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 : Normes et contrôle de qualité

Par :

Etudiante 1 : FETTAK Siham
Etudiante 2 : SAIDI Hayat

Thème :

Influence de la nature du matériau de l'échangeur de chaleur à plaques sur l'encrassement lors d'une phase de traitement thermique du lait

Soutenue publiquement le : 07 /06 /2017. Devant le jury composé de :

Membre de jury 1: **YAHOUM Madiha Melha**	Grade : **MCB**	Etablissement **FS/UYF**	Présidente
Membre de jury 2: **BITAM Said**	Grade : **MAA**	Etablissement **FS/UYF**	Examinateur
Membre de jury 3: **ALOUAOUI Rédha**	Grade : **MAA**	Etablissement **FT/UYF**	Examinateur
Membre de jury 4: **MAHDI Youcef**	Grade : **MCA**	Etablissement **FS/UYF**	Encadreur

Année universitaire 2016/2017

الملخص

يتناول هذا العمل دراسة النمذجة والبرمجة للترسبات في المبادلات الحرارية ذات لوحات من الحليب خلال مرحلة البسترة المضطرة. نقدم صياغة رياضية للتدفق المضطرب المستمر للوحتين مسطحتين مع وبدون الترسب مع نموذج إغلاق $\kappa - \varepsilon$.

النتائج المتحصل عليها فيما يخص درجة الحرارة والسرعة مع وبدون ترسب تظهر انخفاض في درجة الحرارة وزيادة في السرعة في وجود الأوساخ.

يتم إجراء مقارنة بين مادتي الألمنيوم و الفولاذ المقاوم للصدأ (304) في قاعدة التبادل الحراري. ويبدو أن المادتان متشابهتان.

الكلمات المفتاحية نموذج $\kappa - \varepsilon$ **;** الترسب **;** مبادلات الحرارية ذات لوحات **;** الحليب **.**

RESUME

Ce travail porte sur l'étude de la modalisation et la simulation de l'encrassement dans un échangeur de chaleur à plaques par le lait en régime turbulent lors d'une phase de pasteurisation. Nous présentons la formulation mathématique en régime stationnaire d'un écoulement turbulent entre deux plaques planes avec et sans encrassement à l'aide du modèle de fermeture $\kappa - \varepsilon$. On a établi les équations de conservations et les conditions applicables pour la résolution numérique.

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

Une comparaison est faite entre deux matériaux l'Aluminium et l'Inox 304 à la base des échanges thermiques. Il semble que les deux matériaux sont analogues.

Mots clés : Lait, échangeur de chaleur à plaques, modèle $\kappa - \varepsilon$, encrassement.

ABSTRACT

This work deals with the study of the modalization and simulation of fouling in a plate heat exchanger by the milk during a turbulent pasteurization phase. We present the steady-state mathematical formulation of a turbulent flow between two flat plates with and without fouling using the closure model $\kappa - \varepsilon$. Conservation equations and conditions for numerical resolution were established.

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

A comparison is made between two materials, Aluminum and 304 Stainless Steel, at the base of the heat exchanges. It seems that the two materials are analogous.

Key words: Milk, plate heat exchanger, model $k - \varepsilon$, fouling.

Remerciements

Nous formulons notre profonde gratitude à dieu Le tout puissant qui nous a donne l'énergie nécessaire pour la réalisation de ce projet,

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

Nous remercions particulièrement Mr. Zirari Mounire pour leurs suivis, leurs conseils et leurs aides, tout au long de la réalisation de ce modeste travail.

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

Sans oublié de remercier tous les enseignants et les étudiants de Norme et Contrôle de Qualité de l'université de Yahia Farés Médéa.

On remercie tous ceux qui ont participé de prés ou de loin à la réalisation de ce travail



Dédicace

Je tiens tout d'abord à remercier ***Dieu*** *le tout Puissant qui m'a donné le courage et la force et la volonté pour réalisation de ce modeste mémoire*

A cette ocasion.je dédie ce modeste travail :

A mon père "SAAD"

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour toi mon cher père. A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, à me donner l'aide et à me protéger, Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Et qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, je t'aime mon Père

A ma mère "NOURA"

A celle qui a inséré le goût de la vie et le sens de la responsabilité, La flamme mon cœur, a la lumière de mes jours, la source de mes efforts, qui a été à mes côtés et ma soutenu durant toute ma vie,
je t'aime ma Mère

A toute ma famille : *mes grand parents, mes tantes et mes oncles*

surtout ***"MASSOUDE",*** *mes cousins et mes cousines*

A mes frères : *Bilall, Riad, Sofiane, Samir*

A ma sœur *Anissa et son marie Djeloull et son fils :* ***Souhaib***

A mes très chères sœurs *: Faiza, Amina, Zineb, Amel, Nawal, Rachida, Nour al yakine, Hadda*

Et à toute ma famille,

A mon *binôme et fidèle amie* ***Siham Fettak****, je la remercie d'avoir était présente à chaque moment de ma vie.*

A tous mes amis (es) :

Pour notre amitié et tous les bons moments passés et à venir, Pour votre présence, vos bons conseils et nos fous rires partagés Un très grand merci à tous et à toutes

, A tous ceux qui m'ont aidé lors de la réalisation de ce travail, merci à tous

HAYAT



Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

Avant tout, je remercie le grand dieu qui nous a aidés à élaborer ce travail.

Mes très chers parents

C'est que vous avez toujours compris que toute réussite déguise une abdication.

Puisse ce travail récompenser votre patience et persévérance et tous les sacrifice que vous avez consentis au nom de la famille

La reine de l'amour, la source d'espoir, ma guide dans la vie ma mère

pour leur encouragement et leur inquiétudes

Mes chers frères

Slimane et Ahmed

Mes chères sœurs

Hadjira, Zoulikha, Wafa, Karima et Khadidja.

Demain ne sera pas comme hier, il sera nouveau et il dépendra de nous. Notre avenir comme notre passé doit être solidaire. C'est la plus belle chose qui nous est donnée naturellement
Tous mes neveux que j'aime beaucoup.
A tout ma famille.

A mon amie : Hayat SAIDI

Rien au monde, n'a pu ébranler notre amitié.

A tous mes amis

Pour notre amitié et tous les bons moments passés et à venir, Pour votre présence, vos bons conseils et nos fous rires partagés. Un très grand , Merci à tous et à toutes. A tous ceux qui m'ont aidé lors de la réalisation de ce travail merci à tous les personnes qui m'ont encouragé et aidée

SIHAM



TABLES DES MATIÈRES



Tables des matières

Remerciements

Dédicaces

Résumé

Nomenclature

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale 01

Chapitre I* : *Le Lait, Les Produits Laitiers et Les Traitements Thermiques

I.1. LE LAIT……..…….03

I.1.1. Définition……03

I.1.2. la consommation du lait……..…03

I.1.3. Caractéristiques physicochimique du lait…….....04

I.1.4.La composition du lait…….05

I.1.4.1.L'eau……..05

I.1.4.2. Matière grasse……...……05

I.1.4.3.Les glucides……....06

I.1.4.4 Les minéraux ……...06

I.1.4.5. Les vitamines……...……..06

I.1.4.6. Les enzymes……06

I.1.5.Propriétés physico-chimiques du lait……...07

I.1.5.1.Masse volumique…….....07

I.1.5.2.Point de congélation……...…….....07

I.1.5.3.Point d'ébullition……..……08

I.1.5.4.Acidité du lait…….....09

I.1.6.Qualité Organoleptique du lait…….……..09

I.1.7. Flore microbienne……..…….....09

I.1.7.1. Flore indigène ou originelle…….....09

I.1.7.2. Flore contaminant…….....09

I.2.Les dérives du lait…….....10

I.2.1. Crèmes laitières……....10

I.2.2. Définition du yaourt……..10

I.2.3. Définition du fromage……...11

I.3. Traitement thermique…….....11

I.4:Différents types du lait à consommation humaine…….11

I.5. Mise en Ouvre du traitement thermique……12

I.5 1. Définition de la Pasteurisation……12

I.5.2.Objectifs……...13

I.5.3. Principede la pasteurisation……....13

I.5.4. Les Différents Types de Pasteurisation……...13

I.5.4.1. Pasteurisation basse……...13

I.5.4.2. Pasteurisation rapide à haute température (High température short time ou HTST)…….14

I.5.4.3. Pasteurisation haute……..…14

I.5.5. Les Effets Négatifs de la Pasteurisation…….14

I.5.5.1. Optimisation du barème de traitement thermique…….14

I.5.5.2. Dénaturation des Protéines……...…….14

Chapitre II : Les Echangeurs de Chaleur & Encrassement

II.1. NOTIONS GENERALES SUR LES ECHANGEURS…….....15

II.1.1. Définition……..…….....15

II.1.2.Le principe de fonctionnement……..……15

II.1.3. Modes de transferts thermiques……..……..16

II.1.4 Modes d'écoulement des deux fluides…….…….……16

II.1.5 Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange….....18

II.1.6 Classement technologique…….……18

II.1.6.1 Échangeurs tubulaires……...……....18

II.1.6.2 Echangeurs à plaques……...……..…….19

II.1.6.2 .1 Les caractéristiques…….....20

II.1.6.2 .2 Les types des Echangeurs à plaques…….....20

II.2. NOTIONS SUR L'ENCRASSEMENT DES ECHANGEURS……..……....22

II.2.1 L'encrassement des Échangeurs de chaleur……..……22

II.2.2. Phénomène d'encrassement……..……....23

II.2.3. Type d'encrassement……....23

II.2.4 Facteurs favorisant l'encrassement……...…….24

II.2.4.1 Zones stagnantes……..25

II.2.4.2 Effet de la
vitesse…….....25

II.2.4.3 Effet de la température de surface……..……26

II.2.4.4 Etat de surface .Rugosité……26

II.2.4 .5 Matériau de construction, corrosion…….....26

II.2.5 Apparition et développement de l'encrassement……26

II.2.6 L'encrassement de lait…….……...27

II.2.7 L'encrassement protéique du Lait…….…..27

II.2.8 Méthodes de nettoyage des échangeurs…….….28

II.2.8.1 Nettoyage mécanique…….….28

II.2.8.2 Nettoyage chimique…….....29

Chapitre III : Modélisation et Simulation de L'encrassement

III.1. INTRODUCTION…….……..30

III.2.DESCRIPTION DU SYSTEME……..……....30

III. 3. MODELE THERMIQUE DE L'ECHANGEUR A PLAQUE…….……31

III.3.1. Introduction……..31

III.3.2. Formulation mathématique du problème…….33

III.3.2.1. Introduction ……..……33

III.3.2.2. Modélisation de la turbulence dans un milieu totalement fluide……..……...33

III.3.2.2.1. Les hypothèses…….....33

III.3.2.2.2. Equations de conservation.…….34

III.3.2.3. Modélisation de la turbulence dans un milieu poreux …….....35

III.3.2.3.1. Modèle générale ……36

III.3.2.3.2. Conditions initiales et aux limites……..37

III.3.3. Calcul du coefficient de transfert de chaleur global.…….37

III.3.4. Calcul des paramètres à mesurer du mélange (lait) …….....38

III.3.5. Calcul des paramètres à mesurer de l'eau chaude…….....40

III.4.PROGRAMME ANSYS…….....41

III.4.1. Présentation et description du logiciel ANSYS ……...…41

III.4.2. Les points forts des outils ANSYS …….....42

Chapitre IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1. INTRODUCTION……...…….43

IV.2 ECHANEUR DE CHALEUR A PLAQUES EN ALUMINIUM……..44
IV.2.1 LES PROFILS DANS UN MILIEU COMPLETEMENT FLUIDE……...44
IV.2.1.1 Profil de température……..…….44
IV.2.2.2 Profil de vitesse……...44
IV.2. 2.LES PROFILS DANS UN MILIEU AVEC ENCRASSEMENT……..45
IV .2.2.1. Profil de la température……..45
IV .2.2.2 Profil de la vitesse…….…….46
IV.3 ECHANEUR DE CHALEUR A PLAQUES EN INOX 304…….47
IV.3.1 LES PROFILS DANS UN MILIEU COMPLETEMENT FLUIDE……...47
IV.3.1.1 Profil de température……...……47
IV .3.1.2 Profil de la vitesse……..47
IV.3. 2.LES PROFILS DANS UN MILIEU AVEC ENCRASSEMENT……...47
IV .3.2.1. Profil de la température……..48
IV.3.2.2. Profil de la vitesse ……..…….48
IV.4 ETUDE COMPARATIF ENTRE L'ALUMINIUM ET L'INOX 304……..48
IV.4.1 LES PROFILS DANS UN MILIEU COMPLETEMENT FLUIDE……49
IV.4.1.1 Profil de La température …….…….49
IV.4.1.2 Profil de La vitesse……..51
IV.4.2 LES PROFILS DANS UN MILIEU AVEC ENCRASSEMENT ……..….52
IV.4.2.1 Profil de La température……...…….…….. .52
IV.4.2.2 Profil de La vitesse…….…….…….53
IV.5 Conclusion……...54
CONCLUSION GENERALE
Références Bibliographiques
Annexes

Liste des figures

Figure I.1 : Composition moyenne du lait de vache……..07

Figure II.1 : Echangeur de chaleur à co-courant……...16

Figure II.2 : Echangeur à tube à contre-courant……....17

Figure II.3: Echangeur compact à courant croisé…….....17

Figure II.4 : Echangeur monotube…….18

Figure II.5 : Echangeur coaxial cintré……....19

Figure II.6: schéma d'un échangeur à plaques……...19

Figure II.7 : Illustration du fonctionnement du BPHE……..20

Figure II.8 : Echangeur à plateaux ou à plateaux et cadre…….....20

Figure II.9: Echangeurs à plaques et joints……...21

Figure II.10 : Echangeurs à plaques brasées……..21

Figure II.11 : nettoyage à l'aide d'un pistolet hydraulique……28

Figure II.12 : outil de nettoyage mécanique……..30

Figure III .1: Cycle de Pasteurisation du Lait……...31

Figure III.2 : Arrangement des plaques de l'échangeur de pasteurisation et sens de circulation des fluides……..32

Figure III .3: Schématisation de la direction de l'écoulement entre deux plaques……38

Figure III .4: L'interface utilisateur graphique d'ANSYS (GUI) ……..42

Figure IV.1 : Ecoulement dans un canal à section rectangulaire……...43

Figure IV.2 : Variation du profil de température dans lait…….44

Figure IV.3 : Variation du profil de vitesse à la longue de canal……...45

Figure IV.4 : La variation de la température à la longue de canal……..45

Figure IV.5 : Variation du profil de vitesse……46

Figure IV.6 : Variation du profil de température dans lait……...47

Figure IV.7: Variation du profil de vitesse dans le lait……...48

Figure IV.8 : La variation de la température à la longue de canal……..49

Figure IV.9 : Variation du profil de vitesse……49

Figure IV.10: Evolution de la vitesse de l'aluminium et l'inox 34 Pour y =1.2…….50

FigureIV.11 : Evolution de la vitesse de l'aluminium et l'inox 34Pour y=0……50

Figure IV.12 : Evolution de la température de l'inox et l'aluminiumPour y=1.2……..51

Figure IV.13 : Evolution de la température de l'inox et l'aluminium Pour y=0…….51

Figure IV.14 : Evolution de la température de l'inox et l'aluminium…….……52

Figure IV.15 : Evolution de la vitesse de l'inox et l'aluminium Pour y=1.2…….53

Figure IV.16 : Evolution de la vitesse de l'inox et l'aluminium Pour y=0……53

Liste des tableaux

Tableau I.1: Caractéristiques physico-chimiques du lait de vache……...04

Tableau I.2 : Composition moyenne en % du lait de vache, femme, brebis et chèvre.……..05

Tableau I.3 : composition typique de lait de vache et propriété physique……..08

Le tableau I.4 :les différentes fourres de lait destinées à la consommation humaines……..12

Tableau II.1 : comparaison entre échangeurs à plaques et joints, échangeurs à plaques brasées……...21

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	
Eff	Efficacité	%
F	fraction de la masse déposée qui pénètre dans le milieu poreux	%
J	Rapport des viscosités	-
H	Hauteur du canal	m
h	Coefficient de transfert de chaleur du fluide	$W/m^{20}C$
K	Conductivité thermique de l'eau	$W/m\ ^0C$
k	Perméabilité du milieu poreux	m^2
L	Longueur d'une plaque	m
m	Masse des particules	Kg
m_d	La masse déposée par unité de surface	Kg/m^2
Nu	Nombre de Nusselt	-
N	Protéine native	-

P	La pression	Pa
Pr	Nombre de Prandlt	-
Q	Débit volumique	m^3/s
R_d	La résistance du dépôt encrassant	$m^2.^0C/w$
R_d^*	La résistance asymptotique du dépôt encrassant	$m^2.^0C/w$
Re	Nombre de Reynolds du fluide	-
S	Surface	m^2
t	Temps	s
T	Température	K
T_p	La température à la paroi	K
T_{m-s}	La température moyenne de sortie	K
T_e	La température d'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
μ	La viscosité dynamique	kg/m.s
ν	La viscosité cinématique	m^2/s
μ_t	La viscosité turbulente	Pa.s
e_p	Epaisseur du milieu poreux	m
K	Energie cinétique turbulente	m^2/s^2
ε	Dissipation turbulente	m^2/s^3
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

DLC	Date Limite de Consommation
GUI	Interface d'utilisateur graphique
MGLA	La matière grasse laitière
UHT	Ultra Haut Transfert

3. INDICES

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



INTRODUCTION GÉNÉRALE



Introduction générale

Depuis de nombreuses années, les échangeurs de chaleur à plaques sont utilisés dans le secteur agro-alimentaire, notamment dans le domaine de la fabrication de produits laitiers frais. Les raisons de ce choix sont dues aux nombreux avantages qu'ils présentent par rapport aux échangeurs tubulaires.

Ils conduisent, en effet, à d'excellents rapports surface d'échange/volume qui limitent leur encombrement et simplifient leur intégration aux unités de production. La modification de leur configuration est aisée ce qui permet de les adapter facilement à un programme thermique différent de celui initialement prévu. L'évolution des produits laitiers frais (yaourts, crèmes dessert, laits gélifiés ...) sur le marché nécessite de telles modifications afin d'adapter les procédés de fabrication aux qualités demandées pour ces produits.

Les produits agroalimentaires subissent des transformations de plus en plus sophistiquées afin de présenter des qualités meilleures. Les transformateurs cherchent à définir des processus fournissant le produit alimentaire dans des conditions sanitaires et économiques optimales en prenant en compte les modifications physiques, biochimiques, …etc. des matières premières.

Au cours de leur transformation, les produits alimentaires subissent pratiquement toujours un traitement thermique dont le principe repose le plus souvent sur un transfert de chaleur au travers d'interfaces liquide-solide (cas des échangeurs de chaleur à chauffage indirect tubulaire, à plaques, spirales, à surface raclée, ...) afin de présenter des qualités organoleptiques bien ciblées et les plus constantes possibles. Parallèlement, il est indispensable d'assurer la sécurité microbiologique du produit.

Ces interfaces sont le lieu privilégié de réactions entre le matériau solide et les constituants du produit traité, ou entre les constituants eux-mêmes. Le résultat global est souvent un encrassement de la surface d'échange qui diminue les performances du matériel en opposant une résistance supplémentaire au transfert de chaleur et en augmentant les pertes de charges. En outre, il rend souvent plus difficiles et plus longues les opérations de nettoyage. Tous ces facteurs concourent à augmenter le coût de fonctionnement de l'installation.

Le phénomène d'encrassement dans les échangeurs thermiques est un sujet d'actualité. En effet, l'encrassement résulte de la boue causée par des suspensions insolubles, de la rouille causée par la corrosion et pour finir d'un dépôt.

Pour le cas du lait, l'encrassement est provoqué par les réactions chimiques causées par les changements qui proviennent des transformations des protéines du lait sous l'effet de l'augmentation de la température. Les protéines contenues dans le lait, plus précisément la

protéine β-lactoglobuline, jouent un rôle clé dans la formation du dépôt. La formation du dépôt sur les surfaces d'échange thermique est gouvernée par la dénaturation de cette protéine.

D'après les travaux de recherche, l'encrassement est de nature très complexe. Ce phénomène ne peut pas être éliminé, mais essayer de le réduire reste toujours possible d'où le sujet de la thèse qui rentre en jeu et qui consiste à détecter l'encrassement dans les échangeurs thermiques suffisamment tôt pour mettre en place un système d'entretien.

Dans notre sujet nous allons essayer d'étudier l'encrassement dans un échangeur de chaleur à plaques avec différents matériaux. Cette étude est organisée de la façon suivant :

- Le premier chapitre : est une présentation du lait, les produits laitiers est le traitement thermique.
- Le deuxième chapitre : est une description des échangeurs de chaleur en général, et en particulier les échangeurs de chaleur à plaques qui sont les mieux adaptés à industrie agroalimentaire en raison de la qualité de l'échange thermique possible ,et une présentation de l'encrassement par le lait lors de la pasteurisation dans un échangeur à plaque.
- Le troisième chapitre : est consacré à la modélisation numérique et le choix de la méthode utilisée. La méthode numérique des éléments finis est choisie pour la résolution. Le choix du maillage, la discrétisation des équations, ainsi que les étapes de résolution sont également présentés.
- Le quatrième chapitre : est une présentation des résultats et leur interprétation
- A la fin nous terminons par une conclusion générale.

CHAPITRE I :

Le lait, Les Produits Laitiers ET Le Traitements Thermiques

I.1. LE LAIT

I.1.1. Définition

Le lait a été défini en 1908, au cours du Congrès International de la Répression des Fraudes à Genève comme étant : « Le produit intégral de la traite totale et ininterrompue d'une femelle laitière bien portante, bien nourrie et non surmenée. Le lait doit être recueilli proprement et ne doit pas contenir de colostrum» [1].

Le lait est définit comme étant la sécrétion mammaire normale d'animaux de traite obtenue à partir d'une ou plusieurs traites, sans rien y ajouter ou en soustraire, destiné à la consommation comme lait liquide ou à un traitement ultérieur [2].

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

En général, le lait est un liquide alimentaire opaque, blanc mat légèrement bleuté ou plus ou moins jaunâtre, à odeur peu marquée au gout douceâtre, sécrété, après parturition, par la glande mammaire des animaux mammifères femelles pour nourrir leur nouveau-né, il est un aliment complet capable de fournir à l'organisme tous les éléments essentiels et nécessaires à sa croissance et à son développement [4].

I.1.2. Laits de consommation

Le lait est généralement considéré comme un aliment très complet du point de vue nutritionnel car il apporte à la fois des protéines, des glucides, des lipides et des minéraux [5].

Pendant longtemps le lait et les produits laitiers ont été consommés frais par les éleveurs ou dans leur région de production pour des raisons évidentes de transport et de conservation. Pour 6 enfants sur 10, le lait et les produits laitiers font partie des aliments à privilégier pour avoir une bonne alimentation et ils sont 9 sur 10 à affirmer les aimer. Les produits laitiers sont cités par 63% des enfants après les légumes (74%) et les fruits (65%) et avant la viande (58%) et l'eau (52%). Lorsqu'on interroge les mères, le lait, les yaourts et les fromages apparaissent comme le trio laitier incontournable dans l'alimentation des enfants [6]. De nombreuses études ont montré que la consommation des produits laitiers pouvait diminuer le risque d'apparition de certains cancers [7].

I.1.3. Caractéristiques physicochimique du lait

Le lait est un liquide légèrement visqueux dont la composition et les caractéristiques physico-chimiques varient sensiblement selon les espèces animales et selon les races. Ces caractéristiques varient également au cours de la période de lactation ainsi qu'au cours de la traite [5].

Les principales propriétés physico-chimiques utilisées dans l'industrie laitière sont la masse volumique et la densité, le point de congélation, le point d'ébullition et l'acidité [8].

Ses principaux caractères sont les suivants (tableau I) :

Tableau I.1 : Caractéristiques physico-chimiques du lait de vache [9].

Constats	**Moyennes**	**Valeur extrêmes**
-Energie en Kcal/litre	701	587-876
-Densité du lait entier à 20°C	1.03	1.028-1.033
-Densité du lait écrémé	-	1.036
-Densité de la matière grasse	-	0.94-0.96
-pH à 20°	6.6	6.6-6.8
-Acidité titrable (degré dornic)	16	15-17
-Point de congélation (C°)	-	-0.520 à -0.550
-Chaleur spécifique du lait entier à 15C° en J/Kg C°	0.940	-
-Tension superficielle du lait entier à 15C° (Dynes/cm)	50	47-53
-Tension superficielle du lait écrémé à 15C° (Dynes/cm)	55	52-57
-Viscosité du lait entier à 20C° en Pa· s -Conductivité électrique à 25C° -Point d'ébullition (C°)	2.2 45.10-4 -	- 40-50.10-4 100.7-100.15
-Potentiel d'oxydoréduction (v)	0.25	+0.25-70.30
-Point de fusion des grasses(C°)	36	-

I.1.4. La composition du lait

Le lait est reconnu depuis longtemps comme étant un aliment bon pour la santé. Source de calcium et de protéines, il peut être ajouté à notre régime sous plusieurs formes [10]. Le lait est une source importante de protéines de très bonne qualité, riches en acides aminés essentiels, tout particulièrement en lysine qui est par excellence l'acide aminé de la croissance. Ses lipides, caractérisés par rapport aux autres corps gras alimentaires par une forte proportion d'acides gras à chaîne courte, sont beaucoup plus riches en acides gras saturés qu'en acides gras insaturés. Ils véhiculent par ailleurs des quantités appréciables de cholestérol et de vitamine A ainsi que de faibles quantités de vitamine D et E [11].

Les données sont des approximations quantitatives, qui varient en fonction d'une multiplicité de facteurs : race animale, alimentation et état de santé de l'animal, période de lactation, ainsi qu'au cours de la traite. Il reste que la composition exacte d'un échantillon de lait ne peut s'obtenir que par analyse [12].

Tableau I.2 : Composition moyenne en % du lait de vache, femme, brebis et chèvre [13].

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

I.1.4.1. L'eau

L'eau est l'élément quantitativement le plus important : 900 à 910 g par litre. En elle, sont dispersés tous les autres constituants du lait, tous ceux de la matière sèche [14].

I.1.4.2. Matière grasse

La matière grasse ou taux butyreux représente 25 à 45 g par litre. Elle est constituée par 98,5% de glycérides (esters d'acide gras et de glycérol), 1% de phospholipides polaires et 0,5% de substances liposolubles cholestérol, hydrocarbures et vitamines A, D, E, et K [15].

I.1.4.3. Les glucides

Le lactose, disaccharide composé de glucose et de galactose, est le seul glucide libre du lait présent en quantités importantes, sa teneur est très stable entre 48 et 50 g/L. Cette teneur présente de faibles variations à la différence du taux butyreux.

Le lactose joue un rôle nutritionnel particulier et intervient également comme élément de fermentescible. Il peut être hydrolysé par les acides forts, mais surtout par la lactase.

I.1.4.4. Les minéraux

Les minéraux (ou matières salines) sont présents dans le lait à hauteur de 7g/litre environ. Les plus représentés en quantité sont le calcium, le phosphore, le potassium et le chlore.

On retrouve ces matières salines soit en solution dans la fraction soluble, soit sous forme liée dans la fraction insoluble (ou colloïdale). Certains minéraux se trouvent exclusivement à l'état dissous sous forme d'ions (sodium, potassium et chlore) et sont particulièrement bio disponibles. Les autres (calcium, phosphore, magnésium et soufre) existent dans les deux fractions.

I.1.4.5. Les vitamines

Les vitamines du lait sont prélevées directement du sang. On trouve en abondance les vitamines. A, D, B2, mais on retrouve à un faible taux de la vitamine C [16]. On classe les vitamines en deux grandes catégories :

- Les vitamines hydrosolubles : la richesse de lait en vitamine B, C est régulièrement élevée quel que soit la saison et le régime alimentaire.
- Les vitamines liposolubles : A, D, E, K, qui leurs taux dépendent de nombreux facteurs notamment alimentaires. Le lait renferme un taux élevé de vitamine A lorsque le rationnement des animaux est riche en herbes fraîches [17].

I.1.4.6. Les enzymes

Les enzymes comme des substances organiques de nature protidique, produites par des cellules ou des organismes vivants, agissant comme catalyseurs dans les réactions biochimiques. Environ 60 enzymes principales ont été répertoriées dans le lait dont 20 sont des constituants natifs. Une grande partie se retrouve dans la membrane des globules gras mais le lait contient de nombreuses cellules (leucocytes, bactéries) qui élaborent des enzymes : la distinction entre éléments natifs et éléments extérieurs n'est donc pas facile [18].

Les compositions de lait de vache sont représentées dans la figure suivante :

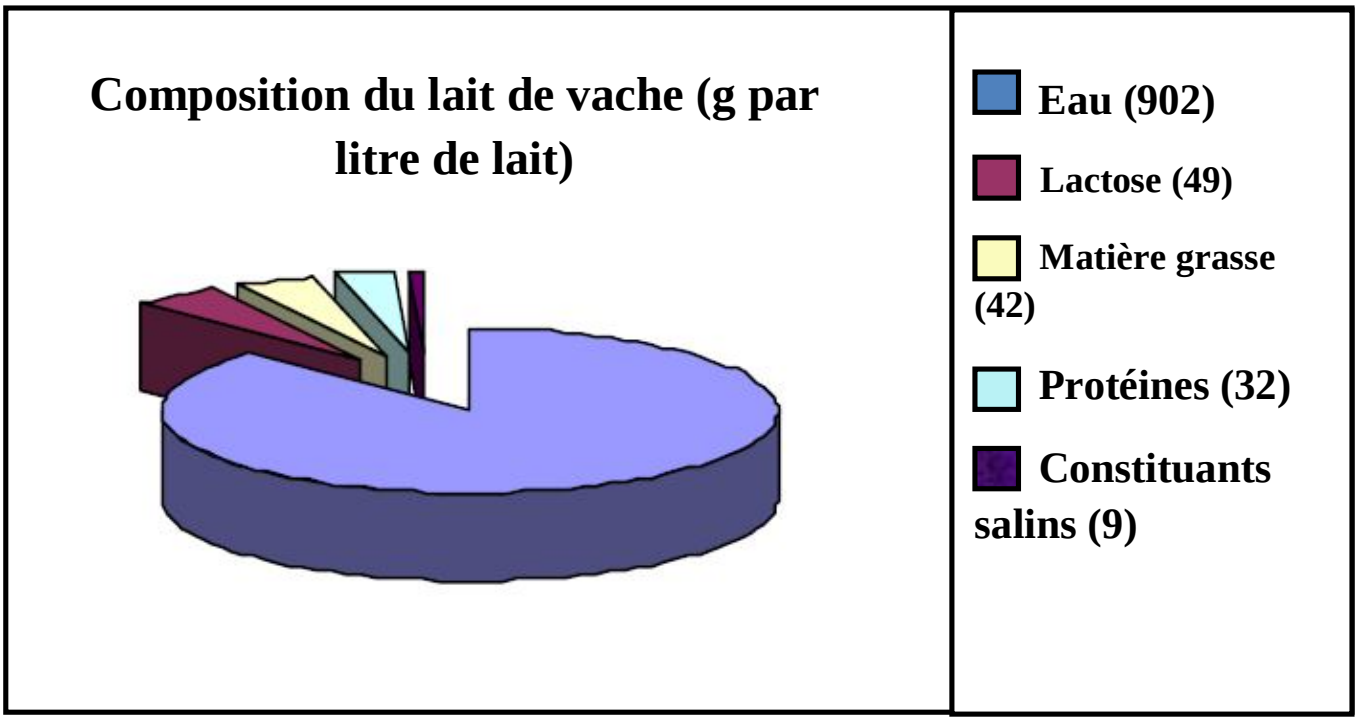


Figure I.1 : Composition moyenne du lait de vache.

I.1.5. Propriétés physico-chimiques du lait

Les principales propriétés physico-chimiques utilisées dans l'industrie laitière sont la masse volumique et la densité, le point de congélation, le point d'ébullition et l'acidité [19].

I.1.5.1. 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 $1030Kg.m^{-3}$[20].

I.1.5.3. 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 [21].

I.1.5.4. Point d'ébullition

Le point d'ébullition comme la température atteinte lorsque la pression de vapeur de la substance ou de la solution est égale à la pression appliquée. Ainsi comme pour le point de congélation, le point 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 [19].

Tableau I.3 : composition typique de lait de vache et propriété physique [22].

	Composition (g/l)	**Etat physique des composants**
Eau	905	Eau libre (solvant) + eau liée (3.7٪)
Glucides (lactose)	49	Solution
Lipide. Matière grasse proprement dite. Lécithine (phospholipides). Partie insaponifiable (stérols, carotènes, Tocophérol)	35 34 0.5 0.5	Emulsion des globules gras (3à5μm)
Protides Caséines Protéines «soluble» (globulines, albumine) Substance azotique non protéique	34 27 5.5 1.7	Suspension micellaire de phosphocaséinate (0.08à 0.12μm). Solution (colloïdale) Solution (vraie)
Sels De l'acide citrique De l'acide phosphorique(P2o3) De l'acide chlorhydrique	9 2 2.6 1.7	Solution en état colloïdal (P et Ca) (sels de k, Ca, Na, Mg…)

Constituants divers (vitamines, enzymes, gaz dissous)	Traces	
Extrait sec total **Extrait sec non gras**	127 92	

I.1.5.5. 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 grammes 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 ≥27 °D coagule au chauffage ; un lait dont l'acidité est ≥ 70 °D coagule à froid [23].

I.1.6. Qualité Organoleptique du lait

Le lait est un liquide blanc, opaque, deux fois plus visqueux que l'eau, de saveur légèrement sucré et d'odeur peu accentuée [24].

I.1.7. Flore microbienne

I.1.7.1. Flore indigène ou originelle

Lorsque le lait provient d'un lait animal sain et qu'il est prélevé dans des conditions aseptiques, il devrait contenir moins de 5000 UFC/ml. La flore indigène des produits laitiers se définit comme l'ensemble des microorganismes retrouvés dans le lait à la sortie du pis.

I.1.7.2. Flore contaminant

La flore contaminant est l'ensemble des microorganismes ajouté au lait, de la récolte jusqu'à la consommation. Elle peut se composer d'une flore d'altération qui causera des défauts sensoriels ou qui réduira la durée de conservation des produits, et une flore pathogène capable de provoquer des maladies chez les personnes qui consomment ces produits laitiers.

a- Flore d'altération

Incluse dans la flore contaminant, la flore d'altération causera des défauts sensoriels de goût, d'arômes, d'apparence ou de texture et réduira la vie de tablette des produits laitiers.

Les principaux genres identifiés comme flore d'altération sont : *Pseudomonas, Proteussp*, les coliformes, soit principalement les genres *Escherichia* et *Entérobactérie, les sporulées* telles que *Bacillus,* et *Clostridium sp,* et certain levures et moisissures.

b- Flore pathogène

Comme la flore d'altération, la flore pathogène est incluse dans la flore contaminant du lait. La présence de microorganisme pathogène dans le lait peut avoir trois sources : l'animal, l'environnement et l'Homme.

Les principaux microorganismes pathogènes associes aux produits laitiers sont : *Salmonella sp, Staphylococcus aureus, Clostridium Botulinum, Clostridium Perfringens, Bacilluscereus, Yersinia Enterocolitica, listeria Monocytogenes, Escherichia coli, Campylobacter jejuni, Schigella sonei* et certaines moisissures [25].

I.2. Les dérivés du lait

I.2.1. Crèmes laitières

La dénomination crème est réservée au lait contenant au moins 30 g de matière grasse provenant exclusivement du lait pour 100 g de poids total. La dénomination crème légère est réservée au lait contenant entre 12g inclus et 30g non inclus de matière grasse provenant exclusivement du lait pour 100 g de poids total.

La texture de la crème laitière varie suivant l'ensemencement en ferments lactiques, l'ajout d'additifs autorisés (notamment d'épaississants), et le taux de matière grasse.

La crème est une émulsion de matière grasse dans l'eau : les particules de matière grasse sont dispersées en gouttelettes dans la phase aqueuse.

I.2.2. Définition du yaourt

La législation française précise: «La dénomination yaourt ou yoghourt est réservée au lait fermenté obtenu, selon les usages loyaux et constants, par le développement des seules bactéries lactiques, Lactobacillus bulgaricus et Streptococcus thermophilus, qui doivent être ensemencées simultanément et se trouvent vivantes dans le produit à raison d'au moins 107 bactéries/g. La quantité d'acide lactique libre ne doit pas être inférieure à 0.7g/100g lors de la vente au consommateur ».

Les bactéries se reproduisent par millions. Elles transforment alors une partie du sucre contenu dans le lait en acide lactique. Il s'agit d'une fermentation lactique.

La production d'acide lactique acidifie le lait, ce qui entraîne sa coagulation et le développement des arômes. En étuvant longuement à une température idéale et pendant une durée déterminée le lait se transforme en yaourt [26].

I.2.3. Définition du fromage

La définition légale française du fromage, précise que le produit est fermenté ou non, en fait, il subit toujours au moins la fermentation lactique, il est constitué essentiellement par la caséine du lait, sous forme de gel plus au moins déshydraté retenant la presque totalité de la matière grasse.

Il constitue une forme ancestrale de conservation des protéines, de la matière grasse ainsi que d'une partie de calcium et du phosphore, dont les qualités nutritionnelles et organoleptiques sont appréciées par l'homme dans presque toutes les régions du globe [26].

I.3. Traitement thermique

Les divers traitements thermiques appliqués au lait en industrie, tels que la pasteurisation et la stérilisation, peuvent avoir des effets dénaturants sur les protéines du lait. Des réactions de dégradation des protéines, de dégradation du lactose et des modifications de l'équilibre minéral sont observées. En effet, lors du chauffage, des réactions de dénaturation et d'agrégation de protéines se produisent et le phosphate de calcium précipite.

I-4. Différents types du lait à consommation humaine

Dans le tableau suivant les différentes fourres de lait destinées à la consommation humaines sont présentées :

Tableau I.4 : illustre les différentes fourres de lait destinées à La consommation humaine

Différent types du lait		**Caractéristiques**
Lait liquide	**Lait cru**	- Recueilli à la ferme par traite mécanique ou manuelle. - Sa durée de conservation est courte en raison de la possibilité de développement des germes psychrophiles. [27]
	Lait pasteurisé	Peut être obtenu de plusieurs façons : Par pasteurisation à basse T° (65°C pendant 30 min) Par pasteurisation à haute T° (72°C pendant 15 secs)

		Par flash pasteurisation à 95°C pendant quelques secondes. [28]
	Lait stérilisé	Obtenu par 2 à 3 secondes de chauffage à 120°C conditionné dans un emballage étanche, il peut se conserver très longtemps à température ambiante [28].
	Lait stérilisé UHT	Ce traitement consiste à mettre le lait pendant 1 ou 2 secondes au mois à 140 – 150°C, il peut se conserver plusieurs mois à température ambiante [28].
Lait concentré	**Lait concentré non sucré**	Il a été privé de 50 à 55% de leur teneur initial en eau et a subis une stérilisation en récipients ou plus rarement le traitement UHT [29].
	Lait concentré sucré	Il ne subit pas de stérilisation car leur forte concentration en sucre limite fortement la croissance des microorganismes. Il est standardisé, pasteurisé quelques secondes puis sucré avec un sirop de saccharose à 70% et enfin concentré sous vide et refroidi rapidement avant d'être conditionné [29].
Lait en poudre		Obtenu par le traitement de séchage du lait qui permet la suppression presque totale de l'eau (4% d'eau au maximum sont permis légalement) [30]. Leur valeur nutritionnelle quantitative et qualitative peut être assimilée à celle des laits stérilisés UHT après leur reconstitution [31]. Sa conservation se fait jusqu'à 1 année dans un endroit frais et sec. Cependant une fois le produit est ouvert, elle dépend de leur teneur en matière grasse : entier (10 jours), demi-écrémée (2 semaines), écrémée (3 semaines) [29].

I.5. Mise en Ouvre du traitement thermique

I.5 1. Définition de la Pasteurisation

La pasteurisation est un processus de conservation des aliments qui consiste à les chauffer à une température donnée (entre 62 et 88 °C) durant une durée déterminée avant

un refroidissement brusque, de manière à éliminer un nombre important de micro-organismes et éviter la prolifération de ceux qui restent. Le terme vient de Louis Pasteur, qui a d'abord élaboré le procédé [32].

I.5.2. Objectifs de la pasteurisation

La pasteurisation a pour but de détruire tous les micro-organismes pathogènes potentiellement présents dans le lait ainsi que la plus grande partie des autres microorganismes et des enzymes susceptibles d'altérer les propriétés organoleptiques du lait.

I.5.3. Principe de la pasteurisation

Pour une pasteurisation efficace, les aliments doivent être chauffés entre 62 et 88 °C, en milieu anaérobie. En deçà, les températures sont trop basses pour éliminer les micro-organismes ; au-dessus, elles risquent de dénaturer le produit et son goût. Au-delà de 100°C, on parle de stérilisation.

Soumis à une forte chaleur durant une certaine durée, les bactéries et autres microbes pathogènes succombent massivement. On estime même que leurs populations seraient divisées par 100.000. Tous les germes ne sont malgré tout pas détruits. C'est pourquoi l'aliment est ensuite placé au frais (environ 4°C) afin de limiter, voire de bloquer, la prolifération des micro-organismes encore vivants. Si cela permet de repousser la période de comestibilité d'un aliment, le chauffage peut aussi éliminer des bactéries utiles et détériorer certaines protéines et vitamines de la nourriture. La pasteurisation est pratiquée pour le lait, mais aussi pour les jus de fruit, le cidre, la viande ou la confiture [32].

I.5.4. Les Différents Types de Pasteurisation

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

Pasteurisation basse (15-30 min/60-65°C), pasteurisation rapide à haute température (HTST) (15-40 sec/70-75°C) et pasteurisation haute (1-2min/85-95°C) [33].

I.5.4.1. Pasteurisation basse

Le lait chauffé dans une vaste chambre à double paroi chauffée par circulation de vapeur ou d'eau chaude. La température à laquelle le lait doit être porté, puis maintenu pendant au

moins 30 minutes, varie de 60°C à 65,5 suivant les pays (c'est-à-dire suivant la conception des marges de sécurité). Le lait est alors refroidi à 10°C ou moins [33].

I.5.4.2. Pasteurisation rapide à haute température (High température short time ou HTST)

C'est un procédé continu dans lequel le lait est rapidement porté à 71°- 72°C et maintenu à cette température pendant au moins 15 secondes ; il est ensuite refroidi rapidement à 10°C ou moins. Cette association de température et de temps assure une bonne marge de sécurité; le chauffage est habituellement obtenu par circulation d'eau chaude et l'échange thermique rapide a lieu à travers des plaques en acier inoxydable ou dans autre type d'appareil, par passage du lait dans un espace annulaire entre des tubes concentriques chauffés par de l'eau qui circule [33].

I.5.4.3. Pasteurisation haute

Le lait est chauffé à une température comprise entre 85°C et 95°C pendant 1-2 minute, soit directement par contact direct avec la vapeur soit le plus souvent, pour des raisons énergétiques, indirectement en flux continu (transmission de la chaleur entre les liquides chauffants et le lait) par des échangeurs de chaleur tubulaires ou à plaques [33].

I.5.5. Les Effets Négatifs de la Pasteurisation

I.5.5.1. Optimisation du barème de traitement thermique

Il est nécessaire de privilégier des couples de températures élevées et des temps de chambrage brefs afin d'éviter les dégradations.

I.5.5.2. Dénaturation des Protéines

La dénaturation d'une protéine correspond à la destruction des liaisons qui maintiennent en place les niveaux de structures quaternaires, tertiaires et secondaires. La protéine se présente donc sous une configuration désordonnée, seule la structure primaire n'est pas perturbée [34].

CHAPITRE II :

Les Echangeurs de Chaleur &Encrassement

II.1. NOTIONS GENERALES SUR LES ECHANGEURS

II.1.1. Définition

Un échangeur de chaleur est un dispositif permettant la récupération de l'énergie thermique d'un fluide par un autre. Le flux thermique traverse la paroi de séparation des différents fluides. En effet, la chaleur peut être caractérisée comme un transfert d'énergie d'un système à un autre dû à une différence de température[35].

II.1.2.Le principe de fonctionnement

Selon la deuxième loi de la thermodynamique, ce transfert d'énergie s'effectue de la température la plus importante vers la plus faible. Il s'arrête donc lorsque les deux milieux sont de températures identiques.

II.1.3. Modes de transferts thermiques

La chaleur peut être transférée par trois modes différents : la conduction, la convection et le rayonnement.

- **La conduction**

Est un mode de transfert de chaleur dû à une différence de température entre deux milieux en contact. A l'inverse de la convection il s'effectue sans déplacement global de matière. C'est le transfert d'énergie des particules les plus énergétiques aux particules les moins énergétiques qui leur sont adjacentes. La conduction peut s'effectuer dans les solides, les liquides ou les gaz. La grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors de ce phénomène est la conductivité thermique. Dans les échangeurs thermiques, la conduction apparaît principalement dans la paroi séparant les deux fluides. Cette paroi est généralement métallique et de faible épaisseur, elle a donc une résistance thermique faible.

- **La convection**

S'effectue par un déplacement de matière dans le milieu. C'est le transfert d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz adjacent. C'est le mode le plus important pour les échangeurs de chaleur mais aussi le plus difficile à estimer, il dépend du type de fluide, des vitesses et du type de l'échangeur.

- **Le rayonnement**

Est un transfert d'énergie sous forme d'ondes électromagnétiquesrésultant des changements dans les configurations électroniques des atomes ou des molécules. Au niveau des échangeurs

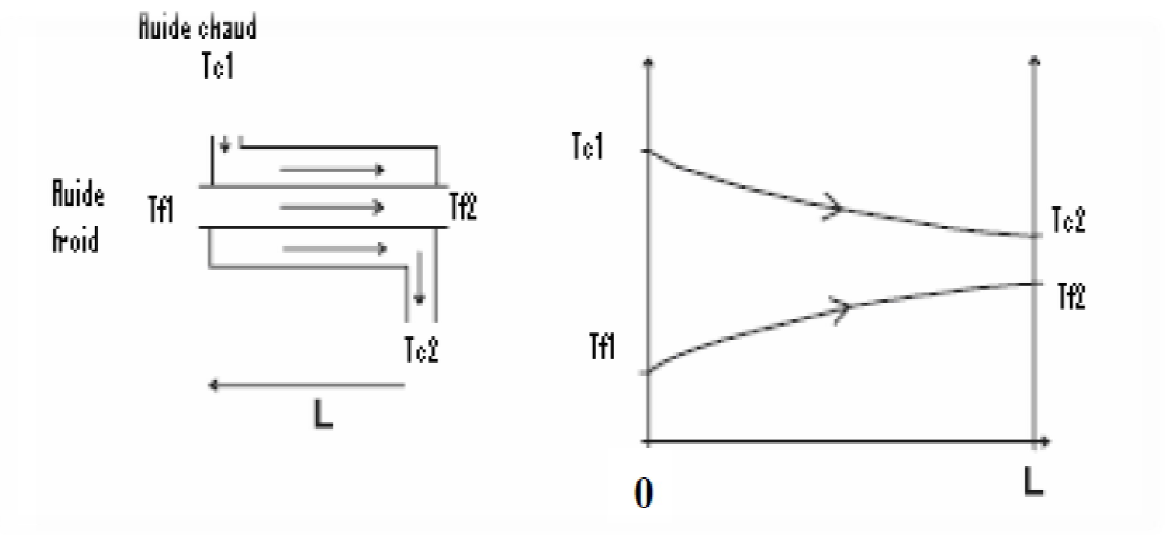
thermiques, c'est le moins prépondérant des modes de transfert thermique, néanmoins il n'est pas négligeable lors de certaines applications telle qu'une chaudière avec brûleur.

II.1.4Modes d'écoulement des deux fluides

On peut distinguer trois modes d'écoulement différents :

A/Ecoulement Co-courants (Ecoulement des deux fluides parallèles et de même sens):

Il s'agit d'échangeurs dit à co-courants ou la température de fluide froid ne peut pas être supérieure à la température de sortie du fluide chaud .Les températures des fluides évoluent pendant leur traversée longitudinale de l'échangeur, à moins que l'un des fluides ne subisse un changement de phase [36].



FigureII.1: Echangeur de chaleur à Co-courant [37].

B/Ecoulement contre-courants (Ecoulement des fluides parallèles mais de sens contraires)

Il s'agit d'échangeur encontre-courant sous la température du fluide froid peut dé passer la température de sortie du fluide chaud .Cette disposition est l'une des plus favorables pour l'échange thermique**.** L'avantage de l'échangeur à contre-courant sur l'échangeur à co-courant est de nécessiter, pour un même flux de chaleur, des surfaces d'échanges plus faibles.

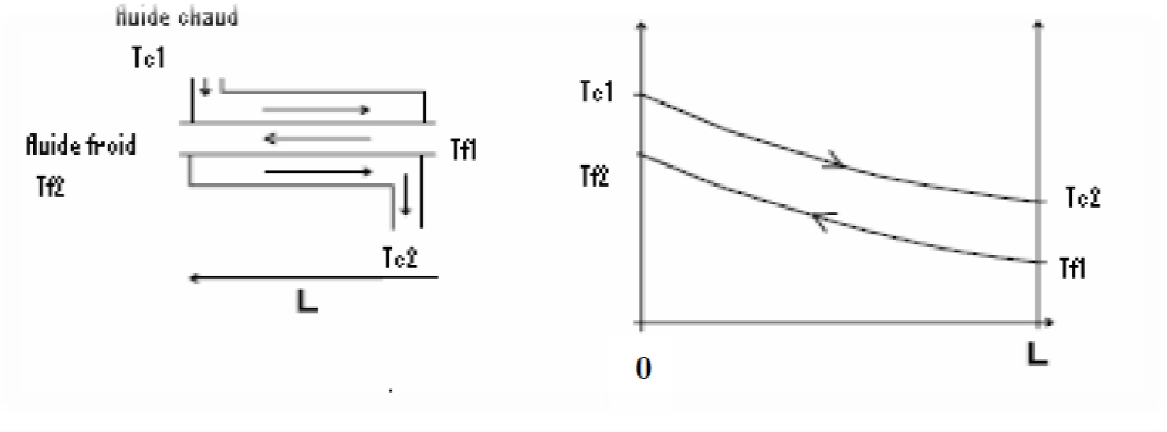


Figure II.2 : Echangeur à tube à contre-courant [37].

C/ Ecoulement des fluides croisés avec ou sans brassage

Les deux fluides s'écoulent perpendiculairement l'un à l'autre, Le fluide non brassé est canalisé: c'est celuidontlaveineestdiviséeentre plusieurs canaux parallèle distincts et de faible section. L'autre fluide circulelibremententreles veines et peut être considéré comme partiellement brassé du fait des tourbillons générés par les tubes. Le brassage an pour effet d'homogénéiser les températures dans les sections droites de la veine fluide .Sans cela, les températuresvarient non seulement avec la direction de l'écoulement, mais aussi dans la section de veine.

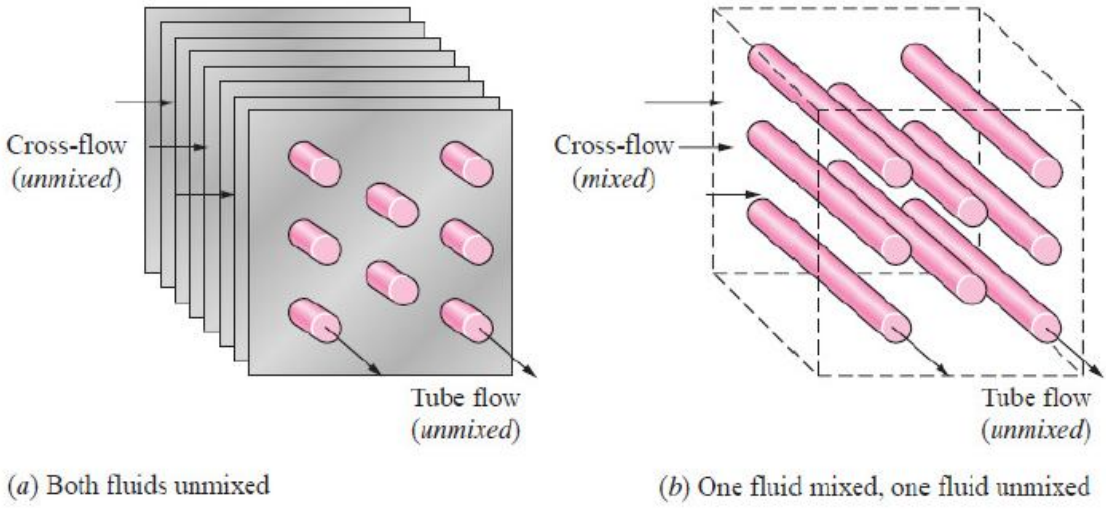


Figure II.3: Echangeur compact à courant croisé [38].

II.1.5 Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange

On retiendra deux types de paroi :

- les échangeurs métalliques en acier, cuivre, aluminium ou matériauxspéciaux : superalliages, métaux ou alliages réfractaires ;
- les échangeurs non métalliques en plastique, céramique, graphite, verre, etc.

II.1.6 Classement technologique :[36]

Les principaux types d'échangeurs rencontrés sont les suivants :

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

II.1.6.1 Échangeurs tubulaires

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 [39], toujours réalisés pour avoir la meilleure efficacité possible pour une utilisation donnée :

- **Echangeur monotube**

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

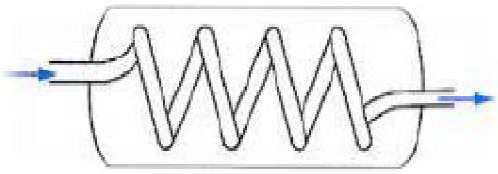


Figure II.4. Echangeur monotube [39].

- **Echangeur coaxial**

Dans cet échangeur de chaleur, 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.

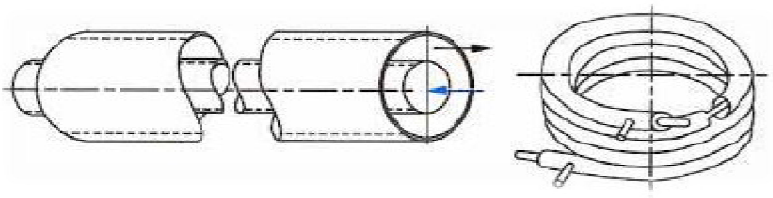


Figure II.5. Echangeur coaxial cintré [39].

II.1.6.2 Echangeurs à plaques : [40,41]

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

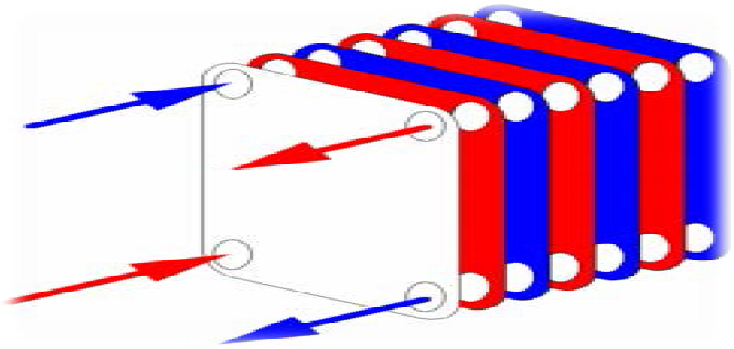


Figure II.6: schéma d'un échangeur à plaques [42].



Figure II.7 :Illustration du fonctionnement du BPHE [43].

II.1.6.2 .1 Les caractéristiques : [44,45]

Echangeur à deux fluides liquides ou àdeux fluides gazeux, il est constitué dedeux tirants auxquels sont fixées desplaques de métal à ondulations ennombre variable garnies de joints d'étanchéité à leur périphérie. L'échange de chaleur est intensifier parl'augmentation de la turbulence favorisée par desondulations. Il est le plus simple car ilest facile à nettoyer et inspecter leproduit alimentaire ou l'eau potable. Ilest employé en pasteurisateurs aussi le préchauffagede l'eau des chaudières avec deseffluents d'eau chaude, le préchauffagede l'eau d'un échaudoir, le chauffage del'eau potable.

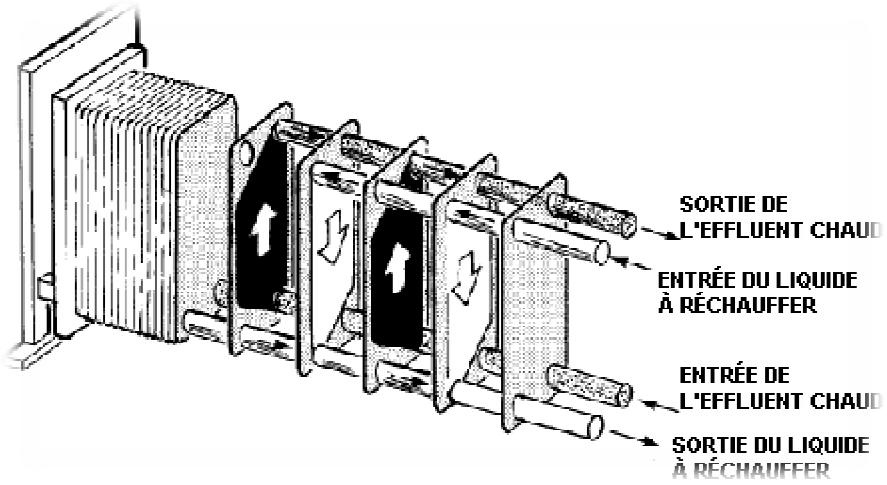
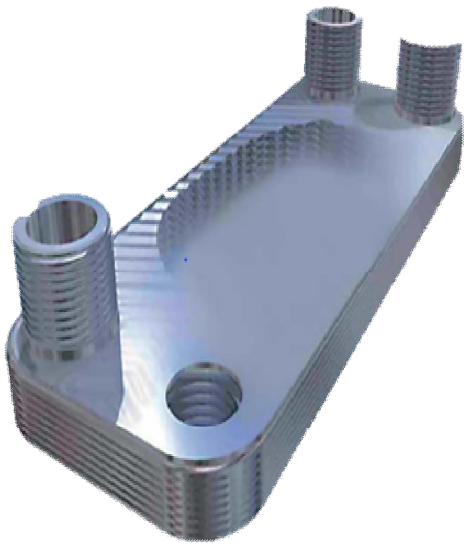


Figure II.8 : Echangeur à plateaux ou à plateaux et cadre.

II.1.6.2 .2 Les types des Echangeurs à plaques :

Résume autre types des Echangeurs à plaques (échangeurs à plaques et joints, échangeurs à plaques brasées) dans le tableau suivant :

Tableau II.1 : comparaison entre échangeurs à plaques et joints, échangeurs à plaques brasées.

	Echangeurs à plaques et joints	**Echangeurs à plaques brasées**
	 **Figure II.9:**Echangeurs à plaques et joints [46]	 **Figure II.10 :** Echangeurs à plaquesbrasées [46]
Définition	Echangeurs à plaques et joints : Sont composés d'un ensemble de plaques métallique corruguées/cannelées par estampage à froid. Ces plaques sont montées entre un bâti fixe et un bâti mobile, le serrage étant assuré par des tirants. Les plaques sont équipées de joints qui permettent d'assurer l'étanchéité de l'échangeur et la circulation des fluides.	Echangeurs à plaques brasées sont composés d'unensemble de plaques en Acier Inoxydable AISI(316) corruguées/cannelées. ces plaques sont empilées/assemblées par brasures cuivre ou nickel et assurent ainsi une résistance mécanique exceptionnelle et une étanchéité parfaite.
Avantages	●Haute efficacité thermique et transfert de chaleur optimale**.** ●Design compact avec des surfaces d'échangethermique optimisées et une empreinte au sol limitée. ● Faibles coûts d'installation. ●Démontage propre, facile et rapide.	● Haute efficacité thermique pour un transfert de chaleur optimal ● Design compact avec des surfaces d'échange thermique optimisées et une empreinte au sol limitée ● Faibles coûts d'installation ●Encrassement faible

	●Hauts niveaux de performances avec de faibles volumes de rétention. ●Design modulaire et flexible.	
Application	● Chauffage. ●réfrigération etrécupération dechaleur liquide/liquide et vapeur/liquide. ● Pasteurisation.	●Production eau chaude sanitaire, chauffage, ●pompes à chaleur, distribution de froid, ●chauffage solaire, géothermie, ●refroidissement d'huile ou autres applications industrielles (fluide/ fluide)
Utilisation	●Chauffage, climatisation, pompe à chaleur ●Condenseur / Evaporateur ●Production d'eau chaude ●Agro-alimentaire, chimie, pétrochimie, énergie .	●Chauffage, ventilation et climatisation ●Industrie ●Réfrigération ●Energie ●Agroalimentaire, marine,...

II.2. NOTIONS SUR L'ENCRASSEMENT DES ECHANGEURS

II.2.1 L'encrassement des Échangeurs de chaleur

L'accumulation des dépôts indésirables sur les surfaces des échangeurs de chaleur est habituellement appelée l'encrassement. Ces dépôts engendrent une résistance au transfert de chaleur et réduit donc l'efficacité de l'échangeur de chaleur. L'encrassement peut être, une matière cristalline, des produits de réactions chimiques y compris la corrosion, ou de particules. La nature du dépôt dépend du fluide (liquide ou gaz) passant à travers l'échangeur de chaleur. Il peut être la masse de fluide lui-même qui provoque le problème de la formation de dépôts, par exemple, la décomposition d'un liquide organique, dans les conditions de température dans l'échangeur de chaleur. Le problème d'encrassement est produit par une certaine forme de contaminant dans le fluide, souvent à très faible concentration, par exemple, des particules solides ou des micro-organismes [47].

II.2.2. Phénomène d'encrassement : [48]

L'encrassement qui, sous sa forme la plus générale, peut être défini commel'accumulation d'éléments solides indésirables sur une interface, affecte un grandnombre d'opérations industrielles.

II.2.3. Type d'encrassement

Selon la classification établie en 1978 par Epstein [48], il existe cinq grands types d'encrassement différents :

- La corrosion
- l'encrassement biologique
- l'encrassement par réaction chimique
- l'entartrage
- l'encrassement particulaire

Quel que soit le phénomène d'encrassement considéré, il est plus ou moins critique selon la nature des fluides employés et/ou la conception des échangeurs. Dans lessituations réelles d'encrassement, il est bien évident que ces différents mécanismesinteragissent ou se superposent de manière plus ou moins complexe.

✓ **La corrosion**

L'encrassement par corrosion est le résultat d'une réaction chimique ou électrochimique entre la surface de transfert de chaleur et le fluide en écoulement [49].Les produits qui se forment et s'accumulent sur la surface créent l'encrassement. Il existe différents types de corrosion :

- la corrosion uniforme caractérisée par une perte d'épaisseur régulière mais dont la vitessen'est pas forcément proportionnelle au temps
- la corrosion par piqûres où l'attaque est limitée à des zones de très petites surfaces
- la corrosion fissurante à l'échelle microscopique intergranulaire ou transgranulaire
- la corrosion sélective où seul un élément d'un alliage subit une attaque sélective

✓ **L'encrassement biologique**

L'encrassement biologique est dû au développement de micro-organismes qui créent un film encrassant au contact de la surface d'échange [50]. Il peut être causé par trois grands types de micro-organismes :

- les bactéries dont le développement est dû à un apport nutritif de type hydrocarbures ;
- les algues dont le développement est dû à la présence d'énergie solaire avec photosynthèse;

- les champignons dont le développement est dû aux changements des conditions ambiantestelles que l'humidité, la température ou le pH.

✓ **l'encrassement par réaction chimique**

L'encrassement par réaction chimique est dû à la présence d'une réaction chimique au voisinage d'une surface d'échange [51]. Les produits solides ainsi formés s'y déposent. Il s'agitle plus souvent d'une réaction de polymérisation qui implique la formation d'un dépôt de haut poids moléculaire. Les vitesses de telles réactions chimiques dépendent fortement de la température, de la pression, de la concentration et de la présence d'éléments catalyseurs. Toutefois, la vitesse globale du mécanisme de dépôt dépend aussi de la dynamique des phénomènes desurface et de transfert. Il est rencontré dans les industries alimentaires, nucléaire etdans les procédés deraffinage du pétrole**.**

✓ **l'entartrage**

Il est généralement associé à la production d'un solide cristallin à partir d'une solution liquide [52]. 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 réunies :

- La limite de solubilité doit êtredépassée, c'est à dire qu'il y ait saturation : c'est l'aspect thermodynamique
- La vitesse de déposition doit être suffisamment rapide : c'est l'aspect cinétique [53.54]

✓ **l'encrassement particulaire**

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

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

II.2.4 Facteurs favorisant l'encrassement

Les facteurs permettant la formation et la stabilisation du dépôt protéique n'ont pas été clairement établis. Certains auteurs ont montré que ce dépôt est stabilisé par la présence d'ions qui renforceraient les forces d'adhésion entre les protéines des agrégats [55]. A l'opposé, d'autres auteurs ont montré qu'une concentration élevée en ions, permet de réduire

l'encrassement protéique dans les échangeurs thermiques utilisés au cours des opérations de pasteurisation ou d'upérisation du lait à haute température (UHT) [56].

II.2.4.1 Zones stagnantes

Les zones stagnantes sont des zones de dépôts préférentiels par exemple dans l'écoulement externe d'un échangeur a tubes et calandre, les particules se concentreront dans les zones de recirculation a l'aval des chicanes ,avec le temps ,lesdépôts ont tendance dans certains cas à s'agglomérer dans l'espace entre les tubes et les chicanes et créer ainsi un blocage de l'écoulement de fluide.

Dans les échangeurs à plaques, spirales et tubulaires à tiges, l'absence de chicanes réduit le risque d'apparition des zones 'mortes`.Par contre quel que soit le type d'échangeur, des zones de faibles vitesses peuvent apparaitre aux raccordements entre les tuyauteries et l'échangeur.

II.2.4.2 Effet de la vitesse

En règle générale, plus la vitesse est importante, plus l'encrassement est faible.Bien entendu, la vitesse retenue reste limitée par les contraintes de pertes de charges et les risques d'érosion, [50,57] la vitesse a un effet prépondérant sur le réentrainement [58].La dureté du dépôt est également un paramètre important pour le réentrainement, cela a été prouvé par Rindt et coll.[59], dans leur des vitesses d'écoulement différentes .Ils ont trouvé que les petites particules s'attachent premièrementaux parois puis les particules larges. Pour éviter l'encrassement une vitesse d'écoulement importante fait diminuer l'épaisseur des dépôts. Avec un dépôt dur et adhérant on constate une évolution linéaire de la résistance d'encrassement par contre avec des dépôts mous, l'évolution de la résistance d'encrassement prend la forme asymptotique classique.

II.2.4.3 Effet de la température de surface

La présence des points chauds (ou froids) sur la surface d'échange est souvent liées à un problème de répartition de vitesse au voisinage de la paroi .Il est bien connu que lorsque la température de surface croit, le dépôt des sels de solubilité inverse est favorisé.En ébullition, cela reste vrai quelque soient les sels en présence [60,61] La même règle est encore vraie pour l'encrassement biologique jusqu'à une certaine température limite (de l'ordre de 35^{o}C).

Les dépôts particulaires sont également influencés par les gradients de température car les phénomènes de thermophorèses agissent dans la direction de ce gradient, pratiquement, cela

revient à accentuer les dépôts lorsqu'on refroidit le fluide encrassant et à diminuer ceux-ci lorsqu'on le chauffe.

II.2.4.4 Etat de surface : la rugosité

Les surfaces rugueuses ont tendance à favoriser les dépôts, particulièrement dans la phase d'initiation de l'encrassement , par contre, par la suite, le dépôts modifie la rugosité de la surface et ce n'est plus la rugosité initiale qui contrôle le phénomène, mais celle du dépôt [62].

II.2.4 .5 Matériau de construction, corrosion

Le choix d'un matériau approprié constitue la méthode le plus radicale pour éviter la corrosion. En présence de produits chimique, les problèmes de corrosion sont complexes, une variation de composition ou la présence d'impuretés dans la solution peuvent modifier le comportement des matériaux.

Pour limiter les effets néfastes de l'encrassement, il est possible d'agir sur ces divers paramètres [62] cités ci-dessus :

- Vitesses
- Température
- Etat de surfaces
- Nature des matériaux

II.2.5 Apparition et développement de l'encrassement

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

- **Initiation :**

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

- **Transfert des particules à la paroi :**

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

- **Adhésion des particules :**

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

- **Réentraînement des particules déposées :**

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

- **Vieillissement du dépôt**

Il s'agit d'un changement de texture du dépôt d'origine chimique ou cristalline. On peut alors observer soit consolidation, soit son écaillage.

II.2.6L'encrassement de lait

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

II.2.7 L'encrassement protéique du Lait

L'encrassement protéique est généralement provoqué par la dénaturation thermique et l'agrégation des protéines contenues dans le fluide traité. Il est principalement observé au niveau des échangeurs de chaleur. En ce qui concerne le traitement du lait de vache et de ses fluides dérivés, il a été montré que l'encrassement protéique résulte des phénomènes de dénaturation thermique, d'agrégation et d'adhésion des protéines,

Principalement de la β-lactoglobuline. Sous l'effet d'une température élevée généralement supérieure à 70°C la β-lactoglobuline subit un changement de conformation permettant l'exposition de groupements sulfhydryles [63].

Cependant, le phénomène initiant l'encrassement n'a pas été clairement établi. Il s'agirait soit de la formation d'une couche initiale de protéines dénaturées soit de celle d'agrégats protéiques à la surface des conduites. [63,64]

Certains auteurs ont montré que ce dépôt est stabilisé par la présence d'ions qui renforceraient les forces d'adhésion entre les protéines des agrégats [57].

A l'opposé, d'autres auteurs ont montré qu'une concentration élevée en ions, permet de réduire l'encrassement protéique dans les échangeurs thermiques utilisés au cours desopérations de pasteurisation ou d'upérisation du lait à haute température (UHT) [56].

II.2.8Méthodesdenettoyage des échangeurs [65]

Dans de nombreux cas, que les techniques de traitement des fluides et de nettoyage en continu soient ou non utilisées, il est nécessaire de procéder à un nettoyage complet de l'appareil.

Cette opération s'effectue pendant les phases d'arrête de l'installation et deux méthodes peuvent être utilisées.



Figure II.11 : nettoyage à l'aide d'un pistolet hydraulique.

II.2.8.1 Nettoyagemécanique

Le nettoyage mécanique pendant les phases d'arrêts peut effectuer sur l'échangeur en place lorsque l'espace disponible le permet ou sur une aire de nettoyage (échangeur démonté), plusieurs techniques peuvent être mise en œuvre :

- **Nettoyage à l'eau sous pression**

  Elle est efficace pour enlever les dépôts à l'intérieur ou à l'extérieur des tubes d'échangeur ou pour d'autre types de géométrie, de façon occasionnelle, du sable peut injecté avec l'eau pour arracher les dépôts durs mais dans ce cas , il y a risque d'érosion de la surface et surtout de destruction du film protecteur anticorrosion .

- **Nettoyage à l'aide d'outils**

Cette technique est utilisée pour enlever les dépôts mêmes très durs à l'intérieure des tubes rectilignes de chaudières, de condenseurs, ou de tous autre durs échangeurs de chaleur.



Figure II.12 : outil de nettoyage mécanique.

II.2.8.2 Nettoyage chimique

Les produits chimiques sont également utilisés pour le nettoyage hors ligne des tubes d'échangeur de chaleur. Plusieurs produits légèrement acides sont disponibles et peuvent éliminer plus de dépôt que la plupart des autres méthodes; mais ils sont coûteux, prennent plus de temps pour que l'opération soit terminée, et l'élimination ultérieure des produits chimiques peut se révéler un danger pour l'environnement. On a également trouvé, assezfréquemment, que certaines matières résiduelles ont besoin d'être enlevé par des méthodes de nettoyage mécanique.

CHAPITRE III :

Modélisation et Simulation de L'encrassement

III .1. INTRODUCTION

Dans le cadre du présent travail, on se propose une modélisation de l'encrassement en régime turbulent dans un échangeur de chaleur à plaques lors de phase de pasteurisation du lait par le modèle de turbulence standard $\kappa - \varepsilon$.

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

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

III .2. DESCRIPTION DU SYSTEME [66]

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.

Le pasteurisateur 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 chambrage, enfin le lait aborde, respectivement l'échangeur 1 afin de chauffer le lait entrant puis l'échangeur 3 (échangeur de refroidissement).

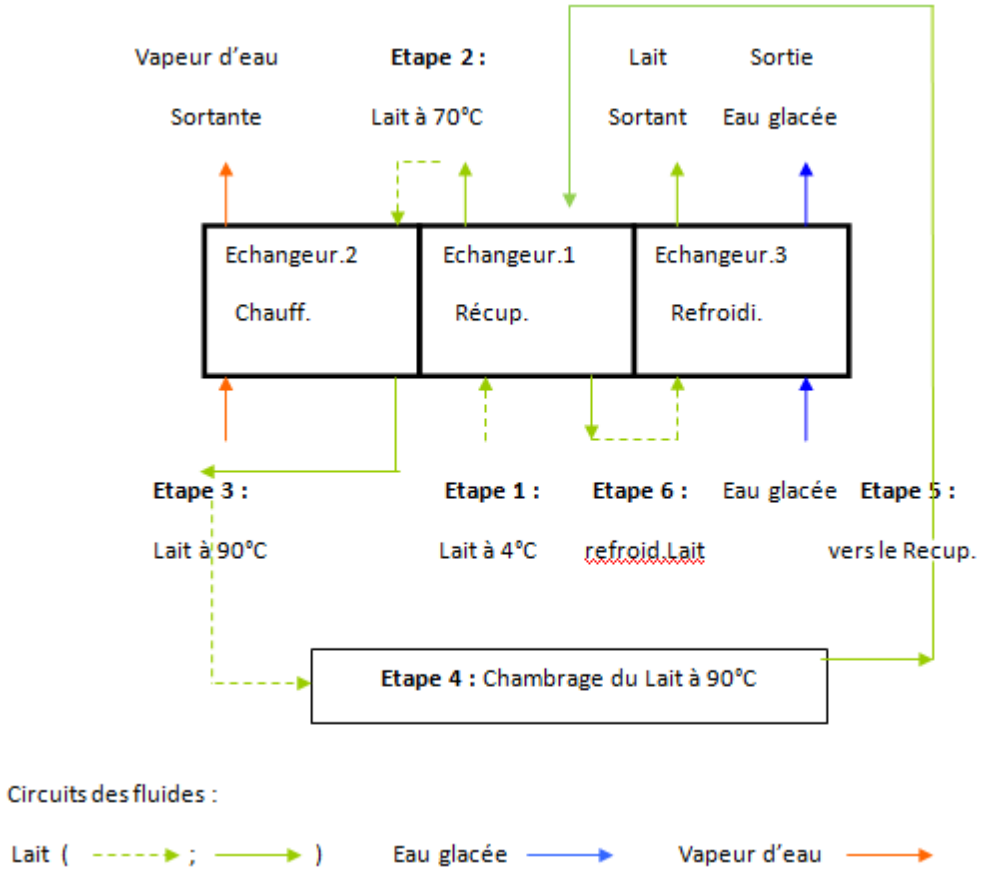


Figure III .1: Cycle de Pasteurisation du Lait.

III .3. MODELE THERMIQUE DE L'ECHANGEUR A PLAQUES [66]

III .3.1. Introduction

Quand il agit de traitement thermique du lait, les échangeurs de chaleur à plaques sont généralement recommandés car ils présentent l'avantage de traiter des débits importants avec un coefficient d'échangeur thermique également important.

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

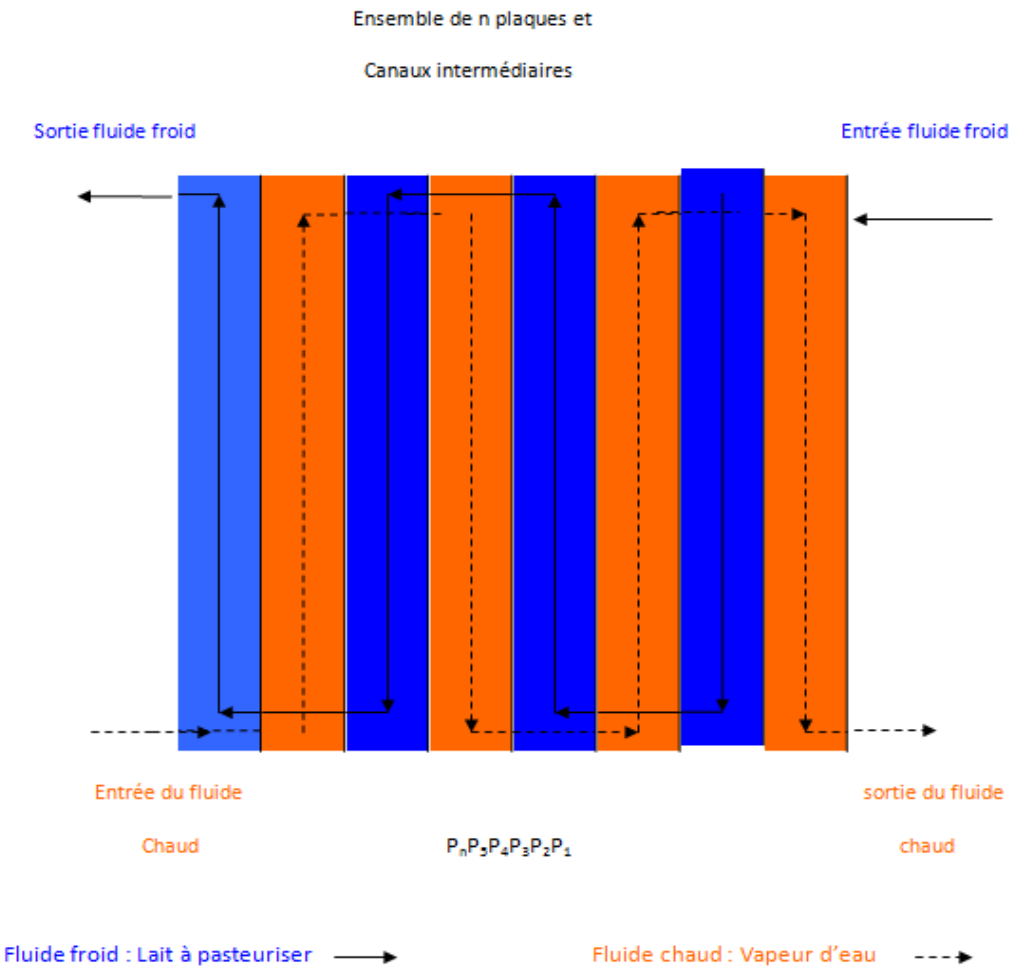


Figure III .2: Arrangement des plaques de l'échangeur de pasteurisation et sens de circulation des fluides.

La modélisation de l'échangeur de chaleur à plaque 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.

III .3.2. Formulation mathématique du problème : [67]

III .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 [68].

III .3.2.2. Modélisation de la turbulence dans un milieu totalement fluide

III .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 $\left(\mu\phi\right)$ sont négligés devant les autres termes de l'équation d'énergie.

III .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

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

b) Equation de conservation de la quantité de mouvement

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

c) Equation de conservation de l'énergie

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

d) Equation générale de l'énergie cinétique de turbulent(k)

$$\rho\overline{U}_j \frac{\partial k}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial X_j}\right] + \mu_t \frac{\partial \overline{U_i}}{\partial X_j}\left(\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial X_j}+\frac{\partial \overline{U_j}}{\partial X_i}\right) - \rho\varepsilon \qquad \textbf{(III .4)}$$

e) Equation de transport du taux de dissipation de turbulent($\mathcal{E}$)

$$\rho\overline{U}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial X_j}\right] + C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}\mu_t \frac{\partial \overline{U_i}}{\partial X_j}\left(\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial X_j}+\frac{\partial \overline{U_j}}{\partial X_i}\right) - C_{\varepsilon 2}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \qquad \textbf{(III .5)}$$

III .3.2.3. Modélisation de la turbulence dans un milieu poreux

III .3.2.3.1. Modèle générale

Afin de réduire considérablement la formulation mathématique, nous allons établir un seul système d'équations qui régit tout le domaine étudié (fluide et poreux) et cela en utilisant l'approche a un seul domaine.

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.

Avec : $R_c = \frac{\lambda_{eff}}{\lambda}$ et $K = D_a$.

Les équations de continuité, de mouvement, d'énergie, d'énergie cinétique turbulente et de dissipation turbulente sont écrites sous forme indicielle dans le système d'équations suivant:

a) Equation de continuité

$$\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial X_i} = 0 \qquad \textbf{(III.6)}$$

b) Equations du mouvement

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial X_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial X_i} + \frac{\partial}{\partial X_i}\left[\left(\nu J + \nu_t\right)\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial X_j}\right] + \frac{\partial}{\partial X_i}\left[\nu_t \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial X_j}\right] - \frac{2}{3}\frac{\partial k}{\partial X_j}$$
$$-\phi \frac{\nu}{K} U_i - \phi^2 \frac{C_F}{K^{1/2}}\left[\left(U_j U_j\right)^{1/2} U_i - \frac{U_j}{\left(U_j U_j\right)^{1/2}}\left(\nu_t \left\{\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i}\right\} - \frac{2}{3}k\right)\right] \qquad \textbf{(III.7)}$$

c) Equation de l'énergie

$$\phi . U_j \frac{\partial T}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_i}\left[\left(\frac{\lambda_{eff}}{\left(\rho . C_p\right)_f} + \phi \frac{\nu_t}{\sigma_t}\right)\frac{\partial T}{\partial X_j}\right] \qquad \textbf{(III.8)}$$

d) Equation de l'énergie cinétique de turbulence (k)

$$\overline{U}_j \frac{\partial k}{\partial X_j} = \nu_t \left(\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial X_j} + \frac{\partial \overline{U_j}}{\partial X_i} \right) \frac{\partial \overline{U_i}}{\partial X_j} + \frac{\partial}{\partial X_k} \left[\nu J + \frac{\nu_t}{\sigma_t} \right] \frac{\partial k}{\partial X_k} - 2\phi \frac{\nu}{K} k - J\varepsilon$$

$$-\phi^2 \frac{C_F}{\left(U_k U_k\right)^{1/2} K^{1/2}} \left[\begin{array}{l} -\nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_k} + \frac{\partial U_k}{\partial X_i} \right) \left(U_k U_j \right) + \frac{8}{3} k \left(U_k U_k \right) + \frac{5}{3} \left(-\frac{4}{3} C_s U_k \frac{k^2}{\varepsilon} \frac{\partial k}{\partial X_k} \right) \\ + \frac{4}{3} C_s U_k \frac{k^2}{\varepsilon} \nu_t \frac{\partial}{\partial X_i} \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_k} + \frac{\partial U_k}{\partial X_i} \right) \end{array} \right] \quad \textbf{(III.9)}$$

e) Equation de transport du taux de dissipation turbulent (ε)

$$\overline{U}_k \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_k} = \frac{\partial}{\partial X_k} \left[\left(\nu J + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_k} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial X_j} - J C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} - 2\phi \frac{\nu}{K} \varepsilon$$

$$-2\phi^2 \frac{C_F}{K^{1/2}} \left[\begin{array}{l} \left(U_k U_k \right)^{1/2} \varepsilon + \nu \left(\frac{\partial}{\partial X_k} \left(\left(U_k U_k \right)^{1/2} \right) \right) \frac{\partial k}{\partial X_j} + \frac{\nu}{3} \frac{\partial}{\partial X_k} \frac{\left(U_k U_i \right)}{\left(U_k U_k \right)^{1/2}} \frac{\partial k}{\partial X_j} \\ + \frac{U_k}{\left(U_k U_k \right)^{1/2}} C_{\varepsilon 3} \frac{k}{\varepsilon} \nu_t \left(\frac{\partial U_k}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_j} + \frac{1}{3} \frac{U_k U_i}{\left(U_k U_k \right)^{1/2}} \varepsilon \\ - \frac{\nu}{2} \nu_t \frac{\partial}{\partial X_j} \frac{\left(U_k U_i \right)}{\left(U_k U_k \right)^{1/2}} \left(\frac{\partial^2 U_i}{\partial X_j \partial X_k} + \frac{\partial^2 U_k}{\partial X_j \partial X_i} \right) - \left(\frac{2}{3} \frac{U_k}{\left(U_k U_k \right)^{1/2}} C_{\varepsilon 3} \frac{k}{\varepsilon} k \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_j} \end{array} \right] \quad \textbf{(III.10)}$$

➢ Dans ce modèle de turbulence les valeurs des constantes les plus courantes sont:

$C_{\varepsilon 1} = 1.44$; $C_{\varepsilon 2} = 1.9$; $\sigma_k = 1$; $\sigma_\varepsilon = 1.2$

III .3.2.3.2. 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) Energie cinétique turbulente et la dissipation turbulente

- Condition d'adhérence à la paroi :

$y=0$ et $y=H$: $k=0$ et $\varepsilon=\nu\frac{\partial^2 k}{\partial y^2}$

- A l'entrée :

$x=0$: $k=k_e=Iu_e^2$ et $\varepsilon=\varepsilon_e=\nu\frac{k_e^{\frac{3}{2}}}{\alpha D_h}$

Avec : I : le taux de turbulence, varie entre 0.1% à 10% et $\alpha=0.33$

- On impose à la sortie un régime établi, soit :

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

d) 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.

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

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

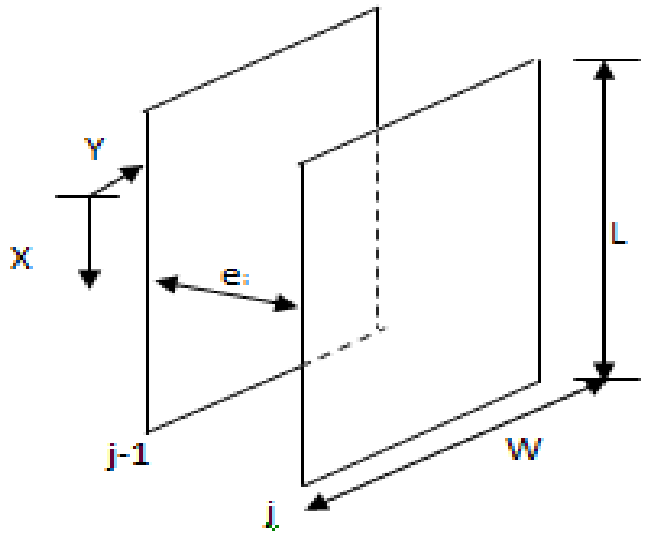


Figure III .3: Schématisation de la direction de l'écoulement entre deux plaques.

III .3.4. Calcul des paramètres à mesurer du mélange (lait)

1. Viscosité : la viscosité du mélange est calculée à partir de la relation d'Einstein appliquée pour les solutions diluées, elle s'écrit [69] :

$$\mu+\mu_0(1+2,5\varphi) \qquad \textbf{(III.11)}$$

φ = (volume des particules)/ (volume total) **(III.12)**

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

-A partir de la relation (III.12), 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.11) nous parvenons à μ :

2. Chaleur spécifique : Elle est calculée avec la corrélation suivante [70] :

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

3. Débit du mélange : Q = 4000 l/h.

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

4. Vitesse du mélange : S'écrit :

$$u = \frac{Q}{A} \qquad \textbf{(III.13)}$$

Avec: $A = e_j \times W$

Donc à partir de la relation (III.13): on obtient la vitesse u :

5. Nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\rho_f \times u \times d_e}{\mu_f} \qquad \textbf{(III.14)}$$

$$d_e = 2 \times e_j \qquad \textbf{(III.15)}$$

$\rho_f = 1033,7 - 0,2308T - 0,00246T^2$ [70].

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 [71].

Pour le transfert de chaleur en régime turbulent dans un échangeur à plaques, la corrélation suivante peut être utilisée [71]:

$$Nu = 0.214\left(Re^{0.662} - 3.2\right)Pr^{0.4} \quad \textbf{(III.16)}$$

$$Pr = \frac{Cp \times \mu}{K} \quad \textbf{(III.17)}$$

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.16) et les équations (III.13) et (III.15) sont utilisées [71] :

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

D'où avec l'équation (III.17): Pr = 2

La corrélation (III.16) 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.18)**

III.3.5. Calcul des paramètres à mesurer de l'eau chaude

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 C^0 [72].

On obtient: μ ,Cp ,ρ_c [72] .

Avec la relation (III.13) :

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.14) et (III.17) on obtient: Re, Pr

-Avec la corrélation (III.16) on obtient : Nu

-De l'équation (III.18) on obtient: h_c

III.4. PROGRAMME ANSYS

III.4.1. Présentation et description du logiciel ANSYS

Le logiciel ‹‹ **ANSYS** ››, a été développé par Dr. John Swanson, fondateur de la société‹‹ **ANSYS**››, qui a son siège à Houston, PA, USA. Il s'agit d'un outil de développement en analyse d'ingénierie, La méthode utilisée est celle des éléments finis. Il est utilisé dans des domaines allant de l'automobile et l'électronique à l'aérospatiale et la chimie. Le logiciel ANSYS permet la modélisation de structures, produits, composantes ou systèmes et d'étudier leurs réponses physique telles que les niveaux de contraintes, la distribution de température ou l'effet de champs électromagnétiques [73].

ANSYS permet également d'optimiser les paramètres de modélisation d'un système, de calculer des régressions linéaires et non linéaires et de générer des courbes de grande qualité. De plus, de nombreuses fonctions mathématiques et thermodynamiques utilisées dans le milieu de l'ingénierie sont incorporées dans le logiciel.

ANSYS est le premier éditeur mondial dans le domaine du calcul par élément finis, Les outils intégrés au logiciel permettent de résoudre les problèmes de validations produits de manière efficace, Ils permettent d'optimiser le processus de conception (gain de temps énorme) et dons de proposer des produits plus innovants (intégration d'une pré-analyse dans le cycle de conception), de qualité plus élevée tout en minimisant les couts [74].

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

- Type de calcul (2D ou 3D)
- Choix du maillage
- Equations résolues
- Conditions aux limites
- Conditions initiales
- Mise en place d'obstacles
- Méthodes et paramètres numériques (choix des schémas, résidus ….)[75]

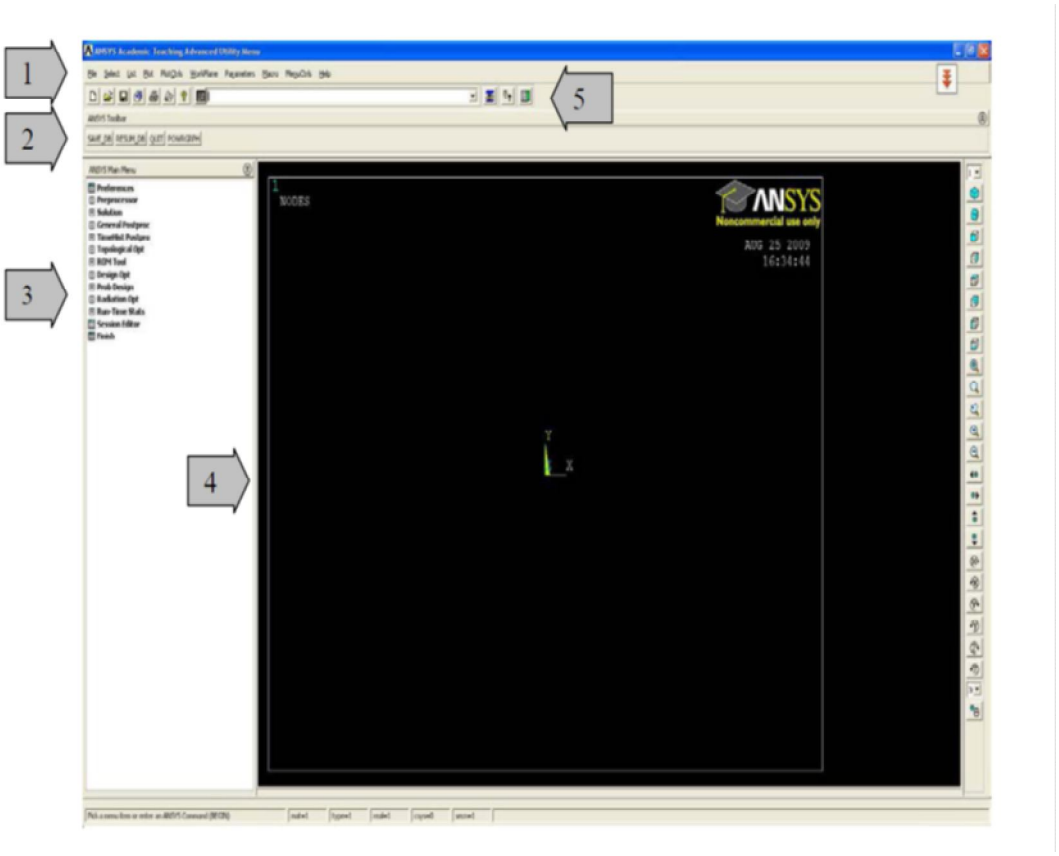


Figure III .4: L'interface utilisateur graphique d'ANSYS (GUI).

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 : [76]

✓ **Pré- processor**

La phase de préprocesseur est celle ou sont spécifiées les données. L'utilisateur peut choisir le système de coordonnées et le type d'éléments, définir des constantes et des propriétés de matériaux, créer des modèles solides et les mailler, ainsi que définir des équations de couplage et contraintes, l'utilisateur peut aussi exécuter un programme qui lui indiquera la

taille des fichiers générés, la mémoire nécessaire, le temps d'exécution et le wavefront nécessaire. Le maillage peut être de 3 types :

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

✓ **Solveur**

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

- Structure, thermique, champ EM, champ électrique, électrostatique, fluides, acoustique.
- Champ couplés : ceci signifie qu'il est possible de résoudre simultanément plusieurs aspects (par exemple, la thermomécanique, l'hydromécanique, thermo-fluidique, etc.).

✓ **Post-processor**

C'est la phase ou l'utilisateur peut manipuler les résultats de la phase précédente et les visualiser interactivement ou faire des sauvegardes pour impression et/ ou vidéo.

III.4.2. Les points forts des outils ANSYS : [77]

- 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 discutions

IV.1. INTRODUCTION :

Cette étude porte sur l'analyse de l'encrassement dans un échangeur de chaleur à plaques. La géométrie considérée est un canal plan, entièrement remplie par un liquide ayant un fort pouvoir encrassant (le lait) 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 poreux 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 V.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).

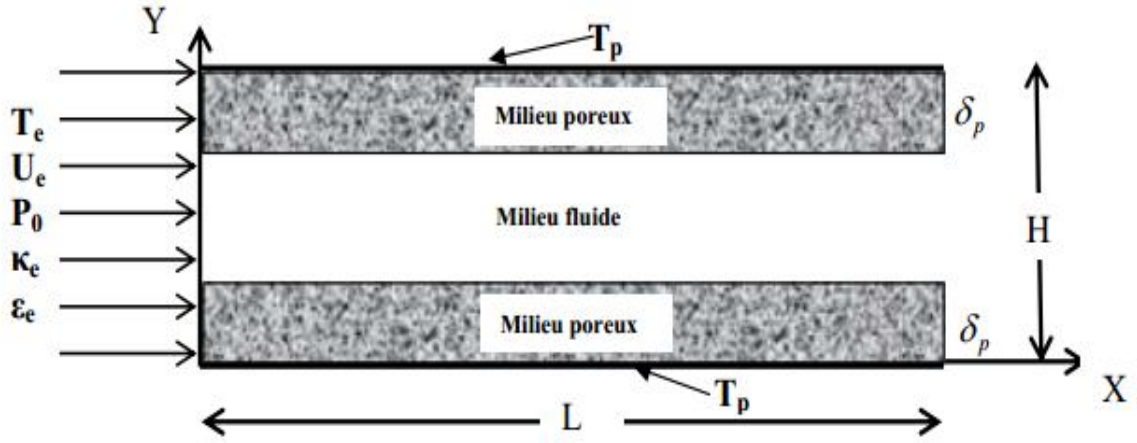


Figure IV.1 Ecoulement dans un canal à section rectangulaire.

IV.2. ECHANEUR DE CHALEUR A PLAQUES EN ALUMINIUM

IV.2.1. LES PROFILS DANS UN MILIEU COMPLETEMENT FLUIDE

IV.2.1.1 Profil de température :

L'évolution de la température en fonction de la largeur du canal est représentée sur la figure V.2 et ce pour différentes positions dans le canal (y).

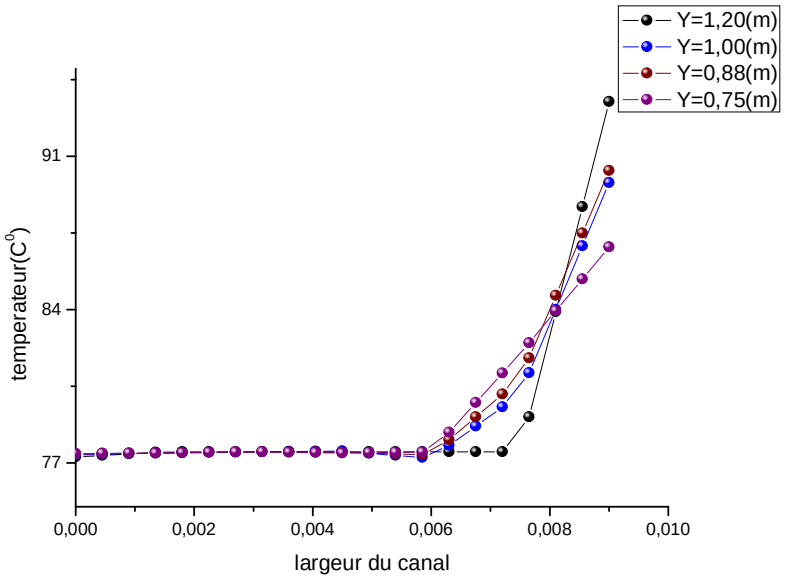


Figure IV.2 : Variation du profil de température dans lait.

Une augmentation de la température du lait le long du canal est observée en raison de l'échange thermique avec la vapeur d'eau circulant en contre-courant dans l'échangeur de chaleur. L'inverse est observé pour la vapeur d'eau (graphe en annexe). L'augmentation maximale est observée pour X=0, à la sortie du canal.

IV.2.2.2. Profil de vitesse :

L'évolution du profil de la vitesse en fonction de la largeur du canal est représentée sur la figure IV.3 et ce pour différentes longueur dans le canal (y).

Trois sous profils de vitesse se dégagent de la figure: une vitesse nulle près des parois de part et d'autre et une vitesse maximale au niveau de l'axe central.

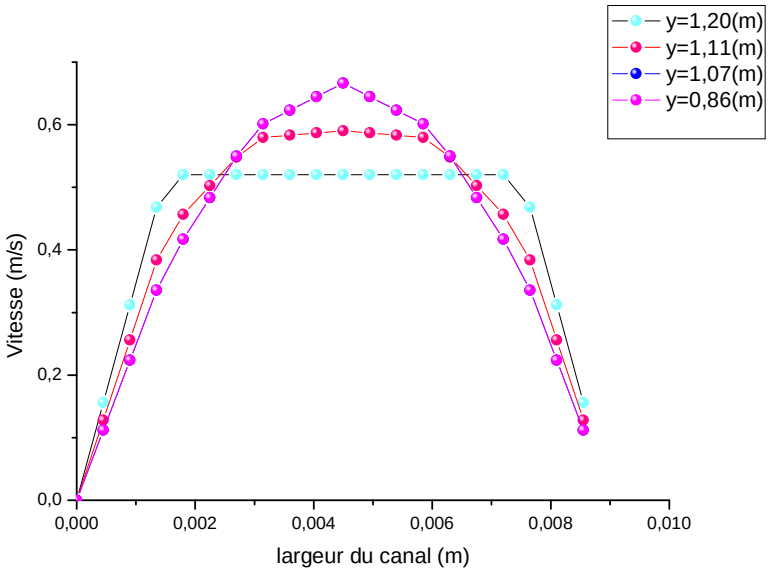


Figure IV.3 : Variation du profil de vitesse à la largeur de canal

IV.2.2. LES PROFILS DANS UN MILIEU AVEC ENCRASSEMENT :

IV.2.2.1. Profil de la température :

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

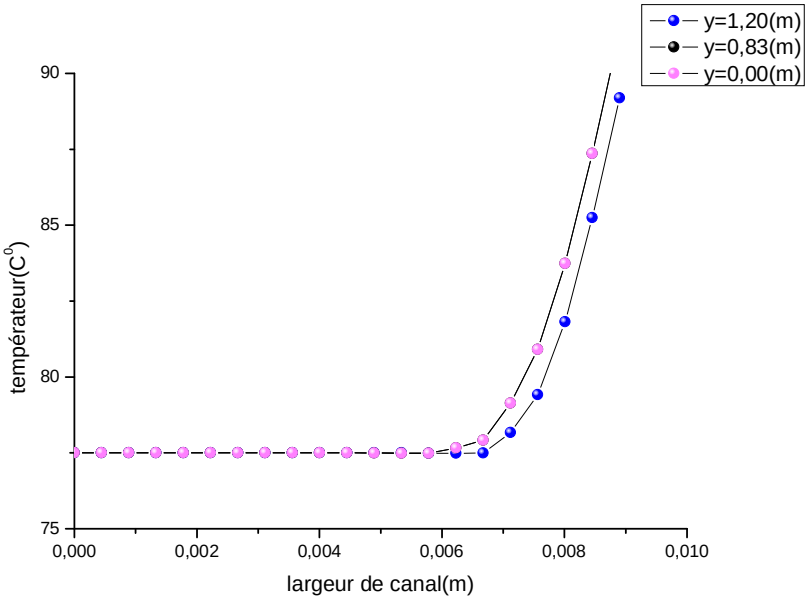


Figure IV.4 : La variation de la température à la largeur de canal.

Une augmentation de la température dans le cas d'un canal avec un dépôt poreux sur les parois est toujours observée mais elle est moins significative en comparaison avec le cas sans dépôt et ce en raison de la présence du dépôt de nature isolante.

IV.2.2.2. 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 V.6 et ce pour différentes positions dans le canal (y).

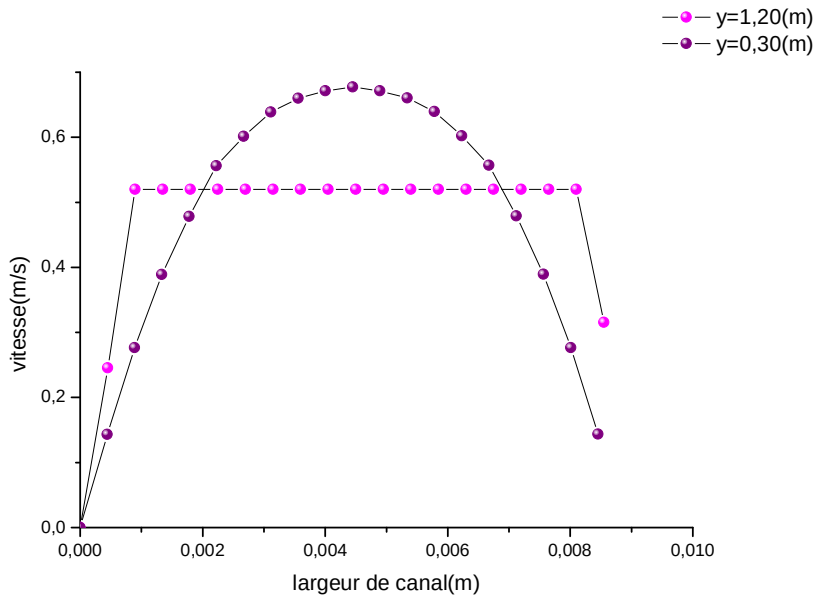


Figure IV.5 : Variation du profil de vitesse.

Les mêmes allures sont observées mais les valeurs sont plus importantes en raison du rétrécissement dans la section de passage du fluide due de la présente du dépôt et ce pour conserver le débit.

IV.3. ECHANEUR DE CHALEUR A PLAQUES EN INOX 304

IV.3.1 LES PROFILS DANS UN MILIEU COMPLETEMENT FLUIDE

IV.3.1.1 Profil de température :

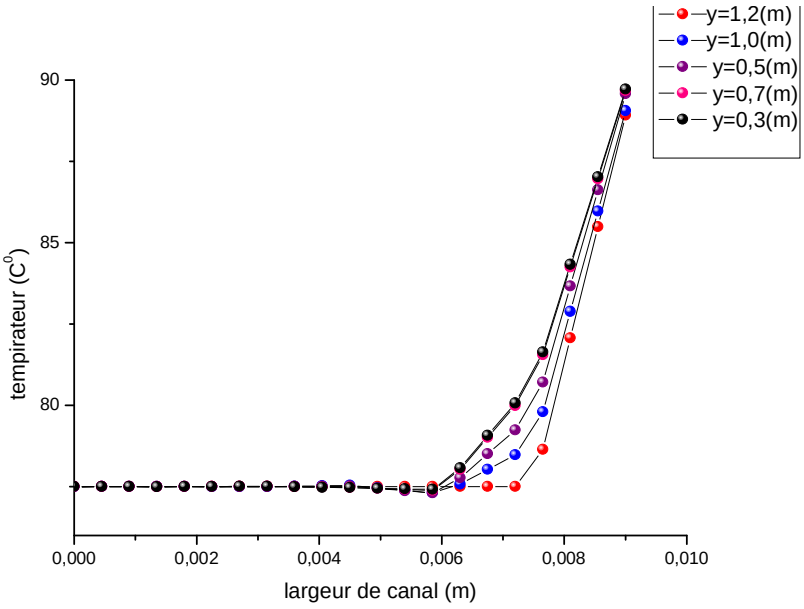


Figure IV.6 : Variation du profil de température dans lait

La figure IV.6 montre l'évolution de la température de lait en fonction de la largeur du canal. On observe une augmentation progressive de la température de fluide qui entre dans le canal à 70 °C dans les deux directions X et Y car il reçoit de la chaleur de la vapeur chaude. L'inverse est observé pour la vapeur d'eau.

IV.3.1.2. Profil de vitesse

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

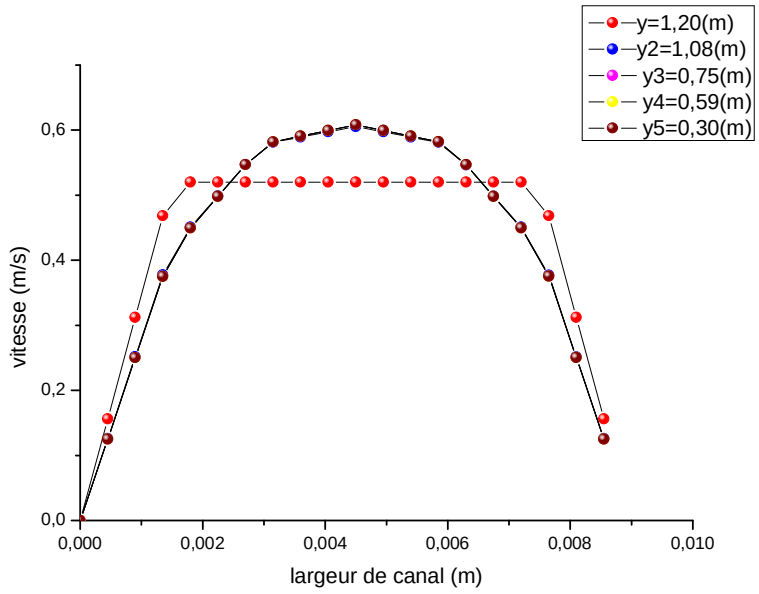


Figure IV.7: Variation du profil de vitesse dans le lait.

IV.3.2. LES PROFILS DANS UN MILIEU AVEC ENCRASSEMENT

IV.3.2.1. Profil de la température

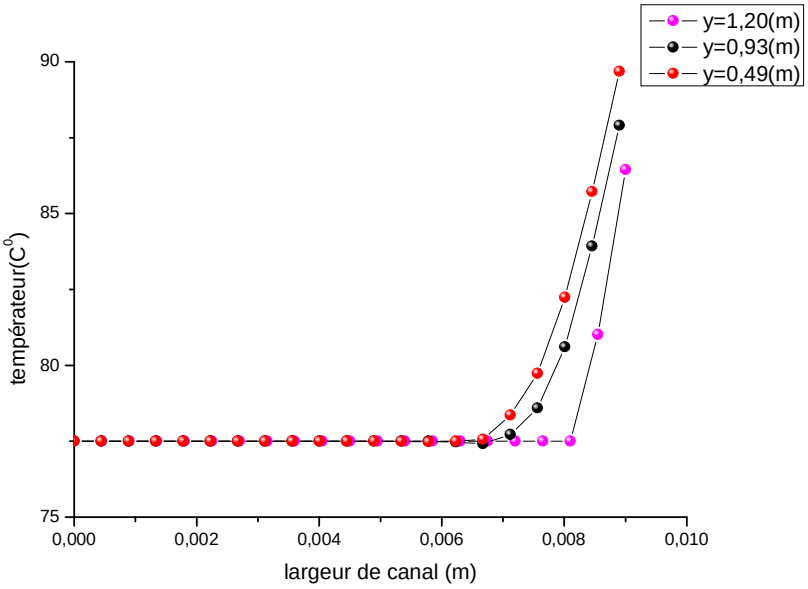


Figure IV.8 : La variation de la température à la largeur de canal.

La figure IV.8montre l'évolution de la température de lait en fonction de la largeur du canal. Une augmentation de la température dans le cas d'un canal avec un dépôt poreux sur les

parois est toujours observée mais elle est moins significative en comparaison avec le cas sans dépôt et ce en raison de la présence du dépôt de nature isolante.

IV. 3.2.2. Profil de Vitesse

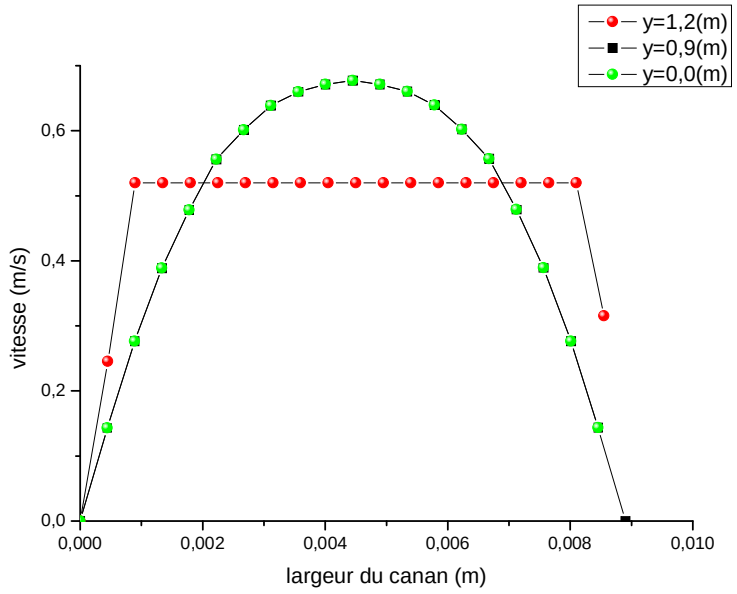


Figure IV.9 : Variation du profil de vitesse.

La figure IV.9montre l'évolution de la vitesse de lait en fonction de la largeur du canal. On observe toujours trois profils de vitesse qui se dégagent de la figure : une vitesse nulle près des parois de part et d'autre et maximale au niveau de l'axe central.

IV.4. ETUDE COMPARATIF ENTRE L'ALUMINIUM ET L'INOX 304

Dans cette partie une comparaison est faite entre l'échangeur en Aluminium et celui en Inox 304 avec et sans encrassement dans le but de prévoir le meilleur matériau lors de la phase de conception des échangeurs de chaleur en vue de monter des pasteurisateurs.

IV.4.1. LES PROFILS DANS UN MILIEU COMPLETEMENT FLUIDE

IV.4.1.1. Profil de La température :

Pour y= 1.2m

L'évolution du profil de la température en fonction de la largeur du canal dans le cas du l'aluminium et l'inox est présentée sur les figures IV.10 et figure IV.11.

Il semble selon ce graphique que l'Inox 304 n'apporte pas une nette amélioration en matière d'échange thermique puisque les graphiques sont sensiblement les mêmes. Donc il faudra considérer d'autres critères pour choisir entre les deux matériaux lors de la phase de conception et réalisation de l'échangeur à plaques, particulier le critère cout.

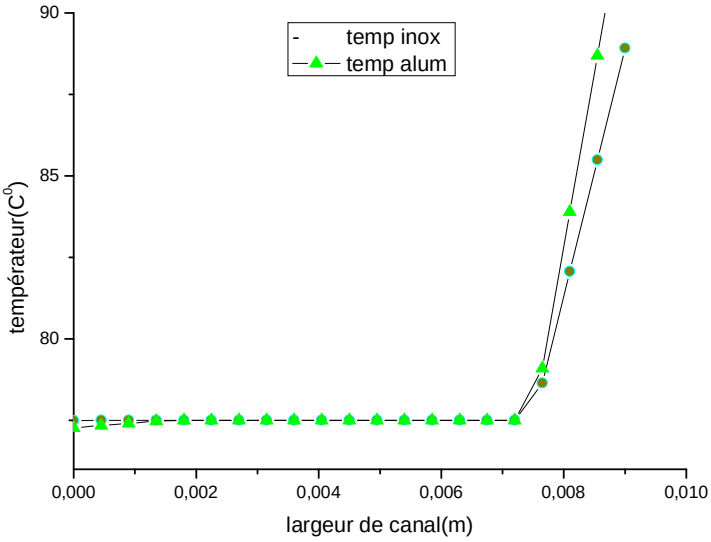


Figure IV.10: Evolution de la température de l'inox et l'aluminium

Pour y=1.0m

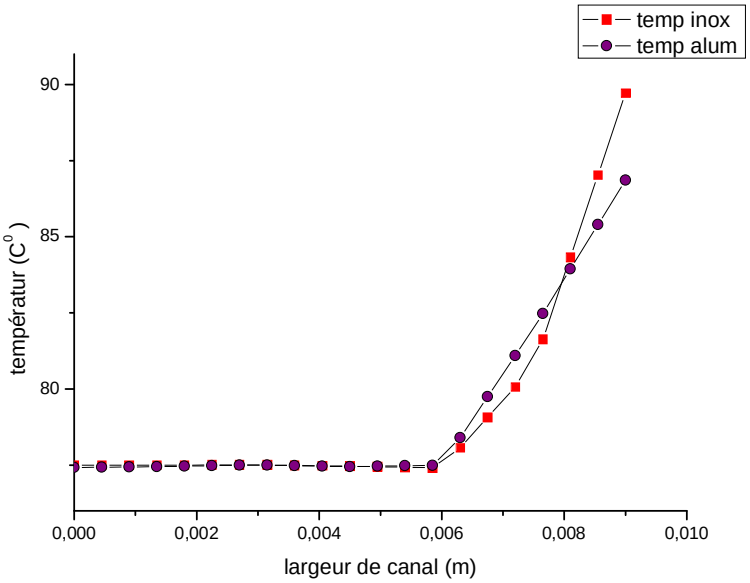


Figure IV.11: Evolution de la température de l'inox et l'aluminium

Pour y=0.

IV.4.1.2. Profil de La vitesse

Pour y= 1.2

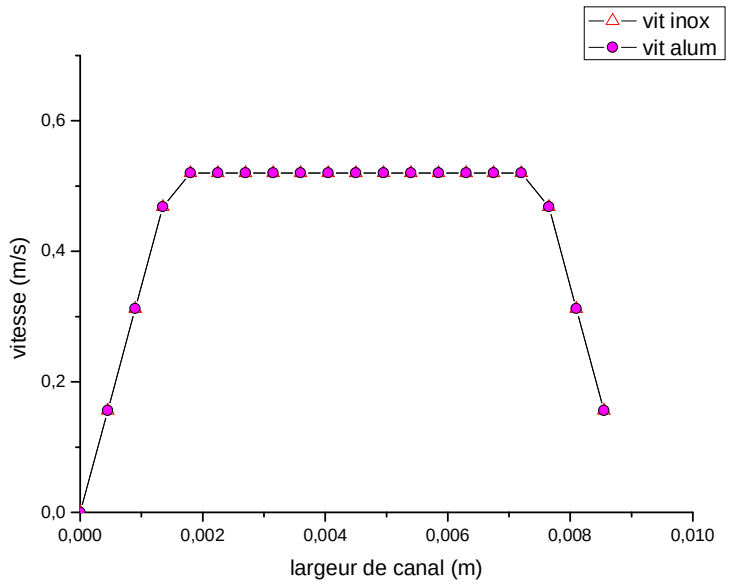


Figure IV.12:Evolution de la vitesse de l'aluminium et l'inox 34

Pour y =1.2.

Pour y= 0

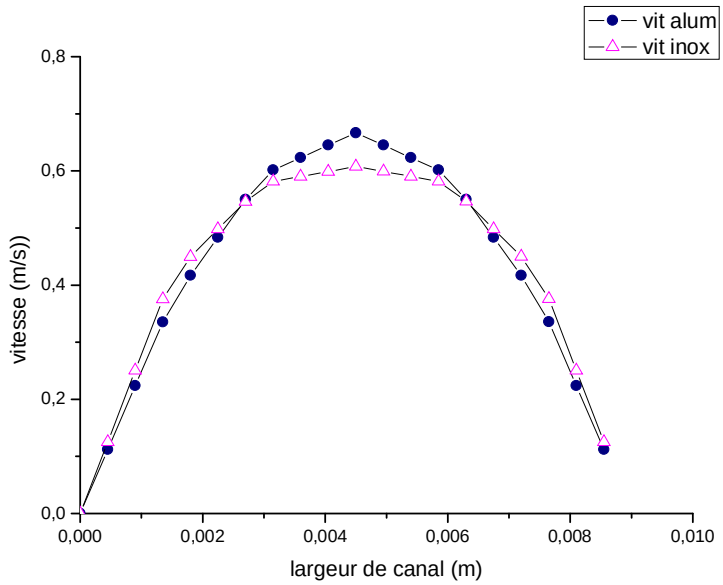


Figure IV.13: Evolution de la vitesse de l'aluminium et l'inox 34

Pour y=0

L'évolution du profile de la vitesse en fonction de la largeur du canal dans le cas du l'aluminium et l'inox est présentée sur les figure IV.12etfigure IV.13.

La même tendance est observée pour les vitesses.

IV.4.2. LES PROFILS DANS UN MILIEU AVEC ENCRASSEMENT

IV.4.2.1. Profil de La température :

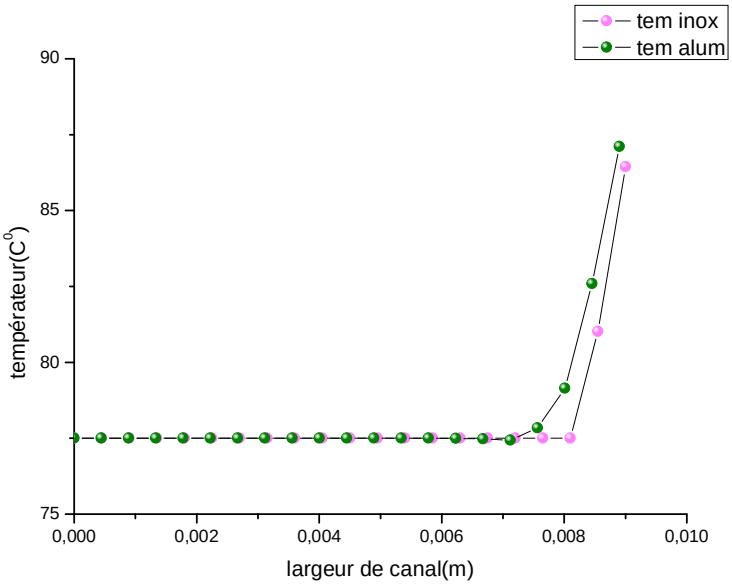


Figure IV.14 : Evolution de la température de l'inox et l'aluminium.

Il semble selon ce graphique que l'Inox 304 n'apporte pas une nette amélioration en matière d'échange thermique puisque les graphiques sont sensiblement les mêmes dans le cas avec encrassement.

IV.4.2.2. Profil de La vitesse

Y=1.2m

L'évolution du profil de la vitesse en fonction de la largeur du canal dans le cas du l'aluminium et l'inox est présentée sur les figure IV.15 et figure IV.16.La même tendance est observée pour les vitesses avec encrassement.

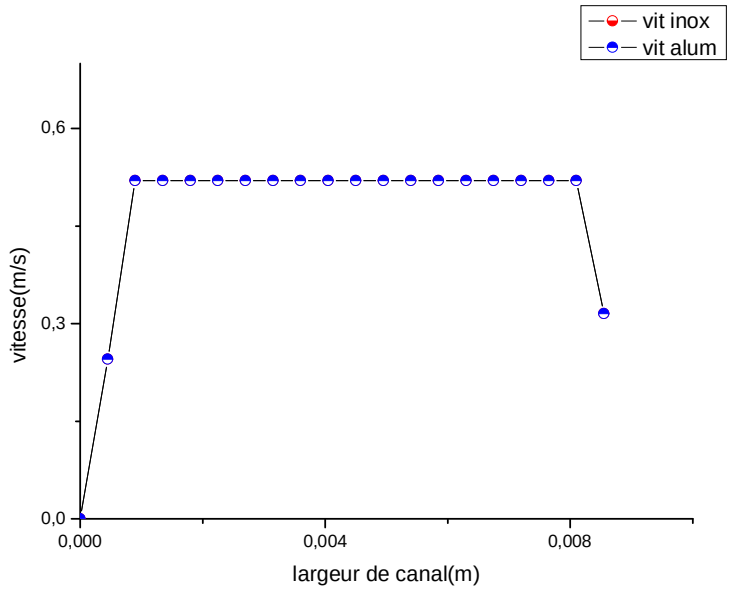


Figure IV.15: Evolution de la vitesse de l'aluminium et l'inox 34

Pour y =1.2.

A y= 0

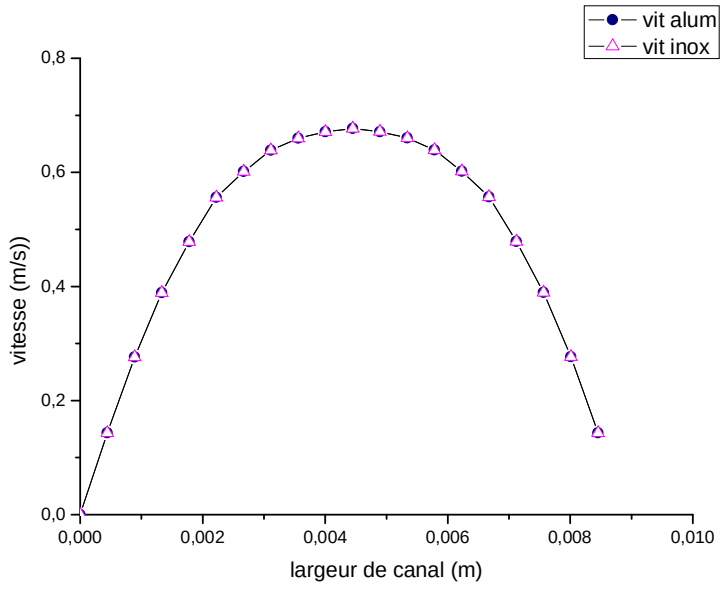


Figure IV.16: Evolution de la vitesse de l'aluminium et l'inox 34

Pour y =0

IV.5. Conclusion

Il parait à l'image de cette étude que l'Inox 304 n'apporte pas d'amélioration en matière d'échange thermique an comparaison en Aluminium. Il faudra donc considérer d'autres critères pour choisir entre les deux matériaux lors de la phase de conception en particulier le paramètre cout.



CONCLUSION GÉNÉRALE



Le modèle physique proposé dans cette contribution repose sur un écoulement à débit constant entre deux plaques planes parallèles à température imposée. Un modèle mathématique en régime instationnaire est ainsi établi à l'échelle macroscopique pour un écoulement turbulent entre deux plaques planes en présence d'un milieu fluide avec et sans encrassement. Le modèle de fermeture $\kappa - \varepsilon$ est choisi et les équations de conservation, pour les conditions spécifique au modèle physique, sont développées avec certaines hypothèses simplifications.

En générale, et après l'analyse des résultats numériques de l'étude de l'encrassement des échangeurs de chaleur a plaques, les résultats obtenus dans le cas d'un milieu poreux montrent que :

1) plus l'épaisseur du dépôt encrassant augmente, moins le fluide est chauffé et plus l'échange thermique entre la paroi et le fluide est affecté.
2) L'existence d'un dépôt de surface de nature isolante réduit la diffusion thermique. Une chute importante de la température est aussi observée. Une grande quantité de chaleur reste emmagasinée dans la matrice poreuse.
3) La vitesse de l'écoulement diminue au cours du temps avant l'augmentation de la masse du dépôt.
4) L'étude comparative entre Aluminium et Inox 304 sur le plan de l'échange thermique avec et sans encrassement montre qu'ils donnent la même qualité de l'échange. Il faut donc voir avec d'autres critères, en particulier le critère cout, pour choisir le matériau approprié lors de la phase de conception des échangeurs de chaleur à plaques qui composent les pasteurisateurs industriels.

Comme suite à ce travail, il semble qu'il est intéressant de comparer avec d'autres matériaux en se basant sur d'autres critères que le critère échange thermique. En particulier :

1) Le cout,
2) Compétitivité du dépôt de la crasse,
3) Enlèvement de la crasse.

REFERENCE ET BIBLIOGRAPHIQUE

[1] : Alais C. Sciences du lait. Principesdes techniques laitières. Edition sepaic .Paris(1975). .

[2] : Codex Alimentaire..Norme générale pour l'utilisation de termes de laiterie CODEX STAN 206-1999 .pp : 1-4 (1999)

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

[4] : http://www.larousse.fr/archives/agricole; 2002,767p. Date de consultation ; 02.05.2015.

[5] : http://www.wikipidia.fr.org.Date de consultation 29.4.2015.

[6] : Soustre Y. Histoire, sociologie et image du lait. [En ligne], site du Centre National Interprofessionnel de l'Economie Laitière (CNIEL), Septembre 2008, Hors-série n°2, [http://www.cniel. com /publicat/Questions sur/pdf/QS_HS2.pdf] (Consulté le 14/10/09).

[7] : Enjalbert. FQualité nutritionnelle et diététique du lait en alimentation humaine Revue : Bulletin des GVT, n° 15, Avril-Mai-Juin, 2002, p.57-58 (2002).

[8] : AMIOT J., FOURNER S., LEBEUF Y., PAQUIN P, SIMPSON R et TURGEON H., Composition, propriétés physicochimiques, valeur nutritive, qualité technologique et techniques d'analyse du lait *In VIGNOLA C.L*, Science et technologie du lait –Transformation du lait, École polytechnique de Montréal, ISBN:3-25-29 (600 pages) (2002).

[9] : Le lait et les produits laitiers dans la nutrition humaine Archive des documents de la FAO ; Collection FAO : Alimentation et nutrition n° 28 ISBN 92-5-20534(1998).http://www.fao.org, Date de consultation 23.05.2015

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

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

[12] : Roudaut H. et Lefrancq E. Alimentation théorique. Edition Sciences des Aliments(2005).

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

[14] : Mathieu J. Initiation à la physicochimie du lait. Guides Technologique des IAA. Edition Lavoisier Tec et Doc, Paris.(1998).

[15]: Benhedane N.et Bachtarzi N. Qualité microbiologique du lait cru destiné a la fabrication d'un type de camembert dans une unité de l'est Algérien Thèse de magistèredépartement des sciences alimentaire , Université de Mentouri Constantine(UMC) ,Algérie(2012).
[16] : Vignola, C.Science et technologie de lait. Ecole polytechnique de Monterial. P70(2002).

[17] : Roy, G..Technologie laitière .Paris: Dunod, p34, P59. Saporta G. -Probabilités, analyses des données et statistiques. 1990. Editions Technip, 622 pages(1951)

[18] : POUGHEON S.Contribution a l'étude des variations de la composition du lait et ses conséquences en technologie laitière, Ecole Nationale Vétérinaire Toulouse, France: 34 (102pages) (2001).

[19] : AMIOT J., FOURNER S., LEBEUF Y., PAQUIN P., SIMPSON R et TURGEON H. Composition, propriétés physicochimiques, valeur nutritive, qualité technologique et techniques d'analyse du lait *In VIGNOLA C.L*, Science et technologie du lait –Transformation du lait, École polytechnique de Montréal, ISBN:3-25-29 (600 pages) (2002).
[20] : POINTURIER H.La gestion matière dans l'industrie laitière, Tec et Doc, Lavoisier, France: 64 (388 pages) (2003).
[21] : NEVILLE M.C et JENSEN R.G.,.The physical properties of humain and bovine milks In *JENSEN R.*, Handbook of milkcomposition-General description of milks, AcademicPress,Inc.: 82 (919 pages) (1995).
[22] :A. Bordjah, Analyse physico-chimique et microbiologie de lait UHT demi écrémé, centrede formation professionnelle El Hidhab Sétif Algérie - BTS en contrôle de qualité dans lesindustries, 2011.
[23] : JEAN C., et DIJON C.Au fil du lait, ISBN 2-86621-172-3 (1993).
[24] : VEISSEYRE R.En Technologie du lait. 3éme Edition. Edité par Paris. La Maison Rustique, p. 452-548(1975).
[25] : Vignola. C-L: Sciences et technologie du lait : transformation du lait ; école polytechnique de Montéreal ; 600 p(2002).

[26] : Mahaut M., Jeant et R., Brulé G., et Schuck P.,. Les produits industriels laitiers. Tec &Doc, Paris, France. Pi-10(2000).
[27] : JORADP n° 69 du 27/10/1993.

[28] : Guiraud. J-P : Microbiologie alimentaire ; Édition : Paris, Technique & Documentation ; DUNOD ;p 652 (1998).

[29] : Fredot. E : Connaissance des aliments : bases alimentaires et nutritionnelles de la diététique ; Edition Lavoisier; pp397(2005).

[30] : Apfelbaum. M, Forrat. C et Nillus. P, 1999 : Diététique et nutrition.

[31] : Elisabeth Vierling, : Aliments et boissons (filières et produits) ; 3ème édition, Doin éditeur ; Centre régional de documentation pédagogique d'Aquitaine ; 277 p(2008).

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

[33] **:** KAY H. D., C.B.E., F.R.S.,: La pasteurisation: exposé général des techniques méthodes de contrôle. Twyford laboratoires. L td, Twyford Road, Londres, Angleterre.261-272. (1953)

[34] :(http://web04.univ-lorraine.fr/ENSAIA/marie/web/ntic/pages/2010/guingr.html)

[35]:Cengel, Y. A. Heat transfer.a practical approach. (2e éd).McGraw-Hill(2002).

[36]**:**Sacadura J, F«Initiation Aux Transfert Thermiques » Edition Lavoisier.EtOzisikM.N,HeatConduction,EditionsJohnWilyandSons,New–York.(1993)

[37]:Yunus A. Çengel, Heat Transfer. Chapitre 13, Deuxième edition, 2002

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

[39] :Laetitia Perez , 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, 2003.

[40] : Pascal Tobaly**.** Echangeurs de Chaleur .2002.

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

[42] : WIKIPEDIA Echangeur de chaleur [En ligne] // Wikipédia.- 27.03.2012.
-http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89 changeur de chaleur.

[43] : http://www.e-comfortusa.com.

[44] :A.mezmiz. Mini projet 1éré post graduation " différent type d'échangeur" de l'université Mentouri Constantine 2006.

[45] : site web: la récupération de la chaleur dans l'industrie des aliments et boissons. Htm

[46]: Rue Henri Simon, TRIANON ECHANGEUR (échangeurs de chaleur Air-Fluides, Fluides-Fluides, Air/Air) P10-11, 2013.

[47]: Fouling of Heat Exchangers by T. R. Bott ISBN: 0444821864 · Pub. Date: April 1995· Publisher: Elsevier Science & Technology Books p1

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

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

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

[51] :Lund, D., Sandhu, C., Chemical reaction fouling due to foodstuffs, Editions Summer scales ,Hemisphere Washington DC, p 437, 1981.

[52]:Rodier, J« L'analyse chimique Et Physicochimique De L'eau » Editions Dunod. (1971)

[53]:Anastsios, J Karablas «Scale Formation in Tubular Heat Exchangers Research Priorities » Research Institute. (2002)

[54]: Leconte, J « Protection Contre La Corrosion » Techniques De L'ingénieur A830

[55]:Daufin et al.Lait, 67, 339-364 (1987)

[56]: Christian et al., TransIchemE, 80, 231 -239 (2002)

[57]:Muller-Steinhagen, M, Watkinsion, P« Influence Of Operating Conditions On Particulate Foulinge» Can, J, Chem,Eng,66 42-50. (1988)

[58]:Grillott,J ,Icart, J«Fouling Of A Cylindrical Probe and A Finned Tube Bundle In A Diesel Exhaust Environment», Exp, Thermal Fluid, Sci 14.442-454.(1997)

[59]:Rindt, C, Abd-Elhady, M, S.«Minimum Gas Speed In Heat Exchanger To Avoid Particulate Fouling » Int, J, Of Heat And Mass Transfer47.3943-3955.(2004)

[60]: Crittenden, B, Khater, E«Fouling From Vaporising Kerosene » Fouling OF Heat Exchangeur Equipment; ASME.HTD. VOL.35, ED.JW. SUITOR.AM A.M.PRTCHARD, P 57-64. (1984)

[61]: Story, M.Knudsen, J.G. «The Effect of Heat Transfer Surface Temperature on the Scaling Behavior of Simulated Cooling Tower .Water ».Am.Inst.Chem.EngnSymp. 74 (124), 25-30. (1978)

[62]: Garret Price «Problem Characterisation, Economic Assessment And Review Of Prevention, Mitigation And Accommodation », Technique Pnl-4883. (1983)

[63]:Visser and Jeurnink, , Expérimental Thermal and FIuId Science, 14, 407-424 (1997).

[64]:Bansal et al.Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 5, 27-33(2006).

[65]: Y. Harkat, Diagnostic de l'encrassement par monitoring des paramètres service aux bornes d'un échangeur de chaleur, Magister en Génie Mécanique, Université M'Hamed Bougara-Boumerdes, 2007.

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

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

[68]: 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.
[69]: Y. Mahdi, L. oufer, Simulation numérique de l'encrassement des échangeurs de chaleur à plaques lors d'une phase de pasteurisation, VIIème Colloque Interuniversitaire Franco-québécois sur la Thermique des Systèmes, Saint-Malo France 23-25 mai 2005.
[70]: Manuel technique de l'installation"" ST.
[71]:P. K. Nema, AK. Datta, "A computer based solution to check the drop in milk outlet temperature due to fouling in a tubular heat exchanger" Journal of Food Engineering (N° 71) 2005.
[72]:E. R. G. Echert, R. M. Drake, "Heat and Mass transfert"Mc Graw-Hill, 1972.
[73]: Melle KAOUANE Malika ; mémoire de magister thème : analyse des contraintes mécaniques et de la fissuration des éléments en béton armé sous l'effet thermomécanique ; année 2010/2011
[74]: HANTZ Mathieu (Elève ingénieur, INSA de Strasbourg, Spécialité Génie Civil). Mémoire de fin d'étude, thème : Etude de l'optimisation du renforcement par des fibres de carbones des dalles en béton armé munies de trémies, en utilisant l'optimisation topologique ; Université Fédérale d'Uberlândia, Brésil
[75]: MELOUKI Omar et MESBAH Abderraouf ; mémoire de master thème : Etude numérique comparative de l'influence entre des tubes carré et cylindrique d'un faisceau aligné, sur les performances thermique d'un échangeur tube et calandre ; année 2013/2014.
[76]:M. Guit, B. Lounes, Simulation Numérique de l'impact des gouttelettes de métal creusessur une surface incliné, Master en génie mécanique, Université Dr. Yahia Farés-Médéa 2013.



ANNEXE



CARACTERISTIQUES DE L'EAU

T (°C)	μ (kg/m.s) $\times 10^{-3}$	T (°C)	μ (kg/m.s) $\times 10^{-3}$
0	1,7827	56	0,4992
1	1,7231	57	0,4915
2	1,6665	58	0,4840
3	1,6128	59	0,4767
4	1,5616	60	0,4695
5	1,5130	61	0,4626
6	1,4667	62	0,4557
7	1,4225	63	0,4491
8	1,3804	64	0,4426
9	1,3403	65	0,4362
10	1,3020	66	0,4300
11	1,2654	67	0,4239
12	1,2305	68	0,4180
13	1,1970	69	0,4121
14	1,1651	70	0,4065
15	1,1344	71	0,4009
16	1,1051	72	0,3954
17	1,0770	73	0,3901
18	1,0500	74	0,3849
19	1,0242	75	0,3797
20	0,9993	76	0,3747
21	0,9755	77	0,3698
22	0,9525	78	0,3650
23	0,9305	79	0,3603
24	0,9092	80	0,3557
25	0,8888	81	0,3511
26	0,8661	82	0,3467
27	0,8501	83	0,3423
28	0,8318	84	0,3381
29	0,8142	85	0,3339
30	0,7971	86	0,3298
31	0,7807	87	0,3257
32	0,7648	88	0,3218
33	0,7404	89	0,3179
34	0,7345	90	0,3141
35	0,7201	91	0,3103
36	0,7002	92	0,3066
37	0,6927	93	0,3030
38	0,6796	94	0,2995
39	0,5670	95	0,2960
40	0,6547	96	0,2926
41	0,6428	97	0,2892
42	0,6312	98	0,2859
43	0,6200	99	0,2827
44	0,6091	100	0,2795
45	0,5985	101	0,2763
46	0,5882	102	0,2732
47	0,5782	103	0,2702
48	0,5684	104	0,2672
49	0,5590	105	0,2643
50	0,5479	106	0,2614

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

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

e = le diamètre de plaque = 0.0045 m

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

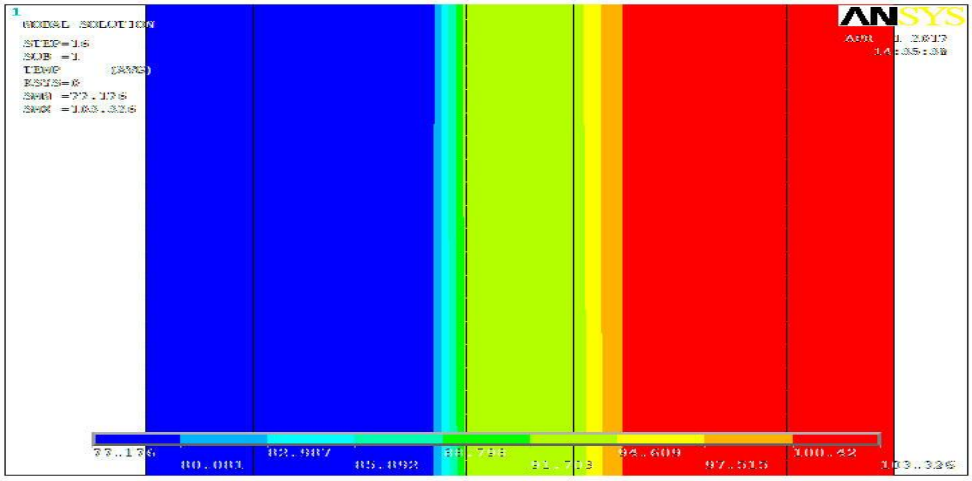
		Paramètre du lait	Paramètre du l'eau	Paramètre d'aluminium	Paramètre Inox 304
Chaleur spécifique CP		3912	4037.24	900	500
Masse volumique		1001.34	983.84	2700	7.9
Viscosité		0.000604	0.00033	/	/
Conductivité		0.642	0.68	237	15
Condition au limite	Vitesse	-0.52	0.52	/	/
	Température	77.5	103	/	/
	Pression	0	0	/	/

I. LES RESULTAT DANS UN MILIEU FLUIDE

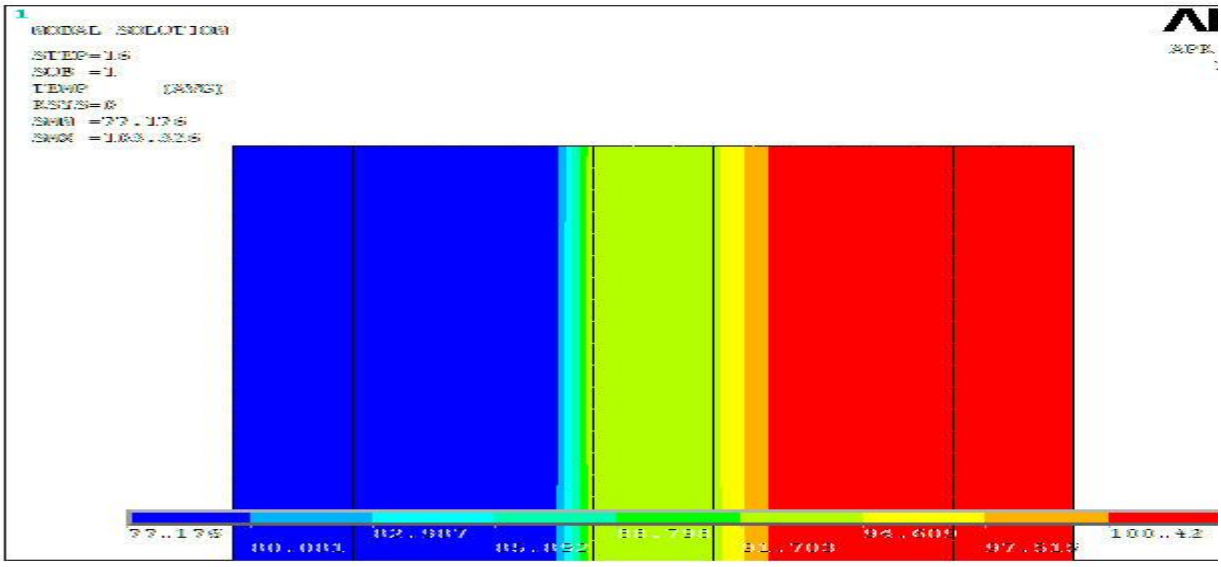
A) Pour L'aluminium :

A. Profil de température :

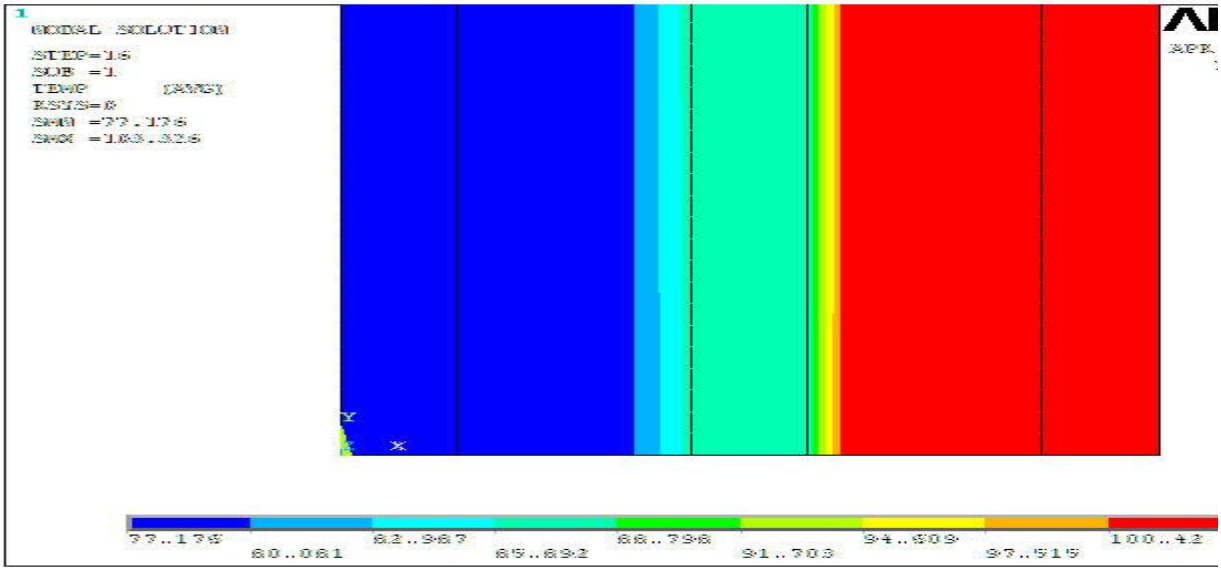
a) Au milieu

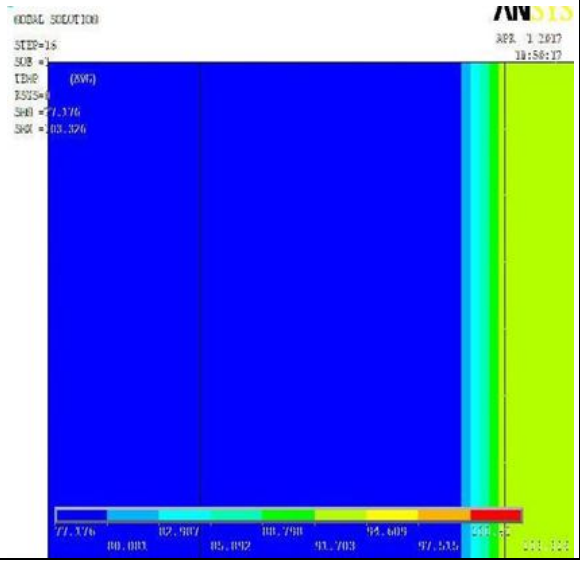
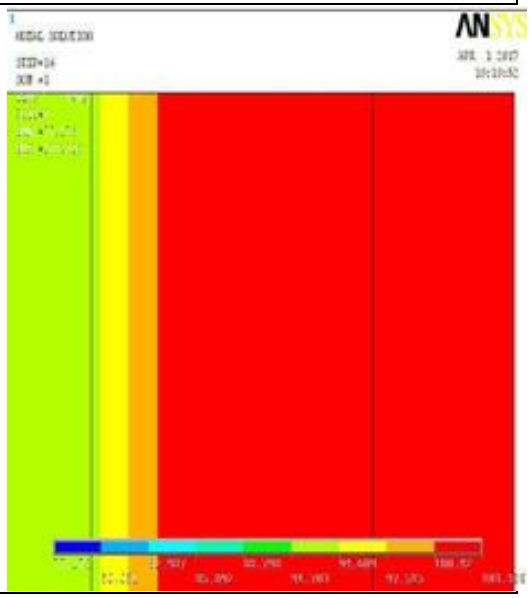
Les deux cotés


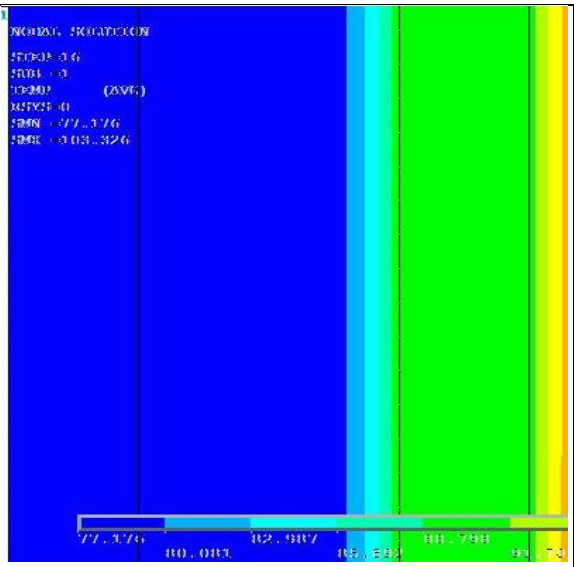
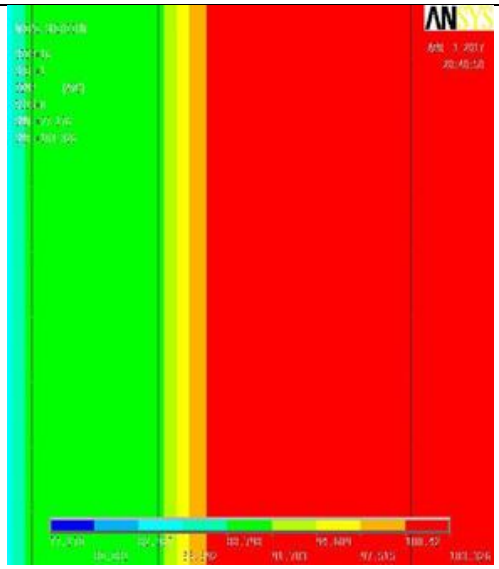
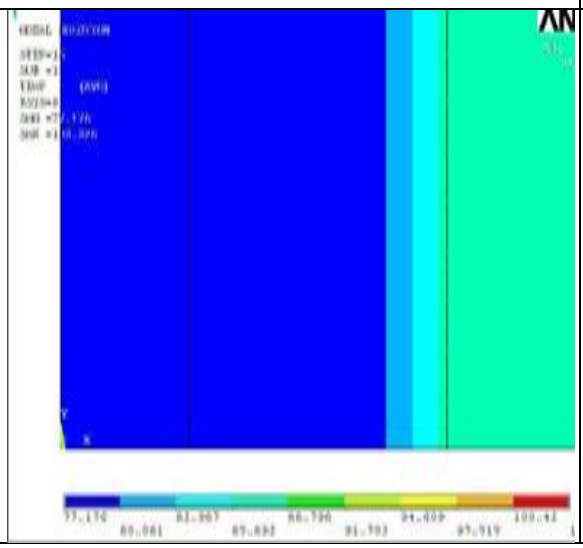
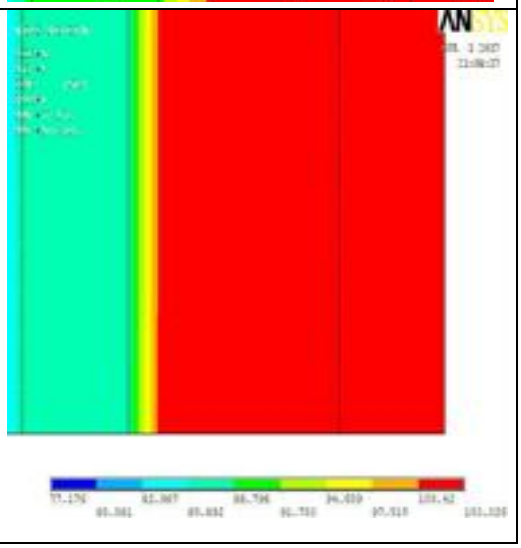
b) En haut :

Les deux cotés


c) En bas

Les deux cotés


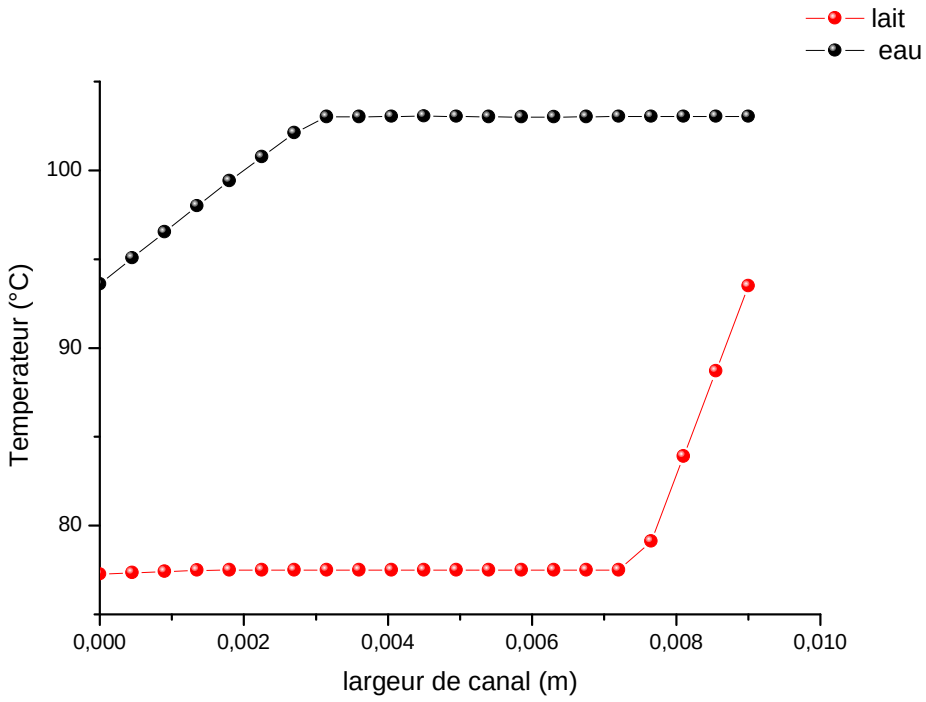
	Coter lait	**Coter eau**
En haut		

Au milieu		
En bas		

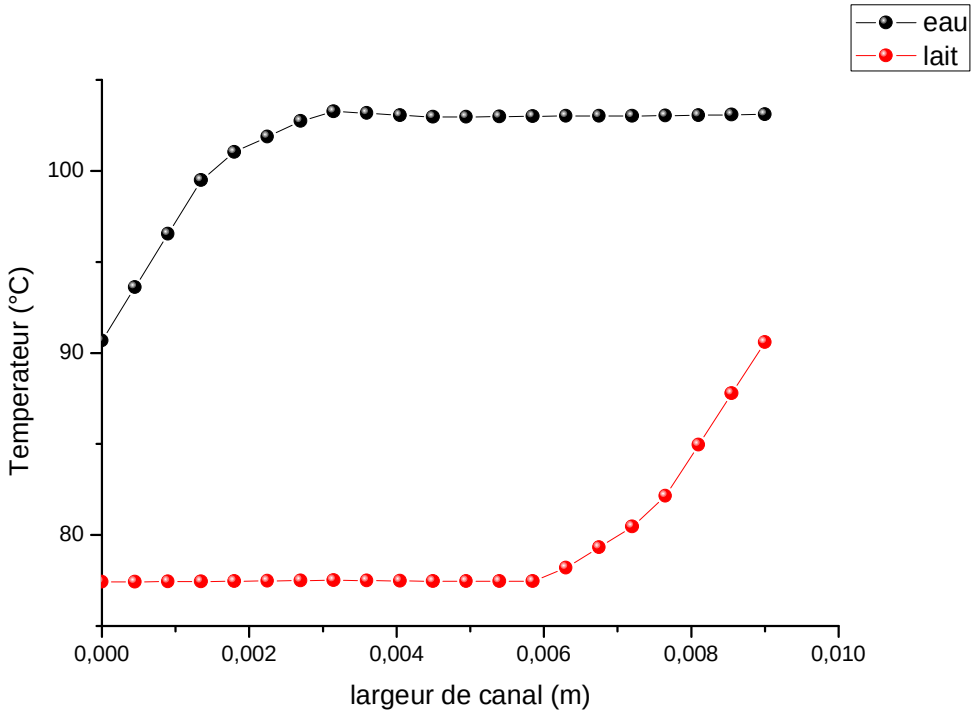
La variation de la température à la largeur de canal

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

Y=1.2

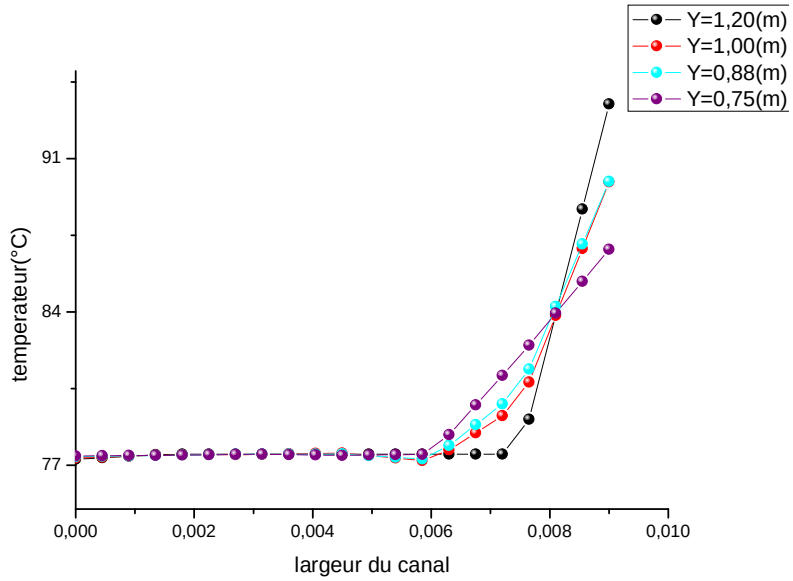

lait
eau
Temperateur (°C)
100
90
80
0,000
0,002
0,004
0,006
0,008
0,010
largeur de canal (m)

Y=0.16

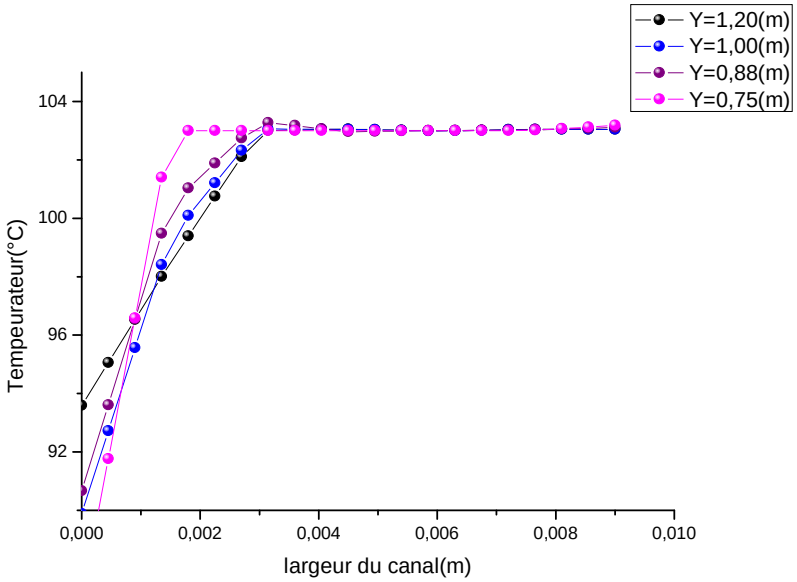

eau
lait
Temperateur (°C)
100
90
80
0,000
0,002
0,004
0,006
0,008
0,010
largeur de canal (m)

Les températures dans un même graphe

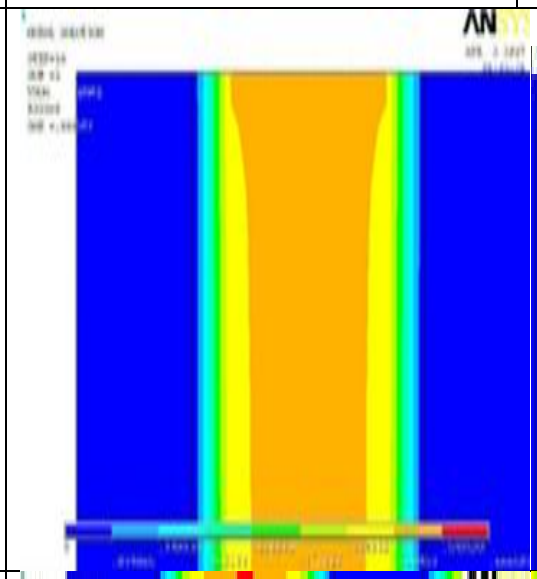
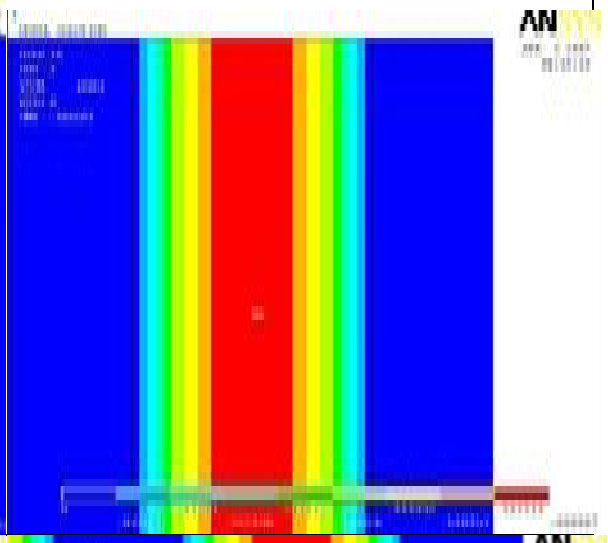
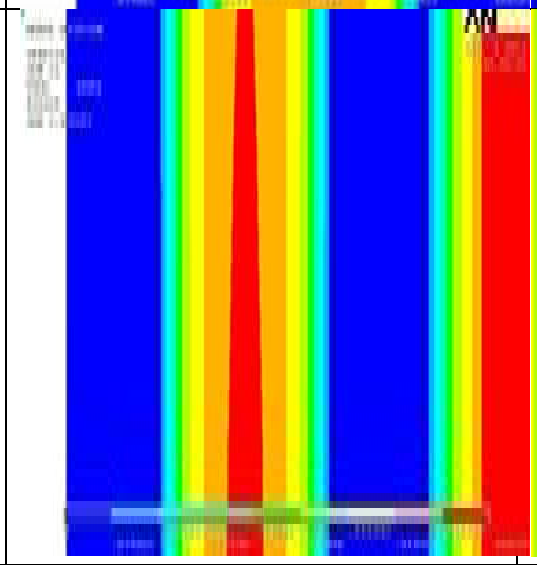
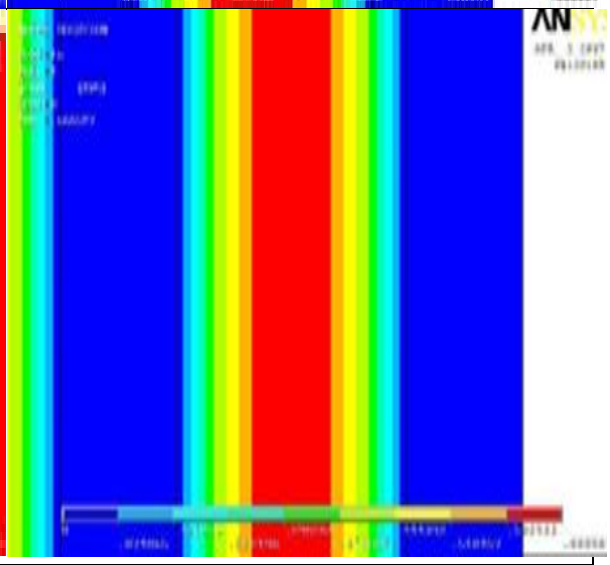
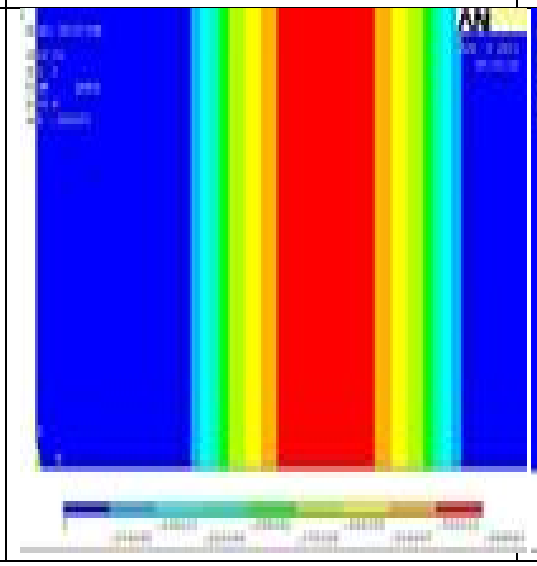
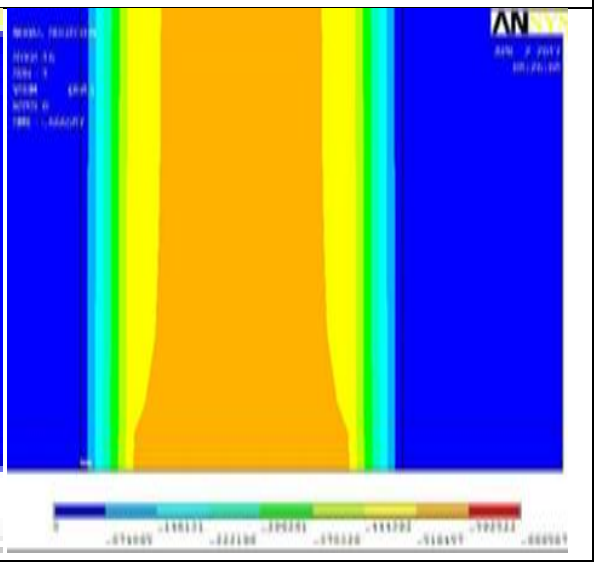
Coté lait



Coté eau



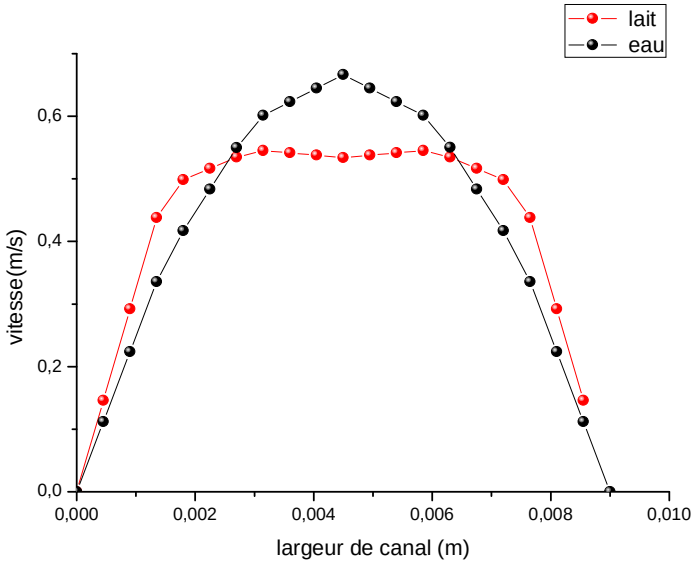
I.2. Profil de vitesse

	Coter lait	Coter eau
En haut		
An milieu		
En bas		

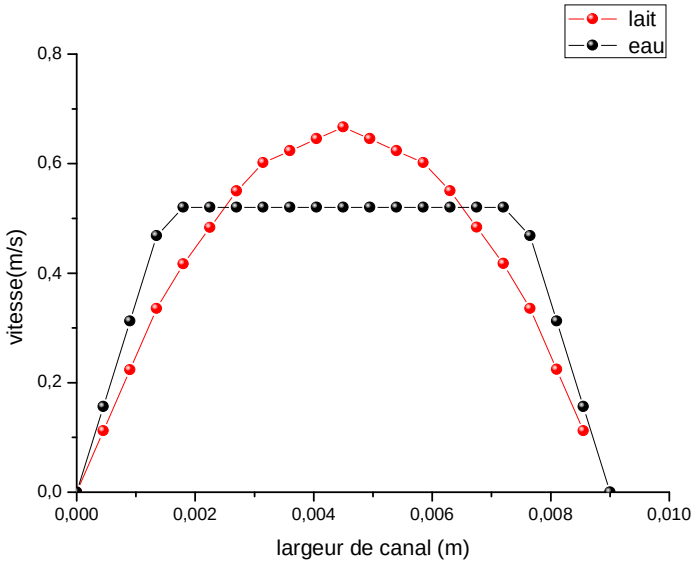
La variation de vitesse à la largeur de canal

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

Y=1.17

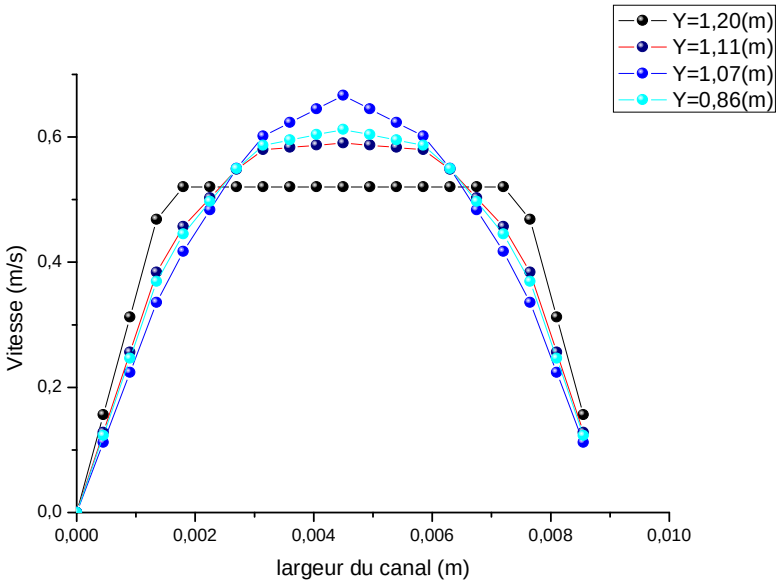


Y=0

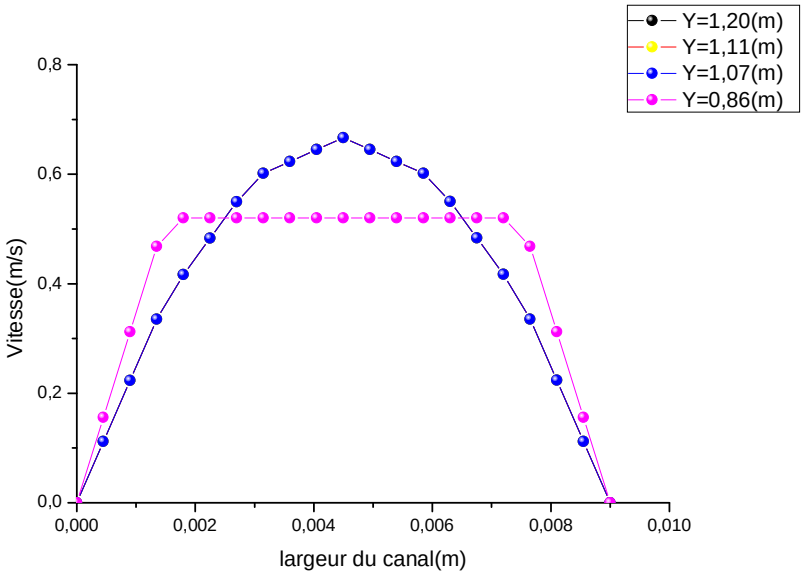


Les vitesses dans un même graphe

Coté lait

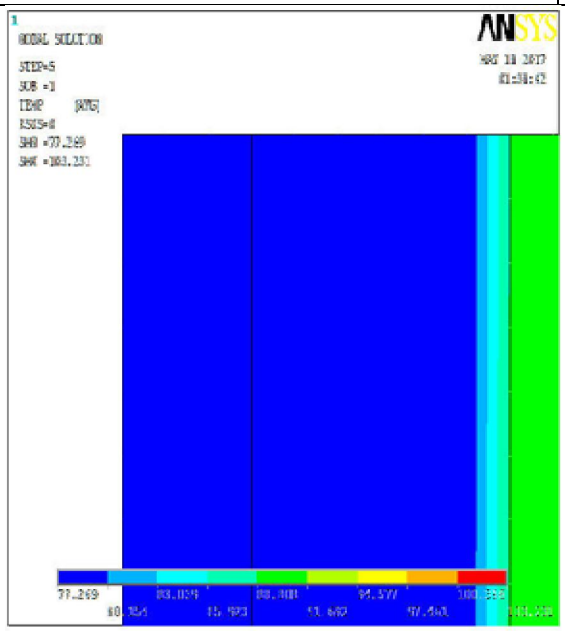
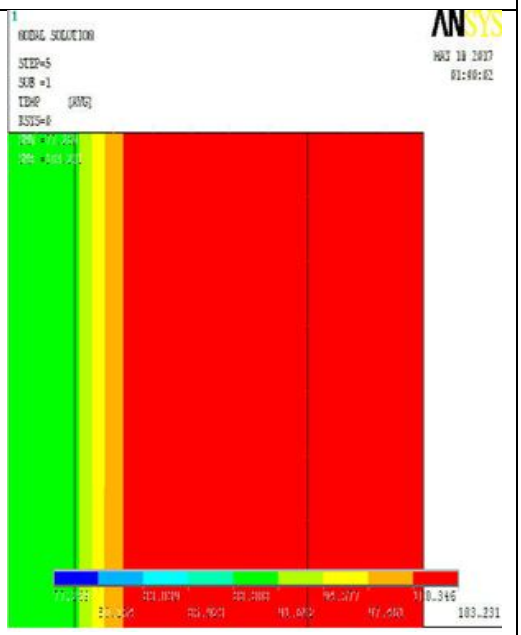
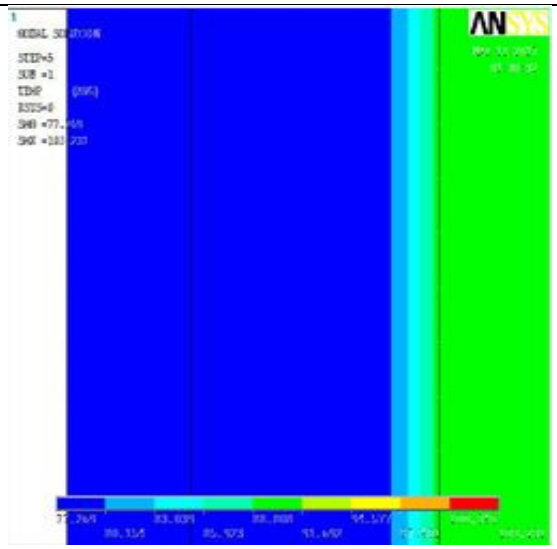
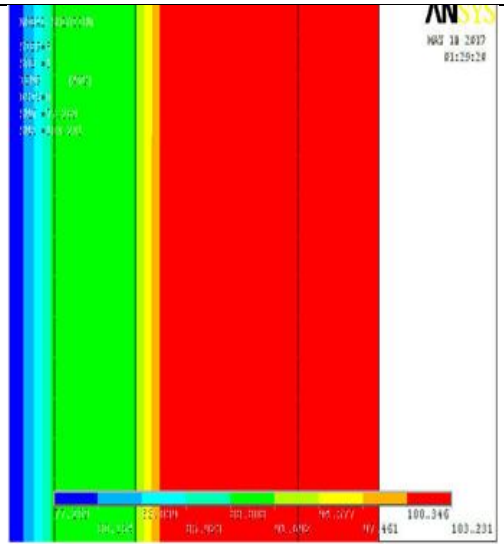


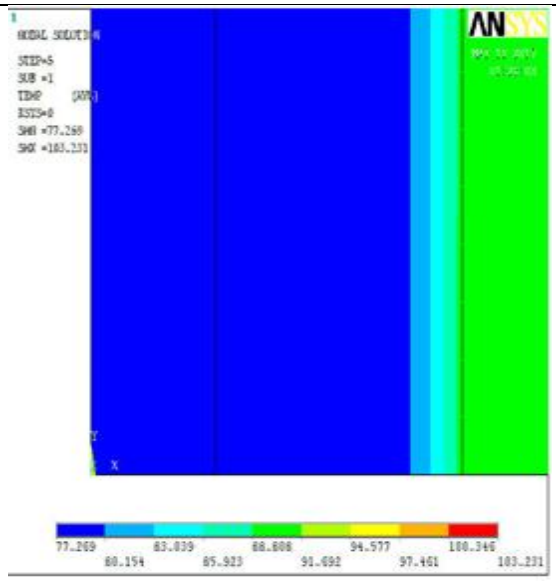
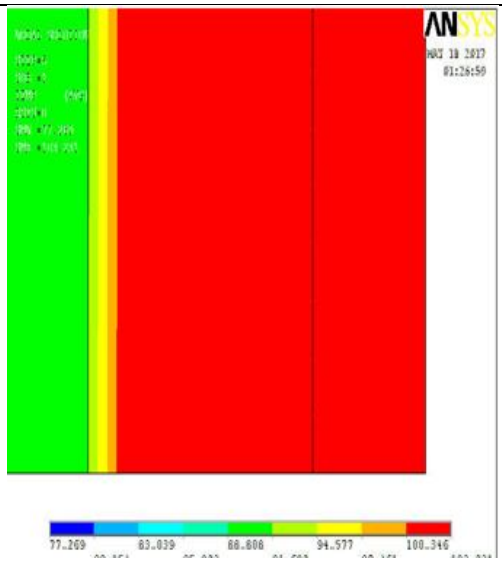
Coté eau



B) Pour L'inox 304 :

1. Profil de température :

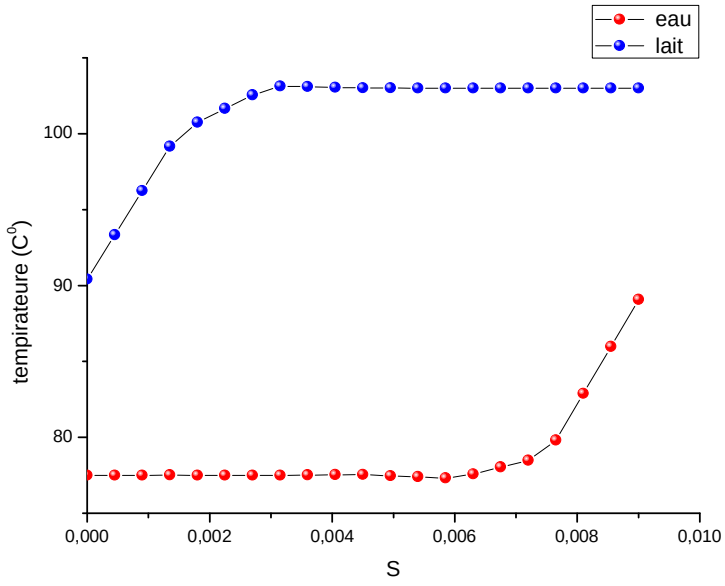
	Coter lait	**Coter eau**
En haut		
Au milieu		

En bas		

La variation de la température à la largeur de canal

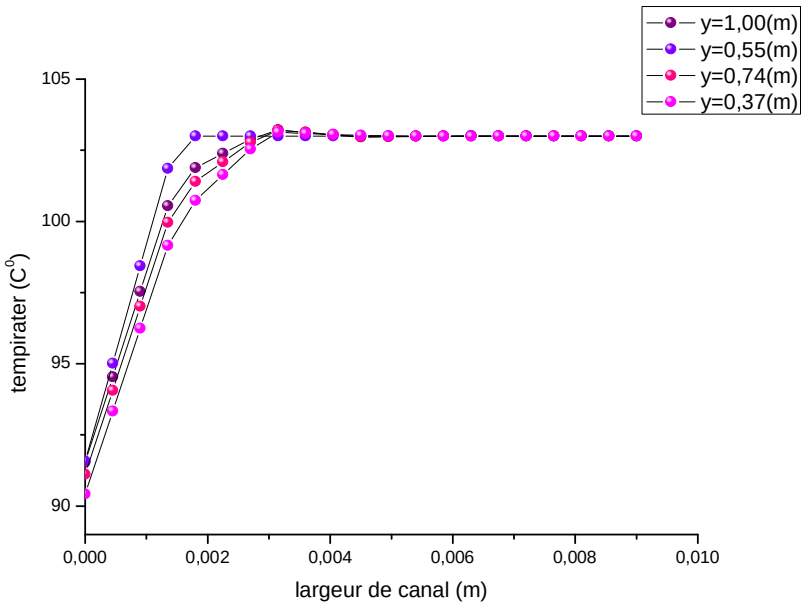
L'évolution du profil de la température en fonction de la largeur (x) du canal est représentée sur les graphes suivantes et ce pour différentes positions dans le canal (Y).pour l'eau et lait

Pour y= 1.0035m

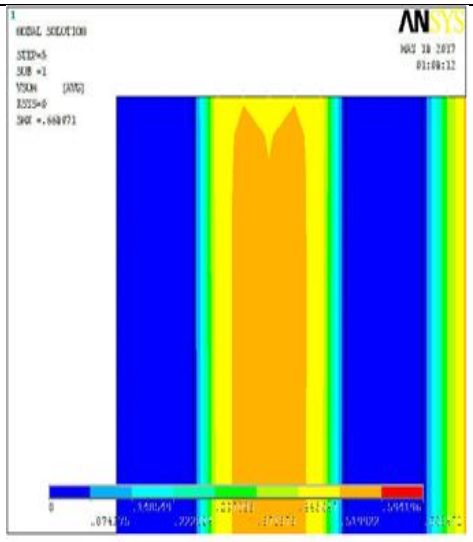
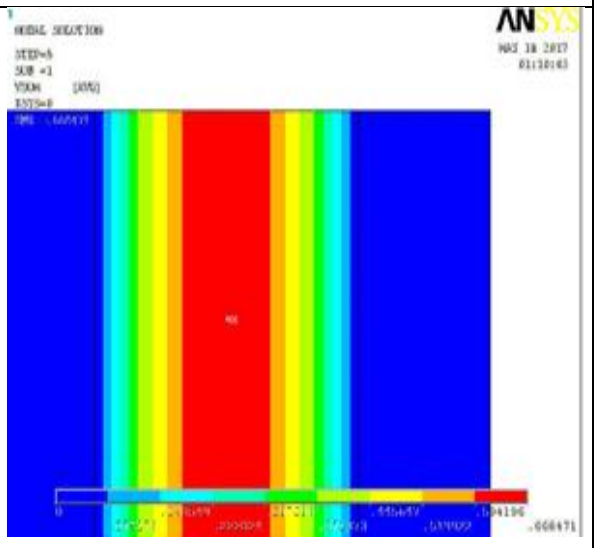


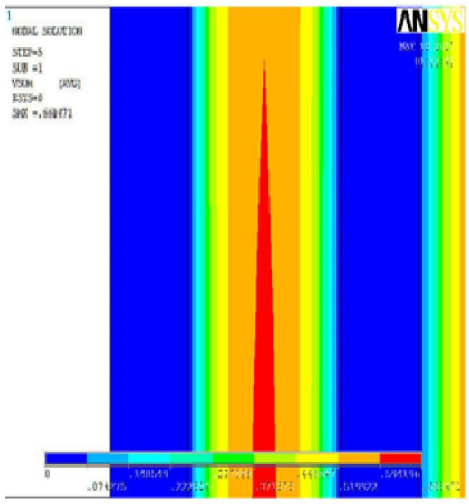
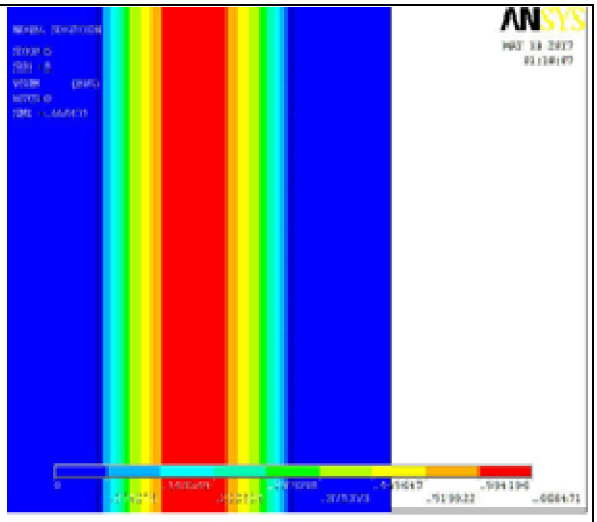
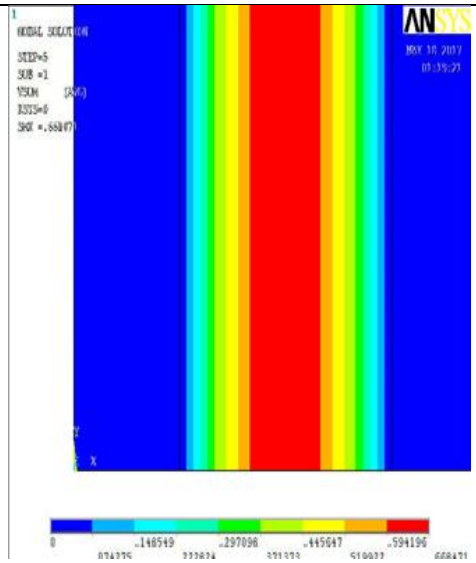
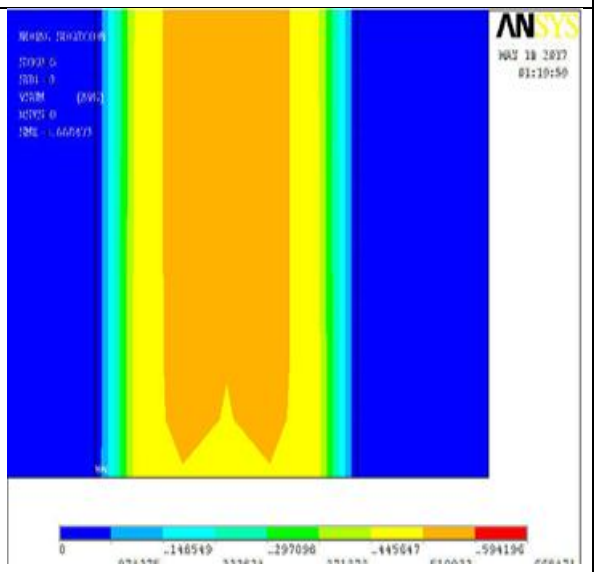
Les températures dans un même graphe

Coté eau



I.2. Profil de vitesse

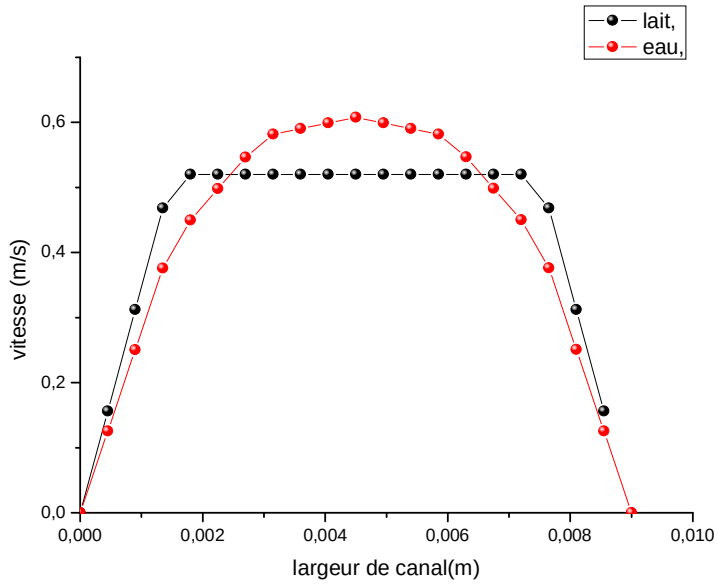
	Coter lait	Coter eau
En haut		

An milieu		
En bas		

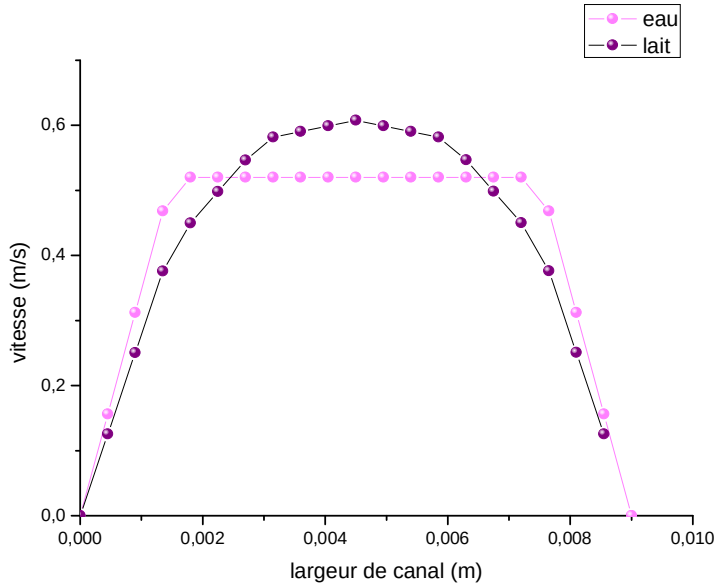
La variation de vitesse à la largeur de canal

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

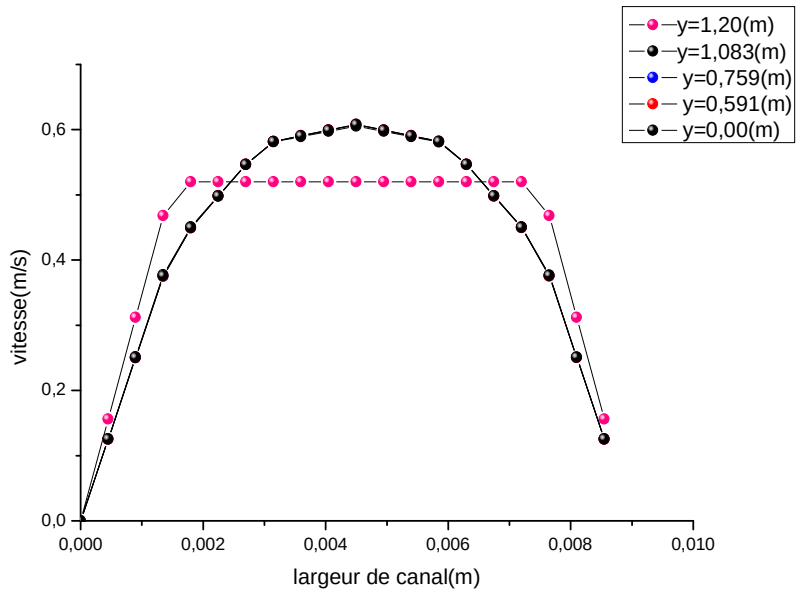
Pour y=1.2



Pour y= 0



Les vitesses dans un même graphe



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

Avec l'encrassement

	Variation de Y (m)		Variation de X (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	0.0045	0.0046

e = le diamètre de plaque = 0.0045 m

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

	Paramètre du lait	Paramètre du l'eau	Paramètre d'aluminium	Paramètre Inox 304
Chaleur spécifique CP	3912	4037.24	900	500
Masse volumique	1001.34	983.84	2700	7.9
Viscosité	0.000604	0.00033	/	/

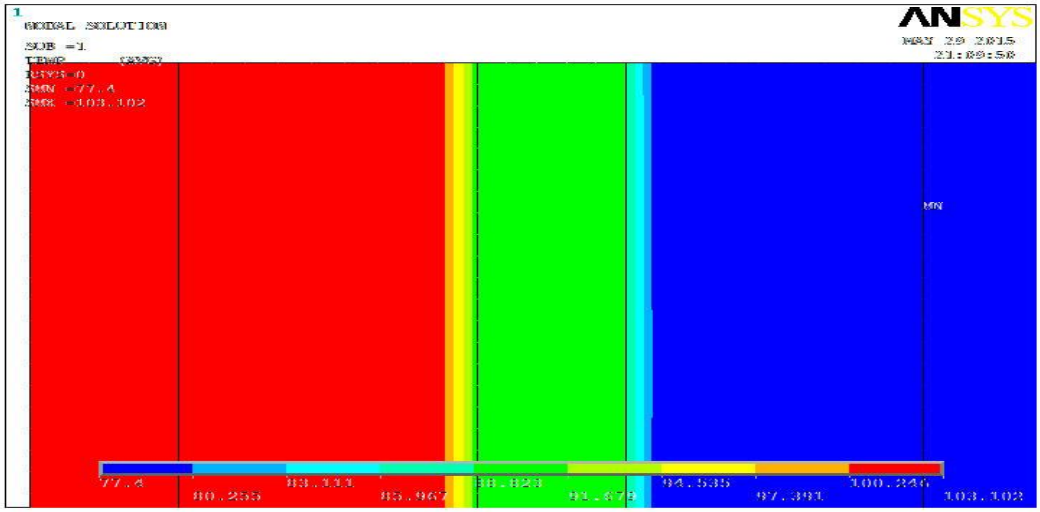
Conductivité		0.642	0.68	237	15
Condition au limite	Vitesse	-0.52	0.52	/	/
	Température	77.5	103	/	/
	Pression	0	0	/	/

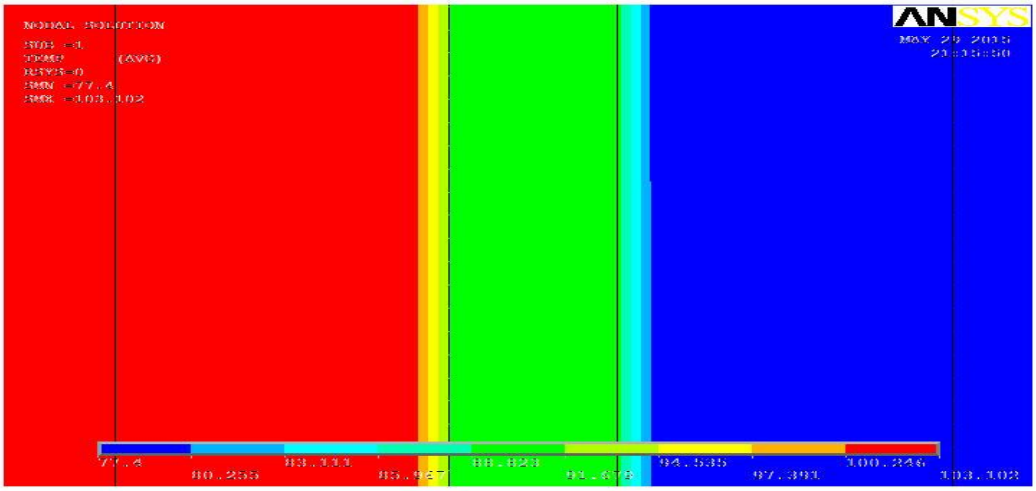
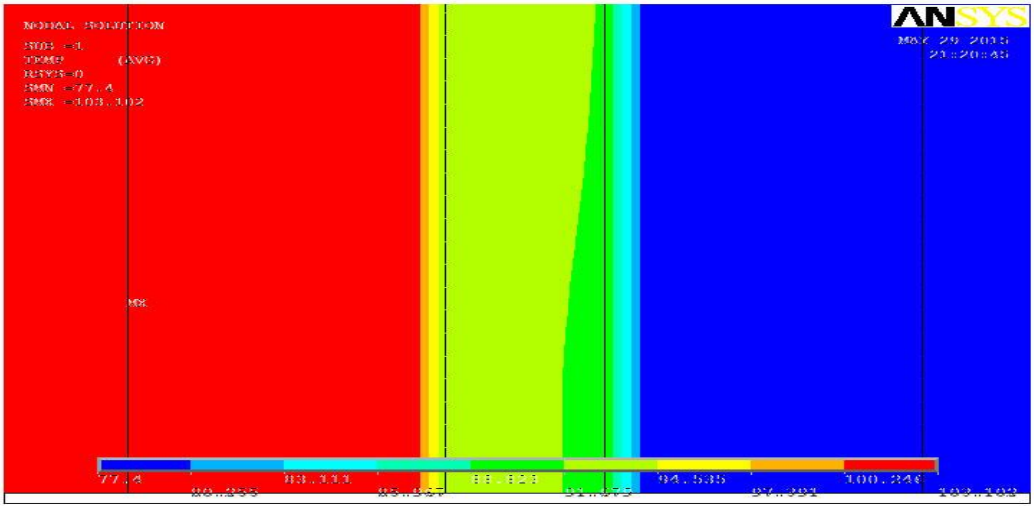
	La chaleur Spécifique CP	Lamasse volumique	La conductivité	
L'encrassement du lait	3912	1030	kxx	kyy
			0.5	0.53

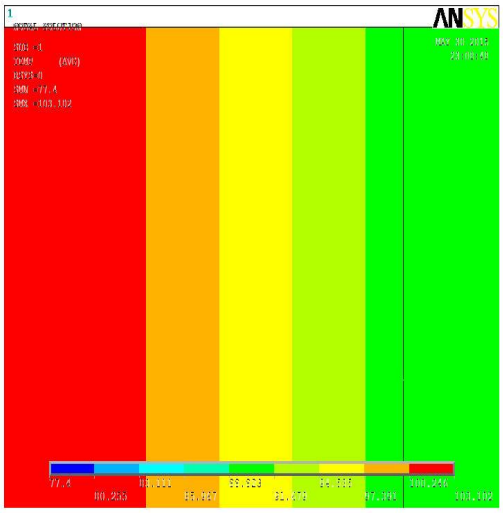
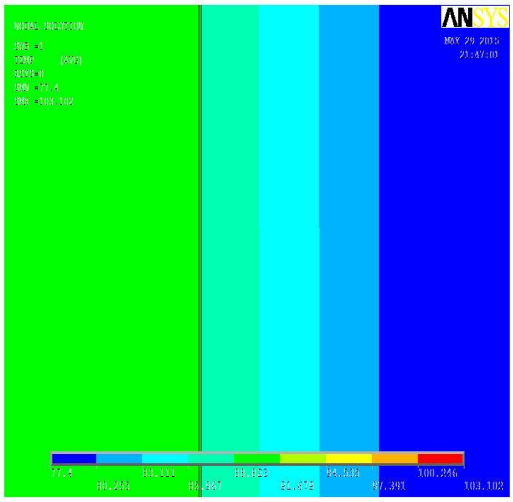
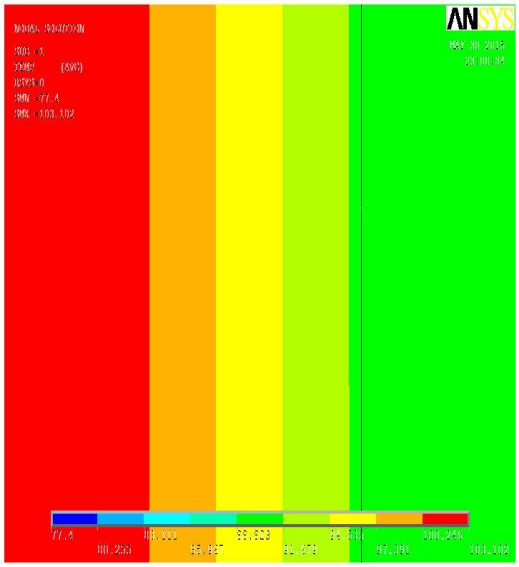
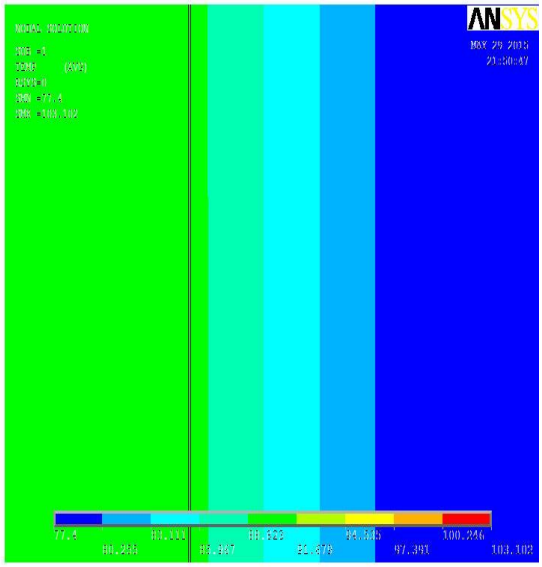
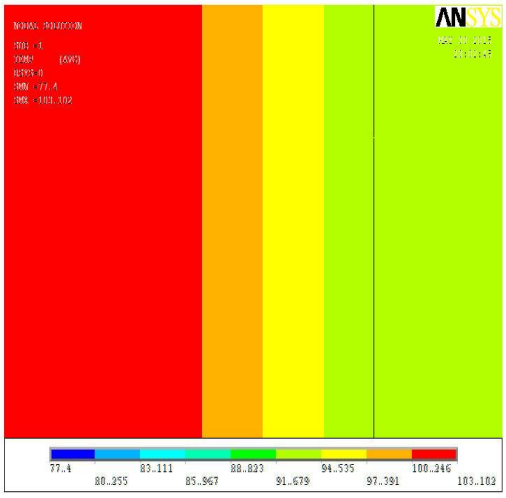
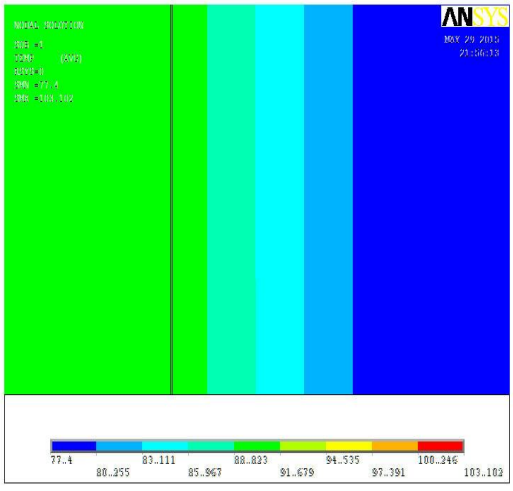
II. LES RESULTAT DANS UN MILIEU AVEC ENCRASSEMENT

a) Pour L'aluminium :

1 Profil de température :

En haut	

Au milieu	
En bas	

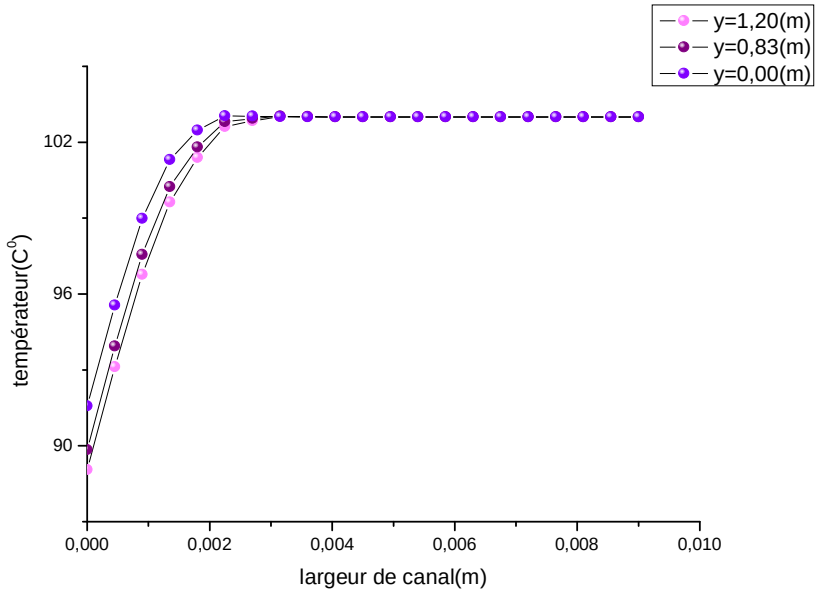
	Coté l'eau	**Coté lait**
En haut		
Au milieu		
En bas		

La variation de la température à la largeur du canal

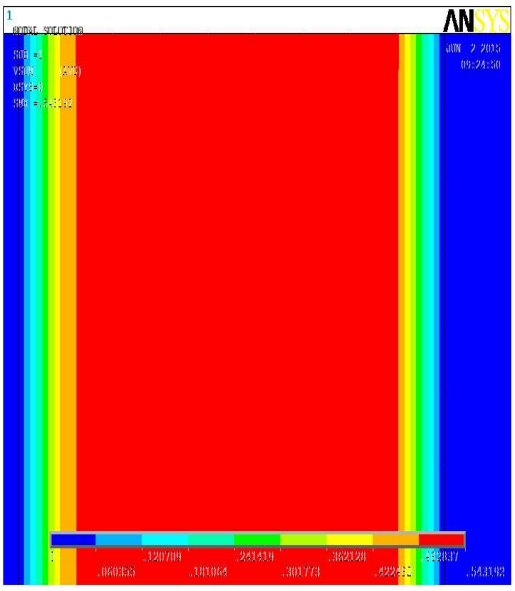
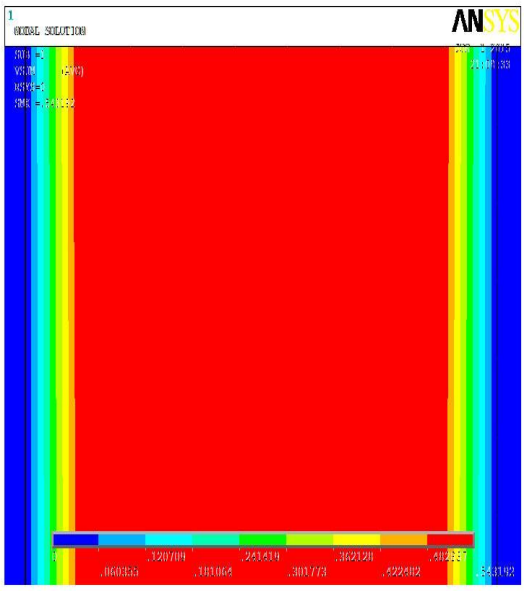
L'évolution du profil de la température en fonction de la largeur (x) du canal est représentée sur les graphes suivantes et ce pour différentes positions dans le canal (Y).pour l'eau et lait

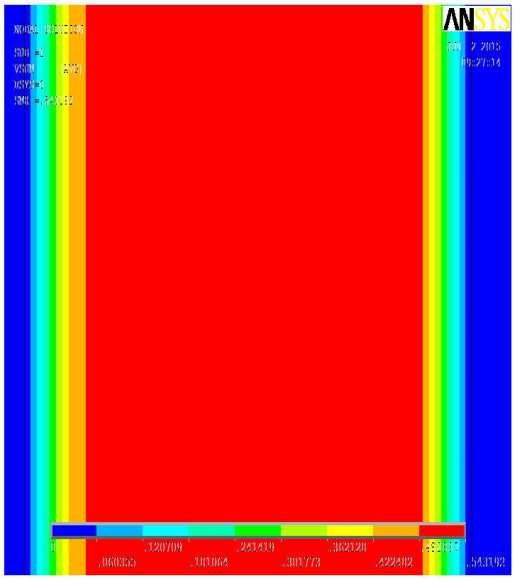
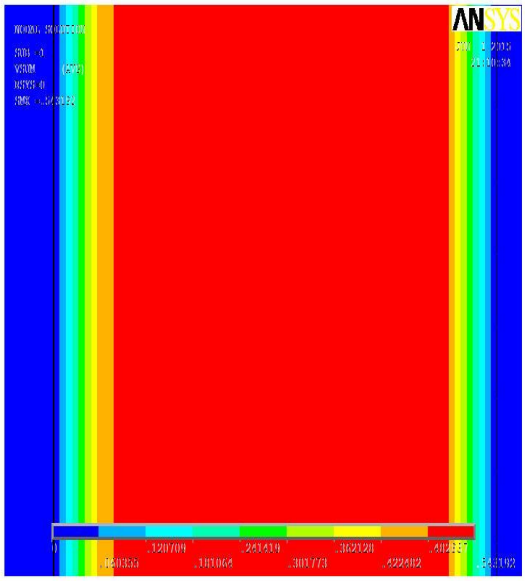
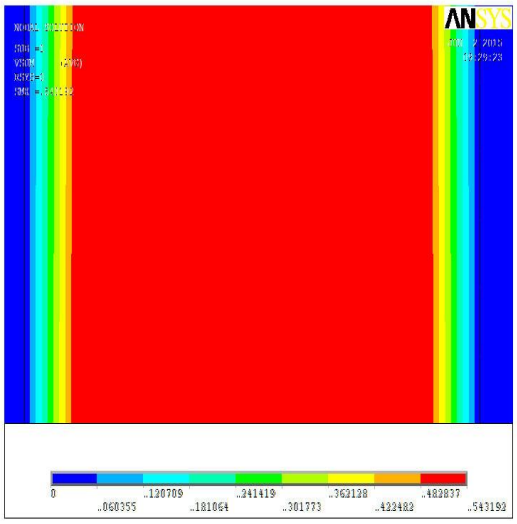
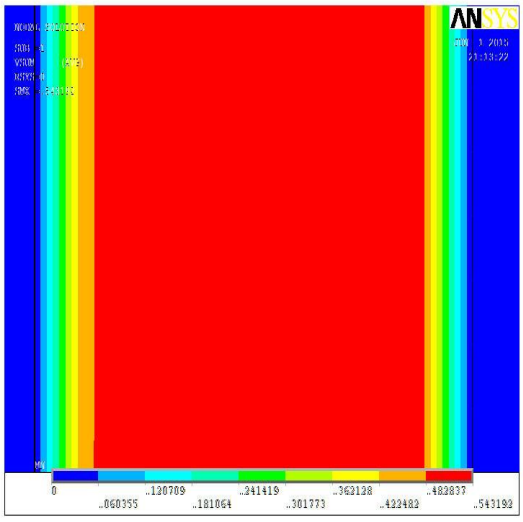
Les températures dans un même graphe

Coté de l'eau



B. La vitesse

	Coté l'eau	**Coté lait**
En haut		

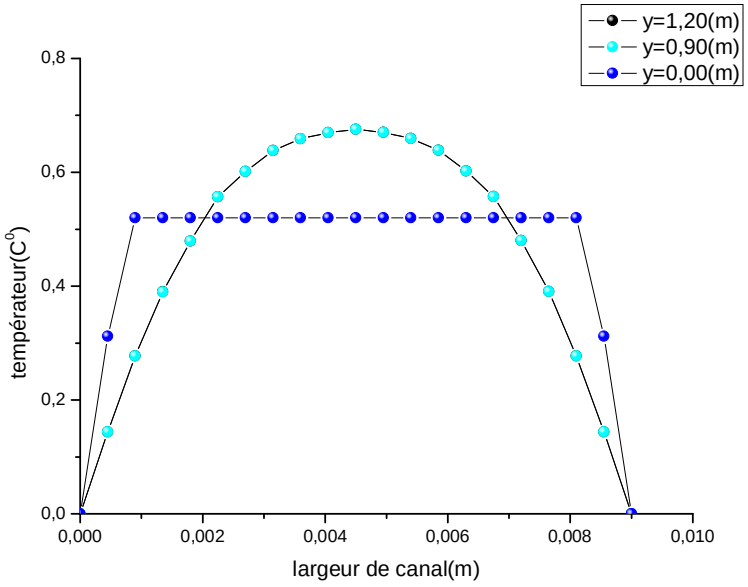
Au milieu		
En bas		

La variation de vitesse à la largeur de canal

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

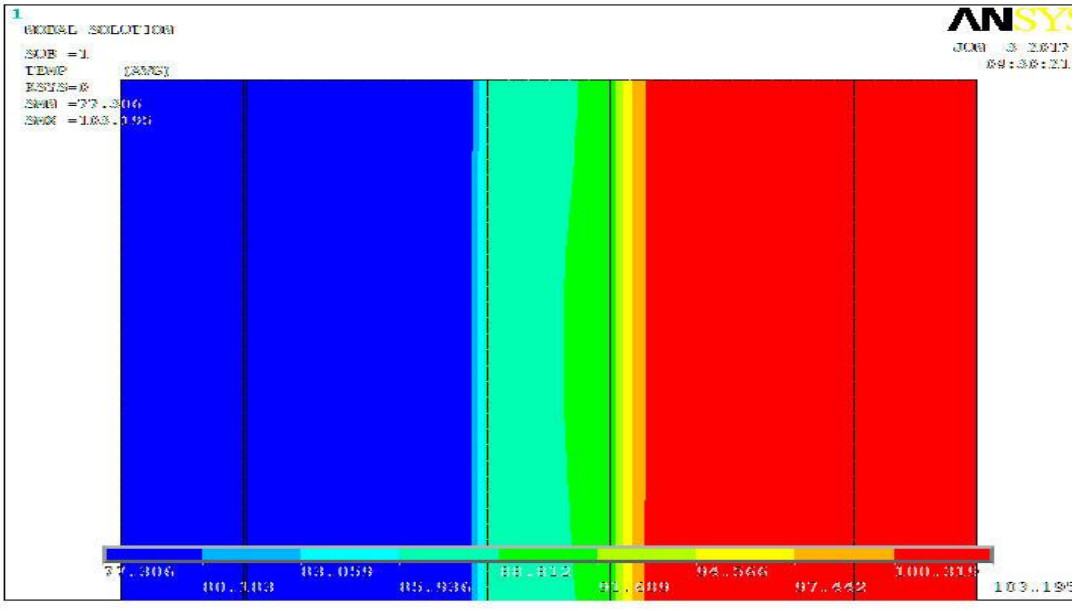
Les vitesses dans un même graphe

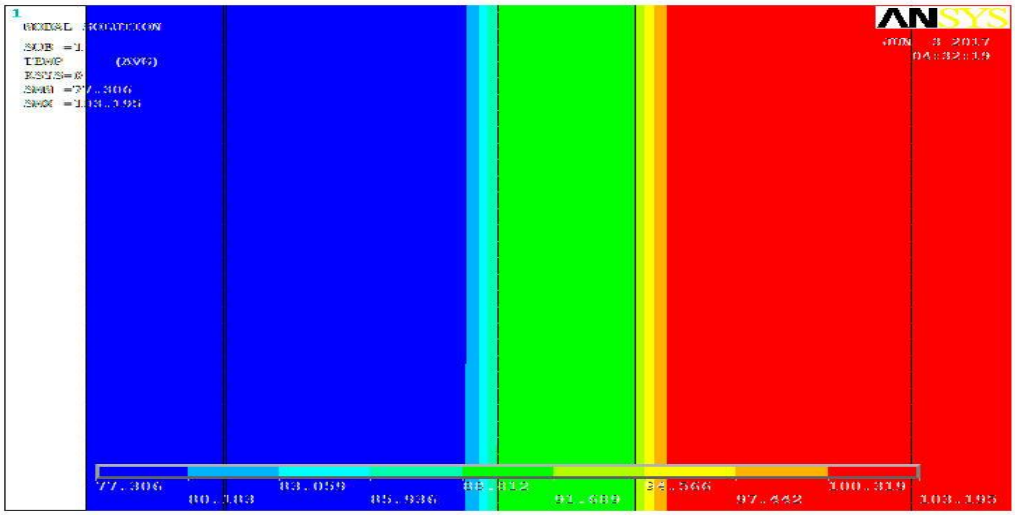
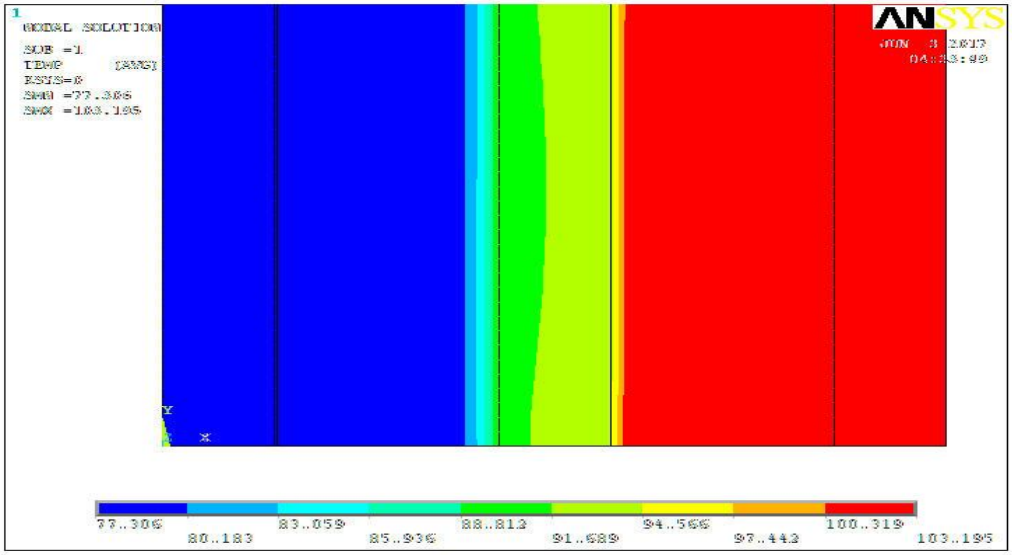
Cote l'eau

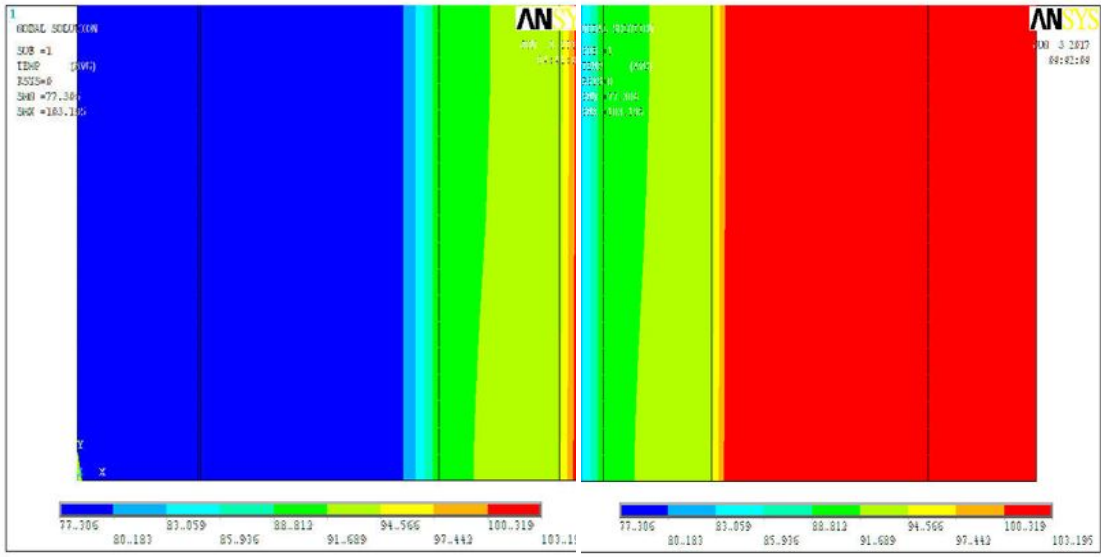


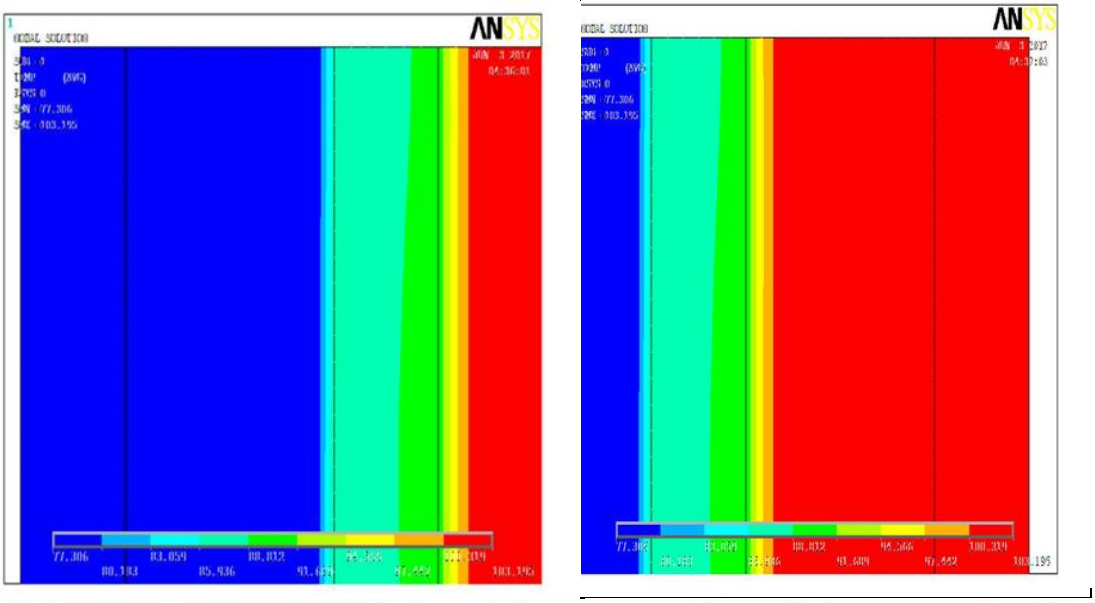
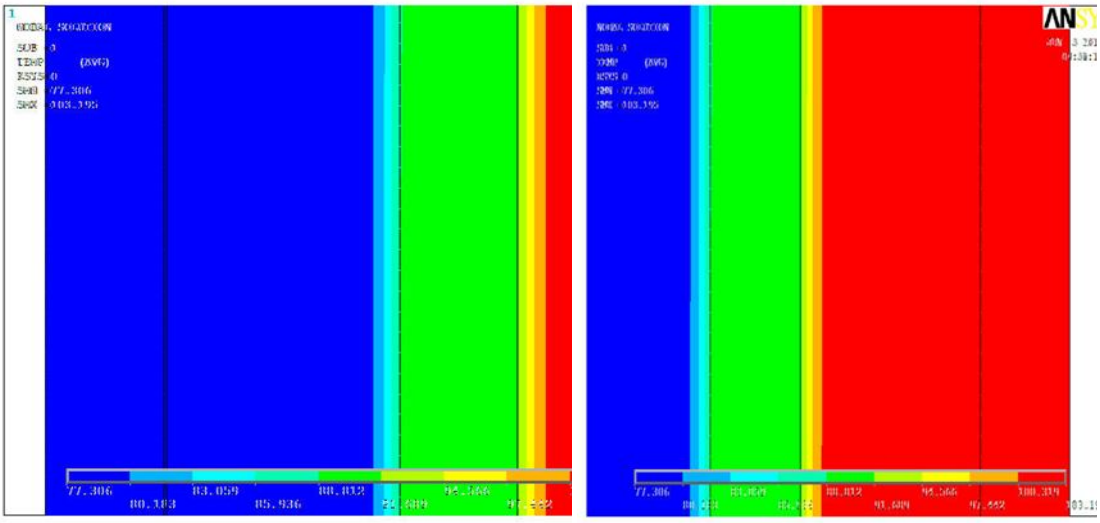
b) Pour l'inox 304 :

1 Profil de température :

	Les deux cotés
En haut	

Au milieu	
En bas	

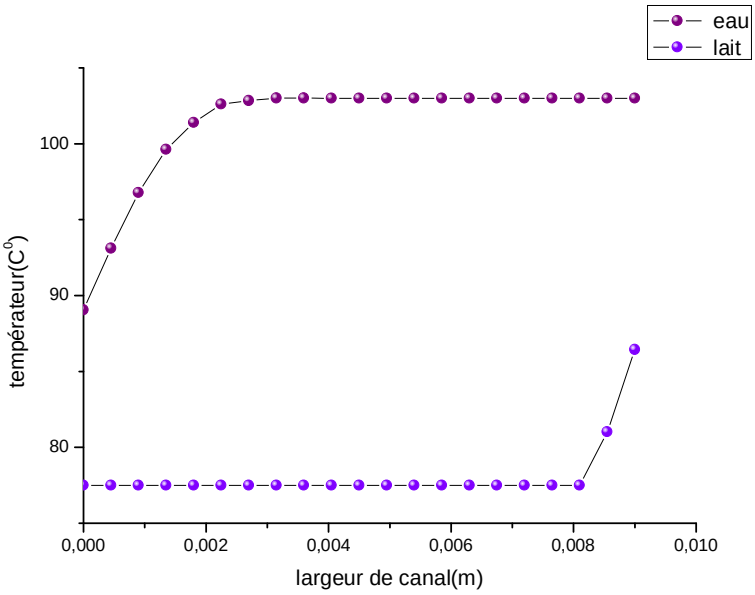
	Coter lait	**Coter eau**
En haut		

Au milieu	
En bas	

La variation de la température à la largeur du canal

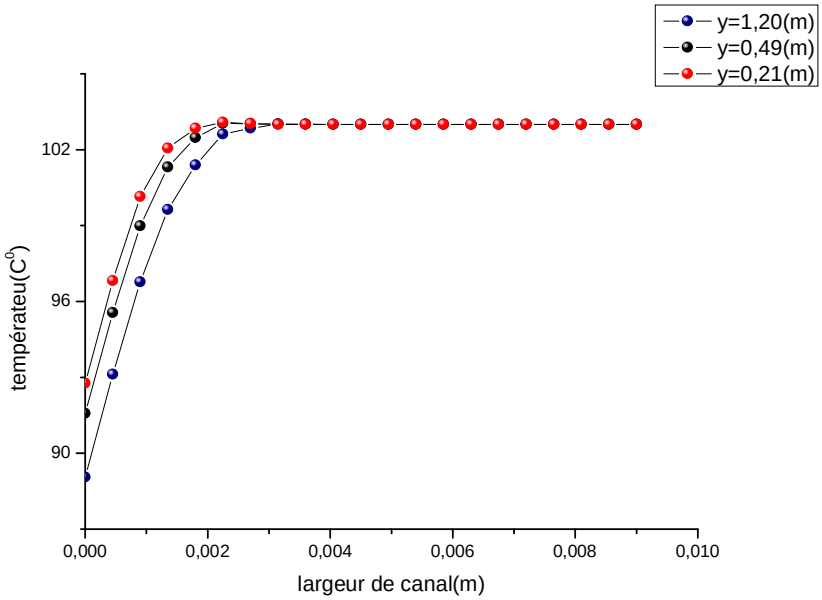
L'évolution du profil de la température en fonction de la largeur (x) du canal est représentée sur les graphes suivantes et ce pour différentes positions dans le canal (Y).pour l'eau et lait

Pour Y=1.2

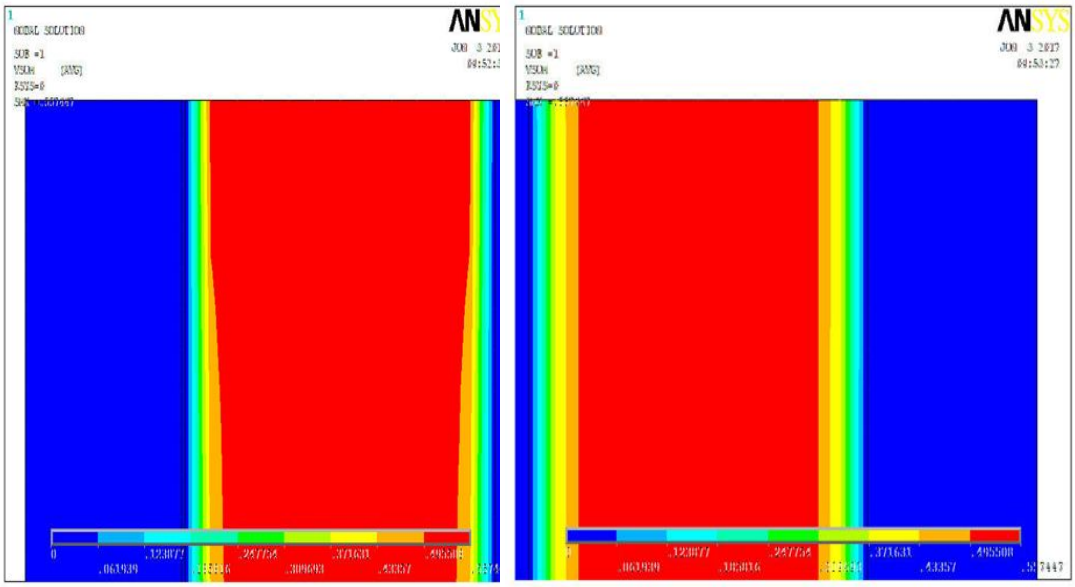
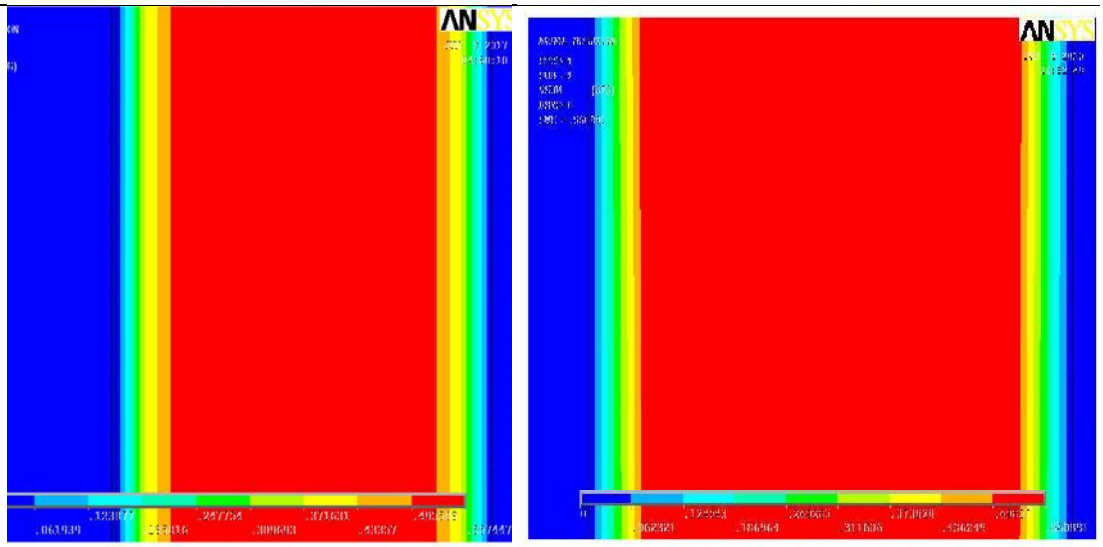
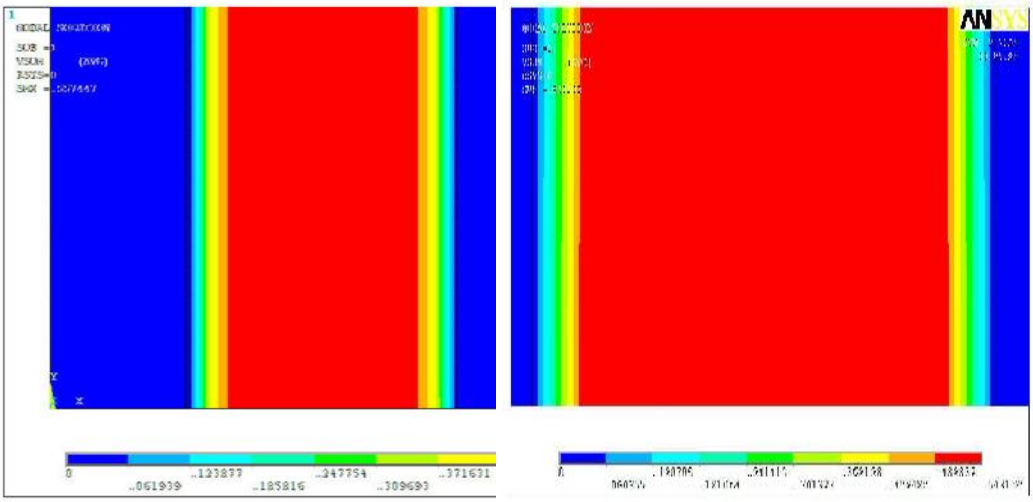


Les températures dans un même graphe

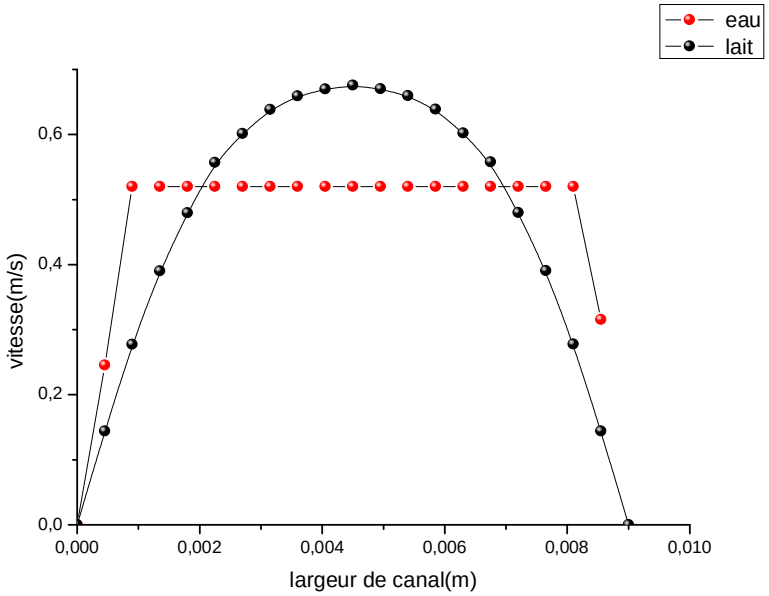
Coté de l'eau



2 Profil de la vitesse

	Coter lait	Coter eau
En haut		
An milieu		
En bas		

Pour Y=1.2



Les vitesses dans un même graphe

Cote l'eau

