République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie de Procédés et Environnement

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

***En Vue de l'Obtention du Diplôme de Master en Génie des* Procédés**

Option : Procédés Pharmaceutiques

Thème

MODELISATION ET SIMULATION NUMERIQUE DE L'ENCRASSEMENT EN REGIME TURBULENT DANS UN ECHANGEUR DE CHALEUR A PLAQUES LORS D'UNE PHASE DE TRAITEMENT THERMIQUE.

Proposé et Dirigé par :
Dr.Youcef MAHDI

Etudié par :
M^{elle} Naima HENTABLI
M^{elle} Selma BELMOSTEFAOUI

Promotion 2014-2015

Remerciement

Tout d'abord nous remercions infiniment le bon dieu puissant de la bonne santé, la volonté et la patience qu'il nous a donné tout le long de nos études.

Nous présentons nos sincères remerciements avec nos profonds respects à notre promoteur, Mr. Mahdi Yousef et notre co-promoteur Mr. Zirari Mounire pour leurs suivis, leurs patiences, leurs conseils et leurs aides, tout au long de la réalisation de ce modeste travail.

Nous tenons à remercier aussi les membres de jury

Je remercie enfin toute personne m 'ayant aidé de prés ou de loin à l 'achèvement de ce travail, spécialement tous les enseignants du département de Génie des Procédés de l 'université de Yahia Fares Médéa.

Dédicaces

A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que Dieu te garde dans son vaste paradis, à toi

mon pére.

A la lumière de mes jours, la source de mes éfforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur

***Maman** que j'adore.*

*Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour, à tous **mes frères et Ihcen, mes sœurs et ses maris**, ma nièce **Sanaa**, et mes neuveux **Tadj Eddine, Mohamed Karime**, à **toute ma famille**, je dédie ce travail dont le grand plaisir leur revient en premier lieu pour leur conseil, aide, et encouragement.*

*Aux personnes qui m'ont toujour aidés et encouragés, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagnaient durant mon chemin d'études supérieures, mes aimables amis, collègues d'études, **selma,meriem , hassiba,hadjer**…….*

Naima

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail ....

A mon père et à ma mère

Une réserve inépuisable de courage vous a permis d'accomplir votre devoir tous les jours et de vous fier au bon DIEU pour le lendemain.

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

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

A ma sœur yasmine

Demain ne sera pas comme hier, il sera nouveau et il dépendra de nous. Notre avenir comme notre passé doit être solidaire. C'est la plus belle chose qui nous est donnée naturellement. Notre force résidera toujours dans notre sincère entente et notre esprit de fraternité.

A mon amie : Hentabli Naima

A tous mes amis, hassiba, merieme, hadjer, siham, selma…..

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

A tous ma famille, Ma grande mère mes tantes.

A mes oncles. Mes cousins et mes cousines

Pour notre amitié et tous les bons moments passés et à venir,

Pour votre présence, vos bons conseils et nos fous rires partagés

Un très grand merci à tous et à toutes.

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

Selma

الملخص

يتناول هذا العمل دراسة، النمذجة والبرمجة للترسبات في المبادلات الحرارية ذات الوحات من الحليب خلال مرحلة البسترة المضطربة. نقدم صياغة رياضية للتدفق المضطرب المستمر للوحتين مسطحتين مع وبدون الترسب مع نموذج إغلاق κ-ε.و قد تم تعيين معادلات المحفوضات والشروط المعمول بها في الحل العددي. النتائج المتحصل عليها فيما يتعلق بدرجة الحرارة، السرعة الطاقة الحركية المضطربة للتبديد مع وبدون الترسبات ، أظهرت انخفاضا في درجة الحرارة، زيادة في السرعة وانخفاض عامل تبديد الطاقة الحركية المضطربة في وجود قاذورات.

الكلمات المفتاح : الحليب, مبادلات حرارية ذات الوحات , نموذج κ-ε, الترسبات.

RESUME

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

Les résultats développés concernent la température, la vitesse et l'énergie cinétique de dissipation turbulente avec et sans encrassement. Ils montrent une chute de la température, une augmentation de la vitesse et une diminution du facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulent en présence de l'encrassement.

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

ABSTRACT

This work deals with the design, modeling and simulation of fouling in a Plate Heat Exchanger by the milk during a turbulent pasteurization phase. We present the mathematical formulation in steady turbulent flow between two flat plates with and without fouling with the κ-ε closure model. Conservations equations and applicable conditions are set for the numerical solution.

The results developed concerning temperature, velocity and the turbulent kinetic energy dissipation with and without fouling. They show a drop in temperature, an increase in velocity and decrease in dissipation factor of the turbulent kinetic energy in the presence of fouling.

Key words: Milk**,** Plate Heat Exchanger, κ-ε model, fouling

INTRODUCTION GENERALE ……...1

Chapitre I : LE LAIT, LES PRODUITS LAITIERS ET LES TRAITEMENTS THERMIQUES

I.1. GENERALITE ……..…3

I.2. LE LAIT: UN ALIMENT RICHE POUR LES HUMAIN.……...……5

I.3. ETAT DE DISPERSION DANS LE LAIT OU « STRUCTURE » DU LAIT……..5

I.3.1.La phase aqueuse……...…….……..…….6

I.3.2. La phase grasse: (sous forme d'émulsion)……..…6

I.3.3. La phase colloïdale……..7

I.3.4. La phase gazeuse ……..7

I.4. LES PRODUITS DERIVES DU LAIT ……..…..……..…7

I.4.1. La crème …….……..…..7

I.4.2. Le beurre……..……..7

I.4.3. Le fromage …….…….…8

I.4.5. Le Yaourts (ou yoghourts)…….……...…..…8

I.5. LAIT EN POUDRE……..…….…...8

I.6. PRINCIPALES CATEGORIES DE TRAITEMENT THERMIQUE DANS L'INDUSTRIE LAITIERE ……...9

I.6.1. Thermo résistance des bactéries et des microorganismes……...……...…10

I.6.2. Laits pasteurisés……...……..…11

I.6.3. Laits stérilisés……..12

I.6.4. Laits concentrés……..13

I.6.5. Laits secs (laits en poudre ou granulés)……14

I.6.6. Laits fermentés……14

I.6.7. Laits emprésurés et gélifiés……14

I.6.8. Laits spéciaux……..15

I.7. MISE EN ŒUVRE DE LA PASTEURISATION ……..15

I.7.1. Objectifs ……15

I.7.2. Pasteurisation en mode discontinu: dite aussi (« batch »)…….……15

I.7.3. Pasteurisation en mode continu …….16

Chapitre II : LES ECHANGEURS DE CHALEUR

II.1. INTRODUCTION …….…….17

II.2. NOTIONS GENERALES SUR LES ECHANGEURS……..…....17

II.2.1. Principaux modes d'écoulement des deux fluides …….. ….....18

II.2.1.1. Ecoulement des deux fluides parallèles et de même sens …….....….18

II.2.1.2. Ecoulement des deux fluides parallèles mais de sens contraires …...19

II.2.1.3. Ecoulement des deux fluides croisés avec ou sans brassage ….....20

II.2.2. Différents types d'échangeurs de chaleurs utilisés en industrie agroalimentaires…….…….21

II.3. Echangeurs à plaques ……..21

II.3.1. Généralités …….……21

II.3.2. Avantages et inconvénients de l'échangeur à plaques……...….23

II.3.2.1 Avantage …….….23

II.3.2.2 Inconvénients …….….24

II.4. Les échangeurs tubulaires…….……24

Chapitre III : ENCRASSEMENT DES EQUIPEMENTS THERMIQUES

III.1. INTRODUCTION…….……25

III.2. NOTIONS SUR L'ENCRASSEMENT DES ECHANGEURS…….……25

III.2.1. La corrosion …….……..26

III.2.2. L'encrassement biologique ……...……26

III.2.3. L'encrassement par réaction chimique…….……..…….26

III.2.4. L'entartrage ……..…….27

III.2.5. L'encrassement particulier …….……..27

III.2.6. L'encrassement par solidification ……27

III.3. APPARITION ET DEVELOPPEMENT DE L'ENCRASSEMENT…….……28

III.3.1. Initiation ……..……...….28

III.3.2.Transfert de particules à la paroi ……...…….28

III.3.3. Adhésion des particules ……..……..28

III.3.4. Réentraînement des particules déposées……...……..28

III.3.5. Vieillissement du dépôt ……...…….29

III.4. ENCRASSEMENT PAR LE LAIT ……...….29

III.4.1. Revue bibliographique ……...…29

III.4.2. Mécanisme de l'encrassement des protéines ……..…....30

III.4.3. Encrassement par cristallisation ……...31

III.5. CONCLUSION ……...32

CHAPITRE IV : MODELISATION ET SIMULATION DE L'ENCRASSEMENT

IV.1.INTRODUCTION ……..…….……..…33

IV.2. CYCLE DE PRODUCTION…….……...…..…….…33

IV.2.1. Les étapes de production ……..……33

IV.2.2. Le cycle de vapeur …….35

IV. 3. MODELE THERMIQUE DE L'ECHANGEUR A PLAQUE …….…….35

IV.3.1. INTRODUCTION ……..……...…..…35

IV.3.2. Formulation mathématique du problème…….…….…….……37

IV.3.3. Calcul du coefficient de transfert de chaleur global ……42

IV.3.4. Calcul des paramètres à mesurer du mélange (lait)……...……...42

IV.3.5. Calcul des paramètres à mesurer de l'eau chaude ……...……44

IV.4 Conclusion ……..…..45

IV5. Le programme ANSYS ……..……....46

IV.5.1 Introduction ……..……..……..46

IV.5.2 PRINCIPES FONDAMENTAUX D'ANSYS …….……..47

Chapitre V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

V.1.INTRODUCTION……..50

V.2 LES PROFILS DANS UN MILIEU COMPLETEMENT FLUIDE…….….50

V.1.1 Profil de température…….50

V.1.2 Profil de vitesse …….....……..….51

V.1.3 Profil du facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulent……..51

V.2 LES PROFILS DANS UN MILIEU AVEC UN DEPOT ……....53

V.2.1 Profil de la température…….....53

V.2.2 Profil de la vitesse ……...54

V.2.3 Profil du facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente avec un milieu poreux……...55

V.3 ETUDE COMPARATIVE ENTRE LE MILIEU FLUIDE ET LE MILIEU POREUX……..56

V.3.1 Profil de la température …….....56

V.3.2 Profil de vitesse……..…56

V.3.3 profil du facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente…….…...57

CONCLUSION GENERALE……..……...……..……...…58

Chapitre I : LE LAIT, LES PRODUITS LAITIERS ET LES TRAITEMENTS THERMIQUES

Tableau I.1 : structure du lait : les différents états de dispersion dans le lait……..6

Chapitre I : LE LAIT, LES PRODUITS LAITIERS ET LES TRAITEMENTS THERMIQUES

Figure I.1 : diagramme montrant la composition du lait……...4

Figure I.2 : Procédé de la consommation du lait ……..…….9

Figure I.3 : dispositif de chauffage du lait en cuve agitée à double enveloppe……....15

Figure I.4 : schéma général d'une installation de traitement thermique en contenu…...….16

Chapitre II : LES ECHANGEURS DE CHALEURS

Figure II.1 : Evolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire co-courant……..…19

Figure II.2 : Evolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire ou à plaques……19

Figure II.3 : Exemples d'échangeurs à courants croisés……....20

Figure II.4 : Coupes d'un échangeur à plaques……...21

Figure II.5 : plaques et joints d'un échangeur……..…..22

Figure II.6 : échangeur tubulaire……....…24

Chapitre III : ENCRASSEMENT DES EQUIPEMENTS

Figure III.1 : Représentation schématique des phases de dépôt et de réentraînement de l'encrassement dans le cas d'un liquide……29

Figure III.2 : Encrassement des protéines……...…31

CHAPITRE IV: MODELISATION ET SIMULATION DE L'ENCRASSEMENT

Figure IV.1 : Cycle de Pasteurisation du Lait……..34

Figure IV.2 : Arrangement des plaques de l'échangeur de pasteurisation et sens de circulation des fluides…….…….....36

Figure. IV.3 : Schématisation de la direction de l'écoulement entre deux plaques……...…..42

Figure IV.4 : L'interface utilisateur graphique d'ANSYS (GUI)……..…46

Chapitre V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Figure V.1 : Ecoulement dans un canal à section rectangulaire.……..…49

Figure V.2 : Variation du profil de température dans le lait…….…….50

Figure V.3 : Variation du profil de vitesse……...…51

Figure V.4 : Variation du facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente……51

Figure V.5 : Variation du profil de température……..52

Figure V.6 : Variation du profil de vitesse……...…53

Figure V.7 : Variation du facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente…….…..54

Figure V.8 : Evolution de la température avec et sans dépôt …….……..……55

Figure V.9 Evolution de la vitesse avec et sans dépôt …….……56

Figure V.10 Evolution du facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente avec et sans dépôt…….…..…..57

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	%
H	Hauteur du canal	m
f	fraction de la masse déposée qui pénètre dans le milieu poreux	%
J	Rapport des viscosités	-
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

1. 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	$m^2.K/w$

2. ABREVIATIONS

DLC	Date Limite de Consommation
MGLA	La matière grasse
NUT	Nombre d'Unité de Transfert
UHT	Ultra Haut Transfert
PHE	Echangeur de chaleur à plaque
HTST	Haute température temp court
FE	Eléments finis
GUI	Interface d'utilisateur graphique

3. INDICES

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

INTRODUCTION GENERALE

Les produits agroalimentaires subissent des transformations de plus en plus sophistiquées afin de présenter des qualités meilleures. Les transformateurs cherchent à définir des processus fournissant le produit alimentaire dans des conditions sanitaires et économiques optimales en prenant en compte les modifications physiques, biochimiques, etc.… des matières premières. Dans cette optique les phénomènes d'encrassement sont considérés. Il s'agit de l'accumulation d'un dépôt sur la surface de l'échangeur thermique. Ils ont la particularité de limiter les performances des équipements thermiques augmentant ainsi le coût de production. En outre, ils peuvent influer considérablement sur la qualité des produits laitiers en aval des chaînes de production.

Divers produits dans les industries agroalimentaires subissent des variétés de traitements parmi lesquelles les traitements thermiques. La pasteurisation du lait est un exemple typique de traitement thermique qui consiste en une opération de chauffage du produit traité à une certaine température pendant un certain temps. L'augmentation de la température du lait, par exemple, modifie certaines de ces propriétés et le rend instable. Elle n'affecte pas considérablement sa composition.

Le traitement thermique engendre donc un encrassement de la surface d'échange en raison de la formation de dépôt (milieu poreux) de nature isolante ce qui diminue les performances, en particulier thermique, des équipements en créant une résistance supplémentaire au transfert et en augmentant les pertes de charges. En plus, il rend souvent plus difficile et plus long l'opération de nettoyage. Tous ces facteurs concourent à augmenter le cout de fonctionnement de l'installation.

Le thème proposé dans ce travail concerne la modélisation et la simulation numérique de l'encrassement en régime turbulent dans un échangeur de chaleur à plaques lors d'une phase de traitement thermique. Un fluide alimentaire tel que le lait, ayant un fort pouvoir encrassant, sera considéré en écoulement turbulent. L'objectif de notre travail est de déterminer les effets du dépôt encrassant formé sur l'échange thermique et d'évaluer la cinétique de déposition de la matière encrassante. 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 ($\kappa - \varepsilon$).

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

- Le premier chapitre est dédié à une présentation du lait, les produits laitiers est les traitements thermique.

- Le second chapitre est consacré à une description des échangeurs de chaleur en général, et en particulier les échangeurs de chaleur à plaques qui sont les mieux adaptés à industrie agroalimentaire en raison de la qualité de l'échange thermique possible.

- Le troisième chapitre présente une analyse bibliographique sur l'encrassement par le lait lors de la pasteurisation dans un échangeur à plaque.

- Le quatrième chapitre est consacré à la modélisation numérique et le choix de la méthode utilisée. La méthode numérique des éléments finis est choisie pour la résolution. Le choix du maillage, la discrétisation des équations, ainsi que les étapes de résolution sont également présentés.

- Le cinquième chapitre est consacré à la présentation des résultats et leurs interprétations.

- A la fin une conclusion est présentée.

Chapitre I

LE LAIT, LES PRODUITS LAITIERS ET LES TRAITEMENTS THERMIQUES

I.1. GENERALITES

Le lait est un liquide opaque de couleur généralement blanc mat, plus ou moins jaunâtre et légèrement visqueux, produit par les mammifères femelles. C'est un des aliments les plus complets, très nourrissant, il réunit à lui seul tous les composants nécessaires à l'alimentation humaine. Proche de la perfection, il contient tout ce qui est nécessaire à la croissance et à la santé mais il possède une carence en certaines vitamines et un manque de fer. La dénomination "lait" sans indication de l'espèce animale de provenance, est réservée au lait de vache [1].

Il est consommé depuis 12000 ans, il est l'aliment universel par excellence. Au fil des siècles, découvertes et procédés industriels améliorent sa conservation et son transport et garantissent sa qualité. Le lait reste au cœur de notre alimentation et de notre culture [2].

Le lait est le produit naturel de la sécrétion de la glande mammaire. Sa composition moyenne chez la vache est présentée dans le diagramme de la figure I.1. Le lait est un complexe nutritionnel qui contient plus de 100 substances différentes qui sont en solution, en émulsion ou en suspension dans l'eau. Par exemple :

- La caséine (la protéine du lait) est sous forme de minuscules particules solides qui restent en suspension dans le lait. Ces particules s'appellent micelles et leur dispersion dans l'eau du lait forme une suspension colloïdale;
- La matière grasse du lait et les vitamines qui y sont solubles, sont sous forme d'émulsion: une suspension de globules liquides qui ne se mélangent pas avec l'eau du lait;
- Le lactose (le sucre du lait), les protéines du petit lait et certains minéraux sont solubles: ces substances sont entièrement dissoutes dans l'eau du lait.

Les micelles de caséine et les globules de matière grasse donnent au lait et aux produits laitiers (beurre, fromage, yoghourt, etc.) leur texture, leur goût et leur saveur [2].

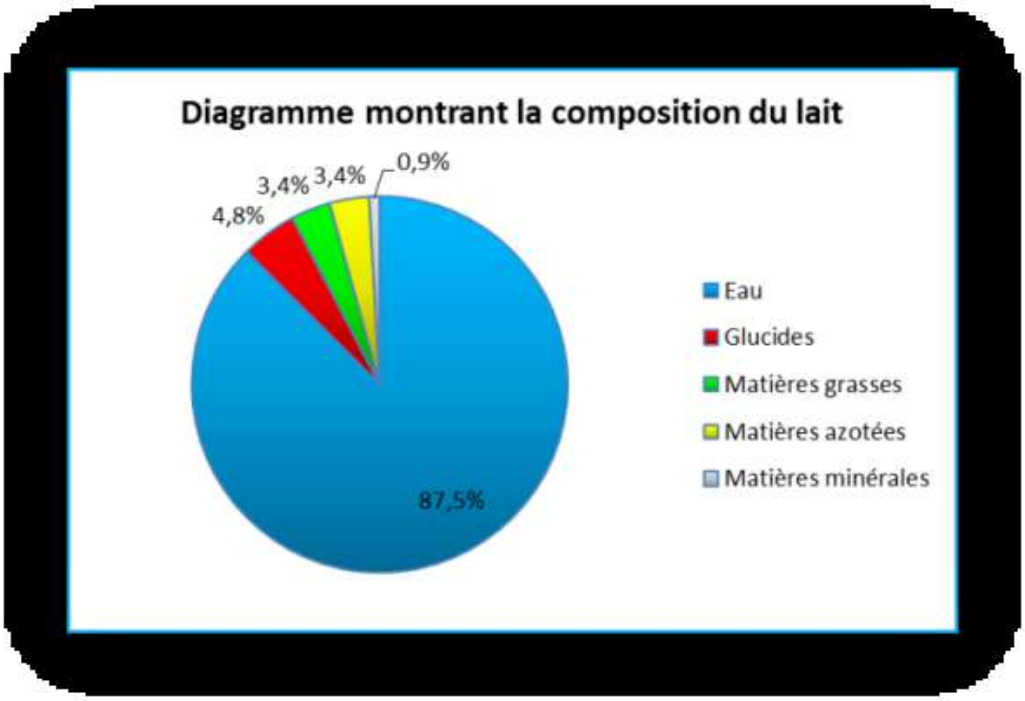


Figure I.1 diagramme montrant la composition du lait [1]

La composition du lait varie considérablement avec la race de vache, le stade de lactation, la saison de l'année et de nombreux autres facteurs. Cependant, le rapport entre certains constituants est très stable et peut être utilisé pour identifier une altération de la composition naturelle du lait. Par exemple, un lait normal possède une densité spécifique qui varie entre 1,023 et 1,040 (à 20°C) et son point de congélation (solidification) varie de -0,518 à 0,534°C.

L'addition d'eau dans le lait est facile à détecter parce que ces paramètres deviennent rapidement anormaux à cause de l'excès d'eau qui s'y trouve.

Le lait est un produit très périssable qui doit être refroidi aussi vite que possible et conservé à plus ou moins 4°C après sa collecte.

Les extrêmes de température, acidité (pH) ou contamination par des micro-organismes peut diminuer sa qualité rapidement et irréversiblement [3].

I.2. LE LAIT: UN ALIMENT RICHE POUR LES HUMAINS [4]

Le lait est un liquide complexe essentiellement aqueux (90% d'eau) contenant :- les trois grands groupes de substances alimentaires en proportions équilibrées :

- **Lactose** (glucide diholoside) : 50 g/l,
- **Protide** (78 à 80% de **caséines**, 17 à 19% de **protéines du lactosérum** et 5% d'**azote non protéique**) : 30 à 35% g/l,
- **Lipides** ou **matière grasse butyrique** : 35 à 45% ;

- un éventail intéressant de substances particulières :

- **sels minéraux** (dont 30% de **calcium** et **phosphore**) : 7 g/l,
- **vitamines** dont la **vitamine A** et la **vitamine B_2** surtout,
- **enzymes**: phosphatase, α -amylase, etc.

I.3. ETAT DE DISPERSION DANS LE LAIT OU « STRUCTURE » DU LAIT [4]

Il est constitué de quatre phases en équilibre instable, qui forment un mélange hétérogène:

I.3.1. La phase aqueuse

C'est une phase homogène stable correspondant à une solution « vraie » voire macromoléculaire où les différents solutés sont dissous dans l'eau, c'est le constituant principal du lait qui contribue à hydrater l'organisme.

Elle contient des constituants solubles: lactose, azote non protéique, sels minéraux, vitamines hydrosolubles B et C. (On peut noter qu'un quart de litre de lait couvre 40% des besoins en vitamines B2 de l'enfant et qu'un litre de lait couvre 100% des besoins en vitamines B12.)

Tableau I.1.structure du lait : les différents états de dispersion dans le lait

Constituant	**Etat de dispersion**	**Teneur** (%)	**Nombre** (par L)	**Taille** (nm)
Globules gras	Emission	3.5 à 4	10^{13}	500 à 10 000
Micelles de caséines	Suspension	2.8	10^{17}	50 à 300
Protéines globulaires du lactosérum	Solution macromoléculaire	0.7	10^{20}	3 à 6

I.3.2. La phase grasse: (sous forme d'émulsion)

C'est une phase constituée par l'ensemble des gouttelettes lipidiques ou globules gras dispersés de façon plus ou moins stable dans le milieu aqueux et formant une émulsion ou état globulaire, elle saturés à longues chaîne nécessaires à la formation des structures cérébrales du bébé et elle assure des vitamines liposolubles (A, D, E, K...).

I.3.3. La phase colloïdale

Elle Correspond à l'ensemble des particules protéiques appelées micelles, dispersées de façon stable (grâce à leur organisation) dans le milieu aqueux. Cet état micellaire n'est pas une solution, mais une suspension. Les micelles sont des agrégats (taille de 0.05 à 0.3 μm) formés de submicelles (associations sphéroïdes 15 à 20 nm de caséines phosphoprotéines «insolubles») reliées entre elles par un « ciment » intersubmicellaire constitué de phosphate

de calcium; ce sont des structures « spongieuses » gorgées d'eau (65%) dont le matériau constitutif (35%) comprend 92% de caséines et 8% de phosphate de calcium.

La teneur protéique du lait varie selon l'alimentation de l'animal, les saisons et le cycle de lactation [3].

I.3.4. La phase gazeuse

Elle est composée d'oxygène, d'azote et de dioxyde de carbone dissous (CO_2), qui représente 4 à 5% du volume du lait à la sortie de la mamelle.

I.4. LES PRODUITS DERIVES DU LAIT [5]

En plus d'être un excellent aliment, le lait peut prendre plusieurs formes. En voici quelques-unes:

I.4.1. La crème

Est séparée du lait par une écrémeuse, une machine qui tourne très vite. Cette crème pure est ensuite diluée avec du lait pour donner des produits à divers taux de matières grasses : 35 %, 15 %, 10 % et 5 %.

I.4.2. Le beurre

Le beurre est produit à partir de la crème. On la met dans une machine ronde qu'on appelle une baratte. Un moteur fait tourné le beurre et les petites boules rondes de graisse de la crème se collent ensemble. Elles se séparent du liquide qui était mêlé à la crème. Après un certain temps, on arrête la baratte et on retire le liquide, qui s'appelle du babeurre. Ce qui reste, c'est le beurre. Il est ensuite découpé en morceaux et peut être salé ou non. Au Québec, les gens le préfèrent, salé. Le beurre contient un minimum de 80 % de matières grasses.

I.4.3. Le fromage

Le fromage est fait principalement à partir du lait entier. Tout d'abord, on le fait cailler. Pour y arriver, on y ajoute des cultures bactériennes et on le fait chauffer. La partie qui donne le fromage devient épaisse et flotte : c'est le caillé. Le liquide qui reste au fond s'appelle du petit lait. On égoutte le caillé, on le sale et on le presse en morceaux plus ou moins gros. Ces derniers peuvent être durs, mous ou même cuits, selon le type de fromage désiré. Finalement, on dépose ces morceaux sur des tablettes dans une chambre froide pendant plusieurs semaines pour les affiner, c'est-à-dire les laisser vieillir.

I.4.4. Le Yaourt (ou yoghourt)

La dénomination yaourt (ou yoghourt) est réservée au lait fermenté obtenu, selon les usages loyaux et constants, par le développement des seules bactéries lactiques thermophiles spécifiques dites Lactobacillus bulgaricus et Streptococcus thermophilus, qui doivent être ensemencées simultanément et se trouver vivantes dans le produit fini jusqu'à la DLC, à raison d'au moins 10 millions de bactéries par gramme rapportées à la partie lactée. De plus, la quantité d'acide lactique libre contenue dans 100 g de yaourt ne doit pas être inférieure à 0,7 g.

Un yaourt peut se décliner avec un taux de matière grasse variable, selon celui du lait utilisé pour sa fabrication et des matières laitières ajoutées.

I.5. LAIT EN POUDRE [6]

Pour la production du lait en poudre, un procédé technologique est effectué tel que l'évaporation et le séchage permettant sa conservation (Figure I.2).

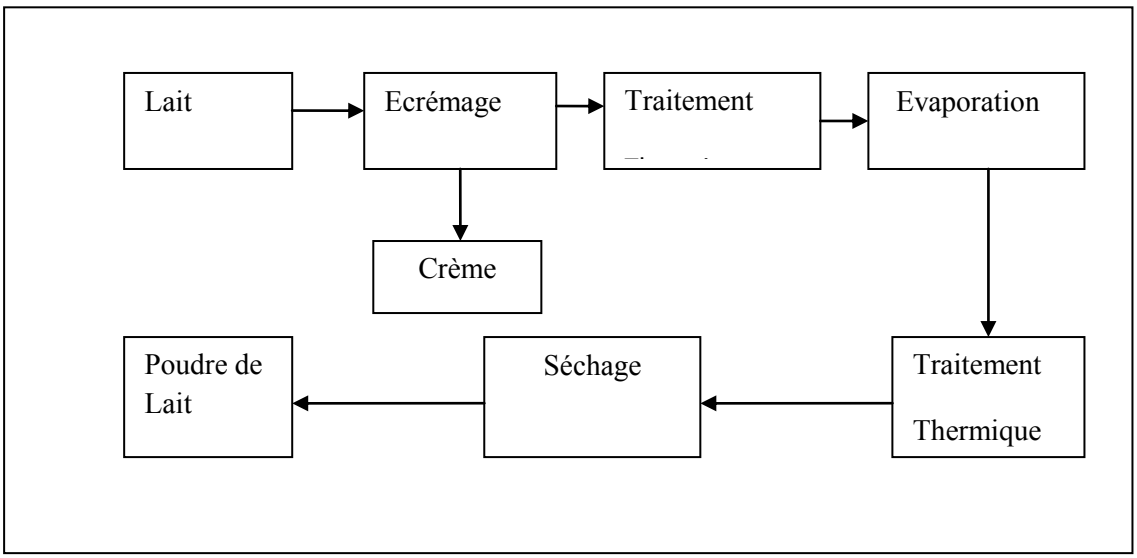


Figure I.2. Procédé de la consommation du lait

Le lait cru (non traité) subit au début un écrémage au cours duquel la matière grasse est éliminée. Un traitement chimique est nécessaire avant la concentration, les raisons de ce traitement sont :

- la réduction des micro-organismes contenus dans la poudre.
- La vérification des qualités fonctionnelles du lait en poudre (solubilité, mouillabilité, etc.), qui sont contrôlées au moyen de l'intensité du couple température et la durée du traitement. ensuite, un évaporateur est utilisé pour concentrer le lait (avoir une concentration de 50 % de matière sèche). Ce lait subit souvent un traitement thermique supplémentaire avant le séchage.

I.6. PRINCIPALES CATEGORIES DE TRAITEMENT THERMIQUE DANS L'INDUSTRIE LAITIERE

L'instabilité du lait, la présence éventuelle de germes pathogènes, la nécessité économique de proposer au consommateur des produits nouveaux et appétissants ont conduit à la mise au point de nombreux procédés technologiques de traitement dans le but d'améliorer sa conservation.

La plupart reposent sur l'emploi ménagé de la chaleur, du froid, de la dessiccation, de l'inhibition de la flore microbienne par additif chimique (sucre) ou action biologique (acidification par ferments lactiques sélectionnés) [4].

I.6.1. Thermo résistance des bactéries et des microorganismes [6]

Tous les microorganismes ne réagissent pas de la même façon à la chaleur. On peut alors dire que leur « thermo résistance » peut être plus ou moins élevée.

De plus, cette thermorésistante dépend du milieu dans lequel un traitement thermique est pratiqué. Plus le milieu est acide, moins la résistance à la chaleur est élevée.

Les aliments sont classés selon trois catégories de pH. Le pH est l'abréviation de puissance en hydrogène. Plus la concentration en hydrogène est élevée, plus la valeur du pH est faible (< 7,0) et plus la substance sera acide.

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

Plus l'aliment est acide, plus le traitement à la chaleur sera léger. Et si l'aliment est neutre, c'est-à-dire qu'il a un pH égal à 7, le traitement thermique à appliquer devra être plus important.

Lorsque le milieu n'est pas favorable à l'activité des levures et des bactéries (dans un milieu où on ajoute beaucoup de sucre, par exemple), la thermorésistance des microorganismes augmente. Cette augmentation de la thermorésistance se produit lorsque le milieu dans lequel vivent les microorganismes devient défavorable par rapport au milieu aqueux initial.

À l'opposé, la présence d'antiseptiques permet de réduire la thermorésistance des microorganismes.

✓ **La pasteurisation**

Par définition, la pasteurisation est un traitement thermique qui consiste à chauffer le lait jusqu'à une température définie et à la maintenir pendant un temps donné, elle détruit tous les germes pathogènes. On distingue :

- La basse pasteurisation (chauffage à 65°C durant 30 minutes) utilisée dans les fromageries.

• La haute pasteurisation (chauffage à 72°C durant 15 secondes, ou à 95°C durant quelques secondes) utilisée pour les laits de consommation.

Le lait pasteurisé doit être conservé à une température inférieure à 10°C, sa conservation est très limitée dans le temps.

Après pasteurisation, il est nécessaire de refroidir le lait très rapidement jusqu'à 3-4°C.

I.6.2. Laits pasteurisés [4]

La chaleur détruit les germes. Certains sont plus résistants que d'autres. On calcule avec précision la température et le temps de chauffage.

Toutes les opérations s'effectuent à l'abri de l'air. Dès leur terme, le lait doit être rapidement réfrigéré.

La pasteurisation détruit tous les germes pathogènes et l'essentiel de la flore saprophyte.

Elle modifie peu les caractères physico-chimiques, les caractères organoleptiques et la valeur nutritionnelle du lait.

Le lait pasteurisé est distribué en vrac (citernes-bidons) ou conditionné (bouteilles en verre ou matériau plastique; blocs «pavés» ou «berlingots» de carton paraffiné ou résinifié, aluminé ou non).

Des normes bactériologiques très sévères ont été instaurées, et l'apposition d'une marque de salubrité est nécessaire lors du conditionnement; le numéro de l'établissement suivi du sigle du pays est exigé si le produit doit être exporté.

La conservation du lait pasteurisé est limitée dans le temps: la date de péremption est au maximum postérieure de sept jours à celle du conditionnement.

Le lait pasteurisé doit être conservé au froid. Après ouverture du conditionnement, l'utilisation du reliquat doit être précédée d'une ébullition de quelques minutes.

La quasi-totalité des fabrications industrielles (crèmes, beurres, yaourts, fromages, etc.) sont préparées avec du lait pasteurisé.

✓ **La stérilisation**

La stérilisation est l'opération qui consiste à détruire les germes vivants ou à les éliminer du milieu qui les contient.

Elle permet la destruction de tous les micro-organismes présents dans le lait. Les techniques les plus anciennes utilisaient une température de 105°C pendant 20 minutes alors que les techniques modernes (procédés UHT) permettent de chauffer le lait à 140°C pendant une seconde et ce chauffage est immédiatement suivi d'un refroidissement après détente sous vide.

Lorsque ces laits sont stérilisés et conditionnés aseptiquement dans des récipients étanches, ils se conservent plusieurs mois à température ambiante.

I.6.3. Laits stérilisés [4]

La stérilisation, par destruction des germes microbiens, des toxines et des enzymes, assure une qualité hygiénique parfaite et une longue conservation à l'abri de l'air, en récipients hermétiquement clos.

Elle est opérée sur le lait en vrac, ou après conditionnement en bouteilles. Dans les deux cas, le lait doit être préalablement homogénéisé.

L'homogénéisation vise à éviter la montée de la crème: par laminage ou passage sous forte pression sur un pointeau, on provoque l'éclatement des globules gras. Ils se résolvent en globules de plus faibles diamètres incapables de déterminer des «bouchons» de crème.

Les opérations de préparation du lait stérilisé préalablement conditionné en bouteilles consistent, après homogénéisation, en préstérilisation de 130 à 140 °C pendant 3 à 4 secondes, embouteillage, suivis de la stérilisation proprement dite, dans un appareil à alimentation continue: une colonne de vapeur est entourée de deux colonnes d'eau qui en équilibrent la pression.

Convoyées mécaniquement, les bouteilles sont préchauffées dans la première colonne d'eau, stérilisées à 115-120 °C pendant 15 à 20 minutes sous vapeur, puis progressivement refroidies dans la seconde colonne d'eau; ce procédé assure une qualité hygiénique parfaite et une longue conservation (150 jours) à température ambiante; il modifie sensiblement les propriétés nutritionnelles (destruction des vitamines) et les caractères organoleptiques du lait.

La stérilisation en vrac est opérée soit directement dans des échangeurs de chaleur, soit indirectement par mélange du lait et de la vapeur surchauffée suivi d'une détente sous vide, par traitement thermique; elle applique le procédé à U.H.T; 140 à 150 °C pendant environ 1 à

2 secondes. Pour des raisons énergétiques, le traitement indirect est le plus fréquent, l'autre nécessite une eau potable.

Le procédé U.H.T, perfectionné et très utilisé depuis 1977, permet de préparer des laits stérilisés en emballages appelés «briques» constitués de plusieurs couches successives: polyéthylène, carton, aluminium; les briques sont elles-mêmes regroupées par packs de 6 dans un film plastique, les packs placés sur des palettes et enveloppés sont mis dans un four de rétraction.

Le produit est stérile, son stockage peut se faire à température ambiante.

La brièveté du chauffage altère moins les constituants fragiles et les propriétés organoleptiques du lait.

En outre, les industries peuvent utiliser un seul équipement pour réaliser soit des pasteurisations, soit des stérilisations.

I.6.4. Laits concentrés [4]

Le lait concentré non sucré est pasteurisé à très haute température, puis concentré par ébullition sous vide partiel dans des évaporateurs ou vacuums.

Homogénéisé, refroidi, il est distribué en boîtes métalliques assemblées (boîtes de conserves).

La stérilisation est obtenue par autoclavage à 115 °C pendant 20 minutes. La conservation est théoriquement illimitée.

Le lait concentré sucré est, après pasteurisation à très haute température, additionné d'un sirop de sucre stérile à 70 % de saccharose.

Le sucre inhibe la multiplication des micro-organismes: le traitement thermique peut donc être moins intense. Après concentration à 50 % environ, le lait est rapidement refroidi et réparti en boîtes ou tubes stériles.

Le lait concentré non sucré est stérile, de longue conservation.

Dès l'ouverture de l'emballage, il doit être rapidement consommé. Le lait concentré sucré n'est pas stérile: c'est une semi-conserve, à conserver au froid et à consommer rapidement après l'ouverture du conditionnement.

I.6.5. Laits secs (laits en poudre ou granulés) [4]

La dessiccation permet une longue conservation, les micro-organismes ne pouvant se multiplier en l'absence d'eau. Par réduction de poids et volume, elle facilite considérablement le stockage. On prépare des laits secs entiers, demi-écrémés ou écrémés. La même méthode est utilisée pour le lactosérum.

Il existe deux procédés industriels de dessiccation: par séchage en film sur cylindres chauffants ou par atomisation en atmosphère d'air surchauffé.

Les laits secs à dissolution instantanée sont soit des laits en poudre partiellement réhydratés et séchés à nouveau dans des chambres ou tubes à turbulence d'air, soit des laits en poudre préparés de telle sorte qu'il se produise une agrégation de particules.

Tous les laits secs doivent être conditionnés en récipients étanches à l'humidité.

I.6.6. Laits fermentés [4]

Le type de laits fermentés le plus courant est le yaourt ou yoghourt, d'origine bulgare.

Le yaourt est obtenu par légère concentration du lait (par addition de poudre de lait) plus ou moins écrémé, pasteurisé puis ensemencé avec un levain spécifique (en France: Lactobacillus bulgaricus et Streptococcus thermophilus).

Après répartition en pots, le lait subit un étuvage à 45-50 °C durant deux heures.

Les yaourts sont finalement refroidis. Pour la fabrication de yaourts brassés, la coagulation est réalisée en cuves et le conditionnement est effectué ultérieurement.

On peut les aromatiser ou les additionner de jus ou de pulpe de fruits. La fermentation est purement lactique.

I.6.7. Laits emprésurés et gélifiés [4]

D'apparition plus récente, les laits emprésurés et gélifiés connaissent un succès certain.

Les premiers sont des boissons ou entremets rafraîchissants faits de lait aromatisé, partiellement coagulé par un léger emprésurage et stérilisé.

Les seconds sont très voisins d'aspect: la consistance et la stabilité sont obtenues par addition de gélifiants extraits d'algues (alginates, carraghénates).

I.6.8. Laits spéciaux [4]

De nombreux procédés très délicats permettent de préparer des laits réservés à des usages médicaux particuliers (laits délactosés, laits «maternisés», etc.) ou plus simplement à des régimes alimentaires (laits déchlorurés, laits écrémés, laits «acides», mélanges lait-babeurre, etc.).

Leur emploi dans l'alimentation des nourrissons est de plus en plus répandu, mais chaque type de lait diététique répond, en fait, à des besoins particuliers, ce qui veut dire qu'on ne doit pas les utiliser sans prescription médicale.

I.7. MISE EN ŒUVRE DE LA PASTEURISATION

I.7.1. Objectifs

Parmi les traitements thermiques destinés à améliorer la qualité hygiénique ou à assurer une longue conservation, on distingue la pasteurisation et la stérilisation.

I.7.2. Pasteurisation en mode discontinu: dite aussi (« batch »)

Un traitement de pasteurisation peut être réalisé par chauffage du lait dans une cuve agitée (Figure I.3).

Comme la montre la figure suivante, l'eau chaude circulant dans l'enveloppe va chauffer le lait qui se trouve à l'intérieur de la cuve jusqu'à sa température de pasteurisation.

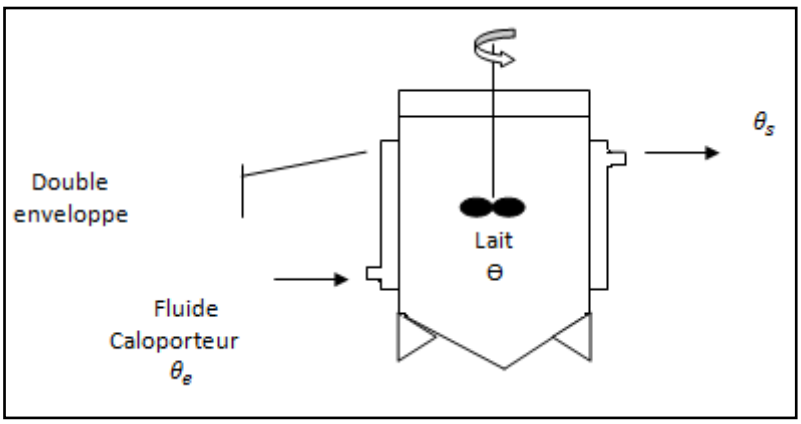


Figure I.3: Dispositif de chauffage du lait en cuve agitée à double enveloppe

I.7.3. Pasteurisation en mode continu

Le pasteurisateur continu peut servir de pasteurisateur en tube ou à plaques (PHE). Il constitue le système essentiel de la chaîne des produits laitiers, situé entre le lait cru et les appareils de traitement. Le pasteurisateur réduit considérablement le nombre de microorganismes (pathogènes) par traitement à chaud. Mode de fonctionnement du pasteurisateur haute température et courte durée (HTST) à flux : le lait cru entre dans le pasteurisateur à 4°, est chauffé à 72° pendant 15 secondes puis immédiatement refroidi à 40°. A cette température, les microorganismes restants se développent très lentement de sorte que la durée de fraîcheur du lait en rayon est prolongée (environ 10 à 14 jours). Un réglage de la température, du temps de maintien et de la température du lait à la sortie du dispositif est disponible selon les différents produits finis.

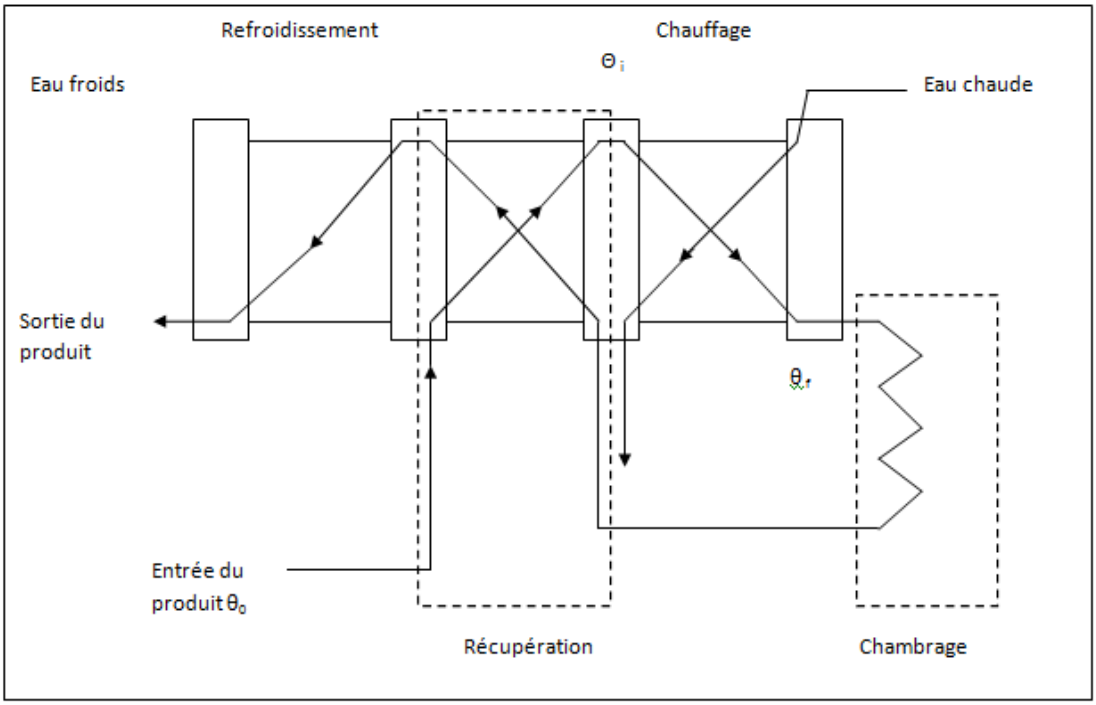


Figure I.4: Schéma général d'une installation de traitement thermique en contenu

Chapitre II :

LES ECHANGEURS DE CHALEUR

II.1 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 de 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, agroalimentaire, etc.), du transport (automobile, aéronautique), mais aussi dans le secteur résidentiel et tertiaire (chauffage, climatisation, etc.). Le choix d'un échangeur de chaleur, pour une application donnée, dépend de nombreux paramètres : domaine de température et de pression des fluides, propriétés physiques et agressivité de ces fluides, maintenance et encombrement. Il est évident que le fait de disposer d'un échangeur bien adapté, bien dimensionné, bien réalisé et bien utilisé permet un gain de rendement et d'énergie des procédés.

II.2. NOTIONS GENERALES SUR LES ECHANGEURS [7]

Un échangeur de chaleur est un dispositif permettant la récupération de l'énergie thermique d'un fluide par un autre. Le flux thermique traverse la paroi de séparation des différents fluides. En effet, la chaleur peut être caractérisée comme un transfert d'énergie d'un système à un autre dû à une différence de température qui permet de réchauffer ou refroidir un liquide ou un gaz, peut subir un changement d'état (condensation, vaporisation, ébullition). Selon la deuxième loi de la thermodynamique, ce transfert d'énergie s'effectue de la température la plus importante vers la plus faible. Il s'arrête donc lorsque les deux milieux sont de températures identiques.

La chaleur peut être transférée par trois modes différents :

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

Cette paroi est généralement métallique et de faible épaisseur, elle a donc une résistance thermique faible.

- La convection s'effectue par un déplacement de matière dans le milieu. C'est le transfert d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz adjacent. C'est le mode le plus important pour les échangeurs de chaleur mais aussi le plus difficile à estimer, il dépend du type de fluide, des vitesses et du type de l'échangeur.
- Le rayonnement est un transfert d'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques résultant des changements dans les configurations électroniques des atomes ou des molécules.

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

II.2.1. Principaux modes d'écoulement des deux fluides

On peut distinguer trois modes d'écoulement différents.

II.2.1.1. Ecoulement des deux fluides parallèles et de même sens

Il s'agit d'échangeurs dits à co-courants où la température de fluide froid ne peut pas être supérieure à la température de sortie du fluide chaud. Les températures des fluides évoluent pendant leur traversée longitudinale de l'échangeur, à moins que l'un des fluides ne subisse un changement de phase, auquel cas sa température reste constante. La Figure II.1 donne l'évolution qualitative de ces températures le long d'un échangeur tubulaire à co-courants très simple. La longueur de l'échangeur a été portée en abscisse. Les températures sont repérées à l'aide d'indices **e** signifiant entrée et **s** sortie, **1** désignant le fluide chaud et **2** le fluide froid.

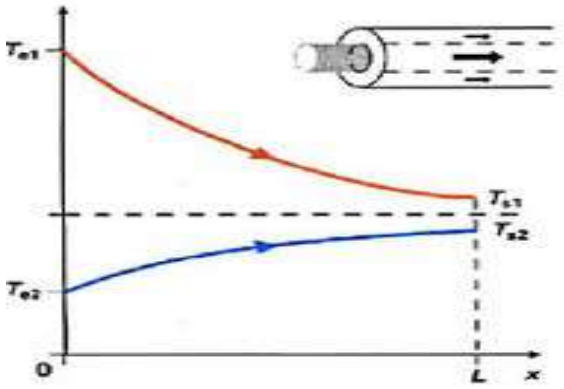


Figure II.1 : Evolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire co-courant [7]

II.2.1.2. Ecoulement des deux fluides parallèles mais de sens contraires

Il s'agit d'échangeurs à contre-courants où la température de sortie du fluide froid peut dépasser la température de sortie du fluide chaud. Cette disposition est l'une des plus favorables pour l'échange thermique. De la même façon que précédemment, la longueur de l'échangeur considéré a été portée en abscisse (Figure II.2). Les températures sont repérées à l'aide d'indices **e** signifiant **entrée** et **s sortie**.

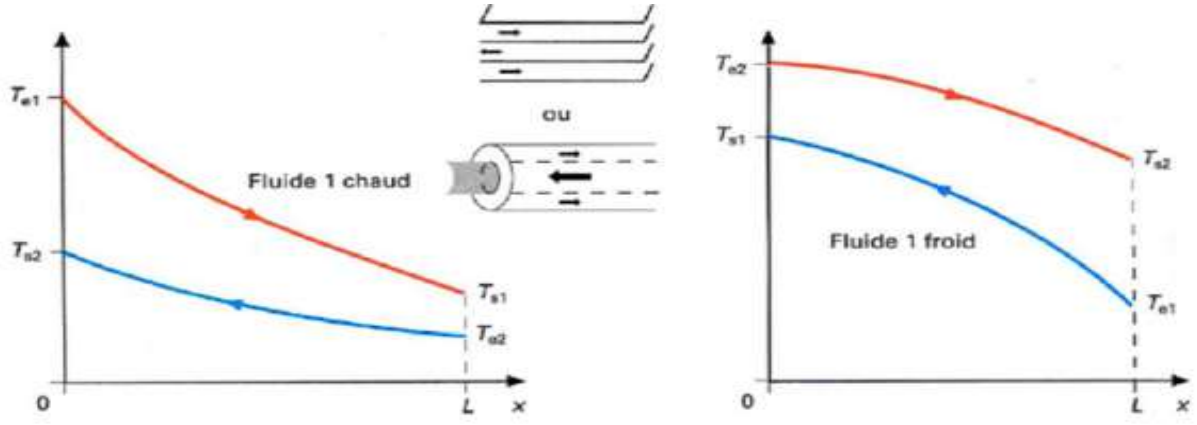


Figure II.2 : Evolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire ou à plaques à contre-courants [7]

L'avantage de l'échangeur à contre-courants sur l'échangeur à co-courants est de nécessiter, pour un même flux de chaleur, des surfaces d'échanges plus faibles.

II.2.1.3. Ecoulement des deux fluides croisés avec ou sans brassage

Les deux fluides s'écoulent perpendiculairement l'un à l'autre (Figure II.3). Le fluide non brassé est canalisé : c'est celui dont la veine est divisée entre plusieurs canaux parallèles distincts et de faible section. L'autre fluide circule librement entre les veines et peut être considéré comme partiellement brassé du fait des tourbillons générés par les tubes. Le brassage a pour effet d'homogénéiser les températures dans les sections droites de la veine fluide. Sans cela, les températures varient non seulement avec la direction de l'écoulement, mais aussi dans la section de veine. Une représentation schématique d'échangeurs à courants croisés est donnée Figure II.3.

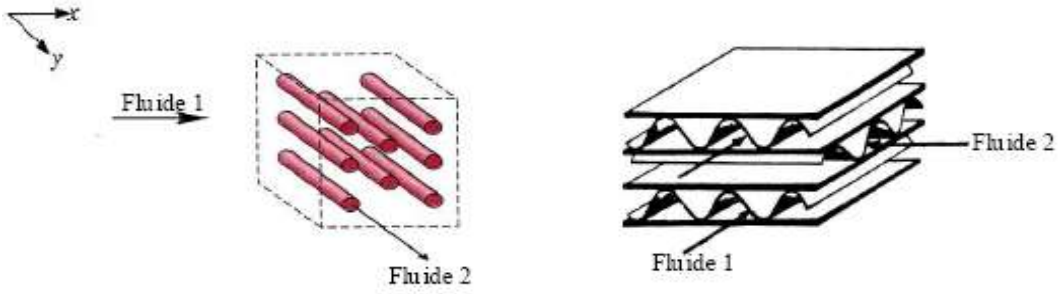


Figure II.3 : Exemples d'échangeurs à courants croisés [7]

Les trois écoulements précédemment décrits, à co-courants, à contre-courants, à courants croisés sont rarement utilisés dans toute leur simplicité. En effet, un échangeur se réduit rarement à un tube unique ou deux plaques ; néanmoins, l'étude de ces cas élémentaires, dans le cadre d'une première approche, est nécessaire: l'échangeur industriel étant en général constitué par un grand nombre de tubes ou de plaques créant ainsi des problèmes supplémentaires.

Par ailleurs, la conception des échangeurs de chaleur introduit le choix entre deux géométries élémentaires principales :

- les tubes qui fixent l'espace dévolu seulement à l'un des deux fluides.
- les plaques, planes ou corrigées, choisies pour un fluide qui imposent la même géométrie pour l'autre.

Souvent, le choix des combinaisons entre différents types d'échangeurs dans les installations industrielles résulte de contingences technologiques et économiques.

II.2.2. Différents types d'échangeurs de chaleurs utilisés en industrie agroalimentaire

Les principaux types d'échangeurs de chaleur rencontrés sont :

- les échangeurs à plaques.
- les échangeurs tubulaires.
- échangeur à surface raclée.

Compte tenu des diverses applications dans lesquelles interviennent les échangeurs de chaleur et de leurs développements actuels, nous n'avons pas ici, la prétention de fournir une liste exhaustive des différentes configurations existantes.

II.3. Echangeurs à plaques [8]

II.3.1. Généralités

Ces échangeurs ont été étudiés à l'origine pour répondre aux besoins de l'industrie laitière. On regroupe, sous ce vocable d'échangeurs à plaques, différentes technologies dont certains sont d'un développement assez récent. On peut distinguer, suivant le type de géométrie de canal utilisé, les échangeurs à surface primaire et les échangeurs à surface secondaire.

Parmi les échangeurs à surface primaire, le type le plus commun est l'échangeur à plaques et joints :

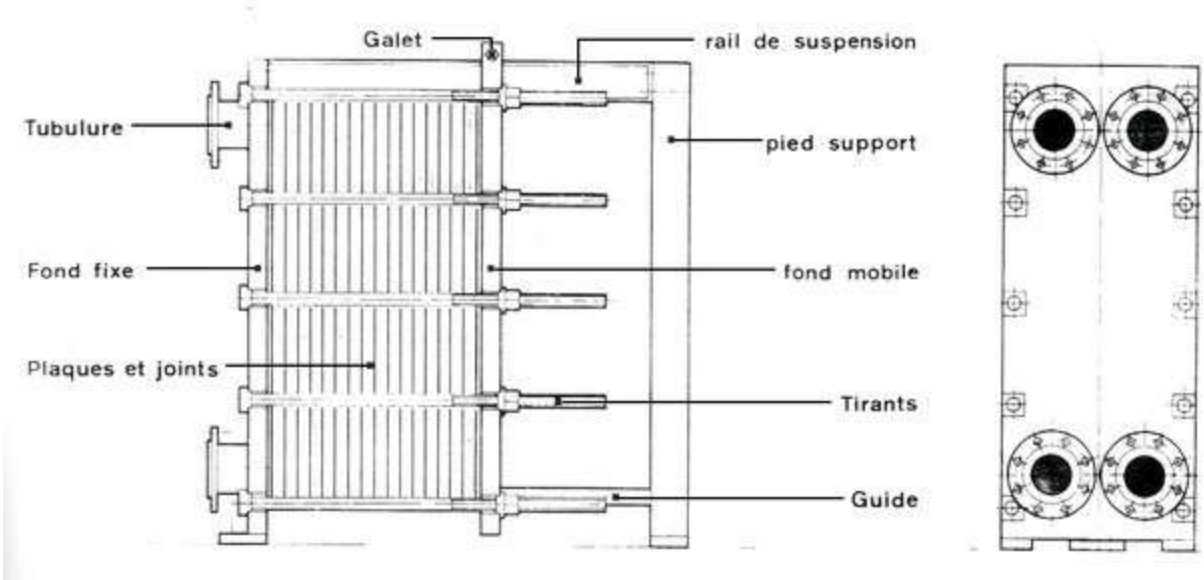


Figure II.4 : Coupes d'un échangeur à plaques

Les applications des échangeurs à plaques et joints sont limitées par la pression maximale de service ainsi que par la pression différentielle entre les deux fluides. Il est possible de concevoir et de construire des échangeurs à plaques et joints tenant à une pression de 25 bars; on admet aujourd'hui fréquemment des pressions de service de l'ordre de 16 à 20 bars.

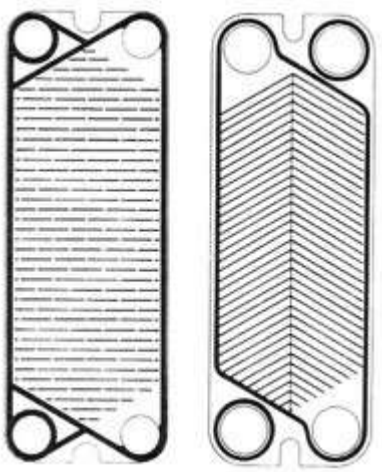


Figure II.5 : plaques et joints d'un échangeur

La température maximale de service limite également le domaine d'utilisation des échangeurs à plaques et joints. Cette température maximale de service est fonction de la nature des joints et on admet comme limite supérieure d'utilisation des joints standards, une température de l'ordre de 150°C.

Les échangeurs à plaques soudées ou brasées permettent d'utiliser les surfaces d'échange primaires avec des niveaux de pression et de température plus élevés que les échangeurs à plaques et joints. Tous les fluides peuvent être véhiculés dans ces échangeurs mais les fluides chargés sont à utilisés avec précaution.

Les échangeurs à surface secondaire utilisent des tôles gaufrées (ondes) séparées par des tôles planes. Pour des applications sur l'air atmosphérique, ces échangeurs sont fabriqués en tôlerie légère, alors que, pour des applications en cryogénie ou en aéronautique, les matériaux utilisés sont l'aluminium ou l'acier inoxydable et l'assemblage de l'échangeur se fait au moyen d'une technique de brassage sous vide.

Pour caractériser le service d'un échangeur à plaques, on utilise les paramètres suivants :

- les débits primaire et secondaire qui déterminent les dimensions des tubulures de raccordement de l'échangeur et, par là même, fixent approximativement les dimensions des plaques (dans le cas des échangeurs à plaques et joints).
- le nombre d'unités de transfert (NUT) qui détermine le service thermique demandé. qualitativement, ce nombre est défini comme étant la différence de température sur un fluide rapportée à l'écart de température moyen entre les deux fluides. Ce nombre est relié aux caractéristiques thermo hydrauliques des plaques (coefficient d'échange de chaleur et pertes de pression) et peut aides à choisir le type de cannelure le mieux adapté au problème posé.
- la perte de pression qui est, imposée par l'utilisateur.

II.3.2 Avantages et inconvénients de l'échangeur à plaques

II.3.2.1 Avantage [9-10]

Les avantages offerts par un échangeur à plaques sont :

- Haut rendement thermique dû au rapport élevé surface / volume ainsi qu'à la forte turbulence engendrée par la géométrie des plaques.
- Récupération élevée étant donné que l'énergie thermique est récupérée à un taux de 90 % environ.
- Flexibilité : selon le nombre de plaques et leur groupage. La capacité de l'échangeur et ses caractéristiques thermiques sont déterminés. La disposition des plaques peut être modifiée.
- Augmentation du débit ou adaptation du système au traitement des produits spéciaux.

Faible encombrement : toutes les opérations de chauffage et de refroidissement sont réalisées dans l'échangeur.

- Contrôle rapide.

II.3.2.2 Inconvénients [10]

- Ne peut pas être utilisé pour des fluides très visqueux ou des fluides contenant des particules solides à cause du faible espace entre les plaques.

- Importante perte de charge.
- domaine de température relativement faible même si certains échangeurs à plaques peuvent aller jusqu'au 300°C.

II.4. Les échangeurs tubulaires

Les échangeurs tubulaires étaient les plus fréquemment employés avant l'apparition des échangeurs à plaque. Ces échangeurs sont constitués d'un faisceau de plusieurs tube fixé par soudure sur une plaque tubulaire dans le quel passe le produit alimentaire à traiter thermiquement. A l'extérieur de ces tubes d'échangeur du coté calandre circule le fluide thermique.



Figure II.6 : échangeur tubulaire

Si on veut effectuer un échange thermique entre deux fluides alimentaire (section de récupération dans un pasteurisateur par exemple), on doit être assuré de la bonne nettoyabilité en place de l'ensemble de l'échangeur. En général dans ce cas on utilise de tubes concentriques, un fluide circulant à l'intérieur du tube de petite diamètre, et l'autre dans l'espace annulaire délimité par le diamètre extérieur du petit tube et celui intérieur du grande tube.

Chapitre III :

ENCRASSEMENT DES EQUIPEMENTS

III.1. INTRODUCTION

Les principaux problèmes rencontrés par les utilisateurs d'échangeurs thermiques ont trait aux phénomènes d'encrassement, de corrosion, de vibrations et de tenue mécanique. Malgré tout, un certain nombre d'études publiées montre que l'encrassement reste au premier rang des préoccupations des industriels du secteur des équipements de transferts thermiques.

Le couplage encrassement – dégradation des échanges thermiques a de fortes répercutions sur la rentabilité de l'opération. Les coûts liés à l'encrassement des échangeurs avoisinent les 700 millions d'euros par an. Ces coûts intègrent les dépenses liées, d'une part, au dimensionnement (surdimensionnement de la surface d'échange à mettre en œuvre, incorporation d'équipements de nettoyage) à hauteur de 20% et, d'autre part, au fonctionnement (perte de production, diminution du transfert, frais de maintenance et nettoyage) à hauteur de 80%. Malgré les efforts considérables déployés depuis les premiers travaux de Kern et Seaton (1959), l'encrassement demeure encore un phénomène bien mal compris où l'empirisme reste le moyen le plus couramment utilisé. En effet, la large gamme d'écoulements et la panoplie des conditions industrielles existantes contribuent grandement à la méconnaissance du phénomène.

Les recherches sont actuellement menées sur deux fronts, totalement différents mais néanmoins complémentaires. Le premier concerne la détection de l'encrassement, et le second, les produits et appareillages permettant le nettoyage de tels dépôts.

III.2. NOTIONS SUR L'ENCRASSEMENT DES ECHANGEURS [11]

Il est possible de classer l'encrassement selon le mécanisme qui contrôle la vitesse de dépôt selon les conditions d'utilisation de l'échangeur ou selon le mécanisme dominant, même s'il ne contrôle pas la vitesse de dépôt. Nous adopterons, comme la plupart des auteurs, cette dernière méthode de classification. Six types différents peuvent alors être définis :

- la corrosion ;
- l'encrassement biologique ;
- l'encrassement par réaction chimique ;
- l'entartage ;
- l'encrassement particulaire ;

- l'encrassement par solidification.

III.2.1. 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. Les produits qui se forment et s'accumulent sur la surface créent l'encrassement. Il existe différents types de corrosion :

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

III.2.2. 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. Il peut être causé par trois grands types de micro-organismes :

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

III.2.3. 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. 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.

III.2.4. 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.

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

III.2.5. L'encrassement particulier

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

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

III.2.6. L'encrassement par solidification

Il s'agit de la solidification d'un liquide pur au contact d'une surface d'échange sous refroidie (formation d'une couche de glace à l'intérieur des conduites par exemple) ou du dépôt d'un

constituant à haut point de fusion d'un liquide au contact d'une surface de transfert de chaleur froide (dépôt des hydrocarbures parafiniques).

III.3. APPARITION ET DEVELOPPEMENT DE L'ENCRASSEMENT : [12]

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

III.3.1. Initiation

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

III.3.2. Transfert de particules à la paroi

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

III.3.3. Adhésion des particules

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

III.3.4. Réentraînement des particules déposées

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 partie est enlevée plus tard. En général, les forces de cisaillement à l'interface entre le fluide et la couche de dépôt encrassant 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.

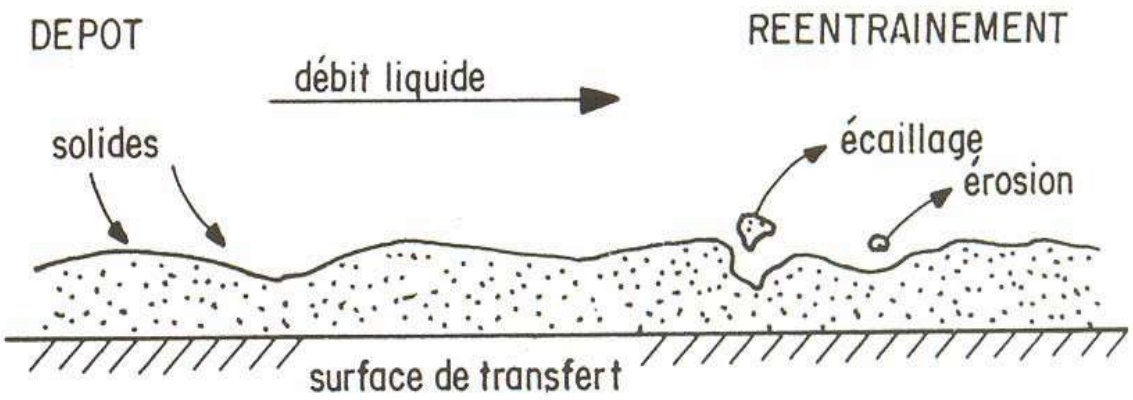


Figure III-1 : Représentation schématique des phases de dépôt et de réentraînement de l'encrassement dans le cas d'un liquide

III.3.5. Vieillissement du dépôt

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.

III.4. ENCRASSEMENT PAR LE LAIT

III.4.1. Revue bibliographique

La remarque principale qu'on peut dégager de cette notre revue bibliographique est que les auteurs des différents travaux ne considèrent que l'encrassement par la protéine β-lactoglobuline qui représente plus de 10 % des protéines du lait [13]. Sa structure lui confère un rôle déterminant dans le processus de l'encrassement, donc on peut confondre entre l'encrassement des protéines et encrassement β-lactoglobuline. Des considérations

thermodynamiques approuvent également l'idée, que l'encrassement est dû uniquement à la protéine β-lactoglobuline [14].

Il est clair également, que l'encrassement des protéines dépend énormément de la température puisque la protéine subit des transformations suite à l'augmentation de la température selon une loi type Arrhenius.

L'encrassement par cristallisation n'est pas pris en compte dans les différents modèles établis, phénomène qui peut devenir très influant à des températures supérieures à 90°C.

Il parait également selon certains travaux, que si l'on procède à un préchauffage à plus de 85°C suivi d'un chambrage, le dépôt dans le pasteurisateur sera moins important. Ceci est dû à la dénaturation de protéines et à la dégradation de la sursaturation en phosphate de calcium par formation de germes cristallins dans le pasteurisateur [15].

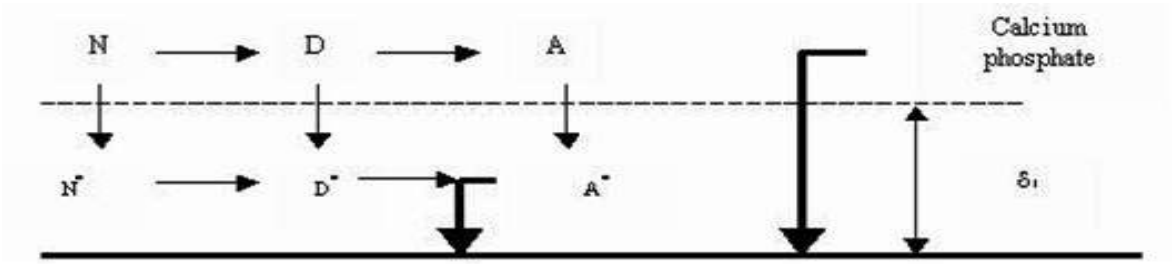
Certains travaux montrent que le pH et la vitesse d'écoulement exercent une influence sur la formation de la crasse. D'autres travaux évoquent le rôle que peut jouer les bulles de gaz dans le processus de l'encrassement, bulles qui se libèrent au cours du chauffage et qui s'adhérent aux surfaces. D'autres auteurs considèrent d'autres paramètres tels que la rugosité de la surface, le type de matériau et la charge superficielle.

Sur un autre article, l'auteur s'est intéressé à l'étude du rapport Ca : P dans la crasse et a trouvé une valeur proche de la valeur caractéristique du $Ca_3(PO_4)_2$ de 1,5. Ceci confirmera l'hypothèse d'un encrassement par cristallisation du phosphate du calcium [16].

Suite à cette revue bibliographique, on peut conclure qu'au cours du procédé de pasteurisation du lait dans un échangeur à plaques, les dépôts encrassant se développent par réaction chimique (encrassement de la protéine β-lactoglobuline) et par cristallisation [17].

III.4.2. Mécanisme de l'encrassement des protéines

L'encrassement de la protéine se fait selon le mécanisme représenté sur la figure suivante [17] :



Mur, surface Dépôt de protéines.

Figure IV-2 : Encrassement des protéines

La protéine β-lactoglobuline, N perd sa structure tertiaire, et donne une protéine dénaturée, D, cette dernière réagit selon deux réactions, elle donne d'une part des agrégats (ensemble de molécules forment un seul bloc), A, qui ne s'encrassent pas et peut réagir, d'autre part, avec des constituants du lait pour donner une protéine dénaturée qui présente une affinité avec la surface hydrophobe et s'adsorbe sur cette dernière, A*. A partir de là, on peut présenter le schéma réactionnel suivant :

Réaction 1

$$N \longrightarrow D$$

Réaction 2

$$D \longrightarrow A$$

Réaction 3

$$A \longrightarrow A^*$$

La cinétique des trois réactions est disponible, les vitesses dépendent de la température selon la loi d'Arrhenius [17].

III.4.3. Encrassement par cristallisation

Le deuxième type d'encrassement et qui ne peut pas être négligé, est celui des sels et plus particulièrement le phosphate de calcium car il possède une solubilité inverse par rapport à la température, c'est-à-dire un gradient négatif de solubilité. Lors du préchauffage, le produit ionique dépasse la concentration limite de solubilité dans le lait. Les sels sédimentent sous

forme cristalline et se déposent sur la paroi. Des travaux ont démontré qu'un encrassement peut avoir lieu avec une solution sursaturée en phosphate de calcium suite à une augmentation de température au-delà de 90°. Le produit de solubilité du phosphate de calcium est rapidement dépassé quand la température augmente, ce qui engendre un dépôt qui est fonction de sursaturation [17].

III.5. CONCLUSION

Suite à cette revue générale de l'encrassement des échangeurs de chaleur à plaques, il parait claire que le phénomène reste mal compris, des études plus poussées sont nécessaire pour une meilleure compréhension du phénomène afin de minimiser les coûts, de nettoyage, supplémentaires engendrées par ce problème.

Chapitre IV :

MODELISATION ET SIMULATION DE L'ENCRASSEMENT

IV.1 INTRODUCTION

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

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

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

IV.2. CYCLE DE PRODUCTION

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

Ce dernier est reconstitué selon le procédé suivant: Il s'agit de mélanger dans une eau les différents composants du lait à savoir : la poudre de lait spray et la matière grasse (MGLA), pour réaliser un produit le plus voisin possible du lait initial. Le mélange se fait en circuit fermé et selon le mode opératoire suivant [18] :

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

Un dégazage à 60°C est effectué pour extraire les mauvaises odeurs et permettre l'homogénéisation de la MGLA dans de meilleures conditions.

2- 400 Kg de matière grasse (MGLA) ou 15 g/l sont ajoutées.

3- Passage dans un homogénéisateur pour fusionner les particules de la matière grasse et rendre le mélange donc plus homogène.

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.

IV.2.1. Les étapes de production

Les étapes de production dans l'unité UHT se résument comme suit (Figure IV.1) [19] :

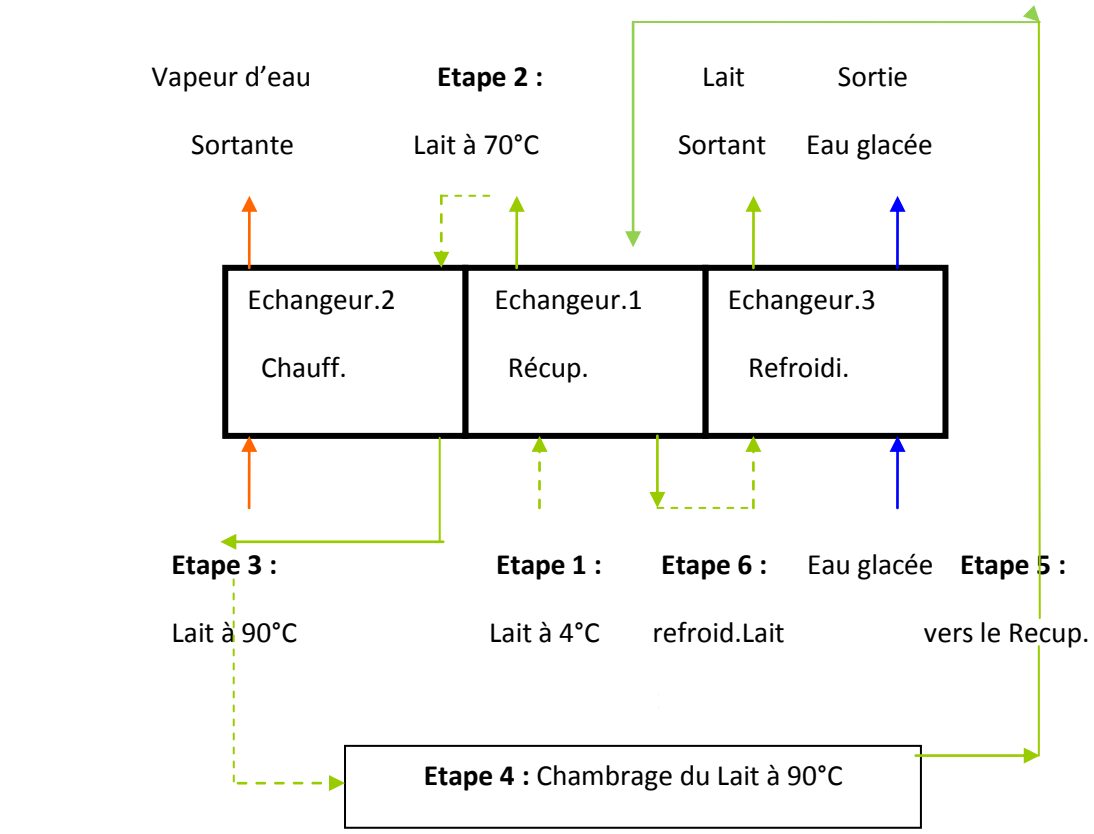


Figure IV.1. Cycle de Pasteurisation du Lait.

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 : Il est assuré dans le compartiment I (échangeur 1) de l'échangeur à plaques par une récupération de chaleur avec le produit pasteurisé.

2. Homogénéisateur (3): Pour fusionner les particules de la matière grasse et rendre le mélange donc plus homogène.

3. Pasteurisation : Elle est assurée dans le compartiment II (échangeur 2) par une injection de la vapeur dans de l'eau, cette opération se fait à une température de 90-120 °C et une pression de 4,4

bars. Le mélange est maintenu à cette température pendant 4 secondes dans un chambreur tubulaire extérieur.

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.

IV.2.2. Le cycle de vapeur

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.

IV.3. MODELE THERMIQUE DE L'ECHANGEUR A PLAQUE

IV.3.1. Introduction

Avant d'introduire le modèle de l'encrassement à adopter, une description de la circulation des fluides à l'intérieur de l'échangeur à plaques plus précisément dans le compartiment pasteurisation (où se trouve le dépôt), s'impose. Le fluide chaud (vapeur d'eau) circule dans chaque canal (C_j) pour chauffer les plaques, le transfert de chaleur se fait par convection, ces dernières transmettent leur chaleur par conduction au fluide froid (lait). La figure IV.2 qui suit résume ce circuit :

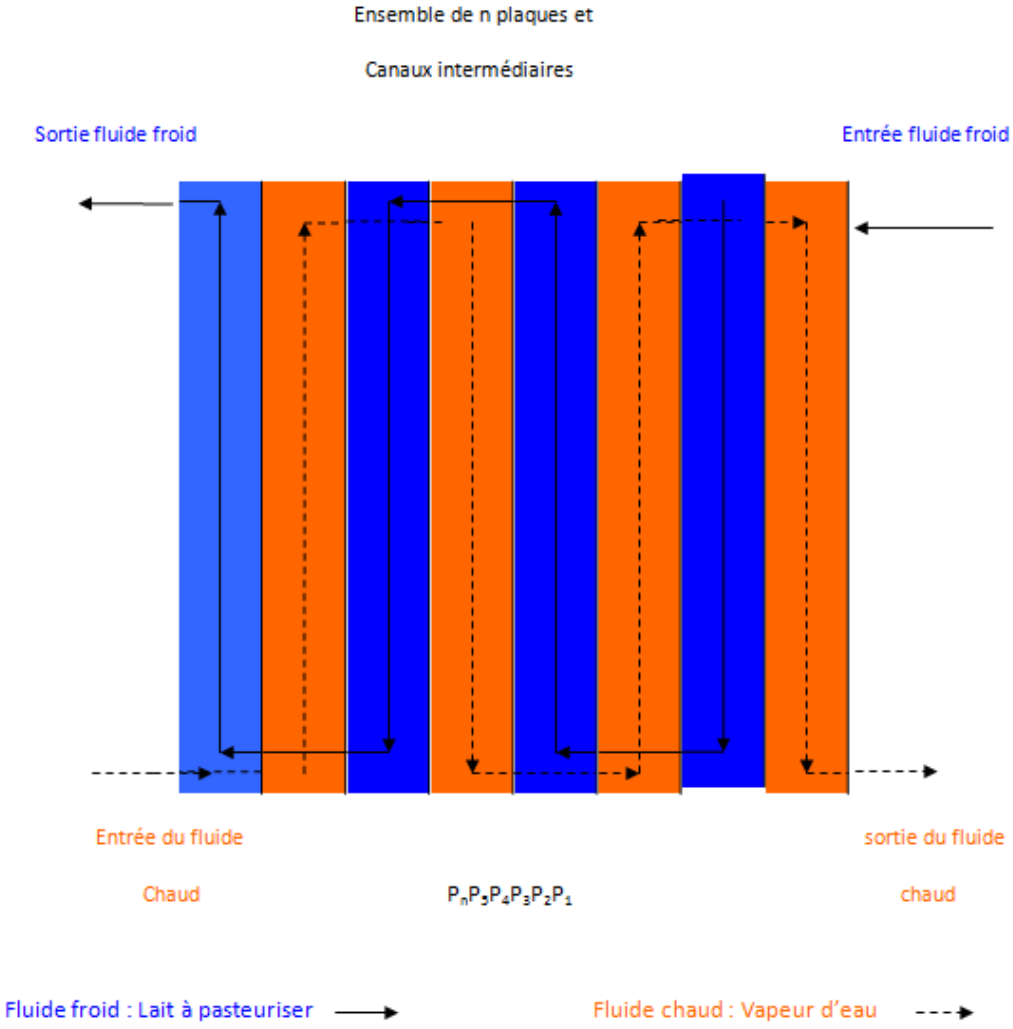


Figure IV.2. Arrangement des plaques de l'échangeur de pasteurisation et sens de circulation des fluides.

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

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

IV.3.2. Formulation mathématique du problème

On s'intéresse dans Cette partie 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'équations 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.

IV.3.2.1 Modélisation de la turbulence dans un milieu totalement fluide [20]

IV.3.2.1.1 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 suppose que les propriétés physiques du fluide restent constantes et évaluées à une température moyenne de référence,
- Les constantes physiques ne dépendent pas de la température,
- L'accélération due à la pesanteur est négligée,
- Pas de source interne de chaleur,
- Toute la chaleur générée par les plaques est cédée au fluide,

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

IV.3.2.1.2 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

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

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(Ɛ)

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

IV.3.2.2 Modélisation de la turbulence dans un milieu poreux

IV.3.2.2.1 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 : $J \geq 1, R_c \neq 1, \phi \prec$ 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

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

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)

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

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

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

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

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

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

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

IV.3.2.2.2 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:

$$\text{x=0} \quad : \quad u = u_e \quad \text{et} \quad V = 0$$

- Condition d'adhérence à la paroi :

$$y = 0 \quad \text{et} \quad y = H \quad : \quad u = v = 0$$

- On impose à la sortie un régime dynamique établi:

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

b) Champ thermique

- Une température constante est imposée sur les parois :

$$y = 0 \quad \text{et} \quad y = H \quad : \quad T = T_P = 400K$$

- Une température constante à l'entrée:

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

- Diffusion axiale négligeable à la sortie:

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

c) Energie cinétique turbulente et la dissipation turbulente :

- Condition d'adhérence à la paroi :

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

- A l'entrée :

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

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 :

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

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 : $J \geq 1, R_c \neq 1, \phi \prec$ valeur finie et très faible.

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

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

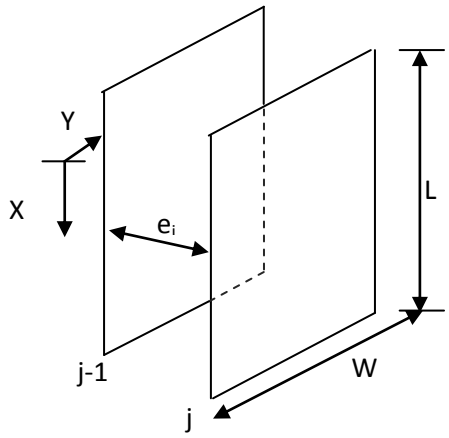


Figure. IV.3 : Schématisation de la direction de l'écoulement entre deux plaques.

IV.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 [21] :

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

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

Nous avons : $V_T = {}^{m_T}\!/_{\rho_m}$ tel que : $\rho_m = 1030$ 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 (Annexe) est :

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

- A partir de la relation **(IV.11)** nous parvenons à μ

2. **Chaleur spécifique :** Elle est calculée avec la corrélation suivante [19] :

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

3. **Débit du mélange :** Q = 4000 l/h.

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

4. **Vitesse du mélange :** S'écrit :

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

$$A = e_j \times W$$

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

5. **Nombre de Reynolds :**

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

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

$$\rho_f = 1033,7 - 0,2308T - 0,00246T^2\ [19].$$

-Donc on obtient le nombre de Re

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 [17].

Pour le transfert de chaleur en régime turbulent dans un échangeur à plaques, la corrélation suivante peut être utilisée [17]:

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

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

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 :

$k = 0,00133T + 0,53991$ [21]

D'où avec l'équation **(IV.17)**: Pr = 2

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

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

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

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 [22].

On obtient : μ ,Cp ,ρ_c [22] .

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

IV.4 CONCLUSION

Nous avons présenté la formulation mathématique 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 $\kappa - \varepsilon$. On a établie les équations de conservations et les conditions applicables pour la résolution numérique.

IV.5 Le programme ANSYS

IV.5.1 Introduction

Les outils de simulation numérique occupent une place prépondérante dans les études. La démarche de conception optimale qui résulte de l'épuisement des ressources énergétiques et du souci de préservation de l'environnement, n'a fait qu'amplifier leur utilisation.

La simulation se définit comme l'utilisation ou la résolution de modèles correspondant à un système donné pour étudier le comportement de ce dernier dans un contexte précis. Elle est la suite logique de la modélisation qui est la première approche d'une simulation.

La modélisation et la simulation interviennent pour :

- ✓ La compréhension de la structure et des interactions à l'intérieur d'un système (déterminer le rendement, la performance…)
- ✓ L'étude du comportement du système par rapport à son environnement extérieur (consommation énergétique/cout…)
- ✓ La prédiction du comportement d'un système pour des situations nouvelles ou extrêmes.
- ✓ La conception de nouveaux dispositifs/ composants, étude de système (composant) avant la création de prototype et mise en œuvre de procédés nouveaux (stratégies et algorithmes de contrôle).
- ✓ L'optimisation des solutions lors de la conception.

La simulation ne supplante pas l'expérimentation mais la complète (validation…). Elle permet d'effectuer l'analyse du problème dans des conditions réalistes (reproduire des tests que l'on fait en expérimentation pour mieux les comprendre et à moindre cout) ou au contraire dans des conditions d'essais extrêmes/marginales (climats extrêmes, défauts d'installations…).

Ces dernières ne peuvent être faites par l'expérimentation (raison de couts…). Ainsi, la simulation accroit le champ des tests pour un système.

A travers la simulation, le système étudié devient plus flexible. On peut plus facilement faire des études paramétriques. L'utilisation peut aussi faire varier l'échelle de temps pour une étude, ce qui est impossible par ailleurs.

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

IV.5.2 PRINCIPES FONDAMENTAUX D'ANSYS [23]

IV.5.2.1 Définition

Avant de plonger dans les détails des procédures reliés au programme ANSYS, nous définissons les termes suivant :

ANSYS, comme beaucoup d'autres FE-programmes, est également divisé en trois parties principales (processeurs, qui sont appelés préprocesseur, processeur solution et post processeur.

Autres logiciel peuvent contenir uniquement la partie prétraitement ou seulement la partie post-traitement. Au cours de l'analyse que vous communiquerez avec ANSYS via une interface d'utilisateur graphique (GUI), qui est décrit ci- dessous et illustré la Figure IV.4.

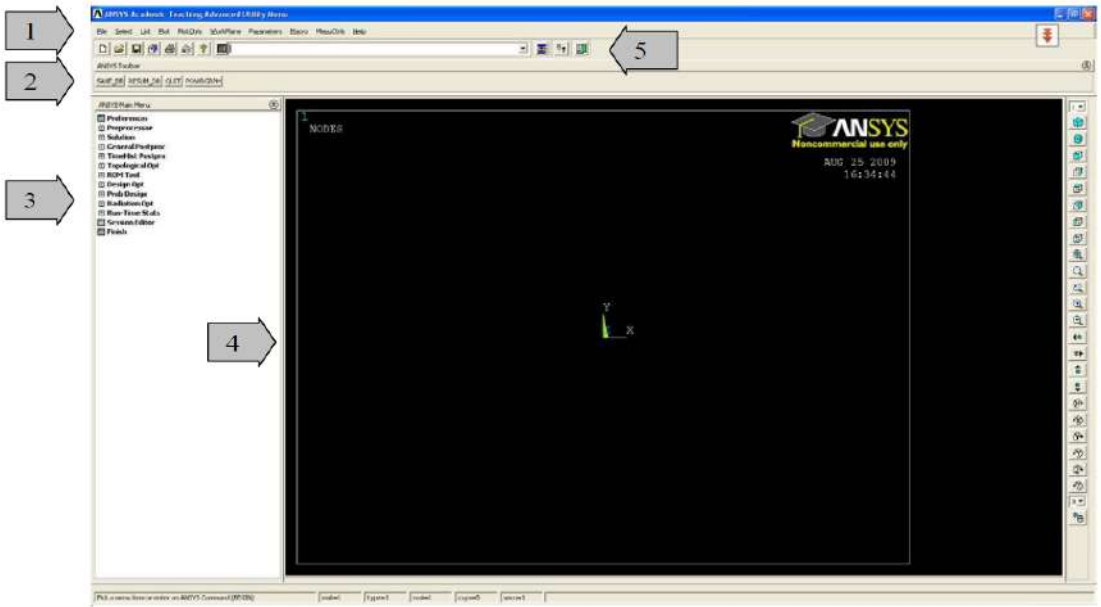


Figure IV.4 : **L'interface utilisateur graphique d'ANSYS (GUI)**.

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

Préprocesseur :

Le modèle est mis en place dans le préprocesseur. Il comprend généralement un certain nombre d'étapes dans l'ordre suivant :

- Construire la géométrie :

  Selon si la géométrie de problème est unidimensionnelle, bidimensionnelle ou tridimensionnelle, la géométrie consiste en créer des lignes, des zones ou des volumes. Cette géométrie peut alors, si nécessaire, être utilisée pour créer d'autre géométrie par l'utilisation d'opérations booléennes. L'idée clé en construisant la géométrie comme ceci est de simplifier la génération de la maille d'élément. D'où, ce pas est facultatif, mais le plus souvent utilisé. Les nœuds et des éléments peuvent cependant être créés de coordonnées seulement.
- Définir les matériaux :

  Un matériau est défini par ses constantes matérielles. Chaque élément doit être affecté une matière déterminée.
- Générer le maillage d'éléments

  Le problème est discrétisé avec points nodaux. Les nœuds sont connectés aux éléments finis de forme, qui forment ensemble de volume de matière. Selon le problème et les hypothèses qui sont faites, Le maillage d'éléments peut être crée dans ANSYS de plusieurs façon la plus courante est qu'il est automatiquement crée, cependant plus ou moins contrôlée. Par exemple, vous pouvez spécifique certain nombre d'élément dans une zone spécifique, ou vous pouvez forcer le mailleur pour maintenir une taille d'élément spécifique au sein d'une zone. Certaines formes de l'élément ou les tailles ne sont pas recommandées et si ces limites sont violées, un avertissement est généré dans ANSYS. Il appartient à l'utilisateur de créer un maillage qui est capable de générer des résultats aves une précision suffisante

Solution processor :

Ici, vous résoudre le problème en rassemblant toutes les informations spécifiées sur le problème

1. **Apply loads** : les états de frontière sont habituellement appliqués sur des nœuds ou des éléments. La quantité prescrite peut par exemple etre (Force, traction, déplacement, moment, rotation). Les charges peuvent également etre éditées du préprocesseur dans ANSYS
2. **Obtain solution** : La solution au problème peut etre obtenue si le problème entier est défini

Postprocessor :

Dans cette partie de l'analyse, vous pouvez par exemple :

1. **Visualiser les résultats** : par exemple, tracer la forme déformée de géométrie ou les contraintes.
2. **List the results** : Il est possible d'énumérer les résultats comme des listes tabulaires ou les impressions de fichier.

Chapitre V :

RESULTATS ET DISCUSSIONS

V.1 INTRODUCTION

Dans cette partie de travail, un fluide alimentaire ayant un fort pouvoir encrassant est utilisé dans la simulation. Les plaques sont chauffées à une température constante uniforme. Le fluide aborde l'échangeur à une vitesse constante.

Nous présentons les résultats pour les écoulements turbulents pleinement développés dans les échangeurs de chaleur à plaques. Nous évaluons et comparons certains flux macroscopiques. Pour des écoulements laminaires type de Poiseuille, le profil de vitesse est auto-similaire. Au contraire, une fois que l'écoulement devient turbulent, le profil de vitesse dépend de l'intensité de turbulence. L'utilisation d'une couche poreuse peut modifier le transfert thermique dans un canal. Ce chapitre est consacré à la modélisation et la simulation numérique du phénomène. Les simulations portent principalement sur le champ dynamique et le champ de température.

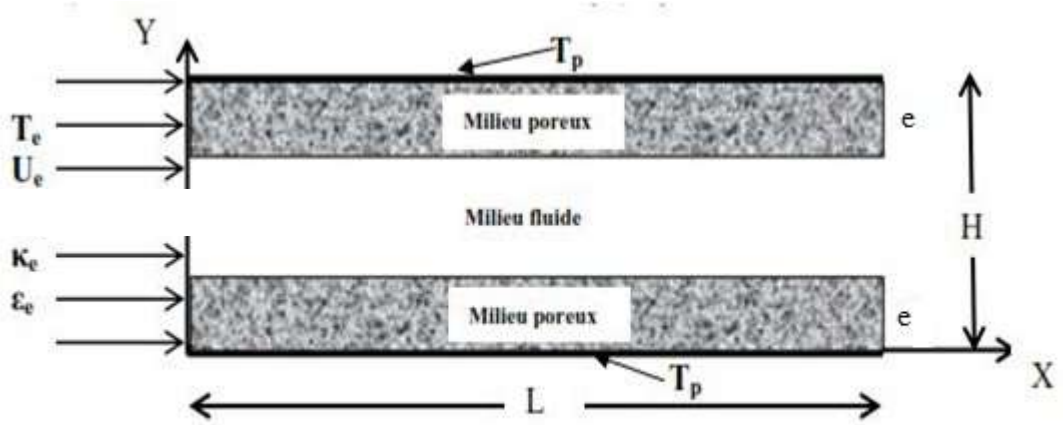


Figure V.1 Ecoulement dans un canal à section rectangulaire.

V.2 LES PROFILS DANS UN MILIEU COMPLETEMENT FLUIDE

V.1.1 Profil de température

L'évolution du profil de la température en fonction de la largeur du canal est représentée sur la Figure V.2 et ce pour différentes longueurs du canal (y).

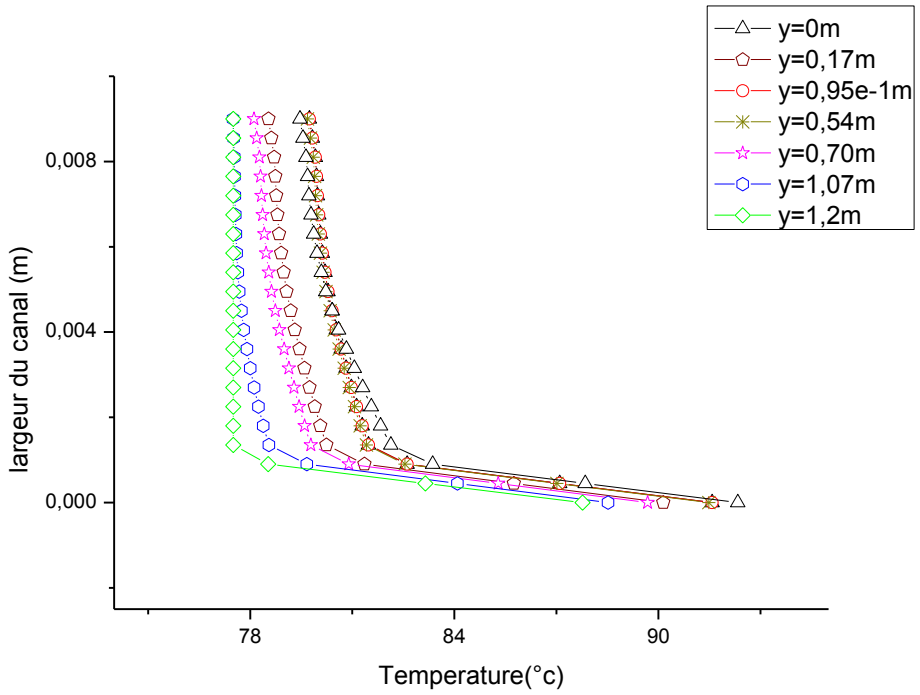


Figure V.2 Variation du profil de température dans le lait.

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

V.1.2 Profil de vitesse

L'évolution du profil de la vitesse en fonction de la largeur du canal est représentée sur la Figure V.3 et ce pour différentes longueurs du canal (y).

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

V.1.3 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.4 et ce pour différentes longueurs du canal (y).

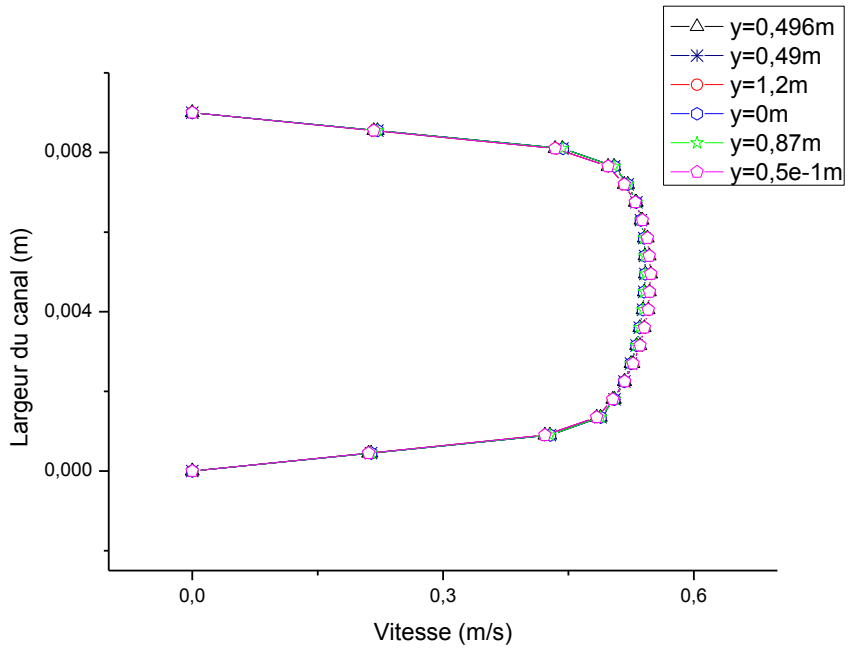


Figure V.3 Variation du profil de vitesse.

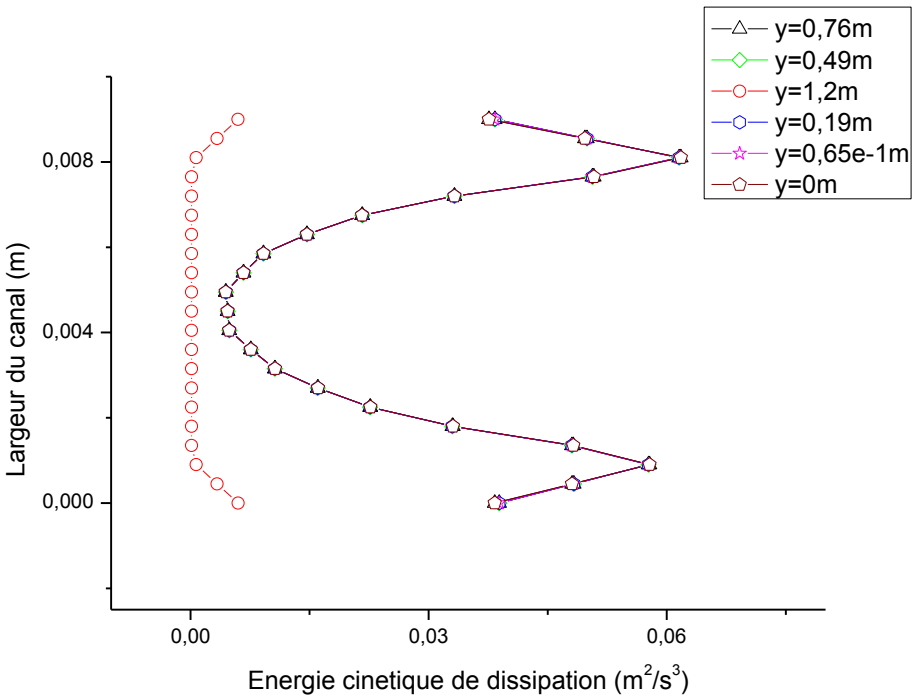


Figure V.4 Variation du facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente.

L'évolution du profil du facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente le long de la largeur du canal est représentée dans ce graphe. Il apparait que le facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente atteint sa valeur maximale à l'interface fluide-paroi.

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. A l'entré du milieu fluide (lait) on constate une faible énergie cinétique.

V.2 LES PROFILS DANS UN MILIEU AVEC UN DEPOT

V.2.1 Profil de la température

L'évolution du profil de la température en fonction de la largeur du canal en présence de l'encrassement est représentée sur la Figure V.5 et ce pour différentes longueurs du canal (y).

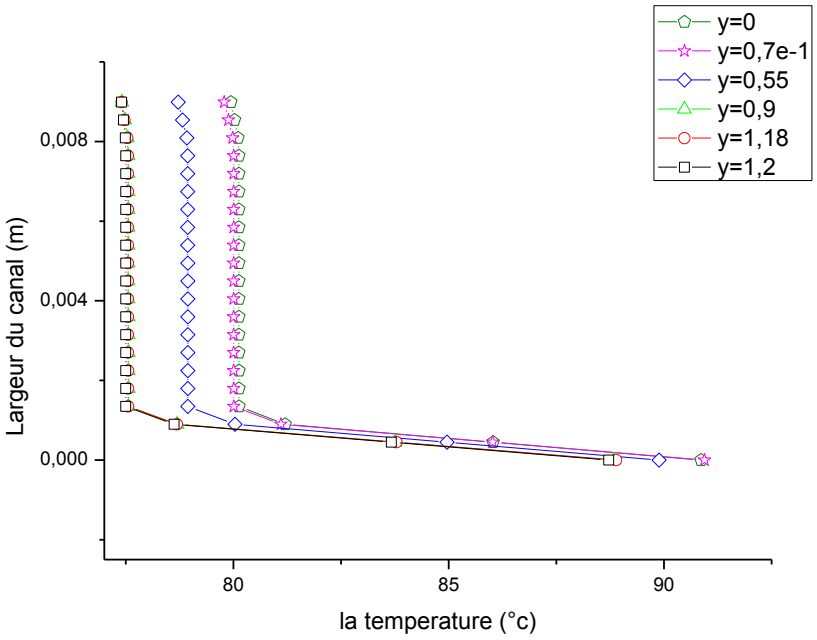


Figure V.5 Variation du profil de température.

Une augmentation moins significative de la température est observée en comparaison avec le cas précédent en présence du milieu poreux et ce en raison de la nature isolant du dépôt.

V.2.2 Profil de la vitesse

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

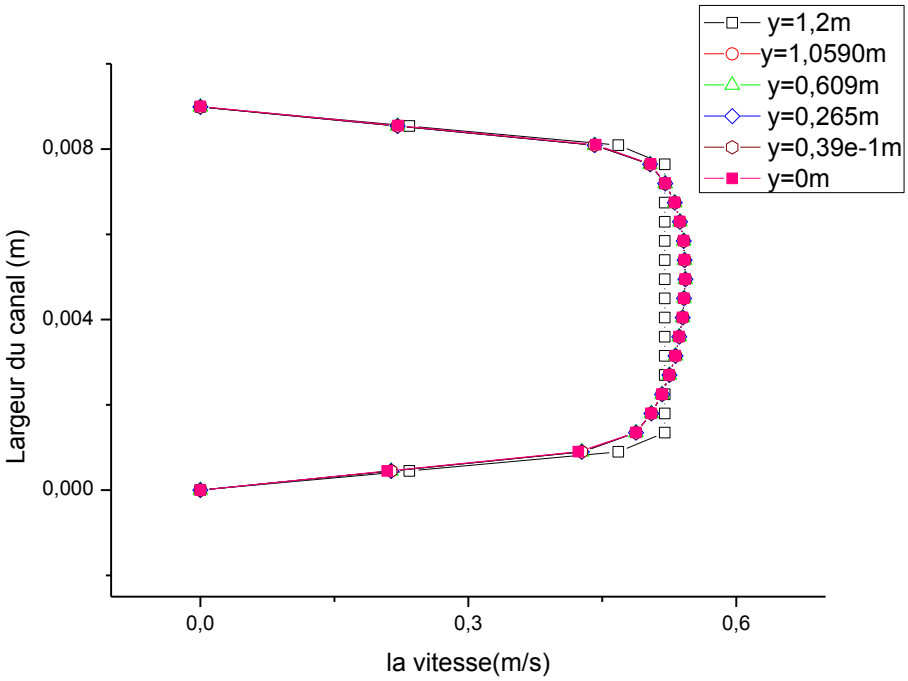


Figure V.6 Variation du profil de vitesse.

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

V.2.3 Profil du 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 dans ce graphe et ce pour différentes longueurs du 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.

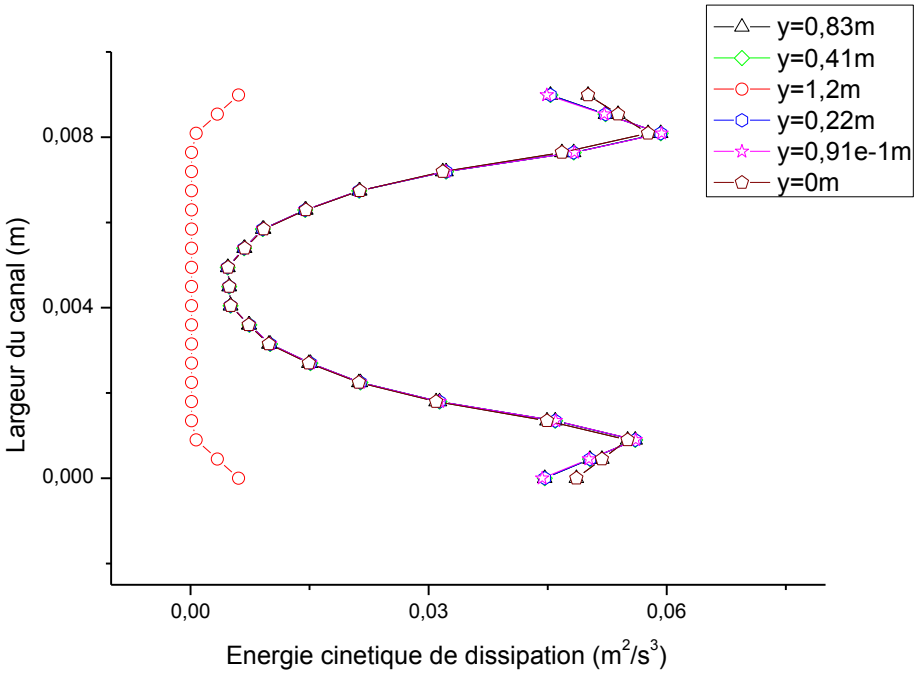


Figure V.7 Variation du facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente.

V.3 ETUDE COMPARATIVE ENTRE LE MILIEU FLUIDE ET LE MILIEU POREUX

V.3.1 Profil de la température

Exemple pour y=0m.

L'évolution du profil de la température en fonction de la largeur du canal avec et sans dépôt est représentée sur la Figure V.8.

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.

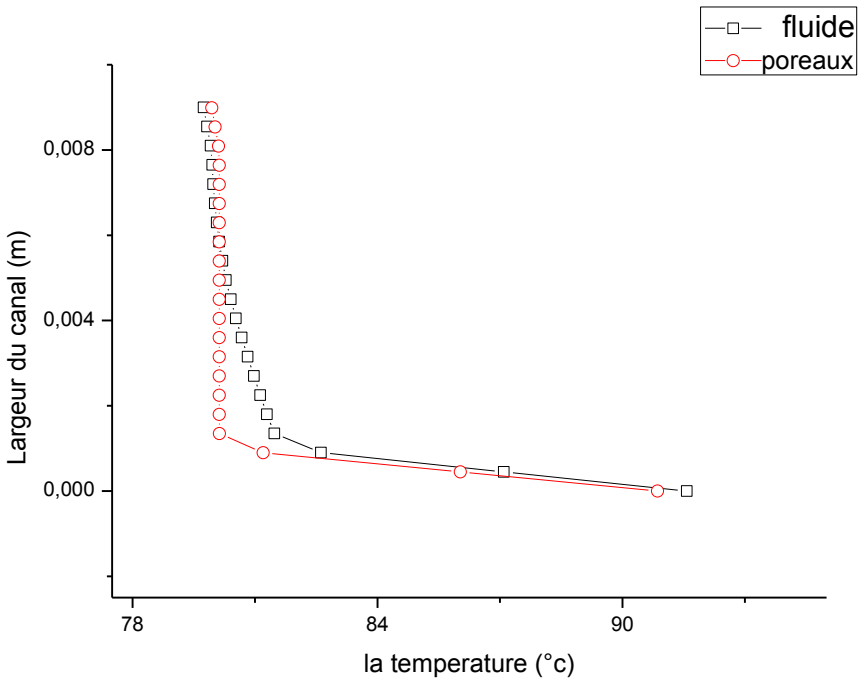


Figure V.8 Evolution de la température avec et sans dépôt.

V.3.2 Profil de la vitesse

Exemple pour y=1.2m.

L'évolution du profil de la vitesse en fonction de la largeur du canal avec et sans dépôt est représentée sur la Figure V.9.

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.

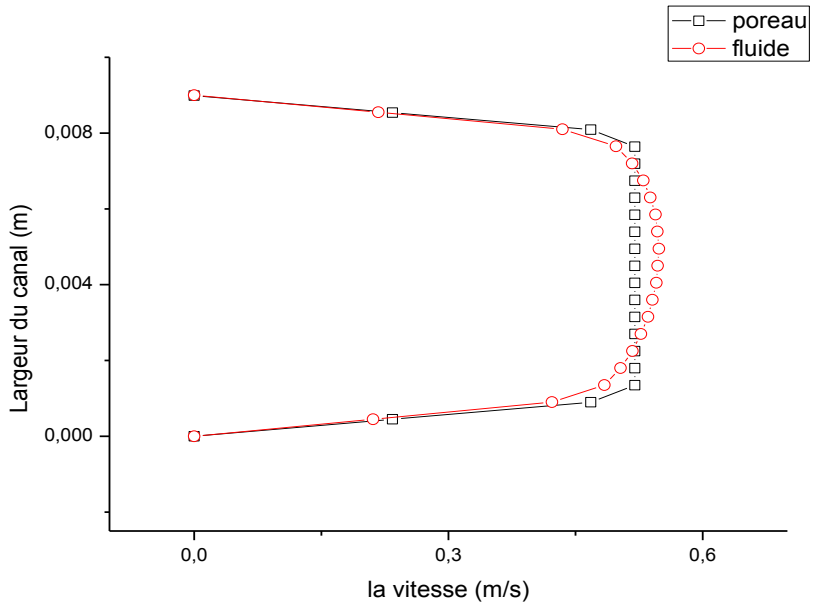


Figure V.9 Evolution de la vitesse avec et sans dépôt.

V.3.3 profil du facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente

Exemple pour y =0m.

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.10.

On note que le facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente atteint son point maximal dans le milieu fluide avant la formation du milieu poreux 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

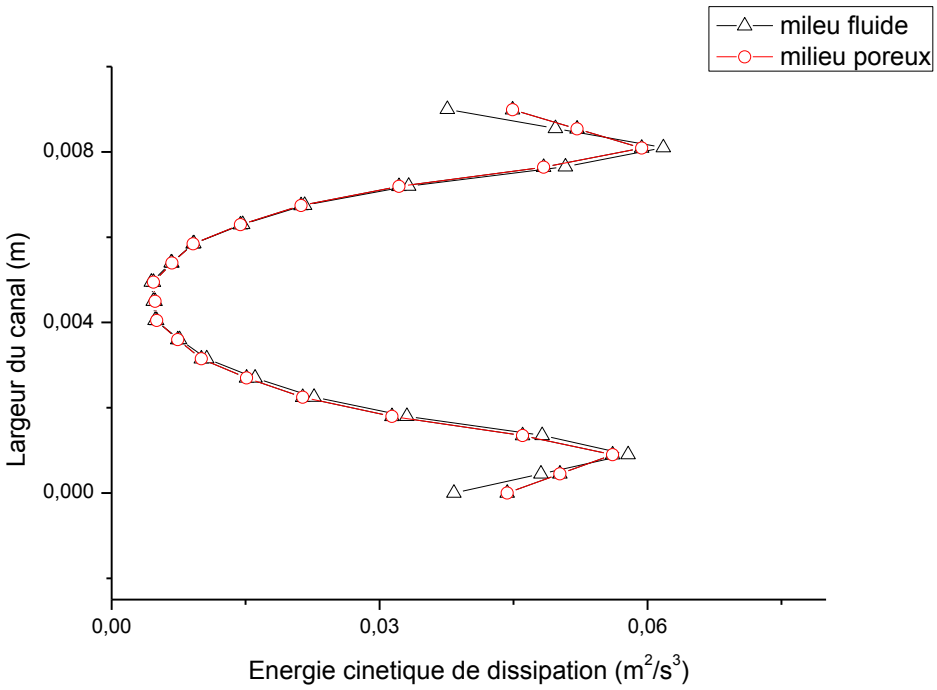


Figure V.10 Evolution du facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente avec et sans dépôt.

CONCLUSION GENERALE

Cette étude apporte une contribution à la compréhension, d'un point de vue thermoénergétique, de l'effet de l'encrassement dans les échangeurs de chaleur à plaques (PHE) en régime turbulent. Au delà de la modélisation mathématique du phénomène pour les échangeurs à plaques, une attention particulière a été portée sur le cas de la pasteurisation du lait, qui est un fluide fortement encrassant et qui pose d'importants défis vis-à-vis de l'efficacité énergétique dans l'industrie agro-alimentaire.

L'impact économique que cela représente est considérable en raison principalement des temps d'arrêts et du processus de nettoyage des équipements concernés par l'encrassement. Il s'avère qu'il est important d'acquérir une connaissance précise de la dégradation des performances dans les échangeurs en vue de l'optimisation de leur rendement. Cela doit passer au début par des notions sur le dimensionnement, l'évaluation de l'efficacité énergétique et l'importance économique des échangeurs employés. De nombreuses études ont été réalisées dans le but d'apporter des réponses sur le phénomène d'encrassement et les paramètres influents.

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

Les résultats obtenus pour le cas d'un écoulement en régime turbulent avec et sans encrassement montrent que le code développé et en mesure de capturer les aspects dynamiques et thermiques du phénomène étudié.

La modélisation proposée décrit la variation temporelle de certains paramètres thermo-physiques avec et sans l'encrassement. Ils montrent que dépôt de faible conductivité thermique fait diminuer la température du fluide le long de l'échangeur. La perte d'efficacité énergétique atteint souvent les 60% en fin du procédé de pasteurisation du lait.

Une grande quantité de chaleur reste emmagasinée au niveau de la matrice poreuse. Le dépôt encrassant constitue une couche qui réduit considérablement le transfert de chaleur fluide/parois.

Le dépôt encrassant provoque des effets de frottement et une résistance supplémentaire plus importante due aux termes de Brinkman et Forchheïmer, permettant d'augmenter le taux de turbulence à son interface. La réduction de la section du passage du fluide fait augmenter l'énergie cinétique sur toute la longueur du canal. La faible perméabilité du dépôt fait diminuer considérablement la vitesse de l'écoulement et la turbulence est ainsi réduite dans la couche du dépôt.

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.

[1] http://www.lait.webatu.com (2011-2012)

[2] http://www.maison-du-lait.com/fr/filiere-laitiere/lhistoire-lait-au-fil-des-siecles (2013)

[3].http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:3UX4J2QeSgkJ:babcock.wisc.edu/sites/default/files/de/fr/de_19.fr.pdf+&cd=1&hl=fr&ct=clnk&gl=dz (2014)

[4] http://longue vergne.free.fr/sommaire-fiche-technique.htm.

[5].http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:5tQUA2z8JmoJ:vietech2.free.fr/Le%2520lait.pdf+&cd=1&hl=fr&ct=clnk&gl=dz (2001-2002)

[6] http://www.natrel.ca/french/index.htlm. (2015)

[7] Sabrina Delrot. Détection de l'encrassement dans un échangeur de chaleur par observateurs de type Takagi-Sugeno. Other. Universit_e de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2012.

[8] Létitia PEREZ, développement, étude de performances et intégration de sondes thermiques pour la caractérisation de l'encrassement d'échangeurs tubulaires à courants croisés. Thèse doctorat d'Ecole nationale supérieure d'Arts et métiers, Paris. Spécialité : mécanique, 2003.

[9] MARRIOTT Where and how to use plate heat exchangers, Chemical Engineering. Avril (1997).

[10] ROUSSEL M. Les échangeurs de chaleur, Analyse stratégique ELC paris/AFMERapport public, JUIN (1987).

[11] Jean – Paul Faux, transferts thermiques, échangeurs de chaleurs à plaque et autres types en agroalimentaire thèse. Université de technologie de Compiègne, (2003).

[12] fascicule de technique d'Ingénieur « problème de fonctionnement », B2 344, 2- (1995).

[13] LALANDE, M., TISSIER, J. P., et CORRIEU, G., Fouling of Plate Exchangers Used in Ultra-High-Temperature Sterilization of Milk, J. Dairy Res., 51,557-568 (1984).

[14] LALANDE , M., TISSIER, J. P., et CORRIEU, G., Fouling of heat Transfer Surfaces Related to B-Lactoglobulin Denaturation during Heat Processing of Milk Biotechnlo. Prog., 1, 131-139 (1985).

[15] LALANDE, M., et RENO, F., Fouling by Milk and Dairy Product and Cleaning of Heat Exchangers Surfaces In Fouling Science and Technology, L. F. Melo, T. r. Bott, and C.A. Bernardo, Eds., NATO ASI Series E, Vol. 145, pp. 557-573, Kluwer, Amsterdam, Netherlands (1988).

[16] JEURUINK, T. J. M., Fouling of the Milk Various Calcium Concentrations. Presented at Fouling and Cleaning in Food Processing, Jesus College, Univ. Cambridge, UK (1994).

[17] Y.MAHDI, L. OUFER, Simulation numérique de l'encrassement des échangeurs de chaleur à plaques lors d'une phase de pasteurisation, VII^{ème} Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes 23-25 mai 2005, Saint-Malo France.

[18] CHARPENTIER, J., C., "Techniques de l'ingénieur", J1080 p 9.

[19] Manuel technique de l'installation" ST

[20] viscosite et energie cinetique turbulente J.L. Estivalezes 22 novembre 2006ERITHERM Le système UHT le plus économique sur le marché".

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

[22] ECKERT, E.R.G., DRAKE, R.M., "Heat and Mass Transfer" Mc Graw-Hill (1972).

[23] www.ansys.com

CARACTERISTIQUES DE L'EAU

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

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

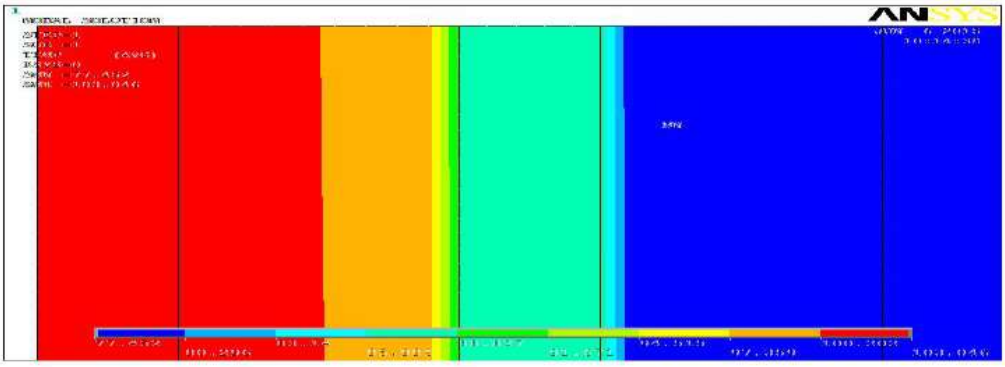
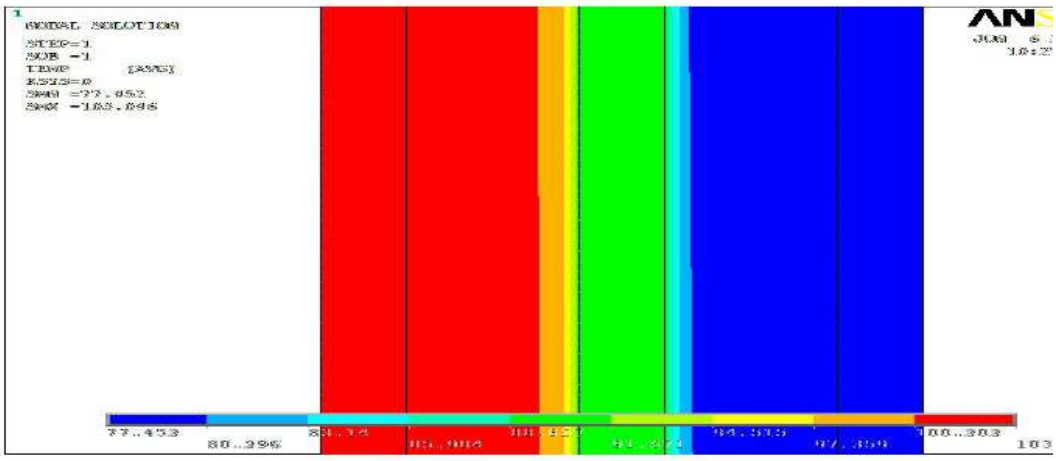
	Variation de Y (m)		Variation de X (m)	
Carrée N °1	0	1.2	0	0.0315
Carrée N°2	0	1.2	0.0045	0.027
Carrée N°3	0	1.2	0.0135	0.018

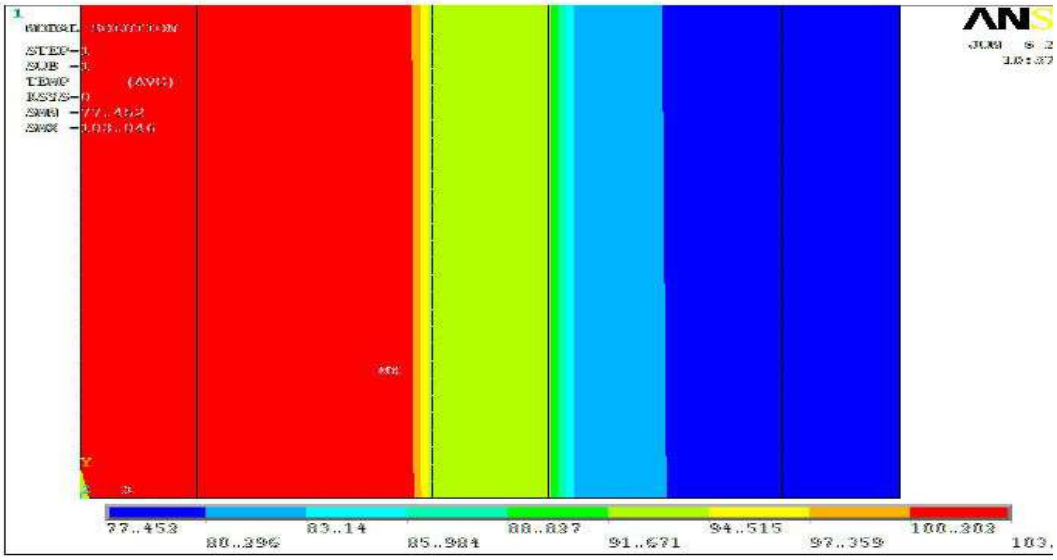
e = le diamètre de plaque = 0.0045 m
d = diamètre hydraulique =diamètre entre les deux plaque = e*2=0.0045*2=0.009 m

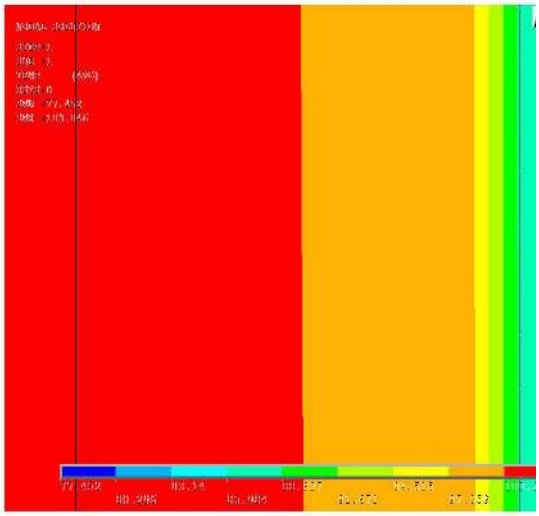
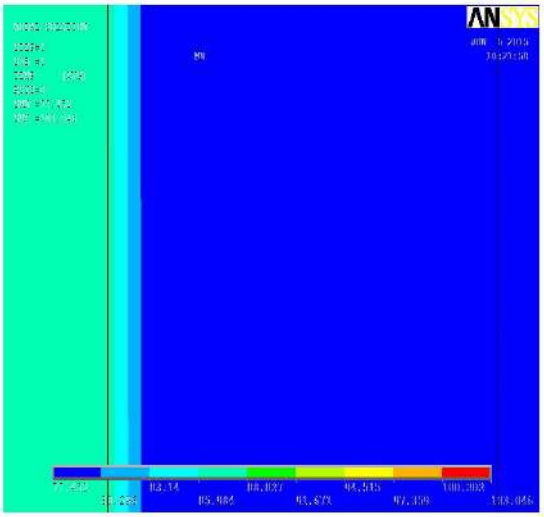
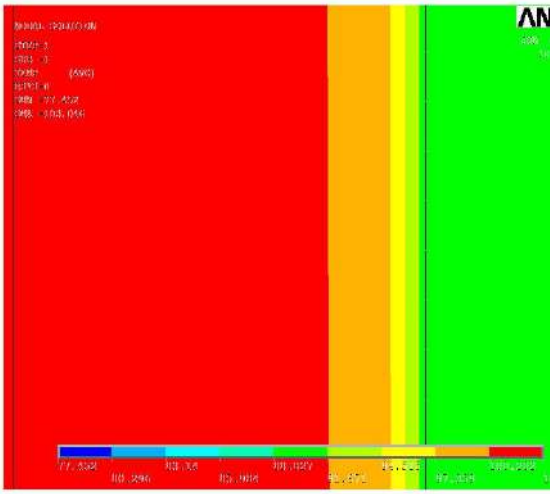
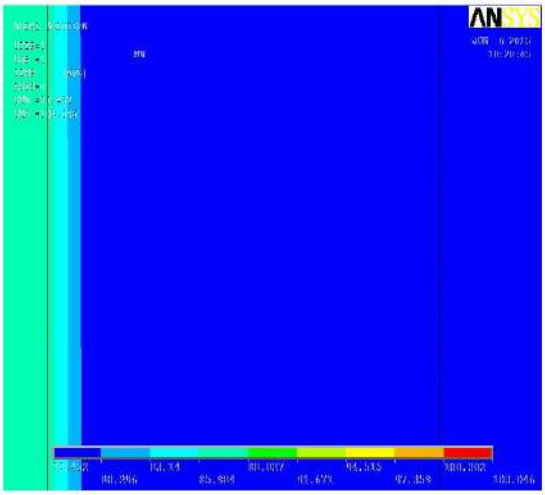
		Paramètre du lait	Paramètre du l'eau	Paramètre d'aluminium
Chaleur spécifique CP		3912	4037.24	900
Masse volumique		1001.34	983.84	2700
Viscosité		0.000604	0.00033	/
Conductivité		0.642	0.68	237
Condition au limite	vitesse	-0.52	0.52	/
	température	77.5	103	/
	pression	0	0	/

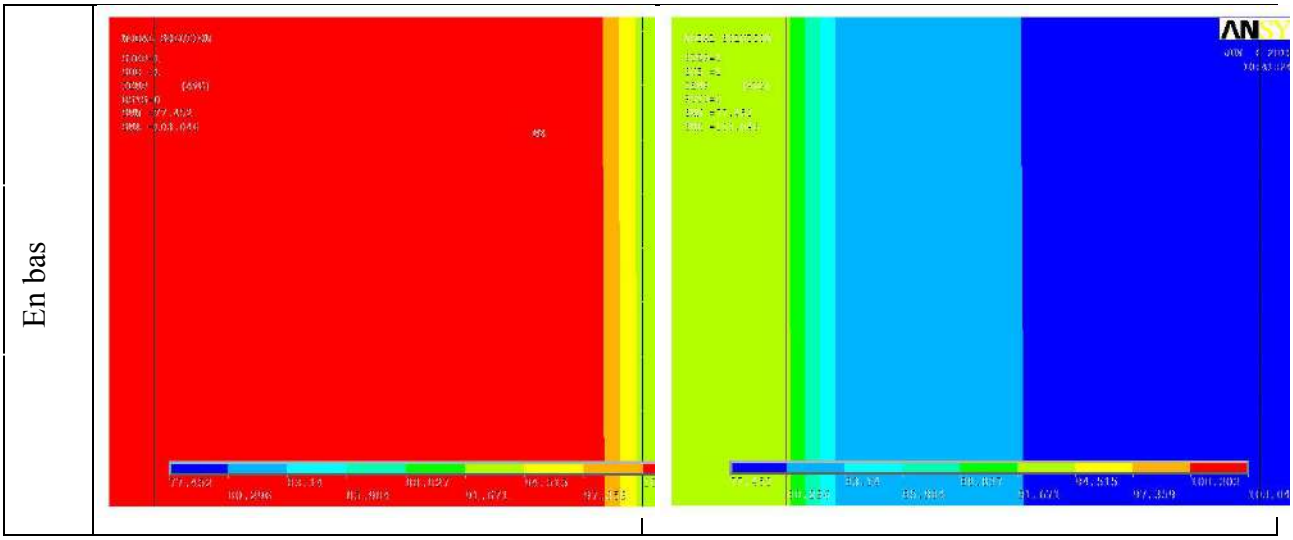
I. LES RESULTAT DANS UN MILIEU FLUIDE

1 . Profil de température

	Les deux cotés
En haut	
Au milieu	

En bas	

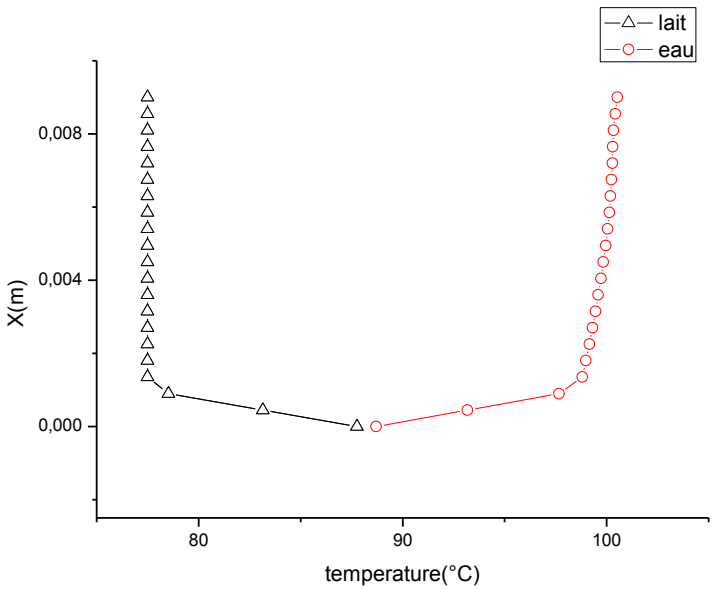
	Coter eau	Coter lait
En haut		
Au milieu		



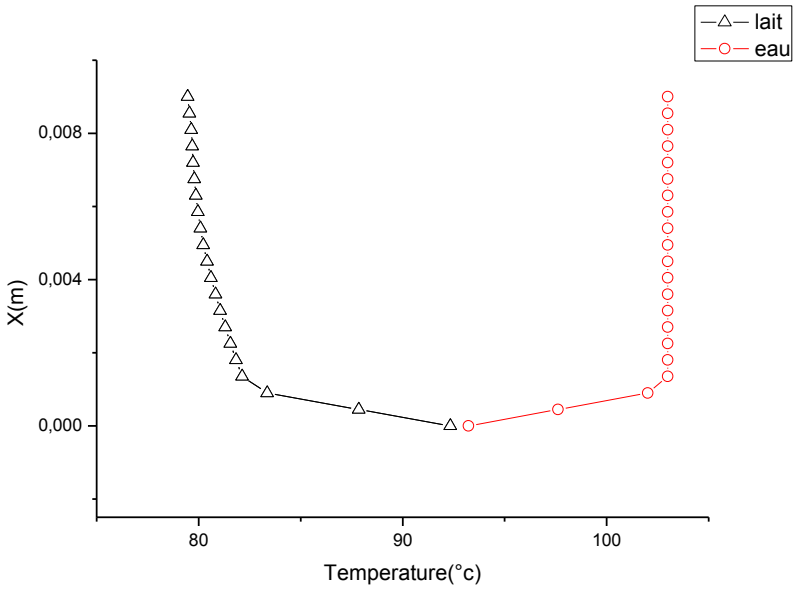
La variation de la température à la longue de canal

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 longueurs du canal (Y).pour l'eau et lait

Y=1.2 (m)

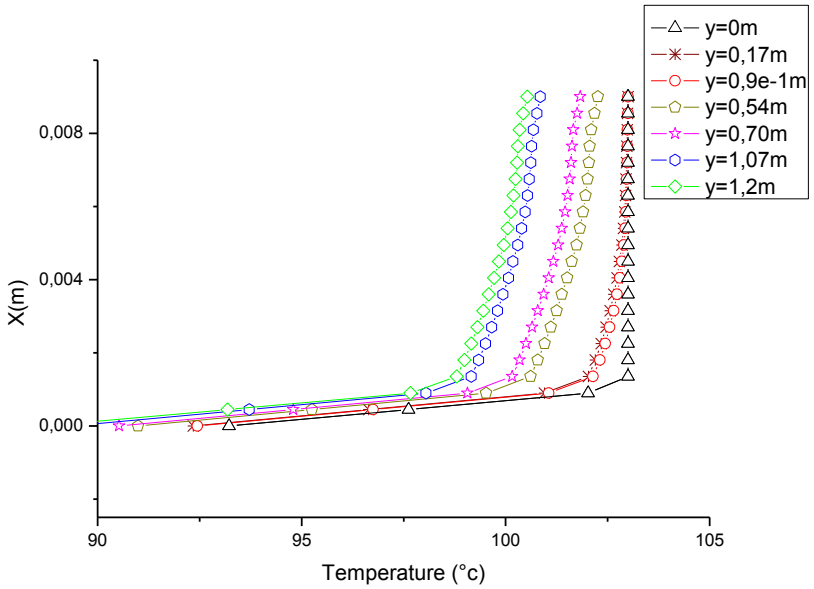


Y=0(m)

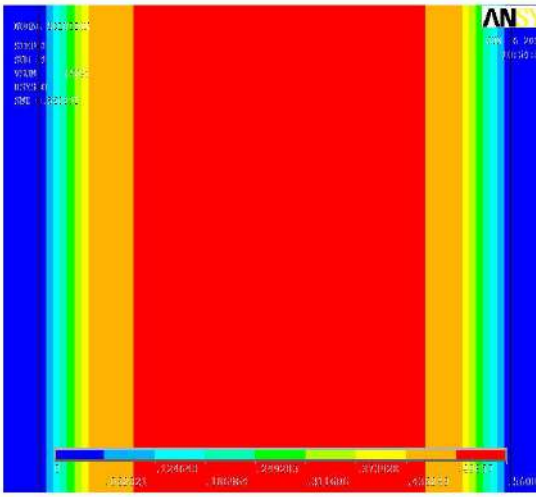
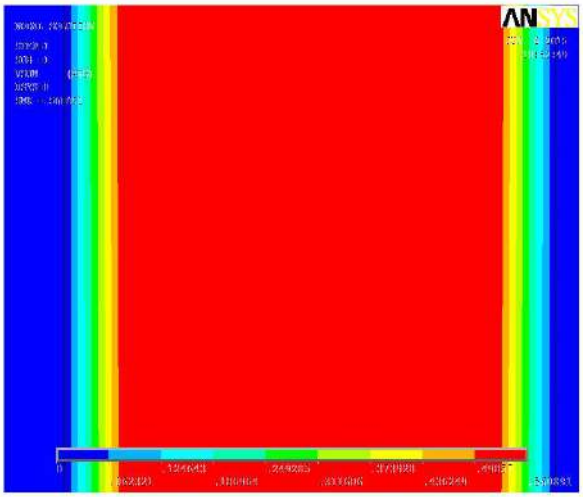
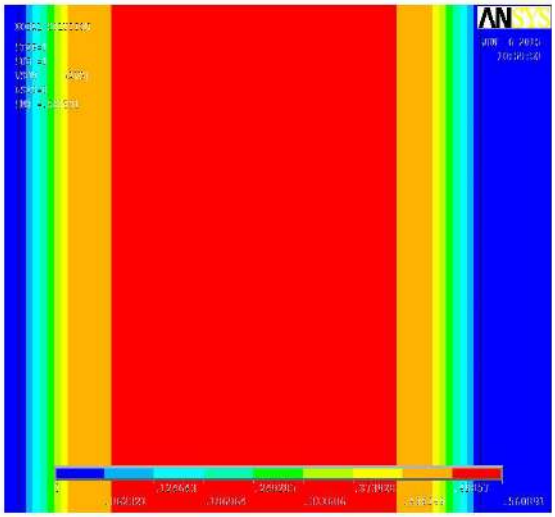
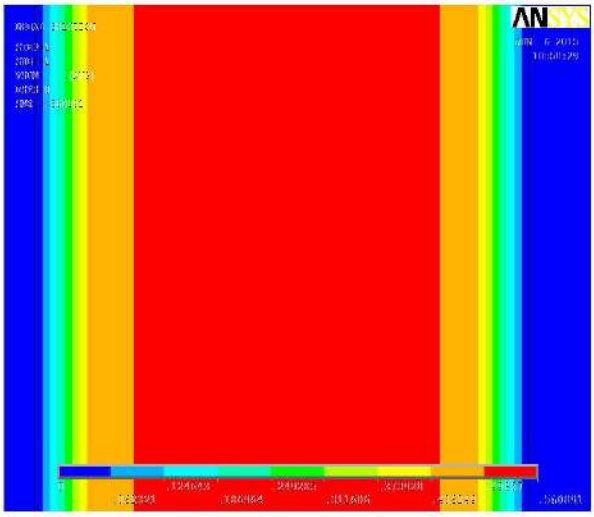
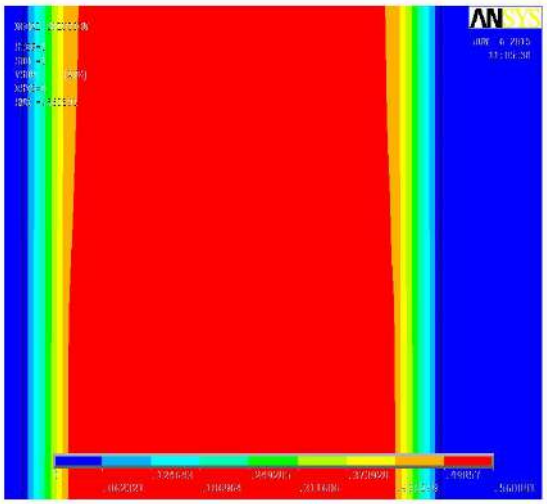
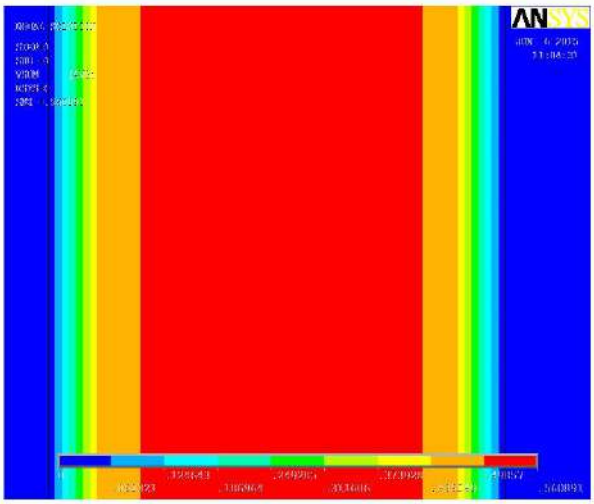


Les températures dans un même graphe

Coté l'eau



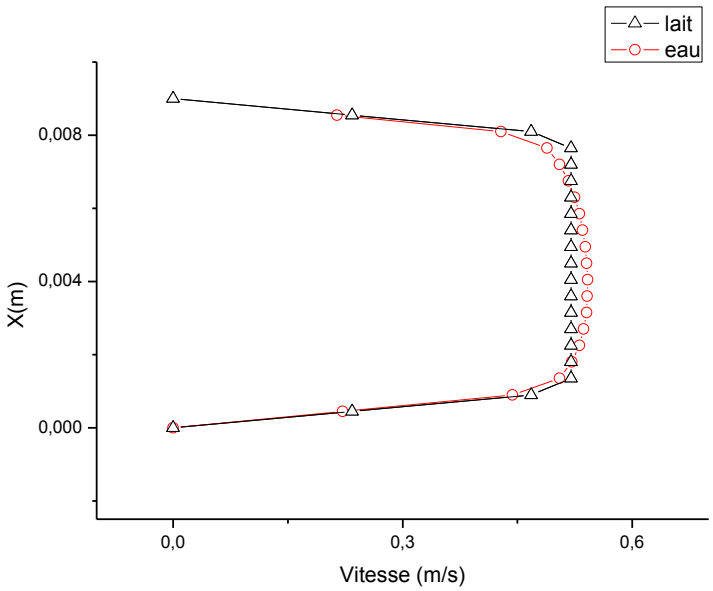
I.2. Profil de vitesse

	Coter eau	Coter lait
En haut		
Au milieu		
En bas		

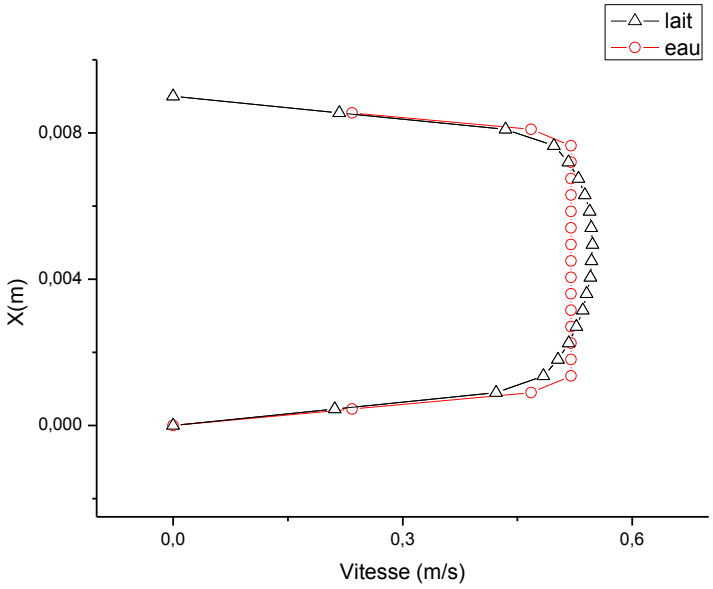
La variation de vitesse à la longue de canal

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 longueurs du canal (Y).pour l'eau et lait

- **Y=1.2 (m)**

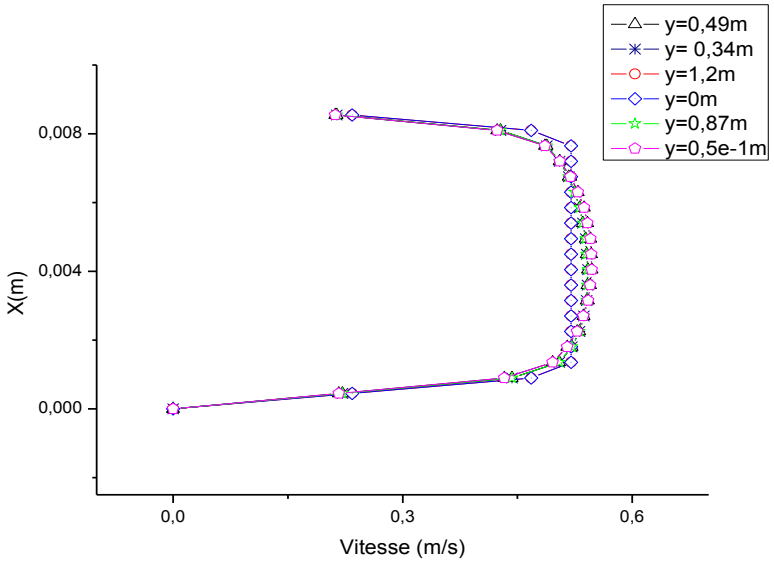


Y=0(m)

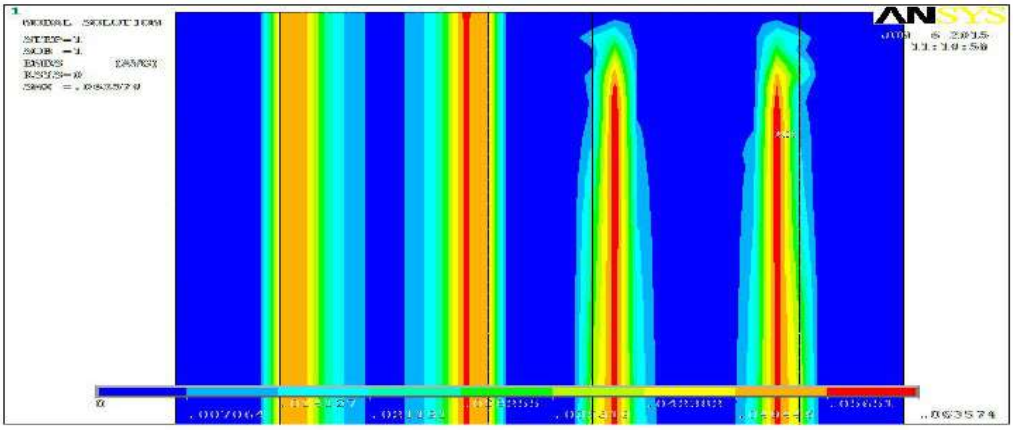


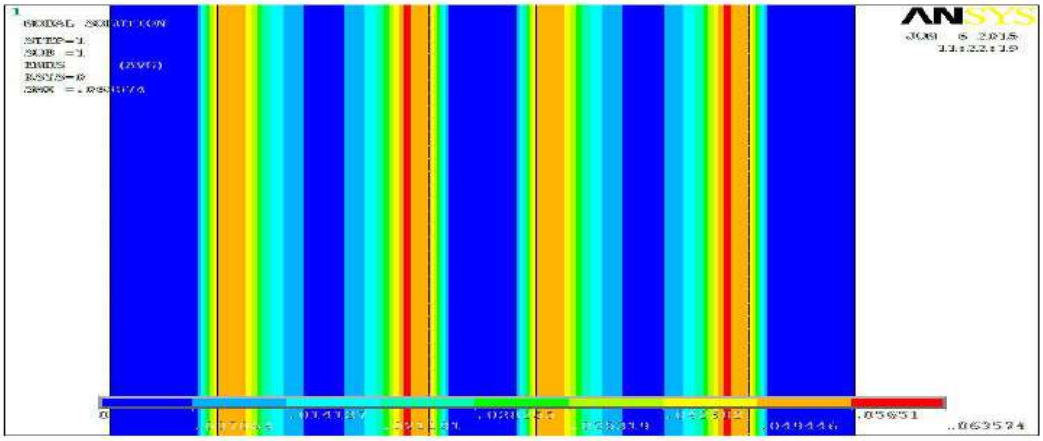
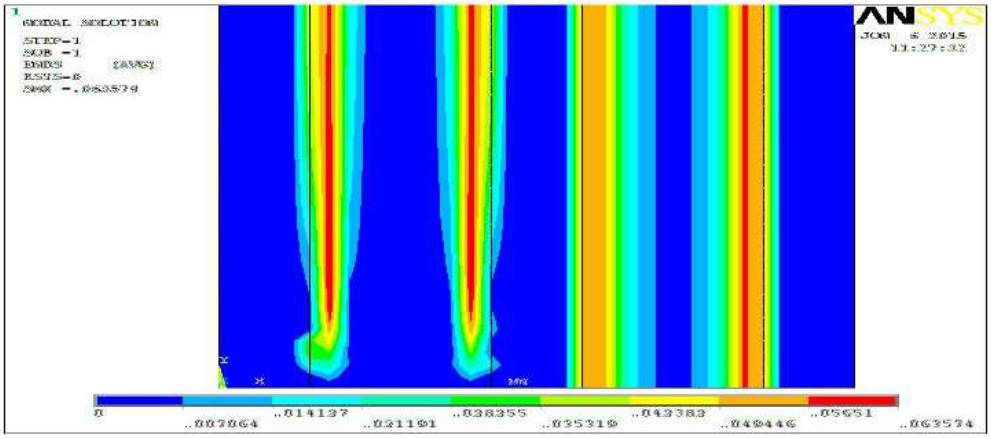
Les vitesses dans un même graphe

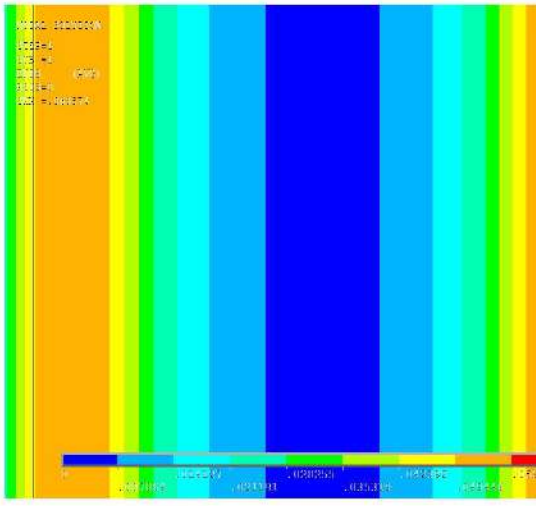
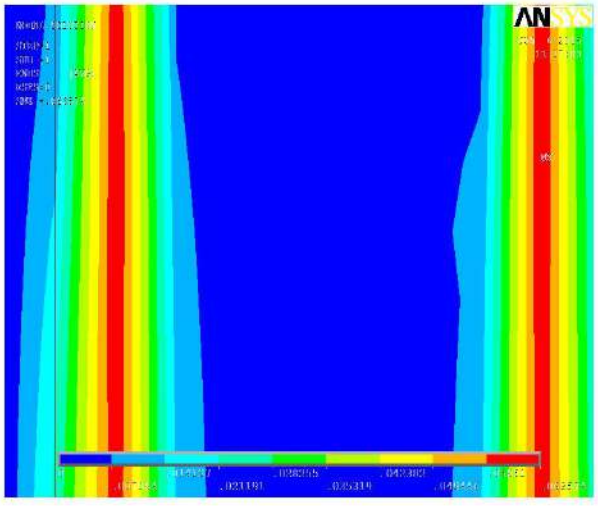
Coté eau

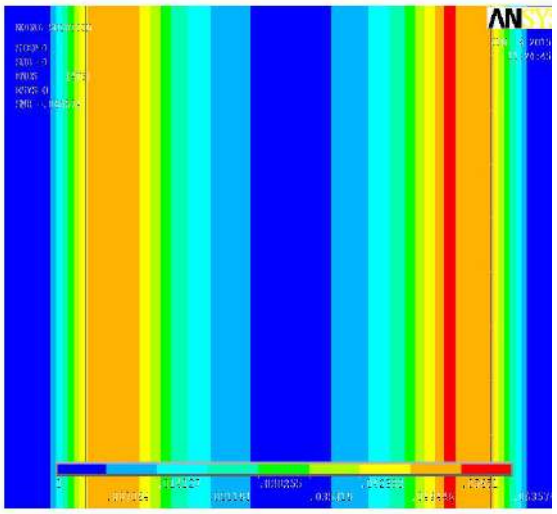
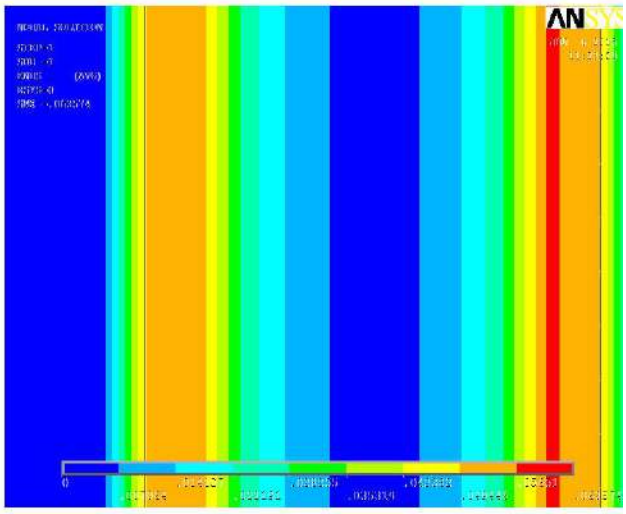
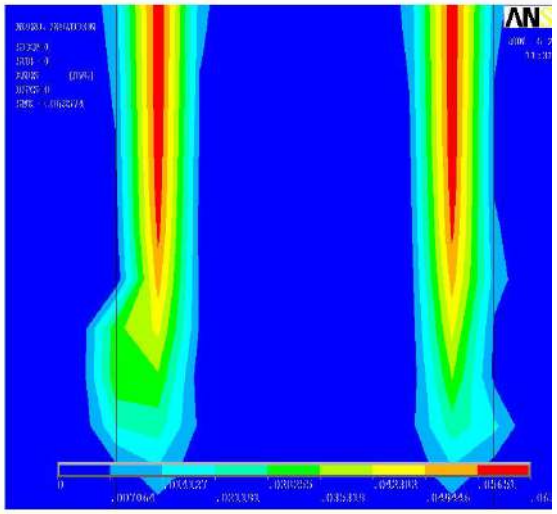
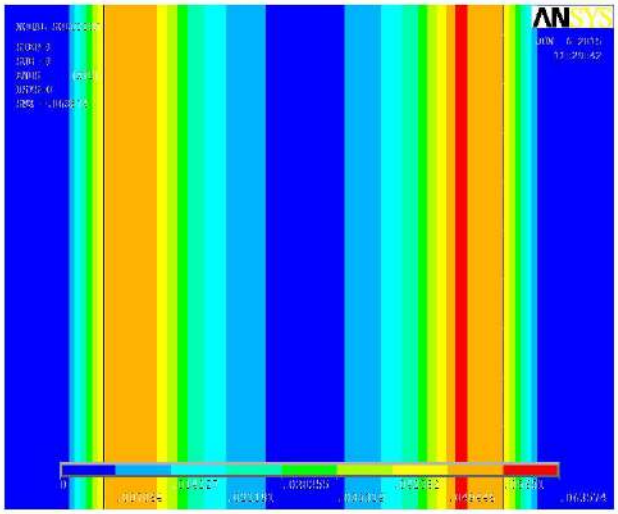


1.3 Le profil de facteur de l'énergie cinétique de dissipation

	Les deux cotés
En haut	

Au milieu	
En bas	

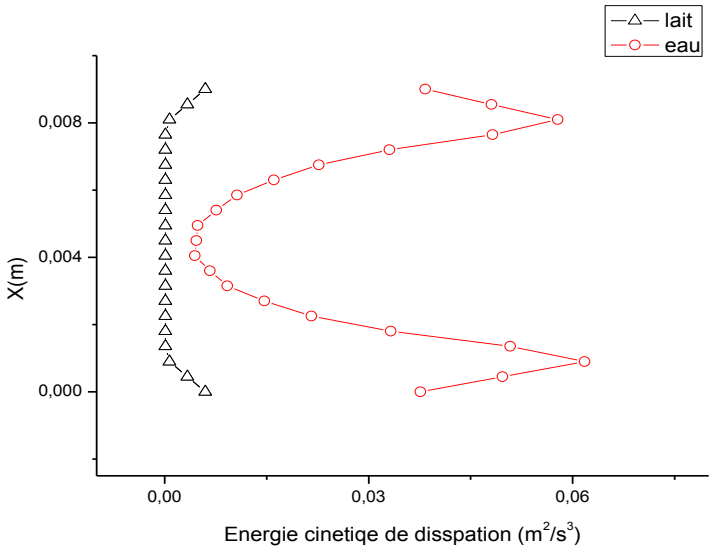
	Coter eau	Coter lait
En haut		

Au milieu		
En bas		

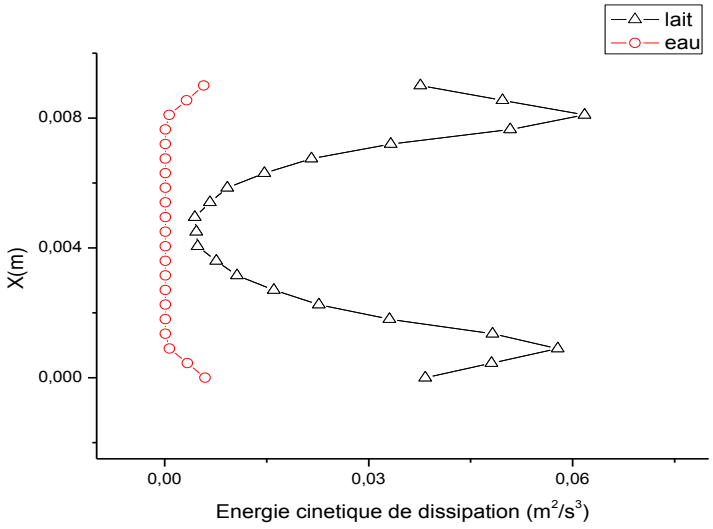
La variation de facteur de dissipation de l'énergie cinétique à la longue de canal

L'évolution du profil de facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulent en fonction de la largeur (x) du canal est représentée les graphes suivantes et ce pour différentes longueurs du canal (Y).pour l'eau et lait

Y=1.2m

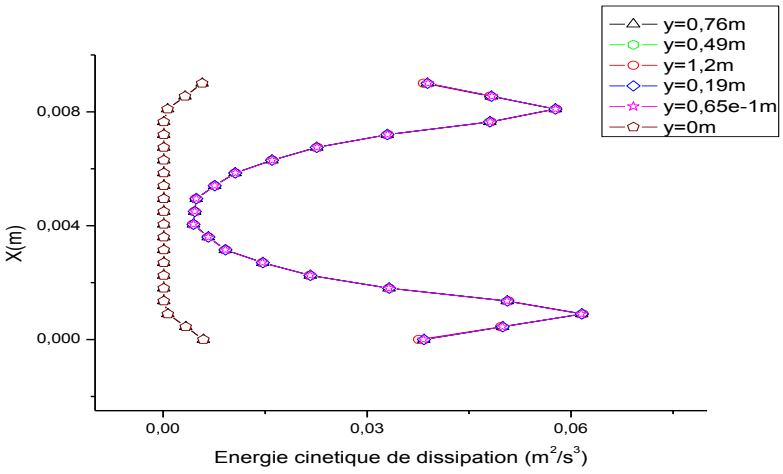


Y=0m



Les énergies de dissipation dans un même graphe

Coté eau



Les démentions de l'échangeur à plaque simulé au programme ansys avec encrassement

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

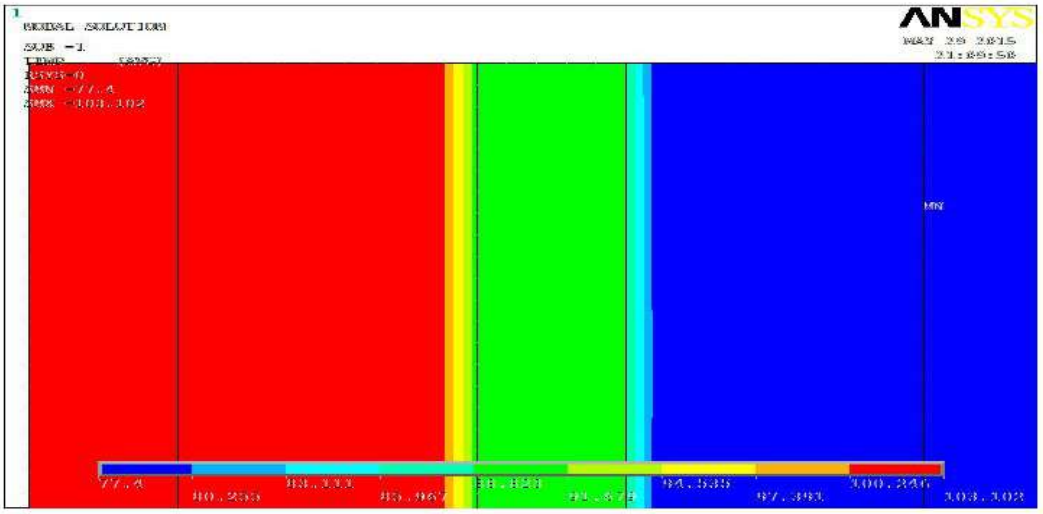
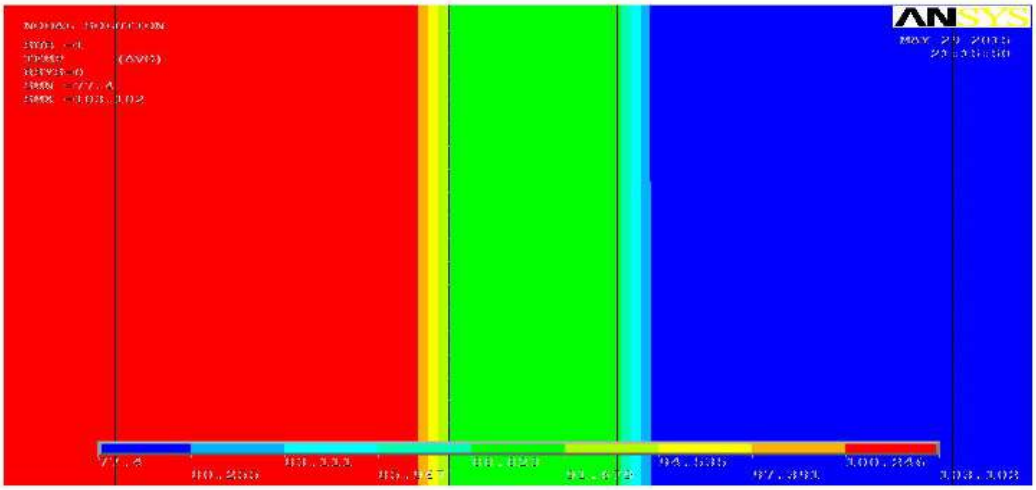
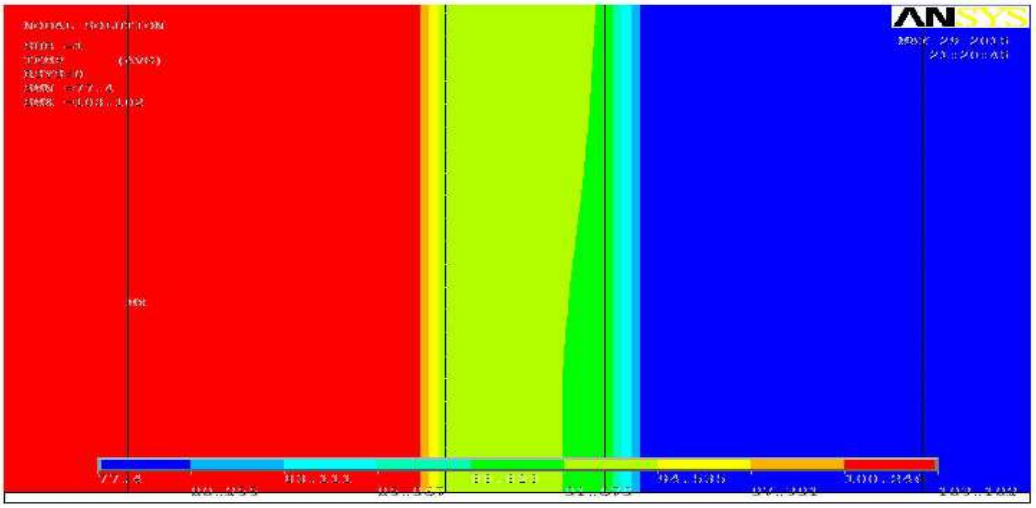
e = le diamètre de plaque = 0.0045 m
d = diamètre hydraulique =diamètre entre les deux plaque = e*2=0.0045*2=0.009 m

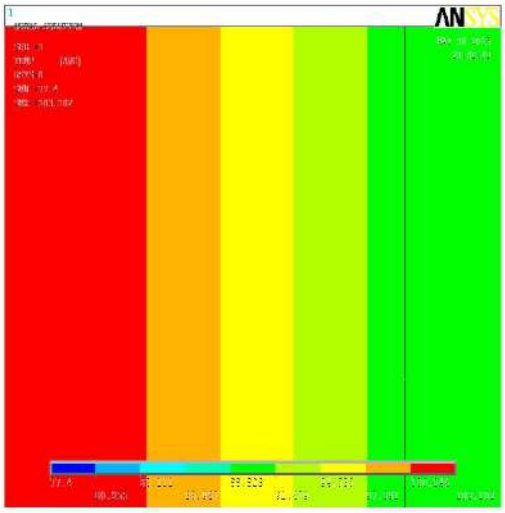
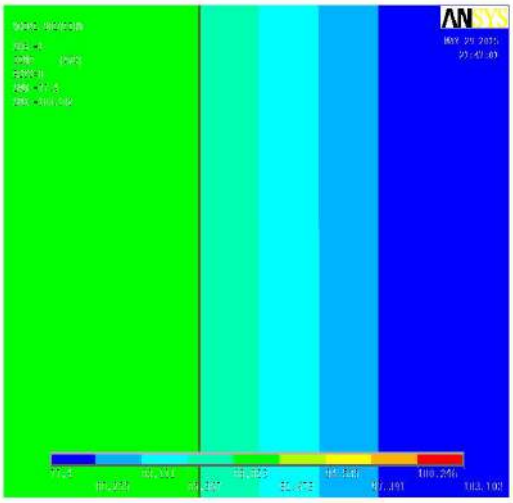
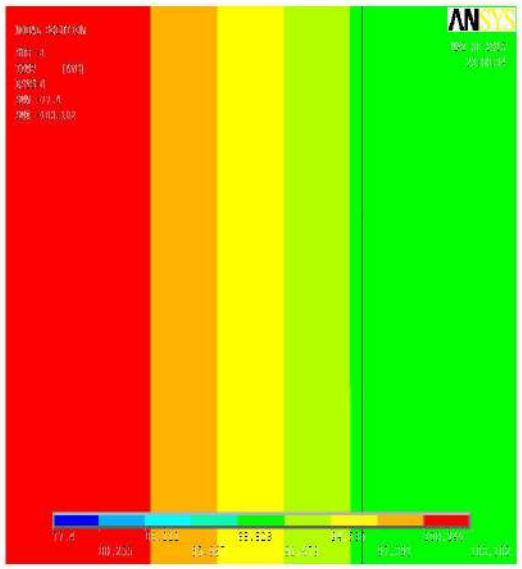
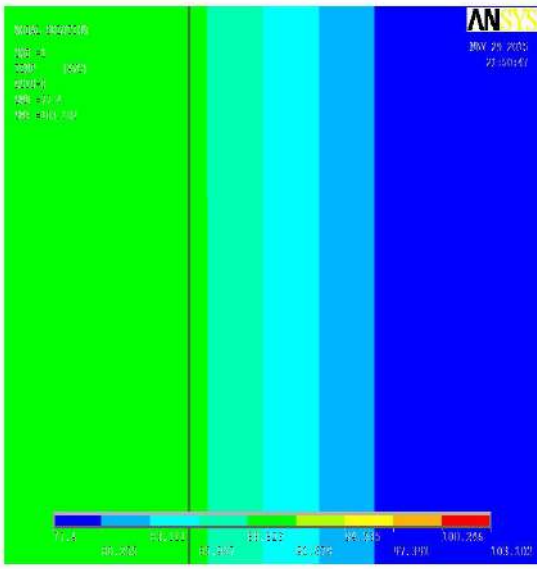
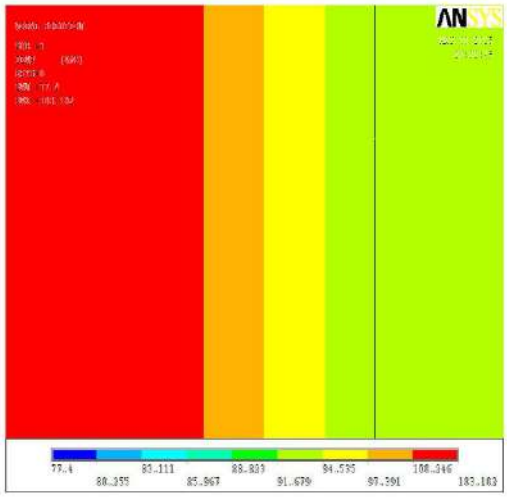
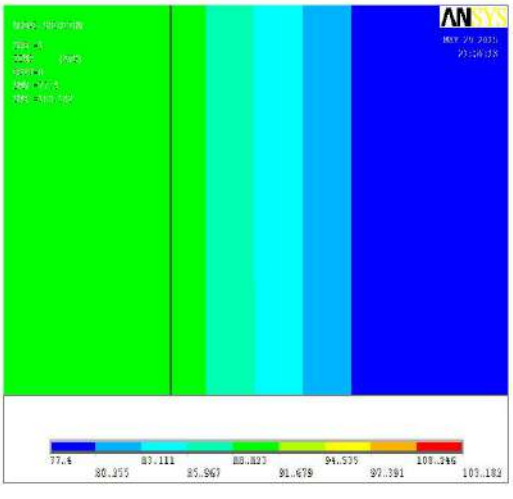
		Paramètre du lait	Paramètre du l'eau	Paramètre d'aluminium
Chaleur spécifique CP		3912	4037.24	900
Masse volumique		1001.34	983.84	2700
Viscosité		0.000604	0.00033	/
Conductivité		0.642	0.68	237
Condition au limite	vitesse	-0.52	0.52	/
	température	77.5	103	/
	pression	0	0	/

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

II. LES RESULTAT DANS UN MILIEU POREUX

II.1 profil de La température

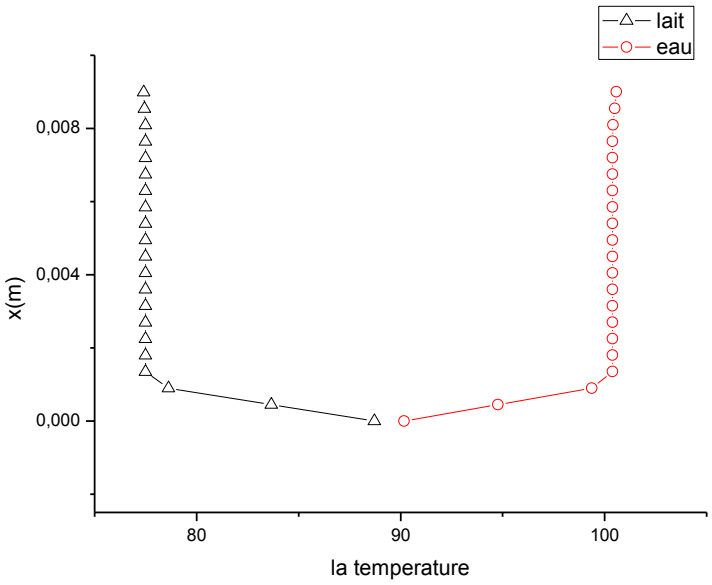
En haut	
Au milieu	
En bas	

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

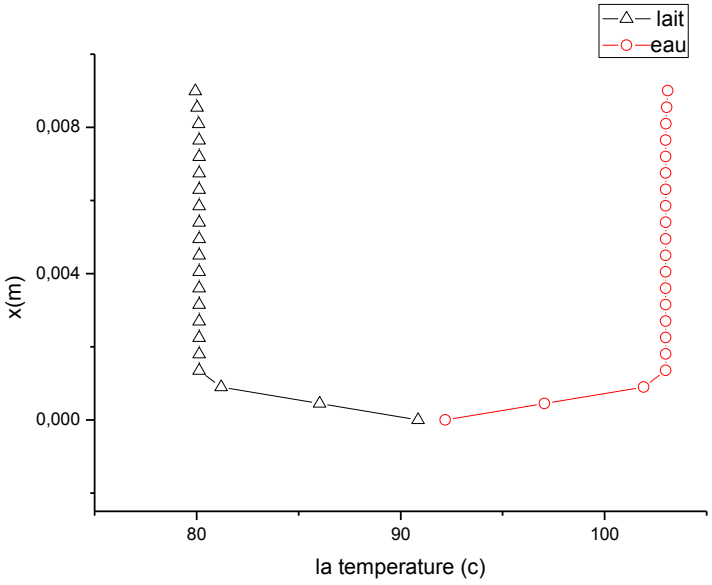
La variation de la température à la longue du canal

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

- **y=1.2 m**

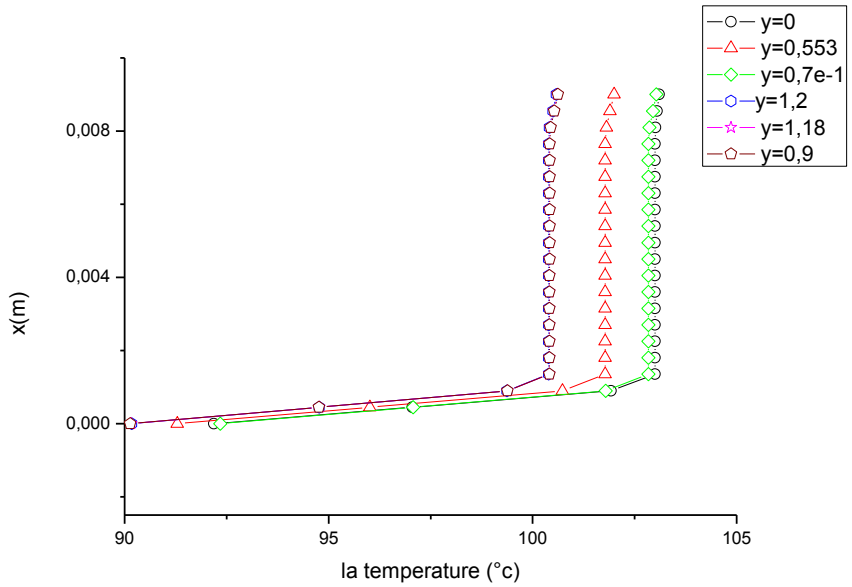


Y=0m



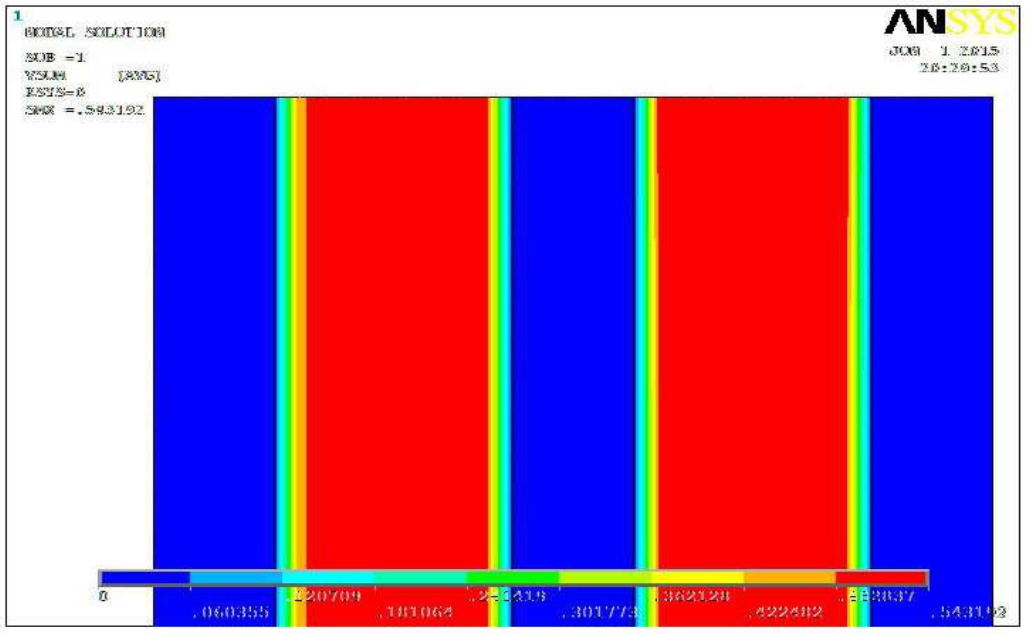
Les températures dans un même graphe

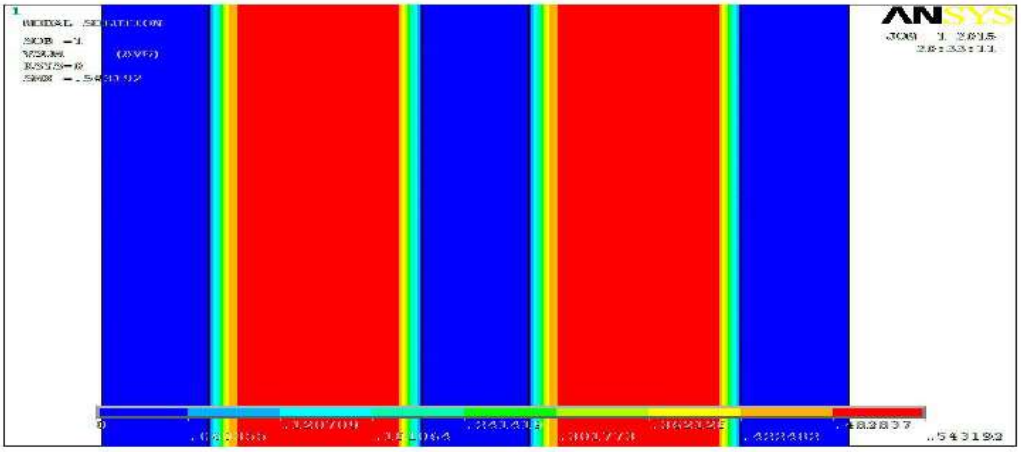
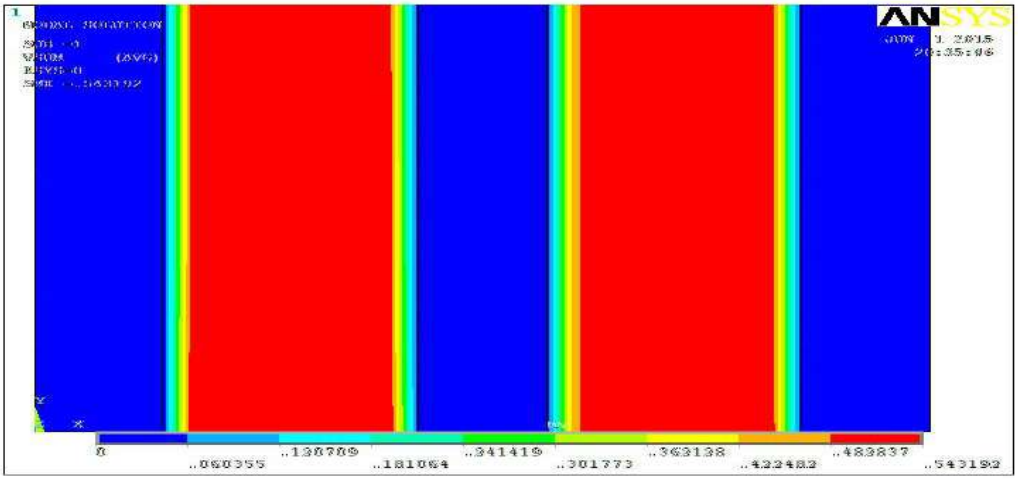
Coté l'eau

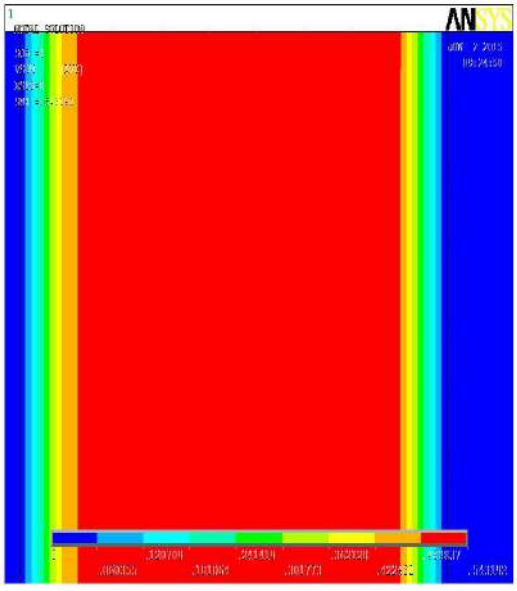
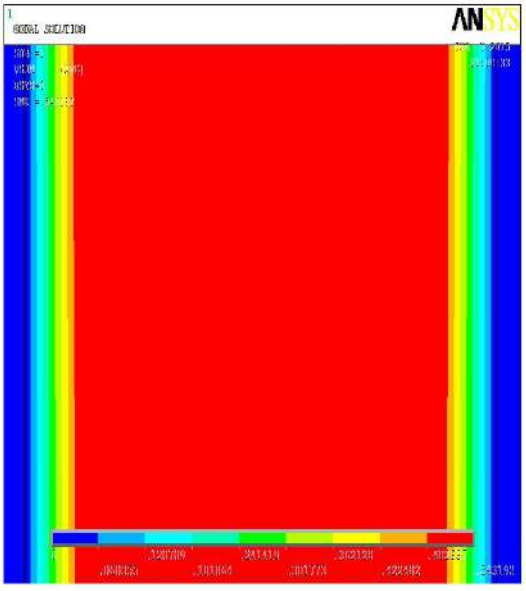


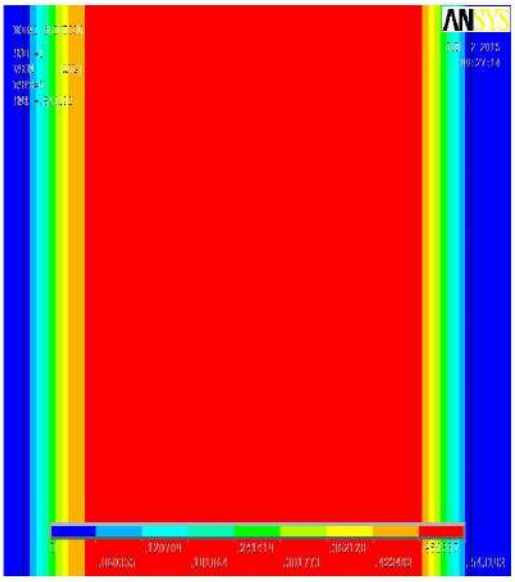
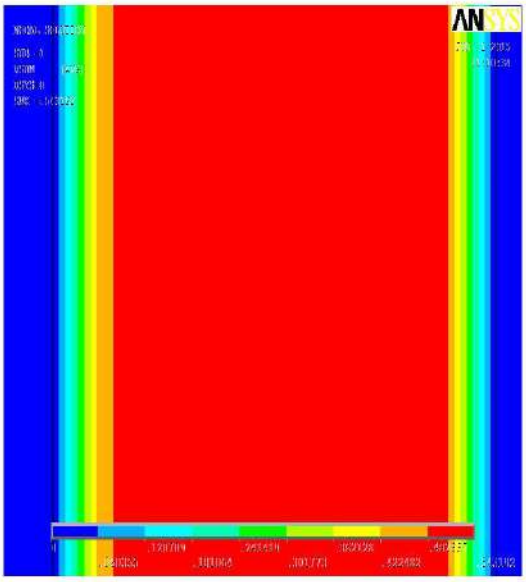
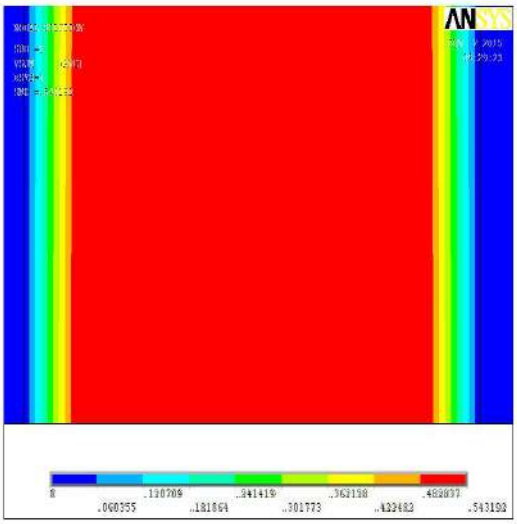
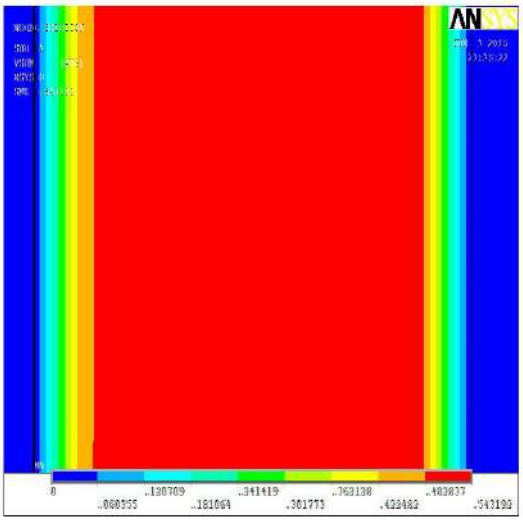
II.2 La vitesse

En haut



Au milieu	
En bas	

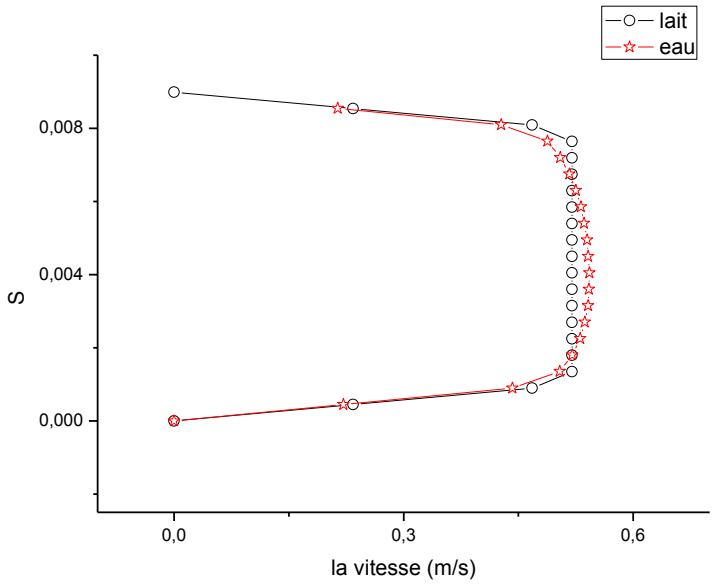
	Coté l'eau	Coté lait
En haut		

Au milieu		
En bas		

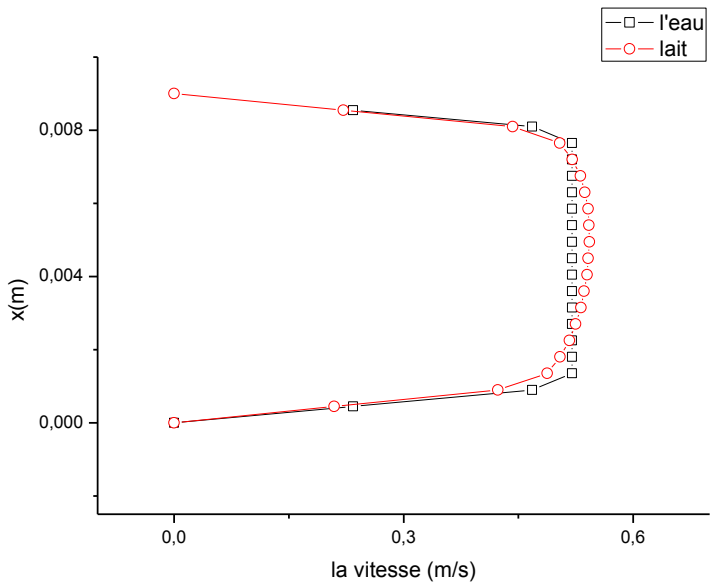
La variation de vitesse à la longue de canal

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

y=1.2m

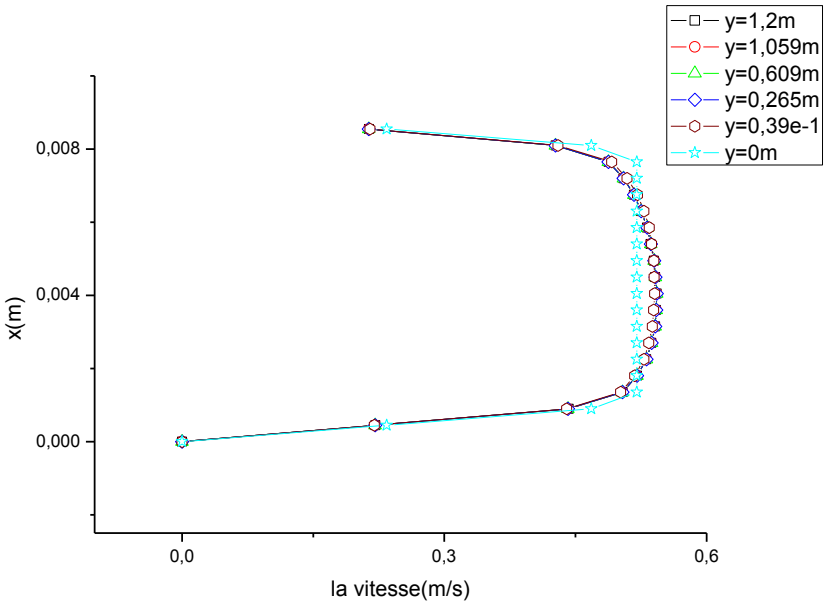


Y=0m

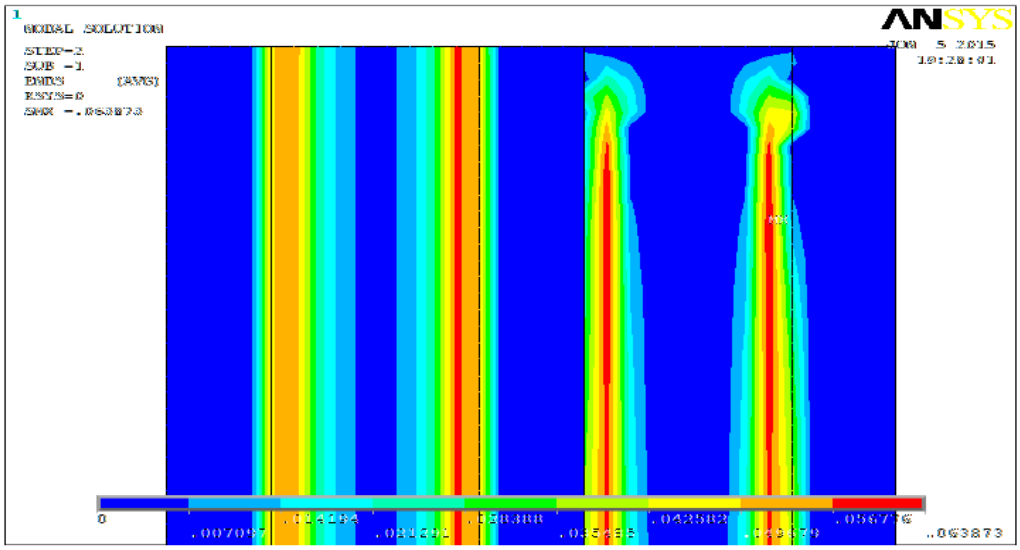


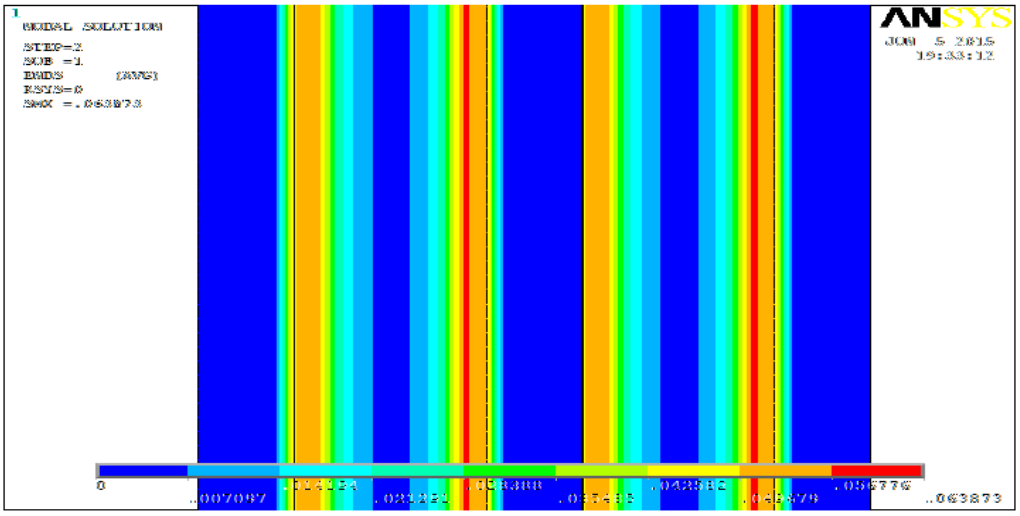
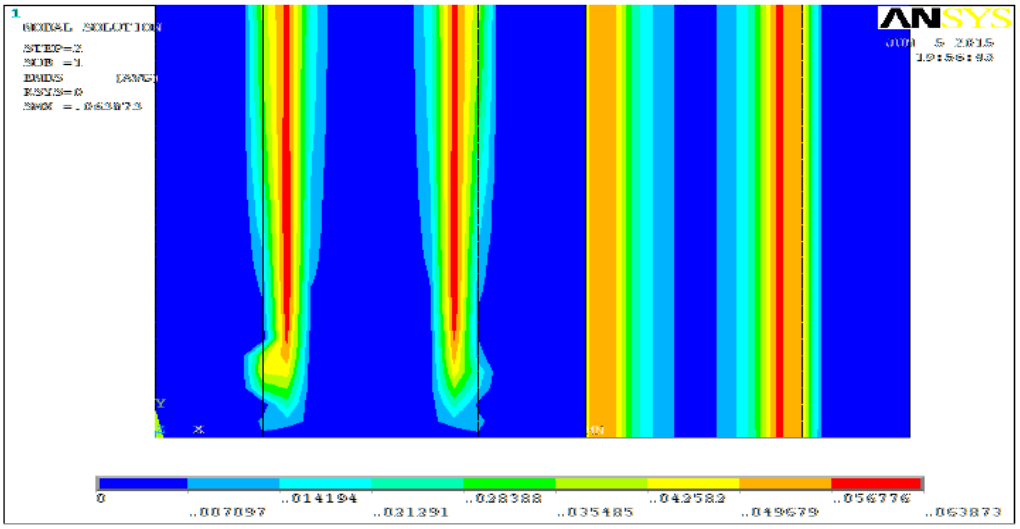
Les vitesses dans un même graphe

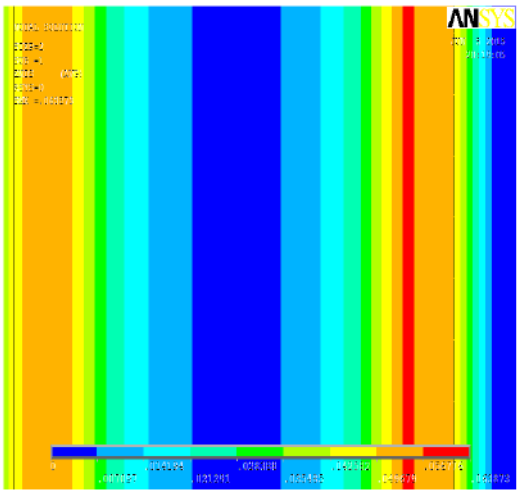
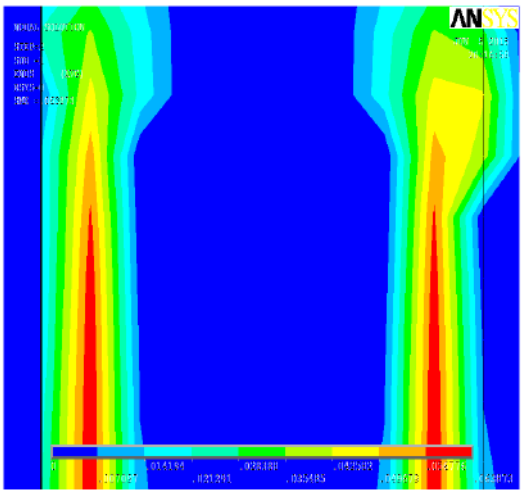
Cote de l'eau

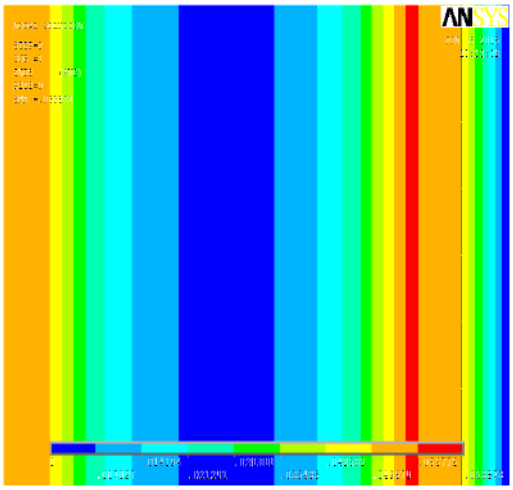
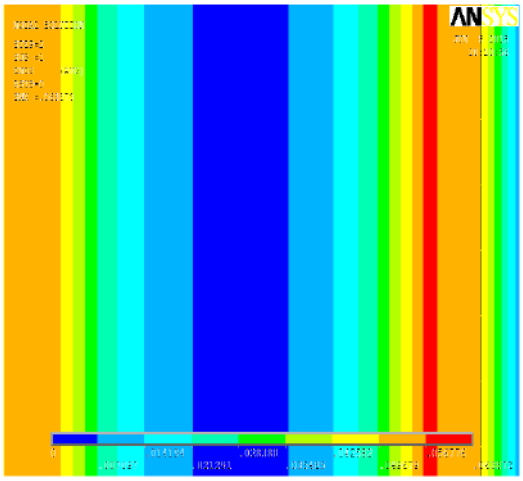
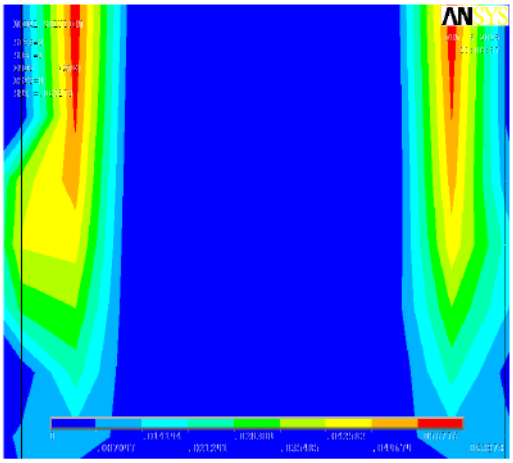
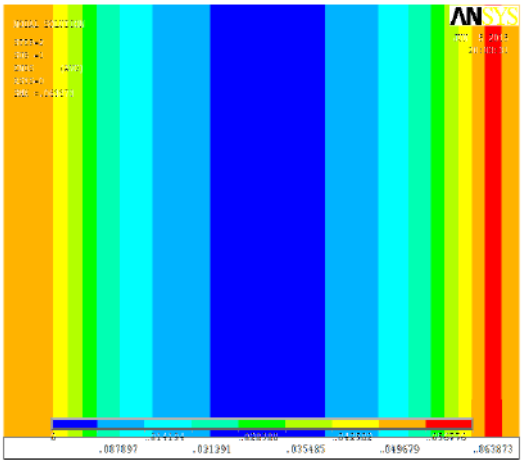


II.3 le profil de l'Energie cinétique de dissipation dan milieu poreux

En haut	

Au milieu	
En bas	

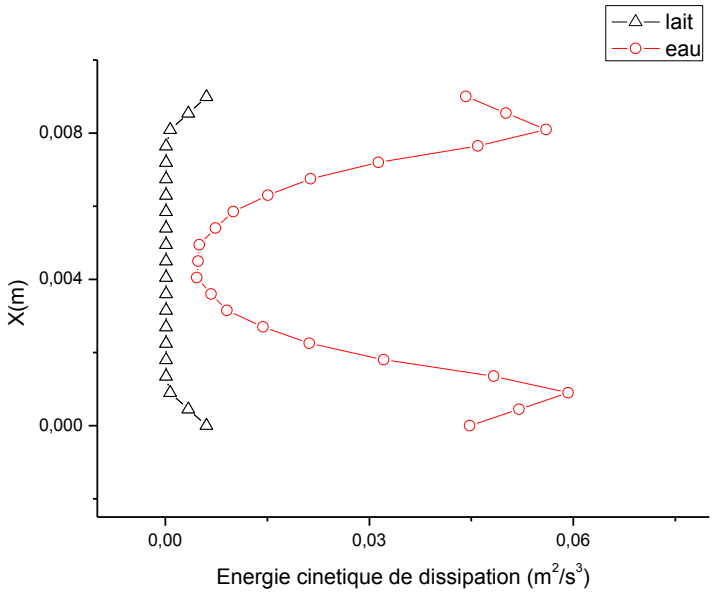
	Coté l'eau	**Coté lait**
En haut		

Au milieu		
En bas		

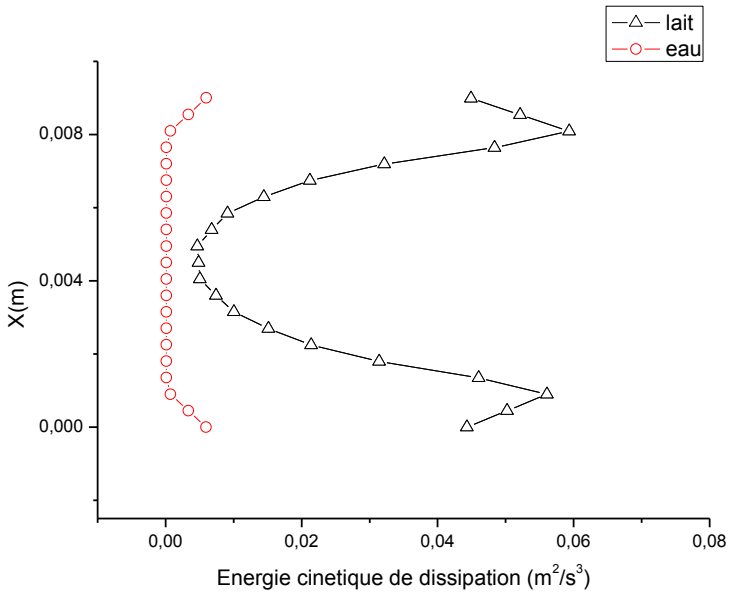
La variation de facteur de dissipation de l'énergie cinétique à la longue de canal

L'évolution du profil de dissipation de l'énergie cinétique en fonction de la largeur (x) du canal est représentée sur les graphes suivantes et ce pour différentes longueurs du canal (Y).pour l'eau et lait

Y= 1.2m

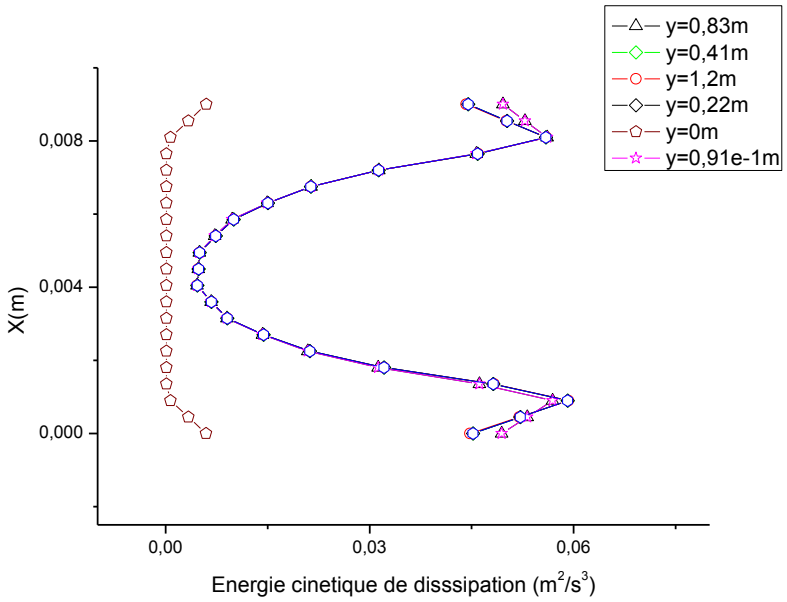


Y=0m



Les facteurs de dissipation de l'énergie dans un même graphe

Pour l'eau

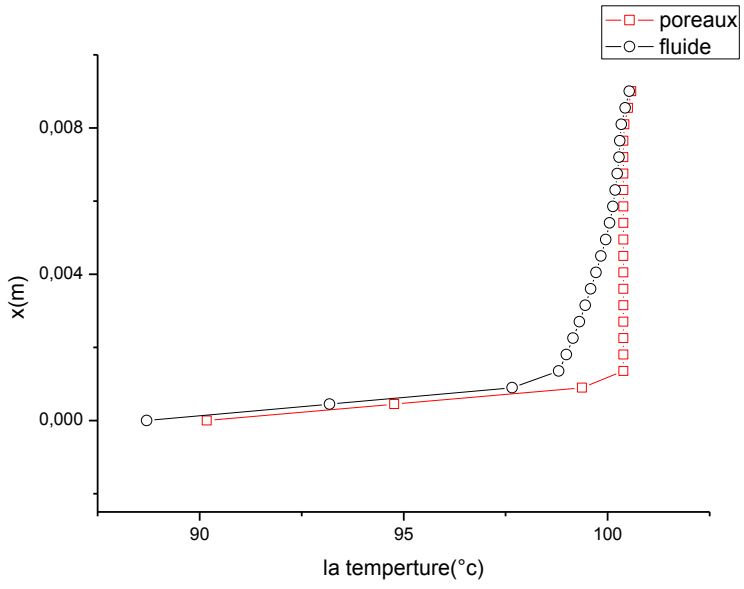


III. ETUDE COMPARATIVE ENTRE LE MILIEU FLUIDE ET LE MILIEU POREUX

III.1 Le profil de températures

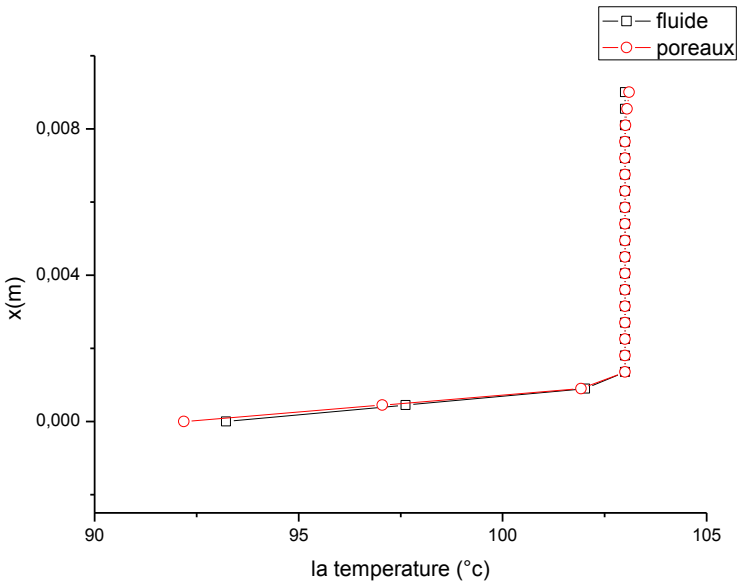
y=1.2m

Cote de l'eau



Y=0

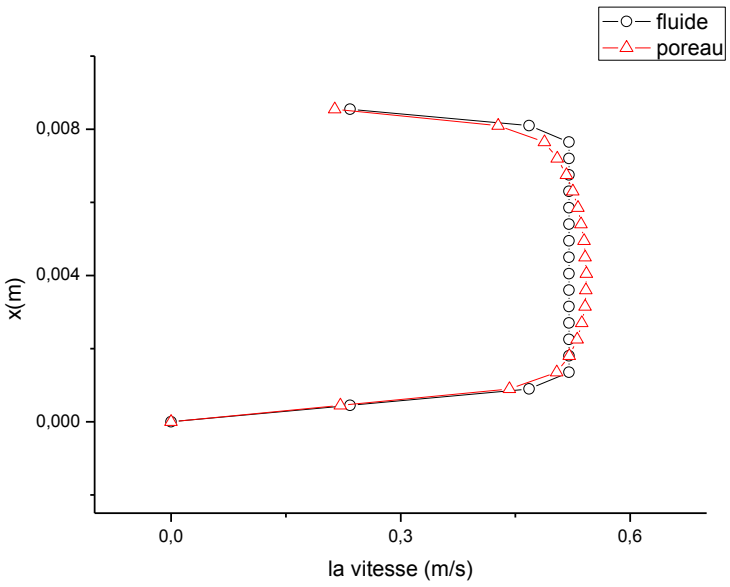
Cote de l'eau



III.2 Le profil de vitesses

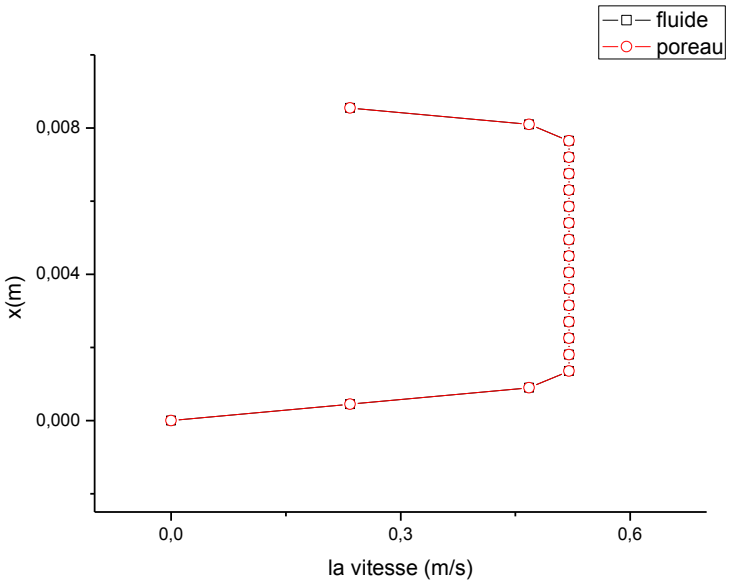
Y=1.2m

Cote de l'eau



Y=0

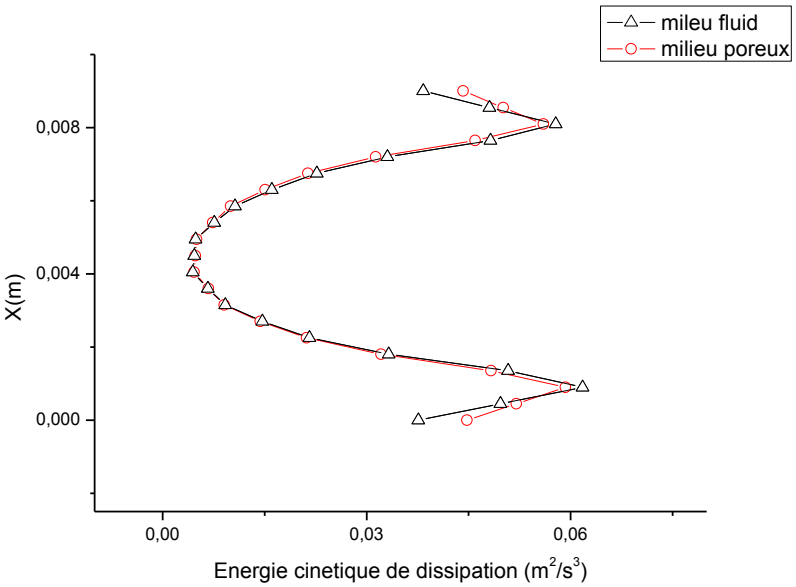
Cote de l'eau



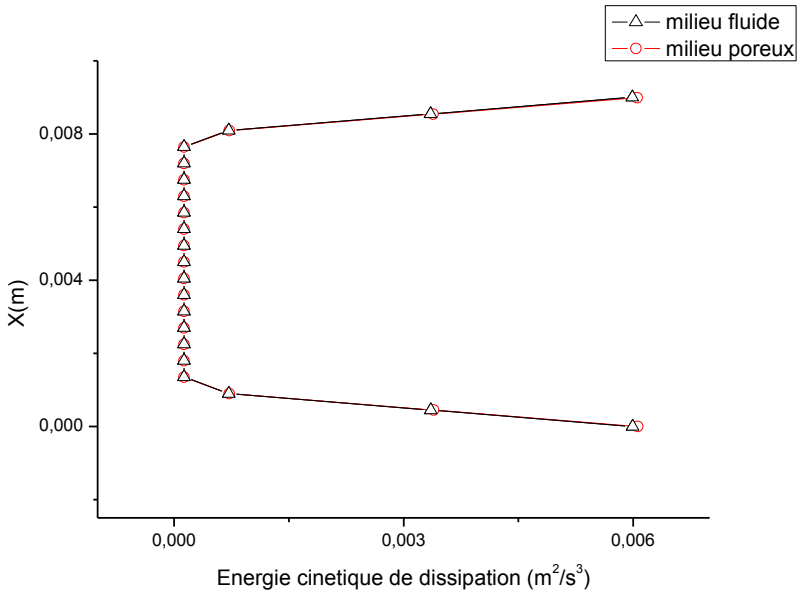
III.3 le facteur de l'énergie cinétique de dissipation

Y=1.2m

Coté l'eau

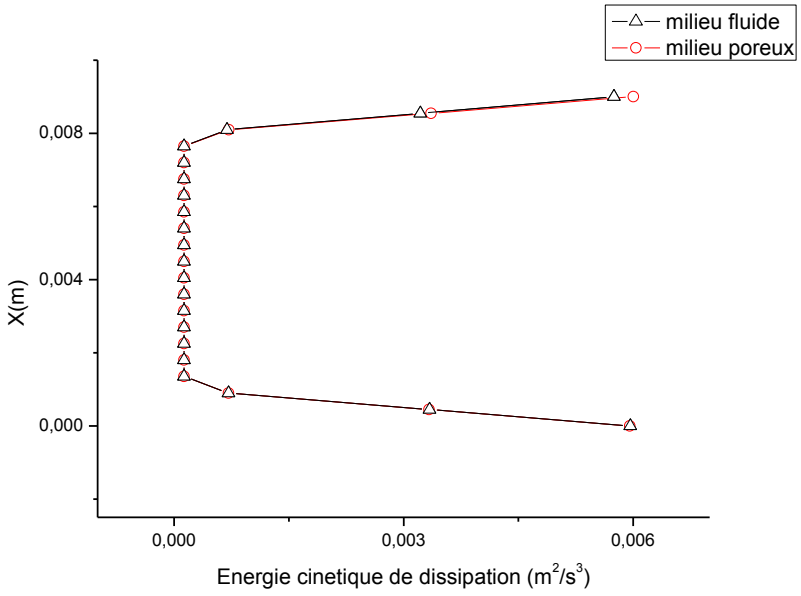


Coté lait

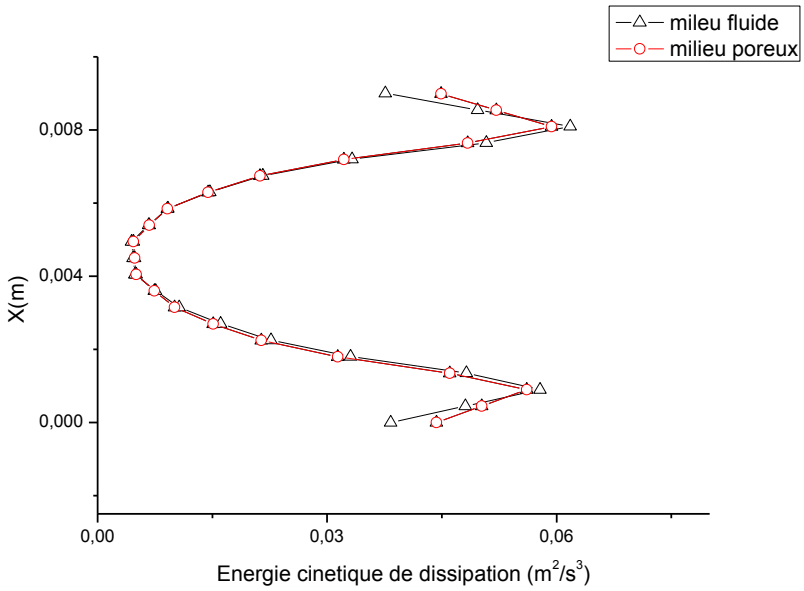


Y=0m

Coté l'eau



Coté lait


mileu fluide
milieu poreux
0,008
0,004
0,000
X(m)
0,00
0,03
0,06
Energie cinetique de dissipation (m²/s³)