REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES



Mémoire

Présenté pour obtenir le diplôme de **Master**

En chimie

Spécialité : Chimie pharmaceutique

Par :

Elyousfi Sallah Eddine
Baitaoui Ghania

Thème :

Influence de paramétrage d'un déflecteur sur les performances thermiques d'un échangeur de chaleur lors d'une phase de traitement thermique

Soutenue publiquement le :15 / 06. /2019, Devant le jury composé de :

Dr.Zouambia.Y	Grade :MCA	FS/UYF	Présidente
Mr.Abiza.A	Grade :MAB	FS/UYF	Examinateur
Dr.Mahdi.Y	Grade :MCA	FS/UYF	Examinateur

Année universitaire : 2018/2019

الملخص:

يعد انسداد المبادلات الحرارية مشكلة اقتصادية ابتليت بها الشركات المصنعة لفترة طويلة. يؤدي إلى خسارة كبيرة في الأداء. يركز هذا العمل على دراسة المحاكاة وتحليل النتائج العددية لظاهرة الترسبات في المبادلات الحرارية اللوحية بواسطة الحليب مع و عدم وجود انحراف خلال مرحلة العلاج نداء البسترة الحراري. نقدم الصيغة الرياضية للحالة المستقرة للتدفق المضطرب بين صفيحتين مسطحتين مع وبدون ترسب . تم إنشاء معادلات الحفظ والشروط المطبقة لتحليل العددي. تتعلق هذه الدراسة باختلاف درجة الحرارة و السرعة، تظهر النتائج أن درجة الحرارة السريعة تزيد والسرعة تنخفض . يبدو أن العاكس يحسن التبادلات الحرارية.

الكلمات المفتاحية :الحليب - المبادلات الحرارية ذات اللوحات – الترسب- العاكس.

Résumé:

L'encrassement dans les échangeurs de chaleur est un problème économique qui tourmente les industriels depuis longtemps. Il se traduit par une perte de performances assez importante. Ce travail porte sur l'étude de la simulation et l'analyse des résultats numérique de phénomène de l'encrassement dans les échangeurs de chaleur à plaque par le lait avec la présence et l'absence de déflecteur lors d'une phase de traitement thermique appelé pasteurisation. Nous présentons la formulation mathématique en régime stationnaire d'un écoulement turbulent entre deux plaques planes avec et sans encrassement. On a établi les équations de conservations et les conditions applicables pour la résolution numérique. Cette étude concerne la variation de la température, la vitesse. Les résultats montrent que la température augmente et la vitesse diminu. Il semble que la présence de plusieurs déflecteurs améliore les échanges thermiques.

Mots clés : Lait, échangeur de chaleur à plaque, encrassement, déflecteur.

Abstract:

Fouling in heat exchangers is an economic problem that has plagued manufacturers for a long time. It results in a significant loss of performance. This work deals with the study of the simulation and the analysis of the numerical results of fouling phenomenon in plate heat exchangers by the milk with the presence the absence of a deflector during a phase of Thermal treatment call pasteurization. We present the steady-state mathematical formulation of a turbulent flow between two flat plates with and without fouling. The conservation equations and applicable conditions for numerical resolution were established. This study concerns the variation of the temperature and the speed. the results show that, the temperature increases and the speed decreases.

Key words: Milk- plate heat exchanger- Fouling -deflector.

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier le bon Dieu le tout Puissant de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail, également nous remercions infiniment nos parents, qui mous ont encouragé et aidé à arriver à ce stade de notre formation.

الحمد لله

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

Nous exprimons aussi notre infinie gratitude à **Mr. Monire ZIRARI** pour leurs aides de la réalisation pratique et la formation de Logiciel Ansys et pour leurs encouragements et leur soutien moral.

Nous remercions aussi les membres de jury : la présidente de jury **Dr. Zouambia.Y**

L'examinateur **Mr. Abiza Amirouche.**

Nous tenons à remercier tous ceux et celle qui ont contribué à
Finaliser ce modeste travail.

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui nous a aidé et assisté
Durant mes études.

Dédicase

Je dédie ce travail qui n'aura jamais pu voir le jour sans les soutiens indéfectibles et sans limite de mes chers parents qui ne cessent de me donner avec amour le nécessaire pour que je puisse arriver à ce que je suis aujourd'hui. Que dieux vous protège et que la réussite soit toujours à ma portée pour que je puisse vous combler de bonheur.

Je dédie aussi ce travail à :

- Ma future femme.
- Mes grands-parents.
- Ma sœur Louz khadidja.
- Ma soeurs et ma famille.

Tous mes amis, mes collègues et tous ceux qui m'estiment.

SALLAH EDDINE

Dédicase

Je dédie ce travail

A mes chers parents ma mère et mon père pour leur patience, leur amour, leur soutiens, leur encouragements.

A mon frère et sa femme.

A mes sœurs et surtout Ahlem, a ma belle petite Ines.

A tous mes amis et mes camarades.

Sans oublier tout les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, de secondaire ou de l'enseignement supérieur.

Baitaoui Ghania

Résumé

Remerciment.

Sommaire.

Liste des Figures.

Liste des tableaux.

Nomenclature.

Introduction Générale……1

Chapitre I : Le lait, Les produits laitières, Le traitement thermique

I. Le lait. 4

I.1. Définition 4

I.2. La composition du lait 4

I.2.1. Eau 6

I.2.2. Matières grasses 6

I.2.3. Protéines 7

I.2.4. Lactose 8

I.2.5. Les Glucides 8

I.2.6. Les Lipides 8

I.2.7. La Matière azotée 8

I.2.8. Les minéraux 9

I.2.9. Les vitamines 9

I.2.10. Les Enzymes 10

I.3. Propriétés physico-chimiques du lait 12

I.3.1. Masse volumique 13

I.3.2. Point de congélation 13

I.3.3. Point d'ébullition 13

I.3.4. Acidité du lait 13

I.4. Qualité Organoleptique du lait 14

I.4.1. La couleur 14
I.4.2. L'odeur 14
I.4.3. La saveur 15
I.4.4. La viscosité 15
I.5. Les Produits dérives du lait 16
I.5.1. La crème et le beurre 16
I.5.2. Les fromages 17
I.5.3. Le yaourt 17
I.6. Le lait pasteurisé 17
I.6.1. Le lait stérilisé 18
A. Lait stérilisé 18
B. Lait stérilisé UHT 18
C. Le lait cru 18
I.7. Traitement thermique de lait 22
I.7.1. Principales catégories de traitement thermique dans l'industrie laitière 22
I.7.2. Thermorésistante des bactéries et des microorganismes 22
I.7.3. Procédés de traitement thermique 23
I.7.3.1. La pasteurisation 23
I.7.3.2. Les Différents Types de Pasteurisation 23
I.7.4. La stérilisation 24
Chapitre II: Les échangeurs de chaleurs et leurs encrassement
II. Introduction 26
II.1. Le Principe de fonctionnement 26
II.2. Modes de transferts thermiques 27
II.2.1. La conduction 27
II.2.2. La convection 27
II.2.3. Le rayonnement 27
II.3. Les principaux modes d'écoulement des deux fluides 27

II.3.1. Ecoulement Co-courants (Ecoulement des deux fluides parallèles et de même sens): 27
II.3.2. Ecoulement contre courants (Ecoulement des fluides parallèles mais de sens contraires) 28
II.3.3. Ecoulement des fluides croisés avec ou sans brassage 29
II.4. Classification des échangeurs 29
II.4.1. Suivants le type technologie 29
II.4.2. Suivant le mode transfert de chaleur 30
II.4.3. Suivant le mode de fonctionnement 30
II.4.4. Suivant la compacité de l'échangeur 30
II.4.5. Suivant la nature du matériau de la paroi d'échange 30
II.4.6. Suivant les écoulements 31
II.4.7. Suivant le Type de contact 31
II.5. Les déférentes types d'échangeurs de chaleur 32
II.5.1. Echangeurs tubulaires 32
II.5.1.1. Echangeur monotube 32
II.5.1.2. Echangeur coaxial 32
II.6. Avantages et inconvénients de l'échangeur à plaques 35
II.6.1. Avantage 35
II.6.2. Inconvénients 36
II.7. Méthodes de dimensionnement 36
II.7.1. Coefficient d'échange global et partiel 37
II.7.2. Critères de performance d'un échangeur 40
II.7.3. Echangeurs de chaleur et déflecteurs 40
II.7.3.1. Echangeurs de chaleur 40
II.7.3.2. Déflecteurs ou plaque de protection du faisceau 41
II.8. Encrassement 42
II.8.1. Introduction 42
II.8.2. Notion sur l'encrassement des échangeurs 43

II.8.2.1. la corrosion 43
II.8.2.2. l'encrassement biologique 43
II.8.2.3. L'encrassement par réaction chimique 44
III.8.2.4. L'entartrage 44
II.8.2.5. L'encrassement particulaire 45
II.8.3. les processus fondamentaux de l'encrassement 45
II.8.3.1. Initiation 45
II.8.3.2.Transfert de particule à la paroi 45
II.8.3.3. Adhésion des particules 46
II.8.3.4. Réentrainement des particules déposées 46
II.8.3.5. Vieillissement du dépôt 46
II.8.4. Encrassement par le lait 46
II.8.4.1. Introduction 46
II.8.4.2. Modèle et mécanisme d'encrassement par le lait 47
II.8.4.3. Encrassement par cristallisation 48

Chapitre III: Modélisation et simulation de l'encrassement

III. Introduction 49
III.1. Description du système 49
III.2. Le cycle de vapeur 50
III.3. Modèle thermique de l'échangeur à plaques 51
III.3.1. Introduction 51
III.3.2. Formulation mathématique du problème 52
III.3.2.1. Introduction 52
III.3.2.2. Modélisation de la turbulence dans un milieu totalement fluide 53
III.3.2.2.1. Les hypothèses 53
III.3.2.2.2. Equations de conservation 54
III.3.2.3.2. Conditions initiales et aux limites 55
III.3.3. Calcul du coefficient de transfert de chaleur global 55

III.3.4. Calcul des paramètres à mesurer du mélange (lait) 56
III.3.5. Calcul des paramètres à mesurer de l'eau chaude 58
III.4. Programme Ansys 59
III.4.1. Introduction 59
III.4.2. Définition d'Ansys 59
III.4.2.1. Ansys CFD 59
III.4.3. Les points forts des outils Ansys 62

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1. Introduction 63
IV.2. Les profils dans un milieu complètement fluide avec la présence d'un déflecteur coté lait sans encrassement 64
IV.2.1. Profil de température 64
IV.2.2. Profil de la vitesse 65
IV.3. Les profils dans un milieu fluide avec encrassement avec la présence d'un déflecteur coté lait 66
IV.3.1. Profil de la température 66
IV.3.2. Le profil de vitesse 66
IV.4. Les profils dans un milieu fluide avec encrassement avec la présence deux déflecteurs coté lait 67
IV.4.1. Profil de température 67
IV.4.2. Profil de la vitesse 68
IV.5. Les profils dans un milieu fluide avec encrassement avec la présence quatre déflecteurs carré coté lait 69
IV.5.1. Profil de température 69
IV.5.2. Profil de vitesse 69
IV.6. Les profils dans un milieu fluide avec encrassement avec la présence d'un déflecteur cercle coté lait 70
IV.6.1. Profil de température 70
IV.6.2. Profil de vitesse 71

IV.7. Etude comparative entre milieu fluide avec encrassement avec la présence de plusieurs déflecteurs coté lait : 71

IV.7.1. Profile de température……71

IV.8. Etude comparative entre milieu fluide avec encrassement avec un déflecteur carrée et un déflecteur cercle coté lait : 72

IV.8.1. Profile de température……72

IV.9. Etude comparative entre milieu fluide avec encrassement avec quatre déflecteur carrée et un déflecteur cercle coté lait : Profil de température 73

IV.9.1. Profile de température……73

Conclusion Générale…….....74

Figure I.1: Structure d'un globule de matière grasse Page : 7

Figure I.2: Technique de production du lait en poudre Page : 20

Figure I.3 : Diagramme de fabrication du lait pasteurise reconstitué Page : 21

Figure I.4. Schéma d'une installation de pasteurisation Page : 25

Figure II.1: Echangeur de chaleur à Co-courant Page : 28

Figure II.2 : Echangeur à tube à contre-courant Page : 28

Figure II.3: Echangeur compact à courant croisé Page : 28

Figure. II.4: différent modes de circulation Page : 31

Figure.II.5: Différents types d'échangeurs tubulaires Page : 33

Figure II.6: schéma d'un échangeur à plaques Page : 34

Figure.II.7 : Echangeur brasé Page : 34

Figure.II.8: Echangeur à plaque et joint Page : 35

Figure II.9 : Echangeur à plateaux ou à plateaux et cadre Page : 36

Figure II .10. type d'échangeurs de chaleurs Page : 41

Figure II.11: déflecteur ou Plaque de protection du faisceau Page : 42

Figure III .1: Cycle de Pasteurisation du Lait Page : 50

Figure III .2: Arrangement des plaques de l'échangeur de pasteurisation et sens de circulation des fluides Page : 51

Figure III.3: Schéma descriptif du canal Page : 53

Figure III .4 : Schématisation de la direction de l'écoulement entre deux plaques Page : 56

Figure III.5 : Les principaux modules des deux logiciels ANSYS ICEM & CFX Page : 60

Figure III.6 : L'interface utilisateur graphique d'ANSYS Page : 61

Figure IV.1: Ecoulement dans un canal à section rectangulaire Page : 64

Figure IV.2 : Ecoulement dans un canal à section rectangulaire avec la présence de déflecteurs Page : 64

Figure IV.3: La variation de la température dans le lait Page : 65

Figure IV .4 : La variation de profil de vitesse Page : 65

Figure IV.5 : La variation de la température Page : 66

Figure IV.6. La variation du profil de vitesse Page : 67

Figure IV.7. La variation de température Page : 68

Figure IV.8 : La variation du profil de vitesse Page : 68

Figure IV.9 : La variation de la température Page : 69

Figure IV.10 : La variation du profil de la vitesse Page : 70

Figure IV.11: La variation de la température. Page : 70

Figure IV.12 : La variation du profil de la vitesse Page : 71

Figure IV.13 : La variation de la température. Page : 72

Figure IV.14 : La variation de la température Page : 72

Figure IV.15 : La variation de la température Page : 73

Liste des tableaux

Tableau I.1: Composition moyenne du lait entier Page : 5

Tableau I.2 : Composition moyenne en % du lait de vache, femme, brebis et chèvre Page : 6

Tableau I.3: Propriétés des principaux nutriments du lait Page : 10

Tableau I.4 : les propriétés physico-chimique du lait de vache Page : 14

Symbole	**Définition**	**Unité**
A	Surface d'échange de chaleur	m^2
A	Protéine agrégats	-
a	Diffusivité thermique	m^2/s
C	La concentration	Kg/m^3
Cp	Chaleur spécifique	$J/Kg\ ^0C$
D	Diamètre	m
d_e	Diamètre hydraulique	m
Dp	Diamètre des particules	m
D	Protéine dénaturé	-
E	Epaisseur de la plaque	m
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	$W/m^2.°C$
K	Conductivité thermique de l'eau	$W/m^2.\ °C$
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'entrée	K
U	Vitesse longitudinale de l'écoulement	m/s
U_0	Coefficient d'échange global à l'état propre	$W/m^2.K$
U_d	Coefficient d'échange global à l'état encrassé (dépôt)	$W/m^2.K$
V_f	Volume du fluide	m^3
V_t	Volume total	m^3
W	Largeur d'une plaque	m

1. SYMBOLES GRECS

Symbole	Désignation	Unité
μ_0	Viscosité dynamique de l'eau	kg/m.s
μ	Viscosité dynamique du mélange,	kg/m.s
ρ	La masse volumique	kg/m^3
λ	La conductivité thermique	W/m.k
e_p	Epaisseur du milieu poreux	M
ϕ	La porosité	N/s^2
ϕ^*	Densité du flux massique	$Kg/m^2/s$
Φ	Flux massique	$W/m^2.K$

2. INDICES

INDICES	Exposants
C	Chaud
F	Froid
I	Nombre d'itération
J	Canal
M	Mélange
P	Plaque, Paroi

Introduction Générale

Le lait est un élément essentiel dans la nutrition de l'être humain mais il peut devenir une source d'infection sérieuse car il héberge des micro-organismes qui peuvent dégradés ses qualités et rendre sa consommation une source de maladies.

Pour inhiber l'action destructive de certaine de ces bactéries, sans influer nettement sur les propriétés physiques et chimiques, on utilise le traitement thermique pour augmenter sa vie.

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 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.

Les chercheurs suggèrent de mettre un ou plusieurs déflecteurs dans les échangeurs de chaleurs a plaque pour diminuer l'encrassement de lait.

Le thème proposé concerne l'analyse de l'encrassement dans un canal plan représentant un échangeur de chaleur à plaques en l'absence et la présence d'un déflecteur. Un fluide alimentaire tel que le lait, ayant un fort pouvoir encrassant, sera considéré en écoulement turbulent. L'objectif de notre travail est premièrement de déterminer les effets du dépôt encrassant formé sur l'échange thermique d'échangeur de chaleur en l'absence et la présence de déflecteur.

Il s'agit de simuler numériquement et de résoudre en régime transitoire les équations de conservation en adoptant un modèle de turbulence et de quantifier la résistance d'encrassement au cours du temps.

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

- Le premier chapitre présente quelques notions sur le lait, les produits laitiers et les méthodes de traitements thermiques du lait.

- Le second chapitre présente une description des échangeurs de chaleur en général. Une attention particulière est portée sur les échangeurs de chaleur à plaques qui sont employés principalement dans les procédés de traitements thermiques du lait et les échangeurs avec déflecteurs. Enfin, l'encrassement des échangeurs de chaleur à plaques est également présenté dans ce chapitre.

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

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

- Nous terminons par une conclusion générale, une présentation générale des résultats et quelques perspectives.

Chapitre I :

Le lait les produits laitières et les traitements thermiques

I. Le lait

I.1. Définition

En générale le lait est un liquide blanc opaque, riche en graisses et en protéines, sécrété par les mammifères femelles pour nourrir leurs petits. «Une mère en bonne santé produira suffisamment de lait pour son bébé» **[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 autre traitement non thermique d'effet équivalent notamment du point de vue de la réduction de la concentration en micro-organismes **[3].**

I.2. 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 **[4]**. La composition nutritionnelle du lait varie essentiellement en fonction du patrimoine génétique des animaux (races), de leur alimentation et du stade de lactation. Au moment de la traite, le lait de vache contient en moyenne 87 % d'eau ; 4,8 % de glucides (du lactose) ; environ 4 % de lipides (environ 60 à 70 % d'acides gras saturés et 30 à 40 % d'insaturés, principalement des mono-insaturés) ; 3,2 % de protéines (80 % de caséines et 20 % de protéines sériques) ; 0,7 % de minéraux et oligo-éléments (dont environ 120 mg de calcium/100 ml.) ; des vitamines (A, D, B…). Le lait peut contenir des enzymes, des germes et des cellules en suspension. Au total, il y aurait plus de 100 000 composés différents dans le lait dont certains peuvent avoir des propriétés fonctionnelles mais aussi apporter des bénéfices

nutritionnels et/ou santé (lactoferrine, oligo-saccharides, phospholipides, sphingolipides, glycosphingolipides, acide ruménique ect.) **[5].**

Tableau I.1: Composition moyenne du lait entier **[6].**

Composants	Teneurs (g/100g)
Eau	89.5
Dérivés azotes	3.44
Protéines	3.27
Caséine	2.71
Protéines solubles	0.56
Azote non protéique	0.17
Matières grasses	3.5
Lipides neutres	3.4
Lipides complexes	<0.05
Composés liposolubles	<0.05
Glucides	4.8
Lactose	4.7
Gaz dissous	5% du volume du lait
Extrait sec total	12.8 g

Le tableau 2 donne la composition moyenne en % pour différentes espèces.

Tableau I.2 : Composition moyenne en % du lait de vache, femme, brebis et chèvre **[7].**

Composants	Chèvre	Vache	Femme	Brebis
Protéines	3.4	1.0	2.9	5.5
Caséine	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.2.1. Eau

L'eau est le consistant le plus important du lait, en proportion. Elle représente environ 80% du lait **[8].** Son caractère lui permet de former une solution vraie avec les glucides, les minéraux et une solution colloïdale avec les protéines **[9].**

I.2.2. Matières grasses

La matière grasse (MG) est présente dans le lait sous forme de globules gras de diamètre de (0.1 à 10^{-6}m) et est essentiellement constitué de triglycérides (98%), de phospholipides (1%) et d'une fraction insaponifiables (1%) [Cholestérol et de β carotène] **[10].** La matière grasse représente à elle seul la moitié de l'apport énergétique du lait. Elle est constituée de 65% d'acide gras saturé et de 35% d'acide gras insaturé. Parmi ceux-ci, la proportion d'acide gras polyinsaturés **[11].**

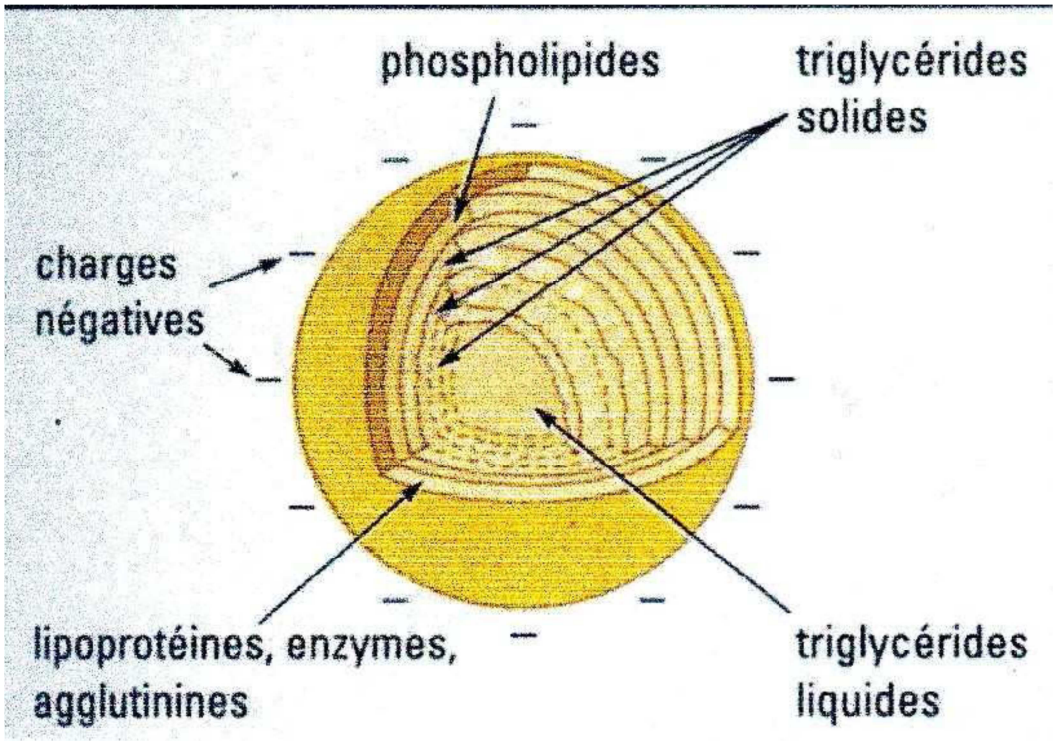


Figure I.1: Structure d'un globule de matière grasse **[11]**

I.2.3. Protéines

Les protéines sont des éléments essentiels au bon fonctionnement des cellules vivantes et elles constituent une part importante du lait et des produits laitiers **[12].**

a. Caséines : Les caséines forment près de 80% de toutes les protéines présentes dans le lait. Elles se regroupent sous forme sphérique appelée micelle. La taille des micelles se situe entre 100 et 500 nm ; avec un diamètre moyen près de 180 nm et elle varie principalement selon l'espèce animale, la saison, le stade de lactation **[13].**

b. Protéines du sérum : Les protéines du sérum, qui représentent environ 20% des protéines totales, se retrouvent sous forme de solution colloïdale. Les deux principales sont la β- lactoglobuline et l'α- lactalbumine ; les autres

protéines du sérum sont les Immoglobulines. En plus, différents enzymes sont présents dans le sérum **[14].**

I.2.4. Lactose

Le lactose est le glucide, ou l'hydrate de carbone, le plus important du lait puis qu'il constitue environ 40% des solides totaux. D'autres glucides peuvent être présents en faible quantité, comme le glucose et le galactose qui proviendraient de l'hydrolyse du lactose ; en outre, certains glucides peuvent se combiner aux protéines. Ainsi, le lait contient près de 4,8% de lactose, tandis que la poudre de lait écrémé en contient 52% et la poudre de lactosérum, près de 70% **[15].**

I.2.5. Glucides

Le constituant principal de la matière sèche du lait est le lactose qui présente une moyenne de 50 g/l**[16]**. D'autres glucides peuvent être présents en faible quantité, comme le glucose et le galactose qui proviendraient de l'hydrolyse du lactose. En outre, certains glucides peuvent se combiner aux protéines **[17].**

I.2.6. Lipides

Les lipides du lait n'ont aucun rôle particulier dans le phénomène de coagulation. Ils sont constitués en majeure partie de triglycérides qui représentent 97 à 99 % des lipides totaux **[18].** En plus des triglycérides, on trouve des phospholipides, des stérols et du cholestérol qui constituent 1 à 3 % des lipides totaux **[17].**

I.2.7. La Matière azotée

La matière azotée du lait englobe deux groupes, les protéines et les matières non protéiques qui représentent respectivement 95 et 5% de

l'azote minéral du lait **[19].**

I.2.8. Les minéraux

Les minéraux contenus dans le lait, prennent plusieurs formes ; ce sont les plus souvent des sels, des bases et des acides. A cette liste s'ajoutent certains éléments, comme le soufre présent dans les protéines et les oligo-éléments suivants, qui sont présents à de faibles concentrations à l'état de trace : manganèse, bore, fluor, silicium, brome, molybdène, cobalt, baryum, titane, lithium et probablement certains autres **[20].**

Les minéraux, ont un rôle structural et fonctionnel : ils sont souvent impliqués dans le mécanisme physiologiques (régulation nerveuse ou enzymatique, contraction musculaire …) **[20-21].**

I.2.9. Les vitamines

Les vitamines sont des substances biologiquement indispensables à la vie puisqu'elles participent comme cofacteurs dans les réactions enzymatiques et dans les échanges à l'échelle des membranes cellulaires. L'organisme humain n'est pas cabale de les synthétiser. On les retrouve en en très petite quantité dans les aliments.

On répartit les vitamines en deux classes selon leur solubilité, soit les vitamines hydrosolubles (vitamines du groupe B, vit C, vit H, acide folique, niacine et niacinamide, acide pantothénique), se retrouvent en plus grande concentration dans le sérum, et les vitamines liposolubles (vit A, vit D, vit E, vit K) qui sont associer à la matière grasse, par conséquence l'écrémage du lait diminuera considérablement leurs concentration. Par contre elles sont en plus grande concentration dans les produits comme la crème et le beurre. Les différentes vitamines peuvent ressentir l'effet de la chaleur et de la lumière **[22].**

I.2.10. Les Enzymes [23]

Le lait contient principalement trois groupes d'enzymes : les hydrolases, les déshydrogénases (ou oxydase) et les oxygénases. Les deux principaux facteurs qui influent sur l'activité enzymatique sont le pH et la température

Tableau I.3. : Propriétés des principaux nutriments du lait **[24]**

Nutriment	Fonctions	Intérêt sanitaire
Minéraux		
Calcium	Formation de l'os, Contraction musculaire, Coagulation du sang, Régulation d'enzymes.	Prévention de l'ostéoporose et de fractures, de l'hypertension artérielle, du cancer du côlon.
Phosphore	Métabolisme énergétique (ATP). Coenzyme NADP. Phospholipides des membranes cellulaires.	Développement et maintien de la masse osseuse.
Magnesium	Cofacteur dans plus de 300 réactions métaboliques. Transmission de l'influx nerveux.	Prévention de troubles du système nerveux : convulsions, hallucinations.
Potassium	Contrôle de la contraction musculaire. Equilibre des échanges cellulaires (avec Na).	Maintien de la force musculaire. Prévention de l'hypertension artérielle.

Zinc	Constituant de l'insuline et de plus de 200 enzymes engagés dans la croissance, la circulation, l'immunité.	Croissance, puberté et appétit normaux. Défense contre les infections.
Vitamines		
Riboflavie	Coenzymes FAD et FMN du métabolisme énergétique.	Protection des muqueuses et de la peau. Vision normale.
Vit. B12	Cofacteur dans la synthèse des acides nucléiques (avec folate).	Prévention de l'anémie pernicieuse.
Biotine	Cofacteur de réaction carboxylation-décarboxylation.	Activité cardiaque et appétit normaux.
Pantothénte	Coenzyme A du métabolisme énergétique et de la synthèse des constituants lipidiques.	Prévention de l'insomnie et de la fatigue.
Niacine	Coenzyme NAD du métabolisme énergétique et de synthèse des acides gras.	Prévention contre la pellagre(dermatite,démence, diarrhée)
Vit. A	Constituant d'un pigment visuel de la rétine. Développement des os, des dents, de la peau.	Prévention contre la cécité, les infections, le dessèchement de la peau et des yeux.

Vit. D Pyridoxine Thiamine	Facteur favorisant le système actif d'absorption intestinale du calcium. Cofacteur de réactions de synthèse et de modification d'acides aminés. Coenzyme de réactions du métabolisme des glucides.	Prévention de problèmes de développement osseux. Prévention de convulsions (déficit en sérotonine). Prévention du béribéri (déficit mental, cardiaque, musculaire).
Protéines Lleu, Leu Lys, Met Thr, Trp Phe, Val	Source d'acides aminés essentiels à La synthèse des protéines des parois cellulaires, fibre musculaire, enzymes et hormones.	Prévention contre les retards de croissance. Résistance et défense contre les infections.

I.3. Propriétés physico-chimiques du lait

Les propriétés physico-chimiques du lait sont plus ou moins stables, elles dépendent soit de l'ensemble des constitutions comme la densité, soit des substances en solution comme le point de congélation ou encore des concentrations en ions comme le pH (acidité). Les principales propriétés physico-chimiques utilisées dans l'industrie laitière sont la masse volumique ou la densité, le point de congélation, le point d'ébullition et l'acidité **[11].**

I.3.1. Masse volumique

La masse volumique d'un liquide est définie par le quotient de la masse d'une certaine quantité de ce liquide divisée par son volume. Elle est

habituellement notée ρ et s'exprime en $Kg.m^{-3}$ dans le système métrique. La masse volumique du lait entier à 20°C et en moyenne de 1030 $Kg.m^{-3}$ **[25].**

I.3.2. Point de congélation

Le point de congélation du lait est légèrement inférieur à celui de l'eau pure puisque la présence de solides solubilisés abaisse le point de congélation. Cette propriété physique est mesurée pour déterminer s'il y a addition d'eau au lait. Sa valeur moyenne se situe entre - 0.54 et - 0.55°C **[26].**

I.3.3. 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 **[16].**

I.3.4. Acidité du lait

L'acidité du lait résulte de l'acidité naturelle, due à la caséine, aux groupes phosphate, au dioxyde de carbone et aux acides organiques et de l'acidité développée, due à l'acide lactique formé dans la fermentation lactique. L'acidité titrable peut être exprimée en 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 **[27].**

Tableau I.4 : les propriétés physico-chimique du lait de vache **[28]**

Densité du lait à 20°C	1,028-1,034 Kg /m^3
Densité de lait écrémé	1,035-1,036 Kg /m^3
Densité de la matière grasse	0,92-0,94 Kg / m^3
Point de congélation	0,530-0,555 °C
pH à 20°C	6,6-6,8
Acidité titrable	15-17 °D
Activité de l'eau à 20°C	0,9

I.4. Qualité Organoleptique du lait

Fredot **[29]** rapporte que l'aspect, l'odeur, la saveur, la texture ne peuvent être précisés qu'en comparaison avec un lait frais.

I.4.1. La couleur

Le lait est de couleur blanche mat, qui est due en grande partie à la matière grasse. Aux pigments de carotène (la vache transforme le ß-carotène en vitamine A qui passe directement dans le lait **[30]**

Reumont **[31]** explique que dans le lait, deux composants, les lipides sous forme de globules de matière grasse et les protéines sous forme de micelles de caséines diffractent la lumière. Ces agrégats dispersent les rayons lumineux sans les absorber et le rayonnement qu'ils renvoient, est identique en composition au rayonnement solaire, à savoir une lumière blanche.

I.4.2. L'odeur

Selon Vierling **[29]**, l'odeur est une caractéristique du lait du fait de la matière grasse qu'il contient fixe des odeurs animales. Elles sont liées à

l'ambiance de la traite, à l'alimentation (les fourrages à base d'ensilage favorisent la flore butyrique, le lait prend, alors une forte odeur), à la conservation (l'acidification du lait à l'aide de l'acide lactique lui donne une odeur aigrelette).

I.4.3. La saveur

La saveur du lait frais est agréable. Celle du lait acidifie est fraiche et un peu piquante. Les laits chauffés (pasteurisés, bouilli, stérilisés) ont un goût légèrement différent de celui du lai cru. Les laits de rétention et de mammites ont une saveur salée plus ou moins accentuée. Il en est en parfois de même du colostrum. L'alimentation des vaches laitières à l'aide de certaines plantes de fourrages ensilés, etc. peut transmettre au lait produits des saveurs anormales en particulier un goût amer. La saveur amère peut aussi apparaître dans le lait par suite de la pullulation de certains germes d'origine extra-mammaire **[32].**

I.4.4. La viscosité [33]

Le test a montré que la viscosité du lait est une propriété complexe qui est particulièrement affectée par les particules colloïdes émulsifiées et dissoutes. La teneur en graisse et en caséine possède l'influence la plus importante sur la viscosité du lait. La viscosité dépend également de paramètres technologiques. La viscosité est une caractéristique importante de la qualité du lait, étant donné qu'une relation intime existe entre les propriétés rhéologiques et la perception de la qualité par le consommateur.

Ainsi, un consommateur d'europe centrale évalue de manière très positive le lait concentré à forte consistance (filandreux). Il associe la teneur élevée des composants du lait à la viscosité élevée.

I.5. Les Produits dérives du lait

Habitudes alimentaires, difficultés de production de certains fromages, préférence pour le lait entier, qui exclut la production de crème ou de beurre, concurrence de la margarine, moins chère, La production de fromage, de crème, de beurre est limitée dans les pays en développement par de nombreux facteurs. Toutefois, si le marché existe, ces produits peuvent être vendus à des prix permettant de rentabiliser la structure de production **[34].**

I.5.1. La crème et le beurre [34]

La crème est obtenue par écrémage du lait, opération qui s'effectue au moyen d'une écrémeuse. Celle-ci sépare la crème, riche en matière grasse (de 30 à 35 %, voire 40 % l'été), du lait écrémé, pauvre en matière grasse. Immédiatement après, la crème est refroidie, puis "mûrie" pendant un temps et à une température qui est fonction des "bonnes" conditions de mûrissement du lieu. La maturation des crèmes résulte en effet de l'action des ferments naturels du lait et de l'environnement ; ces ferments développent une acidification et un arôme qui peut être spécifiques à la région. En même temps, les globules gras se cristallisent en partie et leurs membranes se fragilisent ce qui facilitera la fabrication du beurre. Le beurre est fabriqué au départ de crème, sa teneur en matière grasse doit être de 82 % minimum et sa teneur en eau de 16 % maximum.

La première opération, le barattage, consiste en une agitation énergique de la crème maturée pour provoquer la formation des grains de beurre. Le liquide qui se libère lors du barattage s'appelle le babeurre. Après le barattage, le beurre est lavé afin d'éliminer les restes de caséine emprisonnés entre les grains.

I.5.2. Les fromages [34]

Il existe quantité de fromages, chacun ayant ses spécificités. Ils varient par la nature du lait (vache, brebis, chèvre), par la teneur en matière grasse (résultant de l'addition ou non de crème ou de lait entier), par leur mode de préparation (affinage, égouttage, pressage, cuisson), par la consistance de leur pâte, par leur durée de conservation. Habituellement, on distingue les fromages frais ou non fermentés, les fromages fermentés à pâte molle et les fromages fermentés à pâte dure ou demi-dure

I.5.3. Le yaourt [35]

Le yogourt est un produit laitier coagulé obtenu par fermentation lactique grâce à l'action de Lactobacillus bulgaricus et de Streptococcus thermophilus. Ces bactéries sont cultivées sur du lait préalablement pasteurisé, dans le but d'éliminer la plus grande partie ou la totalité de la flore microbienne préexistante. Après la fermentation, le yaourt est refroidi à une température comprise entre 0 et 6°C, à l'exclusion de tout autre traitement thermique, afin de ne pas détruire la flore bactérienne vivante : la loi impose en effet la présence dans le produit, au moment de la consommation, au moins 100 millions de bactéries spécifiques vivantes par gramme de yaourt.

I.6. Le lait pasteurisé [36]

Le lait pasteurisé, fabriqué à partir de lait cru ou de lait reconstitué, écrémé ou non, est un lait qui a subi un traitement thermique (pasteurisation) qui détruit plus de 90 % de la flore (jusqu'à 98 %) contenue dans le lait (notamment tous les germes pathogènes non sporulés, tels que les germes de la tuberculose et de la brucellose).

I.6.1. Le lait stérilisé [37]

A. Lait stérilisé

C'est un lait conditionné-stérilisé après conditionnement dans un récipient hermétiquement clos, étanche aux liquides et aux microorganismes par la chaleur, laquelle doit détruire les enzymes les microorganismes pathogènes.

B. Lait stérilisé UHT

C'est un lait traité par la chaleur, qui doit détruire les enzymes, les microorganismes pathogènes, et conditionné ensuite aseptiquement dans un récipient stérile, hermétiquement clos, étanche aux liquides et aux microorganismes. Le traitement thermique peut être soit direct (injection de vapeur d'eau), soit indirect. Il est réalisé à 135-150°C pendant 2.5 secondes environ.

C. Le lait cru [38]

Le lait cru est un produit par la sécrétion de la glande mammaire d'une ou de plusieurs vaches, est non chauffé au-delà de 40 C° ni soumis à un traitement d'effet équivalent.

D. Lait concentré sucré

Lait concentré c'est le produit provenant de la concentration du lait propre à la consommation. La concentration du lait peut se faire avec ou sans addition de sucre. La stabilité du lait peut être assurée par réduction de l'activité de l'eau. On y parvient par élimination partielle de l'eau et ajout de sucre. Le principe consiste à effectuer une évaporation sous vide afin d'abaisser la température d'ébullition. L'évaporation s'effectue dans des évaporateurs tubulaires ou à plaques. L'addition de saccharose assure la conservation du

produit sans étape de stérilisation en limitant le développement des micro-organismes par abaissement de l'activité de l'eau. Leur teneur en eau est de 24% environ, les constituants ont une concentration proche du triple de celle du lait, la teneur en saccharose atteint plus de 40% **[29].**

E. Le lait aromatisé

Vierling **[29]** rappelle que cette dénomination est réservée aux boissons stérilisées préparées à l'avance, constituées exclusivement de lait écrémé ou non , sucré ou non , additionné des colorants généralement autorisés et de substances aromatiques naturelles qui peuvent être renforcées artificiellement : abricot , ananas, fraise, prune, cerise, framboise. Les laits aromatisés peuvent avoir subi l'addition d'agar-agar, alginates, carraghénanes et pectines comme stabilisants. Les laits aromatisés sont généralement obtenus par stérilisation en récipients ou par stérilisation UHT (ultra haut température)

F. Le lait fermenté [39]

Le développement des bactéries lactiques dans le lait s'accompagne d'une dégradation (fermentation) du lactose (sucre du lait) en acide lactique, ce qui limite le développement des micro-organismes nuisibles et provoque la coagulation du lait. C'est le mode de transformation le plus courant en Afrique. Il permet d'obtenir un produit plus facile à conserver que le lait, mais aussi plus digeste (dégradation du lactose), et auquel on prête des vertus thérapeutiques. Deux techniques sont possibles pour la fermentation :

- la fermentation spontanée. On laisse le lait fermenter tout seul en le maintenant à un niveau de température et d'humidité relative appropriées.
- la fermentation conduite. Le lait est pasteurisé puis réensemencé avec des starters ou levains sélectionnés. C'est théoriquement la seule méthode envisageable au niveau industriel ou au niveau d'une micro-laiterie.

G. Le lait en poudre

Pfiffner **[40]** évoque que la production de lait condensé avait débuté dans les années 1860, celle de lait en poudre commença plus tardivement (industrie laitière). Les essais de dessiccation de lait entier, demi-écrémé ou écrémé entrepris dans la seconde moitié du XIX*e* siècle avaient donné des produits insatisfaisants à la réhydratation. c'est au début du XX*e* siècle que l'on mit au point des procédés aptes a un usage industriel, dont les plus importants restent aujourd'hui encore l'atomisation et le séchage sur cylindres chauffants ,qui réduisent la teneur en eau du lait de 88% à 2-4% .Selon la loi sur les aliments et drogues du Canada, les poudres de lait sont des produits résultants de l'enlèvement partiel de l'eau du lait.

On répartit les poudres en trois groupes :

- La poudre de lait entier.
- la poudre de lait partiellement écrémé.
- la poudre de lait écrémé.

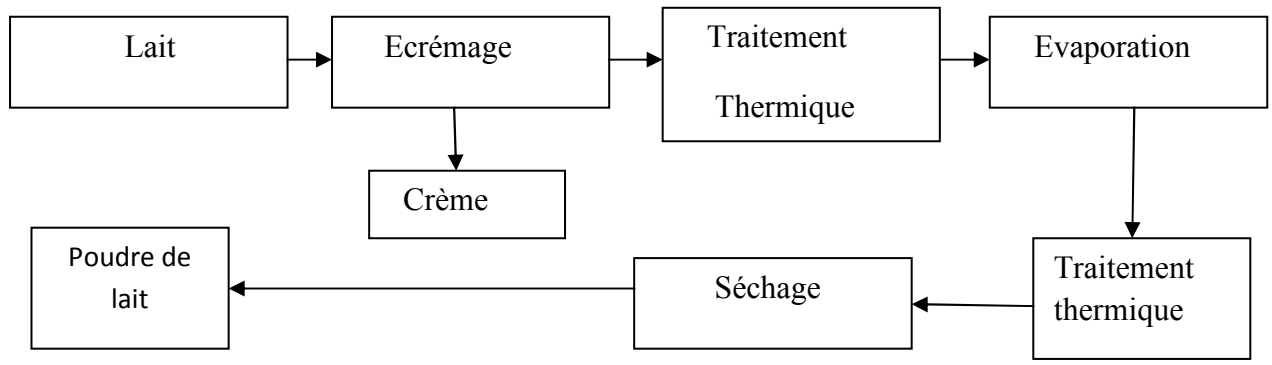


Figure I.2. : Technique de production du lait en poudre **41]**

H. Lait de consommation

L'industrie du lait de consommation a connu un grand essor au cours de dernières décennies grâce à divers facteurs économiques et à une

productivité accrue par les progrès scientifiques et technologiques. Comme dans plusieurs autres domaines industriels, la concentration des usines a donné à des grandes entreprises où l'ordinateur et l'automatisation sont de rigueur **[42]**

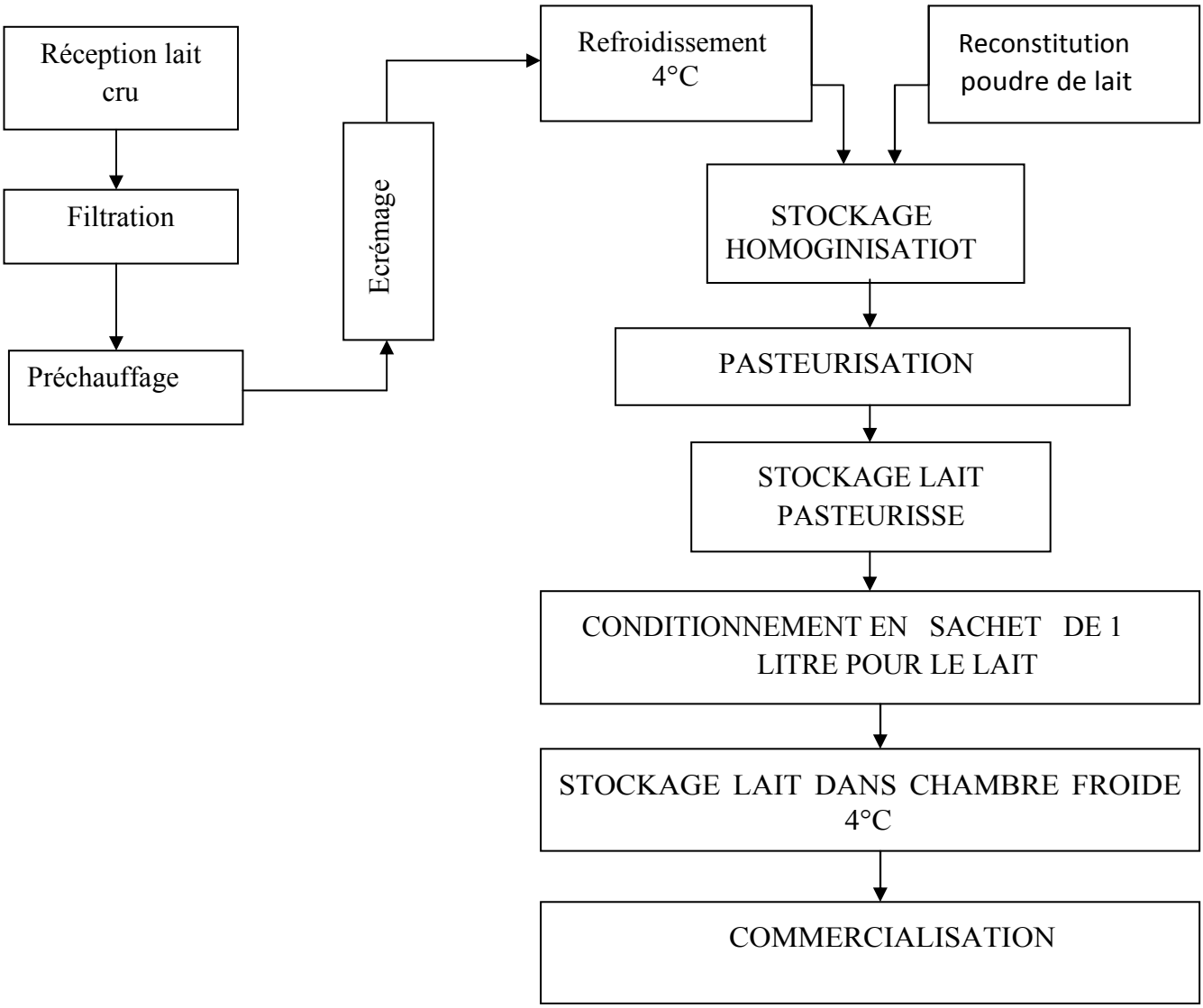


Figure I.3. Diagramme de fabrication du lait pasteurise reconstitué **[24]**

I.7. Traitement thermique de lait

I.7.1. Principales catégories de traitement thermique dans l'industrie laitière

I.7.2. Thermorésistante des bactéries et des microorganismes [43]

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

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

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

I.7.3. Procédés de traitement thermique [43]

Ces procédés ont un objectif commun, à savoir la destruction des germes pathogènes. Ils se différencient par la durée de conservation qu'ils donnent au lait, conséquence d'une destruction plus ou moins complète des autres

microorganismes. Indépendamment de l'ébullition, dont l'intérêt est incontestable, mais limité au niveau domestique, on distingue deux catégories de traitement :

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

I.7.3.1. La pasteurisation [43]

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

I.7.3.2. Les Différents types de Pasteurisation [44]

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

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

- **A. 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.

- **B. Pasteurisation rapide à haute température (High température short time ou HTST)**

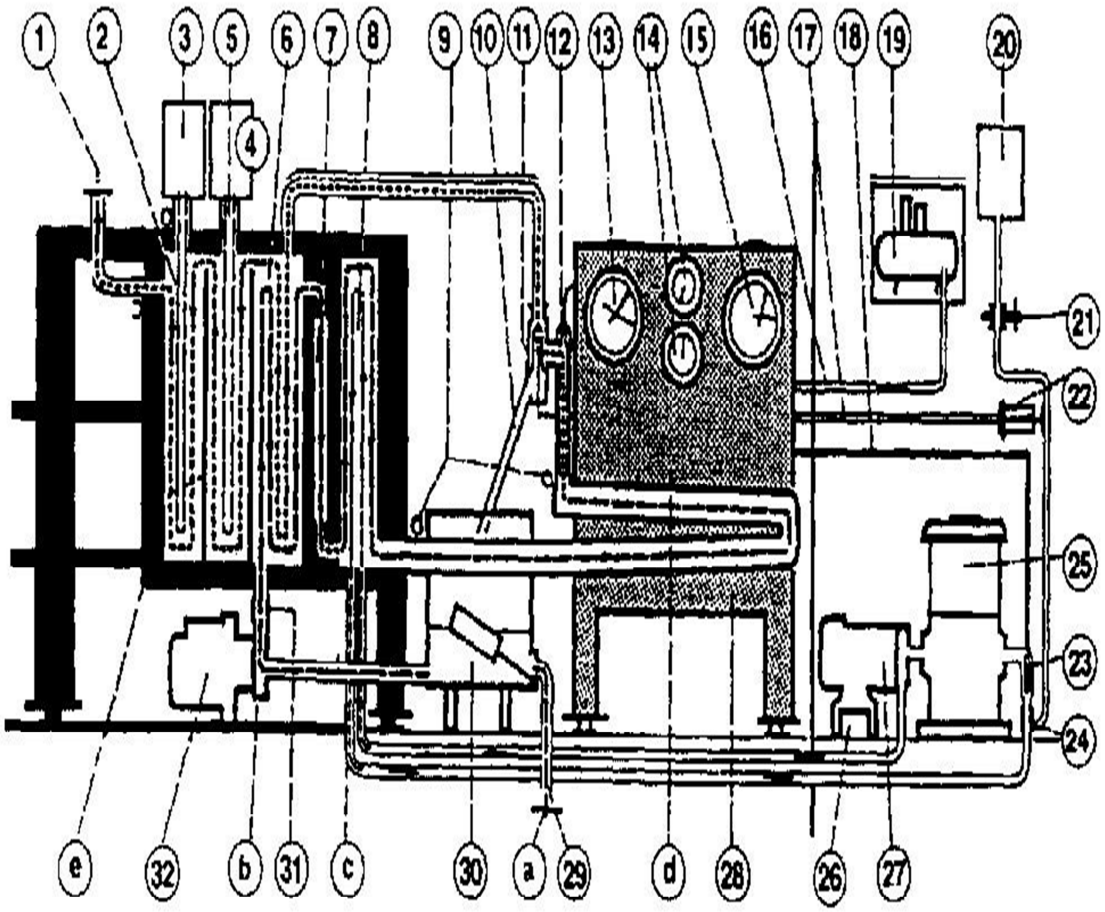
C'est un procédé continu dans lequel le lait est rapidement porté à 71°-72°C et maintenu à cette température pendant au moins 15 secondes ; il est ensuite refroidi rapidement à 10°C ou moins. Cette association de température et de temps assure une bonne marge de sécurité ; le chauffage est habituellement 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.

- **C. 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.

I.7.4. La stérilisation : [45]

La dénomination «lait stérilisé » est réservée au lait préalablement conditionné dans un emballage hermétique, puis chauffé pendant quelques minutes à une température de 115-120°C afin de détruire tous les germes susceptibles de s'y développer. Le lait est ensuite rapidement refroidi. Il se conserve à température ambiante, tant que l'emballage n'a pas été ouvert.



1 Vers l'embouteillage
2 Refroidissement à l'eau glacée
3 Eau glacée
4 Eau froide
5 Refroidissement à l'eau froide
6 Récupération
7 Filtre
8 Chauffage
9 Points de vérification de la température et du temps de chambrage
10 Canalisation de retour du lait insuffisamment chauffé
11 Vanne de déviation
12 Plongeur
13 Thermomètre enregistreur (lait chaud)
14 Contrôleur de température
15 Thermomètre enregistreur (lait froid)
16 Vers le contrôleur de température et la commande de la vanne de déviation
17 Au contrôleur de température
18 Tube capillaire reliant le plongeur au contrôleur de température
19 Compresseur d'air
20 Chaudière à vapeur
21 Détenteur de vapeur
22 Vanne à diaphragme
23 Plongeur
24 Injection de vapeur
25 Réservoir
26 Installation d'eau chaude
27 Pompe
28 Chambreur
29 Lait venant des tanks de réception
30 Réservoir à flotteur
31 Régulateur de débit
32 Pompe à lait

Schéma montrant le fonctionnement d'une installation de pasteurisation rapide avec pulvérisateur «Paraflow» (modèle APV)

a Le lait cru provenant du tank de réception est dirigé sur le bac à flotteur, assurant un niveau constant
b La pompe envoie le lait dans la section de récupération (débit réglé par un régulateur) où s'effectue l'échange de température avec le lait pasteurisé allant à la section de réfrigération
c Le lait préchauffé passe dans le filtre, puis arrive dans la section de chauffage où la température souhaitée est atteinte grâce à la circulation d'eau chaude
d L'action de la chaleur se poursuit dans le chambreur, puis le lait pasteurisé franchit la vanne de déviation (si la température de pasteurisation n'avait pas été atteinte, le lait reviendrait au réservoir à flotteur) et se refroidit en passant dans le secteur de récupération
e Le lait passe ensuite dans le secteur de réfrigération par l'eau froide, et finalement par l'action de l'eau glacée.
Le schéma indique également comment se fait le chauffage et la circulation d'eau chaude (contrôleur de température automatique fonctionnant à l'air comprimé).

Figure I.4. Schéma d'une installation de pasteurisation **[46]**

Chapitre II :

Les échangeurs de chaleur et leurs encrassements

II. Introduction

Les échangeurs de chaleur sont des systèmes thermodynamiques présents dans toutes les unités industrielles dans lesquelles interviennent les processus d'extraction de chaleur.

Ils sont utilisés dans divers industrie pour un large éventail d'application, certain de ces application peuvent être trouvées dans le secteur de chauffage, domaine de climatisation, production d'électricité, récupération de la chaleur perdue, et industrie agroalimentaire…etc .

Le domaine des échangeurs de chaleur peut être considéré comme une synthèse des domaines suivants : transferts thermique, mécanique des fluides, corrosion, encrassement.

L'encrassement dans les échangeurs thermiques a de fortes répercussions sur les performances énergétiques des installations thermiques et induit inévitablement des surcoûts notables à la fois sur des dispositifs mais surtout lors d'exploitation de ceux-ci, ces surcouts sont principalement dus à l'accroissement des consommations énergétiques, aux pertes de production et aux frais de maintenance **[47].**

II.1. Le principe de fonctionnement

Un échangeur de chaleur est un dispositif permettant de transférer de l'énergie thermique d'un fluide vers un autre, sans les mélanger. Le flux thermique traverse la surface d'échange qui sépare les fluides. La plupart du temps, on utilise cette méthode pour refroidir ou réchauffer un liquide ou un gaz qu'il est impossible ou difficile de refroidir ou chauffer directement **[48]**.

II.2. Modes de transferts thermiques [49]

Il existe trois modes essentielles de transferts de chaleur : la conduction, la convection, le rayonnement.

II.2.1. La conduction

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

II.2.2. La convection

C'est le mode de transmission de chaleur qui implique le déplacement d'un fluide, liquide ou gazeux. On le trouve dans l'échange qui a lieu entre une paroi et un fluide.

II.2.3. Le rayonnement

Le rayonnement thermique est le mode de transmission par lequel la chaleur passe d'un corps a haut température a un autre plus froid, les deux corps ne se touchent pas, mais ils séparés par un milieu transparent tel l'air, ou le vide.

II.3. Les principaux modes d'écoulement [50]

On peut distinguer trois modes d'écoulement différents :

II.3.1. 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.

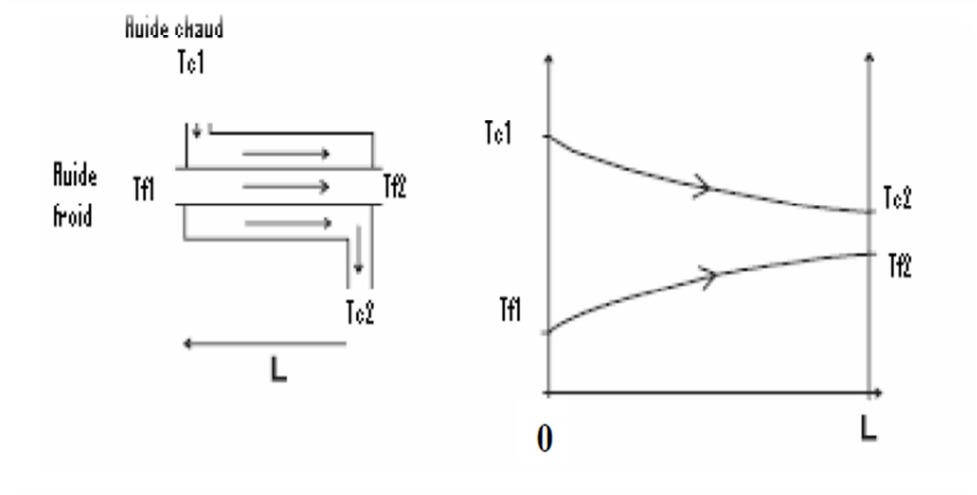


Figure II.1: Echangeur de chaleur à Co-courant **[51].**

II.3.2. Ecoulement contre courants (Ecoulement des fluides parallèles mais de sens contraires) [51]

Il s'agit d'échangeur en contre-courant ou la température de sortie du fluide froid peut dépasser 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.

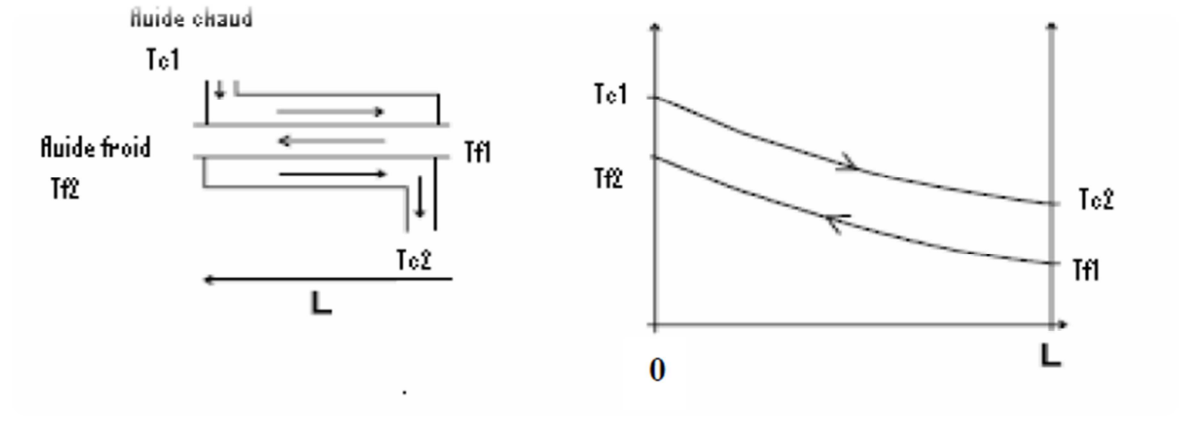


Figure II.2 : Echangeur à tube à contre-courant **[51].**

II.3.3. Ecoulement des fluides croisés avec ou sans brassage [52]

Les deux fluides s'écoulent perpendiculairement l'un à l'autre, Le fluide non brassé est canalisé: c'est celui dont la veine est divisée entre plusieurs canaux parallèle distincts et de faible section. L'autre fluide circule librement entre les 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 températures varient non seulement avec la direction de l'écoulement, mais aussi dans la section de veine.

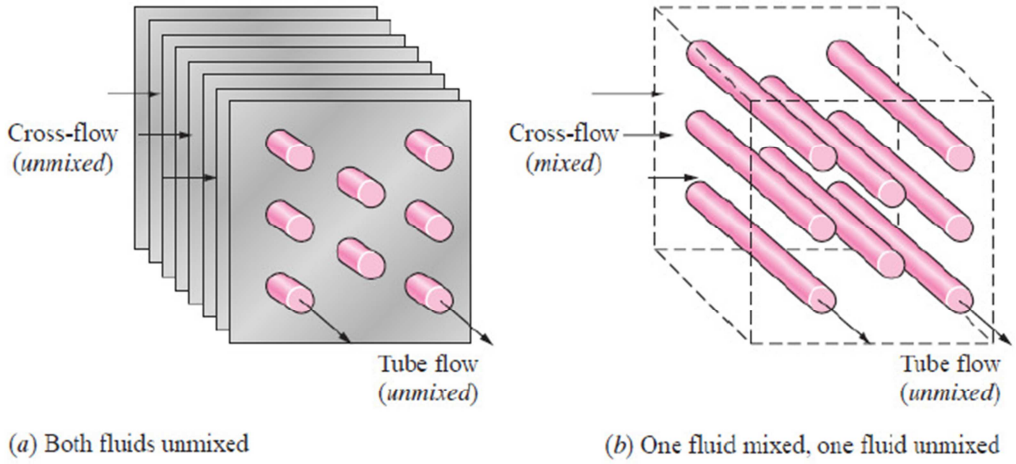


Figure II.3: Echangeur compact à courant croisé **[53].**

II.4. Classification des échangeurs [54]

Il existe plusieurs critères de classement des déférents types d'échangeurs.

II.4.1. Suivants le type technologie

Les principaux types d'échangeurs rencontrés sont les suivants :

à tubes : monotubes, coaxiaux, ou multibulaire.

à plaque : à surface primaire ou à surface secondaire

autre type : contact direct, à caloducs ou à lit fluide

II.4.2. Suivant le mode transfert de chaleur

Les trois modes de transfert de chaleur (conduction, convection, et rayonnement) sont couplés dans la plupart des applications. Comme exemple nous avans les cas suivants :

- Chambre de combustion.
- Récupération sur les fumés.

II.4.3. Suivant le mode de fonctionnement

Le passage des fluides dans l'échangeur peut s'effectuer avec ou sans changement de phase, Suivant le cas, on dit a un écoulement monophasique ou diphasique. On rencontre alors les différents cas suivant :

- Les deux fluides ont un écoulement monophasique.
- Un seul fluide a un écoulement avec changement de phase, cas des évaporateurs ou des condenseurs.

II.4.4. Suivant la compacité de l'échangeur

La compacité est définie par le rapport de l'air de la surface d'échange au volume de l'échangeur. Un échangeur est considéré comme compact si sa compacité à 700 m^2/m^3

Cette valeur est susceptible de varier de 500 à 800 m^2/m^3

II.4.5. Suivant la nature du matériau de la paroi d'échange

On trouve deux types :

-les échanges métalliques en acier, cuivre, aluminium ou matériaux spéciaux , superalliages , métaux au alliages réfractaires.

-Les échanges non métalliques en plastiques, céramique graphite et verre.

II.4.6. Suivant les écoulements

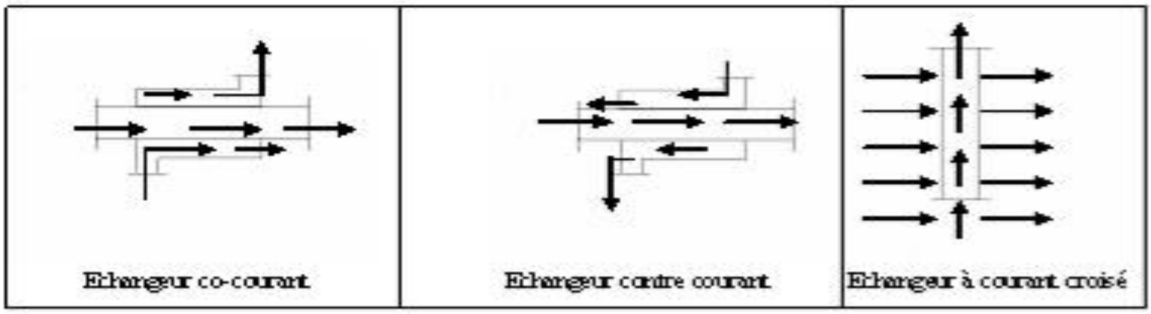


Figure. II.4: différent modes de circulation **[55].**

II.4.7. Suivant le Type de contact [55]

Echangeurs à contact direct : Le type le plus simple comprend un récipient ou canalisation dans lequel les deux fluides sont directement mélangés et atteignent la même température finale.

Echangeurs à contact indirect : les deux fluides s'écoulent dans des espaces séparés par une paroi.

II.5. Les différents types d'échangeurs de chaleur [56]

II.5.1. Echangeurs tubulaires

Les échangeurs utilisant les tubes comme constituant principal de la paroi d'échange sont les plus répandus. On peut distinguer trois catégories suivant le nombre de tubes et leur arrangement, toujours réalisés pour avoir la meilleure efficacité possible pour une utilisation donnée :

II.5.1.1. 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

II.5.1.2. 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.

II.5.1.3. Echangeur multitubulaire [55]

Existant sous quatre formes :

• Échangeur à tubes séparés (figureII.5.c): à l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant se Trouvent placés plusieurs tubes de petit diamètre maintenus écartés par des entretoises.

L'échangeur peut être soit rectiligne, soit enroulé.

• Échangeur à tubes rapprochés (figureII.5d) : pour maintenir les tubes et obtenir un passage Suffisant pour le fluide extérieur au tube, on place un ruban enroulé en spirale autour de Certains d'entre eux. Les tubes s'appuient les uns sur les autres par l'intermédiaire des rubans.

• Échangeur à tubes ailettes (figureII.5e): ces tubes permettent d'améliorer le coefficient d'échange thermique.

•Échangeur à tubes et calandre (figureII.5f): c'est l'échangeur actuellement le plus répandu.

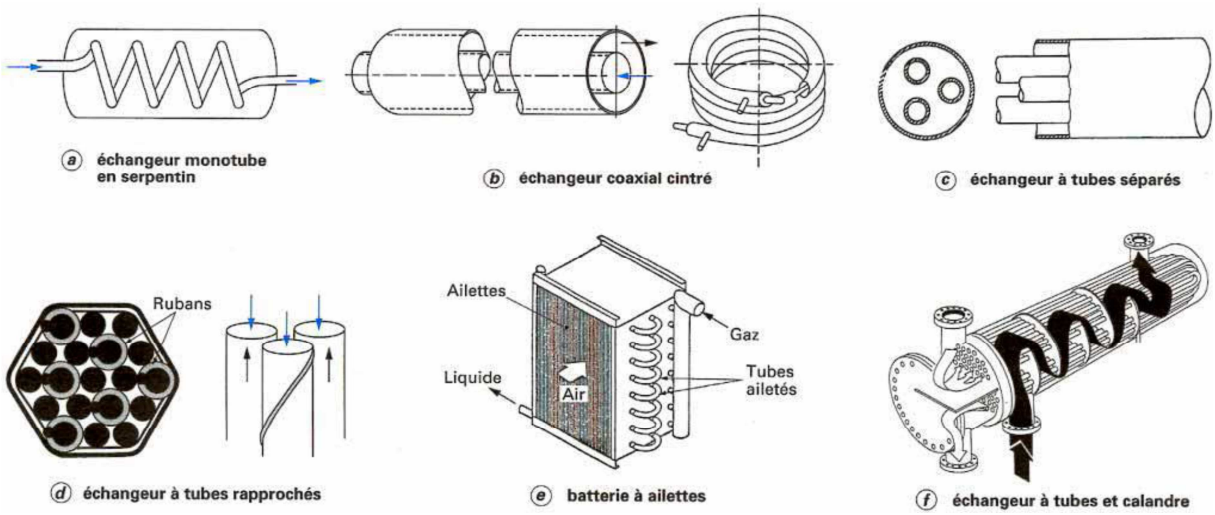


Figure.II.5: Différents types d'échangeurs tubulaires **[55].**

(Figure (a) : échangeur monotube en serpentions)

II.5.2. Echangeurs à plaques [57-58]

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.

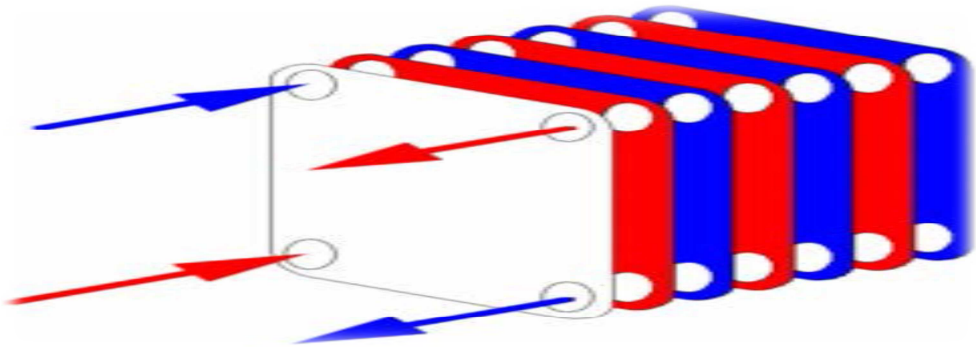


Figure II.6: schéma d'un échangeur à plaques **[59].**

II.5.2.1. Echangeurs à surface primaire

Les échangeurs à surface primaire sont constitués de plaques corruguées , nervurées ou picotées. Le dessin du profil de plaques peut être assez varié mais il a toujours un double rôle d'intensification du transfert de chaleur et de tenue à la pression par multiplication des points de contact **[60].**

II.5.2.2. Echangeurs à plaques soudées ou brasées [61]

Ils sont utilisés en récupération de chaleur, dans les domaines de la chimie, de la pétrochimie, de l'agroalimentaire, etc.

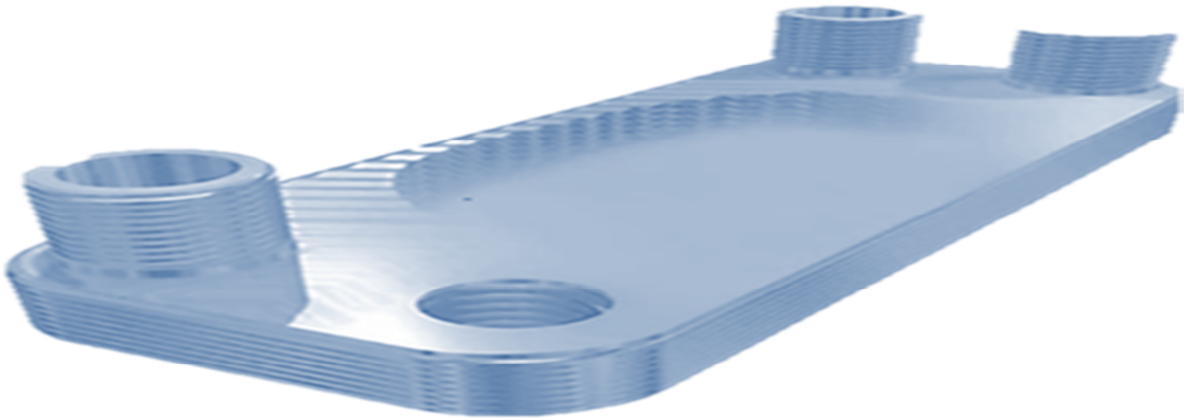


Figure.II.7 : Echangeur brasé **[61].**

II.5.2.3. Echangeurs à plaques et joints

La surface d'échange est alors composée de plaques métalliques, équipées de joints, serrées les unes Contre les autres à l'aide de tirants entre deux flasques, l'un fixe, l'autre mobile **[60**

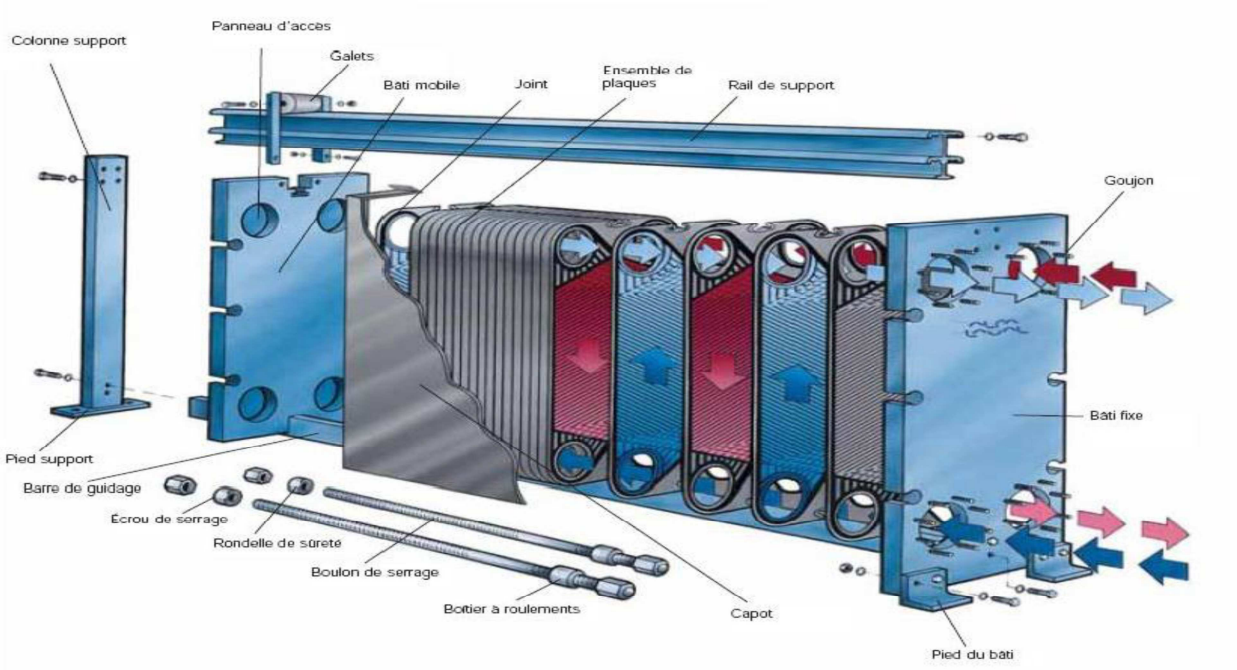


Figure.II.8: Echangeur à plaque et joint **[60].**

II.6. Avantages et inconvénients de l'échangeur à plaques [62]

II.6.1. Avantage

- ✓ Simple et faible.
- ✓ grande durée de vie et pratiquement pas de panne.
- ✓ absence de pièces en mouvement, sécurité de fonctionnement.
- ✓ peu de maintenance nécessaire.
- ✓ faible risque de contamination de l'air frais en cas de bonne conception.
- ✓ exécution en divers matériaux et nombreuses combinaisons possibles.

II.6.2. Inconvénients

- ✓ Ne peut pas être utilisé pour des fluides très visqueux ou des fluides contenant Des particules solides à cause du faible espace entre les plaques.
- ✓ Domaine de température relativement faible même si certain échangeurs à

  Plaques peuvent aller jusque au 300 C°.

II.7. Méthodes de dimensionnement [63]

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

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

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

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

Cette valeur haute correspondant, la plupart du temps, à une capacité de pompage existante et donc à ne pas dé passer (Pour la détermination des pertes

de charge par le calcul du facteur de friction, le lecteur pourra se reporter aux ouvrages).

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

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

II.7.1. Coefficient d'échange global et partiel [64]

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

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

$$P = U \times S(T_c - T_f) = \frac{T_c - T_f}{R_{global}}$$

Les valeurs des résistances d'encrassement. En général, l'encrassement des échangeurs de chaleur est défini comme le dépôt de matériaux ou de substances non désirées sur les surfaces d'échanges. Ce dépôt peut être constitué

de cristaux, de sédiments, de résidus biologiques, de produits d'une réaction chimique ou bien encore être la combinaison de plusieurs de ces éléments.

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

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

Leur prise en compte dans le calcul du coefficient d'échange global permet de simuler le fonctionnement de l'échangeur en conditions dégradées (avec une résistance d'encrassement suite à un nombre d'heures de fonctionnement) et permet de faire un surdimensionnement « justifié » due à une potentielle future baisse de performance.

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

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

$$R_{global} = \frac{1}{U \times S} = \sum R_i$$

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

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

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

$$R_{global} = R_{convevtion\ n_{ext}} + R_{encrassemen\ t_{ext}} + R_{conduction} + R_{encrassemen\ t_{int}} + R_{convectio\ n_{int}}$$

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

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

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_c} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_f}$$

II.7.2. Critères de performance d'un échangeur [65]

Il existe plusieurs critères de performance d'un échangeur :

- L'efficacité d'un échangeur est un critère de performance important.
- Le coefficient d'échange global U est aussi un des plus utilisé. Plus ce dernier est important, plus l'échangeur est performant. Il faut néanmoins que les pertes de charge soient les plus faibles possibles (mais suffisante afin d'assurer une bonne distribution des fluides) mais soient totalement dépendantes du design de l'échangeur.

Enfin, le critère de compacité est aussi important car il est défini par le rapport de l'aire de la surface d'échange au volume de l'échangeur. propose qu'un échangeur soit considéré comme compact si sa compacité (rapport de la surface d'échange sur le volume de l'échangeur) est supérieure à 700 m²/m3 ; cette valeur est susceptible de varier de 500 à 800 m^2/m^3.

II.7.3. Echangeurs de chaleur et déflecteurs

II.7.3.1. Echangeurs de chaleur [66]

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

Pour cela, NORMAG **[66]** propose à l'utilisateur une large gamme d'échangeurs de chaleur pour les différentes applications, pour résoudre de façon optimale le problème respectif. Les échangeurs de chaleur à serpentin, à faisceau tubulaire et les évaporateurs à couche mince représentés sur les figures jointes sont des exemples de la multitude d'appareils proposés.



Échangeur de chaleur à serpentin HC…-P | Échangeur de chaleur à faisceau tubulaire | Évaporateur à couche mince HTF…H

Figure II .10. Type d'échangeurs de chaleurs [66].

II.7.3.2. Déflecteurs ou plaque de protection du faisceau [67]

Pour éviter ou du moins minimiser l'érosion de tube du faisceau, des déflecteurs de protection (figureII.11) peuvent être installés faces aux tubulures d'entrée du fluide côté calandre, l'obligation de leur mise en place est définie dans les standards (TEMA) en fonction de la nature, de l'état du fluide et du produit ρu^2 (ρ : masse volumique, u vitesse du fluide) Ces déflecteurs, d'une épaisseur de l'ordre de 1/2in, sont circulaires, carrés ou rectangulaires, soudés sur des tirants ou entretoise.

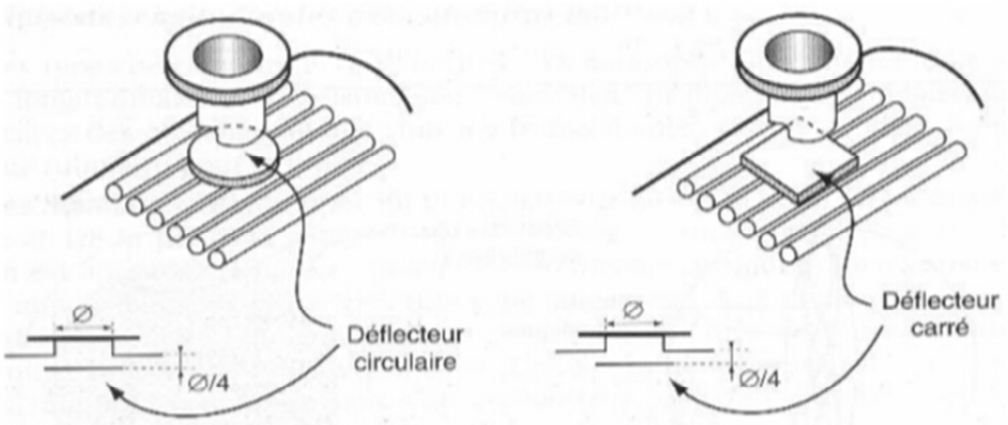


Figure II.11: déflecteur ou Plaque de protection du faisceau [67].

II.8. Encrassement

II.8.1. Introduction

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

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

L'encrassement sur la surface des échangeurs de chaleur est un problème très étudié depuis quelques années De nombreuses études théoriques et

expérimentales ont été faites par Différents auteurs pour comprendre les mécanismes de dépôt sur une paroi de géométrie simple ou complexe.

II.8.2. Notion sur l'encrassement des échangeurs [68]

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

- La corrosion.
- L'encrassement biologique.
- L'encrassement par réaction chimique.
- L'entartrage.
- L'encrassement particulier.

II.8.2.1. la corrosion [69]

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, Les produits qui se forment et s'accumulent sur la surface créent l'encrassement.

II.8.2.2. l'encrassement biologique [70]

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

- les bactéries dont le développement est dû à un apport nutritif de type hydrocarbures.

- les algues dont le développement est dû à la présence d'énergie solaire avec

photosynthèse.

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

II.8.2.3. L'encrassement par réaction chimique [71]

L'encrassement par réaction chimique est dû à la présence d'une réaction chimique au voisinage d'une surface d'échange Les produits solides ainsi

Formés s'y déposent. Il s'agit le plus souvent d'une réaction de polymérisation qui implique la formation d'un dépôt de haut poids moléculaire. Les vitesses de telles réactions chimiques dépendent fortement de la température, de la pression, de la concentration et de la présence d'éléments catalyseurs. Toutefois, la vitesse globale du mécanisme de dépôt dépend aussi de la dynamique des phénomènes de surface et de transfert. Il est rencontré dans les industries alimentaires, nucléaire et dans les procédés de raffinage du pétrole.

II.8.2.4. L'entartrage [72]

L'entartrage d'une surface d'échange est généralement associé à la production d'un solide cristallin à partir d'une solution liquide Il dépend donc fortement de la composition des eaux industrielles. L'entartrage se matérialise par une formation d'incrustations adhérentes et dures sur les surfaces d'échanges généralement métalliques.

Il est produit principalement par la dissipation des sels inorganiques dans le processus d'écoulement présente une super saturation durant l'échauffement ou le refroidissement Pour qu'il y ait entartrage, deux conditions doivent être remplies :

- la limite de solubilité du sel contenu dans l'eau doit être dépassée ;

- la vitesse de dépôt doit être suffisamment rapide.

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

II.8.2.5. L'encrassement particulaire [73]

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.8.3. les processus fondamentaux de l'encrassement [74]

Les auteures s'accordent en général pour considérer cinq phases dans l'apparition et le développement de l'encrassement, ces cinq phases peuvent se présentent comme suite :

II.8.3.1. Initiation

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

II.8.3.2. Transfert de particule à la paroi

Il peut être contrôlé par la diffusion turbulente, l'impact inertielle ou un champ de forces extérieures (thermique, électrique, etc) ces mécanisme peuvent coexister.

II.8.3.3. Adhésion des particules

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

II.8.3.4. Réentrainement des particules déposées

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

II.8.3.5. Vieillissement du dépôt

Le vieillissement du dépôt est le changement de texture du dépôt d'origine chimique ou cristalline. On peut alors observer sa consolidation, soit son écaillage.

II.8.4. Encrassement par le lait [75]

II.8.4.1. Introduction

Afin d'obtenir un produit final de bonne qualité microbiologique avec une longue durée de conservation, le traitement thermique du lait et de ses dérivés est une opération importante dans l'industrie laitière. Le procédé de pasteurisation est un exemple typique du traitement thermique du lait.

Depuis quelques décennies, les échangeurs de chaleur à plaques sont de plus en plus répandus dans divers domaines industriels tels que l'industrie chimique, pharmaceutique et alimentaire. Ils offrent d'excellentes

caractéristiques de transfert de chaleur qui permettent un design d'installations plus compact qu'avec les échangeurs de chaleur tubulaires.

Le problème majeur rencontré dans les unités industrielles utilisant les échangeurs de chaleur est le phénomène d'encrassement. L'effet néfaste de ce phénomène apparait dans la réduction des performances thermiques de l'équipement et l'augmentation des pertes de charge. Ce phénomène est, généralement, dû à la présence simultanée de plusieurs mécanismes physiques et chimiques. Des cycles de nettoyage réguliers sont alors nécessaires, engendrant ainsi des pertes en termes de capital, d'énergie, de temps de maintenance et de production.

Un grand nombre d'investigations ont été faites pour mieux comprendre le mécanisme d'encrassement par le lait. 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.

L'approche numérique a été largement utilisée pour étudier l'encrassement par le lait dans les échangeurs de chaleur à plaques.

II.8.4.2. Modèle et mécanisme d'encrassement par le lait [76]

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

Le paramètre important dans le processus d'encrassement est la formation d'un dépôt de protéine de β-lactoglobuline (βlg). est basée sur la modélisation des réactions chimiques et microbiologiques.

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

II.8.4.3. Encrassement par cristallisation [61]

Le deuxième type de encrassement et qui ne peut pas être négligé, est celui des sels et plus particulièrement le phosphate de calcium car il possède une solubilité inverse par rapport à la température, c'est _à dire un gradient négatif de solubilité. Lors d'un préchauffage, le produit ionique dépasse la concentration limite de solubilité dans le lait. Les sels sédimentent sous forme cristalline et se déposent sur la paroi. Des travaux ont démontré qu'un encrassement peut avoir lieu avec une solution sursaturé en phosphate de calcium suite à une augmentation de température au-delà de 90°. Le produit de solubilité de phosphate de calcium est rapidement dépassé quand la température augmente, ce qui engendre un dépôt qui est fonction de sursaturation.

Chapitre III :

Modélisation et simulation de l’encrassement

III. Introduction

Le phénomène de l'encrassement dans l'industrie agroalimentaire est d'une importance primordiale car en plus de détérioration des équipements, l'encrassement affecte aussi la qualité bactériologique du produit final, cette étude est une contribution de la modélisation de l'encrassement par le lait dans un canal d'échangeur de chaleur a plaques.

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.

Nous avans établis les équations de conservation et les conditions applicables pour la résolution numériques. En général, ces équations sont : l'équation de continuité qui traduit le principe de conservation de masse, les équations de Navier- Stokes qui traduisent le principe de conservation de la quantité de mouvement et l'équation de l'énergie qui représente le principe de conservation de l'énergie.

Le modèle d'encrassement considéré sera basé sur les différents phénomènes massiques, implicitement, et thermiques intervenant lors du traitement thermique du lait, Ce modèle est valable pour le domaine de l'expérience considérée. La simulation du modèle proposé est effectuée à l'aide d'un programme sous Ansys **[77]**

III.1. Description du système [77]

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

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

Le lait provenant des réservoirs de préchauffage, entre dans un premier ensemble d'échangeurs à plaques pour récupérer la chaleur du lait sortant. Le lait, pénètre ensuit dans l'échangeur 2 ou il subit une opération de chauffage par la vapeur d'eau à la sortie de celui-ci, il parcoure, pendant 15 secondes, un tube à la température de 90°C pour subir l'opération dite de chambrage, enfin le lait aborde, respectivement l'échangeur 1 afin de chauffer le lait entrant puis l'échangeur 3 (échangeur de refroidissement).

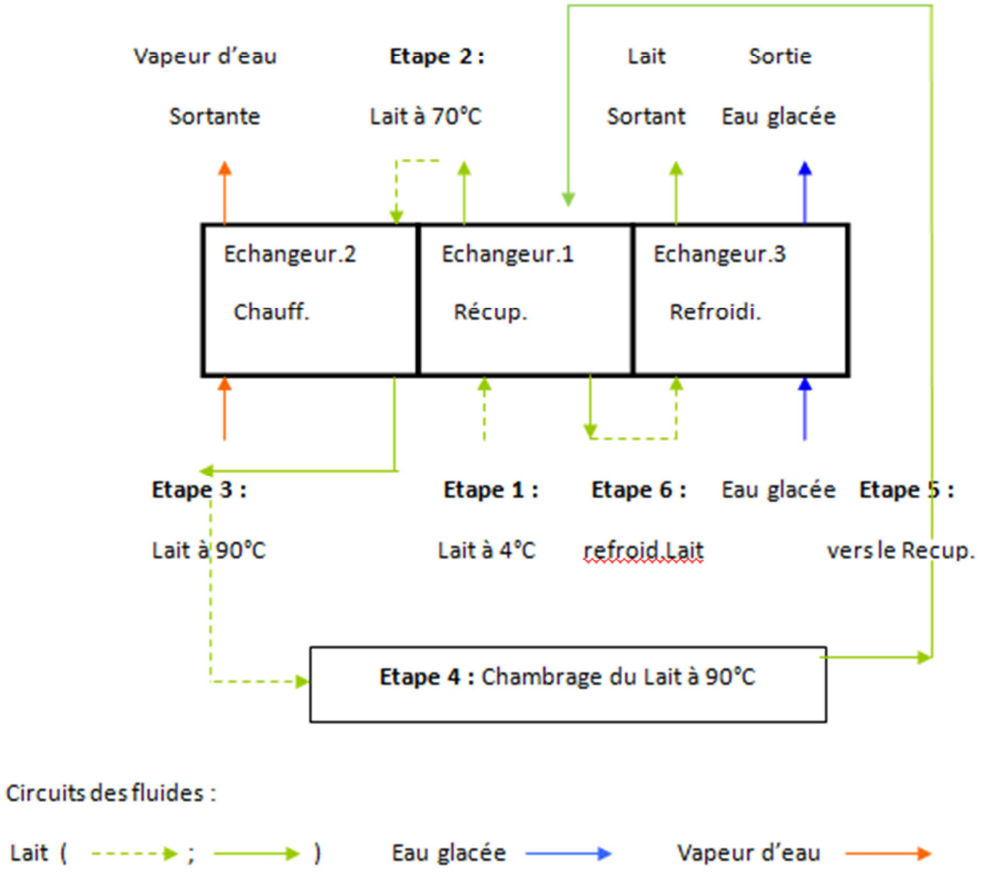


Figure III .1: Cycle de Pasteurisation du Lait **[77].**

III.2. Le cycle de vapeur [78]

La vapeur d'eau entre à une pression de 6 bars, passe par un détendeur avant d'être mélangée avec l'eau chaude sortante de l'échangeur à une

température de 115 °C et une pression de4, 6- 5,2 bars, pour être de nouveau injectée dans échangeur à une température de 128 °C.

II.3. Modèle thermique de l'échangeur à plaques [77]

III.3.1. Introduction [77]

Lois du 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.

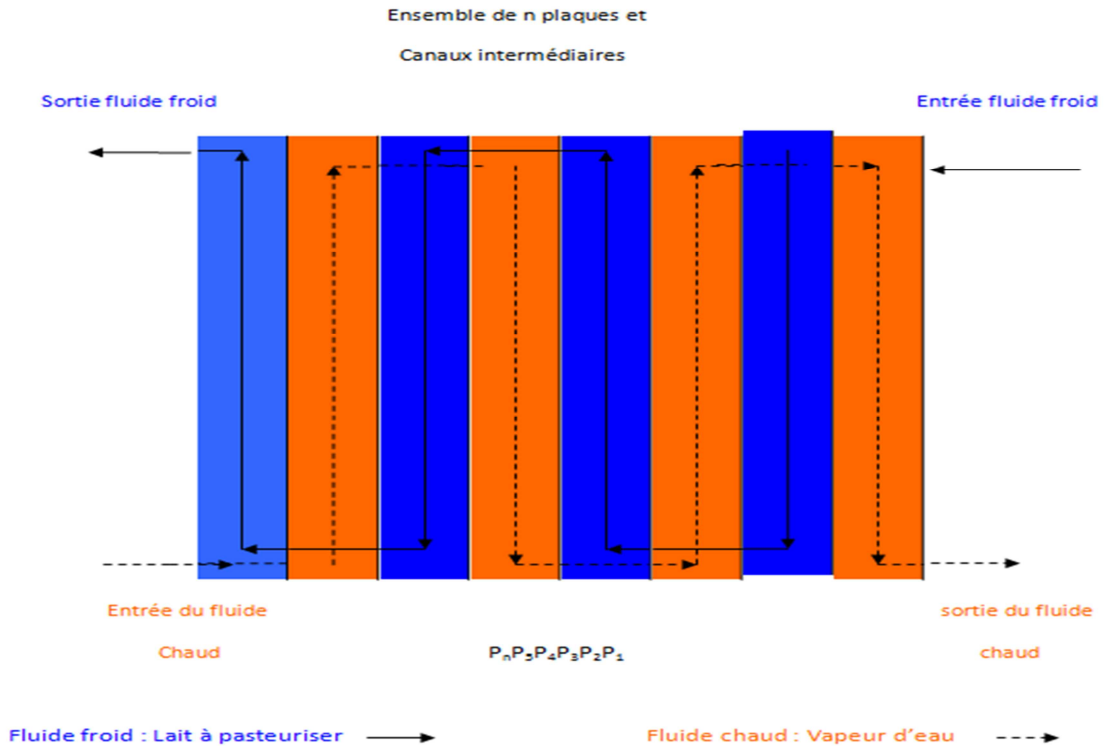


Figure III .2: Arrangement des plaques de l'échangeur de pasteurisation et sens de circulation des fluides **[77].**

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 [78]

III.3.2.1. Introduction [76]

Dans le but d'analyser l'effet de la température d'entrée du lait dans l'échangeur de chaleur sur la quantité du dépôt d'encrassement sur les plaques , une étude numérique , comprenant l'hydrodynamique et les transferts de chaleur et de la matière , lors de l'écoulement du lait , est réalisée. La géométrie considérée est un canal plan (entre deux plaques lisses et parallèles).

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

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

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

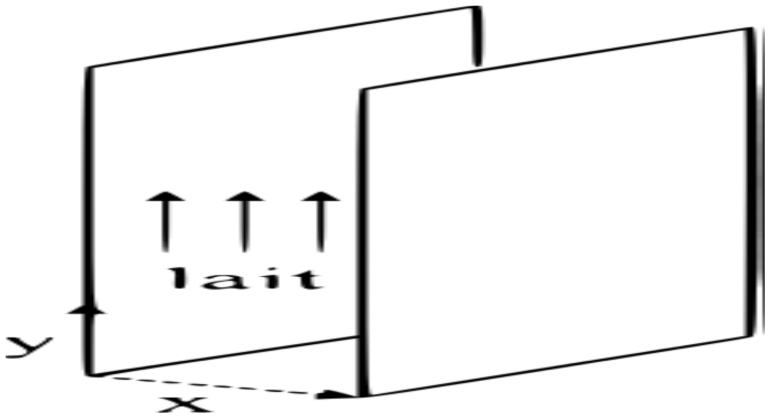


Figure III.3: Schéma descriptif du canal **[76].**

III .3.2.2. Modélisation de la turbulence dans un milieu totalement fluide [76]

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

I.3.2.2.2. Equations de conservation

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

a) Equation de conservation de la masse

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

b) Equation de conservation de la quantité de mouvement

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

c) Equation de conservation de l'énergie

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

I.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) Conditions à l'interface fluide – poreux

On décrit simultanément les écoulements et les transferts dans les deux domaines fluide et poreux. Les conditions de raccordement à l'interface sont alors vérifiées de manière implicite. Le passage du domaine fluide au milieu poreux se fait par une variation de la perméabilité et de la porosité.

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

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

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

I.3.3.Calcul du coefficient de transfert de chaleur global [76]

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

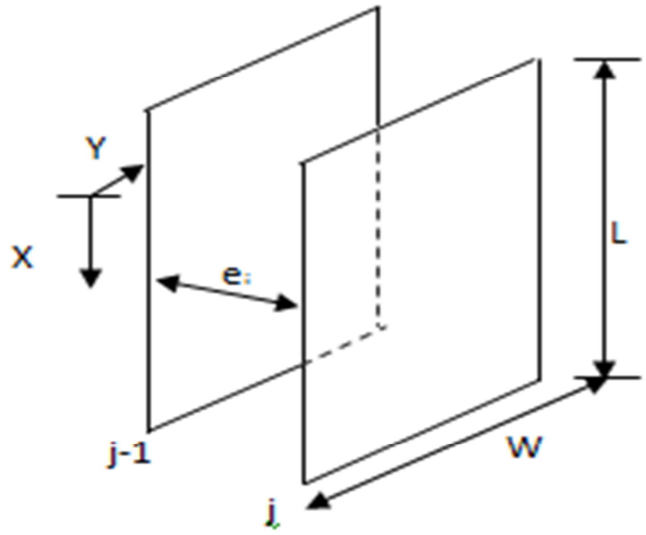


Figure III .4 : Schématisation de la direction de l'écoulement entre deux plaques **[76].**

III.3.4. Calcul des paramètres à mesurer du mélange (lait) [61]

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

$$\boldsymbol{\mu = \mu_0 (1+2.5\varphi)} \qquad \text{(III.4)}$$

Φ = (Volume des particules / Volume total) (III.5)

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

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

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

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

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

2. Chaleur spécifique : Elle est calculée avec la corrélation suivante **[76]**

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

3. Débit du mélange : Q = 4000 l/h.

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

4. Vitesse du mélange : S'écrit :

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

Avec: $A = e_j \times W$

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

5. Nombre de Reynolds :

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

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

$$\rho_f = 1033,7 - 0,2308T - 0,00246T^2 \quad \textbf{[76]}$$

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 **[61].**

Pour le transfert de chaleur en régime turbulent dans un échangeur à plaques, la corrélation suivante peut être utilisée **[61].**

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

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

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

6. Coefficients de transfert de chaleur (h_f)

Pour calculer le coefficient de transfert de chaleur côté fluide froid (h_f), la corrélation (III.9) et les équations (III.7) et (III.8) sont utilisées **[61].**

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

D'où avec l'équation (III.10): Pr = 2

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

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

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

I.3.5.Calcul des paramètres à mesurer de l'eau chaude [76]

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 **[76]**

On obtient: μ ,Cp ,ρ_c **[76]**

Avec la relation (III.11)

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

-D'où avec l'équation (III.12) et (III.10) on obtient: Reynolds et Prandtl.

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

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

III.4. Programme Ansys

III.4.1. Introduction

Depuis quelques années, l'accroissement de la puissance des ordinateurs et le développement des méthodes numériques ont permis de conduire des calculs tridimensionnels de l'écoulement dans plusieurs configurations, tout en tenant compte de l'effet de la viscosité et de la turbulence. Ce progrès a fait de la modélisation numérique de l'écoulement ou CFD (Computational Fluid Dynamic) un outil de plus en plus important pour le développement et l'optimisation du dimensionnement de différents procédés industriels.

Dans ce document on présentera deux outils de simulation numérique qui peuvent être utilisé indépendamment l'un de l'autre. Le premier est le logiciel Ansys ICEM CFD qui est utilisé pour le dessin de la géométrie et la génération du maillage. Le deuxième est le code Ansyscfx qui permet la simulation numérique de l'écoulement ; l'utilisation du pré-prossecing, la résolution et le poste-prossecing **[80].**

III.4.2. Définition d'Ansys

Ansys est un code des éléments finis d'usage général à la résolution numérique d'une large variété de problèmes physique en général et de mécanique en particulier. Ces problèmes portent notamment : analyse structurale en statique et en dynamique (linéaire et non linéaire) transfert de chaleur, dynamique des fluides, électromagnétique **[81].**

III.4.2.1. Ansys CFD

La CFD "Computational Fluid Dynamics" (ou Dynamique des Fluides Numérique), est un ensemble de méthodes numériques permettant d'obtenir une solution approximative d'un problème de dynamique des fluides et/ou de transfert thermique.Les équations qui interviennent sont celles de la mécanique des fluides, résolues par des méthodes numériques **[82].**

III.4.2.2. ANSYS CFX

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

Il est divisé en 4 modules : ICEM, CFX-pre, CFX-solver et CFX-post. Chaque module a une utilisation bien spécifique. (Fig. III.5) **[83].**

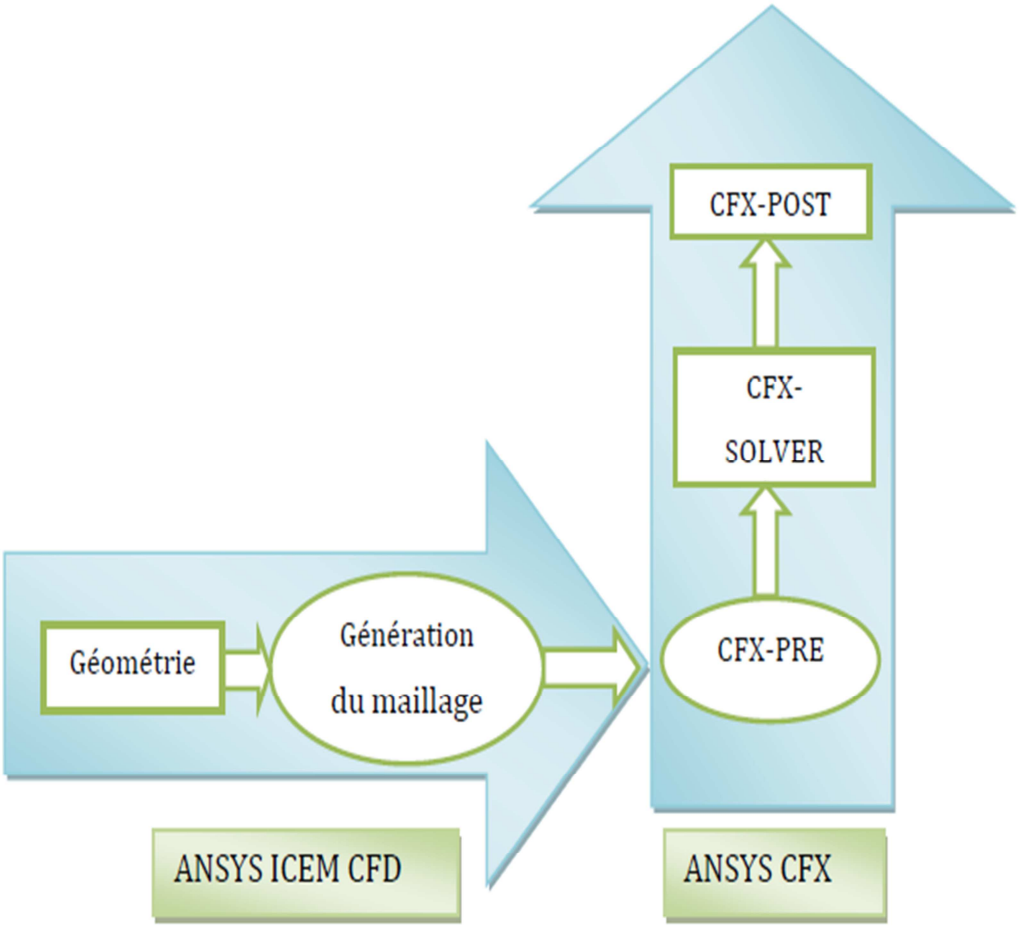


Figure III.5 : Les principaux modules des deux logiciels ANSYS ICEM & CFX **[84].**

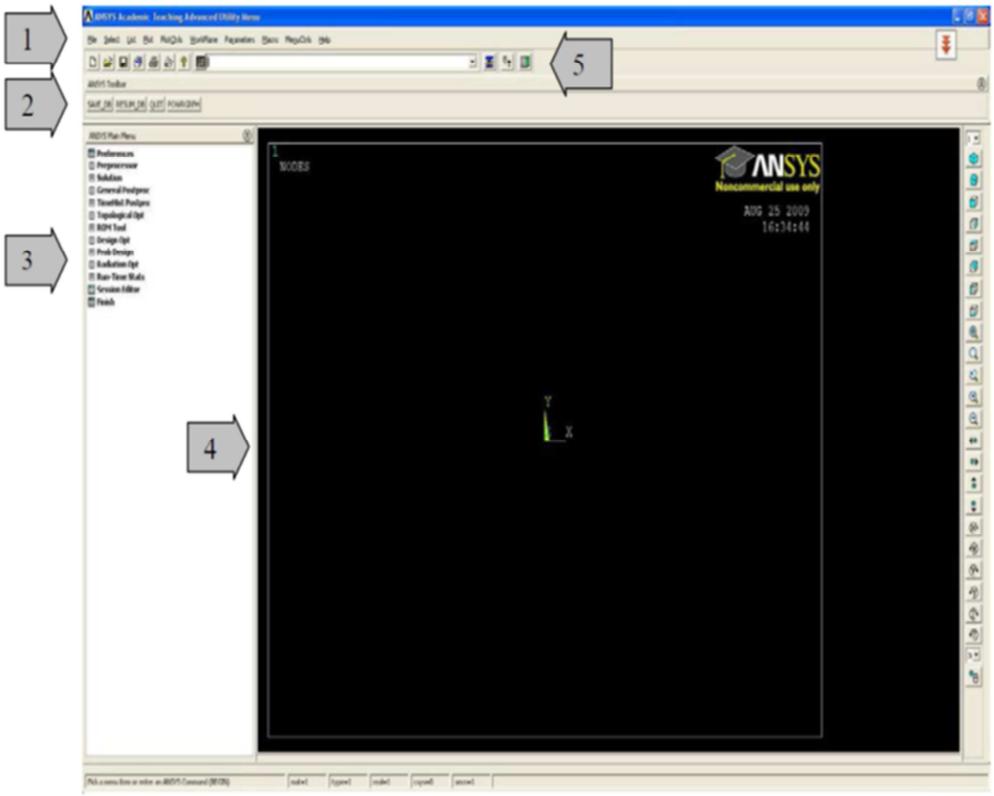


Figure III.6 : L'interface utilisateur graphique d'ANSYS **[78].**

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 **[81].**

- ✓ **Pré –processing**

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

- ✓ **La résolution**

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

Post-processing

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

III.4.3. Les points forts des outils Ansys [85]

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

Chapitre IV :

Résultats et discussion

IV.1. Introduction

Cette étude porte sur l'analyse de l'encrassement dans un échangeur de chaleur à plaques avec et sans déflecteurs avec différents types. La géométrie considérée est un canal plan, entièrement remplie par un liquide ayant un fort pouvoir encrassant, en l'occurrence 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 de nature isolante 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 (fluide et encrassement) au cours du temps. Les parois sont chauffées à une température uniforme et constante notée T_p. Le fluide entre dans la conduite avec une vitesse notée U_e et à une température uniforme en moyenne, notée T_e. L'intensité de turbulence à l'entrée a été fixée dans le modèle de turbulence considéré. La longueur L du canal est choisie de sorte que l'écoulement soit dynamiquement et thermiquement établi dans la section de sortie pour les nombres de Reynolds considérés.

Le modèle physique choisi ainsi que le système de coordonnées utilisé est représenté sur les Figures **IV.1** et **IV.2** (sans et avec déflecteurs). La longueur et la hauteur du canal sont respectivement L et H. Vu la géométrie du problème, le système de cordonnées est cartésien (X, Y).

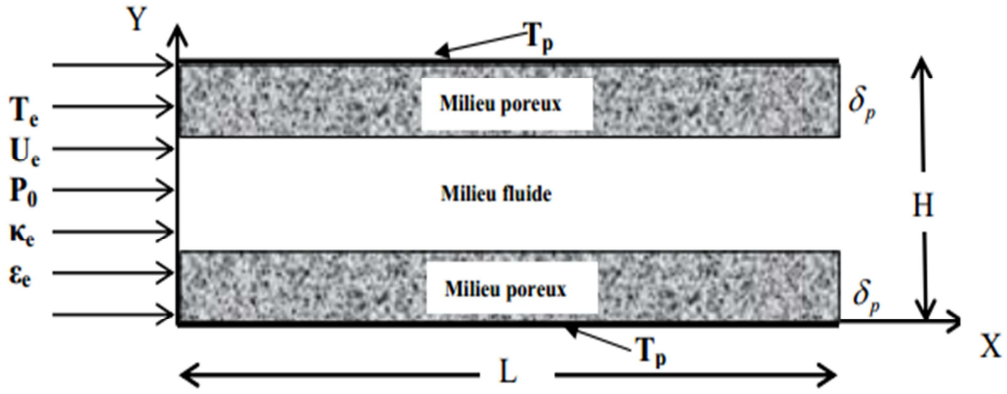


Figure IV.1: Ecoulement dans un canal à section rectangulaire.

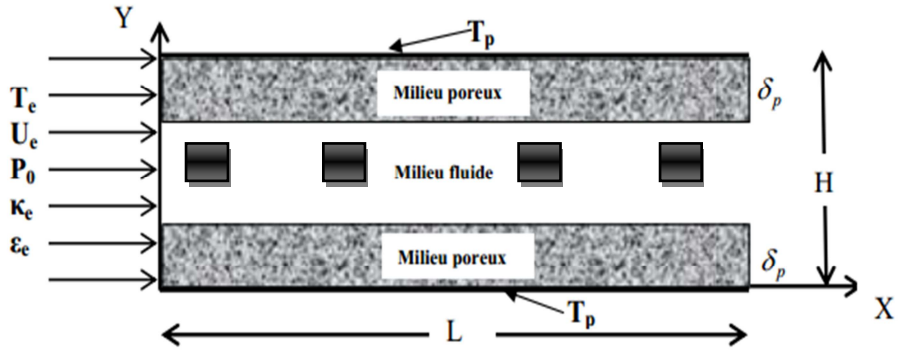


Figure IV.2 : Ecoulement dans un canal à section rectangulaire avec la présence de déflecteurs.

IV.2. Les profils dans un milieu complètement fluide avec la présence d'un déflecteur coté lait sans encrassement

IV.2.1. Profil de température

L'évolution de la température en fonction de la largeur du canal est représentée sur la Figure IV.3 et ce pour différentes positions dans le canal (y). On observe une augmentation de la température due à l'échange thermique en présence d'un déflecteur.

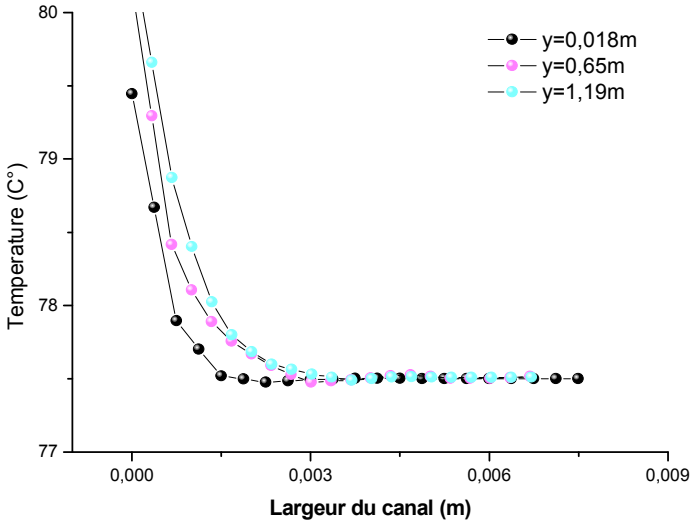


Figure IV.3. : La variation de la température dans le lait.

IV.2.2. Profil de la vitesse

L'évolution du profil de la vitesse en fonction de la largeur du canal est représentée sur la Figure IV.4 et ce pour différentes positions 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.

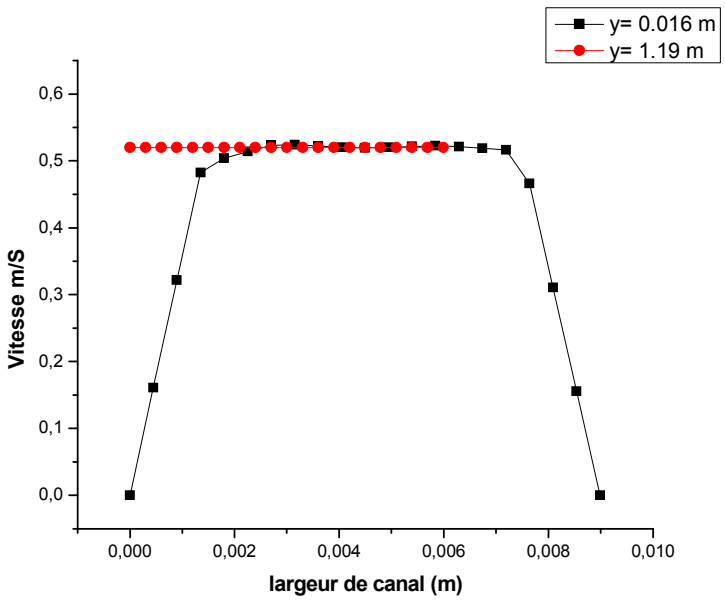


Figure IV .4 : La variation de profil de vitesse

IV.3. Les profils dans un milieu fluide avec encrassement avec la présence d'un déflecteur coté lait

IV.3.1. Profil de la température

L'évolution du profil de la température en fonction de la largeur du canal en présence de l'encrassement est représentée sur la Figure IV.5 et ce pour différentes positions dans le canal (y). La présence du déflecteur donne une turbulence supplémentaire donc un meilleur échange thermique.

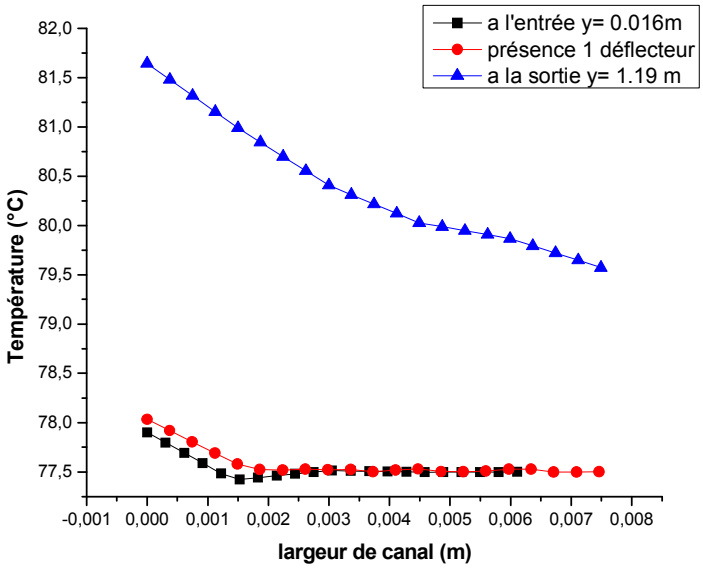


Figure IV.5 : La variation de la température.

IV.3.2. Le profil de vitesse

L'évolution du profil de la vitesse en fonction de la largeur du canal en présence de l'encrassement est représentée sur la Figure IV.6 et ce pour différentes positions dans le canal (y). Le déflecteur joue un rôle d'obstacle d'où une chute de la vitesse à son niveau.

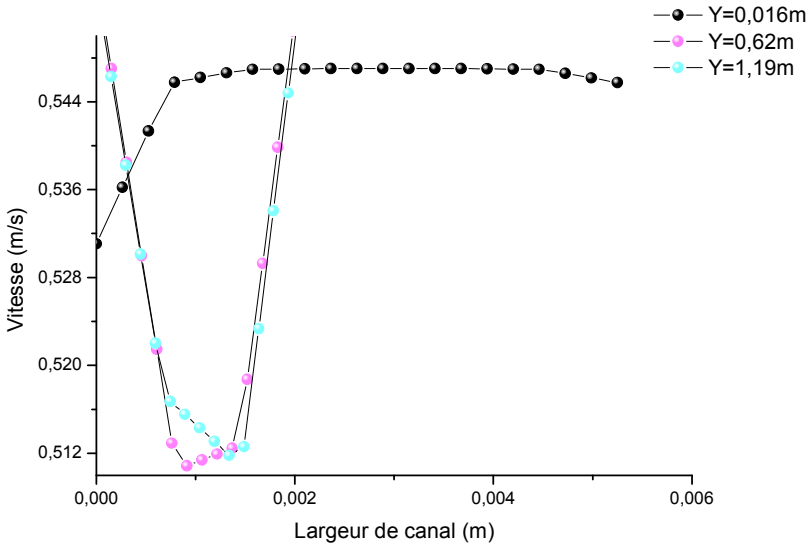


Figure IV.6. La variation du profil de vitesse.

IV.4. Les profils dans un milieu fluide avec encrassement avec la présence deux déflecteurs coté lait

IV.4.1. Profil de température

L'évolution du profil de la température en fonction de la largeur du canal en présence de l'encrassement et deux déflecteurs est représentée sur la Figure IV.7 et ce pour différentes positions dans le canal (y). Il semble que la présence d'un deuxième déflecteur donne une turbulence supplémentaire donc un meilleur échange thermique.

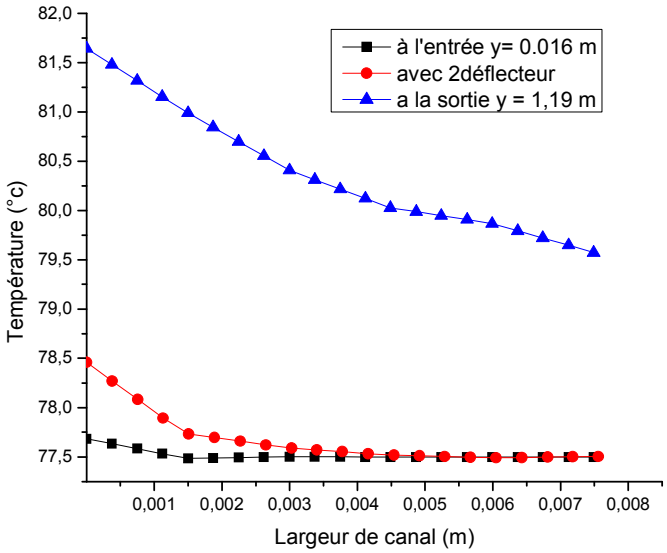


Figure IV.7. La variation de température.

IV.4.2. Profil de la vitesse

L'évolution du profil de la vitesse en fonction de la longueur du canal en présence de l'encrassement est représentée sur la Figure IV.8 et ce pour différentes positions dans le canal (y). Les déflecteurs jouent un rôle d'obstacles d'où une chute de la vitesse à leur niveau. Une augmentation de la vitesse est observée après les déflecteurs.

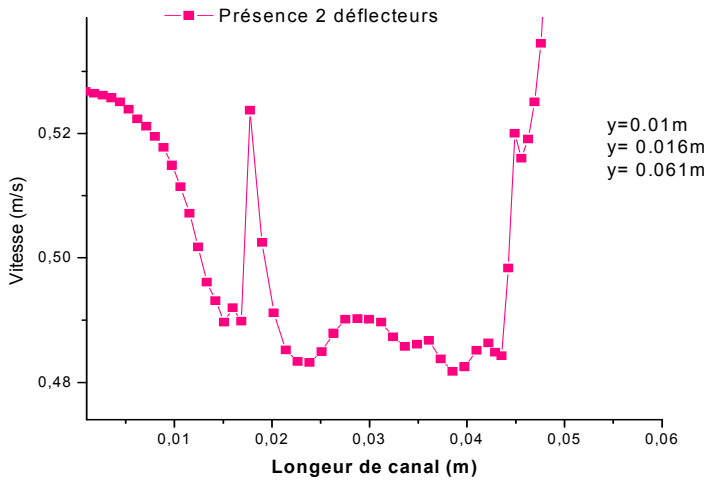


Figure IV.8 : La variation du profil de vitesse.

IV.5. Les profils dans un milieu fluide avec encrassement avec la présence de quatre déflecteurs carré coté lait

IV.5.1. Profil de température

L'évolution du profil de la température en fonction de la largeur du canal avec l'encrassement et quatre déflecteurs est représentée sur la Figure IV.9 et ce pour différentes positions dans le canal (y). Il semble que la présence de quatre déflecteurs donne une turbulence supplémentaire donc un meilleur échange thermique.

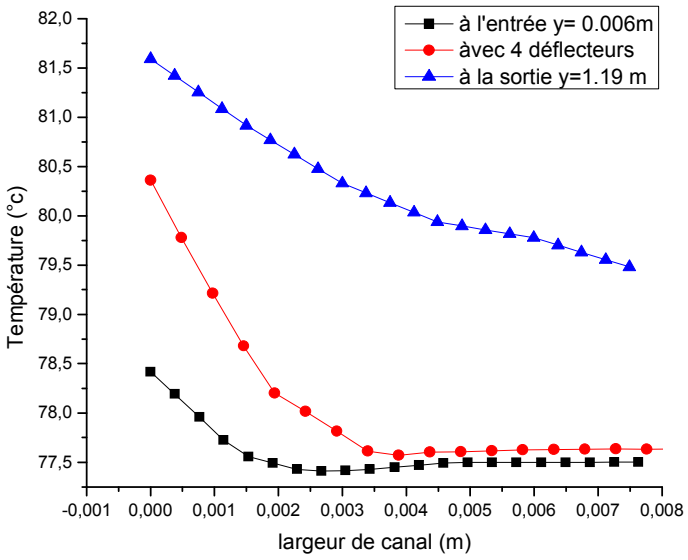


Figure IV.9 : La variation de la température.

IV.5.2. Profil de vitesse

L'évolution du profil de la vitesse en fonction de la longueur du canal en présence de l'encrassement est représentée sur la Figure IV.10et ce pour déférentes positions dans le canal (y).La même remarque est observée les déflecteurs jouent un rôle d'obstacle d'où une chute de la vitesse à leur niveau et une augmentation de la vitesse est observé après les déflecteurs.

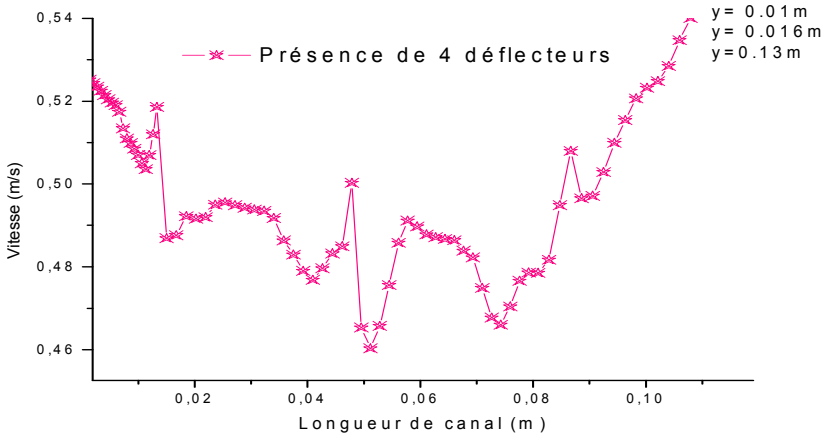


Figure IV.10 : La variation du profil de la vitesse.

IV.6. Les profils dans un milieu fluide avec encrassement avec la présence d'un déflecteur cercle coté lait

IV.6.1. Profil de température

L'évolution du profil de la température en fonction de la largeur du canal en présence de l'encrassement et déflecteur est représentée sur la Figure IV.11 et ce pour différentes positions dans le canal (y). Il semble que le déflecteur type cercle donne une turbulence supplémentaire donc un meilleur échange thermique.

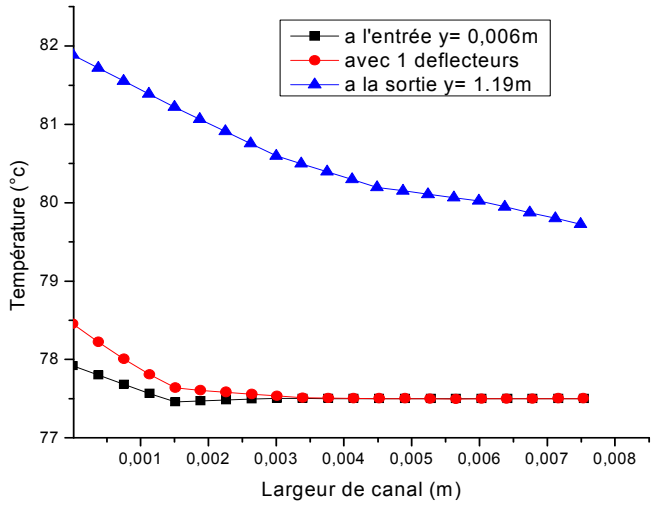


Figure IV.11 : La variation de la température.

IV.6.2. Profil de vitesse

L'évolution du profil de la vitesse en fonction de la longueur du canal en présence de l'encrassement est représentée sur la Figure IV.12 et ce pour différentes positions dans le canal (y). Le déflecteur type cercle joue un rôle d'obstacle d'où une chute de la vitesse à son niveau et une augmentation de la vitesse est observée après le déflecteur.

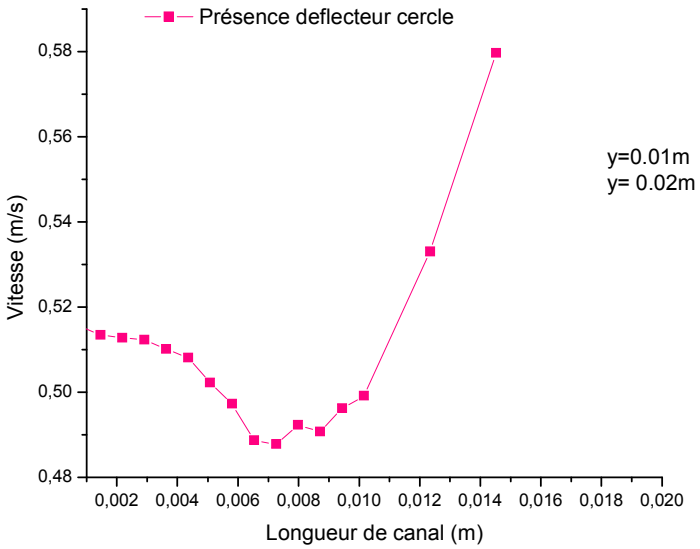


Figure IV.12 : La variation du profil de la vitesse

IV.7. Etude comparative entre milieu fluide avec encrassement avec la présence de plusieurs déflecteurs coté lait :

IV.7.1. Profil de température

La figure IV.13 présente la variation du profil de température en fonction de largeur de canal avec encrassement et à la présence de plusieurs déflecteurs coté lait pour une position donnée. On remarque une augmentation de la température lorsque le nombre de déflecteur augmente car le déflecteur apporte une turbulence meilleure.

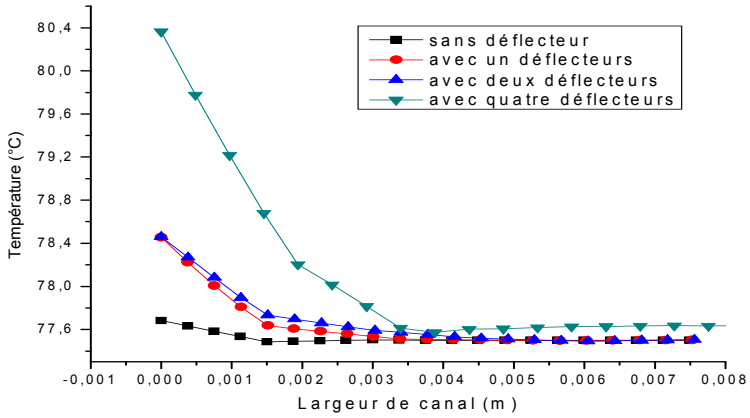


Figure IV.13 : La variation de la température.

IV.8. Etude comparative entre milieu fluide avec encrassement avec un déflecteur carrée et un déflecteur cercle coté lait :

IV.8.1. Profil de température

La figure IV.14 présente la variation du profil de température en fonction de largeur de canal avec encrassement et à la présence de déflecteur carré et cercle coté lait pour une position donnée, on remarque une meilleure augmentation de la température avec le déflecteur cercle par rapport le déflecteur carrée.

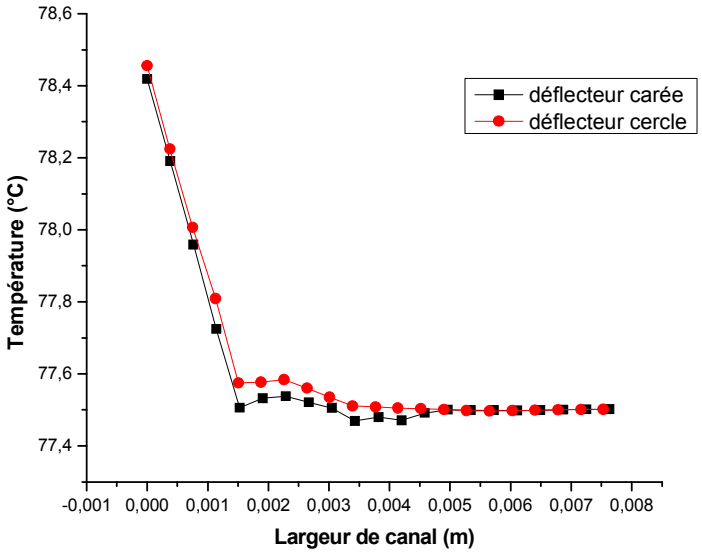


Figure IV.14 : La variation de la température

IV.9. Etude comparative entre milieu fluide avec encrassement avec quatre déflecteurs carrée et un déflecteur cercle coté lait :

IV.9.1. Profil de température

La figure IV.15 présente la variation du profil de température en fonction de largeur de canal avec encrassement avec déflecteur cercle et quatre déflecteurs carrée coté lait pour une position donnée, on remarque une meilleure augmentation de la température avec la présence de quatre déflecteurs.

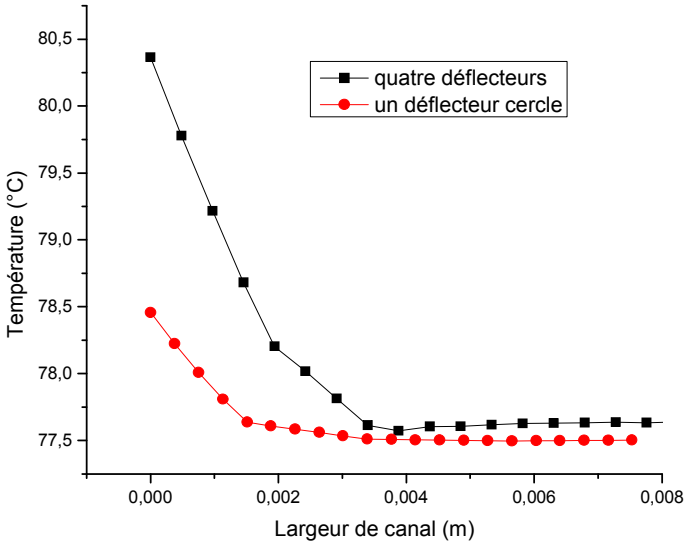


Figure IV.15 : La variation de la température

Conclusion Générale

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

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

Le modèle physique consiste en un écoulement à débit constant entre deux plaques parallèles à température imposée.

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

En général, et après l'analyses des résultats numériques de l'étude de l'encrassement avec la présence de Un Ou plusieurs déflecteurs des échangeurs de chaleur à plaques les résultats obtenus dans le cas d'un milieu poreux montrent que :

- Avec l'encrassement, le fluide est moins chauffé .
- L'existence d'un dépôt de surface réduit la diffusion thermique. Une chute importante de la température est aussi observée. Une grande quantité de chaleur reste emmagasinée dans la matrice poreuse. Le dépôt encrassant constitue une couche isolante de la chaleur.
- La vitesse de l'écoulement diminue au cours du temps.
- Avec plus de déflecteur, l'échange est meilleur.
- La forme d'un déflecteur cercle donne une meilleure turbulence par rapport à un déflecteur carrée.

[1] : https://en.oxforddictionaries.com/definition/milk[20-03-2019-23:02]

[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] : Franworth E. et Maimville 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.

[5] :http://eda.euromilk.org/fileadmin/user_upload/Public_Documents/EDA_Position_papers_Fact_Sheets/Other_Fact_Sheets/2017_Technologie_Laitiere_Serie_9.pdf [16-03-2019-14 : 22]

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

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

[8] : Goursaud J, Boudier IF, 1985. Composition et propriétés physicochimiques, lait et produits laitiers. Lavoisier, Paris - Tome 1.

[9] : Bouvier C 1993, Le lait, la nature et les hommes. Explora, Presse Pocket, Paris.

[10] : Kuzdzal S, 1987. La matière grasse - Le lait matière première de l‟‟industrie laitière. INRA.

[11] : Vignola Carole L, 2002 : Science et technologie du lait transformation du lait. Ecole Polytechnique de Montréal 2002.

[12] :Lankveld JMG, 1995 : Protein standaridized milk produits, composition and properties - IDF Brussels 70-85.

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

[14] : Eigel WN, Buther JE, Ernstrom CA et al, 1984. Nomenclature of proteins of cow‟s milk: fifth revision.

[15] : Amiot J., Fournier S., Lebeuf Y., Paquin P et Simpson R. (2002). Composition

propriétés physicochimiques, valeur nutritive, qualité technologique et techniques

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

[17] : Boyaval P., Corre C., Depuis C., et Roussel F. (1995). Effect of free fatty acid on propionic acid bacteria. Le lait. 75. P17-29.

[18] : Ramet J.P. (1985). La fromagerie et les variétés de fromages du bassin méditerranéen.

[19] : Brulé G, 1987 : Les minéraux. In Cepil (1987). Le lait matière première de l'industrie laitière. Cepil-INRA, Paris. 87-98.

[20] : Gueguen L, 1979 : Apports minéraux par le lait et les produits laitiers Cah natur.Diet ; 3 : 213 - 217.

[21] : Adrian J, 1987 : valeur alimentaire du lait. La maison rustique, Paris 85 - 95.

[22] : Kitchen B.J, Taylor G.C, White I.C 1970 : Milkenzyme. Their distribution and activity. Dairy Rec.

[23] ; Debry G ; 2001 : lait, nutrition et santé technique et documentation, lavoisier Paris.

[24] : Pointirier H . La gestion matière dans l'industrie laitière, Tec et Doc, Lavoisier, France: 64 (388 pages) (2003).

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

[26] : Jean C., et Dijon C. Au fil du lait, ISBN 2-86621-172-3 (1993).

[27] : Bordjah A, Analyse physico-chimique et microbiologie de lait UHT demi écrémé, centre

de formation professionnelle El Hidhab Sétif Algérie - BTS en contrôle de qualitédans les industries, 2011.

[28] : Vierling E , Aliment et besoin-Filière et produit, 2éme édition, doiéditeurs, centre régional de la documentation pédagogique d‟algie d‟aquitaine :page page 11, 2003.

[29] : Fredot E , Connaissance des aliments bases alimentaires et nutritionnelles de la diététique, Lavoisier :pp(10-14), 2005.

[30] : Reumont P , Licencié Kinésithérapie, http://www.medisport.be , 2009.

[31] : .Thieulin.G, Vuilaume.R, Eléments pratiques d‟analyse et d'inspection du lait de produits laitiers et des œufs-revue générale des questions laitiéres 48 avenue, Paris : pp(71-73),1967.

[32] : Rhetest M, Rhéomètre RHEOTEST® RN et viscosimètre à capillaire RHEOTEST® LK–alimentaires et aromatisants Produits , 2010.

[33] : http://www.ulb.ac.be/sciences/cudec/LaitDerives.html.

[34] : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00929530 Submitted on 1 Jan 1997.

[35] : Jean M , Christian, Le lait pasteurisé, Groupede rechercheet d'éch angestechnologiques, Paris , 2001.

[36] : Lesur R , N. Melik , Lait de consommation In LUQUEE F.M, Laits et produits

laitiers vache brebis chèvre, Paris : page 5, 1999.

[37] : H.Korib, A. Bensalah, Contribution à l'évaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique de lait cru et diagnostique de brucellose et

mammites dans la région de Tlemcen en Algérie , Ingénieur d'état en agronomie, Université Abou Bekr Belkaid , 2010

[38] : la fabrication d'un starter pour le mbannick, article, p16, Décembre 1995.

[39] : A. Pfiffner, Lait en poudre, http:www.hls-dhs-dss.ch/textes, 2009.

[40] : Loncen M.Génie industriel alimentaire, aspects fondamentaux. Masson , paris (1995).

[41] : Alais C, 1975 : Science du lait principal des techniques laitières, 3ème édition, Paris maison rustique.

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

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

[44] : 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)

[45] : JP. Merigaud, T. Lemoine, D. Aguer, JC. Gillis, F. Jouanneau, L. Koubbi, E. Lepecheur, T. Madiot, Spécification technique de l'achat public laits et produits laitiers Groupes d'étude des marches de restaurations collective et de nutrition (GEM RCN), 2009.

[46] : Le lait et les produits laitiers dans la nutrition humaine Colection FAO: Alimentation et nutrition n° 28 ISBN 92-5-20534-6Chapitre4 Laits de consommation http://www.fao.org/docrep/t4280f/T4280F0a.htm

d'analyse du lait. In : Science et technologie du lait- Transformation du lait. Presse International, Polytechnique. Canada.

[47] : Demasles H, Mercier P, Tochon P, Thonon B, Guide de l'encrassement des échangeurs de chaleur, Editions GRETH, 2007, ISBN : 2-9502555-5-8

[48] : Slimane T ; la remise en services de l'échangeur E1505 comme palliatif à l'arrêt de la colonne de stabilisation DA4501 ; projet de formation d'induction d'induction ; 2014-2015 p 52 .

[49] : Marvill C et Garrigue C ,J. Hutez ,C .Goubier, R .Vidil , Echangeures de chaleur .Poblémes de fonctionnement . Technique de l'ingénieur 1995.

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

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

[52] : Taourit F ,Etude du comportement thermique de deux écoulement du fluide dans un échangeure de chaleur (comparaison entre le cas simple el le cas avec ailettes), 2013 .

[53] : Cengel, Y. EA. Heat and mass transfer: apracticalapproach. (3e éd.).Mc Graw-Hill(2006).

[54] : Fascicule de technologie d'Ingenieur «Echangeures de chaleur : Description des échangeures » b2 341 ,5_1995

[55] : ANDRE BONTEMPS « ECHANGEUR DE CHALEUR » Université Joseph Fourier,

Institut universitaire de Technologie,Département Génie thermique et Énergie (Grenoble)

[56] : 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.

[57] : Pascal Tobaly. Echangeurs de Chaleur .2002.

[58] : Yves .Jannot. Transfert Thermique, 2003

[59] : WIKIPEDIA Echangeur de chaleur [En ligne] // Wikipédia.- 27.03.2012.

[60 : André BONTEMPS, Alain GARRIGUE, Charles GOUBIER, Jacques HUETZ, Christophe MARVILLET, Pierre MERCIER, Roland VIDIL,« Description des échangeurs », technique de l'ingénieur [B 2 341].

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

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

[63] : MARVILLET.C, MANIFICAT.A, BERRADA.N et WEBER.C (2014). E.Book TOME 1, op. cit.

[64] : BONTEMPS. A, GUARRIGUE.A, GOUBIER.C, HUETZ.J, MARVILLET.C, MERCIER.P, VIDIL.R. Echangeurs, op.cit.- H. DEMASLES, P. MERCIER, P. TOCHON, B. THONON. « Guide de l'encrassement des échangeurs de chaleur » (2007) Editions GRETH – ISBN : 2-9502555-5-8

[65] : SHAH R.K. (2003). Fundamentals of HeatExchanger Design. John Wiley& Sons.

[66] :http://www.normag-glas.de/fr/katalog_neu/prozess/FR-6-WARMEUBERTRAGER_PF-System_140930.pdf [19-03-2019-10 :30]

[67] : Sall S ; Introduction général échangeur de chaleur ; Mémoire de fin d'étude ; univtlemcen ; 2014 ; pp. 1-2.[68] : Jean – Paul Faux , transferts thermique , échangeurs de chaleur à plaque et autre types en agroalimentaire thèse . Université de technologie de Compiége , 2003

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

[70] : 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.

[71] : LUND (D. B.) and SANDU(C.) (1981). - State-of-the-art of fouling: heat transfert surfaces.Fundamentals and applications of surface phenomenaassociatedwithfouling and cleaning in foodprooessing. ProceedingsTylôsand, 27-56.

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

[73] : Fadel N ,Etude de l'influence de la temperature du fluide sur la performance d'un échangeur de chaleur de la raffinerie d'algie , Ingénieur d'état en génie chimique, Université Houri Boumedine – algie ,2010 .

[74] : Epstien N ,Thinking about Heat Transfer Fouling : A 5× 5 Matrix , Departement of chemical engineering , Universityof British Colombia , p(43,56) 1983

[75] : Delplace F, J. C. Leuliet, J.P. Tissier, foulingexperiments of plate heatexchangers by wheyproteins solutions. Transaction of the Institution of ChemicalEngineers, Part C, 72 (1994), 163-169.

[76] : Khadidja TOUATI .Saida RAHICHE .Exploitation et Analyse des Résultats Numériques de l'étudede l'encrassement des échangeurs de chaleur par le lait par un programme ANSYS.2015/2016.université demédea .

[77] : Merakchi R, 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 .

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

[79] : Manuel technique de l'installation"" ST.

[80] : Nema P K , 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.

[81] : Hamel M , Inition a la simulation numérique des écoulment de fluide (CFD) , Introduction à Anlyse ICEM CFD et CFX, Université Mohmed Doudiaf – Algérie , 2010

[82] : Chikh Touhami A, calcul des déformation Elastohydrodynamique dans un papier yahia fares -Médéa 2012 .

[83] : CHAN Y.L, C.L. TIEN, A numerical study of two-dimensional laminar natural
convection in shallow open cavities, International Journal of Heat and Mass Transfer 28, pp. 603-612 (1985).

[84] : Tabet S , Etude numérique de la convection naturelle dans un enceinte fermée partiellement chauffée , thèse Dr , thermique et mécanique des Machines Industrielles , Université d’Oran- Algérie , 2017

[85] : Guit M , Lounes B , Simulation Numérique de l’impact des gouttelettes de métal creuses sur une suraface incliné , Master en génie mécanique , Université Dr. Yahia Fares – Médéa 2103.

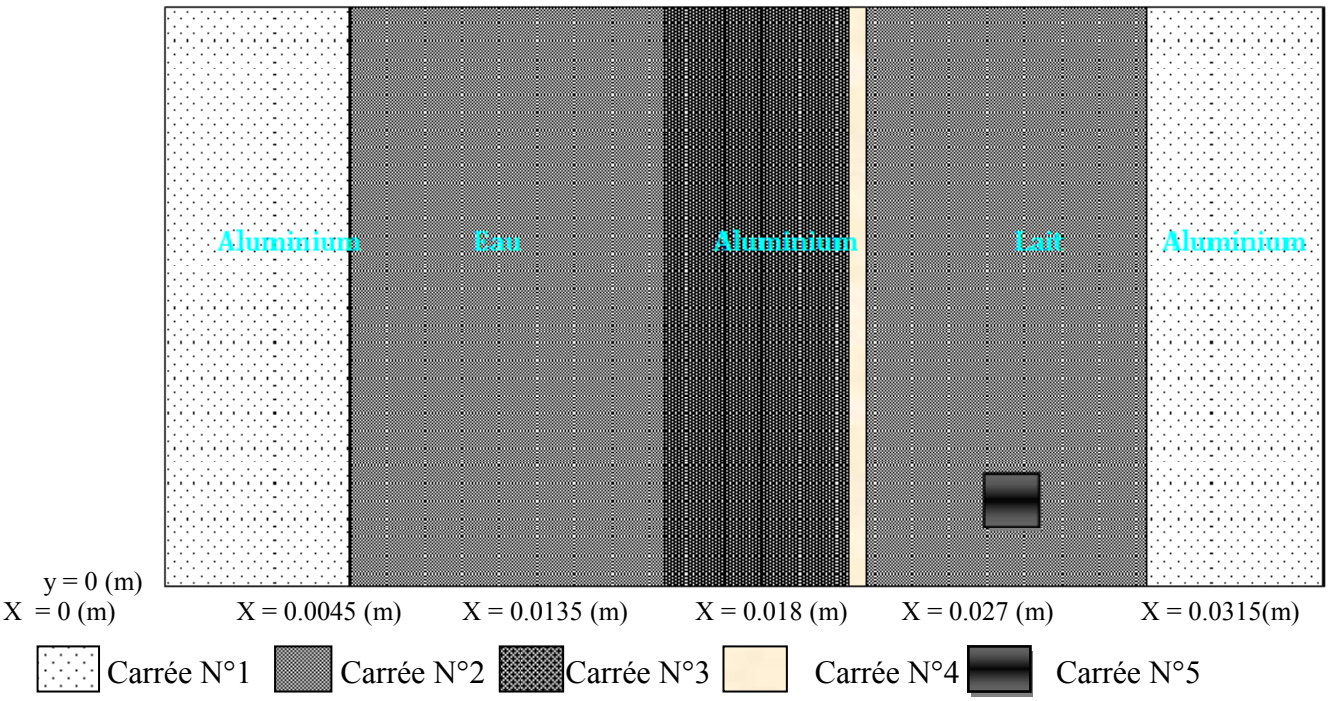
I. Les démentions de l'échangeur à plaque simulé au programme ANSYS avec encrassement à la présence un déflecteur coté lait

	Variation de Y (m)		Variation de X(m)	
	Y_1 (m)	Y_2 (m)	X_1(m)	X_2(m)
Carrée N°1	**0**	**1.2**	**0**	**0.0315**
Carrée N°2	**0**	**1.2**	**0.0045**	**0.027**
Carrée N°3	**0**	**1.2**	**0.0135**	**0.018**
Carrée N°4	**0**	**1.2**	**0.018**	**0.01801**
Carrée N°5	**0.02**	**0.0235**	**0.021**	**0.0245**

e = le diamètre de plaque = 0.0045 m

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

y = 1.2 (m)



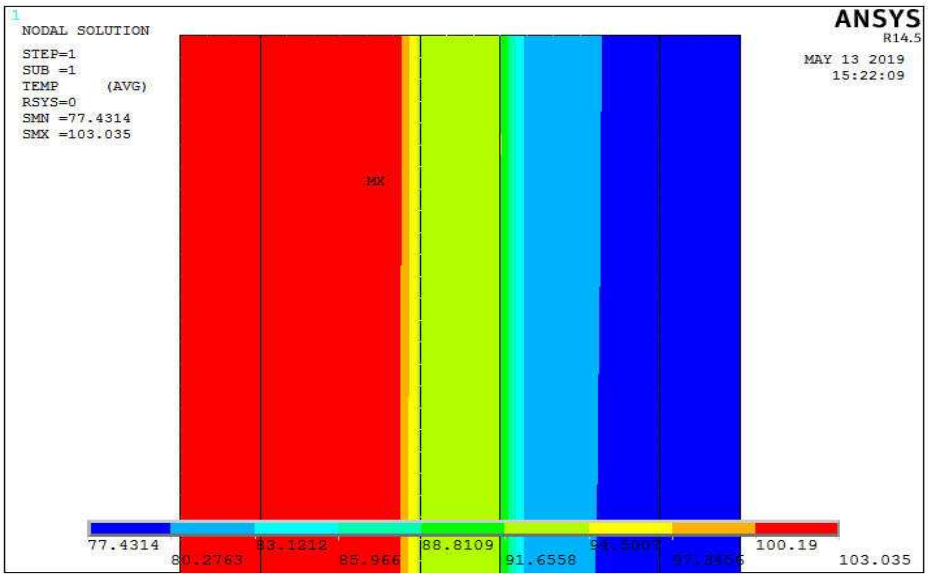
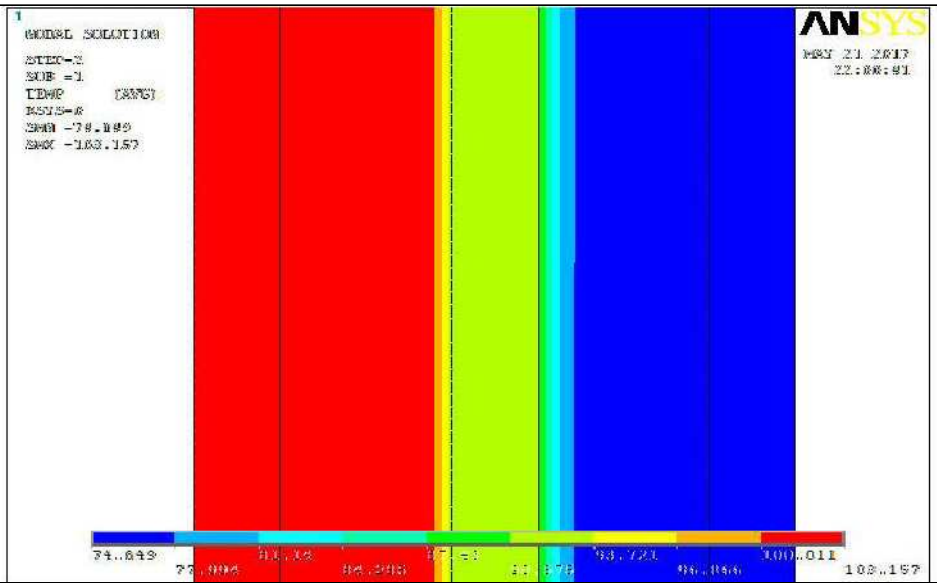
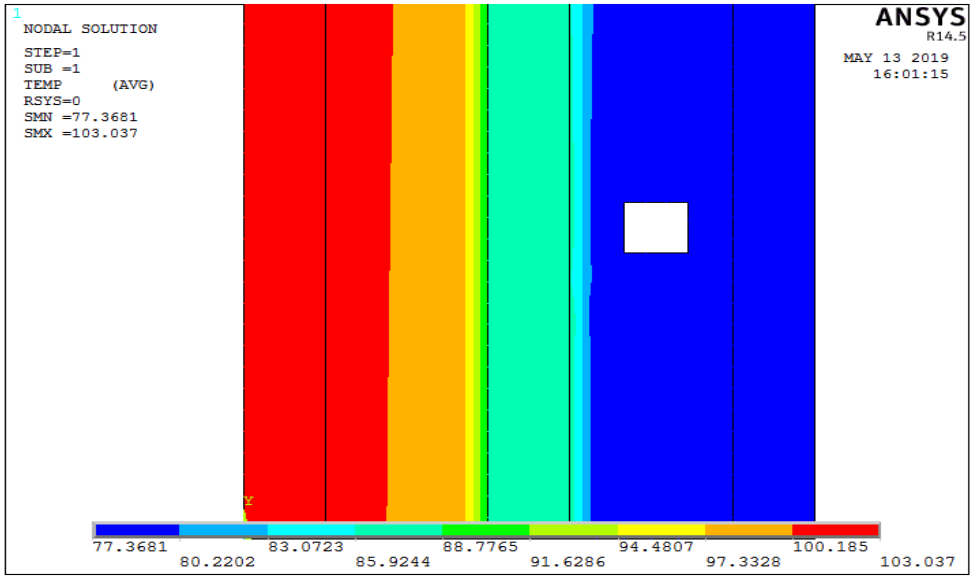
Un diagramme montre les carrées (encrassement) sont placées au programme ANSYS

Les propriétés physico-chimiques des matériaux utilisés :

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

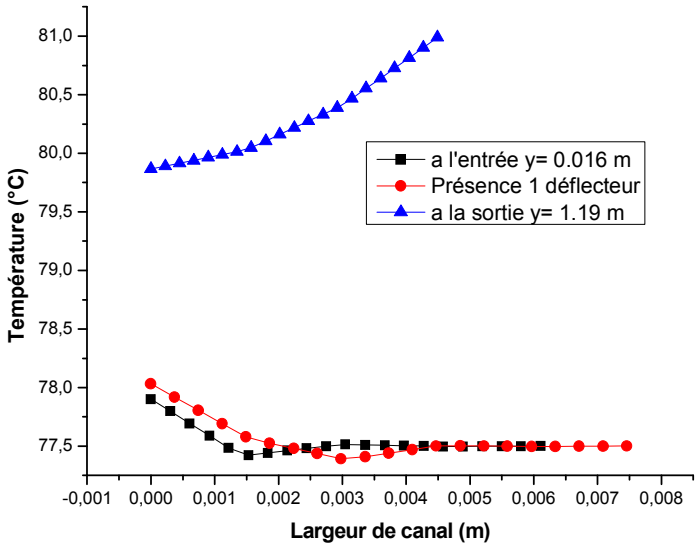
LES RESULTATS DANS UN MILIEU FLUIDE AVEC ENCARASSMENT AVEC UN DEFLECTEURS

I.1 Profil de température

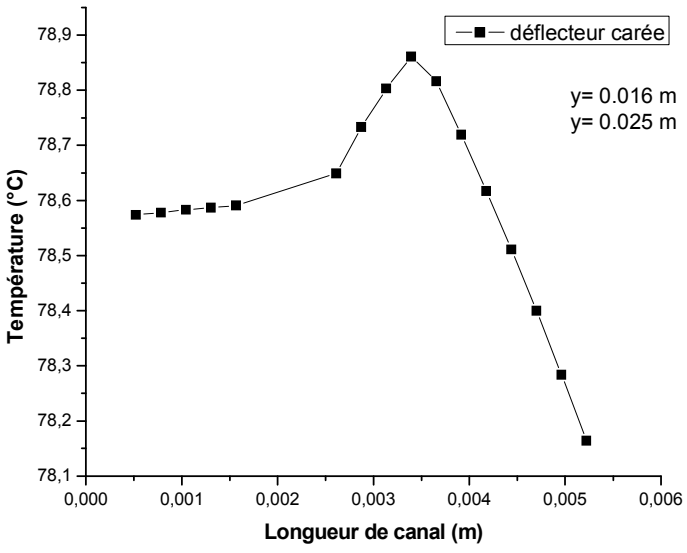
	Coter eau	Coter lait
En haut		
En milieu		
En bas		

La variation de la température à la longue de canal :

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

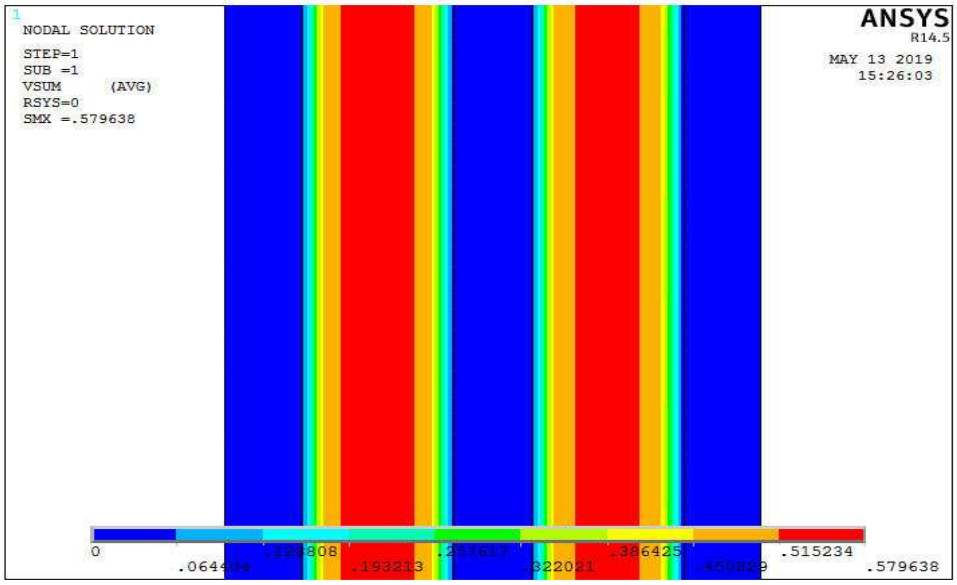
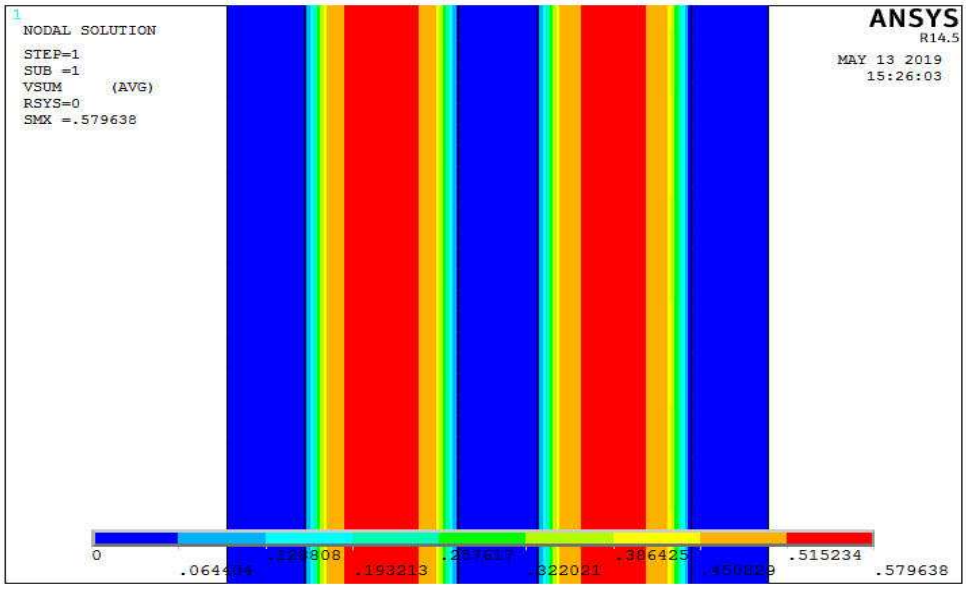
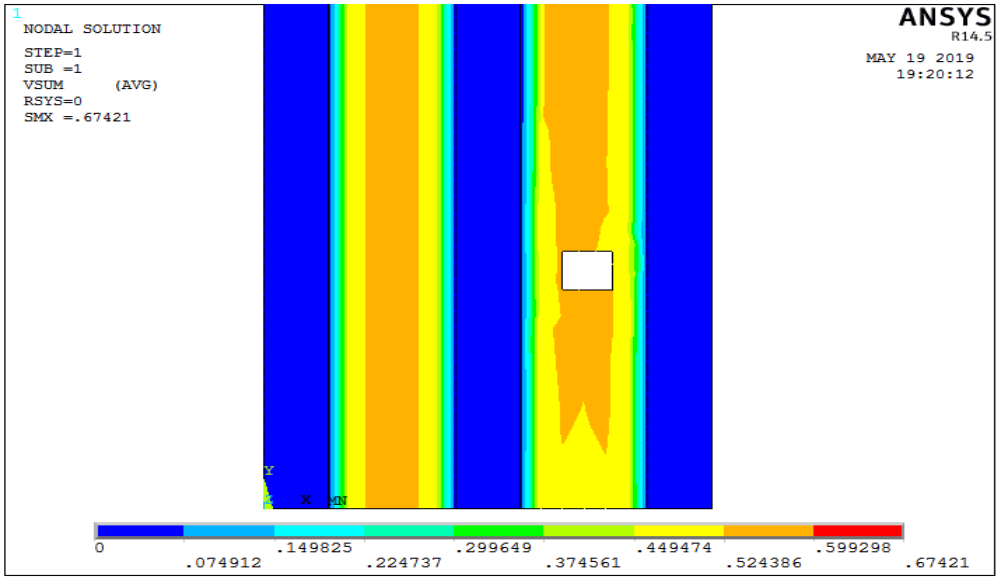


Variation de température de lait (°C) en fonction de largeur de canal (m) en milieu fluide avec encrassement avec un déflecteur



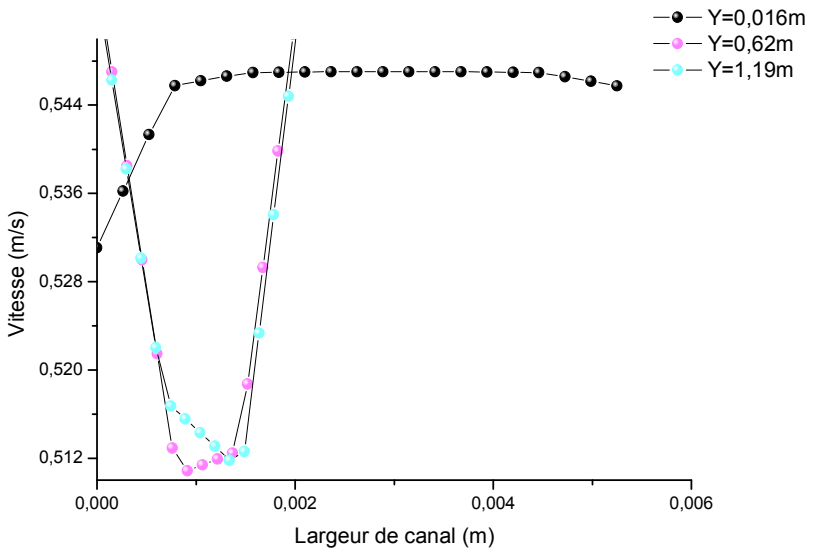
Variation de température de lait (°C) en fonction de longueur de canal (m) en milieu fluide avec encrassement avec un déflecteur

I.2 Profil de vitesse

	Coté eau	Coté lait
En haut		
En millieu		
En bas		

La Variation de la vitesse à la longue de canal :

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



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

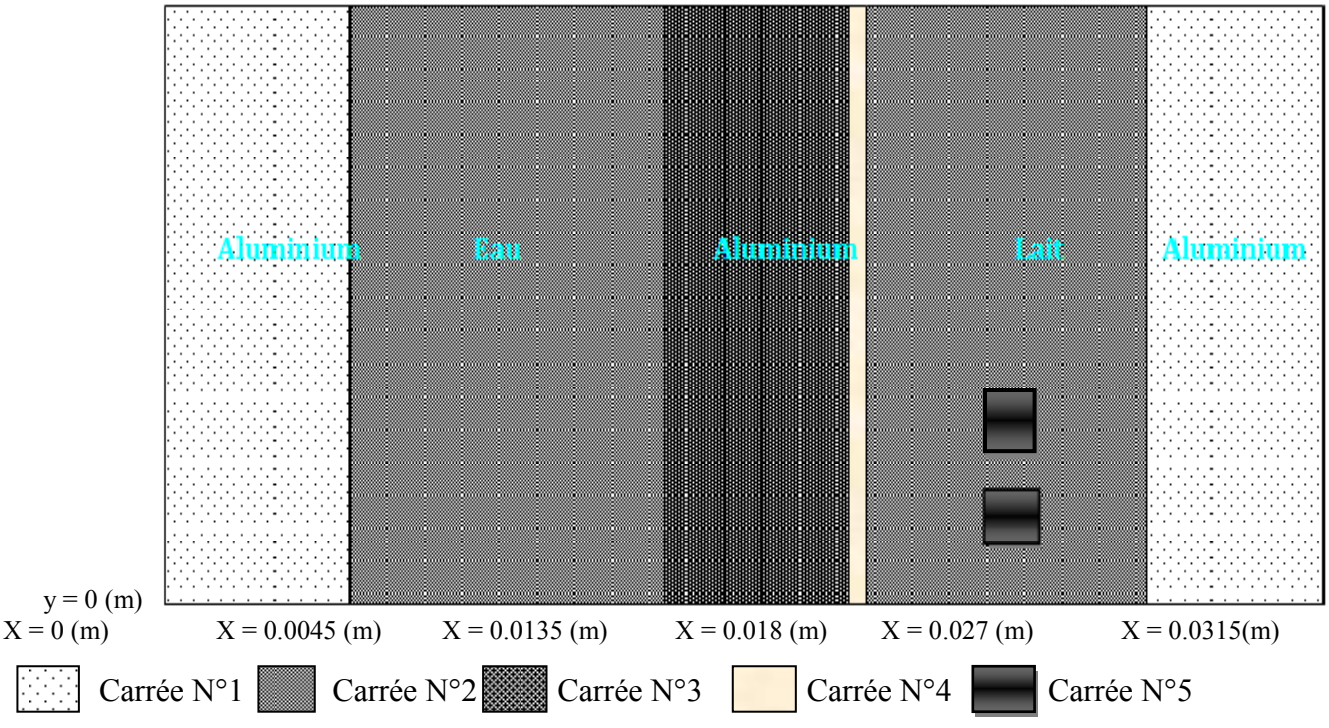
II .Les démentions de l'échangeur à plaque simulé au programme ANSYS avec encrassement à la présence deux déflecteurs coté lait

	Variation de Y (m)		Variation de X(m)	
	Y_1 (m)	Y_2 (m)	X_1(m)	X_2(m)
Carrée N°1	**0**	**1.2**	**0**	**0.0315**
Carrée N°2	**0**	**1.2**	**0.0045**	**0.027**
Carrée N°3	**0**	**1.2**	**0.0135**	**0.018**
Carrée N°4	**0**	**1.2**	**0.018**	**0.01801**
Carrée N°5	**0.02**	**0.0235**	**0.021**	**0.0245**

e = le diamètre de plaque = 0.0045 m

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

y = 1.2 (m) d= 0.035 m (distance entre les déflecteurs)

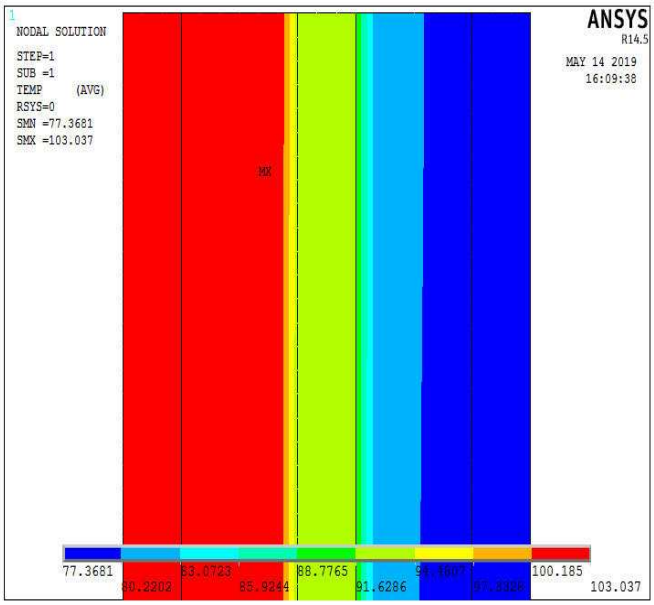
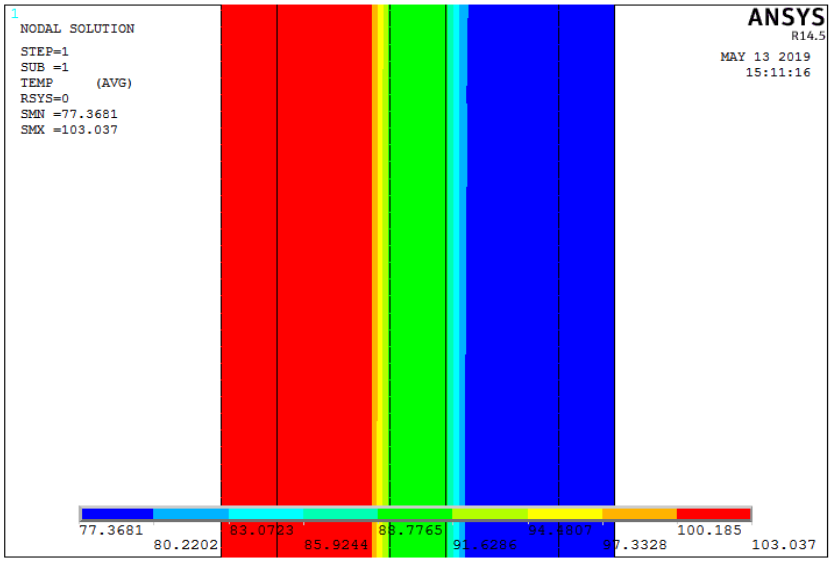
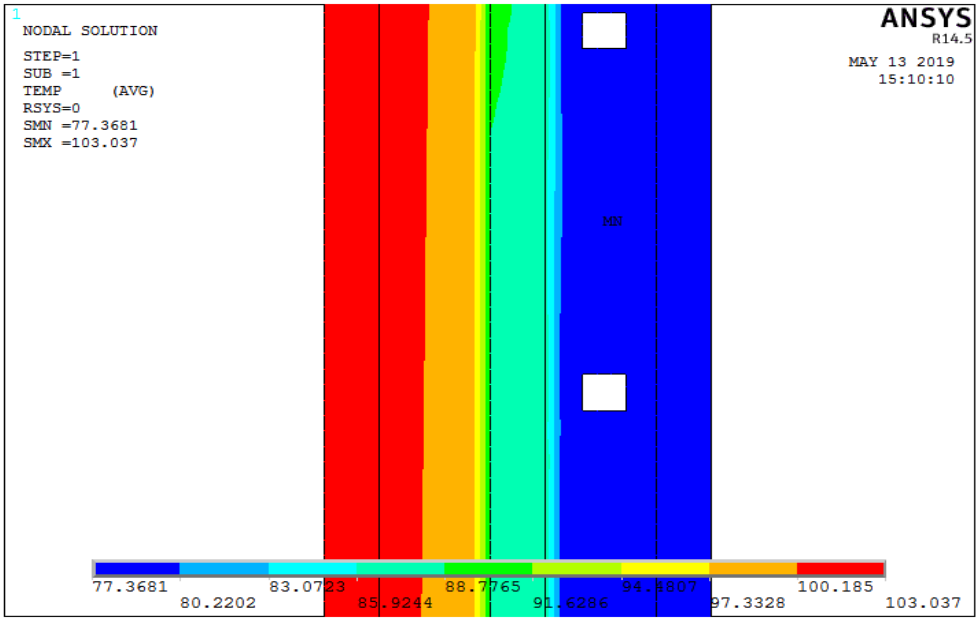


Un diagramme montre les carrées (encrassement) sont placées au programme ANSYS

Les propriétés physico-chimiques des matériaux utilisés :

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

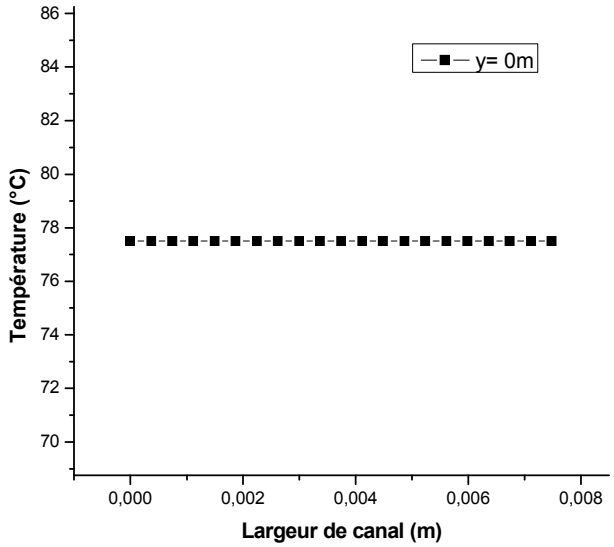
II.1 Profil de la température

	Coté eau	Coté lait
En haut		
En milieu		
En bas		

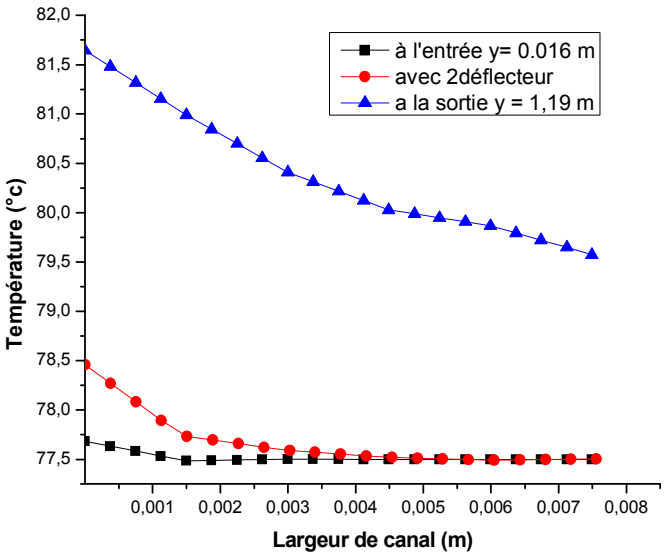
La variation de la température à la longue de canal :

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

Y= 0

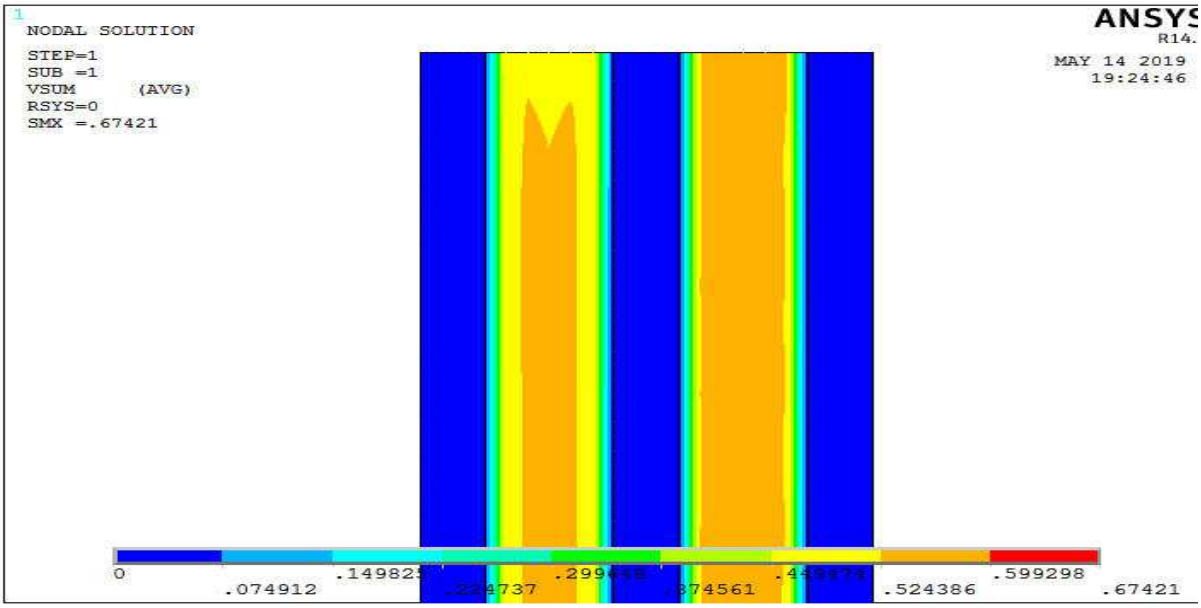
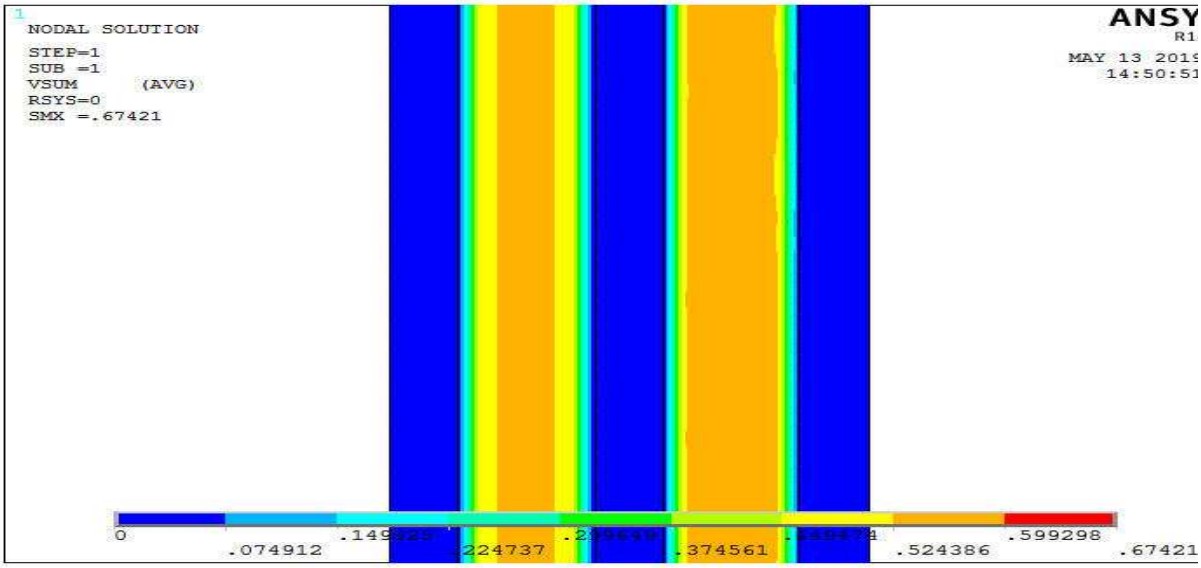
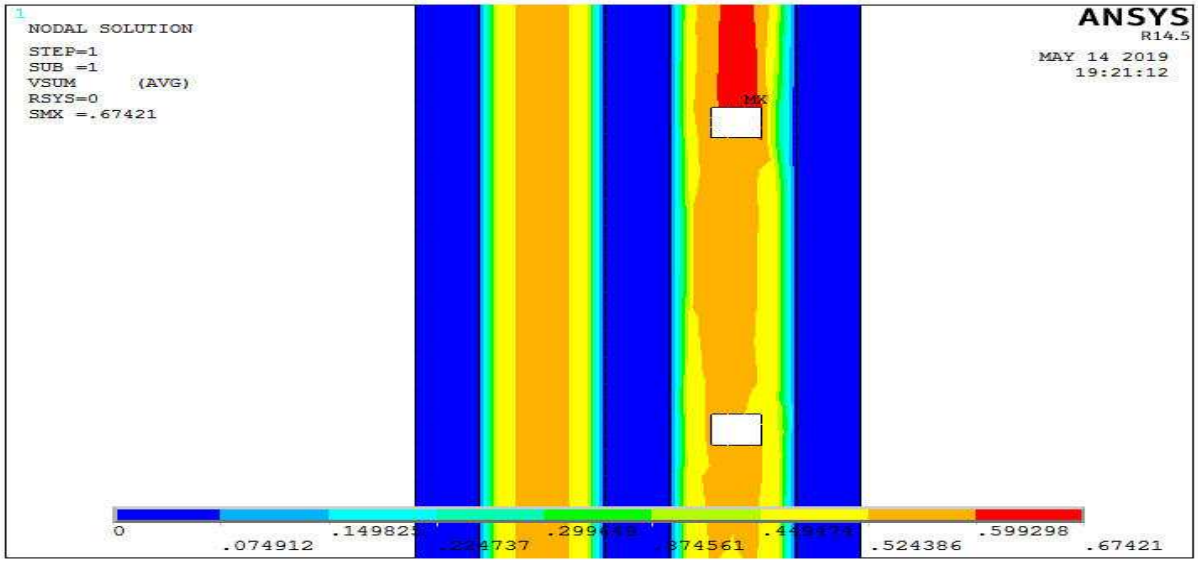


Y= 0.061 m (présence deux déflecteurs)



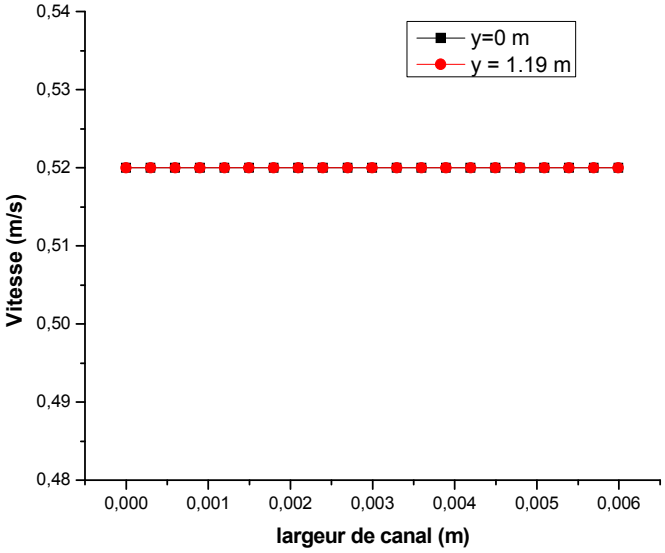
Variation de la température de lait °(C) en fonction de largeur de canal (m) en différents position Y(m)

II.2 Profil de vitesse

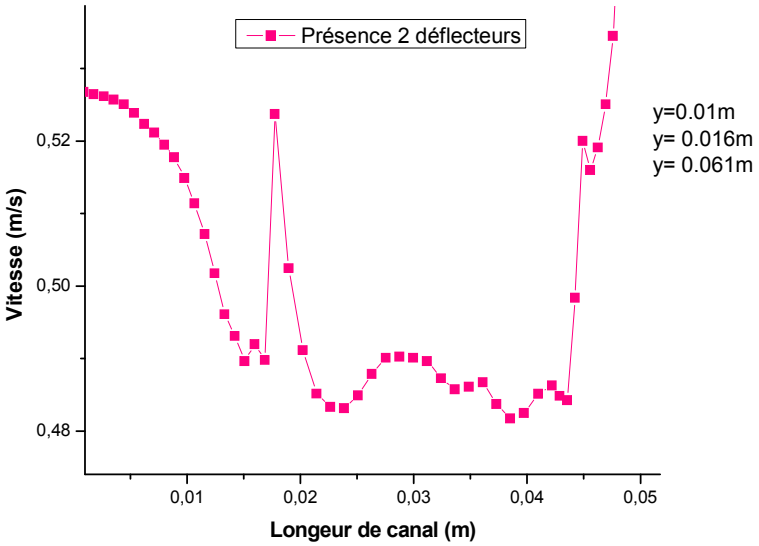
	Coté eau	Coté lait
En haut		
En milieu		
En bas		

La variation de vitesse à la longue de canal :

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



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



La variation de vitesse (m /s) de lait en fonction de longueur de canal (m) en différentes positions Y(m)

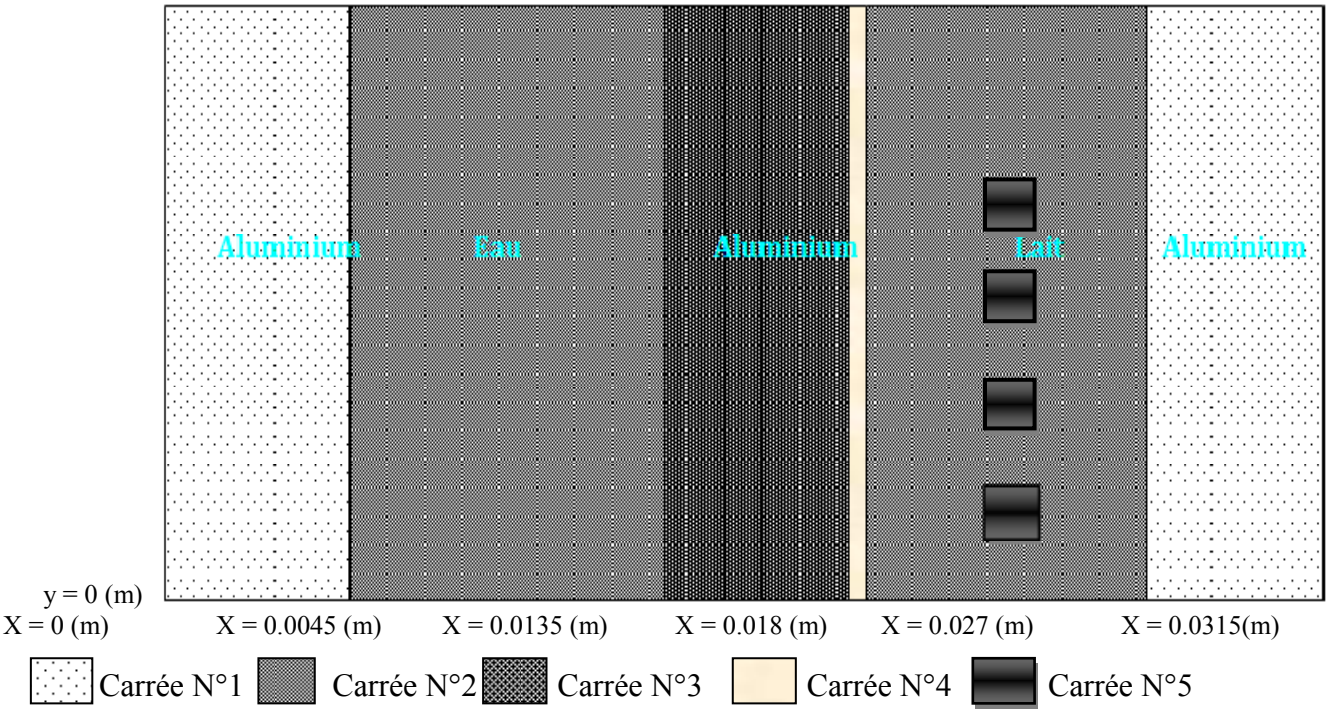
III .Les démentions de l'échangeur à plaque simulé au programme ANSYS avec encrassement à la présence quatre déflecteurs coté lait

	Variation de Y (m)		Variation de X(m)	
	Y_1 (m)	Y_2 (m)	X_1(m)	X_2(m)
Carrée N°1	**0**	**1.2**	**0**	**0.0315**
Carrée N°2	**0**	**1.2**	**0.0045**	**0.027**
Carrée N°3	**0**	**1.2**	**0.0135**	**0.018**
Carrée N°4	**0**	**1.2**	**0.018**	**0.01801**
Carrée N°5	**0.02**	**0.0235**	**0.021**	**0.0245**

e = le diamètre de plaque = 0.0045 m

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

y = 1.2 (m) d= 0.035 m (distance entre les déflecteurs)

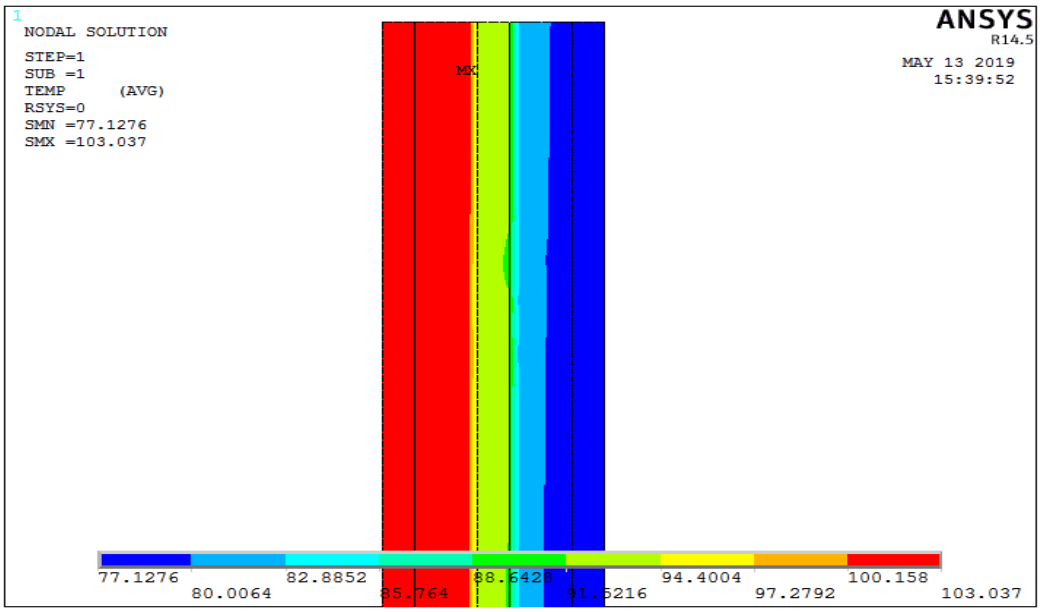
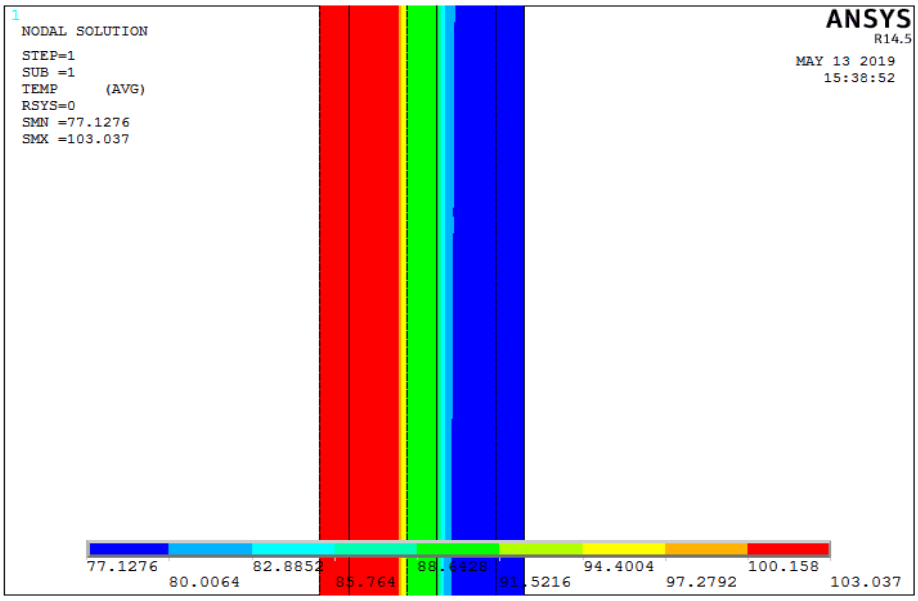
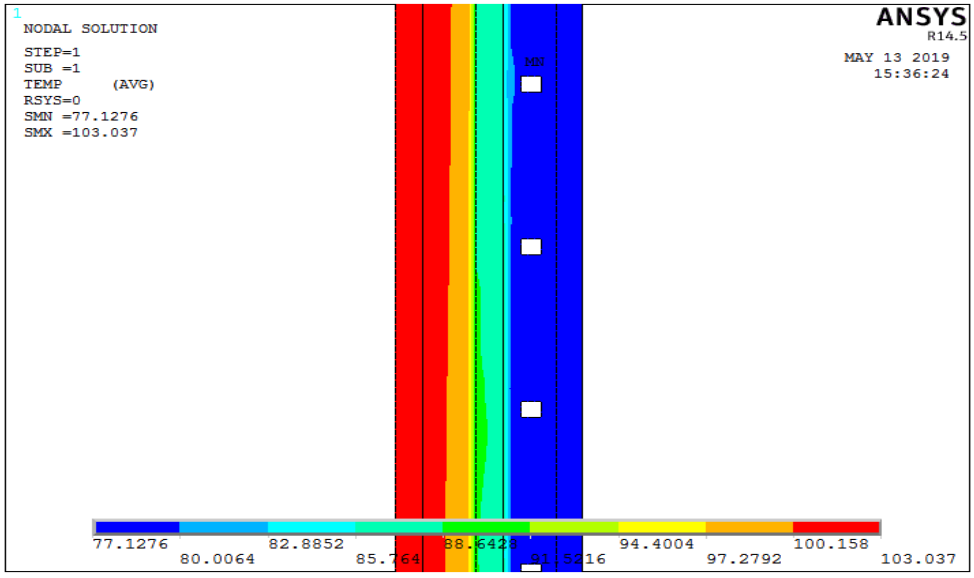


Un diagramme montre les carrées (encrassement) sont placées au programme ANSYS

Les propriétés physico-chimiques des matériaux utilisés :

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

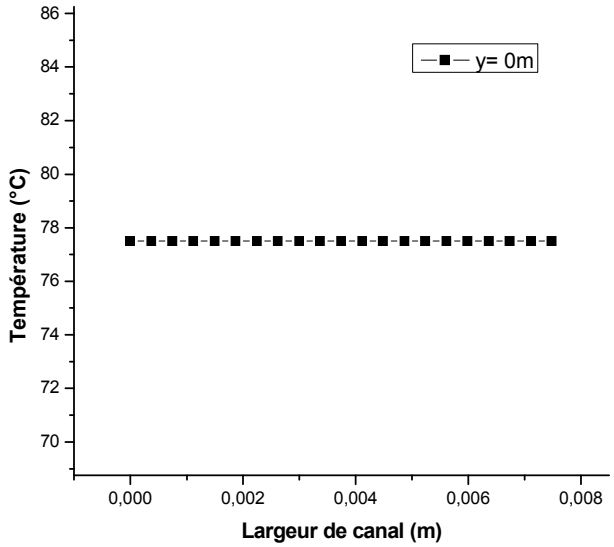
III.1 Profil de température

	Coté eau	Coté lait
En haut		
En milieu		
En bas		

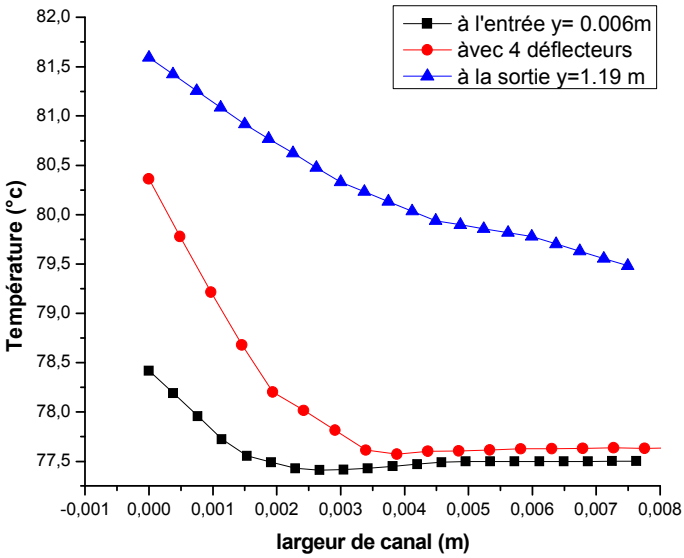
La variation de la température à la longue de canal :

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

Y= 0

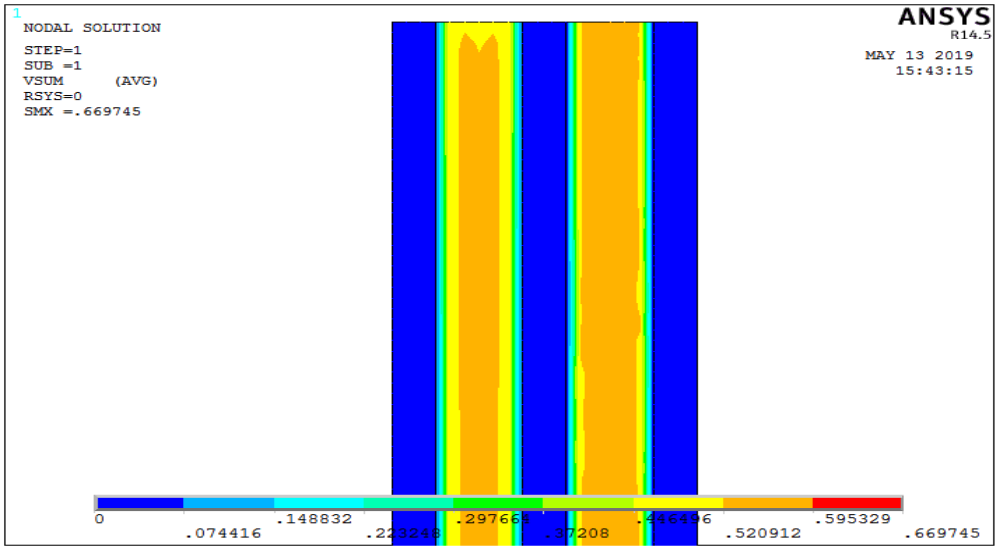
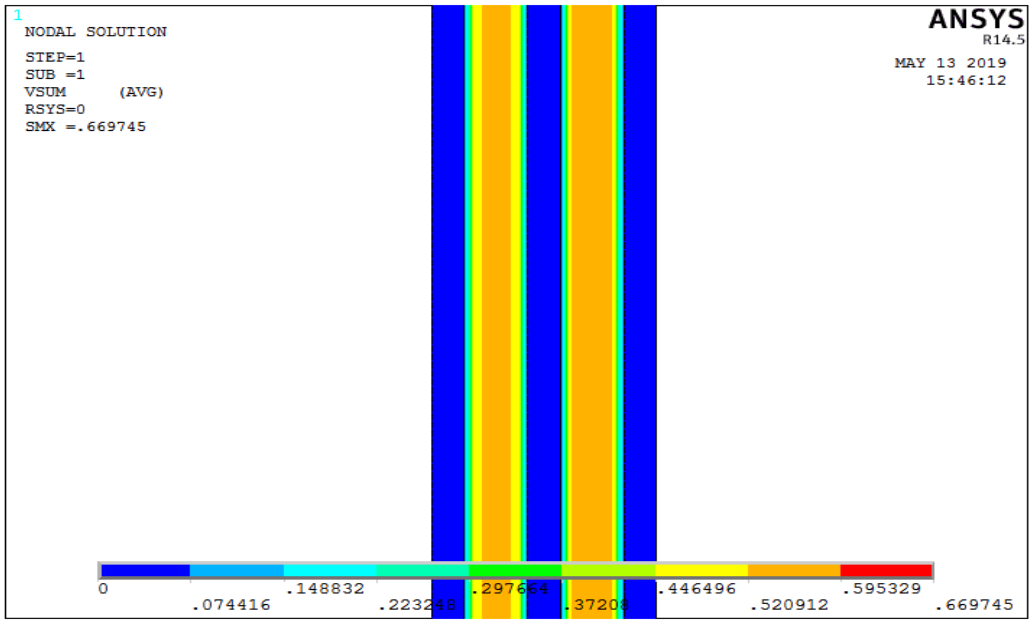
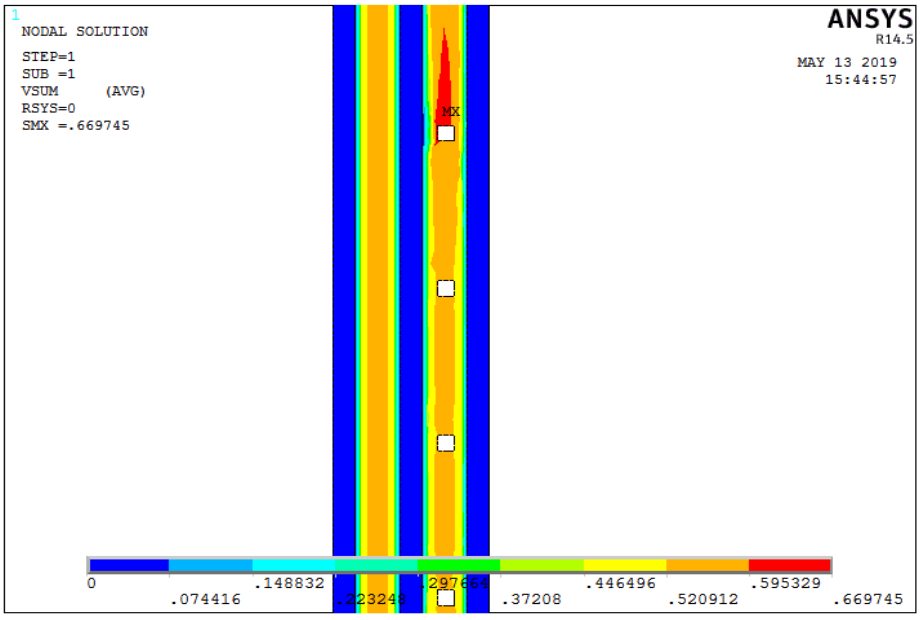


Y= 0.13 m (présences de quatre déflecteurs)



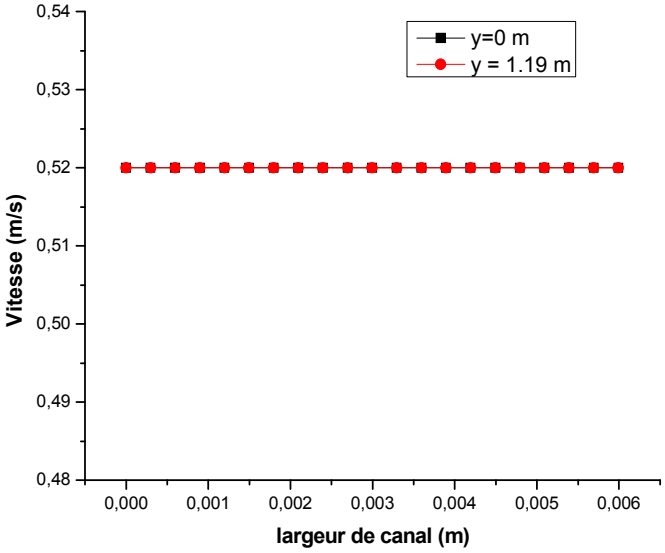
Variation de température de lait (°C) en fonction de largeur de canal (m) en différentes positions Y (m)

III.2 Profil de vitesse

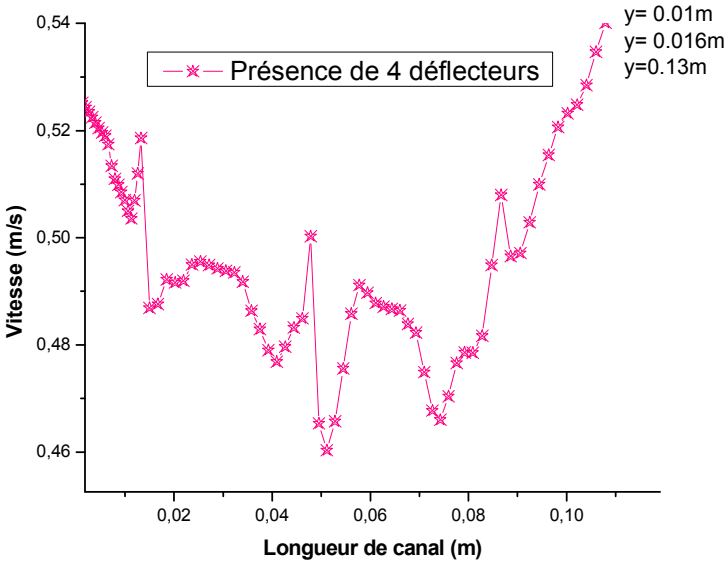
	Coté eau	Coté lait
En haut		
En milieu		
En bas		

La variation de vitesse à la longue de canal :

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



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



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

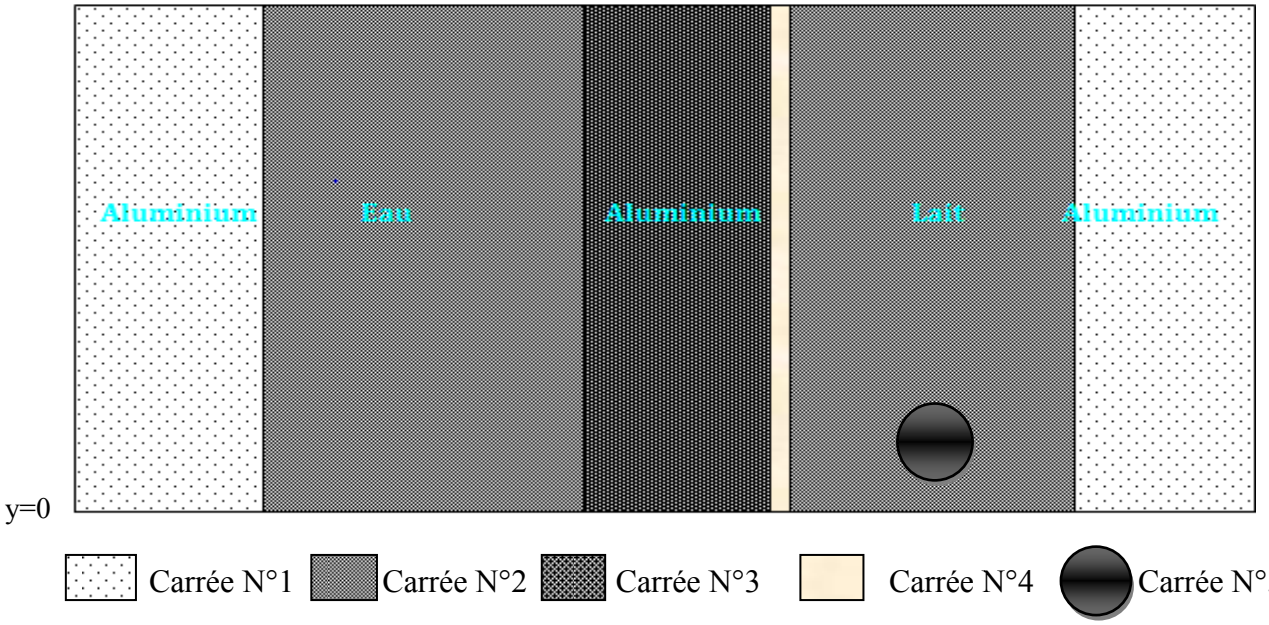
IV. Les démentions de l'échangeur à plaque simulé au programme ANSYS avec encrassement à la présence d'un déflecteur cercle coté lait

	Variation de Y (m)		Variation de X(m)	
	Y_1 (m)	Y_2 (m)	X_1(m)	X_2(m)
Carrée N°1	**0**	**1.2**	**0**	**0.0315**
Carrée N°2	**0**	**1.2**	**0.0045**	**0.027**
Carrée N°3	**0**	**1.2**	**0.0135**	**0.018**
Carrée N°4	**0**	**1.2**	**0.018**	**0.01801**
Carrée N°5	**0.02**	**0.0235**	**0.021**	**0.0245**

e = le diamètre de plaque = 0.0045 m

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

y= 1.2m

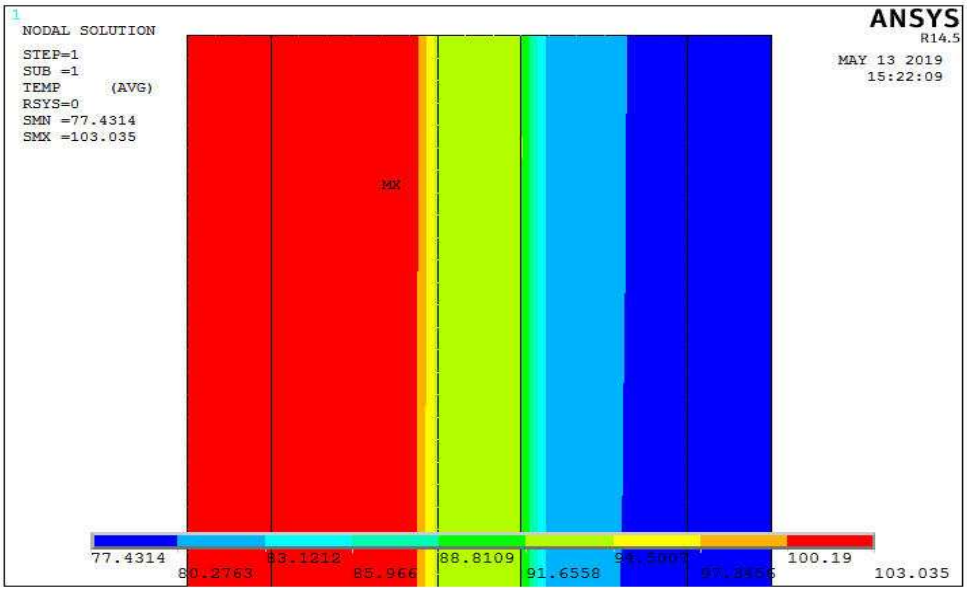
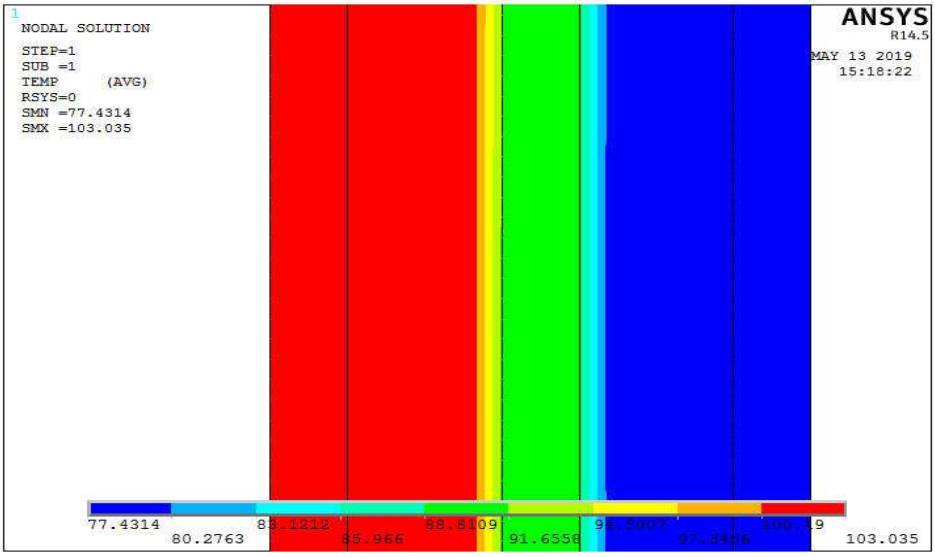
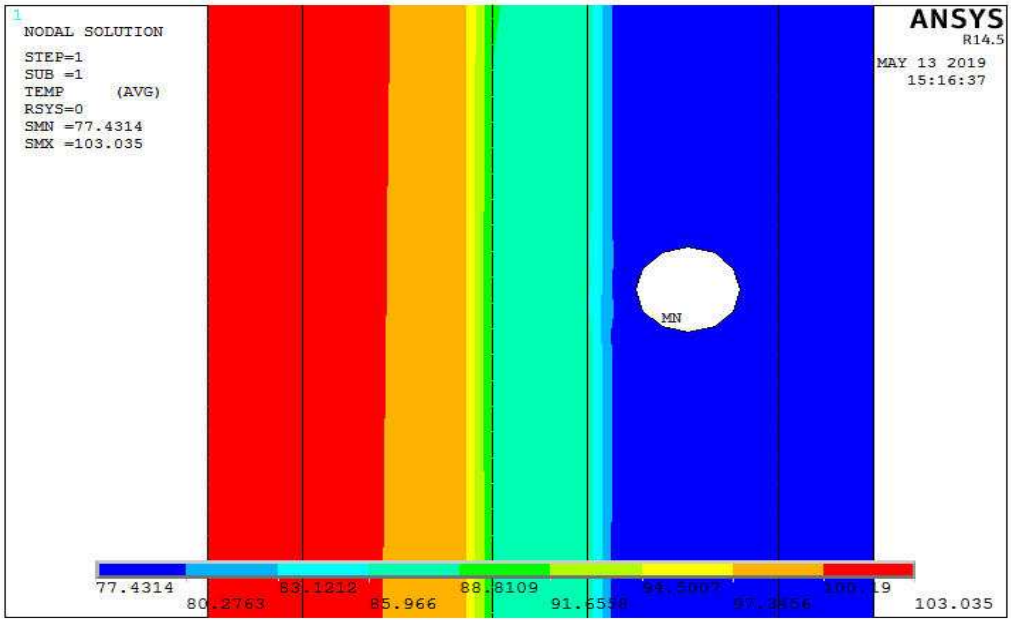


Un diagramme montre les carrées (encrassement) sont placées au programme ANSYS

Les propriétés physico-chimiques des matériaux utilisés :

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

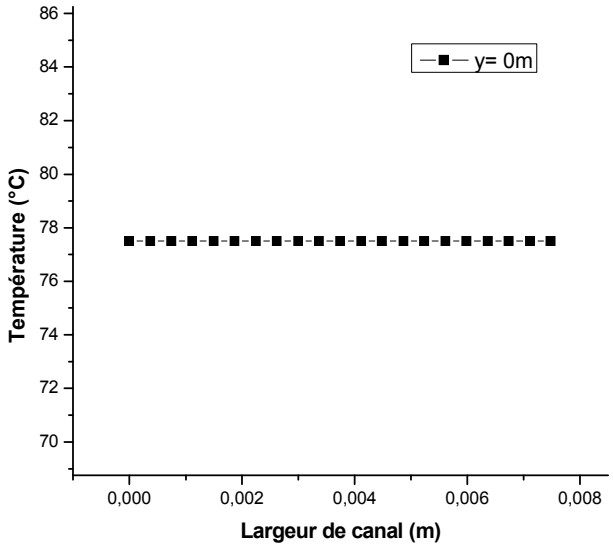
IV.1 Profil de température

	Coté eau	Coté lait
En haut		
En milieu		
En bas		

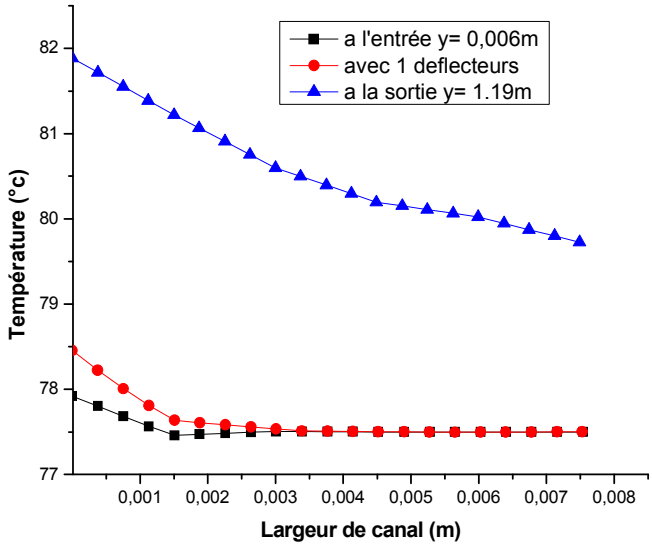
La variation de la température à la longue de canal :

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

Y= 0

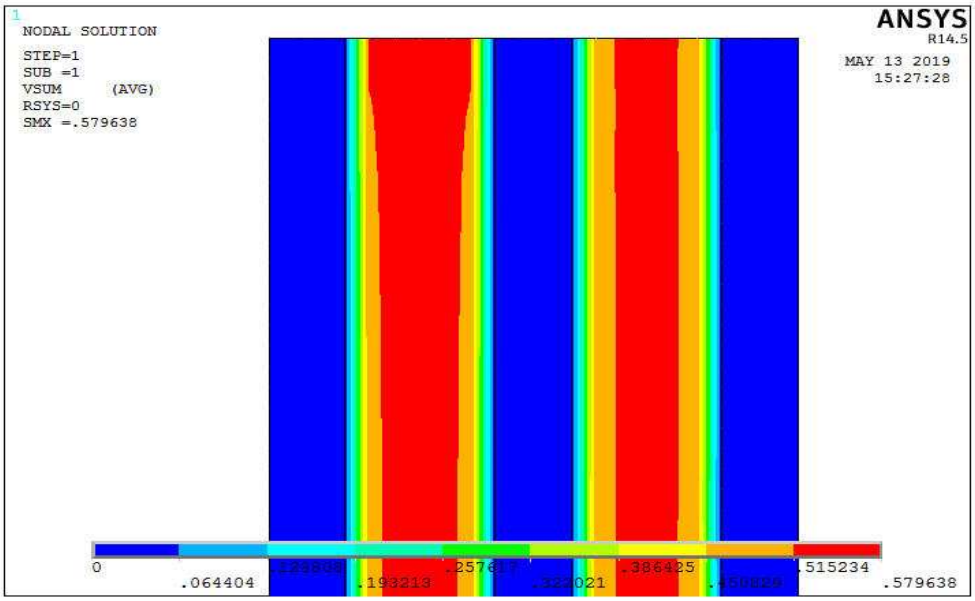
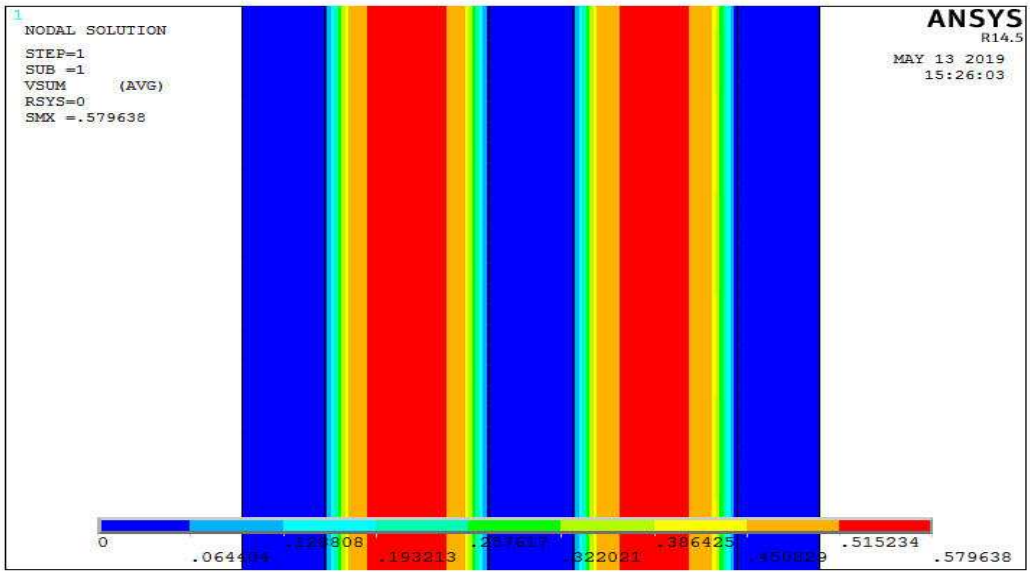
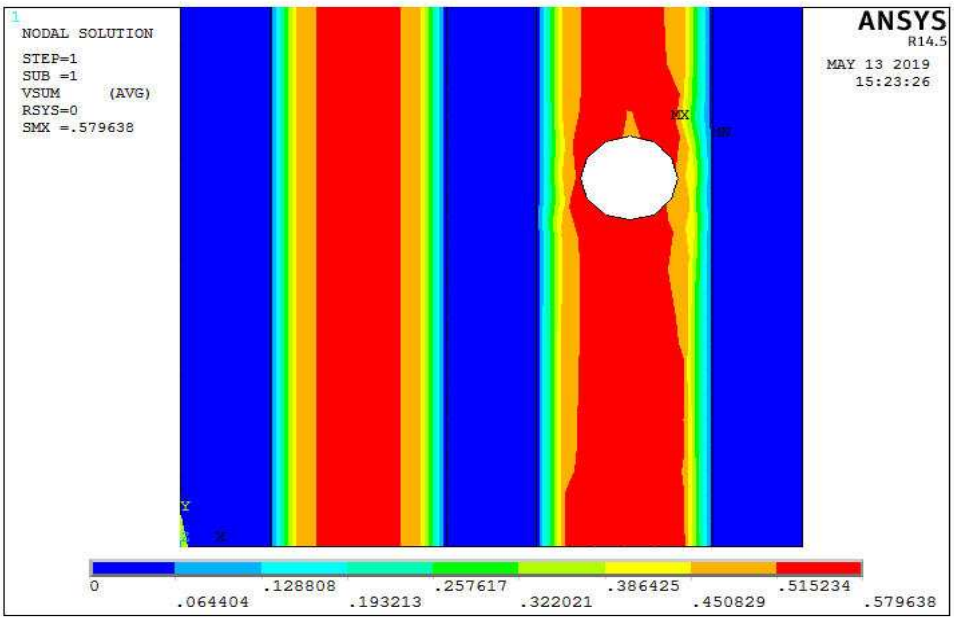


Y= 0.025 m (présences de déflecteur)



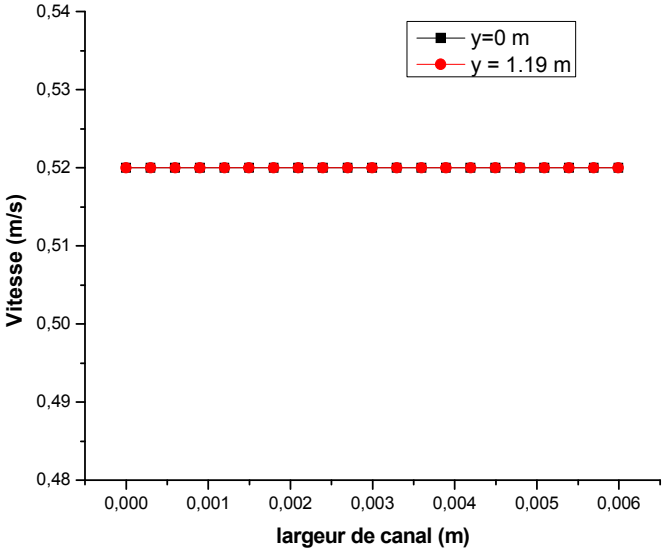
Variation de température de lait (°C) en fonction de largeur de canal (m) en différentes positions Y(m)

IV.2 Profil de vitesse

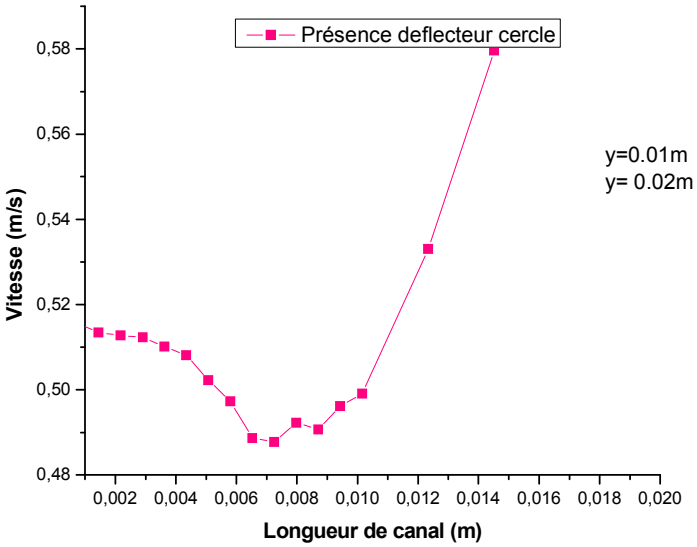
	Coté eau	Coté lait
En haut		
En milieu		
En bas		

La variation de vitesse à la longue de canal :

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



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

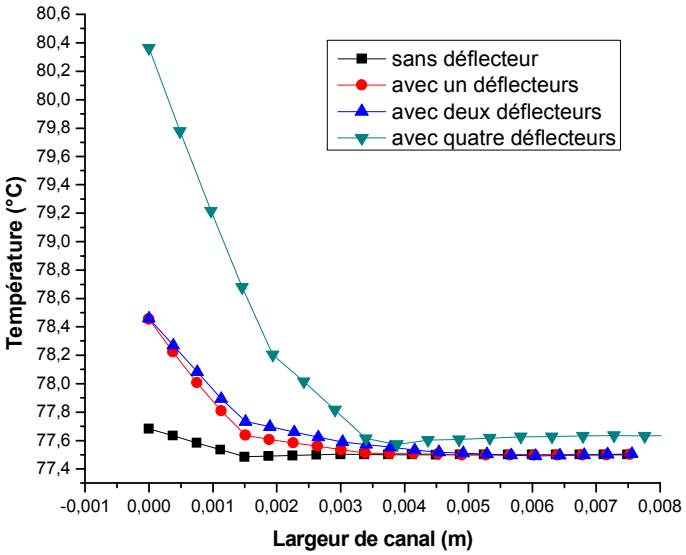


Variation de vitesse de lait (m/s) en fonction de longueur de canal (m) en différentes positions Y(m)

V.1 Etude comparative entre milieu fluide avec encrassement avec la présence de plusieurs déflecteurs coté lait

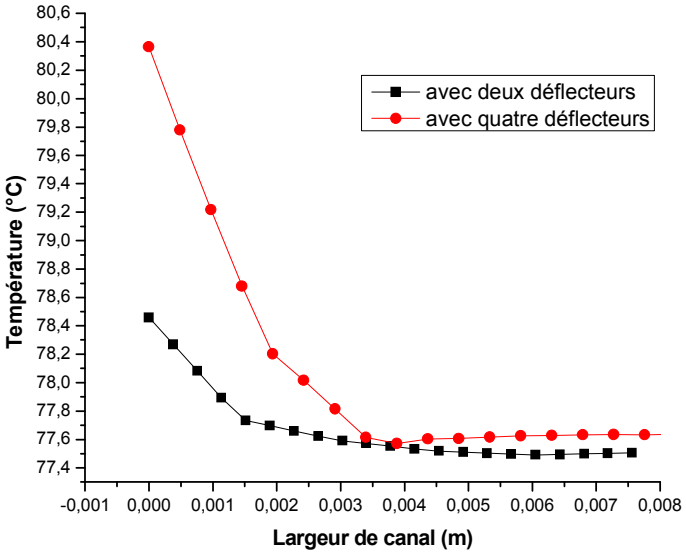
V.1.1 Profil de température

Y = 0.13 m



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

Y = 0.13 m

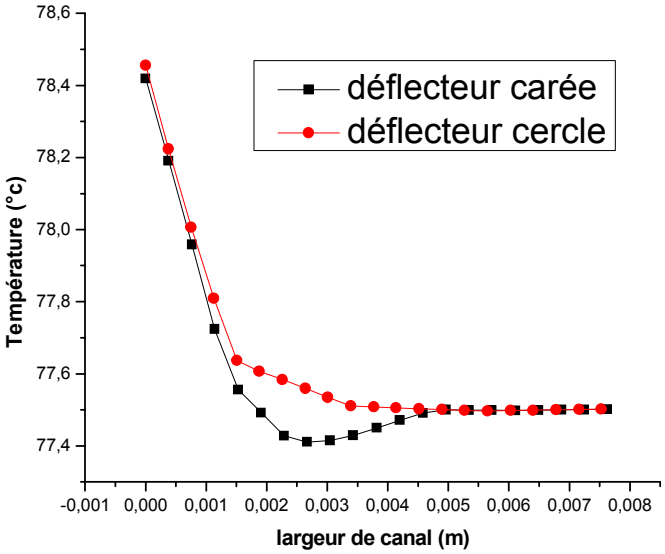


Variation de température de lait (°C) en fonction de largeur de canal (m) milieu fluide avec encrassement avec deux et quatre déflecteurs

V.2 Etude comparative entre milieu fluide avec encrassement avec un déflecteur carrée et un déflecteur cercle coté lait

V.2.1 Profil de température

Y=0.025 m

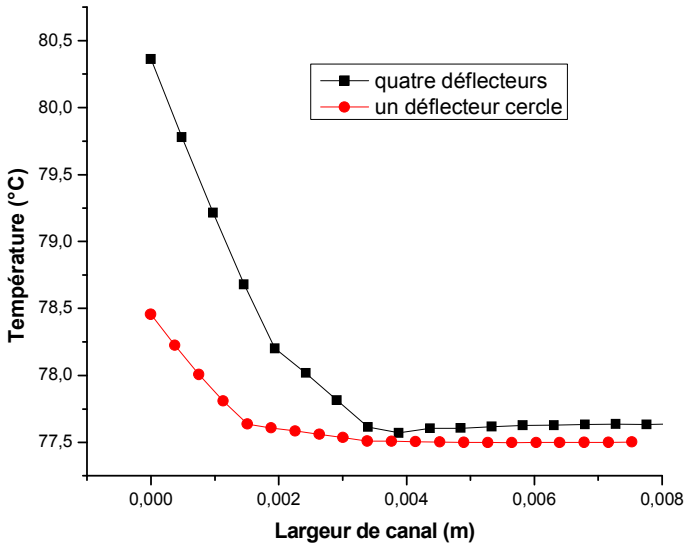


Variation de température de lait (°C) en fonction de largeur de canal (m) milieu fluide avec encrassement avec déflecteur carrée et déflecteur cercle

V. 3 Etude comparative entre milieu fluide avec encrassement avec quatre déflecteurs et un déflecteur cercle coté lait

V. 3 Profil de température

Y= 0.13 m



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