République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université de Médéa

Faculté des Sciences et de la Technologie



Mémoire

Présenté pour obtenir le diplôme de Master

En chimie

Spécialité : Normes et contrôle de qualité

Par :

Etudiant 1 : RAHICHE Saida
Etudiant 2 : TOUATI khadidja

Thème :

Exploitation et Analyse des Résultats Numériques de L'étude de L'encrassement Des Echangeurs de Chaleur Par Le Lait Par Un Programme ANSYS

Soutenue publiquement le : 05/06 /2016, Devant le jury composé de :

Dr Mohamed Tir	*Grade : MCB*		*Président*
Mr Saïd Bitam	*Grade : MAA*	*Etablissement:Univ-de Médéa*	*Examinateur*
Mr Ridha Alouaoui	*Grade : MAA*	*Etablissement:Univ-de Médéa*	*Examinateur*
Mr Mahdi Yousef	*Grade : MCB*	*Etablissement:Univ-de Médéa*	*Encadreur*

Année universitaire : 2015-2016

REMERCIMENT

nous remercions Dieu le tout puissant, le Miséricor dieux, de m'avoir donné le courage, la force, la santé et la persistance et de m'avoir permis de finaliser se travail dans de meilleurs conditions.

Nous exprimons mos remerciements et nos gratitudes À Mr. Mahdi Youcef, pour n'avoir guide et encourage pendant toute la durée de nos travail, ainsi qu'a la confiance qu'elle nous a attribue tout au long de nos étude.

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

Nous tenons à remercier aussi les membres de jury : le président Dr Mohamed Tir, les examinateurs Mr Saïd Bitam et Mr Ridha Alouaoui

Nous remercions 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 surtout les enseignants de la spécialité Norme et Contrôle de Qualité de l'université de Yahia Farés Médéa.

Année Universitaire 2015/ 2016

Dédicaces

Je remercie le bon dieu de m'avoir donné le

courage pour réaliser ce travail et la patience pour

aller jusqu'au bout du parcours de mes études.

Je dédie du plus profond de mon Cœur ce manuscrit:

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

A ma chère mère qui a toujours été la pour moi, je la remercie

pour ses encouragements et son soutien. Que dieu leurs accorde une longue vie.

A mes frères, Anouar, Mohamed, Hocine et Boubaker .

A mes sœurs Djamila et Hadda.

A mon binôme et fidele amie Saida, je la remercie d'avoir était présente à

chaque moment de ma vie.

A tous mes chères amis et surtout: Hafidha , Wafa , Samia, Fatoum, Ahlem ,Dalila , Souad ,

Aldjia, Fadhila ,Djamila et Abir .

Et en fin à tous mes amis de prés ou de loin.

Et A tout les étudiants M2 NCQ

Khadîdja

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail……

A celle qui a inséré le goût de la vie et le sens de la Responsabilité, a la lumière de ma vie, la flamme de ma cœur la source de mes efforts, ma vie et mon bonheur, Que dieu leur procure bonne santé et longue vie *A toi ma mère*

A celui qui a été toujours la source d'inscription et de courage, A mon soutien moral et la source de joie et bonheur, mon exemple éternel, Je prie pour que Dieu me garde.

A toi mon père

A tout ma famille, mes frères *Aissa et son épouse Fatima, Mofteh , Ahmed mes sœurs Zohra et Hanane*
Je dédie spécialement ce travail A mon bon frère Massoud.

A tout mes neveux Anes, Adam et surtout SIF El-Dinne et Fouad
A tout mes tontons , mes tontes et un spéciale dédicace pour les deux filles de ma tonte Hamida et Fayza et fille de m'oncle Zahia.

A tout mes amis : Hanane, Razika, Nassima , Zahra, Samia, Houria,Rbiha ,samia, Fatoum, Djamila, Fadila et mes amis de prés ou de loin.

A mon binôme Khadidja

En fin , Pour tous ceux qui étaient à l'appui de moi dans ce travail,
Et A tout les étudiants ***M2 NCQ***

Saida

الملخص

إن اتساخ أجهزة التبديل الحراري هو مشكل اقتصادي يؤرق الصناعيين منذ مدة, هذا المشكل عموما يتضح بفقدان الجودة الصناعية. يتناول هذا العمل دراسة النمذجة وتحليل النتائج لظاهرة الترسب في المبادلات الحرارية ذات اللوحات من الحليب خلال مرحلة البسترة. نقدم الصياغة الرياضية للتدفق المضطرب المستمر للوحتين مسطحتين مع وبدون الترسب مع نموذج إغلاق K-ε . وقد تم تعيين معادلات المحفوظات والشروط المعمول بها في الحل العددي . هذه الدراسة تُعنى بتغيرات درجة الحرارة, السرعة, الطاقة الحركية المضطربة للتبديد مع وبدون الترسبات . في وجود الترسبات أظهرت النتائج انخفاضا في درجة الحرارة وعامل تبديد الطاقة الحركية المضطربة والعكس صحيح بالنسبة للسرعة.

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

RESUME

L'encrassement dans les échangeurs de chaleur est un problème économique qui tourmente les industriels depuis longtemps. Il se traduit par une perte de performances assez importante.

Ce travail porte sur l'étude de la simulation et l'analyse des résultats numérique de phénomène de l'encrassement dans les échangeurs de chaleur à plaque par le lait lors d'une phase de traitement thermique appelé pasteurisation. Nous présentons la formulation mathématique en régime stationnaire d'un écoulement turbulent entre deux plaques planes avec et sans encrassement à l'aide du modèle de fermeture κ–ε .On a établie les équations de conservations et les conditions applicables pour la résolution numérique. Cette étude concerne la variation de la température, la vitesse et l'énergie cinétique de dissipation turbulente avec et sans encrassement pour un ensemble des résultats. En présence de l'encrassement les résultats montrent que la température et le facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulent diminués, l'inverse pour la vitesse.

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

ABSTRACT

The fouling in heat exchangers is an economic problem which has been damaging the industries for a long time . It is generally expressed by the important loss of performance . This work focuses on the simulation study and analysis of numerical results of the fouling phenomenon in the plate heat exchangers by the milk during a heat treatment step called pasteurization. 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. Overall, this study concerns the variation of the temperature, velocity and turbulent dissipation of kinetic energy with and without fouling.

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

SOMMAIRE

Remercîment

Dédicace

Résumé

NTRODUCTION GENERALE 1

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

I.1. LE LAIT 3

I.1.1. Définition 3

I.1.2. la consommation du lait 3

I.1.3. Propriétés physico-chimiques du lait 4

I.1.4. Compositions du lait 5

I.1.5. Qualité Organoleptique du lait 6

I.2. Les Produits dérives du lait 8

I.2.1. La crème et le beurre 8

I.2.2. Les fromages 9

I.2.3. Le yaourt 9

I.3. Principales catégories de traitement thermique dans l'industrie laitière 10

I.3.1. Thermo résistance des bactéries et des microorganismes 10

I.3.2. Procédés de traitement thermique 11

I.3.3. Le lait pasteurisé 11

I.3.4. Le lait stérilisé 12

I.3.5. Le lait cru..... 12

I.3.6. Le lait fermenté 12

I.3.7. Le lait aromatisé 13

I.3.8. Le lait en poudre 13

I.4. Mise en Ouvre de La Pasteurisation..... 14

I.4.1. Objectifs..... 14

I.4.2. Pasteurisation en mode discontinu : dite aussi « batch » 14

I.4.3. Pasteurisation en mode continu 15

Chapitre II : LES ECHANGEURS DE CHALEUR & ENCRASSEMENT

II .1. NOTIONS GENERALES SUR LES ECHANGEURS..... 16

II.1.1. Définition..... 16

II.1.2. Principe de fonctionnement 16

II .1.3. Modes de transferts thermiques 16

II.1.4. Principaux modes d'écoulement des deux fluides …..... 17

II.1.5. Différents types d'échangeurs de chaleurs utilisés en industrie agroalimentaires..... 19

II.1.5.1. Echangeurs à plaques 19

II.1.5.1.1. Définition..... 19

II.1.5.1.2. Principe 22

II.1.5.1.3. Avantages et inconvénients de l'échangeur à plaques..... 22

II.1.5.2. les échangeurs tubulaires 23

II.2. NOTIONS SUR L'ENCRASSEMENT DES ECHANGEURS 24

II.2.1. Introduction 24

II.2.2. Phénomène d'encrassement 25

II.2.3. Type d'encrassement 25

II.2.4. Apparition et développement de l'encrassement 27

II.2.4.1. Mécanisme de l'encrassement 27

II.3. Encrassement de lait 28

II.3.1. Revue bibliographique 28

II.3.2. Modèles et mécanismes d'encrassement par le lait 29

II.3.3. Encrassement par cristallisation 30

CHAPITRE III : MODELISATION ET SIMULATION DE L'ENCRASSEMENT

III.1. INTRODUCTION 31

III.2. CYCLE DE PRODUCTION 31

III.2.1. Les étapes de production..... 32

III.2.2. Le cycle de vapeur 33

III. 3. MODELE THERMIQUE DE L'ECHANGEUR A PLAQUE..... 33

III.3.1. introduction..... 33

III.3.2. Formulation mathématique du problème 34

III.3.2.1. Introduction 34

III.3.2.2. Modélisation de la turbulence dans un milieu totalement fluide 35

III.3.2.2.1. Les hypothèses 35

III.3.2.2.2. Equations de conservation..... 36

III.3.2.3. Modélisation de la turbulence dans un milieu poreux 36

III.3.2.3.1. Modèle générale 36

III.3.2.3.2. Conditions initiales et aux limites ..... …38

III.3.3. Calcul du coefficient de transfert de chaleur global 40

III.3.4. Calcul des paramètres à mesurer du mélange (lait) 41

III.3.5. Calcul des paramètres à mesurer de l'eau chaude..... 43

III.4.PROGRAMME ANSYS……...44

III.4.1. INTRODUCTION 44

III.4.2. PRINCIPES FONDAMENTAUX D'ANSYS 44

III.4.2.1. Définition d'ANSYS 44

III.4.3. Les points forts des outils ANSYS 46

Chapitre IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1. INTRODUCTION 47

IV.2. LES PROFILS DANS UN MILIEU COMPLETEMENT FLUIDE .. 48

IV.2.1. Profil de température 48

IV.2.2. Profil de vitesse 48

IV.2.3. Profil du facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulent . 49

IV.3. LES PROFILS DANS UN MILIEU AVEC UN DEPOT..... 50

IV.3.1. Profil de la température 50

IV.3.2. Profil de la vitesse 51

IV.3.3. Profil du facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente avec un milieu poreux 52

IV.4. ETUDE COMPARATIVE ENTRE LE MILIEU FLUIDE ET LE MILIEU POREUX 52

IV.4.1. Profil de la température 52

IV.4.2. Profil de vitesse 53

IV.4.3.7. profil du facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente 54

CONCLUSION GENERALE 56

Références Bibliographiques

Annexes

Liste des figures et tableaux

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

Tableau I.1 : Les propriétés physico-chimique du lait de vache……..4

Tableau I.2 : Composition typique du lait de vache……..6

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

Figure I.1 : Composition globale du lait……5

Figure I.2 : Dispositif de chauffage du lait en cuve agitée à double enveloppe……..14

Figure I.3 : Schéma général d'une installation de traitement thermique en contenu……...15

Chapitre II : LES ECHANGEURS DE CHALEUR & ENCRASSEMENT

Figure II.1 : Evolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire Co-courant……...17

Figure II.2 : Evolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire ou à plaques à contre courants…….....18

Figure II.3 : Schéma de deux types d'échangeurs à courants croisés……..19

Figure II.4 : Schéma d'échangeur à plaque…….20

Figure II.5 : Détail plaque d'échange avec joint d'étanchéité……..21

Figure II.6 : Représentation schématique de l'encrassement dans le cas d'un liquide……..28

CHAPITRE III : MODELISATION ET SIMULATION DE L'ENCRASSEMENT

Figure III.1 : Cycle de Pasteurisation du Lait…….33

Figure III.2 : Arrangement des plaques de l'échangeur de pasteurisation et sens de circulation des fluides……...34

Figure III.3 : Schématisation de la direction de l'écoulement entre deux plaques…….41

Figure III.4 : L'interface utilisateur graphique d'ANSYS (GUI)……45

Chapitre IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Figure IV.1 : Ecoulement dans un canal à section rectangulaire…….....47

Figure IV.2 : Variation du profil de température dans lait……..48

Figure IV.3 : Variation du profil de vitesse à la longue de canal……49

Figure IV.4 : Variation du facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente……...49

Figure IV.5 : La variation de la température à la longue de canal……...50

Figure IV.6 : Variation du profil de vitesse…….51

Figure IV.7 : Facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente avec un milieu poreux……52

Figure IV.8 : Evolution de la température avec et sans dépôt ……...53

Figure IV.9 : Evolution de la vitesse avec et sans dépôt……54

Figure IV.10 : Evolution du facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente avec et sans dépôt……..55

NOMENCLATURE

1. SYMBOLE DES LETTRES

Symbole	Définition	Unité
A	Surface d'échange de chaleur	m^2
A	Protéine agrégats	-
a	Diffusivité thermique	m^2/s
C	La concentration	Kg/m^3
Cp	Chaleur spécifique	J/Kg°C
D	Diamètre	m
d_e	Diamètre hydraulique	m
dp	Diamètre des particules	m
D	Protéine dénaturé	-
e	Epaisseur de la plaque	m
eff	efficacité	%
f	fraction de la masse déposée qui pénètre dans le milieu poreux	%
J	Rapport des viscosités	-
H	Hauteur du canal	m
h	Coefficient de transfert de chaleur du fluide	$W/m^2°C$
K	Conductivité thermique de l'eau	W/m °C
K	Perméabilité du milieu poreux	m^2
L	Longueur d'une plaque	m
m	Masse des particules	Kg
m_d	La masse déposée par unité de surface	Kg/m^2
Nu	Nombre de Nusselt	-
N	Protéine native	-
p	La pression	Pa
Pr	Nombre de Prandlt	-
Q	Débit volumique	m^3/s
R_d	La résistance du dépôt encrassant	$m^2.°C/w$
R_d^*	La résistance asymptotique du dépôt encrassant	$m^2.°C/w$
Re	Nombre de Reynolds du fluide	-
S	Surface	m^2
t	Temps	s

T	Température	K
T_p	La température à la paroi	K
T_{m-s}	La température moyenne de sortie	K
u	Vitesse longitudinale de l'écoulement	m/s
U_0	Coefficient d'échange global à l'état propre	W/m^2.k
U_d	Coefficient d'échange global à l'état encrassé (dépôt)	W/m^2.k
V_f	Volume du fluide	m^3
V_t	Volume total	m^3
W	Largeur d'une plaque	m

2. SYMBOLES GRECS

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

3. LISTE D'ABREVIATIONS

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

4. INDICES

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

INTRODUCTION GENERALE

Dans les sociétés industrielles, l'échangeur de chaleur est un élément essentiel de toute politique de maîtrise de l'énergie et donc, par voie de conséquence, de protection de l'environnement. Une grande part de l'énergie thermique 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.

Dans les industries agroalimentaires une variété de traitements thermiques est utilisée un exemple typique est la pasteurisation du lait qui consiste en une opération de chauffage du produit traité. L'augmentation de la température du lait modifie certaines de ces propriétés et le rend instable. Elle n'affecte pas considérablement la composition du lait.

Le traitement thermique engendre donc un encrassement de la surface d'échange en raison de la formation de dépôt 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 phénomène d'encrassement peut être défini comme l'accumulation d'éléments solides indésirables sur les surfaces solides.

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

Le lait est un fluide alimentaire ayant un fort pouvoir encrassant. L'objectif de notre travail est déterminer les effets du dépôt encrassant formé sur l'échange thermique, Il s'agit de simuler numériquement et de résoudre en régime transitoire les équations de conservation en adoptant un modèle de turbulence à deux équations ($\kappa-\varepsilon$) et de quantifier la résistance d'encrassement au cours du temps.

Dans cette optique, ce travail est présenté de la façon suivante :

Dans le premier chapitre quelques notions sur le lait, les produits laitiers et les méthodes de traitements thermiques du lait sont présentés.

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

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

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

A la fin une conclusion est présentée.

I.1. LE LAIT

I.1.1. Définition

Le lait est un liquide alimentaire opaque, blanc mat légèrement bleuté ou plus ou moins jaunâtre, à odeur peu marquée et au goût douceâtre, sécrété, après parturition, par la lande mammaire des animaux mammifères femelles pour nourrir leur nouveau-né [1].

Le lait est riche en lactose, il est la principale source de nutriments pour les jeunes mammifères avant qu'ils puissent digérer d'autres types d'aliments, Le lait en début de lactation contient le colostrum, qui porte les anticorps de la mère afin de réduire le risque de nombreuses maladies chez le nouveau-né.

L'homme utilise le lait produit par certains mammifères domestiques comme un aliment. Dans le monde entier, les fermes laitières ont produit environ 730 millions de tonnes de lait en 2011 notamment consommées par l'Inde, l'Europe, l'Australie et les États-Unis, la Chine et la Russie.

I.1.2. la consommation du lait [2]

Le lait de chaque espèce de mammifères est particulièrement adapté à la nourriture de sa progéniture, ceux-ci consomment celui de leur mère jusqu'au sevrage, puis, hormis certains animaux domestiques, les animaux sauvages n'ont plus de leur vie l'occasion d'en consommer. Les nourrissons humains, quand leur mère ne le peut (infections, éloignement, malformations) ou ne le veut pas, peuvent être allaités par d'autres femmes appelées nourrices, être nourris au biberon par du lait humain collecté ou à défaut doivent consommer du lait animal modifié, dit « lait maternisé », ou encore, en cas d'allergie, des «laits végétaux » tels que le lait de soja. Pour extraire le lait humain, on utilise un mécanisme particulier nommé tire-lait. Il existe des lactariums (banques du lait) pour pallier ces problèmes d'approvisionnement maternel.

Les adultes de nombreuses régions du monde consomment du lait animal, plus ou moins transformé en produits laitiers (fromage, yaourts, etc.)

I.1.3. Propriétés physico-chimiques du lait

Les propriétés physico-chimiques du lait sont plus ou moins stables, elles dépendent soit de l'ensemble des constitutions comme la densité, soit des substances en solution comme le point de congélation ou encore des concentrations en ions comme le pH (acidité).

Les principales propriétés physico-chimiques utilisées dans l'industrie laitière sont la masse volumique ou la densité, le point de congélation, le point d'ébullition et l'acidité [3].

Ceci se résume comme suit :

- La densité du lait varie entre 1.028 et 1.035 pour une moyenne de 1.032 à 15°C.
- Le point de congélation peut varie de -0.530°C à -0.575°C avec une moyenne de-0.555°C .Un point de congélation supérieur à -0.530°C permet de soupçonner une addition d'eau au lait (la vérification se fait à l'aide d'une cryoscopie).
- Le point d'ébullition est à 100.5°C.
- L'acidité est de 15 à 17°D dans des conditions normales.

L'acidité est mesurée en degré Dornic (°D), la Dornic correspond à 1mg d'acide lactique dans 10 ml De lait. Elle permet de juger l'état de conservation de lait.

Tableau I.1: les propriétés physico-chimique du lait de vache [4].

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

I.1.4. Compositions du lait

Le lait contient les différents groupes de nutriments. Les substances organiques se répartissent en éléments bâtisseurs, les protides, et en éléments énergétiques, les glucides et les lipides. À cela s'ajoutent des éléments fonctionnels, c'est-à-dire des sels minéraux (Ca, P, K, Na, Mg, etc.), des vitamines et de l'eau.

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

Les principaux constituants du lait par ordre croissant selon Pougheon et Gourdrud [5] sont :

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

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

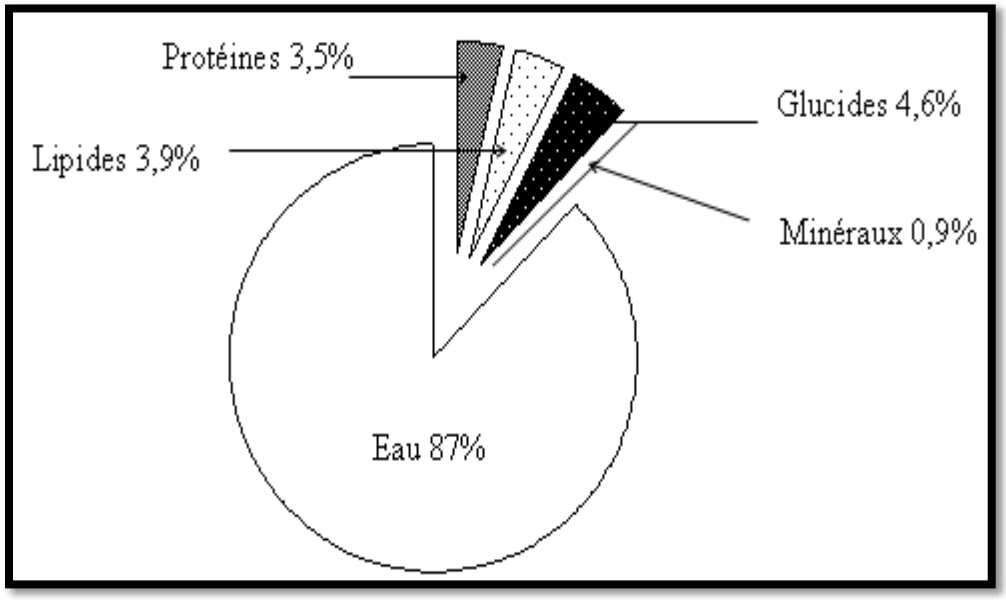


Figure I.1: Composition du lait [6].

Tableau I.2: composition typique du lait de vache [4].

Constituants	**Concentration (g/l)**
Eau	905
Glucides : lactose	49
Lipides	35
Matière grasse proprement dite	34
Lécithine (phospholipide)	0,5
Partie insaponifiable (stérols, carotène, tocophérols)	0,5
Protides	34
Caséines	27
Protéines solubles (Globulines, Albumines)	5,5
Substances azotés non protéiques	1,5
Sels	9
De l'acide citrique	2
De l'acide phosphorique	2,6
De l'acide chlorhydrique (Na Cl)	1,7
Vitamines, enzymes, gaz dessous	Traces
Extrait sec total	127
Extrait sec non dégraissé	92

I.1.5. Qualité Organoleptique du lait

Vierling [7] rapporte que l'aspect, l'odeur, la saveur, la texture ne peuvent etre précisés qu'en comparaison avec un lait frais.

- ✓ **La couleur**

Le lait est de couleur blanc mat, qui est due en grande partie à la matière grasse. Aux pigments de carotène (la vache transforme le ß-carotène en vitamine A qui passe directement dans le lait [8].

Reumont [9] explique que dans le lait, deux composants, les lipides sousorme de globules de matière grasse et les protéines sous forme de micelles de caséines diffractent la lumière.

Ces agrégats dispersent les rayons lumineux sans les absorber et le rayonnement qu'ils renvoient, est identique en composition au rayonnement solaire, à savoir une lumière blanche.

- ✓ **L'odeur**

Selon Vierling [7], l'odeur est une caractéristique du lait du fait de la matière grasse qu'il contient fixe des odeurs animales. Elles sont liées à l'ambiance de la traite, à l'alimentation (les fourrages à base d'ensilage favorisent la flore butyrique, le lait prend, alors une forte odeur), à la conservation (l'acidification du lait à l'aide de l'acide lactique lui donne une odeur aigrelette).

- ✓ **La saveur**

La saveur du lait frais est agréable. Celle du lait acidifie est fraiche et un peu piquante. Les laits chauffés (pasteurisés, bouilliu, stérilisés) ont un goût légèrement différent de celui du lai cru. Les laits de rétention et de mammites ont une saveur Salée plus ou moins accentuée. Il en est en parfois de même du colostrum.

L'alimentation des vaches laitières à l'aide de certaines plantes de fourrages ensilés, etc. peut transmettre au lait produits des saveurs anormales enparticulier un goût amer.

La saveur amère peut aussi apparaître dans le lait par suite de la pullulation de certains germes d'origine extra-mammaire [10].

✓ **La viscosité**

Rheotest [11] a montré que la viscosité du lait est une propriété complexe qui est particulièrement affectée par les particules colloïdes émulsifiées et dissoutes.

La teneur en graisse et en caséine possède l'influence la plus importante sur la viscosité du lait. La viscosité dépend également de paramètres technologiques.

La viscosité est une caractéristique importante de la qualité du lait, étant donné qu'une relation intime existe entre les propriétés rhéologiques et la perception de la qualité par le consommateur.

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

I.2. Les Produits dérives du lait

Habitudes alimentaires, difficultés de production de certains fromages, préférence pour le lait entier, qui exclut la production de crème ou de beurre, concurrence de la margarine, moins chère à l'achat..., La production de fromage, de crème, de beurre est limitée dans les pays en développement par de nombreux facteurs. Toutefois, si le marché existe, ces produits peuvent être vendus à des prix permettant de rentabiliser la structure de production [12].

I.2.1. La crème et le beurre [12]

La crème est obtenue par écrémage du lait, opération qui s'effectue au moyen d'une écrémeuse. Celle-ci sépare la crème, riche en matière grasse (de 30 à 35 %, voire 40 % l'été), du lait écrémé, pauvre en matière grasse. Immédiatement après, la crème est refroidie, puis "mûrie" pendant un temps et à une température qui est fonction des "bonnes" conditions de mûrissement du lieu.

La maturation des crèmes résulte en effet de l'action des ferments naturels du lait et de l'environnement ; ces ferments développent une acidification et un arôme qui peuvent être

spécifiques à la région. En même temps, les globules gras se cristallisent en partie et leurs membranes se fragilisent ce qui facilitera la fabrication du beurre.

Le beurre est fabriqué au départ de crème, sa teneur en matière grasse doit être de 82 % minimum et sa teneur en eau de 16 % maximum.

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

I.2.2. Les fromages [12]

Il existe quantité de fromages, chacun ayant ses spécificités. Ils varient par la nature du lait (vache, brebis, chèvre), par la teneur en matière grasse (résultant de l'addition ou non de crème ou de lait entier), par leur mode de préparation (affinage, égouttage, pressage, cuisson), par la consistance de leur pâte, par leur durée de conservation.

Habituellement, on distingue les fromages frais ou non fermentés, les fromages fermentés à pâte molle et les fromages fermentés à pâte dure ou demi-dure.

I.2.3. Le yaourt [13]

Le yogourt est un produit laitier coagulé obtenu par fermentation lactique grâce à l'action de *Lactobacillus bulgaricus et de Streptococcus thermophilus.*

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

I.3. Principales catégories de traitement thermique dans l'industrie laitière

I .3.1. Thermorésistance des bactéries et des microorganismes [14]

Tous les microorganismes ne réagissent pas de la même façon à la chaleur. On peut alors dire que leur « thermorésistance » 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 le quel 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.

I.3.2. Procédés de traitement thermique

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

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

✓ **La pasteurisation [15]**

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

✓ **La stérilisation [16]**

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

I.3.3. Le lait pasteurisé [17]

Le lait pasteurisé, fabriqué à partir de lait cru ou de lait reconstitué, écrémé ou non, est un lait qui a subi un traitement thermique (pasteurisation) qui détruit plus de 90 % de la

flore (jusqu'à 98 %) contenue dans le lait (notamment tous les germes pathogènes non sporulés,tels que les germes de la tuberculose et de la brucellose).

I.3.4. Le lait stérilisé [18]

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

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

I.3.5. Le lait cru [19]

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

I.3.6. Le lait fermenté [20]

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

- la fermentation spontanée. On laisse le lait fermenter tout seul en le maintenant à un niveau de température et d'humidité relative appropriées.
- la fermentation conduite.

Le lait est pasteurisé puis réensemencé avec des starters ou levains sélectionnés. C'est théoriquement la seule méthode envisageable au niveau industriel ou au niveau d'une micro-laiterie.

I.3.7. Le lait aromatisé

Vierling [21] rappelle que cette dénomination est réservée aux boissons stérilisées préparées à l'avance, constituées exclusivement de lait écrémé ou non , sucré ou non , additionné des colorants généralement autorisés et de substances aromatiques naturelles qui peuvent être renforcées artificiellement : abricot , ananas, fraise, prune, cerise, framboise.

Les laits aromatisés peuvent avoir subi l'addition d'agar-agar, alginates, carraghénanes et pectines comme stabilisants. Les laits aromatisés sont généralement obtenus par stérilisation en récipients ou par stérilisation UHT.

I.3.8. Le lait en poudre

Pfiffner [22] évoque que la production de lait condensé avait débuté dans les années 1860, celle de lait en poudre commença plus tardivement (industrie laitière).

Les essais de dessiccation de lait entier,demi-écrémé ou écrémé entrepris dans la seconde moitié du XIX^{e} siècle avaient donné des produits insatisfaisants à la réhydratation. c'est au début du XX^{e} siècle que l'on mit au point des procédés aptes a un usage industriel, dont les plus importants restent aujourd'hui encore l'atomisation et le séchage sur cylindres chauffants ,qui réduisent la teneur en eau du lait de 88% à 2-4% .

Selon la loi sur les aliments et drogues du Canada, les poudres de lait sont des produits résultants de l'enlèvement partiel de l'eau du lait.

On répartit les poudres en trois groupes:

- La poudre de lait entier.

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

I.4. Mise en Ouvre de La Pasteurisation [23]

I.4.1. Objectifs

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

I.4.2. Pasteurisation en mode discontinu : dite aussi « batch »

Un traitement de pasteurisation peut être réalisé par chauffage du lait dans une cuve agitée. 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.

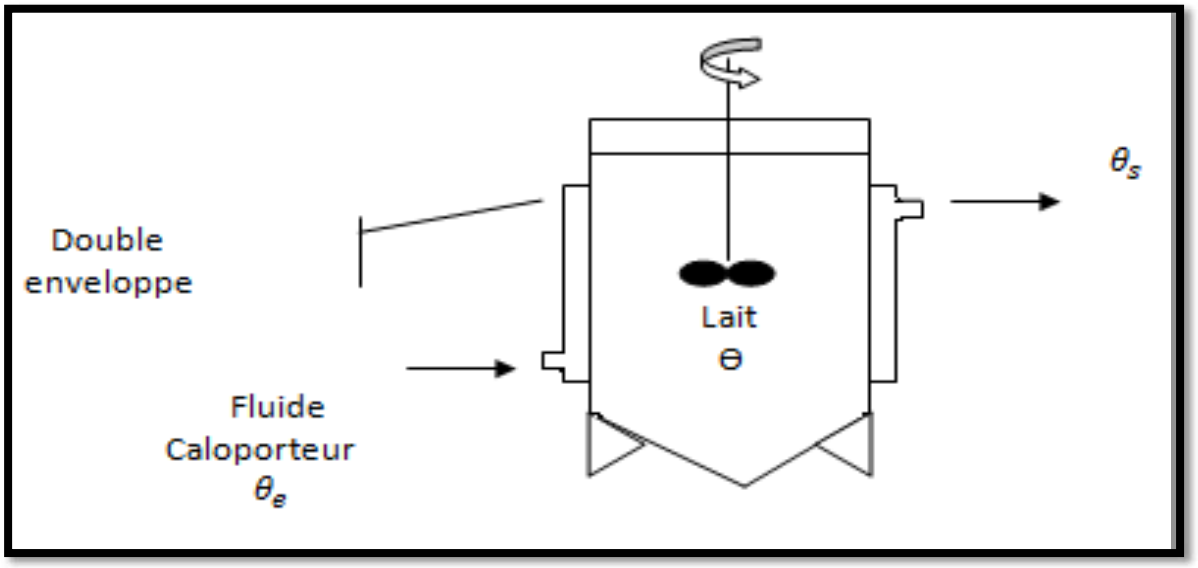


Figure I.2: Dispositif de chauffage du lait en cuve agitée à double enveloppe.

I.4.3. Pasteurisation en mode continu

Un traitement thermique de pasteurisation du lait en continu peut être réalisé dans des échangeurs tubulaires ou à plaques. Le principe consiste à porter le lait à sa température de traitement par échange de chaleur avec un fluide plus chaud, le maintenir à la température de traitement pendant le temps nécessaire (chambrage), puis le refroidir.

Pour réduire les coûts énergétiques, il est possible que dans la zone de récupération réchauffe le lait entrant en refroidissant le lait sortant. La zone de chauffage (par de l'eau chaude ou de la vapeur) est nécessaire car le coefficient de récupération de chaleur de l'installation est habituellement de l'ordre de 90- 92%.

Une zone de refroidissement complémentaire (eau froide ou eau glycolèe) est généralement présente pour ramener le produit à la température de stockage.

Les échanges de chaleur dans chacune de ces différentes zones se font par circulation à contre courant pour permettre un meilleur taux de récupération. Cependant, des échangeurs à Co-courant peuvent également être utilisés.

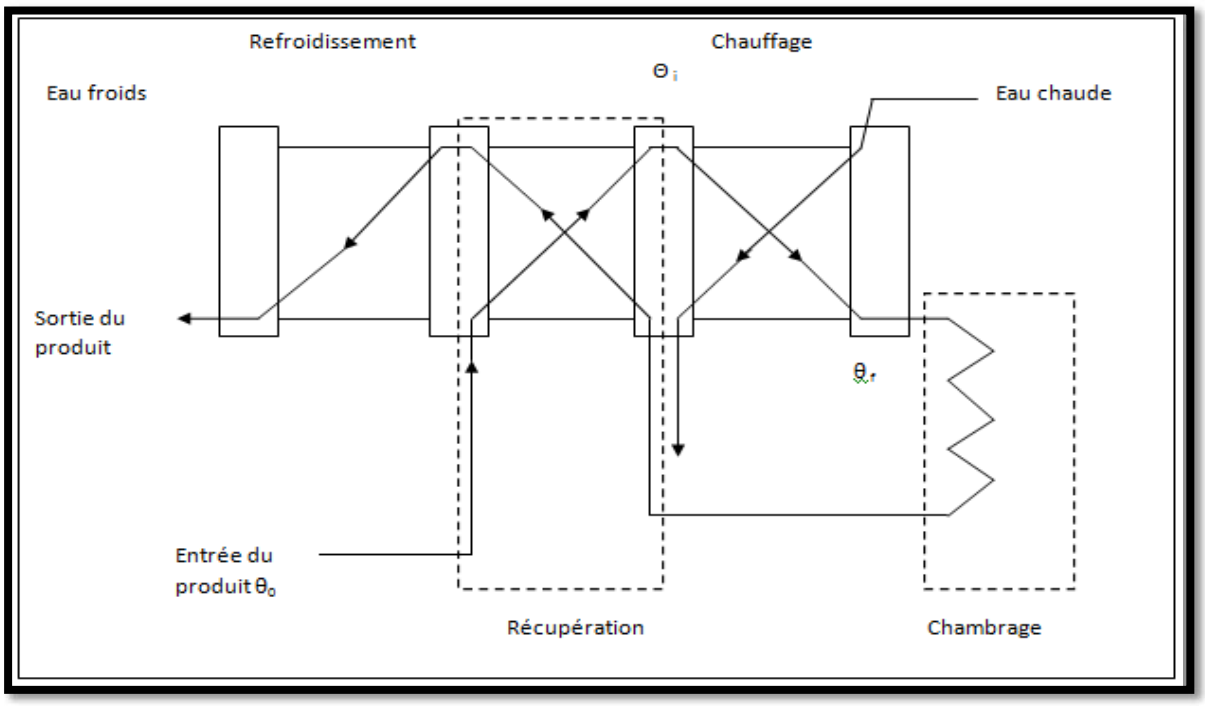


Figure I.3: Schéma général d'une installation de traitement thermique en contenu.

II.1. NOTIONS GENERALES SUR LES ECHANGEURS

II.1.1. Définition [24]

Un échangeur de chaleur est un système qui permet d'échanger la chaleur entre deux fluides ou plus. Dans un échangeur thermique, le fluide chaud et le fluide froid sont séparés par une paroi bien adaptée et par principe la transmission de la chaleur se fait du fluide chaud vers le fluide froid.

II.1.2. Principe de fonctionnement [24]

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

II.1.3. Modes de transferts thermiques [25]

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

- **Conduction**

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

- **Convection**

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

- **Rayonnement**

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

II.1.4. Principaux modes d'écoulement des deux fluides

Dans un échangeur, l'écoulement des deux fluides peut s'effectuer dans de multiples dispositions relatives : parallèlement, à contre-courant, de manière croisée... [26].

- **À Co-courant**: les deux fluides sont disposés parallèlement et vont dans le même sens. Dans un échangeur anti-méthodique la température de sortie du fluide froid est nécessairement moins élevée que la température de sortie du fluide chaud.

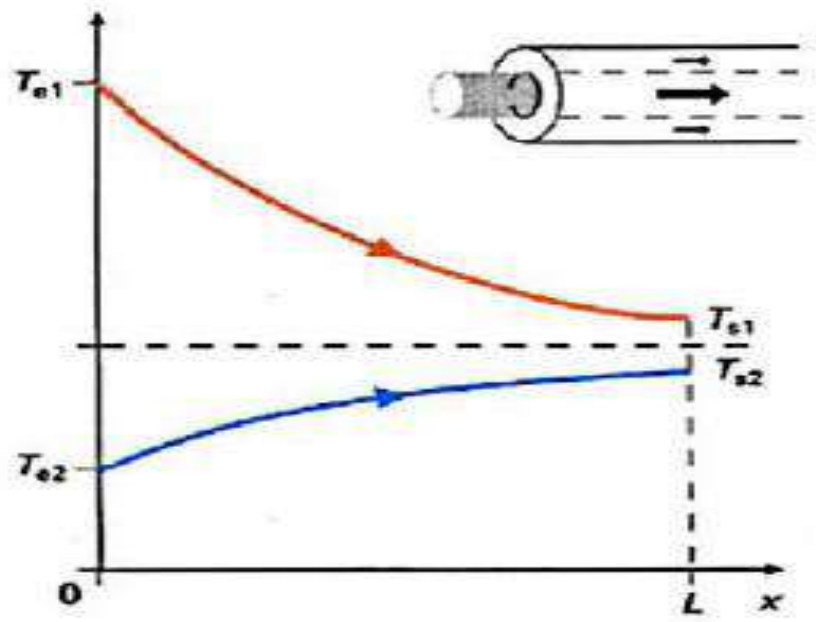


Figure II.1: Evolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire ou à plaques à Co-courant [27].

- **À contre courant:** idem, mais les courants vont dans des sens opposés. Dans un échangeur méthodique, par différence avec un échangeur anti-méthodique la température de sortie du fluide froid peut être plus élevée que la température de sortie du fluide chaud.

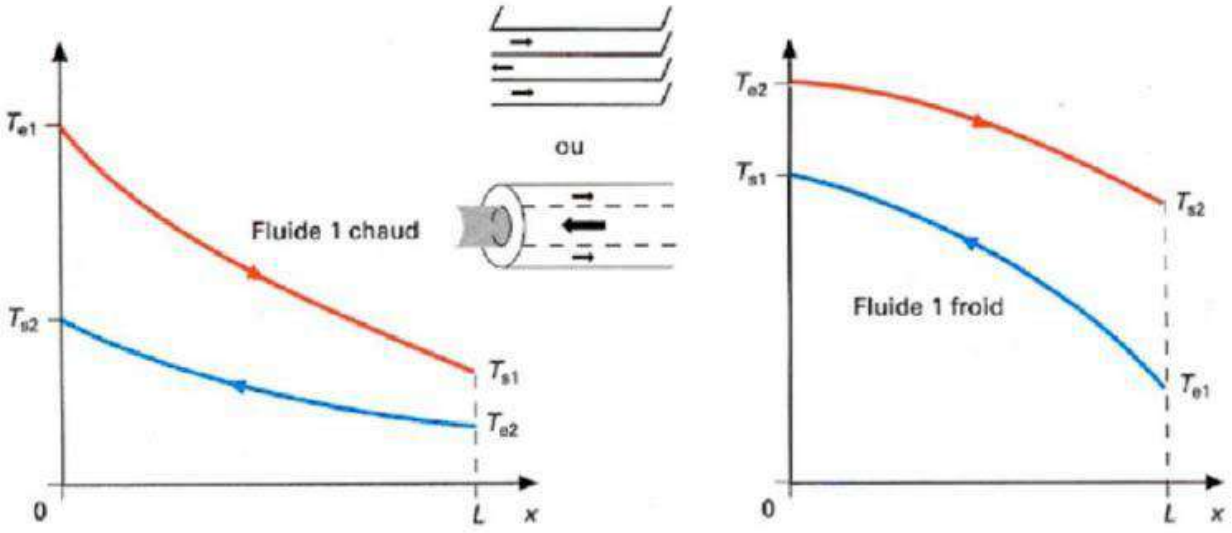


Figure II.2: Evolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire contre-courants [27].

- **À courants croisés :** les deux fluides s'écoulent perpendiculairement l'un à l'autre.

Un fluide est dit non brassé s'il s'écoule dans une veine divisée en plusieurs canaux parallèles distincts et de faible section, il est dit brassé dans le cas contaire.

Le brassage a pour effet d'homogénéiser les températures dans la section droite de la veine. Les échangeurs à courants croisés sont surtout utilisés pour des échangeurs entre un gaz Circulant en calandre et un liquide circulant dans les tubes [28].

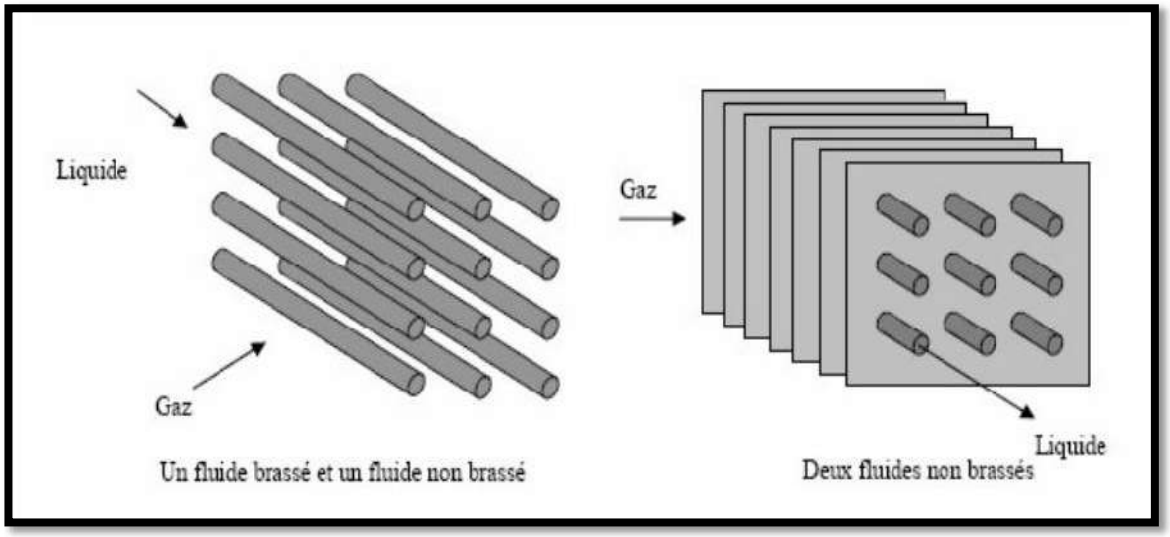


Figure II.3: Schéma de deux types d'échangeurs à courants croisés.

II.1.5. Différents types d'échangeurs de chaleurs utilisés en industrie agroalimentaires

Les principaux types d'échangeurs de chaleur rencontrés sont :

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

II.1.5.1. Echangeurs à plaques

II.1.5.1.1. Définition

L'échangeur à plaques est un type d'échangeur de chaleur qui connaît un usage croissant dans l'industrie. Il est composé d'un grand nombre de plaques disposées en forme de millefeuilles et séparées les unes des autres d'un petit espace (quelques millimètres), au travers desquelles s'effectue le transfert de chaleur entre deux fluides, l'un circule dans les conduits pairs et l'autre dans les conduits impairs. Le périmètre des plaques est bordé d'un joint qui permet par compression de la structure d'éviter les fuites. L'échangeur à plaques ne peut pas toujours être utilisé pour les températures élevées et les fortes pressions [29].

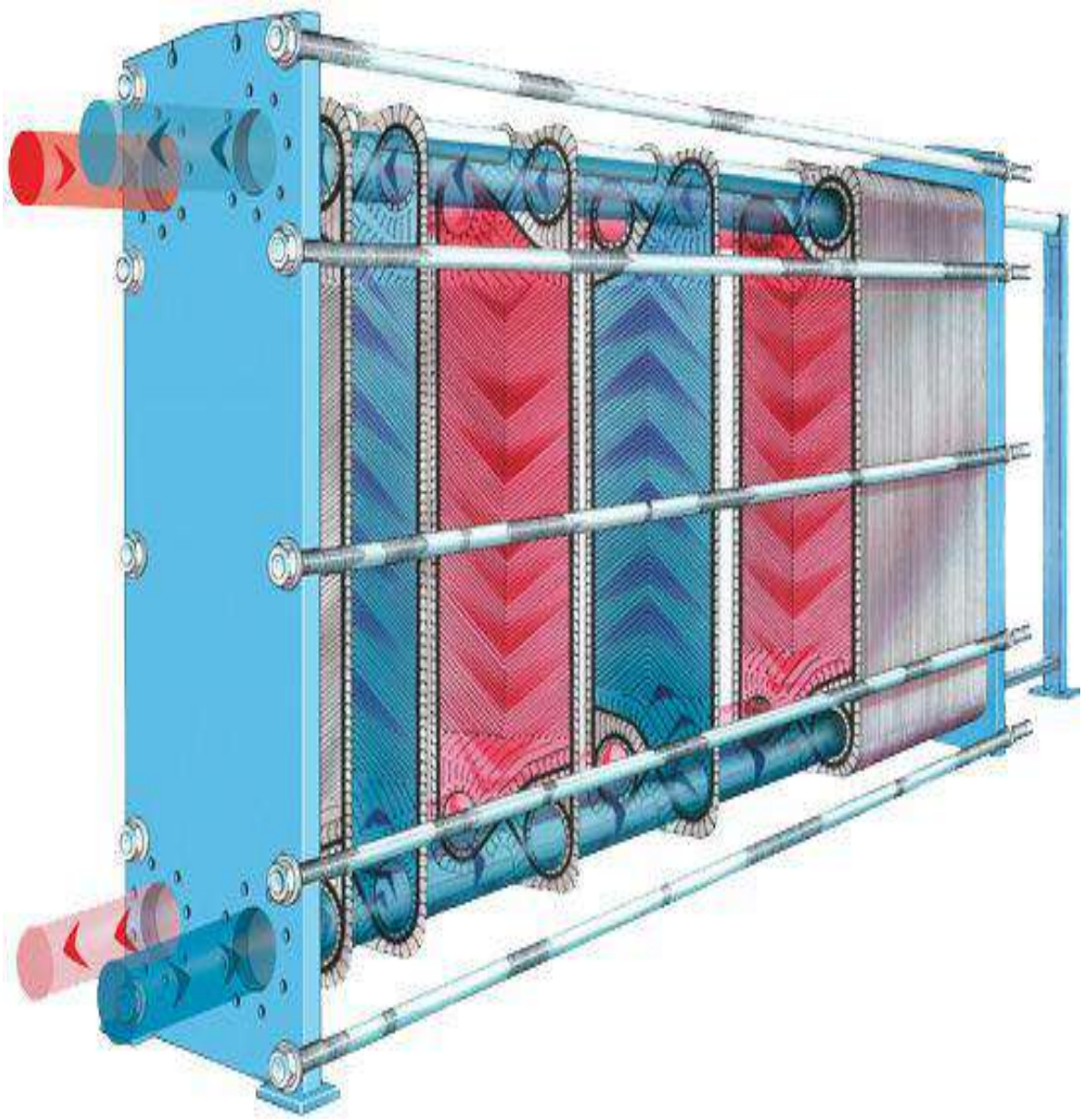


Figure II.4: Schéma d'échangeur à plaque.

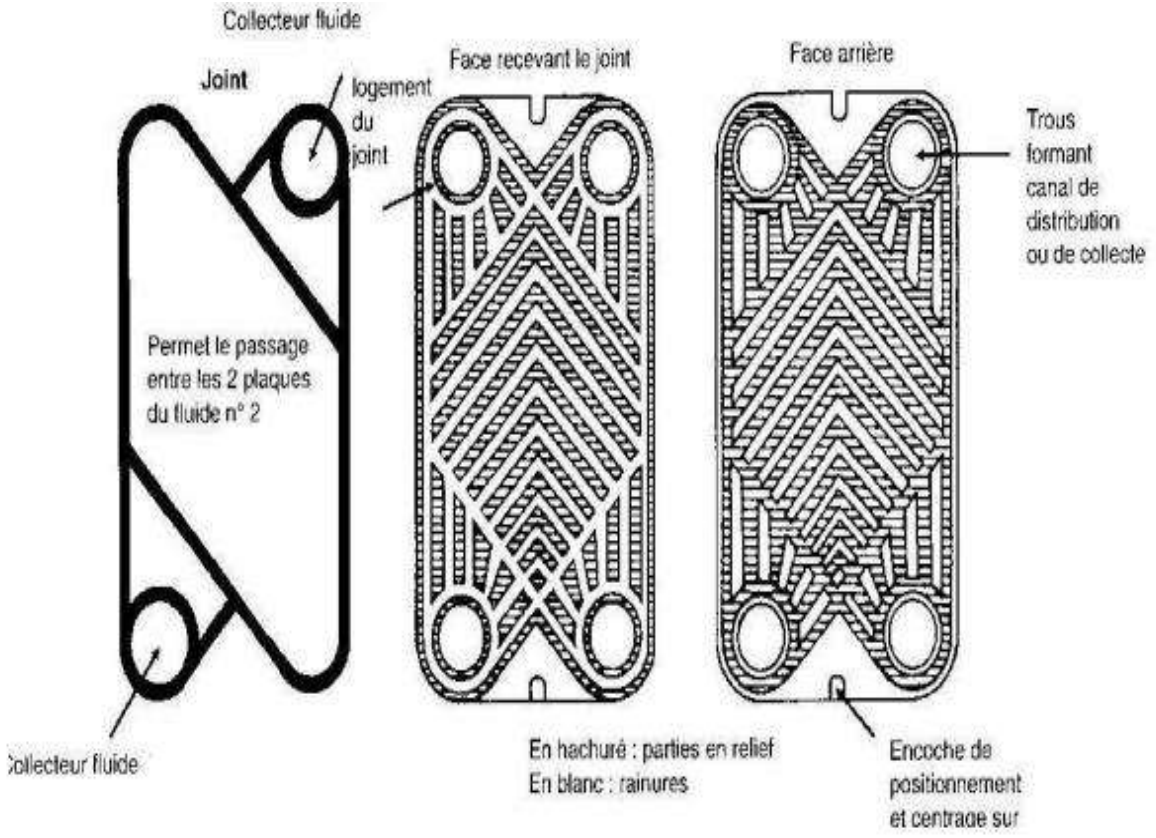


Figure II.5: détail plaque d'échange avec joint d'étanchéité [30].

On distingue suivant la géométrie de canal utilisée les échangeurs à surface primaire et les échangeurs à surface secondaire [24].

- **Échangeurs à surface primaire :** Les échangeurs à surface primaire sont constitués de plaques corruguées, nervurées ou picotées. Le dessin du profil de plaques peut être assez varié mais il a toujours un double rôle d'intensification du transfert de chaleur et de tenue à la pression.

- **Échangeurs à surface secondaire :** Ces échangeurs sont réalisés en aluminium ou en acier inoxydable ; ils sont constitués par un empilage de tôles ondulées formant des ailettes séparées par des tôles planes.

Il existe d'autres échangeurs à plaques dont la diffusion est moins importante tels que les échangeurs de chaleur à spirales et les échangeurs à plaques brasées [31]. Les échangeurs à plaques brasées sont formés de plaques embouties, mais sans joints, qui forment ainsi un appareil compact et résistant à hautes pressions. Les échangeurs à spirales sont

constitués de deux rubans de tôles gaufrées, enroulés et maintenus parallèle et où la circulation du fluide, set de type monocanal à courant parallèle ou croisés. Reste encore les échangeurs à plaques serties qui sont constitués d'un assemblage de tôles planes parallèle entre lesquelles sont disposées des ailettes.

II.1.5.1.2. Principe [32]

L'échangeur de chaleur est constitué de plaques, de tubes ou de gaufrages de type "nid d'abeilles", de faible épaisseur en aluminium ou matière plastique qui séparent les veines d'air. Le matériau utilisé pour la fabrication des plaques est variable, ce peut être du verre (il est insensible à la corrosion mais est lourd et cassant) ou bien de l'aluminium, de l'acier inoxydable ou un matériau synthétique.

Les plaques sont assemblées entre elles par collage ou soudage et placées dans un châssis rigide. L'épaisseur d'une plaque oscille généralement entre ,1 et ,8 mm, la distance entre les plaques est très faible, entre 5 et 1 mm, et les courants sont généralement croisés. Afin de maximiser l'échange convectif, les plaques peuvent être gaufrées et créer de la sorte une turbulence.

II.1.5.1.3. Avantages et inconvénients de l'échangeur à plaques [32]

- **Avantage**

  - Simple et fiable.
  - grande durée de vie et pratiquement pas de panne.
  - absence de pièces en mouvement, sécurité de fonctionnement.
  - peu de maintenance nécessaire.
  - faible risque de contamination de l'air frais en cas de bonne conception.
  - exécution en divers matériaux et nombreuses combinaisons possibles.
  - la solution la plus adaptée (rentabilité) aux petits débits d'air (< 5 m^3/h).

✓ **Inconvénients**

- Disposition air neuf/air rejeté proche.
- sans by-pass, il n'y a pas de régulation de température et donc un risque de surchauffe en été.
- danger de givre par température extérieure basse et par dépassement du point de rosée, il faut être attentif à la régulation si on souhaite tenir compte du récupérateur pour dimensionner les chaudières et les batteries de chauffe.
- l'échangeur présente une perte de charge relativement importante, surtout à de grands débits.
- En cas de panne des équipements mal conçus peuvent être source de bruit ainsi que des fuites de contamination.

II.1.5.2. les échangeurs tubulaires [29]

Les échangeurs tubulaires peuvent être utilisés pour effectuer des transferts de chaleur entre deux fluides ne subissant pas de changement de phase, mais aussi pour condenser une vapeur ou évaporer un liquide. On distingue plus souvent :

- Les échangeurs monotubes pour lesquels le tube est placé dans un réservoir.
- Les échangeurs double tubes pour les quels le tube ou une conduite placés concentriquement à l'intérieur d'un autre tube qui tient alors lieu d'enveloppe.

II.2. NOTIONS SUR L'ENCRASSEMENT DES ECHANGEURS

II.2.1. Introduction

Les transferts thermiques dans les échangeurs thermiques sont favorables au développement de phénomènes d'encrassement dans les liquides et sur les parois thermiques. Ils se traduisent par l'accumulation d'éléments solides indésirables sur les surfaces d'échange [33].

Il existe différents types d'encrassement comme, par exemple, l'encrassement particulaire dû aux particules telles des oxydes et hydroxydes de fer transportés par les fluides en milieu industriel, la corrosion, l'entartrage, l'encrassement biologique dû aux algues ou champignons, … [34]. Cette couche représente une résistance additionnelle au transfert thermique. Le produit de cette résistance thermique par la surface d'échange thermique est appelé facteur d'encrassement. Le facteur d'encrassement pour un nouvel échangeur thermique sera égale à 0 et augmentera avec le temps lorsque les dépôts solides s'accumuleront sur les parois de l'échangeur, et ce jusqu'au nettoyage de l'échangeur.

L'encrassement s'accentuera d'autant plus si la température augmente et la vitesse des fluides diminue. Il existe des tables donnant des valeurs représentatives du facteur d'encrassement recommandées par la TEMA pouvant servir au dimensionnement des échangeurs (cf. (TEMA 1988) [35] par exemple). La plupart de ces valeurs ont un ordre de grandeur de 1-4 $m^2°C/W$, ce qui correspond à la résistance thermique d'une couche de calcaire de 2 mm d'épaisseur et d'un mètre carré de surface. L'encrassement des échangeurs thermiques induit un certain nombre d'effets indésirables ayant un coût économique ou environnemental non négligeable, ainsi :

- L'encrassement diminuant le coefficient de transfert thermique, le coût pour obtenir un coefficient de transfert thermique voulu augmente.
- L'encrassement peut provoquer un écart de température supérieur à la normale et ainsi augmenter les consommations énergétiques. Ceci peut aussi engendrer des pannes des équipements (surchauffe des compresseurs).
- Les coûts d'entretien sont plus élevés afin de supprimer les dépôts d'encrassement avec des produits chimiques et des dispositifs antisalissure ou mécanique ou encore le remplacement des équipements corrodés.
- Les coûts de consommation d'eau, d'électricité et de carburant augmentent pour compenser les effets de l'encrassement.

- Des pertes de production liées aux arrêts d'exploitation − planifiés ou non − causés par l'encrassement entraînent une augmentation des coûts d'exploitation.
- L'encrassement apporte aussi un risque environnemental. En effet, il est montré [36] que, lorsqu'il y a de l'encrassement, pour compenser la perte d'efficacité des échangeurs, la production est activée entrainant ainsi une augmentation de l'émission de dioxyde de carbone. Ainsi, l'existence d'un bio-film microbien d'une épaisseur de 3µm dans les condenseurs d'une station thermique au charbon de 55MW peut entrainer une production supplémentaire de 97 kg par heure de dioxyde de carbone.

II.2.2. Phénomène d'encrassement [37]

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

II.2.3. Type d'encrassement

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 [37]:

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

✓ **La corrosion [37]**

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

✓ **L'encrassement biologique [38]**

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

✓ **L'encrassement par réaction chimique [39]**

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

✓ **L'entartage [40]**

L'entartrage d'une surface d'échange est généralement associé à la production d'un solide cristallin à partir d'une solution liquide. Il dépend donc fortement de la composition des eaux industrielles. L'entartrage se matérialise par une formation d'incrustations adhérentes et dures sur les surfaces d'échanges généralement métalliques. Pour qu'il y ait entartrage, deux conditions doivent être remplies :

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

✓ **L'encrassement particulaire [40]**

La plupart des écoulements, des fluides industriels (liquides ou gazeux) transportent des particules en suspension dont la taille varie d'une fraction de µm à quelques dizaines de µm ; le dépôt est inévitable d'une partie de ces particules sur la surface d'échange :

- L'eau de chaudière contenant des produits de corrosion.
- L'eau de tours refroidissement.
- Les écoulements gazeux pouvant être fortement chargés de particules de poussières.
- Les fumées industrielles de résidus solides de combustion.

- ✓ **L'encrassement par solidification [40]**

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) 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 paraffiniques) .

II.2.4. Apparition et développement de l'encrassement

II.2.4.1. Mécanisme de l'encrassement [41]

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

- ✓ **L'initiation**

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

- ✓ **Transport des particules**

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

- ✓ **Adhésion des particules**

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

- ✓ **Réentrainement des particules déposées**

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

- ✓ **Le Vieillissement**

Il s'agit d'un changement de structure chimique ou cristalline du dépôt du phénomène tels que la déshydratation ou la polymérisation, il y'a alors diminution des forces d'adhésion du dépôt qui peut être arraché sous l'action des force aérodynamique

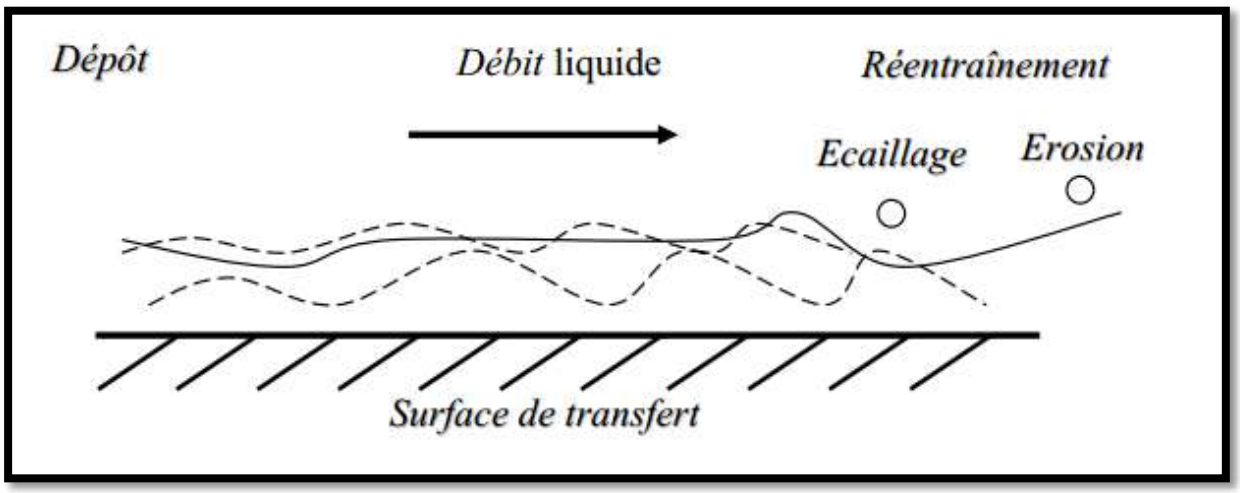


Figure II.6: représentation schématique de l'encrassement dans le cas d'un liquide

II.3. Encrassement de lait

II.3.1. 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 [42]. Sa structure lui confère un rôle déterminant dans le processus de l'encrassement, des considérations thermodynamiques approuvent également cette idée [43].
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 [44].

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'adhèrent 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 Calcium : Phosphore dans la crasse et a trouvé une valeur proche de la valeur caractéristique du $Ca_3(PO4)_2$ de 1,5. Ceci confirmera l'hypothèse d'un encrassement par cristallisation du phosphate du calcium [45]. 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 [46].

II.3.2. Modèles et mécanismes d'encrassement par le lait

Pour le cas du lait, l'encrassement est provoqué par les réactions chimiques causées par les changements qui proviennent des transformations des protéines du lait sous l'effet de la température. Plusieurs auteurs se sont concentrés sur la cinétique de ces réactions. D'après les travaux de recherche, l'encrassement est de nature très complexe. Ce phénomène ne peut pas être éliminé, mais essayer de le réduire reste toujours possible [47].

Le paramètre important dans le processus d'encrassement est la formation d'un dépôt de protéine de β-lactoglobuline (βlg). L'approche de De Jong et al. [48] ainsi que Toyoda et al. [49] est basée sur la modélisation des réactions chimiques et microbiologiques.

- Le traitement thermique du lait interprète l'échangeur comme un réacteur chimique et les constituants du lait comme des réactifs. Les constituants les plus importants provoquant des changements dans les protéines du lait [49] sont :
- β-lactoglobuline qui représente presque 5% des changements thermiques induits que subit le lait.
- α-lactoalbumine qui représente près de 2% des protéines du lait, elle est riche en sulfure de caséine. Quand le lait est chauffé à prés de 65°C, la β-lactoglobuline devient instable thermiquement et il y a dénaturation des molécules exposant les groupements sulfhydriques réactifs et les polymérisent irréversiblement pour donner des particules insolubles dans les agrégations.

II.3.3.Encrassement par cristallisation [46]

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.

III .1. INTRODUCTION

Nous reprenons dans ce travail la formulation mathématique et la modélisation de l'encrassement en régime stationnaire d'un écoulement turbulent d'un fluide entre deux plaques planes en présence d'un milieu poreux à l'aide du modèle de fermeture $\kappa - \varepsilon$ qui a été établi dans un travail précédent [23].

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

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

III .2. CYCLE DE PRODUCTION

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

D'après Avezard et Lablee [50], l'opération de recombinaison consiste a mélanger dans une eau convenable les différent composants du lait pour réaliser un produit le plus voisin possible du lait initial. Les trois composants essentiels sont l'eau, la poudre de lait écrémé spray et la matière grasse laitière anhydre. Dans un certain cas quelques adjuvants complémentaires sont utilisés.

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

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

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

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

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

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

III .2.1. Les étapes de production

Les étapes de production dans l'unité UHT se résument comme suit (Figure IV.1) [51].

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

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

2. Homogénéisateur(3) : l'homogénéisation consiste à faire passer le lait sous forte pression à travers des orifices très étroits qui réduisent la taille des globules gras et fusionner les particules de la matière grasse et rendre le mélange donc plus homogène.

3. Pasteurisation : La pasteurisation est un procédé consistant à chauffer du lait cru pendant quelques minutes ou secondes à une température la plus basse possible, entre 90-100°C et une pression de 4.4 bars, elle est assurée dans le compartiment II (échangeur 2).

4. Refroidissement (récupération de chaleur): Il se fait par un échange de chaleur dans le compartiment I (échangeur 1) entre l'eau chaude et le lait pasteurisé et dans le compartiment III (échangeur 3) avec le lait froid entrant, le produit sort donc à une température de 22-25°C et une pression de 0,8-2 bars.

5. Conditionnement aseptique : C'est la dernière étape de la production du lait, le produit refroidi est conditionné aseptiquement à l'aide conditionneuse.

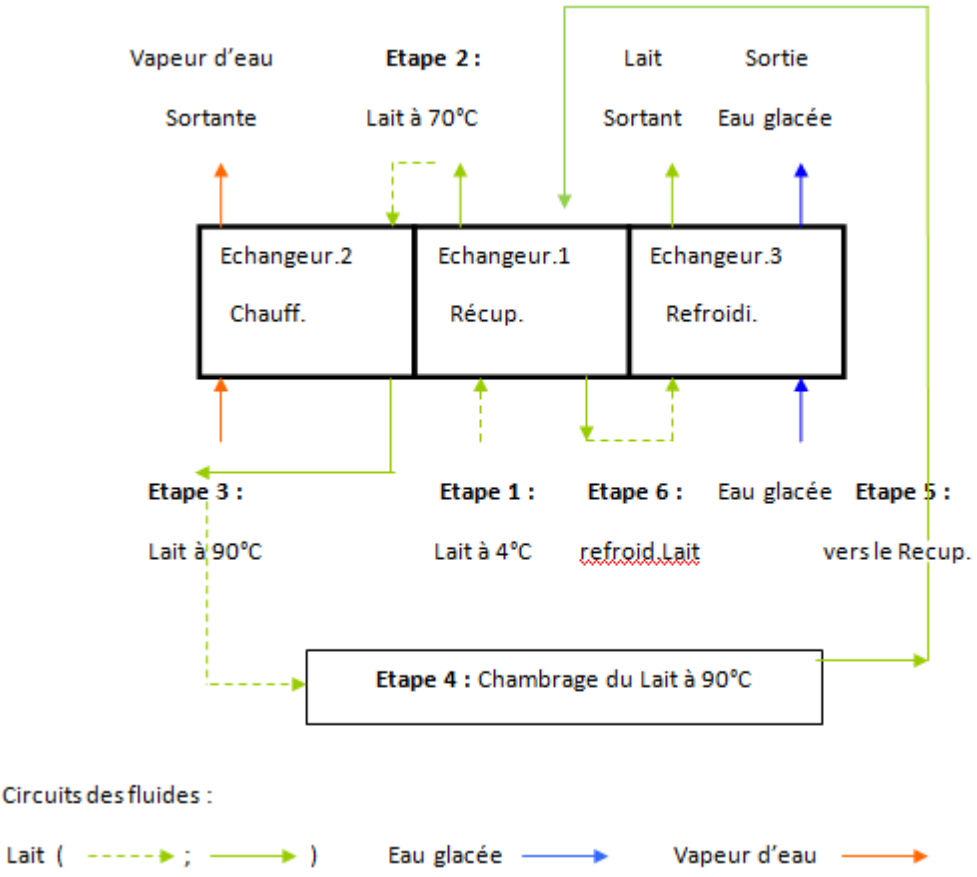


Figure III .1: Cycle de Pasteurisation du Lait.

III .2.2. Le cycle de vapeur [23]

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

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

III .3.1. Introduction

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

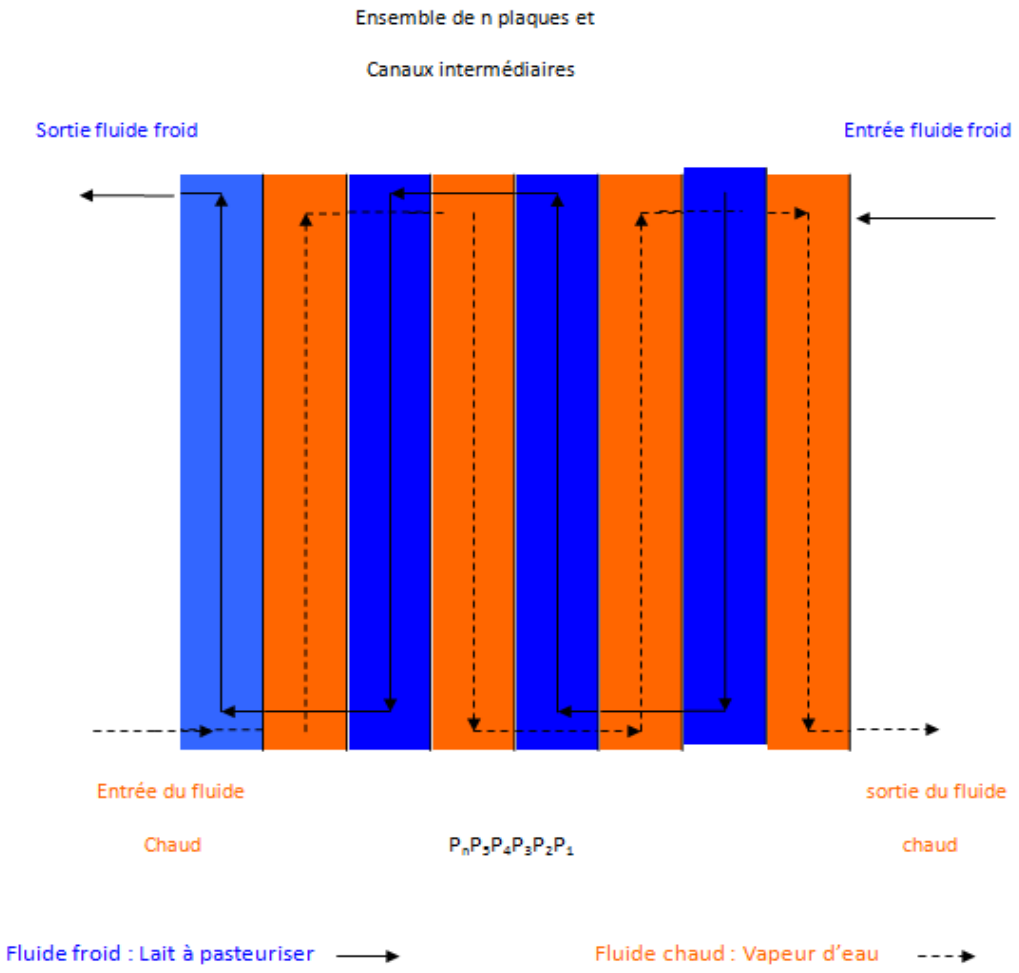


Figure III .2: Arrangement des plaques de l'échangeur de pasteurisation et sens de circulation des fluides.

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

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

III .3.2. Formulation mathématique du problème [23]

III .3.2.1. Introduction

Cette partie du travail est consacrée à la mise en équations du problème physique considéré, en utilisant les équations de conservation gouvernant les transferts de chaleur dans un canal plan 2D en régime turbulent. Le modèle de turbulence standard κ - ε est utilisé. Une revue de

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

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

Dans les deux cas, les équations de conservation, le modèle de fermeture des équations en écoulements turbulents, les hypothèses de travail et les conditions aux limites sont présentées [52].

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

III .3.2.2.1. Les hypothèses

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

- Fluide Newtonien,
- le régime d'écoulement est turbulent,
- l'écoulement est incompressible, 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 $(\mu\phi)$ sont négligés devant les autres termes de l'équation d'énergie.

III .3.2.2.2. Equations de conservation

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

a) Equation de conservation de la masse

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

b) Equation de conservation de la quantité de mouvement

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

c) Equation de conservation de l'énergie

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

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

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

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

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

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

III .3.2.3.1. Modèle générale

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

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

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

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

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

a) Equation de continuité

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

b) Equations du mouvement

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

c) Equation de l'énergie

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

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

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

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

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

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

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

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

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

III .3.2.3.2. Conditions initiales et aux limites

Les équations de notre système sont soumises aux conditions suivantes :

a) Champ dynamique

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

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

- Condition d'adhérence à la paroi :

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

- 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 :

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

d) Conditions à l'interface fluide – poreux

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

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

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

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

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

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

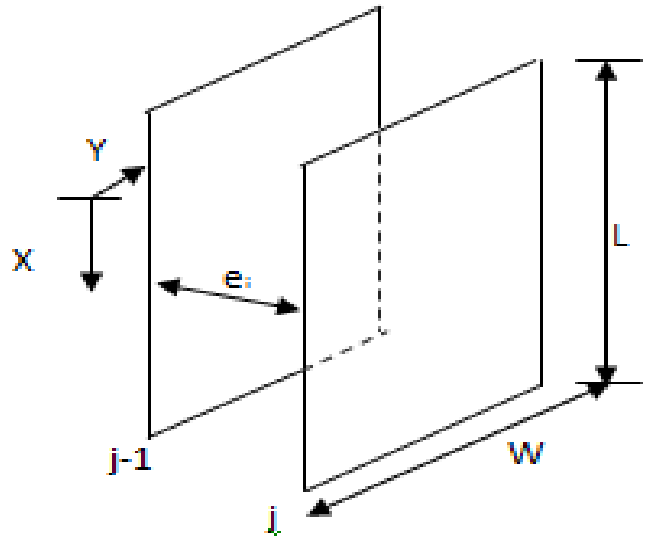


Figure III .3: Schématisation de la direction de l'écoulement entre deux plaques.

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

1. Viscosité : la viscosité du mélange est calculée à partir de la relation d'Einstein appliquée pour les solutions diluées, elle s'écrit [46] :

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

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

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

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

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

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

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

2. Chaleur spécifique : Elle est calculée avec la corrélation suivante [51] :

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

3. Débit du mélange : Q = 4000 l/h.

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

4. Vitesse du mélange : S'écrit :

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

Avec: $A = e_j \times W$

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

5. Nombre de Reynolds :

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

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

$\rho_f = 1033,7 - 0,2308T - 0,00246T^2$ [51].

Donc on obtient ainsi le nombre de Reynolds.

La présence de rainures dans les plaques donne au nombre de Reynolds un tout autre sens que dans le cas d'un écoulement sur une surface lisse, ce qui conduit à considérer l'écoulement comme turbulent dès que Re > 400 ; Le régime est donc turbulent [53].

Pour le transfert de chaleur en régime turbulent dans un échangeur à plaques, la corrélation suivante peut être utilisée [53]:

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

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

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

6. Coefficients de transfert de chaleur (h_f):

Pour calculer le coefficient de transfert de chaleur côté fluide froid (h_f), la corrélation **(III.16)** et les équations **(III.13)** et **(III.15)** sont utilisées [53] :

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

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

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

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

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

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

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

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

k= 0.68 W/m°C [54].

On obtient : μ ,Cp ,ρ_c [54] .

Avec la relation **(III.13)** :

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

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

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

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

III.4. PROGRAMME ANSYS

III.4.1. INTRODUCTION

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

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

La simulation se présente presque toujours sous forme d'un programme ou d'outils informatiques. Ces derniers sont couramment appelés des environnements de simulation [23]. Parmi les outils informatiques de calcul on cite les codes ANSYS. Il s'agit d'un ensemble d'outils numériques édités par une société Américaine depuis 1970. Ses produits majeurs sont des logiciels qui mettent en œuvre la méthode des éléments finis, afin de résoudre des modèles préalablement discrétisés. Nous présentons ici ANSYS CFX un logiciel permettent d'effectuer des simulations en matière de mécanique des fluides.

III.4.2. PRINCIPES FONDAMENTAUX D'ANSYS

III.4.2.1. Définition d'ANSYS

ANSYS est un code éléments finis d'usage général dédié à la résolution numérique d'une large variété de problèmes physique en général et de mécanique en particulier. Ces problèmes portent notamment : analyse structurale en statique et en dynamique (linéaire et non linéaire), transfert de chaleur, dynamique des fluides, acoustique, électromagnétique [55].

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 III.4.

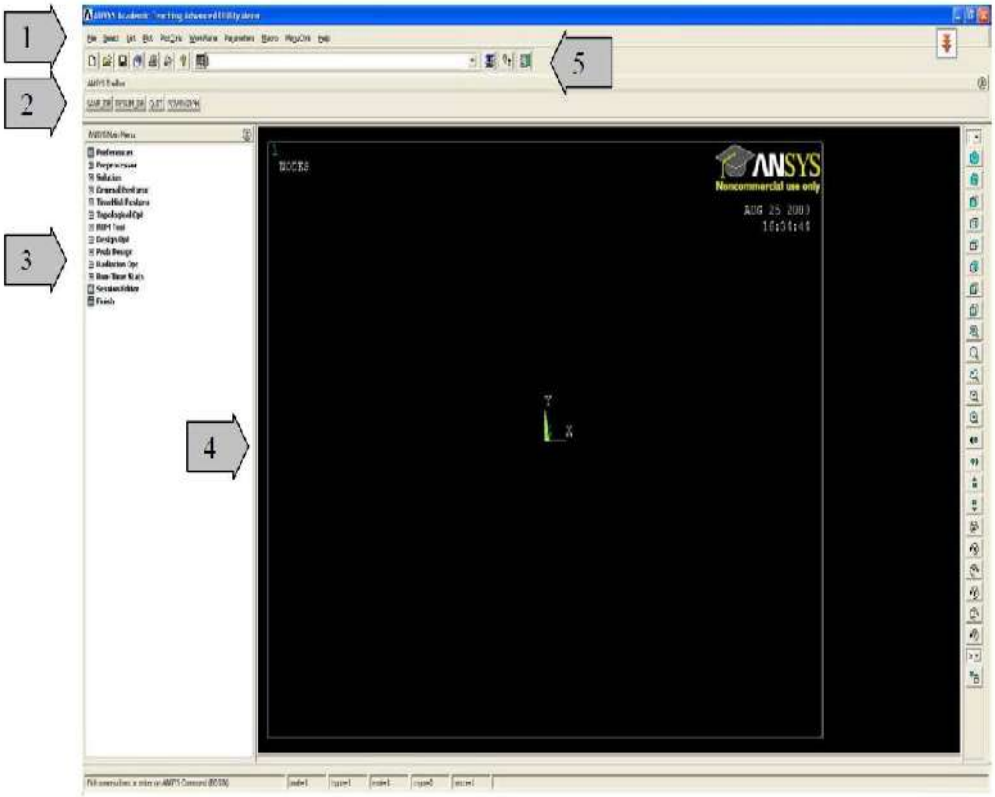


Figure III .4: L'interface utilisateur graphique d'ANSYS (GUI) [23].

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.

De façon générale, une résolution par éléments finis comporte trois étapes [56] :

✓ **Pré- processor**

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

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

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

✓ **Solveur**

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

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

✓ **Post-processor**

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

III.4.3. Les points forts des outils ANSYS [57]

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

IV.1. INTRODUCTION

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

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

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

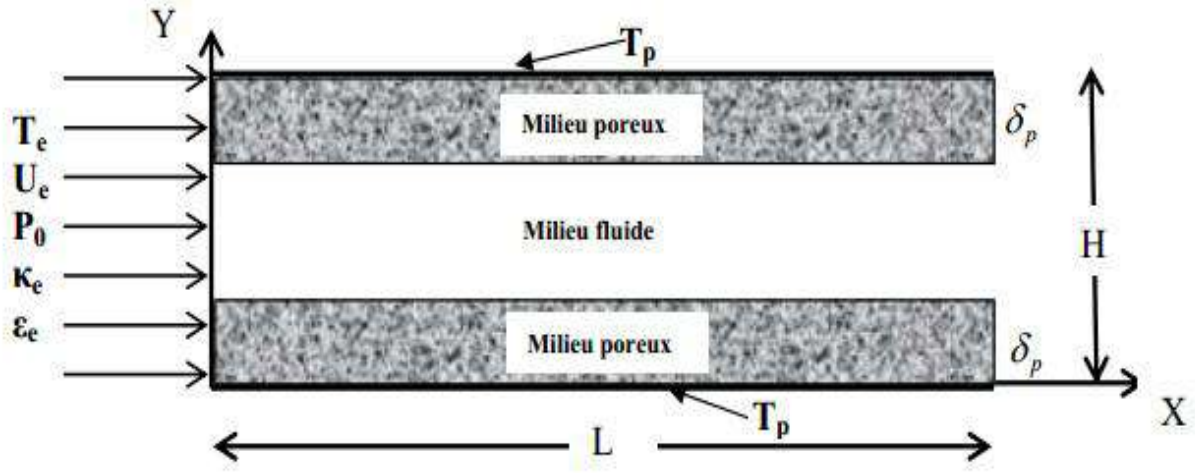


Figure IV.1: Ecoulement dans un canal à section rectangulaire.

IV.2. LES PROFILS DANS UN MILIEU COMPLETEMENT FLUIDE

IV.2.1. Profil de température

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

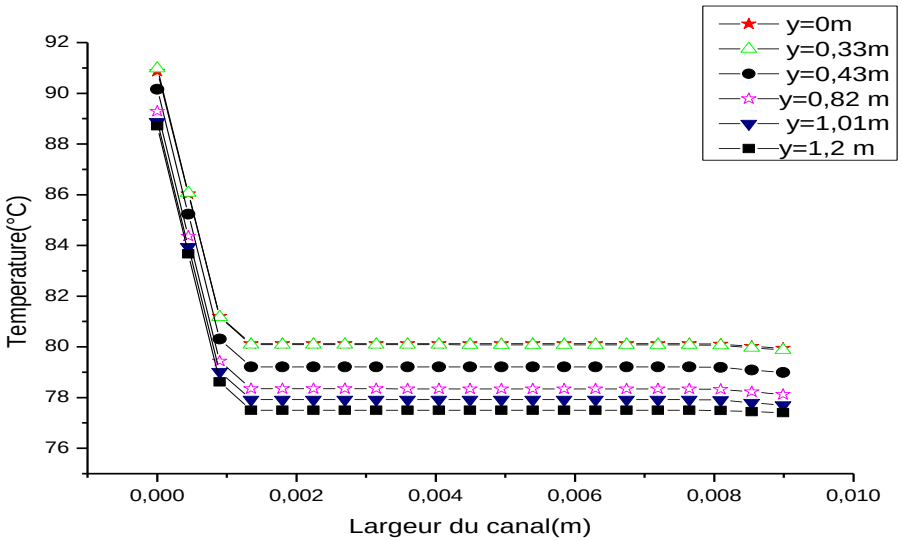


Figure IV.2 : Variation du profil de température dans lait.

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

D'autre part, on observe une diminution de gradient de température pour la vapeur d'eau (graphe en annexe) pour les mêmes raisons.

IV.1.2. Profil de vitesse

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

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

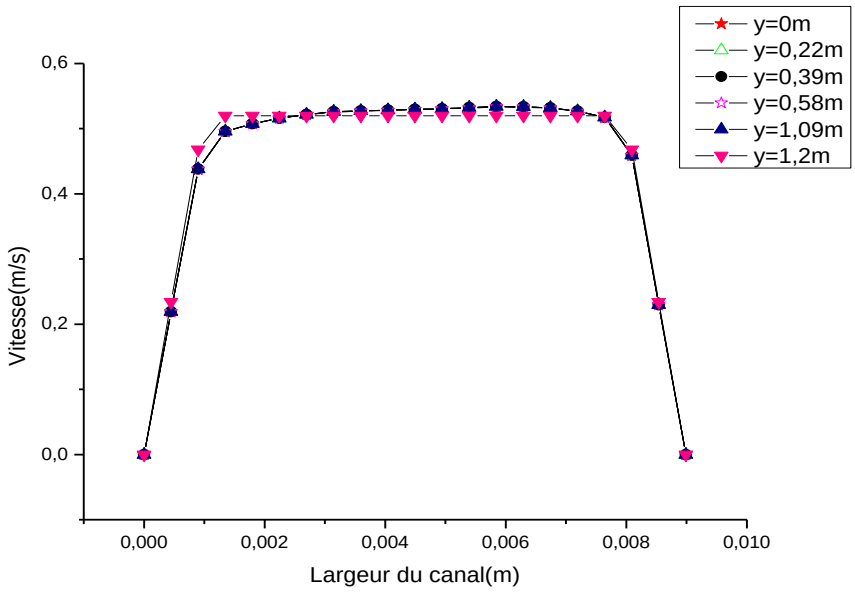


Figure IV.3: Variation du profil de vitesse à la longue de canal

IV.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 IV.4 et ce pour différentes positions dans le canal (y).

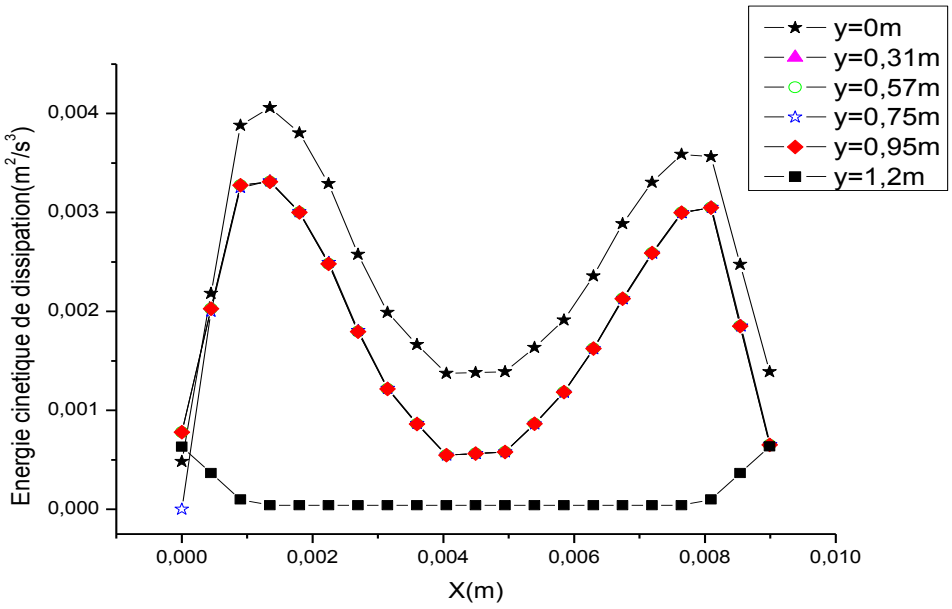


Figure IV.4: Variation du facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente.

L'évolution de l'énergie cinétique turbulente à la sortie du canal est représentée sur la figure IV.4 Il apparait clairement que l'énergie cinétique turbulente atteint sa valeur maximale à l'interface fluide-paroi et/ou fluide-dépôt. La réduction de la section de passage du fluide au cours du temps et la nature de l'interface de contact (fluide-dépôt) provoque le pic d'énergie turbulente. A cette interface, en plus de la résistance due aux forces visqueuses et d'inertie, une résistance supplémentaire plus importante est due aux termes de Darcy et Forchheïmer. Ce qui produit une accélération plus importante dans cette zone. En allant vers le centre du canal l'énergie cinétique turbulente décroît progressivement et atteint son minimum dans la section centrale du canal. La réduction de la section de passage du fluide fait augmenter l'énergie cinétique.

IV.2. LES PROFILS DANS UN MILIEU AVEC UN DEPOT

IV.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 IV.5 et ce pour différentes positions dans le canal (y).

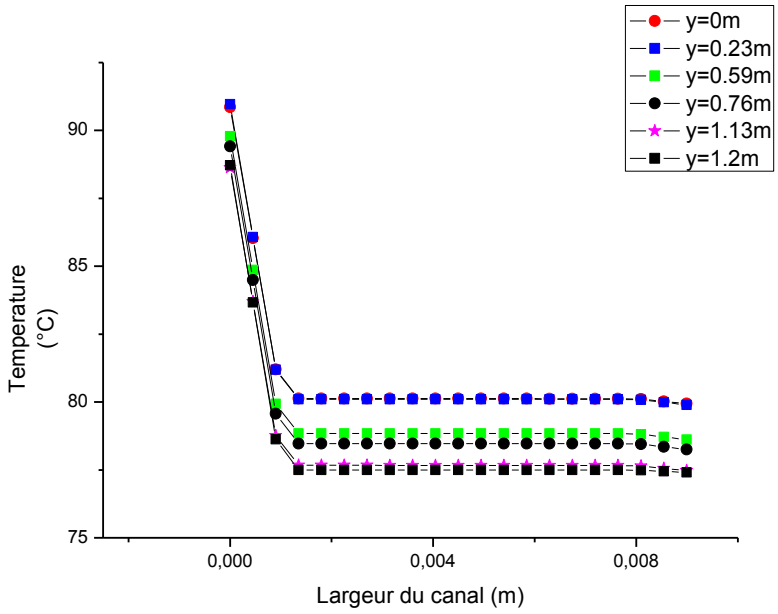


Figure IV.5: La variation de la température à la longue de canal.

Une augmentation de la température dans le cas d'un canal avec un dépôt poreux sur les parois est toujours observée mais elle est moins significative en comparaison avec le cas sans dépôt et ce en raison de la présence du dépôt de nature isolante [58].

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

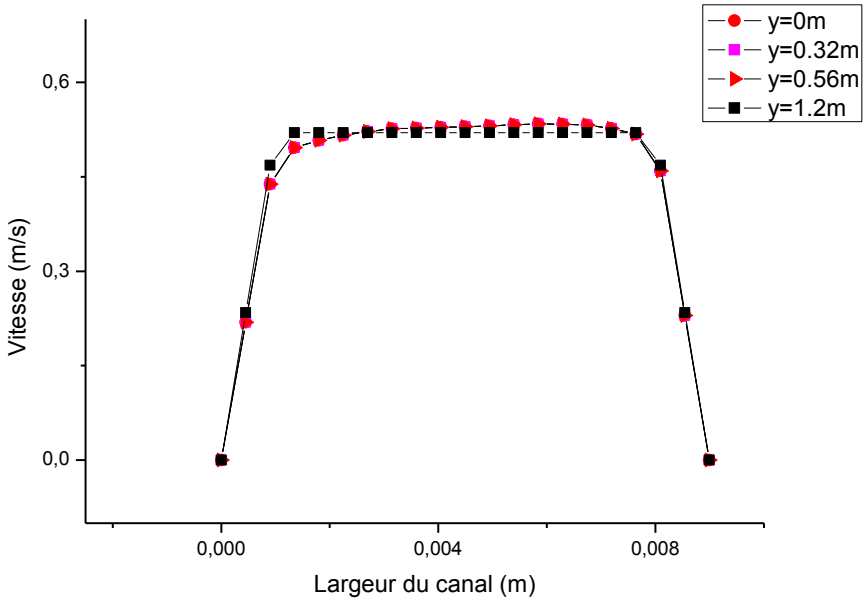


Figure IV.6: Variation du profil de vitesse.

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

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

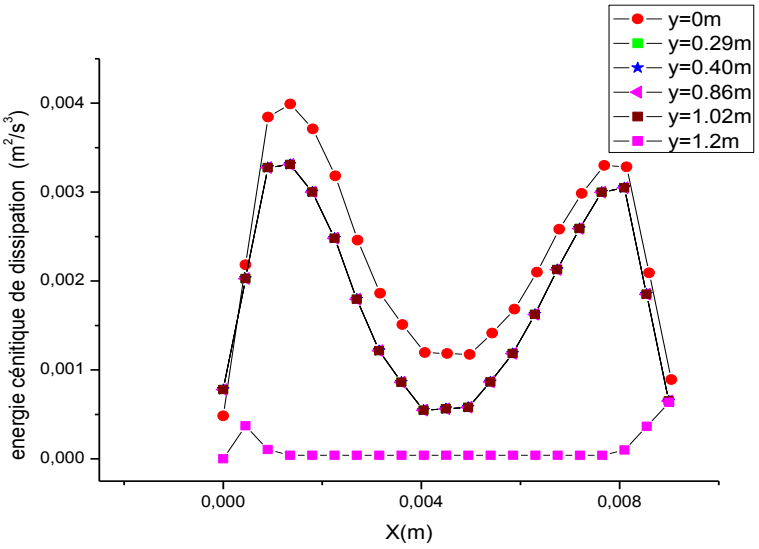


Figure IV.7: Facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente avec un milieu poreux.

L'évolution du profil du facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente le long de la largeur du canal est représentée sur la figure IV.7 et ce pour différentes positions dans le canal (y). Il apparait que le facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente atteint sa valeur maximale à l'interface fluide-dépôt. A cette interface, en plus de la résistance due aux forces visqueuses et d'inertie, une résistance supplémentaire plus importante est due aux termes de Darcy et Forchheïmer.

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

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

IV.3.1. Profil de la température

La Figure IV.8 présente la variation du profil de la température dans la section de sortie en fonction de largeur du canal avec et sans dépôt pour une position y=0.

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

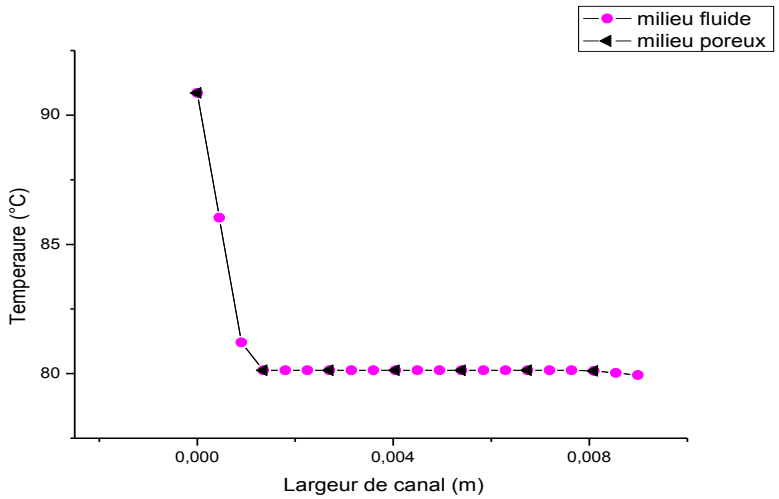


Figure IV.8: Evolution de la température avec et sans dépôt.

IV.3.2. Profil de la vitesse

L'évolution du profil de la vitesse en fonction de la largeur du canal avec et sans dépôt est représentée sur la Figure IV.9 pour une position y=1,2m.

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

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

de la vitesse dans la sortie du canal, on s'aperçoit que la vitesse maximum à la sortie augmente lorsque l'épaisseur de milieu poreux augmente.

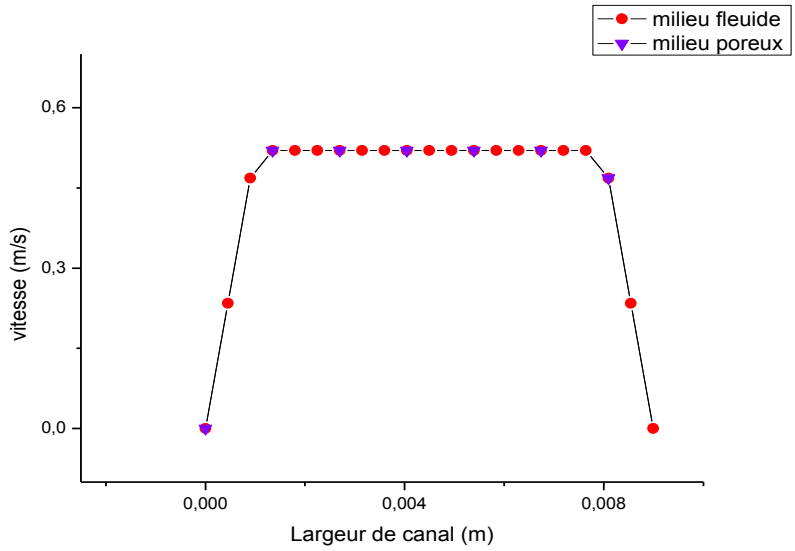


Figure IV.9: Evolution de la vitesse avec et sans dépôt.

IV.3.3. 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 avec et sans dépôt est représentée sur la Figure IV.10 pour une position y=0 m.

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

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

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

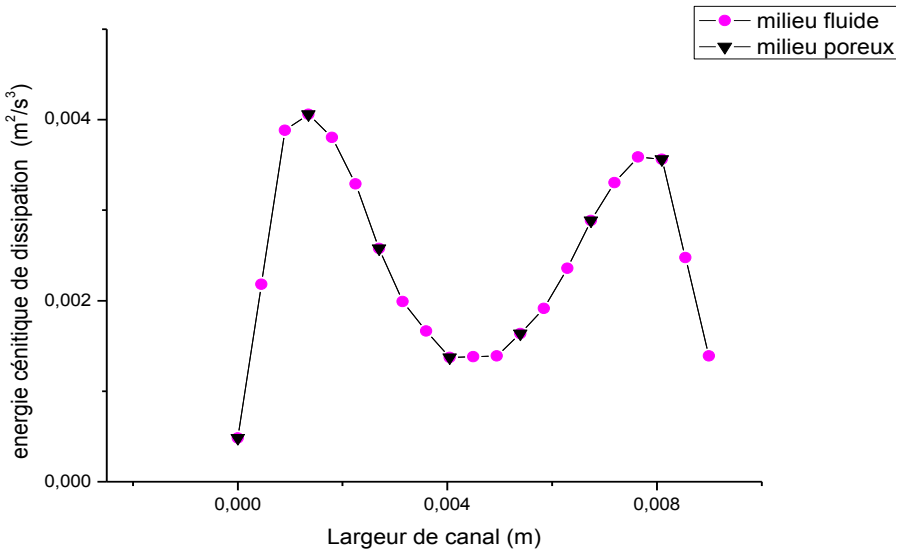


Figure IV.10: Evolution du facteur de dissipation de l'énergie cinétique turbulente avec et sans dépôt.2

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

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

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

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

- plus l'épaisseur du dépôt augmente, moins le fluide est chauffé et plus l'échange thermique entre la paroi et le fluide est affecté.
- L'existence d'un dépôt de surface réduit la diffusion thermique. Une chute importante de la température est aussi observée. Une grande quantité de chaleur reste emmagasinée dans la matrice poreuse. Le dépôt encrassant constitue une couche isolante de la chaleur.
- Les profils de l'énergie cinétique turbulente et de la dissipation turbulente varient de la même façon. Un maximum du taux de dissipation est observé initialement au niveau de l'interface fluide-paroi et il est beaucoup plus important à l'interface fluide-dépôt. Dans la zone du dépôt, le profil de la dissipation est aplati, ce qui revient à confirmer que l'écoulement dans cette zone est quasiment nul.
- la vitesse de l'écoulement diminue au cours du temps et le profil de l'énergie cinétique turbulente décroît aussi.

Références bibliographiques

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

[2] http://www.wikiwand.com/fr/Lait.

[3] C.L.Vignola, Science et technologie du lait, Edition :Ecole polytechnique de Montréal, pp (28-30), 2002.

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

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

[6] http://theses.ulaval.ca /Archimède /fichiers /205166/ch02.html.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

[18] R. Lesur , N. Melik , Lait de consommation In LUQUEE F.M, Laits et produits laitiers vache brebis chèvre, Paris : page 5, 1999.

[19] H.Korib, A. Bensalah, Contribution à l'évaluation de la qualité physico-chimique et

bactériologique de lait cru et diagnostique de brucellose et mammites dans la région de Tlemcen en Algérie , Ingénieur d'état en agronomie , Université Abou Bekr Belkaid , 2010.

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

[21] E. Vierling, Aliment et boisson-science des aliments, Dion éditeur, centre régional de la documentation pédagogique d'Aquitaine, France, pages 11, 1999.

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

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

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

[25] C. Marvill et A. Bontemps, A. Garrigue, J. Huetz, C. Goubier, R. Vidil, Echangeurs de chaleur. Problèmes de fonctionnement. Techniques de l'ingénieur 1995.

[26] TEMA (Dir), Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association, New York, 1988.

[27] T. Casanueva-Robles, & T.R. Boot, The environmental effect of heat exchanger fouling: a case study. Communication présenté Engineering Conférences International, Germany, June 2005.

[28] F. Taourit , Etude du comportement thermique de deux écoulements du fluides dans un échangeur de chaleur (comparaison entre le cas simple et le cas avec ailettes), 2013.

[29] Y. Belloufi, Modélisation d'un échangeur air/sol dont le but de rafraichissement des locaux, Juin 2012.

[30] https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89changeur_de_chaleur.

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

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

[33] F. Finkbeiner, T. Gonard & B. Filiol, Echangeurs thermiques: Enjeux, marchés, technologie et politique d'innovation, France 1993.

[34] M. Roussel, Les échangeurs de chaleur, Analyse stratégique ELC paris/AFM Rapport public, Juin 1987.

[35] Construction Of Shell And Tube Heat Exchanger, Wolverine Tube Heat Transfer Data Book .

Références bibliographiques

[36] http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10867.

[37] T. Pedot, Modélisation du couplage thermique entre la combustion et l'encrassement des tubes d'un four de raffinerie, Doctorat en Energétique et Transfer, Université de Toulouse, Février 2012.

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

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

[40] N. Fadel, Etude de l'influence de la température du fluide sur la performance d'un échangeur de chaleur de la raffinerie d'Algie, Ingénieur d'état en génie chimique, Université Houari Boumediene –Algie, 2010.

[41] N. Epstein, Thinking about Heat Transfer Fouling : A 5×5 Matrix , Departement of chemical engineering ,University of British Columbia , p(43 .56) 1983.

[42] M. Lalande, J.P. Tissier et G. Corrieu, Fouling of Plate Exchangers Used in Ultra-High-Temperature Sterilization of Milk, J. Dairy Res, p (51,557-568) ,1984.

[43] M. Lalande , J. P. TISSIER , et G.CORRIEU, Fouling of heat Transfer Surfaces Related to B-Lacto globulin Denaturation during Heat Processing of Milk Biotechnology. Prog , p(1, 131-139) ,1985.

[44] M. Lalande , F. Reno, 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, pp(557-573), Amsterdam, 1988.

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

[46] Y. Mahdi, L. oufer, Simulation numérique de l'encrassement des échangeurs de chaleur à plaques lors d'une phase de pasteurisation, VIIème Colloque Interuniversitaire Franco-québécois sur la Thermique des Systèmes, Saint-Malo France 23-25 mai 2005.

[47] M. T. Belmar-Beiny, S. M. Gotham, W. R. Paterson & P. J. Fryer, The effect Of Reynolds number and fluid temperature in whey protein fouling. Journal of the Society of Dairy Technology, p (19, 119-139), 1993.

[48] P. Jong, S. Bouman & H. J. Van Der Linden, Fouling of heat transfer equipment in relation to the denaturation of b-lactoglobulin. Journal of the society of Dairy Technology, p (45, 3-8), 1992.

Références bibliographiques

[49] I. Toyoda, P. J. R. Schreyer & P. Fryer, A computational model for reaction fouling from whey protein solutions. In fouling and cleaning in food processing, jesus, College, Cambridge, (pp. 191-196) , March 1994.

[50] C.L. Avezard , J. Lablee , Lait et produits laitiers recombinés , In LUQUEE F.M , Laits et produits laitiers vache brebis chèvre, Paris : p(536-538-539) 1990.

[51] ‘‘Manuel technique de l’installation’’ ST

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

[53] P. K. Nema , AK. Datta , “A computer based solution to check the drop in milk outlet temperature due to fouling in a tubular heat exchanger” Journal of Food Engineering (N° 71) 2005.

[54] E. R. G. Echert, R. M . Drake , “Heat and Mass transfert ” Mc Graw-Hill ,1972.

[55] A. Chikh Touhami, Calcul des déformations Elastohydrodynamique dans un palier circulaire (utilisation du logiciel ANSYS), Master en Génie Mécanique, Université Dr.Yahia Farés-Médéa 2012.

[56] M. Kaouane, Analyse des contraintes et de la fissuration des éléments en béton armé sous l’effet thermomécanique, Magister en Génie Civil, Université Mouloud Mammeri-2011.

[57] M. Guit, B. Lounes , Simulation Numérique de l’impact des gouttelettes de métal creuses sur une surface incliné , Master en génie mécanique ,Université Dr. Yahia Farés-Médéa 2013 .

[58] Y. Mahdi , A. Mouheb and L. Oufer , A dynamic model for milk fouling in a plate heat exchanger, Applied Mathematical Modeling 33, Issue 2, p(648–662), February 2009.

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

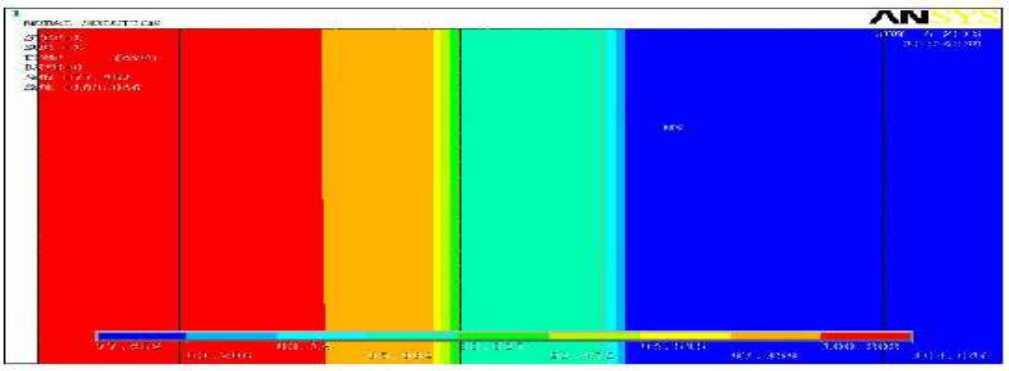
e = le diamètre de plaque = 0.0045 m

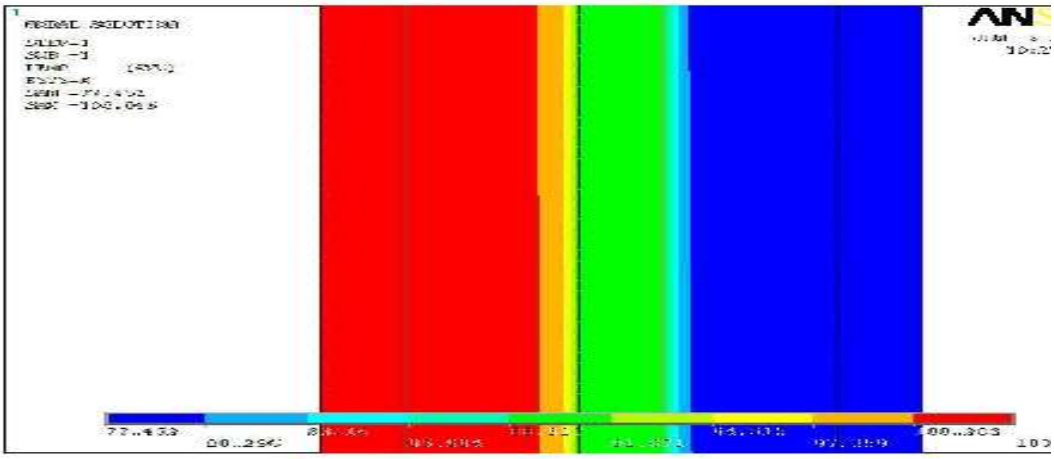
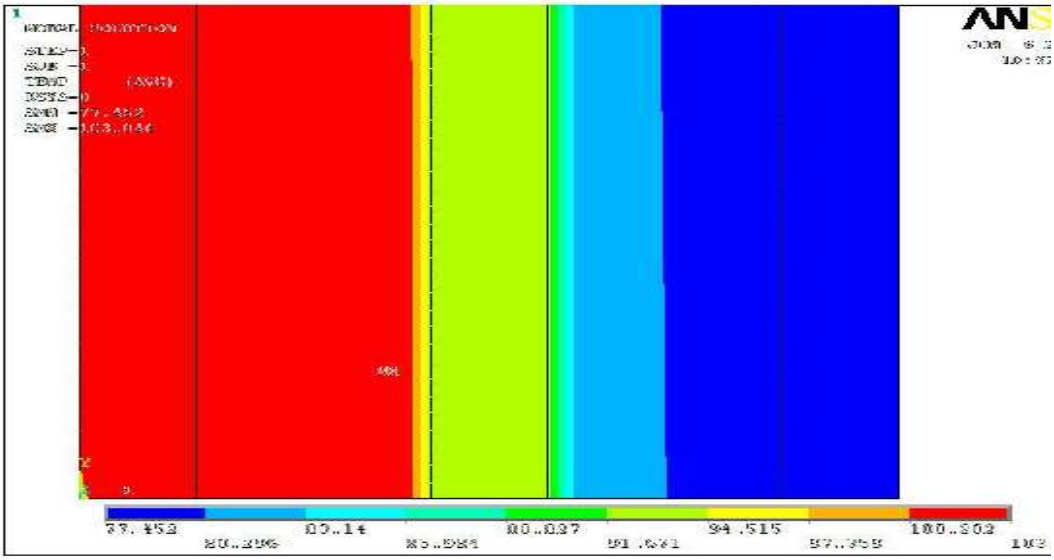
d = diamètre hydraulique =diamètre entre les deux plaque = e*2=0.0045*2=0.009 m

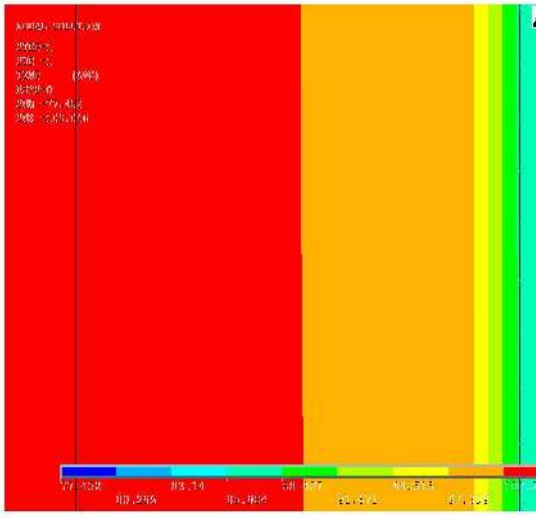
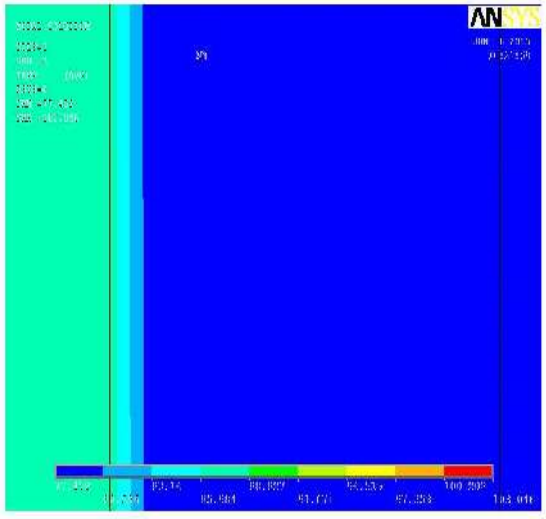
		Paramètre du lait	Paramètre du l'eau	Paramètre d'aluminium
Chaleur spécifique CP		3912	4037.24	900
Masse volumique		1001.34	983.84	2700
Viscosité		0.000604	0.00033	/
Conductivité		0.642	0.68	237
Condition au limite	vitesse	-0.52	0.52	/
	température	77.5	103	/
	pression	0	0	/

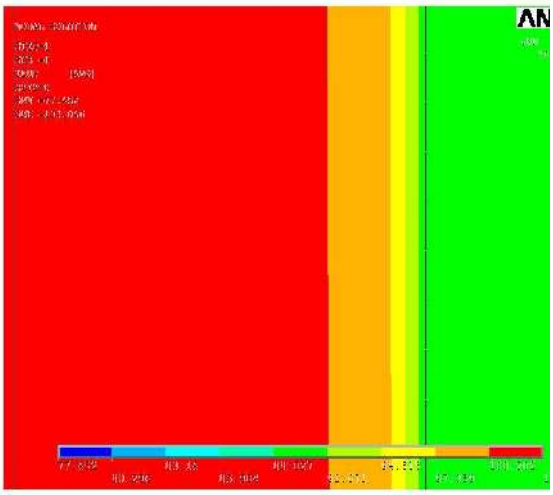
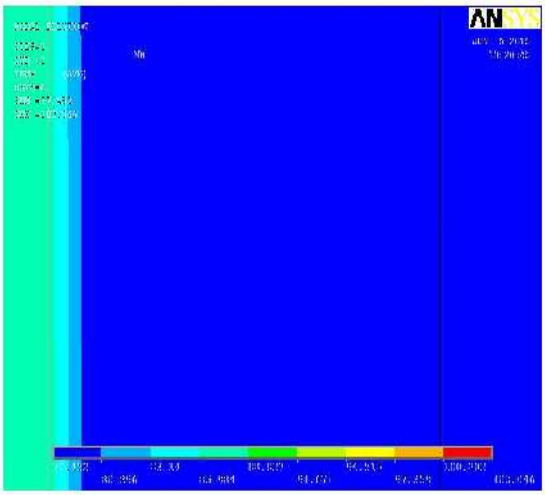
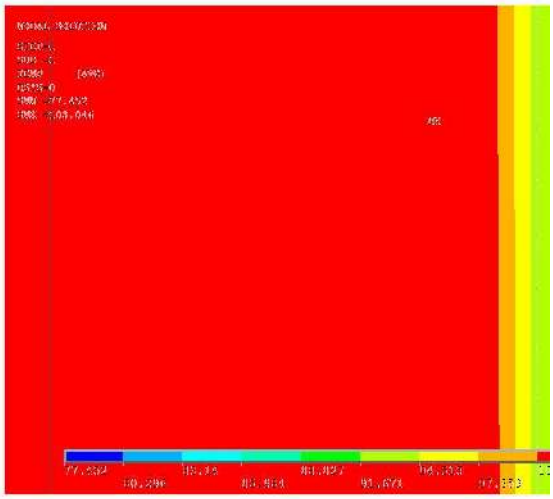
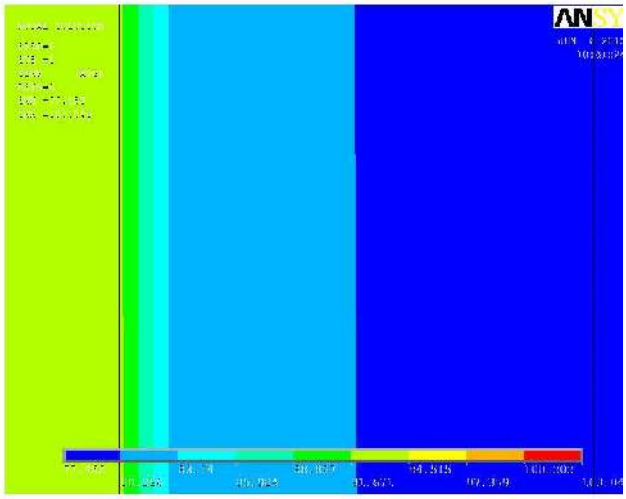
I. LES RESULTAT DANS UN MILIEU FLUIDE

1. Profil de température

	Les deux cotés
En haut	

Au milieu	
En bas	

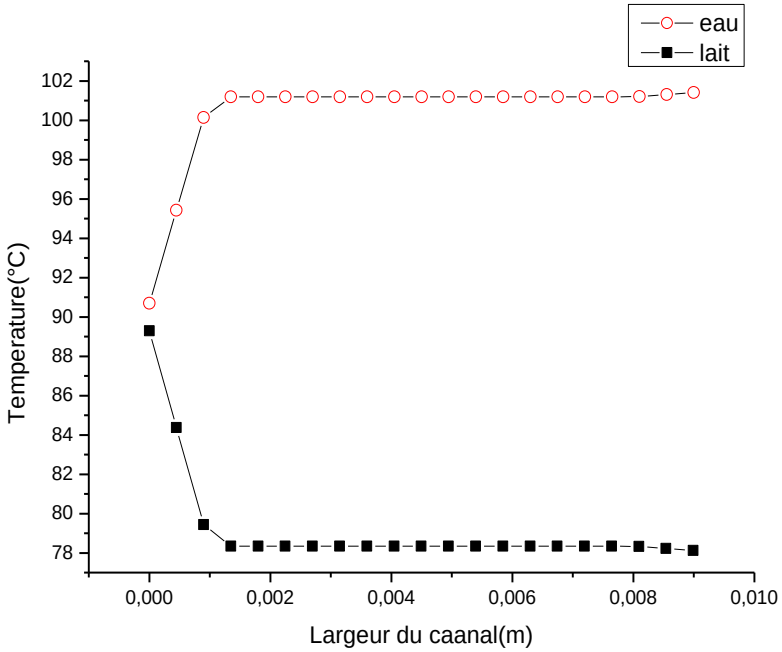
	Coter eau	Coter lait
En haut		

Au milieu		
En bas		

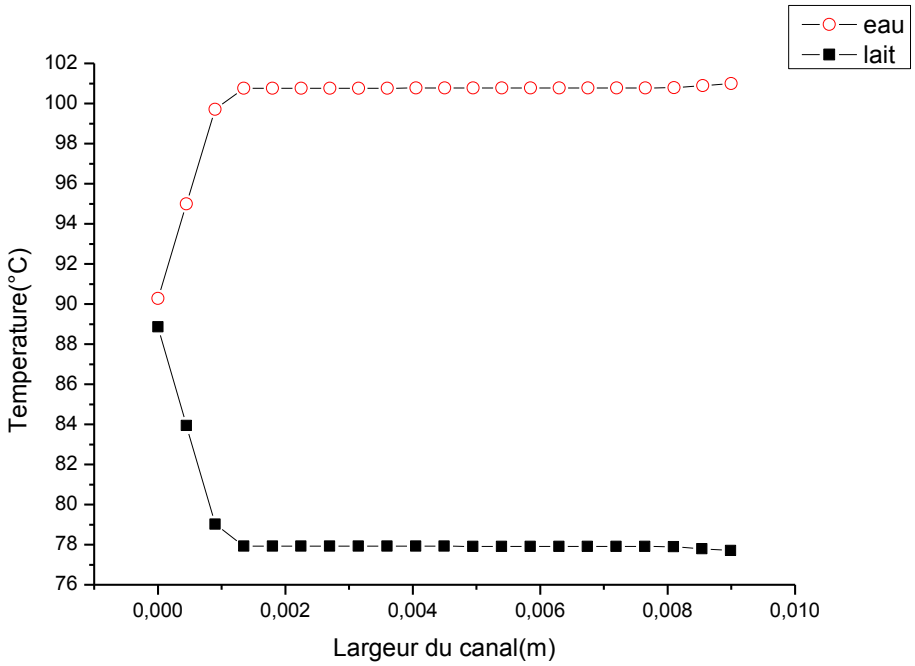
La variation de la température à la longue de canal

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

Y=0.82 m

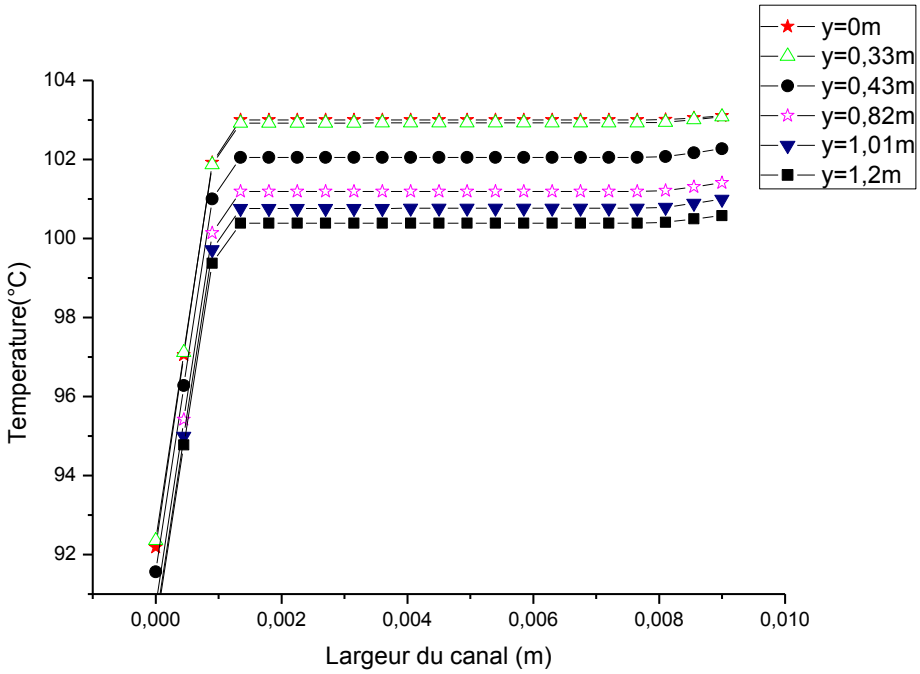

eau
lait
Temperature(°C)
102
100
98
96
94
92
90
88
86
84
82
80
78
0,000
0,002
0,004
0,006
0,008
0,010
Largeur du caanal(m)

Y=1.01m

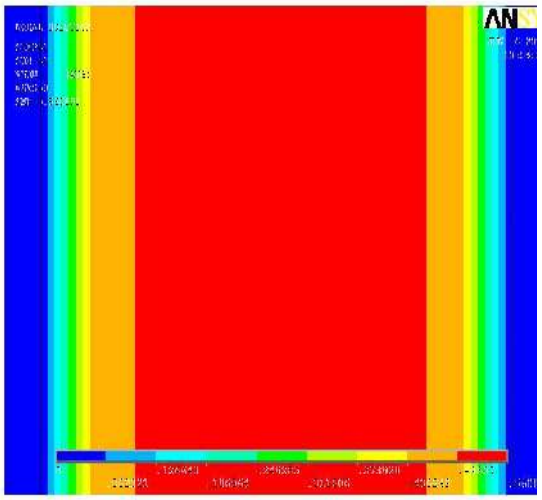
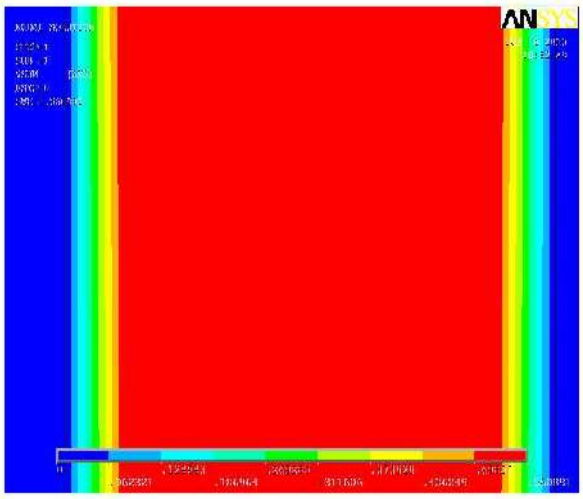

eau
lait
Temperature(°C)
102
100
98
96
94
92
90
88
86
84
82
80
78
76
0,000
0,002
0,004
0,006
0,008
0,010
Largeur du canal(m)

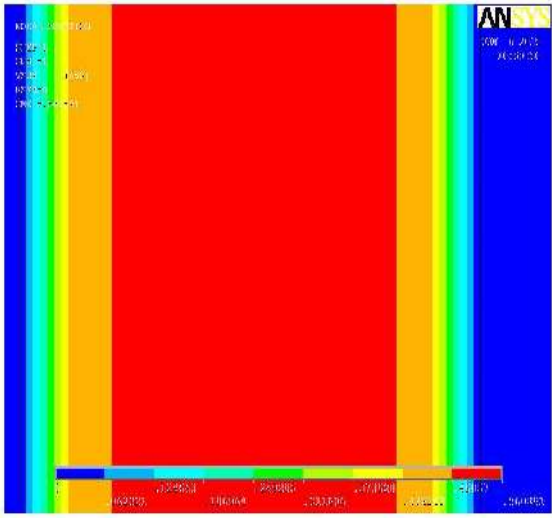
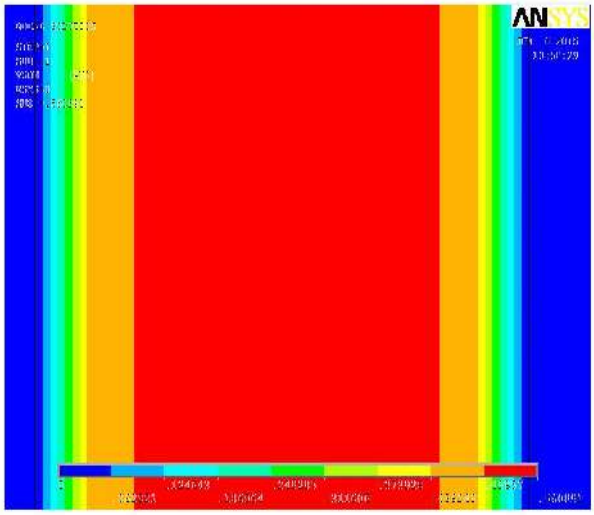
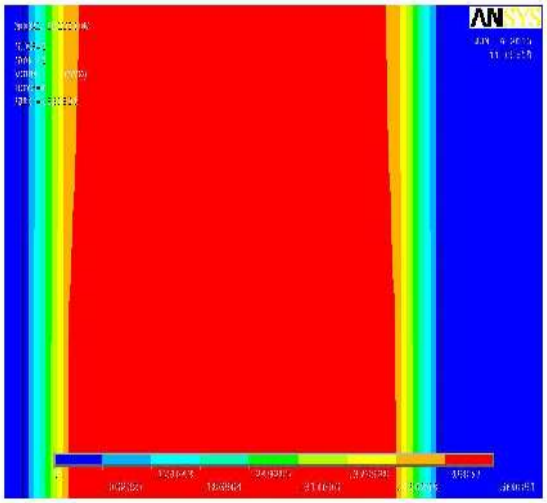
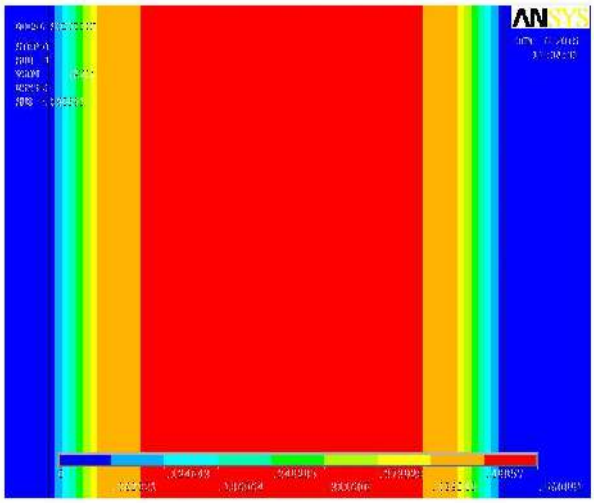
Les températures dans un même graphe

Coté l'eau



I.2. Profil de vitesse

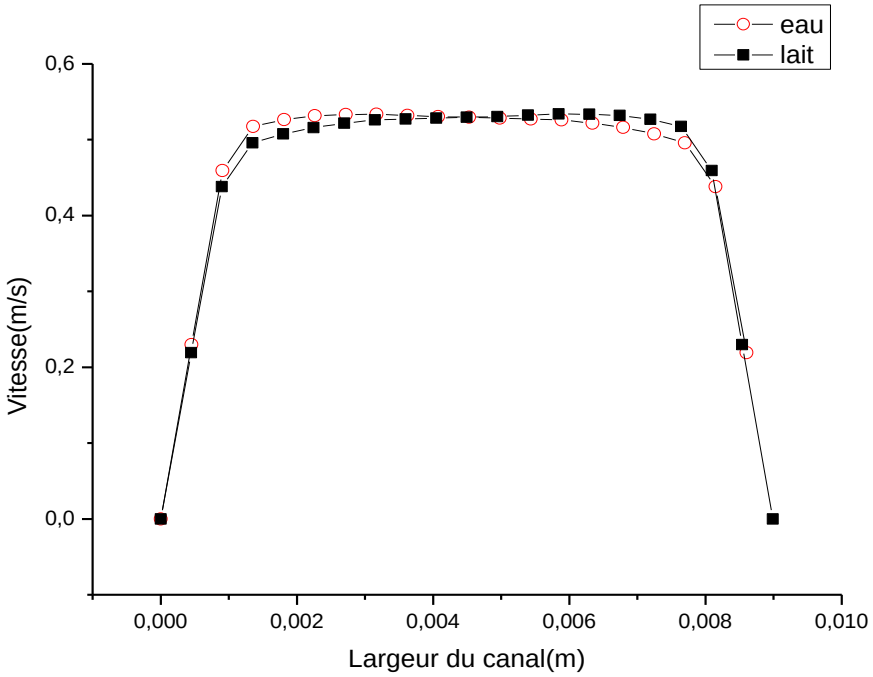
	Coter eau	Coter lait
En haut		

Au milieu		
En bas		

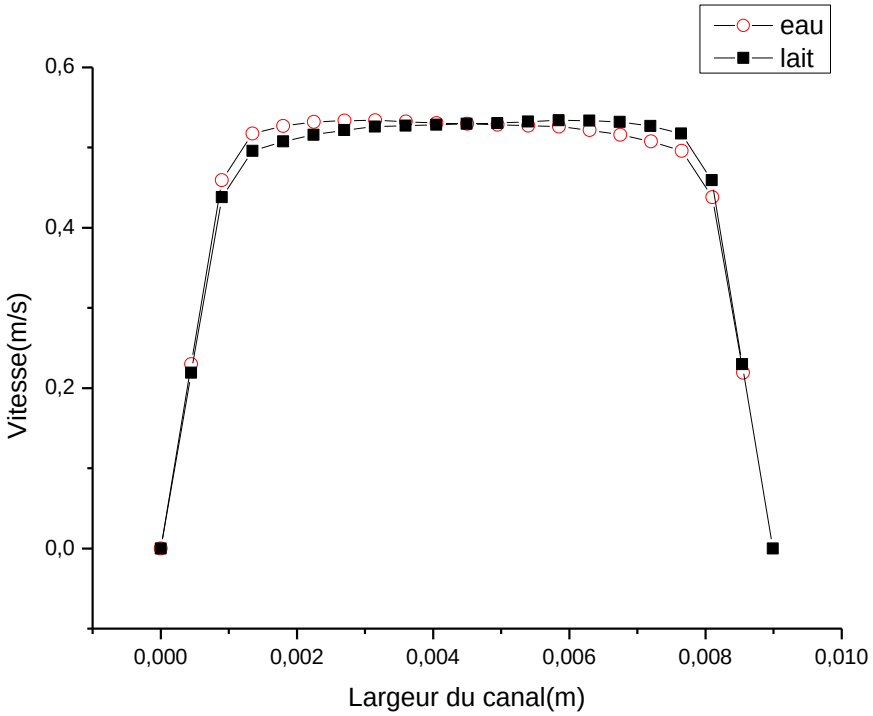
La variation de vitesse à la longue de canal

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 positions dans le canal (Y).pour l'eau et lait

Y=0.22 m

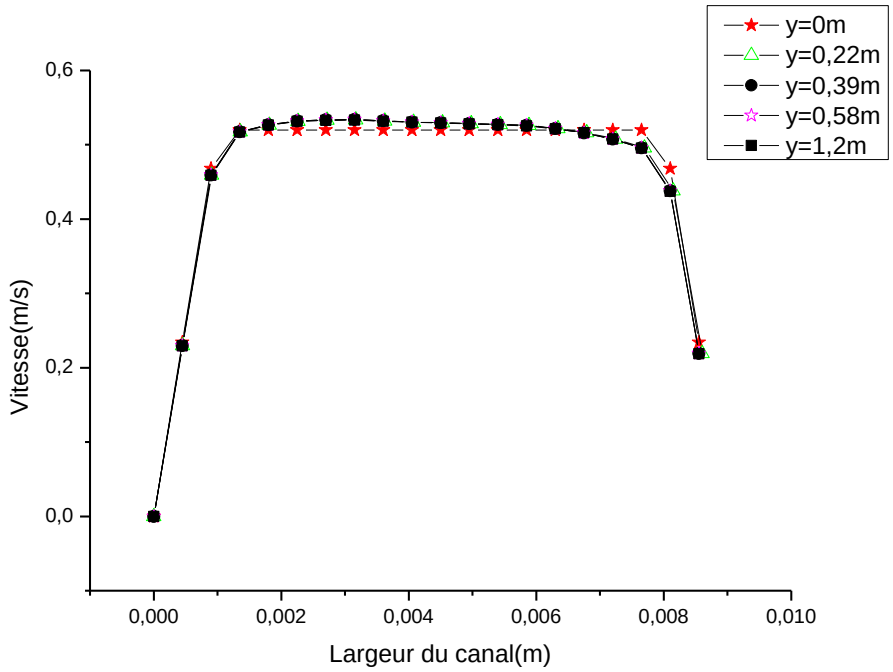

eau
lait
0,6
0,4
0,2
0,0
Vitesse(m/s)
0,000
0,002
0,004
0,006
0,008
0,010
Largeur du canal(m)

Y=0.58m

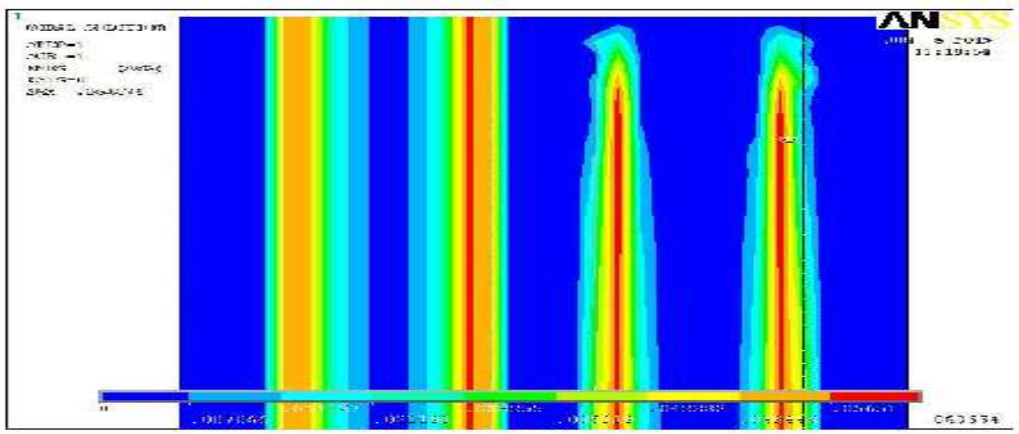

eau
lait
0,6
0,4
0,2
0,0
Vitesse(m/s)
0,000
0,002
0,004
0,006
0,008
0,010
Largeur du canal(m)

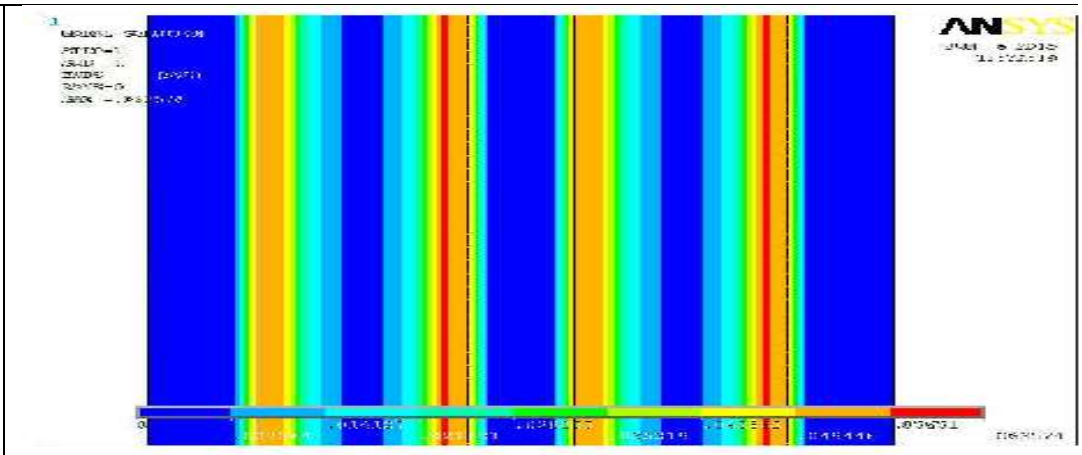
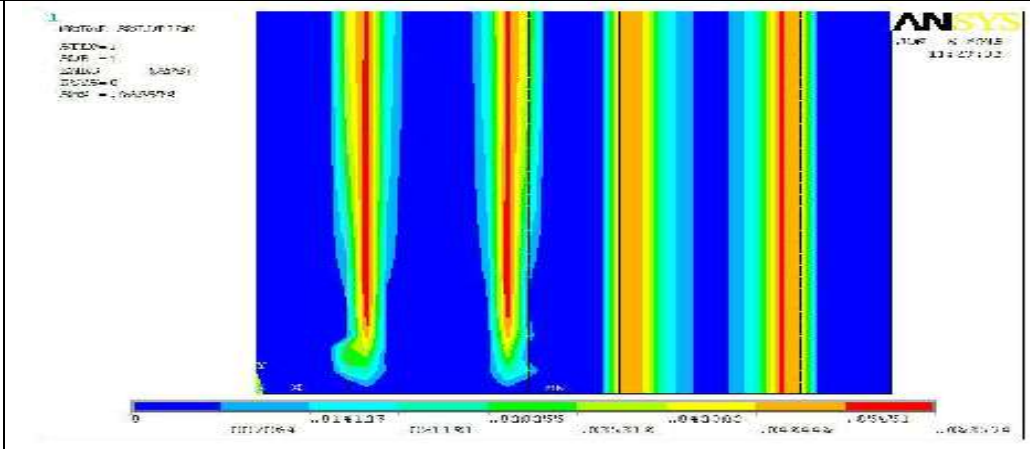
Les vitesses dans un même graphe

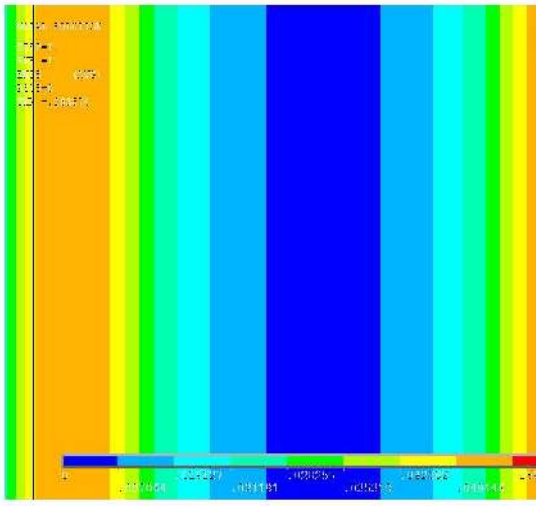
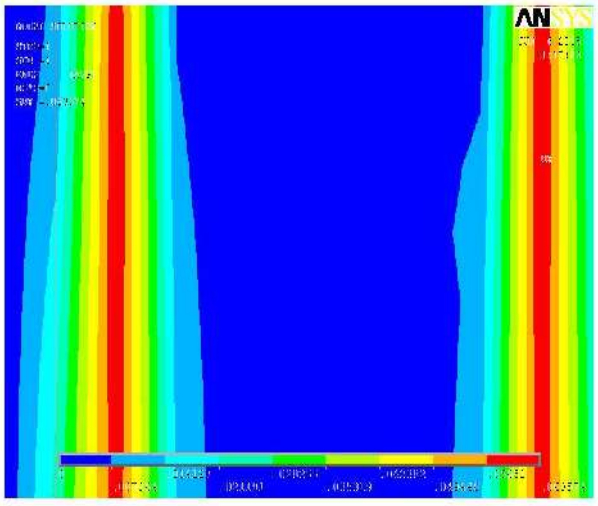
Coté eau

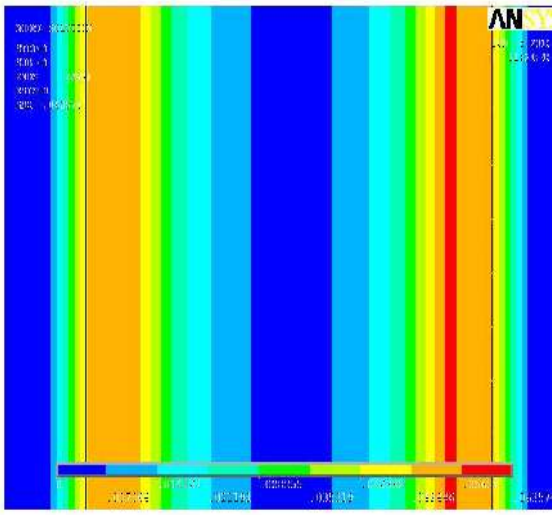
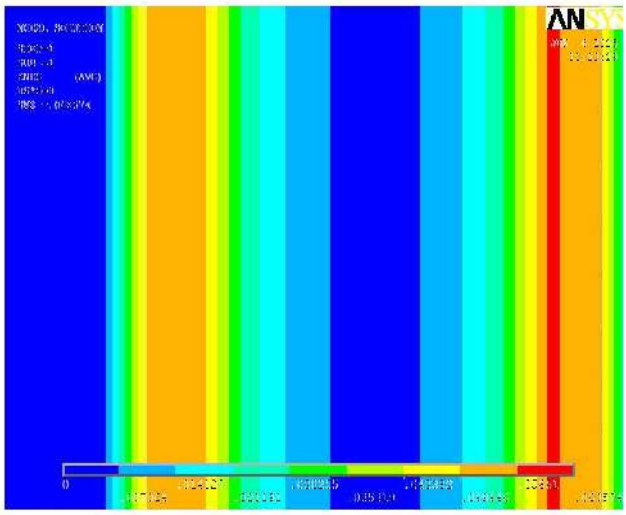
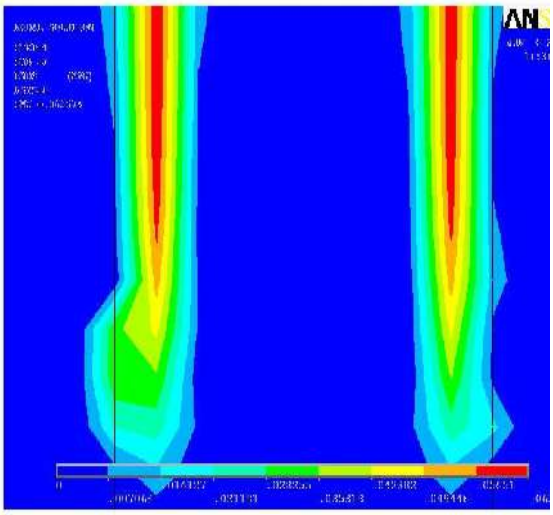
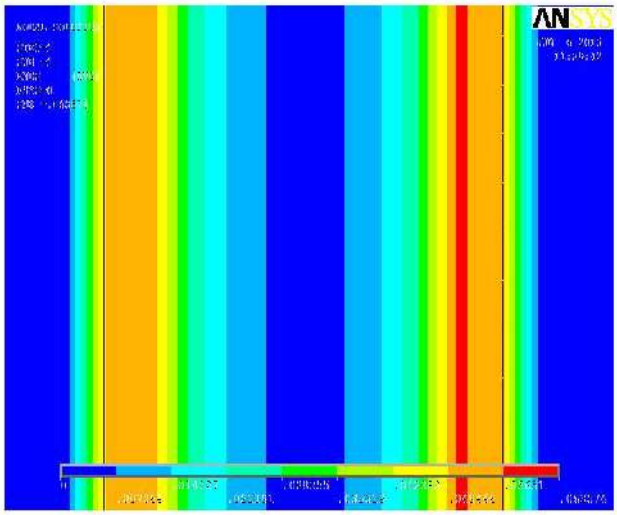


1.3. Le profil de facteur de l'énergie cinétique de dissipation

	Les deux cotés
En haut	

Au milieu	
En bas	

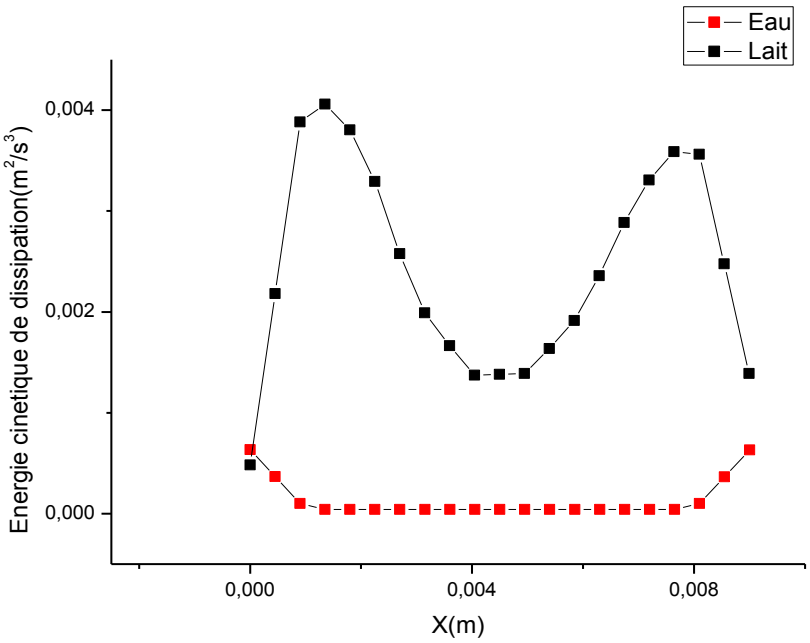
	Coter eau	Coter lait
En haut		

Au milieu		
En bas		

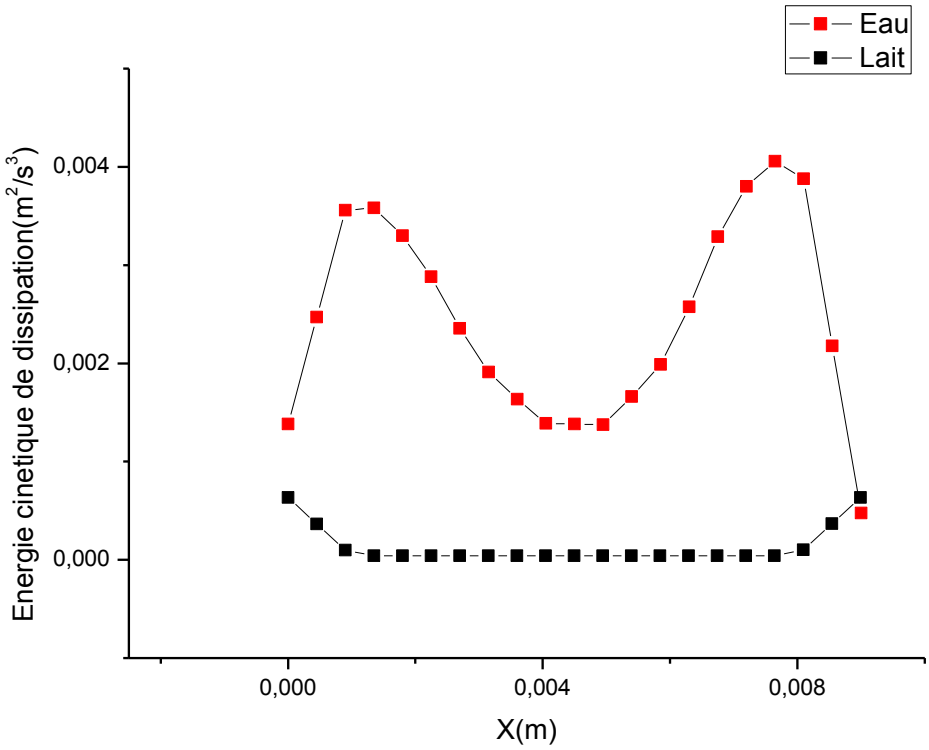
La variation de facteur de dissipation de l'énergie cinétique à la longue de canal

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 positions dans le canal (Y).pour l'eau et lait

y=0 m

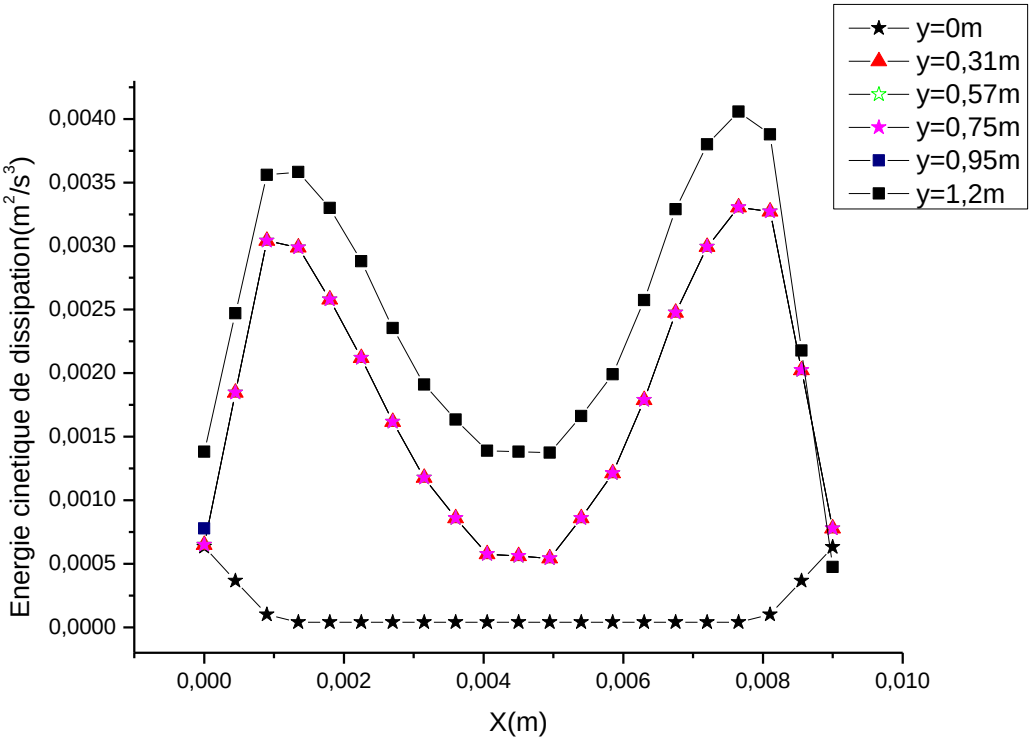

Eau
Lait
Energie cinetique de dissipation(m²/s³)
0,004
0,002
0,000
0,000
0,004
0,008
X(m)

Y=1.2 m


Eau
Lait
Energie cinetique de dissipation(m²/s³)
0,004
0,002
0,000
0,000
0,004
0,008
X(m)

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

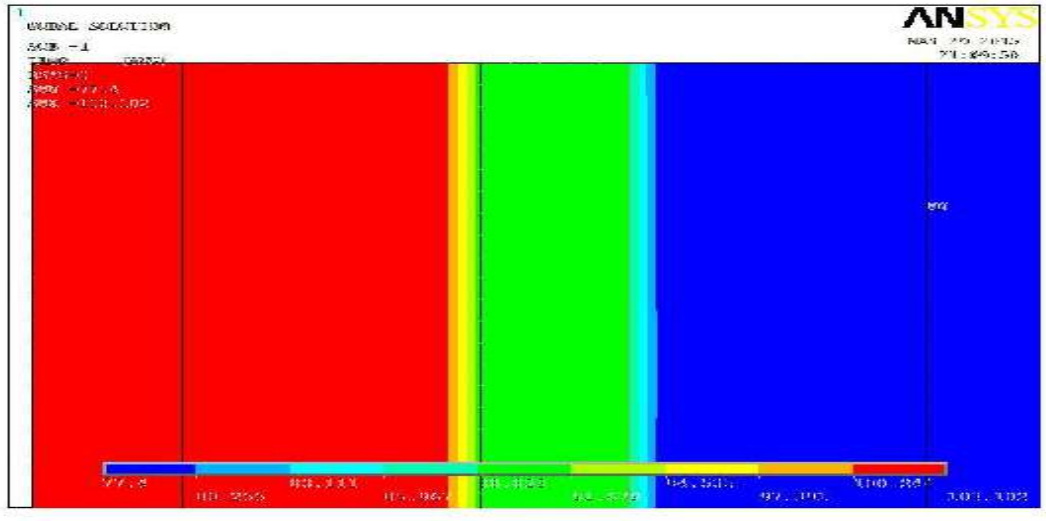
d = diamètre hydraulique =diamètre entre les deux plaque = e*2=0.0045*2=0.009 m

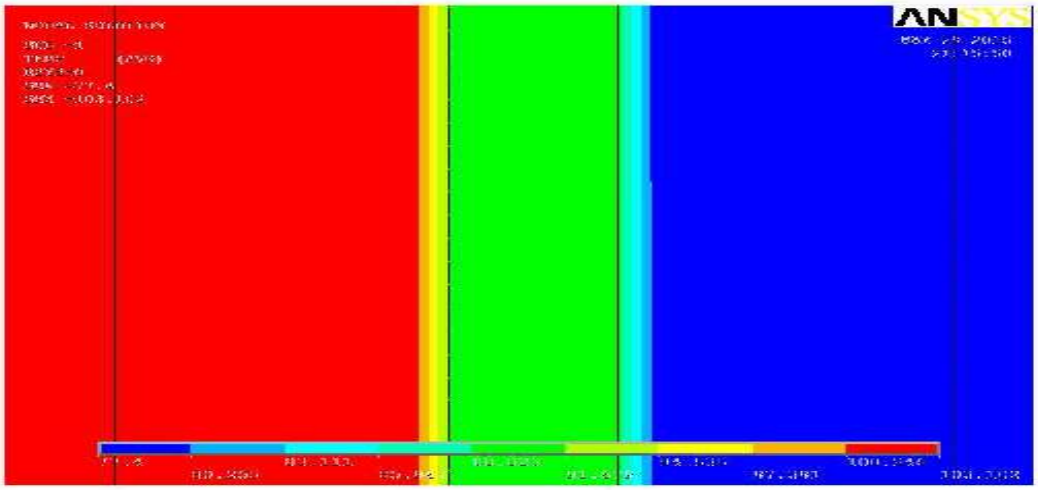
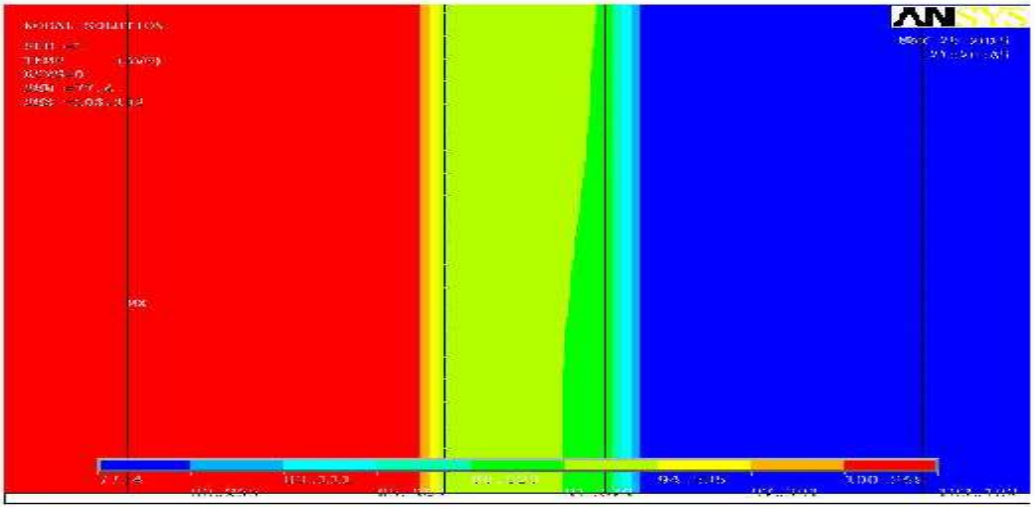
		Paramètre du lait	Paramètre du l'eau	Paramètre d'aluminium
Chaleur spécifique CP		3912	4037.24	900
Masse volumique		1001.34	983.84	2700
Viscosité		0.000604	0.00033	/
Conductivité		0.642	0.68	237
Condition au limite	vitesse	-0.52	0.52	/
	température	77.5	103	/
	pression	0	0	/

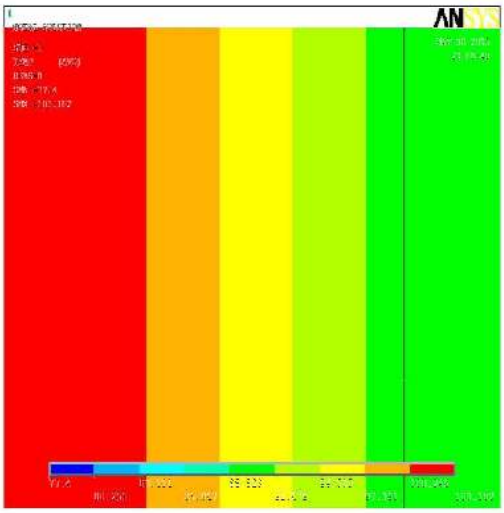
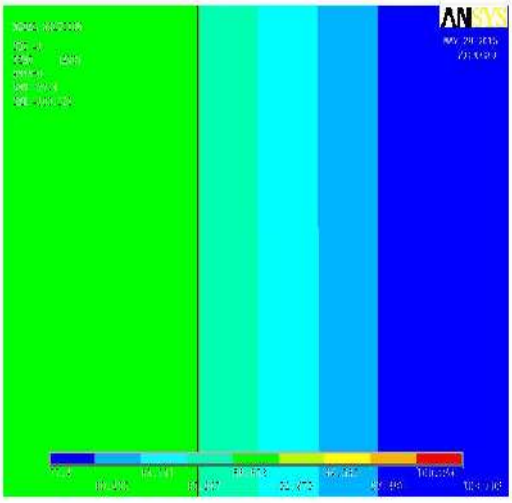
	La chaleur spécifique CP	La masse volumique	La conductivité	
L'encrassement du lait	3912	1030	kxx	Kyy
			0.5	0.53

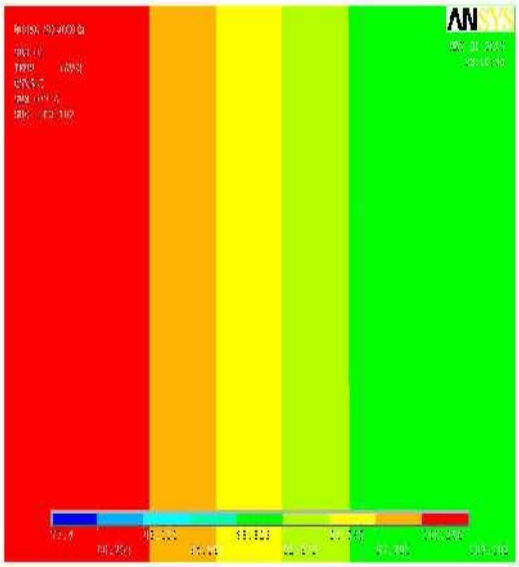
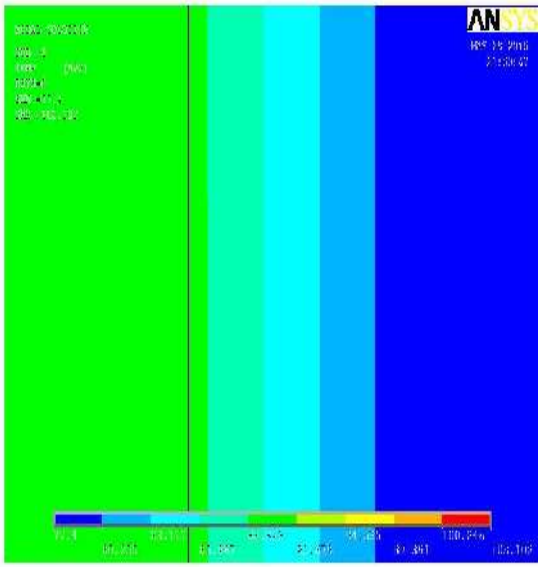
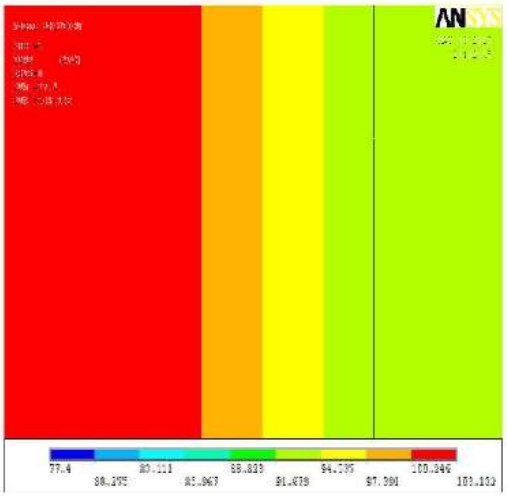
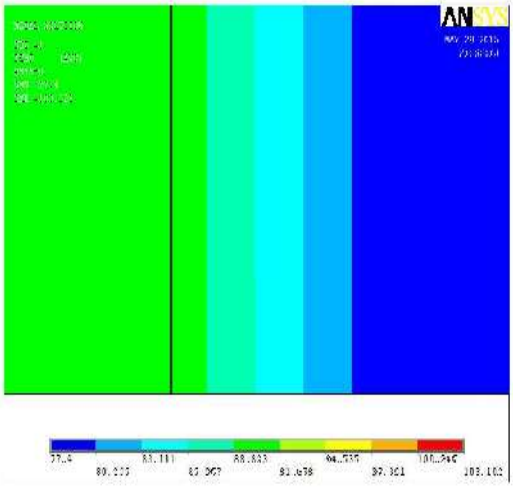
II. LES RESULTAT DANS UN MILIEU POREUX

II.1 profil de La température

En haut	

Au milieu	
En bas	

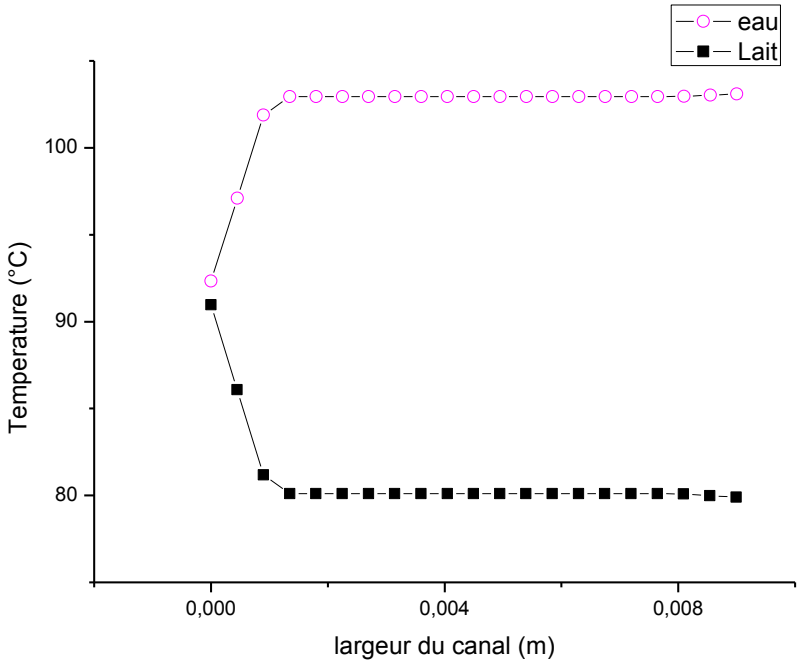
	Coté l'eau	Coté lait
En haut		

Au milieu		
En bas		

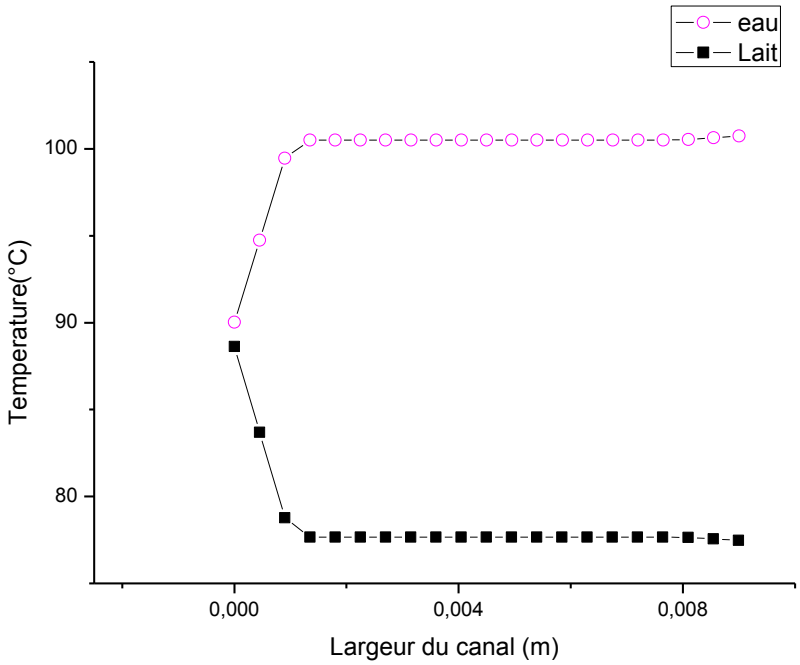
La variation de la température à la longue du canal

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 positions dans le canal (Y).pour l'eau et lait

Y=0.23 m

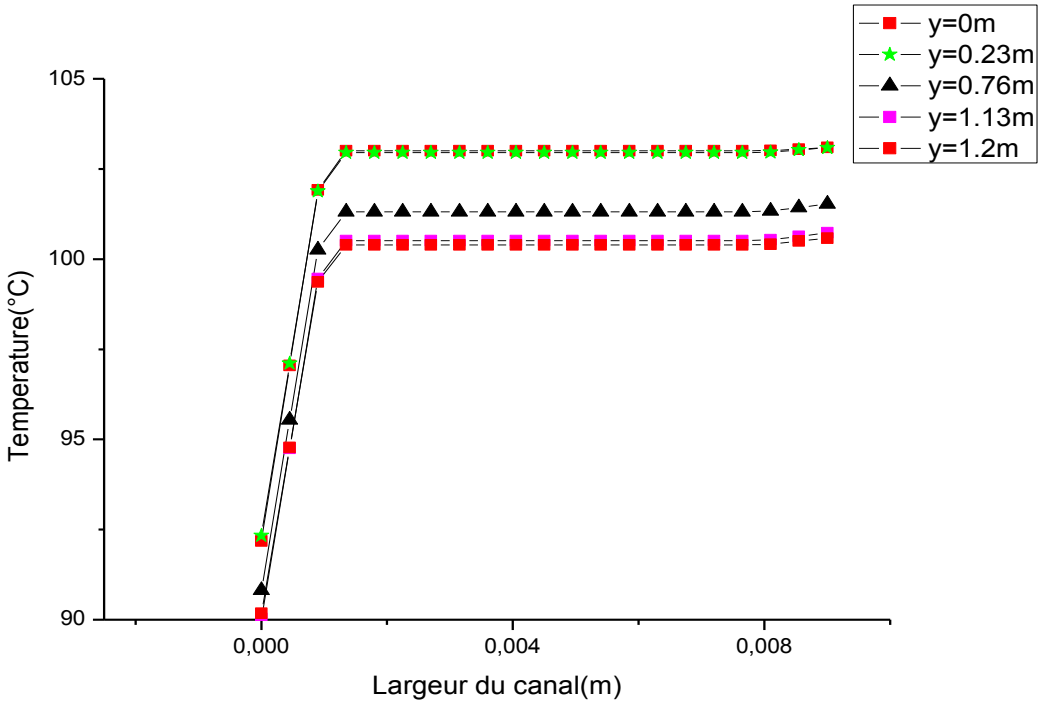

eau
Lait
100
90
80
Temperature (°C)
0,000
0,004
0,008
largeur du canal (m)

Y=1.13 m

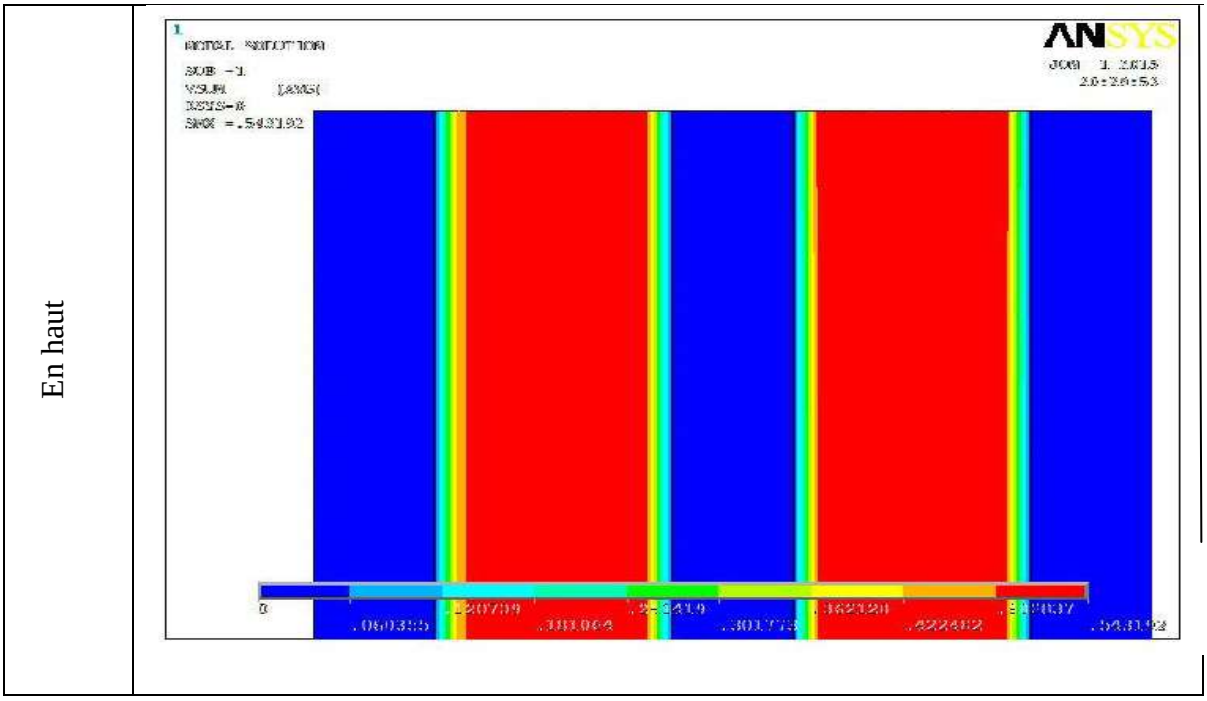

eau
Lait
100
90
80
Temperature(°C)
0,000
0,004
0,008
Largeur du canal (m)

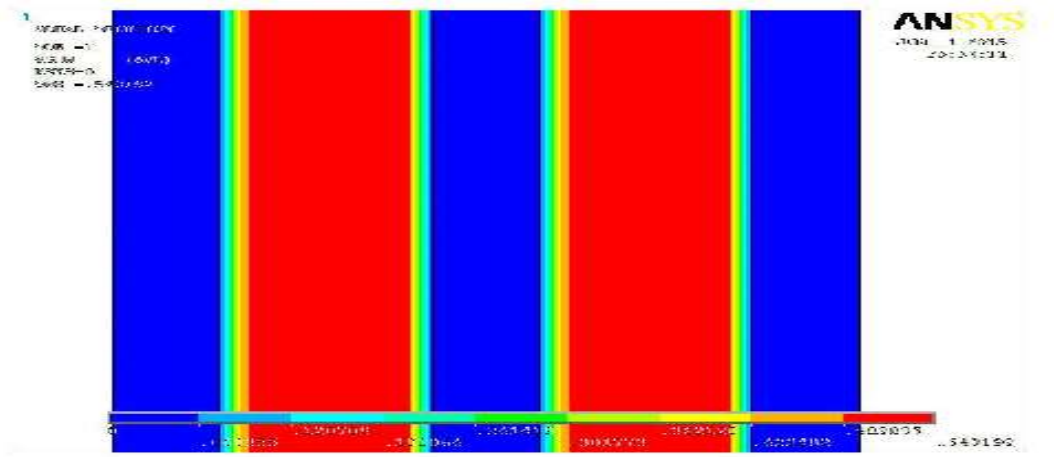
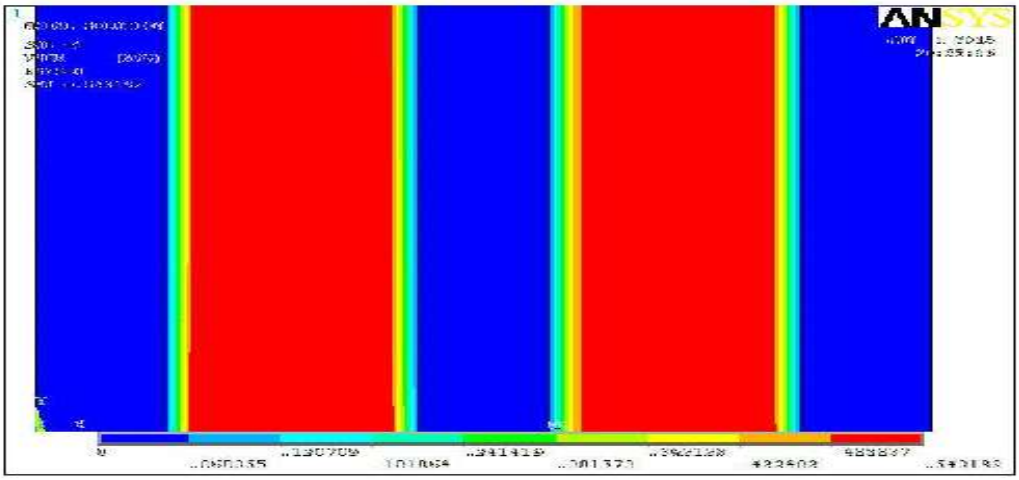
Les températures dans un même graphe

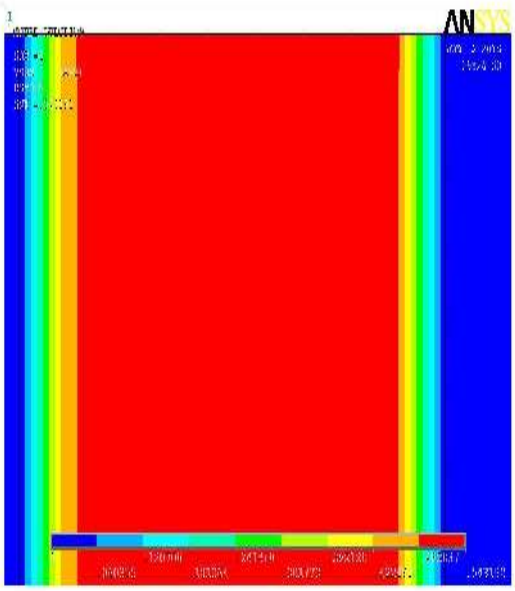
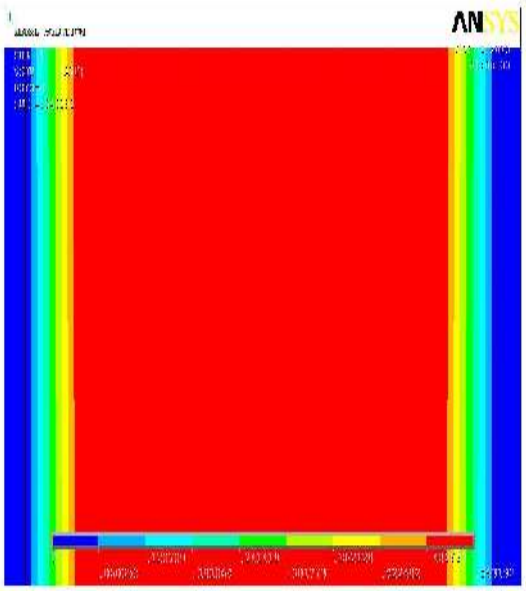
Coté l'eau

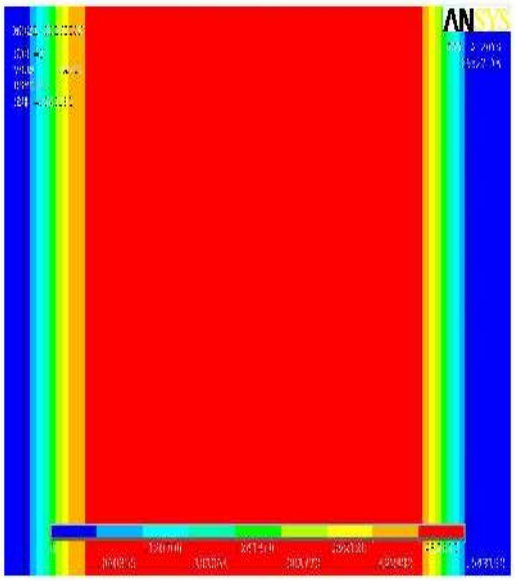
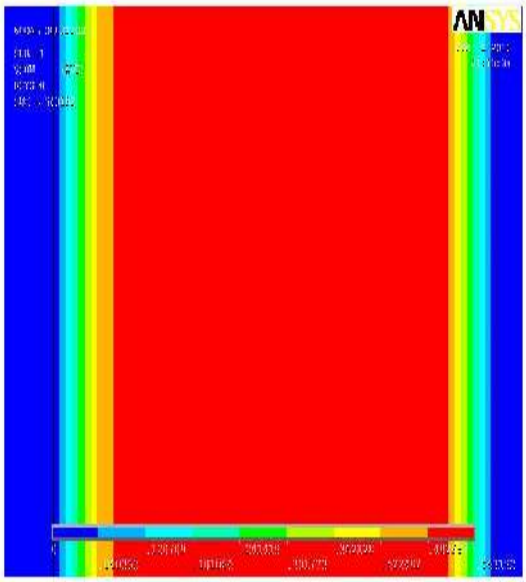
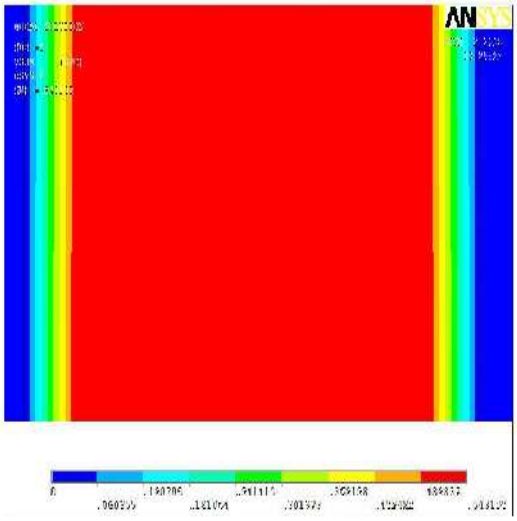
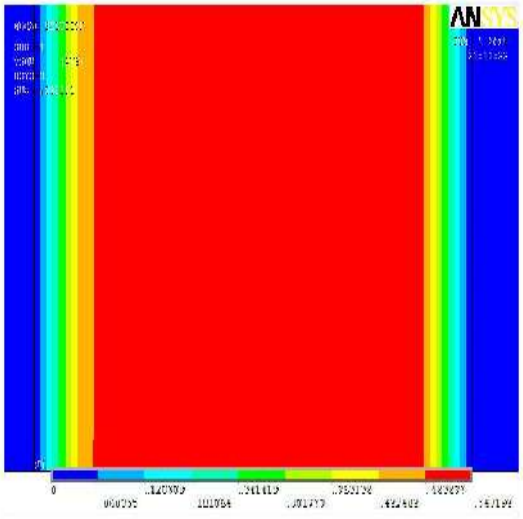


II.2. La vitesse



Au milieu	
En bas	

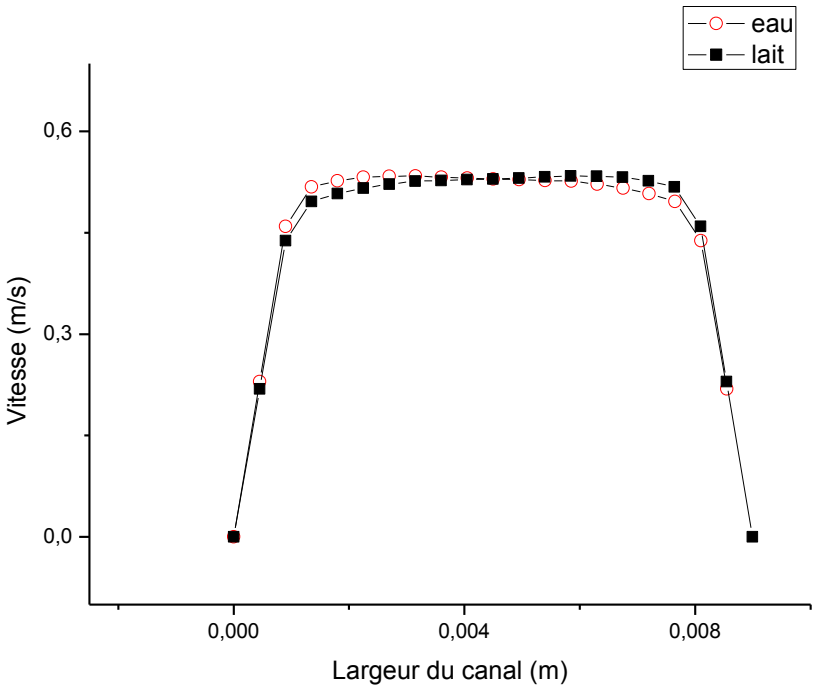
	Coté l'eau	Coté lait
En haut		

Au milieu		
En bas		

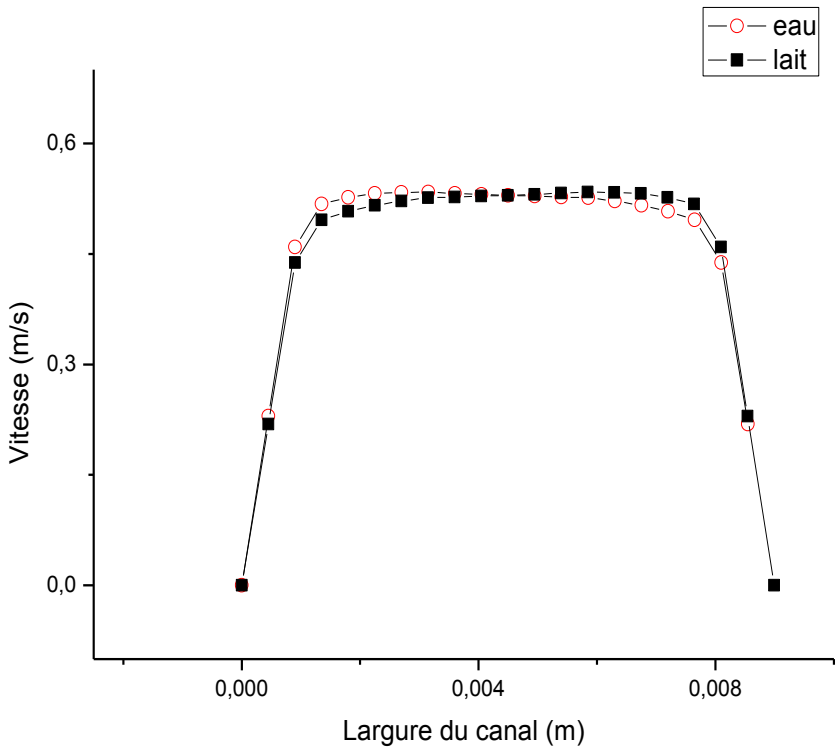
La variation de vitesse à la longue de canal

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

Y=0.56m

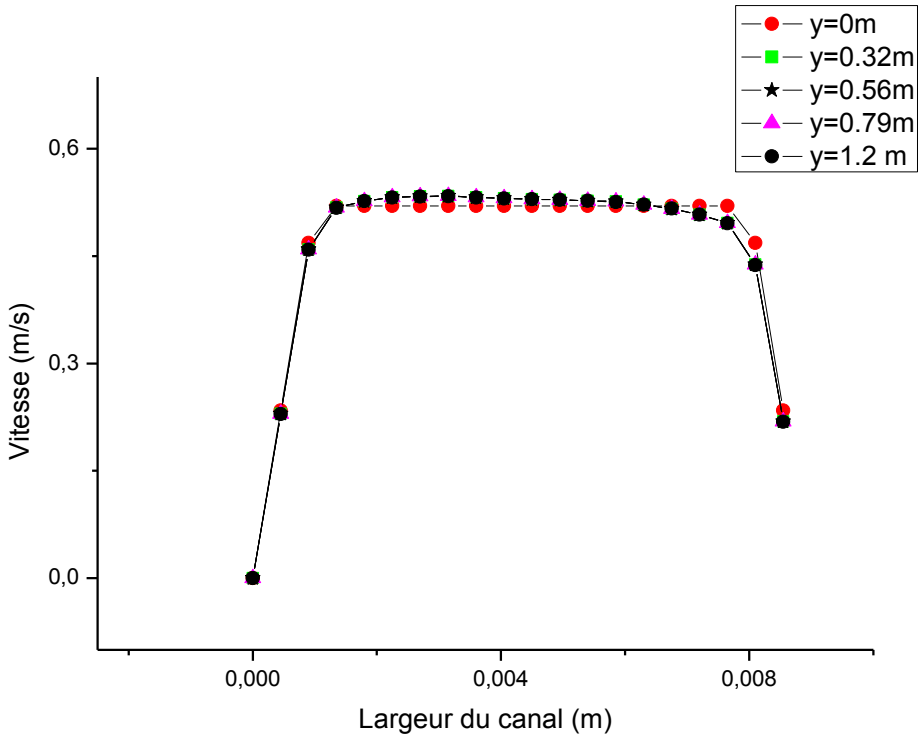

eau
lait
0,6
0,3
0,0
Vitesse (m/s)
0,000
0,004
0,008
Largeur du canal (m)

Y=0.79 m

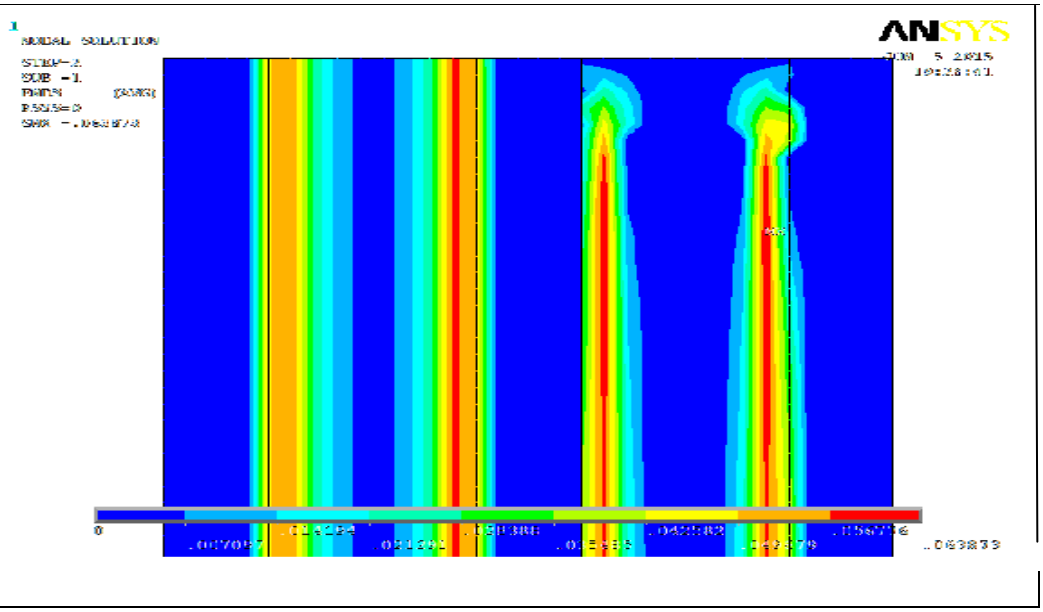

eau
lait
0,6
0,3
0,0
Vitesse (m/s)
0,000
0,004
0,008
Largure du canal (m)

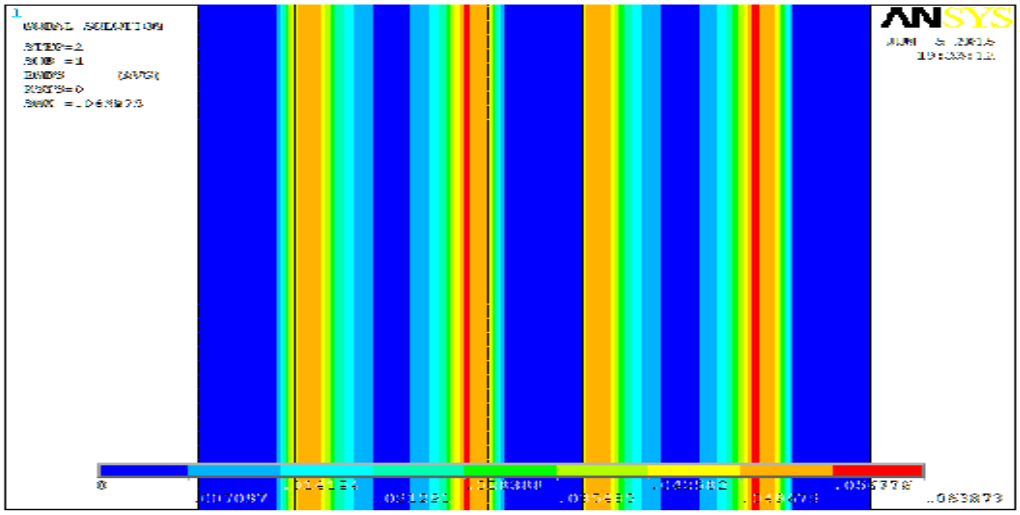
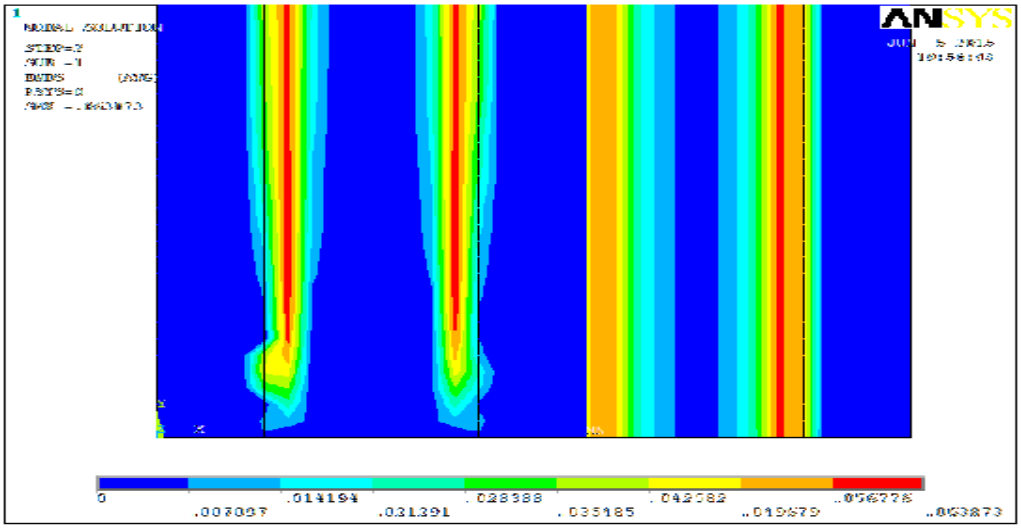
Les vitesses dans un même graphe

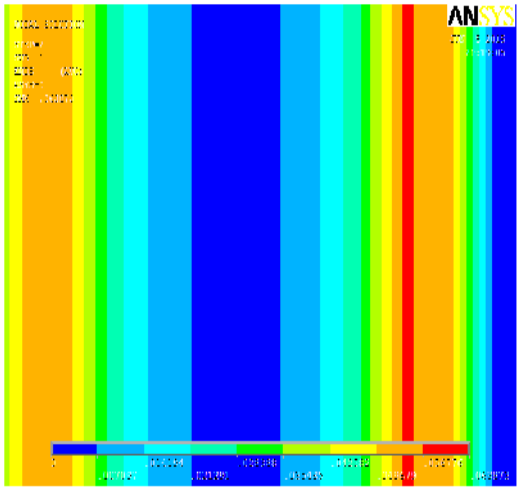
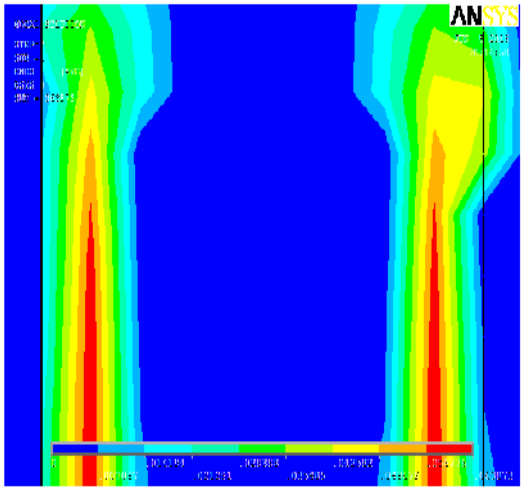
Cote l'eau

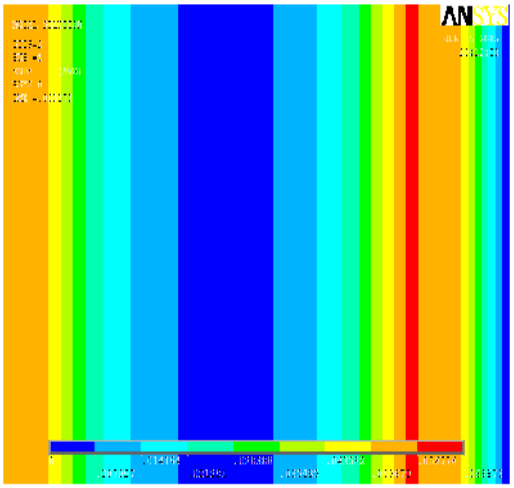
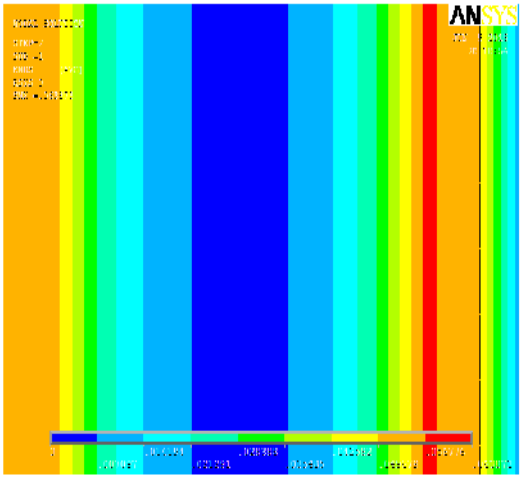
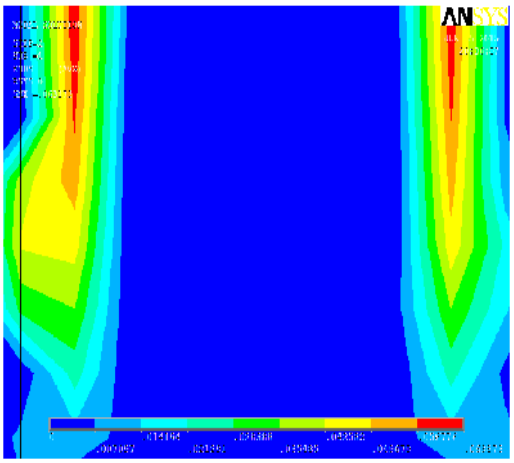
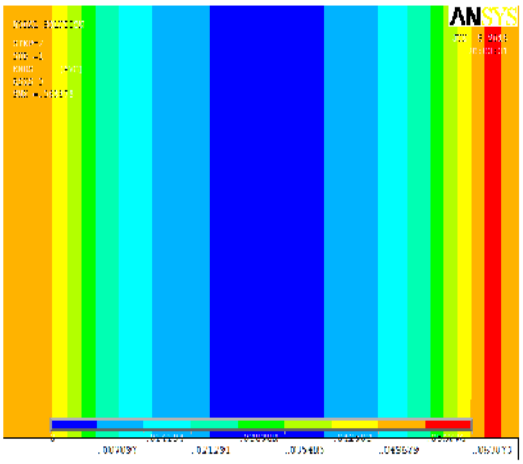


II.3 le profil de l'Energie cinétique de dissipation dan milieu poreux

En haut	

Au milieu	
En bas	

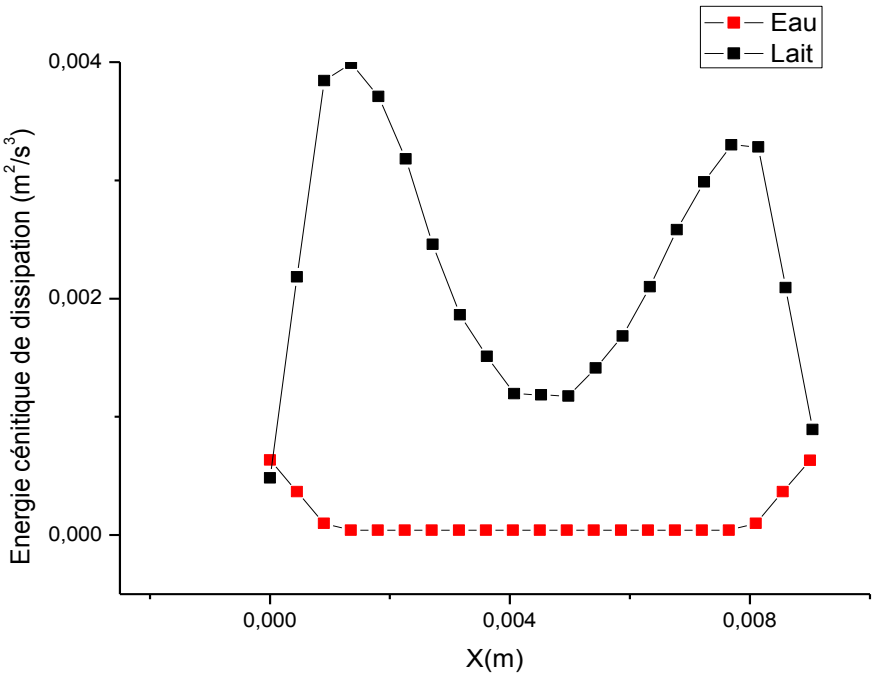
	Coté l'eau	**Coté lait**
En haut		

Au milieu		
En bas		

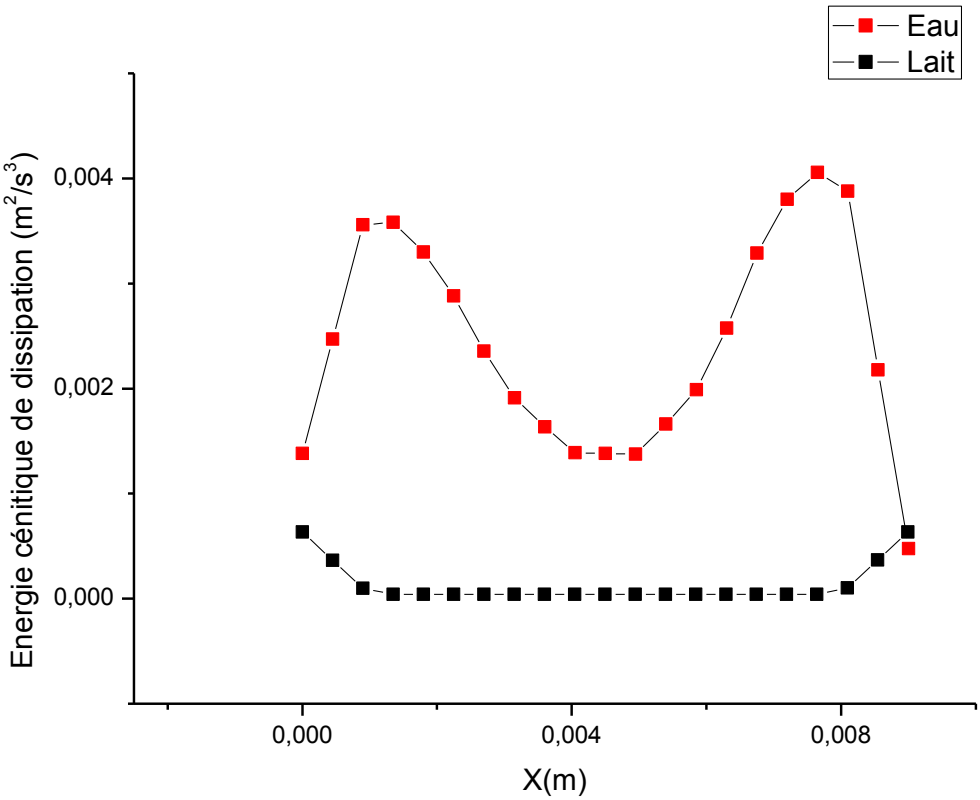
La variation de facteur de dissipation de l'énergie cinétique à la longue de canal

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 positions dans le canal (Y).pour l'eau et lait

Y=0 m

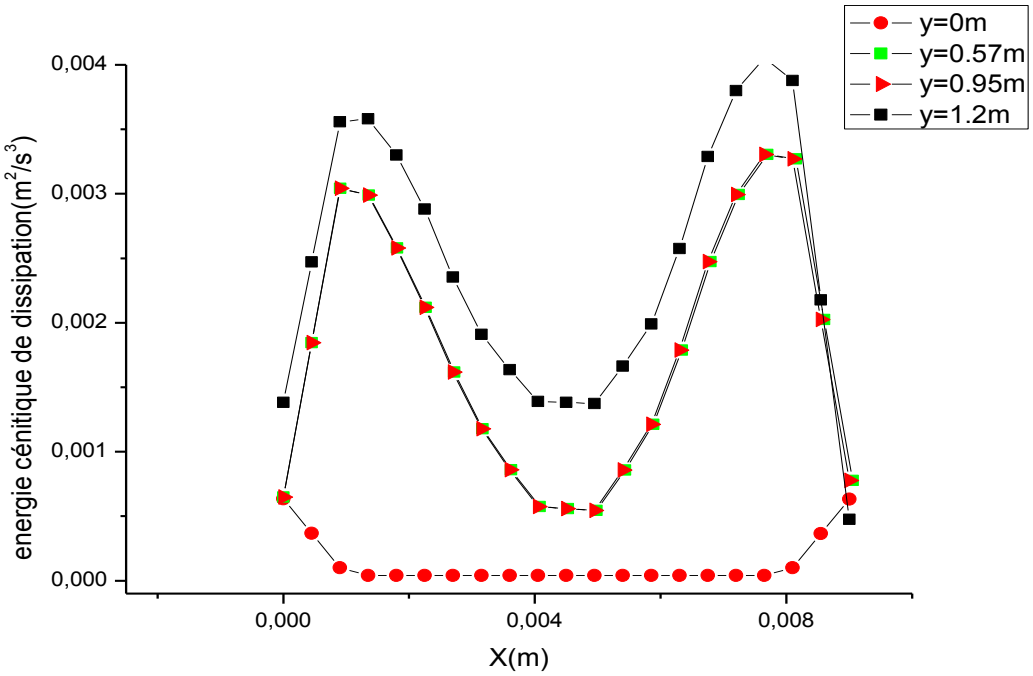

Eau
Lait
0,004
0,002
0,000
Energie cénitique de dissipation (m²/s³)
0,000
0,004
0,008
X(m)

Y=1.2m


Eau
Lait
0,004
0,002
0,000
Energie cénitique de dissipation (m²/s³)
0,000
0,004
0,008
X(m)

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

Pour l'eau

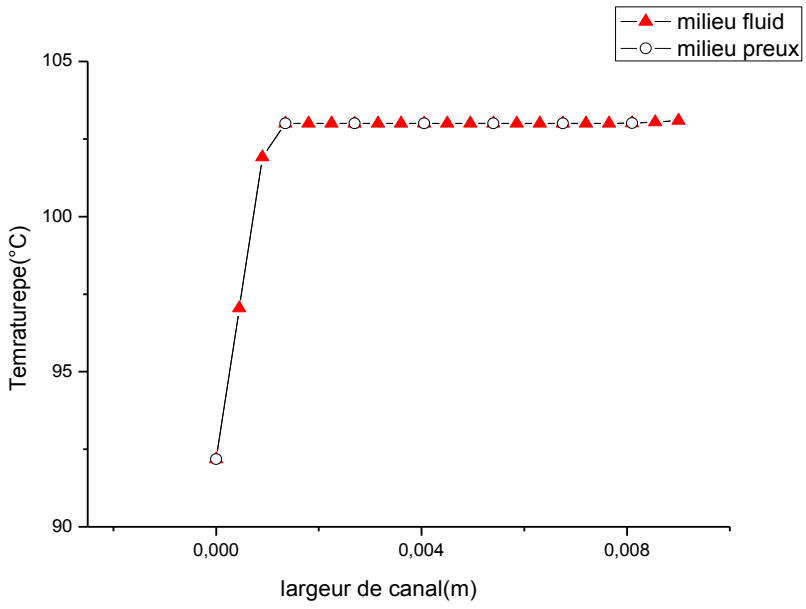


III. ETUDE COMPARATIVE ENTRE LE MILIEU FLUIDE ET LE MILIEU POREUX

III.1. Le profil de températures

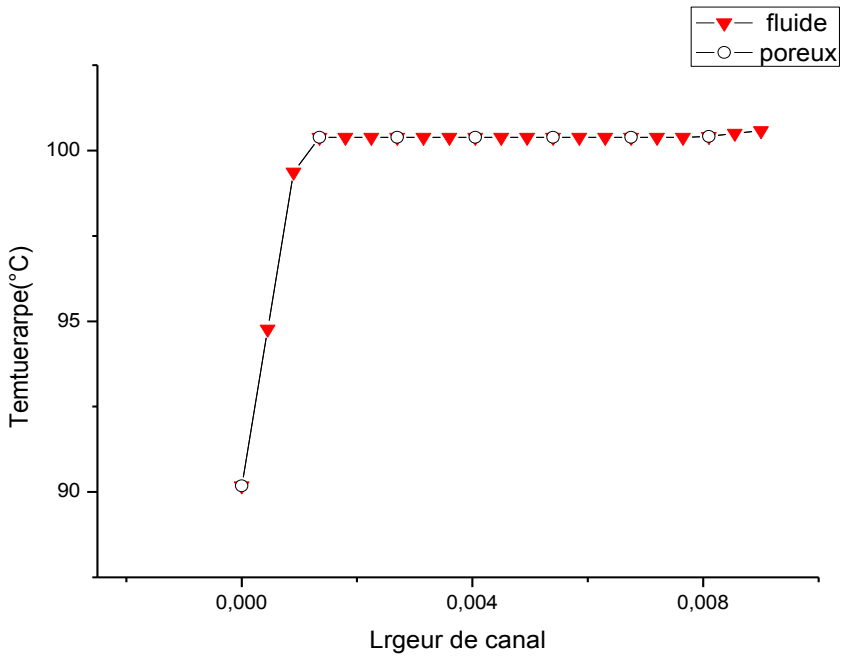
Y=0 m

Cote de l'eau



Y=1.2 m

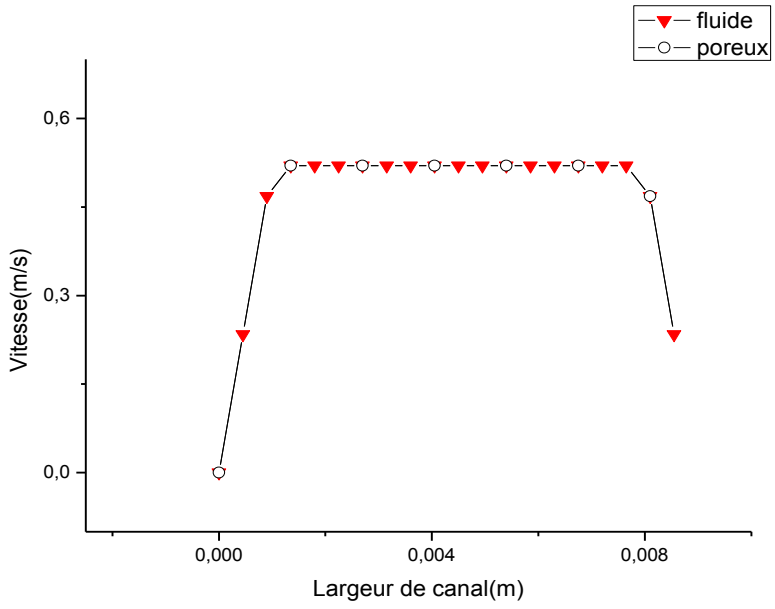
Coté l'eau



III.2. Le profil de vitesses

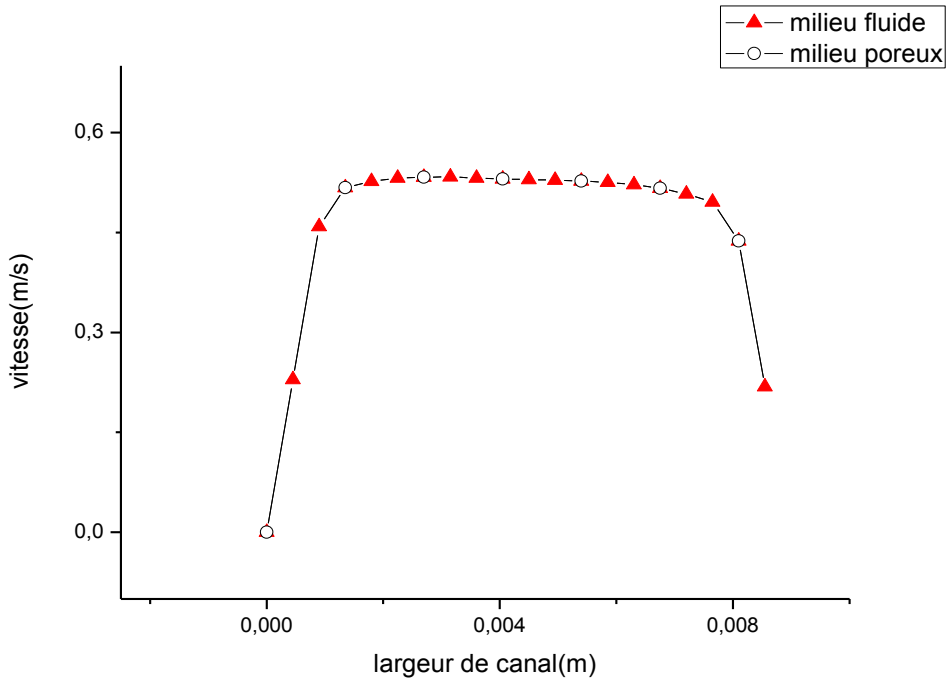
Y=0 m

Cote l'eau



Y=1.2m

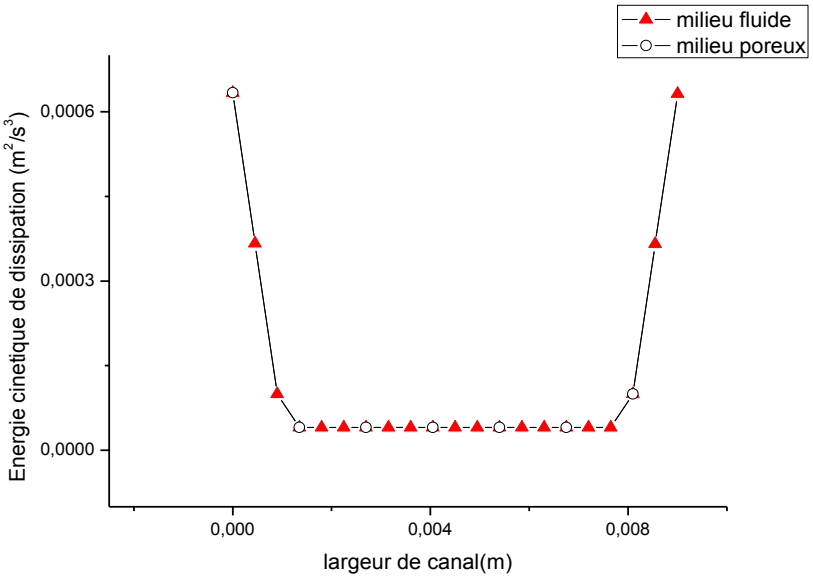
Coté l'eau



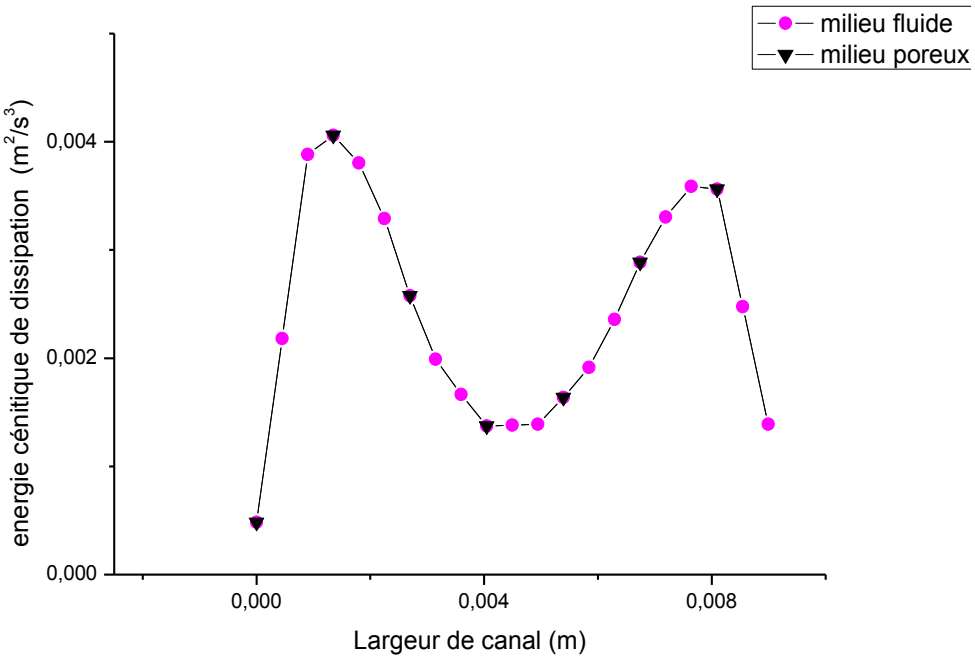
III.3 le facteur de l'énergie cinétique de dissipation

Y=0 m

Coté l'eau

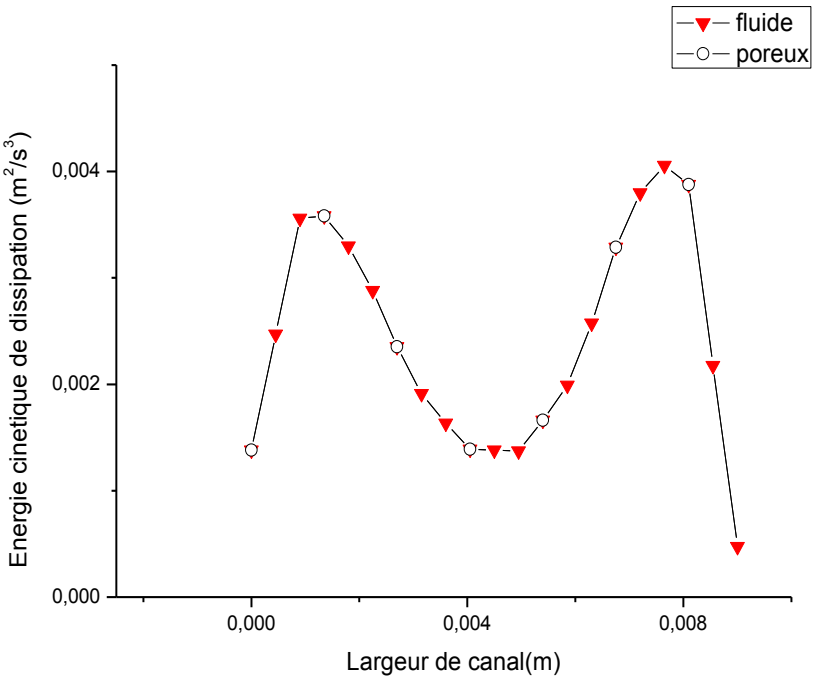


Coté lait

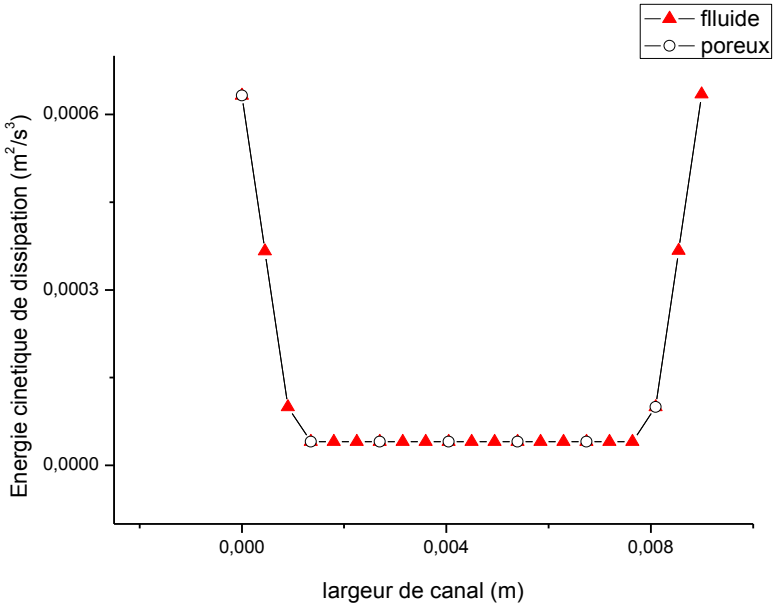


Y=1.2 m

Coté l'eau



Coté lait


flluide
poreux
Energie cinetique de dissipation (m²/s³)
0,0006
0,0003
0,0000
0,000
0,004
0,008
largeur de canal (m)