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 : BOUABDELLAH fatma zohra

Etudiant 2 : NASRI meriem

Thème :

Contribution numérique à l'étude des performances thermiques d'un échangeur de chaleur à plaques lors de traitement thermique d'une solution protéique avec la présence de plusieurs déflecteurs pour différents types de matériaux

Le jury composé de :

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

Année universitaire : 2019/2020

الملخص

الترسبات في المبادلات الحرارية مشكلة اقتصادية لطالما كانت مصدر قلق للصناعين. هذا العمل يتعلق بدراسة المحاكاة العددية لنموذج ترسب لمبدل حراري للصفائح اثناء مرحلة المعالجة الحرارية لمحلول بروتينات في ظل وجود العديد من العاكسات المشكلة من نوعين لتحسين جودة المبادلات الحرارية. أظهرت النتائج أن التبادل الحراري يتحسن مع زيادة عدد العاكسات وأن العاكس الدائري يعطي اضطراب أفضل وبالتالي تبادل حراري أفضل.

الكلمات المفتاحية: محلول بروتين، مبادلات حرارية ذات لوحات، ترسبات، العاكسات

Résumé

L'encrassement dans les échangeurs de chaleur est un problème économique qui tourmente les industriels depuis longtemps. Ce travail porte sur l'étude de la simulation numérique d'un modèle de l'encrassement d'un échangeur à plaques lors d'une phase de traitement thermique des protéines d'une solution protéique et ce en présence de plusieurs déflecteurs de différentes formes pour améliorer la qualité des échangeurs thermiques. Les résultats montrent que l'échange thermique est amélioré par le nombre de déflecteurs et que le déflecteur cercle donne une meilleure turbulence et don un meilleur échange thermique.

Mots clés : solution protéique, échangeurs de chaleur à plaques, encrassement, déflecteurs.

Abstract

The fouling in heat exchangers is an economic problem, which has been damaging the industries for a long time. This work concerns the study of the numerical simulation of a model of the fouling of a plate heat exchanger during a phase of heat treatment of protein solution and this in the presence of several deflectors different formed to improve the quality of the heat exchangers. The results show that the heat exchange improved with the increase in the number of deflectors and that the circle deflector gives better turbulence and therefore better heat exchange.

Key words: protein solution, plate heat exchangers, fouling, deflector

REMERCIMENTS

Grace à Dieu tout puissant qui nos doté de capacités physiques et morales, nous somme enfin arrivés au bout de cette thèse

الحمد والشكر لله العلي العظيم

Nous tenons à remercier ***Mr. Youcef MAHDI*** *d'avoir accepté de nous encadrer sur le thème, de nous avoir conseillé judicieusement, orienté, encouragé et de nous apporter une attention tout au long de ce travail.*

Nous exprimons aussi nos remerciements à ***Mr. Mounire ZIRARI*** *pour leurs aides de la formation de Logiciel Ansys et pour leur encouragement.*

Nous remercions aussi les membres de jurys : ***la présidente de jury***

Mme. Gasmi Sara Nawel, L'Examinateur Mr. Abiza Amirouch

Nous remercions également tous les enseignants du département science de la matière.

En fin, nous adressons nos remerciements à nos familles et nos amies qui fait tout pour nous mettre dans des bonnes dispositions afin que nous puissions accomplir ce travail.

ANNEE UNIVERSITAIRE 2019/2020



DÉDICACES

La locomotive de recherche a traversé de nombreux obstacles,
Mais J'ai essaye de les surmonter réguliièrement et avec
la grace de dieu et de lui.
A mes parentes , à mes frères et amis , il fut le premier complèter la
Recherche , à tous ceux me connaissent de prés et de loin et à
Mes Profersseurs et chaque paiement de master 2 chimie
Macromoluculaire
Je vous dédie une étude,
pour ma graduation,Appelant le tout-puissant à prolonger
votre vie et à vous donner
De Bonnes nouvelles

MERIEM



DÉDICACES

Je remercie le bon dieu de m'avoir donné le courage pour réaliser ce travail et la patience pour aller jusqu'au bout du parcours de mes études.

Je dédie du plus profond de mon Cœur ce manuscrit:

A mon cher père qui ma toujours soutenu et conseille dans ma vie.

A ma chère mère qui a toujours été la pour moi, je la remercie pour ses encouragements et son soutien. Que dieu leurs accorde une longue vie.

A mes fréres ; mes sours et toutes la famile BOUABDELLAH.

A mon binôme et fidele Meriem, je la remercie d'avoir était présente à chaque moment de ma vie.

A tous mes chéres amis de pris ou de loin.

enfin, a tous les étudients de M2 Chimie Macromoleculaire.

FATMA ZOHRA

Sommaire

Résumé

Remerciements

Dédicaces

Introduction générale……01

Chapitre I : le lait, βêta-Lactoglobuline

I. Le lait……03

I.1. Définition**……03**

I.2. La composions chimique de lait**……..03**

I.3. Les protéines de lait**……..……...05**

I.3.1. Caséines**……...….05**

I.3.2. Protéine de sérum**……..……06**

I.3.2.1. α-lactalbumine**…….…06**

I.3.2.2. βêta-Lactoglobuline**…….……07**

I.3.2.3. Les sérums albumines**……..……07**

I.3.2.4. Les immunoglobulines**…….....07**

I.3.2.5. Les Protéases-peptones**……07**

I.4. Propriétés physico-chimiques de lait**……..……08**

I.4.1. Masse volumique**…….……..09**

I.4.2. Point de congélation**…….....….09**

I.4.3. Point d'ébullition**…….……..09**

I.4.4. Acidité de lait**……09**

II. Le peptide de βêta-Lactoglobuline ……..…10

II.1. Définition**……...…10**

II.2. Description générale du peptide**……....12**

II.3. Structure de βêta-Lactoglobuline **……..…13**

II.4. Propriétés du peptide**……14**

II.4.1. Impact de pH**……..…..14**

II.4.2. Impact de concentration……...15
II.4.3. Impact de la séquence d'acides aminés……16
II.5. Mécanisme de dénaturation chaude de βêta-Lactoglobuline……17

Chapitre II : Les échangeurs de chaleur & l'encrassement

I. Notions Générales sur les Echangeurs……..……20
I.1. Introduction……...….20
I.2.Définition……20
I.3. Principe de fonctionnement…….……..20
I.4. Modes de transferts thermiques……..…….20
I.4.1. Conduction……21
I.4.2. Convection……21
I.4.3. Rayonnement……...……..21
I.5. Les déférents types d'échangeurs de chaleur……..21
I.5.1. Echangeurs tubulaires……....21
I.5.1.1. Echangeur monotube……....22
I.5.1.2. Echangeur coaxial……22
I.5.1.3. Echangeur multitubulaire……22
I.5.2. Échangeur de chaleur à plaques……...…..23
I.5.2.1 Échangeurs à surface primaire……...24
I.5.2.2 Échangeurs à plaques et joints……..….25
I.5.2.3. Échangeurs à plaques soudées ou brasées……25
I.6. Avantages et inconvénients de l'échangeur à plaques……..……26
I.6.1. Avantage……...…26
I.6.2. Inconvénients……...…….26

II. Méthodes de dimensionnement……....27
II.1. Coefficient d'échange global et partiel……...……..28

Sommaire

II.2. Critères de performance d'un échangeur……..30
II.3. Echangeurs de chaleur et déflecteurs……..…….30
II.3.1. Echangeurs de chaleur……...…….30
II.3.2. Déflecteurs ou plaque de protection du faisceau……31

III. Encrassement……..…….32
III.1. Introduction…….....32
III.2. Phénomène d'encrassement……...……..33
III.3.Notion sur l'encrassement des échangeurs……...……33
III.3.1. la corrosion…….33
III.3.2.L'encrassement biologique……..……34
III.3.3. L'encrassement par réaction chimique…….…..34
III.3.4. L'entartage…….…34
III.3.5. L'encrassement particulaire……...…….35
III.4. Mécanisme de l'encrassement…….35
III.4.1. L'initiation……..36
III.4.2.Transport des particules……...36
III.4.3. Adhésion des particules……..36
III.4.4. Réentrainement des particules déposées……36
III.4.5. Le Vieillissement……....36

Chapitre III : Modélisation et simulation de l'encrassement

I. Introduction……..……...38
I.1. Description du système……...…38
I.2. Cycle de vapeur……...39
I.3. Modèle thermique de l'échangeur à plaques……..40
I.3.1. Introduction…….....40

I.3.2. Formulation mathématique du problème……..**41**

I.3.2.1. Introduction……..**41**

I.3.2.2. Modélisation de la turbulence dans un milieu totalement fluide……...**42**

I.3.2.2.1. Les hypothèses……..**42**

I.3.2.2.2. Equations de conservation……**43**

I.3.2.2.3 Conditions initiales et aux limites……**43**

I.3.3. Calcul du coefficient de transfert de chaleur global…….**45**

I.3.4. Calcul des paramètres à mesurer du mélange (lait)……..**45**

I.3.5. Calcul des paramètres à mesurer de l'eau chaude……**47**

I.4. Programme Ansys……**48**

I.4.1. Introduction……..**48**

I.4.2. Définition d'Ansys……...**48**

I.4.2.1 Ansys DesignSpace……**49**

I.4.2.2 Ansys Professional……..**49**

I.4.2.3 Ansys Structural / Mechanical……**49**

I.4.2.4. Ansys CFD……**50**

I.4.2.5. Ansys CFX……**50**

I.4.3. Les points forts des outils Ansys……**52**

Chapitre IV : Résultats et discussion

I. Introduction……**54**

II. Les profils dans milieu complètement fluide avec la présence de un déflecteur coté lait ……..**55**

II.1. Profil de la température……...**55**

II.2. Profil de la vitesse……...**56**

Sommaire

III. Les profils dans un milieu fluide avec encrassement avec la présence de quatre déflecteurs coté lait**……57**

III.1. Profil de la température**……57**

III.2. Profil de la vitesse**……58**

IV. Les profils dans un milieu fluide avec encrassement avec la présence d'un déflecteur cercle coté lait**……..59**

IV.1. Profil de la température**……59**

IV.2. Profil de la vitesse**……60**

V. Les profils dans un milieu fluide avec encrassement avec la présence de deux déflecteur cercle coté lait**……61**

V.1. Profil de la température**……61**

V.2. Profil de la vitesse**……62**

VI. étude comparative entre milieu fluide avec encrassement avec la présence de plusieurs déflecteurs coté lait : Profil de la température **…….....63**

VII. étude comparative dans le milieu fluide avec encrassement avec un déflecteur carrée et un déflecteur cercle coté lait : Profil de la température **……..64**

VIII. étude comparative dans le milieu fluide avec encrassement avec des déflecteurs carrée et deux déflecteur cercle coté lait : Profil de la température**…….....65**

Conclusion générale……67

Références bibliographique

Annexes

Chapitre I : le lait, βêta-Lactoglobuline

Tableau I.1. : La composition typique de lait de vache**…….05**

Tableau I.2. : Classification des protéines**…….08**

Tableau I.3. : Effet du PH sur l'aspect visuel des solutions de peptide β-lg selon leur concentration**……15**

Liste de figure

Chapitre I : le lait, βêta-Lactoglobuline

Figure I.1. : La composition chimique de lait **……...04**

Figure I.2. : Structure de sub-micelle caséique**……..06**

Figure I.3. : Séquence d'acide aminés et représentation de la structure tridimensionnelle de β-Lc**……...10**

Figure I.4. : Séquence en acide aminés du peptide β-Lc f1.8**……12**

Figure I.5. : Illustration de la structure tertiaire de la β-lg montrant les positions de la cystéine notée « Cys » représentée par des sphères (A) et les feuillets β (B). Image générée avec le logiciel RasMOL**……14**

Figure I.6. : Effet de la concentration sur la conformation de peptide β-lg FII.4.1 observée par DC à pH 10**……16**

Figure I.7. : Mécanisme de dénaturation chaude de la β-Lc**……..18**

Figure I.8. : Mécanismes de dénaturation chaude de la β-lg comprenant les différents complexes possibles avec d'autres protéines du lait**……..19**

Chapitre II : Les échangeurs de chaleur & l'encrassement

Figure II.1. : Différentes types d'échangeurs tubulaires**……23**

Figure II.2. : Schéma d'un échangeur à plaque**…….....24**

Figure II.3. : Différentes géométries de plaques d'échangeurs à surface primaire**……...24**

Figure II.4. : Échangeur à plaques et joints**……...25**

Figure II.5. : Échangeur brasé**……26**

Figure II.6. : Différents type d'échangeurs de chaleurs**…….31**

Figure II.7. : Déflecteur ou plaque de protection du faisceau**……32**

Figure II.8. : Représentation schématique de l'encrassement dans le cas d'un liquide**……..35**

Chapitre III. Modélisation et simulation de l'encrassement

Figure III.1. Cycle de pasteurisation de lait**……..39**

Figure III .2. : Arrangement des plaques de l'échangeur de pasteurisation et sens de circulation des fluides**……40**

Figure III.3. : Schéma descriptif du canal**…….42**

Figure III .4. : Schématisation de la direction de l'écoulement entre deux plaques**……45**

Figure III.5. : Les principaux modules des deux logiciels ANSYS ICEM & CFX**……50**

Figure III .6. : L'interface utilisateur graphique d'ANSYS**…….. 51**

Chapitre IV : Résultats et discussion

Figure IV.1 : Ecoulement dans un canal à section rectangulaire**…….55**

Figure IV.2 : Ecoulement dans un canal à section rectangulaire à la présence des déflecteurs**……55**

Figure IV.3 : La variation de la température dans lait**……56**

Figure IV.4 : La variation du profil de vitesse**……57**

Figure IV.5 : La variation de la température**……..58**

Liste de figure

Figure IV.6 : La variation du profil de la vitesse**……59**

Figure IV.7 : La variation de la température**.....60**

Figure IV.8 : La variation de la vitesse**……..61**

Figure IV.9 : La variation de la température**……..62**

Figure IV.10 : La variation du profil de la vitesse**……..63**

Figure IV.11 : La variation de la température**…….64**

Figure IV.12 : La variation de la température**…….65**

Figure IV.13 : la variation de la température**…….....66**

Nomenclature

Symbole	Définition	Unité
A	Surface d'échange de chaleur	m^2
A	Protéine agrégats	-
a	Diffusivité thermique	m^2/s
C	La concentration	Kg/m^3
Cp	Chaleur spécifique	$J/Kg\ ^0C$
D	Diamètre	m
d_e	Diamètre hydraulique	m
dp	Diamètre des particules	m
D	Protéine dénaturé	-
e	Epaisseur de la plaque	m
J	Rapport des viscosités	-
H	Hauteur du canal	m
h	Coefficient de transfert de chaleur du fluide	$W/m^2.\ ^0C$
K	Conductivité thermique de l'eau	$W/m^2.\ ^0C$
k	Perméabilité du milieu poreux	m^2
L	Longueur d'une plaque	m
Nu	Nombre de Nusselt	-
N	Protéine native	-
P	La pression	Pa
Pr	Nombre de Prandtl	-
Q	Débit volumique	m^3/s
R_d	La résistance du dépôt encrassant	$m^2.^0C/W$
R_e	Nombre de Reynolds du fluide	-
S	Surface	m^2

Nomenclature

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'entré	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
e_p	Epaisseur du milieu poreux	m
ϕ	La porosité	N/s^2
ϕ^*	Densité du flux massique	$Kg/m^2/s$
Φ	Flux massique	$W/m^2.K$

2. LISTE D'ABREVIATIONS

ß-lc	ß-lactoglobuline
DLC	Date Limite de Consommation

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

Les échangeurs de chaleur à plaques prennent une place sans cesse croissante dans l'équipement des industries agro-alimentaires, et de l'industrie laitière en particulier. Cette Évolution apparaît pour l'instant irréversible, en raison des 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.

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.

De manière générale, La ß-lactoglobuline, **une macromolécule**, est la protéine soluble majoritaire du lait (par conséquent la plus abondante du lactosérum) on la trouve en proportion importante dans toutes les poudres laitières.

L'encrassement affecte aussi la qualité bactériologique du produit final. Cette étude est une contribution à la modélisation de l'encrassement par une solution protéique dans un canal d'un échangeur de chaleur à plaques.

Le thème proposé concerne l'analyse de l'encrassement dans un canal plan représentant un échangeur de chaleur à plaques lors de traitement thermique d'une solution protéique avec la présence de plusieurs déflecteurs pour différents types de matériaux. Un fluide alimentaire tel que le lait, ayant un fort pouvoir encrassant, sera considéré en écoulement turbulent.

L'objectif de notre travail est de déterminer les effets du dépôt encrassant de nature isolante formé sur l'échange thermique dans l'échangeur de chaleur en l'absence et en présence de déflecteurs.

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 ce but, le manuscrit est organisé de la façon suivante :

Le premier chapitre présente quelques notions sur le lait, et la protéine de lait ß-lactoglobuline.

Le second chapitre présente des notions générales sur les échangeurs de chaleur, les échangeurs de chaleur à plaques qui sont employés principalement dans les procédés de traitements thermiques du lait et les échangeurs avec déflecteurs, et résume un certain nombre de travaux antérieurs sur l'encrassement dans les échangeurs de chaleurs.

Le troisième chapitre présente la modélisation, simulation de l'encrassement et la formulation mathématique du problème, avec une présentation de l'outil informatique employé (Ansys Fluent) pour la résolution du modèle physique choisi.

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

Finalement, ce manuscrit sera terminé par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus.

Chapitre I :

Le lait, ßéta-lactoglobuline

I. Le Lait

I.1. Définition

Le lait est un liquide alimentaire opaque, blanc mat légèrement bleuté ou plus ou moins jaunâtre, à odeur peu marqué et ou gout douceâtre, sécrété, après parturition, par le gland mammaire des animaux mammifères femelle pour nourrir leur nouveau-né [1].

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 micro-organismes [2].

I.2. La composions chimique de lait

La composition chimique du lait (figure I.1) contient les différents groupes de nutriments. Les substances organiques se répartissent en éléments bâtisseurs, les protides, et en éléments énergétiques, les glucides et les lipides. A cela s'agissent des éléments fonctionnels, c'est-à-dire des sels minéraux (calcium, phosphore, potassium, sodium, magnésium, etc…) des vitamines et de l'eau.

Il comporte aussi cas morphine, une protéine qui inhibe la sensation de douleur.

Les principaux constituants du lait par ordre croissant selon Pougheon et Gourdrud [3] sont :

- L'eau très majoritaire.
- Les glucides principalement présenté 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 et globulines solubles.

Les éléments à l'état de trace mais au rôle biologique important, enzymes, vitamines et oligoéléments.

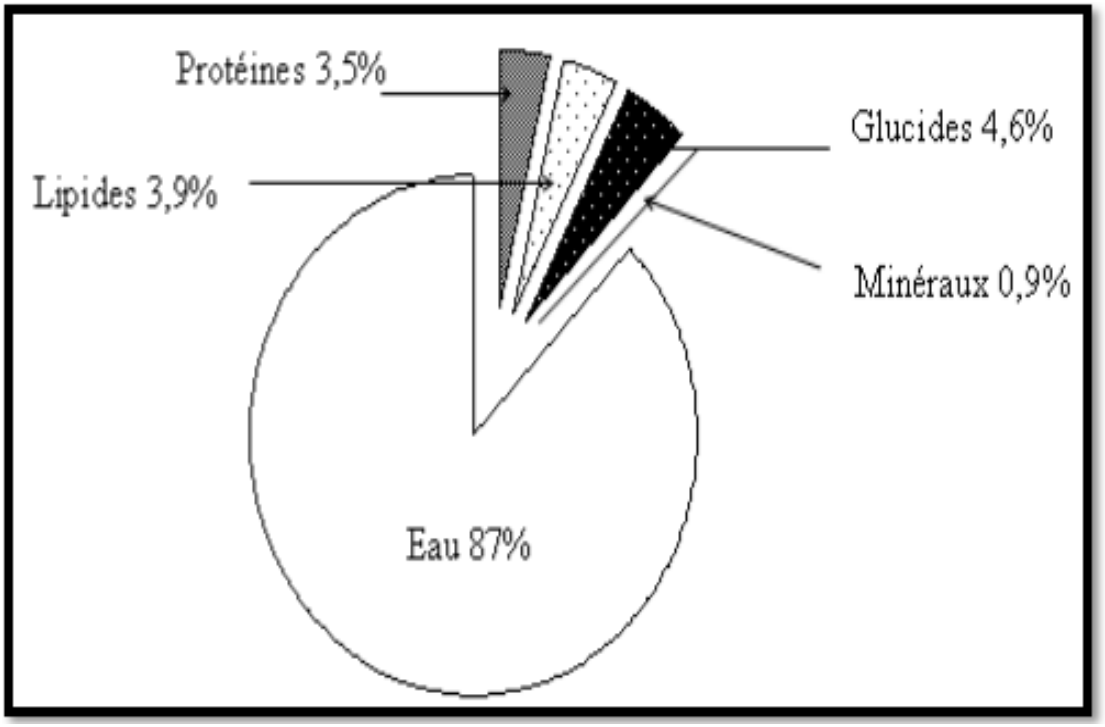


Figure I.1. : La composition chimique de lait [4].

La composition chimique du lait de vache est donnée également dans le tableau I.1.

Tableau I.1. : La composition typique de lait de vache [5].

	Moyenne (% p/p)	Plage de variation (%p/p)
Eau	87.1	85.3-88.6
lactose	4.6	3.8-5.3
Matière grasse	4.0	2.5-5.5
Protéines	3.25	2.3-4.4
Minéraux	0.7	0.57-0.83
Acides organiques	0.17	0.12-0.21

On s'intéresse dans ce qui suit exclusivement aux protéines du lait et plus particulièrement à la protéine ßêta-lactoglobuline (β-Lc) car comme on le verra plus tard elle est le sujet principal de nos intérêts dans cette modeste contribution.

I.3. Les Protéines

Les protéines sont des éléments essentiels au bon fonctionnement des cellules vivantes et elles constituent une part importante du lait et des produits laitiers [6].

I.3.1. Caséines

Les caséines forment de 80% de toutes les protéines présentes dans le lait (figure I.2). Elles se regroupent sous forme sphérique appelée micelle. La taille des micelles se situe entre 100 et 500 mm ; avec un diamètre moyen près de 180 mm et elle varie principalement selon l'espèce animale, la saison, le stade de lactation [7].

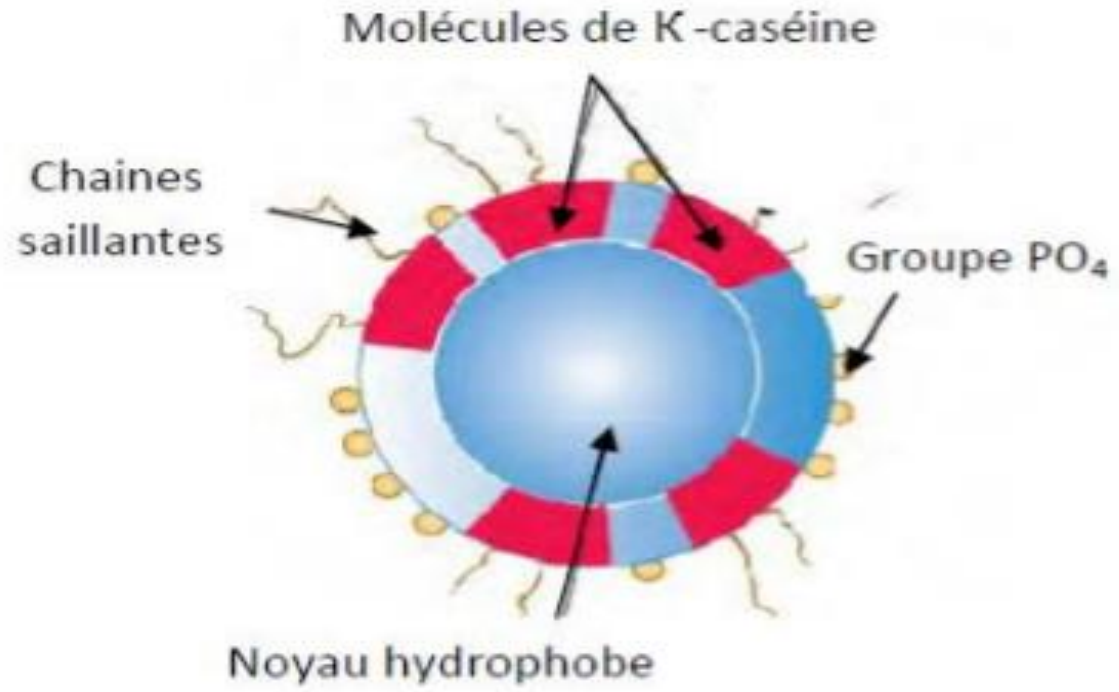


Figure I.2. : Structure de sub-micelle caséique [8]

I.3.2. Les Protéines de sérum

Les protéines de sérum, qui représentent environ 20% des protéines totales, se retrouvent sous forme de solution colloïdale. Les deux principales sont la β-Lc et l'α-lactalbumine ; les autres protéines du sérum sont les immunoglobulines.
En plus, différents enzymes sont présents dans le sérum [9].

I.3.2.1. α-lactalbumine

L'α-lactalbumine est une protéine de 123 acides aminés comportant trois variantes génétiques (A, B, C). Métalloprotéines (elle possède un atome de calcium par mole) de type globulaire (structure tertiaire quasi sphérique). Elle présent environ 22% des Protéines de sérum [10].

1.3.2.2. β-Lactoglobuline

La β-Lc est la plus importante des protéines du sérum puisqu'elle en représente environ 55%. Son point isoélectrique 5.1, la β-Lc est une de 162 acides aminés comportant 7 variantes génétiques (A, B, C, D, E, F, G) lors du chauffage la fixation d'une molécule de caséine κ et d'une β-Lc se fasse également par un pont disulfure [11].

I.3.2.3. Les sérums albumines

Les sérums albumines représentent environ 7% des protéines du sérum. Ils sont constitués de 582 résidus d'acides aminés. Comptant un seul variant génétique A est identique au sérum albumine sanguine [10].

I.3.2.4. Les immunoglobulines

Les immunoglobulines sont des glycoprotéines de haut poids moléculaire responsable de l'immunité. On distingue trois grandes classes d'immunoglobulines : IgA, IgG, IgM. Elles sont très abondantes dans le colostrum. Les immunoglobulines sont les protéines du lactosérum les plus sensibles à la dénaturation thermique [12].

I.3.2.5. Les Protéases-peptones

Elles forment la fraction protéique soluble après chauffage du lait acidifié à pH 4.6 vers 95°C pendant 20 à 30 minutes. C'est un groupe hétérogène issu de la protéolyse par la plasmine de la caséine β [11].

Tableau I.2. : Classification des protéines [13].

Nom	% des protéines	Nombre d'AA
Caséines	75-85	
Caséineαs1	39-46	199
Caséineαs2	8-11	207
Caséine	25-35	209
Caséine k	8-15	169
Caséine g	3-7	
Protéines du Lactosérum	15-22	
β-Lactoglobuline	7-12	162
α-Lactalbumine	2-5	123
Sérum-albumine	0.7-1.3	582
Immunoglobulines (G1,	1.9-3.3	-
G2, A, M)	2-4	-
Protéases-peptones		

I.4. Propriétés physico-chimiques du lait

Les propriétés physico-chimiques du lait sont plus ou moins stables, elles dépendent de l'ensemble des constitutions comme la densité, soit des substances en solution comme le point de congélation ou encore des concentrations en ions comme le pH (acidité). Les principales propriétés physico-chimiques utilisées dans l'industrie laitière sont la masse volumique ou la densité, le point de congélation, le point d'ébullition et l'acidité [10].

I.4.1. Masse volumique

La masse volumique d'un liquide est définie par le quotient de la masse d'une certaine quantité de ce liquide divisée par son volume. Elle est habituellement notée ρ et s'exprime en $Kg.m^{-3}$ dans le système métrique. La masse volumique du lait entier à 20°C et en moyenne de 1030 $kg.m^{-3}$ [14].

I.4.2. Point de congélation

Le point de congélation du lait est légèrement inférieur à celui de l'eau pure puisque la présence de solides solubilisés abaisse le point de congélation. Cette propriété physique est mesurée pour déterminer s'il y a addition d'eau au lait. Sa valeur moyenne se situe entre -0.54 et -0.55°C [15].

I.4.3. Point d'ébullition

Le point d'ébullition comme la température atteinte lorsque la pression de vapeur de la substance ou du point de congélation, le point de d'ébullition subit l'influence de la présence des solides solubilisés. Il est légèrement supérieur au point d'ébullition de l'eau, soit 100.5°C [16].

I.4.4. Acidité du lait

L'acidité du lait résulte de l'acidité naturelle, due à la caséine, aux groupes phosphate, au dioxyde de carbone et aux acides organiques et de l'acidité développée, due à l'acide lactique formé dans la fermentation lactique. L'acidité titrable peut être exprimée en gramme d'acide lactique par litre de lait ou en degré

Dornic (°D). 1°D =0.1g d'acide lactique par litre de lait. Un lait cru au ramassage doit avoir une acidité≤21°D. Un lait dont l'acidité est ≥70°D coagule à froid [17].

II. Le peptide de β-lactoglobuline

II.1. Définition de β-lactoglobuline

La β-Lc 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 18400 grammes/moles et son PI (point isoélectrique, c'est le pH en biochimie) 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 %) [18]. 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.3.



Figure I.3. : Séquence d'acide aminés et représentation de la structure tridimensionnelle de β-Lc [19].

La β-Lc est reconnue pour posséder plusieurs fonctions, tant nutritionnelles que fonctionnelles. Une des fonctions les plus étudiées présentement est la capacité de la protéine à lier certaines molécules d'intérêt nutritionnel et à servir de matrice protectrice lors de la digestion. Il a été démontré que la β-Lc est capable de lier certaines vitamines (D2 et D3), le cholestérol, certaines catéchines et même le mercure [20]. Ces interactions se produisent principalement dans une zone centrale de la protéine, nommée calyx ou β-barrel, qui est formée de feuillets β. Cette cavité hydrophobe, qui permet de fixer une grande variété de ligands, est régulée par une boucle (EF loop) qui agit comme une porte au site de liaison. À bas pH, cette boucle est en position « fermée » et les interactions sont impossibles. Lorsque le pH augmente, la boucle s'ouvre ce qui permet aux ligands de s'insérer dans la cavité hydrophobe [20]. Ce changement de structure, nommé transition de Tanford, se produit généralement entre pH 6,5 et 7,5 [21].

Un autre aspect important de la β-Lc est la production de peptides par hydrolyse enzymatique. L'hydrolyse de cette protéine par une grande variété d'enzymes (pepsine, trypsine, chymotrypsine, plasmine, protéases bactériennes, etc.) permet de générer plusieurs peptides bioactifs, qui ont démontré des propriétés antioxydants, hypocholestérolémiantes, antimicrobiennes, opioïdes, anti-cancer, anti hypertensives, etc… [22]. En plus de leur potentiel d'activités biologiques,

Les hydrolysats de β-Lc contiennent certains courts peptides (5-15 acides aminés) qui possèdent une capacité d'auto assemblage, pour ainsi former des structures complexes de nano fibres et même d'hydrogels. Le peptide β-lg f1-8 produit par hydrolyse trypsique de la β-lg, de même que le fragment β-lg f1-45 obtenu à l'aide d'une protéase bactérienne [23], démontrent cette propriété.

II.2. Description générale du peptide

Comme le démontre la figure I.4, le peptide β-Lc f1-8 est constitué des huit premiers acides aminés de la β-Lc localisés à l'extrémité N-terminale (Leu-Ile-Val-Thr-Gln-Thr-Met-Lys) de la protéine. Son point isoélectrique est de 8,75 et sa masse moléculaire est de 933,5 g/mol [24]. En raison de sa composition en acides aminés (7 résidus hydrophobes et 1 résidu basique), le peptide β-Lc f1-8 est généralement très peu soluble dans l'eau. De plus, les conditions de concentration, de pH et de température sous lesquelles sa réhydratation est effectuée peuvent donner lieu à la formation de nano fibres et d'hydrogels.



Figure I.4. : Séquence en acide aminés du peptide β-Lc f1.8 [24].

Sa capacité d'auto-assemblage a été observée au départ durant la concentration par osmose inverse (OI) d'un hydrolysat de protéines de lactosérum obtenu à l'aide de la trypsine. Lors de ce procédé, un précipité s'est formé spontanément et s'est montré insoluble dans les différents solvants testés (urée, mercaptoéthanol et SDS). Par contre, le précipité s'est avéré soluble en conditions très acides (pH < 2). L'analyse de la fraction insoluble a permis de confirmer que le peptide β-Lc f1-8 était majoritairement responsable de la formation d'agrégats. Ce peptide représentait plus de 94 % du contenu peptidique de La fraction insoluble, ce qui a pu être démontré à l'aide d'une analyse en chromatographie liquide en phase inversée (RP-HPLC) et par spectrométrie de masse (MS) [24].

II.3. Structure de β-lactoglobuline

Nous présentant ici les principales propriétés physico-chimiques de la β-Lc et l'α-lac :

- La β-Lc est constituée de 162 acides aminés. Un poids moléculaire de 18.3 KDa et une taille d'environ 3mm [25-26]. Son point isoélectrique (pHi) est d'environ 5.3 [27] et sa température de dénaturation est estimée à 77°C [28], qui dépend fortement de l'environnement chimique. Sa structure moléculaire comporte 6 à 10 % d'hélices α, 44 à 52 % de feuillets β et 15à 20 % de coudes β [29]. La molécule de β-Lc, comme le montre la figure I.5, contient deux ponts disulfures (Cys_{106}- Cys_{119} – Cys_{66} – Cys_{160}) et un groupement thiol libre caché à l'intérieure de la molécule (Cys_121_) à l'état natif [30].
- L'α-lac renferme 123 acides aminés pour un poids moléculaire de 14.3KDa. Elle présent deux ponts disulfures, un ion calcium intervenant dans sa stabilisation [31]. Elle contient une faible proportion d'acides aminés structurés en hélice α (30%) et en feuillets β (9%). Elle possède une plus grande résistance aux traitements thermiques que la β-Lc [32].

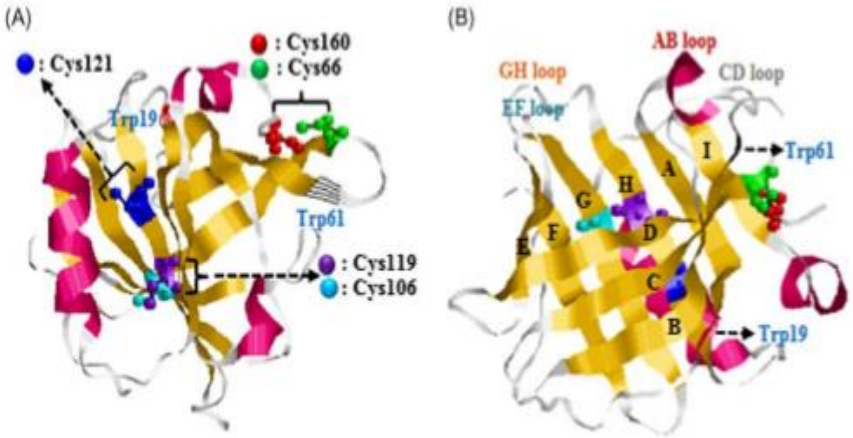


Figure I.5. : Illustration de la structure tertiaire de la β-lg montrant les positions de la cystéine notée « Cys » représentée par des sphères (A) et les feuillets β (B). Image générée avec le logiciel RasMOL [33].

II.4. Propriétés du peptide

II.4.1. Impact de pH

L'impact de la variation du pH sur le processus d'auto-assemblage du peptide β-Lc f1-8 a été vérifié par dichroïsme circulaire (CD) à différentes concentrations. Ces analyses ont démontrées qu'à toutes les concentrations étudiées, les solutions peptidiques restaient claires à pH inférieur à 2,0. À des valeurs supérieures de pH, une concentration critique d'environ 2,5 mg/ml a été observée, donnant une suspension trouble entre pH 3,0 et 8,0. À pH 9,0-11,0, les solutions commencent à former des hydrogels, passant de gels tendres à des concentrations entre 3 et 30 mg/ml, à des gels fermes et opaques pour des concentrations supérieures à 50 mg/ml (tableau I.3).

Tableau I.3. : Effet du PH sur l'aspect visuel des solutions de peptide β-lg selon leur concentration [34].

Concentration en peptide	pH									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
< 2,5 mg/mL	Solution claire	Solution trouble									
> 2,5 mg/mL	Solution claire	Particules floculées en suspension							Formation d'hydrogels		

Les analyses en CD ont démontré un passage de la forme complètement aléatoire à des pH acides, puis à l'apparition de plus en plus d'unités peptidiques sous la forme de feuillets β lorsque le pH augmente. Cette transition est causée par le changement de la charge globale du peptide qui est de +2 à pH 1,0-2,0, +1 entre pH 3,0 et 8,0, nulle aux alentours de son pI (8,75) et -1 à des pH supérieurs à 9,0. Le changement de configuration du peptide et l'auto-assemblage menant à sa floculation sont davantage favorisés lorsque la charge du peptide s'approche de la neutralité ou est négative [34].

II.4.2. Impact de concentration

Le passage du peptide de sa conformation aléatoire à une structure en feuillets β, qui mène au processus d'auto-assemblage, est dépendant de la concentration. Des analyses de CD ont démontré qu'à pH 10 et à une concentration entre 0,4 et 1,0 mg/ml, le peptide β-Lc FII.4.1 adopte principalement une conformation aléatoire.

Lorsque la concentration est augmentée entre 1,0 et 1,5 mg/ml, la solution contient un mélange de peptide sous la forme aléatoire et en feuillets β. [34].

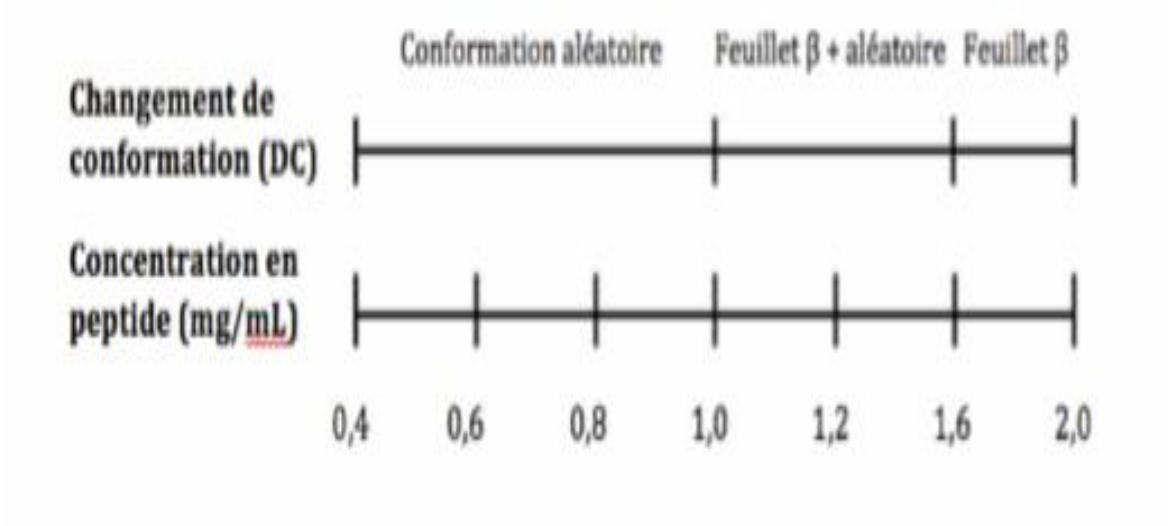


Figure I.6. : Effet de la concentration sur la conformation de peptide β-lg FII.4.1 observée par DC à pH 10 [34].

Les résultats présentés à figures I.5 et au tableau I.3 démontrent donc qu'à un pH supérieur à 2,0 et à une concentration supérieure à 1,5-2,0 mg/ml, le peptide adopte une conformation en feuillet β et les unités peptidiques interagissent alors entre-elles, ce qui peut mener à la formation de structures insolubles plus complexes (nano fibres, hydrogels).

II.4.3. Impact de la séquence d'acides aminés

Pour vérifier l'impact de la séquence d'acides aminés du peptide sur le processus d'autoassemblage, celle-ci a été modifiée par le biais de soustractions, d'ajouts et de substitutions d'acides aminés [35]. Le raccourcissement de la section hydrophobe en début de chaîne, en substituant la leucine par une glycine, a provoqué une très forte diminution de la transition du peptide en feuillet β. Cet effet s'est montré minime suite à la réduction du caractère hydrophile du peptide,

par substitution de la lysine par une alanine, signe que le Caractère hydrophobe du peptide est un élément dominant du processus d'auto-assemblage. Par contre, une balance entre les interactions hydrophobes et électrostatiques est également essentielle au processus. Une substitution de la lysine par l'acide glutamique n'a provoqué aucun changement dans les spectres CD du peptide aux différents pH étudiés. La lysine n'est donc pas nécessaire à l'auto-assemblage du peptide f1-8 et pourrait donc être remplacée par un autre acide aminé [35].

II.5. Mécanisme de dénaturation chaude de β-lactoglobuline

La dénaturation chaude pour la β-Lc est un mécanisme à l'échelle moléculaire qui explique la déstabilisation des molécules et les changements d'interactions à l'origine de la formation de dépôts à la paroi interne des équipements [36]. Une approche du type cinétique réactionnelle est communément utilisée pour expliquer la transformation de la β-Lc à pH neutre qui va passer de l'état natif à un état déplié puis agrégé sous l'effet de la chaleur [37].

La structure de la β-Lc (figure I.5) a l'objet de nombreuse études qui permettant d'expliquer les mécanismes de transformation de cette protéine. [38] ont présenté une synthèse des connaissances théoriques de la dénaturation et l'agrégation des protéines de lactosérum.

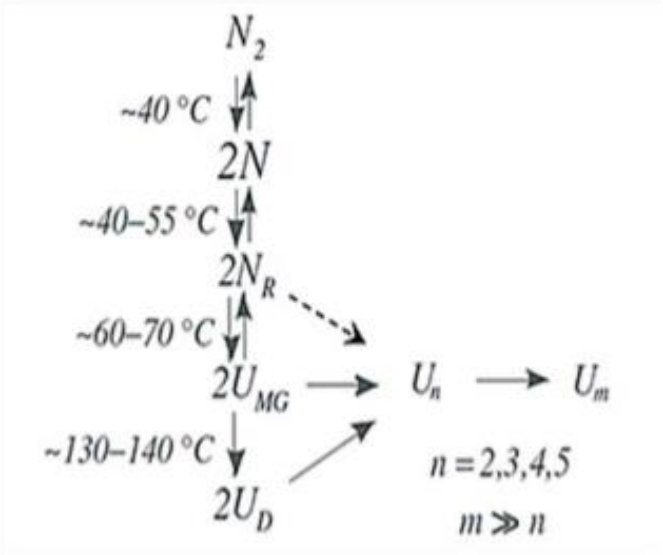


Figure I.7. : Mécanisme de dénaturation chaude de la β-Lc [39].

La figure I.7 résume le mécanisme de dénaturation chaude de la β-Lc celle-ci à l'état natif et à pH neutre se présente sous la forme d'une dimère N_2. Lorsqu'on augmente la température jusque 65°C, la β-Lc se transforme de manière réversible en monomère natif N puis subit des chargements mineurs de conformation qui permettent une formation négligeable d'agrégats due à une légère exposition des groupements thiol situés à l'intérieur de la molécule. Lorsque la température dépasse 60°C, le dépliement de la molécule est toujours réversible suite à la rupture des liaisons non covalentes. C'est l'état « molten globule » U_{MG} sous lequel les molécules forment des agrégats un ou des polymères Um de manière irréversible. A partir de 130 °C, la β-Lc est dénaturée de manière irréversible UD. Le mécanisme détaillé de la dénaturation chaude de la β-lg a fait l'objet de nombreuses études [40]. De nombreux facteurs physico-chimiques agissent sur le mécanisme de dénaturation de la β-Lc sous l'effet de la chaleur. [41] ont montré que des interactions avec d'autres molécules présentes en solution peuvent modifier le niveau de stabilité de la β-Lc. La concentration en β-Lc sous forme native [42], La composition en minéraux [43], la force ionique de la solution [44],

le pH [45] et le profil thermique subi par le produit [46] impactent également le mécanisme de dénaturation.

Une fois dépliée, la β-Lc peut réagir avec les autres molécules de β-Lc ou les autres protéines présentes au sein de la solution de lactosérum. Dans le cas du lactosérum, comprenant uniquement des protéines sériques, principalement β-Lc et α-lact, les molécules de β-Lc dépliées peuvent former un complexe avec l'α-lact (figure I.8) [47]. Préférentiellement, les molécules de β-Lc dépliées vont interagir entre elle afin de former des agrégats contenant encore un groupe thiol libre (figure I.8) ou vont former des agrégats sans groupe thiol libre (figure I.8).

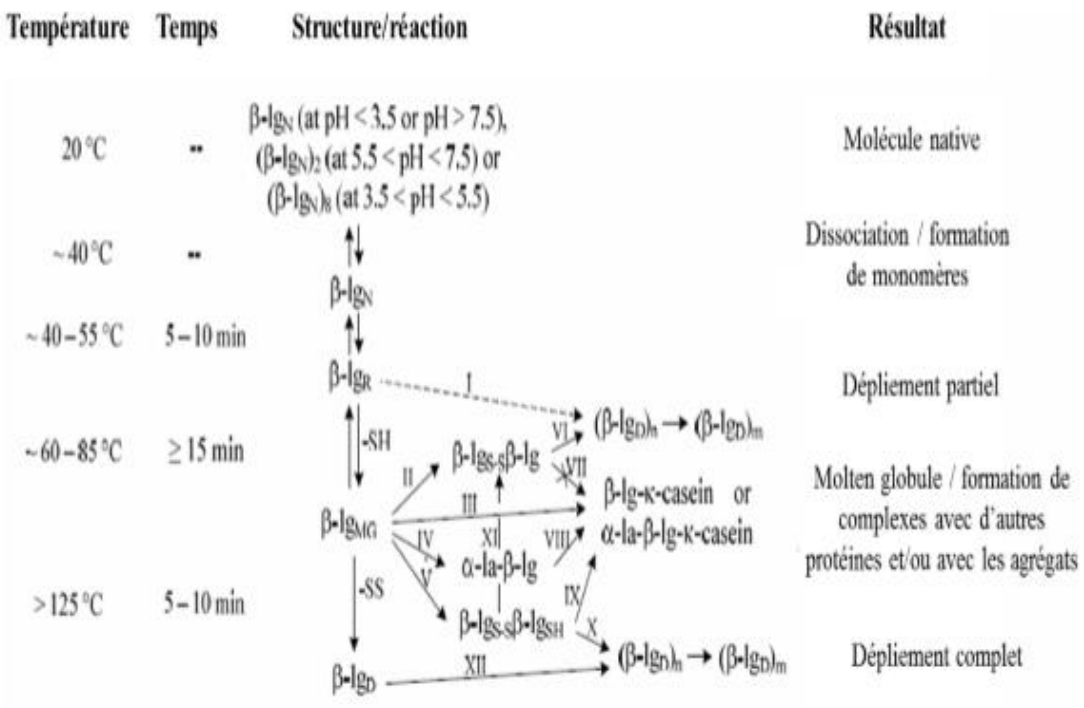


Figure I.8. : Mécanismes de dénaturation chaude de la β-lg comprenant les différents complexes possibles avec d'autres protéines du lait [40].

Chapitre II : Les échangeurs de chaleur & l'encrassement

I. Notions Générales sur les Echangeurs

I.1. Introduction

Les échangeurs de chaleurs sont des dispositifs très utilisés dans divers industries telles que l'industrie agroalimentaire. Ils sont employés en général pour assurer un échange de chaleur entre deux fluides.

I.2. Définition [48]

Un échangeur de chaleur est un système qui permet d'échangeur 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.

I.3. Principe de fonctionnement [48]

Dans un échangeur, la chaleur est transmise d'un fluide à un autre. Le même fluide peut conserver son état physique ou se présenter successivement sous les deux phases.

I.4. Modes de transferts thermiques [49]

Il existe trois modes essentiels de transferts de chaleur : la conduction, le rayonnement et la convection :

I.4.1. Conduction

La conduction est la transmission de la chaleur au sein de la masse d'un corps solide, des points les plus chauds vers les points les moins chauds, par suite du contact des particules entre elles et sans déplacement apparent de matière.

I.4.2. Convection

La convection est le mode de transmission de chaleur qui implique le déplacement de la matière. Il s'agit par exemple d'un échange de chaleur entre une paroi et un fluide.

I.4.3. Rayonnement

Le rayonnement thermique est le mode de transmission par lequel la chaleur passe d'un corps à haute température à un autre plus froid, sans contact, mais ils sont séparés par un milieu transparent tel l'air, ou le vide.

I.5. Les déférents types d'échangeurs de chaleur [50]

I.5.1. Echangeurs tubulaires

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 réalisée pour avoir la meilleure efficacité possible pour une utilisation donnée :

I.5.1.1. Echangeur monotube

Dans cet échangeur de chaleur le tube est placé à l'intérieur d'un réservoir et possède généralement la forme d'un serpentin.

I.5.1.2. Echangeur coaxial

Dans cette classe échangeur de chaleur tubulaire, les doubles tubes sont le plus souvent centrés, en général, le fluide chaud ou le fluide à haute pression s'écoule dans le tube intérieur.

I.5.1.3. Echangeur multitubulaire [50]

Les échangeurs multitubulaires (figure II.1.) existent sous quatre formes :

- Echangeur à tues séparés ; à l'intérieure 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.

- Echangeur à tues rapprochés ; pour maintenir les tubes et obtenir un passage suffisant pour le fluide extérieure au tube, on place un ruban enroulé en spirale autour de certaines d'entre eux, les tubes s'appuient les uns sur les autres par l'intermédiaire des rubans.
- Échangeur à tubes ailettes ; ces tubes permettent d'améliorer le coefficient d'échange thermique.
- Échangeur à tubes et calandre ; c'est l'échangeur actuellement le plus répandu.

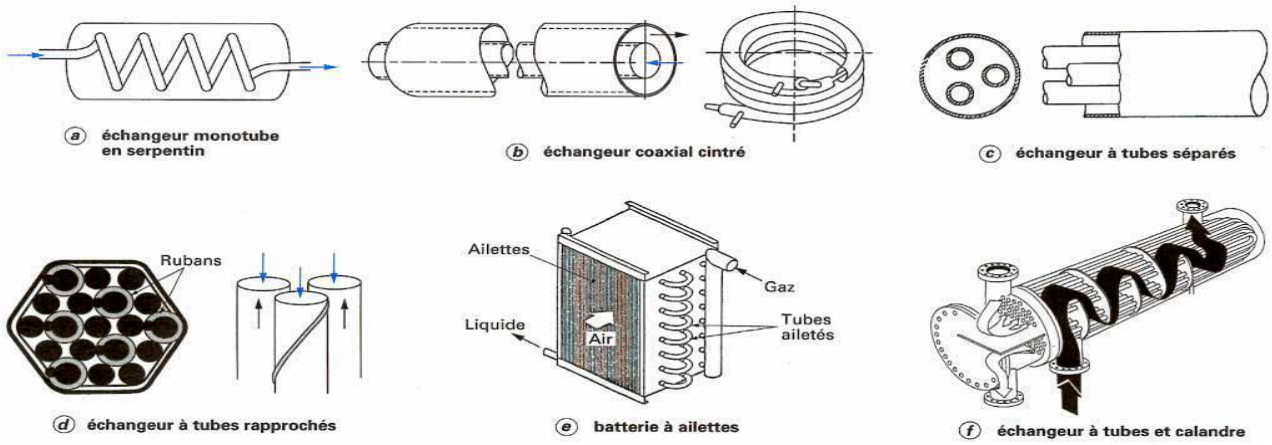


Figure II.1. : Différentes types d'échangeurs tubulaires [51].

I.5.2. Échangeur de chaleur à plaques [52-53]

Les échangeurs à plaques (figure II.2) 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 par exemple) ou l'industrie nucléaire.

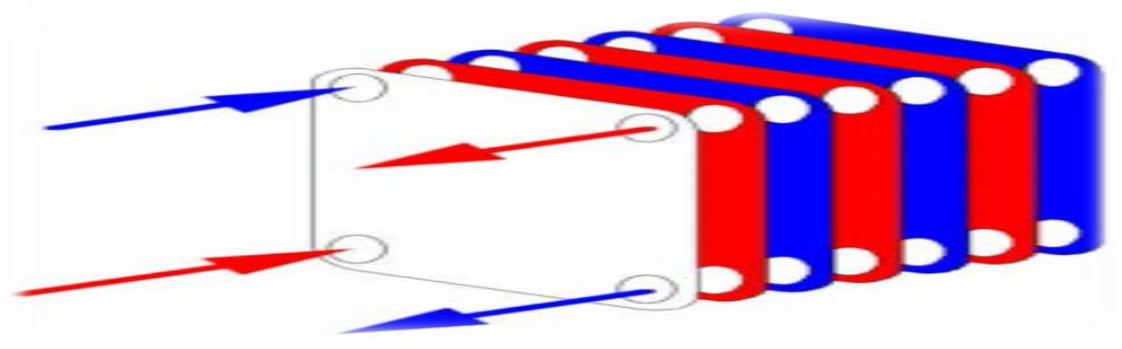


Figure II.2. : Schéma d'un échangeur à plaque [54].

I.5.2.1 Échangeurs à surface primaire

Les échangeurs à surface primaire (figure II.3) sont constitués de plaques corruguées, nervurées ou picotées. Le dessin du profil de plaques peut être assez varié mais il a toujours un double rôle d'intensification du transfert de chaleur et de tenue à la pression par multiplication des points de contact. Les différentes géométries de plaques les plus couramment rencontrées sont présentées sur la figure II.3.

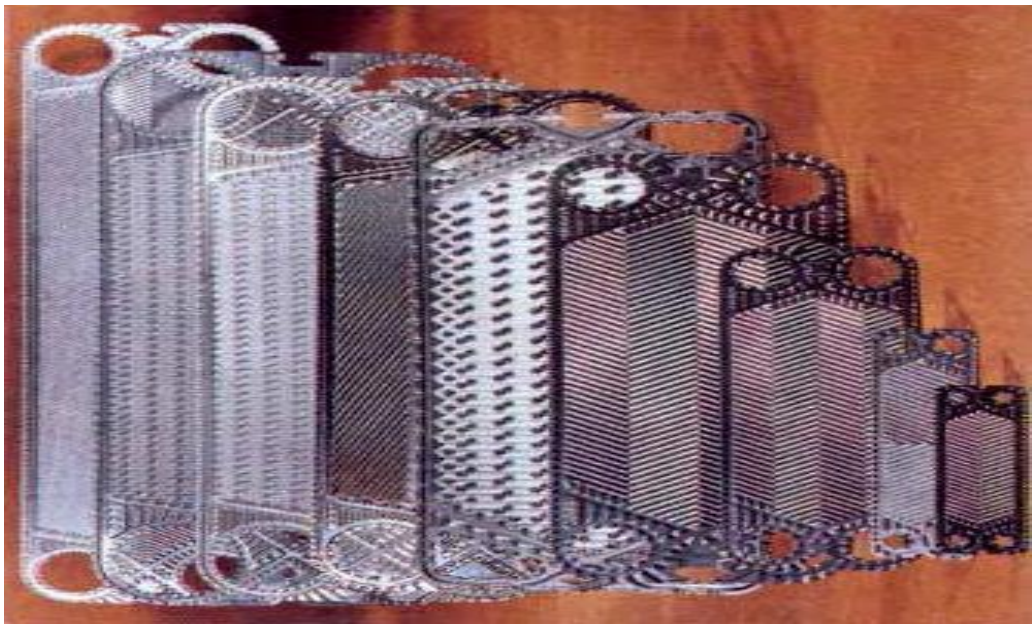


Figure II.3. : Différentes géométries de plaques d'échangeurs à surface primaire [55].

I.5.2.2 Échangeurs à plaques et joints

La surface d'échange est alors composée de plaques métalliques, équipées de joints, serrées les unes contre les autres à l'aide de tirants entre deux flasques, l'un fixe, l'autre mobile (figure II.4).

Un rail fixé sur le flasque fixe et sur un pied supporte l'ensemble des plaques et permet le déplacement de celles-ci pour les manutentions (montage, nettoyage, etc.). Les plaques définissent un ensemble de canaux dans lesquels circulent respectivement chacun des fluides.

Les échangeurs à plaques et joints sont surtout utilisés pour les transferts de chaleur entre fluides monophasiques, mais de plus en plus d'applications existent en double phase, condensation ou évaporation.

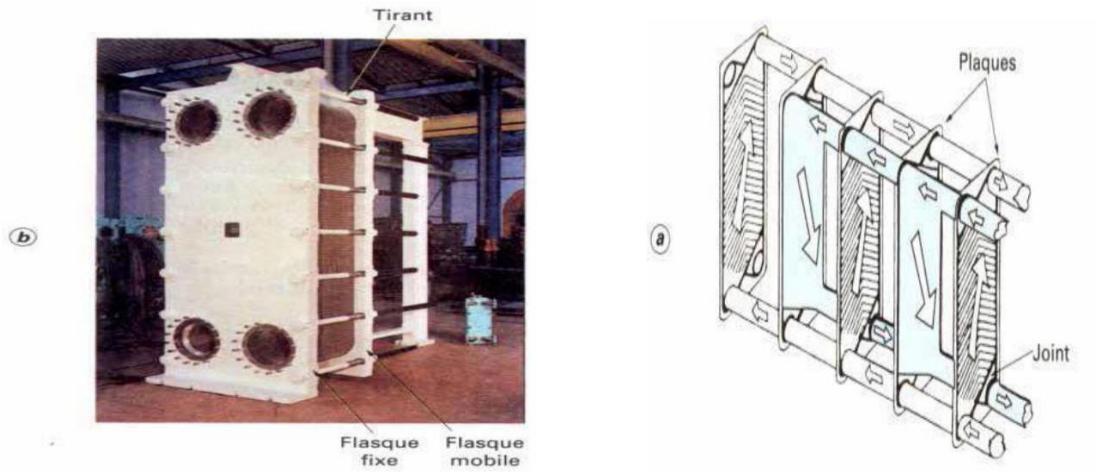


Figure II.4. : Échangeur à plaques et joints [55].

I.5.2.3. Échangeurs à plaques soudées ou brasées [56]

Les échangeurs à plaques soudées ou brasées sont surtout utilisés en récupération de chaleur (figure II.5), dans les domaines de la chimie, de la pétrochimie, de l'agroalimentaire, etc….

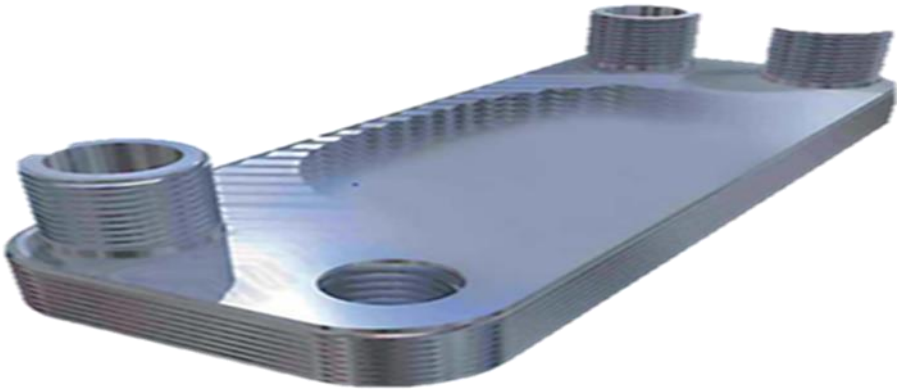


Figure II.5. : Échangeur brasé [56].

I.6. Avantages et inconvénients de l'échangeur à plaques [57]

I.6.1. Avantage

- Simple et faible.
- Grande durée de vie et pratiquement pas de panne.
- Absence de pièces en mouvement, sécurité de fonctionnement.
- Peu de maintenance nécessaire.
- Faible risque de contamination de l'air frais en cas de bonne conception.
- Exécution en divers matériaux et nombreuses combinaisons possibles.

I.6.2. Inconvénients

- Ne peut pas être utilisé pour des fluides très visqueux ou des fluides contenant des particules solides à cause du faible espace entre les plaques.
- Domaine de température relativement faible même si certain échangeurs à Plaques peuvent aller jusque au 300 C°.

II. Méthodes de dimensionnement [58]

Au côté de l'équation de bilan d'énergie, la résolution des problèmes d'échange thermique nécessite l'écriture d'une seconde équation, de nature tout à fait différente de la première, qui pour rappel est une équation thermodynamique et traduit le principe de conservation de l'énergie.

Cette seconde équation est l'équation de transfert de chaleur qui traduit la relation entre le flux de chaleur échangé et la différence de températures disponibles entre les deux fluides qui circulent dans l'échangeur thermique.

Le dimensionnement d'un échangeur consiste à calculer la surface d'échange nécessaire pour obtenir les performances désirées (puissance, température de sortie).

Il faudra par la suite déterminer les pertes de charge (pertes de pression) que va engendrer la circulation des fluides (par la friction contre les parois du fait de la viscosité) afin de vérifier la concordance avec le cahier des charges qui impose souvent une limite haute en terme de valeur d'une perte de charge.

Cette valeur haute correspondant, la plupart du temps, à une capacité de pompage existante et donc à ne pas dépasser (pour la détermination des pertes de charge par le calcul du facteur de friction, le lecteur pourra se reporter aux ouvrages).

Pour connaitre la surface d'échange de l'échangeur, il faut dans un premier temps connaitre les grandeurs dimensionnâtes telles que la puissance, les températures, les débits (voir plus haut la détermination de ces grandeurs par les bilans thermiques).

Ensuite, il faut calculer, et ce quelle que soit la méthode de dimensionnement utilisée, les coefficients d'échanges thermiques partiels et le coefficient d'échange thermique global.

II.1. Coefficient d'échange global et partiel [59]

Pour expliquer clairement la notion de coefficient d'échange, on considère une paroi métallique au travers de laquelle la chaleur est transférée par conduction, cette paroi étant en contact avec un fluide chaud et sur son autre face avec un fluide froid : cette situation se traduit par un transfert de chaleur entre les deux fluides.

On peut exprimer par l'équation qui suit la relation entre le flux de chaleur transféré P, l'écart de température ΔT des deux fluides (le chaud (indice c) et le froid (indice f)) et l'aire S de la paroi d'échange :

$$P = U \times S\left(T_c - T_f\right) = \frac{T_c - T_f}{R_{global}} \quad \textbf{.....II.1}$$

Les valeurs des résistances d'encrassement. En général, l'encrassement des échangeurs de chaleur est défini comme le dépôt de matériaux ou de substances non désirées sur les surfaces d'échanges. Ce dépôt peut être constitué de cristaux, de sédiments, de résidus biologiques, de produits d'une réaction chimique ou bien encore être la combinaison de plusieurs de ces éléments.

C'est un processus qui est dynamique et qui se déroule de façon continue ou ponctuelle, généralement jusqu'à atteindre un état d'équilibre (valeur asymptotique) ou jusqu'à ce qu'il soit nécessaire de nettoyer l'échangeur, la période d'encrassement pouvant varier de quelques heures à plusieurs mois, voire plusieurs années.

Ces résistances thermiques d'encrassement sont en général données par les standards TEMA (Tubulaire Exchanger Manufacturer Association) qui font office de référence (sauf retour d'expérience propre à l'exploitant).

Leur prise en compte dans le calcul du coefficient d'échange global permet de simuler le fonctionnement de l'échangeur en conditions dégradées (avec une

résistance d'encrassement suite à un nombre d'heures de fonctionnement) et permet de faire un surdimensionnement « justifié » due à une potentielle future baisse de performance.

En effet, l'ajout d'une ou plusieurs résistances d'encrassement a pour effet néfaste de dégrader la valeur du coefficient thermique global, induisant une hausse de la surface d'échange nécessaire et donc un sur plus en cout matière et conception.

La résistance globale (et en conséquence U) se déduit de la règle d'additivité des résistances partielles :

$$R_{global} = \frac{1}{U \times S} = \sum R_i \text{.....} \textbf{II.2}$$

On notera que le coefficient d'échange global doit être défini par rapport à une surface d'échange de référence. Dans le cas, d'une paroi plane, cette surface de référence est évidente puisqu'unique : c'est la surface de la paroi. Dans le cas d'une paroi tubulaire (cylindrique), deux surfaces d'échange de référence peuvent être retenues : la paroi interne ou externe**.**

On peut alors choisir indistinctement l'une ou l'autre à la condition de maintenir ce choix tout au long du calcul.

Ainsi, le coefficient d'échange global U (défini par rapport à la surface d'échange interne – notée avec un indice int - pour les échangeurs tubulaires) est déterminé par la relation suivante dans laquelle interviennent la résistance de paroi, les résistances convectives et les résistances d'encrassement :

$$R_{global} = R_{convevtion\ n_{ext}} + R_{encrassemen\ t_{ext}} + R_{conduction} + R_{encrassemen\ t_{int}} + R_{convectio\ n_{int}} \text{.....} \textbf{II.3}$$

Cette expression prend différentes formes suivant le type d'échangeur considéré (en négligeant les résistances d'encrassement) :

- Pour un échangeur à plaques (d'épaisseur e) :

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_c} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_f} \quad \text{.....II.4}$$

II.2. Critères de performance d'un échangeur [60]

Il existe plusieurs critères de performance d'un échangeur **:**

- L'efficacité d'un échangeur est un critère de performance important.
- Le coefficient d'échange global U est aussi un des plus utilisé. Plus ce dernier est important, plus l'échangeur est performant. Il faut néanmoins que les pertes de charge soient les plus faibles possibles (mais suffisante afin d'assurer une bonne distribution des fluides) mais soient totalement dépendantes du design de l'échangeur**.**
- Enfin, le critère de compacité est aussi important car il est défini par le rapport de l'aire de la surface d'échange au volume de l'échangeur. propose qu'un échangeur soit considéré comme compact si sa compacité (rapport de la surface d'échange sur le volume de l'échangeur) est supérieure à 700 m²/m3 ; cette valeur est susceptible de varier de 500 à 800 m²/m.

II.3. Echangeurs de chaleur et déflecteurs

II.3.1. Echangeurs de chaleur [61]

Les échangeurs de chaleur en version transparente et très résistante à la corrosion sont très importants dans l'assemblage d'installations dans le domaine de la chimie et de la pharmacie. Dans presque tous les processus avec des fluides liquides, il faut apporter ou retirer de la chaleur.

Pour cela, Normag [61] propose à l'utilisateur une large gamme d'échangeurs de chaleur pour les différentes applications, pour résoudre de façon optimale le problème respectif. Les échangeurs de chaleur à serpentin, à faisceau tubulaire et les évaporateurs à couche mince représentés sur les figures jointes sont des exemples de la multitude d'appareils proposés.



Figure II.6. : Différents type d'échangeurs de chaleurs [61].

II.3.2. Déflecteurs ou plaque de protection du faisceau [62]

Pour éviter ou du moins minimiser l'érosion de tube du faisceau, des déflecteurs de protection (figure II.7) peuvent être installés faces aux tubulures d'entrée du fluide côté calandre, l'obligation de leur mise en place est définie dans les standards (TEMA) en fonction de la nature, de l'état du fluide et du produit.
ρu_2 (ρ : masse volumique, u : vitesses du fluide). Ces déflecteurs, d'une épaisseur de l'ordre de 1/2in, sont circulaires, carrés ou rectangulaires, soudés sur des tirants ou entretoise.

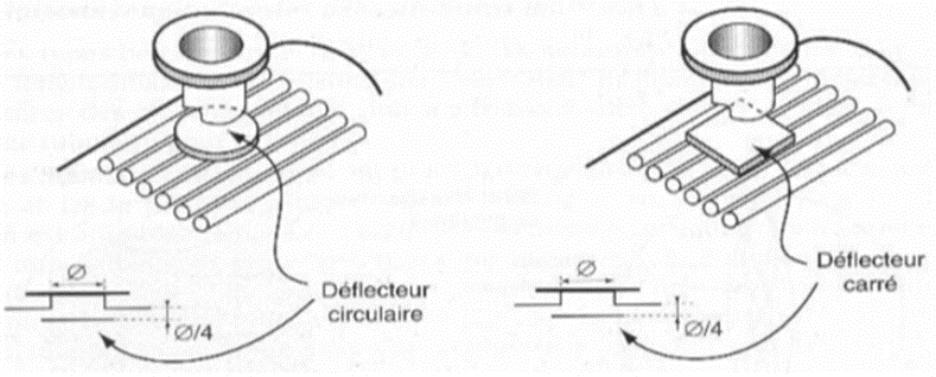


Figure II.7. : Déflecteur ou plaque de protection du faisceau [62].

III. Encrassement

III.1. Introduction

Les échangeurs thermiques sont présents dans un grand nombre de procédés industriels, ils permettent d'optimiser les dépenses énergétiques de l'ensemble d'un processus, Le transfert de chaleur se fait généralement par l'intermédiaire d'une surface d'échange.

L'encrassement est le résultat de l'accumulation d'un dépôt sur la surface d'échange d'un échangeur de chaleur. Ce dépôt produit une résistance thermique supplémentaire sur la surface d'échange. Il peut y avoir différentes conséquences telles que l'augmentation du coût due à une augmentation de la surface d'échange à installer, la perte d'énergie due à la diminution du transfert de chaleur et à l'augmentation de la perte de pression, l'augmentation des coûts de maintenance et de réparation.

L'encrassement sur la surface des échangeurs de chaleur est un problème très étudié depuis quelques années. De nombreuses études théoriques et expérimentales ont été faites par différents auteurs pour comprendre les mécanismes de dépôt sur une paroi de géométrie simple ou complexe.

III.2. Phénomène d'encrassement [63]

L'encrassement est un phénomène qui se produit avec ou sans gradient de température dans un grand nombre de processus naturels, domestiques et industriels. Quelques exemples sont l'obstruction des vaisseaux sanguins par le cholestérol, la catalyse de l'hydrogène, les fluides dans les conduites des échangeurs de chaleur.

III.3. Notion sur l'encrassement des échangeurs [64]

L'encrassement qui, sous sa forme la plus générale, peut être définie comme accumulation d'éléments solides indésirables sur une interface, affecte un grand nombre d'opération industrielle. Selon la classification établie en 1978 par Epstein, [68] il existe cinq grands types d'encrassements différents :

- la corrosion.
- L'encrassement biologique.
- L'encrassement par réaction chimique.
- L'entartrage.
- L'encrassement particulaire.

III.3.1. La corrosion [63]

L'encrassement par corrosion implique une réaction chimique ou électrochimique entre la surface d'échange et l'écoulement fluide pour former des produits de corrosion qui, à leur tour, modifient les caractéristiques thermiques de surface et viennent s'encrasser.

III.3.2. L'encrassement biologique [65]

L'encrassement biologique résulte de la fixation et de la croissance de micro-organismes et de microorganismes sur la surface d'échange thermique formant un biofilm souvent inégal, filamenteux, et déformable, mais difficile à enlever.

III.3.3. L'encrassement par réaction chimique [66]

On rencontre ce type d'encrassement quand une réaction chimique se produit près d'une surface d'échange et que les solides produits par la réaction s'y déposent. Ce type d'encrassement est souvent lié aux réactions de polymérisation produisant la formation d'un dépôt. Les domaines concernés sont essentiellement l'industrie pétrochimique (craquage thermique des hydrocarbures lourds), l'industrie agroalimentaire (pasteurisation de lait) et les circuits de chauffage utilisant des fluides organiques.

III.3.4. L'entartage [67]

L'entartrage d'une surface d'échange est généralement associé à la production d'un solide cristallin à partir d'une solution liquide. 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. 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.

III.3.5. L'encrassement particulaire [67]

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.

III.4. Mécanisme de l'encrassement [68]

Phénoménologiquement, l'encrassement (figure II.8) est un problème transitoire de chaleur et de masse qui nécessite l'action simultanée de plusieurs processus complexes. Les mécanismes d'encrassement sont décomposés de cinq événements séquentiels :

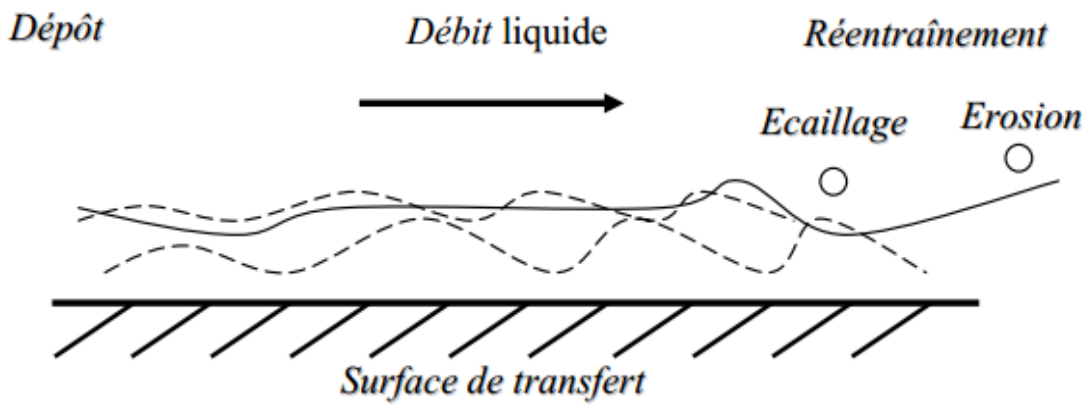


Figure II.8. : Représentation schématique de l'encrassement dans le cas d'un liquide.

III.4.1. L'initiation

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

III.4.2. Transport des particules

Ce transport peut être mécanique par impaction sur un obstacle diffusif, par mouvement turbulent ou bien généré par un champ de force extérieur thermique ou électrique. Dans de nombreux cas, ces différents mécanismes peuvent coexister.

III.4.3. Adhésion des particules

Toutes les particules amenées au voisinage de la paroi n'adhérent pas obligatoirement sur celle-ci, les phénomènes sont essentiellement contrôlés par les force d'adhésion et de cohésion de dépôt.

III.4.4. Réentrainement des particules déposées

Certaines des particules déposées peuvent être réent rainées sous forme d'agglomérats arrachés à la couche de dépôt sous l'action des forces aérodynamiques.

III.4.5. Le Vieillissement

Il s'agit d'un changement de structure chimique ou cristalline du dépôt du phénomène tels que la déshydratation ou la polymérisation, il y'a alors diminution

des forces d'adhésion du dépôt qui peut être arraché sous l'action des force aérodynamique.

Chapitre III : Modélisation et simulation de l'encrassement

I. Introduction

L'encrassement des équipements de transfert de chaleur est phénomène prépondérant dans la réduction des performances : telles que la diminution du coefficient de transfert de chaleur, l'augmentation de la température de fluide chaud et donc des consommations énergétiques.

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.

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

I.1. Description du système [69]

Le pasteurisateur considéré est celui d'une laiterie industrielle, spécialisée dans la transformation et production de divers produits laitier tels que le yaourt, le lait pasteurisé….etc.

La pasteurisation consiste en un chauffage du lait à une température donnée pendant un certain temps afin d'éliminer l'action pathologique des bactéries, c'est un traitement obligatoire que doit subir le lait avant toute utilisation.

Le lait provenant des réservoirs de préchauffage, entre dans un premier ensemble d'échangeurs à plaques pour récupérer la chaleur du lait sortant. Le lait, pénètre ensuit dans l'échangeur 2 ou il subit une opération de chauffage par la vapeur d'eau à la sortie de celui-ci, il parcoure, pendant 15 secondes, un tube à la température de 90°C pour subir l'opération dite de cambrage, enfin le lait aborde,

respectivement l'échangeur 1 afin de chauffer le lait entrant puis l'échangeur 3 (échangeur de refroidissement).

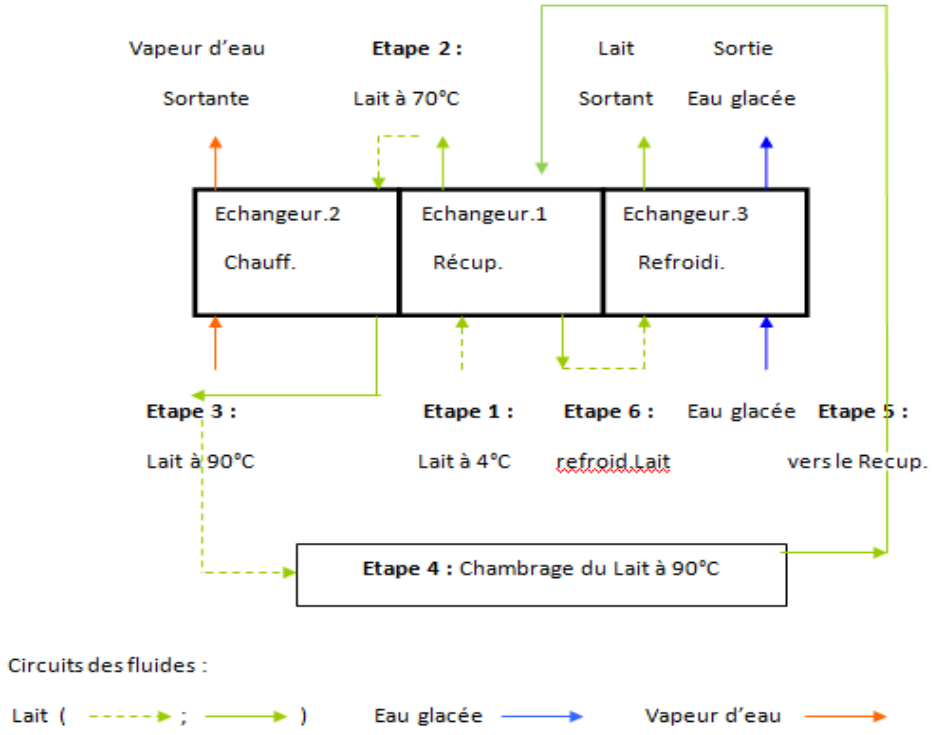


Figure III.1. : Cycle de pasteurisation de lait [69]

I.2. Cycle de vapeur [70]

La vapeur d'eau entre à une pression de 6 bars, passe par un détendeur avant d'être mélangée avec l'eau chaude sortante de l'échangeur à une température de 115 °C et une pression de 4,6- 5,2 bars, pour être de nouveau injectée dans échangeur à une température de 128 °C.

I.3. Modèle thermique de l'échangeur à plaques [70]

I.3.1. Introduction

Dans le compartiment de pasteurisation de lait à l'intérieur de l'échangeur à plaques le fluide Chaud (vapeur d'eau) circule dans chaque canal pour chauffer les plaques, par un mode de transfert de chaleur (convection). Les plaques transmettent leur chaleur par conduction au fluide froid (lait). Le circuit est présenté sur la (figure III.2.).

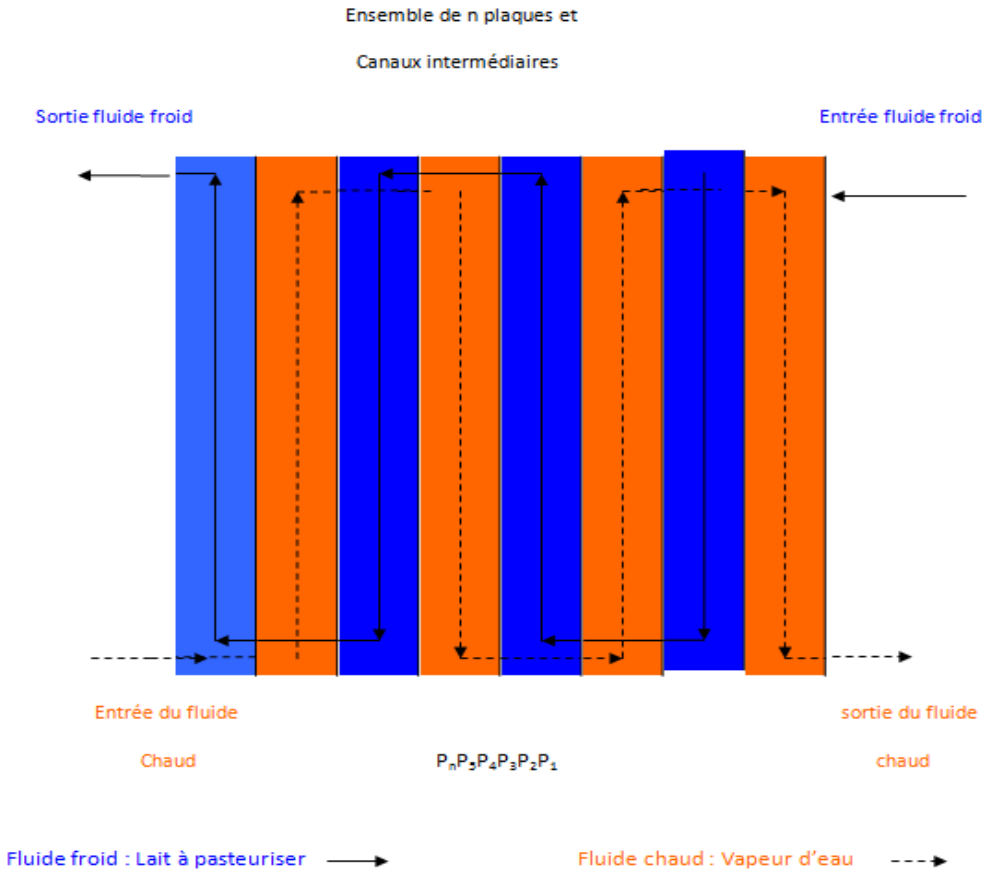


Figure III.2. : Arrangement des plaques de l'échangeur de pasteurisation et sens de circulation des fluides [70]

La modélisation de l'échangeur de chaleur à plaques 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.

I.3.2. Formulation mathématique du problème

I.3.2.1. 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. Le modèle de turbulence standard κ - ε est utilisé. 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 [71].

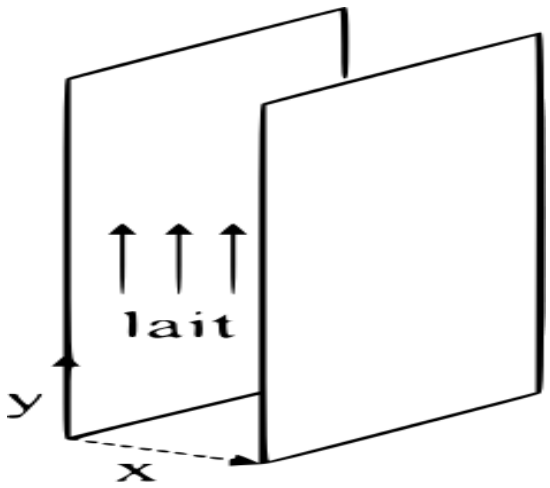


Figure III.3. : Schéma descriptif du canal [72]

I.3.2.2. Modélisation de la turbulence dans un milieu totalement fluide [72]

I.3.2.2.1. 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.

I.3.2.2.2. Equations de conservation

Les équations de base représentant le problème physique sont celles de Navier-Stokes :

a) Equation de conservation de la masse

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0 \quad \text{.....III.1}$$

b) Equation de conservation de la quantité de mouvement

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

c) Equation de conservation de l'énergie

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

I.3.2.2.3 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 poreux. 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.

I.3.3. Calcul du coefficient de transfert de chaleur global

La Figure (III.4.) représente le schéma de l'écoulement du fluide entre deux plaques parallèle de l'échangeur de chaleur :

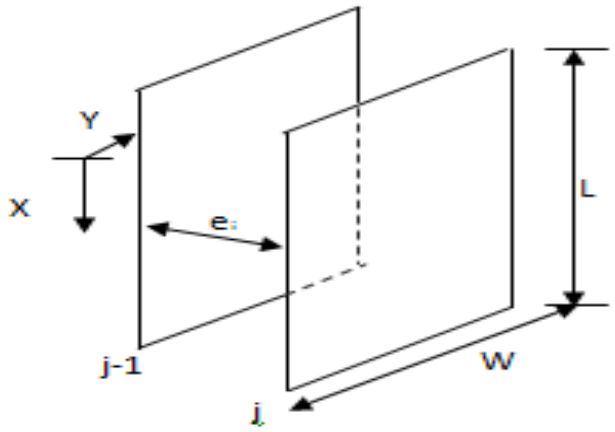


Figure III.4. : Schématisation de la direction de l'écoulement entre deux plaques [72]

I.3.4. Calcul des paramètres à mesurer du mélange (lait) [56]

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

$\mu + \mu_0 (1+ 2{,}5\varphi)$**.....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 [73]

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

3. Débit du mélange : Q = 4000 l/h

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

4. Vitesse du mélange : S'écrit :

$$u = \frac{Q}{A} \quad \text{..... III.6}$$

Avec: $A = e_j \times W$

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

5. Nombre de Reynolds :

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

$$d_e = 2 \times e_j \quad \text{..... III.8}$$

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

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 [74].

Pour le transfert de chaleur en régime turbulent dans un échangeur à plaques, la corrélation suivante peut être utilisée [74].

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

$$Pr = \frac{Cp \times \mu}{K} \quad \text{..... III.10}$$

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 [74].

$$k = 0,00133T + 0,53991 \quad \text{..... III.11}$$

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.12**

I.3.5. Calcul des paramètres à mesurer de l'eau chaude [72]

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 ,ρ_c

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.7) et (III.10) on obtient : Reynolds et Prandtl

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

- De l'équation (III.12) on obtient : h_c

I.4. Programme Ansys

I.4.1. Introduction

Les outils de simulation numérique occupent une place prépondérante dans les études. La démarche de conception optimale qui résulte de l'épuisement des ressources énergétiques et du souci de préservation de l'environnement, n'a fait qu'amplifier leur utilisation. La simulation se définit comme l'utilisation ou la résolution de modèles correspondant à un système donné pour étudier le comportement de ce dernier dans un contexte précis. Elle est la suite logique de la modélisation qui est la première approche d'une simulation.

La simulation se présente presque toujours sous forme d'un programme ou d'outils informatiques. Ces derniers sont couramment appelés des environnements de simulation [70].

I.4.2. Définition d'Ansys

Ansys est un code des éléments finis d'usage général à la résolution numérique d'une large variété de problèmes physique en général et de mécanique en particulier. Ces problèmes portent notamment : analyse structurale en statique et en dynamique (linéaire et non linéaire) transfert de chaleur, dynamique des fluides, électromagnétique [75].

I.4.2.1 Ansys DesignSpace [76]

DesignSpace est un logiciel d'aide à la conception pour bureaux d'études adapté aux environnements Windows standards qui utilise la méthode des éléments finis pour analyser rapidement le comportement mécanique, thermique et vibratoire (analyse modale) de vos conceptions. Il permet de traiter les assemblages et donc d'attribuer un type de contact entre les différentes pièces le constituant.

I.4.2.2 Ansys Professional

Professional permet des analyses plus complexes : réponses spectrales et harmoniques, calculs transitoires (mécaniques et thermiques) mais aussi des outils de contrôle avancés tels que : les options de contacts, les contacts surfaces/surfaces, surfaces/lignes, lignes/lignes, les combinaisons de solutions, le post-traitement des zones de contacts. Ansys Professional est proposé en deux versions : Ansys Professional NLT avec des possibilités en calcul linéaire de structures, calcul dynamique et simulation thermique non linéaire et Ansys Professional NLS avec des possibilités en calcul thermique, calcul de structures en linéaire plus des possibilités basiques en non linéaire.

I.4.2.3 Ansys Structural / Mechanical

Structural et Mechanical permettent d'accéder à tous les types de non linéarités (matériaux, grandes déformations et grands déplacements). Ils sont dédiés à des utilisateurs confirmés avec des connaissances théoriques éléments finis.

I.4.2.4. Ansys CFD

La CFD "Computational Fluide Dynamics" (ou Dynamique des Fluides Numérique), 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 [77].

I.4.2.5. 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) [78].

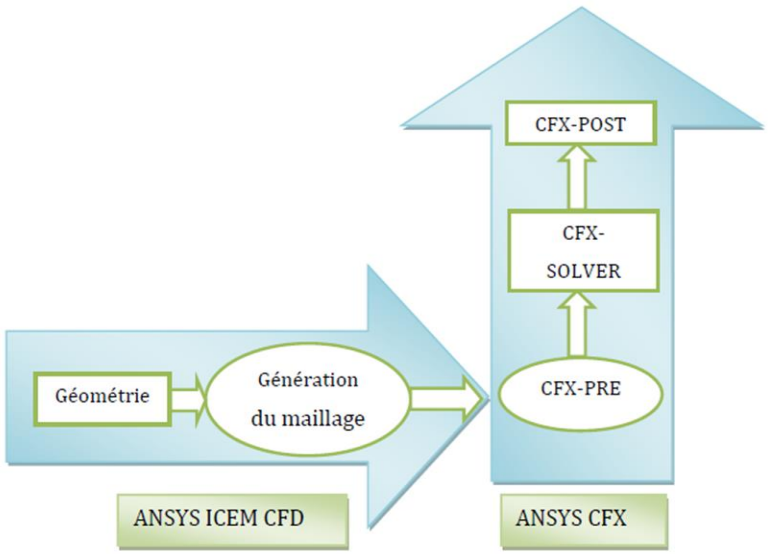


Figure III.5. : Les principaux modules des deux logiciels Ansys ICEM & CFX [78]

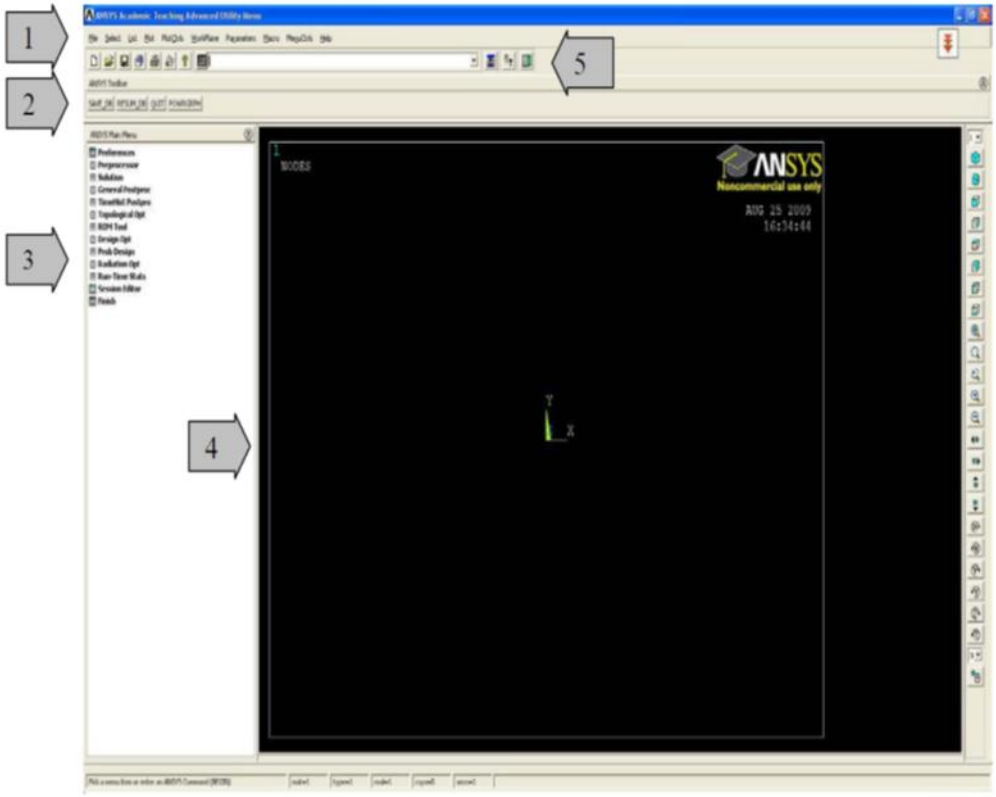


Figure III .6. : L'interface utilisateur graphique d'Ansys [70]

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 [79].

✓ **Pré -processing**

Préparation des données du problème (géométrie du domaine de calcul, génération du maillage de discrétisation, définition des phénomènes physiques et chimique du processus, détermination des propriétés du fluide, spécification des conditions aux limites).

✓ **La résolution**

C'est la solution du problème avec une méthode numérique.

✓ **Post-processing**

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.

I.4.3. Les points forts des outils Ansys [78]

- 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 format natif 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.

Chapitre IV : résultats et discussion

I. Introduction

Cette étude porte sur l'analyse de l'encrassement dans un échangeur de chaleur à plaques avec et sans déflecteurs pour différentes formes. La géométrie considérée est un canal plan, entièrement remplie par un liquide ayant un fort pouvoir encrassant (une 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 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 par un milieu composé (fluide et encrassement) au cours du temps. Les parois sont chauffées à une température uniforme et constante notée T_p. Le fluide 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).

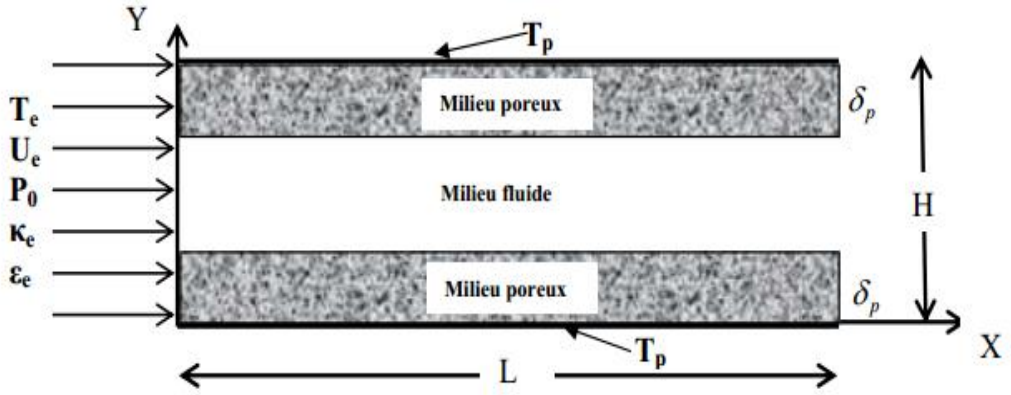
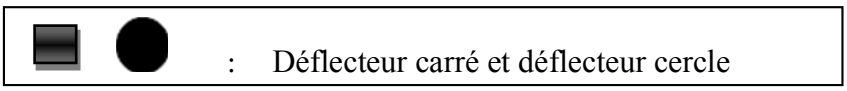


Figure IV.1 : Ecoulement dans un canal à section rectangulaire.



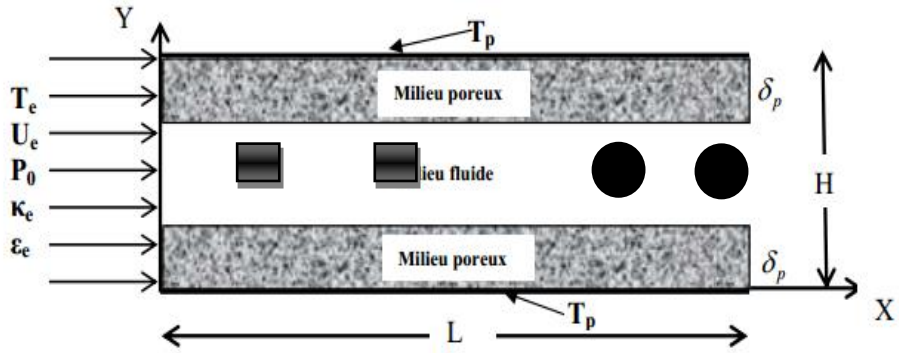


Figure IV.2 : Ecoulement dans un canal à section rectangulaire avec la présence de déflecteurs.

II. Les profils dans un milieu complètement fluide avec la présence d'un déflecteur coté lait

II.1. Profil de la température

L'évolution de la température en fonction de la largeur du canal est représentée sur la Figure IV.3 et ce pour différentes positions dans le canal (y).

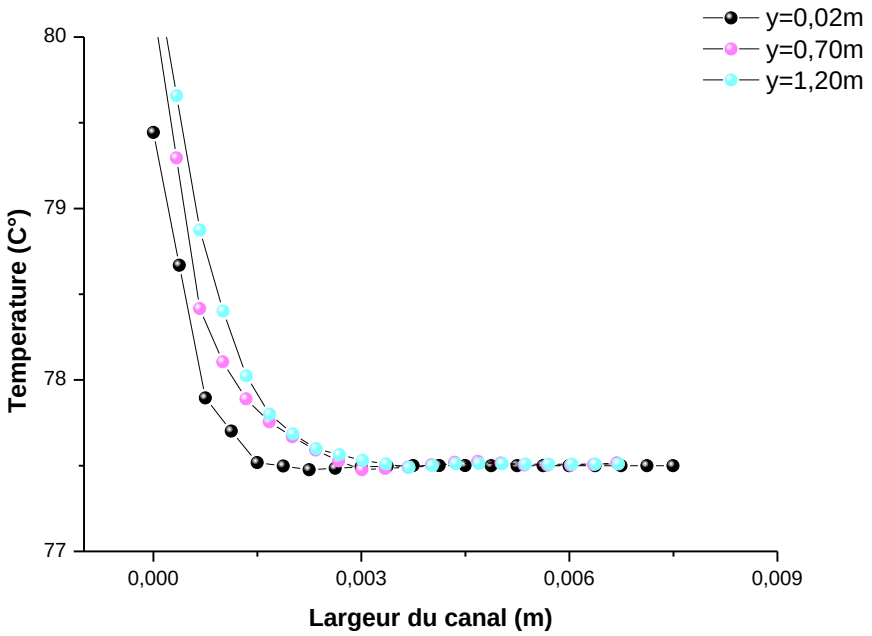


Figure IV.3 : La variation de la température dans la solution protéique.

Une augmentation de la température de la solution de protéine le long du canal est observée à cause de l'échange thermique avec la vapeur d'eau circulant en contre courant dans l'échangeur de chaleur. Dans le sens de la largeur, elle est presque constante pour une longueur donnée puis elle augmente rapidement près de la paroi chaude.

II.2. Profil de la vitesse

L'évolution du profil de la vitesse 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).

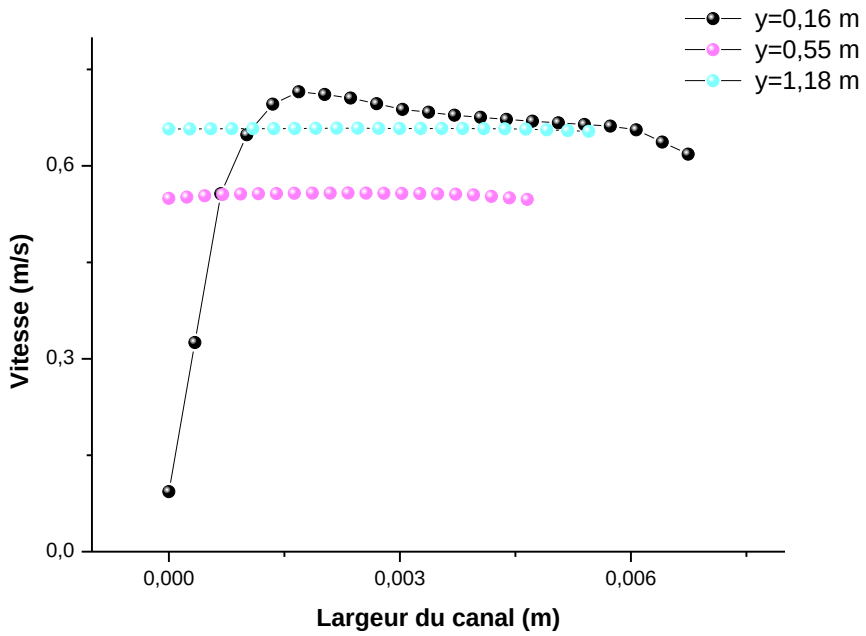


Figure IV.4 : La variation du profil de vitesse.

D'après la figure on observe deux sous profils de vitesse ; une vitesse nulle près des parois d'une part et d'autre part une vitesse maximale au niveau de l'axe central.

III. Les profils dans un milieu fluide avec encrassement et avec la présence de quatre déflecteurs coté lait

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 et quatre déflecteurs est représentée sur la figure IV.5 et ce pour différentes positions dans le canal (y).

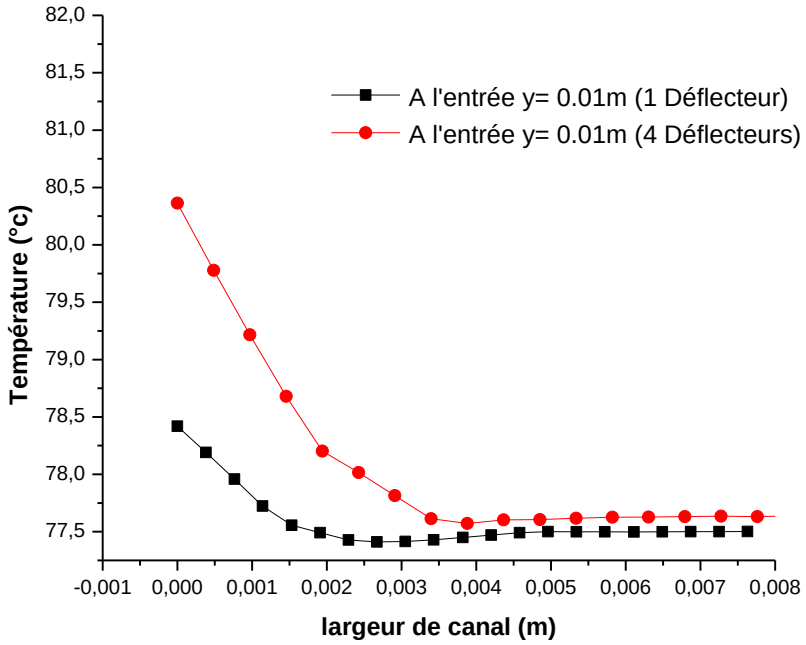


Figure IV.5 : La variation de la température.

On remarque toujours une augmentation de la température dans le cas d'un canal avec encrassement et avec la présence des quatre déflecteurs, plus de déflecteurs favorise une meilleure turbulence et donc un meilleur échange thermique.

III.2. Profil de la vitesse

L'évolution du profil de la vitesse en fonction de la largeur du canal en présence de l'encrassement et avec quatre déflecteurs est représentée sur la figure IV.6 et ce pour différentes positions dans le canal (y).

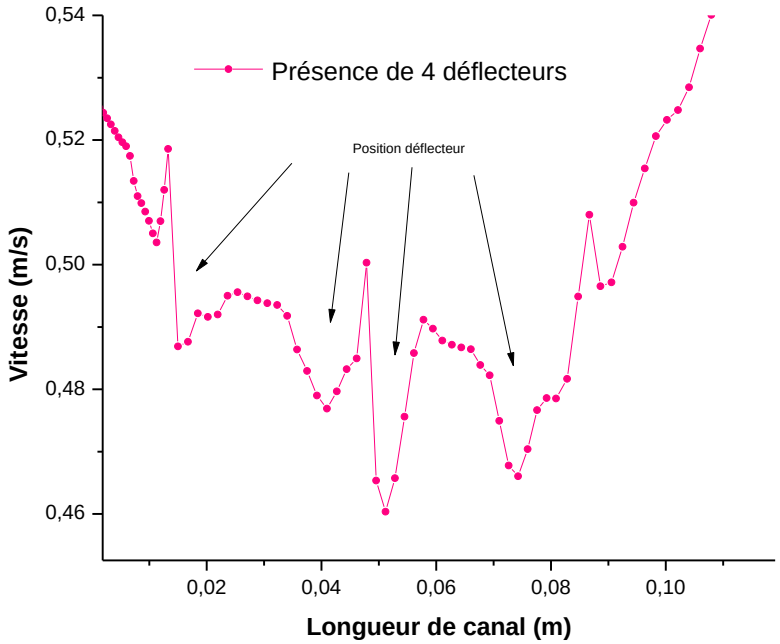


Figure IV.6 : La variation du profil de la vitesse.

On observe une diminution de la vitesse au niveau de chaque déflecteur qui intervient comme un obstacle, puis la vitesse augmente.

IV. Les profils dans un milieu fluide avec encrassement et avec la présence d'un déflecteur cercle côté lait

IV.1. Profil de la température

L'évolution du profil de la température en fonction de la largeur du canal en présence de l'encrassement et avec un déflecteur cercle est représentée sur la figure IV.7.

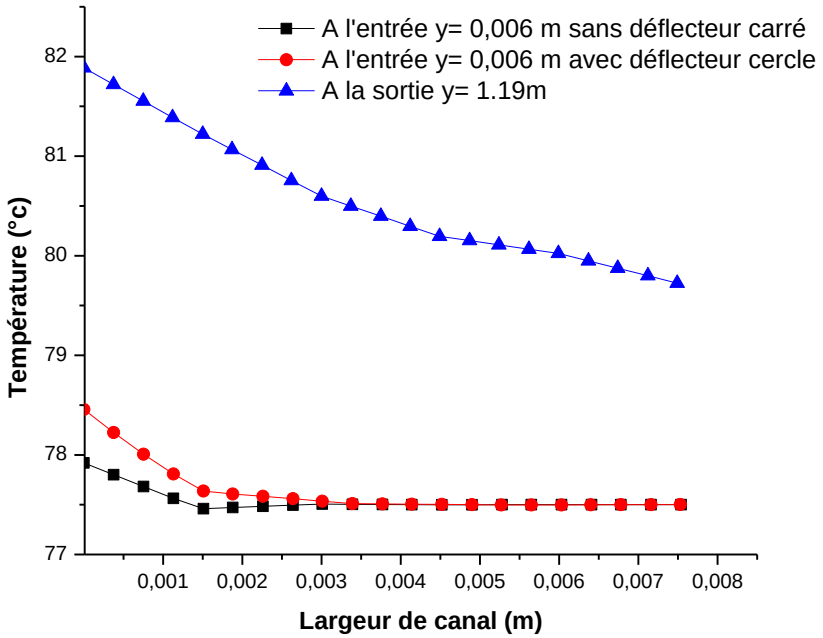


Figure IV.7 : La variation de la température.

D'après la lecture de la figure on constate une augmentation de la température en présence d'un déflecteur cercle qui donne une turbulence supplémentaire par rapport au déflecteur carré donc un meilleur échange thermique.

IV.2. Profil de la vitesse

L'évolution du profil de la vitesse en fonction de la longueur du canal en présence de l'encrassement est représentée sur la figure IV.8.

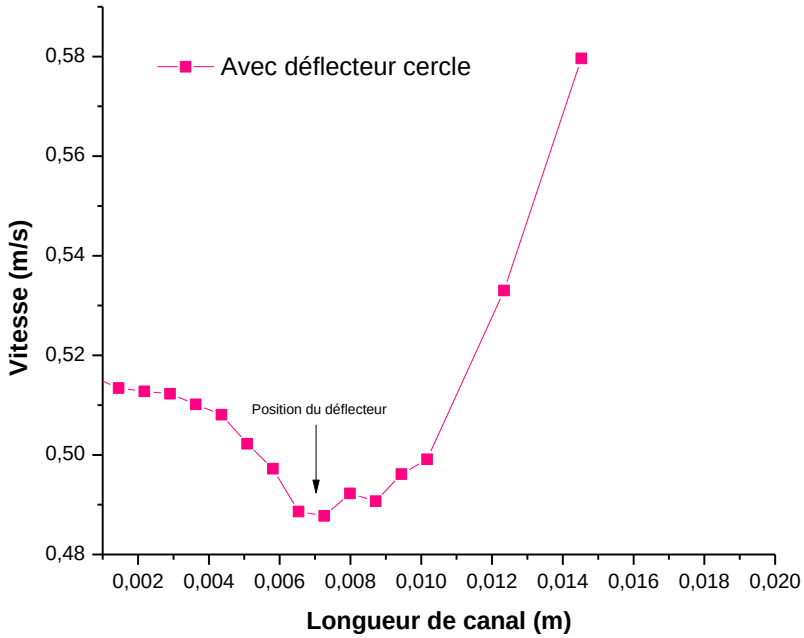


Figure IV.8 : La variation de la vitesse.

D'après la figure en observe une augmentation de la vitesse après le déflecteur cercle. Ceci s'explique car ce dernier intervient comme un obstacle d'où une chute de la vitesse à son niveau.

V. Les profils dans un milieu fluide avec encrassement et avec la présence de deux déflecteurs cercles côté lait

V.1. Profil de la température

L'évolution du profil de la température en fonction de la largeur du canal en présence de l'encrassement et deux déflecteurs est représentée sur la figure IV.9.

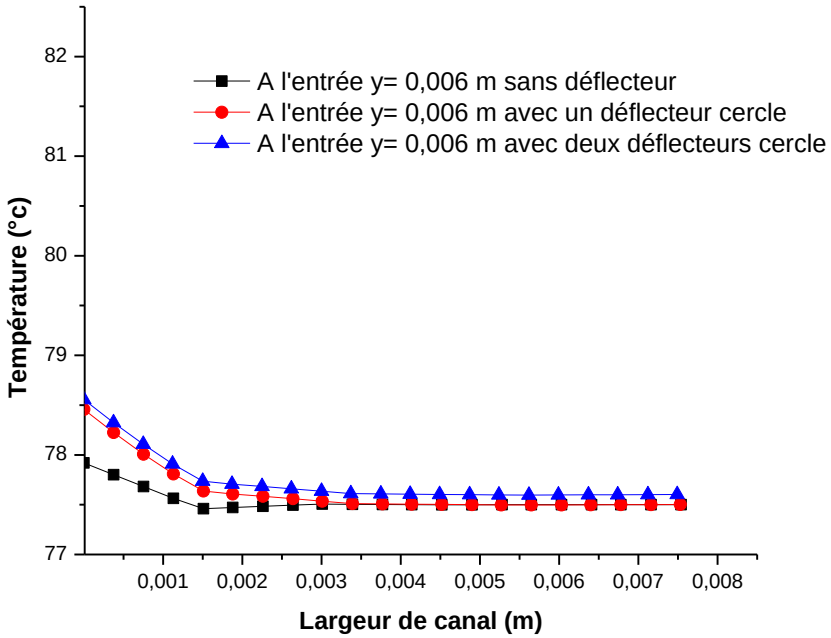


Figure IV.9 : La variation de la température.

La figure montre la présence de deux sous profiles de températures. On constate que la température est constante pour toutes les situations avant le déflecteur s'il y a lieu. Après le premier déflecteur, la température augmente et augmente encore plus avec le deuxième déflecteur même s'il s'agit d'une légère augmentation car le déflecteur apporte une turbulence meilleure donc un meilleur échange thermique.

V.2. Profil de la vitesse

L'évolution du profil de la vitesse en fonction de la longueur du canal en présence de l'encrassement et avec deux déflecteurs est représentée sur la figure IV.10.

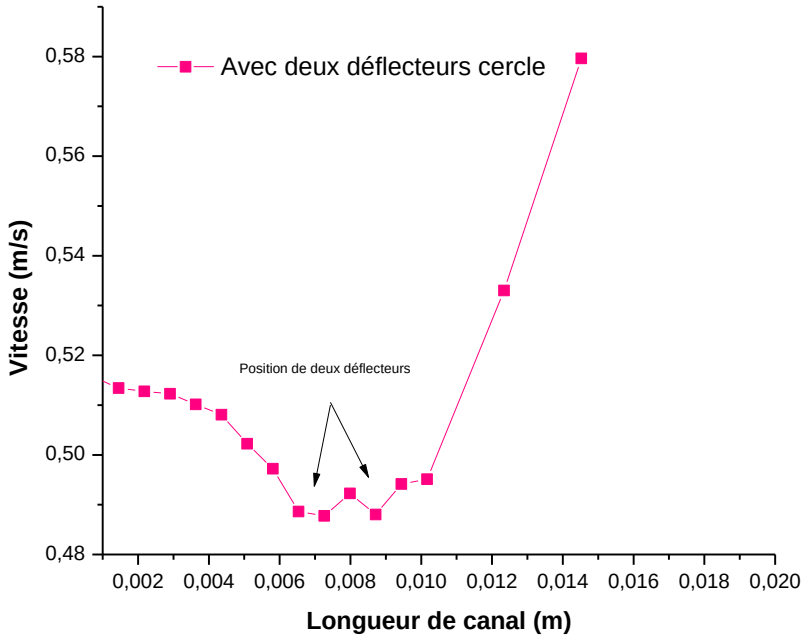


Figure IV.10 : La variation du profil de la vitesse.

La figure montre que la présence du déflecteur cercle donne une turbulence supplémentaire. Après le déflecteur une augmentation de la vitesse est observée.

VI. Etude comparative entre milieu fluide avec encrassement et avec la présence de plusieurs déflecteurs côté lait : Profil de température

La figure IV.11 présente une comparaison de la variation du profil de température en fonction de la largeur de canal avec encrassement et avec la présence de plusieurs déflecteurs côté lait. Une comparaison est faite également avec un profil sans déflecteur sur le même graphique.

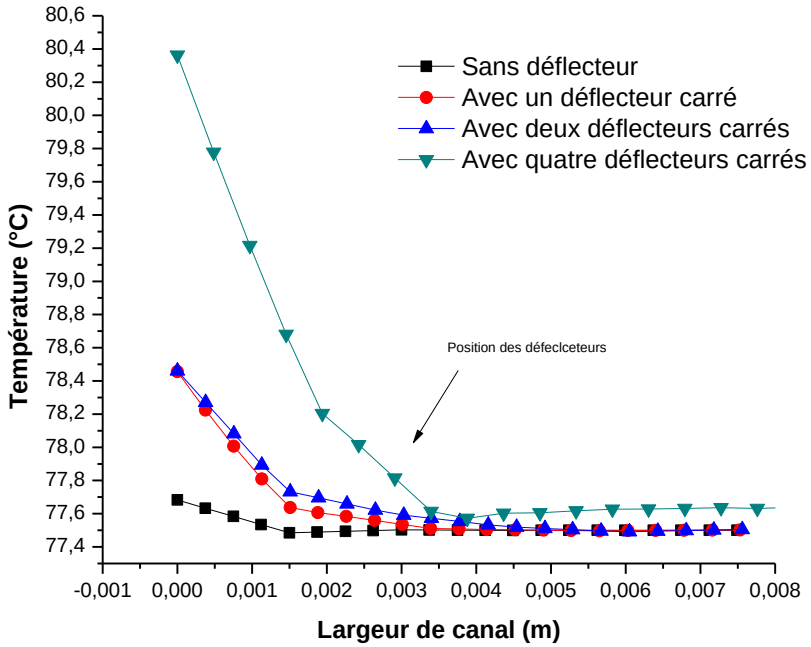


Figure IV.11 : La variation de la température.

On constate que la présence de plusieurs déflecteurs donne une augmentation de la température qui est bien déterminée pour une même position donnée car le déflecteur apporte une meilleure turbulence donc un meilleur échange thermique.

VII. Etude comparative dans le milieu fluide avec encrassement et avec un déflecteur carré et un déflecteur cercle côté lait : Profil de la température

La figure IV.12 présente une comparaison de la variation du profil de température en fonction de largeur de canal avec encrassement et avec un déflecteur carré et un déflecteur cercle côté lait.

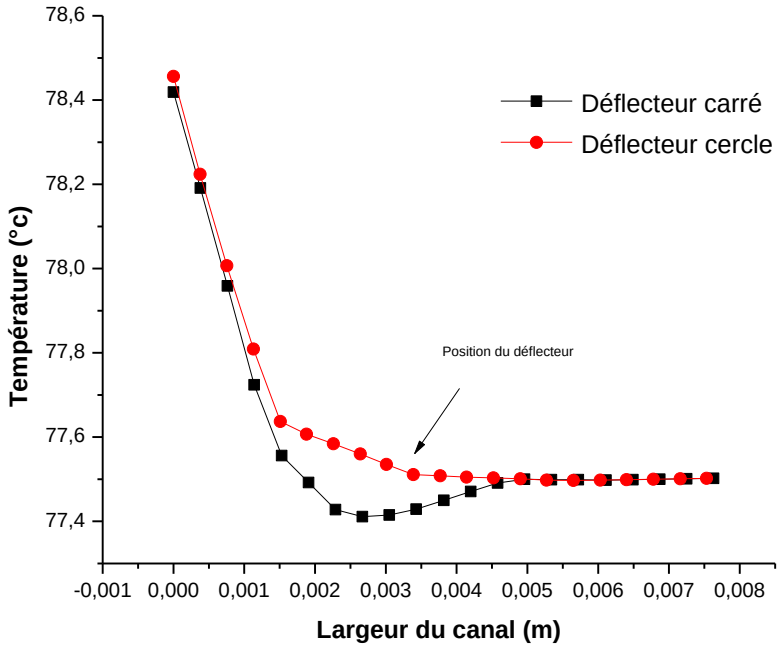


Figure IV.12 : La variation de la température.

D'après la figure on remarque que la présence de déflecteur cercle donne une meilleure augmentation de la température par rapport le déflecteur carré pour une même position.

VIII. Etude comparative dans le milieu fluide avec encrassement et avec des déflecteurs carrés et deux déflecteurs cercle côté lait : Profil de température

La figure IV.13 présente la variation du profil de température en fonction de largeur de canal avec encrassement et avec quatre déflecteurs carrés et deux déflecteurs cercle côté lait.

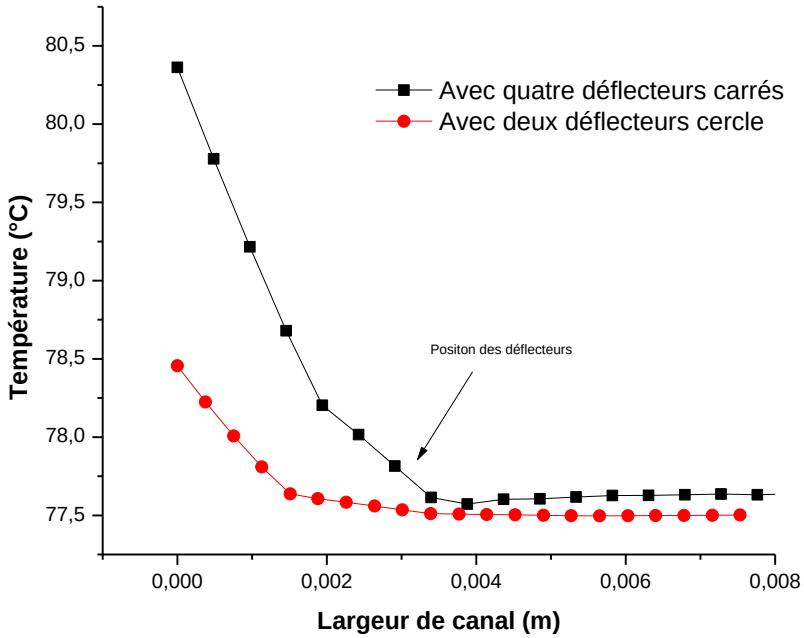


Figure IV.13 : la variation de la température.

D'après la figure on remarque une meilleure augmentation de la température avec la présence de quatre déflecteurs pour une position bien déterminée.

Conclusion Générale

Dans le cadre du présent travail, on s'est proposé de présenter une formulation du problème d'encrassement des échangeurs de chaleur à plaques avec la présence et l'absence des déflecteurs lors d'une phase de traitement thermique d'une solution protéique. La modélisation mathématique d'un système d'échangeurs de chaleur à plaques faisant suite à un encrassement par la solution protéique est présentée en utilisant un modèle dynamique de l'écoulement du fluide.

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

L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement thermique de deux écoulements dans un échangeur de chaleur à plaques dans le cas simple et avec des déflecteurs dans la veine d'écoulement des fluides. On utilise le logiciel (Ansys Fluent) pour simuler numériquement.

En générale, et après l'analyses des résultats numériques de l'étude de l'encrassement des échangeurs de chaleur à plaques, les résultats obtenus montrent que :

- Sur le plan numérique, pour avoir de bons résultats convergents, il faut choisir le maillage qui convient à la configuration étudié.
- La quantité de la chaleur échangée entre les deux fluides (eau et la solution protéique) est meilleure avec les déflecteurs cercles que les déflecteurs carrés.
- Plus le nombre de déflecteur augmente plus l'échange thermique entre la paroi et le fluide est meilleure donc une meilleure augmentation de la température.
- Le déflecteur joue un rôle d'obstacle d'où une chute de la vitesse à son emplacement. Il donne par contre une turbulence supplémentaire donc un meilleur échange thermique.

- La forme d'un déflecteur cercle donne une meilleure turbulence par rapport à un déflecteur carrée.
- En perspective nous proposant que la suite de ce travail de mémoire serait dirigée vers les études de la simulation à trois dimensions de la totalité des échangeurs.

[1] : J. M. Clément ; Larousse agricole ; Editeur : Paris Larousse, 2002.

[2] : Deforges J., Derens E., Rosset R. et Serrand M. ; Maitrise de la chaine du froid des Produits laitiers réfrigérés ; Edition Cemagraf Tec et Doc, Paris ; 1999.

[3] : S. Pougheon, J. Goursaud ; Le lait caractéristiques physicochimique in DEBRYG, Lait, Nutrition et Santé ; Paris : pages 6, 2001.

[4] : http://theses.ulaval.ca /Archimède /fichiers /205166/ch02.html. ; 2020.

[5] : Walstra P., Geurts T.J., Noomen A., Jellma A., Van Bockel ; M.A.J.S. Dairy technology-pricipales of milk properties and processes [En ligne]. MERCEL DEKKER, INC. [s1] : P.Walstra, J.T.M wouters and T.J. Geurts ; 2006.753 ; 2018.

[6] : Lankveld JMG ; protein standaridzed milk produits, compostion and properties –IDF Brussels 70-85 ; 1995.

[7] : Lenoir J.; Les caséines du lait. RLF, 440: 17-23; 1985.

[8] : Bylund G.; Dairy processing handbook-Tetra pak processing systems AB S-221 86; Lund, Sweden: 18-23-381; 1995.

[9] : Eigle WN, Buther JE, Enrnstrom CA et al.; Nomenclature of proteins of cow’s milk: fifth revision; 1984.

[10] : Vignola C.L. ; Science et technologie du lait –Transformation du lait ; École polytechnique de Montréal, ISBN : 29-34 ; 2002.

[11] : Debry G. ; Lait, nutrition et santé ; Tec et Doc, Paris ; 21 ; 2002.

[12] : Thapon J.L. ; Science et technologie du lait, Agrocampus - Rennes, France : 14 ; 2005.

[13] : Brunner J. ; Cow milk proteins : twenty five years of progress; J dairy Sci, 1981,64 : 1038-1054; InPOUGHEON S. ; Contribution à l'étude des variations de la composition du lait et ses conséquences en technologie laitière thèse pour obtenir le grade de docteur vétérinaire, Ecole Nationale Vétérinaire Toulouse, France : 31 ; 102 ; 1984.

[14] : Neville M.C et Jensen R.G.; The physical properties of humain and bovine milks In JENSEN R.; Handbook of milk composition-General description of milks; Academic Press, Inc. : 82; 919 PAGES; 1995.

[15] : Jean C.et Dijon C. ; Au fil du lait ; ISBN 2-86621-172-3 ; 1993.

[16] : Linden G et Lorient D. ; Biochimie agro-alimentaire : Valorisation alimentaire 1994.

[17] : Bordjah A. ; Analyse physico-chimique et microbiologie de lait UHT demi écrémé, centre de formation professionnelle EL Hidhab Sétif Algérie-BTS en contrôle de qualité dans les industries, 2011.

[18] : Allain, A.-F. Étude des relations entre les propriétés structurales et rhéologiques de la β-lactoglobuline. Université Laval, Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation, Mémoire de maîtrise, 1998.

[19] : Filion, M.-M. ; Amélioration de la stabilité thermique du lait par modulation du potentiel d'oxydoréduction. Université Laval ; Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation, Mémoire de maîtrise ; 2006.

[20] : Diarrassouba, F., Remondetto, G. , Liang, L. , Garrait, G. , Beyssac E., Subirade; Effects of gastrointestinal pH conditions on the stability of the β-lactoglobulin/ vitamin D3 complex and on the solubility of vitamin D3. Food Res. Inter.; 52, 515-521; 20013.

[21] : Taulier, N., Chalikian, T. V.; Characterization of pH-induced transitions of βlactoglobulin : Ultrasonic, densimetric and spectroscopic studies; J. Mol. Biol.; 314; 873-889; 2001.

[22] : Urista, C. M., Fernandez, R. A. , Rodriguez, F. R. , Cuenca, A. A. , Jurado, A. T. ; Review: Production and functionality of active peptides from milk ; Food Sci. Technol. Int.; 17, 293-317; 2011.

[23] : Creusot, N. , Gruppen, H.; Hydrolysis of whey protein isolate with Bacillus licheniformis protease : Fractionation and identification of aggregating peptides ; J. of Agr. Food Chem.; 55; 9241-9250; 2007.

[24] : Pouliot Y., Guy M.-M. , Tremblay M., Gaonac'h A-C. , Bertrand C. P. T., Gauthier S. F., Voyer N.; Isolation and characterization of an

aggregating peptide from a tryptic hydrolysate of whey proteins; J. of Agr. Food Chem.; 75; 3760-3764; 2009.

[25] : Hambling S. G., MC. Alpine A. S., Sawyer L; β-lactoglobulin; In : Adv. Dairy Cbm london and New York : Elsevier Applied Science; P.141-190; 1992.

[26]: Mulvihill D.M., Donovan M.; Whey proteins and Their Thermal Denaturation A Review; Ir.J. Foood Sci. Tecbnol.; Vol. 11; n°1; p.43-75; 1987.

[27]: Lalande M., Rene F. « Fouling by Milk and Dairy product and cleaning of Heat Exchange Surface ». In: Melo LF, Bott TR,Bernardo CA (éd). Fouling Sci. Tecbnol. [En ligne]. Dordrecht : Springer Netherlands, 1988. p. 557-573.Disponible sur :<https : //doi.org /10.1007/978-94-009-2813-8_36 > ISBN ; 978-94-009-2813-8 (Consulté le 18 octobre 2018).

[28] : Havea P., Singh H., Creamer L.K.; Charactérisation of heat induced aggregates of β-lactoglobulin, α-lactalbumin and bovine serum albumin in a whey protein concentrate environment; J. Dairy Res. [En ligne] ; Vol. 68, n°3;483-497; 2001.

[29] : Casal H. L., Kohler U., Mantsch H. H.; Structural and conformational changes of β-lactoglobulin B: an infrared spectroscopie study of the effect of pH and temperature; Biochim-Biopbys. Acta BBA – Protein Struct. Mol Enzymol. [En ligne] ; Vol.957, n°1, p. 11-20 ; 1988.

[30] : Labouré H., Cases E., Cayot P.; Heat induced β-lactoglobulin polymerization: role of the change in meduim permittivity; Food Cbem. ; Vol.85, n°, p. 399-406; 2004.

[31] : Ribadeau-Dumaq B., Grappin R. ; Milk protein analysis ; Le lait ; Vol 69, n°5, p. 357-416 ; 1989.

[32] : Leuliet J.-C. ; Comportements hydraulique et thermique des échangeurs à plaques traitant des produits non-Newtoniens ; Thèse de doctorat. France: University de Nancy; 1988.

[33] : Wijayanti H. B., Brodkorb A., Hogan S. A., Murphy E., G.; Chapter 6- Thermal Denaturation, Aggregation, and Methods of Prevention ; In : Deeth HC, Bansal N (éd). Why protéines ; 978 ; 2019.

[34] : Guy, M.-M. ; Caractérisation des interactions moléculaires menant à l'auto-assemblage du peptide β-lg f1-8 ; Université Laval ; Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation ; Mémoire de maîtrise ; 2011.

[35] : Guy M.-M. , Tremblay M.; Voyer N., Gauthier S. F., Pouliot Y.; Formation and stability of nanofibers from a milk-derived peptide; J. of Agr. Food Chem; 59, 720-726; 2011.

[36] : Erabit N., Flick D., Alvarez G.; Formattion of béta-lactoglobulin aggregates during thermomicanical treatments under controlled shear and temperature conditions; J.Food Eng. ; 2013.

[37] : Petit J., Herbig A. L., Moreau A., Deplace G. ; Influence of calcium on béta-lactoglobulin denRRaturation kinitics : Implications in unfolding and aggrigation mecanisms; J.Dairy Sci.; n°12, p.5794-5810; 2011.

[38] : Wijayanti H. B., Bansal N., Deeth H. C.; Stability of Whey protiens during thermal processing ; A Review; Compr.Rev.Food Sci.Food Saf.; p,1235-1251; 2014.

[39] : Tolkach A., Kulozik U.; Reaction kinetic pathway of reversible and irreversible thermal denaturation of béta-lactoglobulin; 87, n°4-5; P 301-315; 2007.

[40] : Boxler C.; Fouling by milk cinstituants and cleaning of modified surfaces; These de doctorat; Braunschweig,Germany : Flkultat fur Maschinenbau, Technischen Universitat Calorowilhelmina , 2014.

[41] : Galani D., Apenten R.K.O.; The Comparative Heat Stability of Bovine β-lactoglobulin in Buffer and Complex Media; J.Sci.Food Agnic.; Vol.74, n°1; p89-98; 1997.

[42] : Oldfield D.J., Singh H., Taylor M. W.; kinitics of heat induced why protein denaturation and aggregation in skin milks with adjusted why protein concentration; J.Dairy Res.; p 369-378; 2005.

[43] : Croguennec T., O'kennody B. T., Mehra R.,; Heat-induced denaturation / aggregation of β-lactoglobulin Aand B : kenitics of the first intermidiates formed ; Int. Dairy J. ; Vol.14,n°5 ; p.399-409 ; 2004.

[44] : Verheul M., Pederson J. S., Roefs S. P.F. M., Kruif K. G .De. ; Association behavior native β-lactoglobulin ; Bioplymers ; Vol.49,n°1, 11-20 ; 1990.

[45] : De Wit J.N.; Thermal Stability and Fonctionality of Why Protiens; J. Dairy Sci.; Vol.73, n°12; p.3602-3612; 1990.

[46] : Oldfield D.J., Singh H., Taylor M.W., Pearce K.N.; Heat-induced interaction of β-lactoglobulin and α-lactalbumin with the casein micelle in pH –adjusted skim milk; Int. Dairy J.; Vol.10,n°8 ; p.509-518 ; 2000.

[47] : De la Fuente M.A., Singh H., Hemar Y.; Recent advances in characterisation of heat-induced aggregates and intermediates of Why Protiens; Trends Food Sci.Tecbnol.; Vol.13; n°8; p.262-274; 2002.

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

[49] : C. Marvill, A. Bontemps, A. Garrigue, J. Huetz, C. Goubier, R. Vidil ; Echangeurs de Chaleur ; Problèmes de fonctionnement ; Techniques de l'ingénieur 1995.

[50] : L. Parez, développement, étude de performances et intégration de sondes thermiques pour la caractérisation de l'encrassement d'échangeurs tubulaires à courants croisés ; thèse doctorat école nationale supérieure d'arts et métier ; Bordeaux France, 2003.

[51] : A. Bontemps ; Echangeur de chaleur ; Université joseph Fourier ; institut universitaire de Technologie ; Département Génie thermique et énergie ; 1994.

[52] : P. Tobaly ; cours sur les échangeurs de Chaleur ; site de Pascal Tobaly ; 2002.

[53] : Y. Jannot ; cours de transfert Thermique ; Ecole des Mines Nancy France ; 2003.

[54] : WIKIPEDIA Echangeur de chaleur ; 2012.

[55] : A. Bontemps, A. Garrigue, C. Goubier, J. Huetz, C. Marvillet, P. Mercier, R. Vidil ; Description des échangeurs ; Technique de l'ingénieur [B 2 341], 2016.

[56] : Mahdi Y, Oufer L. ; Simulation numérique de l'encrassement des échangeurs des chaleurs à plaque lors d'une phase de pasteurisation ; VLLème Colloque Interuniversitaire Franco-québécois sur la thermique des systèmes ; Saint-Malo France ; 23-25 mai 2005.

[57] : Yves J, Généralité sur les transferts de chaleur, 2012.

[58] : C. Maville, M. Manificata, N. Berrada, C. Weber ; Book TOME 1, op; cit; 2014,

[59] : A. Bontemps, A. Guarrigue, C. Goubier, J. Huetz, C. Marvillet, P. Mercier, R. Vidil, Echangeurs ; op.cit- H. Demasles, P. Mercier, P.

Tochon, Guide de l'encrassement des échangeurs de chaleur ; Editions GRETH- ISBN ; 2-9502555-5-8 ; 2007.

[60]: Shah R.K.; Fundamentals of heat exchanger design; John Wiley& Sons; 2003.

[61] :http://www,normag-glas.de/fr/katalogneu/prozess/FR-6-WARMEUBRTAGER-PE-System 140930.pdf; consulté en janvier 2020.

[62] : Sall S ; Introduction général échangeur de chaleur ; Mémoire de fin d'étude ; université Tlemcen Algérie ; pp ,1-2 ; 2014.

[63] : T. Pedot ; Modélisation du couplage thermique entre la combustion et l'encrassement Des tubes d'un four de raffinerie ; Doctorat en Energétique et Transfer, Université de Toulouse France, 2012.

[64] : J.- P. Faux ; transferts thermique, échangeurs de chaleur à plaque et autre types en agroalimentaire thèse ; Université de technologie de Compiègne France ; 2003.

[65] : A. Niaei, J. Towfighi, SM. Sadrameli and R. Karimzadeh; The combined simulation of heat transfert and pyrolysis reactions in industriel cracking furnaces; Applied Engineering; page (14-15) , 2004.

[66] : M. Bennajah et N. Chaouni ; Echangeur de chaleur Technologie ; calcul et design ; page (43-45) ; Mai 2014.

[67] : N. Fadel ; Etude de l'influence de la température du fluide sur la performance d'un échangeur de chaleur de la raffinerie d'Alger, Ingénieur d'état en génie chimique ; Université Houari Boumediene Alger Algérie ; 2010.

[68]: A. Epstein; Thinking about Heat Transfer Fouling: A 5×5 Matrix; Department of chemical engineering; University of British Columbia; p (43 .56); 1983.

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

[70] : Hentabli N, 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 .

[71] : H. Cherif Sadouk, Modélisation de l'encrassement en régime turbulent dans un échangeur de chaleur a plaque avec un revêtement fibreux sur les parois, juin 2009

[72] : Khadîdja TOUATI, Saida RAHICHE, Exploitation et Analyse des Résultats Numérique de l'étude de l'encrassement des échangeurs de chaleur par le lait par un programme ANSYS ,2015/2016, université de Médéa.

[73]: Manual technique de l'installation'''ST.

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

[75]: Chan Y, L, C, L Tien, A numerical study of two –dimensional laminar natural
Convection in shallow open cavities, international journal of heat and mass transfer 28, pp, 603-612 (1985).

[76] : Bouababiche 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 , 2016/2017 , université de Médéa .

[77] : Tabet S, Etude numérique de la convection naturelle dans un enceinte fermée partiellement chauffée, thèse Dr, thermique et mécanique des machines industrielles, Université d'Oran – Algérie, 2017

[78] : Guit M, Loues B, Simulation Numérique de l'impact des gouttelettes de métal creuses sur une surface incliné, Master en génie mécanique, Université Dr, Yahia Farés –Médéa 2103.

[79] : Cheikh Touhami A, calcul des déformations Elastohydrodynamique dans un papier Yahia fares –Médéa 2012.

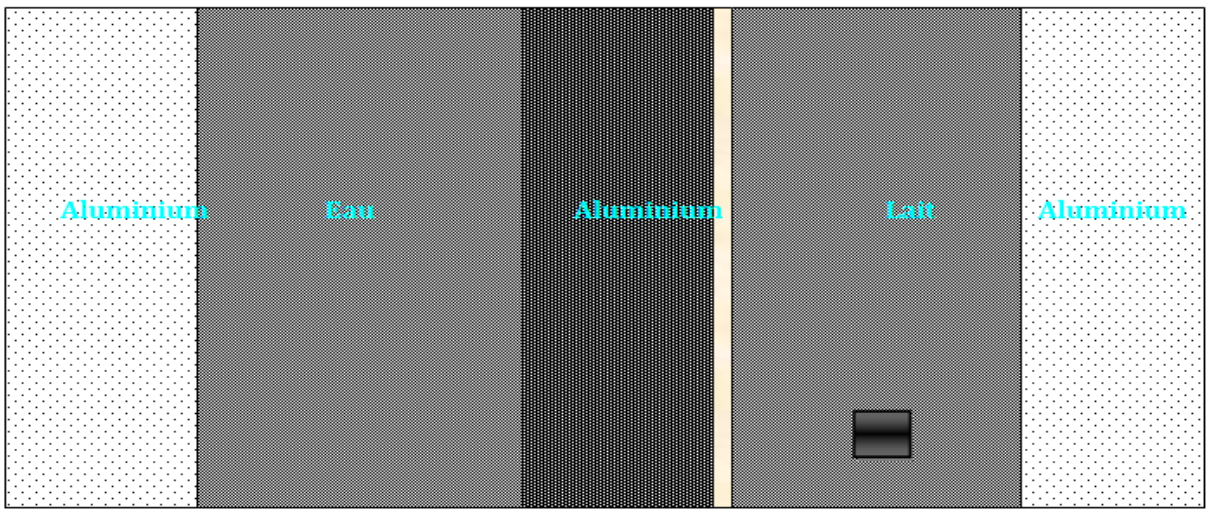
Démentions de l'échangeur à plaque simulé au programme ANSYS à la présence d'un déflecteur coté lait

	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
Carrée N°5	0.02	0.0235	0.021	0.0245

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

Carrée N°1 Carrée N°2 Carrée N°3 Carrée N°4 Carrée N°5

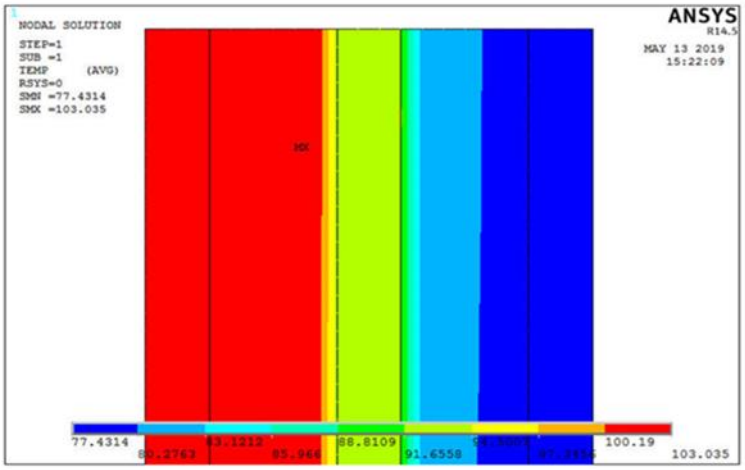
Les propriétés physico-chimiques des matériaux utilisés :

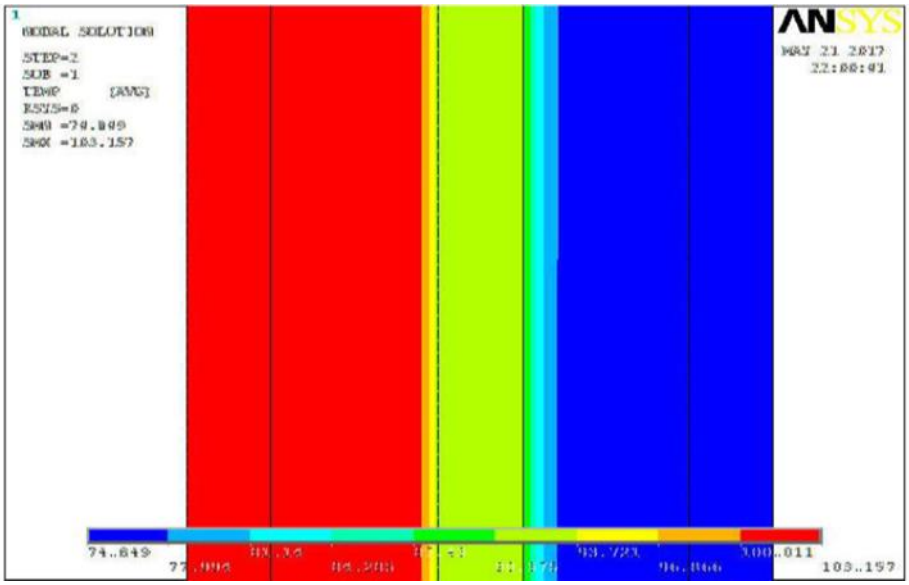
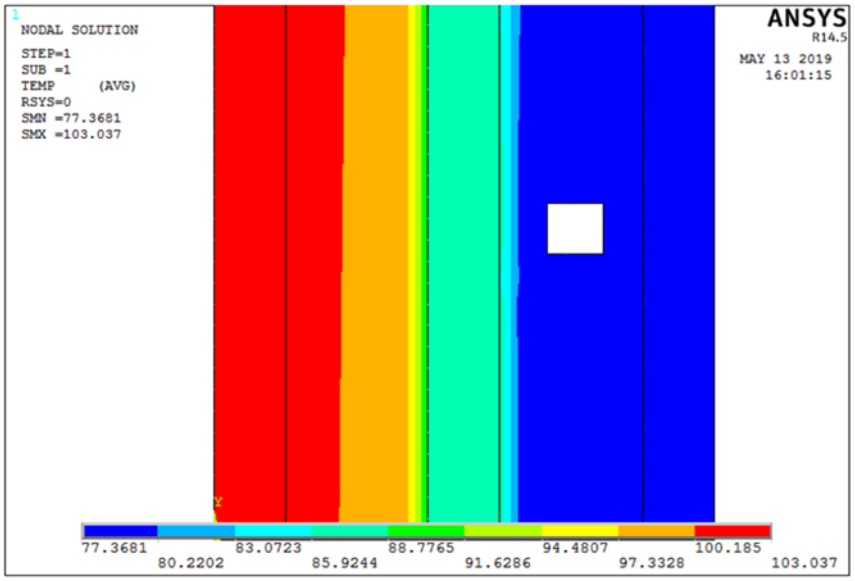
	Paramètre du lait	**Paramètre du l'eau**	**Paramètre d'aluminium**
Chaleur spécifique CP	3912	4037.24	900

Masse volumique		1001.34	983.84	2700
Viscosité		0.000604	0.00033	/
Conductivité		0.642	0.68	237
Condition au limite	**Vitesse**	0.52	-0.52	/
	Température	77.5	103	/
	Pression	0	0	/

I. Les résultats dans un milieu complètement fluide avec la présence de un déflecteur coté lait

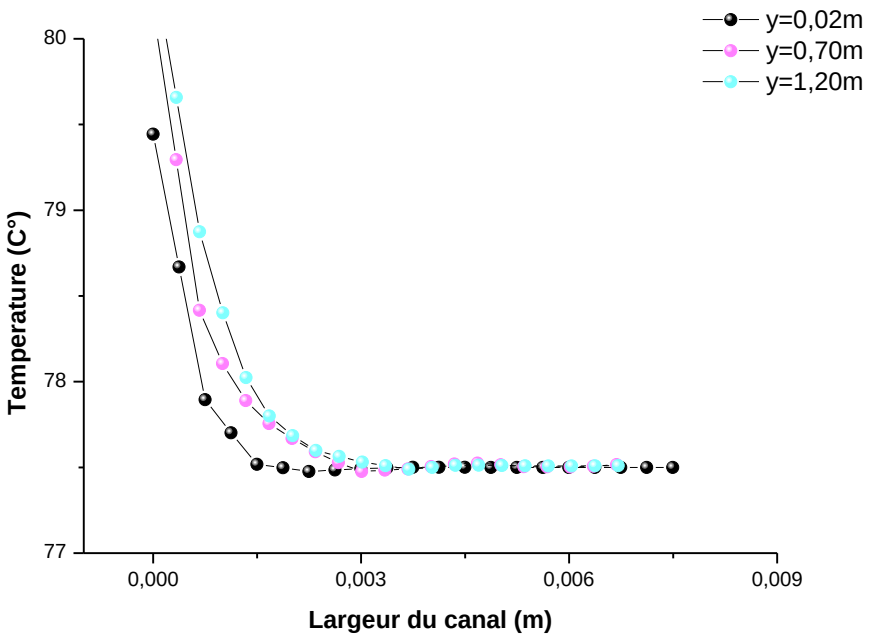
I.1 Profil de température

	Coter eau	**Coter lait**
En haut		

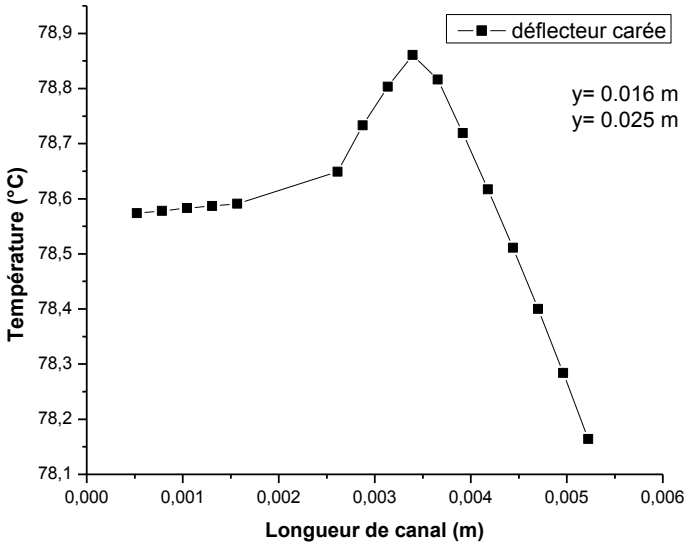
En milieu	
En bas	

La variation de la température à la longue de canal

L'évolution de profil de la température en fonction de la largeur (x) du canal est représentée sur les graphes suivantes et ce pour différentes positions dans la canal (Y) pour lait.

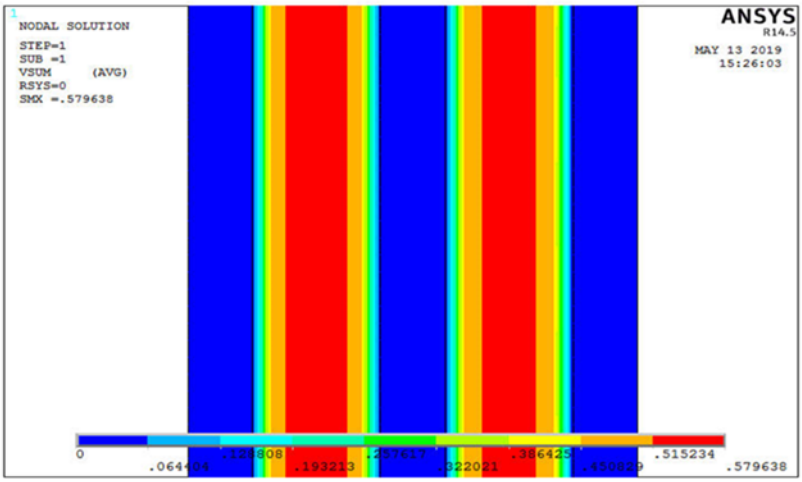
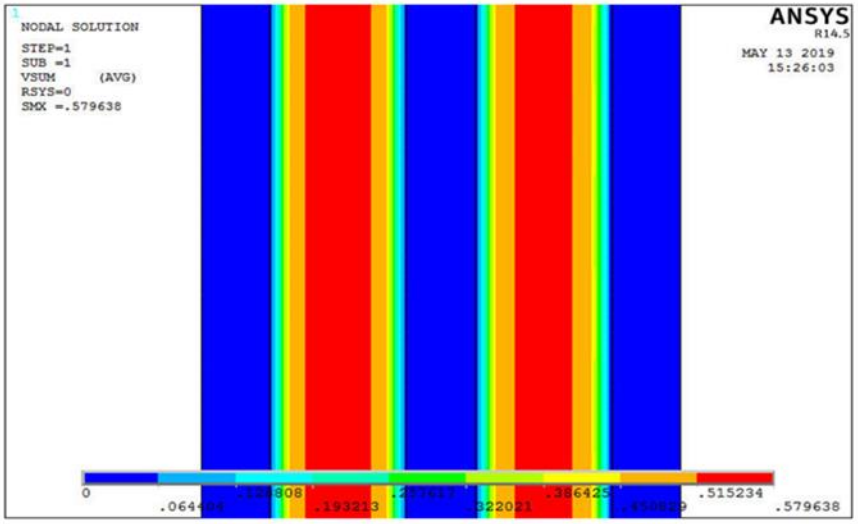
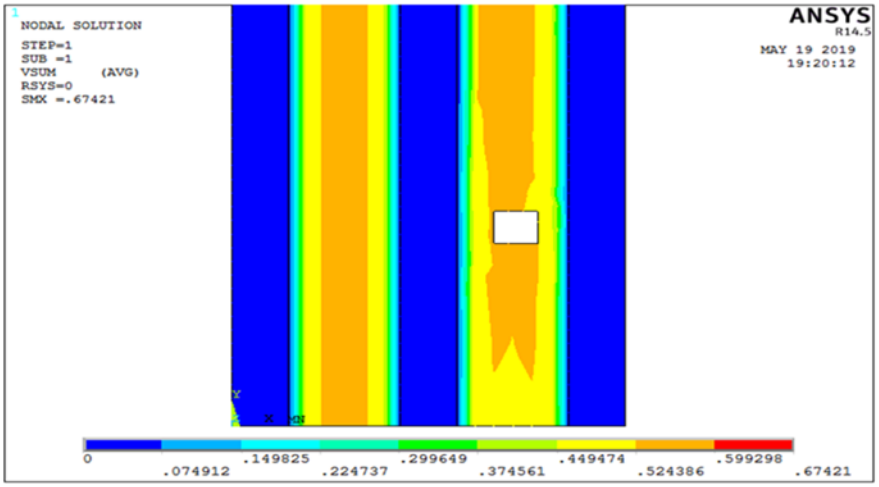


Variation de température de lait (°C) en fonction de largeur de canal (m) en milieu fluide sans encrassement avec un déflecteur.



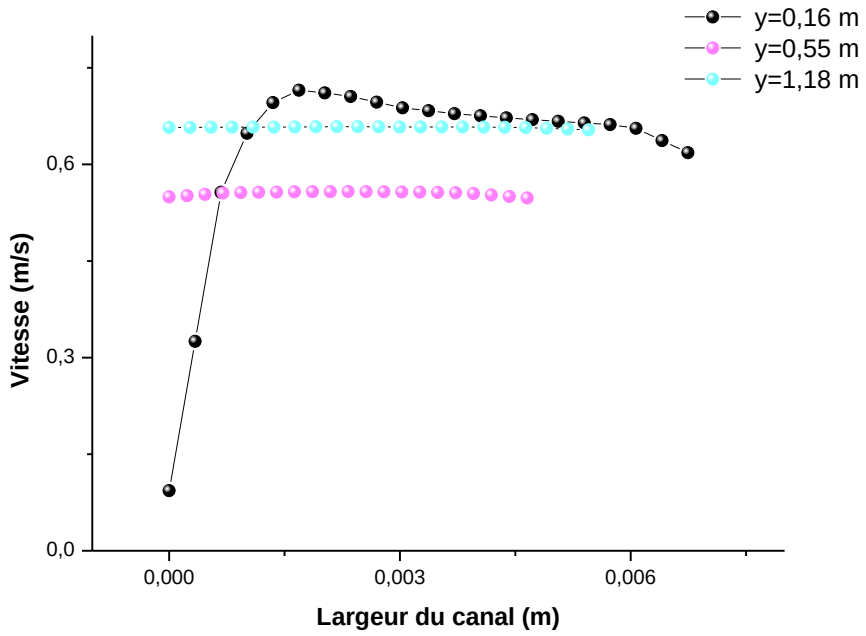
Variation de température de lait (°C) en fonction de largeur de canal (m) en milieu fluide sans encrassement avec un déflecteur.

I.2 Profil de vitesse

	Coté eau	Coté lait
En haut		
En millieu		
En bas		

La Variation de la vitesse à la longue de canal :

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



Variation de vitesse de lait (m/s) en fonction de largeur de canal (m) en différentes positions Y (m)

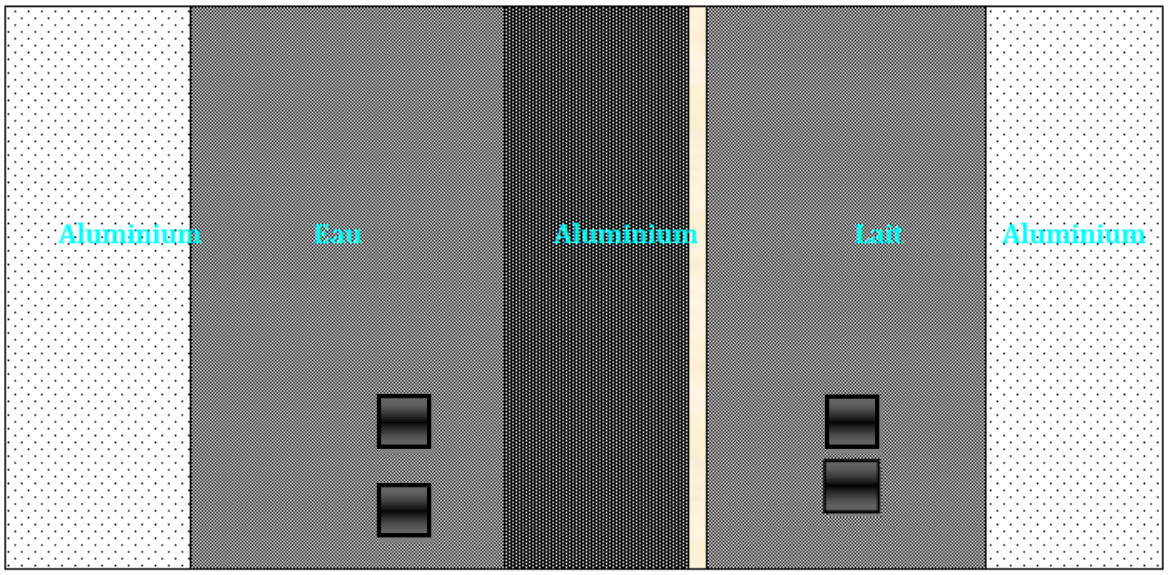
II .Les démentions de l'échangeur à plaque simulé au programme ANSYS avec encrassement à la présence quatre déflecteurs coté lait

	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
Carrée N°5	0.02	0.0235	0.021	0.0245

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) d= 0.035 m (distance entre les déflecteurs)



Y=0(m)

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

Carrée N°1 Carrée N°2 Carrée N°3 Carrée N°4 Carrée N°5

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

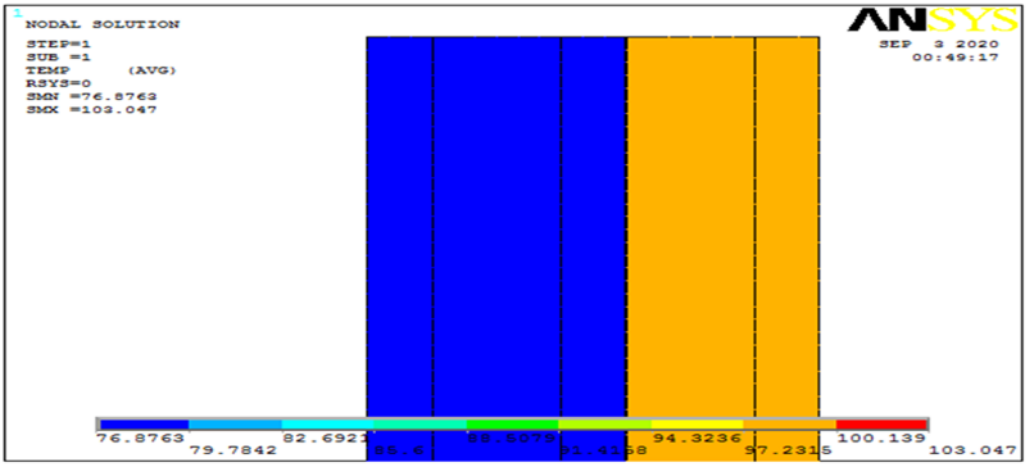
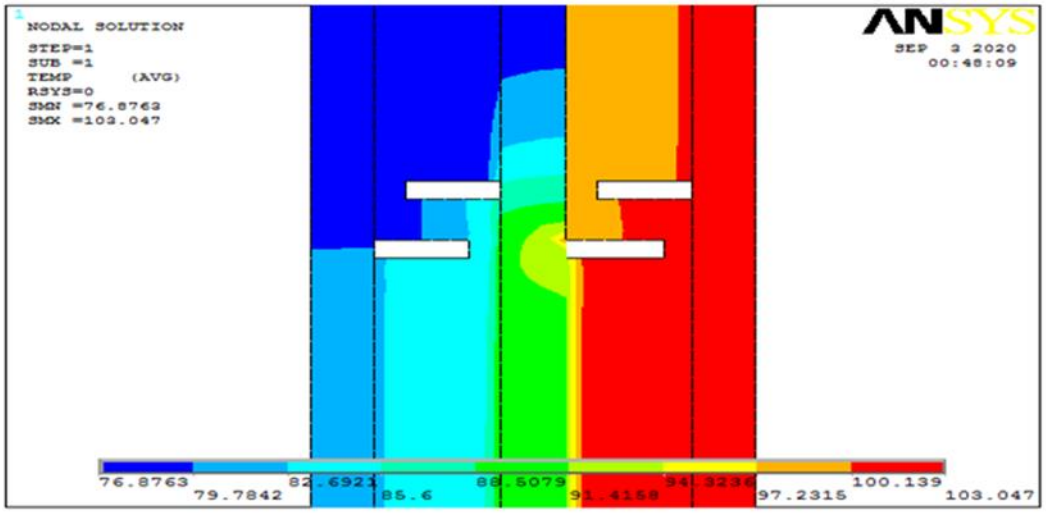
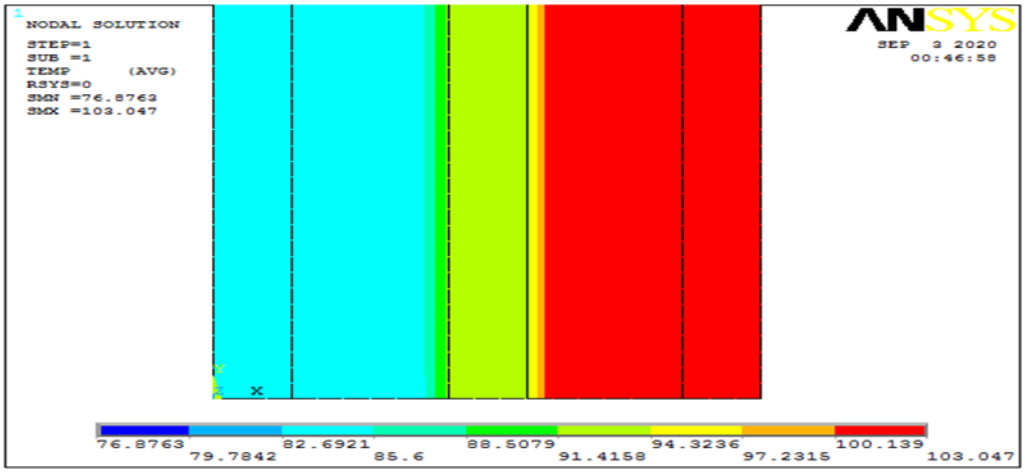
Les propriétés physico-chimiques des matériaux utilisés :

		Paramètre Du lait	Paramètre du l'eau	Paramètre d'aluminium	Paramètre du l'encrassement du lait	
Chaleur spécifique CP		3912	4037.24	900	3192	
Masse volumique		1001.34	983.84	2700	1030	
Viscosité		0.000604	0.00033	/	/	
Conductivité		0.642	0.68	237	K_{xx}	K_{yy}
					0.5	0.53
Condition au limite	**Vitesse**	0.52	-0.52	/	/	
	Température	77.5	103	/	/	
	Pression	0	0	/	/	

II.1 Profil de température

	Coté eau	Coté lait

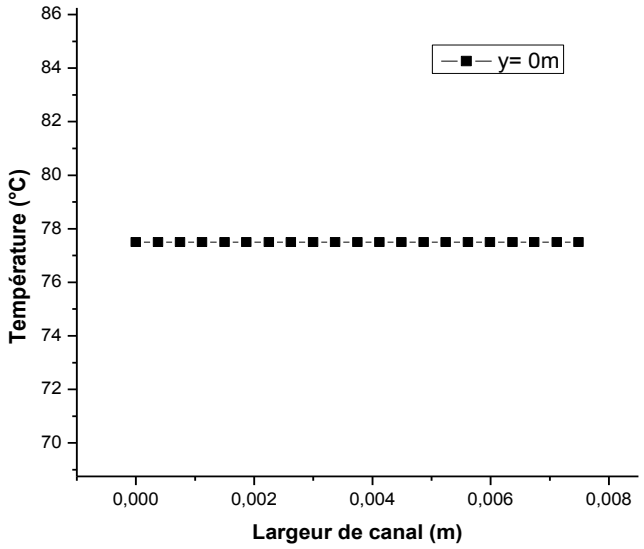
Annexes

En haut	
En milieu	
En bas	

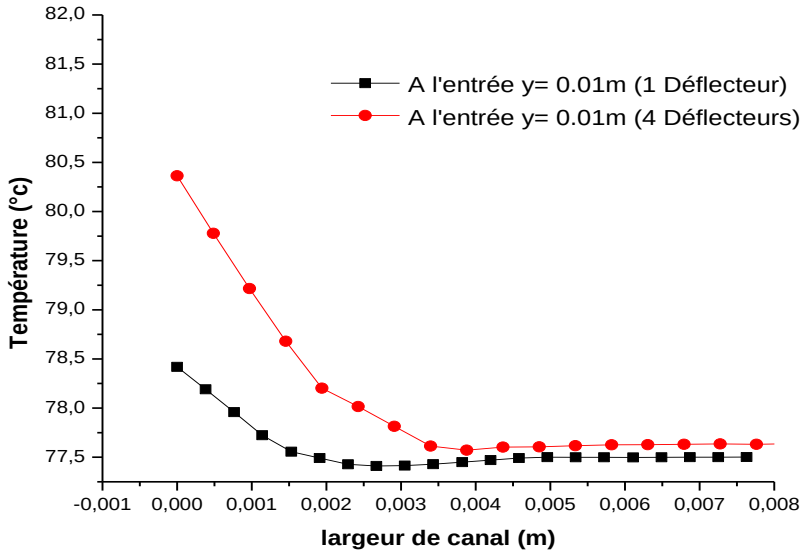
La variation de la température à la longue de canal :

L'évolution du profil de la température en fonction de la largeur (x) est représentée sur les graphes suivantes et ce pour différentes positions dans le canal (Y) pour le lait

Y= 0

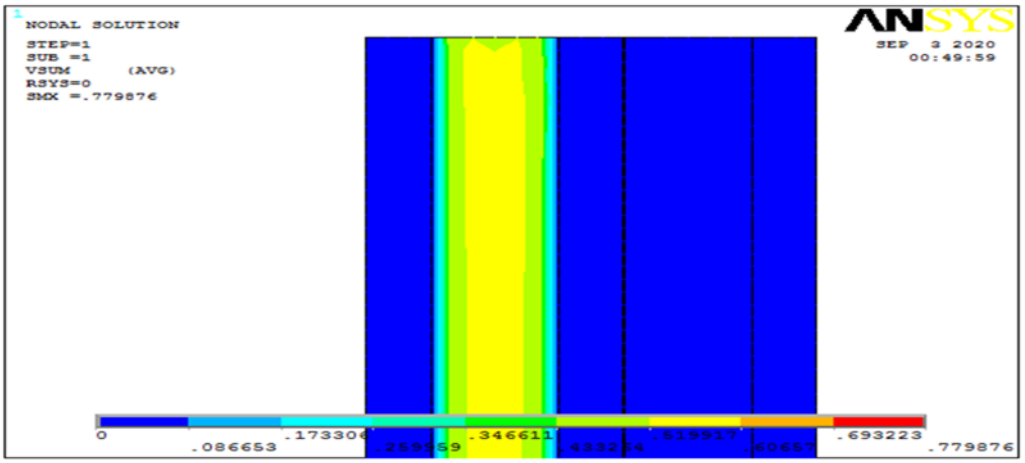
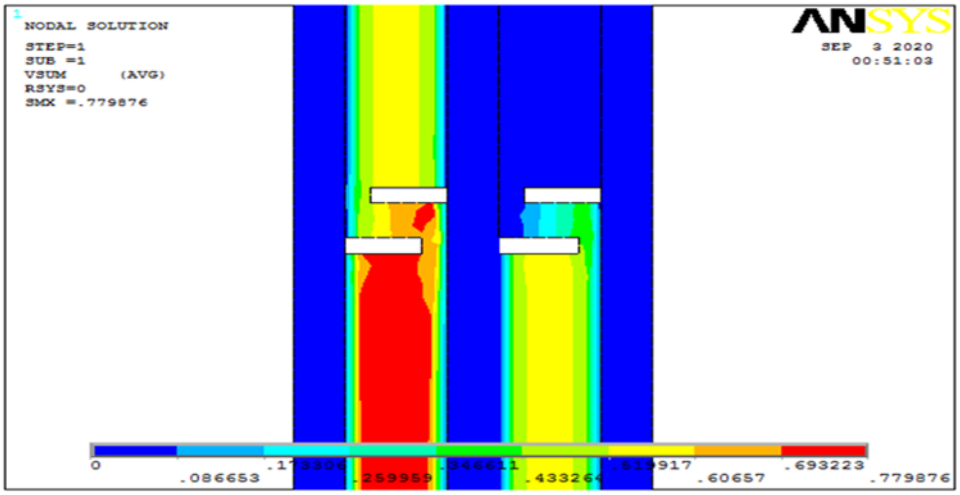
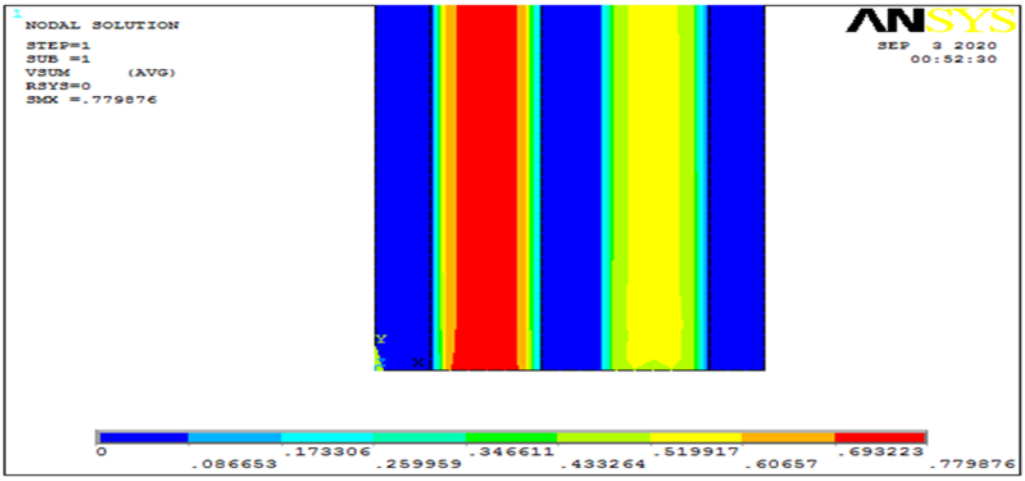


Y= 0.13 m (présences de quatre déflecteurs)



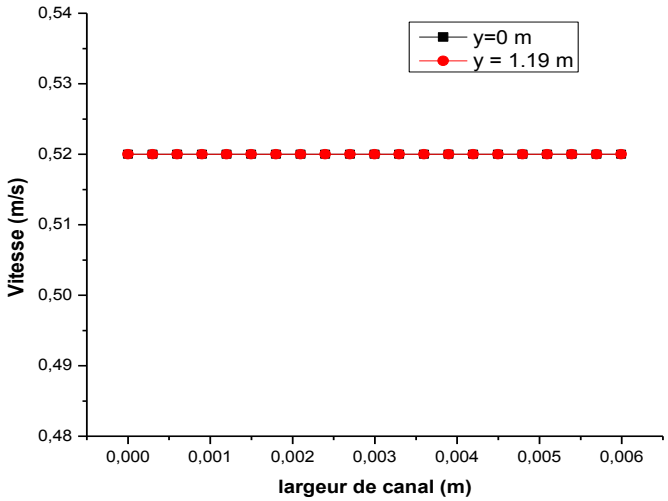
Variation de température de lait (°C) en fonction de largeur de canal (m) en différentes positions Y (m).

II.2. Profil de vitesse

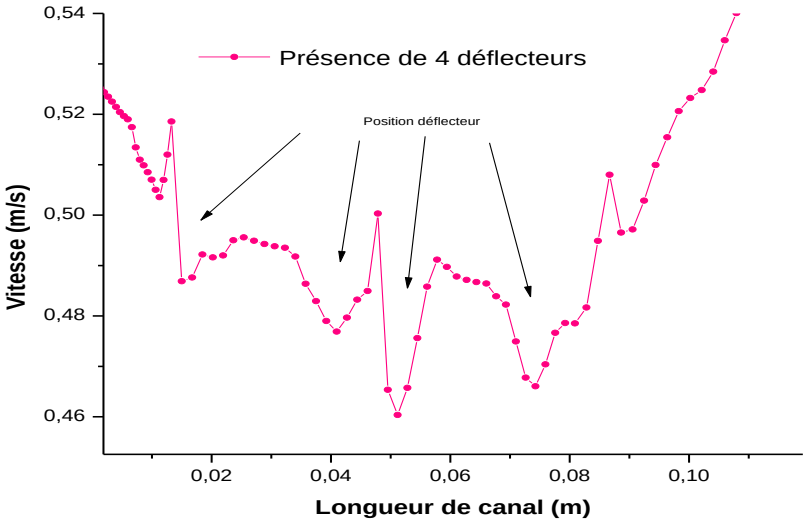
	Coté eau	Coté lait
En haut		
En milieu		
En bas		

La variation de vitesse à la longue de canal :

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.



Variation de vitesse de lait (m/s) en fonction de largeur de canal (m) en différents positions Y(m).



Variation de vitesse de lait (m/s) en fonction de longueur de canal (m) en différentes positions Y(m).

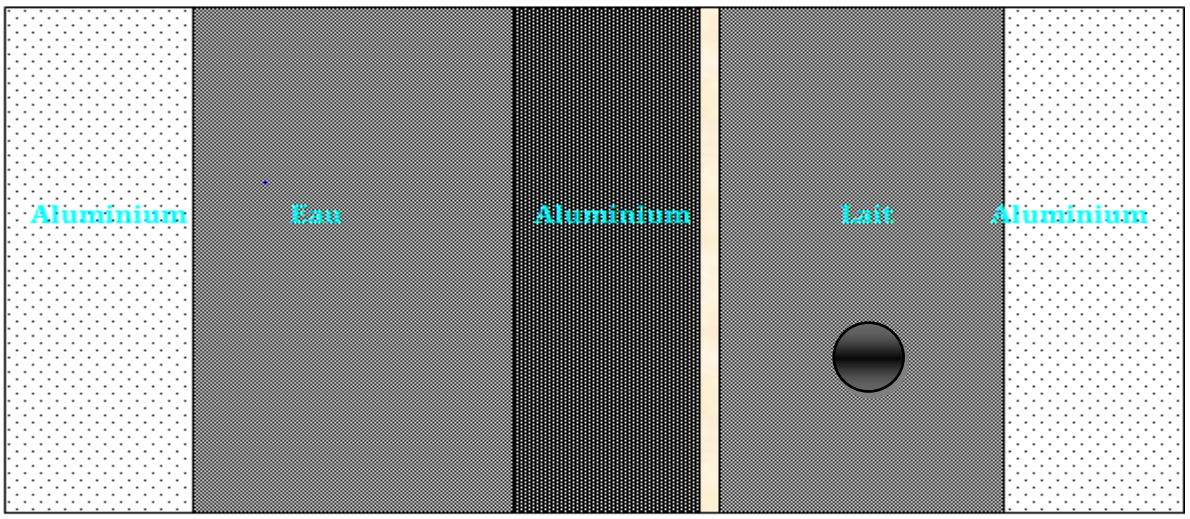
III. Les démentions de l'échangeur à plaque simulé au programme ANSYS avec encrassement à la présence d'un déflecteur cercle coté lait

	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
Carrée N°5	0.02	0.0235	0.021	0.0245

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= 1.2m



Y=0

Carrée N°1 Carrée N°2 Carrée N°3 Carrée N°4 Carrée N°5

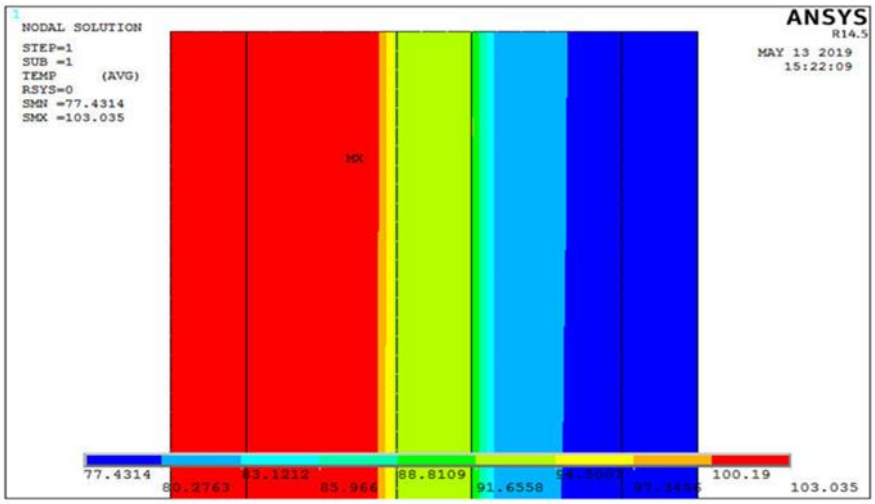
Un diagramme montre les carrées (encrassement) sont placées au programme ANSYS

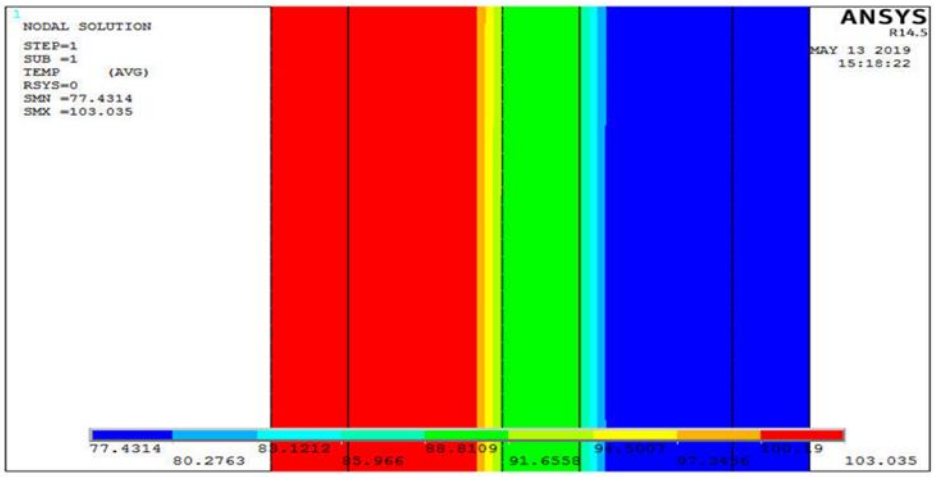
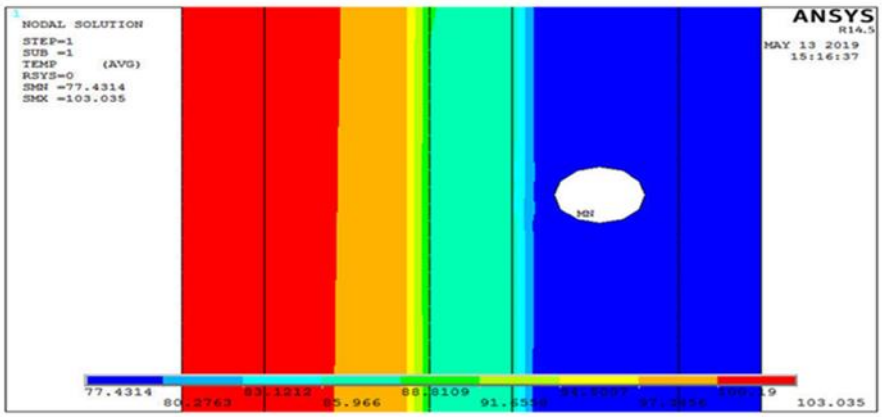
Annexes

Les propriétés physico-chimiques des matériaux utilisés :

		Paramètre du lait	Paramètre du l'eau	Paramètre d'aluminium	Paramètre du l'encrassement du lait	
Chaleur spécifique CP		3912	4037.24	900	3192	
Masse volumique		1001.34	983.84	2700	1030	
Viscosité		0.000604	0.00033	/	/	
Conductivité		0.642	0.68	237	k_{xx}	k_{yy}
					0.5	0.53
Condition au limite	**Vitesse**	0.52	-0.52	/	/	
	Température	77.5	103	/	/	
	Pression	0	0	/	/	

III.1 Profil de température

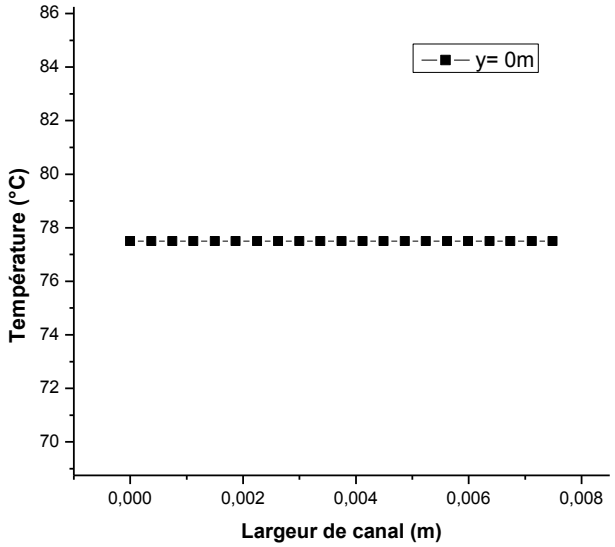
	Coté eau	Coté lait
En haut		

En milieu	
En bas	

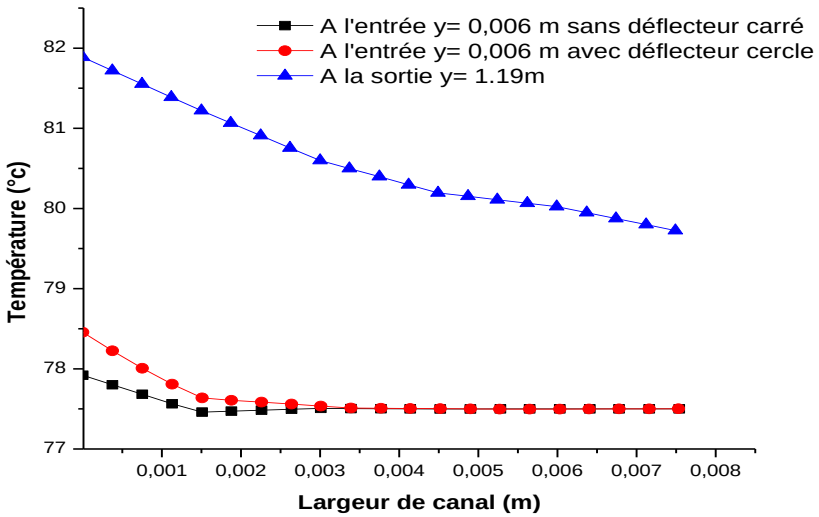
La variation de la température à la longue de canal :

L'évolution du profil de la température en fonction de la largeur (x) est représentée sur les graphes suivantes et ce pour différentes positions dans le canal (Y) pour le lait

Y=0



Y= 0.025 m (présences de déflecteur)

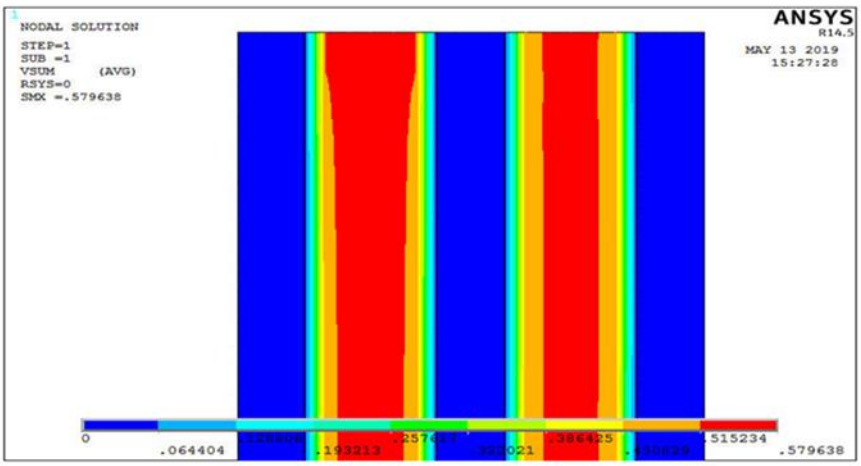
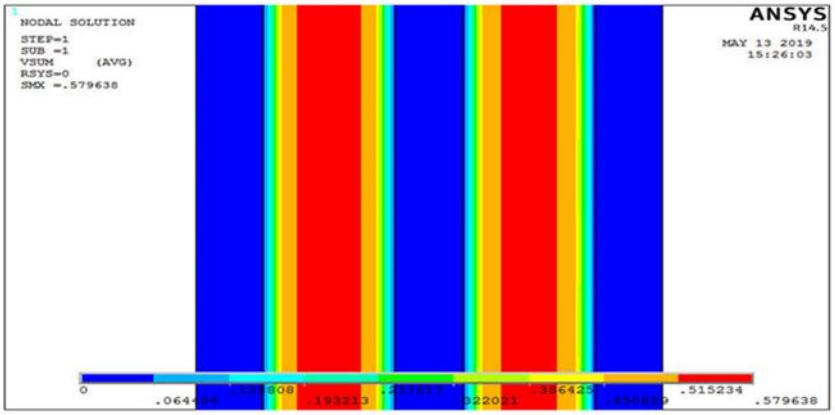
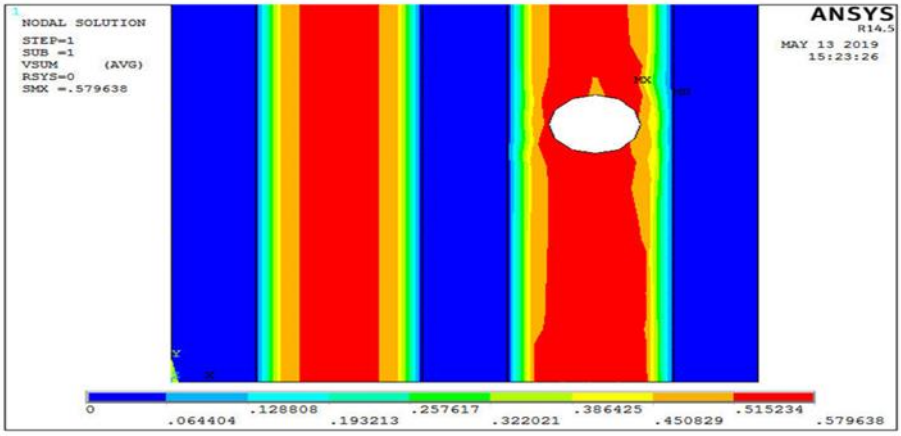


Variation de température de lait (°C) en fonction de largeur de canal (m) en différentes positions Y(m).

III.2 Profil de vitesse

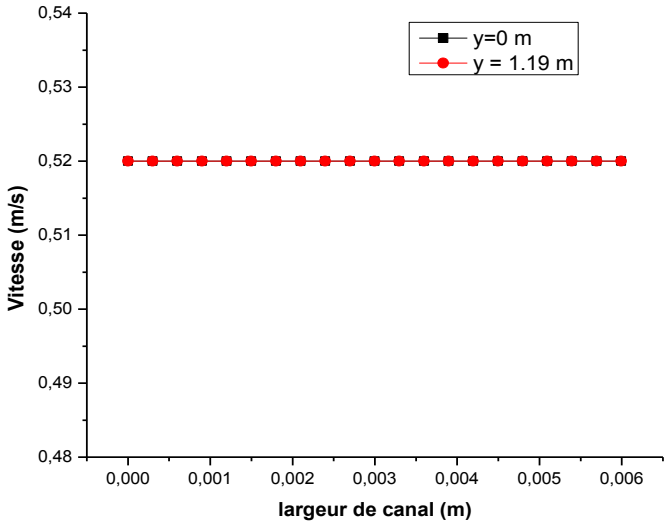
	Coté eau	Coté lait

Annexes

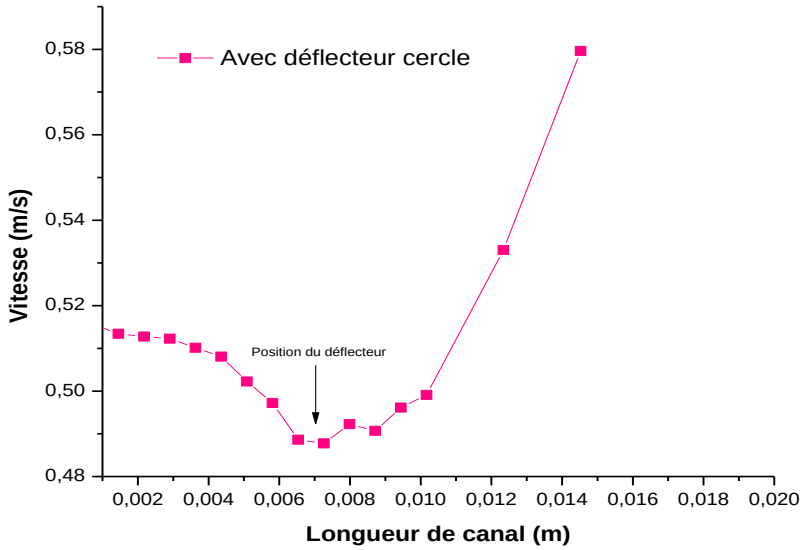
En haut	
En milieu	
En bas	

La variation de vitesse à la longue de canal :

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.



Variation de vitesse de lait (m/s) en fonction de largeur de canal (m) en différents positions Y(m).



Variation de vitesse de lait (m/s) en fonction de longueur de canal (m) en différentes positions Y(m).

IV. Les démentions de l'échangeur à plaque simulé au programme ANSYS avec encrassement à la présence deux déflecteur cercle coté lait

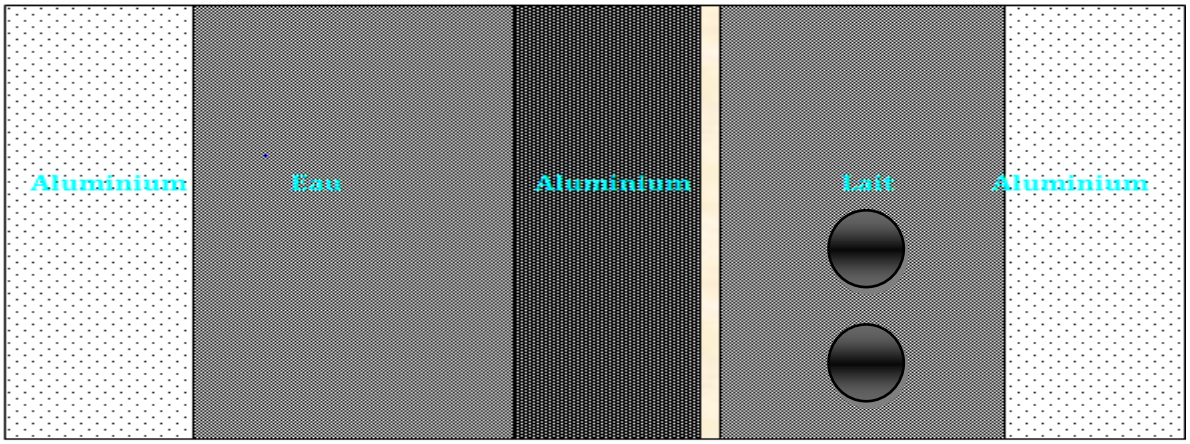
Annexes

	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
Carrée N°5	0.02	0.0235	0.021	0.0245

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) d= 0.035 m (distance entre les déflecteurs)



y=0

Carrée N°1 Carrée N°2 Carrée N°3 Carrée N°4 Carrée N°5

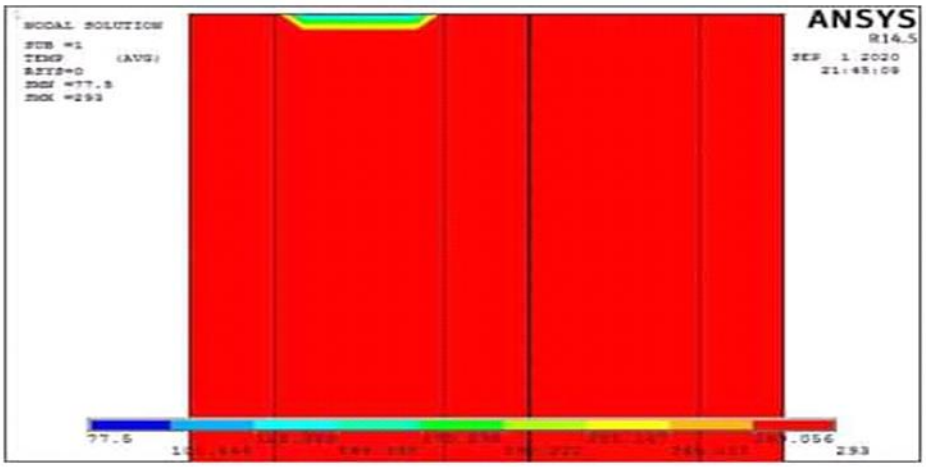
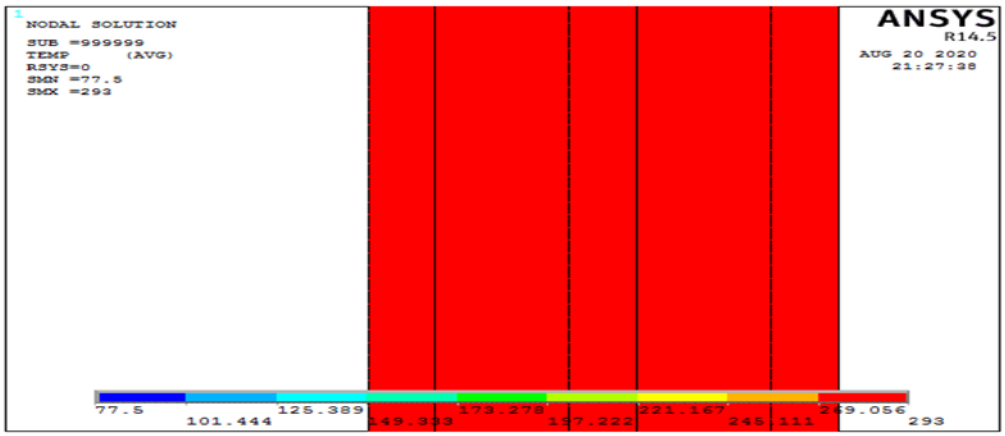
Un diagramme montre les carrées (encrassement) sont placées au programme ANSYS

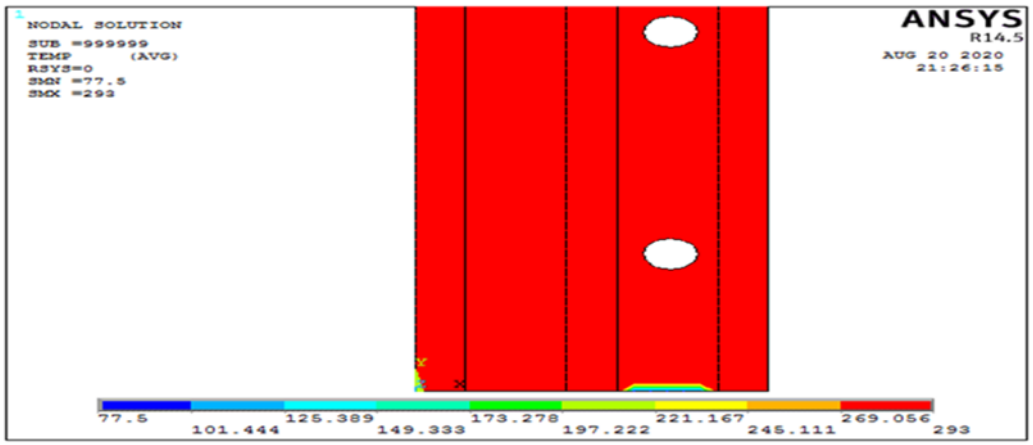
Les propriétés physico-chimiques des matériaux utilisés :

	Paramètre du lait	Paramètre du l'eau	Paramètre d'aluminium	Paramètre du l'encrassement du lait	
Chaleur spécifique CP	3912	4037.24	900	3192	
Masse volumique	1001.34	983.84		1030	
Viscosité	0.000604	0.00033	/	/	
Conductivité	0.642	0.68	237	k_{xx}	k_{yy}
				0.5	0.53

Condition au limite	**Vitesse**	0.52	-0.52	/	/
	Température	77.5	103	/	/
	Pression	0	0	/	/

IV.1 Profil de température

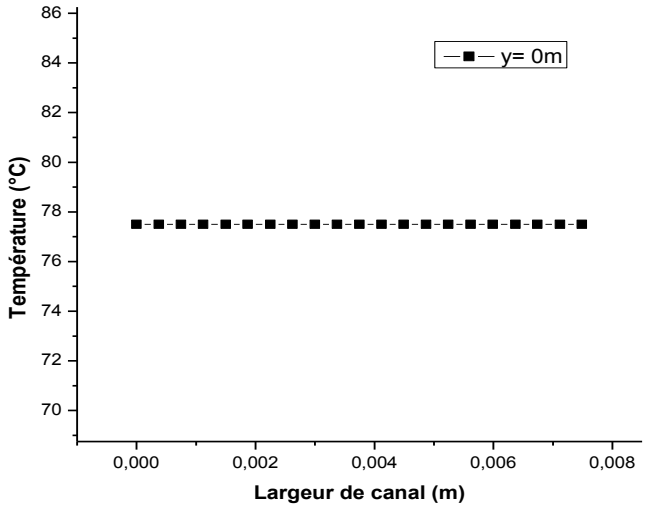
	Coté eau	**Coté lait**
En haut		
En milieu		

En bas	

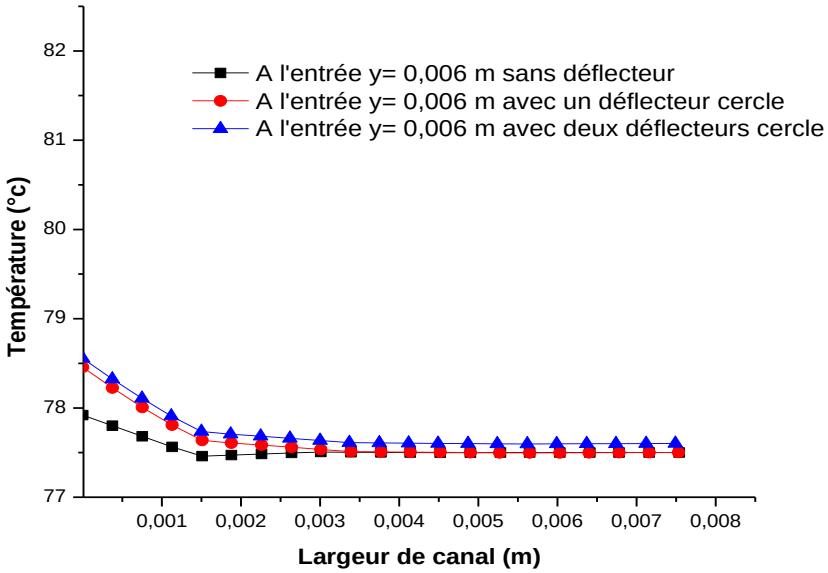
La variation de la température à la longue de canal :

L'évolution du profil de la température en fonction de la largeur (x) est représentée sur les graphes suivantes et ce pour différentes positions dans le canal (Y) pour le lait.

Y= 0

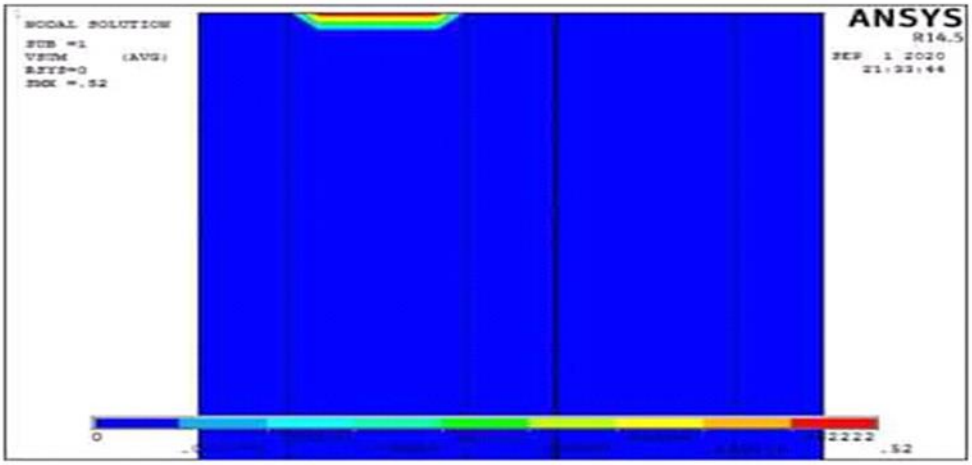


Y= 0.025 m (présences de déflecteur)

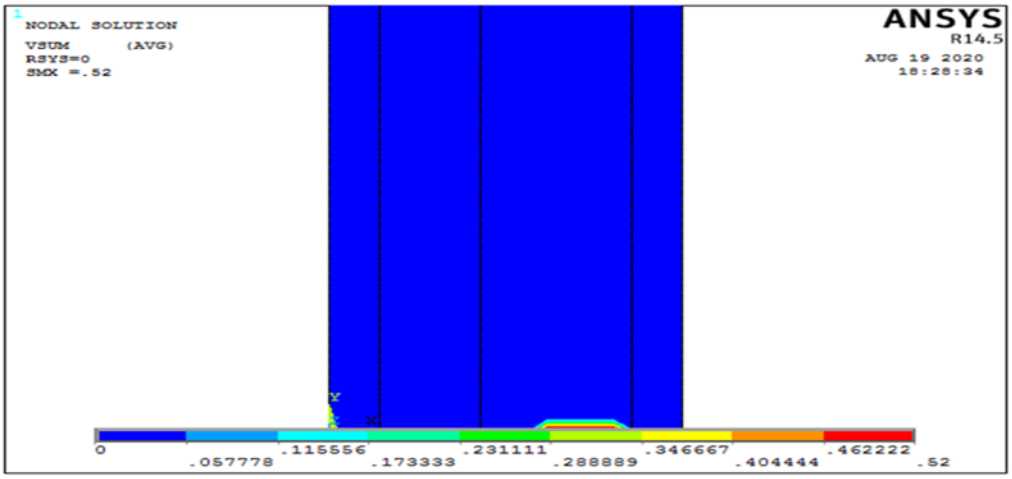
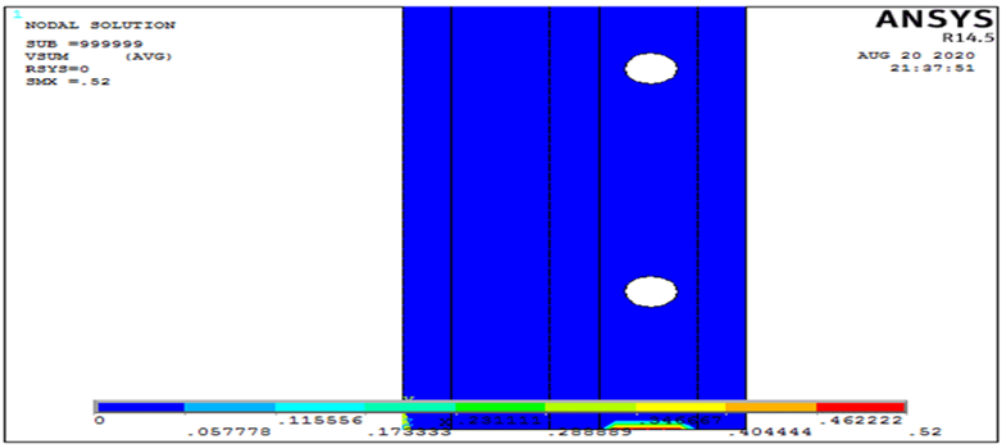


Variation de température de lait (°C) en fonction de largeur de canal (m) en différentes positions Y(m).

IV.2 Profil de vitesse

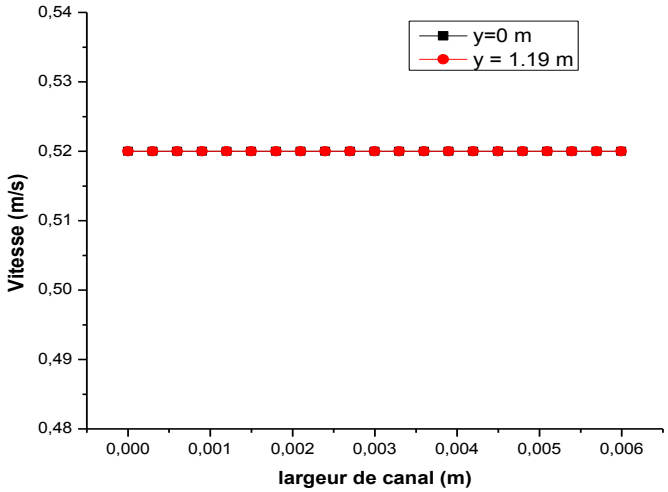
	Coté eau	Coté lait
En haut		

Annexes

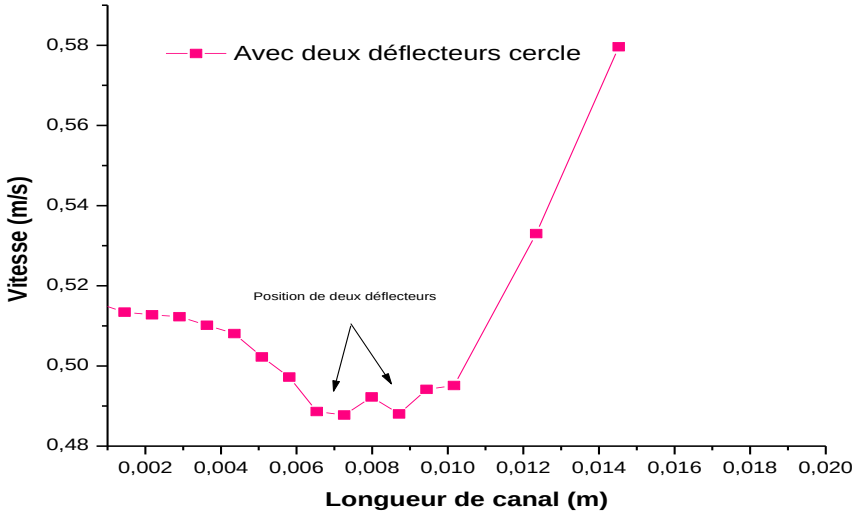
En milieu	
En bas	

La variation de vitesse à la longue de canal :

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.



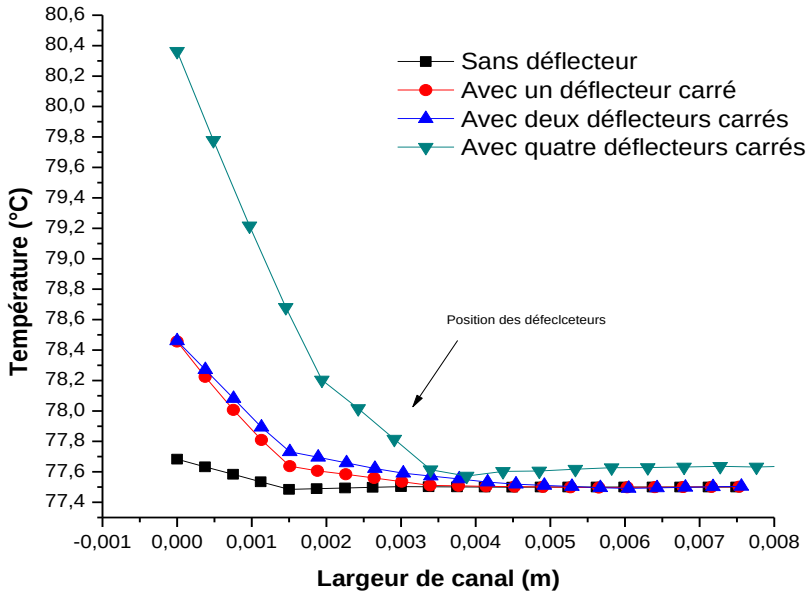
Variation de vitesse de lait (m/s) en fonction de largeur de canal (m) en différents positions Y(m).



Variation de vitesse de lait (m/s) en fonction de longueur de canal (m) en différentes positions Y(m).

V. étude comparative entre milieu fluide avec encrassement avec la présence de plusieurs déflecteurs coté lait : Profil de température

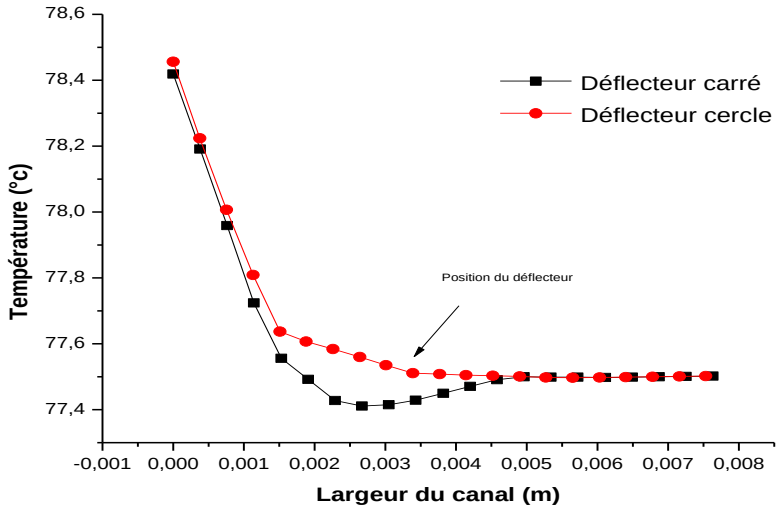
Y=0.13m



Variation de température de lait (°C) en fonction de largeur de canal (m) milieu fluide avec encrassement à la présence de plusieurs déflecteurs.

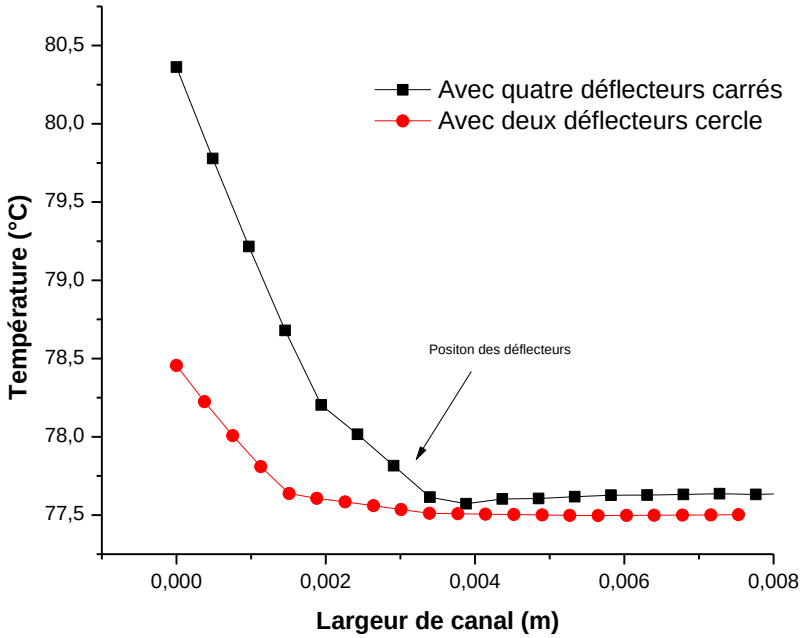
VI. étude comparative dans le milieu fluide avec encrassement avec un déflecteur carrée et un déflecteur cercle coté lait : Profil de la température

Y=0.13



Variation de température de lait (°C) en fonction de largeur de canal (m) milieu fluide avec encrassement à la présence d'un déflecteur carrée et un déflecteur cercle coté lait.

VII. étude comparative dans le milieu fluide avec encrassement avec des déflecteurs carrée et deux déflecteur cercle coté lait : Profil de la température



Y=0.025m

Variation de température de lait (°C) en fonction de largeur de canal (m) milieu fluide avec encrassement avec quatre déflecteurs carrée et déflecteur cercle.