles, espacées de quelques millimètres les unes des autres, à travers lesquelles circulent les fluides. Un joint borde les plaques et, en pressurant l'ensemble, obture toutes les fuites, tant entre les deux liquides que vers l'extérieur [21].

II.6.2. La structure d'un échangeur a plaque :

Un échangeur de chaleur à plaques est un équipement thermique utilisé dans les industries laitières, des jus et des boissons pour la pasteurisation du lait, des jus ou d'autres fluides thermosensibles. Un échangeur de chaleur à plaques est constitué de fines plaques métalliques embouties (**généralement en acier inoxydable AISI 304 ou 316L**) disposées en série et comprimées entre deux cadres : fixe et mobile. Les plaques sont ondulées ou à chevrons, ce qui induit une turbulence contrôlée dans le fluide afin de maximiser le transfert de chaleur et de minimiser l'encrassement [22].

Des orifices d'entrée et de sortie sont installés sur chaque plaque, permettant l'écoulement alterné des deux fluides, à savoir le produit à pasteuriser et le fluide de chauffage ou de refroidissement, à travers les canaux créés entre les plaques. La configuration à contre-courant est idéale pour un transfert de chaleur extrêmement efficace [22].

Les plaques sont équipées de joints (NBR, EPDM ou matériau de qualité FDA) qui dirigent les fluides et empêchent la contamination croisée. L'ensemble est comprimé mécaniquement pour une modularité aisée (ajout ou retrait de plaques selon la capacité du produit ou les exigences de viscosité) [22].

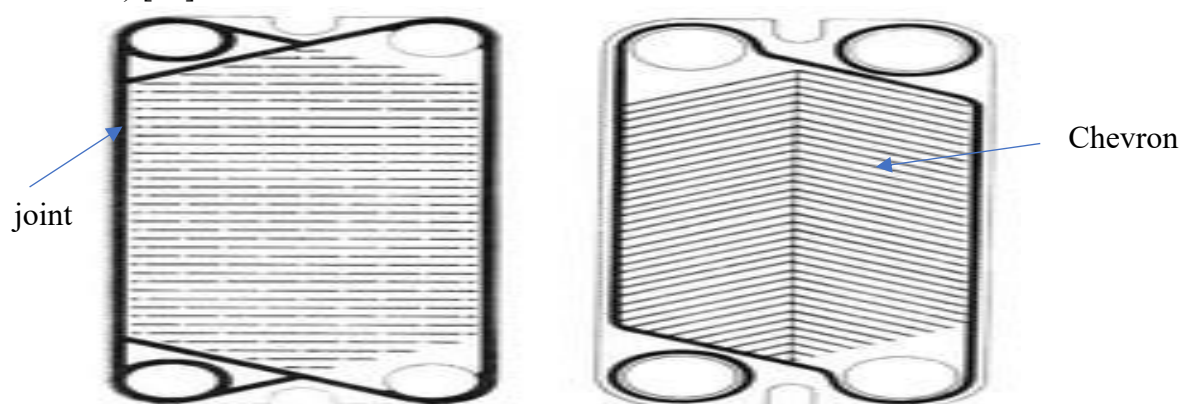


Fig06 : la structure de la plaque.

L'échangeur de chaleur à plaques peut être composé de plusieurs sections : une section de régénération (où il utilise la chaleur du lait chaud pour préchauffer le lait froid entrant), une section de chauffage (utilisant de l'eau chaude ou de la vapeur pour atteindre la température de pasteurisation), une section de maintien (où le produit est maintenu à la température souhaitée pendant une durée déterminée), et une section de refroidissement (pour ramener la température du produit à une température de stockage sûre).[22]

II.6.3. Principe de fonctionnement d'un échangeur à plaques :

Le pasteurisateur, représenté schématiquement sur la figure 1, comprend quatre zones de température :

1. la zone de récupération de chaleur (désignée par B) où le lait froid entrant est préchauffé par le lait pasteurisé refroidi [21].
2. la zone de chauffage (désignée par C) où le lait préchauffé est porté à sa température de pasteurisation grâce à l'énergie thermique d'un flux d'eau chaude [21].
3. le réservoir de stockage (désigné par D) où le lait est maintenu à sa température de pasteurisation pendant une durée calculée en fonction du volume du réservoir et du débit de lait [21].
4. la zone de réfrigération (A) où le lait prérefroidi est refroidi jusqu'à sa température de stockage (environ 4 °C) grâce à l'énergie thermique d'un flux d'eau glacée. Elle est constituée de plaques d'une surface utile de 0,075 m² (modèle V7). Sa conception a été réalisée à l'aide du programme de calcul informatique généralement utilisé par Vicarb, à partir du programme thermique ci-dessous [21] :

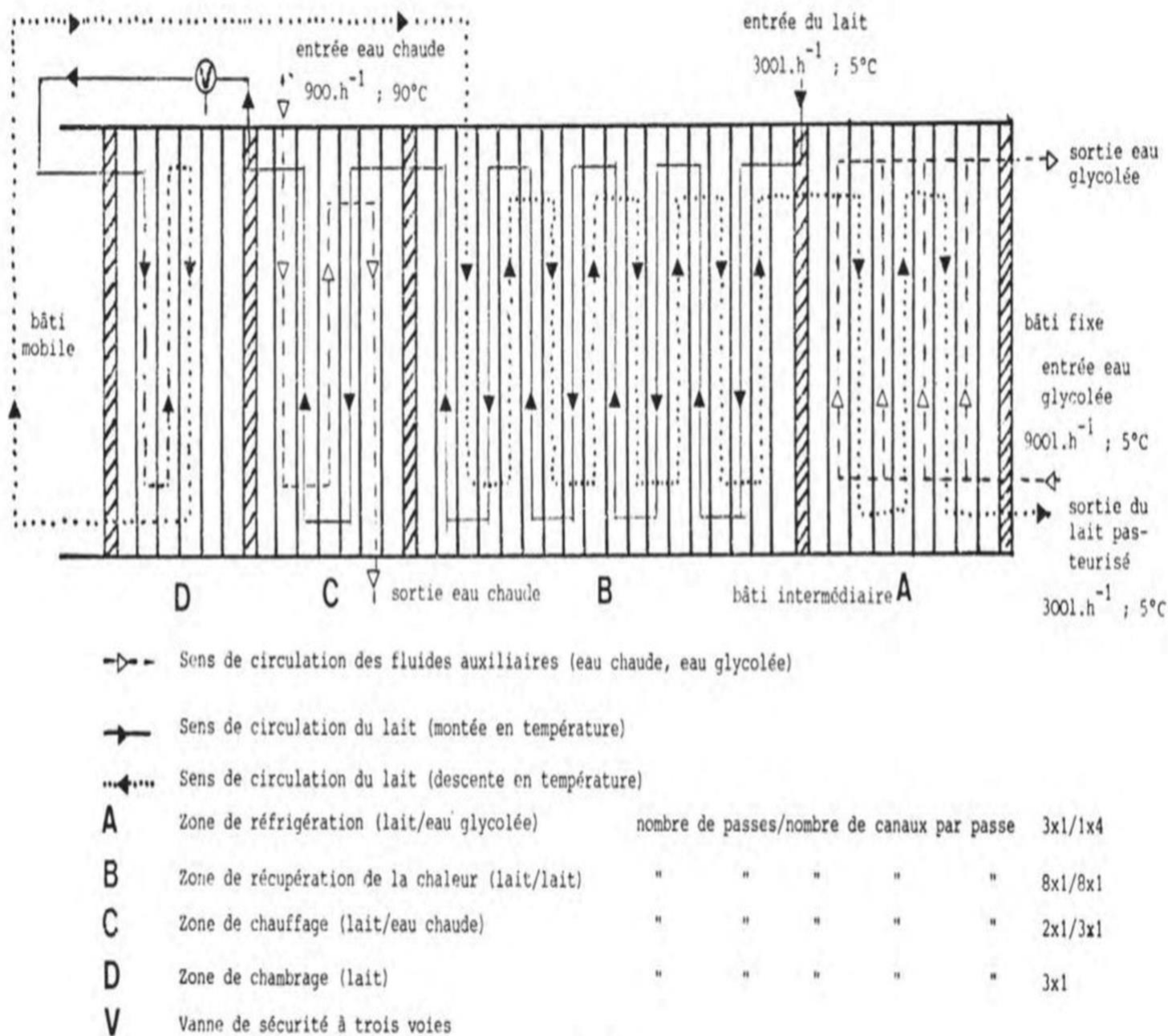


fig. 1

Fig07 : Représentation schématique du pasteurisateur [21].

- Débit de lait (grand mélange, cru, entier) : 6000l/h ;
- Température d'entrée du lait : 5° C ;
- Température de pasteurisation : 85° C ;
- Température du lait préchauffé : 69° C ;
- Température du lait prérefroidi : 21° C ;
- Température de sortie du lait : 5° C ;
- Temps de chambrage : 12 s à 85° C ;
- Débit d'eau glycolée : 900 l/h ;
- Température d'entrée de l'eau glycolée - 5° C
- Débit d'eau chaude : 900 l/h ;
- Température d'entrée de l'eau chaude : 90° C ;
- Coefficient d'encrassement (côté lait) : 1.10^{-4} h/m²/C°/Kcal
- Coefficient d'encrassement (côté eau) : 2.10^{-5} s/h/m²/C°/Kcal
- Conductibilité thermique de la paroi (plaques en acier inoxydable AISI 316 TI) : 14Kcal/hl/m²/ C° ;
- Pourcentage d'énergie récupérée : 80%.

La température de pasteurisation est maintenue constante grâce à une boucle de régulation automatique dont l'actionneur régule le débit d'eau chaude circulant dans la section de chauffage. Nous avons choisi ce fluide car il est plus économe en énergie que la vapeur et jouera un rôle de plus en plus important dans les unités de pasteurisation industrielles [21].

Nous avons limité la récupération d'énergie dans la zone B (préchauffage du lait) à 80 % afin que cette dernière ne représente pas la majorité de l'échangeur au détriment de la zone C (chauffage du lait). Une récupération de 90 à 95 % de l'énergie (pourcentage habituel dans l'industrie laitière) nous aurait conduit, dans les conditions choisies, à une zone C très petite, sans intérêt pour l'extrapolation des résultats [21].

Les expériences ont été réalisées en intégrant le pasteurisateur dans une installation semi-industrielle bien équipée (cuves de stockage du lait, équipement de nettoyage en place, alimentations en eau chaude et froide, etc.). Un ensemble de capteurs

performants (température, débit, pression) fournit les mesures nécessaires à leur fonctionnement. [21]

II.6.4. Types d'échangeurs de chaleur à plaques :

Il existe différents types d'échangeurs de chaleur à plaques, chacun présentant des caractéristiques uniques particulièrement adaptées à diverses utilisations industrielles. Les catégories générales comprennent les échangeurs de chaleur à plaques brasées, soudées et à joints. Voici un aperçu plus détaillé des différences entre ces types et de leurs utilisations optimales.

II.6.4.1 Échangeurs de chaleur à plaques brasées :

Les échangeurs de chaleur à plaques brasées présentent une structure compacte et d'excellentes performances thermiques. Ils sont constitués de plaques pressées et brasées disposées en empilement pour former des passages de fluides étanches. Cette structure offre une conductivité thermique maximale et une résistance élevée aux températures et aux pressions élevées. Les échangeurs de chaleur à plaques brasées sont utilisés lorsque compacité, performances élevées et durabilité sont requises. [24]

Caractéristiques des échangeurs de chaleur à plaques brasées :

- Conception compacte et légère
- Rendement thermique élevé
- Résistance aux températures et aux pressions élevées
- Faibles coûts de maintenance. Applications idéales :
 - Refroidissement liquide
 - Chauffage domestique et industriel
 - Applications CVC (chauffage, ventilation et climatisation)
 - Refroidissement d'huile hydraulique



Fig08 : Échangeurs à plaques brasées [24]

II.6.4.2 Échangeurs de chaleur à plaques soudées :

Les échangeurs de chaleur à plaques soudées sont conçus pour des applications exigeant une résistance maximale aux environnements hostiles. Leur fabrication consiste à souder les plaques ensemble pour former un ensemble compact et robuste. Grâce à cette technique de conception, les échangeurs de chaleur à plaques soudées résistent aux pressions et températures élevées et bénéficient d'une longue durée de vie. Ils sont particulièrement adaptés aux environnements hostiles où fiabilité et longévité sont primordiales [24].

Caractéristiques des échangeurs de chaleur à plaques soudées :

- Construction robuste et durable.
- Résistance aux pressions et températures élevées.
- Faible risque de fuites.
- Faible coût de maintenance.

Applications Idéales:

- Traitement des eaux usées
- Refroidissement des gaz d'échappement
- Applications offshore et marines
- Industries pétrochimiques et chimiques



Fig09 : Échangeur à plaque soudée

II.6.4.3 Échangeurs de chaleur à plaques et joints :

Les échangeurs de chaleur à plaques et joints offrent une plus grande flexibilité et une maintenance simplifiée. Composés de plaques embouties avec joints intégrés, ils simplifient le nettoyage et l'entretien. Leur flexibilité les rend adaptés à une grande variété d'applications, avec une efficacité thermique et une flexibilité opérationnelle accrues. [24]

Caractéristiques des échangeurs de chaleur à plaques et joints :

- Flexibilité et polyvalence d'utilisation
- Facilité d'entretien et d'hygiène
- Rendement thermique élevé
- Coût initial compétitif

Applications Idéales :

- Transformation des aliments et des boissons
- Applications pharmaceutiques
- Réchauffement de l'eau de piscine
- Refroidissement des machines industrielles

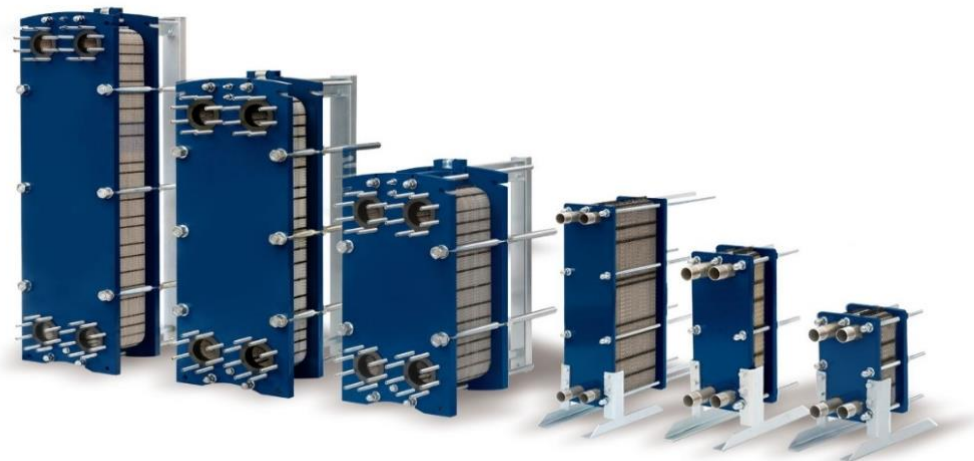


Fig10 : Échangeur à plaque et joint [24].

II.7. Analyse comparative des échangeurs de chaleur :

Pour la pasteurisation du lait, différents échangeurs de chaleur sont utilisés, chacun présentant des avantages et des limites en termes d'efficacité, de coût et de flexibilité.

II.7.1. Échangeur de chaleur à plaques :

Avantages :

- Très efficace pour un échange de chaleur rapide (grande surface d'échange).
- Modulaire et compact (possibilité d'ajouter ou de retirer des plaques selon les besoins).
- Convient aux produits très visqueux comme le lait.
- Facile à nettoyer (NEP - Nettoyage en place) grâce à un démontage simple.
- Contrôle précis de la température [23].

Inconvénients :

- Sensible aux dépôts (encrassement possible avec les laits à forte teneur en matières grasses).
- Moins adapté aux particules en suspension (risque de colmatage) [23].

- Polyvalence : ★★★★★

Très flexible pour les utilisations laitières classiques (lait entier, lait écrémé, crème), mais moins adapté aux laits à forte teneur en particules [23].

II.7.2. Échangeur tubulaire (Tube-in-Tube ou Shell-and-Tube) :

Avantages :

- Robustesse et durabilité (meilleure résistance aux hautes pressions).
- Adapté aux produits visqueux ou contenant des particules (moins de colmatage).
- Adapté aux climats chauds (UHT possible) [25].

Inconvénients :

- Moins économe en énergie que l'échangeur de chaleur à plaques.
- Encombrant et plus difficile à nettoyer [26].

Polyvalence : ★★★★★

Plus adapté aux produits laitiers concentrés ou en particules ; cependant, il est moins efficace pour les laits standard [26].

II.7.3. Échangeur de chaleur à surface raclée :

Avantages :

- Adapté aux produits très visqueux ou cristallisants (par exemple, crème glacée, lait concentré sucré).
- Empêche l'encrassement dû au raclage mécanique [27].

Inconvénients :

- Maintenance coûteuse et complexe.
- Trop grand pour le lait standard [27].

Polyvalence : ★★☆☆☆

Spécifiquement dédié à certains produits, généralement peu adapté à la pasteurisation du lait standard [27].

II .7.4. Échangeur de chaleur multitubulaire

Avantages :

- Bon compromis entre efficacité et durabilité.
- Adapté aux hautes pressions et températures (UHT) [28]

Inconvénients :

- Plus difficile à nettoyer que l'échangeur de chaleur à plaques [28].
- **Polyvalence : ★★★★★**

Utilisé pour le lait UHT, mais moins flexible que l'échangeur à plaques [29].

CONCLUSION

Parmi les différents types d'échangeurs de chaleur présentés, l'échangeur à plaques apparaît comme le plus polyvalent et le plus adapté à la pasteurisation du lait. Son excellent rendement thermique, sa compacité, sa conception modulaire et sa facilité d'entretien, notamment grâce à facilité de systèmes de nettoyage en place (NEP), lui permettent de fonctionner efficacement et de répondre aux besoins des opérations laitières conventionnelles, à savoir la pasteurisation du lait entier, du lait écrémé et de la crème.

Bien que d'autres échangeurs, comme les échangeurs tubulaires ou à surface raclée, offrent des avantages pour les produits extrêmement visqueux ou contenant des particules, leur utilisation est plus spécialisée et généralement moins économique ou polyvalente. L'échangeur à plaques, quant à lui, offre un excellent compromis entre performance, facilité d'entretien et flexibilité, et constitue l'application la plus courante dans l'industrie laitière pour la pasteurisation.

Chapitre III : Simulation d'échangeur à plaque sur COMSOL Multiphysics 6.3.

III.8. Présentation sur logiciel COMSOL Multiphysics :

COMSOL Multiphysics est un puissant logiciel de simulation numérique permettant la modélisation et l'analyse simultanées de phénomènes physiques complexes dans divers domaines de la physique, d'où son appellation « multiphysique ». COMSOL est une plateforme complète qui utilise la méthode des éléments finis pour résoudre des équations aux dérivées partielles couplées, décrivant l'interaction entre divers phénomènes physiques tels que la mécanique, l'électromagnétisme, les processus thermiques, l'écoulement des fluides, les réactions chimiques, l'acoustique, etc [30].

Cette capacité à fusionner plusieurs phénomènes physiques dans un modèle unique facilite les simulations avec un comportement proche de la nature, en réduisant les hypothèses simplificatrices habituellement requises dans les logiciels de simulation standard. Cela permet aux utilisateurs d'unifier plusieurs phénomènes physiques interdépendants, tels que le couplage de la mécanique des structures et de la conduction thermique ou des réactions chimiques et de l'écoulement des fluides, dans une configuration de modèle unique. COMSOL Multiphysics offre une interface intuitive et un flux de travail intégré permettant la définition de la géométrie, des propriétés des matériaux, des conditions aux limites, la résolution des équations et le post-traitement des résultats. De plus, il permet aux utilisateurs de personnaliser leur modèle selon leurs besoins grâce à des expressions définies par l'utilisateur et de créer des applications personnalisées basées sur leur simulation [30].

III.8.1. Domaines principaux :

III.8.1.1. Électromagnétisme :

Modélisation des champs électromagnétiques, des antennes, des dispositifs micro-ondes et des appareils de chauffage par induction [30].

Exemples : chauffage résistif (effet Joule) dans un assemblage de jeux de barres, modélisation de composants électroniques.

III.8.1.2. Mécanique des structures :

Étude des contraintes, déformations, vibrations et fatigue dans les matériaux.

-Applications : interaction fluide-structure, comportement thermomécanique du verre.

III.8.1.3. Acoustique :

Recherches sur la propagation des ondes sonores, les dispositifs électroacoustiques et les métamatériaux acoustiques [30] .

Exemple : conditions de rayonnement thermique dans les tubes creux.

III.8.1.4. Mécanique des fluides numérique (MFN) :

Simulation d'écoulements turbulents, polyphasiques et réactifs, utilisant des techniques telles que la simulation des tourbillons détachés (DES) et les modèles RANS [30].

Applications pratiques : écoulements réactifs à nombre de Mach élevé, transfert d'espèces chimiques dans les écoulements dispersés.

III.8.1.5. Transfert de chaleur :

Simulation de la gestion thermique ou de la gestion thermique des composants de batterie, ainsi que de la conduction, de la convection et du rayonnement [30].

Exemple : optimisation des capteurs solaires.

III.8.1.6. Électrochimie et génie chimique :

Modélisation de réacteurs, systèmes électrochimiques (piles à combustible, électrolyseurs) et corrosion [30].

Utilisation : chauffage résistif dans un procédé d'électrolyse.

III.8.1.7. Interactions multiphysiques :

Couplage des effets physiques (thermomécaniques, magnétohydrodynamiques, etc.) pour les systèmes complexes. Exemples : récupération d'énergie à partir de matériaux magnétostrictifs, conception de capteurs biomédicaux [30].

III.8.2. Exemples sur les domaines :

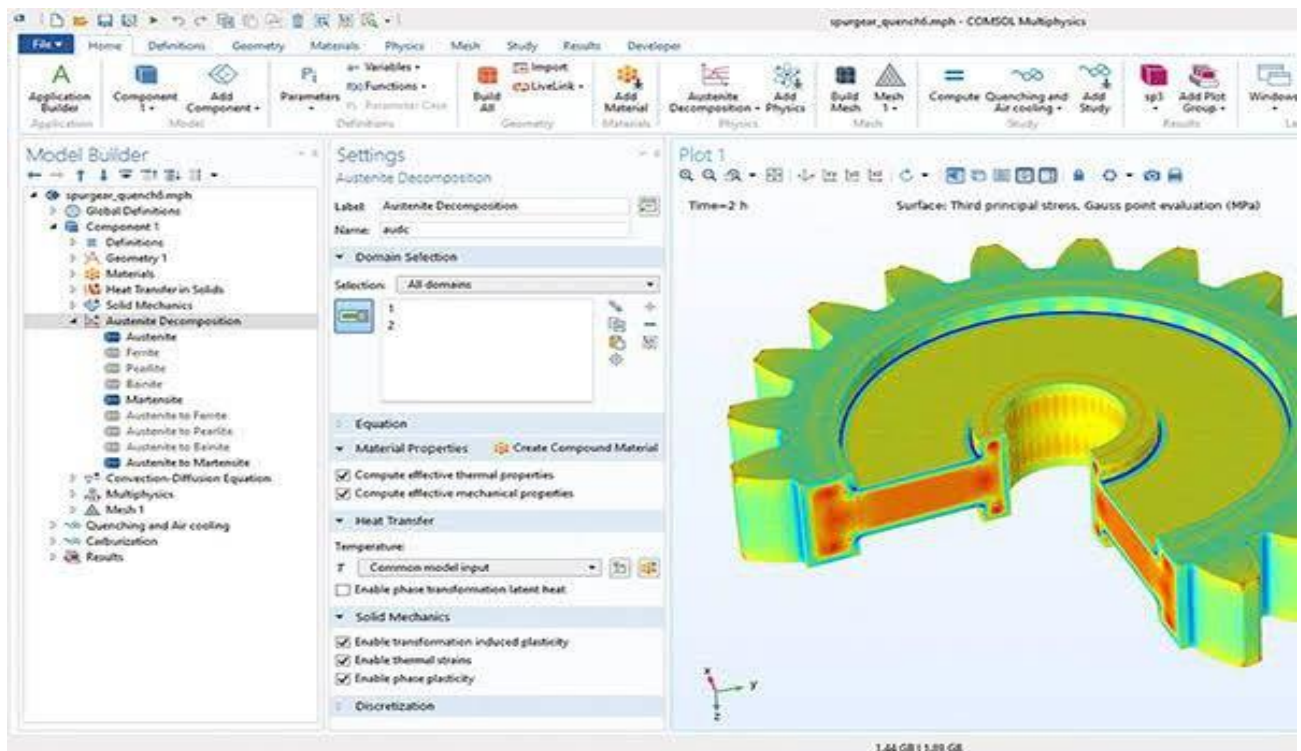


Fig11 : visualisation 3D d'un engrenage dans COMSOL [31].

3.2

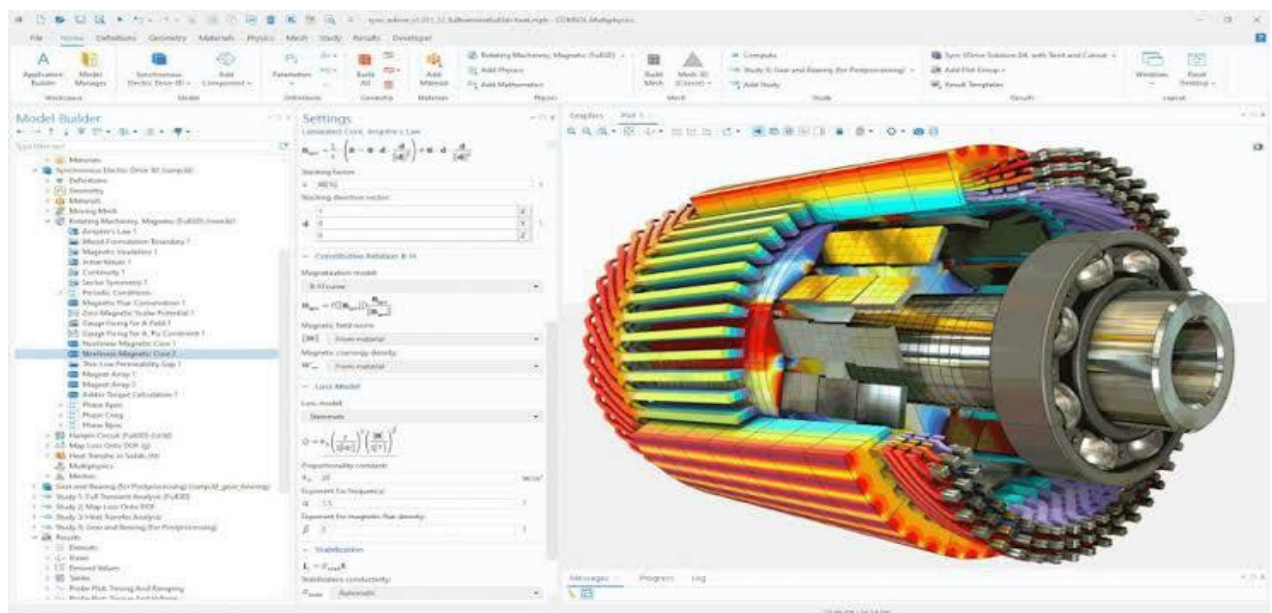


Fig12 : simulation thermique 3D d'un moteur électrique dans COMSOL [31] .

III.9. Modalisation de l'échanger :

III.9.1. Dessin de L'échangeur de chaleur :

-nous choisissons notre domaine d'étude (Heat transfert in fluids).

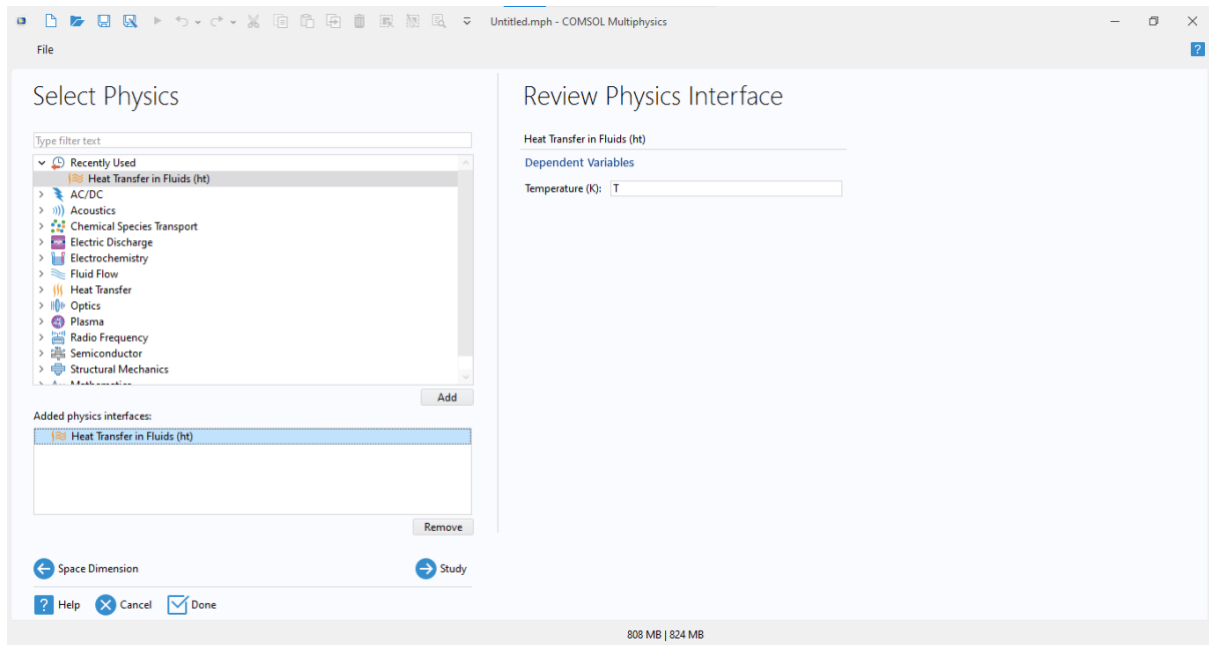


Fig13 : domaine de travail.

-nous procédons à la modélisation en 3D de la première plaque de l'échangeur de chaleur.

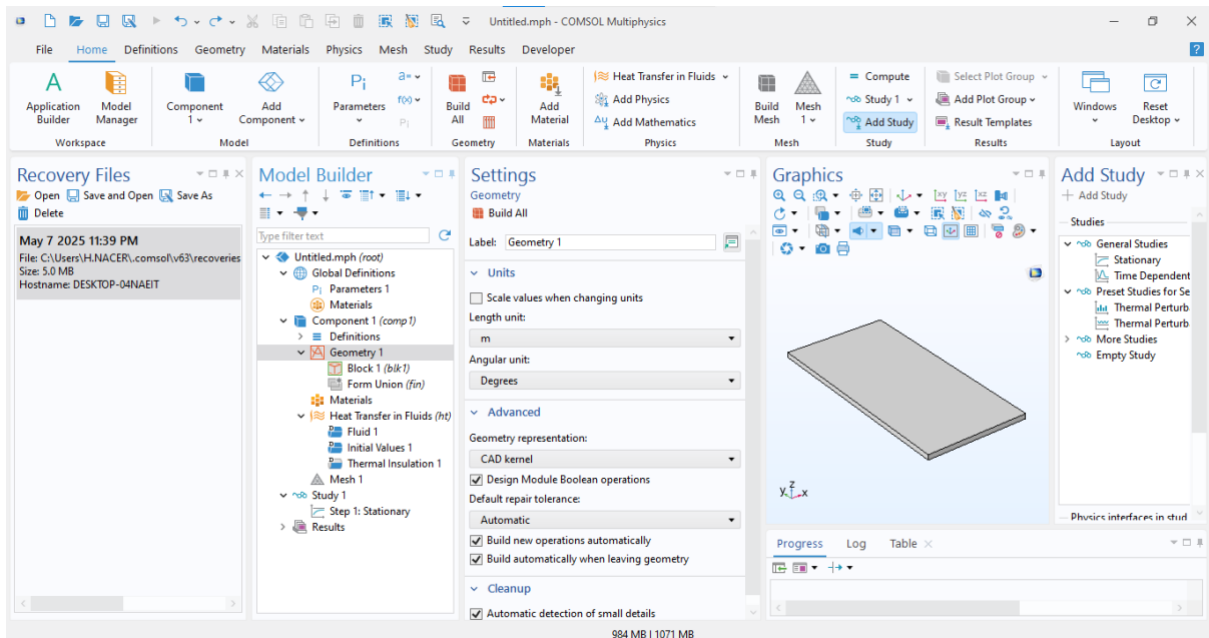


Fig14 : première plaque de l'échangeur.

- On ajoute des ouvertures circulaires au niveau des bords de la plaque afin de représenter les orifices d'entrée et de sortie.

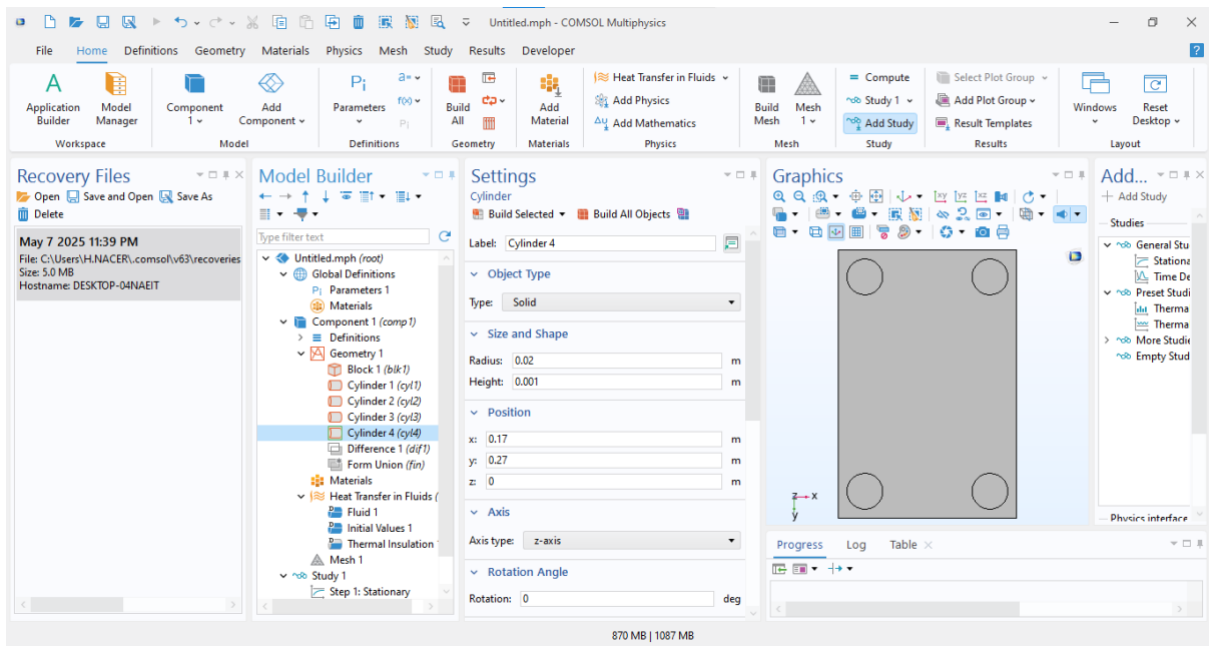


Fig15 : les orifices d'entrée et des sorties.

- Pour créer les évidements au niveau des ouvertures circulaires, nous utilisons la commande suivante :

-Géométrie\Boolean opération\Différence.

-Cette opération permet de soustraire les cylindres de la plaque principale, créant ainsi les orifices de passage des fluides.

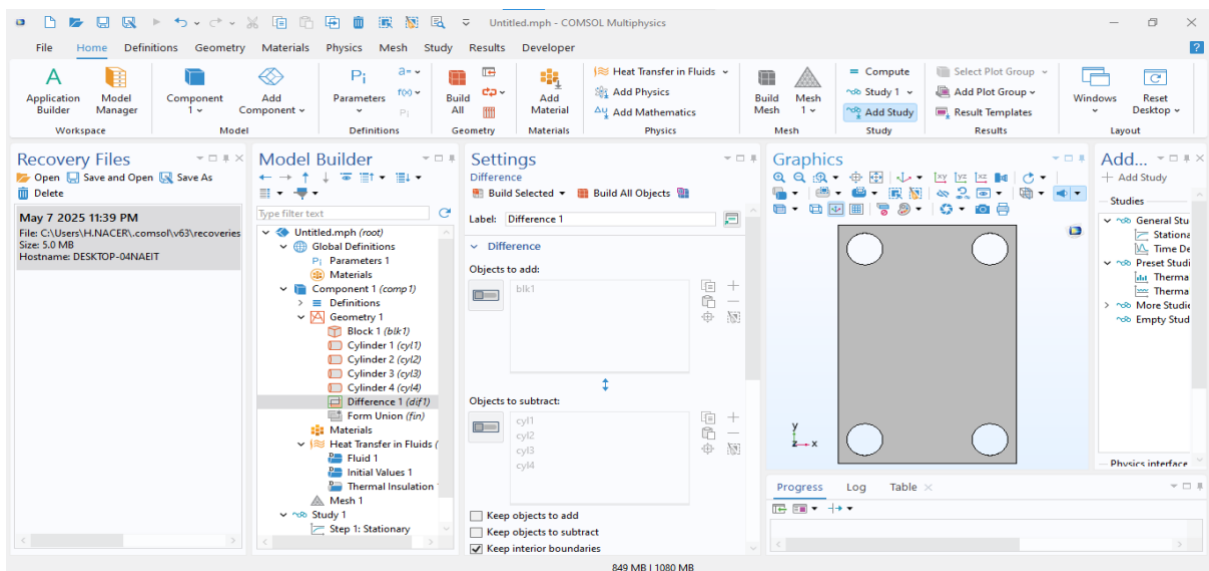


Fig16 : le vide crée.

- De la même manière pour les bords circulaires, nous utilisons la même opération.

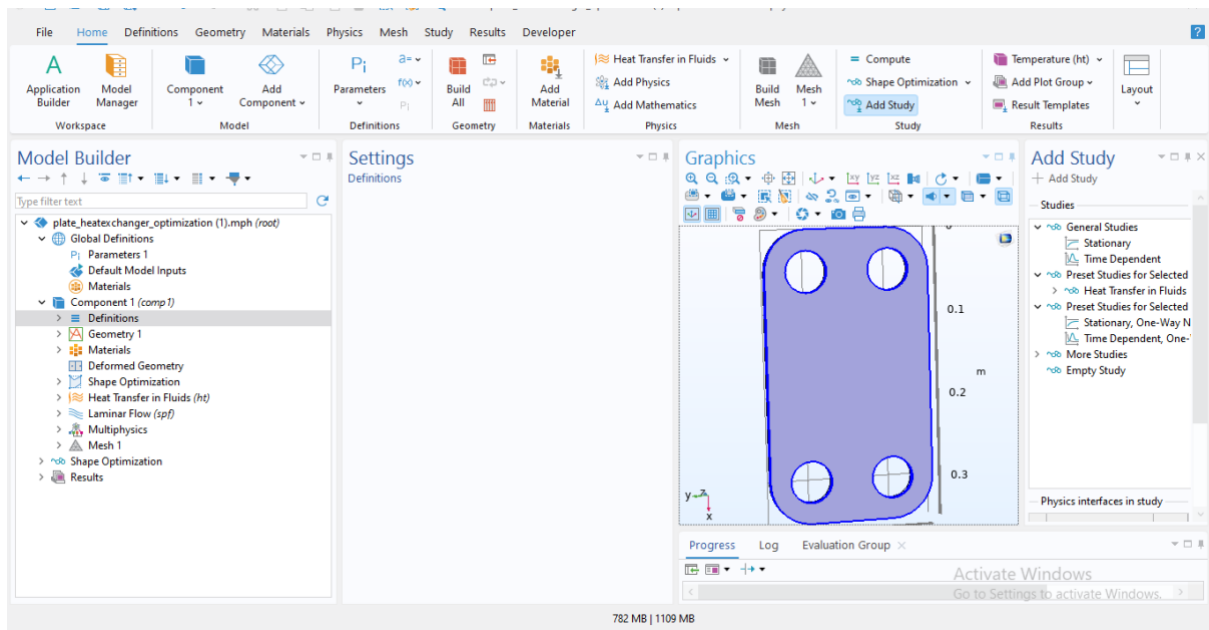


Fig17 :la forme finale de la plaque.

-Nous augmenterons le nombre de plaques, en utilisant la propriété de **ARRAY** pour correspondre à l'échangeur de chaleur considéré.

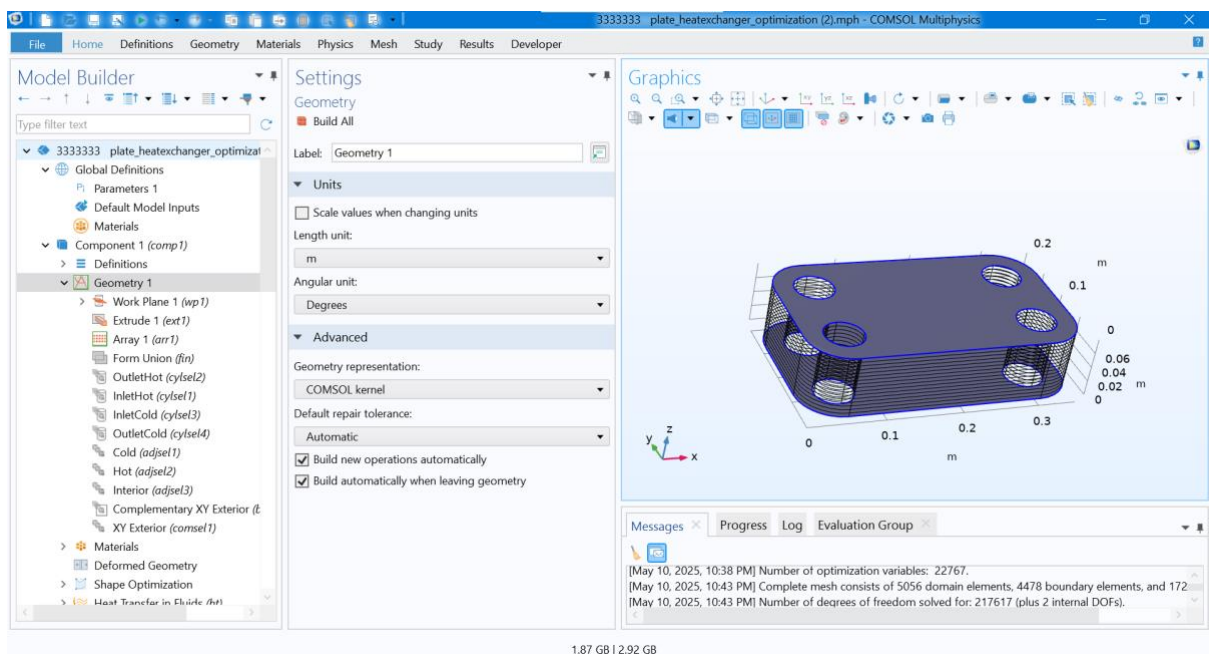


Fig18 : les plaques après fonction ARRAY.

III.9.2. Ajouter des matériaux :

Nous ajoutons les matières à étudier (eau et lait) et leurs propriétés physiques.

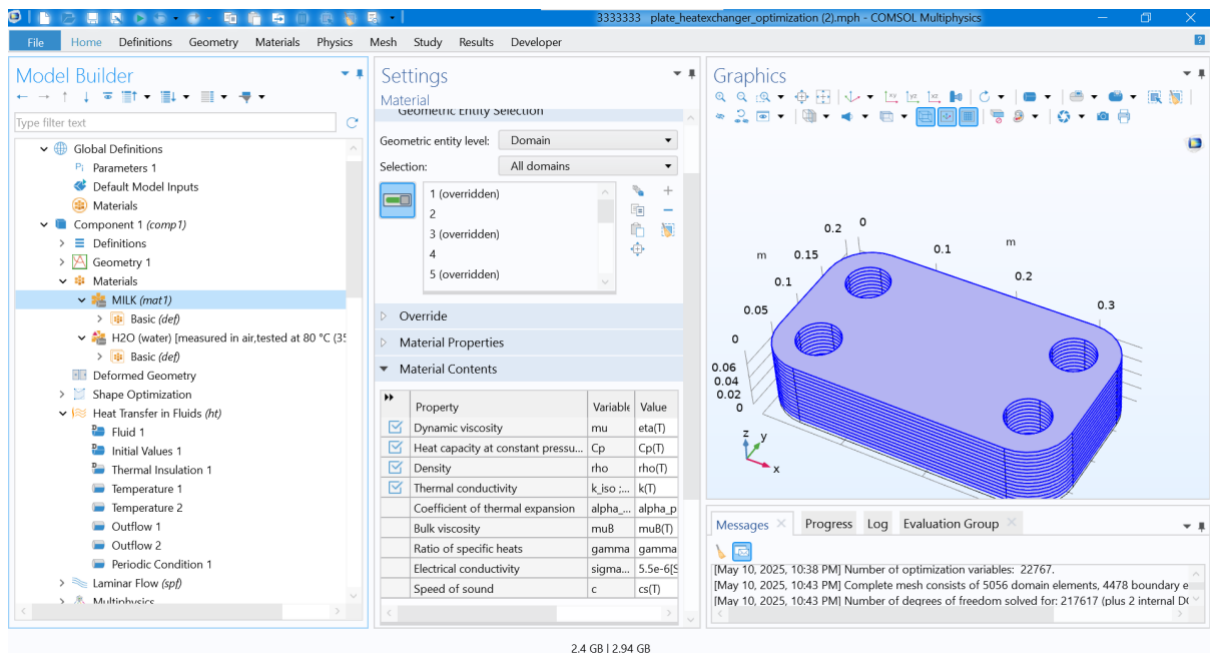


Fig19 : présente les matériaux (WATER & MILK).

Les propriétés des matériaux :

Tableau 8 : Propriétés de l'eau chaude (à 80°C)

Propriété	Valeur	Unité
Densité	997	kg/m ³
Chaleur spécifique	4180	J/kg·K
Viscosité dynamique	0.001	Pa·s
Conductivité thermique	0.6	W/m·K

Tableau 9 : Propriétés du lait (à 10°C)

Propriété	Valeur	Unité
Densité	1030	kg/m ³
Chaleur spécifique	3900	J/kg·K
Viscosité dynamique	0.002	Pa·s
Conductivité thermique	0.5	W/m·K

III.9.3. Transferts de chaleur des fluides:

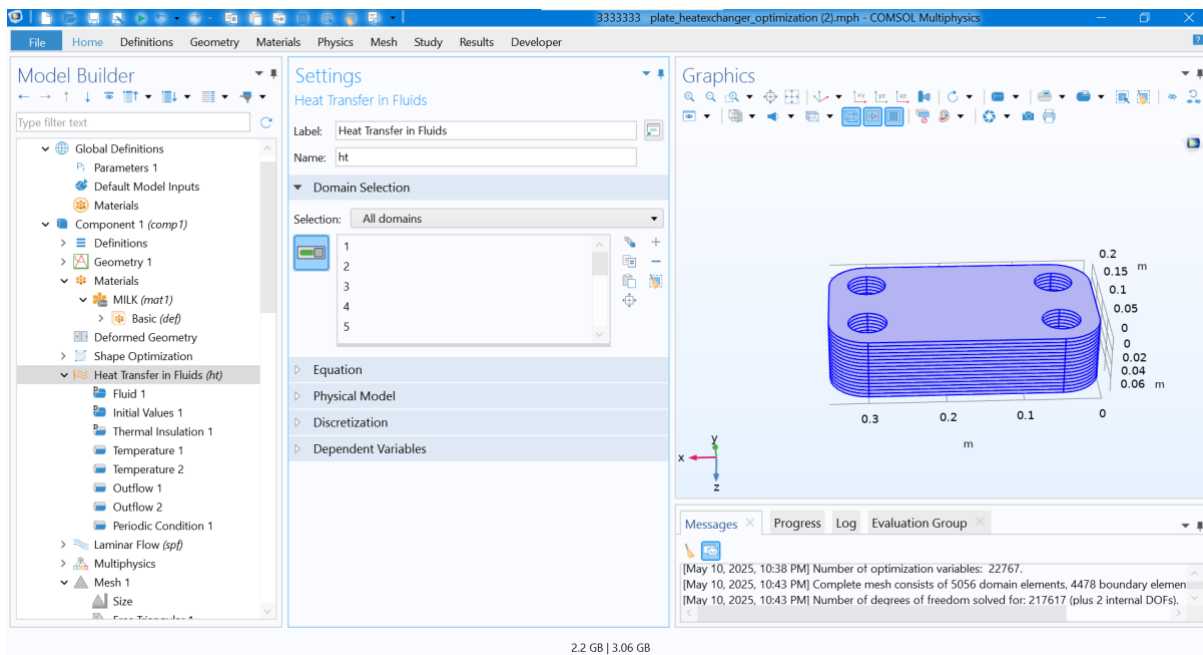


Fig20 : Présente les transferts de chaleur des fluides.

III.9.3.1.Interface physique utilisée :

Utilisation de l'interface Transfert de chaleur dans les fluides pour l'eau chaude et le lait. Elle inclut la conduction thermique à travers les parois et la convection thermique due à l'écoulement des fluides.

III.9.3.2Propriétés thermo physiques des fluides :

- Eau chaude (à 80°C) :
- Densité : 997 kg/m³
- Chaleur spécifique : 4180 J/kg·K
- Conductivité thermique : 0.6 W/m·K
- Viscosité dynamique : 0.001 Pa·s

- Lait (à 10°C) :

- Densité : 1030 kg/m³

- Chaleur spécifique : 3900 J/kg·K

Conductivité thermique : 0.5 W/m·K

Viscosité dynamique : 0.002 Pa·s

III.9.3.3. Conditions aux limites (Bondaroy Conditions) :

Températures d'entrée:

-Eau : 80°C

-Lait : 10°C

Parois (plaques métalliques) :

Propriété	Valeur
Matériau	Acier inoxydable
Conductivité thermique	16 W/m·K
Épaisseur	0,5 mm
Température initiale	Température d'entrée

III.9.4. Flux Laminaire (LAMINAR FLOW) :

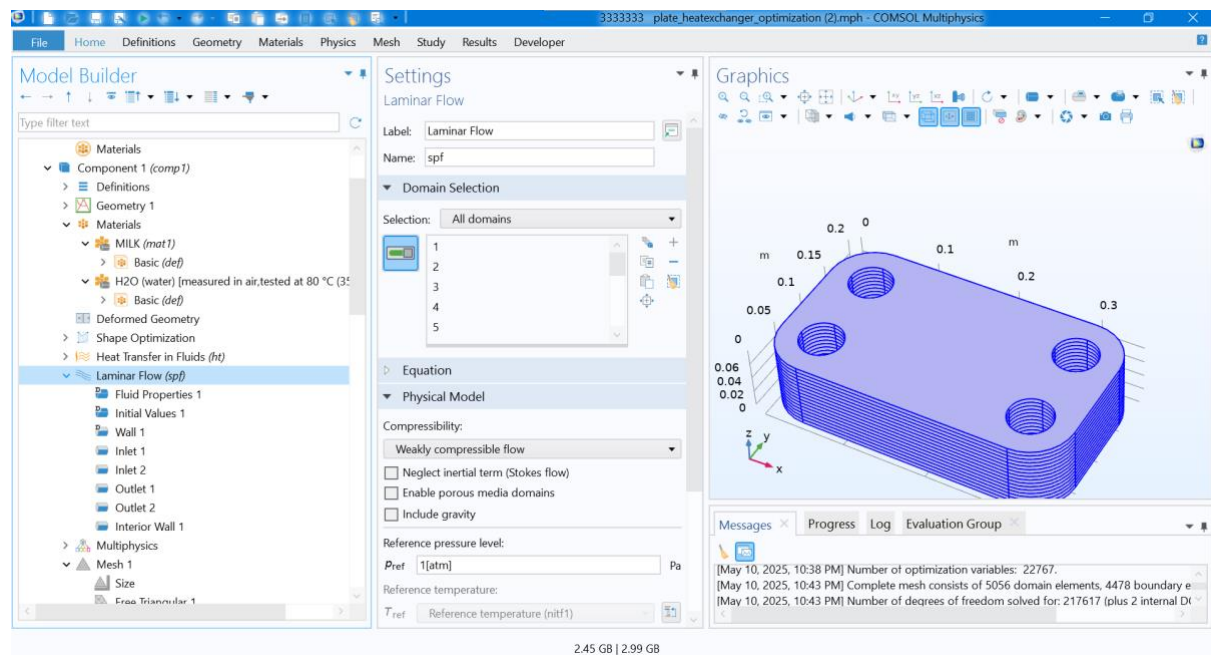


Fig21 : Laminar flux de l'échangeur.

III.9.4.1 Écoulement laminaire (LAMINAR FLOW) :

- Interface physique utilisée :

Utilisation de l'interface Écoulement laminaire car le nombre de Reynolds (Re) est inférieur à 2300, ce qui indique un écoulement régulier sans turbulence.

-Données d'entrée :

- Débit de lait : 0.1 L/s

- Débit d'eau : 0.1 L/s

-Vitesse moyenne :

- Lait : 0.1 m/s

- Eau : 0.15 m/s

-Conditions aux limites :

Entrées :

- Type : Vitesse imposée (Inlet - Velocity)
- Valeurs : selon le fluide (0.1 ou 0.15 m/s)

Sorties :

- Type : Pression = 0 Pa (pression atmosphérique)

Parois :

- Condition de non-glissement (No-slip)

Conditions initiales (optionnel) :

- Vitesse initiale = 0 ou vitesse d'entrée

III.9.5. Maillage d'application (MESH) :

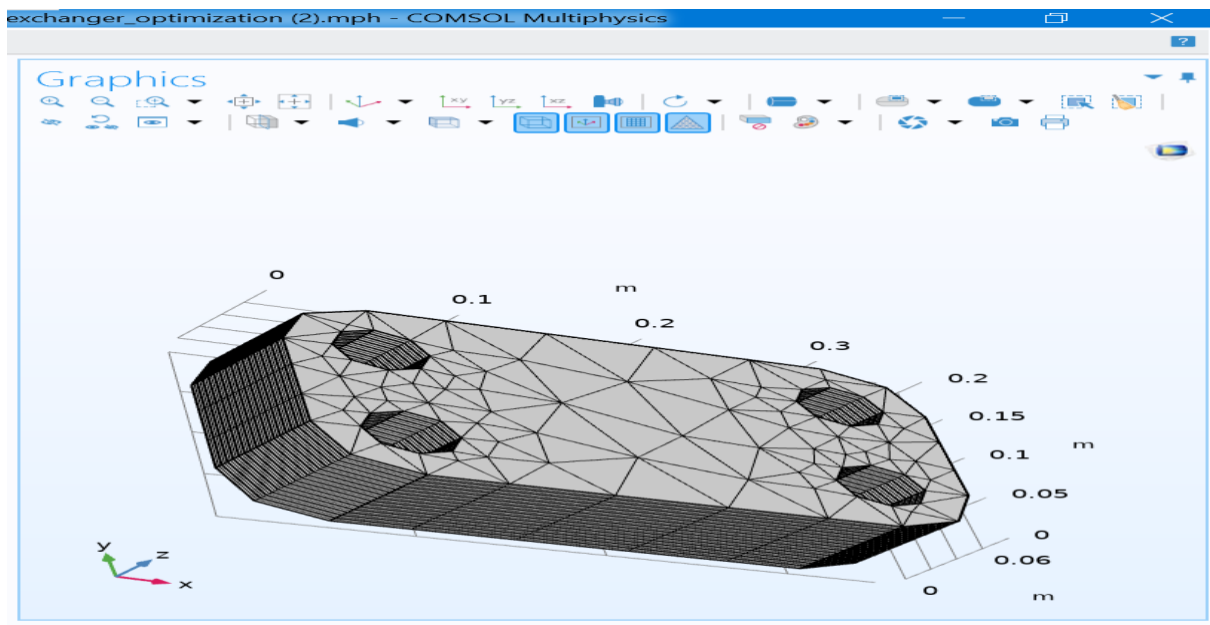


Fig22 : Maillage de l'échangeur.

Remarque : Un maillage moyen a été utilisé pour éviter une consommation de mémoire élevée, tout en garantissant une précision acceptable dans les résultats de transfert de chaleur.

III.9.6. Les résultats de simulation :

1- Distribution de la pression :

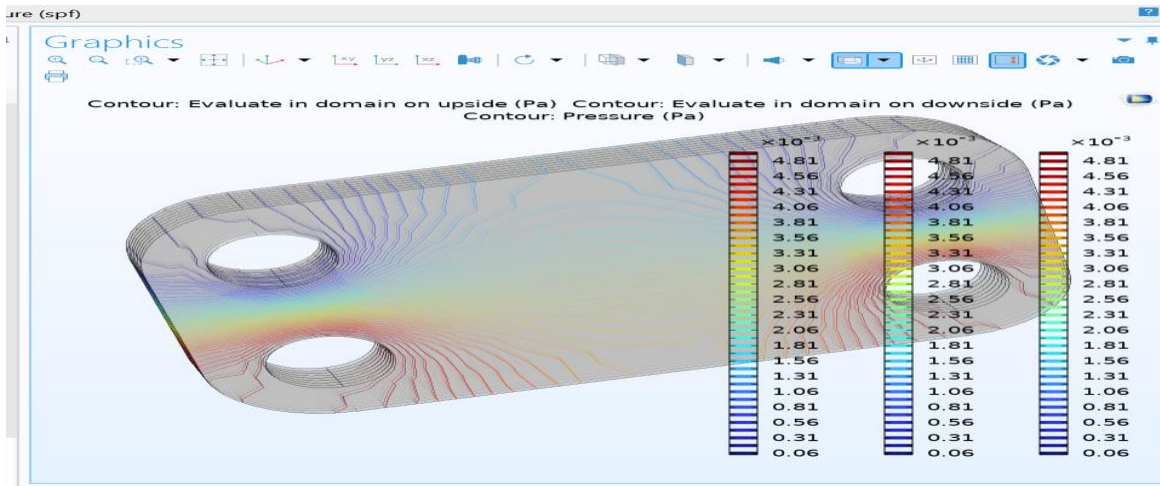


Fig23 : comparaison de la pression sur les surfaces supérieure et inférieure.

- **Observations :** La pression sur la surface supérieure est supérieure à celle sur la surface inférieure.

2- Thermocouple isotherme :

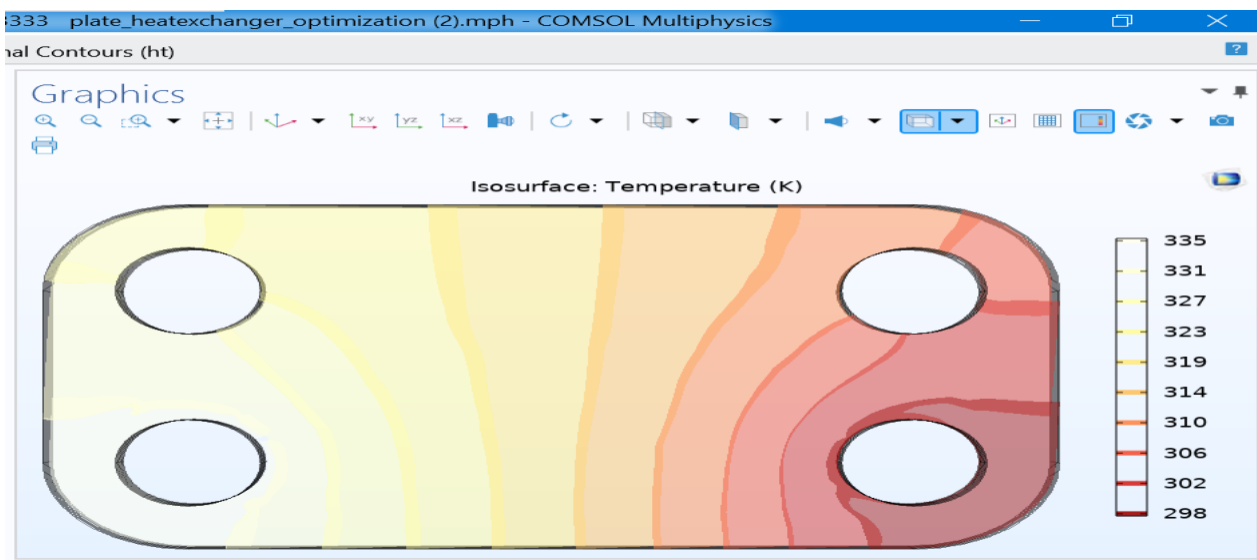


Fig24 : contours isothermes de la température à l'intérieur de l'échangeur.

- **Observations :**

L'image représente le degré de diffusion de la chaleur en rouge puis il diminue progressivement en raison de processus de pasteurisation.

3. la vitesse des fluides :

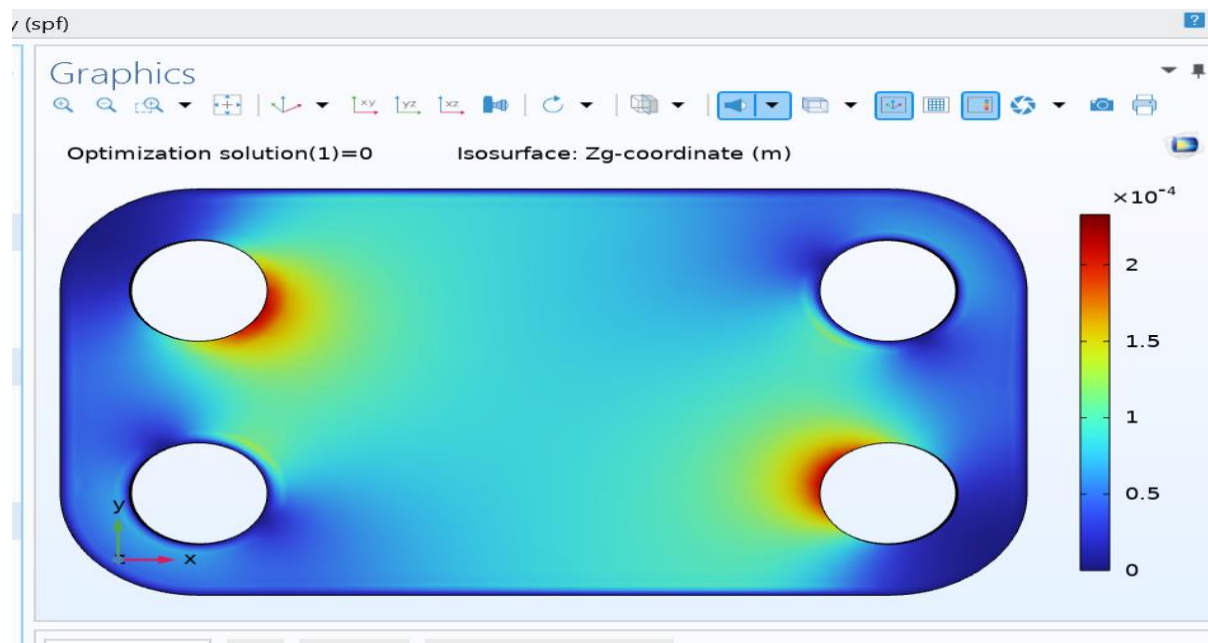


Fig25 : le champ de vitesse avant optimisation.

Observations :

Les zones de vitesse des fluides sont représentées dans le modèle thermique afin d'illustrer l'écoulement du lait et de l'eau à travers l'échangeur de chaleur.

4-Améliorer la géométrie de l'échangeur :

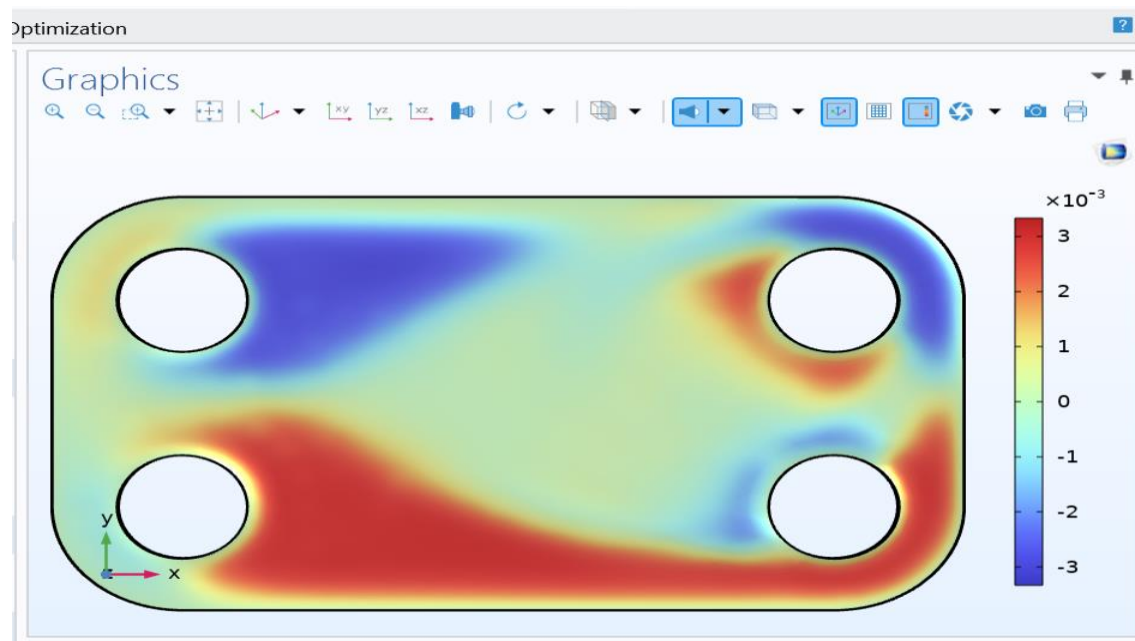


Fig26 : carte de l'optimisation topologique de la géométrie de l'échangeur thermique à plaque.

Observations : La conception permet une distribution plus uniforme de la pression et de la vitesse.

5- lignes de courant de fluide :

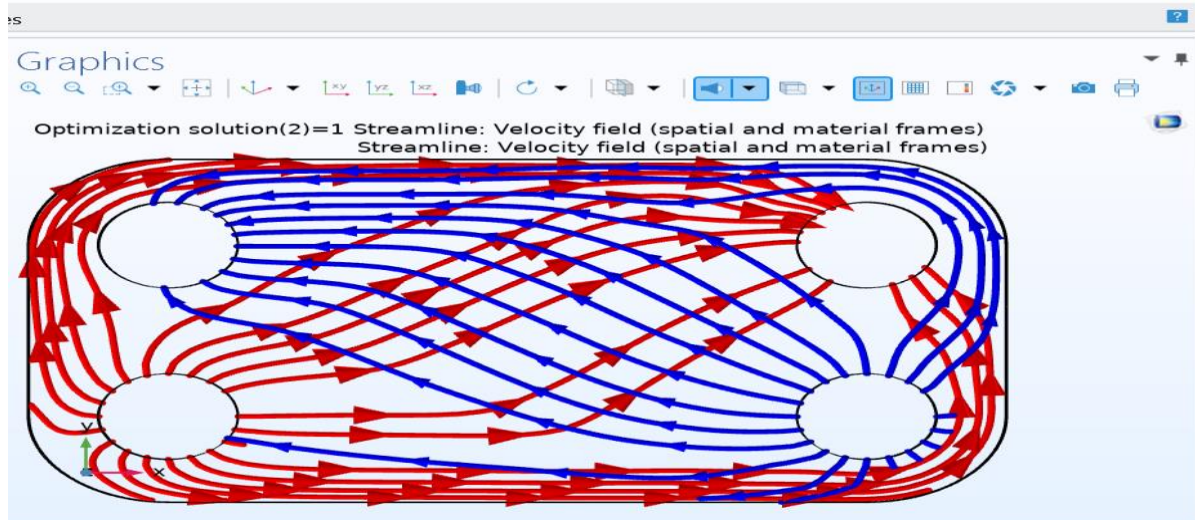


Fig27 : lignes de courant de fluide dans l'échangeur thermique à plaque.

- Observations :

- Les lignes de courant sont parallèles et uniformes dans la plupart des zones.

6-Calcul de l'énergie thermique :

-Débit massique dans chaque canal : $\dot{M} = 0.1 \text{ kg/s}$.

Donc débit total = $4 \times 0.1 = 0.4 \text{ kg/s}$ pour le lait et l'eau

-Capacité thermique massique de l'eau $C_p = 4180 = 4.180 (\text{kJ/kg.K})$.

- Capacité thermique massique de lait $C_p = 3900 = 3.9 (\text{kJ/kg.K})$.

-La différence entre la température (finale et initial) de lait : $\Delta T = 72 - 10 = 62^\circ\text{C}$.

-La différence entre la température (finale et initial) de l'eau : $\Delta T = 80 - 30 = 50^\circ\text{C}$.

1-Calculs de la quantité d'Energie de l'eau chaude :

$$Q = \dot{M} \times C_p \times \Delta T$$

$$= 0.4 \times 4.180 \times 62 = 96.72 \text{ KW}$$

2-Calculs de la quantité d'Energie de lait :

$$Q=0.4 \times 3.9 \times 30 = 50.16 \text{KW}$$

Liquide	Temp entre	Temp sortie	Cp(J/kg.K)	(Kg/s) التدفق	ΔT (°C)	Q(KW)
L'eau chaude	80	50	4180	0.4	30	50.16
Lait	10	72	3900	0.4	62	96.72

Tableau 10 : caractéristique thermique et flux de chaleur des liquides

Conclusion :

Ce chapitre a mis en œuvre avec succès la modélisation numérique 3D d'un échangeur de chaleur à l'aide du logiciel COMSOL, permettant une analyse précise du comportement du transfert de chaleur et de pression au sein du système.

Chapitre IV : Simulation dans logiciel HYSYS.

IV.1. Définition du logiciel Aspen HYSYS :

Aspen HYSYS est un logiciel de modélisation de procédés en régime permanent pour la simulation, la conception axée sur la performance, la surveillance, l'optimisation et la planification des activités des industries chimique, pétrochimique et métallurgique [33].

IV.1.2. Présentation du logiciel Aspen HYSYS :

HYSYS n'est pas le logiciel de simulation industrielle le plus utilisé ni le plus polyvalent, mais il est simple à utiliser et convivial une fois maîtrisé. Développé pour le secteur pétrolier, HYSYS est également utilisé pour d'autres procédés chimiques. Des modules pilotés par menus permettent d'exécuter les simulations. Il intègre également une interface graphique pour la création de diagrammes de procédés [33].

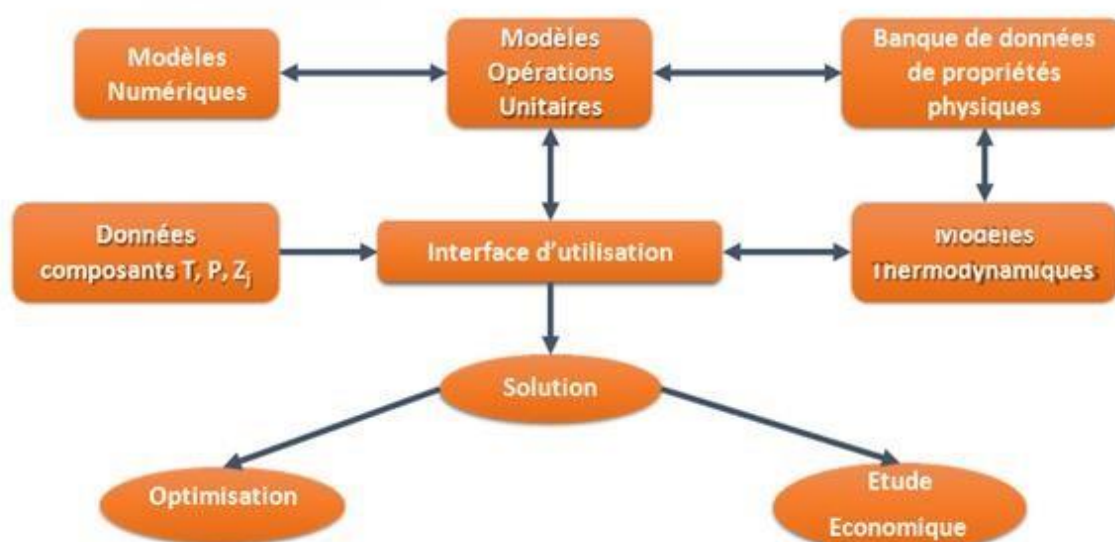


Fig28 : schéma de structure générale de Aspen HYSYS [33].

IV.1.3. Domaines d'application

Industrie pétrolière et gazière : Simulation des opérations d'extraction, de traitement et de transport d'hydrocarbures [34].

Raffinage : Optimisation des unités de distillation, de reformage, de craquage, etc.

Pétrochimie : Conception et analyse des procédés de fabrication de produits chimiques issus du pétrole et du gaz [34].

Autres industries chimiques : HYSYS est également utilisé dans les procédés non pétroliers, tels que la séparation cryogénique de l'air, de l'azote liquide, etc.

IV.1.4. Les Exemples de Simulation :

1-

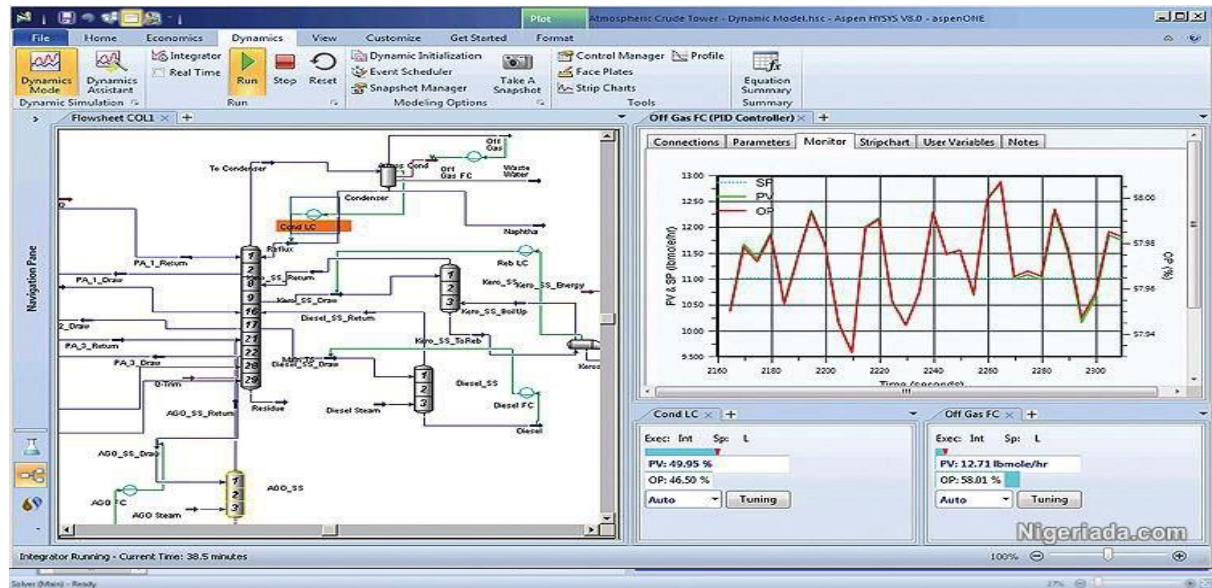


Fig29 : Simulation dynamique d'une colonne de distillation avec Aspen

HYSYS.

2-

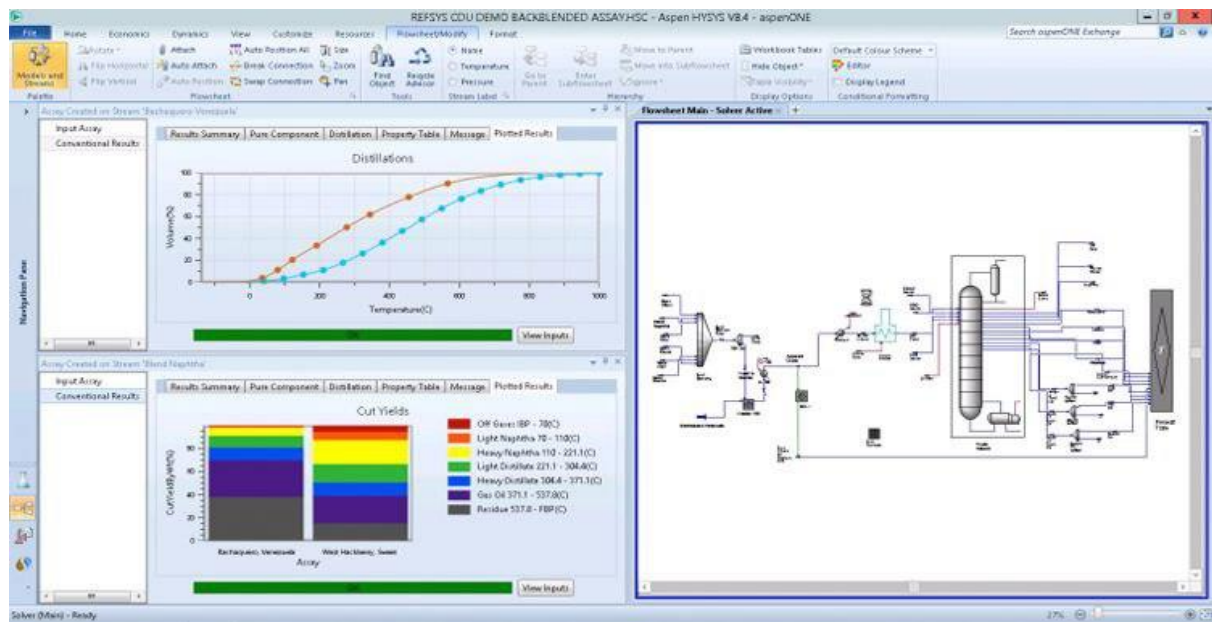


Fig30 : Simulation de la distillation atmosphérique du pétrole brut dans Aspen HYSYS – Analyse des rendements et des coupes.

I.V.2 La simulation de système de pasteurisation :

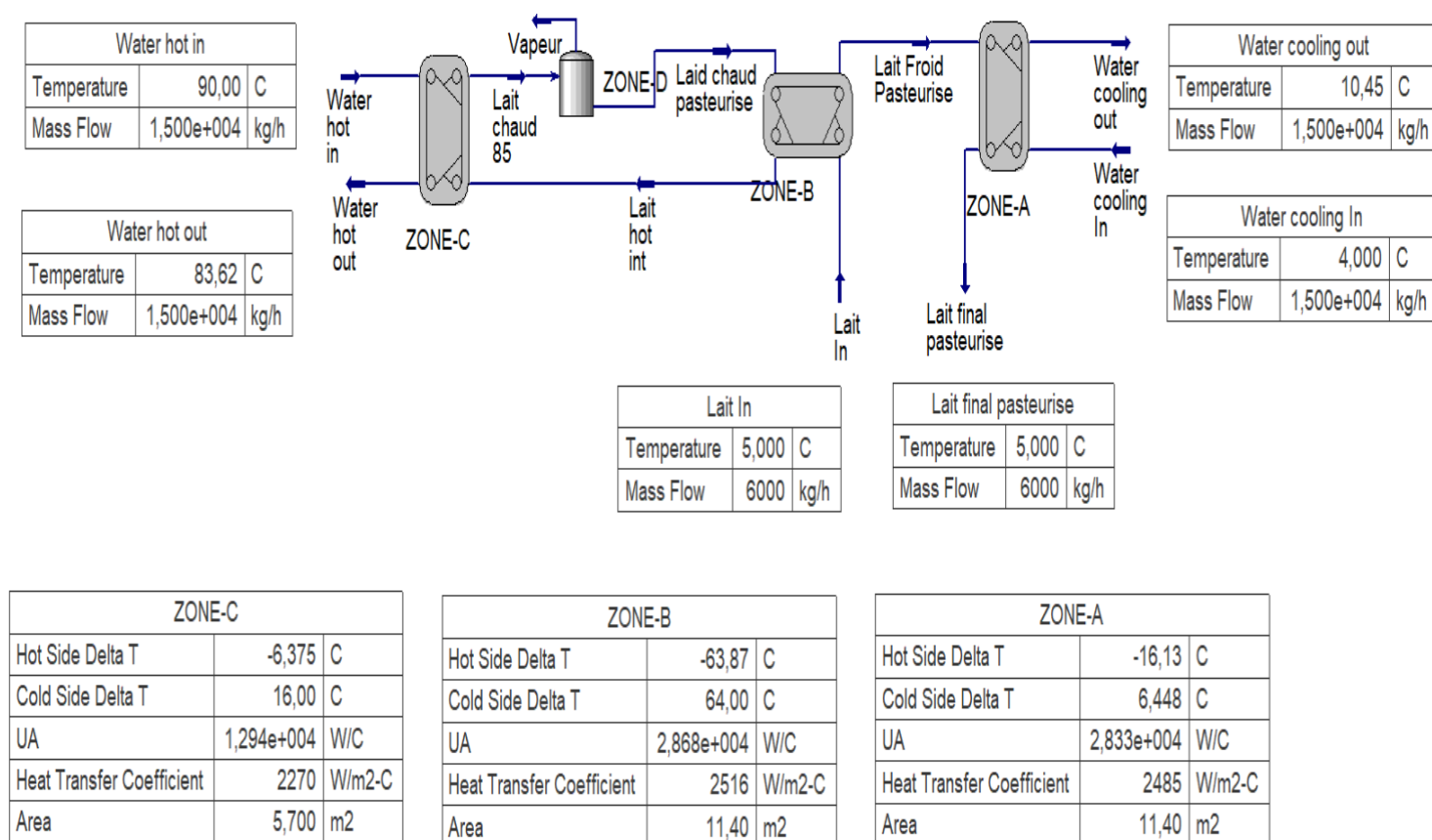


Fig31 : Schéma HYSYS du système de pasteurisation.

-Le choix de 190 plaques est basé sur échangeur réel observé à la laiterie.

El Alouani-Safi, validé par le personnel technique.

L'équipement comprend trois zones d'échange thermique :

- **Zone A** : Refroidissement du lait pasteurisé par eau froide.
- **Zone B** : Récupération de chaleur entre le lait chaud sortant et le lait froid entrant.
- **Zone C** : Chauffage direct du lait par eau chaude.

IV.2.1. Hypothèses et données de base.

- Débit de lait : 6 000 l/h $\approx$ 1,67 kg/s
- Capacité thermique du lait : 3 900 J/kg.K=3.9KJ/kg.K

- Échangeur de chaleur à plaques avec 190 plaques (surface des plaques : 0,22 m²)
- Surface totale disponible : 41,8 m²
- Coefficient d'échange thermique total : $U = 2\,000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

IV.2.2 Données principale extraites d'HYSYS :

Zone	Opération	Surface(m ²)	Coefficient U(W/m ² .K)	UA (W/K)	Temp lait C° (in/out)	Temp eau C° (si présent)
A	Refroidissement	11.40	2180	24852	85 → 5	4 → 10.45
B	Récupération Thermique	11.40	2516	28680	5 → 60	-
C	Chauffage Direct	5.70	2439	13905	60 → 85	100 → 83.62

Tableau 11 : données principale extraites de HYSYS

IV.2.3. Calcul de l'énergie thermique par zone :

1-Zone (A)- Refroidissement du lait pasteurisé

Ecart de température : $\Delta T = 85 - 17 = 68^\circ\text{C}$

$$Q = m \times C_p \times \Delta T$$

$$Q_A = 1.67 \times 3.9 \times 55 = 358.2 \text{ KW}$$

2-Zone(B)-Récupération de chaleur

Ecart de température : $\Delta T = 60 - 5 = 55^\circ\text{C}$

$$Q_B = 1.67 \times 3.9 \times 55 = 358.2 \text{ KW}$$

3- Zone (C) – chauffage final

Ecart de température : $\Delta T = 85 - 73 = 12^\circ\text{C}$

$$Q_C = 1.67 \times 3.9 \times 12 = 78 \text{ KW}$$

4- Taux de récupération thermique

$$\begin{aligned}\eta_{\text{récupération}} &= Q_{\text{récupération}} / (Q_{\text{récupération}} + Q_{\text{chauffage}}) \\ &= 358.2 / (358.2 + 78) = 82.1\%\end{aligned}$$

IV.2.4. Importance et utilité de ces calculs :

1. Évaluation de l'efficacité du système thermique :

Ces calculs permettent de déterminer l'efficacité avec laquelle l'échangeur utilise la chaleur interne disponible, minimisant ainsi la consommation d'énergie.

2. Coûts et économies d'énergie :

Comme 82,1 % de l'énergie du lait chauffé est récupérée, il n'est pas nécessaire de recourir à des sources d'énergie externes telles que l'électricité ou la vapeur.

3. Amélioration de la conception industrielle

Ces calculs permettent de déterminer si l'échangeur doit être repensé ou ajusté en termes de nombre de plaques ou de surface d'échange pour optimiser son efficacité.

4. Durabilité environnementale :

Plus le taux de récupération est élevé, moins l'énergie est gaspillée et, par conséquent, plus l'impact environnemental de l'installation est faible.

5. Contrôle et surveillance :

Ces valeurs constituent une base précieuse pour le suivi régulier des performances de l'échangeur et pour intervenir en cas de baisse de performance.

Conclusion

Un taux de récupération de 82,1 % indique un système thermique bien conçu et efficace, réduisant les coûts d'exploitation mais augmentant la performance énergétique tout en maintenant la qualité et la sécurité au niveau des normes industrielles.

Chapitre V : Discussion des résultats

V.1. Analyse thermique du système :

a. Résultats COMSOL :

Bonne visualisation des profils de température et des isothermes à l'intérieur de l'échangeur.

La simulation montre une diffusion thermique régulière, depuis une température d'entrée de 10 °C (lait) jusqu'à 80 °C (eau chaude), permettant d'atteindre rapidement la température de pasteurisation.

L'homogénéité du champ thermique indique une bonne homogénéité du procédé, essentielle pour éviter les zones de sous-pasteurisation.

b. Résultats HYSYS

L'outil fournit des calculs thermiques macroscopiques par zone (récupération, refroidissement, chauffage).

Un rendement de récupération de chaleur de 82,1 % a été atteint, réduisant significativement les besoins énergétiques pour le chauffage du lait.

Calcul des besoins énergétiques par zone (358,2 kW de récupération, 78 kW de chauffage final).

Conclusion : Les deux approches confirment l'efficacité thermique de l'échangeur de chaleur, mais HYSYS calcule l'impact énergétique avec plus de précision, tandis que COMSOL fournit une vision spatiale précise.

V.2. Étude des contraintes mécaniques et de l'écoulement :

a. COMSOL.

Simulation d'un écoulement laminaire dans les canaux de l'échangeur de chaleur, justifiée par un nombre de Reynolds < 2300 .

Observation de zones de stagnation ou de faibles vitesses aux angles, pouvant entraîner un encrassement local ou une perte d'efficacité.

Les lignes de courant sont majoritairement parallèles, signe d'une bonne conception hydrodynamique.

b. HYSYS.

HYSYS ne permet pas la simulation des écoulements internes ni de la mécanique des fluides ; l'analyse hydrodynamique n'est donc pas disponible.

Conclusion : COMSOL apporte une valeur ajoutée évidente pour l'analyse des performances hydrodynamiques et l'analyse des zones à risques, un point clé pour la maintenance industrielle.

V.3. Optimisation de la géométrie de l'échangeur de chaleur :

COMSOL permet de réaliser une optimisation topologique par analyse de maillage et distribution de température.

Une géométrie déformée (plaques plus larges et redistribution des orifices) a permis d'améliorer l'uniformité de la température et de réduire les pertes de charge internes.

Conclusion : La flexibilité géométrique de COMSOL en fait un outil de conception prédictive adapté, ce qui est difficile à obtenir avec HYSYS.

V.4. Impact économique et énergétique :

Notre modèle atteint 80%, ce qui est cohérent, Réduction des besoins externes en vapeur ou en électricité, augmentant la rentabilité du système.

Supposons que la pasteurisation d'un litre de lait consomme 0,04 kWh d'énergie thermique.

Pour 6 000 L/jour $\Rightarrow$ 240 kWh/jour $\rightarrow$ Si l'efficacité énergétique est augmentée de 10 % grâce à l'optimisation $\rightarrow$ 24 kWh/jour économisés.

À 10 DA/kWh $\Rightarrow$ économies quotidiennes = 240 DA

$\Rightarrow$ 6 000 DA/mois ou 72 000 DA/an.

Cela représente un avantage économique significatif à long terme.

Le flux parallèle dans les sections A, B et C de l'échangeur de chaleur réduit le temps de traitement et augmente la productivité.

. V.5. Impact de l'amélioration COMSOL sur l'efficacité globale :

Cette interaction entre les résultats de la modélisation fine (COMSOL) et de la simulation globale du procédé (HYSYS) souligne l'importance de l'optimisation numérique dans les systèmes thermiques industriels, tant pour réduire la consommation d'énergie que pour optimiser en continu les performances thermiques.

Nous recommandons d'intégrer une approche hybride combinant COMSOL pour l'optimisation géométrique et HYSYS pour la validation énergétique globale.

Cette double approche permettrait d'améliorer l'efficacité thermique des pasteurisateurs industriel tout en réduisant les coûts énergétiques.

De futures études pourraient inclure une validation expérimentale pour consolider les résultats numériques.

Conclusion Général

Dans un contexte industriel où l'efficacité énergétique et la sécurité alimentaire sont primordiales, ce travail a porté sur l'optimisation thermique d'un système de pasteurisation du lait utilisant un échangeur de chaleur à plaques.

Grâce à une approche multidisciplinaire combinant connaissances théoriques, observations sur site et simulations numériques via COMSOL Multiphysics 6.3 et Aspen HYSYS, nous avons pu évaluer les performances thermiques et hydrodynamiques de l'équipement en conditions industrielles réelles à la laiterie El Alouani-Safi (Ghardaïa).

Les simulations ont confirmé que l'échangeur de chaleur à plaques est particulièrement adapté à la pasteurisation du lait en raison de son rendement élevé, de sa compacité et de sa facilité de nettoyage. COMSOL a permis de visualiser précisément la distribution de température, les vitesses d'écoulement et les zones de perte thermique, tandis que HYSYS a fourni une estimation rigoureuse des bilans énergétiques.

En conclusion, ce projet démontre l'intérêt d'une approche hybride intégrant modélisation géométrique et analyse énergétique pour améliorer l'efficacité des procédés thermiques dans l'industrie agroalimentaire. Il ouvre également la voie à des pistes d'innovation futures telles que l'automatisation, l'intégration de matériaux avancés ou la réduction de l'empreinte énergétique globale des installations.

- [1] **Abounacer, B., & Baslimane Hadj, A. (2024).** Politique de distribution : une étude de cas sur : Laitière Elalouani - Safi - Ghardaïa (Mémoire de master). Université de Ghardaïa.
- [2] **Fodil, B., Amira, M., Diyaeddine, S., Abdrrahim, B., & Charif, B. (2024).** Conception et optimisation d'un système de pasteurisation de lait (Mémoire de master). Université Abdelhafid Boussouf - MILA.
- [3] **Meunier-Goddik, L., & Sandra, S. (2002).** Liquid milk products I: Pasteurized milk. In Encyclopedia of Dairy Sciences (Vol. 3, pp. 1627–1632). Academic Press.
- [4] **Vitrine linguistique. (n.d.).** Pasteurisation haute. <https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/18964299/pasteurisation-haute>
- [5] **Canadian Food Inspection Agency. (2023).** Dairy processing: Batch pasteurization systems. <https://inspection.canada.ca/en/preventive-controls/dairy-products/batch-pasteurization>
- [6] **Bylund, G. (2015).** Dairy processing handbook. Tetra Pak.
- [7] **NATURA. (n.d.).** The advantages of UHT processing (Ultra-High-Temperature) in plant-based milk production. <https://natura.ca/en/the-advantages-of-uht-processing-ultra-high-temperature-in-plant-based-milk-production/>
- [8] **Merigaud, J. P., Lemoine, T., Aguer, D., Gillis, J. C., Jouanneau, F., Koubbi, L., Lepêcheur, M., & Madiott. (2009).** Spécification technique de l'achat public laits et produits laitiers. GEM RCN.
- [9] **Ouidmustapha, A., N'Diyae, D., & Ouid Kory, B. (2012).** Étude de la qualité du lait pasteurisé des industries laitières situées à Nouakchott (Mauritanie). Sciences du vivant.
- [10] **Avedemil. (n.d.).** Lait pasteurisé. <https://www.avedemil.com/fr/lait-pasteurise>
- [11] **Augustin, M. A., Clarke, P. T., & Craven, H. (2003).** Characteristics of milk powders. Elsevier Science Ltd, 4703.

- [12] **Boularak, A. (2005).** Guide des déterminations analytiques des laits et produits laitiers. Ministère du Commerce, Algérie.
- [13] **M'boya, J.-C., Broutin, C., & Dudez, P. (2001).** Le lait pasteurisé. GRE-Agridoc, ministère français des Affaires étrangères, pp. 4–5.
- [14] **M'boya, J.-C. (2001).** Groupe de Recherche et d'Échanges Technologique. Éditions Lafayette, Paris.
- [15] **Smithwell, N., & Kailasapathy, K. D. (1995).** Psychotropic bacteria in pasteurised milk: Problems with shelf life. Australian Journal of Dairy Technology, 50, 28–31.
- [16] **Vandercammen, M. (2011).** Quel lait choisir ? CRIOC - Centre de Recherche et d'Information des Organisations de Consommateurs, 015-11, p. 3.
- [17] **International Dairy Federation (IDF). (2020).** Guidelines for pasteurization of milk and dairy products. <https://www.fil-idf.org/publications/>
- [18] **Food and Agriculture Organization (FAO). (2018).** Pasteurization applications beyond the food industry. <http://www.fao.org/3/ca7036en/ca7036en.pdf>
- [19] **European Commission. (2019).** Safety guidelines for cosmetic products: Pasteurization techniques. https://ec.europa.eu/growth/sectors/cosmetics_en
- [20] **Kakac, S., & Liu, H. (2002).** Heat exchangers: Selection, rating, and thermal design. CRC Press.
- [21] **Chung, S. Y., & Sung, H. J. (2003).** Direct numerical simulation of turbulent concentric annular pipe flow. Part 2: Heat transfer. International Journal of Heat and Fluid Flow, 24, 399–411.
- [22] **Alfa Laval. (n.d.).** Fonctionnement d'un échangeur à plaques. <https://www.alfalaval.fr/produits/echange-thermique/echangeur-plaque-fonctionnement/>

- [23] Lalande, M., Corrieu, G., Tissier, J. P., & Ferret, R. (n.d.). Étude du comportement d'un échangeur à plaques Vicarb utilisé pour la pasteurisation du lait.
- [24] RECOWA Group. (2022). Échangeur de chaleur à plaques et joints. <https://www.recowa-group.com/echangeur-chaleur-a-plaques-et-joints/>
- [25] Alfa Laval. (2022). Plate heat exchangers in dairy processing [Technical manual]. <https://www.alfalaval.com/applications/dairy/>
- [26] SPX Flow. (2023). Tubular heat exchangers for UHT milk [White paper]. <https://www.spxflow.com/dairy-solutions>
- [27] Lewis, M. J., & Heppell, N. J. (2000). Continuous thermal processing of foods (Chap. 4). [Comparaison efficacité PHE vs tubulaire].
- [28] AXFLOW. (n.d.). Échangeurs thermiques à surface raclée. <https://www.axflow.com/fr-fr/catalogue/des-produits/echangeurs-de-chaleur/echangeurs-thermiques-a-surface-raclee>
- [29] Factory Future. (n.d.). Fonctionnement d'un échangeur tubulaire. <https://www.factoryfuture.fr/fonctionnement-echangeur-tubulaire/>
- [30] Sacome. (2024). Avantages des échangeurs tubulaires. <https://www.sacome.com/fr/ventajas-intercambiadores-calor-tubulares/>
- [31] COMSOL. (2024). La modélisation multiphysique et les applications de simulation autonomes comme vecteurs d'innovation. <https://www.comsol.fr/blogs/multiphysics-modeling-and-standalone-simulation-apps-drive-innovation>
- [32] COMSOL. (2024). COMSOL Multiphysics. <https://www.comsol.fr/comsol-multiphysics>
- [33] Shailesh prasad, mémoire de fin d'étude, simulation of nitrogen liquefaction cycles.

[34] Said, S. (2020–2021). *Présentation du logiciel HYSYS – Simulateurs en GP*. Notes de cours, Université de Batna-2, Faculté de Technologie, Filière Génie des Procédés, Spécialité Génie Chimique, Master I GC

Annexe 1 : Attestation d'autorisation de correction et de dépôt.

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université de Ghardaïa
Faculté des Sciences et de la Technologie



جامعة غرداية
كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم : الآلات والكهربيك

غرداية في : 22/09/2025

...Electromagnétique: شحنة

Manufacturing industrial: تخصص

شهادة ترخيص بالتصحيح والاياداع:

انا الاستاذ (ة) ج. و. س. ن. ب. س. و. ف. م. ي.

بصفتي المشرف المسؤول عن تصحيح مذكرة تخرج (ليسانس/ماستر/دكتورا) المعنونة بـ:

étude et simulation des performances d'un postérieur de
bait par un échangeur thermique à plaque

من انجاز الطالب (الطالبة):

...موسیٰ... اہل... موسیٰ...

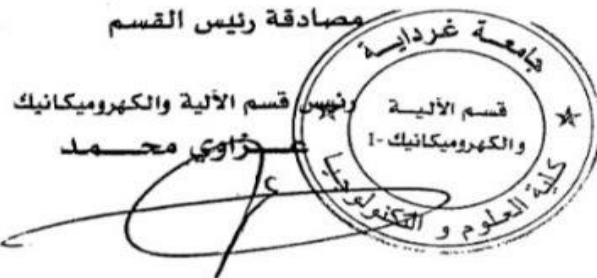
کرمی منی الحاج المنصور

..... 2025 / 06 / 12 التي نوقشت/قيمت بتاريخ:

اشهد ان الطالب/الطالبة قد قام /قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة المناقشة وقد تم التحقق من ذلك من طرفنا

وقد استوفت جميع الشروط المطلوبة .

مصادقة رئيس القسم



امضاء المسؤول عن التصحيح

~~BT~~