REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES



Mémoire

Présenté pour obtenir le diplôme de **Master**

En chimie

Spécialité : Chimie macromoléculaire

Par :

Etudiant 1 : NEMAMSI CHAHRAZED
Etudiant 2: FETTAK KHADIDJA

Thème :

Contribution numérique à l'étude des performances thermiques d'un échangeur de chaleur à plaques lors d'une phase de traitement thermique d'une solution protéique avec la présence de chicane

Soutenue publiquement, Devant le jury composé de :

Gasmi Sara Nawel.	Grade : MCB	FS/Univ. Médéa	Président
Amirouche Abiza	Grade : MAA	FS/Univ. Médéa	Examinateur
Mahdi Youcef	Grade : MCA	FS/Univ. Médéa	Encadreur

Année universitaire : 2019/2020

الملخص

المحاكاة وتحليل النتائج العددية لظواهر التسربات في المبدلات الحرارية للصفائح بواسطة المحلول البروتيني أثناء مرحلة المعالجة الحرارية المسماة بالبسترة بواسطة نموذج تم دراسته . النتائج التي تم تطويرها فيما يتعلق بدرجة الحرارة و السرعة مع وبدون ترسب تظهر انخفاضا في درجة الحرارة وزيادة السرعة في وجود الترسب.

تم استعمال الحواجز من أجل تحسين التبادل الحراري .النتائج تبين أن الحاجز يلعب دور في العقبات ويعطي اضطرابا إضافيا وبالتالي تبادل حراري أفضل

الكلمات المفتاحية: محلول البروتيني, مبدلات حرارية ذات لوحات, نموذج , ترسب, حاجز .

RESUME

la simulation et l'analyse des résultats numériques du phénomène de l'encrassement dans les échangeurs de chaleur à plaques par une solution protéique lors d'une phase de traitement thermique appelé pasteurisation par un modèle mathématique est considérée.

Les résultats développés concernent la température et la vitesse avec et sans encrassement. Ils montrent une chute de la température, une augmentation de la vitesse en présence de l'encrassement.

Les chicanes sont employées pour améliorer les performances thermiques. Les résultats obtenues montres que les chicanes jouent un rôle d'obstacle et donnent une turbulence supplémentaire donc un meilleur échange thermique.

Mots clés : solution protéique, échangeur de chaleur à plaques, modèle, encrassement, chicane.

ABSTRACT

The Simulation and analysis of numerical results of fouling phenomena donations the plate heat exchanger by protein solution during a heat treatment phase called pasteurization by mathematical model is considered.

The results developed relate to temperature and velocity with and without fouling. They show a drop in temperature, an increase in speed in the presence of fouling.

The chicane is utilised for improve thermal performance. The chicane is used to improve thermal performance. The results obtained show the chicane acts as an obstacle and gives additional turbulence and therefore better heat exchange.

Key words: protein solution, Plate Heat Exchanger, model, fouling, chicane.

Remerciements

Nous formulons notre profonde gratitude à dieu Le tout puissant

Qui nous a donné l'énergie nécessaire pour la réalisation de ce

Projet,

Avant de présenter cette étude, nous tenons beaucoup à présenter Notre remerciement et nos respects à notre promoteur Mr, mahdi Yousef, pour son aide précieuse ses conseils, sa confiance son Orientation qu'il n'a pas cessé de nous apporter durant la durée de La réalisation de ce travail,

Nous remercions particulièrement Mr. Zirari Mounire pour

Leurs suivis, leurs conseils et leurs aides, tout au long de la

Réalisation de ce modeste travail.

Nous remerciements vont aussi à tous les membres du jury qui ont Accepté de jugé ce travail et à tous les enseignants,

Sans oublié de remercier tous les enseignants et les étudiants de Chimie macromoléculaire de l'université de Yahia Farés Médéa.

On remercie tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la

Réalisation de ce travail



Dédicace

Nous tenons à remercier Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volante et la force pour réaliser ce modeste travail

A cette ocasion.je dédie ce modeste travail :

A ma mère :

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amoure que vous me portez de puis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés le fruit de vos innombrables sacrifices, puisse dieu, le très haut vous accorder santé, bonheur et longue vie.

Et mes très chers frères, mes sœurs et toute ma famille et mon binôme et fidèle amie Chahrazed et tous mes chères amis et tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

khadidja

Designed by pngtree

Dédicace

Je remercie tout d'abord le bon dieu tout puissant qui ma donné la force et le courage pour terminer ce travail.

A mon très cher père, l'homme Belkacem le plus parfait dons le monde mon grand exemple et secret de ma réussite Ma mère, source de compassion et de tendresse, l'exemple de patience et de sacrifice, la raison de mon existence et le support de ma vie ;

Que dieu les protégé et leur réserviez une langue vie pleine de bonheur et de sante

A mes adorables sœurs : Souhila, Sara, Siham

A mes beaux frères : Ahmed Hakim Salim hamza et Djamel

A tout la famille Nemamci et Bouchali

A mes amis proches ; Meriem, Rafika, Ahlem, Amel

Tous mes amis spécialement de chimie macro khadidja, fatma, Meriem, foziya, khayra……..

chahrazed

SOMMAIRE

Remerciements……...……..…I

Résumé……..……..……..…..II

Nomenclature……...……III

Liste des figures…….……...….IV

Introduction générale……..…….….01

Chapitre I : Le lait, les produits laitiers et les traitements thermique

I. Le lait…….……..….....03

I.1.Définition……...……...…03

I.2.Laits de consommation……..……..03

I.3. Caractéristiques physicochimique dulait……..……...….04

I.4.La composition du lait…….……..……..05

I.4.1LesProtéines…….……...……07

I.4.1.1. Les Caséines……..….07

I.4.1.2. Les Protéines du lactosérum…….…….……..08

I. Traitement thermique de lait ……...……16

II.1.Thermorésistante des bactéries et des microorganismes…....…….…16

II.2.Procédés de traitement thermique……...…….……17

II.2.1. La pasteurisation…….……...…....17

II.2.1.1.Pasteurisation basse…….…….....…18

II.2.1.2. Pasteurisation rapide à haute température (High température short

time ou HTST)……. ……..…..18

II.2.1.3. Pasteurisation haute…….…….…….....19

II.2.1.4. Inconvénients de la pasteurisation.....…..19

II.2.2.La stérilisation …….……...…...20

II.2.2.1. Principe de la stérilisation……..…20

II.2.2.2. Le lait UHT……..……...…….……....21

II.2.2.3.Avantages de la stérilisation…….……..…...21

II.2.3.4.Inconvénients de la stérilisation……..……21

II.2.3. Différences entre pasteurisation et la stérilisation

UHT……...…....22

Chapitre II : Les Echangeurs de Chaleur & Encrassement

II.1. Notions générales sur les échangeurs……..……23

II.1.1. Définition……..……..23

II .1.2 But des échangeurs de chaleur……..…....23

II.1.3. Principe de fonctionnement…….……...…...24

II.1.4. Modes de transferts thermiques…….……..…..24

II.1.5. Principaux modes d'écoulement des deux fluides……..……..….25

II.1.6. Classement technologique……..28

II.1.6.1. Échangeurs tubulaires……...……..….28

II.1.6.2. Echangeurs à plaques…….…….……...….30

II.1.7. Comparaison entre un échangeur à plaques et un échangeur tubulaire……..……..32

II.1.8.Les Chicanes……..……..……33

II.2. Notions sur l'encrassement des échangeurs de chaleur…..…….34

II.2.1.Introduction…….…….....…..34

II.2.2. Définition……...……...…….….35

II.2.3. Catégories et types d'encrassement…….....…..…35

II.2.4.Paramètres Influençant l'encrassement…….…..…....37

II.2.4.1.La Vitesse d'encrassement…….……..38

II.2.4.2. La concentration de la matière encrassant…….……..……38

II.2.4.3.La Température de la surface d'échange de chaleur……....38

II.2.4.4. Etat de surface rugosité…….……39

II.2.4.5. La Corrosion……..……..……39

II.2.5 Apparition et développement de l'encrassement……..…….....…39

II.2.5.1.Initiation……..……....…..40

II.2.5.2. Transfert des particules à la paroi……...……..….40

II.2.5.3. Adhésion des particules……...…..……....…40

II.2.5.4. Réentraînement des particules déposées…….....40

II.2.5.5. Vieillissement du dépôt……..……...…..41

II.2.7. Modèles et mécanismes d'encrassement par le lait…….....41

II.2.8. Prévention de l'encrassement…….……..….42

Chapitre III : Modélisation et simulation de l'encrassement

I .Introduction…….……...……..……...…...44

II. Cycle de production…….....….44

II.1. Présentation……..……..….44

II.2. Les étapes de production……..……45

III. Modèle thermique de l'échangeur de chaleur à plaques……....….47

III.1. Introduction…….…..…47

III.2. Formulation mathématique du problème……..…49

III.2.1. Introduction…….……..…49

III.2.2. Modélisation de la turbulence dans un milieu totalement fluide……...……49

III.2.2.1. Les hypothèses……...…….……49

III.2.2.2. Equations de conservation…….……..……50

III.2.2.3. Conditions initiales et aux limites…….……50

III.2.3. Calcul du coefficient de transfert de chaleur global……..……52

III.2.4. Calcul des paramètres à mesurer du mélange (lait)……. ……52

III.2.5. Calcul des paramètres à mesurer de l'eau chaude……52

IV. Programme Ansys……..…….……55

IV.1. Présentation et description du logiciel Ansys……55

IV.4.2. Ansys CFD…….……58

IV.3. Ansys CFX ……...……59

IV.4. Principes……...…….……60

IV.5. Les points forts des outils Ansys…….……61

Chapitre IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS

I. Introduction …….……..……62

II. Profils dans un échangeur de chaleur à plaques sans encrassement …….……63

II.1. Profil de la température…….……..……63

II.2 Profil de vitesse ……..……65

III. Profils dans un échangeur de chaleur à plaques avec encrassement…….…….65

III.1. Profil de la température …….....……65

III.2. Profil de la vitesse …….……..……66

IV. Profils dans un échangeur de chaleur à plaques avec encrassement en présence de chicane…….…….……67

IV.1. Profil de température …….…….……67

IV. 2. Profil de la vitesse ……..…..…..……68

V. Etude comparative avec et sans chicane…….……69

V.1. Les profils dans un milieu complètement fluide…….……69

V.1.1. Profil de La température ……..……70

V.1.2. Profil de la vitesse …….……70

V.2. Les profils dans un milieu avec encrassement …….……..……72

V.2.1 Profil de La température ……...……72

V.2.2 Profil de La vitesse…….……...……73

CONCLUSION GENERALE 74

Références Bibliographiques……..……...V

Annexes……..……...……VI

Sommaire

Liste de figures

- **Chapitre I : Le lait, les produits laitiers et traitement thermique**

Figure I.1 : Structures primaire (a) et tridimensionnelle (b)
de la β-lg (variant A) ….. ....page : 9
Figure I.2 : Structures primaire et secondaire
du monomère de la βLg…….....page : 11
Figure I.3 : Représentation schématique de la structure secondaire
de la β-Lg variant B ……...…….……page :12
Figure I.4 : Structure tertiaire de la β-Lg illustrant la localisation
d'une molécule de rétinol dans la cavité hydrophobe…….....page : 13
Figure I.5 : Représentation schématique de changement de la structure
de la β-lg en fonction du pH……...……..... Page : 15

- **Chapitre II : Les échangeurs de chaleur & Encrassement**

Figure. II.1 : Représentation simplifiée d'un échangeur de chaleur.....page : 23
Figure. II.2 : Schéma de principe d'un échangeur de chaleur …….....page : 24
Figure. II.3 : Les trois modes de transfert thermique. ……..……...page : 25
Figure. II.4 : Evolution qualitative des températures dans un échangeur
tubulaire ou à plaques à Co-courant …….……....page : 26
Figure. II.5 : Evolution qualitative des températures dans un échangeur
tubulaire contre-courants. ……..……...page : 27
Figure. II.6 : Echangeur compact à courant croisé. ……..……....page : 27
Figure. II.7 : Différents types d'échangeurs tubulaires …..…….....page : 29
Figure II.8 : Echangeur à plaques. .....……page : 30
Figure. II.9 : Principe de fonctionnement d'un échangeur à plaque …..page: 31
Figure. II.10 : Diverses géométries de chicanes transversales……...page : 33
Figure .II.11 : disposition des chicanes..……..…....page : 34

Liste de figures

Figure. II.12 : Echangeur tubulaire encrassé ……..…..…..page : 35

Figure. II.13 : Représentation schématique des phases de dépôt et de réentraînement de l'encrassement dans le cas d'un liquide.....page : 41

- **Chapitre III : Modélisation et simulation de l'encrassement**

Figure III .1 : Cycle de Pasteurisation du Lait …….....page : 46

Figure III.2 : Arrangement des plaques de l'échangeur de pasteurisation et sens de circulation des fluides.....page : 48

Figure III .3 : Schématisation de la direction de l'écoulement entre deux plaques ……...……..... Page : 52

Figure III .4 : L'interface utilisateur graphique d'Ansys…… ...……page : 57

Figure III.5 : Les principaux modules des deux logiciels Ansys Icem & CFX…….....… page : 59

Chapitre IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Figure IV.1 : Ecoulement dans un canal à section rectangulaire..……page : 63

Figure IV.2 : La variation de la température dans lait.……...……page : 64

Figure IV.3 : La variation de la vitesse à la longue de canal..……...…page : 65

Figure IV.4 : La variation de la température à la longue de canal…..…..page : 66

Figure IV.5 : La variation de la vitesse à la longue de canal..……...…page : 67

Figure IV.6 : La variation de la température dans lait..……...…...…page : 68

Figure IV.7 : La variation du profil de vitesse dans le lait..... page : 69

Figure IV.8 : La variation de la température dans lait……... page : 70

Figure IV.9 : La variation du profil de vitesse dans le lait..…..... page : 71

Figure IV.10 : La variation de la température dans lait……. page : 72

Figure IV.11 : La variation du profil de vitesse dans le lait..……page : 73

Liste des tableaux

- **Chapitre I : Le lait, les produits laitiers et traitement thermique**

Tableau I.1 : Les caractéristiques du lait de vache ……page : 04

Tableau I.2 : Composition moyenne du lait entier……..page :06

Tableau I.3 : Composition moyenne en % du lait de vache, femme, brebis et chèvre……page : 07

Tableau I.4 : Les différentes variantes génétiques de la β-lg et leurs variations d'un point de vue de la position des acides aminés……page :10

- **Chapitre II : Les échangeurs de chaleur & Encrassement**

Tableau II. 1 : Comparaison entre un échangeur à plaques et un échangeur tubulaire ……...page :32

Symbole	**Définition**	**Unité**
A	Surface d'échange de chaleur	m^2
C	La concentration	Kg/m^3
Cp	Chaleur spécifique	$J/Kg\ ^0C$
D	Diamètre	m
d_e	Diamètre hydraulique	m
H	Hauteur du canal	m
h	Coefficient de transfert de chaleur du fluide	$W/m^2.^0C$
K	Conductivité thermique de l'eau	$W/m^2.^0C$
L	Longueur d'une plaque	m
Nu	Nombre de Nusselt	-
P	La pression	Pa
Pr	Nombre de Prandtl	-
Q	Débit volumique	m^3/s
Re	Nombre de Reynolds du fluide	-
S	Surface	m^2
t	Temps	s
T	Température	K
T_p	La température à la paroi	K
T_{m-s}	La température moyenne de sortie	K
T_e	La température d'entrée	K
U	Vitesse longitudinale de l'écoulement	m/s
U_0	Coefficient d'échange global à l'état propre	$W/m^2.k$
U_d	Coefficient d'échange global à l'état encrassé (dépôt)	$W/m^2.k$

V_f	Volume du fluide	m^3
V_t	Volume total	m^3
W	Largeur d'une plaque	m

1. SYMBOLES GRECS

Symbole	**Désignation**	**Unité**
μ_0	Viscosité dynamique de l'eau	kg/m.s
μ	Viscosité dynamique du mélange,	kg/m.s
ρ	La masse volumique	kg/m^3
λ	La conductivité thermique	W/m.k

2 LISTE D'ABREVIATIONS

ECP	Echangeur de chaleur à plaques
GUI	Interface d'utilisateur graphique
MGLA	La matière grasse laitière
UHT	Ultra Haut Transfert

3. INDICES

INDICES	**Exposants**
c	Chaud
f	Froid
i	Nombre d'itération
j	Canal
m	Mélange
p	Plaque, Paroi

Introduction générale

Depuis plusieurs années, les échangeurs de chaleur à plaques sont utilisés dans le secteur agro-alimentaire notamment dans le domaine de la fabrication de produits laitiers frais. Les raisons de ce choix sont dues aux nombreux avantages qu'ils présentent par rapport aux échangeurs tubulaires. Ils conduisent, en effet, à d'excellents rapports surface d'échange/volume qui limitent leur encombrement et simplifient leur intégration aux unités de production. La modification de leur configuration est aisée ce qui permet de les adapter facilement à un programme thermique différent de celui initialement prévu. L'évolution des produits laitiers frais (yaourts, crèmes dessert, laits gélifiés ...) sur le marché nécessite de telles modifications afin d'adapter les procédés de fabrication aux qualités demandées pour ces produits.

Dans les industries agroalimentaires une variété de traitements thermiques est utilisée un exemple typique est la pasteurisation du lait qui consiste en une opération de chauffage du produit traité. L'augmentation de la température du lait modifie certaines de ces propriétés et le rend instable. Elle n'affecte pas considérablement la composition du lait. Le traitement thermique engendre donc un encrassement de la surface d'échange en raison de la formation de dépôt de nature isolante ce qui diminue les performances, en particulier thermique, des équipements en créant une résistance supplémentaire au transfert et en augmentant les pertes de charges. En plus, il rend souvent plus difficile et plus long l'opération de nettoyage. Tous ces facteurs concourent à augmenter le cout de fonctionnement de l'installation. Le phénomène d'encrassement peut être défini comme l'accumulation d'éléments solides (particulièrement la protéine β-lactoglobuline macromolécule) indésirables sur les surfaces solides.

Cette étude est une contribution à la modélisation 2D de l'encrassement par le lait dans un canal d'un échangeur de chaleur à plaques. On s'intéresse à l'exploitation, à la confirmation et l'analyse de l'ensemble des résultats numérique de l'étude de l'encrassement des échangeurs de chaleur en présence

de chicane par un programme Ansys d'un modèle physique établi préalablement dans un travail antérieur. Il s'agit de simuler numériquement et de résoudre en régime transitoire les équations de conservation en adoptant un modèle de turbulence et de quantifier la résistance d'encrassement au cours du temps.

Dans cette optique, ce travail est présenté de la façon suivante :

Dans le premier chapitre quelques notions sur le lait, les produits laitiers et les méthodes de traitements thermiques du lait sont présentées.

Le deuxième chapitre est une description des échangeurs de chaleur en général, et en particulier les échangeurs de chaleur à plaques qui sont les mieux adaptés à l'industrie agroalimentaire en raison de la qualité de l'échange thermique possible avec la présence des chicanes, et une présentation de l'encrassement par le lait lors de la pasteurisation dans un échangeur à plaque.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation numérique et le choix de la méthode utilisée. La discrétisation des équations, ainsi que les étapes de résolution sont également présentés. Avec Une présentation de l'outil informatique employé (Ansys) pour la résolution du modèle physique choisi.

Le quatrième chapitre porte sur la présentation des résultats et leurs interprétations.

A la fin une conclusion générale de notre étude est présentée avec les perspectives

CHAPTRE I

LE LAIT, LES PRODUITS LAITIERS ET LES TRAITEMENTS THERMIQUE

I. Le lait

I.1. Définition

Le lait était défini en 1908 au cours du congrès international de la répression des fraudes à Genève comme étant « Le produit intégral de la traite totale et ininterrompue d'une femelle laitière bien portante, bien nourrie et nom surmenée. Le lait doit être recueilli proprement et ne doit pas contenir du colostrum » [1].

En général, le lait est un liquide alimentaire opaque, blanc mat légèrement bleuté ou plus ou moins jaunâtre, à odeur peu marquée au gout douceâtre, sécrété, après parturition, par la glande mammaire des animaux mammifères femelles pour nourrir leur nouveau-né, il est un aliment complet capable de fournir à l'organisme tous les éléments essentiels et nécessaires à sa croissance et à son développement [2].

Le lait cru est un lait non chauffé au-delà de 40°C ni soumis à un traitement non thermique d'effet équivalent notamment du point de vue de la réduction de la concentration en microorganismes [3].

Le lait est définit comme étant la sécrétion mammaire normale d'animaux de traite obtenue à partir d'une ou plusieurs traites, sans rien y ajouter ou en soustraire, destiné à la consommation comme lait liquide ou à un traitement ultérieur [4].

I.2. Laits de consommation

Le lait et les produits laitiers font partie des aliments à privilégier pour avoir une bonne alimentation et ils sont 9 sur 10 à affirmer et aimer. Les produits laitiers sont cités par 63% des enfants après les légumes (74%) et les fruits (65%) et avant la viande (58%) et l'eau (52%). Lorsqu'on interroge les mères, le lait, les

yaourts et les fromages apparaissent comme le trio laitier incontournable dans l'alimentation des enfants [5]. Les nourrissons humains, quand leur mère ne le peut (infections, éloignement, malformations) ou ne le veut pas, peuvent être allaités par d'autres femmes appelées nourrices, être nourris au biberon par du lait humain collecté ou à défaut doivent consommer du lait animal modifié, dit « lait maternisé », ou encore, en cas d'allergie, des «laits végétaux » tels que le lait de soja. Pour extraire le lait humain, on utilise un mécanisme particulier nommé tire-lait. Il existe des lactariums (banques du lait) pour pallier ces problèmes d'approvisionnement maternel [6].

I.3. Caractéristiques physicochimique du lait

Le lait est un liquide légèrement visqueux dont la composition et les caractéristiques physico-chimiques varient sensiblement selon les espèces animales et selon les races. Ces caractéristiques varient également au cours de la période de lactation ainsi qu'au cours de la traite.

Les principales propriétés physico-chimiques utilisées dans l'industrie laitière sont la masse volumique et la densité, le point de congélation, le point d'ébullition et l'acidité [7].

Ses principaux caractères sont les suivants (tableau I.1.) :

Tableau I.1. : Les caractéristiques du lait de vache [8].

Constats	Moyennes	Valeur extrêmes
Energie (Kcal/litre)	701	587-876
Densité du lait entier à 20°C	1.03	1.028-1.033
Densité du lait écrémé	-	1.036
Densité de la matière grasse	-	0.94- 0.96

pH à 20°	6.6	6.6 -6.8
Acidité titrable (degré Dornic)	16	15-17
Point de congélation (°C)	-	-0.250 a-0.550
Chaleur spécifique du lait entier à 15 C° (J/Kg °C)	0.940	-
Tension superficielle du lait entier à 15 C°(Dynes/cm)	50	47_53
Tension superficielle du lait écrémé à 15 C°(Dynes/cm)	55	52-57
Viscosité du lait entier à 20 C° (Pa· s) Conductivité électrique à 25 C° Point d'ébullition (°C)	2.2 45.10-4 -	- 40-50.10-4 100.7-100.15
Potentiel d'oxydoréduction (Volt)	0.25	+0.25-70.30
Point de fusion des grasses (°C)	36	-

I.4. La composition du lait

Le lait est reconnu depuis longtemps comme étant un aliment bon pour la santé. Source de calcium et de protéines, il peut être ajouté à notre régime sous plusieurs formes [9]. Les laits sont les seuls aliments naturels complets qui existent, chacun d'eux étant adapté à la race qu'il permet de développer [10]. Le lait est une source importante de protéines de très bonne qualité, riches en acides aminés essentiels, tout particulièrement en lysine qui est par excellence l'acide aminé de la croissance. Ses lipides, caractérisés par rapport aux autres corps gras alimentaires par une forte proportion d'acides gras à chaîne courte, sont beaucoup plus riches en acides gras saturés qu'en acides gras insaturés. Ils

véhiculent par ailleurs des quantités appréciables de cholestérol et de vitamine A ainsi que de faibles quantités de vitamine D et E [11].

Les principaux constituants du lait par ordre croissant sont :

- L'eau, très majoritaire ;
- Les glucides principalement représentés par le lactose ;
- Les lipides, essentiellement des triglycérides rassemblés en globules gras ;
- Les sels minéraux à l'état ionique et moléculaire ;
- Les protéines, caséines rassemblées en micelles, albumines globulines solubles ;
- Les éléments à l'état de trace mais au rôle biologique important, enzymes, vitamines et oligoéléments. [12].

La composition moyenne du lait entier est donnée dans le tableau I.2.

Tableau I.2. : Composition moyenne du lait entier [13].

Composants	Teneurs (g/100g)
Eau	89.5
Dérivés azotes	3.44
Protéines	3.27
Caséine	2.71
Protéines solubles	0.56
Azote non protéique	0.17
Matières grasses	3.5
Lipides neutres	3.4
Lipides complexes	<0.05
Composés liposolubles	<0.05

Glucides	4.8
Lactose	4.7
Gaz dissous	5% du volume du lait
Extrait sec total	12.8 g

La composition moyenne en % du lait de vache, femme, brebis et chèvre [14] est donnée dans le tableau I.3.

Tableau I.3. : Composition moyenne en % du lait de vache, femme, brebis et chèvre [14].

Composant	**Vache**	**Femme**	**Brebis**	**Chèvre**
Protéines	3.4	10	2.9	5.5
Caséines	2.8	0.4	2.5	4.6
Lipides	3.7	3.8	4.5	7.4
Lactose	4.6	7.0	4.1	4.8
Minéraux	0.7	0.2	0.8	1.0

I.4.1. Les Protéines

Les protéines sont des éléments essentiels au bon fonctionnement des cellules est vivantes été constituent une part importante du lait et des produits laitiers [15].

I.4.1.1. Les Caséines

Les caséines forment près de 80% de toutes les protéines présentes dans le lait. Elles se regroupent sous forme sphérique appelée micelle. La taille des

micelles se situe entre 100 et 500 nm ; avec un diamètre moyen près de180 nm et elle varie principalement selon l'espèce animale, la saison, le stade de lactation [16].

I.4.1.2. Les Protéines du lactosérum

Le lactosérum est le liquide résiduel de la production fromagère et représente environ 80 à 90 % du volume total du lait. C'est un produit complexe avec une composition très variée en nutriments (lactose, protéines, lipides, minéraux) selon sa provenance et ses caractéristiques (lactosérum doux ou acide). Le lactosérum contient des protéines solubles qui comptent pour environ 20 % des protéines totales du lait. La β- lactoglobuline (β-lg) et l'α-lactalbumine (α-la), les deux protéines majeures du lactosérum, ont fait l'objet de nombreuses études en raison de leur potentiel nutritionnel et fonctionnel [17].

- ***α-lactalbumine***

L'α-lactalbumine est une protéine de 123 acides aminés comportant trois variantes génétiques (A, B, C). Métalloprotéine (elle possède un atome de calcium par mole) du type globulaire (structure tertiaire quasi sphérique). Elle présente environ 22% des protéines du sérum [18].

- **β-lactoglobuline**

  - ***Présentation***

La β-lactoglobuline (β-lg) est la plus abondante des protéines du lactosérum bovin, représentant près de 40 % de son contenu total. C'est une protéine globulaire contenant 162 acides aminés ; elle est reconnue pour sa richesse en

lysine, leucine, acide glutamique et acide aspartique. Son poids moléculaire est de 18 400 Da et son pI de 5,1. Sa structure secondaire est composée en majorité de feuillets β (≈50 %), mais on retrouve également des hélices α (10 %), des coudes β (8 %) et une assez forte proportion de structure désordonnée (35 %). Sa structure est également renforcée par deux ponts disulfures et par une structure tertiaire composée majoritairement de feuillets β antiparallèles [La séquence primaire en acides aminés ainsi qu'une représentation de sa structure tridimensionnelle sont présentées à la figure I.1 [17].

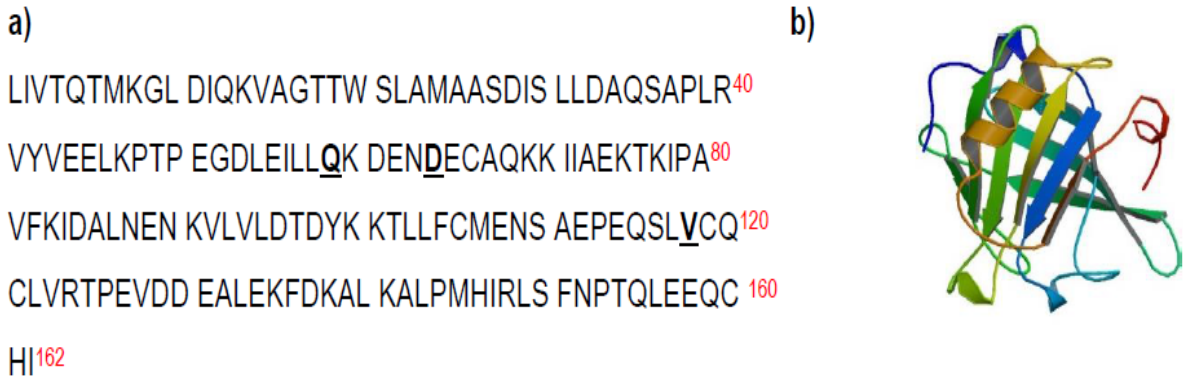


Figure1.1 : Structures primaire (a) et tridimensionnelle (b) de la β-lg (variant A) [19].

Jusqu'à présent, 11 variantes génétiques de la β-lg du lait bovine ont été identifiés (β-lg A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, W). Les trois variantes couramment dosés dans le lait bovin étant les variantes β-lg A, β-lg B et β-lg C. Les variantes A et B se différencient par les acides aminés en position 64 (A : Asp; B : Gly) et 118 (A : Val; B : Ala). Les variantes β-lg B et β-lg C diffèrent par la composition en acide aminé en position : 59 (B : Gly; C : His) (Tableau I.4). [19].

Tableau I.4. : Les différentes variantes génétiques de la β-lg et leurs variations d'un point de vue de la position des acides aminés.

Variantes	Diffusion	Espèces*	Position										
			45	50	56	59	64	70	78	108	118	126	129	158
A	Plus commun	T,I,G	Glu	Pro	Ile	Gln	Asp	Lys	Ile	Glu	Val	Pro	Asp	Glu
B	Plus commun	T,I,G					Gly				Ala			
C	Plutôt commun	T				His	Gly				Ala			
D	Plutôt commun	T	Gln				Gly				Ala			
E	Plus commun	G,J					Gly				Ala			Gly
F	Rare	J		Ser			Gly				Ala		Tyr	Gly
G	Rare	J					Gly		Met		Ala			Gly
H	Rare	T						Asn						
I	Rare	T					Gly			Gly	Ala			
J	Rare	T					Gly				Ala	Leu		
W	Rare	T			Leu		Gly				Ala			

*T = Bos taurus; I = Bos indicus; G = Bos grunniens; J = Bos javanicus.

- ***Les Caractéristiques structurales***

1) Structures primaire [20]

La Structures primaire de La β-lg contient deux ponts disulfures localisés entre les résidus CyS66 et CYSI60, CySl06 et CySll9 ou Cysl2l [21]. Un groupement thiol libre (- SH) se trouve positionné sur le résidu CySl19 ou CyS121. Il est à noter que ce groupement n'est pas toujours présent en fonction de l'espèce

considérée, comme par exemple chez la truie. Les deux principaux variant, A et B, diffèrent par la substitution de deux résidus, l'acide aspartique 64 étant dans le variant B remplacé par une glycine dans le variant A tandis que la valine 118 est substituée par un résidu alanine (Figure 2.1)

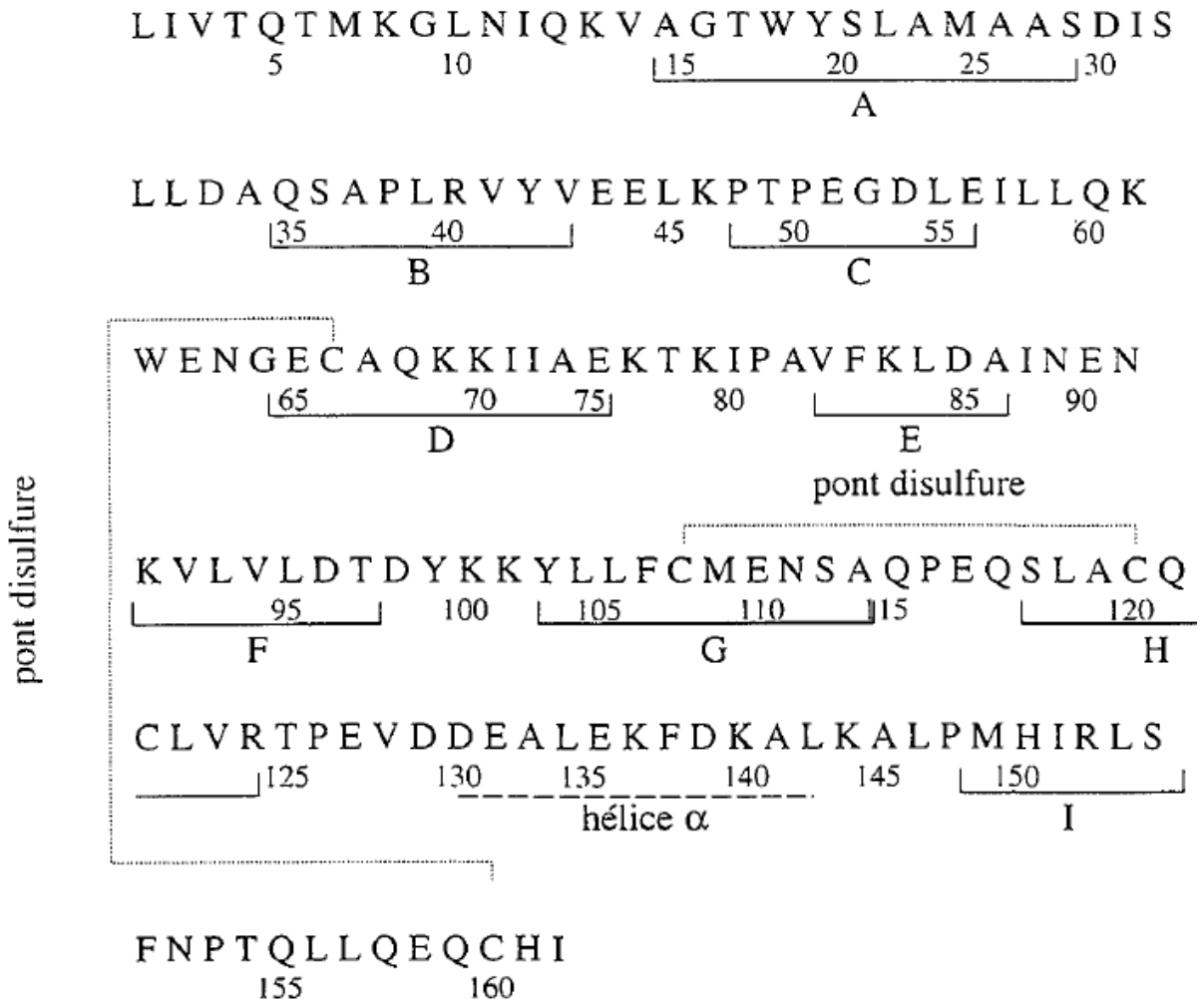


Figure I.2. : Structures primaire et secondaire du monomère de la β-Lg.

2) la structure secondaire [20]

Des estimations très variables de la structure secondaire de la β-lg ont été faites par dispersion optique rotatoire par dichroïsme circulaire par spectroscopie infrarouge et par simulations informatiques. Globalement, la structure secondaire de la β-lg serait composée d'environ 15% d'hélice α, 51% de feuillet β, 17% de courbures β et 17% de structure désordonnée. La quantité importante

de feuillets β serait responsable des interactions entre les monomères, pouvant mener jusqu'à l'agrégation et la gélification de la Protéine. La Figure I.3 illustre, de façon schématique, la structure secondaire de la β-Lg.

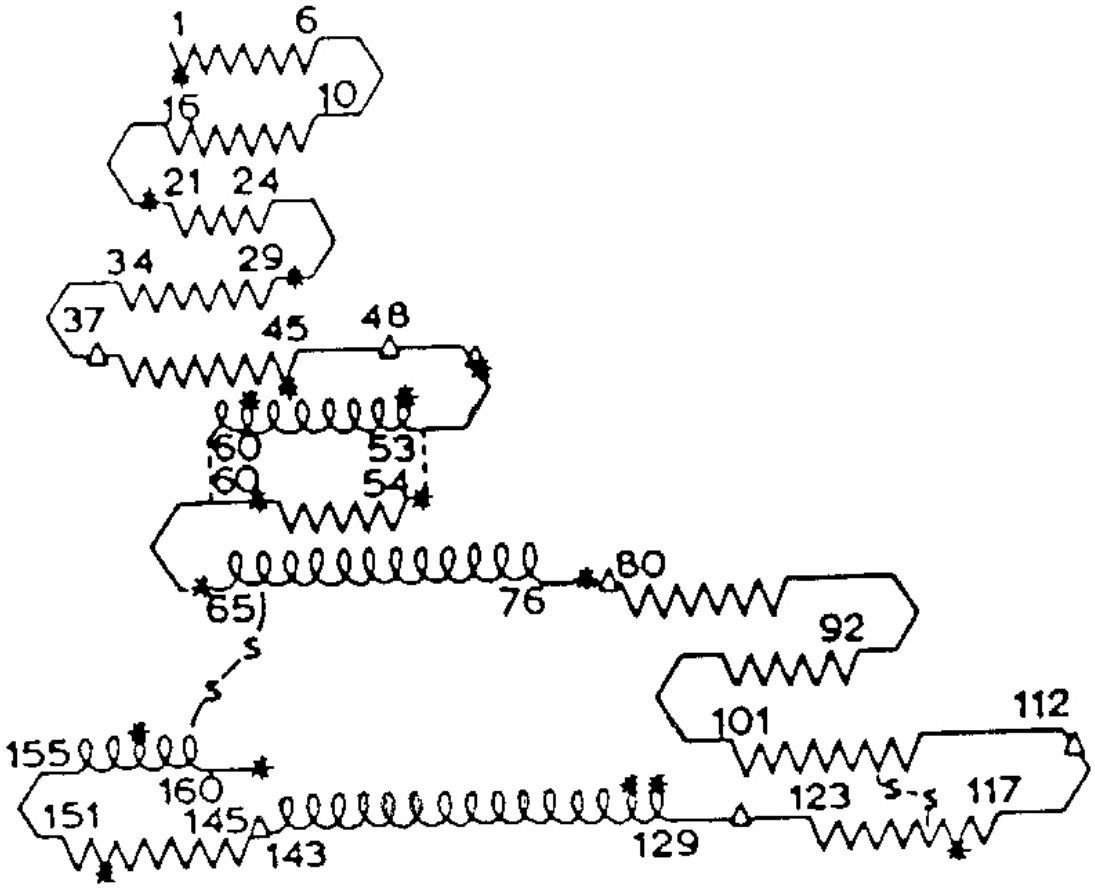


Figure I.3. : Représentation schématique de la structure secondaire de la β-Lg variant B.

La localisation des feuillets β, des hélices α, des prolines et des résidus substitués dans les variantes génétiques est Illustrée.

3) la structure tertiaire de La β-Lg [19]

La structure tertiaire de la β-lg native est composée de neuf feuillets β antiparallèles qui sont localisés entre les positions 15-24, 35-44, 49-56, 65-74, 82-85, 91-97,102-111, 116-124 et 145-150.

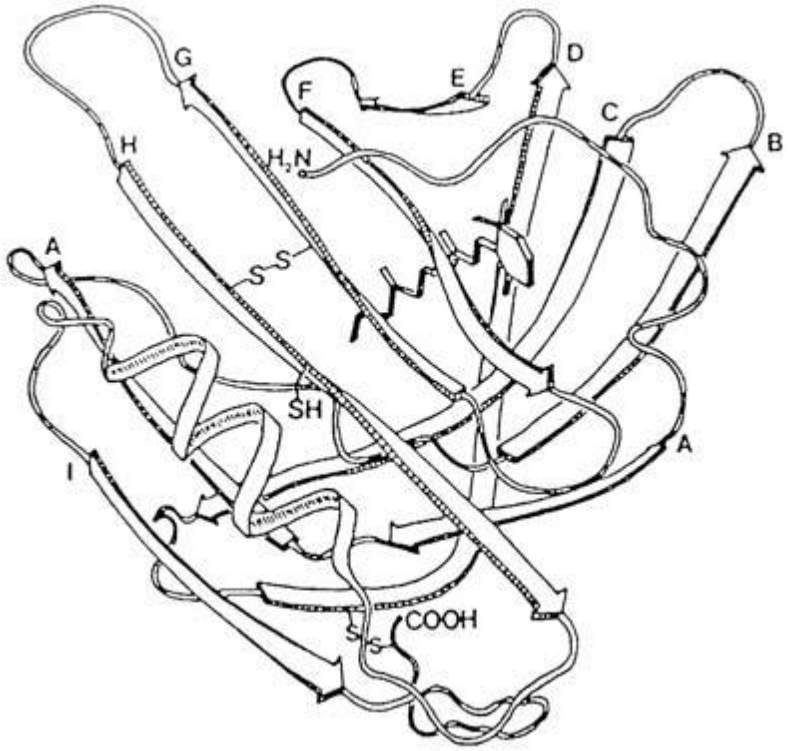


Figure I.4. : Structure tertiaire de la β-Lg illustrant la localisation d'une molécule de rétinol dans la cavité hydrophobe.

4) Structure quaternaire de La β-lactoglobuline [20]

La β-Lg présente la particularité de posséder une large gamme d'états d'association, et donc de structures quaternaires, en fonction de différents paramètres environnementaux dont les plus importants sont le pH, la force ionique du milieu et la température, qui agissent de manière concomitante. De plus, la structure quaternaire de la β-Lg influence certaines de ses propriétés physico-chimiques.

- **Trois Propriétés physico-chimiques de La β-lactoglobuline** [19]

Le premier paramètre affectant la structure et les propriétés physico-chimiques de la β-lg est la température. Ainsi, la dénaturation de cette protéine débute à 65 °C et est presque totale après chauffage à 90 °C pendant 5 minutes. De manière

plus spécifique, lorsque la température atteint 55ºC, le dimère va se dissocier et former deux molécules monomériques (à pH neutre). Après dissociation et jusqu'à 60ºC, seulement quelques ponts hydrogènes intramoléculaires sont rompus, mais la protéine conserve la grande majorité de sa structure tertiaire. Les modifications pouvant survenir en dessous de 60°C seraient pour la majorité réversibles. Entre 65 et 75 ºC, les changements de la structure tertiaire sont suffisamment importants pour exposer les régions hydrophobes et activer le groupement sulfhydrile libre et que la protéine ne puisse plus retrouver son état natif. En prolongeant l'exposition de la β-lg aux hautes températures, le dépliement des structures tertiaires et secondaires est accentué, rendant le groupement sulfhydrile davantage réactif. Des oligomères sont ainsi formées par des liaisons non-covalentes (associations hydrophobes et induite par la présence de sel) qui se produisent principalement entre 75 °C et 85 °C. Les associations hydrophobes sont limitées à des températures supérieures à 85 °C, en raison des changements de la structure de l'eau. Enfin, le déroulement de la structure de la protéine résiduelle est observé entre 125 °C et 150 °C, probablement induite par la décomposition chimique de liaisons disulfures.

Le deuxième facteur ayant des effets sur la β-lg est le pH. Entre pH 2 et 13, la β-lg présente un certain nombre des transitions structurelles locales et globales. À pH inférieur à 3,5, la β-lg existe sous forme de dimères et aucune altération peptidique n'apparaît dans sa structure. De plus, elle possède une certaine résistance à la dénaturation à pH 2. Entre pH 3.5 et 5.5, la β-lg subit une transition structurale, passant de dimères à un octamère par la mise en jeu d'interactions protéine-protéine. Entre pH 4.5 et pH 6, la structure de la β-lg passe d'une forme native étendue (Q-forme) à une forme plus compacte (N-forme). Cette transition Q-à-N peut induire des changements structuraux et des changements au niveau de son hydratation [30]. Entre le pH 7,1 et 8,2, la β-lg subit une transition qui est connu comme la transition de Tanford (N-R) .

Le début de cette transition est causé par le groupement carboxyle du résidu Glu89, enfouis à pH 6,2 et exposé à pH 7,1 et 8,2 et par l'ouverture de la cavité hydrophobe de la molécule par de potentielles interactions hydrophobes. Au pH basique (>9), la β-lg est dénaturée. Cette dénaturation est irréversible et entraine une augmentation de la réactivité des groupements thiols qui induisent une interruption globale de ces structures secondaires et tertiaires. La Figure I.5 montre une représentation schématique du changement de la structure de la β-lg en fonction du pH.

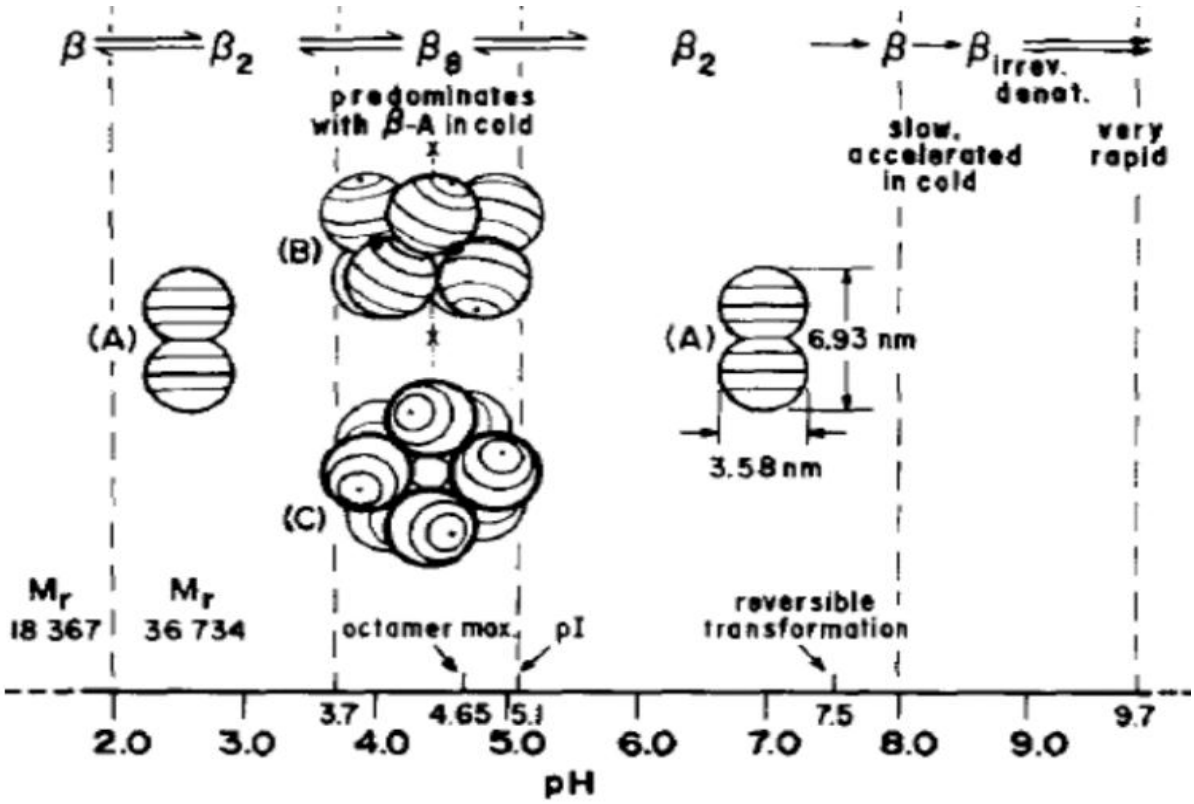


Figure I.5. : Représentation schématique de changement de la structure de la β-lg en fonction du pH.

La présence des sels va également impacter sur la structure de la β-lg. L'addition de chlorure de sodium (NaCl) à pH 2, à température pièce va induire une modification au niveau de la β-lg, celle-ci va passer de la forme monomérique à la forme de dimères. À pH 7, la β-lg va évoluer de la forme dimérique vers un degré d'association supérieure lorsque le milieu est enrichi en NaCl. Le sel va favoriser les interactions entre les résidus non polaires (hydrophobes) en

réduisant les répulsions électrostatiques de la protéine [34]. Par exemple, l'ajout du chlorure de calcium ($CaCl_2$, 1 à 15 mmoles) induit des changements mineurs de la conformation de la β-lg (ces changements sont différents par la présence de NaCl). En présence de sels, l'hydrophobicité de la β-lg et la réactivité des groupements « S-H » vont favoriser la formation d'un gel protéique.

Cette section résume ainsi l'effet des paramètres physico-chimiques majoritairement appliqués en industries alimentaires pour modifier la structure de la β-lg. Cependant, bien qu'intéressantes pour ces propriétés fonctionnelles, un nombre conséquent de travaux ont été effectué sur l'hydrolyse enzymatique de la β-lg, plus particulièrement par la trypsine, afin de connaître précisément sa structure tridimensionnelle de la protéine native mais également dans le but de générer des espèces peptidiques d'intérêts majeurs pour leurs propriétés fonctionnelles et biologiques.

II. Traitements thermiques

II.1. Thermorésistante des bactéries et des microorganismes

Tous les microorganismes ne réagissent pas de la même façon à la chaleur. On peut alors dire que leur « thermorésistante » peut être plus ou moins élevée. De plus, cette thermorésistante dépend du milieu dans lequel un traitement thermique est pratiqué. Plus le milieu est acide, moins la résistance à la chaleur est élevée. Les aliments sont classés selon trois catégories de pH. Le pH est l'abréviation de puissances hydrogène. Plus la concentration en hydrogène est élevée, plus la valeur du pH est faible (<7,0) et plus la substance sera acide.

- Peu acide : pH > 5,3.
- Modérément acide : pH entre 4,5 et 5,3.
- Acide : pH < 4,5.

Plus l'aliment est acide, plus le traitement à la chaleur sera léger. Et si l'aliment est neutre, c'est-à-dire qu'il a un pH égal à 7, le traitement thermique à appliquer devra être plus important. Lorsque le milieu n'est pas favorable à l'activité des levures et des bactéries (dans un milieu où on ajoute beaucoup de sucre, par exemple), la thermorésistante des microorganismes augmente. Cette augmentation de la thermorésistante se produit lorsque le milieu dans lequel vivent les microorganismes devient défavorable par rapport au milieu aqueux initial. A l'opposé, la présence d'antiseptiques permet de réduire la thermorésistante des microorganismes [21].

II.2. Procédés de traitement thermique

Ces procédés ont un objectif commun, à savoir la destruction des germes pathogènes. Ils se différencient par la durée de conservation qu'ils donnent au lait, conséquence d'une destruction plus ou moins complète des autres microorganismes. Indépendamment de l'ébullition, dont l'intérêt est incontestable, mais limité au niveau domestique, on distingue deux catégories de traitement :

- la pasteurisation, lorsque le chauffage est inférieur à 100 °C ;
- la stérilisation, lorsque le chauffage est supérieur à 120 °C.

II.2.1. La pasteurisation

La pasteurisation est un procédé consistant à chauffer du lait cru pendant quelques minute sou quelques secondes à une température la plus basse possible, entre 63 et 95°C, puis à le refroidir à 4°C de manière à détruire les germes nocifs qui pourraient être présents dans le lait, et réduire le nombre de

microorganismes nullement dangereux pour la santé [22], L'objectif de cette méthode est de supprimer les micro-organismes pathogènes.

La température et le temps de pasteurisation sont des facteurs très importants que l'on devra choisir avec précision, en fonction de la qualité du lait, de la durée de conservation requise etc.… Trois types de pasteurisation sont pratiqués en fonction des couples temps/température :

- Pasteurisation basse (15-30 min/60-65°C) ;
- pasteurisation rapide à haute température (HTST)(15-40 sec/70-75°C) ;
- pasteurisation haute (1-2min/85-95°C).

II.2.1.1. Pasteurisation basse

Le lait chauffé dans une vaste chambre à double paroi chauffée par circulation de vapeur ou d'eau chaude. La température à laquelle le lait doit être porté, puis maintenu pendant au moins 30 minutes, varie de 60°C à 65,5 suivant les pays (c'est-à-dire suivant la conception des marges de sécurité). Le lait est alors refroidi à 10°C ou moins.

II.2.1.2. Pasteurisation rapide à haute température (High température short time ou HTST)

C'est un procédé continu dans lequel le lait est rapidement porté à 71°- 72°C et maintenu à cette température pendant au moins 15 secondes ; il est ensuite refroidi rapidement à 10°C ou moins. Cette association de température et de temps assure une bonne marge de sécurité ; le chauffage est habituellement obtenu par circulation d'eau chaude et l'échange thermique rapide a lieu à travers des plaques en acier inoxydable ou dans autre type d'appareil, par

passage du lait dans un espace annulaire entre des tubes concentriques chauffés par de l'eau qui circule.

II.2.1.3. Pasteurisation haute

Le lait est chauffé à une température comprise entre 85°C et 95°C pendant 1-2 minute, soit directement par contact direct avec la vapeur soit le plus souvent, pour des raisons énergétiques, indirectement en flux continu (transmission de la chaleur entre les liquides chauffants et le lait) par des échangeurs de chaleur tubulaires ou à plaques [23].

II.2.1.4. Inconvénients de la pasteurisation [24].

Pour une pasteurisation efficace, les aliments doivent être chauffés entre 62 et 88 °C, en milieu anaérobie. En deçà, les températures sont trop basses pour éliminer les microorganismes ; au-dessus, elles risquent de dénaturer le produit et son goût. Au-delà de 100°C, on parle de stérilisation. Soumis à une forte chaleur durant une certaine durée, les bactéries et autres microbes pathogènes succombent massivement. On estime même que leurs populations seraient divisées par 100.000. Tous les germes ne sont malgré tout pas détruits.

C'est pourquoi l'aliment est ensuite placé au frais (environ 4°C) afin de limiter, voire de bloquer, la prolifération des micro-organismes encore vivants. Si cela permet de repousser la période de comestibilité d'un aliment, le chauffage peut aussi éliminer des bactéries utiles et détériorer certaines protéines et vitamines de la nourriture. La pasteurisation est pratiquée pour le lait, mais aussi pour les jus de fruit, le cidre, la viande ou la confiture.

II.2.2. La stérilisation [25]

La stérilisation est un traitement thermique qui vise la destruction de l'ensemble des microorganismes susceptibles de se développer dans le lait.

Dans le cas du lait, deux couples temps/température peuvent être appliqués :

- 120 °C pendant 20 minutes.
- 140 °C pendant 4 secondes, dans le cas de la stérilisation UHT (Ultra Haute Température). [40]

II.2.2.1. Principe de la stérilisation

Les aliments fluides, contenant éventuellement des particules de dimensions inférieures à 20 mm, c'est à dire des aliments pompables, sont traités thermiquement avant le conditionnement. Pour être stérilisés, ils sont chauffés dans des échangeurs à plaques ou tubulaires, mais on emploie aussi parfois des tubes de chauffage ohmique ou micro-ondes. Les produits refroidiront grâce à des échangeurs classiques. Ces deux opérations (chauffage puis refroidissement) sont séparés par un maintien à haute température appelé chambrage**,** par circulation dans une conduite isolée thermiquement.
Après avoir été stérilisés, les aliments traités doivent être protégés des contaminations avant et pendant leur conditionnement. Les emballages chargés doivent donc être eux aussi stériles. Les opérations assurant ces fonctions constituent le conditionnement aseptique et sont réalisés dans une machine dont l'ambiance est alimentée en air stérile sous pression.
Enfin, certains produits, qui ne craignent pas les sur-cuissons (compotes de fruits, confiture par exemple), peuvent être conditionnés à chaud : ils réaliseront la stérilisation de leur emballage en se refroidissant. Cette façon de faire est appelée "auto-stérilisation" (compotes de fruits, confiture par exemple), peuvent être conditionnés à chaud : ils réaliseront la stérilisation de leur emballage en se refroidissant. Cette façon de faire est appelée "auto-stérilisation".

II.2.2.2. Le lait UHT [26]

Avec la stérilisation à ultra haute température (UHT), le lait est chauffé entre 140 °C et 150 °C durant 2 à 5 secondes puis refroidi, ce qui détruit la totalité des enzymes et bactéries. La rapidité du traitement permet de préserver ses qualités nutritionnelles mais entraîne une légère modification. Il se conserve environ trois mois et exige un emballage imperméable à la lumière et à l'oxygène (c'est pourquoi on ajoute une feuille d'aluminium dans les briques en carton du lait UHT). Mise au point en Suisse en 1951, la stérilisation à ultra haute température a constitué une véritable révolution dans l'industrie laitière, permettant de réduire de manière significative les coûts de logistique et le gaspillage.

II.2.2.3. Avantages de la stérilisation [25]

L'avantage de la stérilisation est la destruction totale des micro-organismes lors du traitement thermique. Les produits stérilisés seront conservés plusieurs mois dans leur emballage sans risque de recontamination et n'ont donc pas besoin de rester au frais.

II.2.2.4. Inconvénients de la stérilisation [25]

Les traitements de stérilisation présentent l'inconvénient de dénaturer une partie des composants du produit : protéines, vitamines (notamment et surtout la vitamine C) due à l'utilisation de températures élevées. On ne peut donc appliquer ce traitement pour des produits trop sensibles à la chaleur. Ainsi, dans le cas des produits pompables avec une charge de particule importante, l'utilisation de pompe particulière, très coûteuse, est nécessaire pour ne pas détériorer les particules. En effet, compte tenu des hautes températures utilisées,

il est préférable d'appliquer des temps de traitement courts. Or, la présence de particules ralentit la circulation du liquide à traiter dans les échangeurs. Malgré tout, l'utilisation d'échangeurs permet des traitements plus courts que si l'on devait traiter le produit dans son emballage du fait des meilleurs échanges de chaleur.

II.2.3. Différences entre pasteurisation et la stérilisation UHT [27]

La pasteurisation et la stérilisation à ultra haute température (UHT) sont des techniques de conservation du lait (et d'autres boissons) par traitement thermique. La pasteurisation s'effectue à 71,5° pendant 15 secondes, puis le lait est rapidement refroidi à 4°C. Cette technique permet de conserver au mieux les qualités gustatives du lait cru. Le lait pasteurisé doit être conservé au réfrigérateur (entre 7 et 15 jours selon la date indiquée sur l'emballage). La stérilisation UHT consiste à porter le lait à plus de 135°C pendant 3 secondes seulement avant de le refroidir. La rapidité du traitement permet de préserver les qualités nutritionnelles du lait. Le lait UHT se garde entre 90 et 150 jours à température ambiante. La richesse naturelle du lait en calcium et en protéines est conservée, que le lait soit pasteurisé ou UHT. Dès qu'il est ouvert, le lait se garde 2 à 3 jours au réfrigérateur.

CHAPTRE II

Les Echangeurs de Chaleur & Encrassement

II.1. Notions générales sur les échangeurs de chaleur

II.1.1. Définition

Un échangeur de chaleur est un système qui permet d'échanger la chaleur entre deux fluides ou plus. Dans un échangeur thermique, le fluide chaud et le fluide froid sont séparés par une paroi bien adaptée et par principe la transmission de la chaleur se fait du fluide chaud vers le fluide froid [28].

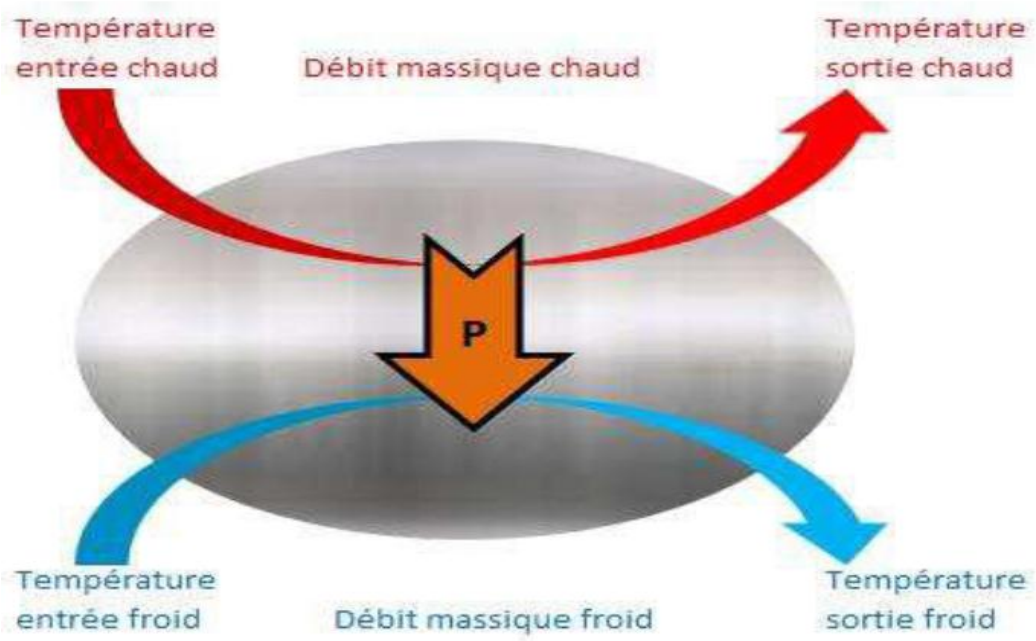


Figure II.1. : Représentation simplifiée d'un échangeur de chaleur [29].

II.1.2. But de l'emploi des échangeurs de chaleur

Le but de l'emploi d'un échangeur de chaleur est de récupérer un maximum d'échange thermique entre deux fluides séparés ou non par une paroi.

II.1.3. Principe de fonctionnement

Dans un échangeur, la chaleur est transmise d'un fluide à un autre. Le même fluide peut être conservé son état physique (liquide ou gazeux) ou se présenter successivement sous les deux phases (cas des condenseurs et des vaporiseurs) [28].

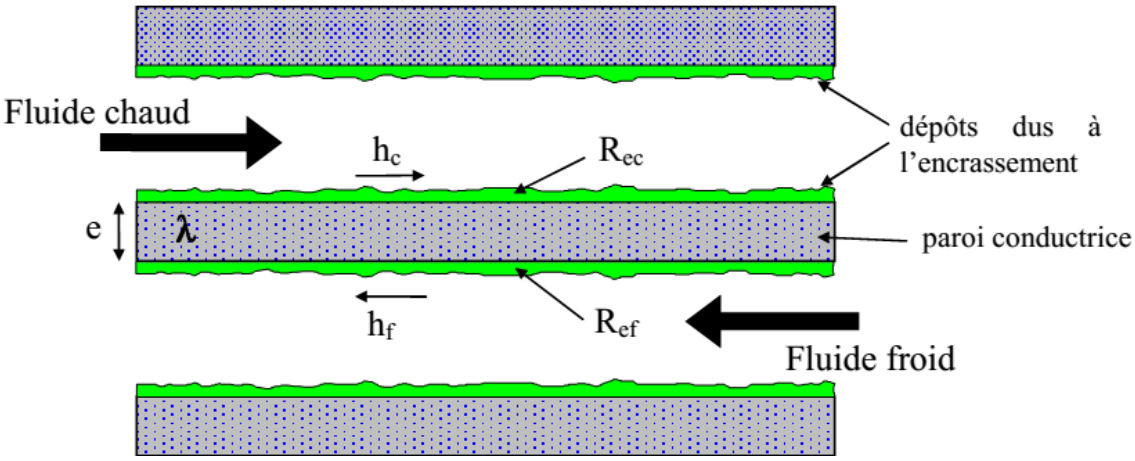


Figure II.2. : Schéma de principe d'un échangeur de chaleur [30].

II.1.4. Modes de transferts thermiques

Le transfert de chaleur décrit l'échange d'énergie thermique entre les systèmes physiques, en fonction de la température, en dissipant la chaleur. Les modes fondamentaux de transfert de chaleur sont la conduction, la convection et le rayonnement.

- **La conduction**

C'est le transfert d'énergie entre les objets solide qui sont en contact physique. La conductivité thermique est la propriété d'un matériau à conduire la chaleur.

- **La convection**

Le transfert d'énergie entre un objet et son environnement, en raison du mouvement fluide. La température moyenne, est une référence pour l'évaluation des propriétés relatives au transfert de chaleur par convection.

- **Le rayonnement**

L'énergie du mouvement des particules chargées à l'intérieur des atomes est convertie en rayonnement électromagnétique.

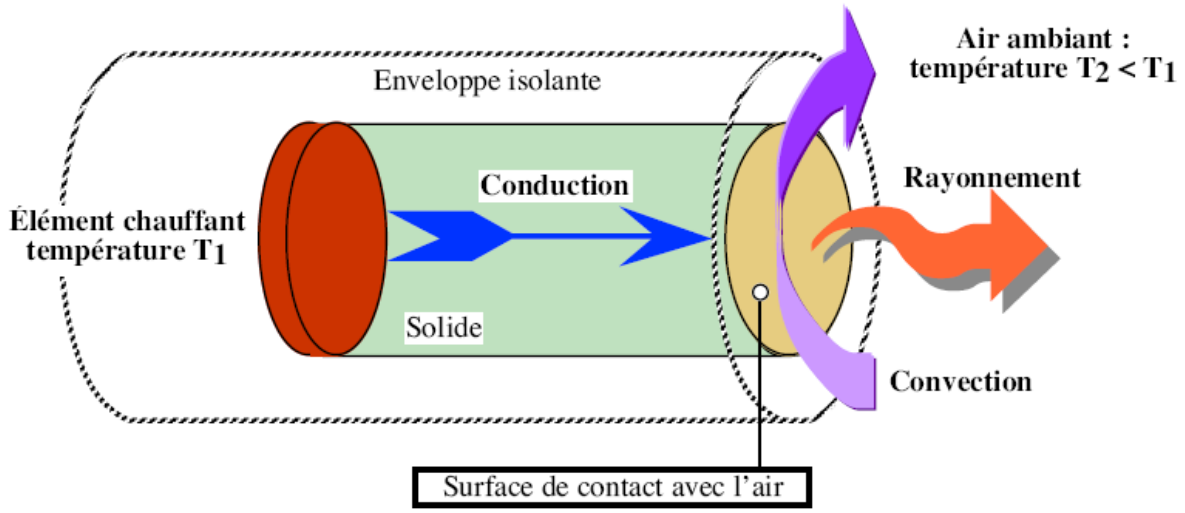


Figure II.3. : Les trois modes de transfert thermique.

II.1.5. Principaux modes d'écoulement des deux fluides

Dans un échangeur, l'écoulement des deux fluides peut s'effectuer dans de multiples dispositions relatives : parallèlement, à contre-courant, de manière croisée [31].

➢ À Co-courant : les deux fluides sont disposés parallèlement et vont dans le même sens. Dans un échangeur anti-méthodique la température de sortie du fluide froid est nécessairement moins élevée que la température de sortie du fluide chaud.

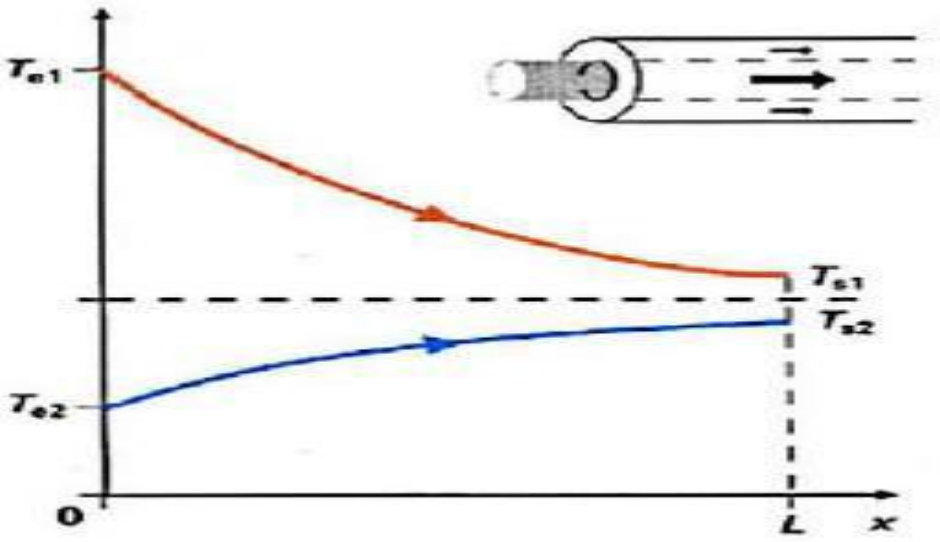


Figure II.4. : Evolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire ou à plaques à Co-courant [32].

➢ À Contre-courant

De la même manière, mais les courants vont dans des sens opposés. Dans un échangeur méthodique, par différence avec un échangeur anti-méthodique la température de sortie du fluide froid peut être plus élevée que la température de sortie du fluide chaud.

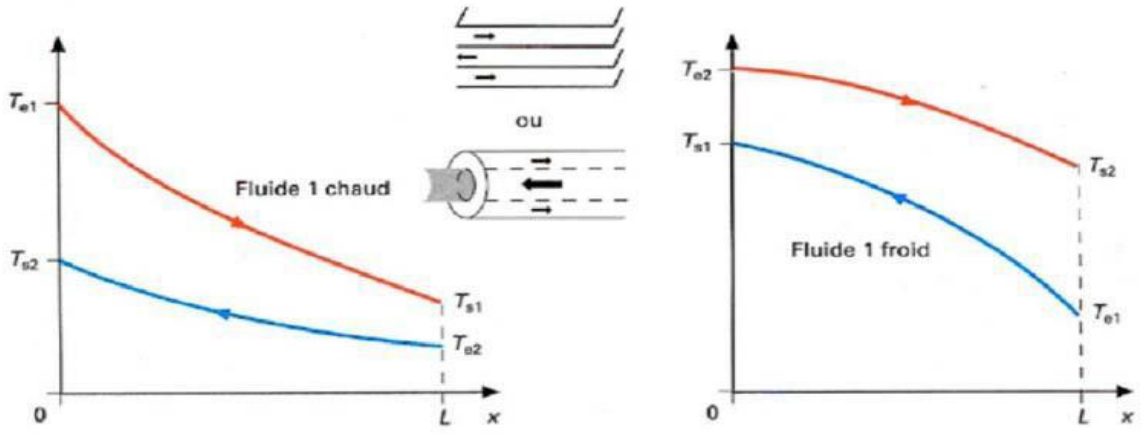


Figure II.5. : Evolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire contre-courants [32].

- À courants croisés

Les deux fluides s'écoulent perpendiculairement l'un à l'autre. Un fluide est dit non brassé s'il s'écoule dans une veine divisée en plusieurs canaux parallèles distincts et de faible section, il est dit brassé dans le cas contraire. Le brassage a pour effet d'homogénéiser les températures dans la section droite de la veine. Les échangeurs à courants croisés sont surtout utilisés pour des échangeurs entre un gaz circulant en calandre et un liquide circulant dans les tubes [33].

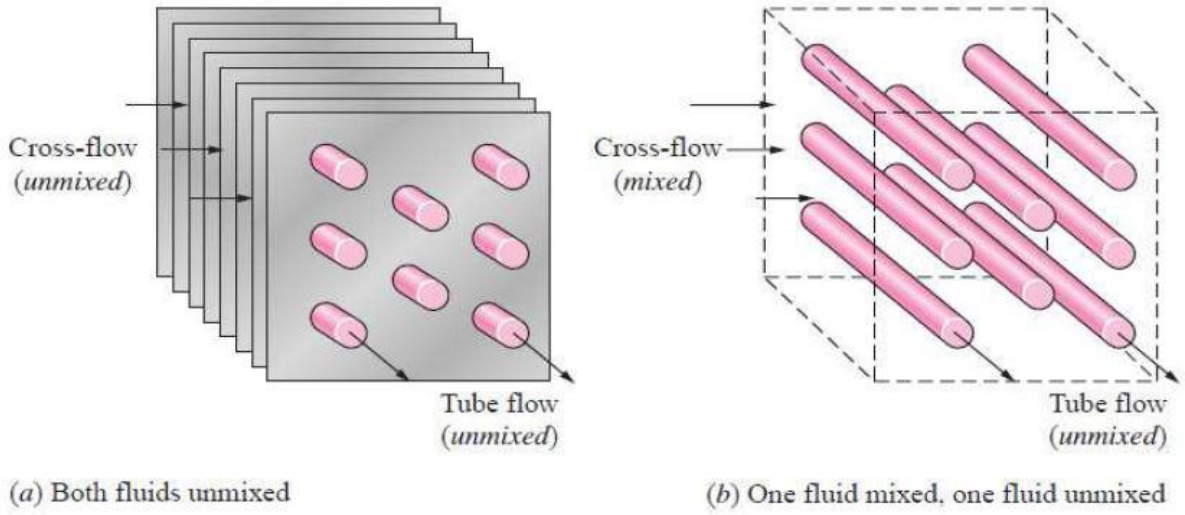


Figure II.6. : Echangeur compact à courant croisé [34].

II.1.6 Classement technologique

Les principaux types d'échangeurs rencontrés sont les suivants [35]

- à tubes : monotubes, coaxiaux ou multitubulaires.
- à plaques : à surface primaire ou à surface secondaire ;
- Autres types : contact direct, à caloducs ou à lit fluidisé.

II.1.6.1. Échangeurs tubulaires

A. Présentation

Les échangeurs utilisant les tubes comme constituant principal de la paroi d'échange sont les plus répandus. On peut distinguer trois catégories suivant le nombre de tubes et leur arrangement, toujours réalisés pour avoir la meilleure efficacité possible pour une utilisation donnée : le fluide chaud ou le fluide à haute pression s'écoule dans le tube intérieur.

On peut distinguer trois catégories suivant le nombre de tubes et leur arrangement, toujours réalisés pour avoir la meilleure efficacité possible pour une utilisation donnée :

- échangeur monotube (figure II.7.a.), dans lequel le tube est placé à l'intérieur d'un réservoir et a généralement la forme d'un serpentin ;
- échangeur coaxial (figure II.7.b.), dans lequel les tubes sont le plus souvent cintrés ; en général, le fluide chaud ou le fluide à haute pression s'écoule dans le tube intérieur ;
- échangeur multitubulaire, existant sous quatre formes :
    - échangeur à tubes séparés (figure II.7.c.) : à l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant se trouvent placés plusieurs tubes de petit

diamètre maintenus écartés par des entretoises. L'échangeur peut être soit rectiligne, soit enroulé,

- échangeur à tubes rapprochés (figure II.7.d.) : pour maintenir les tubes et obtenir un passage suffisant pour le fluide extérieur au tube, on place un ruban enroulé en spirale autour de certains d'entre eux. Les tubes s'appuient les uns sur les autres par l'intermédiaire des rubans,
- échangeur à tubes ailettes (figure II.7.e.) : ces tubes permettent d'améliorer le coefficient d'échange thermique.
- échangeur à tubes et calandre (figure II.7.f.) : c'est l'échangeur actuellement le plus répandu ;

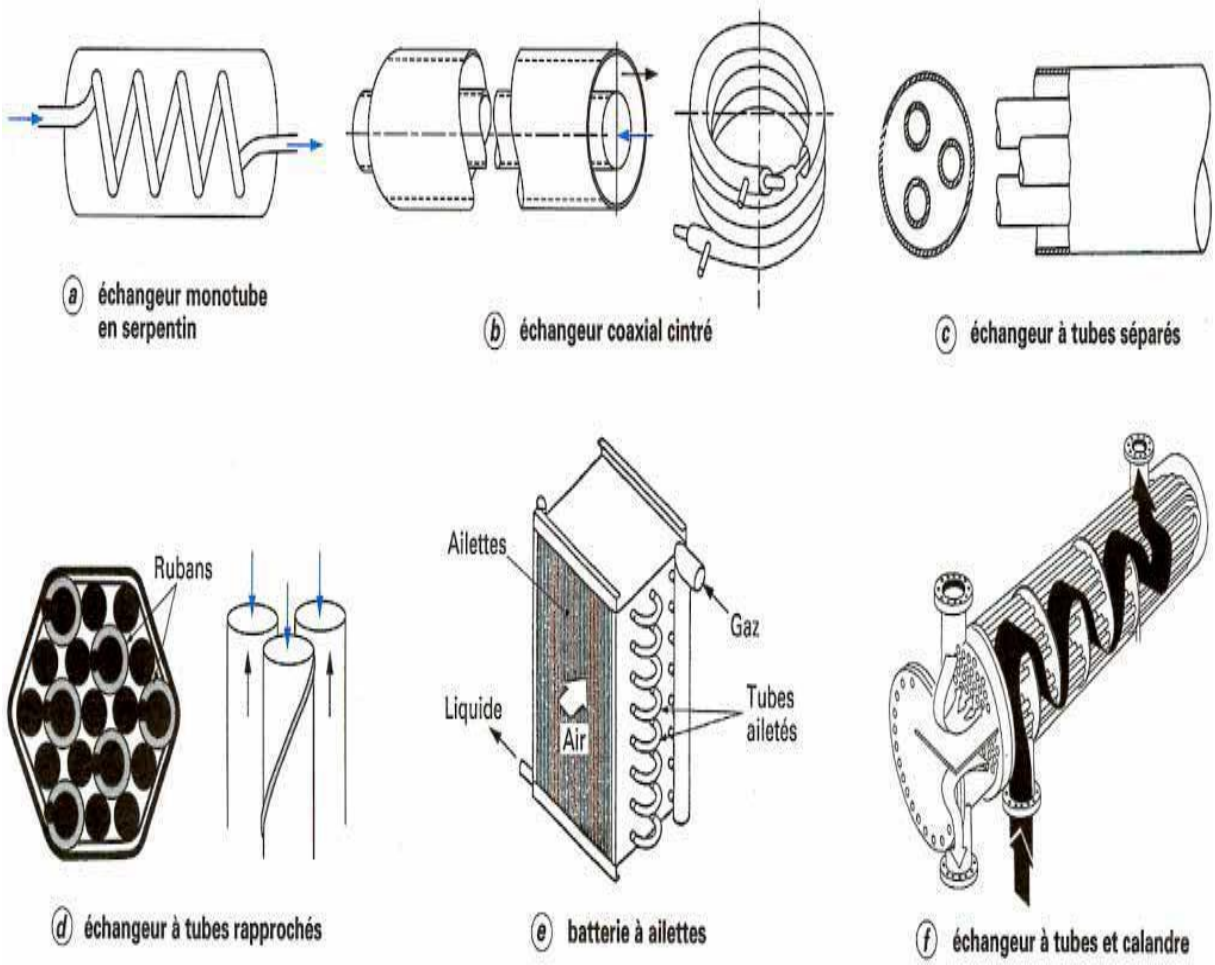


Figure II.7. : Différents types d'échangeurs tubulaires [36].

II.1.6.2.Echangeurs à plaques [37-38]

Les échangeurs à plaques sont constitués de plaques formées dont les alvéoles constituent les chemins empruntés par les fluides. Les plaques sont assemblées de façon à ce que le fluide puisse circuler entre elles. La distribution des fluides entre les plaques est assurée par un jeu de joints de telle sorte que chacun des deux fluides soit envoyé alternativement entre deux espaces inter plaques successifs. Les fluides peuvent ainsi échanger de la chaleur à travers les plaques. L'avantage principal de ce type d'échangeur est la compacité. En effet, on voit bien que ce dispositif permet une grande surface d'échange dans un volume limité, ce qui est particulièrement utile lorsque des puissances importantes doivent être échangées. Les échangeurs à plaques sont très utilisés dans l'industrie agroalimentaire (pasteurisation du lait) ou l'industrie nucléaire.

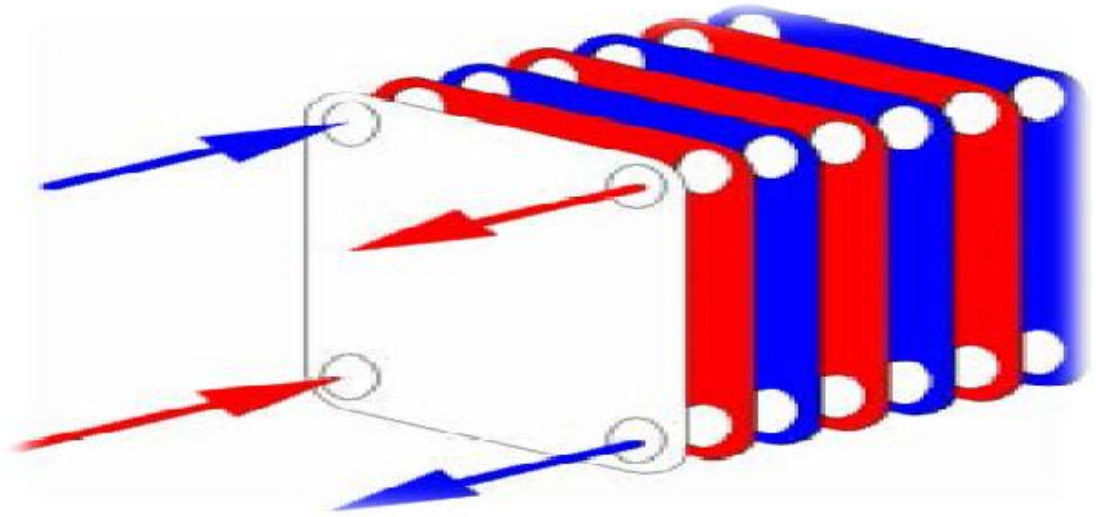


Figure II.8. : Echangeur à plaques [39].

II.1.6.2.1. Principe de fonctionnement [40]

L'échangeur de chaleur est constitué de plaques, de tubes ou de gaufrages de type "nid d'abeilles", de faible épaisseur en aluminium ou matière plastique qui séparent les veines d'air. Le matériau utilisé pour la fabrication des plaques est

variable, ce peut être du verre (il est insensible à la corrosion mais il est lourd est cassant) ou bien de l'aluminium, de l'acier inoxydable ou un matériau synthétique. Les plaques sont assemblées entre elles par collage ou soudage et placées dans un châssis rigide. L'épaisseur d'une plaque oscille généralement entre 0,1 et 0,8 mm, la distance entre les plaques est très faible, entre 5 et 1 mm, et les courants sont généralement croisés. Afin de maximiser l'échange convectif, les plaques peuvent être gaufrées et créer de la sorte une turbulence.

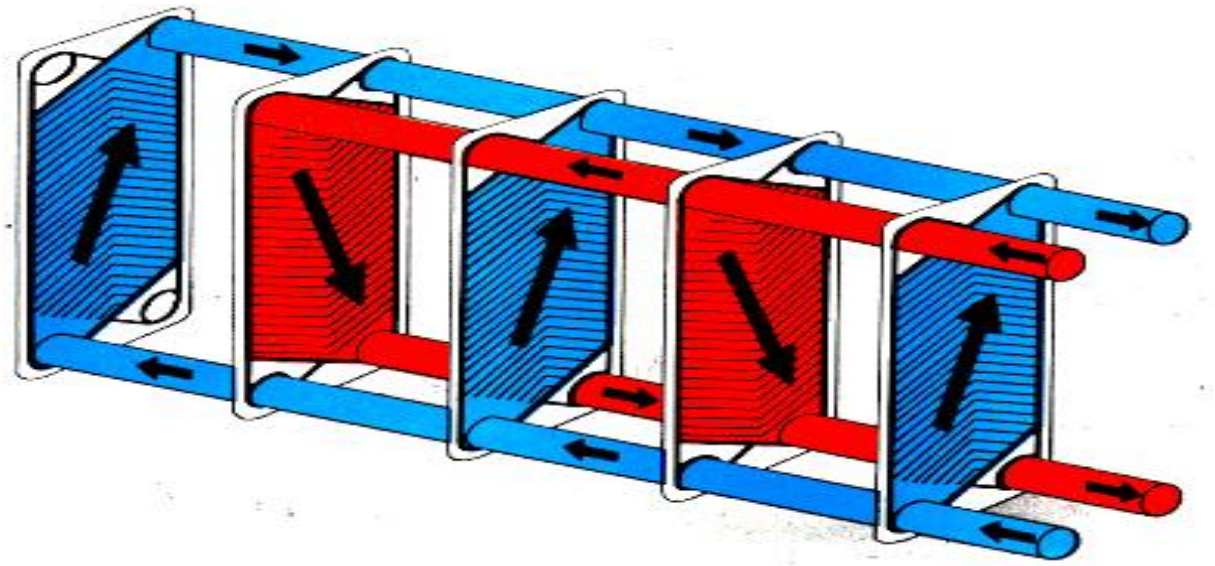


Figure II.9. : Principe de fonctionnement d'un échangeur à plaques [41].

II.1.6.2.2. Utilisation des échangeurs à plaques

Elles sont très utilisées dans certaines applications liquides - liquides (en particulier dans les industries alimentaires). Dans le cas des échangeurs gaz - liquide ou gaz -gaz, la faible densité des gaz impose, si l'on veut rester à un niveau acceptable de perte de charge, que l'on réduise la vitesse de passage des gaz relativement à celles pratiquées pour les liquides. Réduire la vitesse c'est aussi réduire le coefficient de convection fluide -paroi, ce qui nécessite, à volume égal, une augmentation de la surface d'échange. Pour les échangeurs

gaz-gaz les surfaces d'échanges adoptées sont très souvent constituées de plaques planes séparées par des ailettes braisées sur celles-ci les deux fluides circulant alternativement entre les plaques. Les ailettes permettent d'augmenter la surface d'échange et aussi, par leur disposition en quiconque de crée des interruptions dans les écoulements favorisant la turbulence et améliorant de ce fait les échanges thermiques. Dans les échangeurs gaz -liquide, il y a nécessité d'obtenir une surface d'échange ayant des étendues différentes au contact des deux fluides. C'est la raison pour laquelle on utilise des batteries de tubes à ailettes ou des radiateurs dans l'automobile.

II.1.7. Comparaison entre un échangeur à plaques et un échangeur tubulaire

Le tableau II.1 résume quelques caractéristiques des échangeurs à plaques et tubulaires. [42].

Caractéristiques	Echangeur à plaques traditionnel	Echangeur tubulaire
croisement de température	possible	impossible
approche de température		5°C
raccordements	dans un même plan	sur plusieurs plans
rapport des coefficients de transmission thermique	1°C	1°C
rapport des poids	1C°	3 à 10
volume de rétention	faible	élevé
rapport d'encombrement	1	2 à 5
soudures	aucune	appareil soudé
résistance aux vibrations	bonne résistance	sensible
détection des fuites	aisée (par l'extérieur)	difficile
temps nécessaire à	15 minutes avec outil	60 à 90 minutes

l'ouverture	pneumatique	
réparation	joints et plaques remplaçables	implique le remplacement des tubes
modification	simple par ajout ou retrait de plaques	impossible

II.1.8. Les Chicanes

Elles ont pour rôle d'augmenter la vitesse du fluide dans la calandre et la rigidité du faisceau. Dans le cas d'un transfert de chaleur sans changement de phase, il est intéressant d'augmenter la vitesse du fluide pour améliorer le coefficient d'échange. La vitesse est d'autant plus élevée que les chicanes sont rapprochées pour l'écoulement transversal au faisceau de tubes (entre deux chicanes) et qu'elles ont une ouverture faible pour l'écoulement parallèle au faisceau de tubes (au passage de la chicane). Mais un compromis doit être trouvé pour avoir simultanément un coefficient global d'échange thermique et des pertes de pression acceptables. Les chicanes sont de même matériau que la calandre ; elles peuvent être de plusieurs types : chicanes classiques (figure II.10, a, b et c) ou chicanes à barreaux (figure II.10, d). La disposition des chicanes est représentée sur la figure II.11.

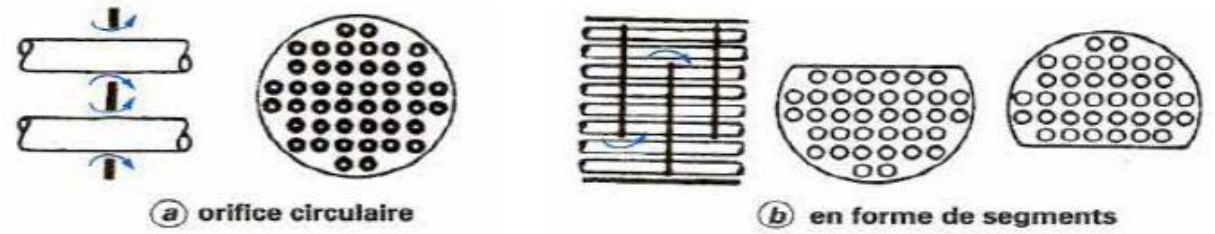






Figure II.10 : Diverses géométries de chicanes transversales [43].

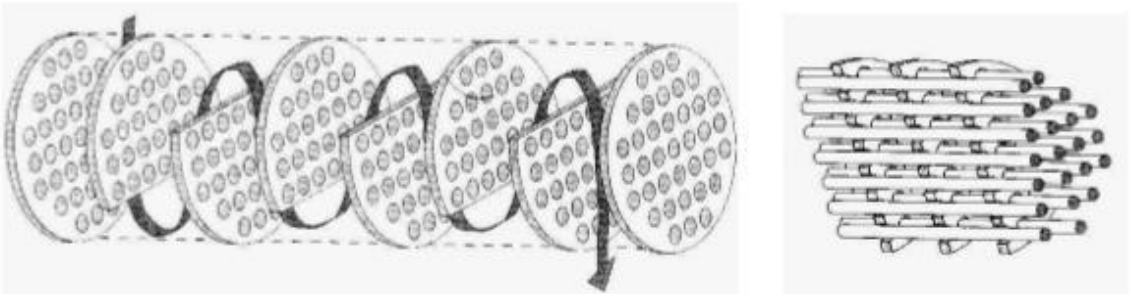


Figure II.11 : disposition des chicanes.

II.2. Notions sur l'encrassement des échangeurs de chaleur

II.2.1. Introduction

D'une manière générale, l'encrassement peut être défini comme la déposition de matière indésirable sur une surface. Il s'agit d'un phénomène qui concerne un grand nombre d'équipements industriels, notamment ceux impliquant des

surfaces d'échange de chaleur. La figure II.12 est une photo d'un échangeur de chaleur tubulaire encrassé.



Figure II.12. : Echangeur tubulaire encrassé [44].

II.2.2 Définition

L'encrassement des équipements de transfert thermique est défini comme étant la déposition et l'accumulation de matériaux ou de substances indésirables sur les surfaces d'échange de chaleur [45]. Ces dépôts peuvent être de la rouille, du tartre (sédiment), de la vase, des cristaux, des résidus biologiques, des produits de réaction chimique ou la combinaison de plusieurs de ces éléments.

II.2.3. Catégories et types d'encrassement

Selon la classification établie en 1978 par Epstein [46], il existe cinq grands types d'encrassement différents : La corrosion ; l'encrassement biologique ; l'encrassement par réaction chimique ; l'entartrage ; l'encrassement particulaire. Quel que soit le phénomène d'encrassement considéré, il est plus ou moins critique selon la nature des fluides employés et/ou la conception des échangeurs. Dans les situations réelles d'encrassement, il est bien évident que ces différents

mécanismes interagissent ou se superposent de manière plus ou moins complexe.

➢ La corrosion : L'encrassement par corrosion est le résultat d'une réaction chimique ou électrochimique entre la surface de transfert de chaleur et le fluide en écoulement [47].

Les produits qui se forment et s'accumulent sur la surface créent l'encrassement. Il existe différents types de corrosion :

- la corrosion uniforme caractérisée par une perte d'épaisseur régulière mais dont la vitesse n'est pas forcément proportionnelle au temps ;
- la corrosion par piqûres où l'attaque est limitée à des zones de très petites surfaces ;
- la corrosion fissurant à l'échelle microscopique inter granulaire ou transgranulaire ;

➢ L'encrassement biologique : L'encrassement biologique est dû au développement de micro-organismes qui créent un film encrassant au contact de la surface d'échange [48]. Il peut être causé par trois grands types de micro-organismes :

- les bactéries dont le développement est dû à un apport nutritif de type hydrocarbures ;
- les algues dont le développement est dû à la présence d'énergie solaire avec photosynthèse ;
- les champignons dont le développement est dû aux changements des conditions ambiantes telles que l'humidité, la température ou le pH.

➢ L'encrassement par réaction chimique : L'encrassement par réaction chimique est dû à la présence d'une réaction chimique au voisinage d'une surface d'échange [49]. Les produits solides ainsi formés s'y déposent. Il s'agit le plus souvent d'une réaction de polymérisation qui implique la formation d'un dépôt de haut poids moléculaire.

Les vitesses de telles réactions chimiques dépendent fortement de la température, de la pression, de la concentration et de la présence d'éléments catalyseurs. Toutefois, la vitesse globale du mécanisme de dépôt dépend aussi de la dynamique des phénomènes de surface et de transfert. Il est rencontré dans les industries alimentaires, nucléaire et dans les procédés de raffinage du pétrole.

➢ L'entartrage : L'entartrage d'une surface d'échange est généralement associé à la production d'un solide cristallin à partir d'une solution liquide [50]. Il dépend donc fortement de la composition des eaux industrielles. L'entartrage se matérialise par une formation d'incrustations adhérentes et dures sur les surfaces d'échanges généralement métalliques. Il est produit principalement par la dissipation des sels inorganiques dans le processus d'écoulement présente une super saturation durant l'échauffement ou le refroidissement. Pour qu'il y ait entartrage, deux conditions doivent être remplies :

- la limite de solubilité du sel contenu dans l'eau doit être dépassée ;
- la vitesse de dépôt doit être suffisamment rapide.

Ce type d'encrassement est conditionné par une grande vitesse de déposition et un excès de concentration par rapport à la limite de solubilité

➢ L'encrassement particulaire : Il s'agit du dépôt puis de l'accumulation, sur les surfaces d'échange, de particules transportées par l'écoulement de fluides industriels tels que :

- l'eau des chaudières contenant des produits de corrosion ;
- l'eau des tours de refroidissement ;
- les écoulements gazeux chargés de particules tels les résidus solides de combustion, ou les poussières résultant de l'incinération de déchets ménagers.

II.2.4. Paramètres Influençant l'encrassement

L'encrassement, par ces différents types, est contrôlé par plusieurs paramètres opératoires liés au fluide d'alimentation ou à la surface d'échange. On peut citer :

- La vitesse d'écoulement du fluide d'alimentation ;
- La concentration de la matière encrassant ;
- La température de la surface d'échange de chaleur ;
- Etat de surface rugosité ;
- Corrosion.

II.2.4.1. La vitesse d'encrassement

La vitesse d'écoulement du fluide a une influence très importante sur la formation du dépôt c'est-à-dire, l'augmentation de la vitesse du fluide, fait décroitre la résistance d'encrassement.

II.2.4.2. La concentration de la matière encrassant [51]

Les études sur l'encrassement particulaire ont montré que la formation du dépôt augmente avec la concentration. D'autre part, il a été prouvé qu'a température élevée et à faible vitesse, les concentrations élevées du dépôt augmentent les vitesses d'encrassement.

II.2.4.3. La Température de la surface d'échange de chaleur

La température de la surface d'échange de chaleur est un paramètre important quel que soit le type d'encrassement. Selon plusieurs recherches, la déposition des particules solides sur la surface d'échange est favorisée lorsque la

température de cette dernière est élevée. Ainsi la formation de l'encrassement est plus rapide avec ces conditions. D'après les recherches on a constaté que le temps d'induction diminue lorsque la température de la surface augmente.

II.2.4.4. Etat de surface rugosité

Les surfaces rugueuses ont tendance à favoriser les dépôts, particulièrement dans la phase d'induction de l'encrassement. Par la suite, le dépôt modifie la rugosité de la surface et n'a plus la rugosité initiale qui contrôle le phénomène, mais celle du dépôt [52].

II.2.4.5. La Corrosion

Le choix d'un matériau approprié constitue la méthode la plus radicale pour éviter la corrosion. On pourra, par exemple, utiliser un métal noble ou, plus souvent, un alliage passivable (alliages d'aluminium, à base de nickel, les aciers inoxydables).

En présence de produits chimiques, les problèmes de corrosion sont plus complexes ; une variation de composition ou la présence d'impuretés dans la solution peut modifier le comportement du matériau [52].

II.2.5. Apparition et développement de l'encrassement [53]

Les auteurs s'accordent en général pour considérer cinq phases dans l'apparition et le développement de l'encrassement. Ces cinq phases peuvent chronologiquement se décomposer comme suit.

II.2.5.1. Initiation

Cette phase est associée au temps nécessaire avant de pouvoir observer la formation d'un dépôt encrassant sur une surface propre.

II.2.5.2. Transfert des particules à la paroi

Il peut être contrôlé par la diffusion turbulente, l'impaction inertielle ou un champ de forces extérieures (thermiques, électriques, etc.) ; ces mécanismes peuvent coexister.

II.2.5.3. Adhésion des particules

Les particules transférées à la paroi peuvent s'y maintenir grâce aux forces d'adhésion dues à l'attraction moléculaire (forces de Van der Waals), aux forces électriques ou capillaires.

II.2.5.4. Réentraînement des particules déposées

Il est classique de supposer que le mécanisme de réentraînement est lié aux forces de cisaillement s'exerçant sur le dépôt. Lorsque la force aérodynamique est supérieure aux forces d'adhésion d'une particule, le réentraînement se produit par érosion lorsqu'il concerne des agglomérats de particules, il correspond à un phénomène d'écaillage.

II.2.5.5. Vieillissement du dépôt

Il s'agit d'un changement de structure chimique ou cristalline, du dépôt dû à des phénomènes tels que la polymérisation, la cristallisation ou la déshydratation. La consolidation du dépôt ou son écaillage peuvent, alors, être observés.

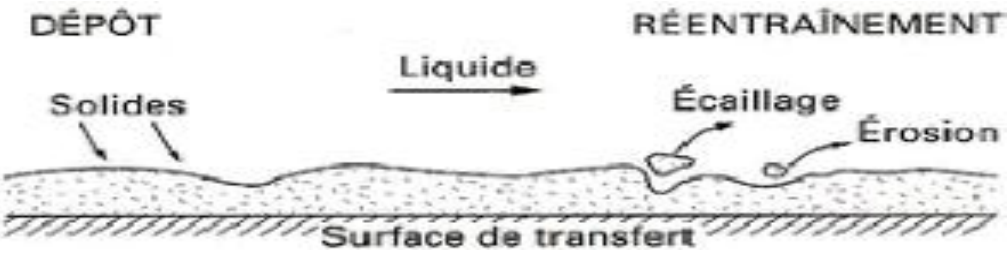


Figure II.13. : Représentation schématique des phases de dépôt et de réentraînement de l'encrassement dans le cas d'un liquide [53].

II.2.6. L'encrassement de lait

La formation de dépôts protéiques est la cause principale d'encrassement des installations de traitement du lait et des produits dérivés du lait. Cet encrassement protéique diminue les performances, notamment le rendement, des procédés, affecte la qualité des produits finaux et impose des opérations régulières de nettoyage des installations nécessitant l'arrêt total de la production. Par ailleurs, il peut constituer un milieu favorable à la croissance bactérienne compromettant ainsi la stérilité et la sécurité sanitaire des produits finaux.

II.2.7. Modèles et mécanismes d'encrassement par le lait

Pour le cas du lait, l'encrassement est provoqué par les réactions chimiques causées par les changements qui proviennent des transformations des protéines du lait sous l'effet de la température. Plusieurs auteurs se sont concentrés sur la cinétique de ces réactions. D'après les travaux de recherche, l'encrassement est de nature très complexe. Ce phénomène ne peut pas être éliminé, mais essayer de le réduire reste toujours possible [54].

Le paramètre important dans le processus d'encrassement est la formation d'un dépôt de protéine de β-lc. L'approche de Jong et al. [55] ainsi que Toyoda et al. [56] est basée sur la modélisation des réactions chimiques et microbiologiques.

- Le traitement thermique du lait interprète l'échangeur comme un réacteur chimique et les constituants du lait comme des réactifs. Les constituants les plus importants provoquant des changements dans les protéines du lait [56] sont :
- β-lc qui représente presque 5% des changements thermiques induits que subit le lait.
- α-lactoalbumine qui représente près de 2% des protéines du lait, elle est riche en sulfure de caséine. Quand le lait est chauffé à près de 65°C, la β-lc devient instable thermiquement et il y a dénaturation des molécules exposant les groupements sulfhydriques réactifs et les polymérisent irréversiblement pour donner des particules insolubles dans les agrégations.

II.2.8. Prévention de l'encrassement

Il existe des procèdes mécaniques, chimique, électrique, magnétique de prévention pendant la phase de fonctionnement :

- Procédés mécaniques

Il existe des méthodes en continu et en échangeur démonté. Pour le nettoyage en continu les procédés utilisés sont ceux à billes, à brosses, à racleurs et à ressorts. Afin d'assurer une répartition la plus uniforme possible, les boules ont une densité très voisin de celle du fluide. Il existe d'autres procédés de nettoyage : à molettes, mèches par exemple.

- Autres procédés

Les procédés chimiques consistent à utiliser des solutions détergentes qui mettent en jeu des réactions de dissolutions, d'hydrolyse ou de mise en suspension des dépôts. Les procédés thermique consistent à crées des chocs

thermiques qui fragilisent le dépôt des procédés électriques, magnétique, par ultrasons et par soufflage acoustique sont aussi utilisés.

CHAPTRE III

MODELISATION ET SIMULATION DE L'ENCRASSEMENT

I. Introduction

Nous présentons dans cette partie une modélisation de l'encrassement en régime turbulent dans un échangeur de chaleur à plaques (ECP) lors de phase de pasteurisation du lait.

On a donc établie les équations de conservations et les conditions applicables pour la résolution numérique. En général, ces équations sont : l'équation de continuité qui traduit le principe de conservation de masse, les équations de Navier-Stokes qui traduisent le principe de conservation de la quantité de mouvement et l'équation de l'énergie qui représente le principe de conservation de l'énergie.

Le modèle d'encrassement considéré sera basé sur les différents phénomènes massiques, implicitement, et thermiques intervenant lors du traitement thermique du lait. Ce modèle est valable pour le domaine de l'expérience considérée [57].

La simulation du modèle proposé est effectuée à l'aide d'un programme sous Fluent Ansys.

II. Cycle de production

II.1. Présentation

Le lait qui doit subir un traitement thermique peut être du lait cru ou du lait recombiné. L'opération de recombinaison consiste à mélanger dans une eau convenable les différents composants du lait pour réaliser un produit le plus voisin possible du lait initial. Les trois composants essentiels sont l'eau, la poudre de lait écrémé spray et la matière grasse laitière anhydre. Dans un certain cas quelques adjuvants complémentaires sont utilisés.

Le mélange se fait en circuit fermé et selon le mode opératoire suivant :

1- A l'aide d'un mixeur et pendant 45 minutes mélangées 2650 Kg de poudre maigre (106 sacs de 25 Kg chacun) et 8000l d'eau chauffée à 45°C.

Un dégazage a pour but de permettre l'homogénéisation de la matière grasse (MGLA) dans les meilleures conditions. Elles a également comme intérêt de retirer partiellement au moins certaines odeurs caractéristiques des laits reconstitués. Le dégazage se fait généralement à

60°C.

2- Ajoutée une quantité de MGLA 400 Kg ou 15 g/l.

3- L'Homogénéisation pour fusionner les particules de la MGLA et stabiliser l'état physique de lait.

4- Dans des réservoirs de 30.000 l, le mélange subit une dilution avec 15.000 l d'eau avant de l'envoyer à l'unité Ultra Haute Température (UHT) pour le pasteuriser [58].

II.2. Les étapes de production

Les étapes de production dans l'unité UHT se résument comme suit (Figure III.1.) [59].

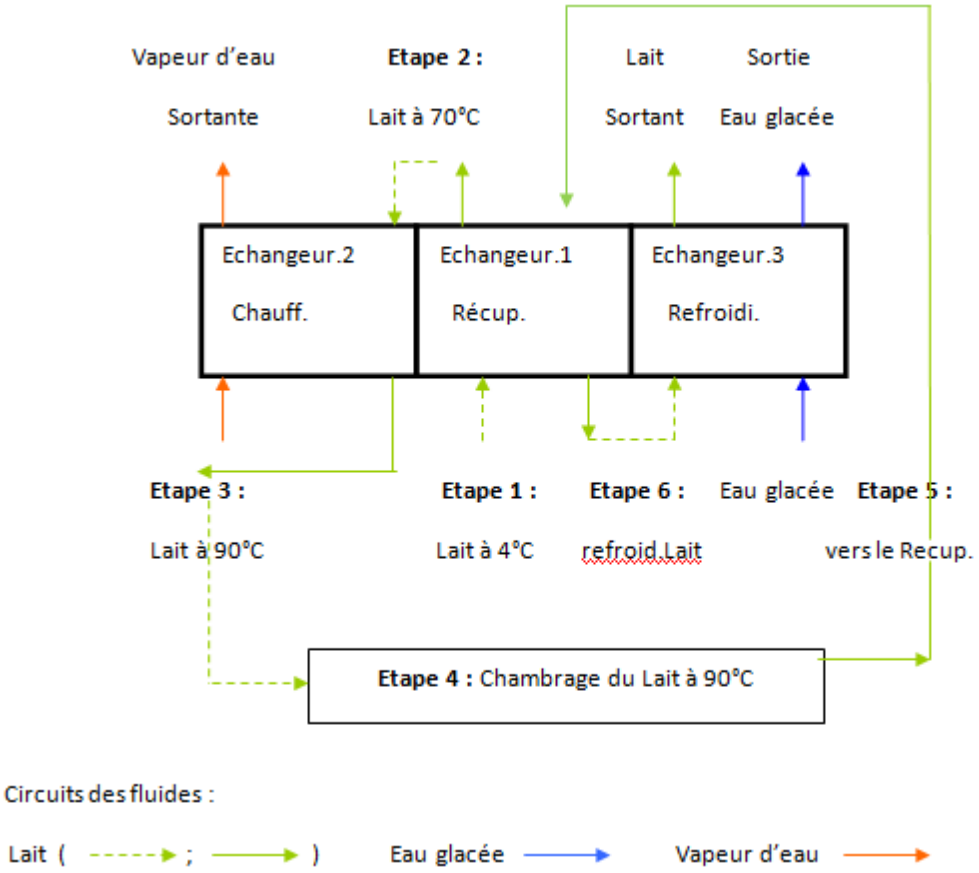


Figure III .1. : Cycle de Pasteurisation du Lait [60].

Alimentation : Pré-refroidissement du lait avec de l'eau portée à une température de 8°C avant d'être envoyé vers un bac de stockage. Grâce à une pompe d'alimentation, le lait est ensuite dirigé vers un bac de lancement équipé d'une sonde pour commander la quantité entrante dans l'échangeur à plaques.

1. Préchauffage (récupération de chaleur): c'est le passage de lait dans les ECP(s) (Echangeur 1) de 4°C à 70°C.

2. Homogénéisateur (3) : l'homogénéisation consiste à faire passer le lait sous forte pression à travers des orifices très étroits qui réduisent la taille des globules gras et fusionner les particules de la MGLA et rendre le mélange donc plus homogène.

3. Pasteurisation : La pasteurisation est un procédé consistant à chauffer du lait cru pendant quelques minutes ou secondes à une température la plus basse

possible, entre 90-100°C et une pression de 4.4 bars, elle est assurée dans le compartiment II (échangeur 2).

4. Refroidissement (récupération de chaleur) : Il se fait par un échange de chaleur dans le compartiment I (échangeur 1) entre l'eau chaude et le lait pasteurisé et dans le compartiment III (échangeur 3) avec le lait froid entrant, le produit sort donc à une température de 22-25°C et une pression de 0,8-2 bars.

5. Conditionnement aseptique : C'est la dernière étape de la production du lait, le produit refroidi est conditionné aseptiquement à l'aide conditionneuse.

III. Modèle thermique de l'échangeur de chaleur à plaques

III.1. Introduction

Quand il agit de traitement thermique du lait, les ECP(s) sont généralement recommandés car ils présentent l'avantage de traiter des débits importants avec un coefficient d'échangeur thermique également important.

Un ECP consiste à un certain nombre de canaux d'écoulement de fluide, métalliques parallèles et séparés par une garniture, qui assure l'étanchéité, et qui entoure le périmètre de chaque plaque (figure III 2). Un échange thermique à lieu entre deux fluides qui circulent dans des canaux voisins [61].

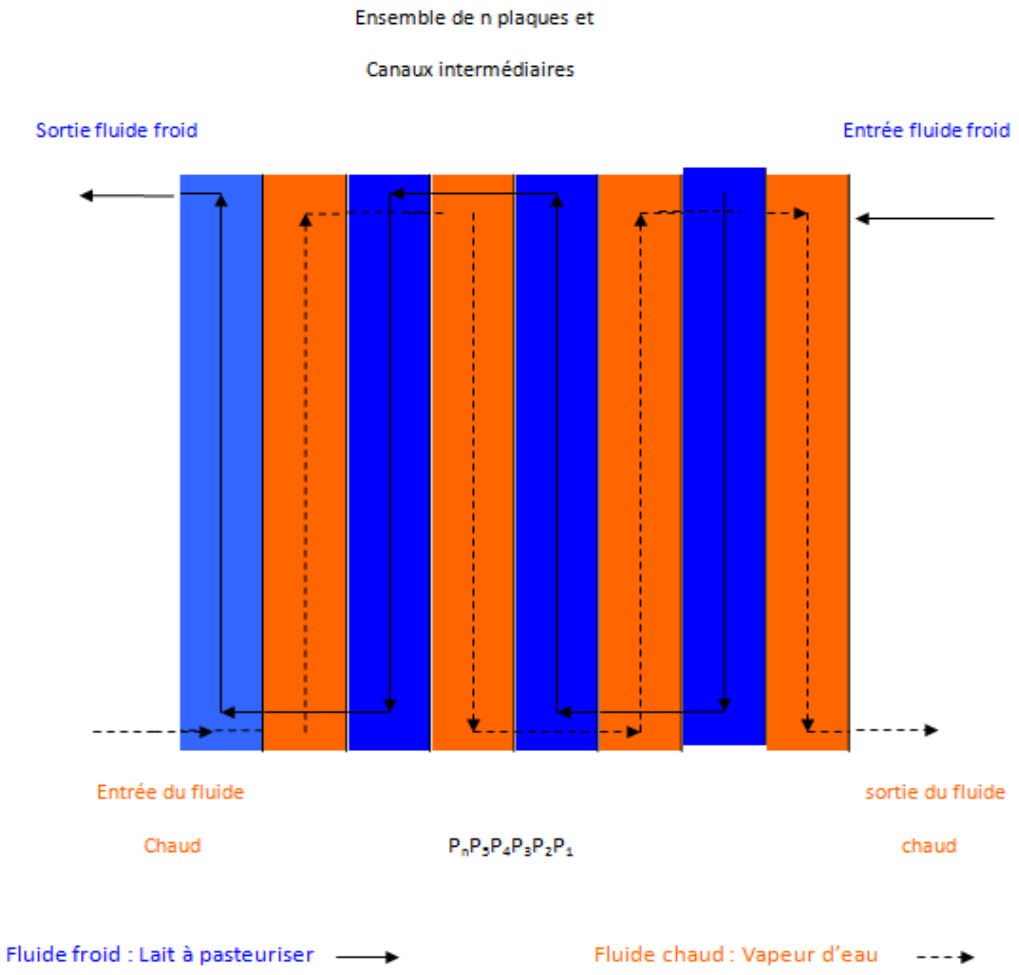


Figure III.2. : Arrangement des plaques de l'échangeur de pasteurisation et sens de circulation des fluides.

La modélisation de l'ECP est basée sur les hypothèses simplificatrices suivantes:

- La variation des propriétés physiques des fluides est négligée.
- On néglige le transfert de chaleur selon la direction axiale.
- Les pertes de chaleur vers l'environnement sont négligeables [61].

III.2. Formulation mathématique du problème

III.2.1. Introduction

Cette partie du travail est consacrée à la mise en équations du problème physique considéré, en utilisant les équations de conservation gouvernant les transferts de chaleur dans un canal plan 2D en régime turbulent.

Une revue de la littérature comprenant des généralités et des définitions de base sur les écoulements turbulents, les lois de paroi, les modèles de fermeture des équations et leurs modélisations sont présentées.

La formulation mathématique est présentée dans ce chapitre en explicitant d'abord le problème physique et les principales hypothèses qui ont été introduites. La formulation proprement dite sera scindée en deux parties : Le modèle d'équation pour un écoulement turbulent en milieu fluide, et le modèle d'équation en présence d'un milieu poreux.

Dans les deux cas, les équations de conservation, le modèle de fermeture des équations en écoulements turbulents, les hypothèses de travail et les conditions aux limites sont présentées [61].

III.2.2. Modélisation de la turbulence dans un milieu totalement fluide

III.2.2.1. Les hypothèses

Afin de pouvoir résoudre le présent problème, nous avons adopté certaines hypothèses simples permettant de résoudre les équations de notre problème :

- Fluide Newtonien,
- le régime d'écoulement est turbulent,
- l'écoulement est incompressible, monodimensionnel en régime stationnaire,

On suppose que les propriétés physiques du fluide restent constantes et évaluées à une température moyenne de référence,

- les constantes physiques ne dépendent pas de la température,
- l'accélération due à la pesanteur est négligée,
- pas de source interne de chaleur,
- toute la chaleur générée par les plaques est cédée au fluide,
- La dissipation d'énergie par les forces visqueuses est négligée,

Les termes de compressibilité $\left(-p\nabla.\vec{V}\right)$ et de dissipation d'énergie par les forces visqueuses $(\mu\phi)$ sont négligés devant les autres termes de l'équation d'énergie. [61].

III.2.2.2. Equations de conservation

a) Equation de conservation de la masse

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0 \qquad \text{(III.1)}$$

b) Equation de conservation de la quantité de mouvement

$$\rho\overline{U}_j \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial X_j} = -\frac{\partial \overline{P}}{\partial X_i} + \frac{\partial}{\partial X_j}\left[(\mu+\mu_t)\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial X_j}\right] + \frac{\partial}{\partial X_j}\mu_t\left[\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial X_j}\right] \qquad \text{(III .2)}$$

c) Equation de conservation de l'énergie

$$\rho\overline{U}_j \frac{\partial \overline{T}}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j}\left(\frac{\mu}{P_r} + \frac{\mu_t}{\sigma_t}\right)\frac{\partial \overline{T}}{\partial X_j} \qquad \text{(III.3)}$$

III.2.2.3. Conditions initiales et aux limites

Les équations de notre système sont soumises aux conditions suivantes :

a) Champ dynamique

- A l'entrée on suppose un profil de vitesse constant :

x=0 : $u = u_e$ et $V = 0$

- Condition d'adhérence à la paroi :

$y = 0$ et $y = H$: $u = v = 0$

- On impose à la sortie un régime dynamique établi :

$x = L$: $\left.\frac{\partial u}{\partial x}\right|_{x=L} = 0, v = 0$

b) Champ thermique

- Une température constante est imposée sur les parois :

$y = 0$ et $y = H$: $T = T_P = 400K$

- Une température constante à l'entrée :

$x = 0$: $T = T_e = 300K$

- Diffusion axiale négligeable à la sortie :

$X = L$: $\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=L} = 0$

c) Conditions à l'interface fluide – poreux

On décrit simultanément les écoulements et les transferts dans les deux domaines fluide et dépôt. Les conditions de raccordement à l'interface sont

alors vérifiées de manière implicite. Le passage du domaine fluide au milieu poreux se fait par une variation de la perméabilité et de la porosité.

Avec l'approche à un seul domaine, les valeurs limites suivantes des paramètres propres au milieu poreux permettent de définir le type du milieu a modélisé :

a) milieu fluide : $J=1, R_c=1, \phi=1, D_a \to \infty$

b) Milieu poreux : $J \geq 1, R_c \neq 1, \phi \prec 1, D_a =$ valeur finie et très faible.

III.2.3. Calcul du coefficient de transfert de chaleur global

La Figure III. 3 représente le schéma de l'écoulement du fluide entre deux plaques parallèle de l'échangeur de chaleur

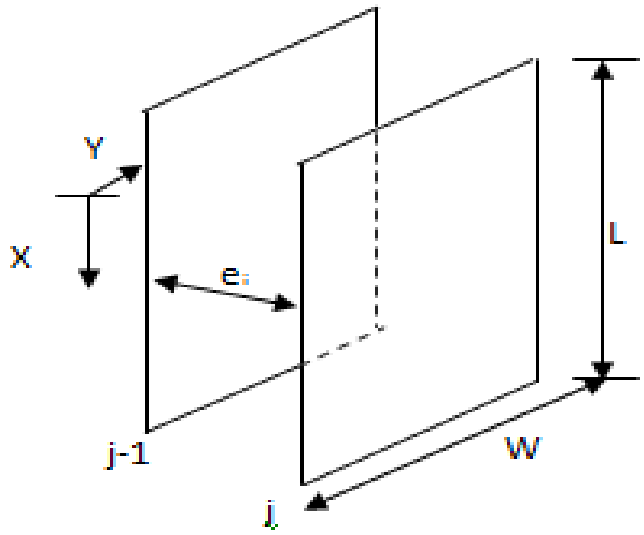


Figure III .3. : Schématisation de la direction de l'écoulement entre deux plaques.

III.2.4. Calcul des paramètres à mesurer du mélange (lait)

1. Viscosité : la viscosité du mélange est calculée à partir de la relation d'Einstein appliquée pour les solutions diluées, elle s'écrit [62] :

$$\mu + \mu_0 (1 + 2{,}5\varphi) \qquad \text{(III.4)}$$

φ = (volume des particules)/ (volume total) (III.5)

Nous avons : $V_T = m_T / \rho_m$ tel que : ρ_m= 1030 kg/m^3 (valeur mesurée)

-A partir de la relation (III.5), nous obtenons : φ

La température moyenne du compartiment pasteurisation permettant la détermination de μ_0 à partir du tableau des caractéristiques de l'eau est :

$$T_{moy} = \frac{(137 + 65)}{2}$$

- A partir de la relation (III.4) nous parvenons à μ.

2. Chaleur spécifique : Elle est calculée avec la corrélation suivante [63] :

$$Cp = 1{,}68T + 3864{,}2$$

3. Débit du mélange : Q = 4000 l/h.

$$Q = 1{,}11\ 10^{-3}\ m^3/s$$

4. Vitesse du mélange : S'écrit :

$$u = \frac{Q}{A} \qquad \text{(III.6)}$$

Avec: $A = e_j \times W$

Donc à partir de la relation (III.6) on obtient la vitesse u :

5. Nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\rho_f \times u \times d_e}{\mu_f} \qquad \text{(III.7)}$$

$$d_e = 2 \times e_j \qquad \text{(III.8)}$$

$$\rho_f = 1033{,}7 - 0{,}2308T - 0{,}00246T^2$$

Donc on obtient ainsi le nombre de Reynolds.

La présence de rainures dans les plaques donne au nombre de Reynolds un tout autre sens que dans le cas d'un écoulement sur une surface lisse, ce qui conduit à considérer l'écoulement comme turbulent dès que Re > 400 ; Le régime est donc turbulent [64].

Pour le transfert de chaleur en régime turbulent dans un ECP, la corrélation suivante peut être utilisée [64].

$$Nu = 0.214\left(Re^{0.662} - 3.2\right)Pr^{0.4} \qquad \text{(III.9)}$$

$$Pr = \frac{Cp \times \mu}{K} \qquad \text{(III.10)}$$

Cette corrélation nécessite de prendre en compte le diamètre hydraulique du canal dans l'évaluation du nombre de Reynolds. Dans le cas où le régime est laminaire (fluide à viscosité élevé), on peut adopter le même mode de calcul que pour des surfaces lisses.

6. Coefficients de transfert de chaleur (h_f)

Pour calculer le coefficient de transfert de chaleur côté fluide froid (h_f), la corrélation (III.9) et les équations (III.7) et (III.8) sont utilisées**.**

$$k = 0,00133T + 0,53991$$

D'où avec l'équation (III.10): Pr = 2

La corrélation (III.9) donne : Nu = 173.11

Sachant que : $Nu = \frac{h_f \times d_e}{K}$

D'où : $h_f = \frac{Nu \times K}{d_e}$ (III.11)

III.2.5. Calcul des paramètres à mesurer de l'eau chaude [65] :

En suivant le même procédé de calcul décrit précédemment pour le fluide chaud, les résultats de calculs sont :

La température moyenne du fluide chaud est T= (90+116)/2 d'où T= 103 °C

k= 0.68 W/m ^{0}C.

On obtient : μ,Cp, ρc

Avec la relation (III.11)

Tel que : u= 0.52 m/s sachant que le débit de la vapeur d'eau : Q= 1.11 10^{-3} m^3/s.

-D'où avec l'équation (III.9) et (III.10) on obtient : Reynolds et Prandtl.

-Avec la corrélation (III.9) on obtient : Nu

-De l'équation (III.11) on obtient : h_c

IV. Programme Ansys

IV.1. Présentation et description du logiciel Ansys

L'outil Ansys est un logiciel de simulation numérique utilisé dans le développement dans le domaine des CFD (computational fluid dynamics). Il concerne toutes les étapes nécessaires à une simulation : le traitement géométrique, le maillage, la résolution, le traitement des résultats et optimisation.

Les utilisateurs Ansys sont des domaines industriels telles que la construction de machines, les secteurs de l'énergie, l'automobile, le ferroviaire, l'aérospatiale, le médical, la microtechnique, la micro électrique ou encore les biens de consommation [66]. Il permet la modélisation de structures, produits, composantes ou systèmes et d'étudier leurs réponses physique telles que les

niveaux de contraintes, la distribution de température ou l'effet de champs électromagnétiques [67].

Ansys permet également d'optimiser les paramètres de modélisation d'un système. Il permet de calculer des régressions linéaires et non linéaires et de générer des courbes de grande qualité. De plus, de nombreuses fonctions mathématiques et thermodynamiques utilisées dans le milieu de l'ingénierie sont incorporées dans le logiciel. Ansys est le premier éditeur mondial dans le domaine du calcul par élément finis, Les outils intégrés au logiciel permettent de résoudre les problèmes de validations produits de manière efficace, Ils permettent d'optimiser le processus de conception (gain de temps énorme) et donc de proposer des produits plus innovants (intégration d'une pré-analyse dans le cycle déconception), de qualité plus élevée tout en minimisant les couts [68].

Les différentes étapes nécessaires à la simulation d'un problème physique :

- Type de calcul (2D ou 3D) ;
- Choix du maillage ;
- Equations résolues ;
- Conditions aux limites ;
- Conditions initiales ;
- Mise en place d'obstacles ;
- Méthodes et paramètres numériques (choix des schémas, résidus ….) [69].

Au cours de l'analyse que vous communiquerez avec Ansys via une interface d'utilisateur graphique (GUI), qui est décrit ci- dessous et illustré sur la Figure III.4.

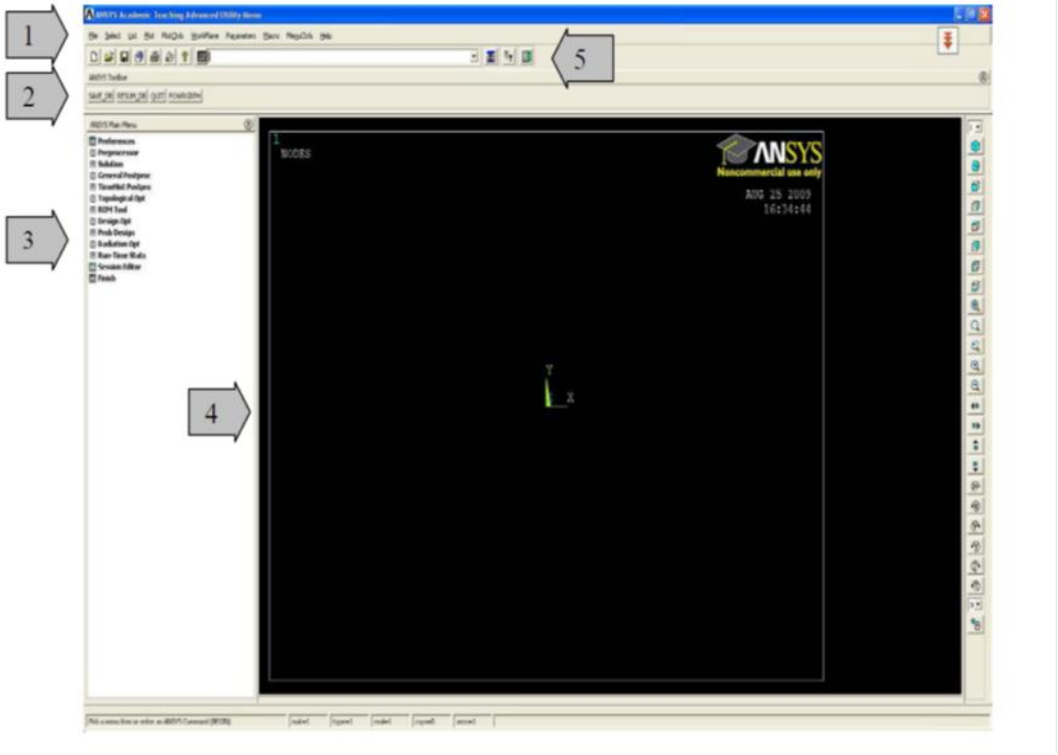


Figure III .4. : L'interface utilisateur graphique d'Ansys [70].

1. **Menu de service** : Ici vous pouvez accéder et ajuster les propriétés de votre session, tels que fichiers, liste et graphique de contrôle.
2. **Barre d'outils** : Boutons pour les commandes couramment utilisées.
3. Menu principal : Ici vous pouvez trouver les processeurs utilisés lors de l'analyse de votre problème.
4. **Fenêtre graphique** : Dans la fenêtre graphique votre modèle s'affiche, éléments, la géométrie, la visualisation des résultats et ainsi de suite
5. **Fenêtre de saisie** : Vous pouvez taper des commandes dans la fenêtre de saisie.

De façon générale, une résolution par éléments finis comporte trois étapes [71] :

- **Pré- processor**

La phase de préprocesseur est celle ou sont spécifiées les données. L'utilisateur peut choisir le système de coordonnées et le type d'éléments, définir des

constantes et des propriétés de matériaux, créer des modèles solides et les mailler, ainsi que définir des équations découplage et contraintes, l'utilisateur peut aussi exécuter un programme qui lui indiquera la taille des fichiers générés, la mémoire nécessaire, le temps d'exécution et le wavefrontnécessaire. Le maillage peut être de 3 types :

- maillage conforme (seulement des briques) ;
- maillage libre (tétraédrique) ;
- maillage adaptatif (itératif).

➢ **Solveur**

Le type d'analyse sélectionné détermine les équations qui seront utilisées par le solveur. Les catégories disponibles incluent :

- Structure, thermique, champ EM, champ électrique, électrostatique, fluides, acoustique.
- Champ couplés : ceci signifie qu'il est possible de résoudre simultanément plusieurs aspects

(Par exemple, la thermomécanique, l'hydromécanique, thermo-fluidique, etc.).

➢ **Post-processor**

C'est la phase ou l'utilisateur peut manipuler les résultats de la phase précédente et les

visualiser interactivement ou faire des sauvegardes pour impression et/ ou vidéo.

IV.4.2. Ansys CFD

La CFD est un ensemble de méthodes numériques permettant d'obtenir une solution approximative d'un problème de dynamique des fluides et/ou de transfert thermique. Les équations qui interviennent sont celles de la mécanique des fluides, résolues par des méthodes numériques [72].

IV.3. Ansys CFX

CFX est un logiciel général de simulation numérique d'écoulements en mécanique des fluides et transfert thermique. Ce logiciel permet de mettre en œuvre une simulation numérique complète de la modélisation, de la création géométrique et la visualisation des résultats, en passant par la création du maillage et le calcul.

Il est divisé en 4 modules : ICEM, CFX-pre, CFX-solver et CFX-post. Chaque module a une utilisation bien spécifique. (Fig. III.5) [73].

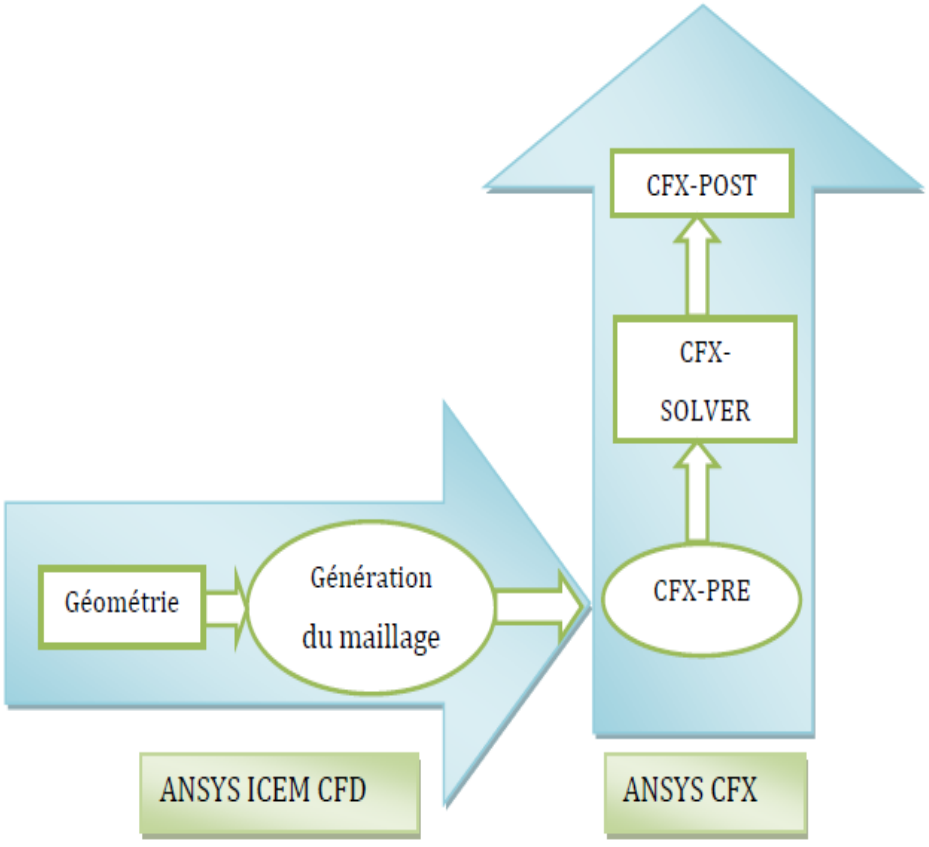


Figure III.5. : Les principaux modules des deux logiciels ANSYS ICEM & CFX [73].

IV.4. Principe

Ces outils numériques sont basés sur trois grandes familles de méthodes :

➢ **Les différences finies** : La méthode consiste à remplacer les dérivées partielles par des différences divisées ou combinaisons de valeurs ponctuelles de la fonction en un nombre fini de points discrets ou nœuds du maillage.

- Avantages : grande simplicité d'écriture et faible coût de calcul.
- Inconvénients : limitation à des géométries simples, difficultés de prise en compte des conditions aux limites de type Neumann.

➢ **Les volumes finis :** La méthode intègre, sur des volumes élémentaires de forme simple, les équations écrites sous forme de loi de conservation. Elle fournit ainsi de manière naturelle des approximations discrètes conservatives et est particulièrement bien adaptée aux équations de la mécanique des fluides. Sa mise en œuvre est simple avec des volumes élémentaires rectangles.

- Avantages : permet de traiter des géométries complexes avec des volumes de forme quelconque, détermination plus naturelle des conditions aux limites de type Neumann.
- Inconvénient : peu de résultats théoriques de convergence.

➢ **Les éléments finis :** La méthode consiste à approcher, dans un sous-espace de dimension finie, un problème écrit sous forme de variations (comme minimisation de l'énergie en général) dans un espace de dimension infinie.
La solution approchée est dans ce cas une fonction déterminée par un nombre fini de paramètres comme, par exemple, ses valeurs en certains points ou nœuds du maillage.

- Avantages : traitement possible de géométries complexes, nombreux résultats théoriques sur la convergence.
- Inconvénient : complexité de mise en œuvre et grand coût en temps de calcul et mémoire [74].

IV.5. Les points forts des outils Ansys

- Une interface WORKBENCH intuitive et très facile à prendre en main.
- L'associativité avec tous les outils CAO 3D disponibles sur le marché.
- La possibilité de communiquer avec tous les logiciels CAO du marché : en formatnatif avec Catia V4 et V5, Solid Edge, NX-Unigraphics, Pro/Engineer, SolidWorks, Autodesk Inventer et Mechanical Desktop, et par l'intermédiaire de passerelles Acis et Parasolid intégrées avec tous les autres produits.
- Des notes de calcules automatiques.
- Des meilleurs robustes.
- Des outils de convergence automatique.
- Une gestion automatique des assemblages et des contacts.
- La possibilité d'avance progressivement dans la complexité des phénomènes traités [75].

CHAPTRE IV

RESULTATS ET DISCUSSION

I. Introduction

Cette étude porte sur l'analyse de **l'encrassement** avec et sans chicanes dans un échangeur de chaleur à plaques. La géométrie considérée est un canal plan, entièrement remplie par un liquide ayant un fort pouvoir encrassant (**solution protéique**) en raison de sa composition. Le transfert de chaleur en raison de l'opération de chauffage pour pasteuriser le lait par exemple peut affecter la composition chimique du fluide au cours du temps. Par conséquent, un dépôt résultant de la transformation chimique des protéines du lait de nature isolante sous l'effet de la température, est formé sur les surfaces d'échanges du canal. C'est le phénomène d'encrassement.

Les simulations numériques sont basées sur la résolution des équations de transport modélisant des écoulements turbulents dans une conduite plane partiellement remplie au cours du temps. Les parois sont chauffées à une température uniforme et constante notée T_p. Le fluide, une solution protéique, entre dans la conduite avec une vitesse notée U_e et à une température uniforme en moyenne, notée T_e. L'intensité de turbulence à l'entrée a été fixée dans le modèle de turbulence considéré. La longueur L du canal est choisie de sorte que l'écoulement soit dynamiquement et thermiquement établi dans la section de sortie pour les nombres de Reynolds considérés.

Le modèle physique choisi ainsi que le système de coordonnées utilisé est représenté sur la Figure IV.1. La longueur et la hauteur du canal sont respectivement L et H. Vu la géométrie du problème, le système de cordonnées est cartésien (X, Y).

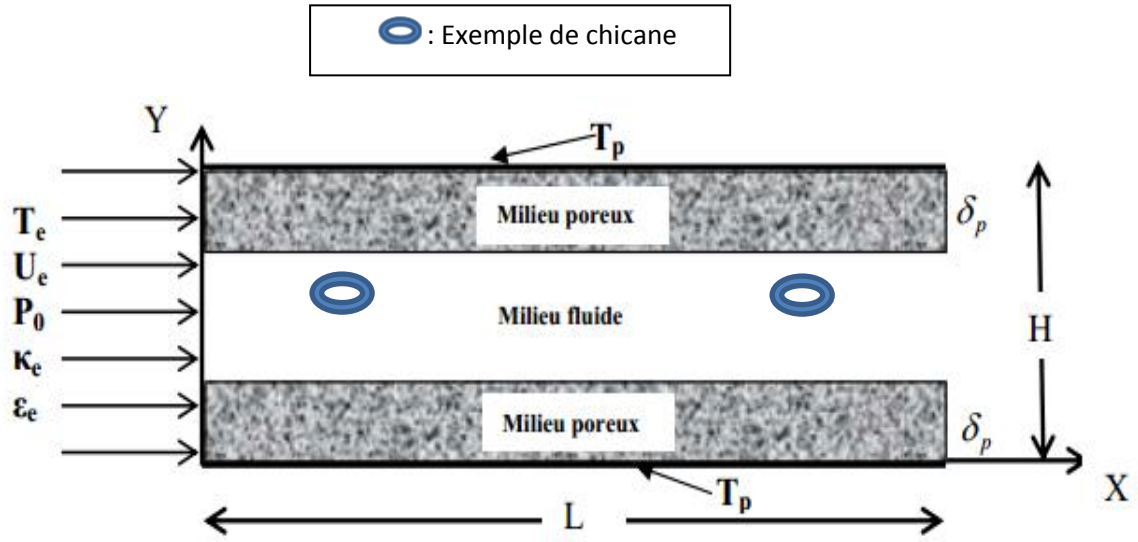


Figure IV.1 Ecoulement dans un canal à section rectangulaire.

II. Profils dans un échangeur de chaleur à plaques sans encrassement

II.1. Profil de la température

L'évolution de la température en fonction de la largeur du canal est représentée sur la figure IV.2 et ce pour différents position dans le canal.

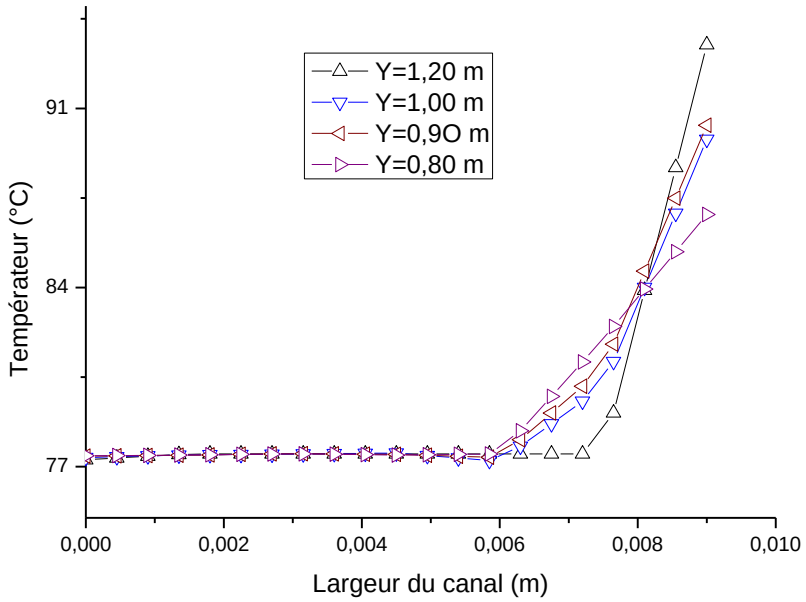


Figure IV.2 : La variation de la température dans le fluide.

En raison de l'échange thermique avec la vapeur d'eau circulant en contre-courant dons l'échangeur de chaleur à plaques, on observe une augmentation de la température de la solution protéique le long du canal.

II.2 Profil de la vitesse

L'évolution du profil de la vitesse en fonction de la largeur du canal est représentée sur la figure IV.3 et ce pour différentes positions dans le canal (y).
Trois sous profils de vitesse classiques se dégagent de la figure ; une vitesse nulle près des parois de part et d'autre et une vitesse maximale au niveau de l'axe central.

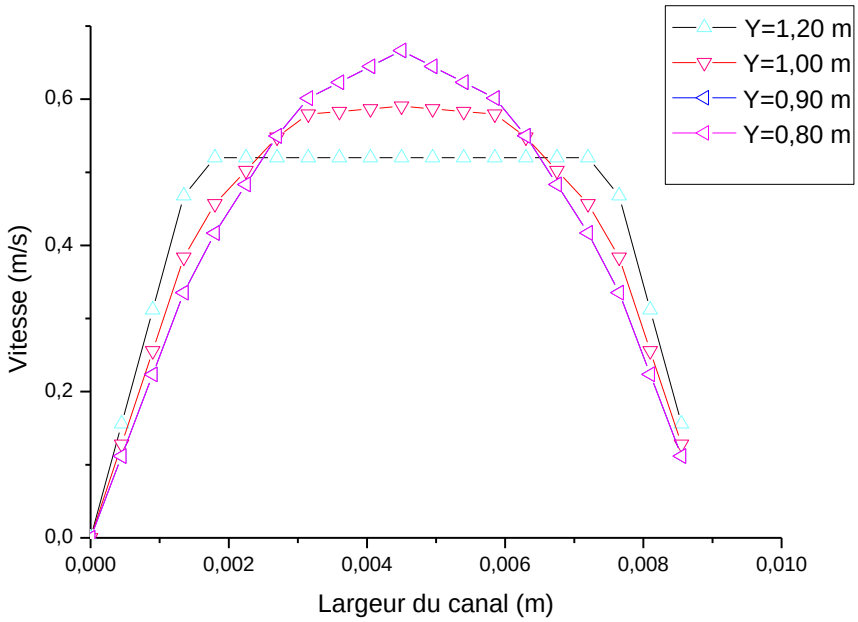


Figure IV.3 : La variation de la vitesse à la longue de canal.

III. Profils dans un échangeur de chaleur à plaques avec encrassement

III.1. Profil de la température

L'évolution du profil de la température en fonction de la largeur du canal en présence de l'encrassement est représentée sur la figure IV.4 et ce pour différentes positions dans le canal (Y).

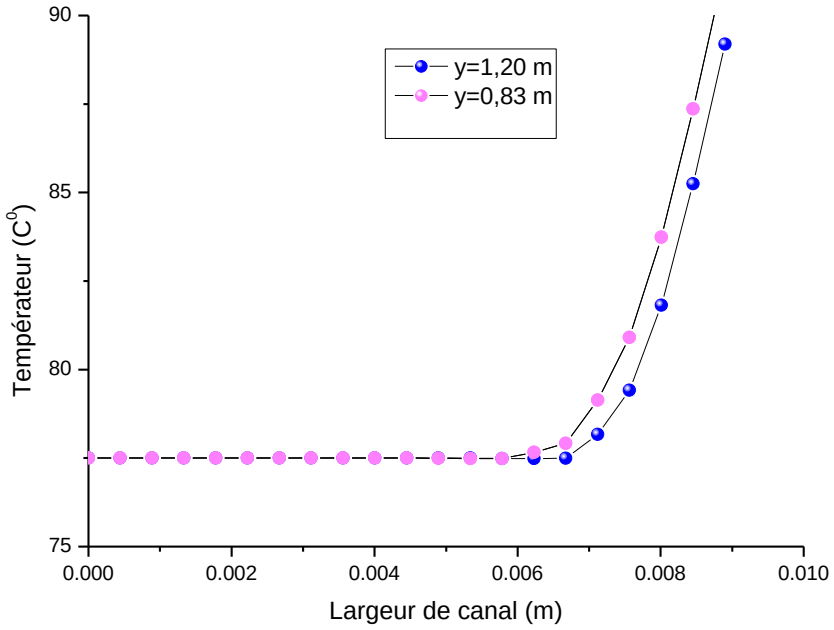


Figure IV.4 : La variation de la température à la longue de canal.

Une augmentation de la température de la solution protéique dons le cas d'un canal avec encrassement est toujours observée mais elle est moins significative en comparaison avec le cas d'un canal sans encrassement et ce en raison de la nature isolante du dépôt.

III.2. Profil de la vitesse

L'évolution du profil de vitesse en fonction de la largeur du canal en présence de l'encrassement est représentée sur la figure IV.5 et ce pour différentes positions dans le canal (y).

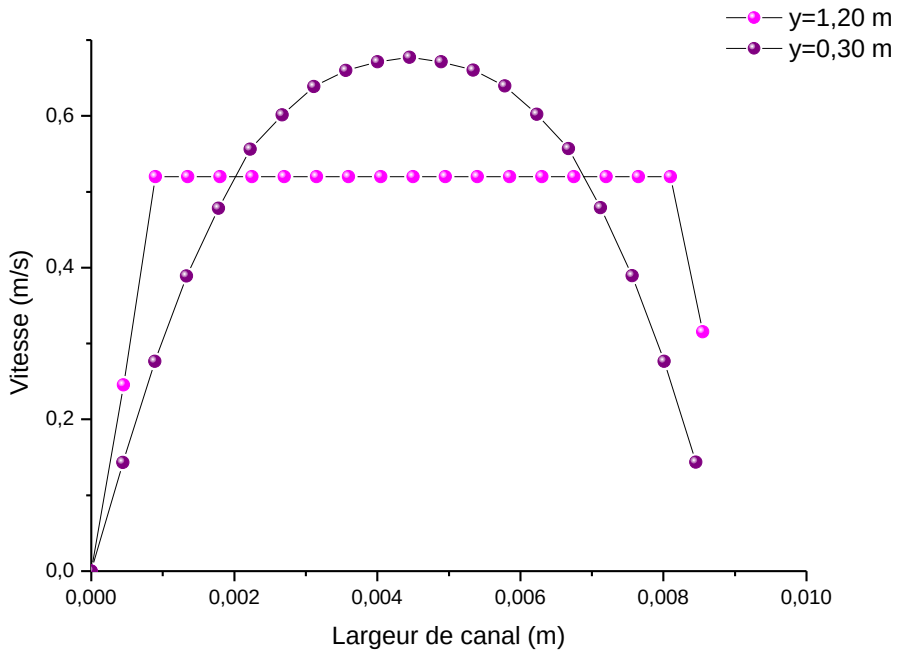


Figure IV.5 : La variation de la vitesse à la longue de canal.

On observe les mêmes allures mais les valeurs sont plus importantes en raison du rétrécissement dans la section de passage du fluide due de la présence de l'encrassement.

IV. Profils dans un échangeur de chaleur à plaques avec encrassement en présence de chicane

IV.1. Profil de la température

L'évolution de la température en fonction de la largeur du canal en présence de l'encrassement est représentée sur la figure IV.6 et ce pour différents positions dans le canal (y).

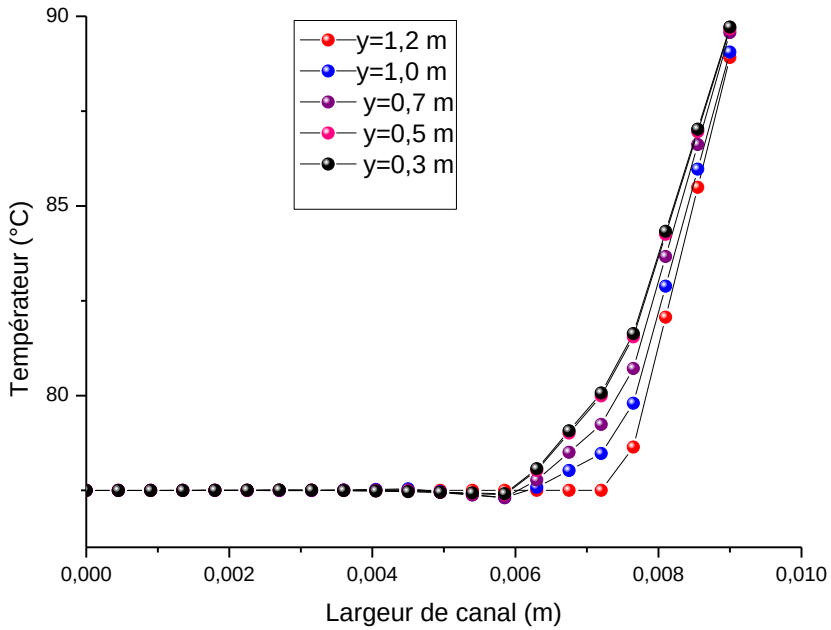


Figure IV.6 : La variation de la température dans le fluide.

On remarque une augmentation progressive de la température de fluide qui entre dans le canal en raison de l'échange thermique.

IV.2. Profil de la vitesse

La figure IV.7 montre l'évolution de la vitesse du lait en fonction de la largeur du canal. On observe trois profils de vitesse qui se dégagent de la figure : une vitesse nulle près des parois d'une part et d'autre part maximale au niveau de l'axe central.

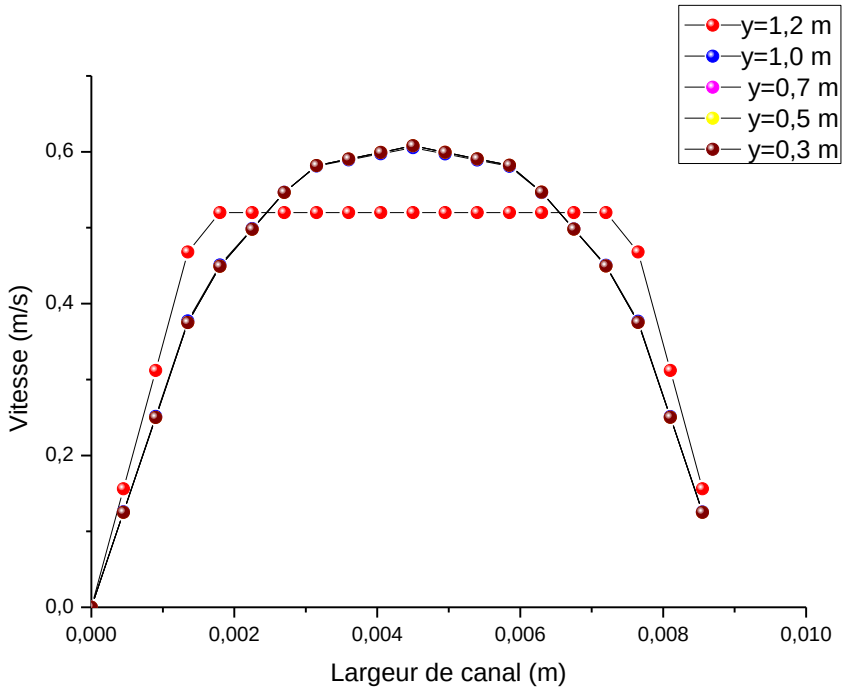


Figure IV.7 : La variation du profil de vitesse dans le fluide.

V. Etude comparative avec et sans chicane

Pour considérer l'efficacité des chicanes, une comparaison des profils de température est faite entre un échangeur de chaleur à plaques avec est sans chicanes en présence ou non de l'encrassement.

V.1. Les profils dans un milieu complètement fluide

V.1.1. Profil de la température

La figure IV.8 montre l'évolution de la température de la solution protéique en fonction de la largeur du canal.

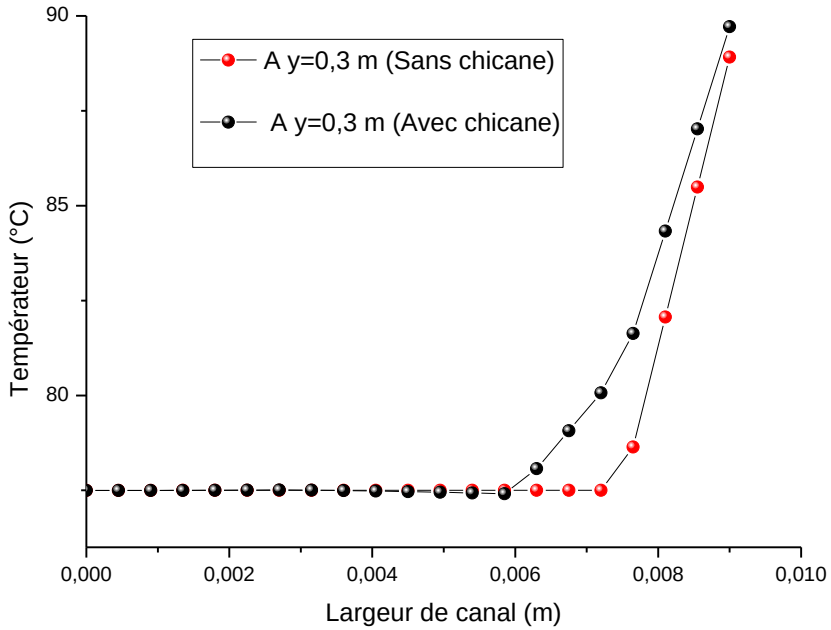


Figure IV.8 : La variation de la température dans le fluide.

Sans chicanes, on observe une augmentation de la température sur les parois mais elle est moins significative en comparaison avec le cas de présence de chicane. Les chicanes apportent une meilleure turbulence donc un meilleur échange thermique avec la vapeur d'eau circulant dans l'échnageur de chaleur à plaques.

V.1.2 Profil de la vitesse

La figure IV.9 montre l'évolution de la vitesse de la solution protéique en fonction de la largeur du canal. La même tendance de l'évolution est observée.

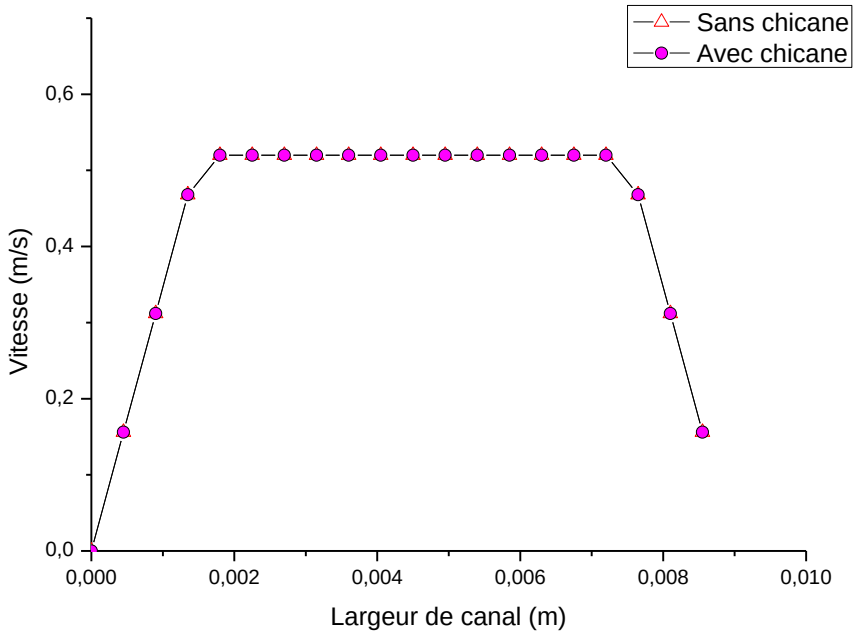


Figure IV.9 : La variation du profil de vitesse dans le fluide.

V.2. Les profils dans un milieu avec encrassement

V.2.1 Profil de la température

La figure IV.10 montre l'évolution de la température de la solution protéique en fonction de la largeur du canal en présence d'encrassement.

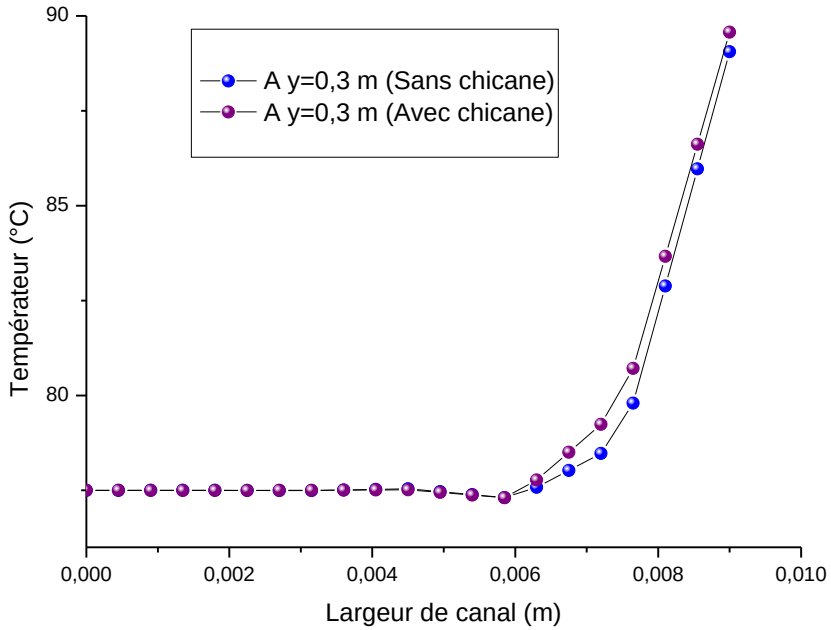


Figure IV.10 : La variation de la température dans le fluide.

Une augmentation de la température est toujours observée en raison de l'échange thermique. Elle est plus significative en présence des chicanes.

V.2.2. Profil de la vitesse

L'évolution du profil de vitesse en fonction de la largeur du canal en présence de l'encrassement est représentée sur la figure IV11et ce pour différentes positions dans le canal (y). Les mêmes allures sont observées.

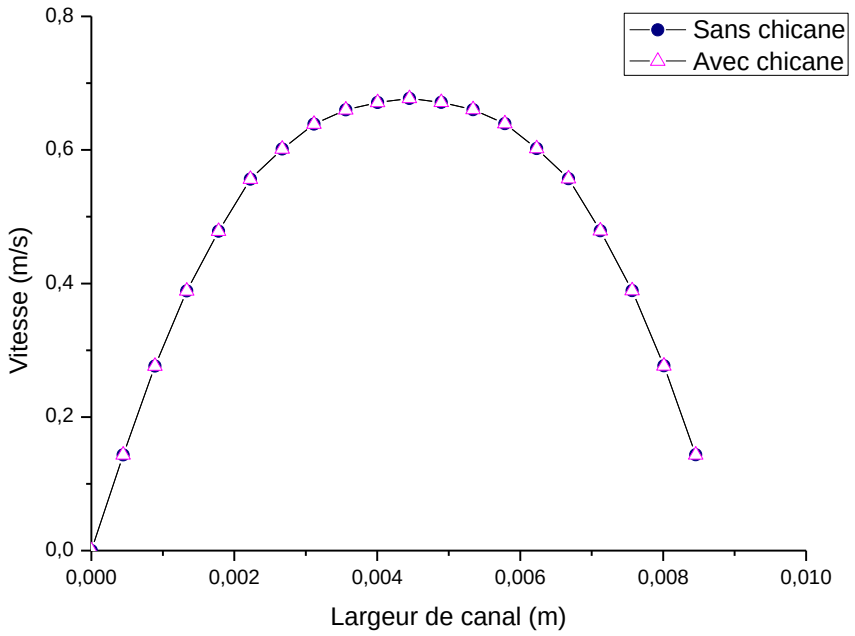


Figure IV.11: La variation du profil de vitesse dans le fluide.

Conclusion

La présence des chicanes donne une turbulence supplémentaire donc un meilleur échange thermique avec et sans encrassement. L'emploi des chicanes est ainsi recommandé.

CONCLUSION GENERALE

Dans le cadre du présent travail, on s'est proposé de présenter une formulation du problème d'encrassement des échangeurs de chaleur à plaques lors de la pasteurisation du lait. La modélisation mathématique d'un système d'échangeurs de chaleur à plaques faisant suite à un encrassement par une solution portique est présentée utilisant un modèle dynamique de l'écoulement du fluide avec la préséance de la chicane.

Un modèle mathématique en régime instationnaire est établi à l'échelle macroscopique pour un écoulement turbulent entre deux plaques planes en présence d'un milieu fluide avec encrassement. Les équations de conservation sont choisies, pour les conditions spécifiques au modèle physique, sont développées avec certaines hypothèses simplificatrices.

Dans le cas de lait, la dénaturation des protéines de lait et surtout la β-lactoglobuline est la principale cause de la formation de dépôt sur les parois des échangeurs de chaleur.

En générale, et après l'analyses des résultats numériques de l'étude de l'encrassement avec la présence et l'absence des chicanes dans les échangeurs de chaleur à plaques, les résultats obtenus montrent que :

- L'existence d'un dépôt de surface réduit la diffusion thermique donc la température. Une grande quantité de chaleur reste emmagasinée dans le dépôt de nature isolante.
- Des profils classiques de vitesses sont observés.
- Le chicane joue un rôle d'obstacle et donne une turbulence supplémentaire donc un meilleur échange thermique.

Références bibliographiques

[1] : https ;//en.oxforddictionaires.com/definition/milk.

[2] : http://www.larousse.fr/archives/agricole; 2002, pp767.

[3] : Deforges J., Derens E., Rosset R.et Serrand M. Maitrise de la chaine du froid des produits laitiers réfrigérés. Edition Cemagref Tec et Doc, Paris. (1999).

[4] : Codex Alimentaire, Norme générale pour l'utilisation de termes de laiterie Codex Stan 206, pp 1-4, 1999.

[5] : Soustre Y., Histoire, sociologie et image du lait, site du Centre National Interprofessionnel de l'Economie Laitière (CNIEL), Hors-série n°2, [http://www.cniel.Com. /publicat/Questions sur/pdf/QS_HS2.pdf] (Consulté le 14/10/09).

[6] : http://www.wikiwand.com/fr/Lait.

[7] : http://www.wikipidia.fr.org.Date.

[8] : Le lait et les produits laitiers dans la nutrition humaine Archive des documents de la FAO ; Collection FAO : Alimentation et nutrition n° 28 ISBN 92-5-20534, http://www.fao.org, 1998.

[9] : Franworth E. et Mainville I., Les produits laitiers fermentés et leur potentiel thérapeutique, Centre de recherche et de développement sur les aliments, Saint-Hyacinthe. http://www.dos.transf.edwa.pdf, 2010.

[10] : Mittaine J., Les laits autres que le lait de vache, http://whqlibdoc.who int/monograph/ who mono, 1980.

[11] : FAVIER J.C., Composition du lait de vache-Laits de consommation, http://www.horizon.documentation.fr, 1985.

[12] : JENSEN R., Handbook of milk composition-General description of milks,Academic Press,Inc:3, 919 pages,1995.

[13] : Boubabiche A., Influence de la présence d'un déflecteur sur les performances thermiques d'un échangeur de chaleur lors d'une phase de traitement thermique du lait, Université Dr. Yahia Farés-Médéa, Jun 2017.

[14] : Lenoir J., les casenes du lait RLF ?440/17-23, 1985.

[15] : Lankveld J.M.G., protein standarized milk produits composition and properties –IDF Brussels 70-85,1995.

[16] : Fredot E., Connaissance des aliments-Bases alimentaires et nutritionnelles de la diététique, Tec et Doc, Lavoisier.25, 397 pages, 2006.

[17] : Gabriel R., Interaction entre un peptide de β-lactoglobuline bovine (β-lg f1-8) et les protéines du lactosérum Le cas de l'α-lactalbumine Canada, Maîtrise en sciences et technologie des aliments, 2013.

[18] : Vignola C.L., Science et technologie du lait –Transformation du lait, École polytechnique de Montréal, ISBN: 29-34 (600 pages), 2002.

[19] : Raquel Silveria Porto Oliveria, modification des propriétés physicochimique de la caséine micellaire en présence du peptide f1-8 généré par hydrolyse de la bêta –lactolobuline canada / Maîtrise en sciences et technologie des aliments Maître ès Sciences (M. Sc), 2013.

[20] : C. Schmidt, Etude de la coacervation complexe entre la bêta-Iactoglobuline et la gomme d'acacia en solution aqueuse / Institut National Polytechnique de Lorraine Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires, 2000.

[21] : http://www.natrel.ca/french/index.htlm.

[22] : A. Ould Mustapha, D. Ndiyae, B. Ould Kory, Etude de la qualité du lait pasteurisé des industries laitières situées à Nouakchott (Mauritanie), Sciences du vivant Biologie, Editions Mersenne, 2012.

[23] : http://www.futura-sciences.com/sante/definitions/nutrition -pasteurisation-13574.

[24]:(http://web04.univlorraine.fr/ENSAIA/marie/web/ntic/pages/2010/guingr.html).

[25] : http://www.espritsante.com/articles/sterillisation-traitement-aliments-hautes-températures.

[26] : http://www.futura-science, com/sante/questions-reponce/nutrition-lait-pasterise-lait-uht-microfiltre-difference-11520/.

[27] : http://www.cerin.org/question-aux-dieteticiens/quelle-difference-entre-le-lait-pasterise-et-le-lait-uht/.

[28] : Y. A. Cengel, K.J.Mc, Grew Hill Bell & A.C.Mueller ,Wolverine Engineering Transfert ,Wolverine Tube , 2002.

[29] : Weber C. et Magnificat A., Article : 055 ; Les échangeurs de chaleur ; févr.-16 ; Encyclopédie de l'énergie 2000.

[30] : Incropera F.P., De Witt D.P., Fundamentals of heat and mass transfer, Wiley & Sons, 1990.

[31] : TEMA (Dir), Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association, New York, 1988.

[32] : T. Casanueva-Robles, & T.R. Boot, The environmental effect of heat exchanger fouling:a case study. Communication présenté Engineering Conférences International, Germany, June 2005.

[33] : F. Taourit, Etude du comportement thermique de deux écoulements du fluides dans un échangeur de chaleur (comparaison entre le cas simple et le cas avec ailettes), 2013.

[34] : Cengel, Y. A., Heat and mass transfer: a practical approach. (3e éd.) . Mc Graw- Hill, 2006.

[35] **:** Sacadura J, F«Initiation Aux Transfert Thermiques » Edition Lavoisier.EtOzisikM.N,Heat Conduction , Editions John Wilyand Sons , NewYork. 1993.

[36] : F.Taourit, Etude du comportement dynamique et thermique de deux écoulements du fluide dans un échangeur de chaleur (comparaison entre le cas simple et le cas avec ailettes, Thèse de Master, Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, 2013.

[37] : Pascal Tobaly**.** Echangeurs de Chaleur, 2002.

[38] : Yves .Jannot**.** Transfert Thermique, 2003.

[39] : Wikipedia, Echangeur de chaleur [En ligne] // Wikipédia, .- http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89 changeur de chaleur, 2012.

[40] :J. Yves, Généralité sur les transferts de chaleur, 2003.

[41] : Vitherm, Échangeur de chaleur à plaques jointées», VT-MAN 1003 France , 2005.

[42] : Alfa-Laval, Les cahiers Alfa-Laval, Spécial Thermique, N°17, 1987.

[43] : Bontemps A., Garrigue A., Goubier C., Huetz J., MAarvillet C., Mercier C., Vidil C, Description des échangeurs » technique de l'ingénieur [B 2 341], 2000.

[44] : Sadouk H., Source Modélisation de l'encrassement en régime turbulent dans un échangeur de chaleur à plaques avec un revêtement fibreux sur les parois, thèse de doctorat, USTHB Alger, 2009.

[45] **:** Kaka S., Boilers, evaporators, and condensers ; 1991.

[46] : Epstein, N., Fouling in heat exchangers, Heat Transfer 1978 : 6th International Heat Transfer Conference, 6, p 235-253, 1978.

[47] : Laque, F. L., Copson, H. R., Corrosion resistance of metals and alloys. Reinhold Publishing Corporation, 1963.

[48] : Duffau, C., Grillot, J. M., Navarro, J. M., Vidil, R., L'encrassement dans les échangeurs : description, prévention, remèdes, GRETh Technique et Documentation, Diffusion Lavoisier, 1991.

[49] : Lund D. B. and Bixby D., Fouling of heat exchange surfaces by milk. Proc. Biochem., 10 (9), 52-55, 1975.

[50] : Rodier, J., L'analyse chimique et physicochimique de l'eau, Editions Dunod, 1971.

[51] : R. Harche ; Etude et modélisation de l'encrassement par le lait dans une conduite verticale ; Mémoire de Magister en énergétique des procédés Industrielle ; USTHB, 2009.

[52] : C. Duffau, J.M. Navaroo, et R.Vidil, L'encrassement dans les échangeurs. Description. Prévention. Remèdes ; Edition GRET ; 1991.

[53] : J. Huetz, A. Garrigure, C. Marvillet, A. Bontemps, R. Vidil , C. Goubier, P. Mercier, Echangeur de chaleur - Problème de fonctionnement ; Base documentaire, Génie énergétique ; B2344 ; 10 fév. 1995.

[54] : M. T. Belmar-Beiny, S. M. Gotham, W. R. Paterson & P. J. Fryer, The effect Of Reynolds number and fluid temperature in whey protein fouling. Journal of the Society of Dairy Technology, p (19, 119-139), 1993.

[55] : P. Jong, S. Bouman & H. J. Van Der Linden, Fouling of heat transfer equipment in relation to the denaturation of b-lactoglobulin. Journal of the society of Dairy Technology, p (45, 3-8), 1992.

[56] : I. Toyoda, P. J. R. Schreyer & P. Fryer, A computational model for reaction fouling from whey protein solutions. In fouling and cleaning in food processing, jesus, College, Cambridge, (pp. 191-196) , March 1994.

[57] : N. Hentabli, S. Belmostefaoui**,** Modélisation et simulation numérique de l'encrassement en régime turbulent dans un échangeur de chaleur à plaques lors d'une phase de traitement thermique, Université Dr. Yahia Farés-Médéa, Jun 2015.

[58] : C.L. Avezard , J. Lablee , Lait et produits laitiers recombinés , In LUQUEE F.M , Laits et produits laitiers vache brebis chèvre, Paris : p(536-538-539) 1990.

[59] : Manuel technique de 'installation' ST, 1990.

[60] : R. Merakchi, Simulation numérique de l'encrassement des échangeurs de chaleur à plaques par le lait lors d'une phase de pasteurisation en deux dimensions (2D), 2007.

[61] : N. Hentabli, S. Belmostefaoui**,** Modélisation et simulation numérique de l'encrassement en régime turbulent dans un échangeur de chaleur à plaques lors d"une phase de traitement thermique, Université Dr. Yahia Farés-Médéa, Juin 2015.

[62] : Y. Mahdi, L. oufer, Simulation numérique de l'encrassement des échangeurs de chaleur à plaques lors d'une phase de pasteurisation, VIIème Colloque Interuniversitaire Franco-québécois sur la Thermique des Systèmes, Saint-Malo France 23-25 mai 2005.

[63] : Manuel technique de l'installation, ST 1992.

[64] : P. K. Nema, AK. Datta, "A computer based solution to check the drop in milk outlet temperature due to fouling in a tubular heat exchanger" Journal of Food Engineering (N° 71) 2005.

[65] : E. R. G. Echert, R. M. Drake, "Heat and Mass transfert"Mc Graw-Hill, 1972.

[66] : http : //www .cadfem-an.com/produits/ansys.html.

[67] : Kaouane Malika ; mémoire de magister thème : analyse des contraintes mécaniques et de la Fissuration des éléments en béton armé sous l'effet thermomécanique, 2011.

[68] : Hantz Mathieu (Elève ingénieur, INSA de Strasbourg, Spécialité Génie Civil). Mémoire de fin d'étude, thème : Etude de l'optimisation du renforcement par des fibres de carbones des dalles en béton armé munies de trémies, en utilisant l'optimisation topologique ; Université Fédérale d'Uberlândia, Brésil, 2009.

[69] : Melouki Omar et Mesbah Abderraouf ; mémoire de master thème : Etude numérique comparative de L'influence entre des tubes carré et cylindrique d'un faisceau aligné, sur les performances thermique d'un échangeur tube et calandre , 2014.

[70] : Epstien N.Thinking about Heat Transfer Fouling : A5*5 Matrix,Departementof chimical energineering, University of Britsh COLOMBIA ? P (43 ,56) 1983.

[71] : M. Kaouane, Analyse des contraintes et de la fissuration des éléments en béton armé sous l‟ effet thermomécanique, Magister en Génie Civil, Université Mouloud Mammeri- 2011.

[72] : Tabet S , Etude numérique de la convection naturelle dons un enceinte fermée partiellement chauffée ,thèse Dr, thermique et mécanique des machines Industrielles, Université d'Oran-Algérie,2017.

[73] : Guit M , Lounes B , Simulation Numérique de l'impact des gouttelettes de métal creuses sur une suraface incline ,master en gène mécanique , Université Dr, Yahia Fares- Médéa.

[74] :https://cel.archives ouvertes.fr/file/index/docid/556967/filename/MethodesNumeriques_EricGoncalves.pdf.

[75] : M. Guit, B. Lounes , Simulation Numérique de l'impact des gouttelettes de métal creuses sur une surface incliné, Master en génie mécanique ,Université Dr. Yahia Farés-Médéa, 2013 .

Annexes

T (°C)	μ (kg/ms.) ×10-3	T (°C)	μ (kg/ms.) ×10-3
0	1,7827	56	0,4992
1	1,7231	57	0,4915
2	1,6665	58	0,4840
3	1,6128	59	0,4767
4	1,5616	60	0,4695
5	1,5130	61	0,4626
6	1,4667	62	0,4557
7	1,4225	63	0,4491
8	1,3804	64	0,4426
9	1,3403	65	0,4362
10	1,3020	66	0,4300
11	1,2654	67	0,4239
12	1,2305	68	0,4180
13	1,1970	69	0,4121
14	1,1651	70	0,4065
15	1,1344	71	0,4009
16	1,1051	72	0,3954
17	1,0770	73	0,3901
18	1,0500	74	0,3849
19	1,0242	75	0,3797
20	0,9993	76	0,3747
21	0,9755	77	0,3698
22	0,9525	78	0,3650
23	0,9305	79	0,3603
24	0,9092	80	0,3557
25	0,8888	81	0,3511
26	0,8661	82	0,3467
27	0,8501	83	0,3423
28	0,8318	84	0,3381
29	0,8142	85	0,3339
30	0,7971	86	0,3298
31	0,7807	87	0,3257
32	0,7648	88	0,3218
33	0,7404	89	0,3179
34	0,7345	90	0,3141
35	0,7201	91	0,3103
36	0,7002	92	0,3066
37	0,6927	93	0,3030
38	0,6796	94	0,2995
39	0,5670	95	0,2960
40	0,6547	96	0,2926
41	0,6428	97	0,2892
42	0,6312	98	0,2859
43	0,6200	99	0,2827
44	0,6091	100	0,2795

45	0,5985	101	0,2763
46	0,5882	102	0,2732
47	0,5782	103	0,2702
48	0,5684	104	0,2672
49	0,5590	105	0,2643
50	0,5479	106	0,2614

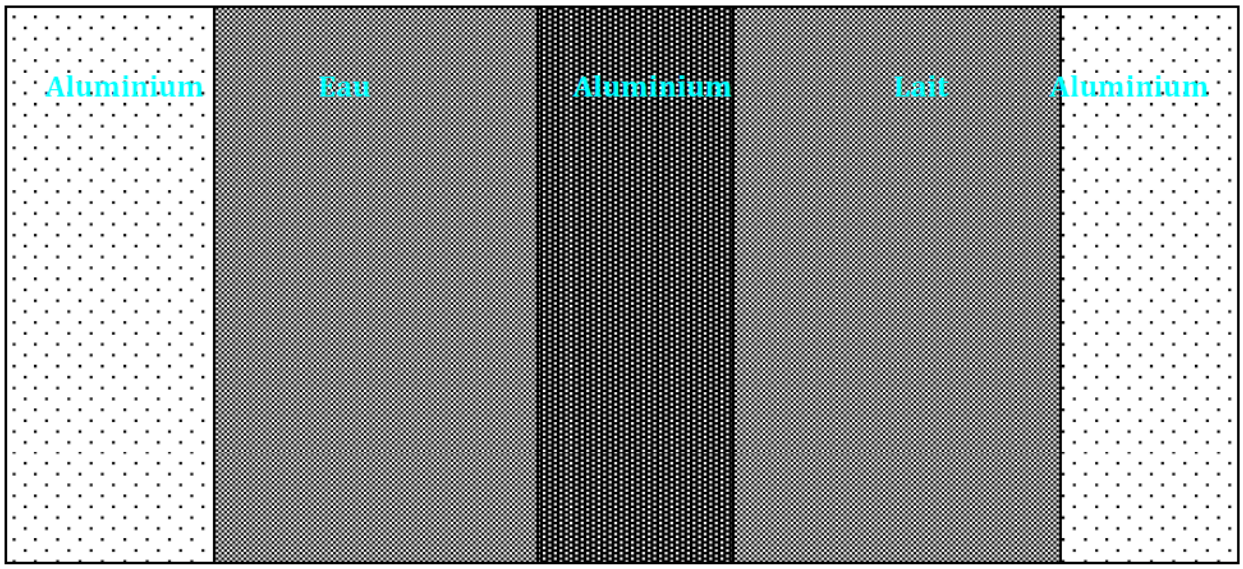
Les démentions de l'échangeur à plaque simulé au programme ANSYS

	Variation de Y (m)		Variation de X(m)	
	Y_1 (m)	Y_2 (m)	X_1(m)	X_2(m)
Carrée N°1	**0**	**1.2**	**0**	**0.0315**
Carrée N°2	**0**	**1.2**	**0.0045**	**0.027**
Carrée N°3	**0**	**1.2**	**0.0135**	**0.018**

e = le diamètre de plaque = 0.0045 m

d = diamètre hydraulique =diamètre entre les deux plaque d = e*2=0.0045*2=0.009 m

Y = 1.2 (m)



Y = 0 (m) X = 0.0045 (m) X = 0.0135 (m) X = 0.018 (m) X = 0.027 (m) X = 0.0315(m)

X = 0 (m)

Carrée N°1 Carrée N°2 Carrée N°3

Un diagramme montre les carrées sont placées au programme ANSYS

Les propriétés physico-chimiques des matériaux utilisés :

		Paramètre du lait (β-lactoglobuline)	Paramètre du l'eau	Paramètre d'aluminium
Chaleur spécifique CP		4.18855	4037.24	900
Masse volumique		1360	983.84	2700
Viscosité		0.009	0.00033	/
Conductivité		1.6992	0.68	237
Condition au Limite	Vitesse	-0.52	0.52	/
	Température	77.5	103	/
	Pression	0	0	/

Les dimensions de l'échangeur à plaque simulé au programme ANSYS avec encrassement et une chicane :

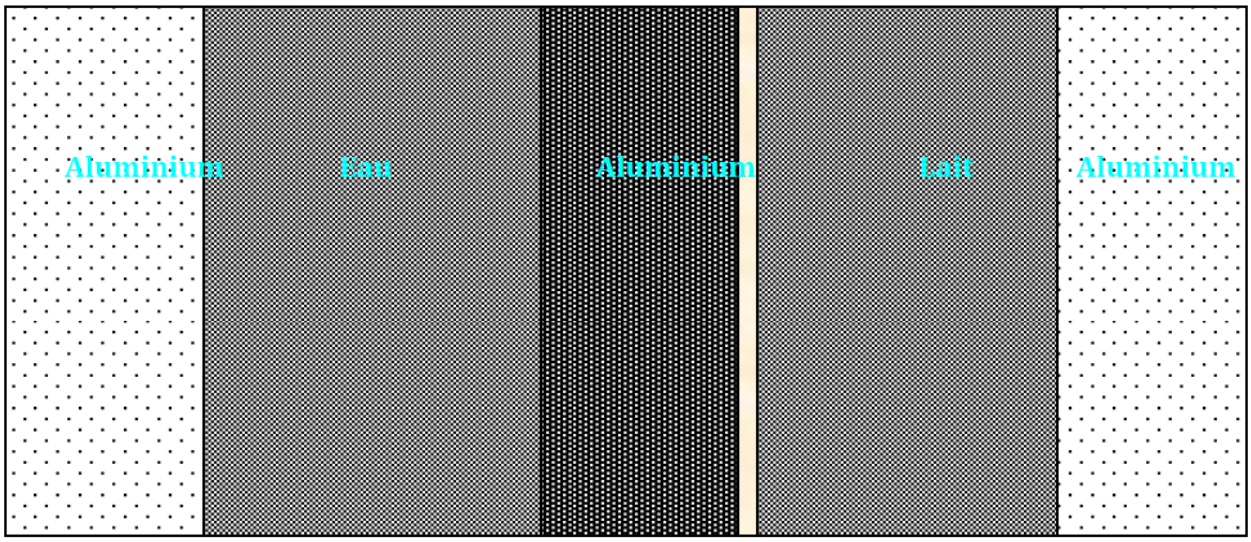
	Variation de Y (m)		Variation de X(m)	
	Y_1 (m)	Y_2 (m)	X_1(m)	X_2(m)
Carrée N°1	0	1.2	0	0.0315
Carrée N°2	0	1.2	0.0045	0.027
Carrée N°3	0	1.2	0.0135	0.018
Carrée N°4	0	1.2	0.018	0.01801

e = le diamètre de plaque = 0.0045 m

d = diamètre hydraulique =diamètre entre les deux plaque

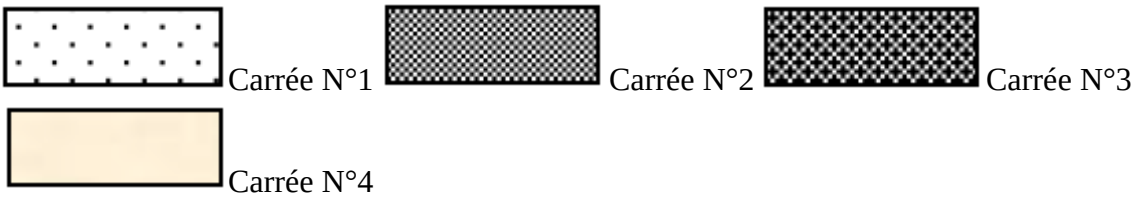
d = e*2=0.0045*2=0.009 m

Y = 1.2 (m)



X = 0 (m)

Y = 0 (m)

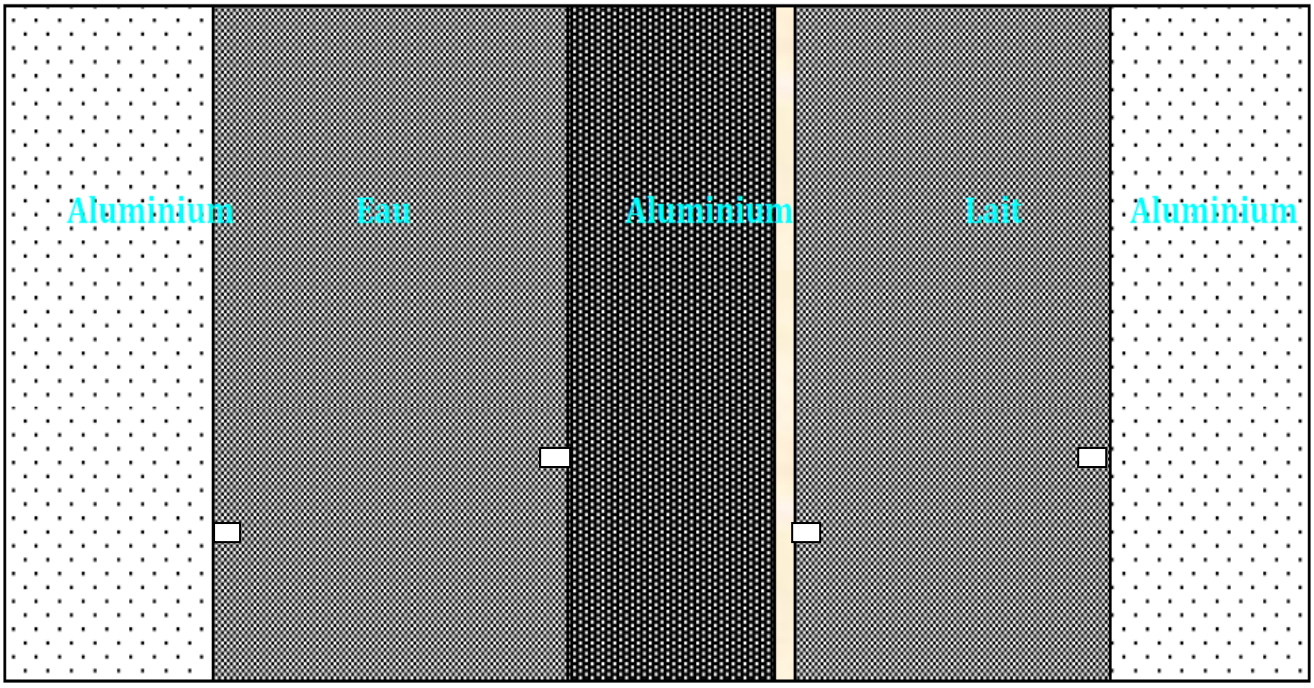


Un diagramme montre les carrées (encrassement) sont placées au programme ANSYS

Les dimensions de l'échangeur à plaque simulé au programme ANSYS avec chicane :

	Variation de Y (m)		Variation de X(m)	
	Y_1 (m)	Y_2 (m)	X_1(m)	X_2(m)
CHICANE N°1	0.3	0.302	0.0045	0.00675
CHICANE N°2	0.3	0.302	0.018	0.02025

CHICANE N°3	0.3065	0.3085	0.0135	0.01125
CHICANE N°4	0.3065	0.3085	0.027	0.02475



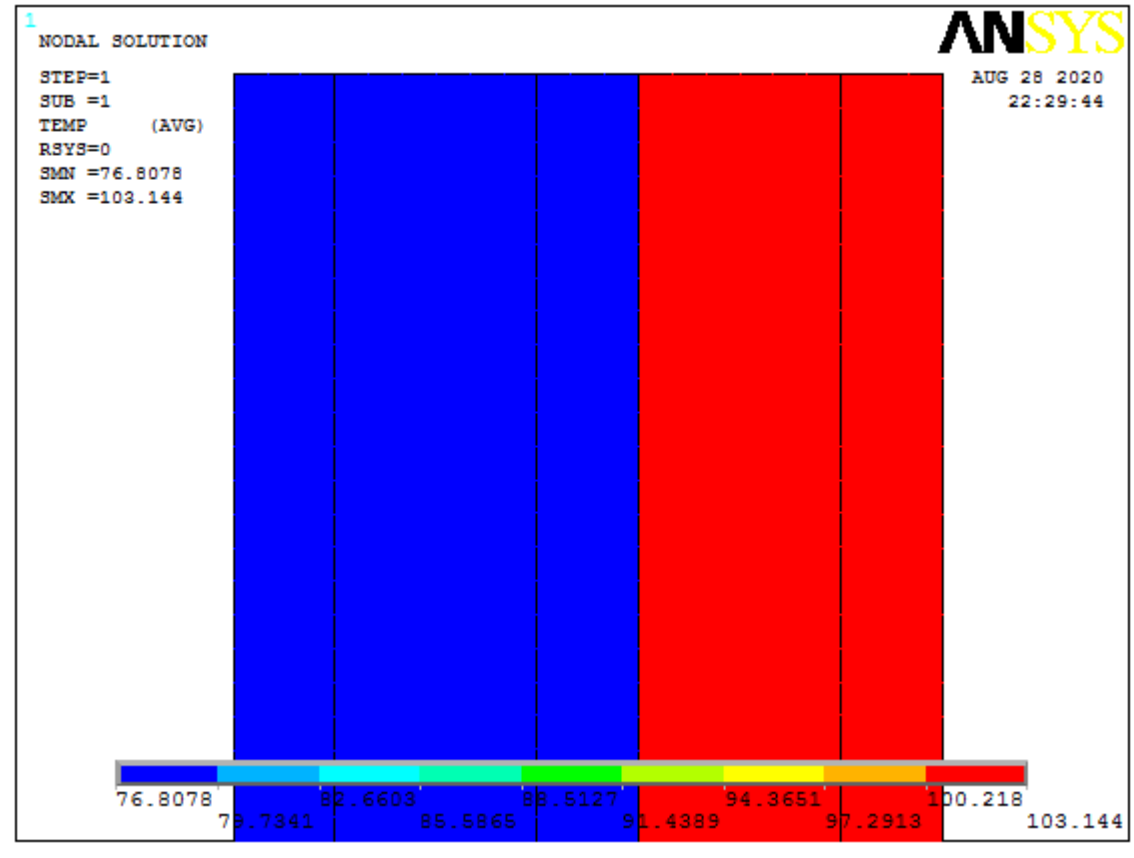
Les propriétés physico-chimiques des matériaux utilisés :

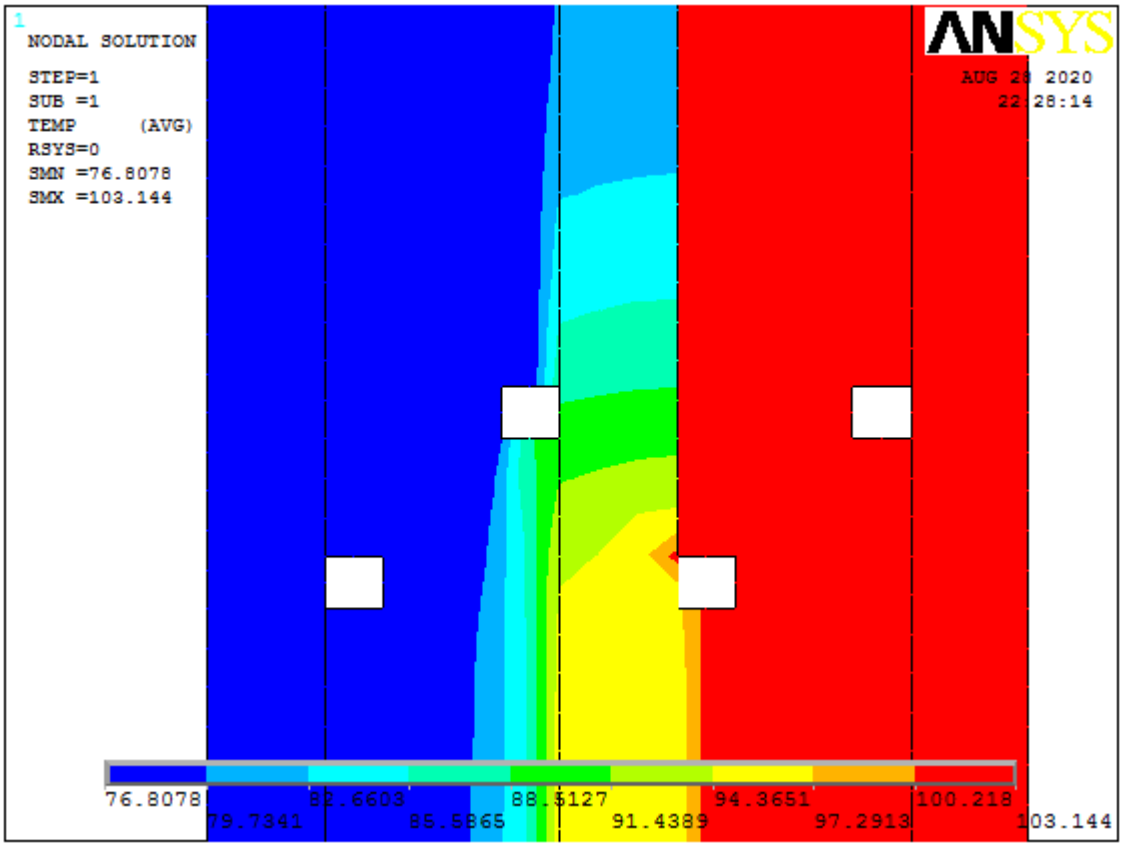
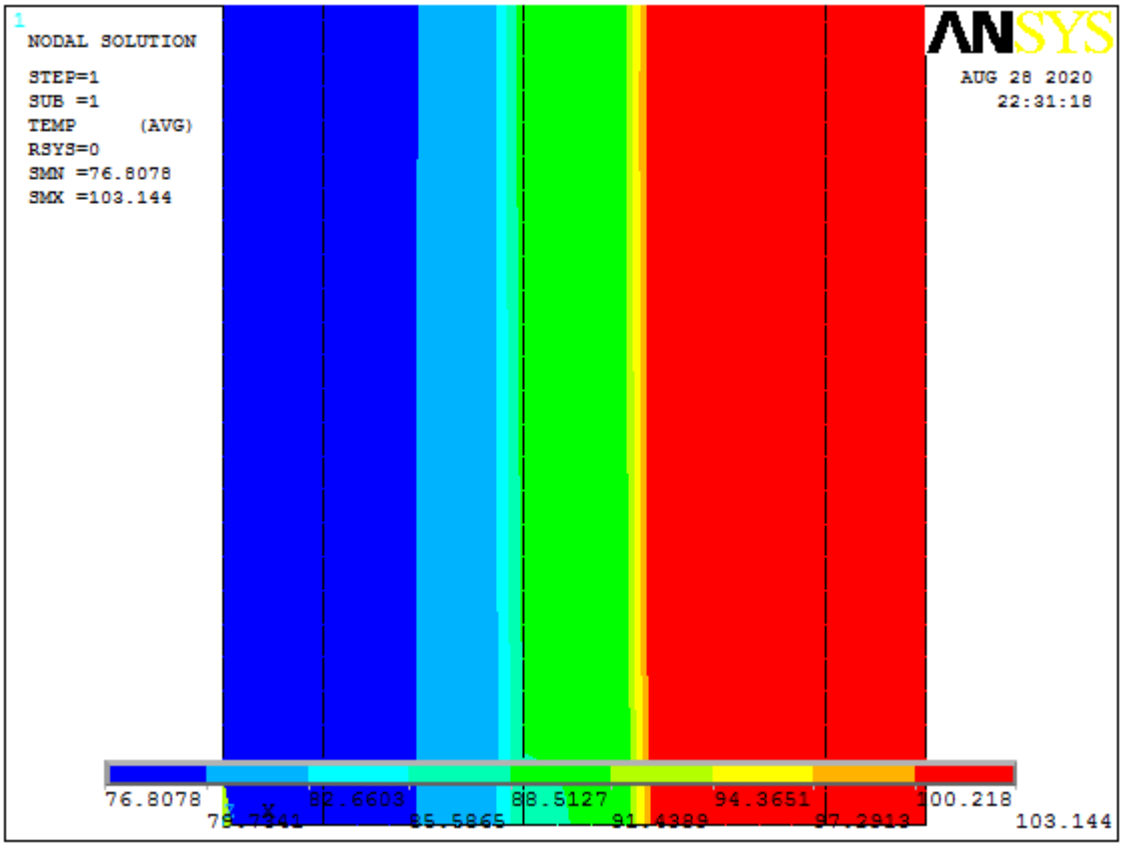
	Paramètre Du lait (βlactoglobuline)	Paramètre du l'eau	Paramètre d'aluminium	Paramètre du l'encrassement du lait
Chaleur spécifique CP	4.18855	4037.24	900	3192
Masse volumique	1360	983.84	2700	1030
Viscosité	0.009	0.00033	/	/

Conductivité		1.6992	0.68	237	Kxx	Kyy
					0.5	0.53
Condition au Limite	Vitesse	-0.52	0.52	/	/	
	Température	77.5	103	/	/	
	Pression	0	0	/	/	

I.LES RESULTATS

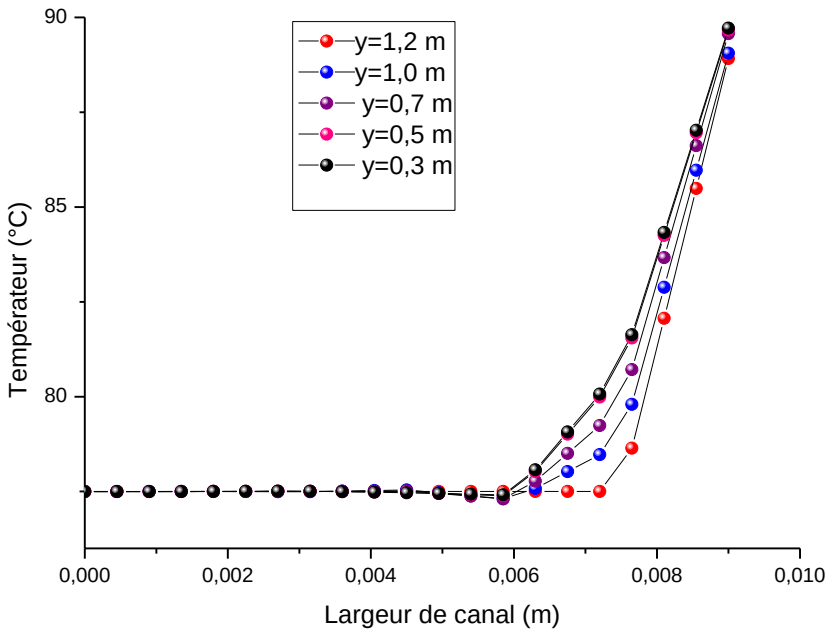
I.1.Profil de température

	Coter eau	**Coter lait**
En haut		

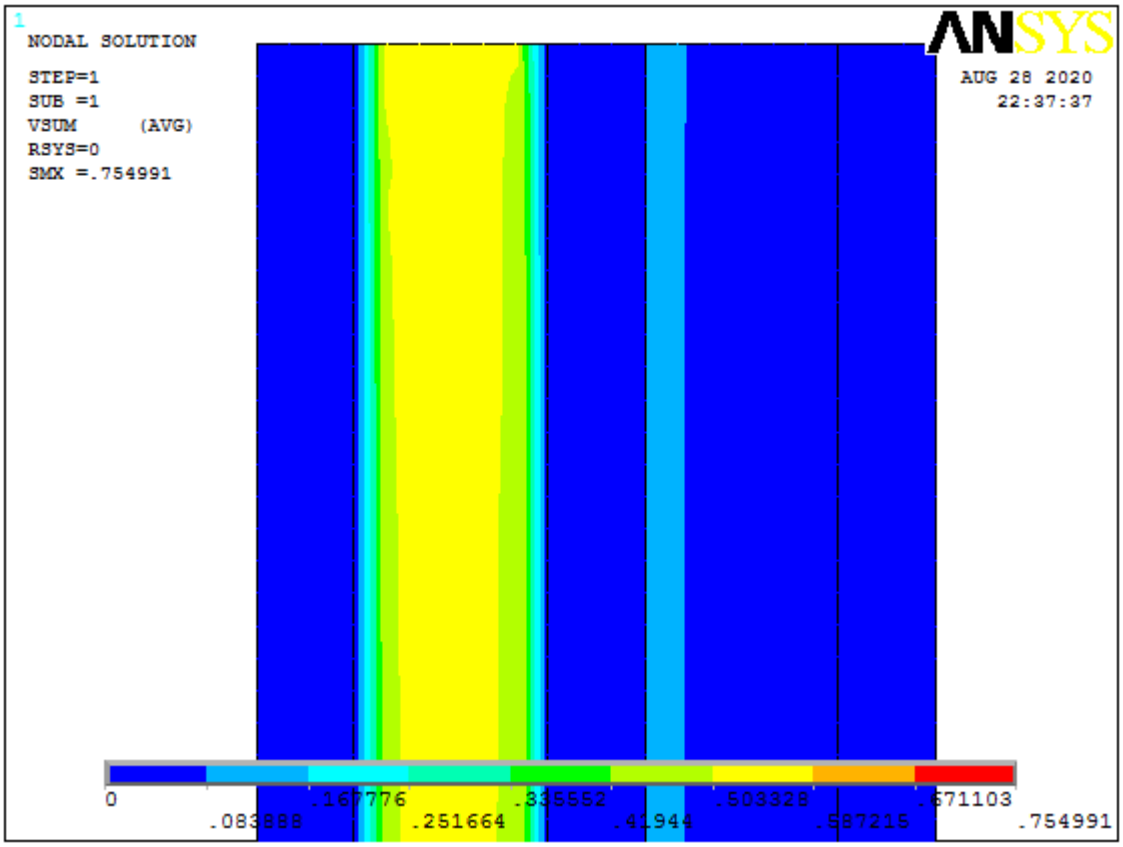
Au milieu	
En bas	

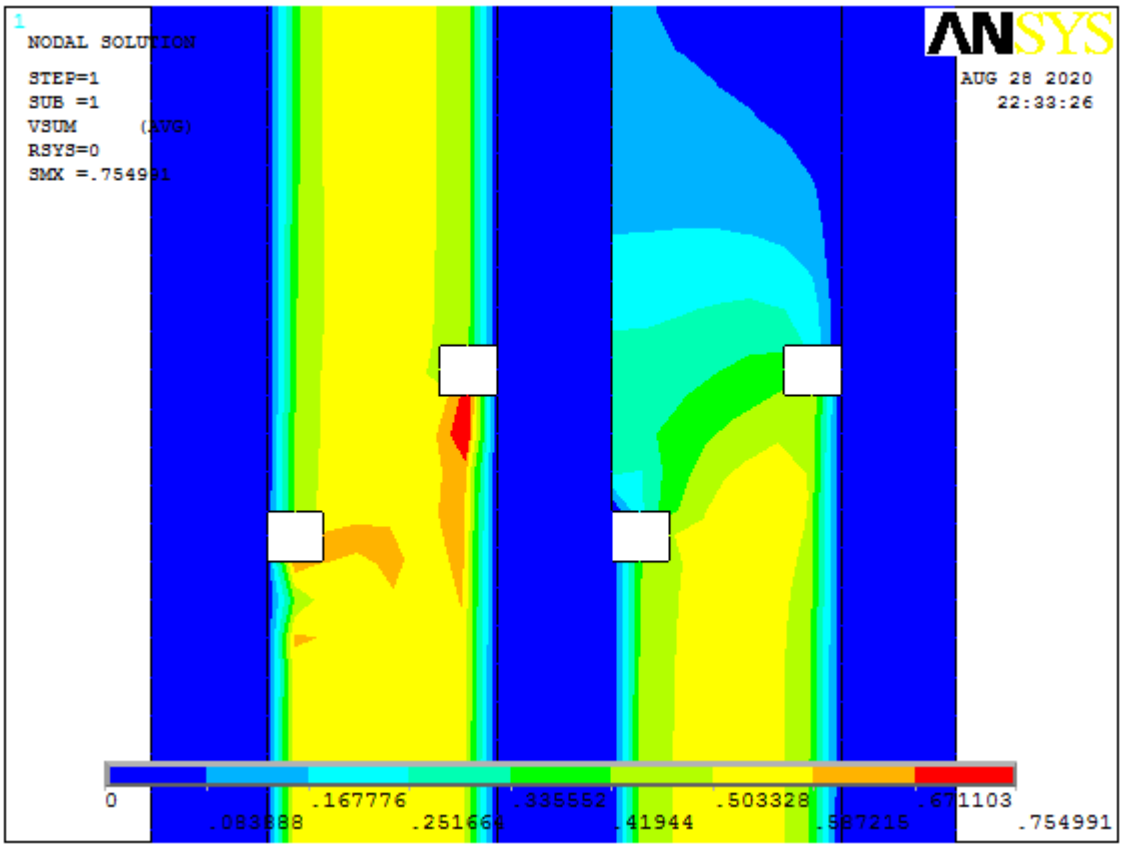
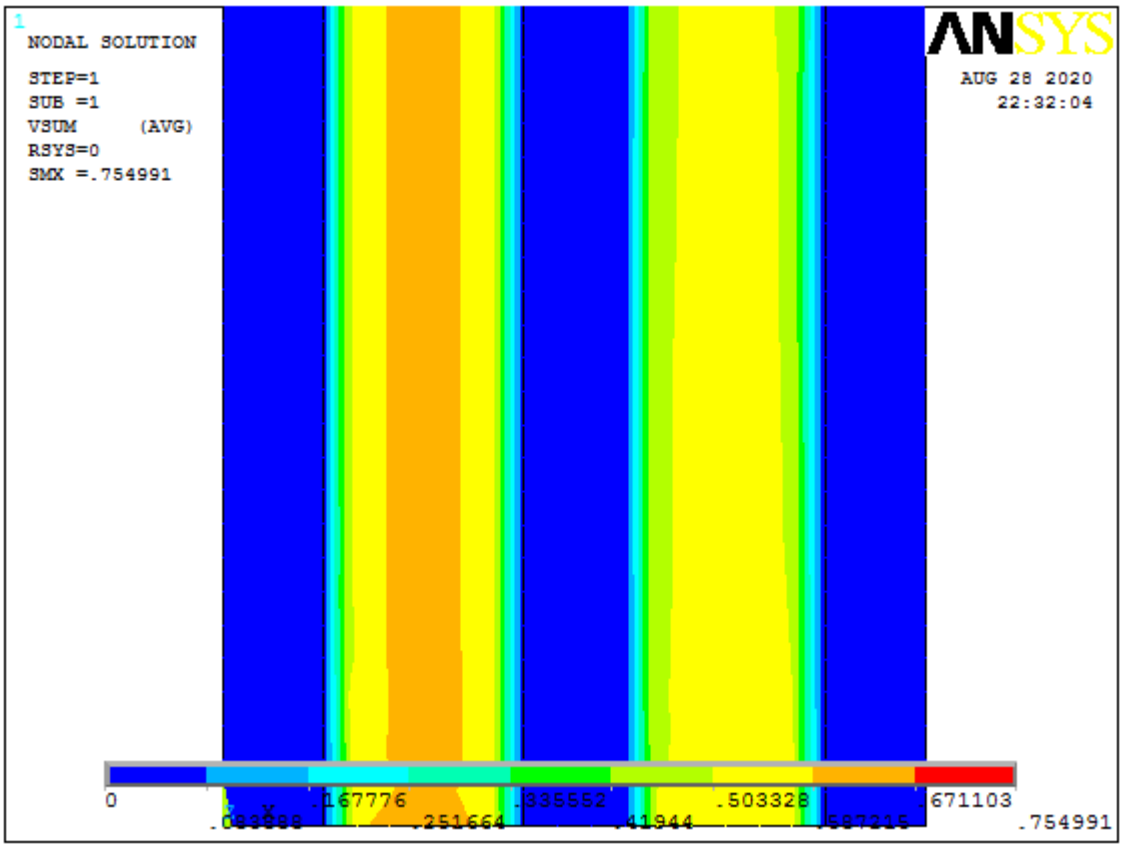
La variation de la température à la longue de canal :

L'évolution du de la température en fonction de la largeur est représentée sur les graphes suivantes et ce pour différentes position dans le canal(y).



2. Profil de vitesse

	Coter eau	Coter lait
En haut		

Au milieu	
En bas	

L’évolution du profil de vitesse en fonction de la largeur (x) de canal est représentée sur les graphes suivants pour différentes positions dans le canal (Y) pour le lait

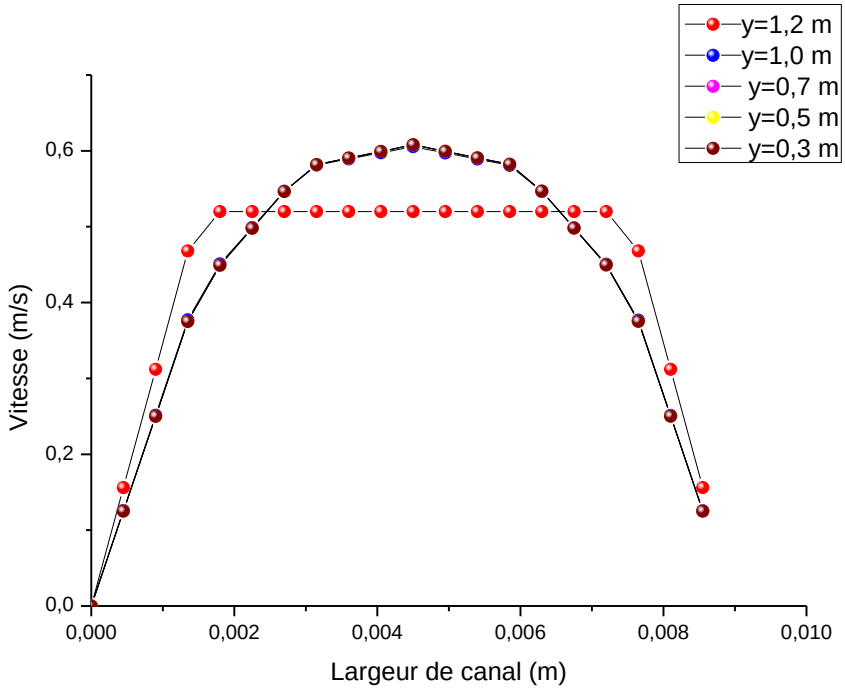


Figure IV.7:Lavariation du profil de vitesse dans le lait.