REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES

Mémoire

Présenté pour obtenir le diplôme de **Master**

En chimie

Spécialité : Normes et contrôle de qualité

Par :

Melle : **BOUBACHICHE Ahlem**

Thème :

Influence de la présence d'un déflecteur sur les performances thermiques d'un échangeur de chaleur lors d'une phase de traitement thermique du lait

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

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

Année universitaire 2016/2017

الملخص:

إن اتساخ أجهزة التبادل الحراري هو مشكل اقتصادي يؤرق الصناعيين منذ مدة,هذا المشكل عموما يظهر بفقدان الجودة الصناعية. يتناول هذا العمل دراسة النمذجة وتحليل النتائج لظاهرة الترسب في المبادلات الحرارية ذات اللوحات للحليب خلال مرحلة البسترة في وجود وغياب موجه.نقدم الصياغة الرياضية للتدفق المضطرب المستمر للوحتين مسطحتين مع وبدون الترسب مع نموذج إغلاق k-ε.وقدتم تعيين معادلات المحفوظات والشروط المعمول بها في الحل العددي. هذه الدراسة تُعنى بتغيرات درجة الحرارة, السرعة . حيث أظهرت النتائج في وجود موجه والترسبات ترتفع درجة الحرارة وتنخفض السرعة.يبدو أن الموجه يحسن من المبادلات الحرارية

الكلمات المفتاح : الحليب,مبادلات حرارية ذات اللوحات, نموذج κ-ε, الترسب.الموجه.

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 d'un 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 à l'aide du modèle de fermeture κ–ε . On a établie les équations de conservations et les conditions applicables pour la résolution numérique. Cette étude concerne la variation de la température et la vitesse. En présence de l'encrassement les résultats montrent que la température rapide augmente et la vitesse diminués. Il semble que le déflecteur amélioreles échanges thermiques.

Mots clés : Lait, échangeur de chaleur à plaque, modèle κ-ε, encrassement,déflecteur.

Summary :

Fouling in heat exchangers is an economic problem that has plagued industrialists for a long time. It results in a significant loss of performance.

This work deals with the study of the simulation and analysis of the numerical results of the phenomenon of fouling in plate heat exchangers by the milk with the presence the absence of a deflector during a phase of treatment Called pasteurization. We present the steady-state mathematical formulation of a turbulent flow between two flat plates with and without fouling using the closure model κ-ε. Conservation equations and conditions for numerical resolution have been established. This study concerns the variation of temperature, velocity and and without fouling for a set of results. In the presence of fouling the results show that the rapid temperature increases and the velocity decreased. it seems deflector improved heat exchange

Key words: Milk, plate heat exchanger, κ-ε model, fouling.deflector.

REMERCIMENTS

Grace a Dieu tout puissant qui m'a doté de capacités physiques et morales, je suis enfin arrivé au bout de cette thèse.

﴿فالحمـــــد و الشكـــــر لله العلي العظيـــم﴾

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

J'exprime aussi notre infinie gratitude à ***Mr. Monire ZIRARI*** *pour leurs aides de la réalisation pratique et le formation de Logciel Ansys et pour leur encouragements et leur soutien moral.*

Je remercie aussi les membres de jury : le présidente de jury ***Mm. Madiha Melha YAHOUM*** *.les examinateurs* ***Mr. Said BITAM****.et* ***Mr. Rédha ALOUAOUI***

Si je Lesse ma très chère maman à la fin ce n'est que le manque de vocabulaire, pour exprimer en cette occasion,sa profonde gratitude et sa reconnaissance pour moi. elle a réussi à me inculquer les meilleures valeurs et surtout l'amour du savoir qui représente le durable et le noble héritage.

mon master n'est qu'un résultat parmi d'autres et ca c'est grace à toi ma tendresse maman.

Merci mon jannah

En fin, j'adresse mes remerciements à ma famille et mes amies qui fait tout pour nous mettre dans des bonnes dispositions afin que nous puissions accomplir ce travail.

Remerciment……...……I
Sommaire…….……..II
Liste des figures ……..…….III
Nomenclature……..…….IV
Introductin générale ……..……01

Chapitre I :Le lait ,les laits commercialises.Traitement thermique

I-LE LAIT……..…….....03

I-1-Définition……...03

I-2-La composition du lait……...…….……03

I-2-1-Eau……..……....05

I-2-2-Matière grasse…….…….……...05

I-2-3-Protéines…….…….……06

I-2-4-Lactose…….…….……..09

I-2-5-Minéraux…….……09

I-2-6-Vitamines…….…...10

I-2-7-Enzymes……...…….…..11

I-3-Facteurs influençant la composition du lait……...…….…12

I-3-1-Variabilité génétique entre individus……..13

I-3-2-Stade de lactation……13

I-3-3-Age ou numéro de lactation……13

I-3-4-Facteurs alimentaires……...13

I-3-5-Facteurs climatiques et saisonniers……14

I-4-Propriétés physico-chimiques du lait……...…….....14

I-4-1-Masse volumique……...……..……...14

I-4-2-Point de congélation…….…….....15

I-4-3-Point d'ébullition……..…….....15

I-4-4-Acidité du lait……...…….……..15

I-5-Qualité organoleptique du lait……..…….……16

I-5-1- La couleur……...……...16

I-5-2- L'odeur ……...….…….……16

I-5-3- La saveur ……...…….....16

I-5-4-La viscosité…….16

II-LES LAITS COMMERCIALISÉS…….….17

II-1-Lait pasteurisé…….....17

II-2-Lait stérilisé……...18

II-3-Lait concentré sucré……..18

II-4-Lait aromatisé……..……..18

II-5-Lait fermenté……..……...……19

II-6-Lait en poudre……...…….……...19

III-Traitement thermiques du lait……..……...…….…….....20

III-1-Procédés de traitement thermique……...…….……...22

III-1-1-Pasteurisation……...…….……...22

III-1-2-Stérilisation……...…….……...25

Chapitre II :Les échangeurs de chaleurs & encrassement

I-Introduction ……...…….……...29

I-1-Principal but et fonctions d'un échangeur thermique……..……...…….……...29

I-2-Technologie des échangeurs……..……...30
I-3-Fonctionnement général d'un échangeur thermique…….……32
I-3-1-Calcul de la puissance thermique d'un échangeur : le bilan thermique……..…...32
I-3-2-Méthodes de dimensionnement……..……...39
I-4-Critères de performance d'un échangeur…….……...42
I-5-Echangeurs de chaleur et déflecteurs……..…….…...42
I-5-1-Déflecteurs longitudinaux…….……....44
I-5-2-Déflécteur d'entrée ……..…….……..……..…...45
I-6-Echangeurs à plaques…….……..…….……...45
I-6-1-Principe de fonctionnement d'un échangeur à plaques……..……..…….…….....47
II-Encrassement…….……..……...48
II-1-Introduction……..……..……...48
II-2-Notions sur l'encrassement des échangeurs…….……..…….……...49
II-2-3-Catégories et types d'encrassement……..…….……..……...49
II-2-4-Les processus fondamentaux de l'encrassement…….…...51
II-3-l'encrassement par le lait……..…….……...52
II-3-1-Introduction……..…….……..……...52
II-3-2-Modèles et mécanismes d'encrassement par le lait…….……...53
Chapitre III : Modélisation et simulation de l'encrassement et Présentation d' ANSYS

I-Introduction ……..……..……..……..…….....54
II-Cycle de production ……..……..……..…….....54
II-1-Les étapes de production……..……..……..…….....55
II-2-Le cycle de vapeur……..……..……..…….....56
III-Modele thermique de l'echangeur a plaque……..……..…….....57
III-1-Introduction……..……..……..……..…….....57
III-2-Formulation mathématique du problème ……..……..…….....58
III-2-1-Introduction …..……..……..……..…….....58
III-2-2- Modélisation de la turbulence dans un milieu totalement fluide ……..……..…….....58
III-2-2-1-Les hypothèses ……..……..……..…….....58
III -2-2-2- Equations de conservation …….....……..…….....59
III-2-3- Modélisation de la turbulence dans un milieu poreux ……..……..…….....59
III-2-3-1- Modèle générale……..……..……..……..…….....59
III-2-3-2- Conditions initiales et aux limites ……..……..……..…….....61

III-3-Calcul du coefficient de transfert de chaleur global ……..…….…….....62
III-3-4-Calcul des paramètres à mesurer du mélange (lait) ……..…….....63
IV-Calcul des paramètres à mesurer de l'eau chaude……..…….....65
I-Introduction……..…….…….....……..…….....66
I-1-Ansys DesignSpace ……...……..…….…….....……..…….....66
I-2-Ansys Professional……...……..…….…….....……..…….....66
I-3-Ansys Structural / Mechanical……...……..…….…….....……..…….....66
I-4-Ansys CFX……...……..…….…….....……..…….....66
I-5-Les avantages d'Ansys CFX ……...……..…….…….....……..…….....66
II-Le calcul numérique……...……..…….…….....……..…….....67
II-1-Les trois grandes familles de methodes de résolutions……...……..…….…….....68
III-Les étapes à suiver pour simuler mathématiquement un probléme de transfert de chaleur dans un échangeur a plaque sans et avec déflecteurs ……...……..…….…….....……..…….....69
III-1-définir la géométrie de l'échangeur……...……..…….…….....……..…….....69
III-2-le maillage……...……..…….…….....……..…….....70
III-3-les conditions aux limites……..…….…….....……..…….....71
III-4-solution et exécution ……...……..…….…….....……..…….....73
III-5-Propriétés d'eau et de lait. ...……..…….…….....……..…….....75
III-7-Lire les résultats……..……..…….…….....……..…….....76
IV-Conclusion……...……..…….…….....……..…….....77

Chapitre IV : Résultats et discussion

I-Introduction ……...……..…….....……..…….....78

II-Les profils dans un milieu complètement fluide……...……..…….....79

II-1-Profil de température ……....……..…….....……..…….....79

II-2-Profil de vitesse ……...……..…….....……..…….....80

II-3-Profil du facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente ……...……..…….....80

III-Les profils dans un milieu fluide avec encarassement……..…….....81

III-1-Profil de la température ……....……..…….....……..…….....81

III-2-Profil de la vitesse ……...……..…….....……..…….....82

III-3-Profil du facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente avec un milieu poreux 82
IV-Etude comparative entre le milieu fluide et le milieu fluide avec l'encrassement.....83

IV-1-Profil de la température ……...…….…….....83

IV-2-Profil de la vitesse ……...……...…….…….....84

IV-3- Le profil du facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente ……...…….....84

V-Les profils dans un milieu complètement fluide avec la présence de déflecteurs côté lait ….....84

V-1-Profil de température ……...…….…….....85

V-2-Profil de vitesse……...…….…….....86

VI-Les profils dans un milieu fluide avec encarassement avec la présence du déflecteur coté lait.....86

VI-1-Profil de la température……...…….…….....86

VI-2-Le profil de la vitesse ……...……...……...…….…….....87

VII-Etude comparative entre le milieu fluide avec l'encrassementavec la présence et l'absence de déflecteurs coté lait ……...……...……...…….....87

VII-1-le profil de la température ……...……...…….…….....87

VII-2-Profil de la vitesse……...……...……...……...…….....88

Conclusion général……...……...……...……...…….....89

Réfereces bibliographique……...……...……...……..V

Annexes ……...……...……...……...…….....VI

- **Chapiter I :Le lait, les laits commercialises.Traitement thermique**
- Figure I.1: Composition de la matière grasse du lait ……..……...….page : 6
- Figure I.2: Structure d'une sub-micelle caséique……...…….….page : 7
- Figure I.3 : Choix d'un traitement thermique (la zone hachurée recouvre les combinaisons temps température qui permettent de détruire les germes sans provoquer le août de cuit dans le lait)….page : 22
- Figure I.4 : Schema d'une installation de pasteurisation ……..…….....….page : 24
- **Chapiter II :Les échangeurs de chaleur & encrassement**
- Figure.II.1 : Classification des échangeurs thermiques (à surface) en fonction de la technologie de fabrication ……...……...…….……...……....….page : 31
- Figure.II.2 : Répartition en pourcentage des recettes par type d'échangeur sur le marché totale de l'échangeur en Europe (données 1998) ……..…...……..…...……....….page : 31
- Figure.II.3 : Représentation simplifiée d'un échangeur de chaleur……..……....….page : 33
- Figure.II.4:Représentation du diagramme Température-Puissance pour des échanges monophasique/monophasique……..……..……...……....….page : 34
- Figure.II.5:Représentation du diagramme Température-Puissance pour un échange de type Evaporation/Monophasique.……..……..…….……....……....….page : 36
- Figure.II.6: Représentation du diagramme Température-Puissance pour un échange de type Condensation/Monophasique……..……..……....…….....….page : 37
- Figure.II.7: Représentation du diagramme Température-Puissance pour un échange de type Evaporation/Condensation……..……..……....……..…....….page : 38
- Figure II.8: Schématisation des différentes résistances thermiques d'une paroi.....…….page : 41
- Figure.II.9:Échangeur de chaleur et tube-chaleur: échangeur de chaleur 1/2 et b) échangeur de chaleur 2/4 …….....….page : 43
- Figure.II.10 : Types de déflecteurs et de plaques d'échangeur et échangeurs de tubes-chaleur:

a) chicanes de disque.b) déflecteurs segmentaires .c) chicanes d'orifice.....page : 44

- Figure .II.11: Différentes géométries de plaques d'échangeurs à surface primaire……..…..page : 45
- Figure.II.12 : Échangeur brasé……..……..…….....….page : 46
- Figure.II.13:Échangeur à plaque et joint……...……....….page : 46
- Figure.II.14 : Principe de fonctionnement d'un échangeur à plaques…….....….page : 47
- Figure.II.15: La circulation des fluides est latérale……...……....….page : 47
- Figure.II.16 :La circulation des fluides est diagonale……...……....….page : 48
- Figure II.17 : Les différentes couches d'encrassement……..……...……....….page : 54
- **Chapiter III : Modélisation et simulation de l'encrassement et présentation d' ANSYS**
- Figure.IV.1: Schéma de principe de l'installation…….....……....……..….....page : 55
- Figure .IV.2: Cycle de Pasteurisation du Lait…..…….……...……..…..….....page : 56

- Figure IV.3: Arrangement des plaques de l'échangeur de pasteurisation et sens de circulation des fluides ……..……..……..…….…….....page : 57
- Figure IV.4: Schématisation de la direction de l'écoulement entre deux plaques..... .....page : 62
- Figure III.1:schéma representative de l'interface en preprocessor. ……..……...….page : 69
- Figure III.2:schéma represente le substrat de surfaces déflecteurs. ……..……..…..….page : 70
- Figure III.3:schéma representatif de l'interface pour sélectionner le modèle mathématique.……...page : 70
- Figure III.4:schéma represente l'etape de maillage…….…….....page : 71
- Figure III.5:Les vitesses……..…….....page : 72
- Figure III.6:La pression. ……..……..…….....page : 72
- Figure III.7:Les températures. ……..……....…….....page : 73
- Figure III.8:Les caractéristiques de l'écoulement. ……...……..…….....page : 73
- Figure III.9:Le nombre d'itération pour l'exécution. ……..….....…….....page : 74
- Figure III.10:Les propriétés de fluide……...……..…...……..…....page : 74
- Figure III.11:pour sélectionner les propriétés d'eau et de lait. ……...…....page : 75
- Figure III.12:Les données del'eau et du lait. ……..…….....page : 75
- Figure III.13:Exécutiondu programme Ansys. ……..……..…….…..….....page : 76
- Figure III.14:Affichage des résultats. ……..……..……..…..…….....page : 76
- **Chapiter IV : Résultats et discussion**
- Figure V.1: Ecoulement dans un canal à section rectangulaire. …..……..…...….....page : 78
- Figure V.2: Ecoulement dans un canal à section rectangulaire à la présence de déflecteurs..……...page : 78
- Figure V.3 : Variation du profil de température dans lait. ……..…..…..……....page : 79
- Figure V.4: Variation du profil de vitesse à la longue de canal……..…....….....page : 80
- Figure V.5:Variation du facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente.....page : 80
- Figure V.6: La variation de la température à la longue de canal. ……..…..…....page : 81
- Figure V.7: Variation du profil de vitesse. ……. ……..…..….....page : 82
- Figure V.8: Facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente avec un milieu poreux…....page : 82
- Figure V.9: Evolution de la température avec et sans dépôt……..……..….....page : 83
- Figure V.10: Evolution de la vitesse avec et sans dépôt…..……..……..…….....page : 84
- Figure V.11: Evolution du facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente avec et sans dépôt ……..…..page : 85
- Figure V.12 : Variation du profil de température dans lait. …..……..…….....page : 85
- Figure V.13: Variation du profil de vitesse à la longue de canal…..…..…….....page : 86
- Figure V.14: La variation de la température à la longue de canal. ……..…..…….....page : 86
- Figure V.15: Variation du profil de vitesse. …..…….....page : 87
- Figure V.16: Evolution de la température dépôtavec et sans déflecteurs coté lait.....page : 88
- Figure V.17: Evolution de la vitesse dépôtavec et sans déflecteur coté lait …….....page : 88

- **Chapiter I :Le lait, les laits commercialises.Traitement thermique**

- Tableau I.1 : Composition moyenne du lait……...……..….page : 4
- Tableau I.2 : Composition moyenne en % du lait de vache, femme, brebis et chèvre.....page : 5
- Tableau I.3 : Classification des protéines……..…..….....page : 9
- Tableau I.4 : Composition minérale du lait de vache……..…….…….....page : 10
- Tableau I.5 : Composition vitaminique moyenne du lait cru..……..…...…..page : 11
- Tableau I.6 : Caractéristiques des principaux enzymes du lait..…….…..page : 12
- Tableau I.7: Composition des laits en poudre (% m/m)…….……..…...…...page :20
- Tableau I.8: Composition des laits en poudre (% m/m)……..……..…...…...page :24

1. SYMBOLE DES LETTRES

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°C
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 °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	$m^2.°C/w$
R_d^*	La résistance asymptotique du dépôt encrassant	$m^2.°C/w$
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
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

2. SYMBOLES GRECQUES

Symbole	Désignation	Unité
μ_0	Viscosité dynamique de l'eau	kg/m.s
μ	Viscosité dynamique du mélange,	kg/m.s
ρ	La masse volumique	kg/m^3
λ	La conductivité thermique	W/m.k
μ	La viscosité dynamique	kg/m.s
ν	La viscosité cinématique	m^2/s
μ_t	La viscosité turbulente	Pa.s
e_p	Epaisseur du milieu poreux	m
k	Energie cinétique turbulente	m^2/s^2
ε	Dissipation turbulente	m^2/s^3
ϕ	La porosité	N/s^2
ϕ^*	Densité du flux massique	$Kg/m^2/s$
Φ	Flux massique	$m^2.K/w$

3. LISTE D'ABREVIATIONS

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

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

De même, l'augmentation du coût de l'énergie a entraîné celle des quantités de chaleur récupérées. Trois causes principales, liées à la conception des échangeurs à plaques, expliquent qu'ils fournissent de meilleurs coefficients généraux d'échange que les échangeurs tubulaires et, par conséquent, qu'ils exigent pour un programme thermique donné, des surfaces d'échange moindres . Il s'agit: - des faibles valeurs de diamètre hydraulique nominal qui se situent entre 5 et 10 mm alors que des tubes de diamètre inférieur à 20 mm (3/4 de pouce) ne sont jamais utilisés industriellement ; de la faible épaisseur des parois d'échange que les techniques actuelles d'emboutissage permettent d'obtenir. Elles sont comprises entre 0,6 et 0,8 mm pour les plaques contre 1 à 1,5 pour des tubes ; de l'augmentation de turbulence, à débit constant, provoquée par la structure ondulée des plaques qui conduit à des coefficients de films améliorés. Toutefois, leur utilisation de plus en plus répandue pour la réalisation des traitements thermiques pose des problèmes techniques difficiles à résoudre notamment dans l'industrie laitière. Les perturbations des régimes thermique et hydrodynamique dues aux propriétés encrassantes du lait au cours de La pasteurisation.

La pasteurisation est une technique utilisée très fréquemment en agroalimentaire. L'objectif est d'allonger de façon significative la durée de conservation de lait. La pasteurisation est un traitement thermique à des températures comprises entre 60 et 100°C ayant pour but de détruire la totalité des micro-organismes pathogènes non sporulés et de réduire significativement la flore végétative présente dans un produit. C'est un procédé de conservation limité pour lequel le produit doit être conditionné hermétiquement et réfrigéré.

Cependant, durant le traitement thermique du lait, certains de ses constituants, particulièrement la protéine β-lactoglobuline, deviennent instables thermiquement, subissant une altération d'ordre chimique dont les produits forment un dépôt sur les parois de l'équipement. Le phénomène d'encrassement dans l'industrie agroalimentaire est d'une importance primordiale car en plus de la détérioration des équipements,

l'encrassement affecte aussi la qualité bactériologique du produit final. Cette étude est une contribution à la modélisation 2D de l'encrassement par le lait dans un canal d'un échangeur de chaleur à plaques.

On s'intéresse à l'exploitation, à la confirmation et l'analyse de l'ensemble des résultats numérique de l'étude de l'encrassement des échangeurs de chaleur en l'absence et la présence de déflecteurspar un programme ANSYS d'un modèle physique établi préalablement dans un travail antérieur.

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 de 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 à deux équations ($\kappa - \varepsilon$) et de quantifier la résistance d'encrassement au cours du temps.

Dans ce but, le projet 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 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. Et présentation ANSYS.
- Le quatrième chapitre porte sur la présentation des résultats et leurs interprétations.

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

I-LE LAIT

I-1-définition

Le lait était défini en 1908 au cours du congrès international de la répression des fraudes à Genève comme étant « Le produit intégral de la traite totale et ininterrompue d'une femelle laitière bien portante ,bien nourrie et nom surmenée. Le lait doit être recueilli proprement et ne doit pas contenir du colostrum » (Poucheon et Goursaud, 2001 [1]).

Selon Aboutayeb (2009) [2], le lait est un liquide blanc, opaque, de saveur légèrement sucrée, constituant un aliment complet et équilibré, sécrété par les glandes mammaires de la femme et par celles des mammifères femelles pour la nutrition des jeunes. Le lait cru est un lait qui n'a subi aucun traitement de conservation sauf la réfrigération à la ferme. La date limite de vente correspond au lendemain du jour de la traite. Le lait cru doit être porté à l'ébullition avant consommation (car il contient des germes pathogènes).

Il doit être conservé au réfrigérateur et consommé dans les 24 heures (Fredot, 2006) [3]. Jeantet et Coll. (2008) [4] rapportent que le lait doit être en outre collecté dans de bonnes conditions hygiéniques et présenter toutes les garanties sanitaires. Il peut être commercialisé en l'état mais le plus souvent après avoir subi des traitements de standardisation lipidique et d'épuration microbienne pour limiter les risques hygiéniques et assurer une plus longue conservation.

I-2-La composition du lait

Franworth et Mainville (2010) [5] évoquent que 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. Les laits sont les seuls aliments naturels complets qui existent, chacun d'eux étant adapté à la race qu'il permet de développer (Mittaine I, 1980) [6]. Selon Favier (1985) [7], le lait est une source importante de protéines de très bonne qualité, riches en acides aminés essentiels, tout particulièrement en lysine qui est par excellence l'acide aminé de la croissance. Ses lipides, caractérisés par rapport aux autres corps gras alimentaires par une forte proportion d'acides gras à chaîne courte, sont beaucoup plus riches en acides gras saturés qu'en acides gras insaturés. Ils véhiculent par ailleurs des quantités appréciables de cholestérol et de vitamine A ainsi que de faibles quantités de vitamine D et E.

Les principaux constituants du lait par ordre croissant selon Poucheon et Goursaud (2001) [1] sont :

- L'eau, très majoritaire
- Les glucides principalement représentés par le lactose
- Les lipides, essentiellement des triglycérides rassemblés en globules gras
- Les sels minéraux à l'état ionique et moléculaire
- Les protéines, caséines rassemblées en micelles, albumines et globulines solubles

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

La composition moyenne du lait entier est représentée dans le tableau 1.

Fredot (2006) [3] rappelle que le lait est constitué de quatre phases :

- Une émulsion de matières grasses ou phase grasse constituée de globules gras et de vitamines liposolubles (A,D).
- Une phase colloïdale qui est une suspension de caséines sous forme de micelle
- Une phase aqueuse qui contient les constituants solubles du lait (protéines solubles, lactose, vitamines B et C, sels minéraux, azote non protéique).
- Une phase gazeuse composée d'O_2, d'azote et de CO_2 dissous qui représentent environ 5 ٪ du volume du lait.

Tableau I.1 : Composition moyenne du lait entier (Fredot, 2006)) [3].

Composants	**Tenurs (g/100g)**
Eau	89.5
Dérivés azotes	3.44
Proteines	3.27
Caseine	2.71
Proteines solubles	0.56
Azote non proteique	0.17
Matieres 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 (Jensen,1995) [8]

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

I-2-1-Eau

D'après Amiot et Coll. (2002) [9],l'eau est le constituant le plus important du lait, enproportion. La présence d'un dipôle et de doublets d'électrons libres lui confère un caractère polaire. Ce caractère polaire lui permet de former une solution vraie avec les substances polaires telles que les glucides, les minéraux et une solution colloïdale avec les protéines hydrophiles du sérum. Puisque les matières grasses possèdent un caractère non polaire (ou hydrophobe), elles ne pourront se dissoudre et formeront une émulsion du type huile dans l'eauIlen est de même pour les micelles de caséines qui formeront une suspension colloïdale puisqu'elles sont solides.

I- 2-2-Matière grasse

Jeantet et Coll. (2008) [4] rapportent que la matière grasse est présente dans le lait sous forme de globules gras de diamètre de 0.1 à 10µm et est essentiellement constitué de triglycérides (98%). La matière grasse du lait de vache représente à elle seule la moitié de l'apport énergétique du lait. Elle est constituée de 65% d'acides gras saturés et de 35% d'acides gras insaturés. Elle renferme :

- une très grande variété d'acides gras (150 différents)
- une proportion élevée d'acides gras à chaînes courtes, assimilés plus rapidement que les acides gras à longues chaînes
- une teneur élevée en acide oléique (C18 :1) et palmitique (C16 :0)
- une teneur moyenne en acide stéarique (C18 :0)

La figure 1 présente un globule gras du lait. La membrane est constituée de phospholipides, de lipoprotéines, de cérébrosides, de protéines, d'acides nucléiques, d'enzymes et d'oligoéléments (métaux) et d'eau (Bylund,1995 [10]).

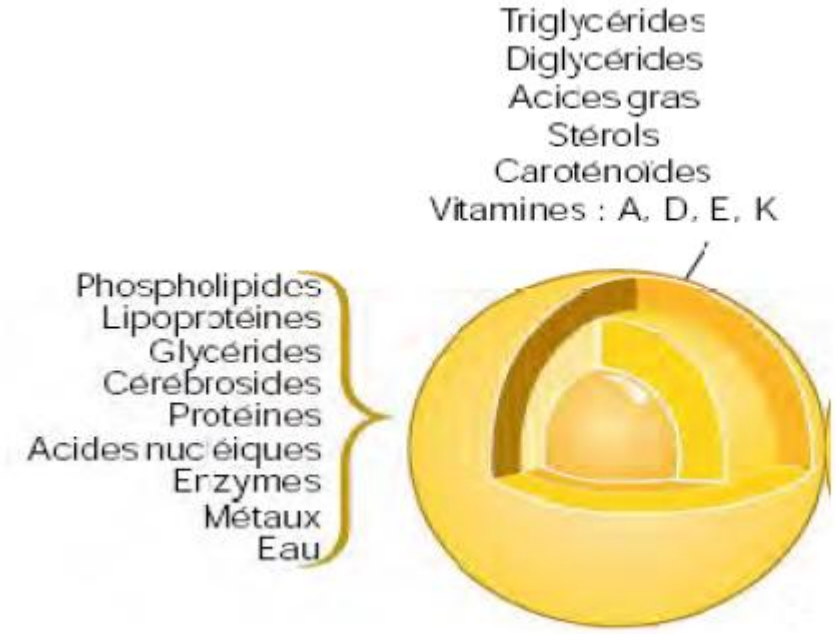


Figure I.1: Composition de la matière grasse du lait (Bylund,1995) [10]

Les phospholipides représentent moins de 1% de la matière grasse, sont plutôt riches en acides gras insaturés.

Le lait de vache est pauvre en acides gras essentiels (acide linoléique $C_{18:2}$ et acide linolénique $C_{18:3}$) par rapport au lait de femme (1.6% contre 8.5% en moyenne) (Jeantet et Coll., 2008) [4].

La matière grasse du lait est produite principalement à partir des acides gras volatils (acides acétique et butyrique). Le premier est formé principalement à partir des glucides pariétaux des fourrages (cellulose) et le second à partir des glucides rapidement fermentescibles (sucre de betterave). Une partie de la matière grasse du lait provient de la mobilisation des réserves lipidiques de la vache (jusqu'à 60 kg). Sous certaines conditions, des graisses alimentaires peuvent également contribuer à la formation de la matière grasse du lait(Stoll, 2003 [11]).

I-2-3-Protéines

Selon Jeantet et Coll (2007) [4], le lait de vache contient 3.2 à 3.5٪de protéines réparties en deux fractions distinctes :

- Les caséines qui précipitent à pH 4.6, représentent 80٪des protéines totales,
- Les protéines sériques solubles à pH 4.6, représentent 20٪des protéines totales.

La classification des protéines est illustrée dans le tableau 3.

A-Caséines

Jean et Dijon (1993) [12] rapportent que la caséine est un polypeptide complexe, résultatde la polycondensation de différents aminoacides, dont les principaux sont la leucine, la proline, l'acide glutamique et la sérine.

Le caséinate de calcium, de masse molaire qui peut atteindre 56000 g mol^{-1}, forme une dispersion colloïdale dans le lait. Les micelles protéiques ont un diamètre de l'ordre de 0,1µm (Figure 2).

La caséine native a la composition suivante : protéine 94٪, calcium 3٪, phosphore 2.2٪, acide citrique 0.5٪et magnésium 0.1٪(Adrian et Coll., 2004) [13].

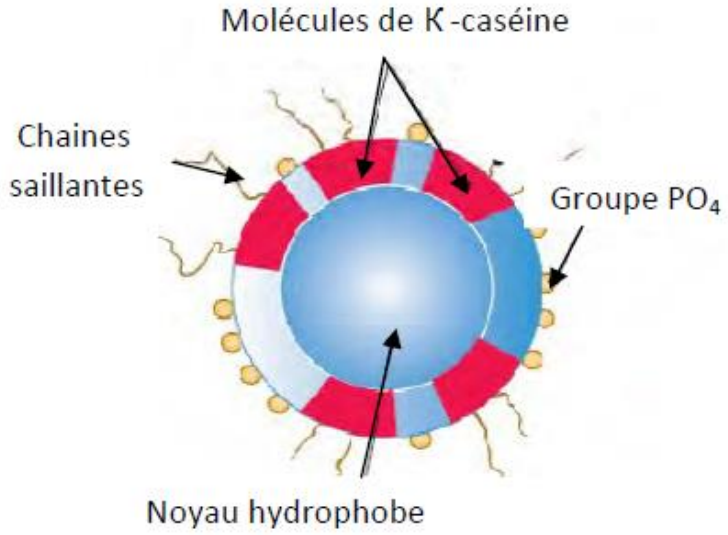


Figure I.2: Structure d'une sub-micelle caséique (Bylund, 1995) [10]

B-Protéines du lactosérum

Les protéines du lactosérum représentent 15 à 28% des protéines du lait de vache et 17% des matières azotées (Debry, 2001) [14].

Thapon (2005) [15], définit les protéines du lactosérum comme protéines d'excellente valeur nutritionnelle, riches en acides aminés soufrés, en lysine et tryptophane. Elles ont de remarquables propriétés fonctionnelles mais sont sensibles à la dénaturation thermique.

a- α-lactalbumine

L'α-lactalbumine est une protéine de 123 acides aminés comportant trois variantes génétiques (A, B, C). Métalloprotéine (elle possède un atome de calcium par mole) du type globulaire (structure tertiaire quasi sphérique). Elle présente environ 22% des protéines du sérum (Vignola, 2002) [16].

b- β-lactoglobuline

La β-lactoglobuline est la plus importante des protéines du sérum puisqu'elle en représenteenviron 55%. Son point isoélectrique est 5.1 la β-lactoglobuline est une protéine de 162 acides aminés comportant 7 variantes génétiques (A, B, C, D, E, F, G). Lors du chauffage lafixation d'une molécule de caséine ƙ etd'uneβ-lactoglobuline se fasse également par un pontdisulfure (Debry, 2001) [14].

c- Le sérum-albumine

Représente environ 7% des protéines du sérum. Elle est constituée de 582 résidus d'acides aminés. Comptant un seul variant génétique A est identique au sérum albumine sanguine (Vingola, 2002) [16].

d-Les immunoglobulines

Ce sont des glycoprotéines de haut poids moléculaire responsable de l'immunité. On distingue trois grandes classes d'immunoglobulines:IgA, IgG, IgM. Elles sont très abondantes dans le colostrum. Les immunoglobulines sont les protéines du lactosérum les plus sensibles à la dénaturation thermique(Thapon, 2005) [15].

d- Protéoses-peptones

Elles forment la fraction protéique soluble après chauffage du lait acidifié à pH 4.6 vers 95°C pendant 20 à 30 minutes. C'est un groupe hétérogène issu de la protéolyse par la plasmine de la caséine β (Debry, 2001) [14].

Tableau I.3: Classification des protéines (Brunner,1981 cité par Poucheon, 2001) [17]

NOMS	***% des protéines***	***Nombre d'AA***
CASEINES	75-85	
Caséineα_{s1}	39-46	199
Caséineα_{s2}	8-11	207
Caséine	25-35	209
Caséine k	8-15	169
Caséine g	3-7	
PROTEIN DU LACTOSERUM	15-22	
β-Lactoglobuline	7-12	162
α-Lactalbumine	2-5	123
Sérum-albumine	0.7-1.3	582
Immunoglobulines (G1, G2, A, M)	1.9-3.3	-
Protéoses-peptones	2-4	-

I-2-4-Lactose

Mathieu (1999) [18] évoque que le lait contient des glucides essentiellement représentés par le lactose, son constituant le plus abondant après l'eau. Sa molécule $C_{12}H_{22}C_{11}$, est constituée d'un résidu galactose uni à un résidu glucose . Le lactose est synthétisé dans les cellules des acini à partir du glucose sanguin. Celui-ci est en grande partie produit par le foie.

Le lactose est quasiment le seul glucide du lait de vache et représente 99% des glucides du lait de monogastriques. Sa teneur est très stable entre 48 et 50 g/l dans le lait de vache. Cette teneur présente de faibles variations dans le sens inverse des variations du taux butyreux. Le lactose est un sucre spécifique du lait (Hoden et Coulon, 1991) [19].

I-2-5-Minéraux

Selon Gaucheron (2004) [20], le lait contient des quantités importantes de différents minéraux.

Les principaux minéraux sont calcium, magnésium, sodium et potassium pour les cations et phosphate, chlorure et citrate pour les anions (Tableau 4).

Tableau I.4 : Composition minérale du lait de vache (Jeantet et Coll,2007) [4]

Eléments minéraux	***Concentration (mg.kg^{-1})***
Calcium	1043-1283
Magnésium	97-146
Phosphate inorganique	1805-2185
Citrate	1323-2079
Sodium	391-644
Potassium	1212-1681
Chlorure	772-1207

I-2-6-Vitamines

Selon Vignola(2002) [16], 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 capable de les synthétiser (Tableau 5).

On distingue d'une part les vitamines hydrosolubles (vitamine du groupe B et vitamine C) en quantité constantes, et d'autre part les vitamines liposolubles (A, D, E et K) (Jeantet et Coll. 2008) [4].

TableauI. 5 : Composition vitaminique moyenne du lait cru (Amiot et Coll., 2002) [9]

Vitamines	***Teneur moyenne***
Vitamines liposolubles	
Vitamine A (+carotènes)	40µg/100ml
Vitamine D	2.4 µg/100ml
Vitamine E	100 µg/100ml
Vitamine K	5 µg/100ml
Vitamines hydrosolubles	
VitamineC (acide ascorbique)	2mg/100ml
Vitamine B_1 (thiamine)	45 µg/100ml
Vitamine B_2 (riboflavine)	175 µg/100ml
Vitamine B_6 (pyridoxine)	50 µg/100ml
Vitamine B_{12}(cyanocobalamine)	0.45 µg/100ml
Niacine et niacinamide	90 µg/100ml
Acide pantothénique	350 µg/100ml
Acide folique	5.5 µg/100ml
Vitamine H (biotine)	3.5 µg/100ml

I-2-7-Enzymes

Poucheon (2001) [1] définit les enzymes comme des substances organiques de natureprotidique, produites par des cellules ou des organismes vivants, agissant comme catalyseursdans les réactions biochimiques. Environ 60 enzymes principales ont été répertoriées dans lelait dont 20 sont des constituants natifs. Une grande partie se retrouve dansla membrane desglobules gras mais le lait contient de nombreuses cellules (leucocytes, bactéries) qui élaborentdes enzymes : la distinction entre éléments natifs et éléments extérieurs n'est donc pas facile (Tableau 6).

Tableau I. 6 : Caractéristiques des principaux enzymes du lait Vignola , 2002 [16]

Grouped'enzyme	***Classesd'enzymes***	***pH***	***Température (°C)***	***Substrats***
Hydrolases	***Estérases***			
	Lipases	8.5	37	Triglycérides
	Phosphatase alcaline	9- 10	37	Esters phosphoriques
	Phosphatase acide	4.0-5.2	37	Esters phosphoriques
	Protéases			
	Lysozyme	7.5	37	Parois cellulaire microbienne
	Plasmine	8	37	Caséines
Déshydrogénases	Sulfhydrile oxydase	*7*	37	Protéines, peptides
ou oxydases	Xanthine oxydase	*8.3*	37	Bases puriques
Oxygénases	Lactoperoxydase	*6.8*	*20*	Composés réducteurs+H_2O_2
	Catalase	*7*	*20*	H_2O_2

I-3-Facteurs influençant la composition du lait

Selon Coulon (1994) cité par Poucheon (2001) [21], la composition chimique du lait et ses caractéristiques technologiques varient sous l'effet d'un grand nombre de facteurs.

Ces principaux facteurs de variation sont bien connus, ils sont liés soit à l'animal (facteursgénétiques, stade de lactation, état sanitaire …) soit au milieu et à la conduite d'élevage(saison, climat, alimentation). Cependant, si les effets propres de ces facteurs ont étélargement étudiés, leurs répercussions pratiques sont parfois plus difficiles à interpréter.

La composition du lait est variable elle dépend bien entendu du génotype de la femelle laitière (race, espèce) mais l'âge, la saison, le stade de lactation, l'alimentation sont des facteurs qui peuvent avoir des effets importants sur la composition du lait (Poucheon et Goursaud, 2001) [1].

I-3-1-Variabilité génétique entre individus

D'après Poucheon et Goursad (2001) [1], il existe indéniablement des variabilités de composition entre les espèces et les races mais les études de comparaison ne sont pas faciles à mener, car les écarts obtenus lors des contrôles laitiers sont la combinaison des différences génétiques et des conditions d'élevage. Généralement les races les plus laitières présentent un plus faible taux de matières grasses et protéiques or le choix d'une race repose sur un bilan économique global. C'est pourquoi un éleveur a tendance à privilégier les races qui produisent un lait de composition élevée.

Il existe ainsi une variabilité génétique intrarace élevée, c'est pourquoi une sélection peut apporter un progrès.

I-3-2-Stade de lactation

Les teneurs du lait en matières grasses et protéiques évoluent de façon inverse à la quantité de lait produite. Elles sont élevées en début de lactation (période colostrale), elles chutent jusqu'à un minimum au 2^{eme} mois de lactation après un palier de 15 à 140 jours.

Les taux croissent plus rapidement dans les trois derniers mois de lactation (Poucheon et Goursaud, 2001) [1].

I-3-3-Age ou numéro de lactation

Selon Poucheon et Goursaud (2001) [1], on peut considérer que l'effet de l'âge est très faible sur les quatre premières lactations. On observe une diminution du TB (TB : taux butyreux en g/Kg) de 1% et du taux protéique de 0.6%.

I-3-4-Facteurs alimentaires

L'alimentation n'est pas un des principaux facteurs de variation du lait mais elle est importante car elle peut être modifiée par l'éleveur. Une réduction courte et brutale duniveau de l'alimentation se traduit par une réduction importante de la quantité de lait produite et une baisse variable du taux protéique mais la mobilisation des graisses corporelle sentraine une augmentation très importante du taux butyreux associée à une modification de la composition en matière grasse (augmentation de la part des acides gras à chaines longues). Avec un apport de fourrages à volonté un niveau d'apports azotés conduit à un meilleur tauxazotée avec un accroissement de l'apport non protéique (ANP) et des caséines.

L'addition dematières grasses dans la ration induit le plus souvent une baisse du TB. Elle est due à une perturbation des fermentations ruminales, mais elle influence la composition en AG de lamatière grasse du lait (Poucheon et Goursaud,2001) [1].

I-3-5-Facteurs climatiques et saisonniers

D'après Poucheon et Goursaud (2001) [1], la saison a une influence importante qui se rajoute aux autres facteurs (alimentation, stade de lactation, âge ….) de façon immuable, le TB passe par un minimum en juin – juillet et par un maximum à la fin de l'automne.

La teneur en protéines passe par deux minimums un à la fin de l'hiver et l'autre au milieu de l'été et par deux maximums à la mise à l'herbe et à la fin de la période de pâturage.

I-4-Propriétés physico-chimiques du lait

Les principales propriétés physico-chimiques utilisées dans l'industrie laitière sont la masse volumique et la densité, le point de congélation, le point d'ébullition et l'acidité (Amiot et Coll., 2002) [9].

I-4-1-Masse volumique

Selon Pointurier (2003) [22], 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. Comme la masse volumique dépend étroitement de la température, il est nécessaire de préciser à quelle température (T) elle est déterminée. La masse volumique du lait entier à 20°C et en moyenne de 1030 $Kg.m^{-3}$.

La densité d'un liquide est une grandeur sans dimension qui désigne le rapport entre la masse d'un volume donné du liquide considéré et la masse du même volume d'eau.

Comme la masse volumique de l'eau à 4°C est pratiquement égale à 1000Kg.m-3, la densité du lait à 20°C par rapport à l'eau à 4°C est d'environ 1.030 ($d_{20/4}$). Il convient de signaler que le terme anglais «density» prête à confusion puisqu'il désigne la masse volumique et non la densité (Pointurier, 2003) [22].

I-4-2-Point de congélation

Neville et Jensen (1995) [23]ont pu montrer que 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, celle-ci est également la température de congélation du sérum sanguin. On constate de légères fluctuations dues aux saisons, à la race de la vache, à la région de production. On a par exemple signalé des variations normales de - 0.530 à - 0.575°C. Le mouillage élève le point de congélation vers 0°C, puisque le nombre de molécules, autres que celles d'eau, et d'ions par litre diminue.

D'une manière générale tous les traitements du lait ou les modifications de sa composition qui font varier leurs quantités entrainent un changement du point de congélation (Mathieu,1999) [18].

I-4-3-Point d'ébullition

D'après Amiot et Coll. (2002) [9], on définit 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.

I-4-4-Acidité du lait

Selon Jean et Dijon (1993) [12], 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 du lait est déterminée par dosage par une solution d'hydroxyde de sodium en présence de phénolphtaléine. Bien que l'acide lactique ne soit pas le seul acide présent, 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.

I-5-Qualité organoleptique du lait

Vierling (2003) [24] rapporte que l'aspect, l'odeur, la saveur, la texture ne peuvent être précisés qu'en comparaison avec un lait frais.

I-5-1- La couleur

Le lait est de couleur blanc mat, qui est due en grande partie à la matière grasse, aux pigments de carotène (la vache transforme le B-carotène en vitamine A qui passe directement dans le lait

Fredot, (2005) [25]. Reumont (2009) [26] 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-5-2- L'odeur

Selon Vierling (2003) [24], l'odeur est caractéristique le 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 alorsune forte odeur), à la conservation (l'acidification du lait à l'aide de l'acide lactique lui donne une odeur aigrelette).

I-5-3- La saveur

La saveur du lait normal frais est agréable. Celle du lait acidifié est fraiche et un peu piquante. Les laits chauffés (pasteurisés, bouillis ou stérilisés) ont un goût légèrement différent de celui du lait 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 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 (Thieulin et Vuillaume ,1967) [27].

I-5-4-La viscosité

Rheotest (2010) [28] 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.

II-LES LAITS COMMERCIALISÉS

Le terme “Laits de consommation” désigne les différentes catégories de laits vendus à l’état liquide. Ces laits sont présentés obligatoirement en emballages fermés jusqu’à la remise au consommateur (Cnerna,1981) [29]. D'après Vierling (1999) [30], les laits de consommation sont des laits destinés à être consommés en l’état.

L’évolution des processus technologiques, des techniques de conservation et de distribution a permis l’élaboration d’une large gamme de lait de consommation qui se distinguent par leur composition, leur qualité nutritionnelle et organoleptique et leur durée de conservation (Jeantet et Coll. , 2008) [4].

II-1-Lait pasteurisé

Harding (1995) [31] évoque que la pasteurisation a pour objectif la destruction de toutes les formes végétatives des micro-organismes pathogènes du lait sans altérer la qualité chimique, physique et organoleptique de ce dernier.

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) [32].

D’après Jeantet et Coll. (2008) [4], on distingue trois types de traitements :

- ***Pasteurisation basse (62-65°C/30min) :***elle n’est réalisable qu’en batch et est abandonnée en laiterie
- ***Pasteurisation haute (71-72°C/15-40s):*** ou HTST (high temperature short time) : elle est réservée aux laits de bonne qualité hygiénique. Au plan organoleptique et nutritionnel, la pasteurisation haute n’a que peu d’effets. Au niveau biochimique, la phosphatase alcaline est détruite par contre la peroxydase reste active et les taux de dénaturation des protéines sériques et des vitamines sont faibles. La date limite de consommation(DLC) des laits ayant subi une pasteurisation haute est 7 jours après conditionnement (bouteille en verre ou en carton, polyéthylène ou aluminium).
- ***Flash pasteurisation (85-90°C/1-2s)*** : elle est pratiquée sur les laits crus de qualité moyenne ; la phosphatase et la peroxydase sont détruites.

II-2-Lait stérilisé

Lesur et Melik (1999) [33] ont montré que selon le procédé de stérilisation, on distingue le lait stérilisé et le lait stérilisé UHT. Ces laits doivent être stables jusqu'à la date limite de consommation.

- ***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. La stérilisation est réalisée à une température de 100-120°C pendant une vingtaine de minutes.
- ***Lait stérilisé UHT*** : C'est un lait traité par la chaleur , qui doit détruire les enzymes ,les microorganismes pathogènes , et conditionné ensuite aseptiquement dans unrécipient 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 [33].

II-3-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 [34].

Selon Jeantet et Coll. (2008) [4], la stabilité du lait peut être assurée par réduction de l'activité de l'eau (a_w) 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'a_w.

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% (Vierling, 2003) [24].

II-4-Lait aromatisé

Vierling (1999) [30] 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.

Ce sont tous des laits stérilisés auxquels on a ajouté des arômes autorisés (notamment cacao, vanille, fraise)[33].

II-5-Lait fermenté

D'après Fredot (2006) [3], la dénomination lait fermenté est réservée au produit laitier préparé avec des laits écrémés ou non ou des laits concentrés ou en poudre écrémés ou non sous forme liquide, concentré ou en poudre. Ils pourront être enrichis avec des constituants tels que la poudre de lait ou les protéines de lait. Le lait subit alors un traitement thermique au moins équivalent à la pasteurisation et est ensemencé avec des microorganismes caractéristiques de chaque produit. La coagulation des laits fermentés ne doit pas être obtenue par d'autres moyens que ceux qui résultent de l'activité des microorganismes qui sont pour la plupart du pro biotique c'est-à-dire bénéfique pour la santé.

Pour Brule (2004) [35], le lait fermenté le plus consommé dans les pays occidentaux est le yaourt.

De nombreux autres produits sont arrivés sur le marché : laits fermentés pro biotiques, laits fermentés de longue conservation (pasteurisés, UHT, lyophilisés) et produits « plaisirs » (à boire, à sucer, pétillants ou glacés).

La dénomination "yaourt" ou "yoghourt" est strictement réservée aux laits dont la fermentation est obtenue par des bactéries lactiques Lactobacillus bulgaricus et Streptococcus thermophilus. Ces bactéries doivent être ensemencées simultanément et se trouver vivantes dans le produit fini à raison d'au moins 10 millions de bactéries par gramme et ceci jusqu'à la date limite de consommation [36].

II-6-Lait en poudre

Pfiffner (2009) [37] 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} s. avaient donné des produits insatisfaisants à la réhydratation. C'est au début du XX^{e} s. que l'on mit au point des procédés aptes à 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% (Tableau 7).

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 et la poudre de lait écrémé [38].

TableauI.7: Composition des laits en poudre (% m/m) [39]

Corposants	**Lait entier**	**Lait partiellement écrémé**	**Lait écrémé**
Matiére grasse laitiére			
Minimum	26	>1.5	
Maximum	<40	<26	1.5
Eau maximum	**5**	**5**	**5**

III.TRAITEMENT THERMIQUE DU LAIT [40]

Dans le but d'assainir le lait et de prolonger sa durée de conservation, on lui applique généralement un traitement thermique qui détruit partiellement ou complètement sa flore microbienne.

Lorsque l'on soumet une population microbienne à l'action d'une température donnée pendant un temps déterminé, une certaine proportion de cette population est détruite. Ce fait se traduit par deux lois expérimentales. La première loi montre qu'à l'intérieur d'une même espèce et pour un traitement thermique déterminé, le nombre de survivants est fonction de la durée du traitement. La seconde loi fait apparaître que pour une même espèce, et pour obtenir un taux de réduction donné de la population, la durée de traitement nécessaire est fonction de la température de traitement. Ces deux fonctions sont des exponentielles. Leur représentation graphique est la «courbe de survie» pour la première et la courbe du temps de réduction pour la seconde. Une représentation plus commode consiste à porter en ordonnée le logarithme du temps de chauffage et en abscisse la température: on obtient dès lors une droite dite «de survie».

Les lois de destruction des micro-organismes sont de même nature que celle régissant la dégradation des molécules biochimiques du lait. Les effets du chauffage sur les micro-organismes, les enzymes, les protéines et autres constituants du lait, qui déterminent notamment son goût, son aspect, sa valeur nutritive, etc., résultent de l'accroissement de la vitesse de certaines réactions. Des réactions se faisant très lentement à la température ordinaire peuvent s'accomplir à une vitesse très grande, sous l'action de températures élevées. Il a été établi que chaque fois que la température augmente de 10 °C, la vitesse de réaction est multipliée par un facteur à peu près constant, appelé «coefficient de température». Ce coefficient est de 5 à 10 pour la destruction des spores microbiennes et de 10 à 25 pour la destruction des bactéries.

Il existe, pour chaque espèce microbienne ou chaque souche, ou pour chaque réaction, une droite de combinaisons temps-température délimitant deux domaines. Dans celui de droite apparaît la modification considérée. Pour déterminer les combinaisons temps-température, on établit les courbes de destruction des micro-organismes, ainsi que celles de l'apparition des modifications que l'on veut éviter (par exemple,

apparition du goût cuit du lait). Le choix de ces combinaisons est d'autant plus réduit que l'on veut détruire un grand nombre d'espèces microbiennes et d'enzymes tout en respectant l'état du milieu, en évitant des modifications du produit sur le plan organoleptique, nutritionnel et technologique.

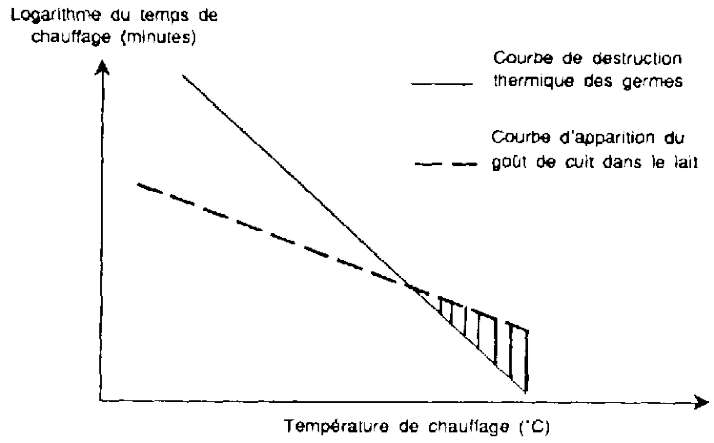
D'une manière générale, les hautes températures appliquées pendant un temps très court ont un effet plus puissant sur la destruction des microorganismes et des enzymes que sur les modifications des constituants du lait, ce qui justifie l'intérêt des traitements UHT. De plus, en assurant une montée en température et un refroidissement rapides, les procédés UHT évitent les effets cumulatifs des traitements thermiques et réduisent ainsi les modifications physicochimiques du lait.

Pour caractériser la cinétique de destruction d'une population d'une souche microbienne donnée, à une température donnée et dans un milieu défini, on utilise le «temps de réduction décimale» qui correspond à la destruction de 90 pour cent de la population microbienne, donc à la division par 10 (ou réduction décimale) de son effectif initial. Si, par exemple, il faut 2 minutes pour passer d'une population microbienne de 1 millions 100 000, il faut autant de temps pour passer de 100 000 à 10 000, ou de 10 000 à 1 000.

Le caractère de relativité de la destruction des micro-organismes par la chaleur montre que l'efficacité du traitement thermique est fonction du nombre initial de germes contenus dans le lait. On voit ainsi la nécessité pour assainir un lait, tout en respectant ses qualités originelles, qu'il soit peu chargé en microorganismes. D'où l'importance de conditions hygiéniques de récolte du lait puis de son refroidissement et de son traitement rapide.

L'efficacité du couple temps-température sur les micro-organismes dépend de plusieurs facteurs, dont:

- Le milieu. En solution aqueuse les germes, sont plus facilement détruits qu'en milieu gras (crème) ou déshydraté (lait en poudre). En milieu acide, ils sont plus aisément détruits. Plus le milieu est concentré en sucres, en sels et en protéines, plus la résistance des germes augmente.
- L'état de la population microbienne. La résistance à la chaleur varie avec les espèces et les souches. C'est ainsi que certaines souches d'Escherichia coli sont tuées en cinq minutes à 57 °C alors que d'autres résistent 60 minutes à cette température. Les formes végétatives sont en général très sensibles à la chaleur; beaucoup sont détruites en 15 secondes à 72 °C. Par contre, les formes sporulées nécessitent un chauffage supérieur à 100 °C pendant 20 ou 30 minutes. Certaines enzymes microbiennes, notamment des Pseudomonas, peuvent ne pas être inactivées par des traitements thermiques de 5 minutes à 130 °C



Source: D'après Veisseyre, 1975.

FIGURE I.3 : Choix d'un traitement thermique (la zone hachurée recouvre les combinaisons temps-température qui permettent de détruire les germes sans provoquer le août de cuit dans le lait) [40].

III-1-Procédés de traitement thermique

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

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

III-1-1-Pasteurisation

A la suite de nombreux travaux, on a défini les combinaisons temps température capables d'assurer la destruction des germes pathogènes. On s'est fondé pendant longtemps sur la destruction du plus thermorésistant, à savoir le bacille tuberculeux, qui nécessite un chauffage de 12 secondes à 72 °C. Actuellement, on prend en compte le bacille Coxiellaburnetti qui nécessite une durée de chauffage de 15 secondes à 72 °C.

A la suite des travaux de Dahlberg(1932), un certain nombre de combinaisons temps-température assurant une destruction équivalente ont été sélectionnées compte tenu d'une marge suffisante de sécurité.

Le lait pasteurisé contient toujours une flore résiduelle (bactéries lactiques, germes saprophytes variés) dont l'importance est notamment lieé à la charge microbienne initiale. Son développement doit être empêché en réfrigérant le lait immédiatement et rapidement après chauffage à une température de +2 °C à +4 °C. Même à ces températures, le lait n'est pas totalement stabilisé en raison de la présence éventuelle de germes psychrotrophes thermorésistants.

Pour conserver au lait pasteurisé son caractère hygiénique, il est indispensable de le soustraire aux recontaminations qui ne manquent pas de se produire au cours de la distribution du lait en vrac et qui rendent alors nécessaire son ébullition avant consommation. C'est pourquoi, dès sa réfrigération, le lait pasteurisé doit être conditionné en emballages de détail (bouteilles en verre ou en plastique, cartons, sachets plastique).

La pasteurisation est définie par un chauffage à 72 °C maintenu pendant 15 ou 20 secondes. Elle est souvent désignée sous le nom de procédé high temperature short time ou HTST, c'est-à-dire procédé à haute température et de courte durée. Ce type de pasteurisation est utilisé dans le monde entier. Toutefois, lorsque le lait cru est de qualité microbiologique médiocre ou mauvaise, il faut augmenter la température et le temps de chauffage. C'est ainsi que celle-ci peut atteindre ou dépasser 80 °C avec une durée de chambrage atteignant 1 ou 2 minutes.

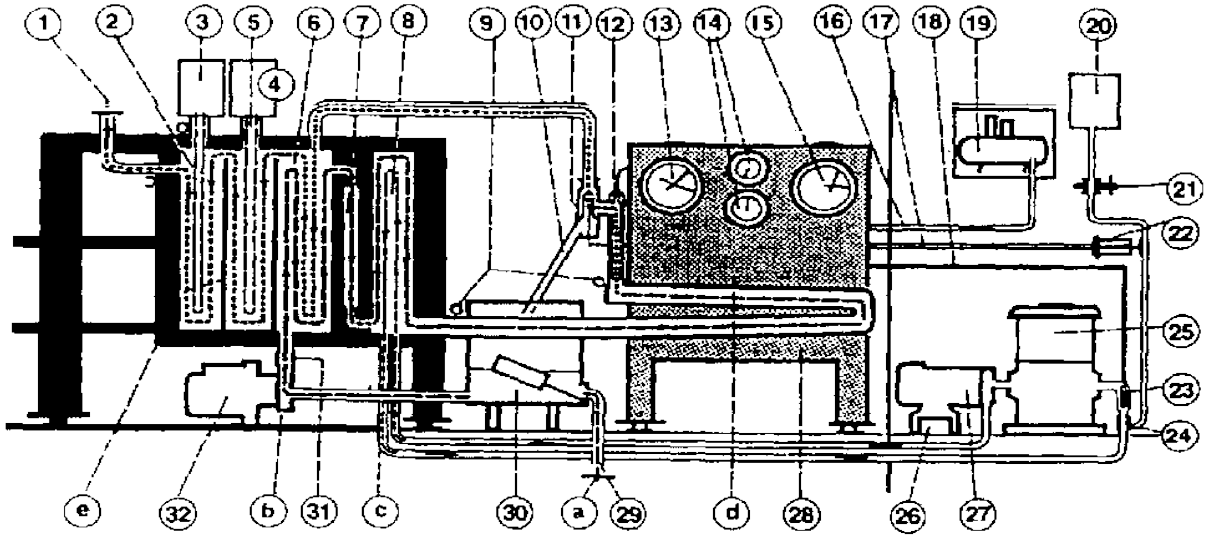
L'effet de la pasteurisation HTST bien conduite est tout à fait négligeable sur les qualités organoleptiques et nutritionnelles du lait. Ce n'est que lorsque le traitement est plus sévère qu'apparaissent des modifications défavorables touchant particulièrement la saveur (goût de cuit).

La plupart des appareils utilisés sont constitués par un ensemble de tubes ou plus généralement de plaques entre lesquelles les fluides circulent en continu à contre-courant. Une installation classique comprend les éléments ci-après:

- un échangeur récupérateur dans lequel le lait cru arrivant est réchauffé (vers 60-65 °C) par le lait chaud sortant de l'élément de pasteurisation chambrage.
- un réchauffeur ou pasteurisateur proprement dit dans lequel le lait arrivant de l'élément 1 est porté à la température de pasteurisation (par exemple 80 °C);
- un chambreur dans lequel le lait venant de l'élément 2 est maintenu à la température de pasteurisation (par exemple 80 °C) pendant le temps voulu (par exemple 20 secondes);
- un échangeur récupérateur (qui est l'élément 1) où le lait venant de l'élément 3 subit un refroidissement (par exemple vers 35 °C) par échange avec le lait cru froid entrant;
- un réfrigérant (comprenant généralement deux sections, l'une d'eau froide, l'autre d'eau glacée ou de saumure) où le lait est refroidi à +3-+4 °C.

L'installation est complétée par divers appareils de contrôle (thermomètres) et de régulation du degré de chauffage et de sécurité (dispositif de déviation du lait insuffisamment chauffé). Elle peut être reliée à un nettoyeur centrifuge, à une écrémeuse, à un homogénéisateur et à un dégazeur. Un schéma d'une installation à plaques est donné à la figure 10.

Les normes et les prescriptions sanitaires concernant le lait pasteurisé varient selon les pays. En l'absence d'une réglementation, on peut toutefois considérer qu'un lait pasteurisé conditionné est de qualité satisfaisante quand, à la vente au consommateur, il présente les caractères ci-après:



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 :Schema d'une installation de pasteurisation [40]

Tableau I.8: Composition des laits en poudre (% m/m) [39]

Acidité	1,5 à 1,8 g/litre d'acide lactique
Stabilité à l'ébullition	
Epreuve de phosphatage	négative
Bactéries aérobies mésophiles à 30 °C	moins de 30 000/ml
Bactéries coliformes	moins de 10/ml
Escherichia coli	absence dans 1 ml
Antibiotiques et inhibiteurs	absence

Le lait pasteurisé destiné à être vendu en vrac, à la sortie du pasteurisateur, doit présenter les mêmes caractéristiques. Ensuite, il subit généralement, au cours de la distribution, des recontaminations qui lui font perdre les avantages du traitement thermique, et doit être bouilli avant d'être consommé.

On considère qu'un lait pasteurisé conditionné a une durée de conservation d'environ 8 jours, maintenu à la température de +4 °C à +6 °C. Toutefois, cette durée ne peut être atteinte que dans la mesure où:

- le lait cru n'était pas trop chargé en micro-organismes, notamment en thermorésistants psychrotrophes;
- le lait a subi effectivement en temps et en température le traitement thermique nécessaire;
- le lait n'est pas recontaminé au cours du refroidissement et des opérations diverses intervenant au cours du conditionnement.

III-1-2- Stérilisation

Elle a pour objectif la destruction totale des micro-organismes (y compris les spores), ainsi que des enzymes et des toxines. En fait, la destruction des germes dans les conditions de température et de durée appliquées de façon à altérer le moins possible le lait et notamment ses qualités organoleptiques risque de ne pas être absolue. Des micro-organismes vivants ou revivifiables peuvent subsister. Pour cette raison, le traitement de «stérilisation» vise, en pratique, à obtenir un produit restant stable au cours d'une longue conservation (de 5 à 6 mois), c'est-à-dire exempt de germes susceptibles de s'y développer et d'y provoquer des altérations. Parmi ces germes seuls les non pathogènes subsistent éventuellement, les plus thermorésistants d'entre eux étant détruits pour des combinaisons temps/température très inférieures. Dans le cas des spores, la plus résistante d'entre elles (celle de Clostridium botulinum, d'ailleurs très rare dans le lait), en admettant qu'elle ne soit pas tuée, ne trouverait pas dans le lait «stérilisé» des conditions permettant sa croissance. Ainsi, les risques de non-stérilité n'ont de conséquences éventuelles que sur la conservation du lait. C'est pourquoi la notion de «stérilité» (c'est-à-dire de stérilité absolue) est remplacée par celle de «stérilité commerciale». Bien entendu, cette stérilité n'est maintenue que si le lait est conditionné en récipients hermétiquement clos (récipients en verre, en métal, en matière plastique, en carton).

Le lait destiné à la stérilisation doit être de bonne qualité: peu chargé en micro-organismes et en enzymes thermorésistantes et stable à la chaleur. La stabilité au cours du chauffage varie avec les espèces (le lait de vache est plus stable que celui de chèvre ou de brebis) et avec les races.

Dans la plupart des méthodes modernes de stérilisation, il est recommandé de faire précéder ce traitement proprement dit d'une pasteurisation ou, mieux, d'un chauffage à haute température ou préstérilisation. Cette pratique a un double but:

- élimination d'une part importante des micro-organismes afin de procéder à la stérilisation dans des conditions thermiques moins sévères et de limiter ainsi les modifications du lait;
- amélioration de la stabilité du lait par formation d'un complexe caséine k/13- lactoglobuline et abaissement du pH au maximum de stabilité.

Une bonne méthode de préstérilisation consiste en un chauffage du lait en flux continu dans un appareil UHT à 130-140 °C pendant 3 à 4 secondes. 11 est ensuite refroidi vers 70-80 °C, homogénéisé puis envoyé à la stérilisation.

L'homogénéisation, indispensable avant la stérilisation des laits complets ou partiellement écrémés, consiste à projeter du lait à 70 °C environ sous forte pression (de 1 à 350 atmosphères) dans une tubulure obstruée par un clapet conique maintenu sur son siège par un ressort dont la tension est réglable. Pour s'écouler, le lait doit vaincre la résistance opposée par le clapet. Sous l'action du choc contre le clapet, du laminage entre celui-ci et son siège, et de la détente brutale du lait, il se produit un éclatement des globules et une stabilisation de l'émulsion de matière grasse. On distingue deux procédés de stérilisation:

- la méthode classique, qui consiste à stériliser le lait préalablement conditionné en récipients hermétiquement clos;
- la stérilisation en vrac ou en flux continu, suivie du conditionnement aseptique du lait.

❖ ***Stérilisation en récipients clos***

Méthode discontinue. Un premier procédé le plus simple, consiste à soumettre le lait préalablement mis en bouteilles hermétiquement bouchées à un chauffage à la vapeur, en autoclave, à 120 °C pendant une vingtaine de minutes. La montée et la descente en température sont progressives et lentes. Le goût et la couleur du lait sont altérés, sa teneur en vitamines hydrosolubles est diminuée. Lorsque le lait est fortement contaminé en spores bactériennes, sa stabilité n'est pas assurée.

La méthode est améliorée par l'emploi d'autoclaves rotatifs ou à paniers agités, ce qui accélère les échanges thermiques et permet l'application d'un traitement un peu moins sévère et ainsi de limiter les modifications des propriétés organoleptiques.

Malgré ces améliorations, les appareils fonctionnant de façon discontinue ont l'inconvénient de nécessiter une durée totale de traitement longue due à la lenteur de la montée en température et du refroidissement, ce qui, de plus, est défavorable à la qualité organoleptique du lait. Néanmoins, ils rendent de bons services pour de petites quantités de lait.

Méthode continue. Elle est utilisée lorsque les quantités de lait sont importantes. Les bouteilles sont rapidement portées à la température souhaitée. Dans le cas des bouteilles en verre ou des boîtes en métal, on utilise généralement l'appareil à pression d'eau ou stérilisateur hydrostatique. Celui-ci est constitué de trois colonnes verticales: une colonne ou chambre de stérilisation sous pression de vapeur reliée à l'atmosphère par deux colonnes d'eau symétriques faisant équilibre à la pression qui règne dans la chambre.

Les récipients sont introduits de façon continue dans des supports solidaires d'un transporteur à chaîne parcourant les trois colonnes. Certains appareils permettent leur agitation permanente. Ils passent dans la première colonne qui sert de réchauffeur; le lait y est amené de la température ambiante à environ 100 °C. Ils entrent ensuite dans la seconde, ou stérilisateur, où le lait est porté à une température comprise entre 110 et 120 °C selon la technique utilisée. Ils vont ensuite dans la troisième colonne où ils sont refroidis.

Le choix de la combinaison temps/température de stérilisation se fait entre deux techniques. L'une consiste en un chauffage pendant 40 minutes à 110 °C; l'autre, pendant 20 minutes à 115-120 °C. Dans tous les cas, il est recommandé de préstériliser le lait à 135-140 °C pendant 3 à 4 secondes.

Lorsque l'on utilise des bouteilles en matière plastique, on utilise généralement des appareils à surpression pneumohydrostatique qui évitent la déformation des récipients. Le lait peut atteindre une température de 127-130 °C.

❖ ***Stérilisation en vrac ou en flux continu***

Les procédés précédents ont l'avantage d'être relativement simples, y compris sur le plan mécanique. Cependant, ils nécessitent un chauffage long qui provoque des modifications, notamment du goût et de la couleur. En cherchant à les réduire, on risque alors des altérations d'origine microbienne et enzymatique.

Par contre, en chauffant le lait à température élevée (135-150 °C) pendant un temps très court (de 1 à 5 secondes), on assure la destruction des microorganismes et des enzymes sans endommager ses propriétés organoleptiques et biochimiques. Ce procédé n'est possible qu'en flux continu. Il s'est généralisé sous le nom de traitement Ultra-HauteTempérature ou UHT. Dans la préparation des laits liquides de consommation, il est utilisé:

- soit en préstérilisation, comme vu précédemment;
- soit plus généralement en stérilisation, lorsque celle-ci est suivie d'un conditionnement aseptique et seulement dans ce cas. Il est en effet pratiquement impossible de maintenir la stérilité d'un lait conditionné selon les méthodes utilisées pour le lait pasteurisé, car, au cours des manipulations de remplissage, même en travaillant très proprement, on récupère toujours quelques germes.

Les procédés UHT mettent en œuvre:

- soit le chauffage indirect dans des échangeurs tubulaires ou à plaques,
- soit le chauffage direct par contact du lait et de vapeur d'eau sous pression.

Le chauffage indirect se fait dans des échangeurs comparables à ceux utilisés pour la pasteurisation, mais adaptés aux conditions du traitement. Les appareils doivent être particulièrement bien étudiés et réalisés en

ce qui concerne, notamment, l'écoulement du lait, le transfert de la chaleur et l'homogénéité du chauffage. La température de chauffage est généralement limitée à 145 °C pendant 3 à 4 secondes.

Le chauffage direct se fait par mélange intime de lait et de vapeur, ce qui assure une élévation quasi instantanée de la température du lait vers 140-150 °C et le maintien de celle-ci pendant environ 2 secondes. Une partie de la vapeur se condense dans le lait, ce qui le dilue (d'environ 10 pour cent). Il est donc nécessaire de faire suivre le chauffage d'une évaporation permettant de ramener la matière sèche du lait à sa teneur initiale.

Le chauffage direct peut être réalisé selon deux procédés:

- soit par injection de vapeur dans le lait;
- soit par pulvérisation du lait dans la vapeur.

Les procédés UHT ne se justifient que pour de grosses quantités de lait. La conservation du lait UHT conditionné aseptiquement est en principe de 6 mois à température ambiante (20 °C). Dans les régions chaudes, elle est plus limitée; à 30 °C elle ne peut guère dépasser trois mois.

II.I.Introduction

Dans les sociétés industrielles, l'échangeur de chaleur est un élément essentiel de toute politique de maîtrise de l'énergie. Une grande part (90 %) de l'énergie thermique utilisée dans les procédés industriels transite au moins une fois par un échangeur den chaleur, aussi bien dans les procédés eux-mêmes que dans les systèmes de récupération de l'énergie thermique de ces procédés. On les utilise principalement dans les secteurs de l'industrie (chimie, pétrochimie, sidérurgie, agroalimentaire, production d'énergie, etc.), du transport (automobile, aéronautique), mais aussi dans le secteur résidentiel et tertiaire (chauffage, climatisation, etc.).

Ils constituent donc un des dispositifs clé du thermicien, et sont un composant quasi inévitable dans la maîtrise de l'énergie. Comptetenu de leurs multiples utilisations, les difficultés rencontrées par les utilisateurs d'échangeurs de chaleur sont diverses et variées. Toutefois, un des principaux problèmes de fonctionnement auxquels ils se heurtent a trait aux phénomènes d'encrassement [41].

II.I.1 Principal but et fonctions d'un échangeur thermique

La fonction principale de l'échangeur thermique est de transférer de l'énergie thermique d'un fluide vers un autre à des niveaux de températures distincts. Les fonctionnalités des échangeurs thermiques sont extrêmement diverses et variées : les principales en sont les suivantes :

La fonction principale de l'échangeur thermique est de transférer de l'énergie thermique d'un fluide vers un autre à des niveaux de températures distincts. Les fonctionnalités des échangeurs thermiques sont extrêmement diverses et variées : les principales en sont les suivantes [42]:

- Préchauffeur ou refroidisseur d'un liquide ou d'un gaz (air par exemple) pour lesquels de très nombreux exemples pourraient être rappelés et qui se caractérise par une fonction simple : le contrôle de la température du fluide en un point particulier du procédé.
- Récupérateur thermique qui permet d'introduire la récente notion de valorisation de l'énergie thermique d'un procédé. La fonction de cet échangeur est alors d'assurer le transfert d'une capacité thermique maximale afin de permettre une valorisation maximale du rejet thermique sur des critères énergétiques et économiques.
- Réfrigérants (et aéro-réfrigérant lorsque le vecteur de refroidissement est l'air, réfrigérant sur eau) qui assure la dissipation de l'énergie thermique non valorisable d'un procédé vers le milieu extérieur – fonction essentielle dans de nombreux process.
- Capteurs ou émetteurs thermiques dont les équipements ont pour fonction, respectivement, d'associer réception d'énergie thermique et transmission vers l'usage. Les exemples les plus courants sont les capteurs solaires thermiques ainsi que les radiateurs domestiques qui assurent le confort thermique dans un bâtiment.

- Déshumidificateurs ou condenseurs partiels qui assurent la condensation d'une vapeur en mélange avec un gaz incondensable pour obtenir, en fin d'opération, un gaz appauvri en vapeur : l'exemple rencontré fréquemment est le déshumidificateur d'air humide qui permet d'assurer un contrôle de l'humidité de l'air en sortie de Centrale de Traitement d'Air (CTA). D'autres exemples industriels peuvent être cités comme la captation de vapeurs organiques dans les cryo-condenseurs ou les condenseurs de buées fréquemment rencontrés dans les installations de génie chimique.
- Evaporateurs qui assurent l'évaporation complète ou partielle d'un liquide dans différents procédés notamment de production d'énergie mécanique (cycle moteur de Rankine, de Hirn) et de production frigorifique : cycle à compression (PAC), réfrigérateur. Condenseurs qui assurent la condensation complète ou partielle d'un gaz (vapeur) là encore par exemple pour la production d'énergie mécanique et frigorifique ;
- Equipements qui permettent la congélation et la fusion d'une phase liquide ou vapeur grâce à une paroi refroidie en dessous du point triple du fluide. Ces dispositifs sont utilisés pour assurer la séparation de plusieurs corps, assurer le stockage d'énergie thermique (stockage de glace ou stockage par MCP), produire une phase solide pour divers usages.
- Le caloduc (*Heat Pipe*), véritable système thermique diphasique, qui permet notamment d'assurer la dissipation de la chaleur générée par les éléments électroniques (Microprocesseur ou électronique embarquée), la récupération d'énergie, le maintien en température stable et uniforme [43]

On notera qu'un même échangeur peut assurer plusieurs fonctions dans des domaines applicatifs variés.

II.I.2. Technologie des échangeurs

Difficile d'être exhaustif sur la description technologique des échangeurs tant la diversité de ces appareils et de leurs variantes en fonction des constructeurs est importante. La figure II.1 rappelle de façon synthétique les principales classes d'échangeurs suivant des critères strictement technologiques.

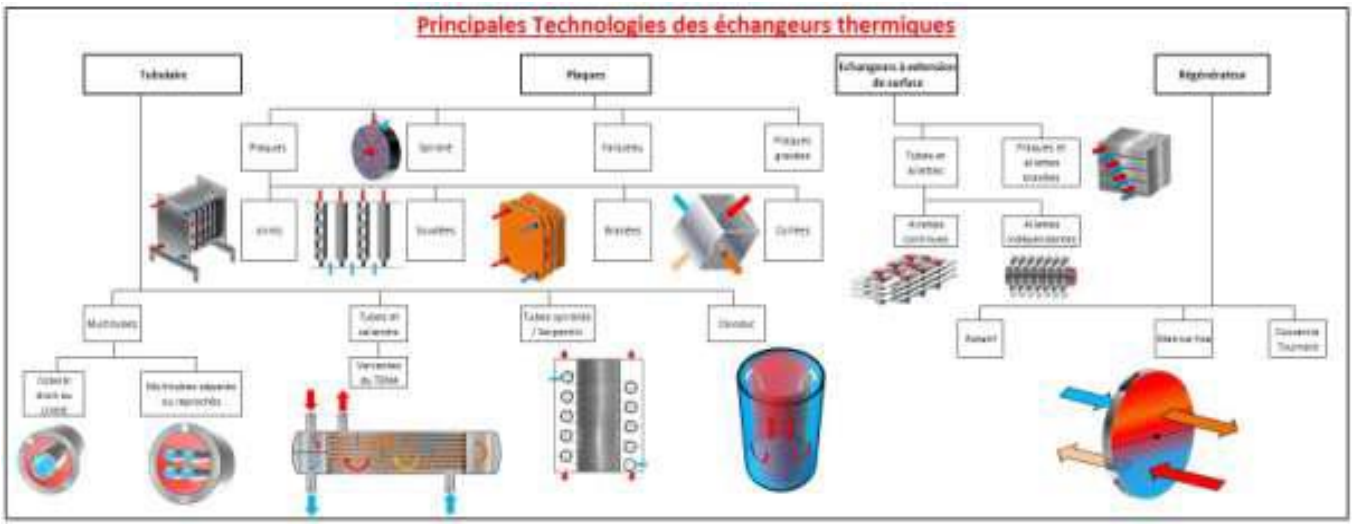


Figure.II.1 : Classification des échangeurs thermiques (à surface) en fonction de la technologie de fabrication [44].

Les échangeurs tubulaires (tubes et calandre, coaxial et autres) sont les plus répandus et représentaient, en 1998, quasiment 50% des parts de marché en Europe. Les échangeurs dits compacts (échangeurs à plaques et joints, par exemple), qui ont connus une croissance importante dans les années 1990, tendent à faire diminuer ce pourcentage mais la grande adaptabilité des échangeurs tubulaires (tenue en pression et en température, diversité des matériaux) fait qu'il est difficile d'assurer leurs remplacements par d'autres technologies [45] (figure II.2).

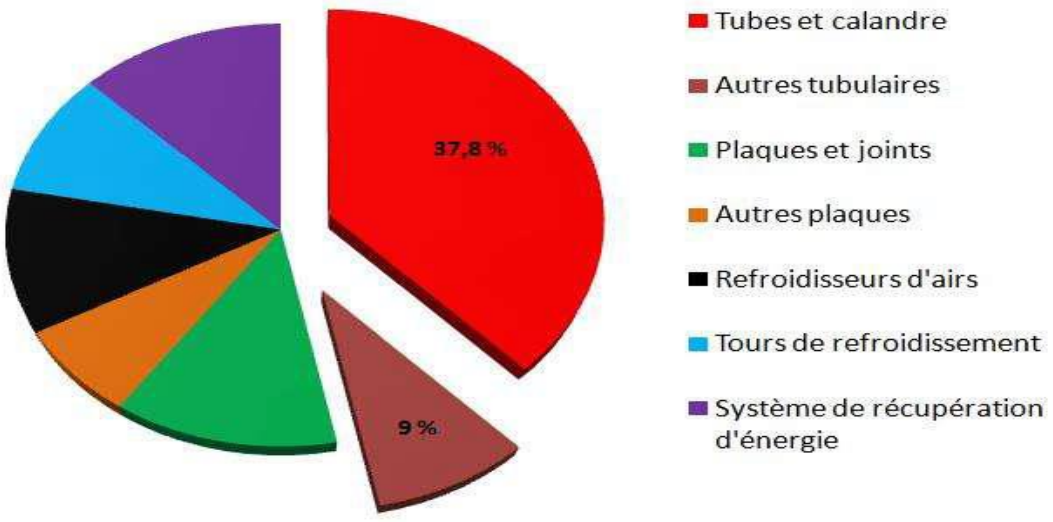


Figure.II.2 : Répartition en pourcentage des recettes par type d'échangeur sur le marché totale de l'échangeur en Europe (données 1998) [44].

II.I.3. Fonctionnement général d'un échangeur thermique

Il existe de nombreuses technologies d'échangeurs de chaleur, mais tous fonctionnent suivant les mêmes processus physiques d'échanges, c'est-à-dire :

- la conduction qui représente les échanges à travers les parois (le plus souvent métalliques),
- la convection qui représente les échanges entre les fluides et les parois,
- le rayonnement qui représente les échanges radiatifs entre les fluides et les parois

(principalement infra rouge) bien que ce dernier soit souvent négligeable (car pris en compte uniquement pour un fonctionnement à haute température).

On distingue également trois modes d'écoulement différents :

- celui à co-courants : écoulements parallèles des fluides et dans la même direction ;
- celui à contre-courants : écoulements parallèles des fluides mais dans des directions inverses ;
- et celui à courants croisés : écoulements perpendiculaires entre les deux fluides.

Le mode de circulation influe également sur la qualité et l'efficacité du transfert.

Un échangeur dit anti-méthodique (ou à co-courants) signifie que l'entrée des deux fluides (chaud et froid) se situe du même coté de l'échangeur. La configuration dite méthodique est celle ou les fluides circulent à contre-courants. On l'appelle méthodique car c'est cette configuration qui permet d'obtenir le smeilleures performances d'échangeurs. En effet, pour une circulation à co-courant des fluides, la température de sortie du fluide chaud ne pourra pas être plus basse que la température de sortie du fluide froid tandis qu'à contre courant, il est possible d'abaisser la température du fluide chaud à une valeur qui tendra vers la température d'entrée du fluide froid.

Des représentations graphiques illustreront plus loin ces distinctions.

II.I.3.1. Calcul de la puissance thermique d'un échangeur : le bilan thermique

L'équation de bilan d'énergie exprime, conformément au premier principe de la thermodynamique, l'égalité des flux de chaleur échangés par chacun des fluides circulant dans l'échangeur thermique, en négligeant les pertes vers l'extérieur [46].

La puissance échangée entre les deux fluides, dépend essentiellement de l'écart de température que celui-ci subit lorsque l'échange se réalise par chaleur sensible, ou alors essentiellement de la valeur de la chaleur latente (correspondant à l'enthalpie de changement d'état) lorsqu'il y a un changement de phase (fluide diphasique).

a- ***Echange monophasique***

Lorsque l'on parle de transfert monophasique, cela signifie que les fluides en présence restent sous une même et unique phase et ne changent pas d'état (il reste uniquement à l'état gazeux ou liquide) : les échanges de chaleur se traduisent ainsi uniquement par une élévation ou une baisse de leur température. On parle alors d'échange sous forme de chaleur sensible.

La puissance échangée (P en Watt) entre deux fluides à l'état monophasique, dépend essentiellement des trois critères suivants :

- Le débit massique des fluides (qm en [kg/s]),
- Les propriétés thermophysiques des fluides (masse volumique (ρ en [kg/m3]) et chaleur spécifique (Cp en [J/kg-K])).
- L'écart de température que vont subir les fluides (ΔT en [K] ou en [°C]).

l'échangeur étant représenté (configuration co-courant) sur la figure.II.3

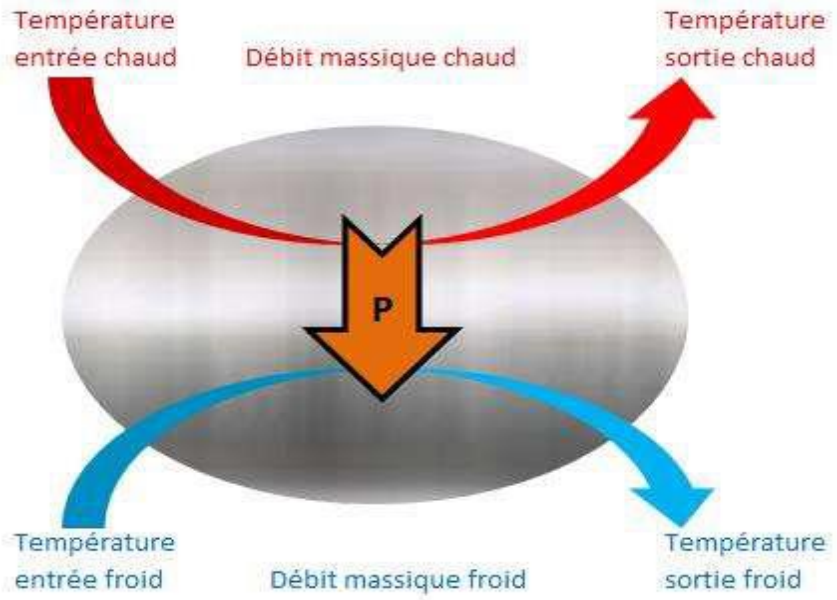


Figure.II.3 : Représentation simplifiée d'un échangeur de chaleur[44].

La chaleur se dirigeant toujours du fluide chaud vers le fluide froid et en faisant l'hypothèse que les échanges vers l'extérieur sont nuls (cas d'un échangeur isolé), on a logiquement:

$Tentréechaud > Tsortiechaud$

$Tentréefroid < Tsortiefroid$

De ce fait, on peut exprimer la puissance échangée par chacun des fluides avec les expressions suivantes qui impliquent la notion de conservation de l'énergie :

Avec :$P = qm_c \times C\rho_C \times \Delta T_C = -qm_f \times Cp_f \times \Delta T_f$

$$\Delta T_c = Te_c - Ts_c$$

$$\Delta T_f = Te_f - Ts_f$$

On notera également que de manière générale, les valeurs des propriétés thermophysiques des fluides sont retenues comme étant des constantes calculées à la valeur moyenne de température et de pression de chacun des fluides.

Grâce à l'écriture de ces bilans thermiques, on peut ainsi facilement retrouver une grandeur (par exemple la température de sortie du fluide froid) si on connait l'ensemble des autres grandeurs.

Une représentation assez courante des échanges thermiques entre deux fluides est le diagramme Température Enthalpie (ou Température-Puissance). Dans le cadre d'un échange par chaleur sensible uniquement, la représentation est celle de la figure II.4.

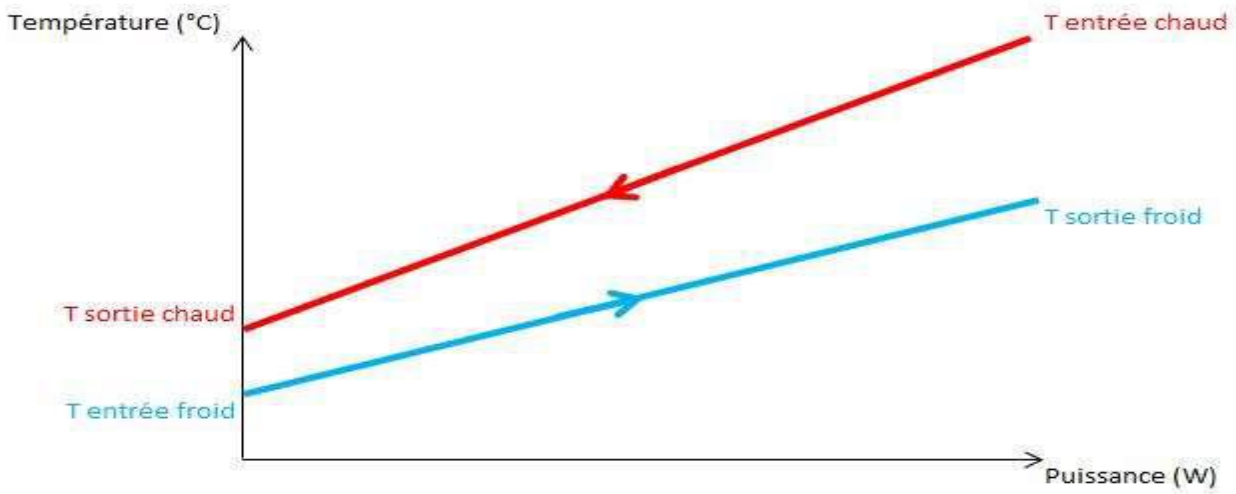


Figure.II.4:Représentation du diagramme Température-Puissance pour des échanges monophasique/monophasique[44].

Si, on illustre une configuration à contre courant (comme pour les exemples qui suivent) où le fluide chaud (en rouge) entre du coté opposé à celui du fluide froid (en bleu) : on rappelle que, dans cette configuration, le fluide chaud peut être refroidit à un niveau plus bas que la température de sortie du fluide froid tandis que le fluide froid peut, lui aussi, être chauffé à une température plus haute que la température de sortie du fluide chaud.

b- ***Echange diphasique***

Lorsque l'on parle de transfert diphasique, cela signifie que les fluides en présence vont changer d'état (ou de phase) entre l'entrée et la sortie de l'échangeur : les échanges de chaleur se traduisent ainsi quasiment uniquement par un changement d'état sans élévation ni baisse de leur température (pour les corps pures à pression constante). On parle alors d'échange sous forme de chaleur latente. Les changements de phase les plus fréquemment rencontrés dans le domaine des échangeurs de chaleur sont l'évaporation (Liquide → Gaz) et la condensation (Gaz → Liquide), notamment dans le domaine du génie climatique (cycle des pompes à chaleur pour la production de froid) et de la production d'énergie électrique (via un cycle de Rankine pour la production d'énergie mécanique puis électrique via un alternateur).

Les autres changements de phase, tels que la fusion et la solidification, restent encore des domaines plus marginaux bien qu'appliqués de plus en plus par l'utilisation grandissante des MCP (Matériaux à Changement de Phase). On citera également la sublimation (Solide→ Gaz) qui est utilisé, par exemple, dans les process de lyophilisation. La puissance échangée entre deux fluides qui vont changer de phase dépend essentiellement des trois critères suivants :

- Le débit massique des fluides (q_m en [kg/s]),
- La chaleur latente ou enthalpie de changement de phase (liquide/vapeur le plus couramment) qui est une propriété thermophysique des fluides (noté L_v ou Δh_{lv} en [J/kg]).
- Le titre massique (noté x_v) d'une des phases (en général la phase vapeur pour un mélange liquide/vapeur). Ce titre massique est définit comme le rapport du débit massique de la phase vapeur au débit massique des deux phases (c'est-à-dire le débit massique total de fluide), il est donc compris entre 0 (phase totalement liquide) et 1 (phase totalement vapeur) :

$$x_v = \frac{qm_v}{(qm_v + qm_1)} = \frac{qm_v}{(qm_{total})}$$

Pour une évaporation (ou une condensation) totale, on peut donc dire que l'on passe d'un titre de vapeur de 0 à un titre de vapeur de 1 (ou inversement pour la condensation) donc $\Delta x_v=1$. Ainsi, l'expression de la puissance est la suivante :

$$P = qm_c \times \Delta h_{vl_c} = -qm_f \times \Delta h_{lv_f}$$

Dans le cadre de cette expression, le fluide chaud (indice c) va par exemple se condenser totalement et le fluide froid va s'évaporer totalement. On a ainsi les expressions suivantes pour le calcul de l'enthalpie de changement de phase :

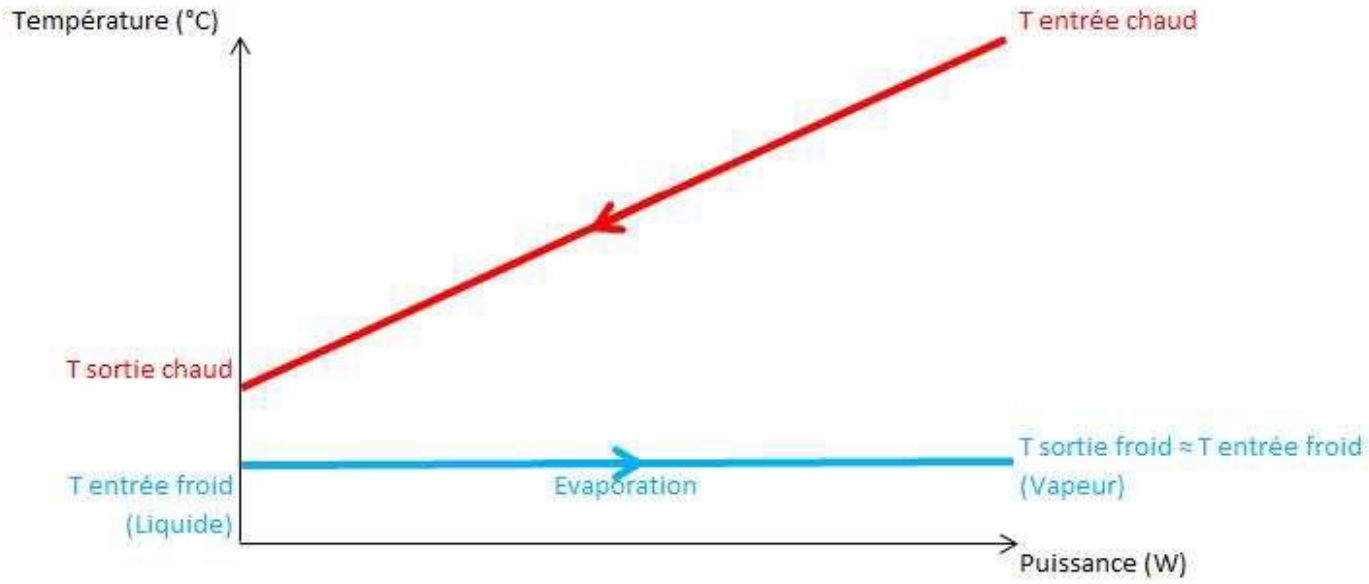
$$\Delta h_{vl_c} = H_{v_c} - H_{l_c}$$
$$\Delta h_{lv_f} = H_{l_c} - H_{v_c}$$

On notera que la détermination de l'enthalpie de changement de phase est dépendante de la pression ou de la température de saturation du fluide (en sachant que ces deux paramètres sont dépendants l'un de l'autre).

Lorsque la condensation ou l'évaporation est partielle (i.e. $0 < x_v < 1$), on fait alors intervenir la différence du titre massique entre l'entrée et la sortie du fluide : La puissance échangée s'exprime ainsi par :

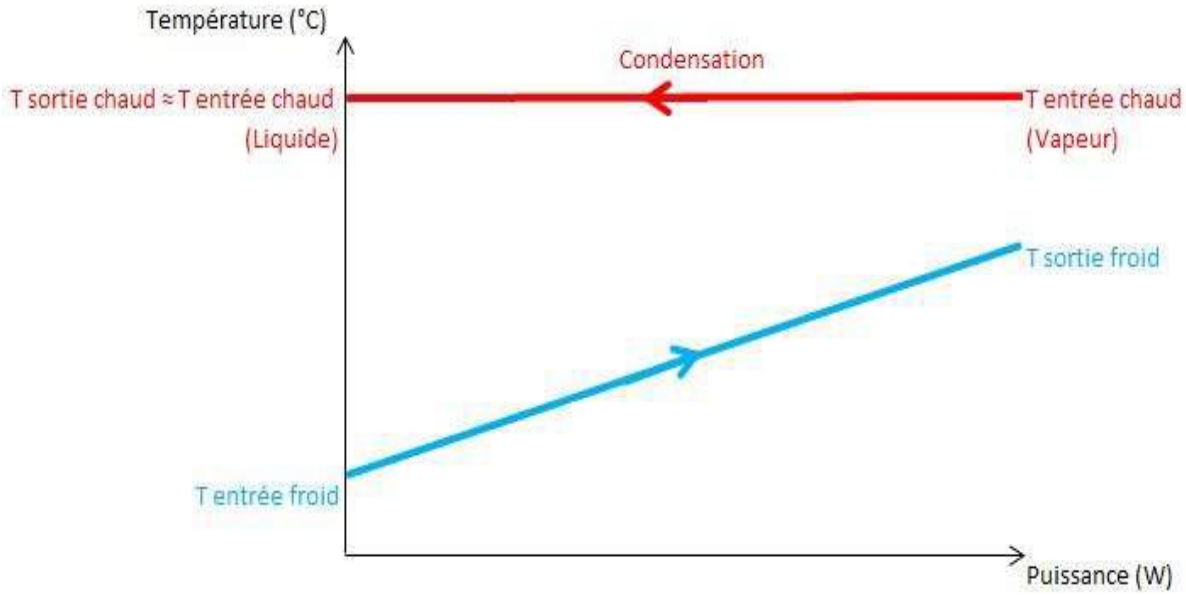
$$P = qm_c \times \Delta h_{v_{lc}} \times \Delta X_v = -qm_f \times \Delta h_{lv_f} \times \Delta X_v$$

Pour un changement de phase sur le fluide froid (évaporation) avec un fluide chaud monophasique, on peut par exemple rencontrer l'évolution suivante dans le diagramme Température-Puissance (figure .II.5):



(figure.II.5): Représentation du diagramme Température-Puissance pour un échange de type Evaporation /Monophasique[44].

Ici, le fluide froid entre dans l'échangeur à l'état liquide saturé (par exemple eau liquide à 1 bar et 100°C donc x_v=0) et s'évapore jusqu'à saturation vapeur (par exemple vapeur d'eau à 1 bar et 100°C donc x_v=1) par l'apport d'énergie thermique issue du fluide chaud qui par conséquent se refroidit. Pour un changement de phase sur le fluide chaud (condensation) avec un fluide froid monophasique, on peut avoir l'évolution du diagramme Température-Puissance (figure .II.6) :



(figure.II.6) : Représentation du diagramme Température-Puissance pour un échange de type Condensation /Monophasique [44].

Ici, nous somme dans la situation inverse : Le fluide chaud entre dans l'échangeur à l'état vapeur saturée et se condense jusqu'à saturation par l'extraction d'énergie thermique issue duréchauffement du fluide froid.

*c- **Echange monophasique et diphasique***

Lors d'un échange par changement de phase, il est fort probable que les fluides disponibles ne soit pas exactement à l'état saturé (pour l'eau, l'état de saturation à la pression atmosphérique est atteint à environ 100°C). De ce fait, l'échangeur va devoir coupler les échanges monophasiques (sensibles) et diphasiques (changements de phase=latente). Pour le calcul de la puissance, on devra alors additionner les deux expressions vues plus amont pour calculer la puissance totale échangée.

Par exemple chauffer un fluide liquide jusqu'à saturation puis l'évaporer partiellement ou totalement (ou refroidir un fluide gazeux jusqu'à saturation pour le condenser partiellement ou totalement), dans ce mode de fonctionnement, on pourra donc additionner les deux expressions vues en amont pour calculer la puissance totale échangée :

$$P = qm_c \times Cp_c \times \Delta T_{c_{v_{sat}}} + qm_c \times \Delta h_{vl_c} \times \Delta X_{v_c} = qm_c \times (Cp_c \times \Delta T_{c_{v_{sat}}} + \Delta h_{vl_c} \times \Delta X_{v_c})$$

$$-P = qm_f \times Cp_f \times \Delta T_{f_{l_{sat}}} + qm_f \times \Delta h_{lv_f} \times \Delta X_{v_{fc}} = qm_f \times (Cp_f \times \Delta T_{f_{l_{sat}}} + \Delta h_{lv_f} \times \Delta X_{v_f})$$

Enfin, il arrive fréquemment de devoir surchauffer de la vapeur à la suite de l'évaporation totale ou bien de sous refroidir un liquide à la suite d'une condensation totale. L'expression de la puissance devient alors la suivante :

$$P = qm_c \times Cp_{c_v} \times \Delta T_{c_{v_{sat}}} + qm_c \times \Delta h_{vl_c} + qm_c \times Cp_{c_l} \times \Delta T_{c_{l_{sat}}}$$
$$= qm_c \times (Cp_{c_v} \times \Delta T_{c_{v_{sat}}} + \Delta h_{vl_c} + Cp_{c_l} \times \Delta T_{c_{l_{sat}}})$$
$$-P = qm_f \times Cp_{f_1} \times \Delta T_{f_{l_{sat}}} + qm_f \times \Delta h_{lv_f} \times qm_f \times Cp_{f_v} \times \Delta T_{v_{l_{sat}}}$$
$$= qm_f \times (Cp_{f_l} \times \Delta T_{v_{l_{sat}}} + \Delta h_{lv_f} + Cp_{f_v} \times \Delta T_{f_{v_{sat}}})$$

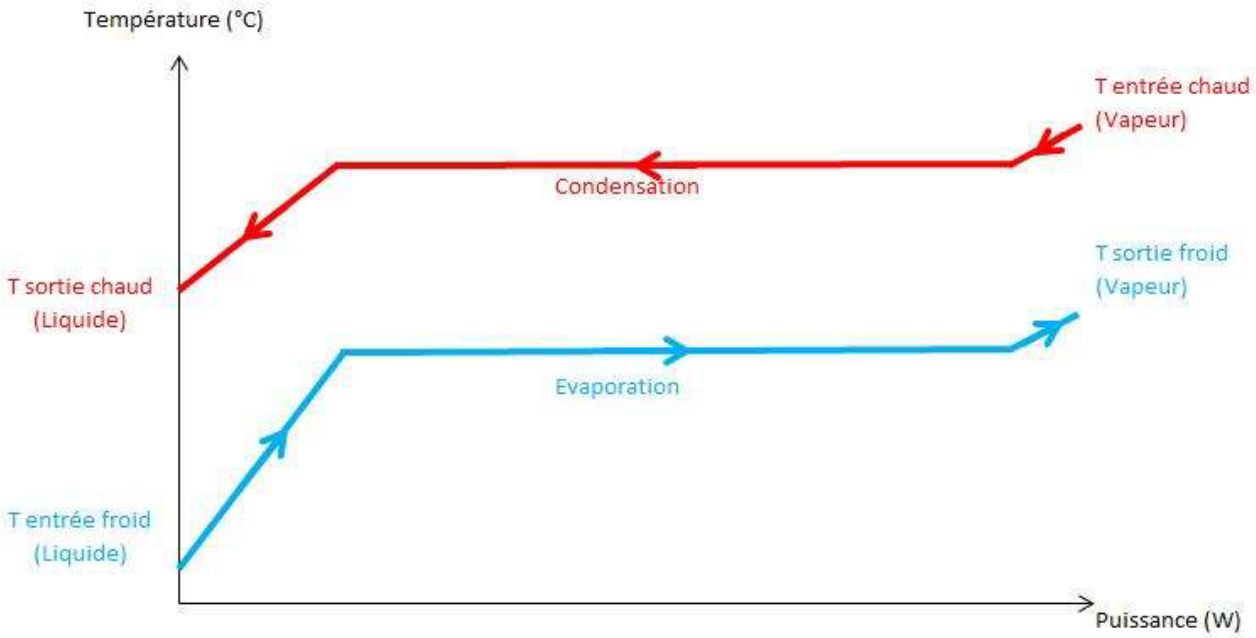
Avec :

$$\Delta T_{c_{v_{sat}}} = T_{e_c} - T_{sat(x=1)_c} \Delta T_{f_{v_{sat}}} = T_{s_f} - T_{sat(x=1)_f}$$
$$\Delta T_{c_{l_{sat}}} = T_{sat(x=1)_c} - T_{s_c} \Delta T_{f_{l_{sat}}} = T_{sat(x=1)_f} - T_{e_c}$$

Pour un corps pur, on souligne que :

$$T_{c_{l_{sat(x=1)}}} = T_{c_{v_{sat(x=0)}}} T_{f_{l_{sat(x=1)}}} = T_{f_{v_{sat(x=0)}}}$$

Pour un fluide chauffé, puis évaporé puis surchauffé par un fluide chaud qui est refroidi, condensé puis sous refroidi, on peut avoir l'évolution du diagramme température-puissance (figure.II.7).



(figure.II.7) : Représentation du diagramme Température-Puissance pour un échange de type Evaporation / Condensation [44].

Ici, l'énergie thermique permettant le chauffage, l'évaporation et la surchauffe du fluide froid est fournie par le refroidissement, la condensation ainsi que le sous-refroidissement du fluide chaud.

Nous avons vu l'expression de la puissance d'un échangeur par l'équation de la conservation de l'énergie à travers l'écriture des différentes expressions et en fonction des modes de transferts thermiques (sensible, latent ou couplage sensible + latent). Nous n'avons cependant pas abordé le fond du problème du dimensionnement de l'échangeur. En effet, ces premiers calculs permettent de connaitre les principales grandeurs (puissance, débit, température) qui vont conditionner le dimensionnement, c'est-à-dire les dimensions (la taille) de l'échangeur.

Pour cela, nous allons introduire les deux principales méthodes de dimensionnement qui nécessitent toutes deux le calcul du coefficient d'échange thermique global.

II.I.3.2. Méthodes de dimensionnement

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 dimensionnantes telles que la puissance, les températures, les débits (voir plus haut la détermination de ces grandeurs par les bilans thermiques).

Ensuite, il faut calculer, et ce quelle que soit la méthode de dimensionnement utilisée, les coefficients d'échanges thermiques partiels et le coefficient d'échange thermique global [47].

II.I.3.2. a.*Coefficient d'échange global et partiel*

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

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

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

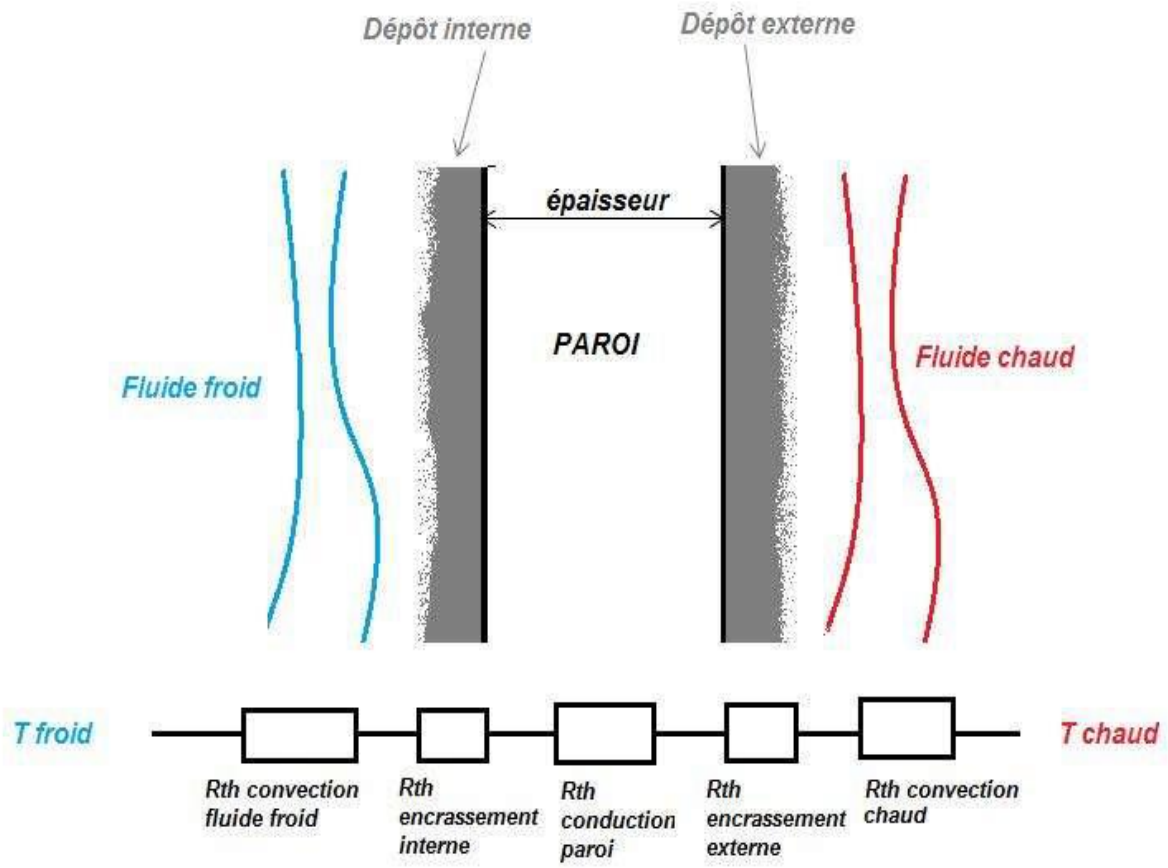
Les valeurs des résistances d'encrassement. En général, l'encrassement des échangeurs de chaleur est défini comme le dépôt de matériaux ou de substances non désirées sur les surfaces d'échanges. Ce dépôt peut être constitué de cristaux, de sédiments, de résidus biologiques, de produits d'une réaction 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 d'échange thermique global, induisant une hausse de la surface d'échange nécessaire et donc un surplus en cout matière et conception (figure.II.8) [48]



(figure II.8) : Schématisation des différentes résistances thermiques d'une paroi [49].

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.I.4.Critères de performance d'un échangeur

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.[50] 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 m^2/m^3 ; cette valeur est susceptible de varier de 500 à 800 m^2/m^3.

II.I.5.Echangeurs de chaleur et déflecteurs :

Dans les cas où il est nécessaire d'avoir une grande surface de transfert pour effectuer le transfert de chaleur d'un fluide à l'autre, il est recommandé d'utiliser un ensemble de tubes contenus dans une echangeur (Figure.II.9) . L'ensemble des tubes s'appelle un faisceau et la plaque de support ferme le faisceau. Dans ce type d'échangeurs de chaleur, un fluide circule à l'intérieur des tubes et l'autre circule à l'extérieur des tubes et à l'intérieur de plaque.

Habituellement, ce dernier fluide est obligé de changer de direction en raison de la présence de plans de support.

De tels défauts ou déflecteurs peuvent être perpendiculaires ou horizontaux au faisceau de tubes, dans le premier cas, ils sont appelés déflecteurs, et différents déflecteurs sont affichés dans (Figure.II.10).

(Chicanes d'orifice, chicanes de disque et déflecteurs segmentaires).

La distance entre les chicanes détermine la vitesse du fluide, en général 0,2 fois le diamètre de la valeur de la plaque. En outre, le pourcentage du diamètre de la plaque non occupée par le déflecteur Est appelé en passant.

Lorsque les plaques d'échangeurs de support placées à l'intérieur de la plaque sont des dalles, parallèlement aux tubes, diviser la plaque d'échangeur en jeu de passages de telle sorte que le fluide qui circule à l'extérieur des tubes change de direction.

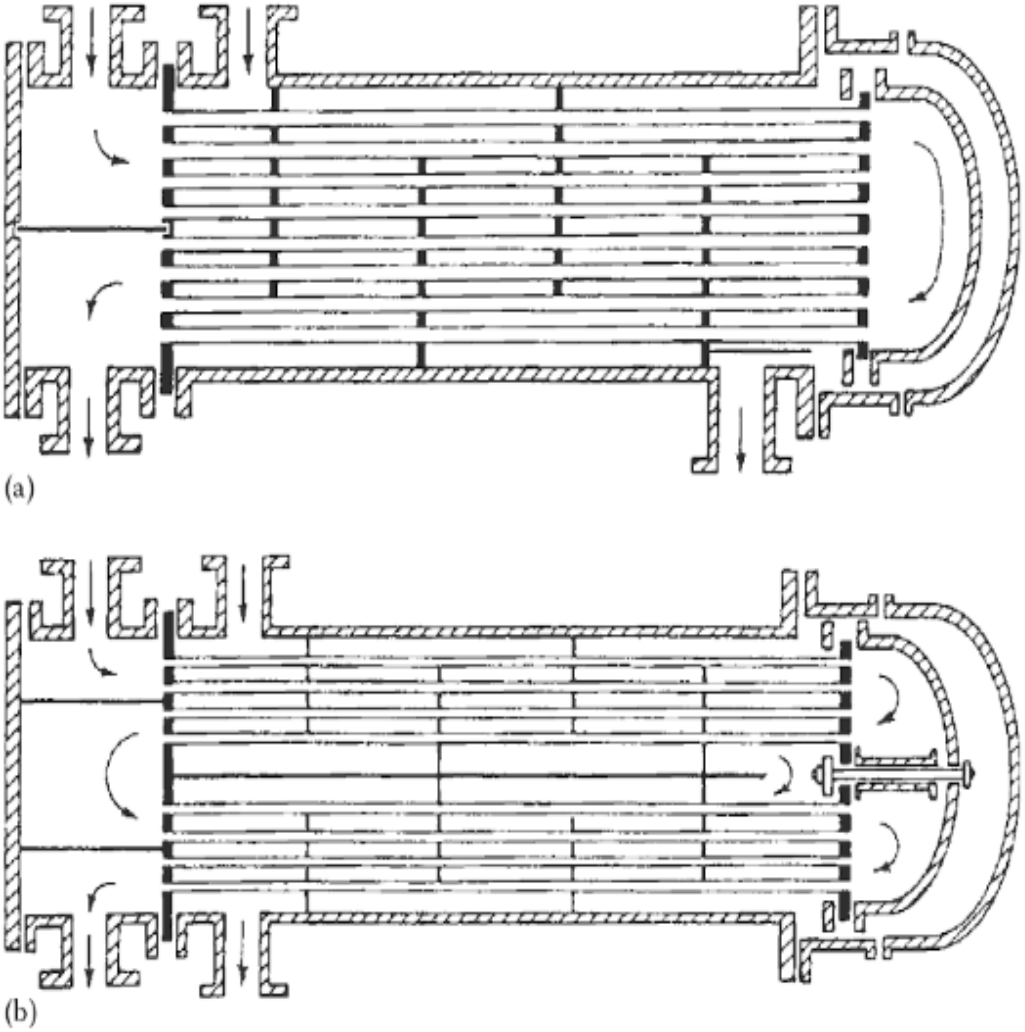


Figure.II.9:Échangeur de chaleur et tube-chaleur:

a) échangeur de chaleur 1/2 et b) échangeur de chaleur 2/4[51].

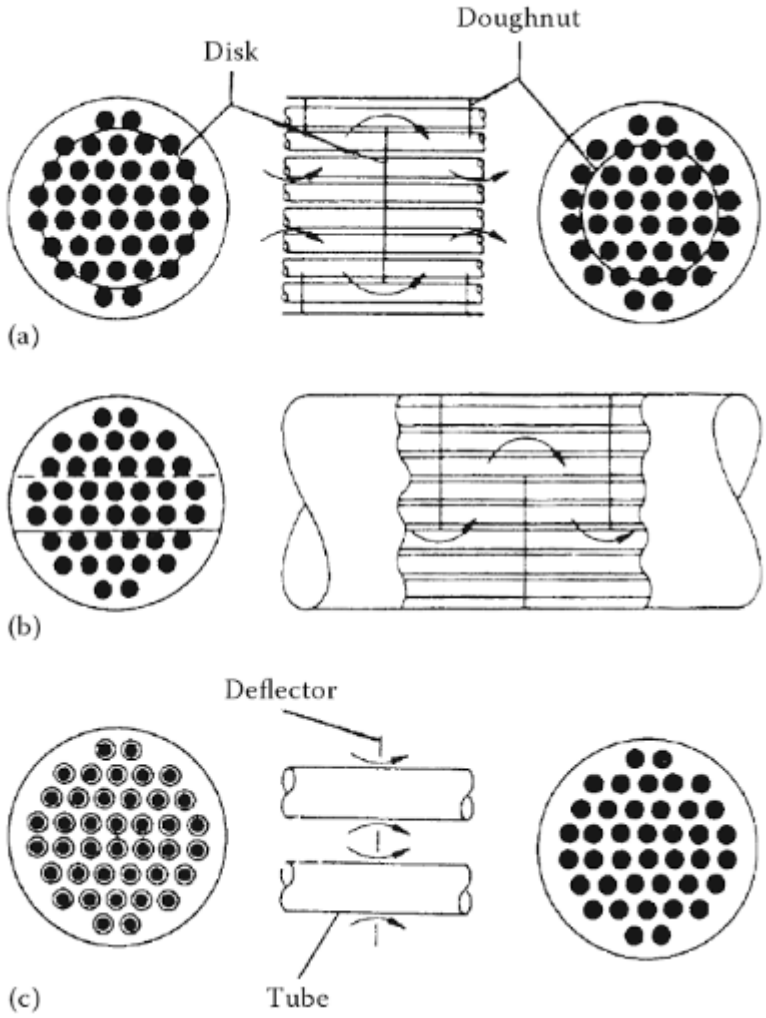


Figure.II.10 : Types de déflecteurs et de plaques d'échangeur et échangeurs de tubes-chaleur:
a) chicanes de disque b) déflecteurs segmentaires c) chicanes d'orifice [51].

En deux passes consécutives. De la même manière, le changement directionnel du fluide qui circule à l'intérieur du faisceau de tubes s'appelle un passage, des trois différents de la plaque d'échangeur et des échangeurs de tubes-chaleur avec des passages de fluide différents.

II.I.5.1.Déflecteurs longitudinaux :

Entre les tubes périphériques et la calandre subsistz nécessairement un vide non négligeable .Une part importante du fluide peut (phénoméne de by-pass) et ne pat participer à l'échange de chaleur, ce que l'on atténue en utilisant des déflecteurs longitudinaux .

II.I.5.2.Déflécteur d'entrée :

Il ser à protéger , dans certains cas le faisceau contre courant placé entre les plaques d'échangeur

II.I.6. Echangeurs à plaques :

Un échangeur à plaques est composé d'un nombre variable de plaques cannelées munies de joints, serrées entre un bâti fixe et un plateau mobile de serrage au moyen de tirants.

a) Échangeurs 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 [52].

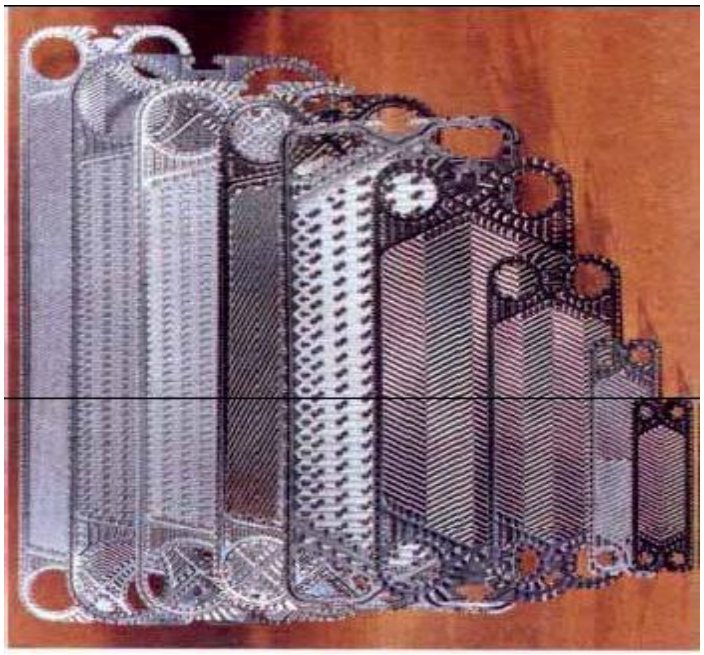


Figure .II.11: Différentes géométries de plaques d'échangeurs à surface primaire [52].

b) Échangeurs à plaques soudées ou brasées :

Ils sont utilisés en récupération de chaleur, dans les domaines de la chimie, de la pétrochimie, de l'agro-alimentaire, etc



Figure.II.12 : Échangeur brasé [52].

c) Échangeurs à plaques et joints :

La surface d'échange est alors composée de plaques métalliques, équipées de joints, serrées les unes contre les autres à l'aide de tirants entre deux flasques, l'un fixe, l'autre mobile [52].

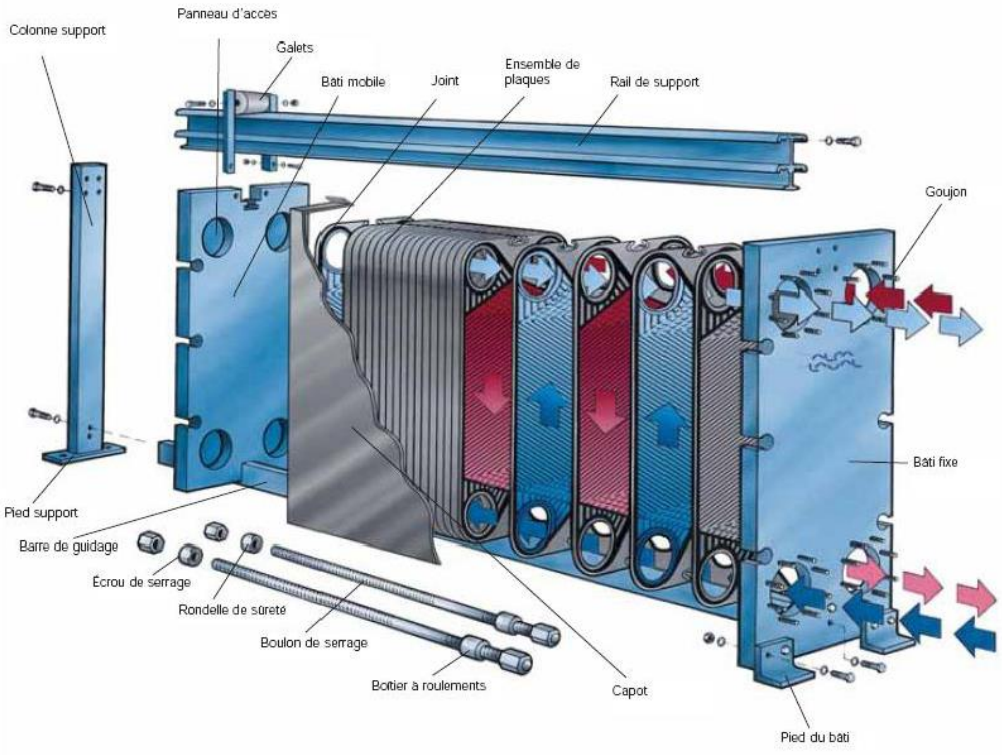


Figure.II.13:Échangeur à plaque et joint [52].

II.I.6.1.Principe de fonctionnement d'un échangeur à plaques

Un échangeur de chaleur à plaques consiste pour l'essentiel en une série de fines plaques cannelées assemblées et/ou soudées, en fonction des liquides qui circuleront dans les plaques et de l'éventuelle possibilité de séparer les plaques pour une raison quelconque. Les plaques sont ensuite embouties ensemble dans un bâti rigide afin de créer une circulation de flux parallèles. L'un des fluides se déplace dans les canaux impairs, l'autre fluide dans les canaux pairs.

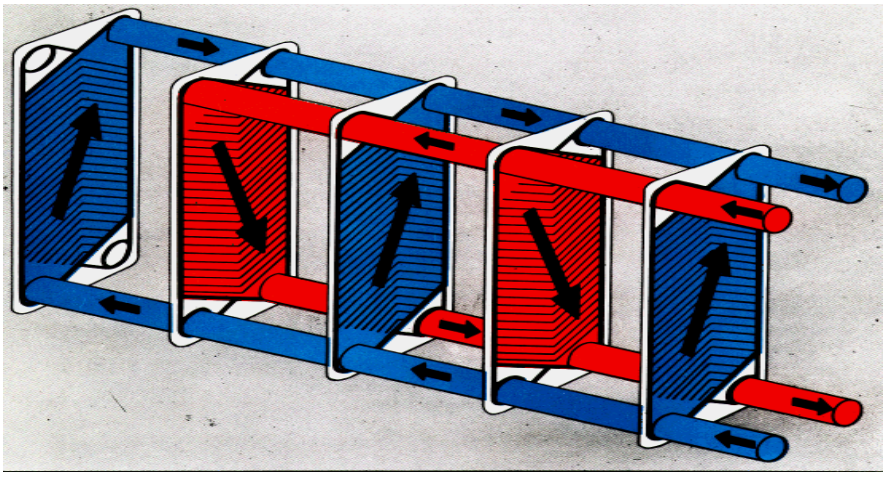


Figure.II.14 : Principe de fonctionnement d'un échangeur à plaques [53].

- **Circulation latérale à travers les plaques**



Figure.II.15: La circulation des fluides est latérale.

- **Circulation diagonale à travers les plaques**



Figure.II.16 : La circulation des fluides est diagonale.

II.II.ENCRASSEMENT :

II. II.1.Introduction

Dans les sociétés industrielles, l'échangeur de chaleur est un élément essentiel de toute politique de maîtrise de l'énergie et donc, par voie de conséquence, de protection de l'environnement. Une grande part de l'énergie thermique (90%) utilisée dans les procédés industriels transite au moins une fois par un échangeur de chaleur, aussi bien dans les procédés eux-mêmes que dans les systèmes de récupération de l'énergie thermique de ces procédés. Ils sont utilisés principalement dans les secteurs de l'industrie (chimie, pétrochimie, sidérurgie, agro-alimentaire, production d'énergie, etc.).

les difficultés rencontrées par les utilisateurs d'échangeurs de chaleur sont diverses et variées. Toutefois, un des principaux problèmes de fonctionnement auxquels ils se heurtent a trait aux phénomènes d'encrassement. En effet, l'encrassement reste encore, de nos jours, l'un des phénomènes le moins compris et le moins prédictible de l'industrie.

II.II.2. Notions sur l'encrassement des échangeurs :[54]

L'encrassement qui, sous sa forme la plus générale, peut être défini comme l'accumulation d'éléments solides indésirables ou de substances non désirées sur une interface, affecte un grand nombre d'opérations industrielles. Ce dépôt qui évolue dans le temps, peut être constitué de cristaux, de sédiments, de résidus biologiques, des produits d'une réaction chimique ou bien encore être la combinaison de plusieurs de ces éléments.

Il est très important de considérer ce phénomène d'encrassement pour être en mesure de choisir un échangeur thermique qui ait les dimensions appropriées, car l'encrassement peut réduire considérablement la capacité de transmission de chaleur et d'augmenter la chute de pression.

Un nettoyage et un entretien périodiques sont requis. Comme l'encrassement et les difficultés de maintenance augmentent avec le temps, les nettoyages doivent être fréquents.

Il est souvent important de prévoir certains types de cloisons qui filtrent les impuretés de fluides caloporteurs avant son admission dans l'échangeur afin de réduire les risques d'encrassement.

Il a été démontré au cours des longues années passées dans la recherche de moyens de lutte contre l'encrassement, que ce dernier était lié aux conditions opératoires, aux propriétés physico-chimiques des fluides mis en jeu, à la géométrie du système ainsi qu'à la nature des surfaces. La connaissance de l'origine du phénomène est un facteur déterminant pour répondre aux variations de ces paramètres.

II.II.2.3 Catégories et types d'encrassement

Selon la classification établie en 1978 par Epstein [55], il existe cinq grands types d'encrassement différents : La corrosion; l'encrassement biologique; l'encrassement par réaction chimique; l'entartrage; l'encrassement particulaire.

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

- **La corrosion :** L'encrassement par corrosion est le résultat d'une réaction chimique ou électrochimique entre la surface de transfert de chaleur et le fluide en écoulement [56].

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

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

➢ **L'encrassement biologique :** L'encrassement biologique est dû au développement de micro organismes qui créent un film encrassant au contact de la surface d'échange [57]. Il peut être causé partrois grands types de micro-organismes :

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

telles que l'humidité, la température ou le pH.

➢ **L'encrassement par réaction chimique :** L'encrassement par réaction chimique est dû à la présence d'une réaction chimique au voisinage d'une surface d'échange [*58*]. Les produits solides ainsi formés s'y déposent. Il s'agit le plus souvent d'une réaction de polymérisation qui implique la formation d'un dépôt de haut poids moléculaire.

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

➢ **L'entartrage :** L'entartrage d'une surface d'échange est généralement associé à la production d'un solide cristallin à partir d'une solution liquide [59].

Il dépend donc fortement de la composition des eaux industrielles. L'entartrage se matérialise par une formation d'incrustations adhérentes et dures sur les surfaces d'échanges généralement métalliques.

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

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

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

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

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

II.II.2.4 : Les processus fondamentaux de l'encrassement

Phénoménologiquement, l'encrassement est un problème transitoire de chaleur et de masse qui nécessite l'action simultanée de plusieurs processus complexes. Epstein [60] a décomposé les mécanismes d'encrassement selon 5 événements séquentiels :

1) **L'initiation**

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

2) **Transport**

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

3) **Déposition**

Une partie de la matière encrassante transportée est attachée à la surface. Les forces agissantes des particules proches de la surface sont importantes à déterminer l'attachement.

En plus, les propriétés du matériel tel que la densité, la viscosité et les conditions de surface sont importantes. L'adhésion des particules sous l'effet des forces de Van der Waals, des forces électrostatiques ou capillaires.

4) **Le réentraînement (Enlèvement)**

Le réentraînement des particules déposées dû aux forces de cisaillement s'exerçant sur le dépôt, à l'érosion ou à l'écaillage. Une certaine proportion de la matière est enlevée de la surface immédiatement après leur dépôt et une autre est enlevée plus tard. En général, les forces de cisaillement à l'interface entre le fluide et la couche de dépôt encrassante sont responsables de cet enlèvement. Les forces de cisaillement dépendent du gradient de la vitesse à la surface, de la viscosité du fluide et de la rugosité de la surface.

5) **Le Vieillissement**

Le vieillissement du dépôt caractérisé par un changement de texture et une usure du dit dépôt. Une fois le dépôt est posé sur la surface, le vieillissement commence. Les propriétés mécaniques de ce dépôt seront modifiées durant cette phase, à cause du changement de cristal ou de la structure chimique, par exemple, l'empoisonnement lent du micro-organisme causé par la corrosion à la surface affaiblira et appauvrira la couche du bio-encrassement. La réaction chimique attire la surface du dépôt pour modifier la composition chimique du dépôt, et de cette façon changer les propriétés mécaniques.

II.II.3. l'encrassement par le lait

II.II.3.1.Introduction

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 [54] 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.

Ces inconvénients ont justifié les études menées depuis de nombreuses années sur l'encrassement et sur les moyens de le limiter. Les revues bibliographiques de Burton [61] et de Lund et Bixby [58] font le

point complet de ces travaux dans le domaine laitier où l'influence de divers paramètres relatifs à la matière première lait, ou aux conditions de l'échange thermique a été mise en évidence.

Les équipementiers et les fabricants de produits alimentaires cherchent par conséquent à définir des procédés fournissant le produit visé dans des conditions économiques raisonnable tout en prenant en compte les modifications physiques, biochimiques, biologiques…etc. des matières premières ainsi que les phénomènes d'encrassement qui limitent les performances des appareils.

Cependant, les études sur un matériel industriel sur un échangeur à plaques pour traitement à ultra haute température, s'avèrent difficiles: possibilités limitées de variations des conditions de traitement, variabilité des caractéristiques des produits traités, nécessité de disposer de quantités importantes de matière première, répartition hétérogène de l'encrassement, lourdeur de manipulation du matériel et difficultés d'interprétation de mesures souvent globales.

Des études ont été également menées sur des matériels de laboratoire dans des conditions expérimentales bien connues mais avec soit une absence de circulation, soit une recirculation du fluide encrassant [54].

II.II.3.2. Modèles et mécanismes d'encrassement par le lait : [62]

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 prés 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.

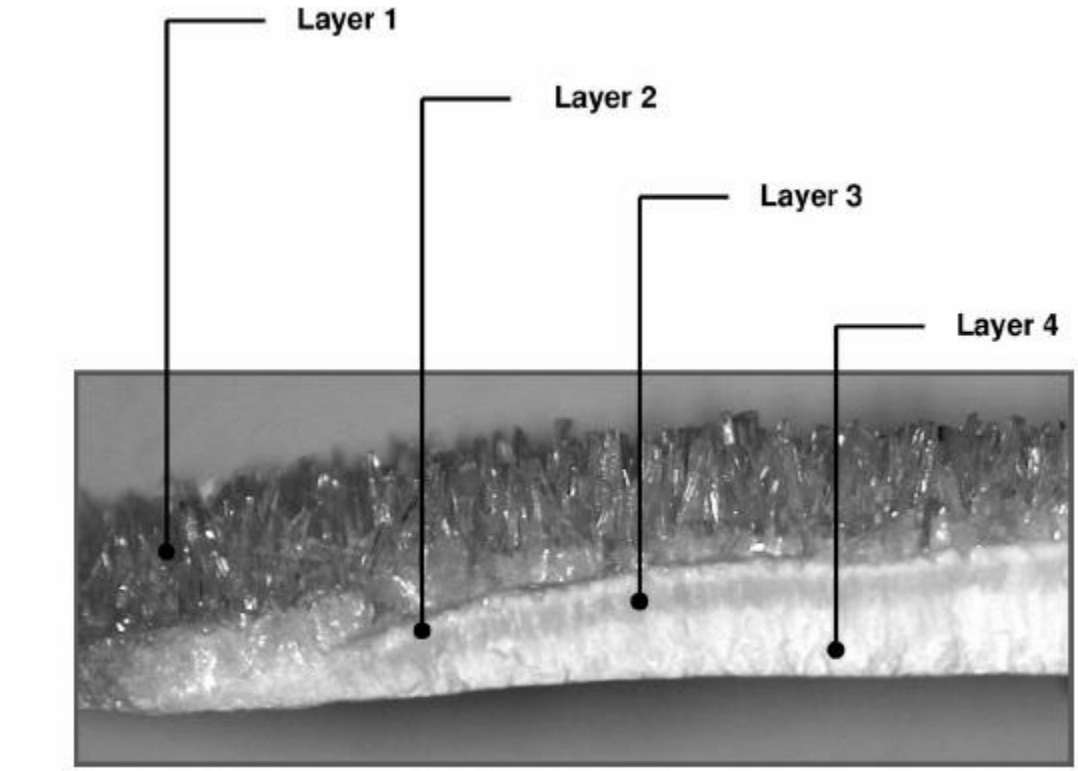


Figure II.17 : Les différentes couches d'encrassement

III - INTRODUCTION

Nous reprenons dans ce travail la formulation mathématique et la modélisation de l'encrassement en régime stationnaire d'un écoulement turbulent d'un fluide entre deux plaques planes en présence d'un milieu poreux à l'aide du modèle de fermeture $\kappa - \varepsilon$ qui a été établi dans un travail précédent [65].

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

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

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 l'investissement lors de la conception des dispositifs mais surtout lors de l'exploitation de ceux-ci :

ces surcoûts sont principalement dus à l'accroissement des consommations énergétiques, aux pertes de production et aux frais de maintenance [66].

L'absence d'outil numérique, de protocole et de méthodologie permettant de prévoir la cinétique d'encrassement et ensuite d'agir efficacement sur les effets de l'encrassement des échangeurs thermiques est à l'origine de cette étude. Nous présentons d'un outil de prédiction des effets d'encrassement à partir de la connaissance d'un nombre réduit de données de fonctionnement.

Cet outil doit ainsi permettre, à terme, de déterminer une cinétique réaliste d'encrassement et de permettre d'élaborer une pratique adaptée de maintenance en vue d'une minimisation des coûts énergétiques et des coûts d'intervention.

III- .2. CYCLE DE PRODUCTION : [62]

Le lait qui doit subir un traitement thermique peut être du lait cru ou du lait recombiné.

D'après Avezard et Lablee [62], l'opération de recombinaison consiste a mélanger dans une eau convenable les différent composants du lait pour réaliser un produit le plus voisin possible du lait initial.

Les trois composants essentiels sont l'eau, la poudre de lait écrémé spray et la matière grasse laitière anhydre. Dans un certain cas quelques adjuvants complémentaires sont utilisés.

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

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

Un dégazage a pour but de permettre l'homogénéisation de la matière grasse (MGLA) dans les meilleures conditions. Elles a également comme intérêt de retirer partiellement au moins certaines odeurs caractéristiques des laits reconstitués. Le dégazage se fait généralement à 60°C.

2- Ajoutée une quantité de matière grasse (MGLA) 400 Kg ou 15 g/l.

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

4- Dans des réservoirs de 30.000 l, le mélange subit une dilution avec 15.000 l d'eau avant de l'envoyer à l'unité UHT pour le pasteuriser.

III .2.1. Les étapes de production

Les étapes de production dans l'unité UHT se résument comme suit (Figure IV.1).

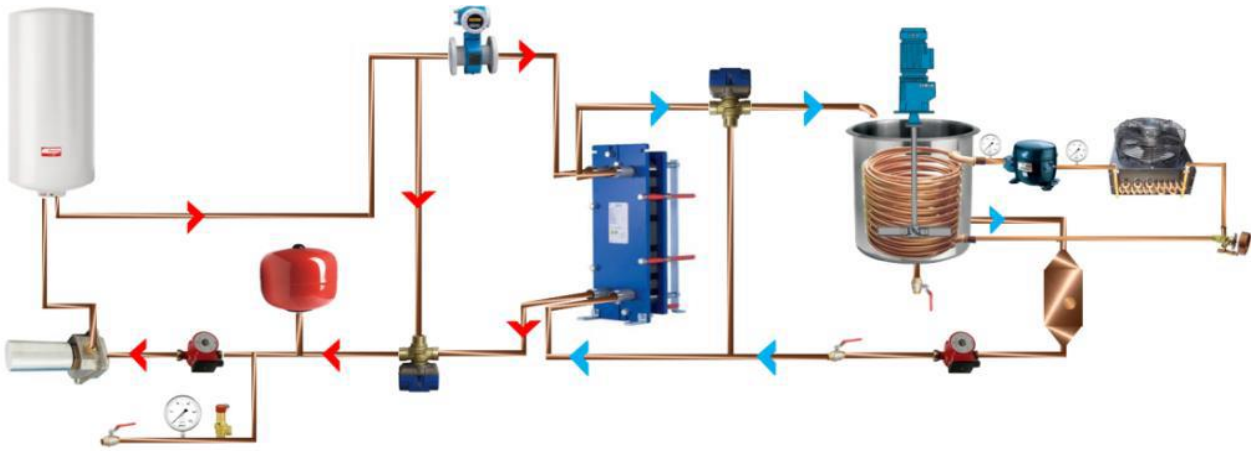


figure.III.1: Schéma de principe de l'installation [67].

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

- **1. Préchauffage (récupération de chaleur):** c'est le passage de lait dans les échangeurs de chaleur à plaque (Echangeur 1) de 4°C à 70°C.

- **2. Homogénéisateur(3) :** l'homogénéisation consiste à faire passer le lait sous forte pression à travers des orifices très étroits qui réduisent la taille des globules gras et fusionner les particules de la matière grasse et rendre le mélange donc plus homogène.
- **3. Pasteurisation :** La pasteurisation est un procédé consistant à chauffer du lait cru pendant quelques minutes ou secondes à une température la plus basse possible, entre 90-100°C et une pression de 4.4 bars, elle est assurée dans le compartiment II (échangeur 2).
- **4. Refroidissement (récupération de chaleur):** Il se fait par un échange de chaleur dans le compartiment I (échangeur 1) entre l'eau chaude et le lait pasteurisé et dans le compartiment III (échangeur 3) avec le lait froid entrant, le produit sort donc à une température de 22-25°C et une pression de 0,8-2 bars.
- **5. Conditionnement aseptique :** C'est la dernière étape de la production du lait, le produit refroidi est conditionné aseptiquement à l'aide conditionneuse.

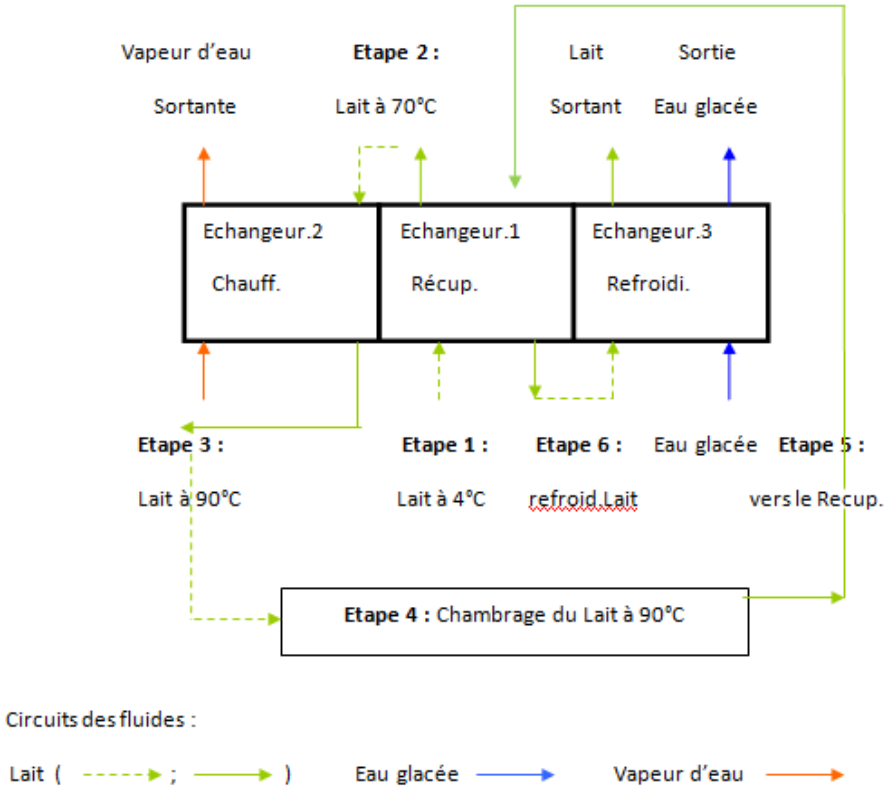


Figure .III.2: Cycle de Pasteurisation du Lait [62].

III .2.2. Le cycle de vapeur [62]

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

III.III - MODELE THERMIQUE DE L'ECHANGEUR A PLAQUE

III.III .1. Introduction

Dans le compartiment de pasteurisation de lait à l'intérieur de l'échangeur à plaques le fluide Chaud (vapeur d'eau) circule dans chaque canal (C_j) pour chauffer les plaques, par un mode de transfert de chaleur (convection). Les plaques transmettent leur chaleur par conduction au fluide froid (lait). Le circuit est présenté sur la (figure IV.3).

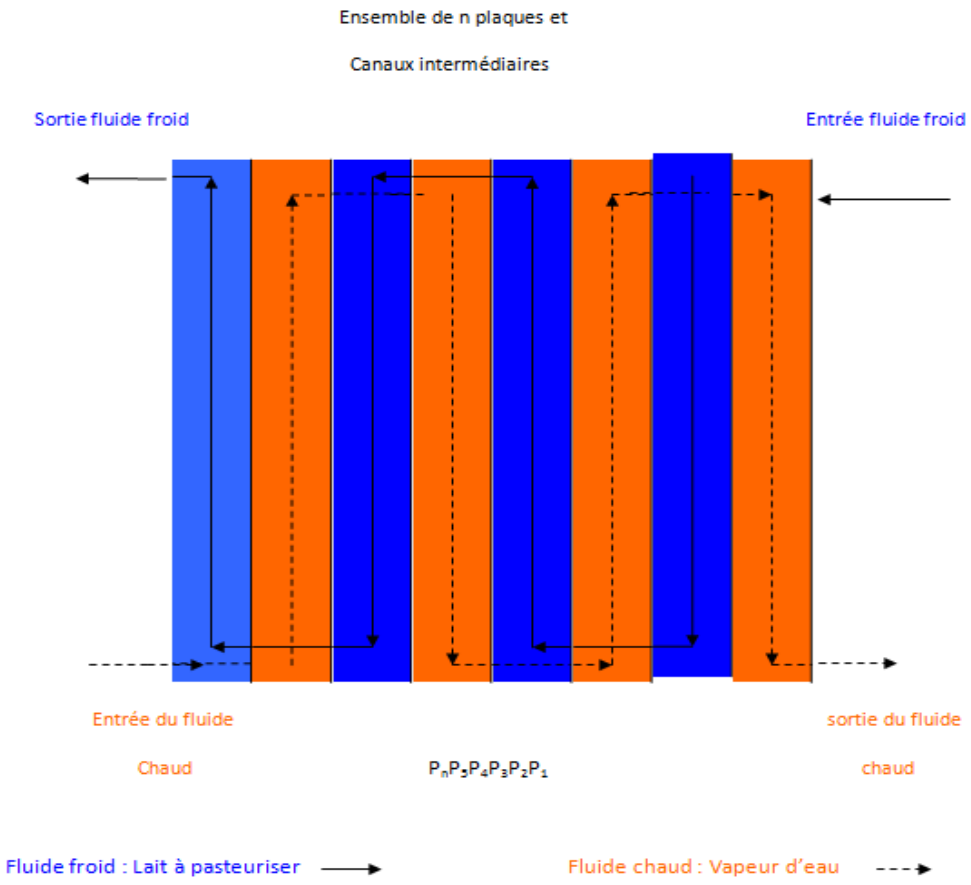


Figure III.3: Arrangement des plaques de l'échangeur de pasteurisation et sens de circulation des fluides [62].

La modélisation de l'échangeur de chaleur à plaques est basée sur les hypothèses simplificatrices suivantes :

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

III.III .2. Formulation mathématique du problème [62]

III.III .2.1. Introduction

Cette partie du travail est consacrée à la mise en équations du problème physique considéré, en utilisant les équations de conservation gouvernant les transferts de chaleur dans un canal plan 2D en régime turbulent. Le modèle de turbulence standard κ - ε est utilisé. Une revue de la littérature comprenant des généralités et des définitions de base sur les écoulements turbulents, les lois de paroi, les modèles de fermeture des équations et leurs modélisations sont présentées. La formulation mathématique est présentée dans ce chapitre en explicitant d'abord le problème physique et les principales hypothèses qui ont été introduites. La formulation proprement dite sera scindée en deux parties: Le modèle d'équation pour un écoulement turbulent en milieu fluide, et le modèle d'équation en présence d'un milieu poreux.

Dans les deux cas, les équations de conservation, le modèle de fermeture des équations en écoulements turbulents, les hypothèses de travail et les conditions aux limites sont présentées [62].

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

III.III .2.2.1. Les hypothèses

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

- Fluide Newtonien,
- le régime d'écoulement est turbulent,
- l'écoulement est incompressible, bidimensionnel en régime stationnaire. On supposeque les propriétés physiques du fluide restent constantes et évaluées à une température moyenne de référence,
- les constantes physiques ne dépendent pas de la température,
- l'accélération due à la pesanteur est négligée,
- pas de source interne de chaleur,
- toute la chaleur générée par les plaques est cédée au fluide,
- La dissipation d'énergie par les forces visqueuses est négligée,
- Les termes de compressibilité $\left(-p\nabla.\vec{V}\right)$ et de dissipation d'énergie par les forces visqueuses $\left(\mu\phi\right)$ sont négligés devant les autres termes de l'équation d'énergie.

III.III .2.2.2. Equations de conservation

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

a)Equation de conservation de la masse

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

b) Equation de conservation de la quantité de mouvement

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

c) Equation de conservation de l'énergie

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

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

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

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

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

III.III.2.3. Modélisation de la turbulence dans un milieu poreux

III.III.2.3.1. Modèle générale

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

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

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

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

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

a) Equation de continuité

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

b) Equations du mouvement

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial X_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial X_i} + \frac{\partial}{\partial X_i}\left[(\nu J + \nu_t)\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial X_j}\right] + \frac{\partial}{\partial X_i}\left[\nu_t \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial X_j}\right] - \frac{2}{3}\frac{\partial k}{\partial X_j}$$

$$-\phi\frac{\nu}{K}U_i - \phi^2 \frac{C_F}{K^{1/2}}\left[\left(U_j U_j\right)^{1/2} U_i - \frac{U_j}{\left(U_j U_j\right)^{1/2}}\left(\nu_t\left\{\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i}\right\} - \frac{2}{3}k\right)\right] \qquad \textbf{(IV.7)}$$

c) Equation de l'énergie

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

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

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

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

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

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

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

- Dans ce model de turbulence les valeurs des constantes les plus courantes sont:

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

III.III.2.3.2. Conditions initiales et aux limites

Les équations de notre système sont soumises aux conditions suivantes :

a) Champ dynamique

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

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

- Condition d'adhérence à la paroi :
- $y = 0$ et $y = H$: $u = v = 0$
- On impose à la sortie un régime dynamique établi:

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

b) Champ thermique

- Une température constante est imposée sur les parois :

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

- Une température constante à l'entrée:

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

- Diffusion axiale négligeable à la sortie:

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

c) Energie cinétique turbulente et la dissipation turbulente

- Condition d'adhérence à la paroi :

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

- A l'entrée :

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

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

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

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

d) Conditions à l'interface fluide – poreux

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

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

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

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

III.III .3. Calcul du coefficient de transfert de chaleur global

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

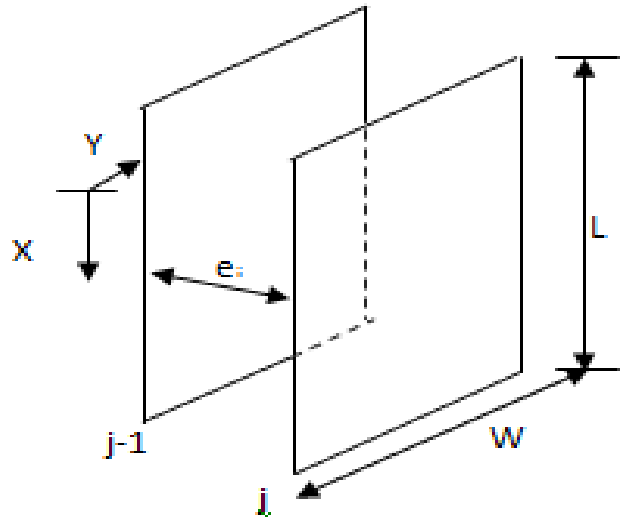


Figure III.4: Schématisation de la direction de l'écoulement entre deux plaques.

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

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

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

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

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

-A partir de la relation (IV.12), nous obtenons : φ

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

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

- A partir de la relation (IV.12) nous parvenons à μ :

2. Chaleur spécifique : Elle est calculée avec la corrélation suivante [62] :

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

3. Débit du mélange : Q = 4000 l/h.

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

4. Vitesse du mélange : S'écrit :

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

Avec: $A = e_j \times W$

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

5. Nombre de Reynolds :

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

$$d_e = 2 \times e_j \quad \textbf{(IV.15)}$$

$\rho_f = 1033,7 - 0,2308T - 0,00246T^2$ [62].

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 [62].

Pour le transfert de chaleur en régime turbulent dans un échangeur à plaques, la corrélation suivante peut être utilisée [62]:

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

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

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

6. Coefficients de transfert de chaleur (h_f)

Pour calculer le coefficient de transfert de chaleur côté fluide froid (h_f), la corrélation (IV.16) et les équations (IV.13) et (IV.15) sont utilisées [62] :

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

D'oùavecl'équation (IV.17): Pr = 2

La corrélation (IV.16) donne : Nu = 173.11

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

$$\text{D'où : } h_f = \frac{Nu \times K}{d_e} \quad \textbf{(IV.18)}$$

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

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

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

k= 0.68 W/m°C [62].

On obtient:μ ,Cp ,ρ_c [62] .

Avec la relation (IV.13) :

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

-D'où avec l'équation (IV.14) et (IV.17) on obtient:Re, Pr

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

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

III.V.Introduction [63]

Ansys est le premier éditeur mondial dans le domaine du calcul par éléments finis. Les outils proposés permettent de résoudre les problèmes de validations produits de manière efficace. Ils permettent d'optimiser le processus de conception (gain de temps énorme) et donc de proposer des produits plus innovants (intégration d'une pré-analyse dans le cycle de conception), de qualité plus élevée tout en minimisant les coûts.

III.V.**1-Ansys DesignSpace**

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

III.V.**-2-Ansys Professional**

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

III.V **-3-Ansys Structural / Mechanical**

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

III.V -4-Ansys CFX

CFX permet le calcul mécanique des fluides et de transferts thermiques. Passer rapidement de votre CAO à une modélisation d'écoulements et de transferts thermiques.

Dynamique des fluides de tous niveaux. Un assistant logiciel intelligent, intégrant les 25 années de savoir-faire de Fluent, guide l'utilisateur tout au long du processus de simulation : 100 % compatible avec les logiciels de CAO. Ansys Fluent pour Catia V5® permet le déploiement de la simulation numérique au cœur du processus industriel. C'est un logiciel de simulation d'écoulements des fluides intégré dans l'environnement Catia V5®.

III.V -5-Les avantages d'Ansys CFX

- intégration bidirectionnelle totale.
- compatibilité avec tous les autres modules d'analyse.
- pilotage de géométries en fonction de la solution.
- système de détection d'erreurs alertant l'utilisateur.
- prétraitement automatique.
- mise en place et calculs.
- algorithmes de convergence.
- rapport automatique

I- Le calcul numérique

L'une des solutions est de recourir à une série d'expériences pour analyser les paramètres et grandeurs du système Mais les essais peuvent s'avérer très coûteux (essais en vol, essais avec matériaux rares, instrumentations très chères...) et ils peuvent être très dangereux (essais nucléaires, environnement spatial...). Enfin il peut être difficile de mesurer tous les paramètres : échelles du problème trop petites (chimie du vivant, couche limite en uide...) ou trop grandes (astrophysique, météorologie, géophysique...).

III.VI -1- LES TROIS GRANDES FAMILLES DE METHODES :[64]

Pour passer d'une problème exact continu régit par une EDP (Ces modèles utilisent très souvent des systèmes d'équations aux dérivées partielles) au problème approché discret, il existe trois grandes familles de méthodes :

- **Les différences finies :** La méthode consiste à remplacer les dérivées partielles par des différences divisées ou combinaisons de valeurs ponctuelles de la fonction en un nombre fini de points discrets ou noeuds du maillage.
  - Avantages : grande simplicité d'écriture et faible coût de calcul.
  - Inconvénients : limitation à des géométries simples, di-cultés de prise en compte des conditions aux limites de type Neumann.

- **Les volumes finis :** La méthode intègre, sur des volumes élémentaires de forme simple, les équations écrites sous forme de loi de conservation. Elle fournit ainsi de manière naturelle des approximations discrètes conservatives et est particulièrement bien adaptée aux équations de la mécanique des fluides. Sa mise en oeuvre est simple avec des volumes élémentaires rectangles.
  - Avantages : permet de traiter des géométries complexes avec des volumes de forme quelconque, détermination plus naturelle des conditions aux limites de type Neumann.
  - Inconvénient : peu de résultats théoriques de convergence.

- **Les éléments finis** : La méthode consiste à approcher, dans un sous-espace de dimension finie, un problème écrit sous forma variationnelle (comme minimisation de l'énergie en général) dans un espace de dimension infinie.

La solution approchée est dans ce cas une fonction déterminée par un nombre fini de paramètres comme, par exemple, ses valeurs en certains points ou noeuds du maillage.

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

III.VI.2.Les étapes à suiver pour simuler mathématiquement un probléme de transfert de chaleur dans un échangeur a plaque sans et avec déflecteurs

III.VI.2-1-définir la géométrie de l'échangeur

Dans cette étude les plaques sont représentées par des rectangles.

Méthode de travail :

- La premiere étape : lancer ANSYS depuis le menu de démarrage.
- La seconde étape : on suit les instructions suivantes :

→ Preprocessor → modeling → creat → area {rectangle} → by dimention

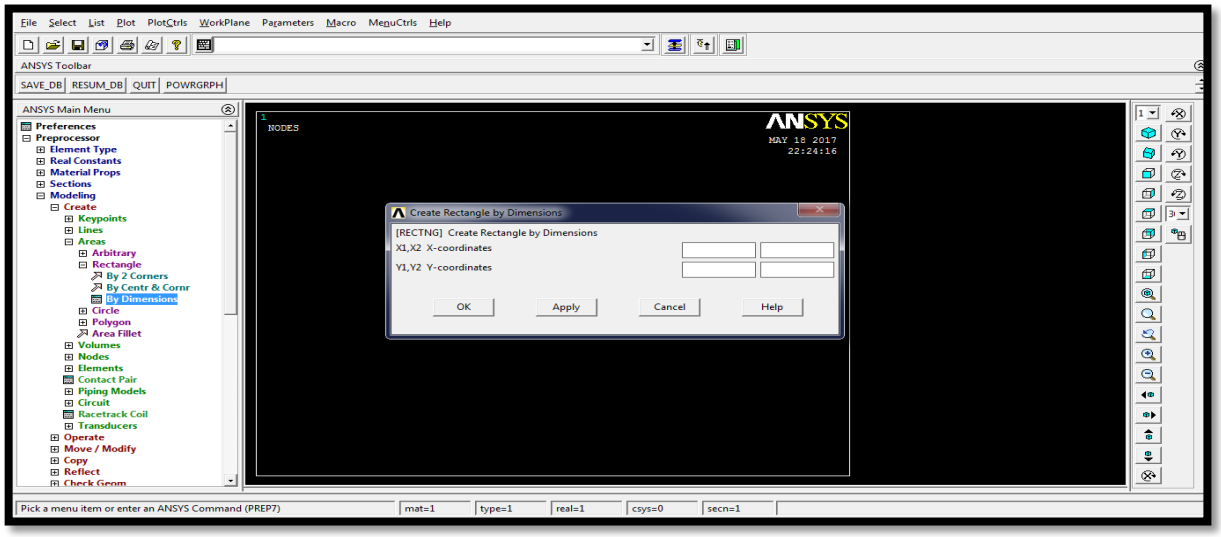


Figure III.5:schéma representative de l'interface en preprocessor.

- La troisiéme étape : on doit soustraire la surface pour représenter par la suite le deflecteur créer un vide (un trou) :

→ Preprocessor→ modeling → operate → booleans →substract→ area (selectionnant le grand rectangle →ok→séléctionner les rectangle ou les crecles).

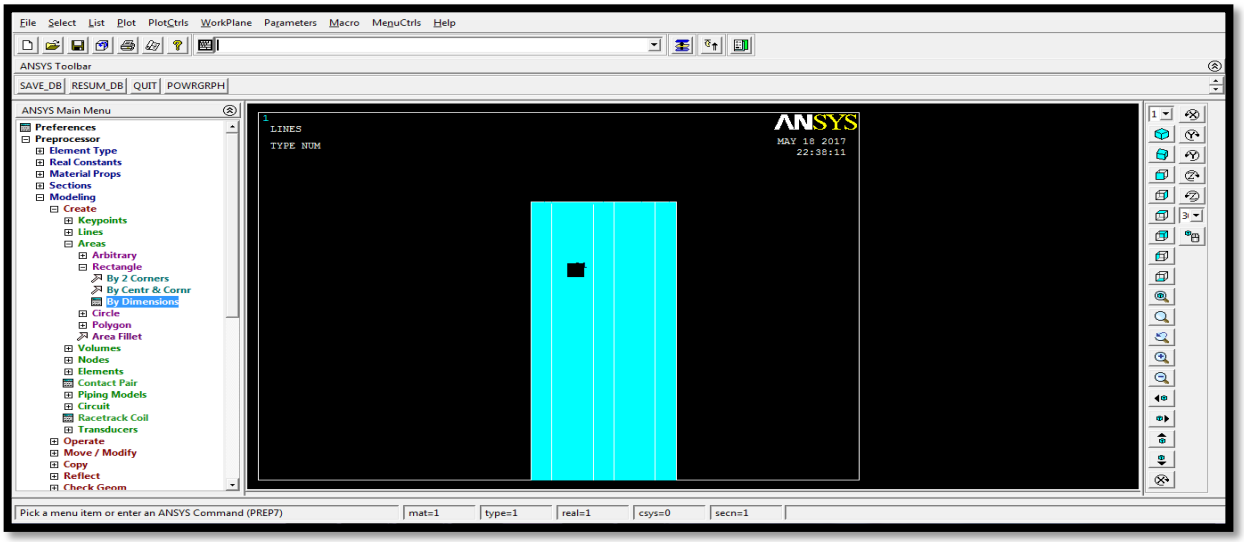


Figure III.6:schéma represente le substrat de surfaces déflecteurs.

III.VI.2-2- le maillage

Le maillage intégré par le logiciel ANSYS est fait selon :

- La premier étape : choisir d'abord le modèle mathématique utilisé dans notre etude :

→ Preprocessor → élement type → add/edit/deletflotrancfd → fluid 141 → ok → close → ok

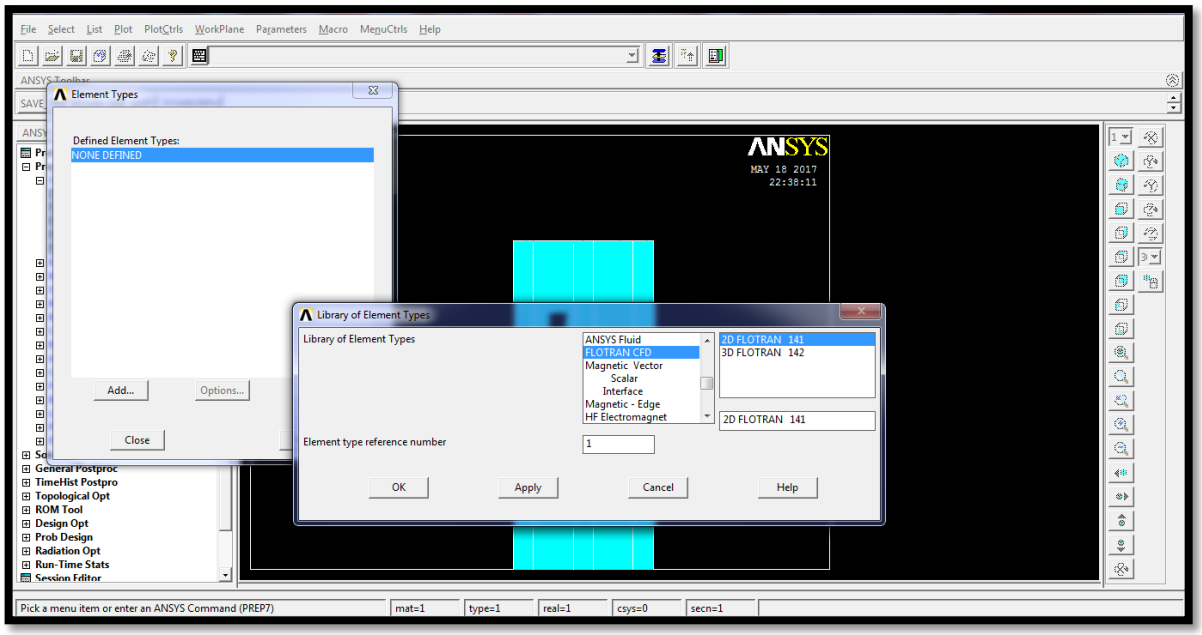


Figure III.7:schéma representatif de l'interface pour sélectionner le modèle mathématique.

Pour définir le maillage :

→ Meshing →meshtool → set → area : sélectionner la surface → ok

→ entrer la valeur du maillage qu'on veut → ok → meshtool →mesh → séléctionner → la surface →ok

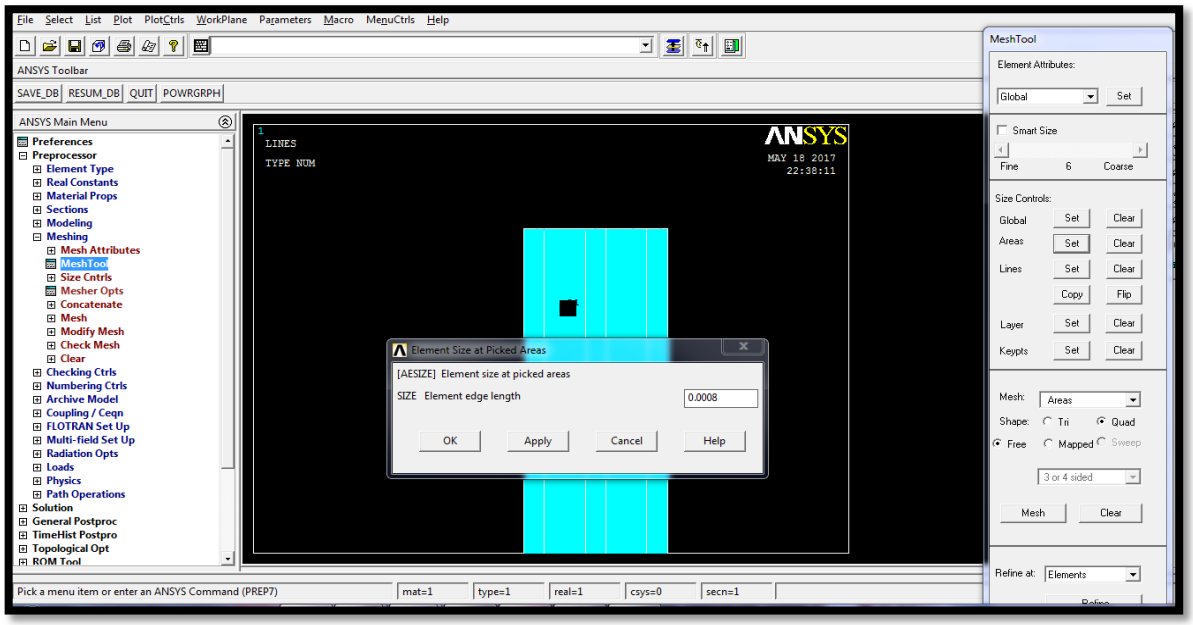


Figure III.8:schéma represente l'etape de maillage

III.VI.2-3-les conditions aux limites

Les conditions aux limites à l'entreé de la paroi extérieure et aux bords de la plaque (vitesse d'entrée , les températures et la pression) sont définées :

- **La vitesse :**

→ Preprocessor → load → define load → fluid cfd → velocity → on line :selectionner les parois

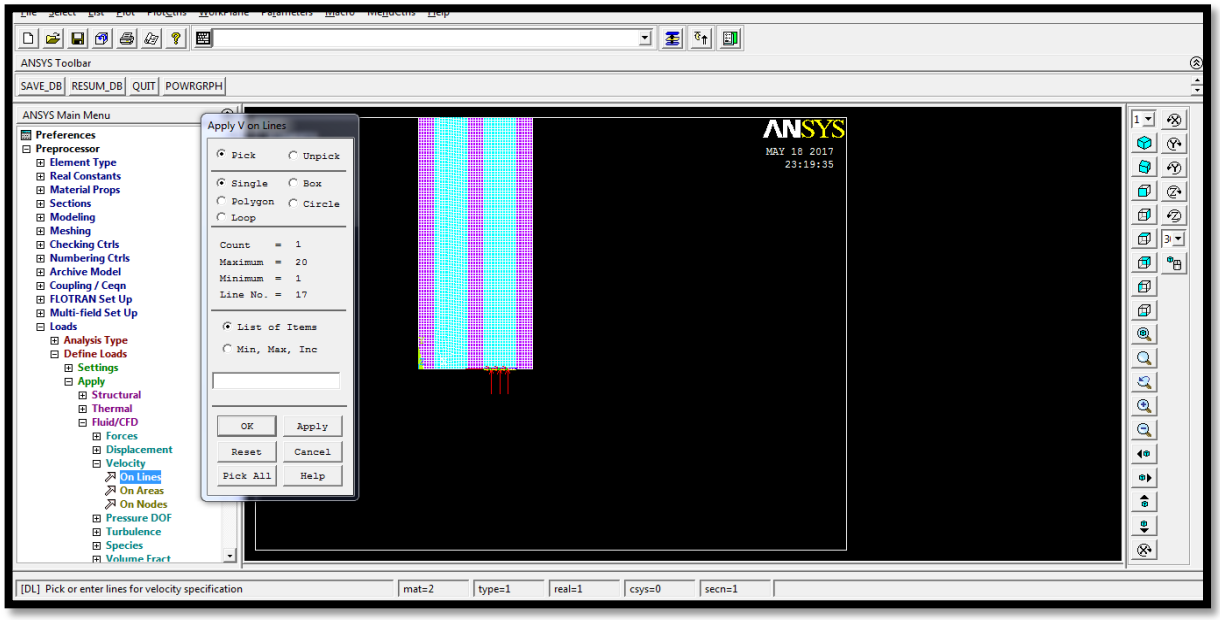


Figure III.9: Lees vitesses.

- **La préssion:**

→ Preprocessor → load → define load → fluid cfd →pressurdof → on line : selectionner les parois

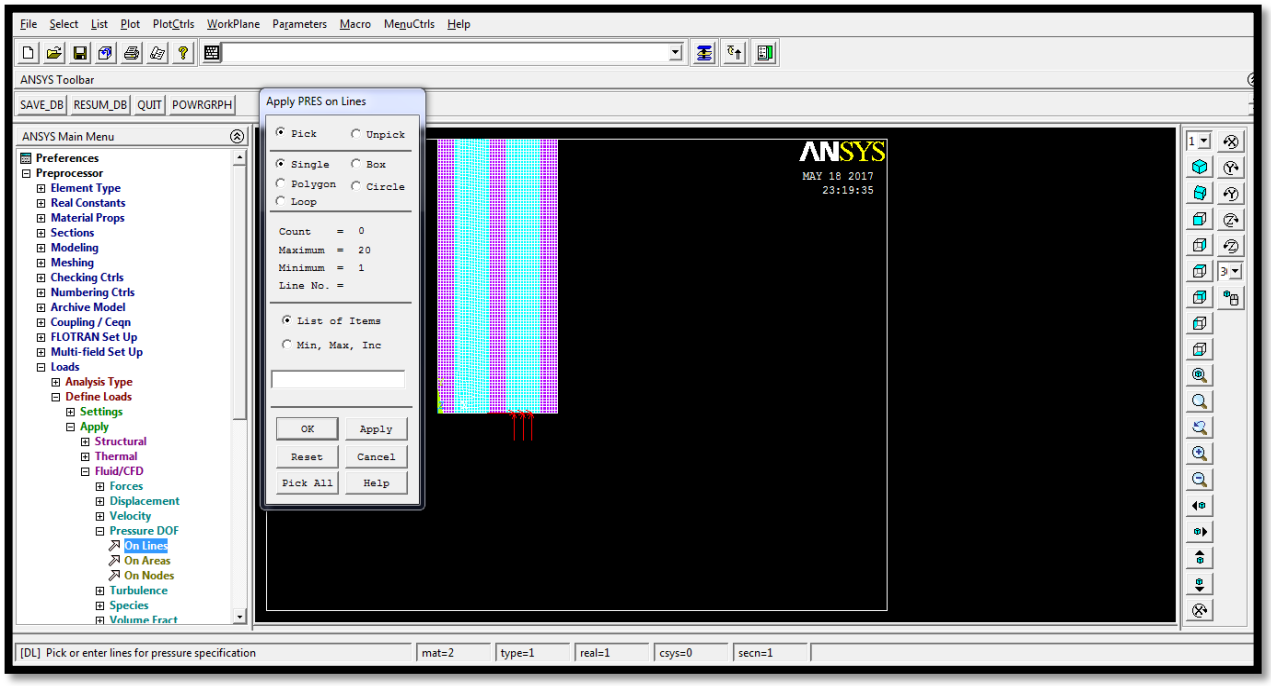


Figure III.10: La pression.

- **La température :**

→ Preprocessor → load → define load → thermal→ temperature → on line :selectionner les parois

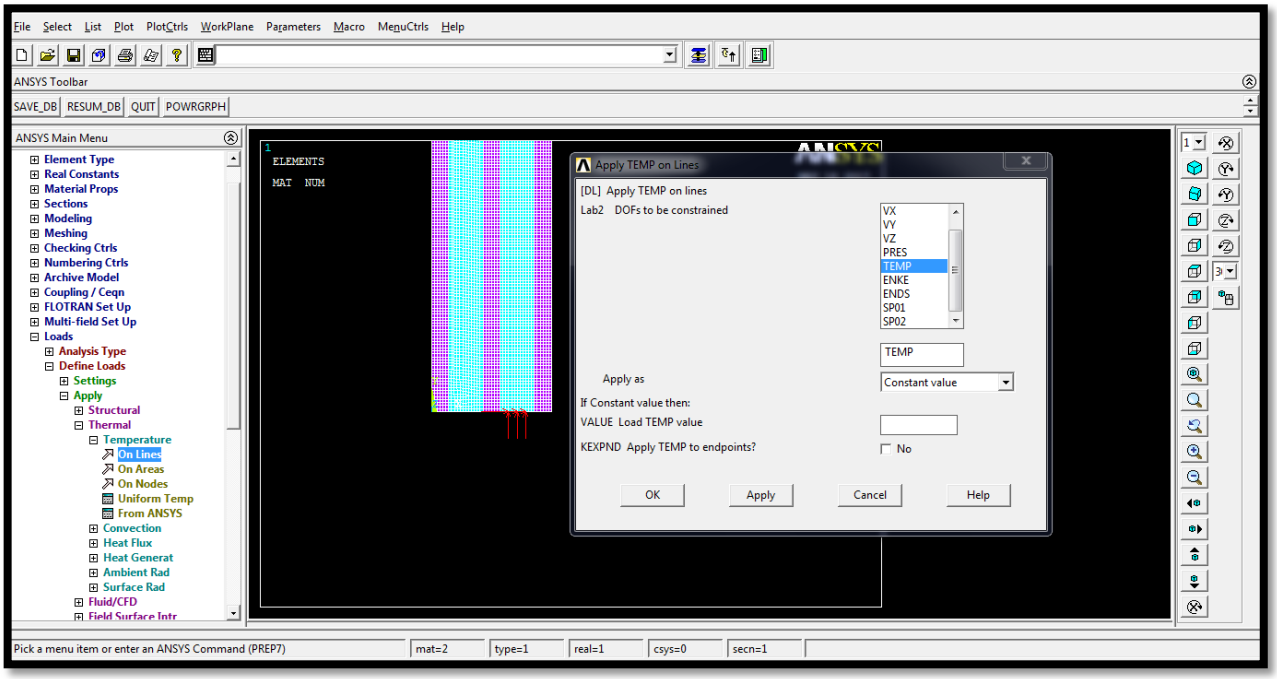


Figure III.11: Les températures.

III.VI.2-4-solution et exécution

a-solution : Le choix du nombre d'itération nécessaires pour l'execution ainsi que le choix des propriétés du fluide et les caractéristiques de l'écoulement : (state, thermique et turbulent)

→ Solution → flotron set up → solution option

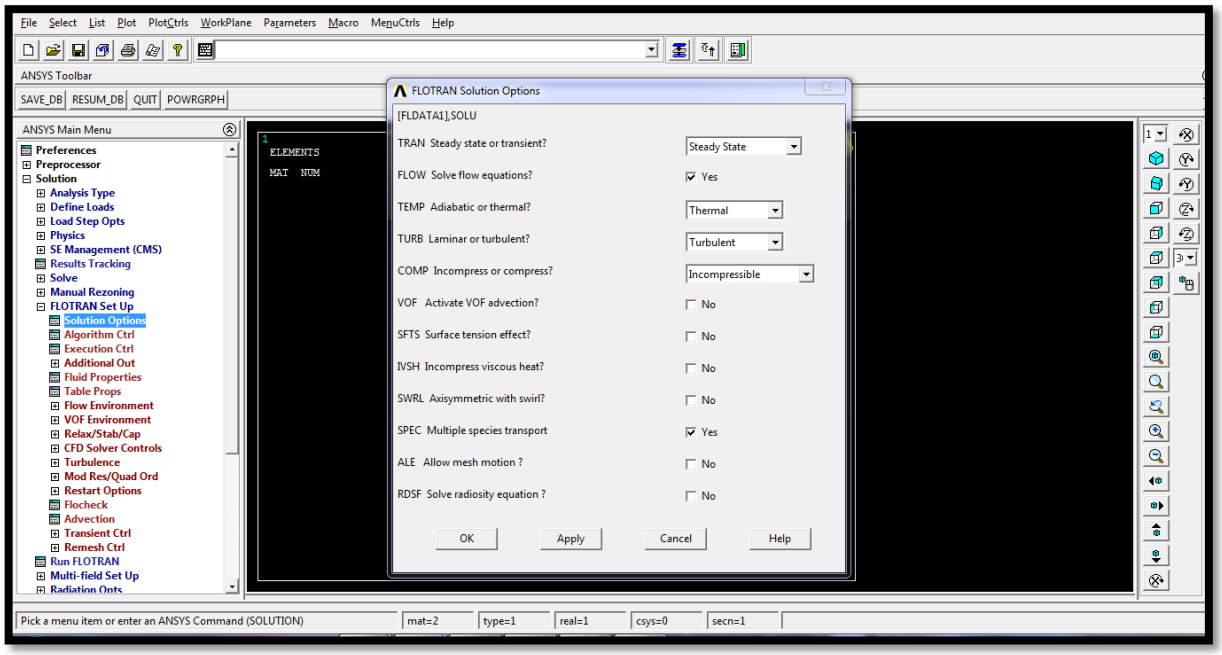


Figure III.12: Les caractéristiques de l'écoulement.

b-exécution control : Le choix du nombre d'itération :

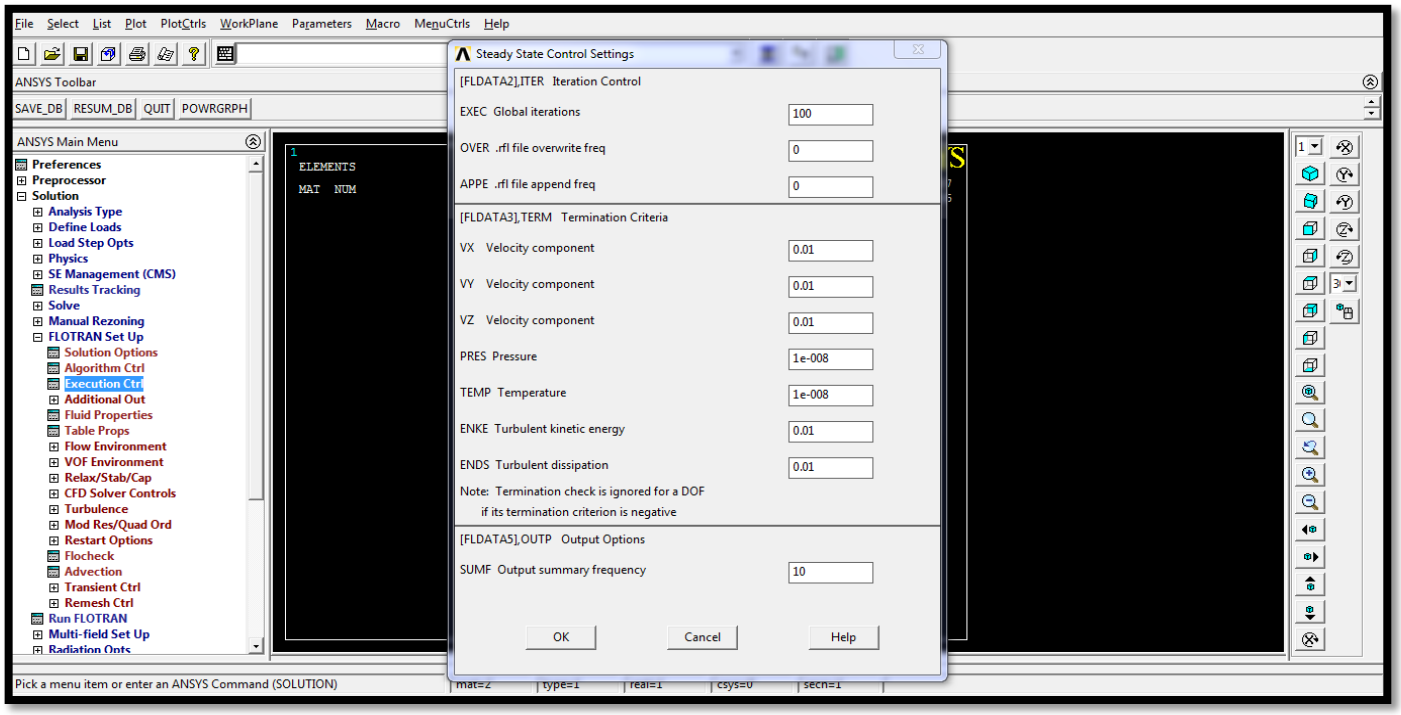


Figure III.13: Le nombre d'itération pour l'exécution.

c-fluidproprietes : Le choix des propriétés du fluide : (pour notre cas : CMIX)

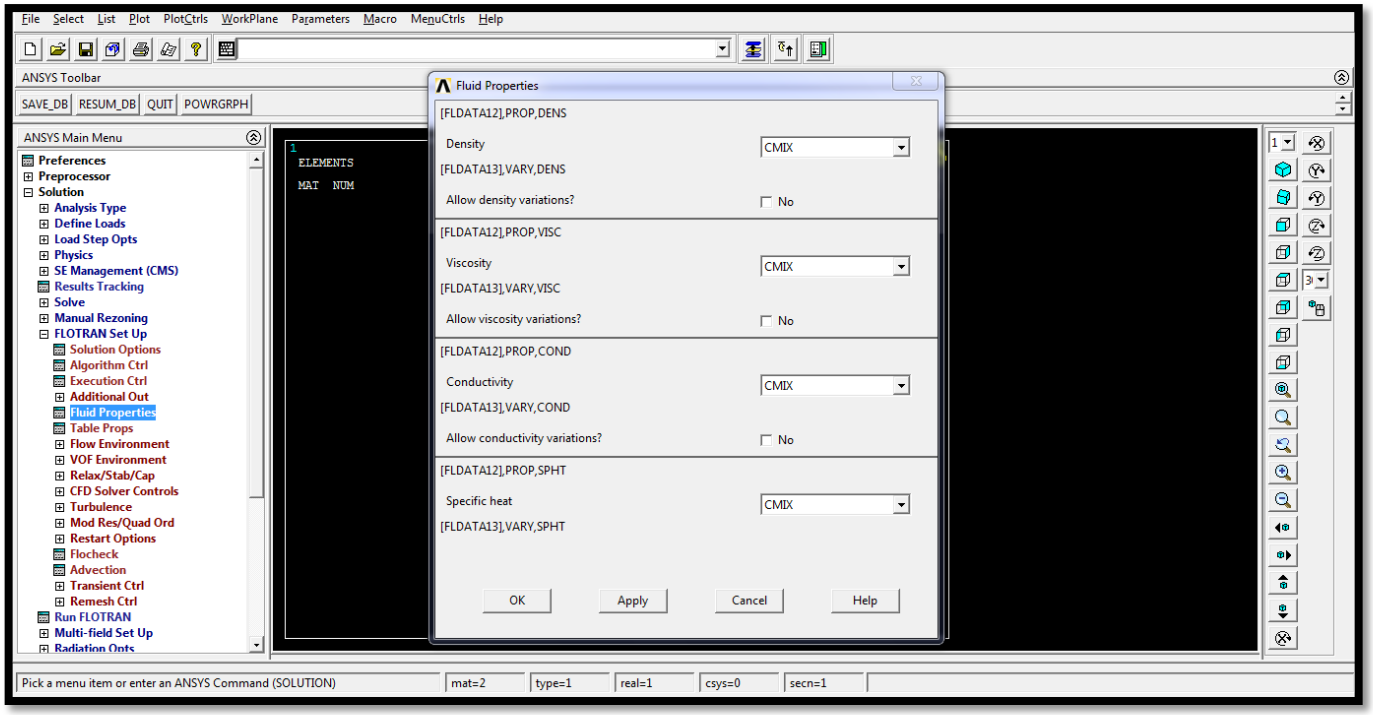


Figure III.14: Les propriétés de fluide.

III.VI.2-5-Propriétés d'eau et de lait :

Les propriétés du lait :→ Preprocessor → flotron set up → multipl species → 02→ ok

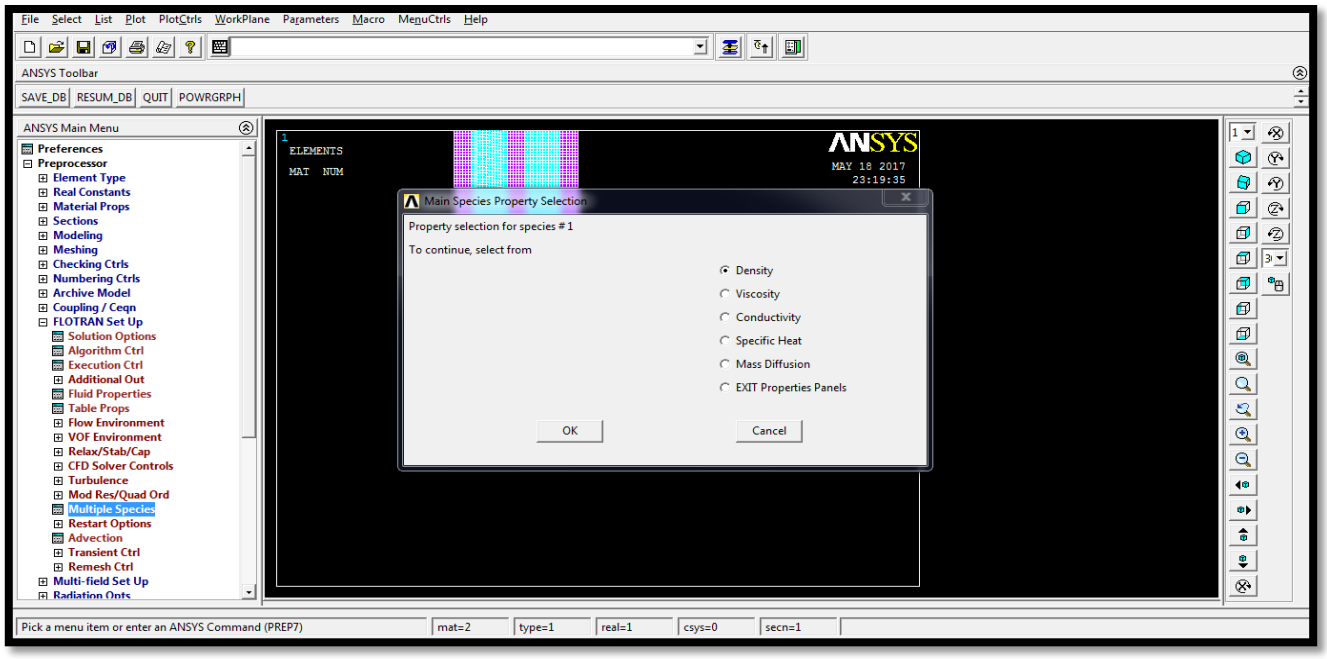


Figure III.15:pour sélectionner les propriétés d'eau et de lait.

Preprocessor → load → define load → fluid cfd→species → on line : selectionner les parois

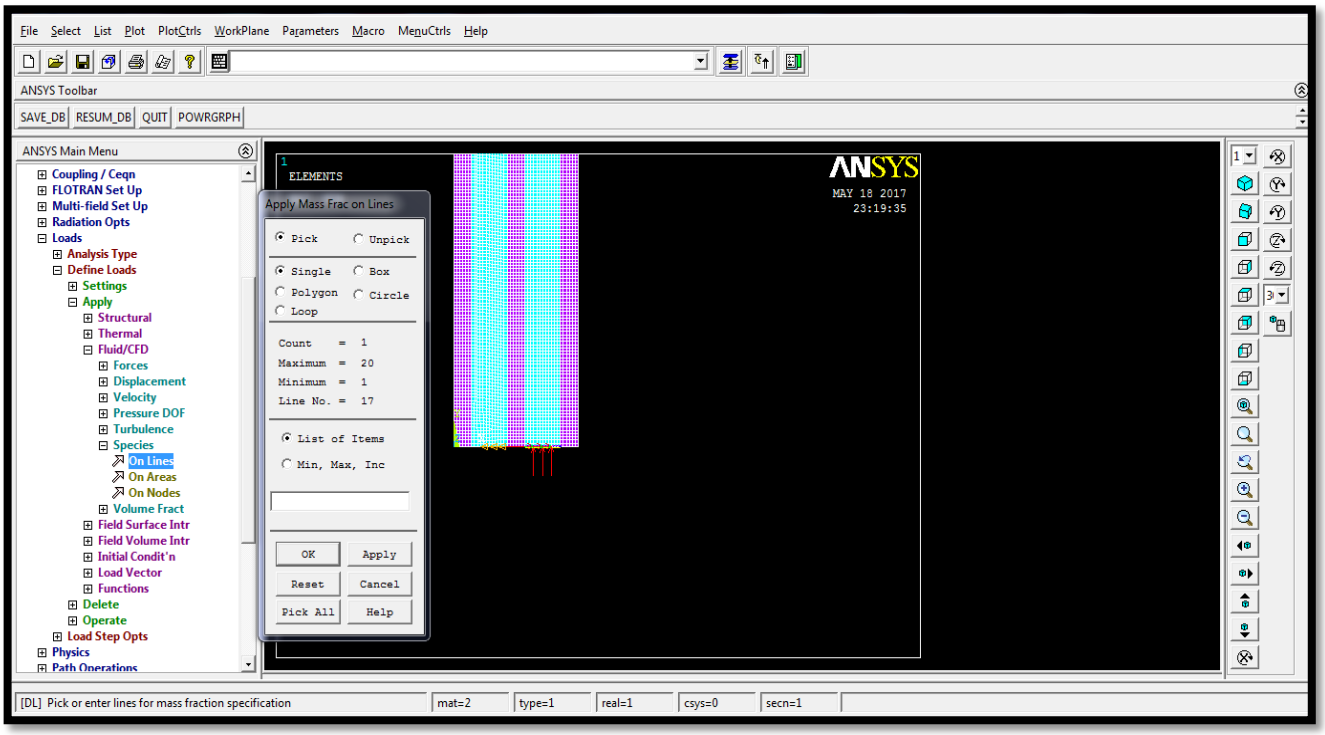


Figure III.16: Les données del'eau et du lait.

III.VI.2-6-Run flotran : Exécuter dyu programme : (exécution)

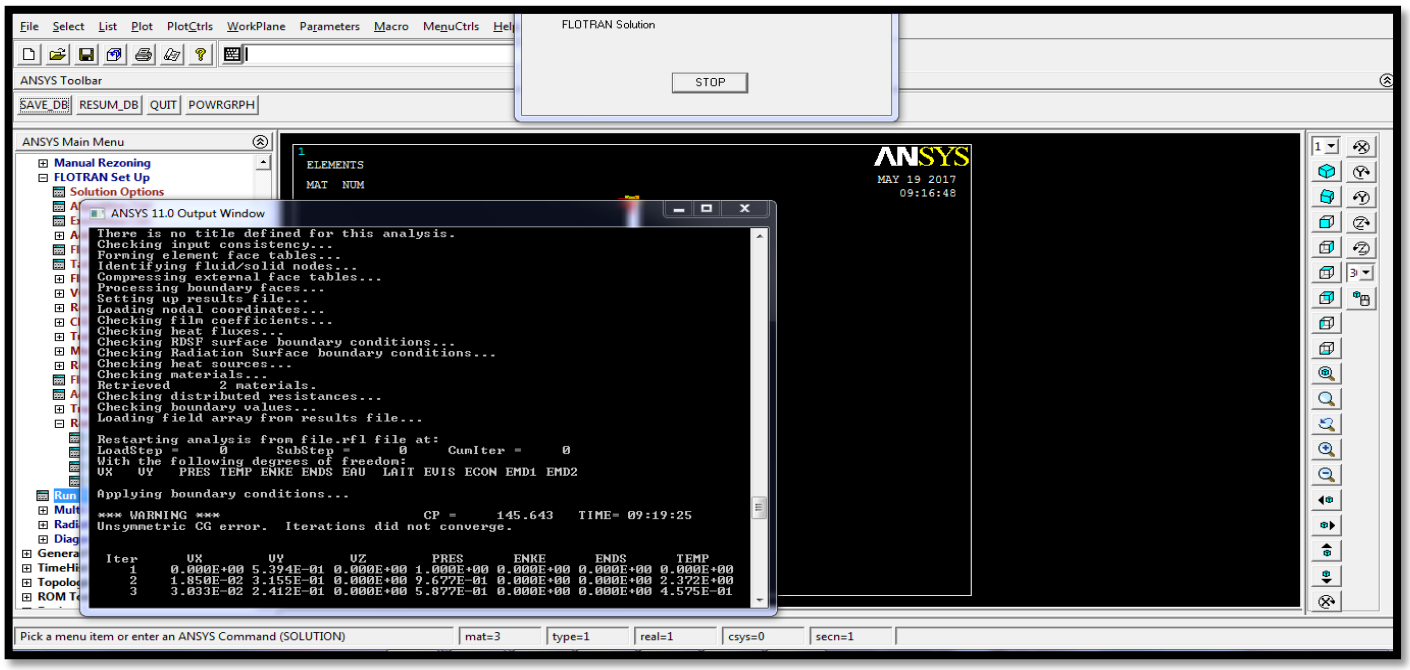


Figure III.17: Exécutiondu programme Ansys.

III.VI.2-7-Lire les résultats :

Pour lire les résultats finals exécutés on suit les instruction suivantes :

→ Généralpostproc → read result → last set →plot result →contour plot→ Nodal solution → dofsolution : et on sélectionne la grandeur qu'on veut lire .

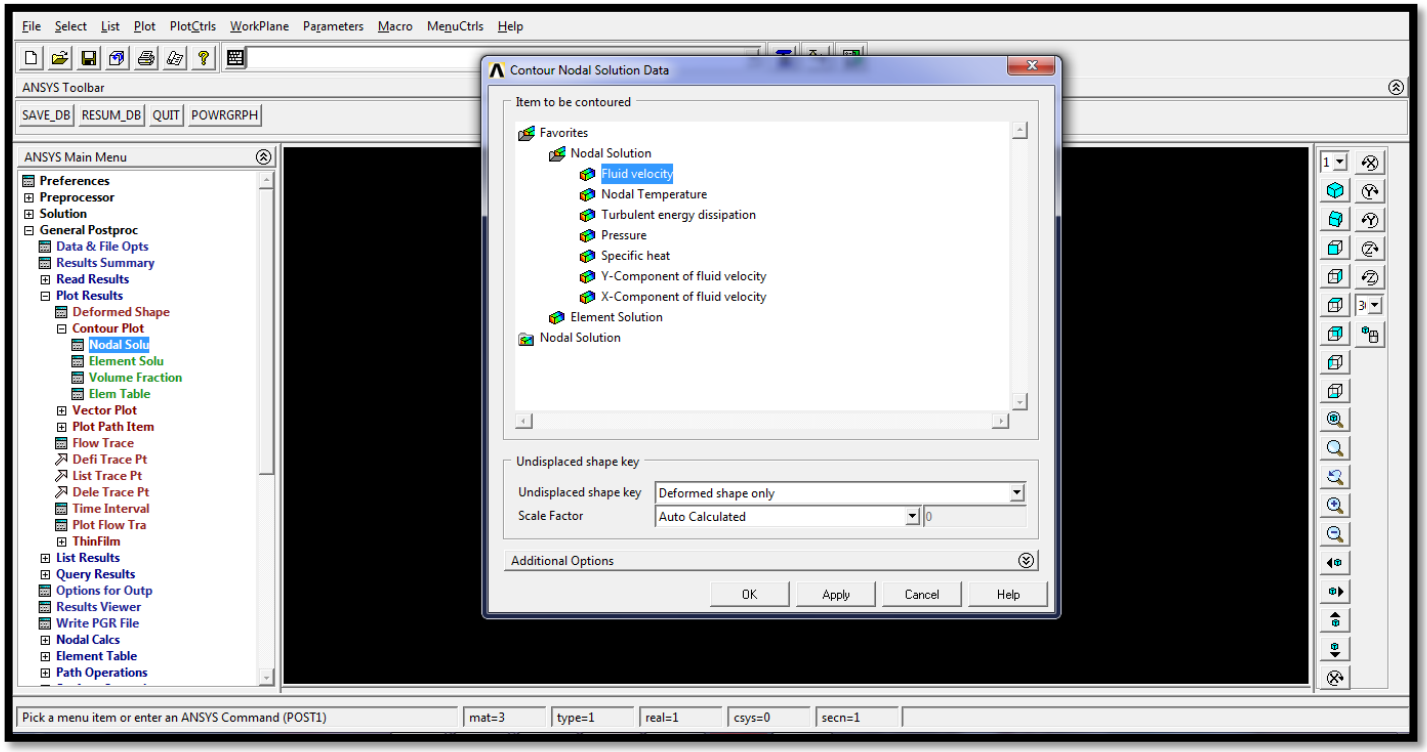


Figure III.18: Affichage des résultats.

III.VII.Conclusion

Les modèles physiques considérés prenent en compte les couplage entre les principaux phénoménes physiques (transfert de chaleur) entrant en jeu avec et sans défelecteur.

Dans ce chapitresont présentés les méthodes numériques qui sont utiliseés généralement pour la résolution des systémes d'équations aux dériveés partielles. Elles concernent l'emploi de la méthode des éléments finis intégrée sur ANSYS. On explique également la méthodologie de travail du logiciel.

I. Introduction

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

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

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

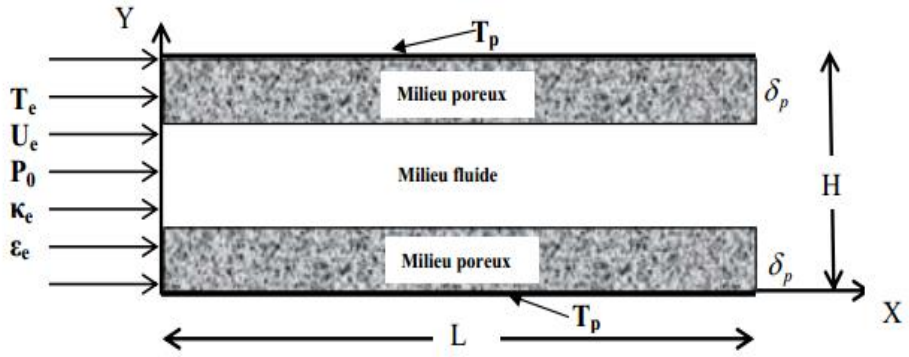


Figure V.1: Ecoulement dans un canal à section rectangulaire.

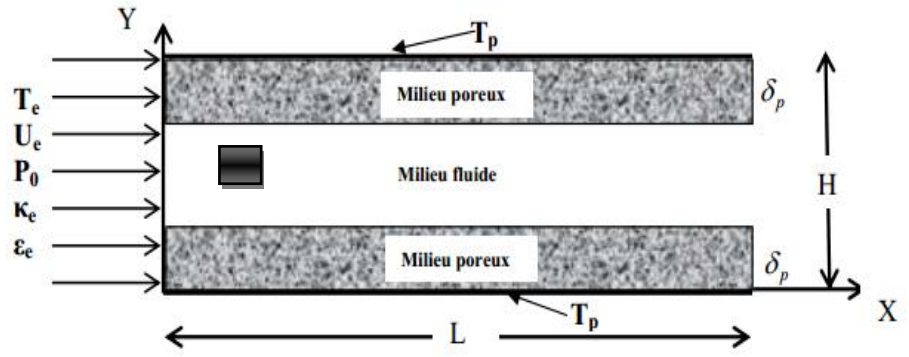


Figure V.2: Ecoulement dans un canal à section rectangulaire à la présence de déflecteurs.

II. Les profils dans un milieu complatement fluide

II.1. Profil de température

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

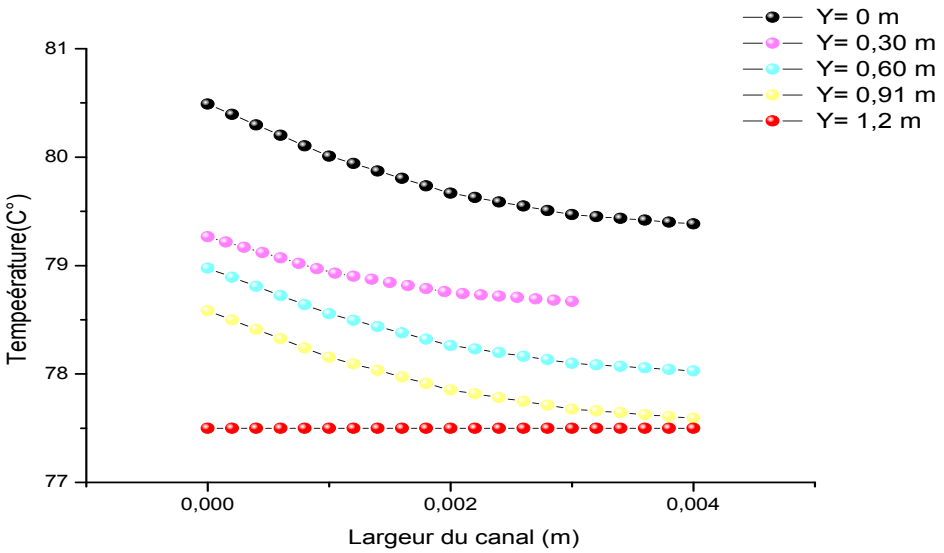


Figure V.3 : Variation du profil de température dans lait.

Une augmentation de la température du lait le long du canal est observée en raison de l'échange thermique avec la vapeur d'eau circulant en contre courant dans l'échangeur de chaleur. Dans le sens de la largeur, elle est presque constante pour une longueur donnée puis elle augmente rapidement près de la paroi chaude. La valeur maximale de la température est observée pour X=0, à la sortie du canal (écoulement contre-courant). D'autre part, on observe une diminution de gradient de température pour la vapeur d'eau (graphe en annexe) pour les mêmes raisons.

II.2. Profil de vitesse

L'évolution du profil de la vitesse en fonction de la largeur du canal est représentée sur la Figure V.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.

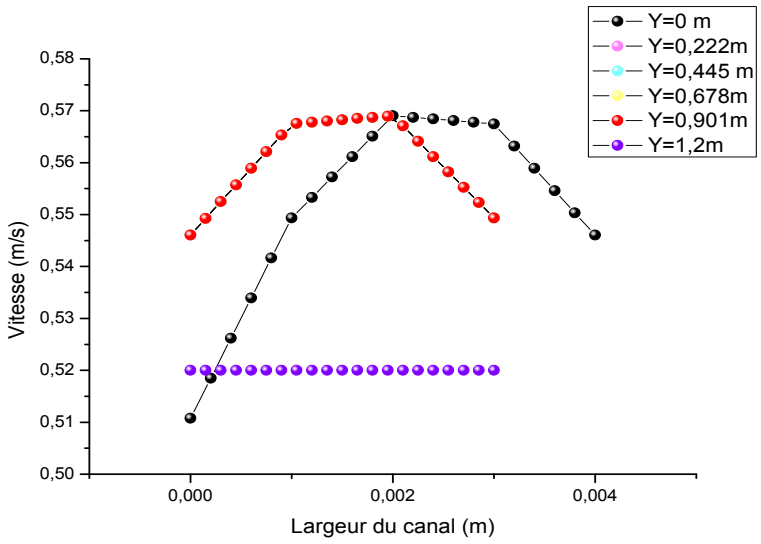


Figure V.4: Variation du profil de vitesse à la longue de canal

II.3. Profil du facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente

L'évolution du profil du facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente en fonction de la largeur du canal est représentée sur la Figure V.5 et ce pour différentes positions dans le canal (y).

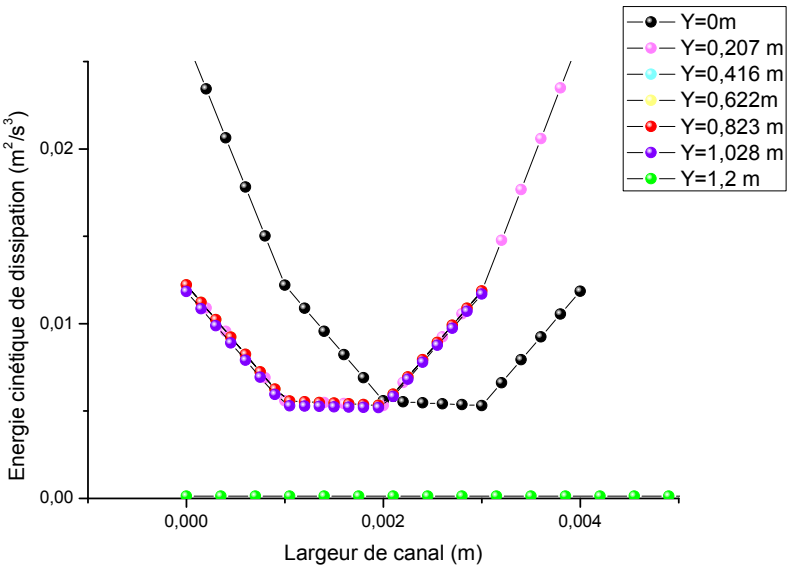


Figure V.5:Variation du facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente.

L'évolution de l'énergie cinétique turbulente à la sortie du canal est représentée sur la figure V.5. Il apparait clairement que l'énergie cinétique turbulente atteint sa valeur maximale à l'interface fluide-paroi et/ou fluide-dépôt. La réduction de la section de passage du fluide au cours du temps et la nature de l'interface de contact (fluide-dépôt) provoque le pic d'énergie turbulente. A cette interface, en plus de la résistance due aux forces visqueuses et d'inertie, une résistance supplémentaire plus importante est due aux termes de Darcy et Forchheïmer. Ce qui produit une accélération plus importante dans cette zone. En allant vers le centre du canal l'énergie cinétique turbulente décroît progressivement et atteint son minimum dans lasection centrale du canal. La réduction de la section de passage du fluide fait augmenterl'énergie cinétique.

III. Les profils dans un milieu fluide avec encarassement

III.1. Profil de la température

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

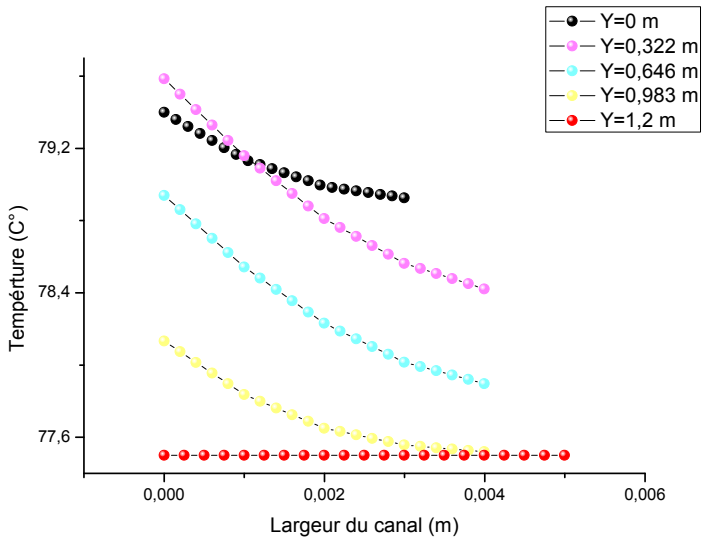


Figure V.6: La variation de la température à la longue de canal.

Une augmentation de la température dans le cas d'un canal avec un dépôt poreux (encrassement) sur les parois est toujours observée mais elle est moins significative en comparaison avec le cas sans encrassement et ce en raison de la présence du dépôt de nature isolante [62].

III.2. Profil de la vitesse

L'évolution du profil de la vitesse en fonction de la largeur du canal en présence de l'encrassement est représentée sur la Figure V.7 et ce pour différentes positions dans le canal (y).

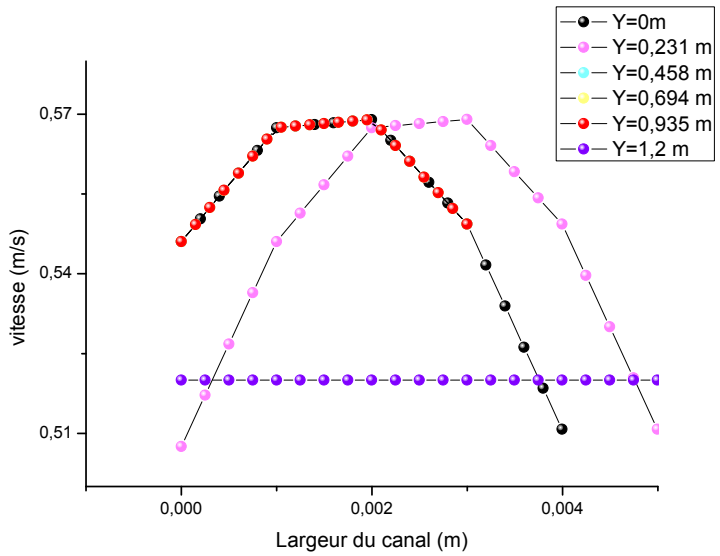


Figure V.7: Variation du profil de vitesse.

Les mêmes allures sont observées mais les valeurs sont plus importantes en raison du rétrécissement dans la section de passage du fluide due de la présente du dépôt

III.3. Profil du facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente avec un milieu poreux

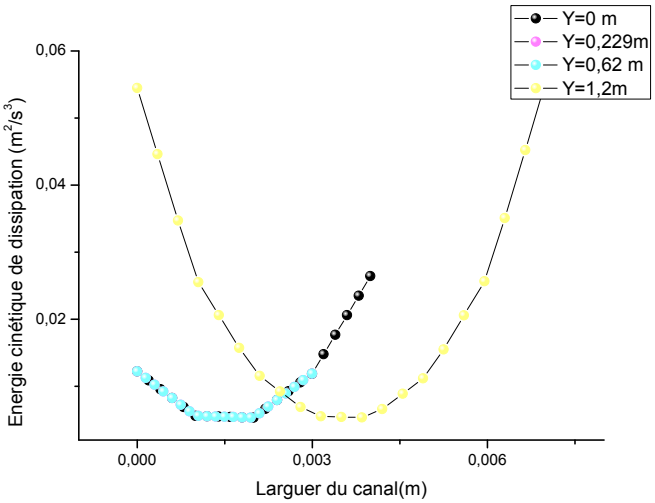


Figure V.8: Facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente avec un milieu poreux.

L'évolution du profil du facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente le long de la largeur du canal est représentée sur la figure V.8 et ce pour différentes positions dans le canal (y). Il apparait que le facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente atteint sa valeur maximale à l'interface fluide-dépôt.

A cette interface, en plus de la résistance due aux forces visqueuses et d'inertie, une résistance supplémentaire plus importante est due aux termes de Darcy et Forchheïmer.

Ce qui produit une accélération plus importante dans cette zone. En allant vers le centre du canal le facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente décroît progressivement et atteint son minimum dans la section centrale du canal.

IV. Etude comparative entre le milieu fluide et le milieu fluide avec l'encrassement

IV.1. Profil de la température

La Figure V.9 présente la variation du profil de la température dans la section de sortie en fonction de largeur du canal avec et sans dépôt pour une position y=0.60.

D'après cette figure, l'encrassement fait réduire considérablement la température de sortie de la conduite. La température du fluide dans la partie centrale du canal chute, ce qui représente une dégradation importante des échanges fluide-parois. On observe que la température atteint sa valeur maximale à la sortie du canal (x=0) dans un milieu fluide mieux que avec un milieu poreux. L'encrassement de nature isolante joue un rôle de deuxième paroi en diminuent la transmission de la chaleur.

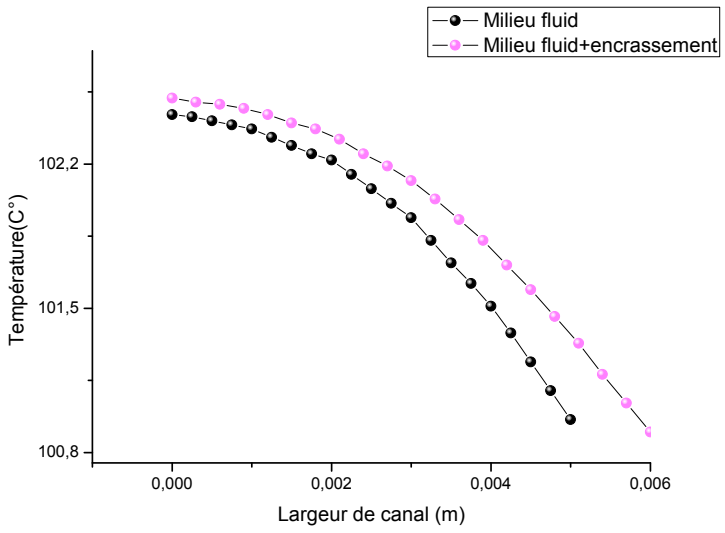


Figure V.9: Evolution de la température avec et sans dépôt.

IV.2. Profil de la vitesse

L'évolution du profil de la vitesse en fonction de la largeur du canal avec et sans dépôt est représentée sur la Figure V.10 pour une position y=0.60m.

Initialement, l'encrassement n'a pas encore eu lieu. La vitesse dans le dépôt diminue par rapport au cas précédent. Cette diminution de la vitesse dans le milieu poreux est compensée par une augmentation de la vitesse dans la partie centrale du canal afin de conserver le débit dans la conduite. Les mêmes allures sont observées.

On remarque que, dans le cas d'un canal avec un dépôt poreux sur les parois, la forme du profil de vitesse est à faible gradient à la sortie du canal au niveau de fluide, par contre les sorties de milieu poreux où elle est atteint est maximal. La réduction de la section de passage du fluide à partir de l'augmentation de l'épaisseur de milieu poreux provoque une accélération de la vitesse dans la sortie du canal, on s'aperçoit que la vitesse maximum à la sortie augmente lorsque l'épaisseur de milieu poreux augmente.

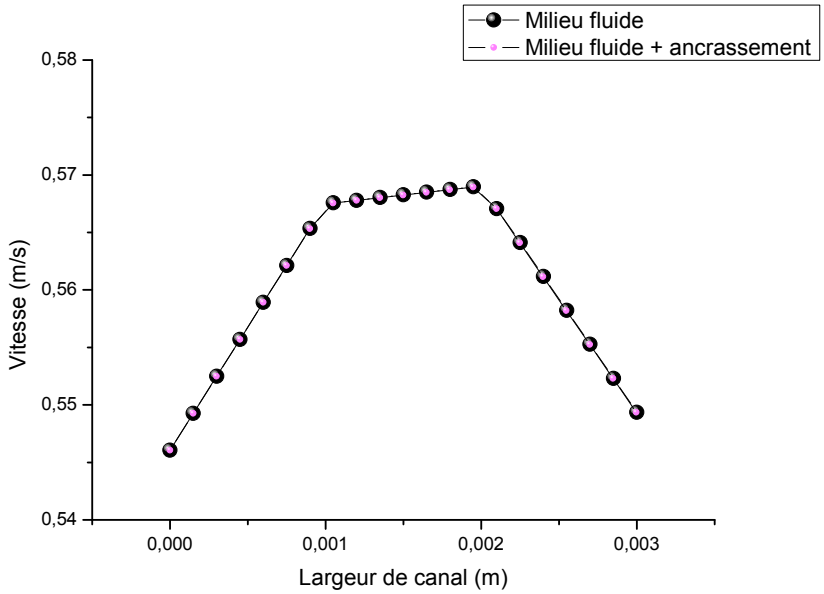


Figure V.10: Evolution de la vitesse avec et sans dépôt.

IV.3. Le profil du facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente

L'évolution du profil du facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente en fonction de la largeur du canal avec et sans dépôt est représentée sur la Figure V.11pour une position y=0.60 m.

On remarque d'après la figure que le facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente prend une valeur maximale dans le milieu fluide avant la formation de dépôt près des parois. En allant vers le centre du canal le facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente décroît progressivement et atteint son minimum.

Le point maximal de facteur de dissipation de l'énergie cinétique dans un milieu fluide est plus grand que dans un milieu poreux .Cela est due a un encrassement dans le milieu poreux

L'énergie cinétique turbulente est faible à la sortie de canal au niveau de fluide par apport la sortie de milieu poreux où elle est attient une valeur maximale

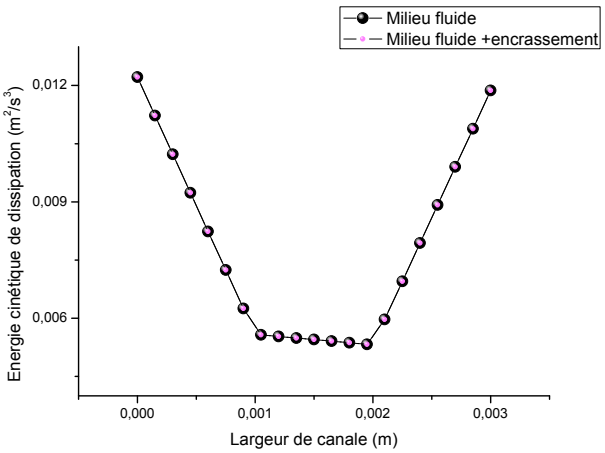


Figure V.11: Evolution du facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente avec et sans dépôt.

V. Les profils dans un milieu complètement fluide avec la présence de déflecteur côté lait

V.1. Profil de température

L'évolution de la température en fonction de la largeur du canal est représentée sur la Figure V.12 et ce pour différentes positions dans le canal (y). On remarque toujours une augmentation de la température due à l'échange thermique en préence de défelceteur.

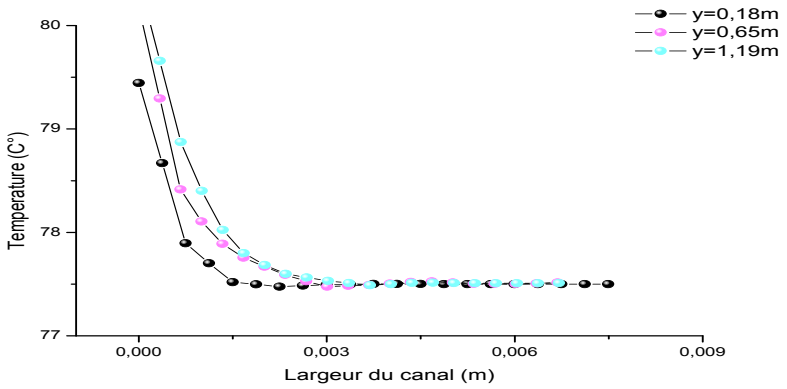


Figure V.12 : Variation du profil de température dans lait.

V.2. Profil de vitesse

L'évolution du profil de la vitesse en fonction de la largeur du canal est représentée sur la Figure V.13 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.

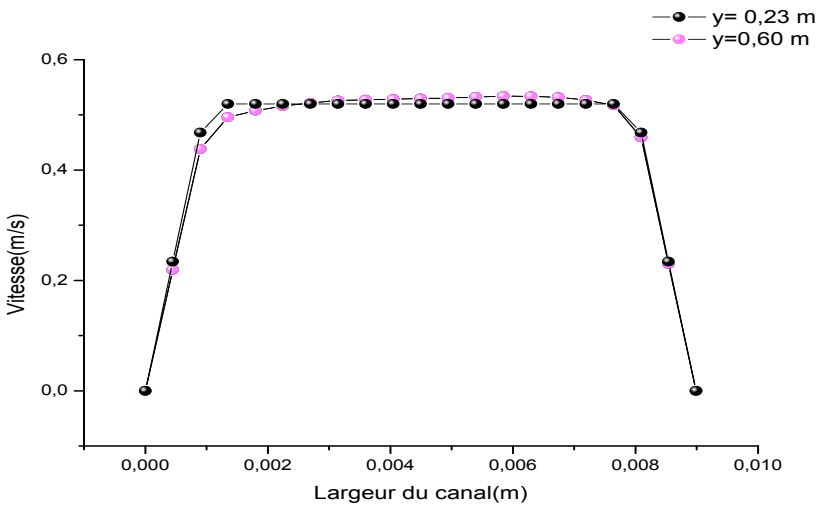


Figure V.13: Variation du profil de vitesse à la longue de canal

VI. Les profils dans un milieu fluide avec encarassementavec la présence du déflecteur coté lait

VI.1. Profil de la température

L'évolution du profil de la température en fonction de la largeur du canal en présence de l'encrassement est représentée sur la Figure V.14 et ce pour différentes positions dans le canal (y). La présence du déflecteur donne une turbulence supplémentaire donc un meilleur écahange thermique.

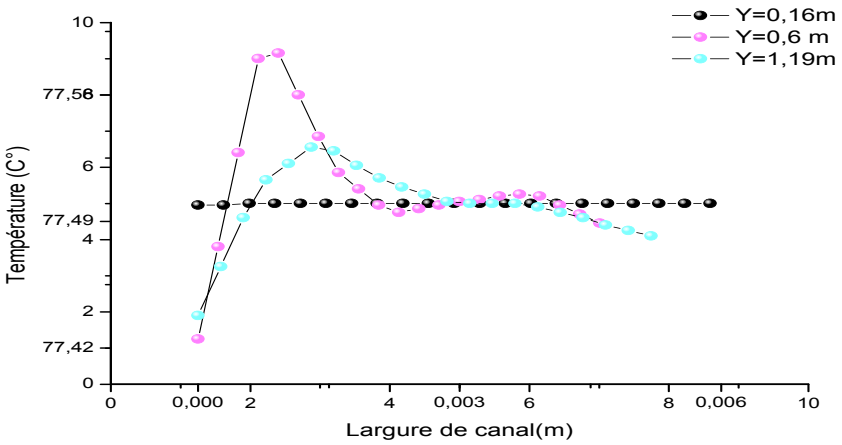


Figure V.14: La variation de la température à la longue de canal.

VI.2. Le profil de la vitesse

L'évolution du profil de la vitesse en fonction de la largeur du canal en présence de l'encrassement est représentée sur la FigureV.15 et ce pour différentes positions dans le canal (y). Le déflecteur joue un rôle d'obstacle d'où une chutte de la vitesse à son niveau.

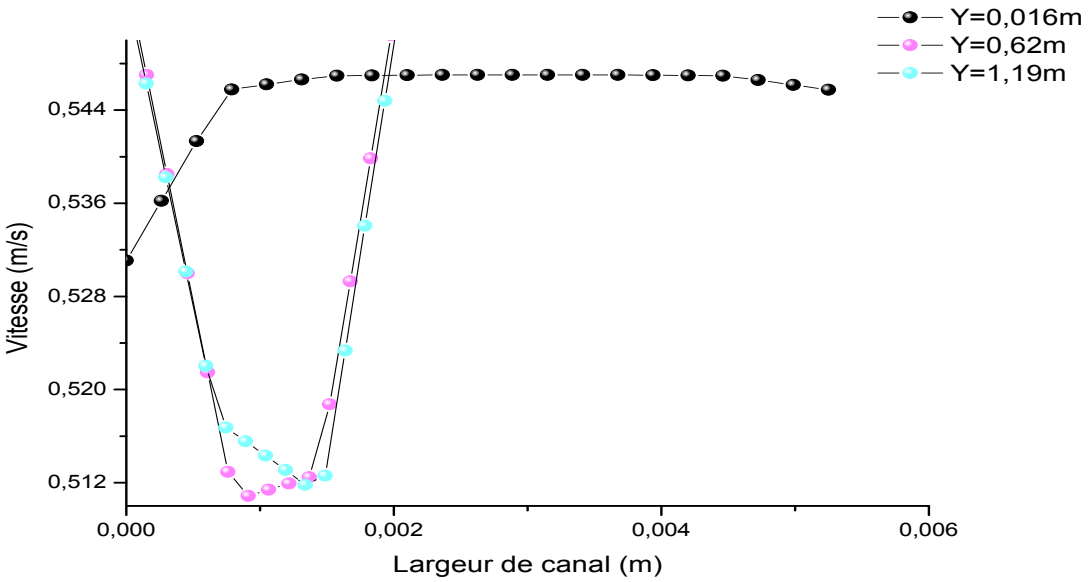


Figure V.15: Variation du profil de vitesse.

VII. Etude comparative entre le milieu fluide avec l'encrassement avec la présence et l'absence de déflecteur coté lait

VII.1. le profil de la température

La Figure V.16 présente la variation du profil de la température dans la section de sortie en fonction de largeur du canal avec dépôtetavec et sans déflecteur coté lait pour une position y=0.60m. Avec la présence d'un deflecteur, on remarque une augmentation meilleure de la température car le deflecteur apporte une meilleure turbulence.

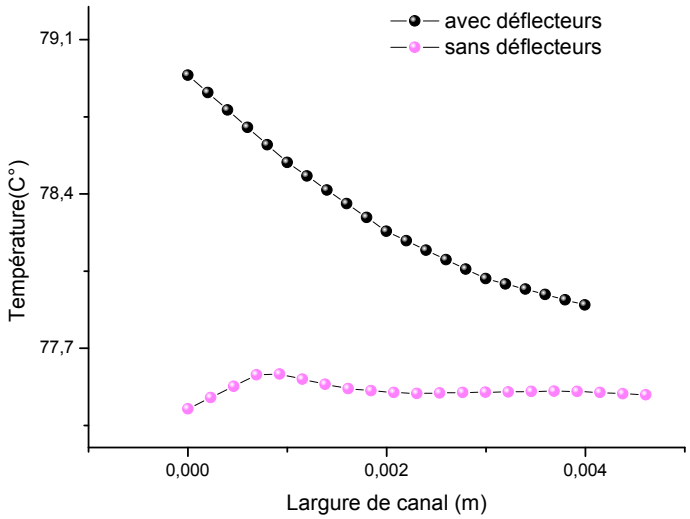


Figure V.16: Evolution de la température dépôt avec et sans déflecteurs coté lait.

VII.2. Profil de la vitesse

L'évolution du profil de la vitesse en fonction de la largeur du canal avec dépôt et avec et sans déflecteurs coté lait Figure V.17 pour une position y=0.60m. Une chutte de la vitesse est observée au niveau de l'emplacement du deflecteur qui joue un rôle d'obstacle mais qui donne une turbulence meilleure.

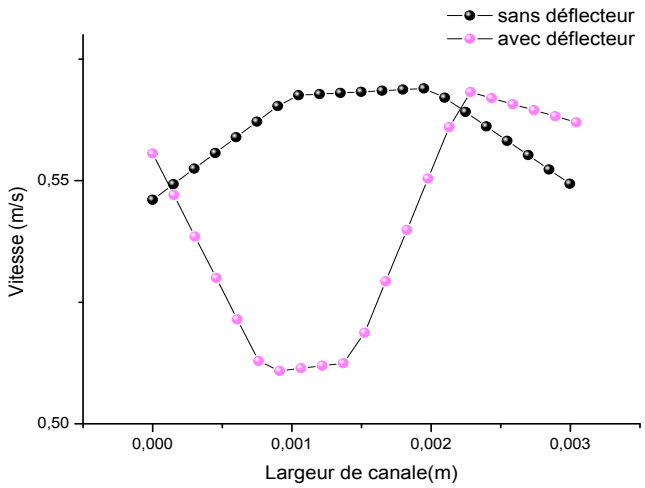


Figure V.17: Evolution de la vitesse dépôtavec et sans déflecteurs coté lait

Dans le cadre du présent travail, on s'est proposé de présenter une formulation du problème d'encrassement des échangeurs de chaleur à la présence et l'abesnce d'un déflecteur 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 planes 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 et sans encrassement. Le modèle de fermeture $\kappa-\varepsilon$ est choisi et les équations de conservation, pour les conditions spécifiques au modèle physique, sont développées avec certaines hypothèses simplificatrices.

En générale, et après l'analyses des résultats numériques de l'étude de l'encrassement à la présence et l'abesnce d'un déflecteur des échangeurs de chaleur a plaque, les résultats obtenus dans le cas d'un milieu poreux montrent que :

- plus l'épaisseur du dépôt augmente, moins le fluide est chauffé et plus l'échange thermique entre la paroi et le fluide est affecté.
- 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.
- Les profils de l'énergie cinétique turbulente et de la dissipation turbulente varient de la même façon. Un maximum du taux de dissipation est observé initialement au niveau de l'interface fluide-paroi et il est beaucoup plus important à l'interface fluide-dépôt. Dans la zone du dépôt, le profil de la dissipation est aplati, ce qui revient à confirmer que l'écoulement dans cette zone est quasiment nul.
- la vitesse de l'écoulement diminue au cours du temps et le profil de l'énergie cinétique turbulente décroît aussi.
- Le déflecteur joue un rôle d'obstacle d'où une chutte de la vitesse et donne une turbulence supplémentaire donc un meilleur écahange thermique.

[1] : POUGHEON S .et GOURSAUD J., (2001)
Le lait caractéristiques physicochimiques In DEBRY G., Lait, nutrition et santé, Tec et Doc, Paris : 6(566 pages).

[2] : ABOUTAYEB R., (2009)
Technologie du lait et dérivés laitiers http://www.azaquar.com.

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

[4] : JEANTET R., CROGUENNEC T., MAHAUT M., SCHUCK P. et BRULE G., (2008)
Les produits laitiers ,2ème édition, Tec et Doc, Lavoisier: 1-3-13-14-17 (185 pages).

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

[6] : MITTAINE J., (1980)
Les laits autres que le lait de vache, http://whqlibdoc.who int/monograph/ who mono.

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

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

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

[10] : BYLUND G., (1995)
Dairy processing handbook-Tetra pak processing systems AB S-221 86 , Lund ,Sweden : 18- 23-381(436 pages).

[11] : STOLL W., (2003)
Vaches laitières -L'alimentation influence la composition du lait , vol 9 , http:// www.db- alpadmin-ch/ fr/ publication en / docs/ 2612.pdf.

[12] : JEAN C., et DIJON C., (1993)
Au fil du lait, ISBN 2-86621-172-3.

[13] : ADRIAN J., POTUS J. et FRANGNE R., (2004)
La science alimentaire de A à Z ,2ème édition, Tec et Doc, Lavoisier : 79 (477 pages).

[14] : DEBRY G., (2001)
Lait, nutrition et santé, Tec et Doc, Paris : 21 (566 pages).

[15] : THAPON J.L., (2005)
Science et technologie du lait, Agrocampus-Rennes, France: 14(77 pages).

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

[17] : BRUNNER J.,(1981)
Cow milk proteins: twenty five years of progress. J dairy Sci, 1981,64 : 1038-1054. In POUGHEON S., Contribution a l'étude des variations de la composition du lait et ses conséquences en technologie laitière thèse pour obtenir le grade de docteur vétérinaire, Ecole Nationale Vétérinaire Toulouse, France: 31(102 pages).

[18] : MATHIEU J.,(1999)
Initiation à la physicochimie du lait, Tec et Doc, Lavoisier, Paris: 3-190 (220 pages).

[19] : HODEN P., et COULON H., (1991)
Composition chimique du lait, http:// www.2.vet.lyon.fr.

[20] : GAUCHERON F., (2004)
Minéraux et produits laitiers, Tec et Doc, Lavoisier:783 (922 pages).

[21] : COULON J.B.,(1994) Facteurs de variation du taux protéique du lait de vache en exploitation. INRA Prod. Anim.,4 (4) : 303-309 In POUGHEON S.,Contribution a l'étude des variations de la composition du lait et ses conséquences en technologie laitière, thèse pour obtenir le grade de docteur vétérinaire ,Ecole Nationale Vétérinaire Toulouse, France: 59 (102 pages).

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

[23] : NEVILLE M.C et JENSEN R.G., (1995)
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) .

[24] : VIERLING E., (2003)
Aliment et boisson-Filière et produit, 2ème édition, doin éditeurs, centre régional de la documentation pédagogique d'Aquitaine:11(270 pages).

[25] : FREDOT E., (2005)
Connaissance des aliments-Bases alimentaires et nutritionnelles de la diététique, Tec et Doc, Lavoisier:10-14 (397 pages).

[26] : REUMONT P., (2009)
Licencié Kinésithérapie, http://www.medisport.be.

[27] : THIEULIN G. et VUILLAUME R., (1967)
Eléments pratiques d'analyse et d'inspection du lait de produits laitiers et des oeufs-revue générale des questions laitières 48 avenue, Président Wilson, Paris : 71-73(388 pages).

[28] : RHEOTEST M., (2010)
Rhéomètre RHEOTEST® RN et viscosimètre à capillaire RHEOTEST® LK – Produits alimentaires et aromatisants http://www.rheoest.de/download/nahrungs.fr.pdf.

[29] : CNERNA., (1981)
Centre National de Coordinations des Etudes et Recherches sur la Nutrition et l'Alimentation, Lait de consommation-Conférence de presse du 5 novembre 1981, Paris.

[30] : VIERLING E., (1999)
Aliment et boisson-science des aliments, doin éditeurs, centre régional de la documentation pédagogique d'Aquitaine, France:11(270 pages).

[31] : HARDING F., (1995)
Milk quality, Blackie academic et professional : 113(166 pages).

[32] : JEAN CHRISTIAN M., (2001)
Le lait pasteurisé, Groupe de recherche et d'échanges technologiques, Paris http://www.gret.org.

[33] : LESEUR R., et MELIK N., (1999)
Lait de consommation In LUQUEE F.M, Laits et produits laitiers vache brebis chèvre, Tec et Doc, Lavoisier, Paris : 5 (637 pages).

[34] : JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE., (2001)
Bulletin officiel n° 4862 du 9 chaoual 1421 (4 janvier 2001), Décret n° 2-00-425 du 10 ramadan 1421 (7 décembre 2000) relatif au contrôle de la Production et de la commercialisation du lait et produits laitiers.

[35] : BRULE G., (2004)
Progrès technologiques au sein des industries alimentaires impact sur la qualité des produits –La filière laitière, Rapport commun de l'Académie des technologies et de l'Académie d'Agriculture de France : 8 (24 pages).

[36] : GERVOSON P.,(2007)
Les laits fermentés-vos aillés pour une meilleure santé, Esco news,pileje-37 quai de Grenelle- 75015,Paris:3 (7pages).

[37] : PFIFFNER A., (2009)
Lait en poudre, http:www.hls-dhs-dss.ch/textes

[38] : CLAUDE MICHEL J., POULIOT M., RICHARD J. et VALLERAND C., (2002)
Lait de consommation In VIGNOLA C. L., Science et technologie du lait-transformation du lait, Ecole polytechnique de Montréal, ISBN:298 (600 pages).

[39] : FAO., (2010)
Le lait et les produits laitiers dans la nutrition humaine- Laits de consommation
http://www.horizon.documentation.ird.fr

[40] : Le lait et les produits laitiers dans la nutrition humaine Colection FAO: Alimentation et nutrition n° 28 ISBN 92-5-20534-6Chapitre 4 Laits de consommation http://www.fao.org/docrep/t4280f/T4280F0a.htm

[41] : Mr.BERBOUCHA Ismail et Mr.MEGHSEL Abdelkrim ; L'étude Paramétrique de l'influence des Chicanes Dans un échangeur à Plaque Par Simulation Numérique ; Université Dr. Yahia Fares de Médéa 2013

[42] : MARVILLET.C, MANIFICAT.A, BERRADA.N et WEBER.C (2014). E.Book TOME 1: Echangeurs Thermiques -: Technologies, Conception et dimensionnement, GRETh.

[43] : CHAUDOURNE.S (1987). Les échangeurs à caloducs. Collection « Echangeurs de chaleur », GRETh, Lavoisier TEC&DOC, Septembre.- BRICARD.A, CHAUDOURNE.S (1997). Caloducs. Techniques de l'ingénieur, traité Génie énergétique, Référence b9545, Avril

[44] : WEBER Christophe et MAGNIFICAT André ; Article : 055 ; Les échangeurs de chaleur ; févr.-16 ;Encyclopédie de l'enrgie

[45] : REAY.D.A, KEW. P.A, McGLEN.R.J (2014). Heat Pipes – Theory, design and Applications, 6th edition, Elsevier, ISBN: 978-0-08-098266-3.

[46] : BONTEMPS. A, GUARRIGUE.A, GOUBIER.C, HUETZ.J, MARVILLET.C, MERCIER.P, VIDIL.R. Echangeurs de chaleur, Techniques de l'ingénieur, traité Génie énergétique, Références B2340, B2341, B2342, B2343, B2344.

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

[48] :MARVILLET.C, MANIFICAT.A, BERRADA.N et WEBER.C (2014). E.Book TOME 1, op. cit.
- 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
- T.R. BOTT (1995). Fouling of heat exchangers. Elsevier Science & Technology Books; April, ISBN: 04444821864 qui traitent le sujet de manière assez exhaustive.

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

[50] : SHAH R.K. (2003). Fundamentals of Heat Exchanger Design. John Wiley & Sons.

[51] : Introduction to Food Process Engineering Par Albert Ibarz,Gustavo V. Barbosa-Canovas page 346

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

[53] : VITHERM sas, « Échangeur de chaleur à plaques jointées», VT-MAN 1003 France (2005).

[54] : Hamza Cherif Sadouk. Modélisation de l'encrassement en régime turbulent dans un échangeur de chaleur à plaques avec un revêtement fibreux sur les parois. 15 Juin 2009. Ecole doctorale : Information, Communication, Modélisation, Simulations (ED n° 431). Université de Paris-Est.

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

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

[57]: 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.

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

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

[60] : Epstein, N., Thinking about heat transfer fouling : a 5x5 matrix, Heat Transfer Engineering, 4 (1), p 43- 56, 1983.

[61] : BURTON(H.) (1968). - Deposits from whole milk in heat treatment plant: a review and discussion. J. Dairy Res., 35, 317-330

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

[63] : http://www.cetim.fr/Logiciels/Ansys-logiciel-analyse-mecanique-et-calcul-par-elements-finis

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

[65] : Contribution à l'étude de l'encrassement par le lait dans un échangeur de chaleur à plaques
S. Amine AOUANOUK, Abdelkader MOUHEB, Rafik ABSI, M. Rafik ZAZOUN, Youcef MAHDI

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

[67] : Christophe WEBER, Brice TREMEAC, Christophe MARVILLET, Cathy CASTELAIN
Analyse de différents modèles de prédiction de l'encrassement dans un échangeur de chaleur à partir de données expérimentales

1

CARACTERISTIQUES DE L'EAU :

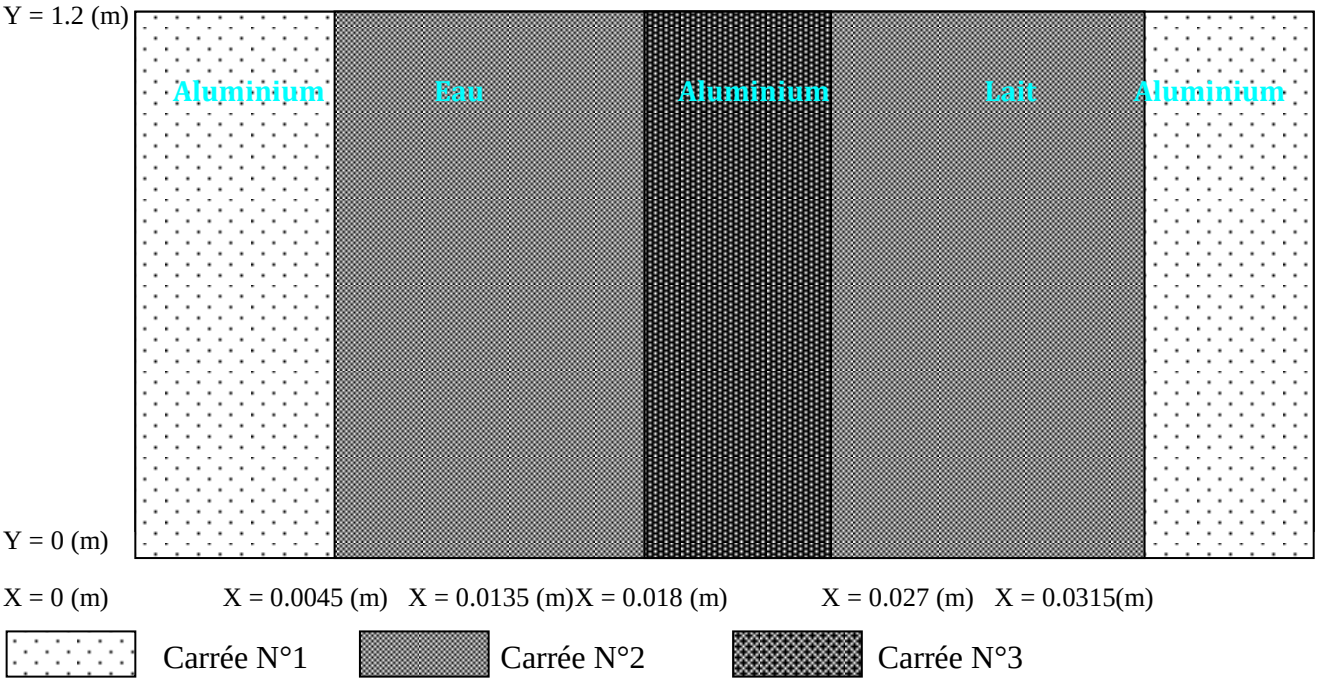
T (°C)	μ (kg/m.s) $\times 10^{-3}$	T (°C)	μ (kg/m.s) $\times 10^{-3}$
0	1,7827	56	0,4992
1	1,7231	57	0,4915
2	1,6665	58	0,4840
3	1,6128	59	0,4767
4	1,5616	60	0,4695
5	1,5130	61	0,4626
6	1,4667	62	0,4557
7	1,4225	63	0,4491
8	1,3804	64	0,4426
9	1,3403	65	0,4362
10	1,3020	66	0,4300
11	1,2654	67	0,4239
12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

Les dimentions de l'échangeur à plaque simulé au programme ANSYS :

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

e = le diamètre de plaque = 0.0045 m

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



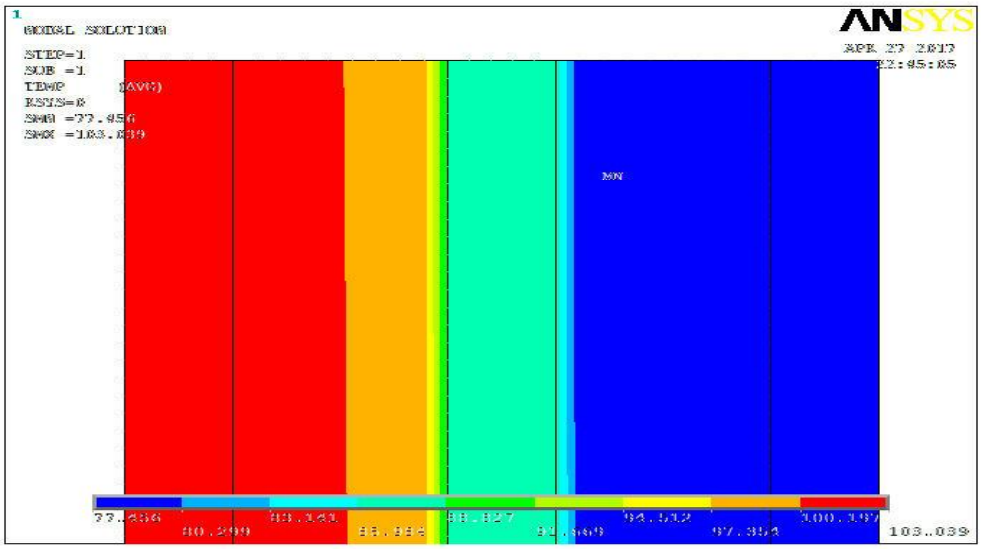
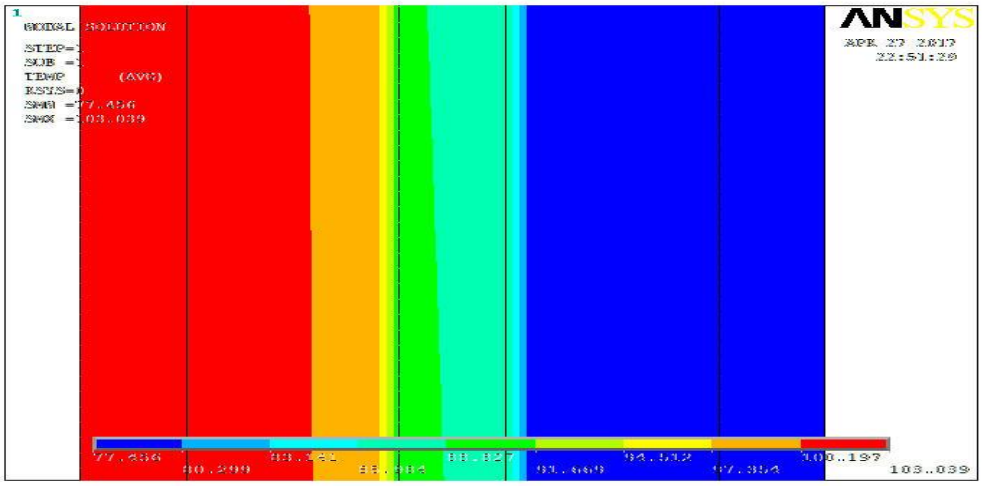
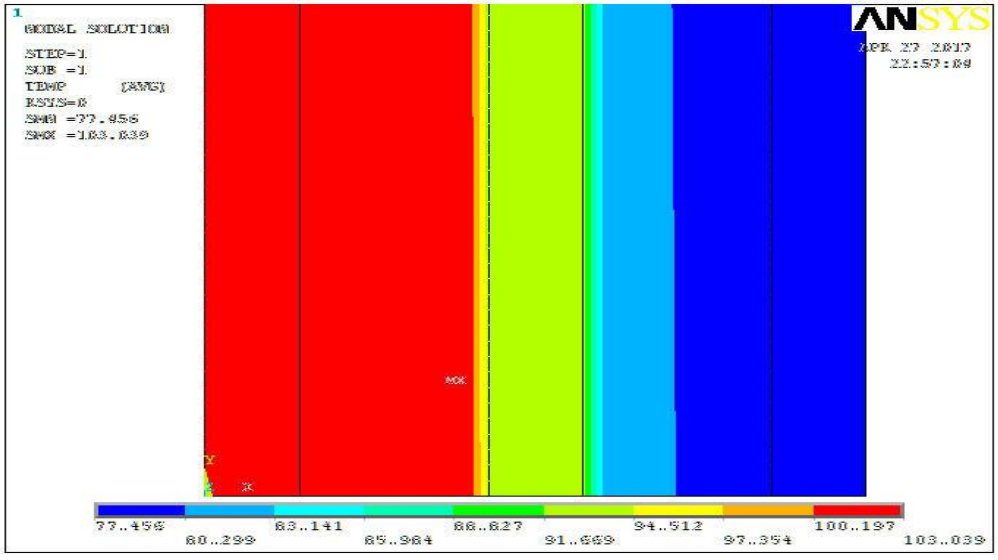
Un diagramme montre les carrées sont placées au programme ANSYS

Les proprietes physico-chimiques des matériaux utilisés :

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

I.LES RESULTATS DANS UN MILIEU FLUIDE :

I.1.Profil de température

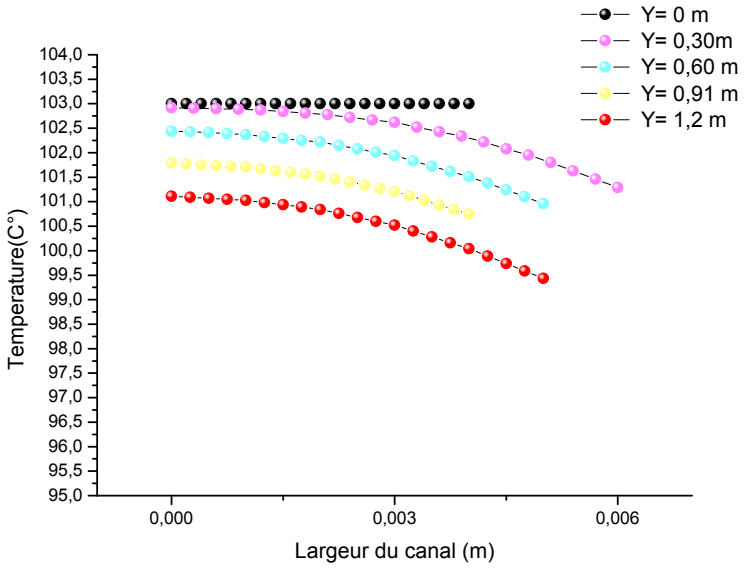
	Coter eau	Coter lait
En haut		
Au milieu		
En bas		

La variation de la température à la longue de canal :

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

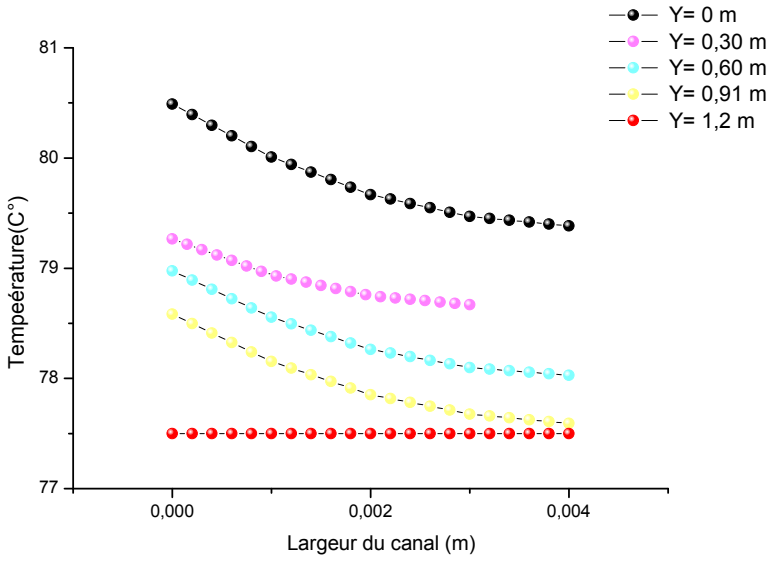
Les temperatures dans un meme graphe :

1.coté l'eau :



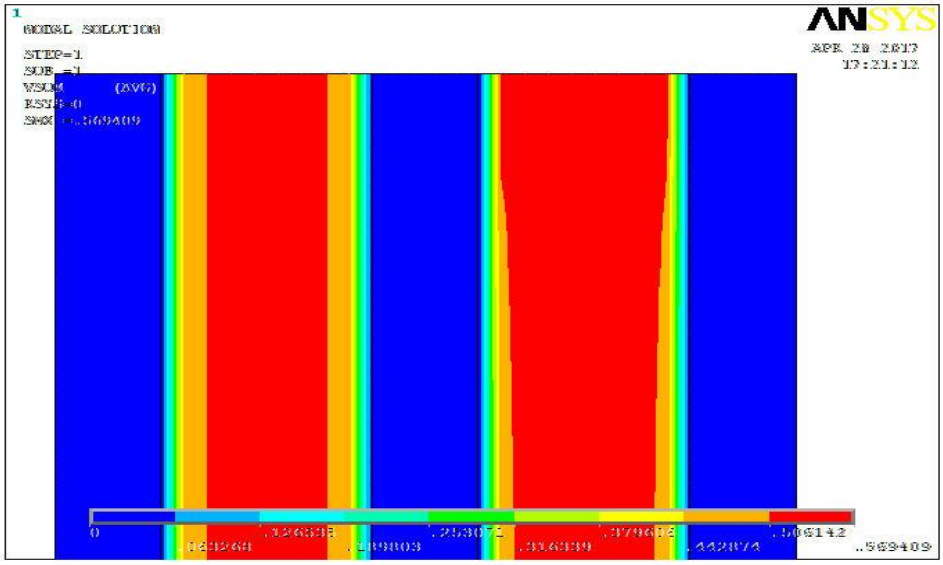
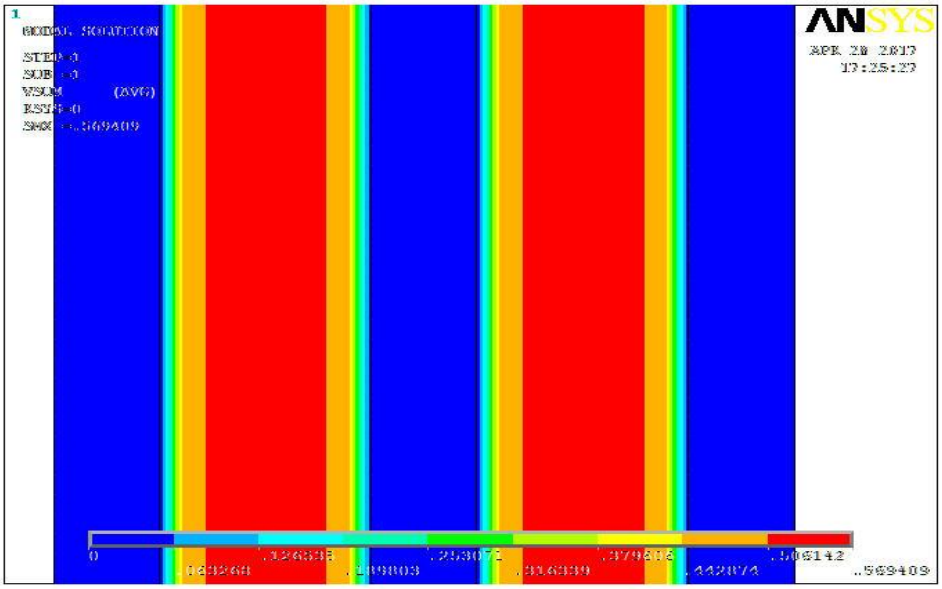
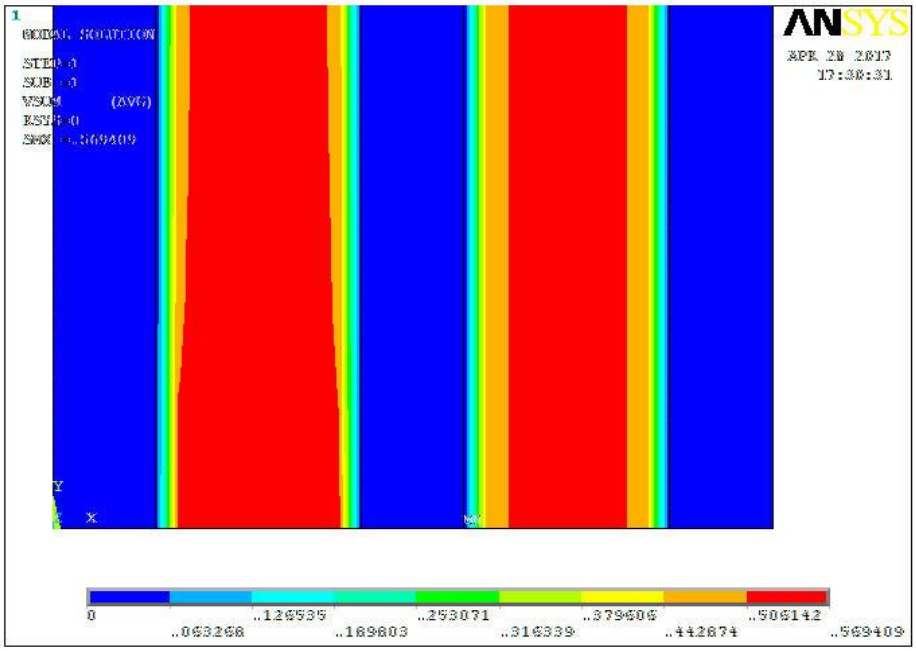
Variation de temperatures d'eau (C°) en fonction de largeur du canal(m) en différents position Y(m)

2.coté lait :



Variation de temperatures de lait (C°) en fonction de largeur du canal(m) en différents position Y(m)

I.2.Profil de vitesse

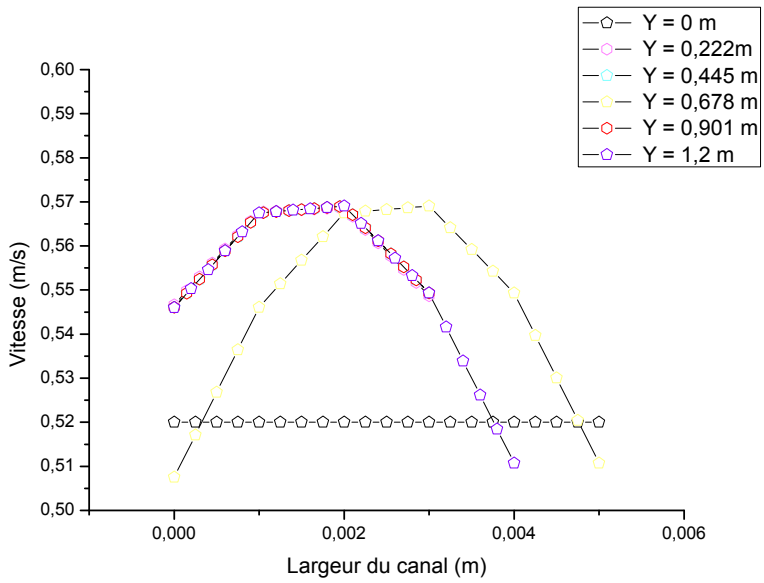
	Coter eau	Coter lait
En haut		
Au milieu		
En bas		

La variation de vitesse à la longue de canal :

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

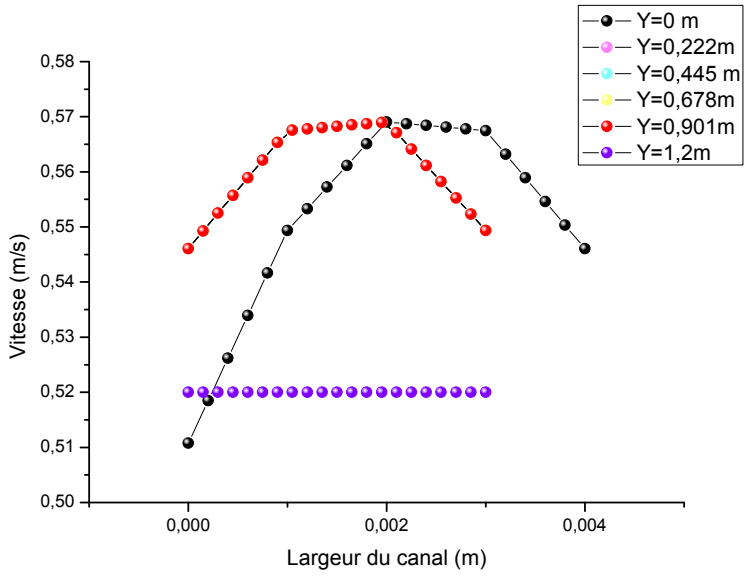
Les vitesses dans un meme graphe :

1.coté l'eau :



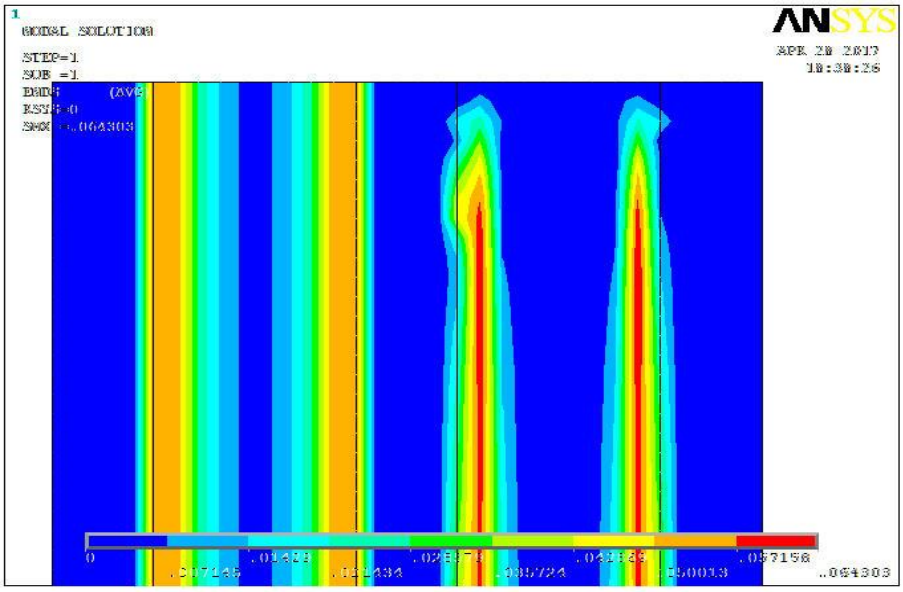
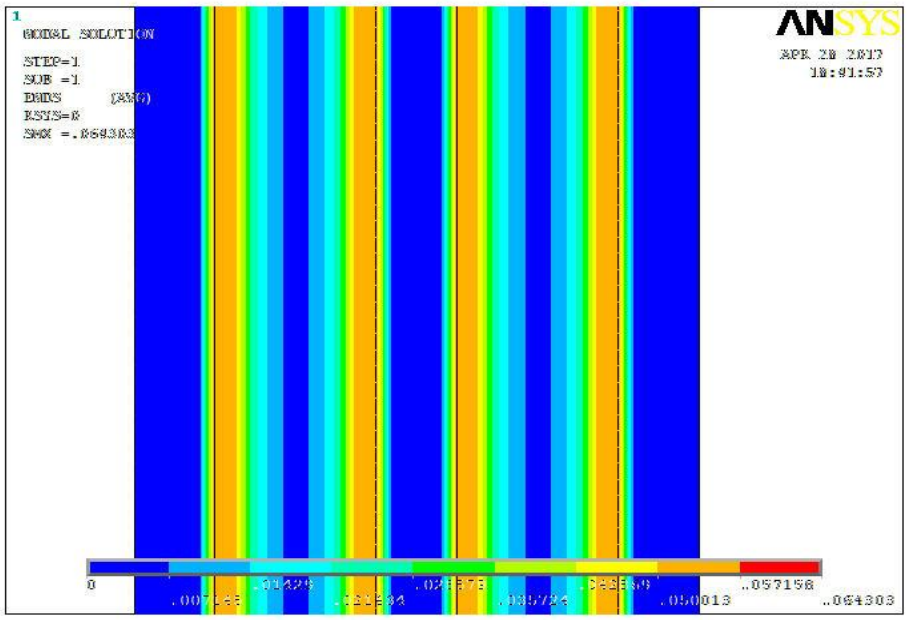
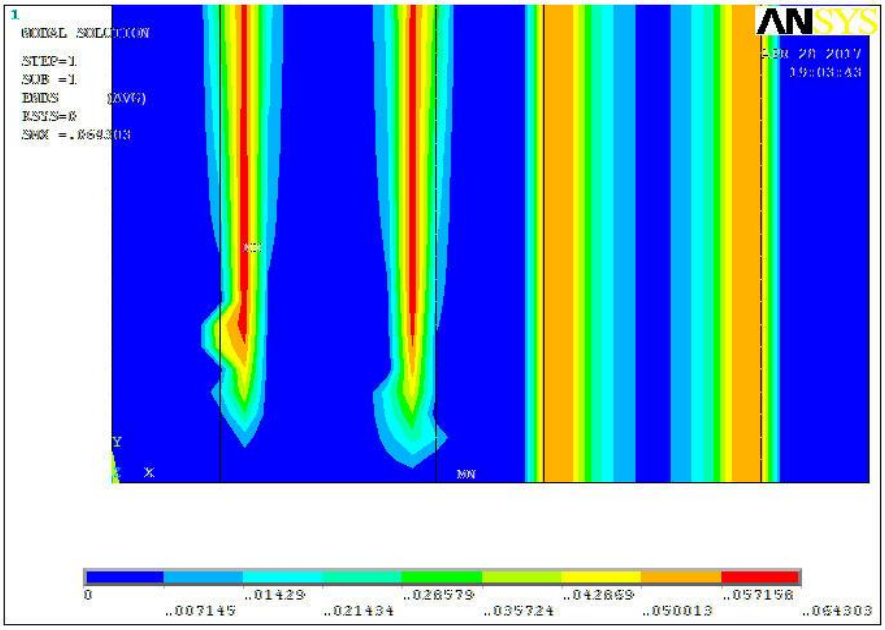
Variation de vitesse de eau (m/s) en fonction de largeur du canal(m) en différents position Y(m)

2.coté lait :



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

I.3.Profil de facteur d'energie cinétique de dissipation

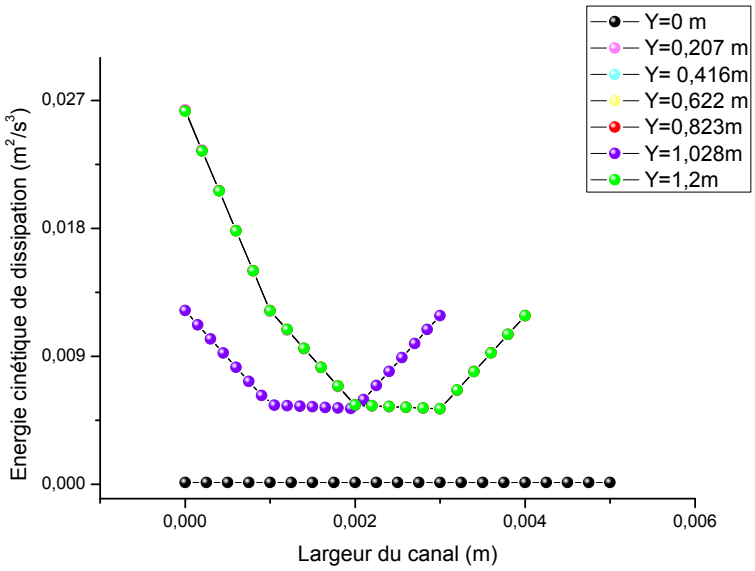
	Coter eau	Coter lait
En haut		
Au milieu		
En bas		

La variation de facteur d'energie cinétique de dissipation à la longue de canal :

L'évolution dufacteur d'energie cinétique de dissipationen fonction de la largeur (x) du canal est représentée sur les graphes suivantes et ce pour différentes positions dans le canal (Y).pour l'eau et lait

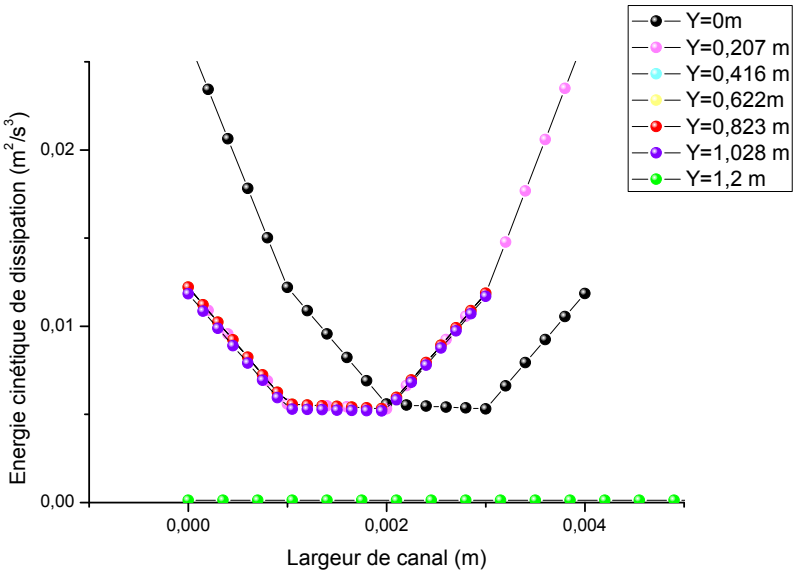
Les facteur d'energie cinétique de dissipation dans un meme graphe :

1.coté l'eau :



Variation de facteur d'energie cinétique de dissipation (m^2/s^3) d'eau en fonction de largeur du canal(m) en différents position Y(m)

2.coté lait :



Variation de facteur d'energie cinétique de dissipation (m^2/s^3) de lait en fonction de largeur du canal(m) en différents position Y(m)

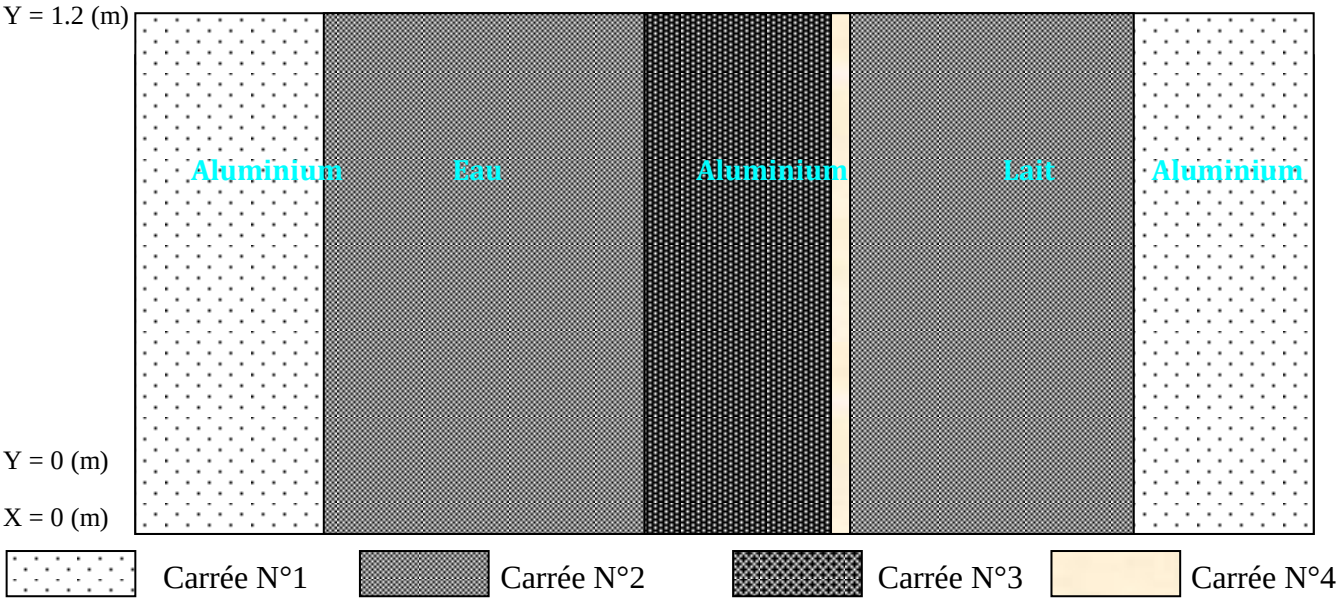
Les dimentions de l'échangeur à plaque simulé au programme ANSYS avec encrassement :

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

e = le diamètre de plaque = 0.0045 m

d = diamètre hydraulique =diamètre entre les deux plaque

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



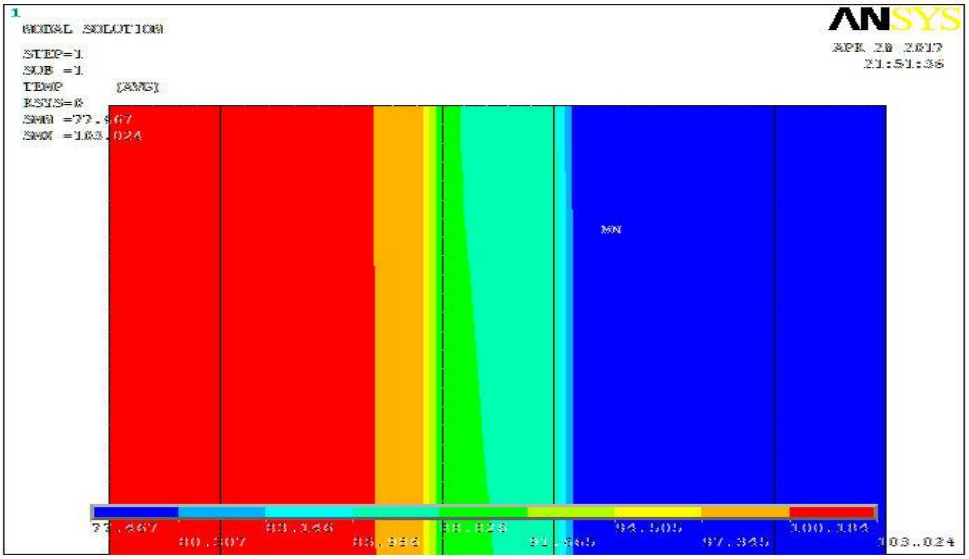
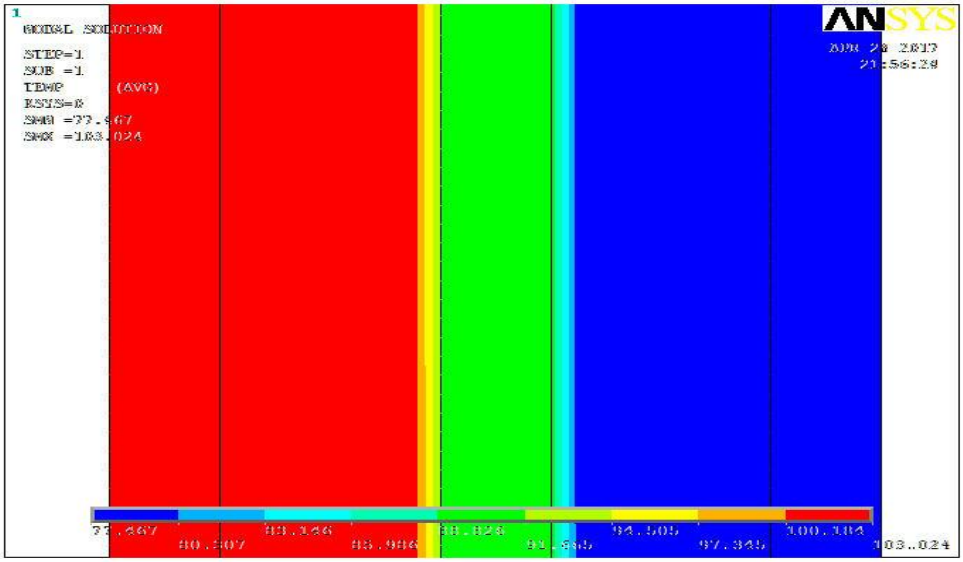
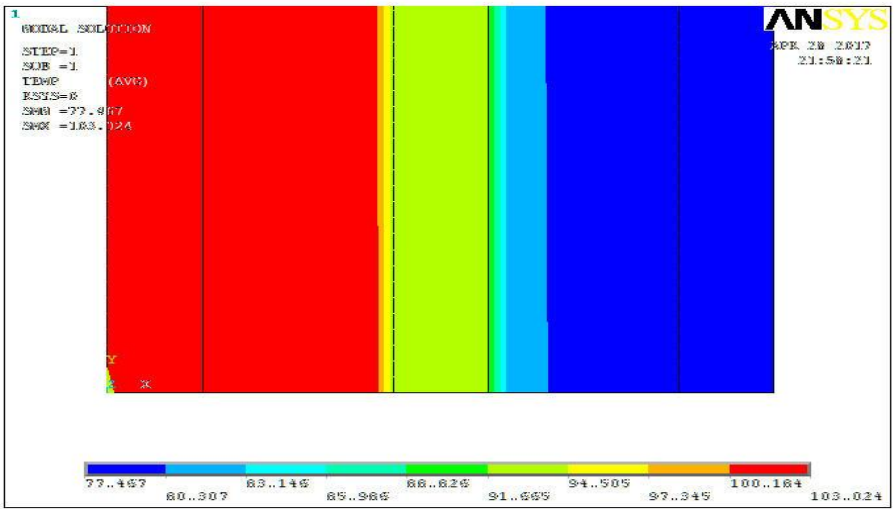
Un diagramme montre les carrées (encrassement) sont placées au programme ANSYS

Les proprietes physico-chimiques des matériaux utilisés :

		Paramètre du lait	Paramètre du l'eau	Paramètre d'aluminium	Paramétre 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.LES RESULTATS DANS UN MILIEU FLUIDE AVEC L'ENCRASSEMENT :

II.1.Profil de température

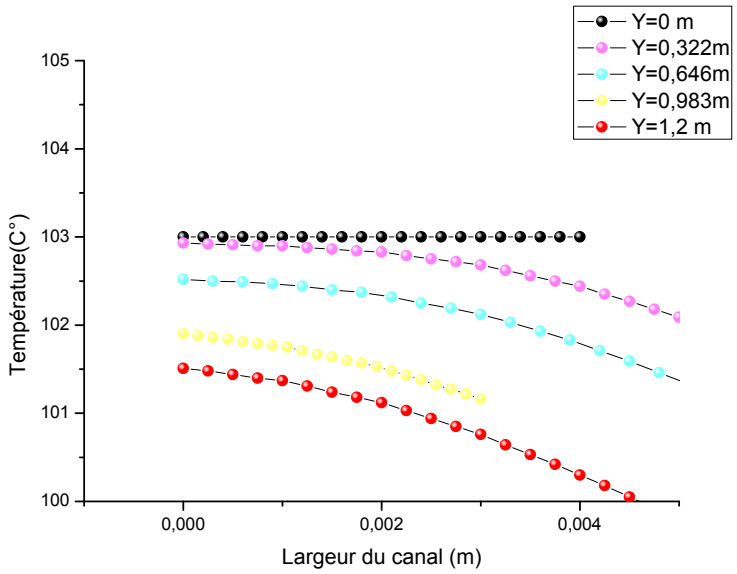
	Coter eau	Coter lait
En haut		
Au milieu		
En bas		

La variation de la température à la longue de canal :

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

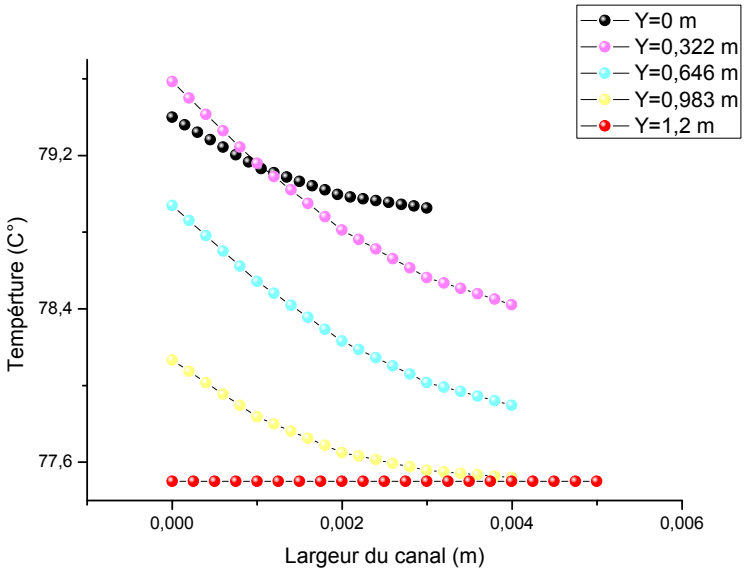
Les temperatures dans un meme graphe :

1.coté l'eau :



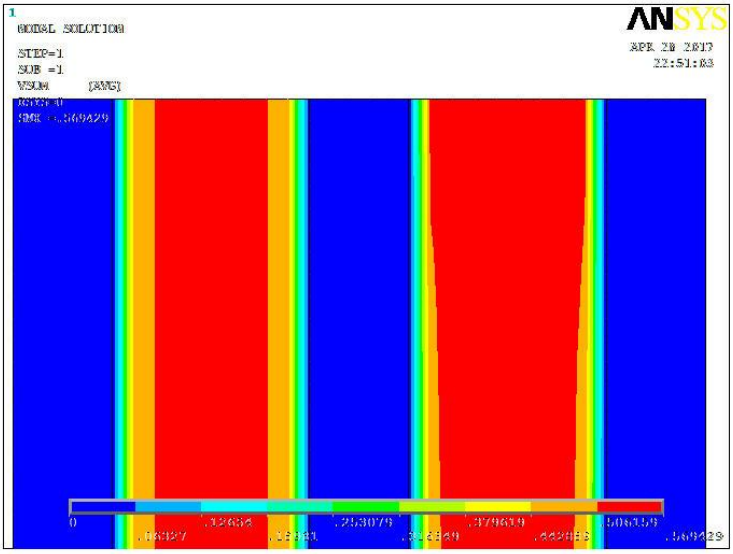
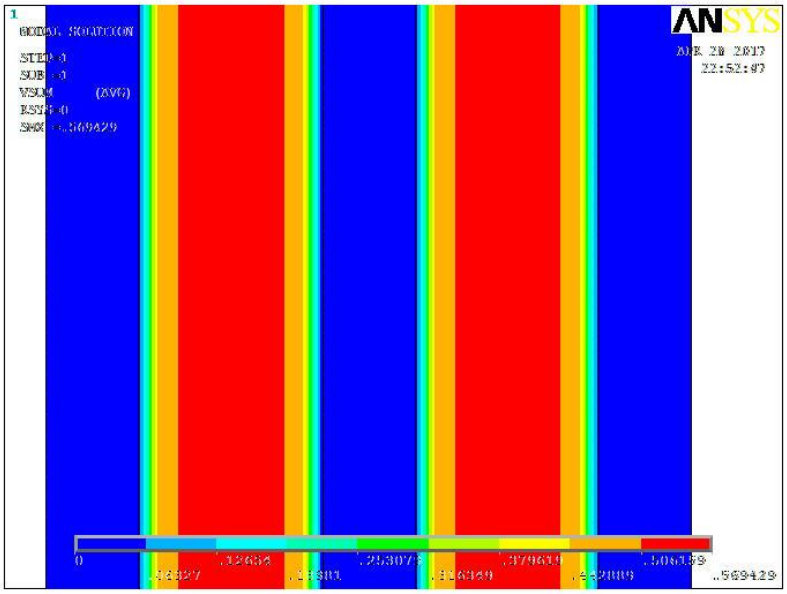
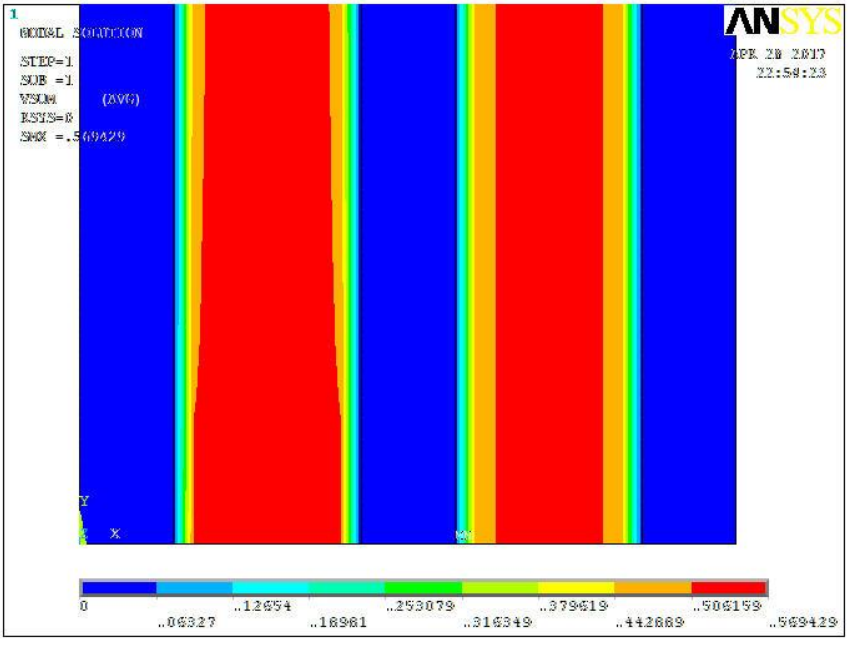
Variation de temperatures d'eau (C°) en fonction de largeur du canal(m) en différents position Y(m)

2.coté lait :



Variation de temperatures de lait (C°) en fonction de largeur du canal(m) en différents position Y(m)

II.2.Profil de vitesse

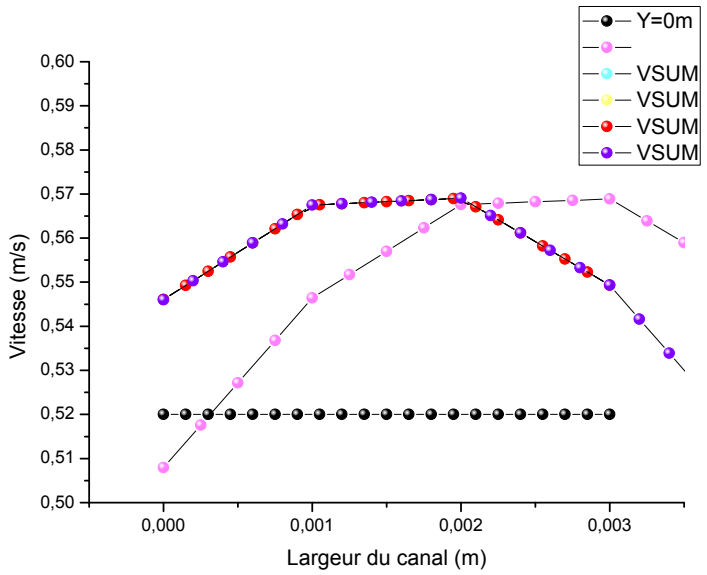
	Coter eau	Coter lait
En haut		
Au milieu		
En bas		

La variation de La vitesse à la longue de canal :

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

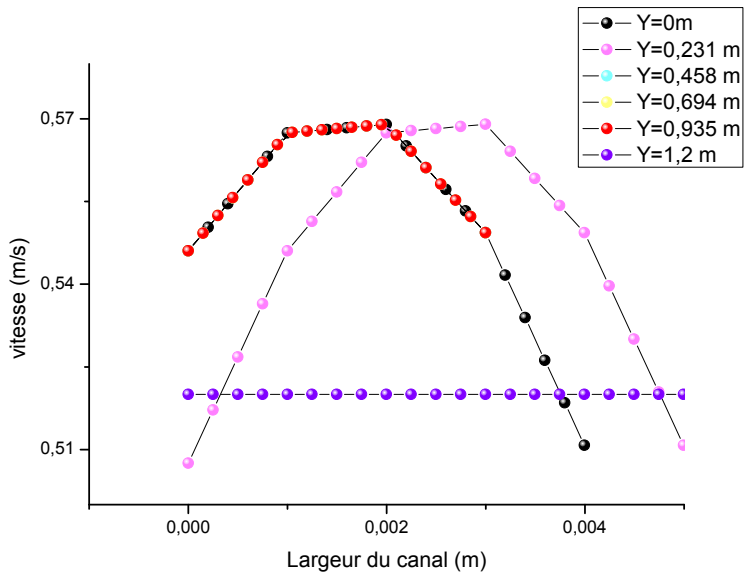
Les vitesses dans un meme graphe :

1.coté l'eau :



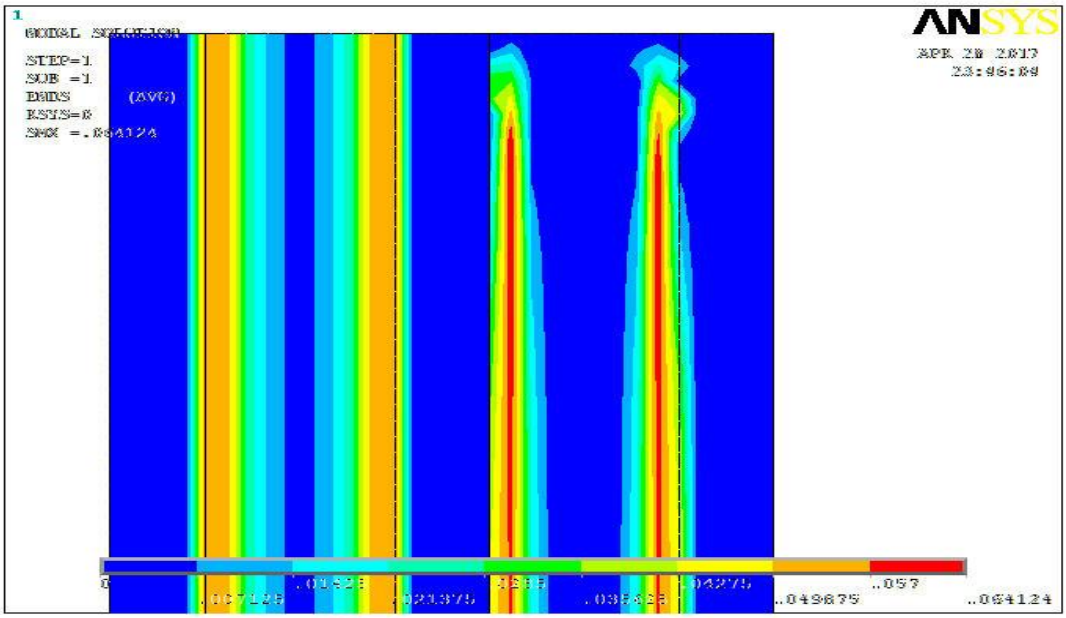
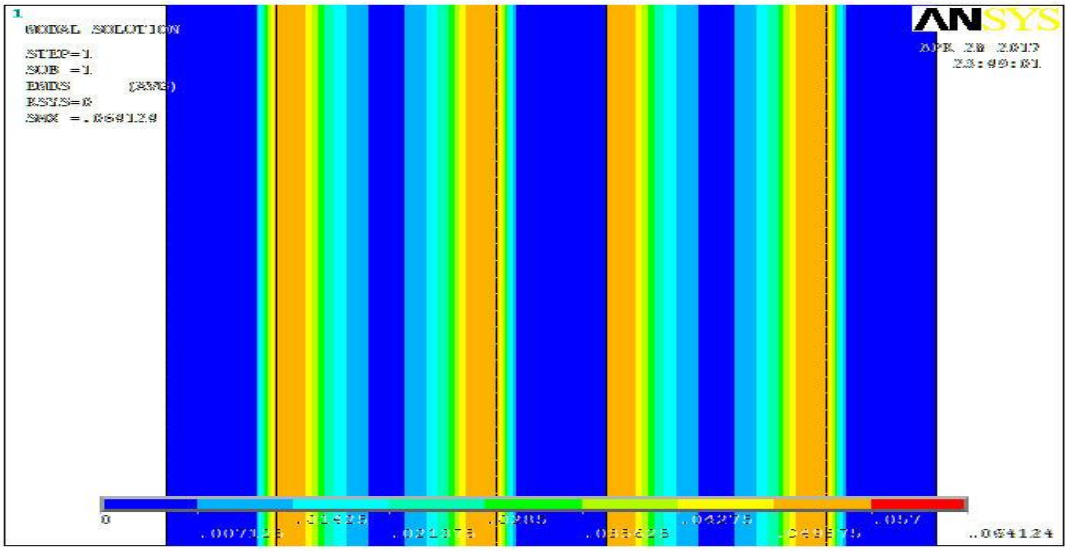
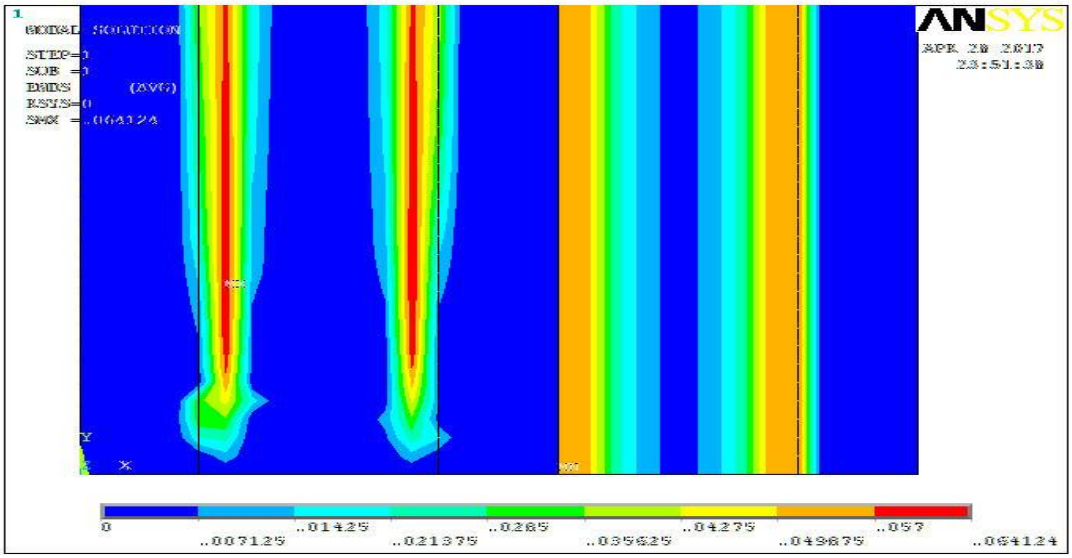
Variation de vitesse d'eau (m/s) en fonction de largeur du canal(m) en différents position Y(m)

2.coté lait :



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

II.3.Profil de facteur d'energie cinétique de dissipation

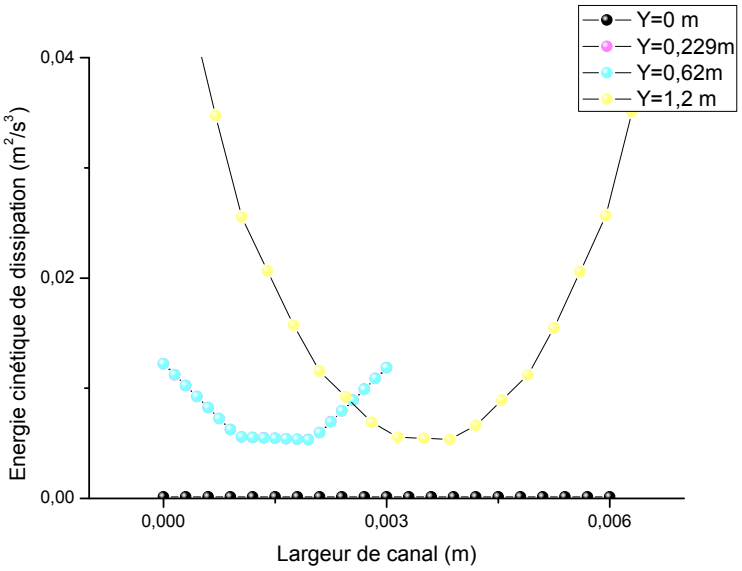
	Coter eau	Coter lait
En haut		
Au milieu		
En bas		

La variation de facteur d'energie cinétique de dissipation à la longue de canal :

L'évolution dufacteur d'energie cinétique de dissipationen fonction de la largeur (x) du canal est représentée sur les graphes suivantes et ce pour différentes positions dans le canal (Y).pour l'eau et lait

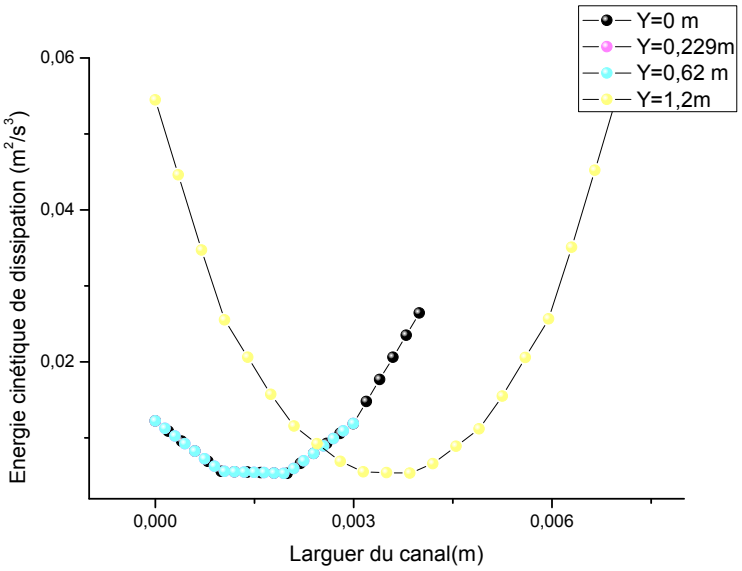
Les facteur d'energie cinétique de dissipation dans un meme graphe :

1.coté l'eau :



Variation de facteur d'energie cinétique de dissipation (m^2/s^3) d'eau en fonction de largeur du canal(m) en différents position Y(m)

2.coté lait :



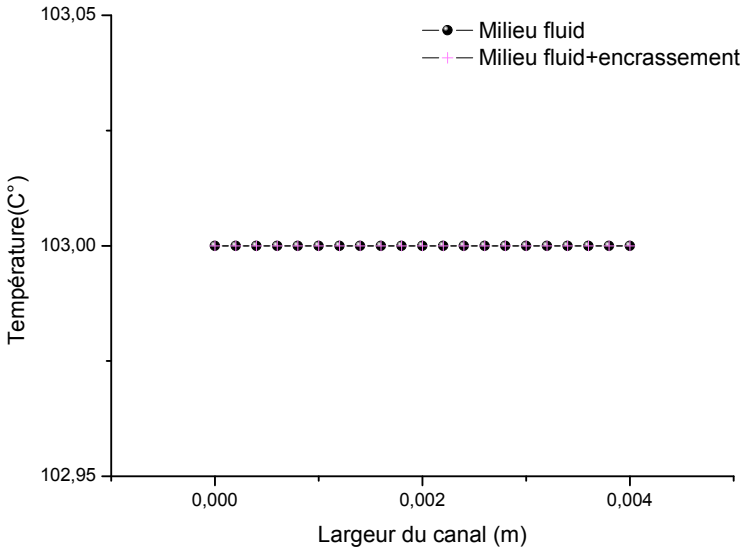
Variation de facteur d'energie cinétique de dissipation (m^2/s^3) de lait en fonction de largeur du canal(m) en différents position Y(m)

III. ETUDE COMPARATIVE ENTRE LE MILIEU FLUIDE ET LE MILIEU FLUIDE AVEC ENCRASSEMENT DE LAIT :

III.1. Le profil de températures

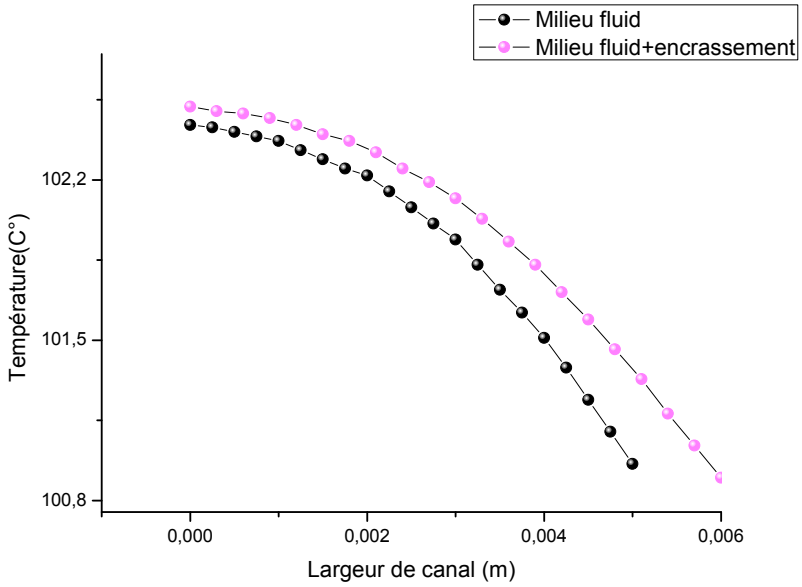
Cote de l'eau

Y=0 m



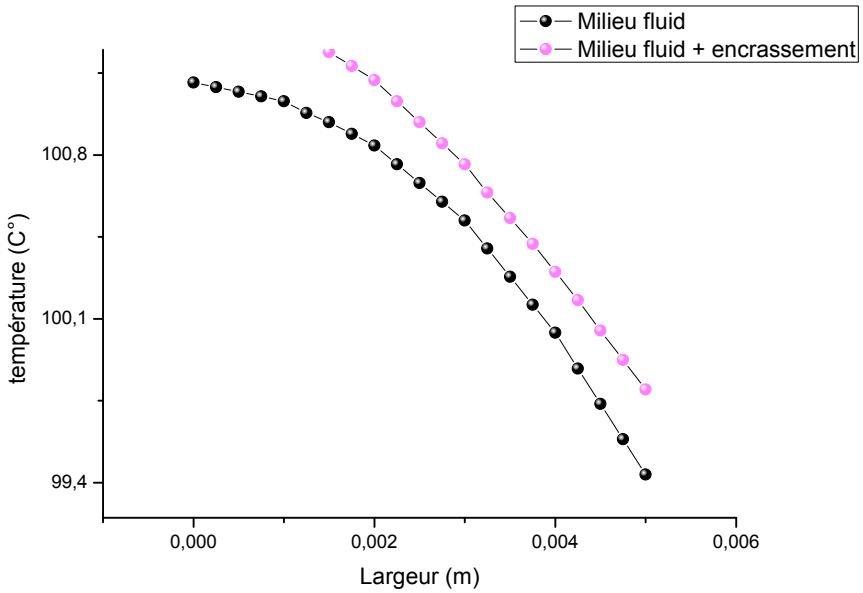
Variation de temperatures d'eau (C°) en fonction de largeur du canal(m) en milieu fluid et milieu fluid avec encrassement de lait

Y=0.60 m



Variation de temperatures d'eau (C°) en fonction de largeur du canal(m) en milieu fluid et milieu fluid avec encrassement de lait

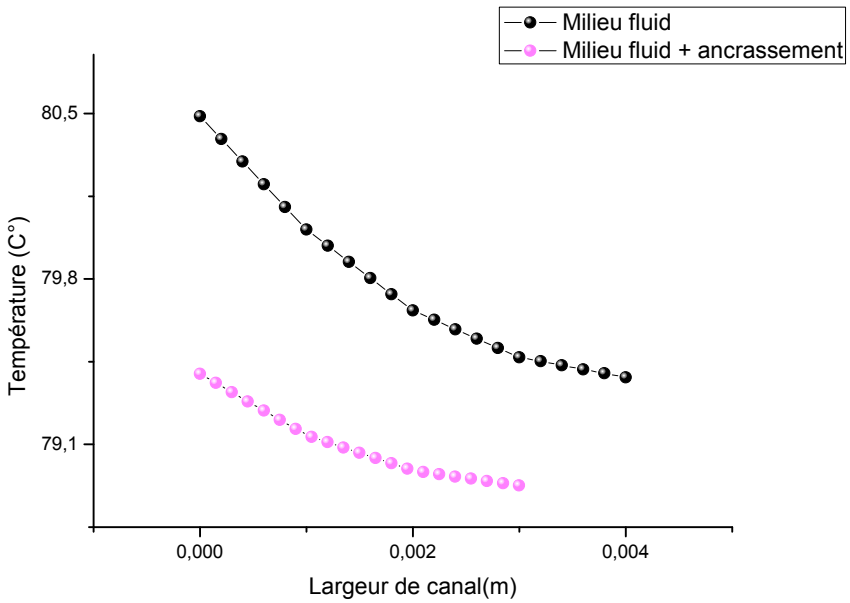
Y=1.2 m



Variation de temperatures d'eau (C°) en fonction de largeur du canal(m) en milieu fluid et milieu fluid avec encrassement de lait

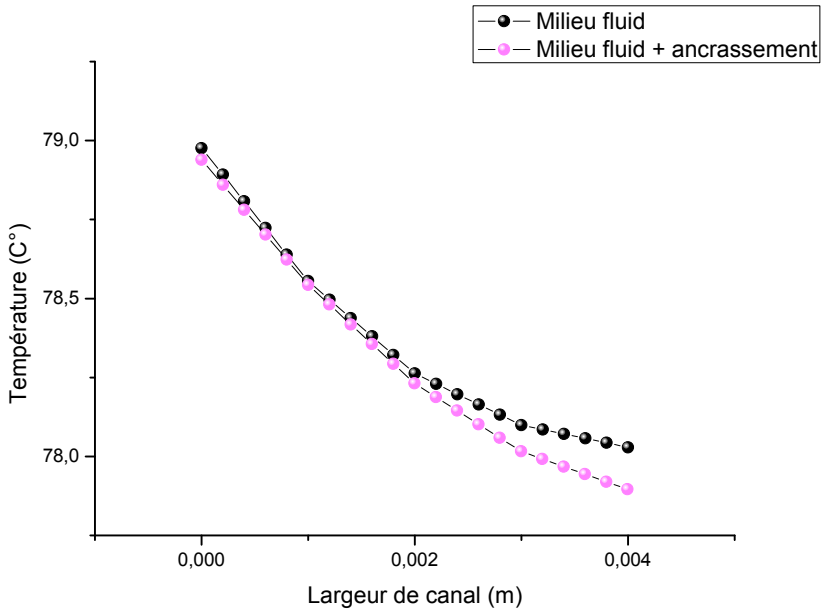
Coté lait :

Y=0 m



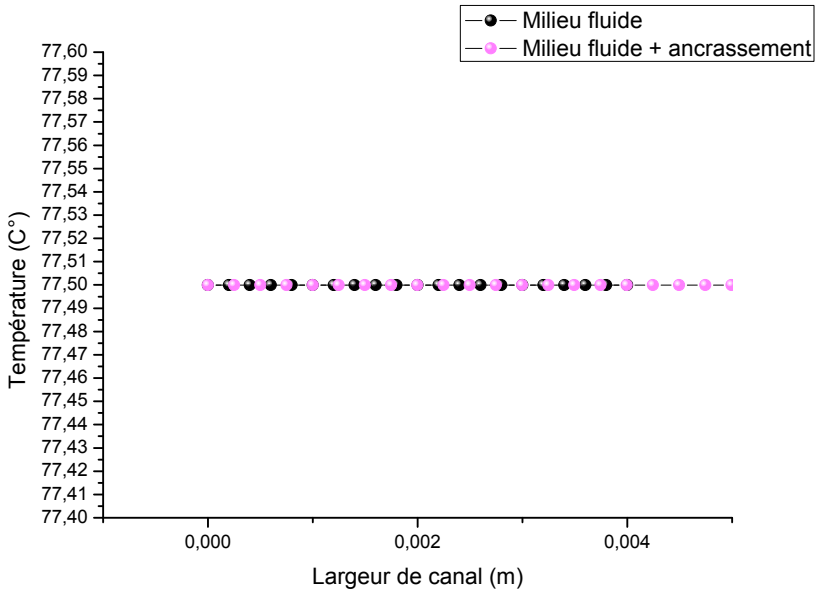
Variation de temperatures de lait (C°) en fonction de largeur du canal(m) en milieu fluid et milieu fluid avec encrassement de lait

Y= 0.60 m



Variation de temperatures de lait (C°) en fonction de largeur du canal(m) en milieu fluid et milieu fluid avec encrassement de lait

Y=1.2 m

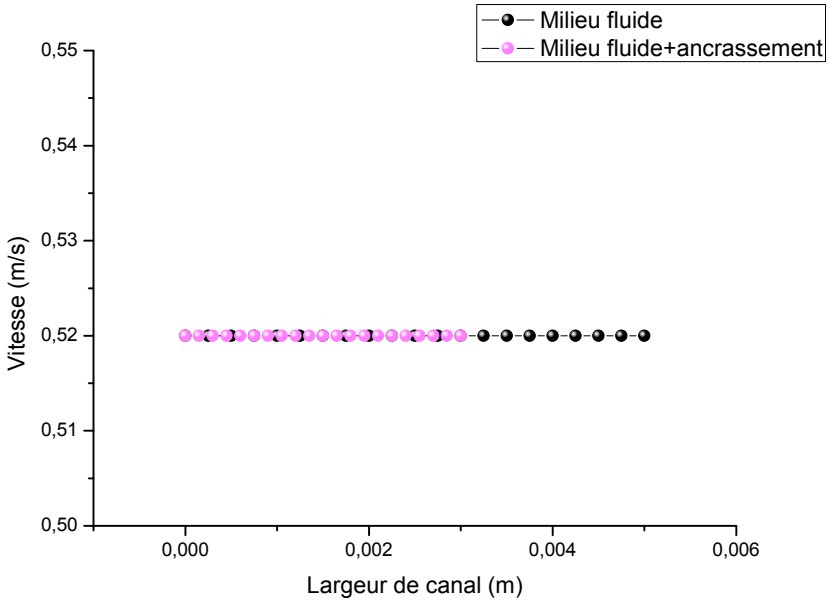


Variation de temperatures de lait (C°) en fonction de largeur du canal(m) en milieu fluid et milieu fluid avec encrassement de lait

III.2. Le profil de vitesses :

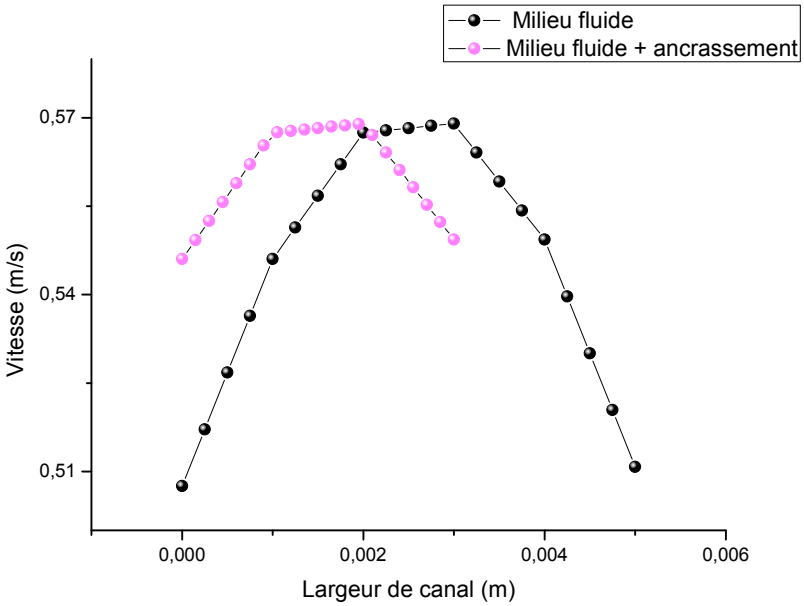
Cote de l'eau

Y=0 m



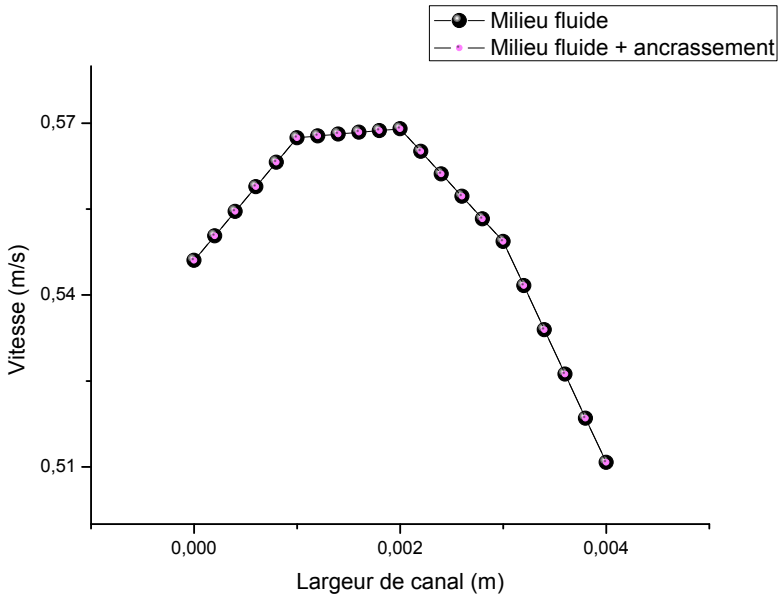
Variation de vitesse d'eau (m/s) en fonction de largeur du canal(m) en milieu fluide et milieu fluide avec encrassement de lait

Y= 0.60 m



Variation de vitesse d'eau (m/s) en fonction de largeur du canal(m) en milieu fluide et milieu fluide avec encrassement de lait

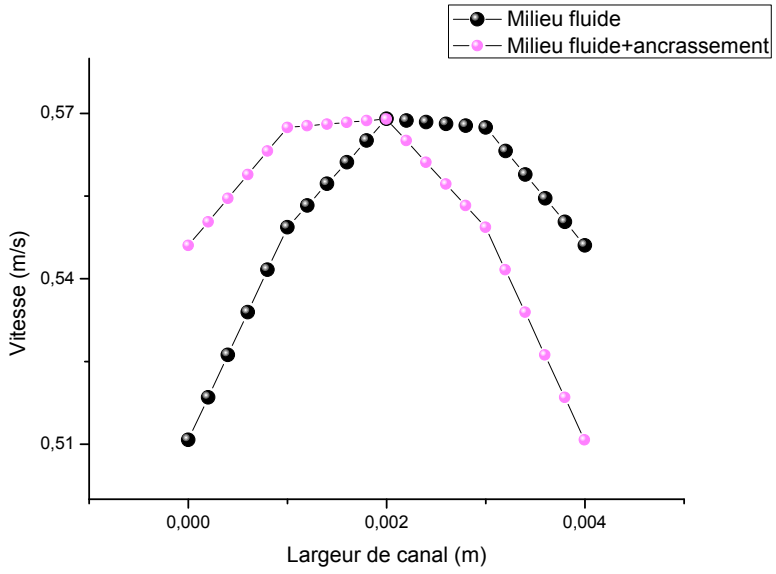
Y=1.2 m



Variation de vitesse d'eau (m/s) en fonction de largeur de canal(m) en milieu fluide et milieu fluide avec encrassement de lait

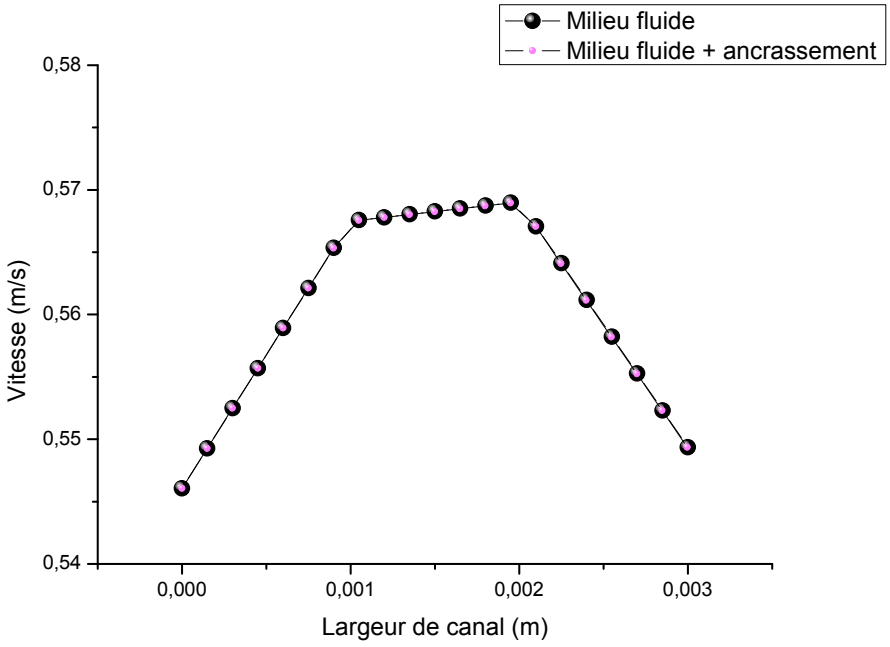
Coté lait

Y=0 m



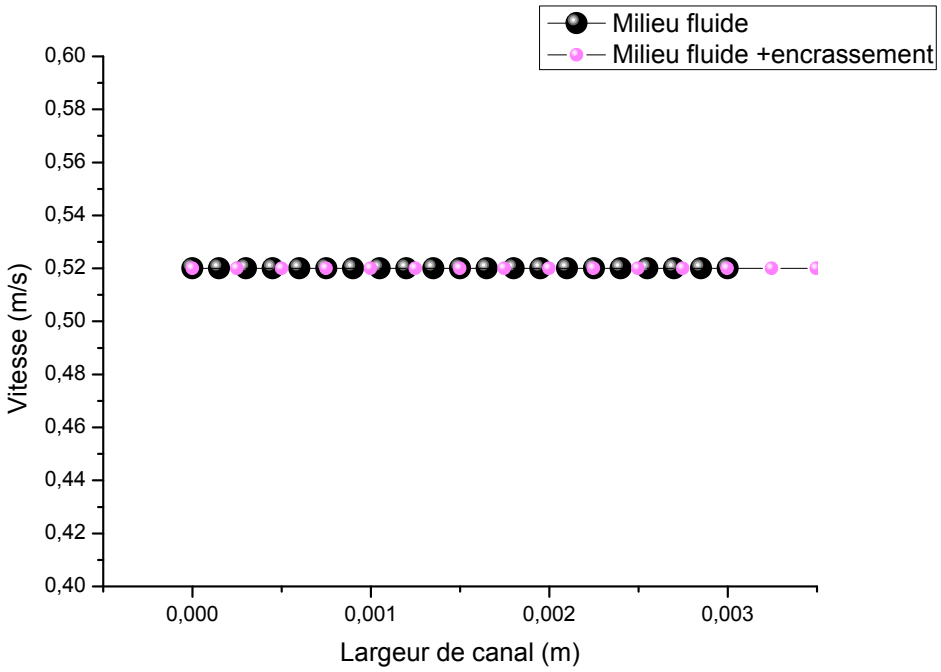
Variation de vitesse de lait (m/s) en fonction de largeur de canal(m) en milieu fluide et milieu fluide avec encrassement de lait

Y=0.60m



Variation de vitesse de lait (m/s) en fonction de largeur de canal(m) en milieu fluide et milieu fluide avec encrassement de lait

Y=1.2 m

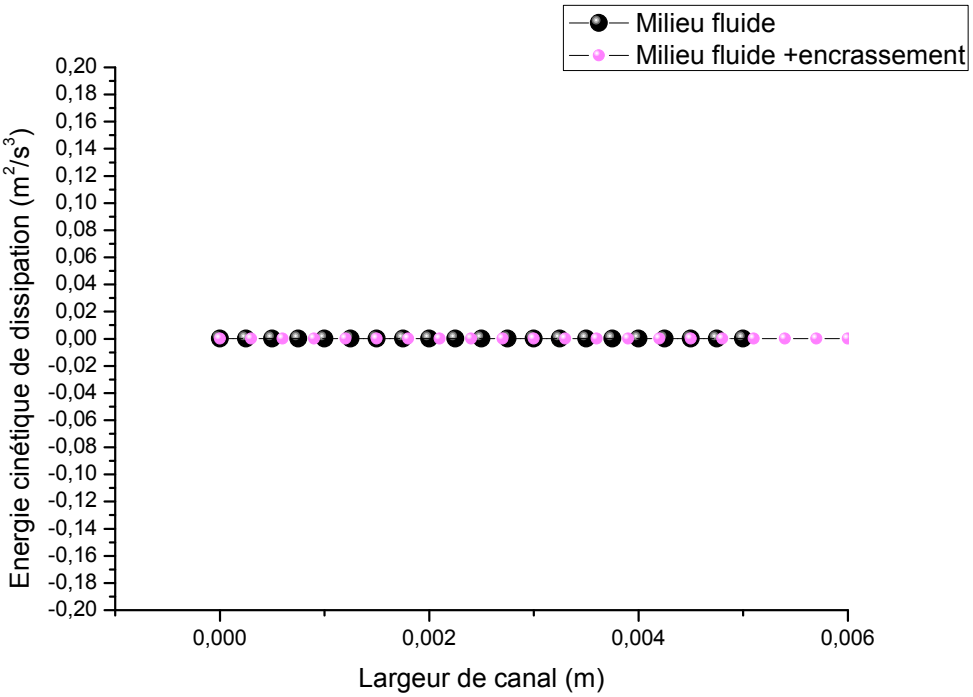


Variation de vitesse de lait (m/s) en fonction de largeur de canal(m) en milieu fluide et milieu fluide avec encrassement de lait

III.3 le facteur de l'énergie cinétique de dissipation :

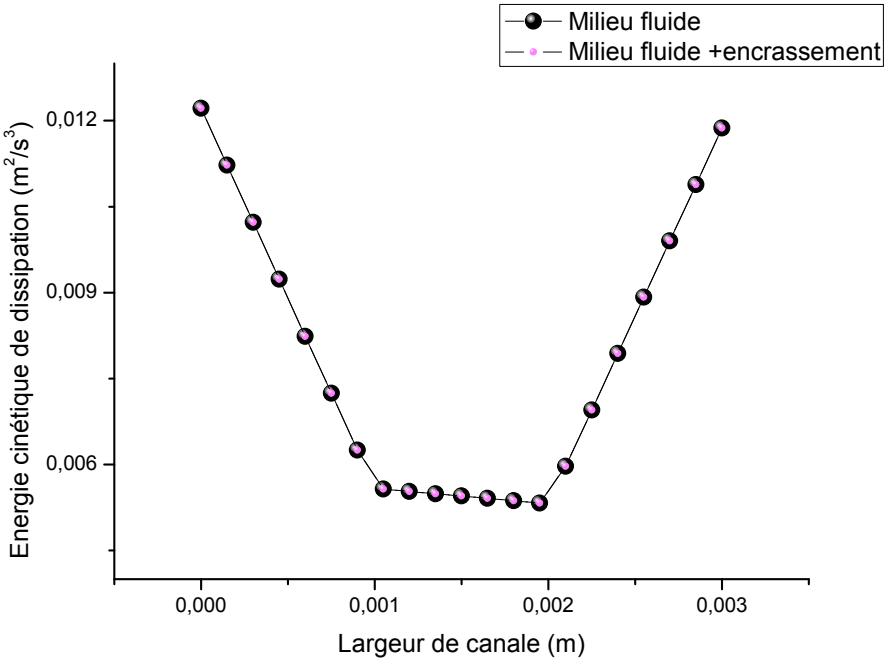
Cote de l'eau :

Y=0 m



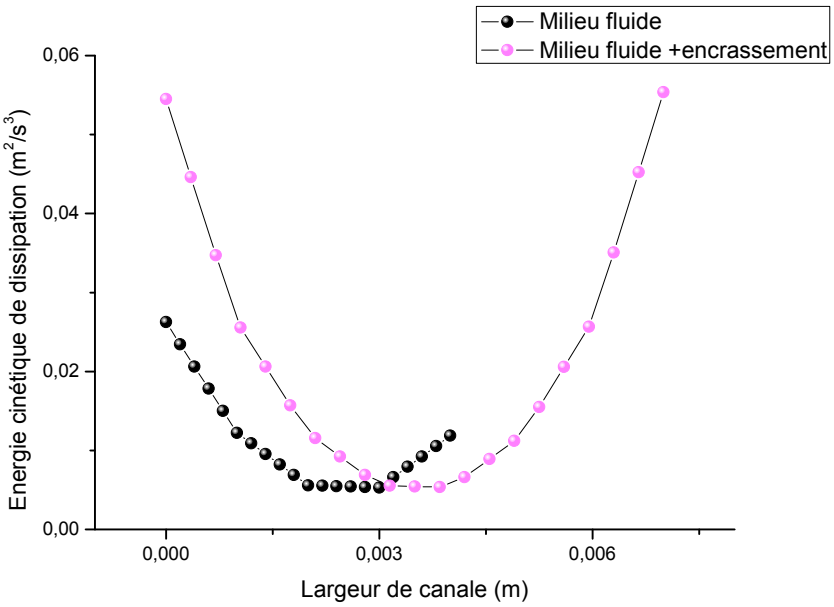
Variation d'energie cinétique (m^2/s^3) d'eau en fonction de largeur de canale (m) en milieu fluide et milieu fluide avec encrassement de lait

Y= 0.60 m



Variation d'energie cinétique (m^2/s^3) d'eau en fonction de largeur de canale (m) en milieu fluide et milieu fluide avec encrassement de lait

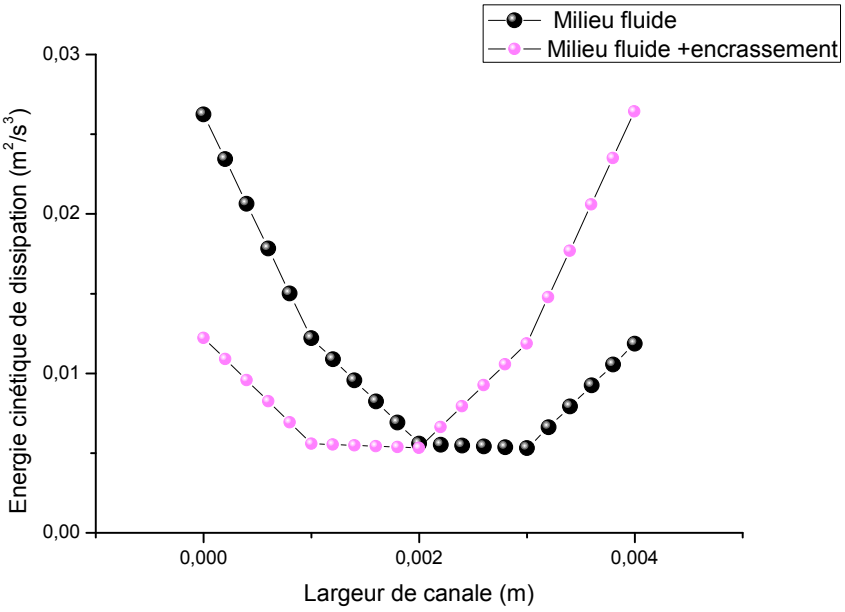
Y=1.2 m



Variation d'energie cinétique (m^2/s^3) d'eau en fonction de largeur de canale (m) en milieu fluide et milieu fluide avec encrassement de lait

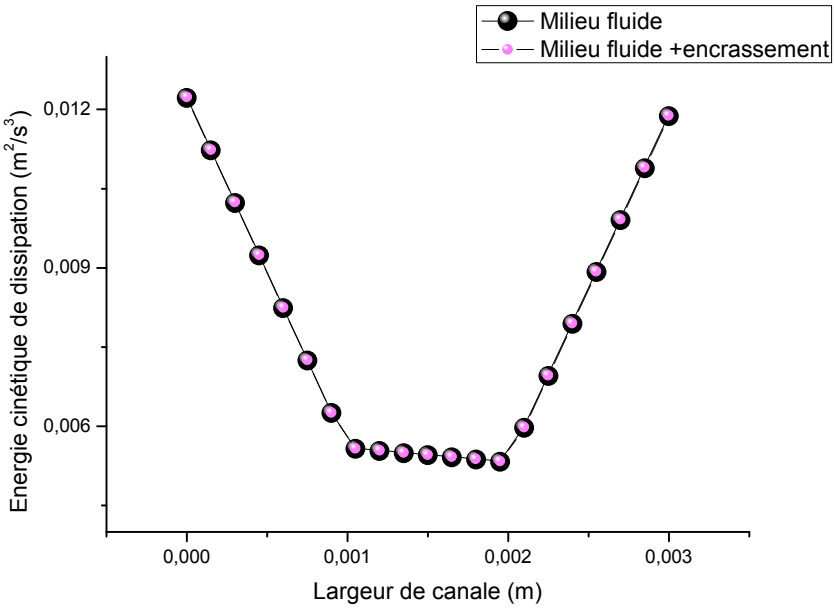
Coté lait

Y=0 m



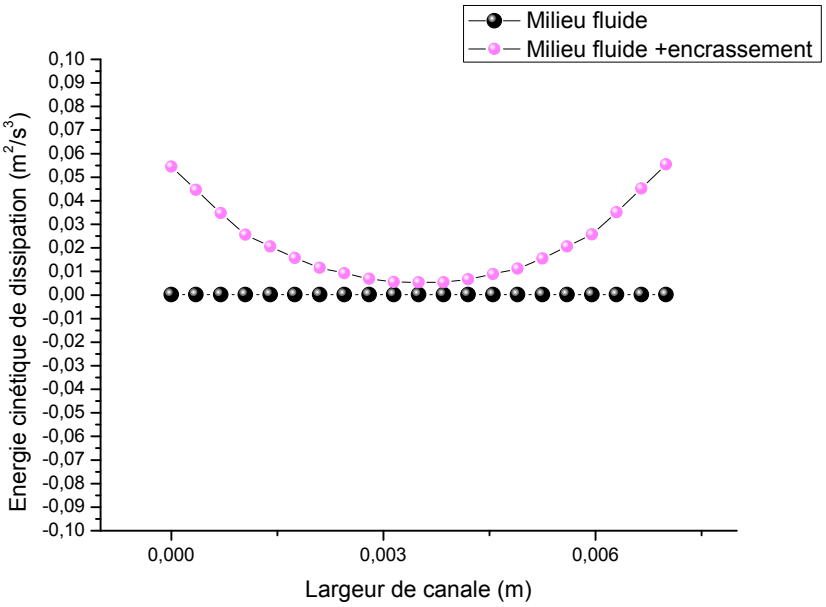
Variation d'energie cinétique (m^2/s^3) de lait en fonction de largeur de canale (m) en milieu fluide et milieu fluide avec encrassement de lait

Y= 0.60 m



Variation d'energie cinétique (m^2/s^3) de lait en fonction de largeur de canale (m) en milieu fluide et milieu fluide avec encrassement de lait

Y=1.2 m



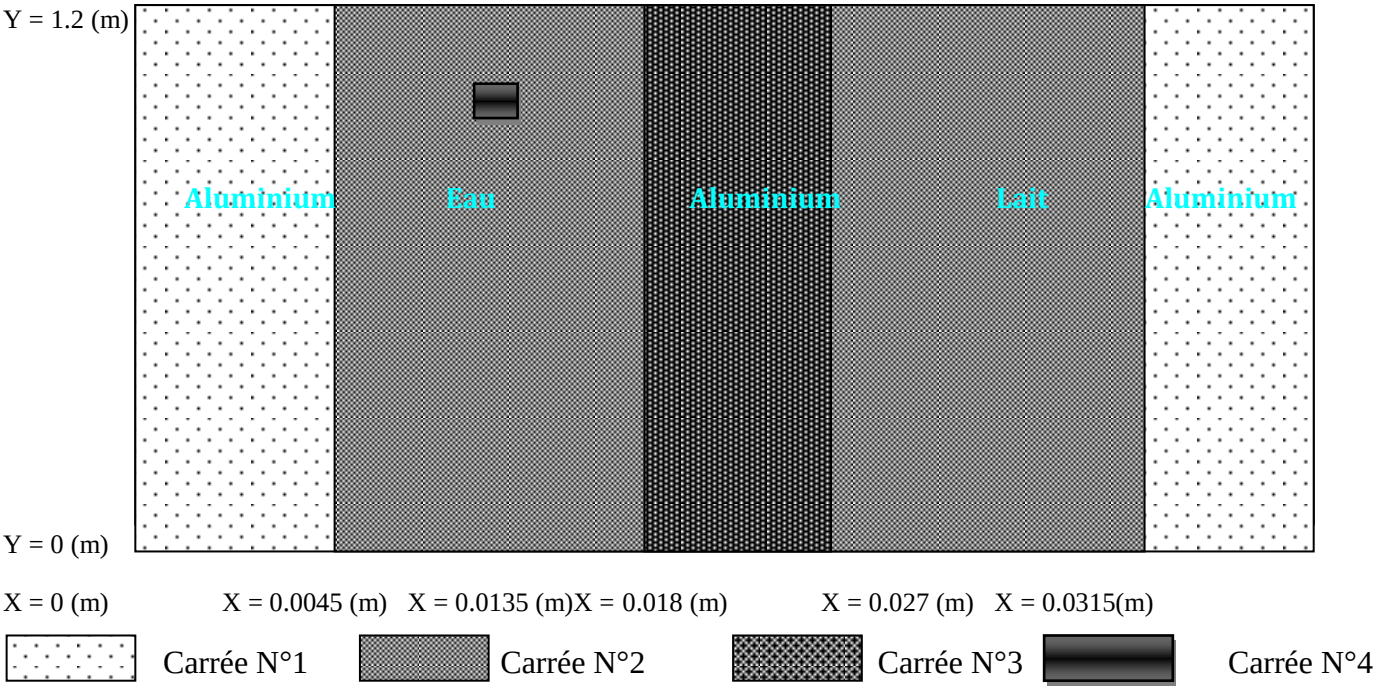
Variation d'energie cinétique (m^2/s^3) de lait en fonction de largeur de canale (m) en milieu fluide et milieu fluide avec encrassement de lait

Les dimentions de l'échangeur à plaque avec déflecteurs simulé au programme ANSYS :

	Variation de Y (m)		Variation de X(m)	
	Y_1 (m)	Y_2 (m)	X_1(m)	X_2(m)
Carrée N°1	**0**	**1.2**	**0**	**0.0315**
Carrée N°2	**0**	**1.2**	**0.0045**	**0.027**
Carrée N°3	**0**	**1.2**	**0.0135**	**0.018**
Carrée N°4	**1.18**	**1.1835**	**0.0080**	**0.0115**

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



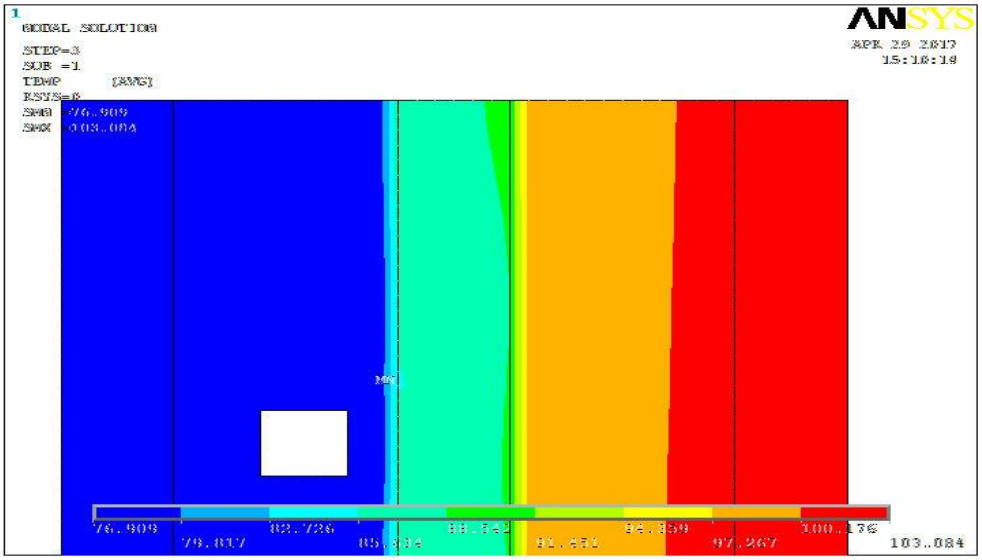
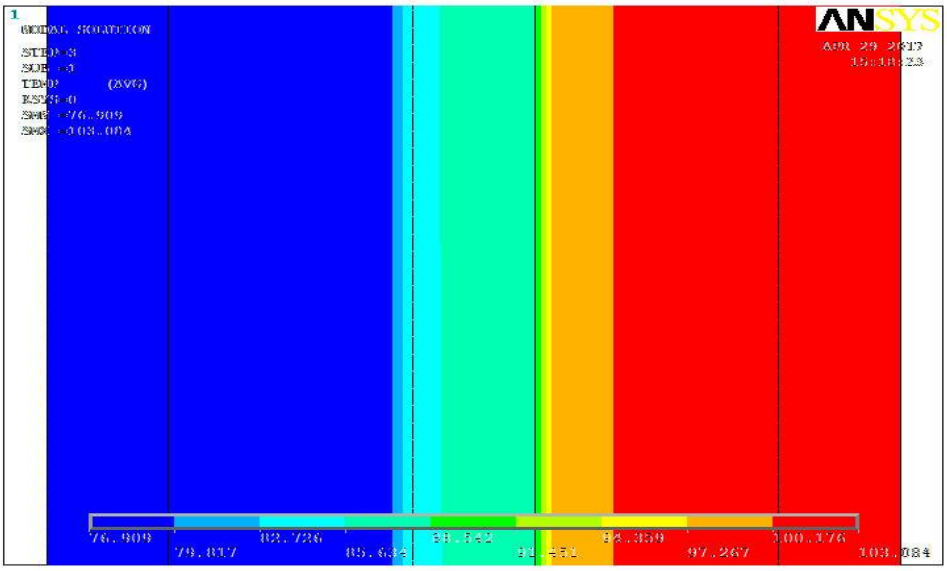
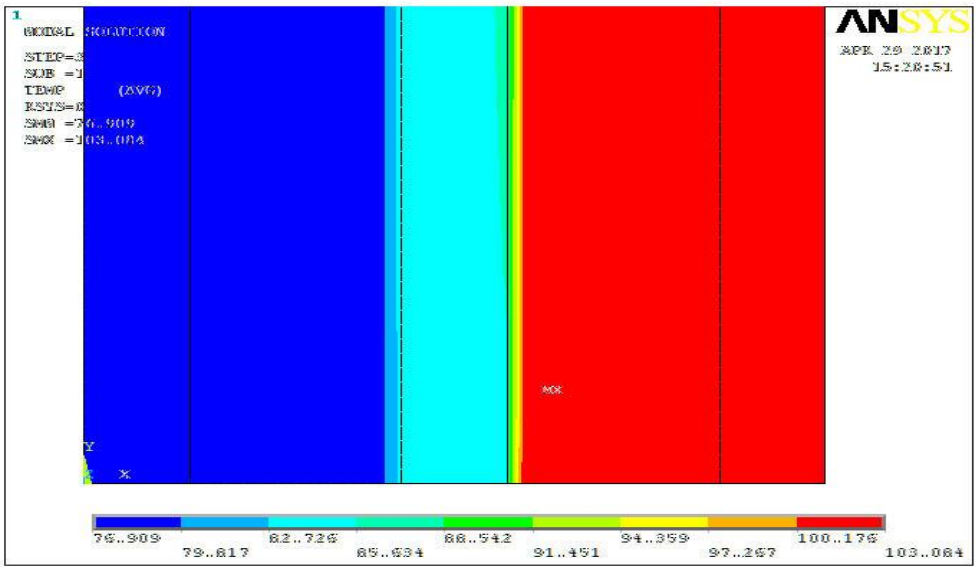
Un diagramme montre les carrées sont placées au programme ANSYS

Les proprietes physico-chimiques des matériaux utilisés :

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

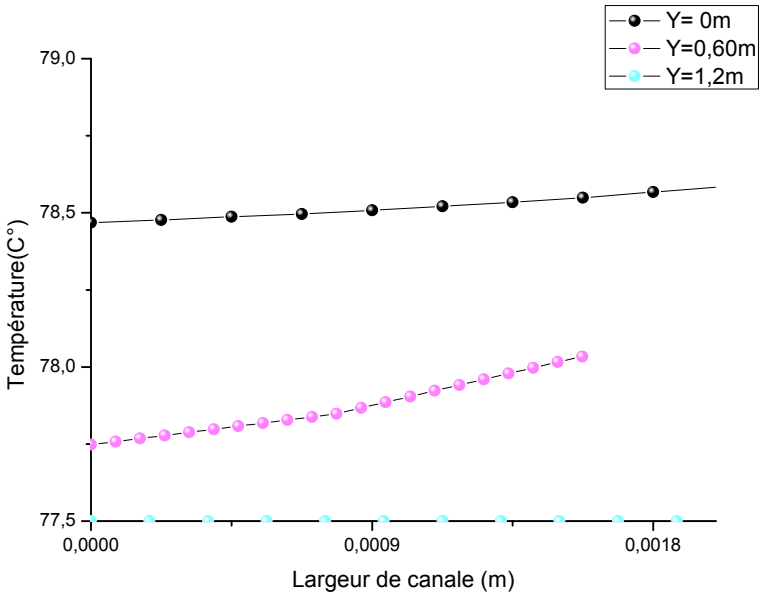
IV.LES RESULTATS DANS UN MILIEU FLUIDE AVEC DELECTEURS :

IV.1.Profil de température

	Coter eau	Coter lait
En haut		
Au milieu		
En bas		

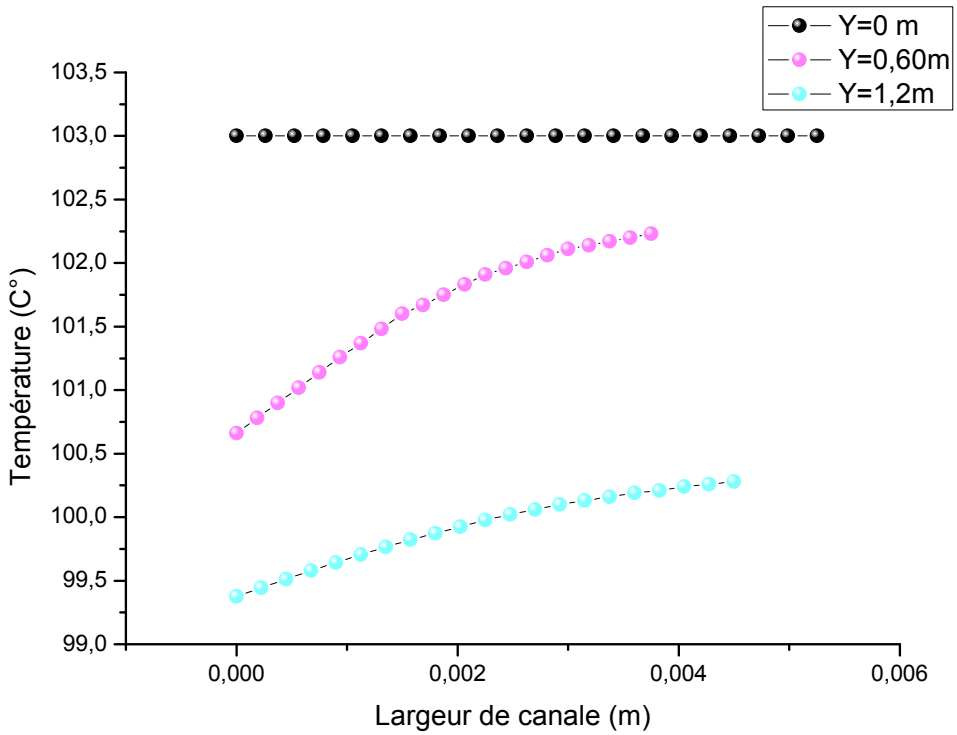
Les temperatures dans un meme graphe :

1.coté l'eau :



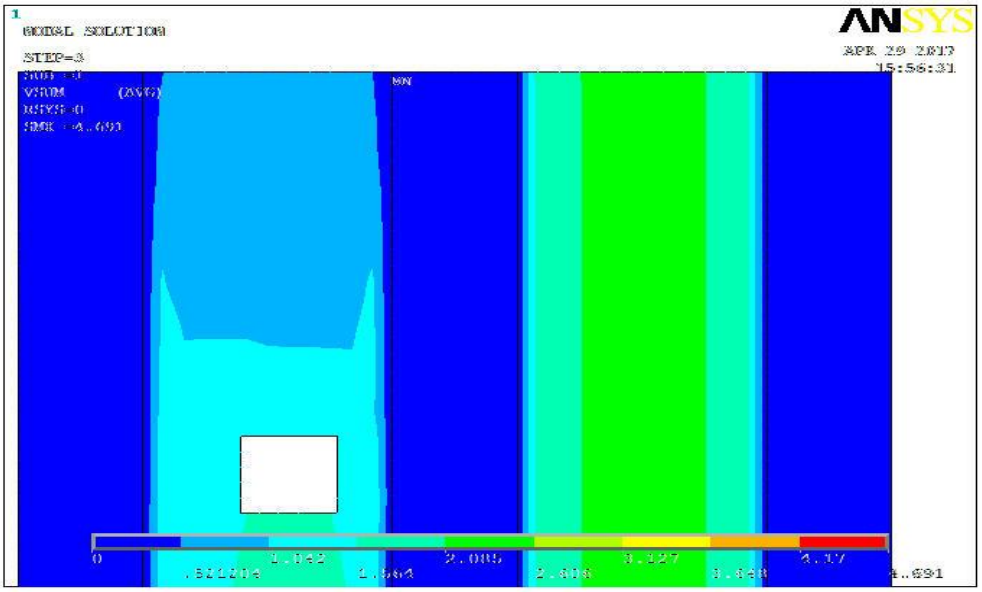
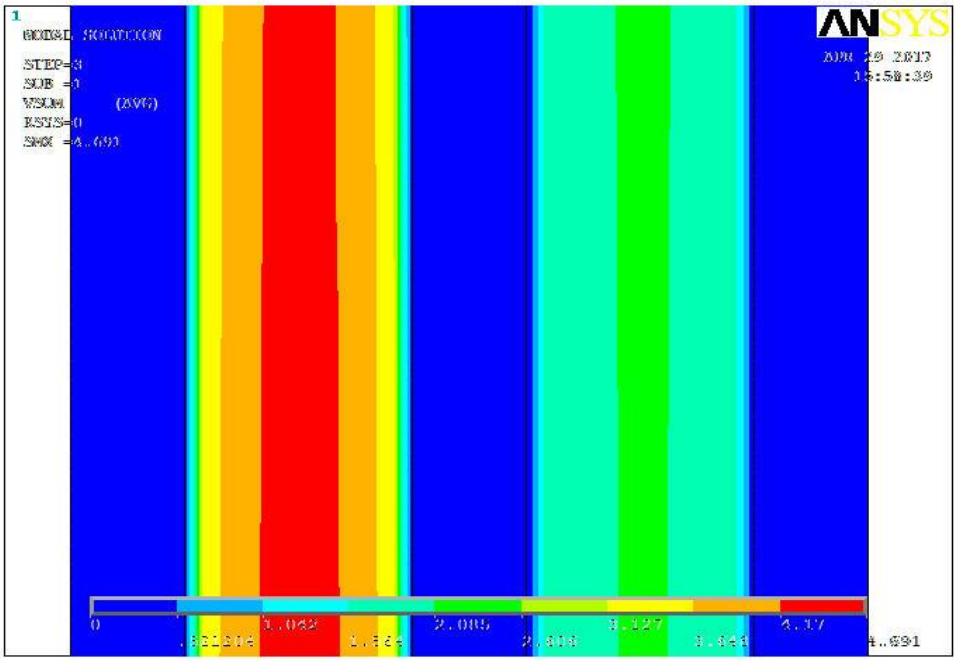
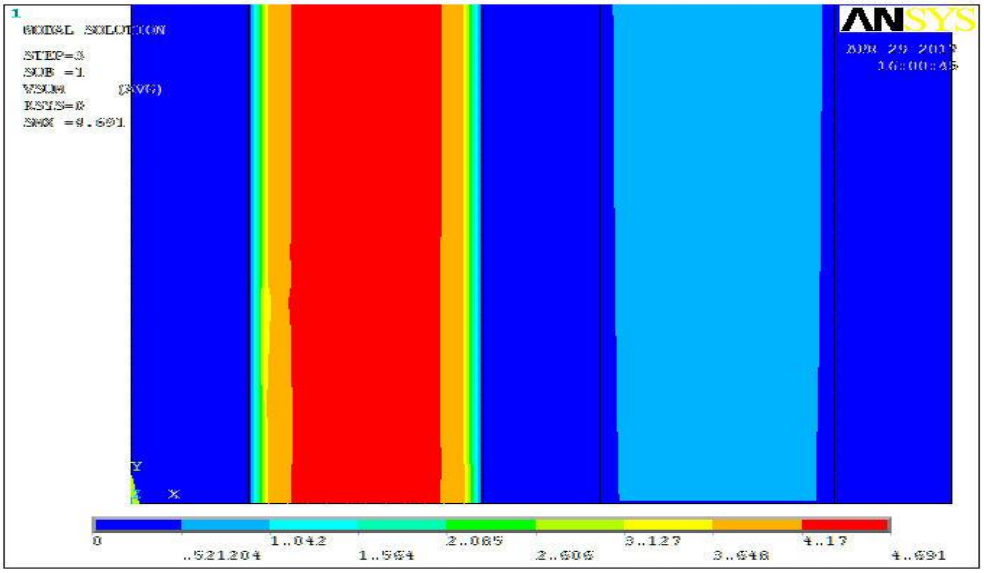
Variation de temperatures d'eau (C°) en fonction de largeur du canal(m) en différents position Y(m)

2.coté lait :



Variation de temperatures de lait (C°) en fonction de largeur du canal(m) en différents position Y(m)

IV.2.Profil de vitesse

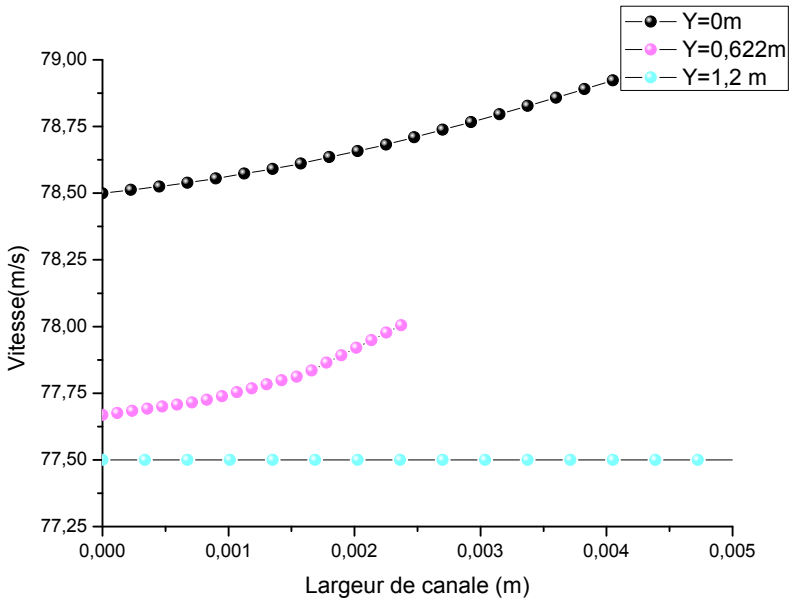
	Coter eau	Coter lait
En haut		
Au milieu		
En bas		

La variation de vitesse à la longue de canal :

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

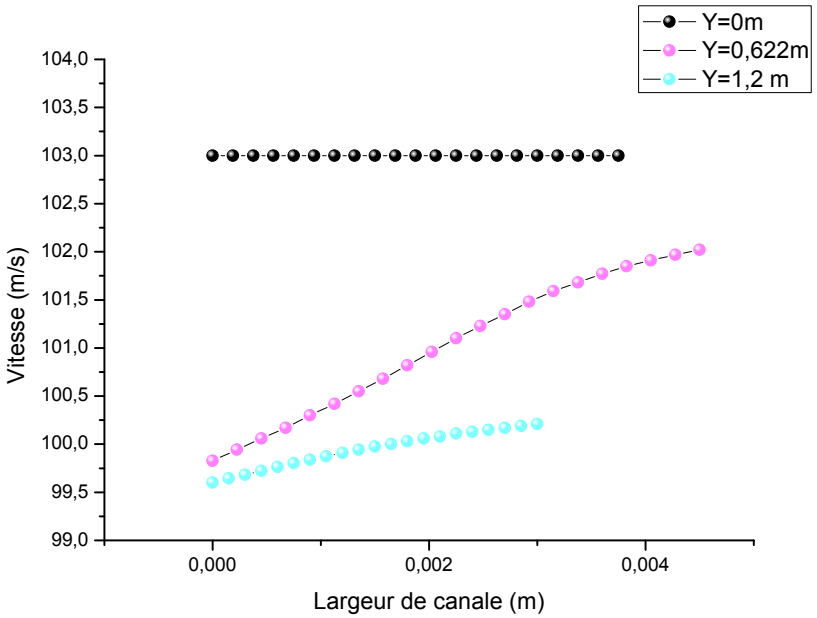
Les vitesses dans un meme graphe :

1.coté l'eau :



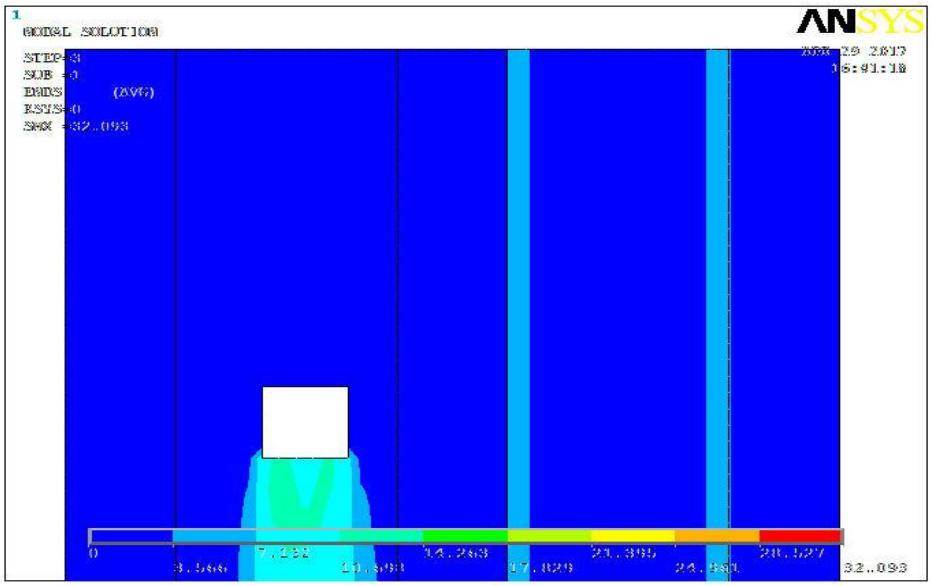
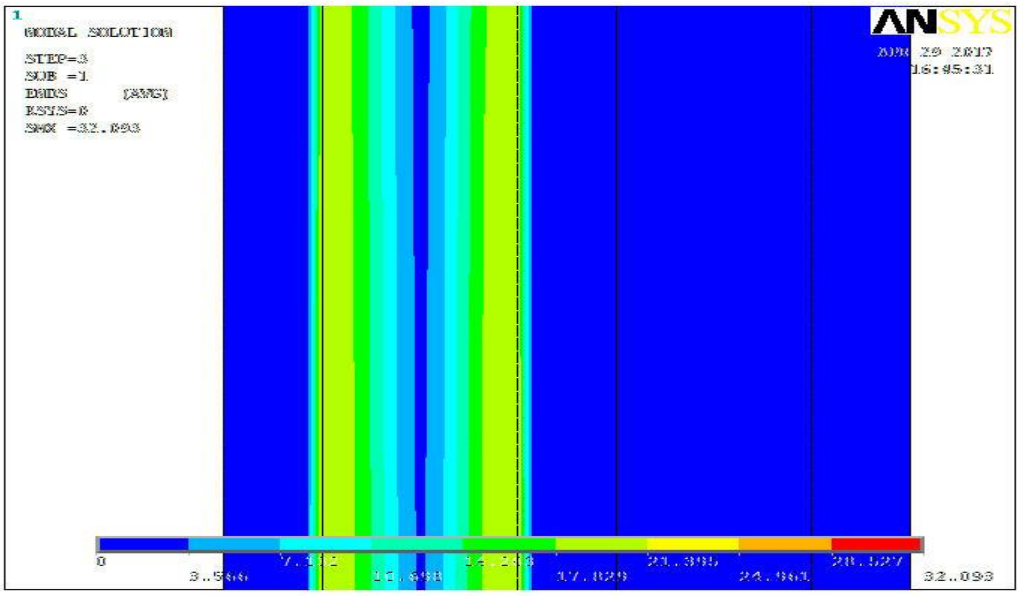
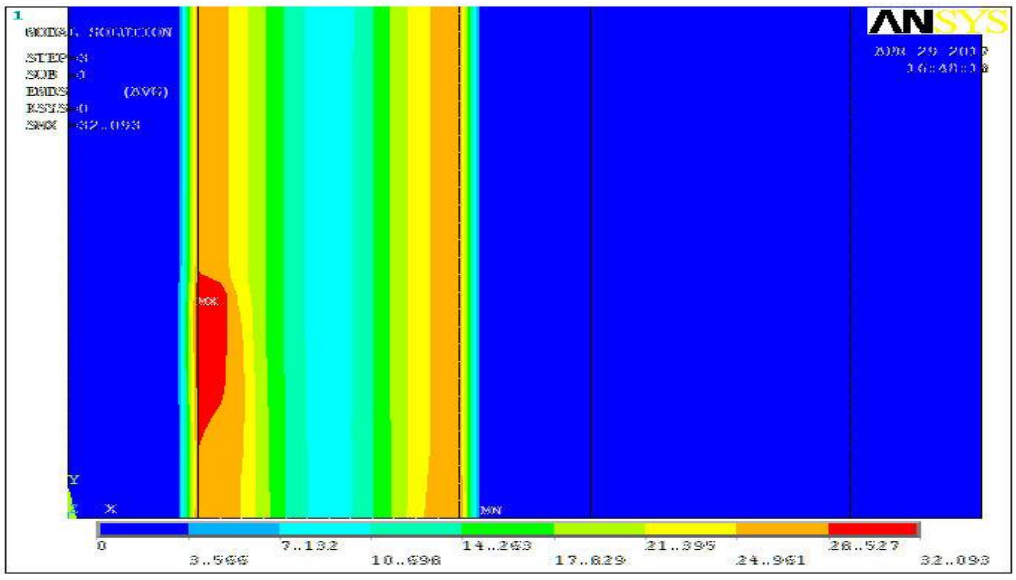
Variation de vitesse d'eau (m/s) en fonction de largeur du canal(m) en différents position Y(m)

2.coté lait :



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

IV.3.Profil de facteur d'energie cinétique de dissipation

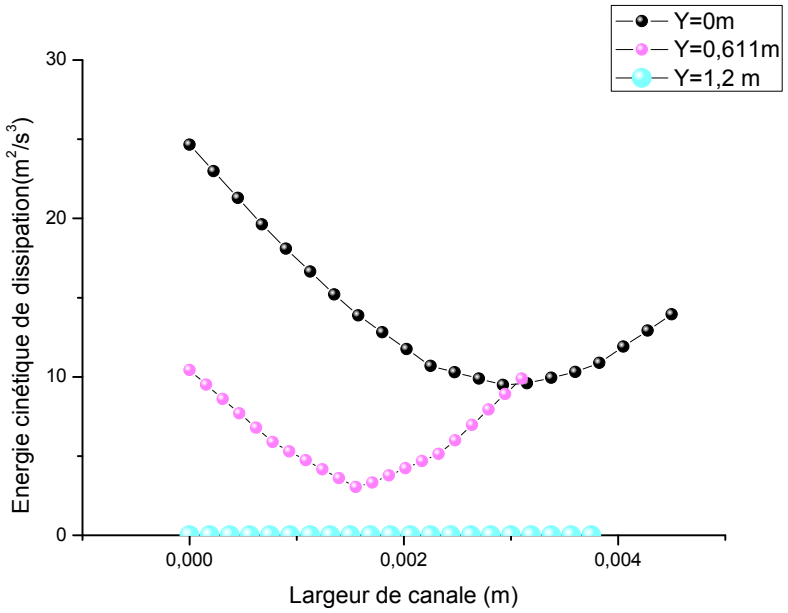
	Coter eau	Coter lait
En haut		
Au milieu		
En bas		

La variation de facteur d'energie cinétique de dissipation à la longue de canal :

L'évolution dufacteur d'energie cinétique de dissipationen fonction de la largeur (x) du canal est représentée sur les graphes suivantes et ce pour différentes positions dans le canal (Y).pour l'eau et lait

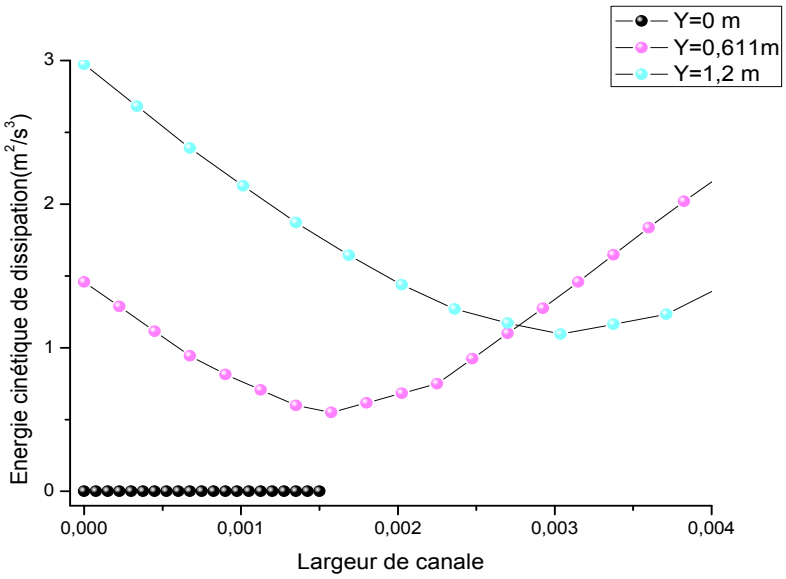
Les facteur d'energie cinétique de dissipation dans un meme graphe :

1.coté l'eau :



Variation de facteur d'energie cinétique de dissipation (m^2/s^3) d'eau en fonction de largeur du canal(m) en différents position Y(m)

2.coté lait :



Variation de facteur d'energie cinétique de dissipation (m^2/s^3) de lait en fonction de largeur du canal(m) en différents position Y(m)

Les dementions de l'échangeur à plaque avec deflecturs dans coté lait simulé au programme ANSYS avec encrassement :

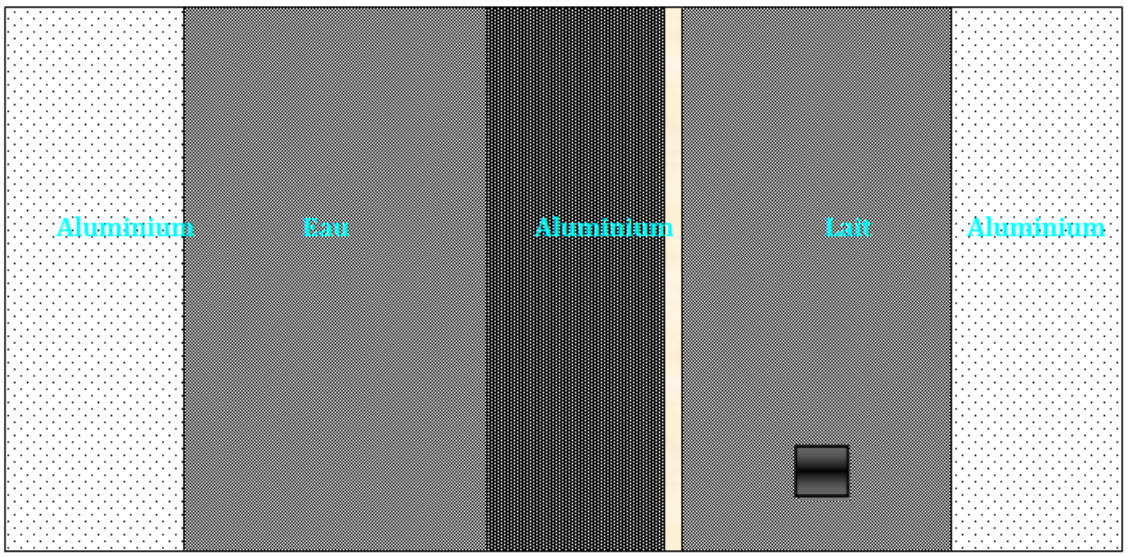
	Variation de Y (m)		Variation de X(m)	
	Y_1 (m)	Y_2 (m)	X_1(m)	X_2(m)
Carrée N°1	**0**	**1.2**	**0**	**0.0315**
Carrée N°2	**0**	**1.2**	**0.0045**	**0.027**
Carrée N°3	**0**	**1.2**	**0.0135**	**0.018**
Carrée N°4	**0**	**1.2**	**0.018**	**0.01801**
Carrée N°5	**0.02**	**0.0235**	**0.021**	**0.0245**

e = le diamètre de plaque = 0.0045 m

d = diamètre hydraulique =diamètre entre les deux plaque

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

Y = 1.2 (m)



Y = 0 (m)

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

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

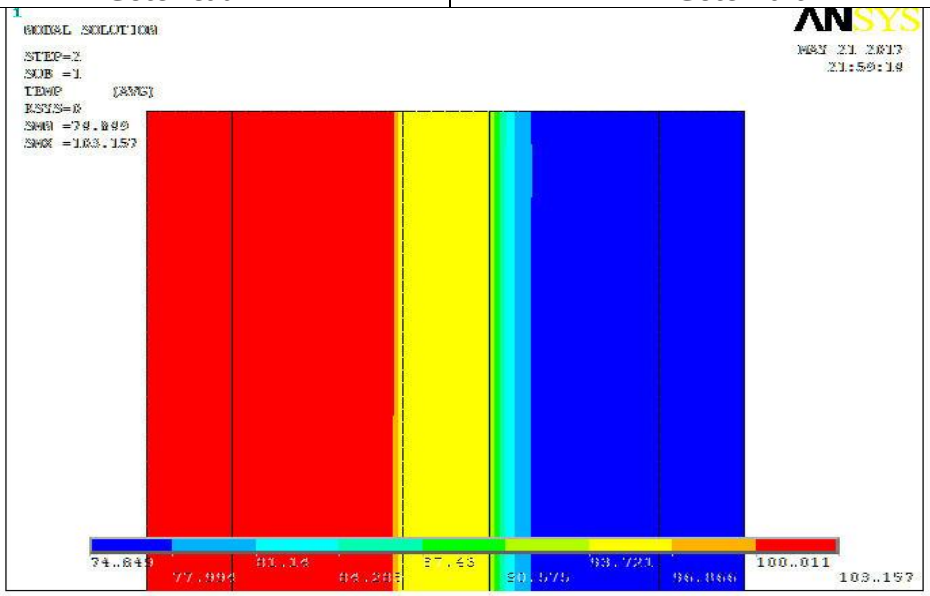
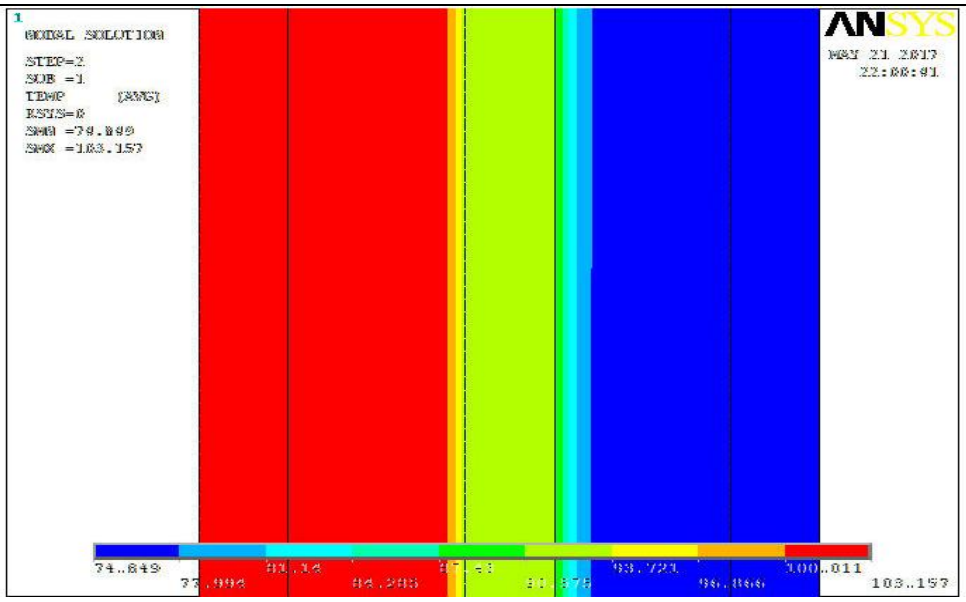
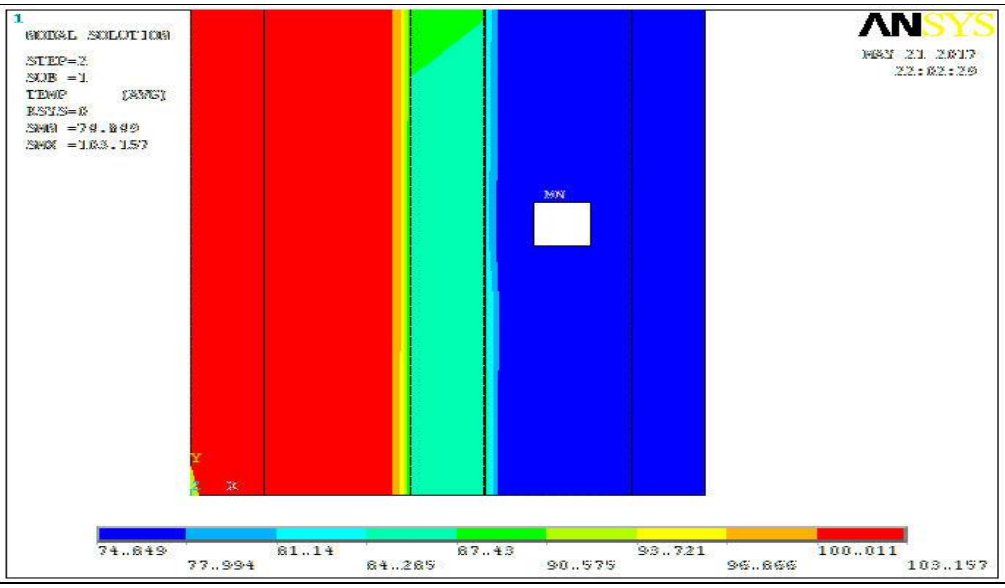
Un diagramme montre les carrées (encrassement) sont placées au programme ANSYS

Les proprietes physico-chimiques des matériaux utilisés :

		Paramètre du lait	Paramètre du l'eau	Paramètre d'aluminium	Paramétre 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	/	/	

VI.LES RESULTATS DANS UN MILIEU FLUIDE AVEC L'ENCRASSEMENT :

VI.1.Profil de température

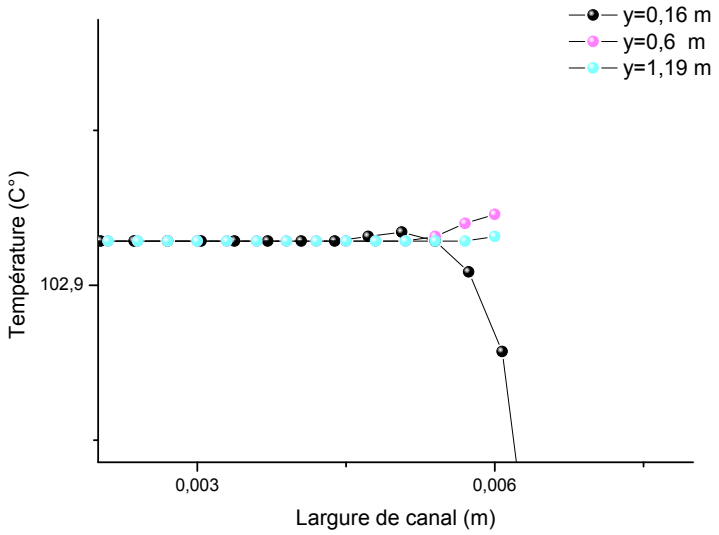
	Coter eau	Coter lait
En haut		
Au milieu		
En bas		

La variation de la température à la longue de canal :

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

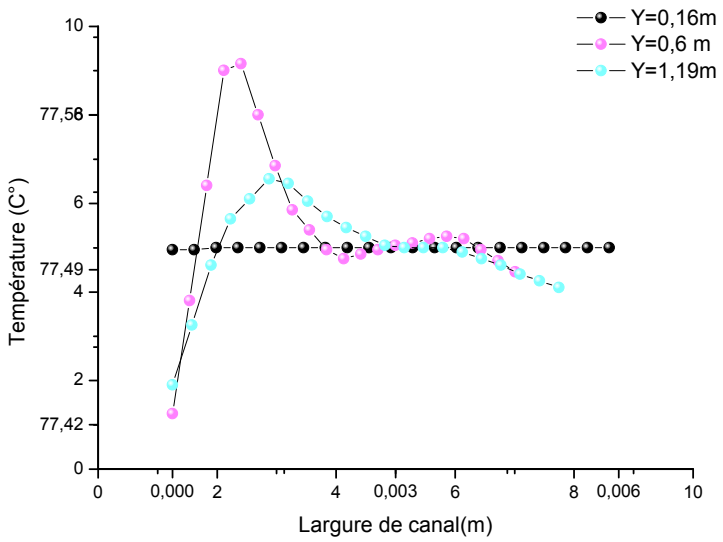
Les temperatures dans un meme graphe :

1.coté l'eau :



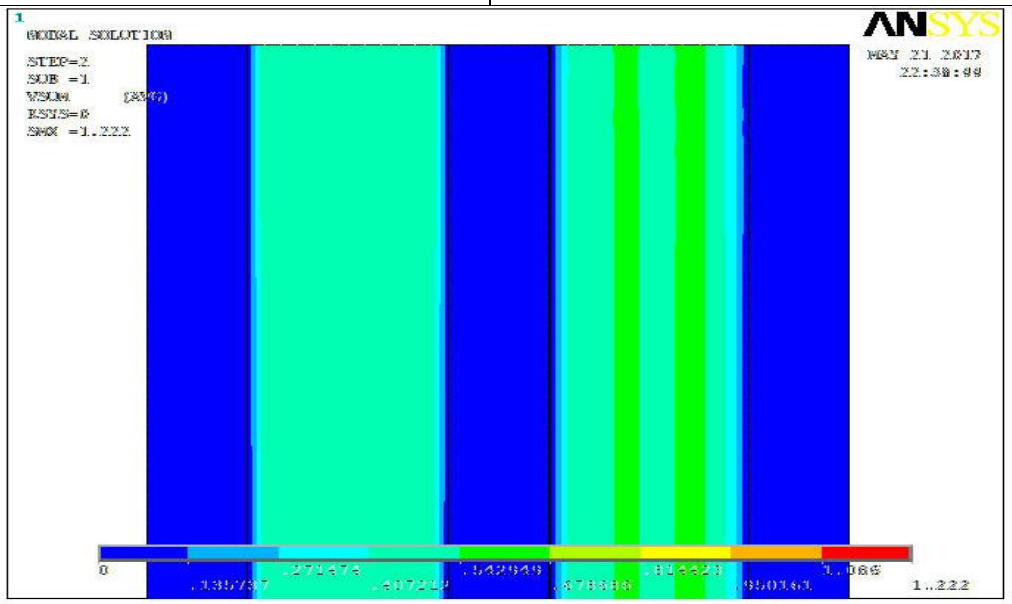
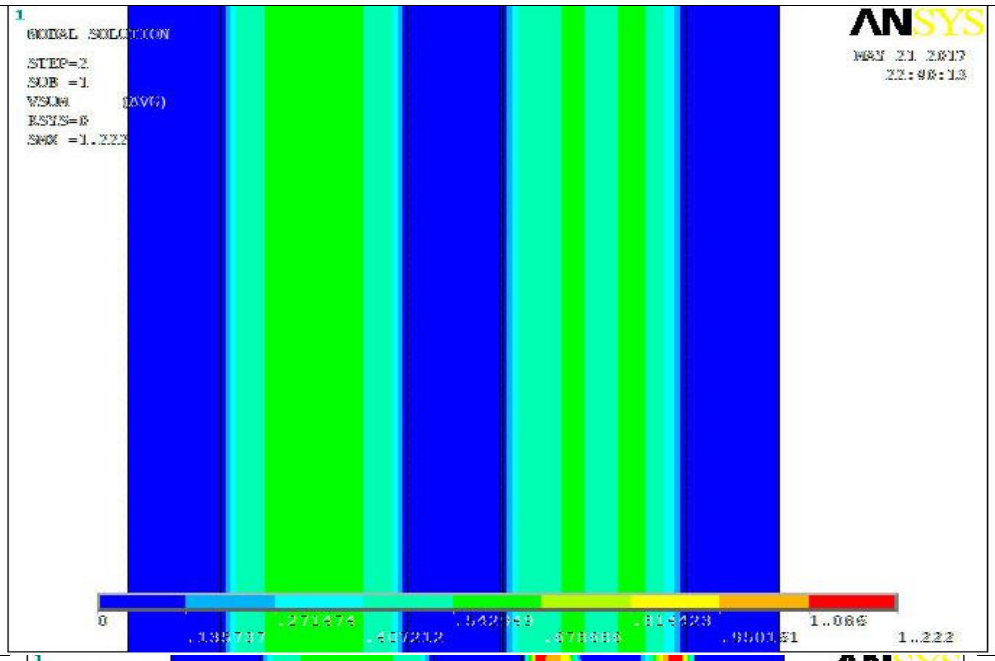
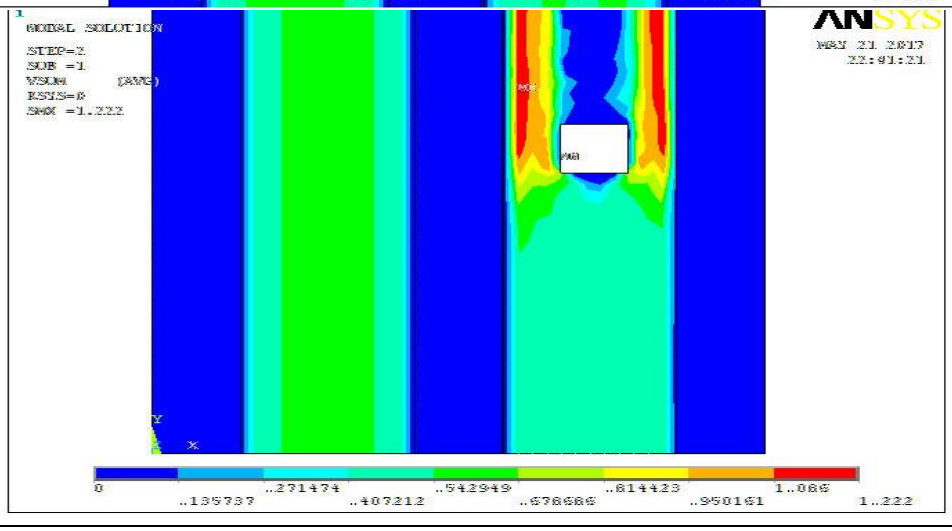
Variation de temperatures d'eau (C°) en fonction de largeur du canal(m) en différents position Y(m)

2.coté lait :



Variation de temperatures de lait (C°) en fonction de largeur du canal(m) en différents position Y(m)

VI.2.Profil de vitesse

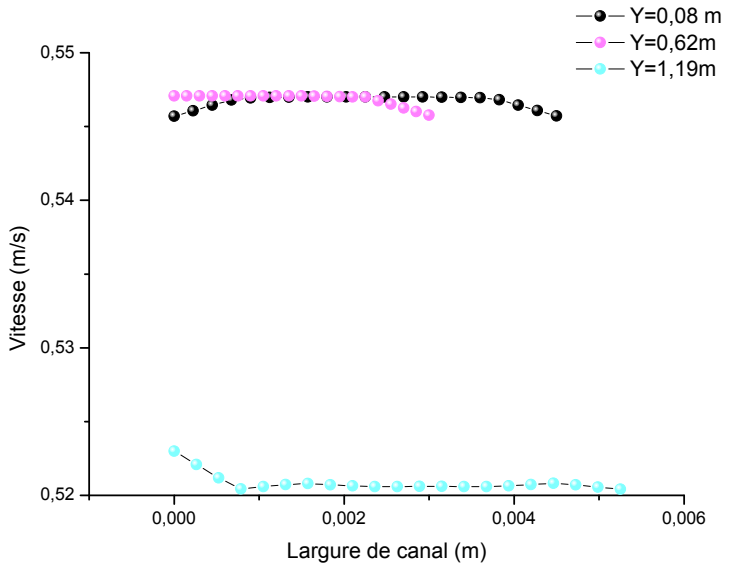
	Coter eau	Coter lait
En haut		
Au milieu		
En bas		

La variation de La vitesse à la longue de canal :

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

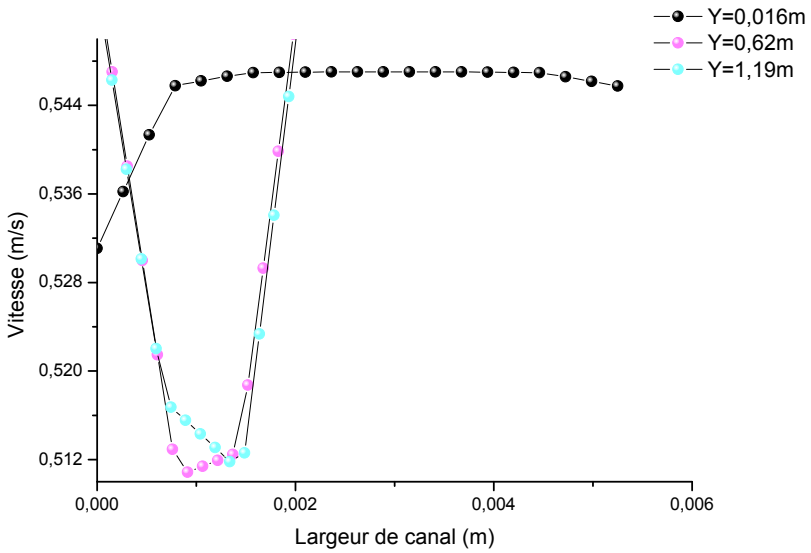
Les vitesses dans un meme graphe :

1.coté l'eau :



Variation de vitesse d'eau (m/s) en fonction de largeur du canal(m) en différents position Y(m)

2.coté lait :



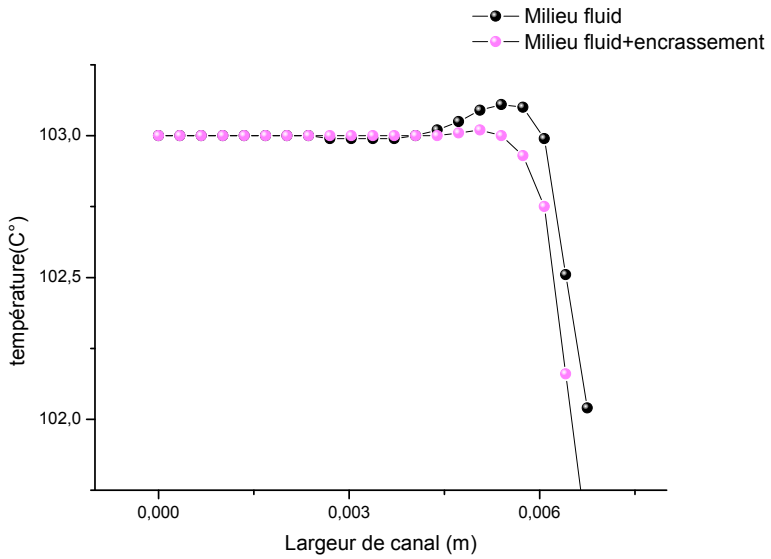
Variation de vitesse de lait (m/s) en fonction de largeur du canal(m) en différents position Y(m)

VII. ETUDE COMPARATIVE ENTRE LE MILIEU FLUIDE ET LE MILIEU FLUIDE AVEC ENCRASSEMENT DE LAIT :

VII.1. Le profil de températures

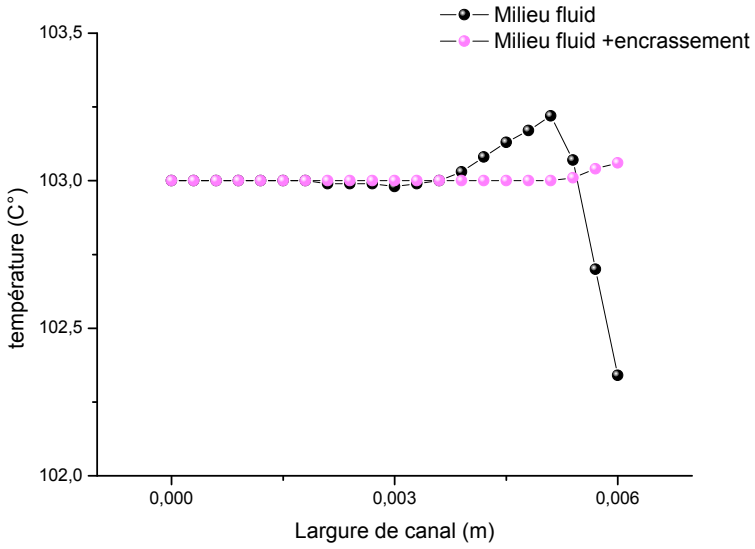
Cote de l'eau

Y=0 m



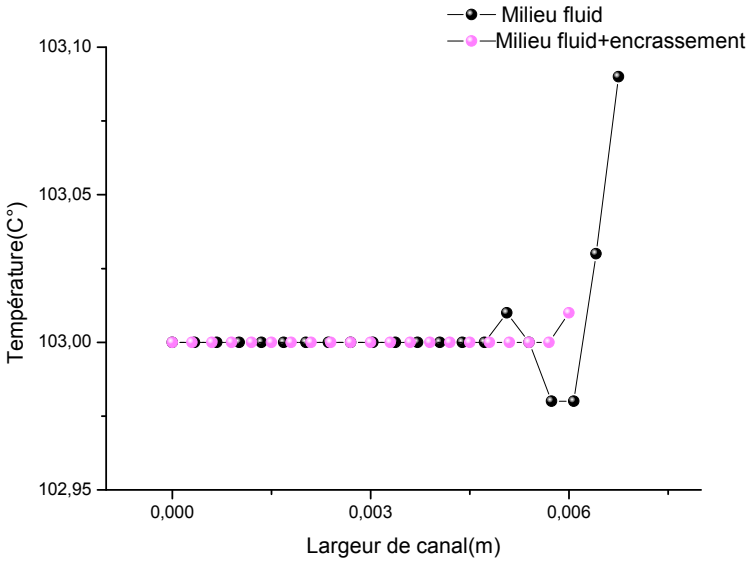
Variation de temperatures d'eau (C°) en fonction de largeur du canal(m) en milieu fluid et milieu fluid avec encrassement de lait

Y=0.60 m



Variation de temperatures d'eau (C°) en fonction de largeur du canal(m) en milieu fluid et milieu fluid avec encrassement de lait

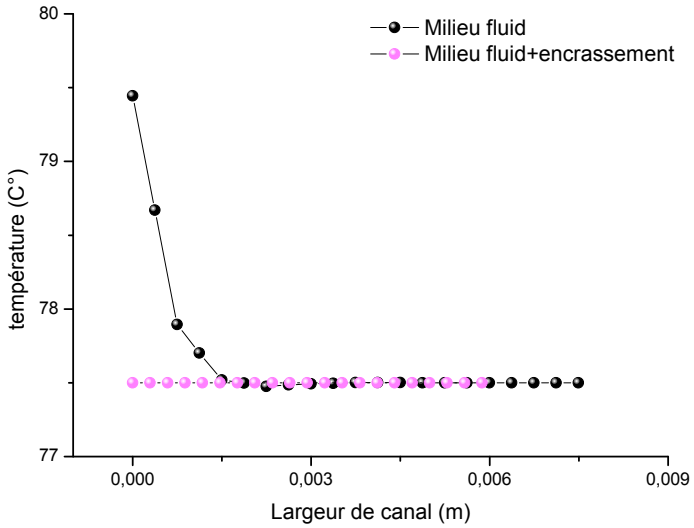
Y=1.2 m



Variation de temperatures d'eau (C°) en fonction de largeur du canal(m) en milieu fluid et milieu fluid avec encrassement de lait

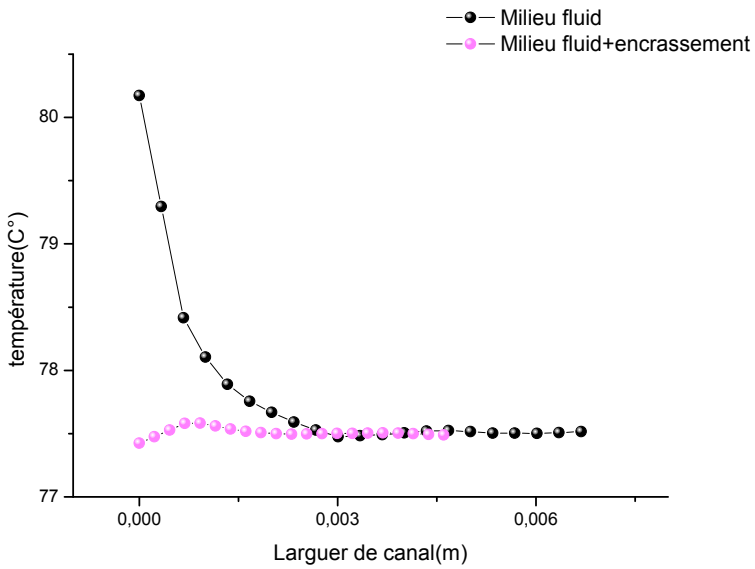
Coté lait :

Y=0 m



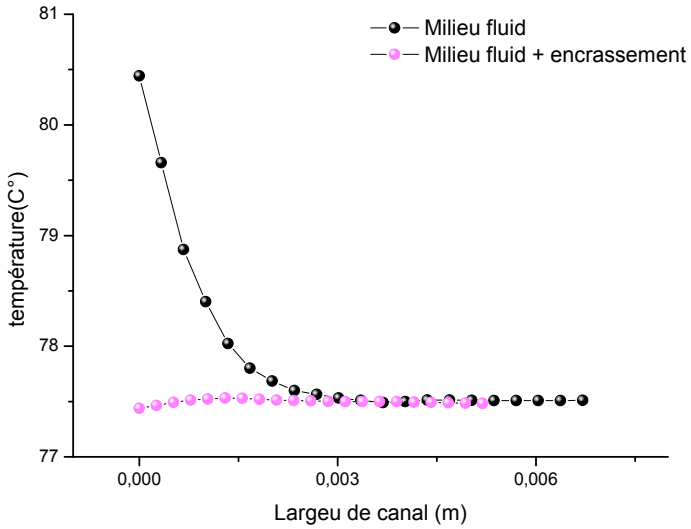
Variation de temperatures de lait (C°) en fonction de largeur du canal(m) en milieu fluid et milieu fluid avec encrassement de lait

Y= 0.60 m



Variation de temperatures de lait (C°) en fonction de largeur du canal(m) en milieu fluid et milieu fluid avec encrassement de lait

Y=1.2 m

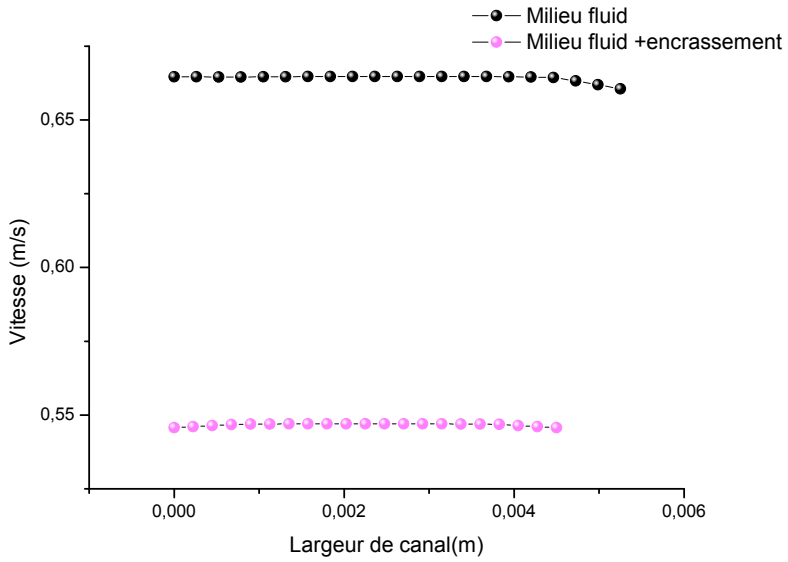


Variation de temperatures de lait (C°) en fonction de largeur du canal(m) en milieu fluid et milieu fluid avec encrassement de lait

III.2. Le profil de vitesses :

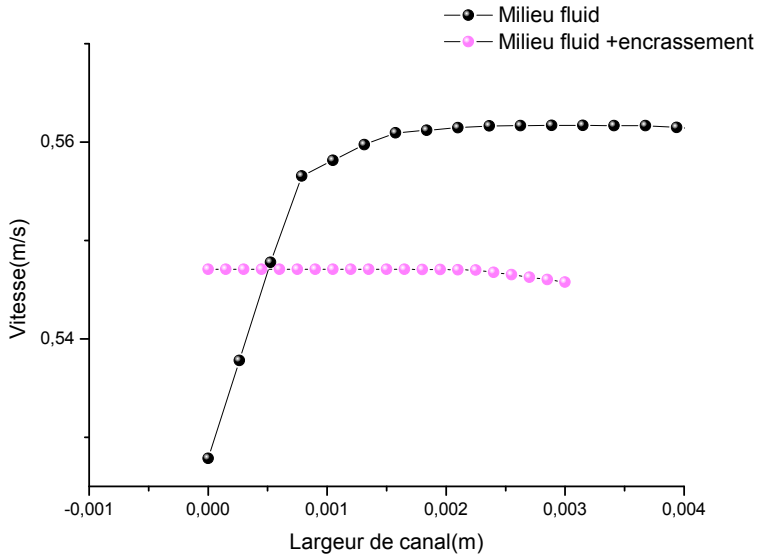
Cote de l'eau

Y=0 m



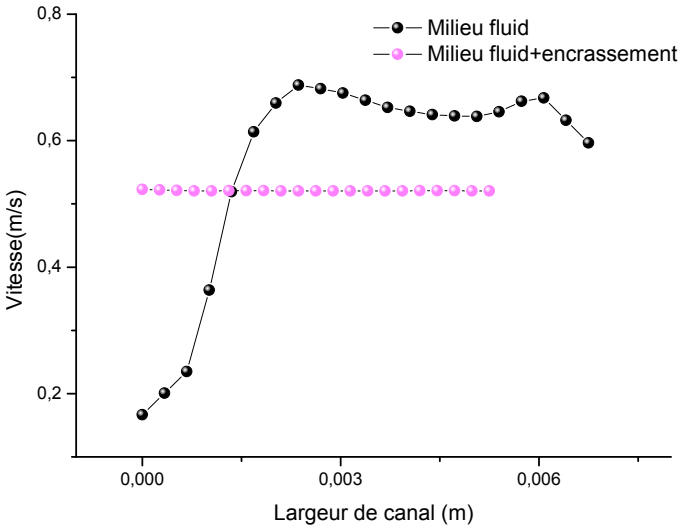
Variation de vitesse d'eau (m/s) en fonction de largeur du canal(m) en milieu fluide et milieu fluide avec encrassement de lait

Y= 0.60 m



Variation de vitesse d'eau (m/s) en fonction de largeur du canal(m) en milieu fluide et milieu fluide avec encrassement de lait

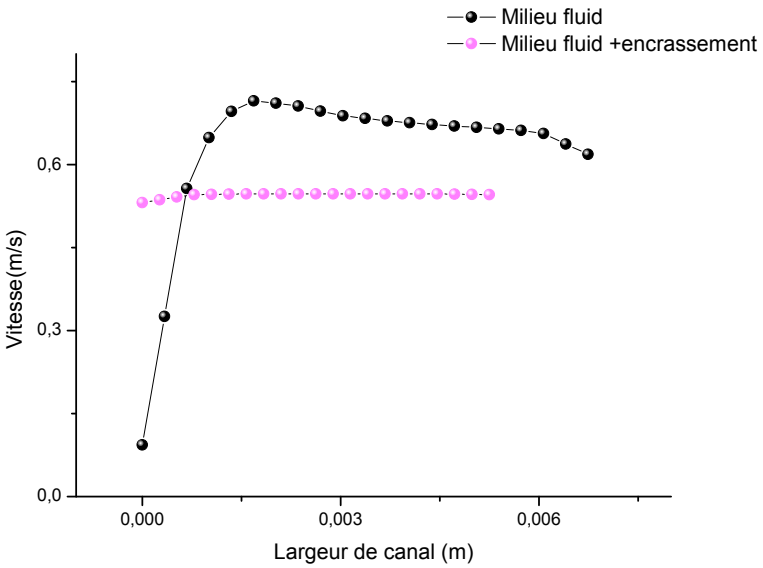
Y=1.2 m



Variation de vitesse d'eau (m/s) en fonction de largeur de canal(m) en milieu fluide et milieu fluide avec encrassement de lait

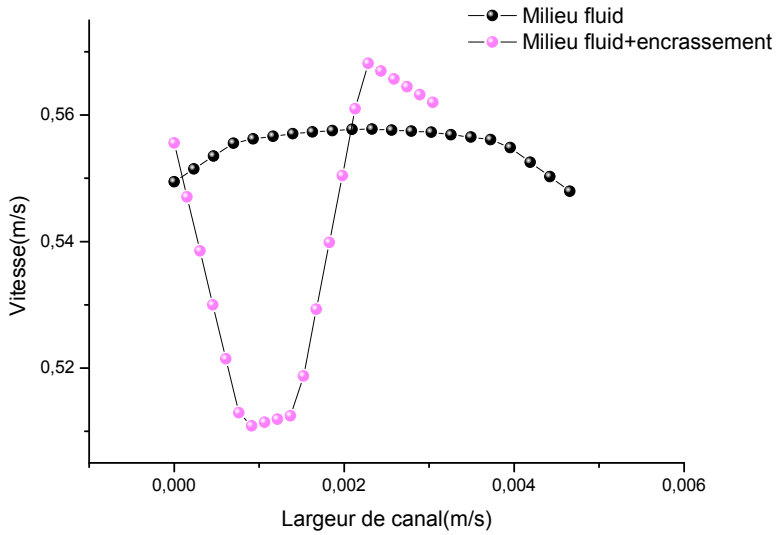
Coté lait

Y=0 m



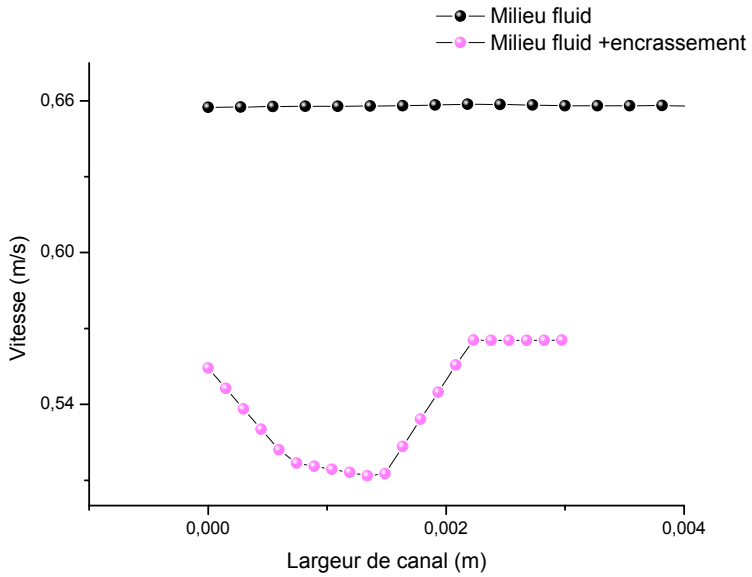
Variation de vitesse de lait (m/s) en fonction de largeur de canal(m) en milieu fluide et milieu fluide avec encrassement de lait

Y=0.60 m



Variation de vitesse de lait (m/s) en fonction de largeur de canal(m) en milieu fluide et milieu fluide avec encrassement de lait

Y=1.2 m



Variation de vitesse de lait (m/s) en fonction de largeur de canal(m) en milieu fluide et milieu fluide avec encrassement de lait