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

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie des Procédés et Environnement

Mémoire de Fin d'Etudes pour l'obtention du diplôme de Master en

Génie des Procédés

Spécialité : ***Procédés Pharmaceutique***

Thème

Identification de la résistance thermique d'encrassement lors d'un processus de pasteurisation du lait

Dirigé par :

Dr.Youcef Mahdi

Réalisé par :

M[me]. Boukhalkhal asmaa

M[me]. Kerrouche siham

Promotion Juin 2014

Remerciement

On remercie ***dieu*** *le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.*

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement ***Dr.Youcf Mahdi*** *, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.*

Nos remerciement s'adresse à Mr Said Bilel pour son aide dans notre travaill et son soutien moral et ses encouragements.

Nous sommes conscientes de l'honneur que nous a fait ***Dr . MOHAMED TIR*** *en étant président du jury et les examinateurs* ***M . RAHALE SOFIEN*** *et* ***M^{me} . YAHOUM MADIHA*** *d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

Nos remerciement s'adresse également à tout nos professeurs Pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles. Nos profonds remerciements vont également à toutes les personnes qui nous ont aidés et soutenue de prés ou de loin .

Merci

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

A mes ***parents*** *.Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour Dont ils ne cessent de me combler. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.*

A celui que j'aime beaucoup et qui m'a soutenue tout au long de ce projet : mon mari ***Messaoud*** *, et bien sur A mes* ***frères***

sans oublié ma ***belle sœur*** *et bien sur la petite* ***sarah***

A toute ma famille, et mes amis,

A mon binôme ***Asmaa*** *et toute la famille* ***Boukhalkhal*** **,**

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.

Siham

Dédicaces

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

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur, ***maman*** *que j'adore.*

Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour,
A tous mes ***frères Salah eddine*** *et* ***abdelmalik*** *, ma* ***sœur Meriem****.*

Je fais une dédicace très spéciale à ***mon mari Mohamed Bachir*** *, pour leur soutien moral, Leur gentillesse et leur profond attachement m'ont permis de réussir mon Travail.*
Et que ce travail soit témoignage de ma reconnaissance et de mon amour sincère et fidèle.

A toute ***ma famille****,surtout* ***Souhila****,****Naima****,****Zineb****,****Samira****,****Imene*** *et* ***Hiba*** *je dédie ce travail dont le grand plaisir leurs revient en premier lieu pour leurs conseils, aides, et encouragements.*

Je dédie ce travail à mon binôme ***Sihem***
Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagnaient durant mon chemin d'études , mes trés chéres amies ***Fella ،Selma****,****Souria*** *et* ***Nawel****.*
Mes collegues ***Lamia,Salima****,****Imene****,****Nadia*** *et* ***Soumia.***

Asmaa

INTRODUCTION GENERALE ……...…….……1

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

I.1. GENERALITES ……3

I.2. COMPOSITION DU LAIT ……...……...4

I.2.1 Le Lait de vache……..…4

I.2.1.1. Composition chimique du lait…….. 4

I.2.1.2. Etats de dispersion dans le lait ou « structure » du lait……..…….6

I.2.1.3. Produits laitiers essentiels de la filière lait…….....7

I.2.2. LAIT EN POUDRE……..8

I.3.PRINCIPALES CATEGORIES DE TRAITEMENT THERMIQUE DANS L'INDUSTRIE LAITIERE……..9

I.3.1.Thermorésistance des bactéries et des microorganismes……9

I.3.2.Laits pasteurisés……10

I.3.3.Lais stérilisés……..11

I.3.4.Laits concentrés……12

I.3.5.Laits secs (laits en poudre ou granulés)……..12

I.3.6.Laits fermentés……..13

I.3.7.Laits emprésurés et gélifiés……..13

I.3.8.Laits spéciaux……14

I.4.MISE EN ŒUVRE DU TRAITEMENT THERMIQUE……..14

I.4.1.Objectifs……. ……..14

I.4.2.Pasteurisation…… ……14

I.4.2.1.Pasteurisation en mode discontenu : dite aussi « batch »……14

I.4.2.2.Pasteurisation en mode contenu…….. …..15

Chapitre II : LES ECHANGEURS DE CHALEUR

II.1. INTRODUCTION……...……16

II.2. NOTIONS GENERALES SUR LES ECHANGEURS DE CHALEUR ……...16

II.2.1. Principaux modes d'écoulement des deux fluides……...……..17

II.2.1.1. Ecoulement des deux fluides parallèles et de même sens …….17

II.2.1.2. Ecoulement des deux fluides parallèles mais de sens contraires ……..17

II.2.1.3. Ecoulement des deux fluides croisés avec ou sans brassage ……..18

II.2.2.Différents types d'échangeurs de chaleurs utilisés en industrie agroalimentaires.19

II.2.2.1. Echangeurs à plaques …….…….20

II.2.2.2.Les échangeurs tubulaires……..24

II.2.2.3.Les échangeurs à surface raclée…….26

II.2.2.4.Autres types d'échangeur……...27

II.3.CONCLUSION……28

Chapitre III : ENCRASSEMENT DES ECHANGEURS DE CHALEUR

III.1.INTRODUCTION……...……30

III.2.NOTIONS SUR L'ENCRASSEMENT DES ECHANGEURS…….30

III.2.1.La corrosion……..31

III.2.2.L'encrassement biologique……..31

III.2.3.L'encrassement par réaction chimique……..32

III.2.4.L'entartrage…….32

III.2.5.L'encrassement particulier……..32

III.2.6.L'encrassement par solidification……...33

III.3.APPARITION ET DEVELOPPEMENT DE L'ENCRASSEMENT……33

III.3.1.Initiation……33

III.3.2.Transfert de particules à la paroi……...33

III.3.3.Adhésion des particules……33

III.3.4.Réentrainement des particules déposées……....33

III.3.5.Vieillissement du dépôt……34

III.4.ENCRASSEMENT PAR LE LAIT ……34

III.4.1.Revue bibliographique……34

III.4.2.Mécanisme de l'encrassement des protéines……..35

III.4.3.Encrassement par cristallisation…….....36

III.5.PREVENTION DE L'ENCRASSEMENT……. ……36

III.5.1.Au moment de la conception de l'échangeur……37

III.5.2.Au moment de la fabrication de l'échangeur et de sa mise en route……...37

III.5.3.Au cours du fonctionnement de l'échangeur……37

III.5.4.Au moment de l'arrêt de l'échangeur……38

III.5.5.Aspects économiques liés à l'encrassement……...39

III.5.5.1.Coûts liés à la conception de l'échangeur……39

III.5.5.2. Coûts liés au fonctionnement de l'échangeur……39

III.5.5.3. Coûts liés à l'arrêt de l'installation……40

III.6.CONCLUSION……...40

Chapitre IV : IDENTIFICATION DE LA RESISTANCE THERMIQUE D'ENCRASSEMENT

IV.1.INTRODUCTION……..41

IV.2.CYCLE DE PRODUCTION…… ……41

IV.2.1.Les étapes de production……42

IV.2.2.Le cycle de vapeur……..42

IV.3.MODELE THERMIQUE DE L'ECHANGEUR A PLAQUE……...43

IV.3.1.Introduction……43

IV.3.2.Modèle d'identification de kern et seaton …….. ……45

IV.3.3.Calcul du coefficient de transfert de chaleur global……49

IV.3.4.Calcul des paramètres à mesurer du mélange (lait)……49

IV.3.5.Calcul des paramètres à mesurer de l'eau chaude……..51

IV.3.6.Calcul du coefficient de transfert de chaleur avant encrassement……52

IV.3.7.Evolution du coefficient global d'échange de chaleur……..52

IV.3.8.Evolution de la résistance d'encrassement au cours du temps……55

IV.4.CYCLE DE NETTOYAGE…….....55

CHAPITRE V:RESULTATS ET DISCUSSIONS

V.1.EVOLUTION DE LA RESISTANCE THERMIQUE D'ENCRASSEMENT……..57

V.1.1. Lors de cycle de production…… .57

V.1.1.1.Echangeur de récupération……57

V.1.1.2.Echangeur pasteurisation……..58

V.1.1.3.Echangeur global……60

V.1.1.4.Conclusion……62

V.1.2.Lors de cycle de lavage……63

V.1.2.1.Evolution la perte de charge en fonction du temps……63

V.1.2.2.Echangeur de récupération……...64

V.1.2.3.Echangeur de pasteurisation……65

V.1.2.4.Echangeur global……...67

V.2.EVOLUTION DE COEFFICIENT D'ECHANGE GLOBAL ……68

V.2.1.Cycle de production……..68

V.2.2.Cycle de lavage……..69

V.3.CONCLUSION…….....70

CONCLUSION GENERALE……71

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

Tableau I.1 : Compositions chimiques du lait de vache……5

Tableau I.2 : Propriétés physiques du lait de vache……...5

Tableau I.3 : Structure du lait : les différents états de dispersion dans le lait ……..6

Figure I.1 : Technique de production du lait en poudre ……7

Chapitre II : LES ECHANGEURS DE CHALEUR

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……..18

Figure II.3 :Exemples d'échangeurs à courants croisés……..19

Figure II.4 : Vue éclatée échangeur à plaques et joints……..20

Figure II.5 : Détail plaque d'échange avec joint d'étanchéité……22.

Figure II.6 : Principe d'écoulement alterné des fluides entre plaque……..23

Figure II.7 : Arrangement chevrons plaques……...23

Figure II.8 : Echangeur tubulaire……25

Figure II.9 : Un tube d'échange……...26

Figure II.10 :Un échangeur à surface raclée……26

Chapitre III : ENCRASSEMENT DES ECHANGEURS DE CHALEUR

Figure III.1 : Représentation schématiques des phases de dépôt et de réentrainement de l'encrassement dans le cas d'un liquide……34

Figure III.2 : Encrassement des protéines……...35

Chapitre IV :IDENTIFICATION DE LA RESISTANCE THERMIQUE D'ENCRASSEMENT

Figure IV-1 : Cycle de pasteurisation du lait……...43

Figure IV-2 : Arrangement des plaques de l'échangeur de pasteurisation et sens de…….44

Figure IV-3 : Résistance des films pour une plaque encrassée……46

Figure IV-4 : Schématisation de la direction de l'écoulement entre deux plaques…….49

Figure IV-5 : Schématisation des rainures des plaques……54

CHAPITRE V: RESULTATS ET DISCUSSIONS

Figure V.1 : Evolution de la résistance d'encrassement en fonction du la perte de charge (compartiment I-III)…….57

Figure V.2 : Evolution de la résistance d'encrassement en fonction du temps (compartiment I-III)……..58

Figure. V.3 : Evolution de la résistance d'encrassement en fonction du la perte de charge (compartiment II)……..59

Figure. V.4 : Evolution de la résistance d'encrassement en fonction du temps (compartiment II)……..60

Figure. V.5 : Evolution de la résistance d'encrassement en fonction du la perte de charge (compartiment I-II-III)……..61

Figure. V.6 : Evolution de la résistance d'encrassement en fonction du temps (compartiment I-II-III)…… …… 61

Tableau V.1 représente les valeurs de R_d^* et de β lors de cycle de production ……..62

Figure. V.7 : Evolution de la perte de charge en fonction du temps (échangeur global)…….63

Figure. V.8 : Evolution de la résistance d'encrassement en fonction du la perte de charge (lavage-compartiment I-III)…… ……. ...64

Figure. V.9 : Evolution de la résistance d'encrassement en fonction du temps (lavage-compartiment I-III)…… ……..65

Figure. V.10 : Evolution de la résistance d'encrassement en fonction du la perte de charge (lavage-compartiment II)…… ……66

Figure. V.11 : Evolution de la résistance d'encrassement en fonction du temps (lavage-compartiment II)…….. 66

Figure. V.12 : Evolution de la résistance d'encrassement en fonction du la perte de charge (lavage-global)…… ……..**.....**77

Figure. V.13 : Evolution de la résistance d'encrassement en fonction du temps (lavage-global)……**...**77

Figure. V.14 : Evolution de coefficient d'échange global en fonction du la perte de charge……68

Figure. V.15 : Evolution de coefficient d'échange global en fonction du la perte de charge..69

Symbole	**Définition**	**Unité**
A	Surface d'échange de chaleur	m^2
A	Proteine agrégats	-
a_t	Constante	s
Bi	Nombre de Biot	-
C	Concentration	Kg /L
Cp	Chaleur spécifique	J/Kg°C
d_e	Diamètre hydraulique	m
D	Proteine dénaturé	-
e	Epaisseur de la plaque	m
f	Facteur de friction	-
h	Coefficient de transfert de chaleur du fluide par convection	$W/m^2°C$
K	Conductivité thermique de l'eau	W/m°C
k_m	Constante de dépôt	-
k_1, k_2	Constantes	-
k_2, k_3	Constantes de la relation (25) : $\Delta P_0=k_3 Re^{k_2} \rho Q^2$	-
L	Longueur d'une plaque	m
m	Masse des particules	Kg
$Mass_d$	Masse de dépôt	Kg
Nu	Nombre de Nusselt	-
N	Proteine native	-
Δp	Perte de charge	bar
P_e	La pression de l'entré de l'échangeur	bar
Pr	Nombre de Prandlt	-
p_s	La pression de la sortie de l'échangeur 1	bar
P_{s1}	La pression de la sortie de échangeur	bar

q	Flux de chaleur	W
Q	Débit volumique	m^3/s
R_d	Résistance d'encrassement pour une surface sale	$m^2°C/W$
Re	Nombre de Reynolds du fluide	-
t	Temps	s
T	Température	°C
u	Vitesse	m/s
U	Coefficient global de transfert de chaleur pour une surface encrassée	$W/m^2°C$
U_0	Coefficient global de transfert de chaleur pour une surface propre	$W/m^2°C$
V_T	Volume total du fluide	m^3
V	Vitesse	m/s
W	Largeur d'une plaque	m

SYMBOLES GRECQUES :

Symbole	**Désignation**	**Unité**
ρ_d	Masse volumique du dépôt	kg/m^3
μ_0	Viscosité dynamique de l'eau	kg/m.s
μ	Viscosité dynamique du mélange,	kg/m.s
τ_p	Perte de charge spécifique	bar
ε	Constante	-
λ	Constante de la conductivité thermique	-
Φ_d	Flux de dépôt	Kg/s
Φ_n	Flux net	Kg/s

2 .ABREVIATIONS

DLC	Date Limite de Consommation
MG	La matière grasse
NUT	Nombre d'Unité de Transfert
TAG	Triacylglycérols
UHT	Ultra Haut Transfert
CIP	Cleaning In Place

3 .INDICES

INDICES	**Exposants**
asy	Asymptotique
d	Dépôt
m	mélange
c	chaud
fl	Fluide
f	froid
p	Plaque, paroi
i	nombre d'itération
j	canal
∞_1	Lait
∞_2	Vapeur d'eau

RESUME

On étudie le phénomène d'encrassement d'un système d'échangeur de chaleur à plaques, par modélisation expérimentale lors d'une phase de traitement thermique de lait. On considère l'identification de la résistance thermique par rapport à un modèle théorique. Le modèle mathématique proposé est basé sur les différents échanges massiques et thermiques qui se produisent dans le procédé. Une relation entre la perte de charge et la résistance thermique de l'encrassement est établie.
Les résultats montrent que la résistance thermique d'encrassement est proportionnelle à la perte de charge. Elle augmente avec l'augmentation de la perte de pression à cause de la formation de dépôt de nature isolante sur la surface de l'échangeur, particulièrement dans échangeur de chauffage et elle diminue lors de la phase de nettoyage suite à l'élimination du dépôt. Ils montrent également que la résistance thermique d'encrassement suit le modèle de Kern et Seaton. Une identification des différents paramètres est réalisée.
Mots clés : Lait, Pasteurisation, Modélisation, Encrassement, Echangeur de chaleur à plaques, Résistance thermique d'encrassement, Production, Lavage, Modèle de Kern et Seaton.

ABSTRACT

The fouling phenomenon of a plate heat exchanger system is studied by experimental modeling during a phase of milk heat treatment. It also considers the identification of thermal resistance with respect to a theoretical model. The mathematical model is proposed based on different mass and heat exchanges that occur in the process. A relationship between the pressure loss and the thermal resistance of the fouling is established. The results show that the thermal resistance of fouling is proportional to the pressure drop. It increases with the increase of the pressure loss due to deposit formation on insulating nature of the surface of the exchanger, particularly in heating exchanger and decreases during the cleaning phase following removal of the deposit. They also show that the thermal fouling resistance follows the model proposed by Kern and Seaton form. Identification of individual parameters is realized.
Keywords: Milk, Pasteurization, Modeling, Fouling, heat exchanger plate, fouling thermal resistance, Production, Cleaning, Kern and Seaton model.

ملخص

ندرس ظاهرة التوسخ المبادلات الحرارية ذو لوحات بواسطة النمذجة التجريبية أثناء مرحلة المعالجة الحرارية للحليب،كما نحدد المقاومة الحرارية بواسطة النموذج النظري. النموذج الرياضي المقترح يعتمد على مختلف التبادلات المادية والحرارية التي تنتج أثناء العملية.تتأسس علاقة بين انخفاض الضغط والمقاومة الحرارية.
النتائج تثبت أن المقاومة الحرارية لترسب تكون متناسبة طردا مع هبوط الضغط ، حيث تزداد مع زيادة الضغط وذلك بسبب تشكل الترسب ذات الطبيعة العازلة على السطح المبادل وخاصة في المبستر . أما في مرحلة الغسل تتناقص المقومة الحرارية لترسب بسبب زوال الترسب ،النتائج تثبت أيضا انها مطابقة لنموذج كيرن وسيتون . العناصر الفاعلة تحدد.

الكلمات المفتاح : الحليب ، البسترة ، المبادل الحراري باللوحات ، المقاومة الحرارية لترسب ، الإنتاج ، الغسل ، نموذج كيرن و سيتون .

Au cours de leur transformation, les produits agroalimentaires subissent différents traitements et transformations dans le but de présenter des qualités meilleures dans des conditions sanitaires et économiques optimales en prenant en compte les modifications physiques, biochimiques, etc.… des matières premières et plus particulièrement les phénomènes d'encrassement qui sont généralement définis comme un dépôt indésirable de matière sur la surface des équipements. Malheureusement, ces phénomènes limitent les performances des équipements sur plusieurs plans.

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 ce qui diminue les performances des équipements en créant une résistance supplémentaire au transfert de chaleur et en augmentant les pertes de charges. En outre, il rend souvent plus difficiles et plus longues les opérations de nettoyage. Tous ces facteurs concourent à augmenter le coût de fonctionnement de l'installation [1].

Dans ce travail, on s'intéresse principalement à l'évaluation et l'identification mathématique de la résistance thermique de la couche de nature isolante due à cet encrassement. Le calcul est établi à partir de mesures expérimentales de la perte de charge relevées sur un site industriel Algérien.

Pour ce faire, nous allons présenter ce travail selon le schéma suivant :

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, et en particulier les échangeurs de chaleur à plaques qui sont employés dans les procédés de traitements thermiques.

L'encrassement des échangeurs de chaleur à plaques lors de la pasteurisation du lait est présenté dans le troisième chapitre.

Dans le quatrième chapitre, la modélisation et l'identification de la résistance thermique de l'encrassement des échangeurs de chaleur à plaques du lait lors d'une phase de pasteurisation est présentée.

Le cinquième chapitre est consacré à la présentation et la discussion des résultats trouvés.

A la fin une conclusion est présentée avec quelques recommandations.

I -1 GENERALITES

Le lait a été défini lors du premier congrès international pour la répression des fraudes à Genève, en 1908, comme le produit intégral de la traite totale et ininterrompue d'une femelle laitière bien portante, bien nourrie et non surmenée. Il doit être recueilli proprement et être exempt de colostrum.

Le lait est synthétisé à partir des éléments puisés dans le sang au niveau de cellules particulières tapissant les acini constitutifs de la glande mammaire. Après avoir accumulé les matériaux précurseurs, les parois des cellules des acinis , gonflées, subissent une lyse; leur contenu est alors évacué dans la cavité des acinis pour former le lait qui est retenu dans la mamelle au cours de la période qui sépare deux traites. Lorsque, dans la glande, la pression du lait atteint un certain seuil, la sécrétion s'arrête et une résorption des éléments élaborés commence. En particulier le lactose, la caséine, la matière grasse diminuent au profit des chlorures conduisant au lait de rétention.

La production du lait n'est pas régulière; les principales causes de variations sont liées à la race et à l'espèce, mais elles dépendent également de facteurs individuels liés à l'état sanitaire, de l'alimentation, de l'âge de l'animal.

Quantitativement le lait de vache constitue la matière première la plus largement produite et transformée au plan mondial; toutefois, le lait d'autres mammifères - chèvre, brebis, bufflesse, chamelle - revêt une importance non négligeable dans l'économie des contrées semi-arides et en particulier de celles du bassin Méditerranéen [1].

Avant l’apparition du traitement thermique, le lait était une source d’infection, car il constitue un milieu de croissance parfait pour les micro-organismes. Le lait répandait parfois des maladies comme la tuberculose et le typhus.

Les traitements thermiques aux produits laitiers ont plusieurs objectifs :

- détruire certains micro-organismes pour améliorer la qualité hygiénique et allonger la DLC des produits.

- inactiver certaines enzymes pour améliorer des produits au cours de leur stockage.

- modifier la structure de certaines molécules telles que les protéines pour influer sur la texture du produit finis;

- générer des produits de la réaction de Maillard (brunissaient suite à une cuisson) pour certaines applications (chocolaterie par exemple).

De façon générale, tout traitement thermique devra prendre en compte la préservation des qualités organoleptiques et nutritionnelles des produits. Par exemple, on cherchera à limiter la dénaturation des protéines (changement de structure) et la réaction de Maillard pour éviter le brunissement, goût de cuit et perte de lysine dans le cas de la stabilisation des laits de consommation [2].

I .2. COMPOSITION DU LAIT

I.2.1. Le lait de vache [3]

I.2.1.1 Composition chimique du lait

La composition du lait est caractérisée par une grande complexité dans la nature et la forme de ses composants; ceux-ci sont particulièrement adaptés aux besoins nutritionnels et aux possibilités digestives du jeune animal qui y trouve tous les éléments nécessaires à sa croissance. Quatre composants sont dominants du point de vue quantitatif: l'eau, les matières grasses, les protéines et le lactose; les composés mineurs sont représentés par les matières minérales, les enzymes, les vitamines, les gaz dissous. Les tableaux suivants résument la composition chimique moyenne et les propriétés physiques du lait de vache (tableau I-1).

- Biocatalyseurs :

Pigments - Enzymes - Vitamines

- Gaz dissous :

Gaz carbonique - Oxygène - Azote (4 à 5 % du volume du lait à la sortie de la mamelle)

-Constituants :

constituants	Quantités (g)
Eau	900–910
Extrait sec total	125–130
Extrait sec dégraissé	90–95
Matière grasse	35–45
Lactose	47–52
Matières azotées	33–36
Matières minérales	9–9,5

Tableau I-1 : compositions chimiques du lait de vache.

-Constantes physiques:

constantes	Valeurs
Masse volumique moyenne à 15° C	1,030 à 1,034 (Kg/m^3)
Chaleur spécifique moyenne	0,93 (J/Kg°K)
Point de congélation	- 0,55 (°C)
pH	6,5 à 6,6
Indice de réfraction à 20° C	6,5 à 6,6

Tableau I-2 : propriétés physiques du lait de vache.

I.2.1.2 Etats de dispersion dans le lait ou « structure » du lait :

Le lait est un liquide hétérogène dont les différents constituants ne sont pas dispersés de façon équivalente dans l'eau. On distingue ainsi trois états de dispersion ou phases en équilibre dans le lait (Tableau I.3).

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

Tableau I.3- structure du lait : les différents états de dispersion dans le lait.

- La phase aqueuse :

C'est une phase homogène stable correspondant à une solution « vraie » voire macromoléculaire où les différents solutés sont dissous dans l'eau. Cette phase contient le lactose et les vitamines hydrosolubles (vitamine du groupe B), les protéines globulaires « solubles » du lactosérum (albumines, globulines) et la fraction soluble des sels minéraux.

- La phase grasse :

C'est une phase constituée par l'ensemble des gouttelettes lipidiques ou globules gras dispersés de façon plus ou moins stable dans le milieu aqueux et formant une émulsion ou état globulaire. Les globules gras sont des structures sphériques d'un diamètre moyen de 4 à 5µm dont la surface est formée de quelques lipides amphiphiles (phospholipides) et protéines alors que le centre est constitué de triacylglycérols (TAG) accompagnés de carotènes et de vitamines A et D.

- La phase micellaire :

Elle correspond à l'ensemble des particules protéiques appelées micelles, dispersées de façon stable (grâce à leur organisation) dans le milieu aqueux. Cet état micellaire n'est pas une solution, mais une suspension. Les micelles sont des agrégats (taille de 0.05 à0.3µm) formés de submicelles (associations sphéroïdes 15 à 20 nm de caséines phosphoprotéines «insolubles») reliées entre elles par un « ciment » intersubmicellaire constitué de phosphate de calcium ; ce sont des structures « spongieuses » gorgées d'eau (65%) dont le matériau constitutif (35%) comprend 92% de caséines et 8% de phosphate de calcium.

I.2.1.3 Produits laitiers essentiels de la filière lait

Dans la filière lait, on peut distinguer deux groupes principaux d'opérations :

- des opérations de stabilisation (réfrigération, standardisation, homogénéisation) et de conservation (pasteurisation, stérilisation, procédé UHT) du lait, maintenant tous les constituants du produit brut, donnent la grande diversité des laits commercialisés,

- des opérations de fractionnement et de transformation ont pour objectif de récupérer et de valoriser certaines phases du lait : phase grasse dans la crème et le beurre, phase micellaire pour les fromages.

Trois produits laitiers essentiels doivent être présentés.

- La crème du lait :

C'est une émulsion de type huile dans eaux à 30% de matière grasse laitière (phase dispersée discontinue) dans un milieu aqueux (phase principale continue). Ce produit de densité (d= 0.90) inférieure à celle de l'eau est obtenu par centrifugation dans une écrémeuse.

Les lipides de la crème sont essentiellement des TAG constitués d'acides gras saturés (2/3), dont une grande diversité d'acides gras à courtes chaînes (dits volatils : 4 à 10 chaines), et d'acides gras insaturés (1/3) ; parmi les lipides, il faut aussi citer la vitamine A et ses précurseurs (0.2 mg/100g).

- le beurre :

C'est une émulsion de type eau dans huile contenant un peu d'eau (phase dispersée discontinue) dans au moins 82% de matière grasse laitière (phase principale continue). Il s'agit donc d'un concentré des lipides du lait obtenu par une agitation de crème maturée (la maturation, grâce aux ferments lactiques, produit acidification, aromatisation et épaississement de la crème), ce qui provoque une incorporation passagère d'air entraînant une inversion des phases de l'émulsion avec un rejet important d'eau (babeurre).

- Les fromages :

Les fromages sont des concentrés de caséines obtenus suite à coagulation du lait.

I.2.2. Lait en poudre [4]

Pour la production du lait en poudre, des procédés technologiques sont effectués tel que l'évaporation et le séchage permettant sa conservation (figure I.1).

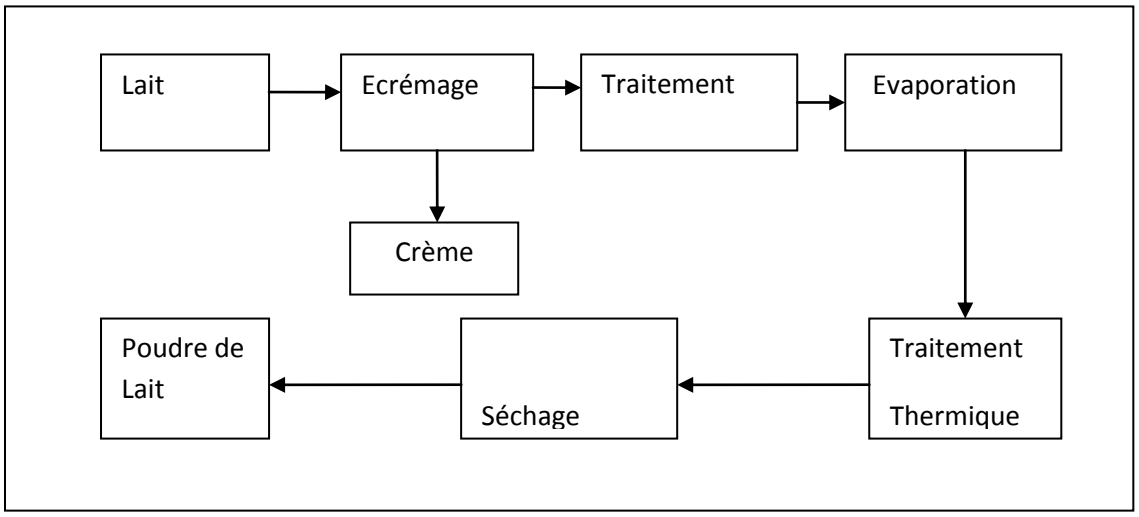


Figure I.1 : Technique de production du lait en poudre.

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

La réduction des micro-organismes contenus dans la poudre.

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

I.3.PRINCIPALES CATEGORIES DE TRAITEMENT THERMIQUE DANS L'INDUSTRIE LAITIERE

L'instabilité du lait, la présence éventuelle de germes pathogènes, la nécessité économique de proposer au consommateur des produits nouveaux et appétissants ont conduit à la mise au point de nombreux procédés technologiques.

La plupart reposent sur l'emploi ménagé de la chaleur, du froid, de la dessiccation, de l'inhibition de la flore microbienne par additif chimique (sucre) ou action biologique (acidification par ferments lactiques sélectionnés) [3].

I .3.1 Thermorésistance des bactéries et des microorganismes [4]

La thermorésistance des microorganismes peut être plus ou moins élevée ce qui donne des réactions différentes à la chaleur.

De plus, elle dépend du milieu dans lequel la pasteurisation est pratiquée. Plus le milieu est acide, moins la résistance à la chaleur est élevée.

La classification des éléments est faite 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. Son augmentation se produit lorsque le milieu dans lequel vivent les microorganismes devient défavorable par rapport au milieu aqueux initial.

Par contre, la présence d'antiseptiques (comme l'éthanol contenu dans le vin) permet de réduire la thermorésistance des microorganismes.

I .3.2 Laits pasteurisés [3]

La chaleur détruit les germes. Certains sont plus résistants que d'autres. On calcule avec précision la température et le temps de chauffage. Toutes les opérations s'effectuent à l'abri de l'air. Dès leur terme, le lait doit être rapidement réfrigéré. La pasteurisation détruit tous les germes pathogènes et l'essentiel de la flore saprophyte. Elle modifie peu les caractères physico-chimiques, les caractères organoleptiques et la valeur nutritionnelle du lait.

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

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

En France par exemple, le lait pasteurisé conditionné ne doit pas renfermer plus de trente mille germes banals et dix coliformes par millilitre au quatrième jour après son conditionnement.

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

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

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

I .3.3.Laits stérilisés [3]

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

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

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

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

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

La stérilisation en vrac est opérée soit directement dans des échangeurs de chaleur, soit indirectement par mélange du lait et de la vapeur surchauffée suivi d'une détente sous vide, par traitement thermique; elle applique le procédé à U.H.T 140 à 150°C pendant environ 1 à 2 secondes. Pour des raisons énergétiques, le traitement indirect est le plus fréquent, l'autre réclame une eau potable.

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

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

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

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

I .3.4.Laits concentrés [3]

On pasteurise le lait concentré non sucré à très haute température, puis concentré par ébullition sous vide partiel dans des évaporateurs ou vacuums. Homogénéisé, refroidi, il est distribué en boîtes métalliques serties (boîtes de conserves).

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

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

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

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

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

I .3.5.Laits secs (laits en poudre ou granulés) [3]

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

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

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

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

I .3.6.Laits fermentés [3]

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

Le yaourt est obtenu par légère concentration du lait (par addition de poudre de lait) plus ou moins écrémé, pasteurisé puis ensemencé avec un levain spécifique (en France: Lactobacillus bulgaricus et Streptococcus thermophilus). Après répartition en pots, le lait subit un étuvage à 45-50 °C durant deux heures.

On fait le refroidissement après pour la fabrication de yaourts brassés, la coagulation est réalisée en cuves et le conditionnement est effectué ultérieurement. On peut les aromatiser ou les additionner de jus ou de pulpe de fruits.

La fermentation est purement lactique.

I .3.7. Laits emprésurés et gélifiés [3]

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

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

I .3.8.Laits spéciaux [3]

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

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

I .4.MISE EN ŒUVRE DU TRAITEMENT THERMIQUE

I.4.1. Objectifs

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

Dans la présente étude on s'intéresse uniquement à la pasteurisation.

I.4.2. Pasteurisation [2]

La pasteurisation a pour but la destruction des formes végétatives incluant certains pathogènes *(Salmonella, Brucella, Listeria)* et la réduction de la flore banale.

Trois zones de couples temps-température sont pratiquées :

-pasteurisation basse (62 à 65°C / 30 min),

-pasteurisation haute (72 °C / 15-40 s),

-flash de pasteurisation (85-90 °C / 1-2 s).

I.4.2.1. 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.

I.4.2.2. 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.

II.1. INTRODUCTION

Dans les installations industrielles, il est souvent nécessaire d'apporter une quantité de chaleur importante à une partie du système. Dans la majorité des cas, la chaleur est transmise à travers un échangeur de chaleur. On estime à 90% la part des transferts d'énergie réalisée par les échangeurs de chaleur dans l'industrie telles que la climatisation, l'automobile (radiateurs de refroidissement), l'industrie : chimique, pharmaceutique, pétrochimie, sidérurgie, agroalimentaire, etc.

Le choix d'un échangeur de chaleur, pour une application donnée, dépend de nombreux paramètres : domaine de température et de pression des fluides, propriétés physiques et agressivité de ces fluides, maintenance et encombrement. Il est évident que le fait de disposer d'un échangeur bien adapté, bien dimensionné, bien réalisé et bien utilisé permet un gain de rendement et d'énergie des procédés [1].

II.2. NOTIONS GENERALES SUR LES ECHANGEURS DE CHALEUR [5]

L'échangeur de chaleur est un équipement qui permet d'assurer un transfert de chaleur d'un fluide chaud à un fluide froid sans contact direct entre les deux fluides. Le même fluide peut conserver son état physique (liquide ou gazeux) ou se présenter successivement sous les deux phases: c'est le cas des condenseurs, évaporateurs, bouilleurs, ou des tours de refroidissement.

En principe, pour les échangeurs les plus courants dans l'industrie, les deux fluides s'écoulent dans des espaces séparés par une paroi ou cloison à faible inertie thermique au travers de laquelle les échanges se font par conduction. En effet, la chaleur que l'un des fluides cède à la paroi par convection le long de la surface de contact est transférée par conduction et, est cédée à l'autre fluide par convection le long de l'autre face. Le rayonnement n'intervient de manière significative que s'il existe des différences de température très importantes entre un fluide semi-transparent et la paroi.

De par leurs différentes applications, les caractéristiques des échangeurs se situent dans une gamme très étendue en encombrement, en puissance échangée, en pression et en température. Les exigences de fonctionnement, les différentes normes imposées par le législateur pour la conception de tels appareils, les technologies ainsi que les matériaux utilisés sont inévitablement variés et difficilement comparables.

Il devient donc difficile d'établir une classification rigoureuse sans faire le choix incontestablement restrictif d'un critère. Le plus souvent, les échangeurs de chaleur sont classifiés selon la configuration d'écoulement des fluides considérés et selon leur type de construction.

II.2.1. Principaux modes d'écoulement des deux fluides [5]

On peut distinguer trois modes d'écoulement différents.

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

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

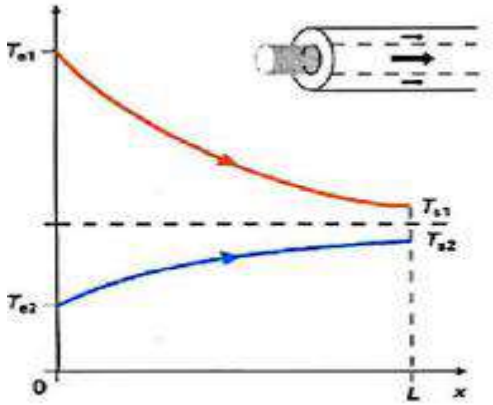


Figure II.1 : Evolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire co-courant.

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

Il s'agit d'échangeurs à contre-courants où la température de sortie du fluide froid peut dépasser la température de sortie du fluide chaud. Cette disposition est l'une des plus favorables pour l'échange thermique. De la même façon que précédemment, la longueur de

l'échangeur considéré a été portée en abscisse (Figure II.2). Les températures sont repérées à l'aide d'indices e signifiant entrée et s sortie.

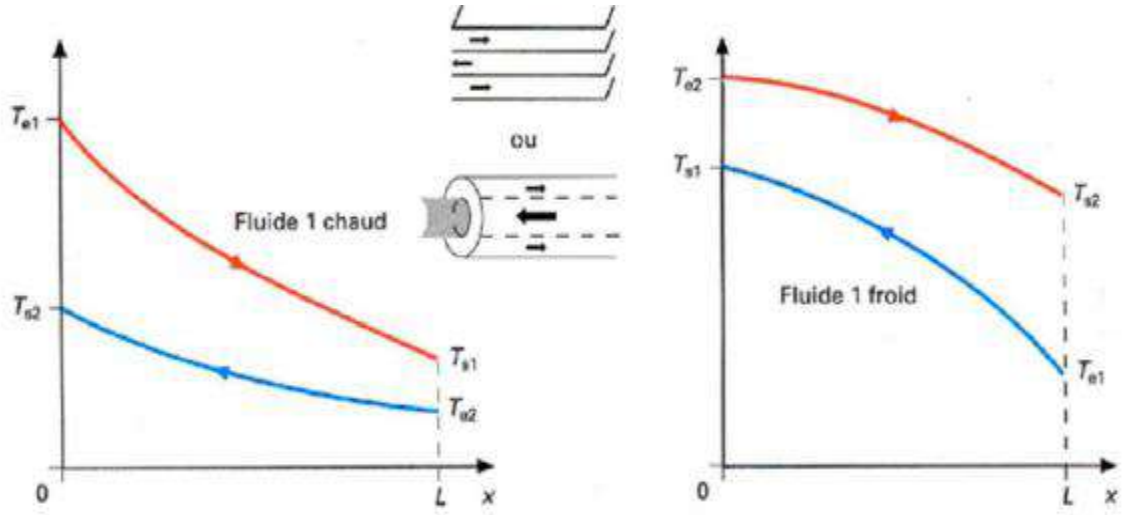


Figure II.2 : Evolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire ou à plaques.

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

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

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

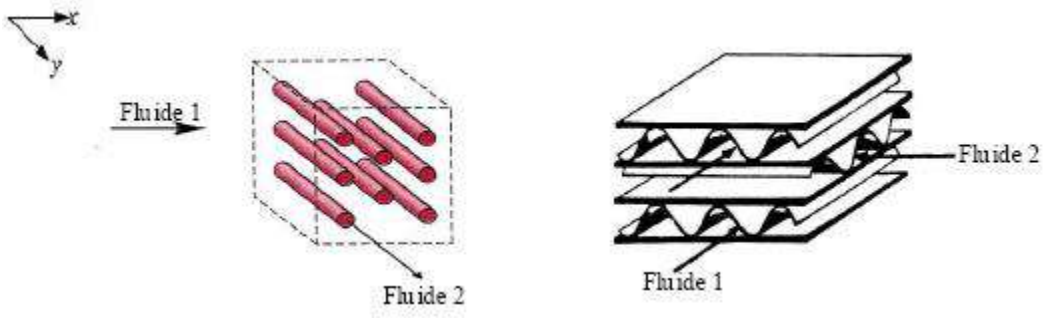


Figure II.3 : Exemples d'échangeurs à courants croisés.

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

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

- les tubes qui fixent l'espace dévolu seulement à l'un des deux fluides.

- les plaques, planes ou corruguées, choisies pour un fluide qui imposent la même géométrie pour l'autre.

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

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

Les principaux types d'échangeurs de chaleur rencontrés sont :

- les échangeurs à plaques.

- les échangeurs tubulaires.

- échangeur à surface raclée.

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

II.2.2.1. Echangeurs à plaques [6]

Principe et description des échangeurs à plaques:

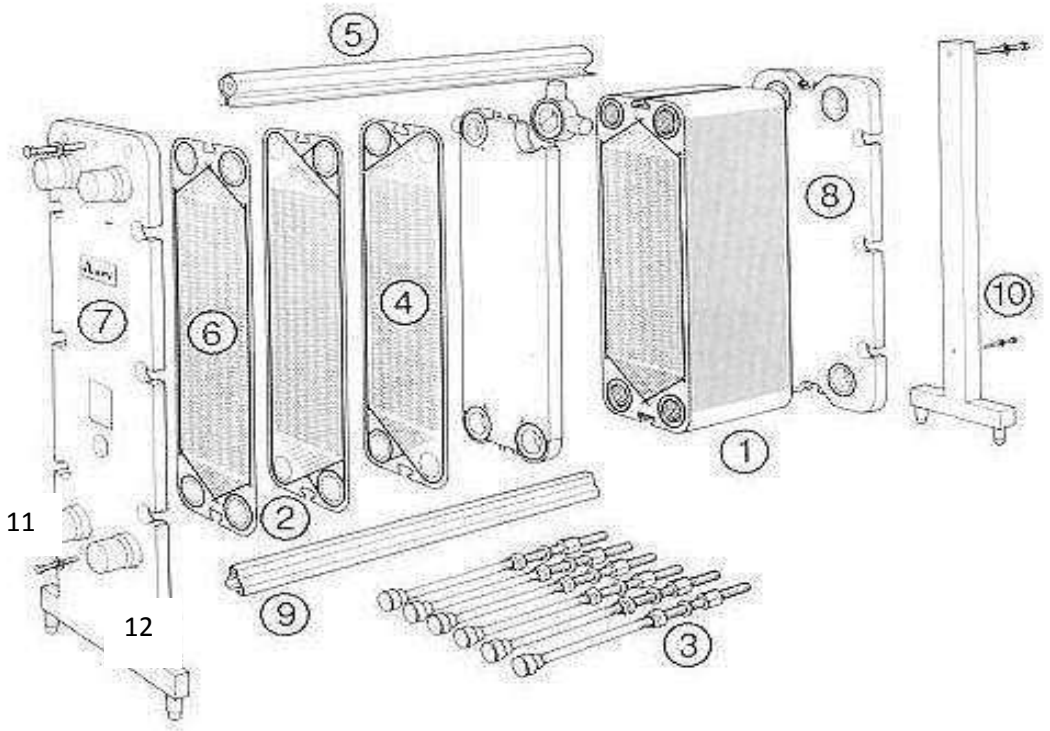


Figure II -4 : Vue éclatée échangeur à plaques et joints [7].

Description de l'appareil :

1- Jeu de plaques

2- Plaques d'échange avec entrée et sortie

3- Vis de serrage

4- Joint et gorge de joint

5- Barre supérieure

6- Plaque d'extrémité

7- Tête fixe avec raccordements

8- Tête mobile

9- Barre inférieure

10- Pieds arrière

11- cadre de raccordement

12-Bossage.

L'échangeur à plaques est construit d'un empilement de tôles embouties (repère 1 figure II.4), constituant à la fois la surface d'échange et les parois de l'écoulement des deux fluides entre lesquels on veut échanger de la chaleur. Les plaques ont une forme assurant la rigidité de l'empilement et la turbulence de l'écoulement pour accroître le coefficient d'échange de chaleur. Elles sont équipées de joints, qui maintiennent les produits à l'intérieur de l'empilement (figure II.5). L'ensemble est aligné par des barres-support supérieure et inférieure (repères 5 et 9 figure II.4).

Une tête fixe (repère 7) constitue le support principal de l'assemblage. Elle peut reposer au sol ou servir à l'accrochage sur un mur ou une charpente. Elle porte des raccordements de tuyauterie qui viennent dans l'alignement des trous ménagés dans les plaques pour la circulation des produits. Une première plaque (repère 6) vient à son contact pour que le produit, souvent salissant ou agressif, soit toujours enfermé dans un paquet de plaques semblables. Cette plaque d'extrémité ne compte pas pour la surface d'échange, mais elle est indispensable.

Une tête mobile (repère 8, figure II.4) vient à l'autre extrémité du paquet de plaques. Elle peut également porter des raccordements. La dernière plaque du paquet est à son contact. Elle ne fait pas non plus partie de la surface d'échange, mais reste indispensable pour contenir l'un des produits. L'ensemble du paquet de plaques et des têtes fixe et mobile peut être fermé par des barres de serrage (repère 3, figure II.4) ou des vérins entre tête mobile et pied d'extrémité, selon les conceptions.

La figure II.4 représente la disposition de deux échangeurs sur un même bâti. On peut en effet, faire une telle combinaison en se servant de cadre de raccordement (repère 11) ; ils permettent des sorties (ou des entrées) de fluides entre deux paquets de plaques d'échange par l'intermédiaire des bossages de raccordement (repère 12). Un cadre de raccordement constitue une tête mobile intermédiaire, où l'on peut faire intervenir les canalisations de produit ou de fluide auxiliaire. On évite de raccorder des canalisations pour fluides très chauds, car à chaque

ouverture de l'échangeur il faudra démonter ces tuyauteries avec les risques engendrés pour la sécurité.

Chaque plaque est équipée d'un joint d'étanchéité ; la conception du joint permet la circulation des fluides alternativement tous les deux entre plaque. Les parties circulaires des joints empêchent le fluide de circuler verticalement le long des plaques pour rejoindre le collecteur opposé. Le fluide concerné ne peut donc que poursuivre son chemin horizontal dans ce collecteur formé par l'empilement des plaques appliquées les unes sur les autres (voir figure II.6). Lorsqu'il n'y a pas de joint annulaire, le fluide pour une part poursuit son chemin horizontal et pour une autre part circule verticalement le long de la plaque pour rejoindre le collecteur disposé en quinconce à l'autre extrémité.

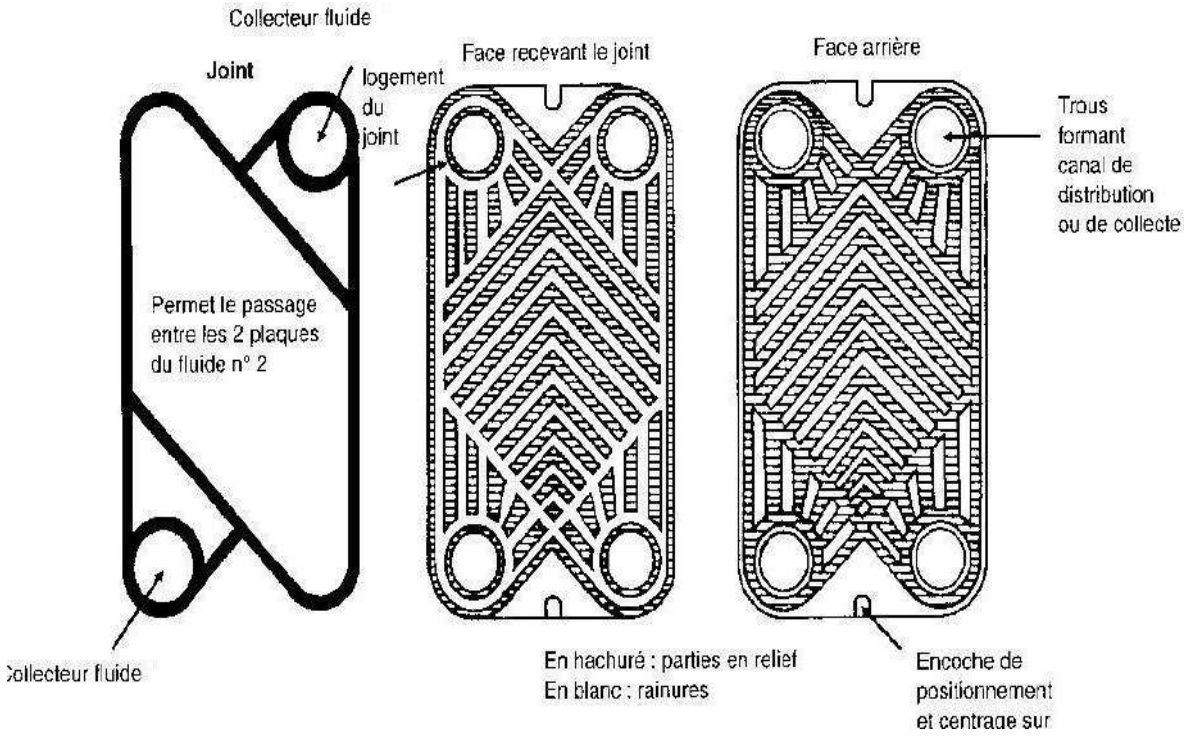


Figure II.5 : détail plaque d'échange avec joint d'étanchéité [7].

La conception du joint est faite pour que les deux fluides ne soit pas en contact de part et d'autre du joint. Entre le joint annulaire qui par exemple bloque la circulation du fluide 1^{e} dans l'entre plaque où circule le fluide 2, l'espace trapézoïdal n'est pas hermétique, selon les fabricants un méplat ou une encoche dans le joint établi un contact avec l'atmosphère extérieur, et la possibilité visuelle de détecter une fuite. Il reste cependant le risque d'une plaque percée par la corrosion, les plaques subissent régulièrement des essais d'étanchéité.

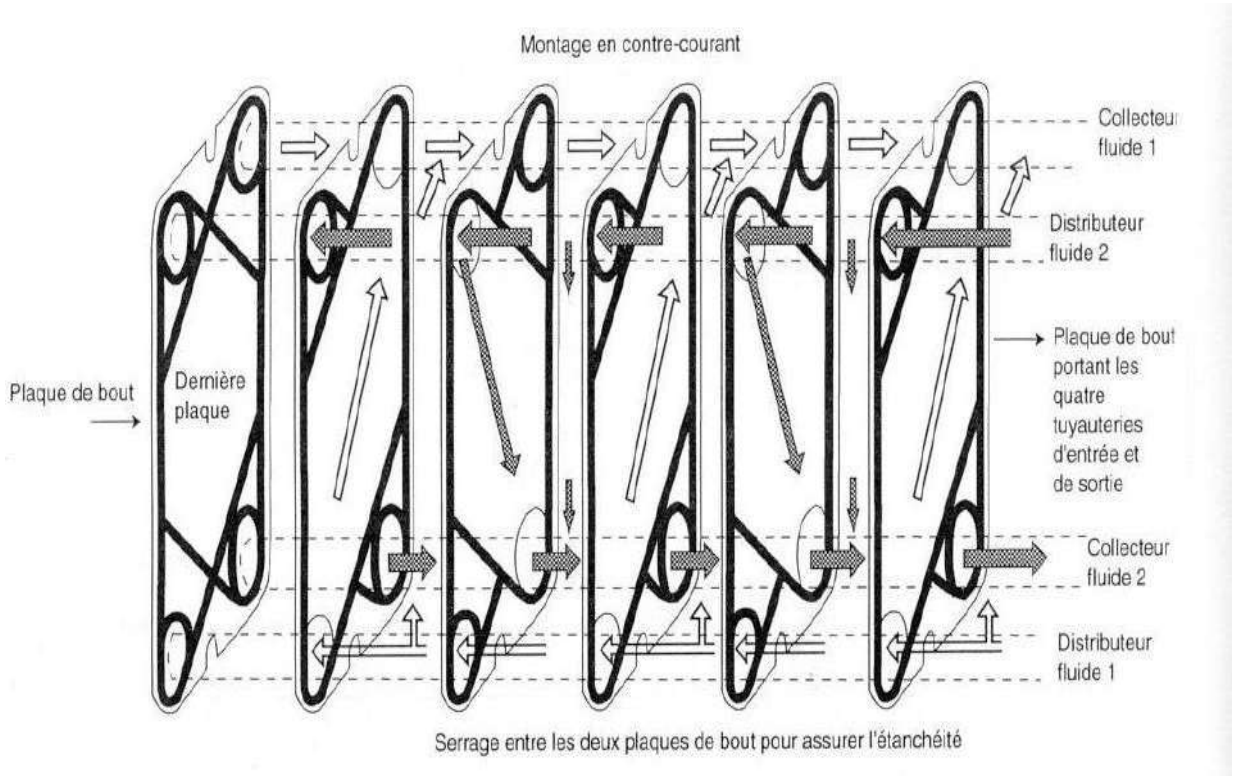
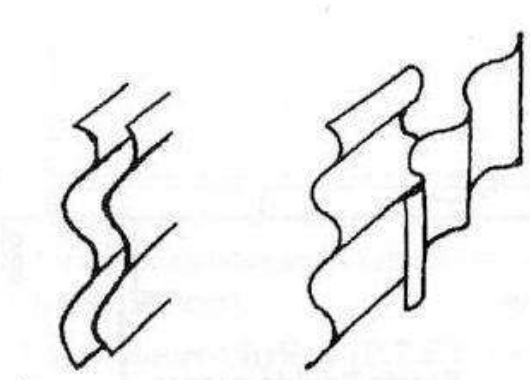


Figure II.6 : principe d'écoulement alterné des fluides entre plaque [7].

L'emboutissage des plaques en chevron favorise la turbulence des fluides et assure une bonne tenue à la pression. Les plaques peuvent se monter de façon identique (chevrons en parallèle) ou en sens inverse (chevrons croisés), ce cas favorise la turbulence mais également augmente la résistance à l'écoulement et donc les pertes de charges.



Chevrons parallèles Chevrons croisés

Figure II.7 : arrangement chevrons plaques.

II.2.2.2. Les échangeurs tubulaires [8]

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

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

Ce type d'échangeur est de nouveau employé, à la place des échangeurs à plaque, lors de traitement thermique de fluide avec des morceaux (soupe, crèmes dessert ou yaourt avec fruit…). On utilise toujours un nombre limité de tubes d'échange en parallèle pour éviter les écoulements préférentiels et de ce fait la réalisation d'un traitement thermique hétérogène. Qui peut s'avérer critique au niveau bactériologique.

On prendra également des précautions particulières avec les fluides visqueux ou sensibles aux cisaillements.

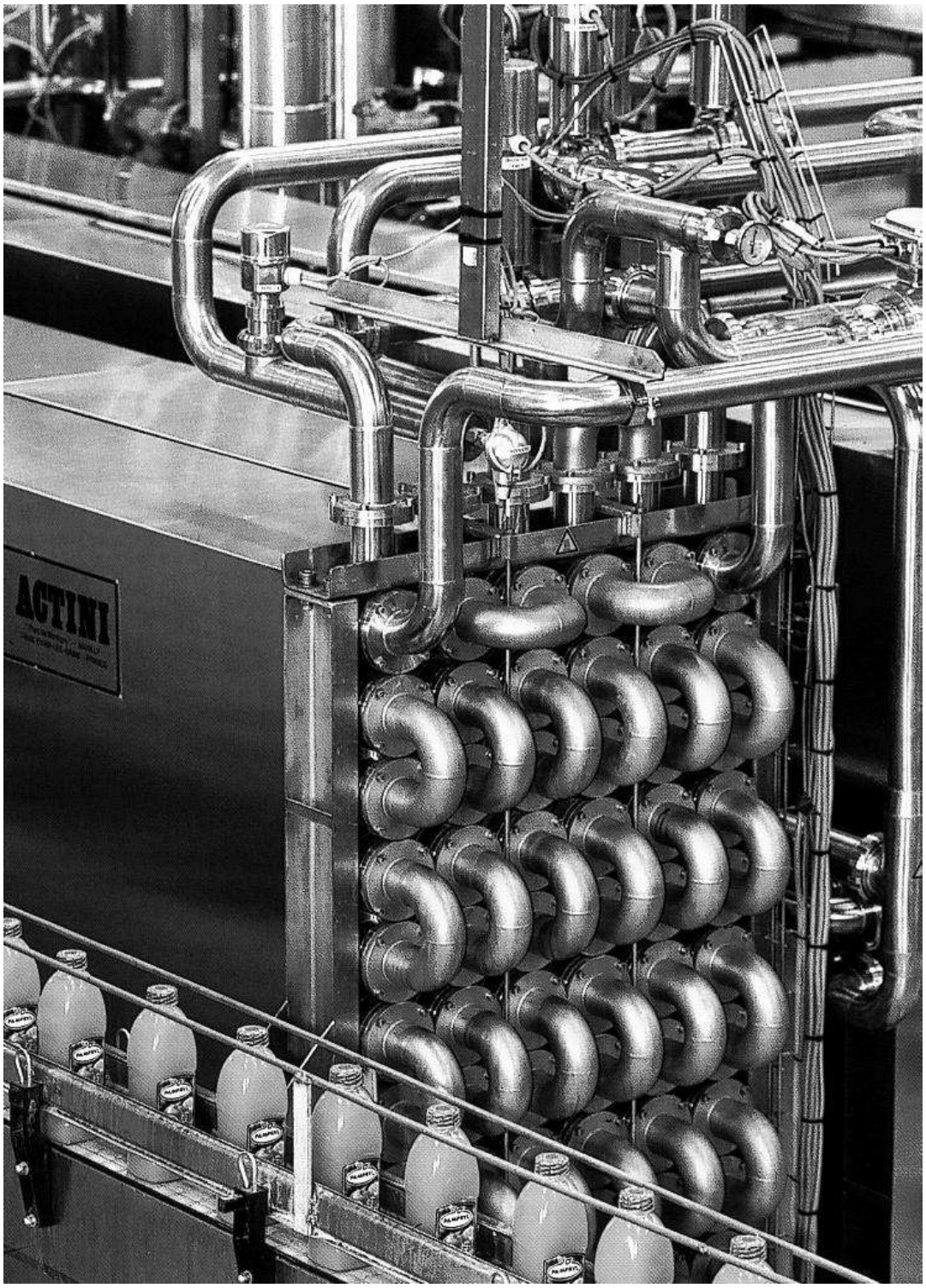


Figure II -8 : échangeur tubulaire.

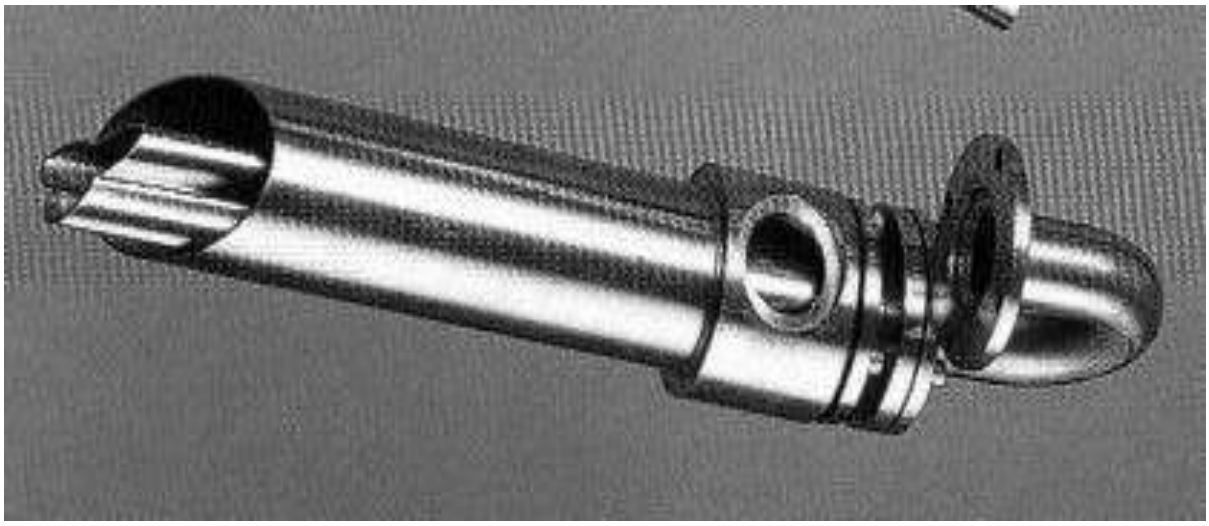


Figure II -9 : un tube d'échange.

II.2.2.3. Les échangeurs à surface raclée [8]

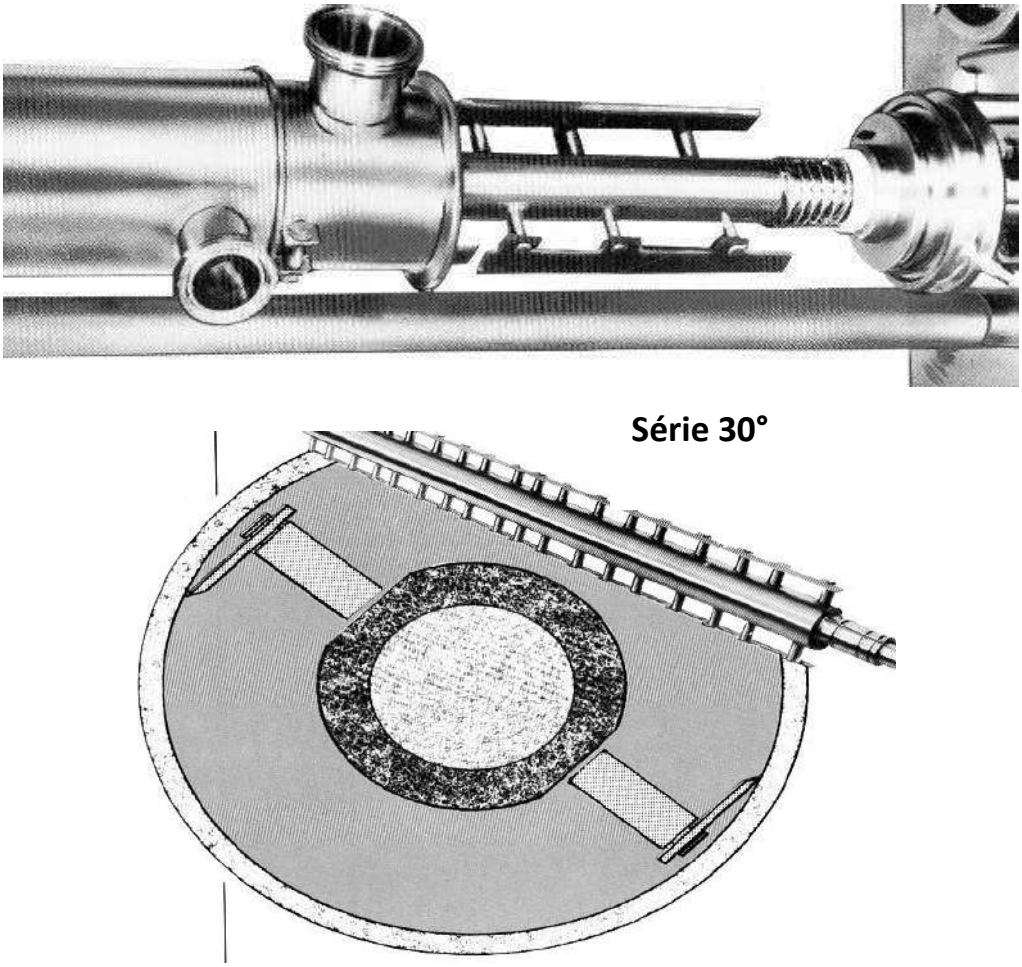


Figure II -10 : un échangeur a surface raclée

On utilise les échangeurs à surface raclée pour les produits visqueux, voire des produits franchement pâteux (purées, concentrés de jus de tomate, crème glacée…) ils sont constitués de plusieurs fûts en série verticaux ou horizontaux. Chaque fûts est constitué d'un tube central dans lequel tourne le batteur équipé de lames qui raclent la paroi d'échange thermique, et maintiennent ainsi une surface d'échange toujours renouvelée avec un bon coefficient d'échange thermique.

Le flux thermique traverse le tube central et s'évacue dans la double enveloppe où circule le fluide thermique (eau chaud ou froid, vapeur ou fluide frigorigène suivant les applications),

Ce type d'appareil est utilisé comme simple échangeur pour réchauffer ou refroidir, mais aussi comme pasteurisateur ou stérilisateur de plats cuisinés ou autre produits en vrac. On l'utilise également comme cristallisateur, par exemple pour la cryoconcentration, ou comme évaporateur pour les produits très visqueux.

Les échangeurs à surface raclée sont particulièrement coûteux à l'investissement (peu de surface d'échange installée par fûts) et en fonctionnement du fait de l'ensemble des pièces mécaniques en mouvement (rotor, garnitures d'étanchéité d'arbre, usure des lames…). Ils présentent aussi l'inconvénient de ne pas pouvoir effectuer de récupération de chaleur à contre courant, comme pour les échangeurs à plaques ou tubulaires.

Ce type d'échangeur reste cependant indispensable pour plusieurs procédés, qui ne serait pas autrement possibles (par exemple fabrication du mixe de crèmes glacées,…).

II.2.2.4 Autres types d'échangeur [8]

Parmi les autres types d'échangeurs échangeurs thermiques, il convient également de citer les échangeurs où l'un des deux fluides change de phase. Il s'agit du cas particulier des évaporateurs – tubulaires ou à plaques – où le fluide froid passe de l'état liquide à l'état gazeux, et des condenseurs – tubulaires ou à plaques – où le fluide chaud passe de l'état gazeux à l'état liquide. Ils sont généralement utilisés pour concentrer une solution, refroidir un fluide ou produire de la vapeur.

Pour résoudre ses problèmes d'échanges thermiques, l'utilisateur se trouve devant une grande variété de produits, dont les principales catégories sont, rappelons le, les échangeurs tubulaires et les échangeurs à plaques. Toutefois, la technologie de ces types d'échangeurs porte surtout sur l'utilisation de nouveaux matériaux ainsi que sur les conditions d'amenée des

fluides. Les matériaux les plus utilisés dans les échangeurs sont les aciers inoxydables et le titane, mais d'autres matériaux sont également employés, notamment pour limiter l'effet des phénomènes de corrosion, comme le graphite, la céramique, le verre et les plastiques. L'objectif est d'améliorer la résistance des échangeurs afin de les rendre plus fiables lorsqu'ils sont utilisés dans des cycles thermiques.

Une autre technologie vise à diminuer l'encombrement des échangeurs par le développement d'échangeurs compacts ou même de micro échangeurs.

Ce sont encore des échangeurs, mais un peu moins courants, les appareils suivant :

- les échangeurs à lit fluidisé,

- les échangeurs à contact direct,

- les échangeurs à fluide complexe.

Utilisés depuis plus d'un siècle dans l'industrie agroalimentaire, les échangeurs thermiques ont maintenant de nombreuses applications, majoritairement dans l'industrie, mais également dans l'habitat ou dans les transports. Il existe une grande variété de produits, de tailles, et de performances différentes qui se différencient principalement par leurs fonctions, leurs conditions d'utilisation, les technologies ou les matériaux employés, ainsi que par leur prix.

II.3. CONCLUSION

Le traitement thermique des produits laitiers s'effectue dans des échangeurs de chaleurs à plaques sujet de notre travail grâce à ces avantages qui sont :

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

- Contrôle rapide [9]
- Nettoyage plus facile par rapport aux autres classes.

Mais aussi ils ont des inconvénients parmi eux on note :

- Ne peut pas être utilisé pour des fluides très visqueux ou des fluides contenant des particules solides à cause du faible espace entre les plaques.
- Importante perte de charge.
- Domaine de température relativement faible même si certains échangeurs à plaques peuvent aller jusqu'au 300°C en raison principalement du système d'étanchéité en caoutchouc [9].

III.1. INTRODUCTION [5]

Le calcul des échangeurs de chaleur dans les conditions réelles de fonctionnement ne peut souvent être estimé par l'étude thermique seule. Durant le fonctionnement, avec la plupart des liquides et quelques gaz, un film "sale" s'amorce graduellement sur la surface d'échange ; son effet principal est d'augmenter la résistance thermique et peut aussi engendrer des pertes de pression.

L'encrassement, qui sous sa forme la plus générale peut être défini comme l'accumulation d'éléments solides indésirables sur une interface, affecte une grande variété d'opérations industrielles.

III.2. NOTIONS SUR L'ENCRASSEMENT DES ECHANGEURS [8]

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

- La corrosion,

- l'encrassement biologique,

- l'encrassement par réaction chimique,

- l'entartrage,

- l'encrassement particulier,

- l'encrassement par solidification.

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

III.2.1. La corrosion

L'encrassement par corrosion est le résultat d'une réaction chimique ou électrochimique entre la surface de transfert de chaleur et le fluide en écoulement. Les produits qui se forment et s'accumulent sur la surface créent l'encrassement. Il s'agit là d'un mécanisme de corrosion in situ. Lorsque l'encrassement est dû à des produits de corrosion générés ex situ, l'encrassement correspondant est de type particulaire. Il existe différents types de corrosion :

- la corrosion uniforme caractérisée par une perte d'épaisseur régulière mais dont la vitesse n'est pas forcément proportionnelle au temps ;

- la corrosion par piqûres où l'attaque est limitée à des zones de très petites surfaces ;

- la corrosion fissurant à l'échelle microscopique inter-granulaire ou trans-granulaire;

- la corrosion sélective où seul un élément d'un alliage subit une attaque sélective.

III.2.2. L'encrassement biologique

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

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

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

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

Dans certains cas extrêmes, il peut même être caractérisé par l'apparition de coquillages.

III.2.3. L'encrassement par réaction chimique

L'encrassement par réaction chimique est dû à la présence d'une réaction chimique au voisinage d'une surface d'échange. Les produits solides ainsi formés s'y déposent. Il s'agit le plus souvent d'une réaction de polymérisation qui implique la formation d'un dépôt de haut poids moléculaire. Les vitesses de telles réactions chimiques dépendent fortement de la température, de la pression, de la concentration et de la présence d'éléments catalyseurs. Toutefois, la vitesse globale du mécanisme de dépôt dépend aussi de la dynamique des phénomènes de surface et de transfert.

III.2.4. L'entartrage

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

III.2.5. L'encrassement particulier

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

- l'eau des chaudières contenant des produits de corrosion ;

- l'eau des tours de refroidissement ;

- les écoulements gazeux chargés de particules tels les résidus solides de combustion, ou les poussières résultant de l'incinération de déchets ménagers.

Toutefois, les types d'encrassement les plus fréquemment rencontrés dans l'industrie sont l'encrassement particulaire et l'entartrage .

III.2.6. L'encrassement par solidification

L'encrassement par solidification est 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 de givre) 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 d'hydrocarbures parafiniques). Une vapeur peut également se déposer sous une forme solide sans passer par l'état liquide (formation de givre).

III.3. APPARITION ET DEVELOPPEMENT DE L'ENCRASSEMENT [9]

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

III.3.1. Initiation

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

III.3.2. Transfert de particules à la paroi

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

III.3.3. Adhésion des particules

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

III.3.4. Réentraînement des particules déposées

Il est classique de supposer que le mécanisme de réentraînement est lié aux forces de cisaillement s'exerçant sur le dépôt. Lorsque la force aérodynamique est supérieure aux forces d'adhésion d'une particule, le réentraînement se produit par érosion (Figure III.1) ; lorsqu'il concerne des agglomérats de particules, il correspond à un phénomène d'écaillage.

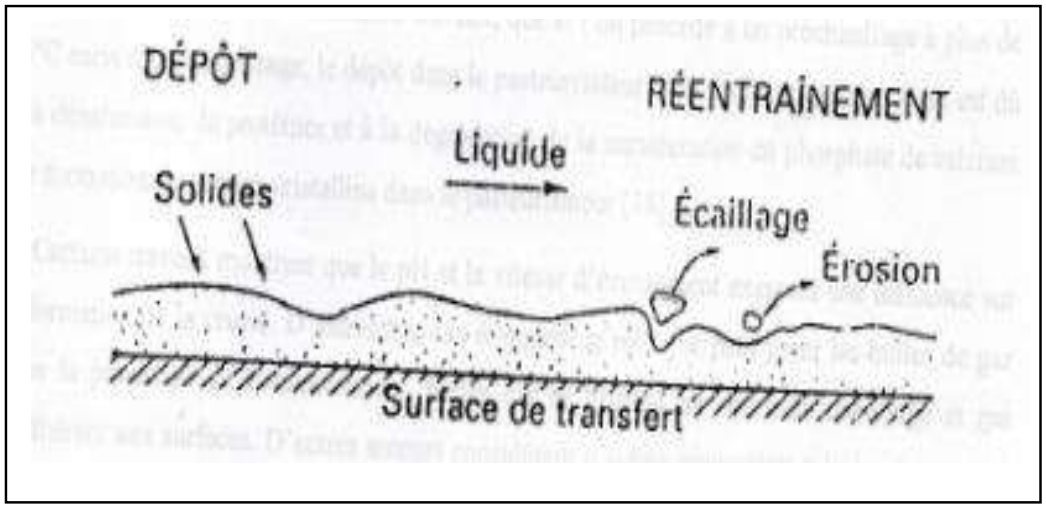


Figure III -1 : Représentation schématique des phases de dépôt et de réentraînement de l'encrassement dans le cas d'un liquide [10]

III.3.5. Vieillissement du dépôt

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

III.4. ENCRASSEMENT PAR LE LAIT

III.4.1. Revue bibliographique

La remarque principale qu'on peut dégager de cette revue bibliographique est que les auteurs des différents travaux ne considèrent que l'encrassement par la protéine β-Lactoglobuline qui représente plus de 10 % des protéines du lait [11]. Sa structure lui confère un rôle déterminant dans le processus de l'encrassement, donc on peut confondre entre l'encrassement des protéines et encrassement de la protéine β-lactoglobuline. Des considérations thermodynamiques approuvent également l'idée, que l'encrassement est dû uniquement à la protéine β-lactoglobuline [12].

Il est clair également, que l'encrassement des protéines dépend énormément de la température puisque la protéine subit des transformations selon la loi d'Arrhenius [1].

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 [13].

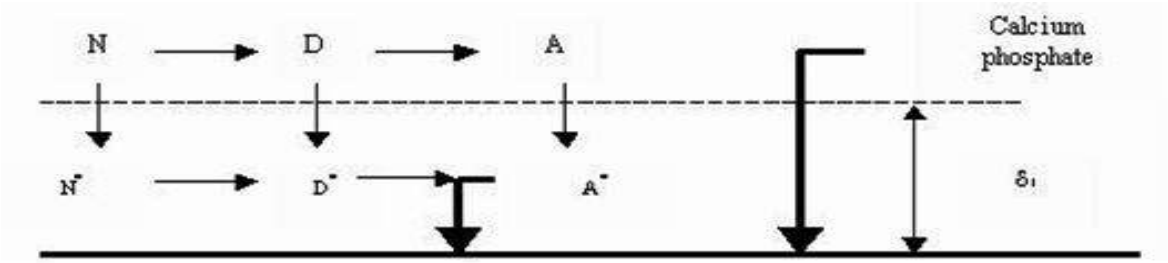
Certains travaux montrent que le pH et la vitesse d'écoulement exercent une influence sur la formation de la crasse. D'autres travaux évoquent le rôle que peut jouer les bulles de gaz dans le processus de l'encrassement, bulles qui se libèrent au cours du chauffage et qui s'adhérent aux surfaces. D'autres auteurs considèrent d'autres paramètres tels que la rugosité de la surface, le type de matériau et la charge superficielle [2].

Sur un autre article, l'auteur s'est intéressé à l'étude du rapport Ca : P dans la crasse et a trouvé une valeur proche de la valeur caractéristique du $Ca_3(PO_4)_2$ de 1,5. Ceci confirmera l'hypothèse d'un encrassement par cristallisation du phosphate du calcium [14].

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 [1].

III.4.2. Mécanisme de l'encrassement des protéines

L'encrassement de la protéine se fait selon le mécanisme représenté sur la figure suivante [1] :

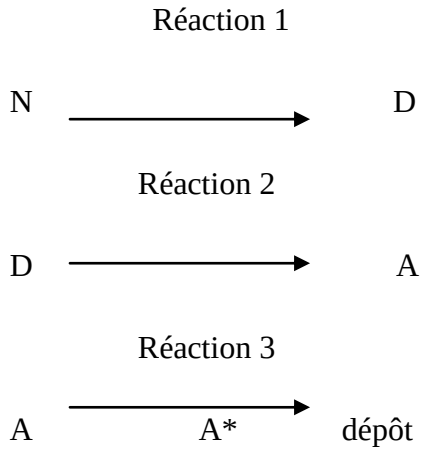


Mur, surface Dépôt de protéines.

Figure III -2 : Encrassement des protéines.

La protéine β-lactoglobuline naturel, N perd sa structure tertiaire, et donne une protéine dénaturée, D, cette dernière réagit selon deux réactions, elle donne d'une part des agrégats (ensemble de molécules forment un seul bloc), A, qui ne s'encrassent pas et peut réagir, d'autre part, avec des constituants du lait pour donner une protéine dénaturée qui présente une

affinité avec la surface hydrophobe et s'adsorbe sur cette dernière, A*. A partir de là, on peut présenter le schéma réactionnel suivant :



La cinétique des trois réactions est disponible, les vitesses dépendent de la température selon la loi d'Arrhenius [1].

III.4.3. Encrassement par cristallisation

Le deuxième type d'encrassement et qui ne peut pas être négligé, est celui des sels et plus particulièrement le phosphate de calcium car il possède une solubilité inverse par rapport à la température, c'est-à-dire un gradient négatif de solubilité. Lors du préchauffage, le produit ionique dépasse la concentration limite de solubilité dans le lait. Les sels sédimentent sous forme cristalline et se déposent sur la paroi. Des travaux ont démontré qu'un encrassement peut avoir lieu avec une solution sursaturée en phosphate de calcium suite à une augmentation de température au-delà de 90°. Le produit de solubilité du phosphate de calcium est rapidement dépassé quand la température augmente, ce qui engendre un dépôt qui est fonction de sursaturation [1].

III.5. PREVENTION DE L'ENCRASSEMENT [11 , 15]

Face au problème de l'encrassement des échangeurs thermiques, pour lequel aucune solution miracle ne semble exister, il est néanmoins possible d'utiliser une ou plusieurs des nombreuses méthodes en vigueur. Le choix de l'une ou de plusieurs d'entre elles est conditionné par la nature de la surface d'échange et par le type d'encrassement auquel sera soumis l'échangeur.

III.5.1. Au moment de la conception de l'échangeur

Dans un premier temps, il faut choisir parmi les différents types d'échangeurs, leurs coûts, leurs encombrements et leurs niveaux de température et de pression, celui qui est le mieux adapté au problème posé. Dans ce choix, il ne faut pas négliger les échangeurs tels que ceux en graphite, en verre ou en plastique, qui possèdent des comportements avantageux vis-à-vis de certaines formes d'encrassement. Dans un second temps, il faut choisir des configurations et des modes de fonctionnement tels que la disparition des zones stagnantes, des points chauds ou froids, l'état des surfaces, l'optimisation des vitesses ou le choix des matériaux pour limiter au maximum les effets néfastes de l'encrassement. La prise en compte de techniques d'intensification des échanges thermiques par des actions simultanées sur les matériaux, ou sur l'hydrodynamique du système paraît essentielle lors de cette étape. Pour finir, le choix de la résistance d'encrassement est primordial.

III.5.2. Au moment de la fabrication de l'échangeur et de sa mise en route

Dans cette phase, des précautions doivent être prises telle que la protection des surfaces d'échange de tout l'environnement favorisant le dépôt ou la corrosion. Lors de la mise en service de l'installation, compte-tenu de l'excès de surface attribuée pour tenir compte de l'encrassement, l'échangeur ne fonctionne pas dans des conditions optimales. En effet, des vitesses de circulation plus lentes et des températures de surface plus importantes favorisent l'encrassement. Ainsi, des efforts doivent être faits au démarrage de l'installation pour atteindre les valeurs nominales de fonctionnement.

III.5.3. Au cours du fonctionnement de l'échangeur

Des opérations de maintenance et d'entretien sont utilisées pour prévenir la formation de dépôts encrassant dans l'échangeur. Elles permettent ainsi d'augmenter la durée de vie de l'appareil entre deux arrêts pour maintenance.

Suivant la nature de l'encrassement, différents procédés existent :

- Procédés mécaniques pour les liquides pour le nettoyage en continu de la surface interne d'échangeurs tubulaires :

  - ✓ à boules,

- ✓ à ressorts,
- ✓ à brosses.

- Procédés mécaniques pour des échangeurs fonctionnant avec des gaz encrassant tels que :

- ✓ la projection de vapeur ou d'air comprimé,
- ✓ le nettoyage à l'eau,
- ✓ le grenaillage,
- ✓ le soufflage acoustique,
- ✓ le nettoyage par chocs thermiques.

En ce qui concerne les échangeurs à plaques, des systèmes analogues existent, toutefois, il est aussi possible d'utiliser :

- ✓ des systèmes à inversion de débits,
- ✓ des échangeurs à surface raclée,
- ✓ un nettoyage par chocs thermiques.

De la même façon, des procédés mécaniques, chimiques, électriques ou magnétiques sont utilisés pour éviter ou minimiser les dépôts entartant ou l'encrassement biologique.

Une autre solution consiste à introduire des filtres en amont des échangeurs.

III.5.4. Au moment de l'arrêt de l'échangeur

Il est souvent nécessaire, malgré les procédés précédemment cités, de nettoyer complètement l'appareil. Le démontage de l'appareil permet des interventions comme le nettoyage mécanique où plusieurs techniques peuvent être mises en œuvre, le nettoyage hydraulique ou le nettoyage chimique.

III.5.5. Aspects économiques liés à l'encrassement

L'appréciation du coût supplémentaire que représente l'encrassement des échangeurs thermiques n'est pas facile à évaluer de manière directe. Les différentes études réalisées sur le sujet sont d'accord pour répartir les dépenses relatives à l'encrassement selon quatre grandes catégories :

- investissement supplémentaire en surface d'échange lors du dimensionnement (20 %) ;

- coût de maintenance incluant les phases de nettoyage (18 %),

- non récupération d'énergie sur les effluents encrassant (41 %),

- coûts supplémentaires en énergie nécessités par l'encrassement pendant les phases de production (21 %).

III.5.5. 1 .Coûts liés à la conception de l'échangeur

Il s'agit surtout, dans cette phase, de surdimensionnés les surfaces d'échange par l'affectation d'une valeur, le plus souvent empirique, de résistance d'encrassement. Dans de nombreux procédés industriels, l'utilisation d'échangeurs thermiques fonctionnant avec une efficacité continuellement proche d'une efficacité optimale est souvent requise. Dans ce cas, l'échangeur considéré est dupliqué. Ainsi, lorsque l'échangeur en place est encrassé, il est retiré de l'installation pour entretien, et remplacé par son duplicata. Le coût engendré par la nécessité d'avoir une réserve de répliques vient alors s'ajouter au surcoût lié au surdimensionnement des surfaces d'échange.

Le phénomène de corrosion est aussi pris en compte lors de la conception d'un échangeur. Un des moyens de le minimiser est d'utiliser des matériaux plus onéreux que l'acier, tel que le titane. Il faut donc s'attendre à ce que le coût d'un tel échangeur soit plusieurs fois plus élevé que celui d'un échangeur classique.

III.5.5. 2 .Coûts liés au fonctionnement de l'échangeur

Si le problème de l'encrassement n'est pas anticipé correctement lors de la phase de conception, des coûts supplémentaires dus aux arrêts intempestifs pour maintenance et entretien viennent s'ajouter. En effet, des arrêts non planifiés de l'installation peuvent mener à une perte complète de production qui représente à son tour un manque à gagner pour les industriels. Outre ces dépenses, les démontages et remontages répétés peuvent aboutir à une

détérioration plus rapide du matériel, ainsi qu'à une réduction de la durée de vie des échangeurs.

L'encrassement des surfaces d'échange entraîne une perte d'énergie non négligeable due à la diminution du transfert de chaleur et à l'augmentation de la perte de charge. Généralement, cette perte d'énergie au niveau de l'échangeur doit être compensée par une utilisation accrue d'énergie primaire.

III.5.5.3. Coûts liés à l'arrêt de l'installation

Le nettoiement des échangeurs thermiques entraîne des coûts de main d'œuvre supplémentaires et exige un équipement adéquat surtout si un traitement chimique est requis. Dans ce cas, un circuit complémentaire impliquant des pompes et des réservoirs peut être nécessaire. Les produits chimiques doivent être achetés et les effluents issus du processus de nettoyage doivent être traités. Les processus de nettoyage plus conventionnels, tels que la projection de vapeur ou d'air comprimé, ou la circulation de boules ou de ressorts dans l'installation, exigent des dépenses supplétives à celles liées à la main d'œuvre.

III.6. CONCLUSION

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

I V.1. INTRODUCTION

Dans le cadre du présent travail, on se propose d'identifier expérimentalement la résistance thermique de l'encrassement des échangeurs de chaleur à plaques due à la couche de dépôt formé lors de la phase de pasteurisation du lait par rapport au modèle théorique de Kearn et Seaton (1959) en partant de la perte de charge causée par cet encrassement [17] .

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

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

I V.2. CYCLE DE PRODUCTION

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

Ce dernier est reconstitué selon le procédé suivant: Il s'agit de mélanger dans une eau les différents composants du lait à savoir : la poudre de lait spray et la matière grasse (MG), pour réaliser un produit le plus voisin possible du lait initial. Le mélange se fait en circuit fermé et selon le mode opératoire suivant [16] .

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

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

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

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

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

I V.2.1. Les étapes de production

Les étapes de production dans l'unité UHT se résument comme suit (Figure V.1) [16] :

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

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

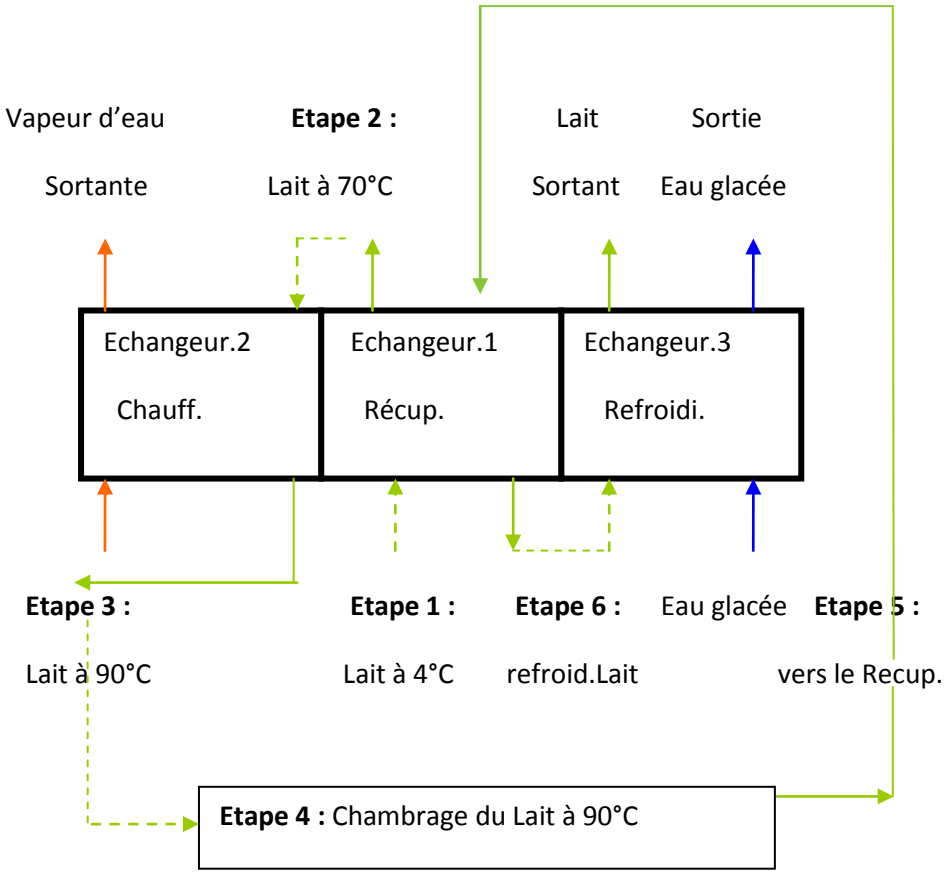
2. Homogénéisateur (3) : Pour fusionner les particules de la matière grasse et rendre le mélange donc plus homogène.

3. Pasteurisation : Elle est assurée dans le compartiment II (échangeur 2) par une injection de la vapeur dans de l'eau, cette opération se fait à une température de 90-120 °C et une pression de 4,4 bars. Le mélange est maintenu à cette température pendant 4 secondes dans un chambreur tubulaire extérieur.

4. Refroidissement (récupération de chaleur): Il se fait par un échange de chaleur dans le compartiment III (échangeur 3) entre l'eau glacé et le lait pasteurisé et dans le compartiment I 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.

I V.2.2. Le cycle de vapeur La vapeur d'eau entre à une pression de 6 bars, passe par un détendeur avant d'être mélangée avec l'eau chaude sortante de l'échangeur à une température de 115°C et une pression de 4,6-5,2 bars, pour être de nouveau injectée dans l'échangeur à une température de 128 °C.



Circuits des fluides :

Lait (;) Eau glacée Vapeur d'eau

Figure V.1. Cycle de Pasteurisation du Lait.

I V.3. MODELE THERMIQUE DE L'ECHANGEUR A PLAQUE

I V.3.1. Introduction

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

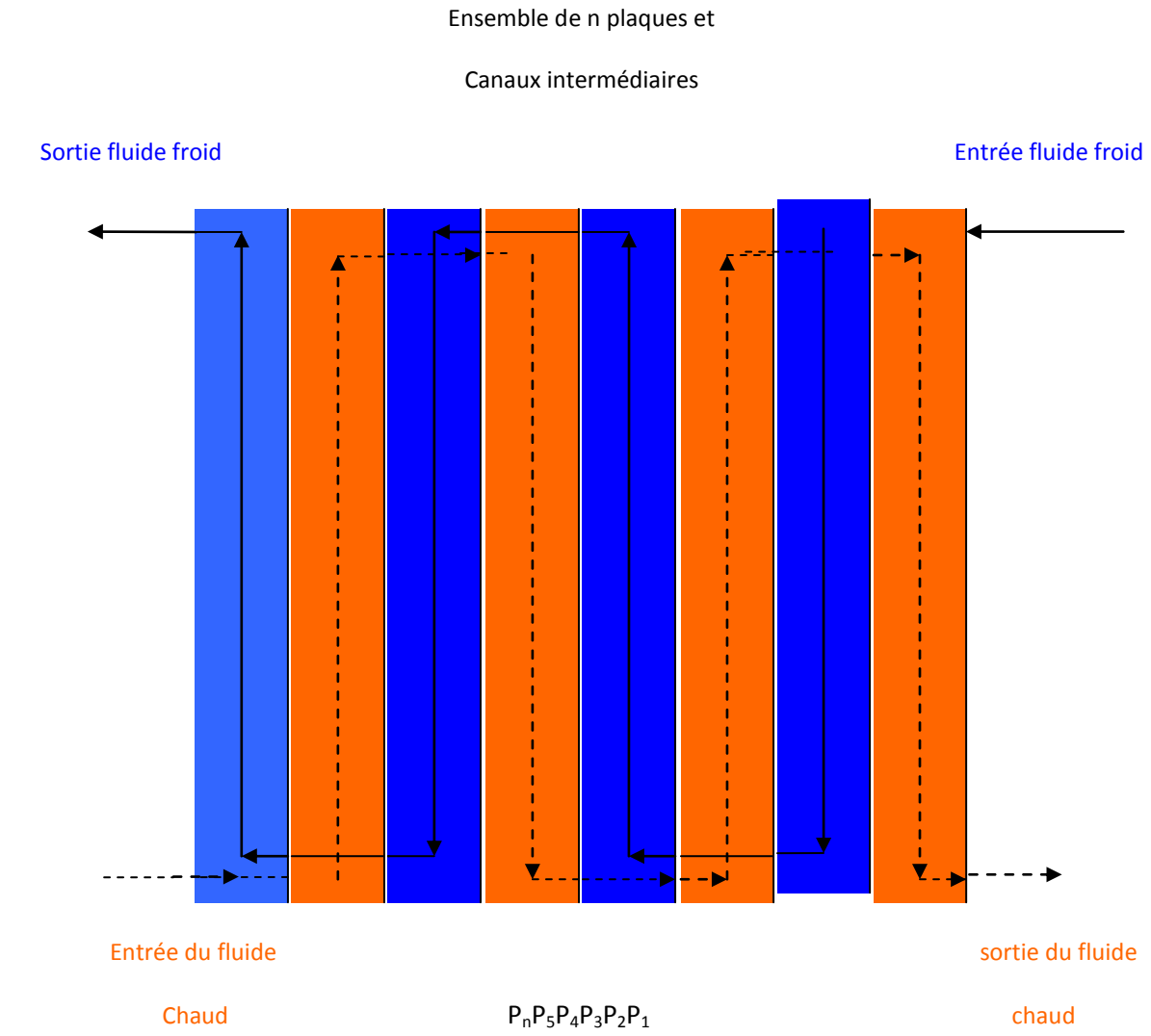


Figure V.2. Arrangement des plaques de l'échangeur de pasteurisation et sens de circulation des fluides.

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.

I V.3.2. Modèle de l'identification de Kern – Seaton (1959) [17]

Kern et Seaton (1959) proposent un flux net de dépôt Φ_n défini comme étant la différence entre un flux de dépôt et un flux de réentraînement selon :

$$\Phi_n = \frac{d\,Mass_d}{dt} = \left(\Phi_d - \Phi_r\right) \qquad (V.1)$$

Avec :

$$\Phi_d = K_m \left(C_{fl} - C_p\right) \qquad (V.2)$$

Le dépôt est ainsi gouverné par le transfert de masse à la paroi. Par contre, le réentraînement est gouverné par la masse de dépôt et la contrainte de cisaillement. Ceci fait que les particules les plus récemment déposées sur les dernières couches sont plus concernées par le réentraînement que les plus anciennes.

L'intégration de l'équation du flux net donne la masse de dépôt pour une masse initialle nulle et un flux de dépôt constant :

$$Mass_d = Mass_d^{asy}\left(1 - \exp\left(-t/a_t\right)\right) \qquad (V.3)$$

Avec :

$$Mass_d^{asy} = \Phi_d\, a_t \qquad (V.4)$$

C'est ainsi que Kern et Seaton (1959) trouvent que l'encrassement suit une évolution asymptotique.

Cleaver et Yates (1976) propose pour la constante:

$$a_t = \frac{2 10^4\, \mu}{\varepsilon\, \tau_p} \qquad (V.5)$$

La résistance d'encrassement est donnée par:

$$R_d = R_d^{asy}\left(1 - \exp\left(-t/a_t\right)\right) \qquad (V.6)$$

Car :

$$R_d = \frac{Mass_d}{\rho_d \lambda_d} \qquad (V.7)$$

A cet effet, le bilan thermique entre les deux fluides dans l'échangeur est donné par :

$$A \times \rho_m Cp\left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x}\right) = U \times A\left(T_{\infty 1} - T_{\infty 2}\right) \qquad (V.8)$$

En termes de quantité de chaleur nous avons:

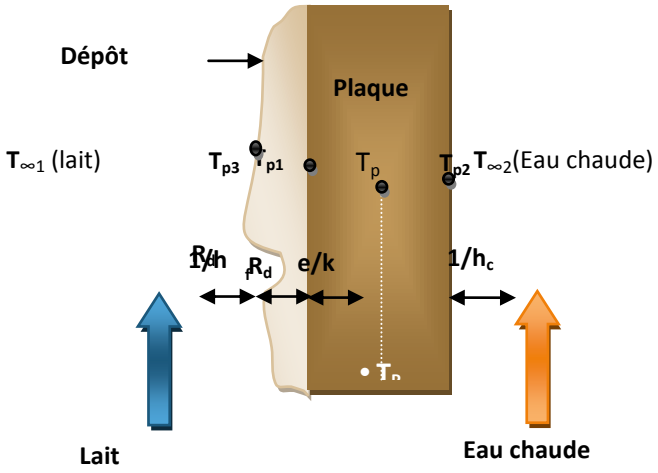


Figure. I V.3 : Résistance des films pour une plaque encrassée.

La chaleur échangée par convection côté fluide froid s'écrit en appliquant la loi de Newton :

$$q_1 = h_f A\left(T_{\infty 1} - T_{p3}\right) \qquad (V.9)$$

La chaleur échangée par convection côté fluide chaud s'écrit en appliquant la loi de Newton :

$$q_2 = h_c A\left(T_{\infty 2} - T_{p2}\right) \qquad (V.10)$$

La chaleur échangée par conduction dans la plaque s'écrit en appliquant la loi de Fourrier :

$$q_3 = \frac{\left(T_{p1} - T_{p2}\right)}{\frac{e}{K \times A}} \qquad (V.11)$$

La chaleur échangée par conduction dans le dépôt s'écrit en appliquant la loi de Fourrier :

$$q_4 = \frac{\left(T_{p3} - T_{p1}\right)}{R_d} \qquad (V.12)$$

En régime permanent nous avons : $q_1=q_2=q_3= q_4=q$

On obtient :

$$U \times A\left(T_{\infty 1} - T_{\infty 2}\right) = \frac{\left(T_{\infty 1} - T_{\infty 2}\right)}{\frac{e}{K_1 A} + \frac{1}{h_f A} + \frac{1}{h_c A} + R_d}$$

Donc:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_f} + \frac{1}{h_C} + \frac{e}{k_1} + R_d \qquad (V.13)$$

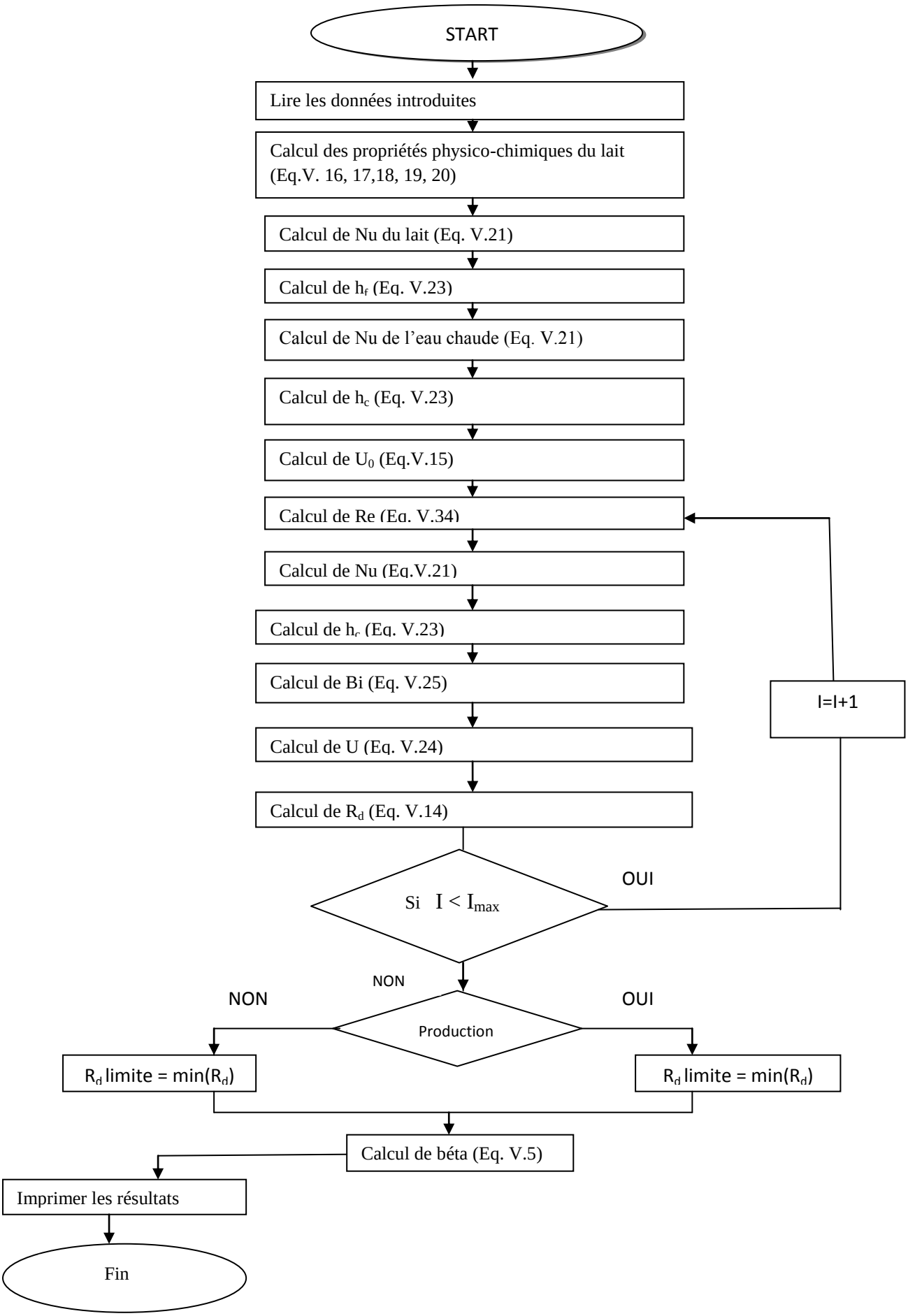
La résistance d'encrassement apparaît donc comme la différence entre la résistance thermique globale de l'échangeur à l'état encrassé et celle de l'échangeur à l'état propre.

Où :

$$R_d = \frac{1}{U} - \frac{1}{U_0} \qquad (V.14)$$

$$\frac{1}{U_0} = \frac{1}{h_f} + \frac{1}{h_c} + \frac{e}{K_1} \qquad (V.15)$$

Le calcul de la résistance d'encrassement par la méthode de Kern, nécessite la détermination des résistances des films côté fluides chaud et froid. Pour cela, il est indispensable d'évaluer les propriétés physiques des deux fluides (mélange + eau chaude) ainsi que les caractéristiques hydrodynamiques et thermiques du processus pour ce compartiment, à savoir que les paramètres à contrôler pendant les tests sont les températures et pressions. L'organigramme de calcul présenté ci-dessous, résume la méthodologie à suivre pour la modélisation de l'encrassement qui sera détaillée dans les sections qui vont suivre :


START
Lire les données introduites
Calcul des propriétés physico-chimiques du lait (Eq.V. 16, 17,18, 19, 20)
Calcul de Nu du lait (Eq. V.21)
Calcul de h_f (Eq. V.23)
Calcul de Nu de l'eau chaude (Eq. V.21)
Calcul de h_c (Eq. V.23)
Calcul de U_0 (Eq.V.15)
Calcul de Re (Eq. V.34)
Calcul de Nu (Eq.V.21)
Calcul de h_c (Eq. V.23)
Calcul de Bi (Eq. V.25)
Calcul de U (Eq. V.24)
Calcul de R_d (Eq. V.14)
I=I+1
Si I < I_{max}
OUI
NON
Production
NON
OUI
R_d limite = min(R_d)
R_d limite = min(R_d)
Calcul de béta (Eq. V.5)
Imprimer les résultats
Fin

I V.3.3. Calcul du coefficient de transfert de chaleur global

La Figure V.4, représente le schéma de l'écoulement du fluide entre deux plaques parallèle de l'échangeur de chaleur.

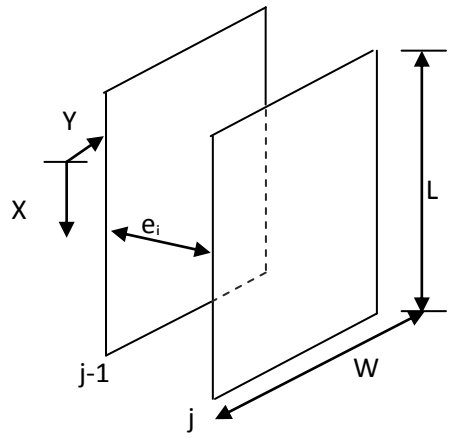


Figure. I V.4 : Schématisation de la direction de l'écoulement entre deux plaques.

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

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

$$\mu + \mu_0 (1 + 2{,}5\varphi) \qquad \text{(V.16)}$$

φ = (volume des particules)/ (volume total). (V.17)

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

-A partir de la relation (V.17), nous obtenons : φ

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

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

- A partir de la relation (V.16) nous parvenons à :μ

Chaleur spécifique : Elle est calculée avec la corrélation suivante [18]:

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

Débit du mélange : Q = 4000 l/h.

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

Vitesse du mélange : S'écrit :

$$u = \frac{Q}{A} \qquad (V.18)$$

$$A = e_j \times W$$

Donc à partir de la relation (V.18): on obtient u

Nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\rho_f \times u \times d_e}{\mu_f} \qquad (V.19)$$

$$d_e = 2 \times e_j \qquad (V.\ 20)$$

$\rho_f = 1033,7 - 0,2308T - 0,00246T^2$ [18].

Donc on obtient le nombre de Re

La présence de rainures dans les plaques donne au nombre de Reynolds un tout autre sens que dans le cas d'un écoulement sur une surface lisse, ce qui conduit à considérer l'écoulement comme turbulent dès que Re > 400 ; Le régime est donc turbulent [16].

Pour le transfert de chaleur en régime turbulent dans un échangeur à plaques, la corrélation suivante peut être utilisée [16]:

$$Nu = 0.214\left(Re^{0.662} - 3.2\right)Pr^{0.4} \qquad (V.21)$$

$$Pr = \frac{Cp \times \mu}{K} \qquad (V.22)$$

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.

Coefficients de transfert de chaleur (h_f):

Pour calculer le coefficient de transfert de chaleur côté fluide froid (h_f), la corrélation (V.21) et les équations (V.18) et (V.20) sont utilisées :

$k = 0,00133T + 0,53991$ [19] .

D'où avec l'équation (V.21): Pr = 2

La corrélation (V.21) donne : Nu = 173.11

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

D'où : $h_f = \frac{Nu \times K}{d_e}$ (V.23)

I V.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 [19].

On obtient : μ ,Cp ,ρ_c [19] .

Avec la relation (V.18) :

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 (V.19) et (V. 22) on obtient: Re , Pr

-Avec la corrélation (V.21) on obtient : Nu

-De l'équation (V.23) on obtient: h_c

I V.3.6. Calcul du coefficient de transfert de chaleur avant encrassement

Le coefficient global de transfert de chaleur avant encrassement U_0 est calculé à travers l'expression (V.15) : sachant que k_1= 15.1 (W/m°C) [20] et e= 4,5 10^{-3} m, ce qui donne : U_0

I V.3.7. Evolution du coefficient global d'échange de chaleur

La méthodologie à suivre dans le présent calcul, nécessite l'introduction du comportement hydrodynamique du lait dans le compartiment stérilisation, car la partie expérimentale se base sur le suivi journalier de la perte de pression au cours du temps.

Le coefficient global de transfert après encrassement est donné par [1]:

$$U = \frac{U_0}{1+Bi} \qquad (V.24)$$

Le nombre de Biot : $$Bi = \frac{e/K_1}{\frac{1}{\frac{1}{h_f}+\frac{1}{h_c}}} \qquad (V.25)$$

Ce qui nécessite la détermination de h_f au cours du temps à travers la relation (V.23). Cette équation, conduit à la connaissance du nombre de Reynold au cours du temps. A cet effet, le comportement hydrodynamique du lait dans le compartiment pasteurisation est pris en considération les principales hypothèses à tenir en compte, en dehors de celles déjà énoncées sont :

1-L'écoulement du fluide est unidirectionnel et unidimensionnel.

2-Le lait est considéré comme fluide parfait incompressible : ρ = constante

3-Ecoulement stationnaire : $\frac{\partial u_i}{\partial t} = 0$ (i : direction de l'écoulement)

4-Ecoulement établi : $\frac{\partial u_i}{\partial x} = 0$

5-W>>L : $\frac{\partial u_i}{\partial y} = 0$ et v=0 (v : vitesse de l'écoulement du lait selon la direction oy)

L'équation de continuité : $\frac{\partial u}{\partial y} = 0$ et v = 0

L'équation de l'impulsion simplifiée à travers ces dernières hypothèses s'écrit:

$$\frac{dP}{dx} + \tau_{xy} = 0 \qquad \text{(V.26)}$$

Après intégration de l'équation (V.26) et pour $y = \frac{e_j}{2}$ et x = L, nous obtenons :

$$\tau_p = \frac{e_j}{2}\frac{\Delta P}{L} \qquad \text{(V.27)}$$

D'autre part :

Le facteur de friction f s'écrit :

$$f = \frac{\tau_p}{\frac{1}{2}\rho \times u^2} \qquad \text{(V.28)}$$

Donc :

A débit de lait traité égal, la réduction du diamètre hydraulique de l'échangeur résultant de la présence du dépôt crée une augmentation de la perte de charge. La perte de charge d'un échangeur à plaques propre (ΔP_0) déduite de l'équation (V.27) tout en remplaçant les paramètres τ_p et e_j tirés des équations (V.27) et (V.20) est

$$\Delta P_0 = 2 \times f \left(\frac{L}{d_e}\right) \rho \times u \qquad \text{(V.29)}$$

Le facteur de friction f est fonction du nombre de Reynolds :

$$\Delta P_0 = \left(2\frac{L}{d_e}\right) k_1 Re^{k_2} \rho \times u^2 \qquad \text{(V.30)}$$

Pour n passage du fluide la perte de charge s'écrit donc :

$$\Delta P_0 = \left(8\frac{L \times n}{d_e^3 w^2}\right) k_1 Re^{k_2} \rho \times Q^2 \qquad \text{(V.31)}$$

La relation (V.31), est simplifiée en :

$$\Delta P_0 = K_3 \times Re^{K_2} \rho \times Q^2 \qquad \text{(V.32)}$$

Avec K qui est fonction de la géométrie et de la configuration de l'échangeur, il doit être identifié au démarrage de l'installation.

Donc : $K=2{,}16\ 10^{-3}$.

D'autre part :

f est calculé selon Martin 1996 [20] :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{\cos\theta}{\sqrt{0.045\tan\theta + 0.09\sin\theta + \frac{f_0}{\cos\theta}}} + 1 - \frac{\cos\theta}{3.9\, f_1} \qquad \text{(V.33)}$$

f_0 et f_1 dépendent du régime du fluide, en régime turbulent et pour Re>2000:

$$f_0 = \frac{1}{1.56\ln \mathrm{Re} - 3} \quad \text{et} \quad f_1 = \frac{9.75}{\mathrm{Re}^{0.289}}$$

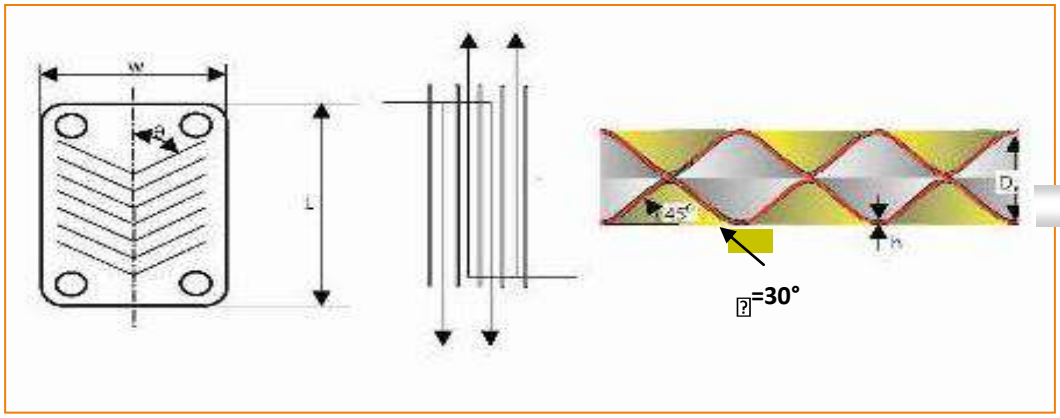


Figure. I V.5 : Schématisation des rainures des plaques

Alors pour :

θ=30°

$f_0 = 0.08$ et $f_1 = 0.6$

Donc:

f=0.55 et de l'équation (V.29) : ΔP_0=0.457 bars

A partir de la relation (V.30) : k_2= 1,23

De la relation (V.32) l'équation reliant le nombre de Reynolds à la perte de charge (déterminée expérimentalement) s'écrit:

$$Re = \sqrt[k_2]{\frac{\Delta P}{K_3 \rho \times Q^2}} \qquad (V.34)$$

A partir des équations : (V.20), (V.24) et (V.31) on a aboutit à l'évaluation du coefficient global de transfert de chaleur au cours du temps à travers la relation (V.23).

(voir programme MATLAB en Annexe9).

I V.3.8. Evolution de la résistance d encrassement au cours du temps

A travers la méthode de Kern et après évaluation du coefficient global de transfert de chaleur, l'expression de la résistance thermique créée par le dépôt et s'opposant au transfert de chaleur (équation (V.14) est déterminée, à travers une simple comparaison avec la valeur calculée qu'aurait ce même coefficient si l'appareil était propre. A cet effet :

$$R_d = \frac{1}{U} - \frac{1}{U_0} \qquad (V.35)$$

Cette relation nous permettra le suivi de la résistance thermique du dépôt en fonction du temps et ce, à travers le programme MATLAB écrit en annexe 8. La variation de la résistance d'encrassement au cour du temps est illustrée dans les figures qui suivent .

I V.4. CYCLE DE NETTOYAGE [21]

L'installation nécessite un nettoyage en place CIP (Cleaning In Place) programmé sur l'armoire de commande dès qu'un cycle de production est achevé, sa durée est de 90 minutes.

Ce processus doit être entrepris soigneusement toutes les 5 à 10 heures, et se fait en circuit fermé d'où le nom CIP. Les impuretés à enlever sont des constituants tels que la protéine, la matière grasse, le lactose aussi bien que les sels inorganiques en provenance du lait et de l'eau. De ce fait, et par cette composition, le dépôt ne peut pas être éliminé par de l'eau uniquement, les protéines sont principalement enlevées par des solutions de nettoyage alcalines et les minéraux par les solutions acides. Les étapes de nettoyage se résument comme suit [15] :

1. Un pré-rinçage avec l'eau de ville pendant 10 min sans recyclage.

But: Eliminer les grosses particules.

2. Phase soude 1 (NaOH à 2 %) :La température est de 80°C pour la poudre de lait et 72°C pour le lait de vache pendant 20 minutes sans recyclage.

But: Réaction de saponification permettant de l'élimination de toutes les particules de la matière grasse.

3. Un rinçage avec l'eau de ville pendant 10 min sans recyclage.

But : Eliminer le NaOH.

4. Phase soude 2 : C'est le même procédé que la phase soude1.

5. Un rinçage avec l'eau de ville pendant 10 min.

But : Eliminer le NaOH.

6. Passage de l'acide nitrique (HNO_3 à 1%) : 70°C pendant 20 min sans recyclage.

But : précipiter les sels minéraux contenus dans l'eau de rinçage tel que le calcaire.

7.Rinçage avec l'eau de ville pend 10 minute .

V.1.EVOLUTION DE LA RESITANCE THERMIQUE D'ENCRASSEMENT

V.1.1. Lors de cycle de production

V.1.1.1. Echangeur de récupération

La variation de la résistance thermique d'encrassement R_d en fonction de la perte de charge ΔP est représentée sur la Figure V.1 pour les compartiments de récupération de chaleur, compartiment (I) de préchauffage et compartiment (III) de refroidissement, où (ΔP=Ps-Psl). La courbe de la figure V.1 montre une augmentation de la résistance thermique d'encrassement en fonction de la perte de charge. La perte de charge observée est due à la formation de dépôt de nature isolante (K=0,5 W/m.K) [21] ce qui engendre une augmentation de la résistance thermique d'encrassement qui aboutit à une valeur maximale de l'ordre de 1.17 10^{-3} m^2.K/W.

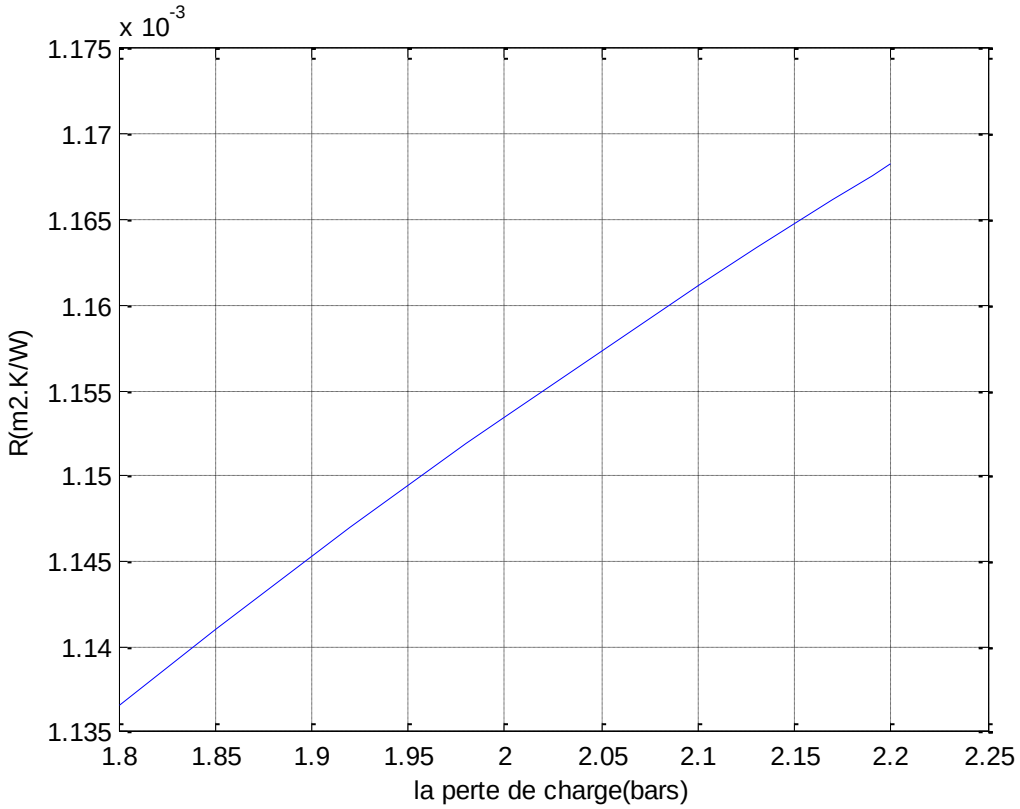


Figure V.1 : Evolution de la résistance d'encrassement en fonction du la perte de charge (Compartiment I-III)

L'allure de la figure V.2 représente l'évolution de la résistance thermique d'encrassement R_d en fonction du temps t. Elle montre que le dépôt est formé avec une faible proportion sur la

surface de compartiment I et III où la valeur de la résistance thermique d'encrassement R_d varie entre 1.13 m^2.K/W et 1.16 m^2.K/W dans un intervalle de temps de 0 jusqu'à 31 S et après la 31éme seconde la courbe reste sensiblement stable car dans cette partie de l'installation la température reste au-dessous de la température d'activation de l'agrégation des protéines. En effet, le lait aborde l'échangeur de préchauffage à une température de 4 °C et il en sort à 70 °C alors que l'activation du processus de dénaturation des protéines commence vers une température de 70 °C [22].

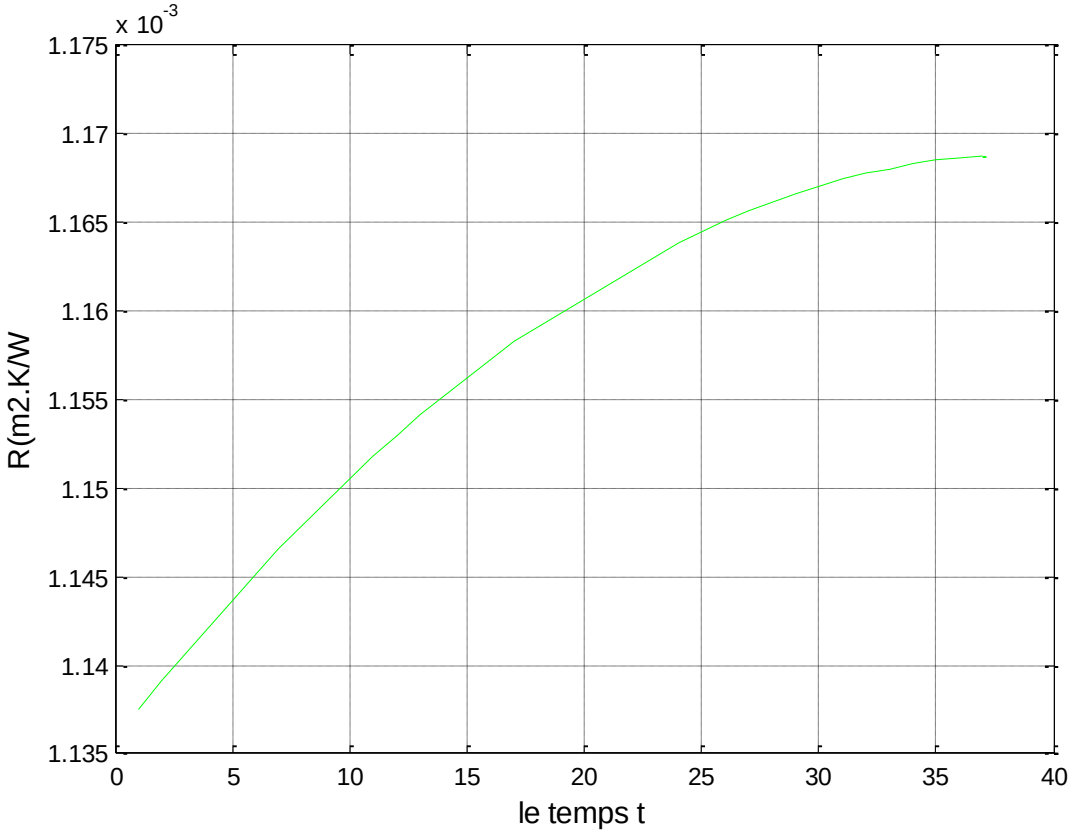


Figure V.2 : Evolution de la résistance d'encrassement en fonction du temps (s)

(Compartiment I-III)

V.1.1.2. Echangeur pasteurisation

La variation de la résistance thermique d'encrassement R_d en fonction de la perte de charge ΔP est représentée sur la Figure V.3 pour la compartiment II, compartiment de chauffage, où (ΔP=Pe-Ps).

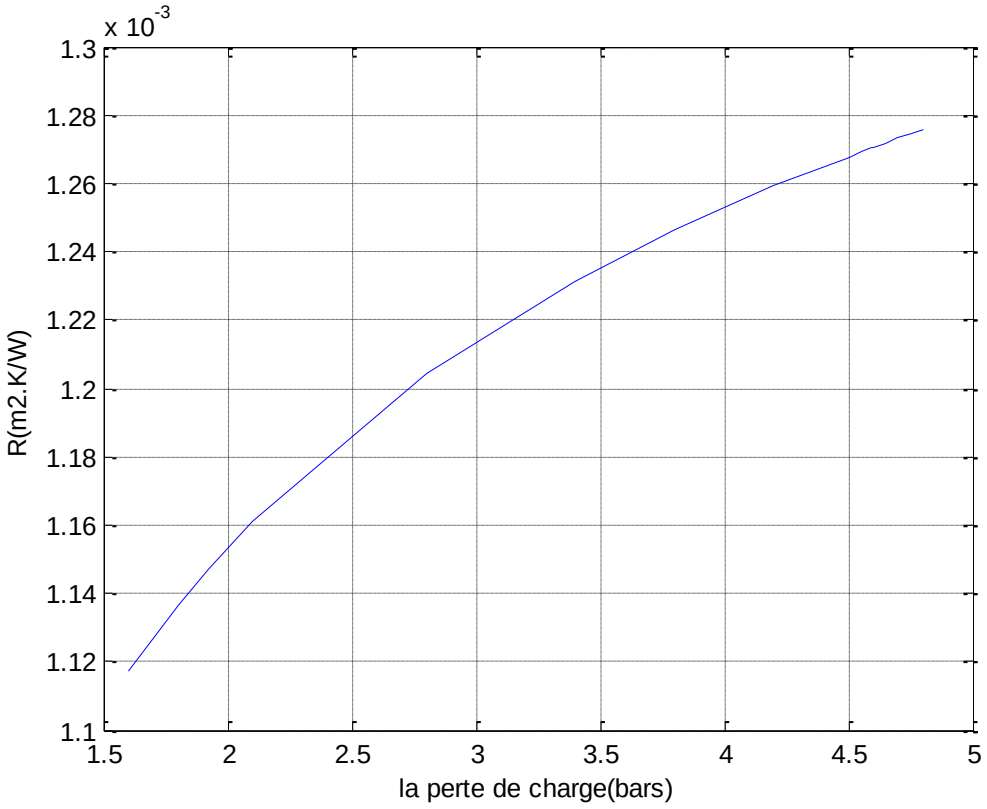


Figure V.3 : Evolution de la résistance d'encrassement en fonction du la perte de charge

(Compartiment II)

La courbe de la figure V.3 est une fonction exponentielle qui montre une augmentation plus sensible de la résistance thermique d'encrassement R_d en fonction de la perte de charge ΔP (5.3 bars) pour une valeur de la résistance thermique d'encrassement R_d de l'ordre de 1.2877 10^{-3} m^2.K/W. L'allure de la figure V.4 représente la variation de la résistance thermique d'encrassement R_d en fonction de temps t pour le compartiment II. Elle montre que l'évolution de la résistance thermique d'encrassement R_d est plus important que dans les deux compartiments précédents, où la valeur de la résistance thermique d'encrassement R_d varie entre 1 .11 m^2.K/W jusqu'à 1.13 m^2.K/W dans intervalle de temps entre de 0 à 33 S et après la 33éme seconde la courbe deviens sensiblement stable. Cela est probablement dû à une température plus importante suite à un échange thermique plus important de part et d'autres des plaques de l'échangeur, dans cette partie du processus et qui donne lieu à l'activation de la dénaturation et l'agrégation des protéines. Le lait entre dans l'échangeur principal (II) à une température de 70 °C pour atteindre à la sortie la température recherchée de 90 °C.

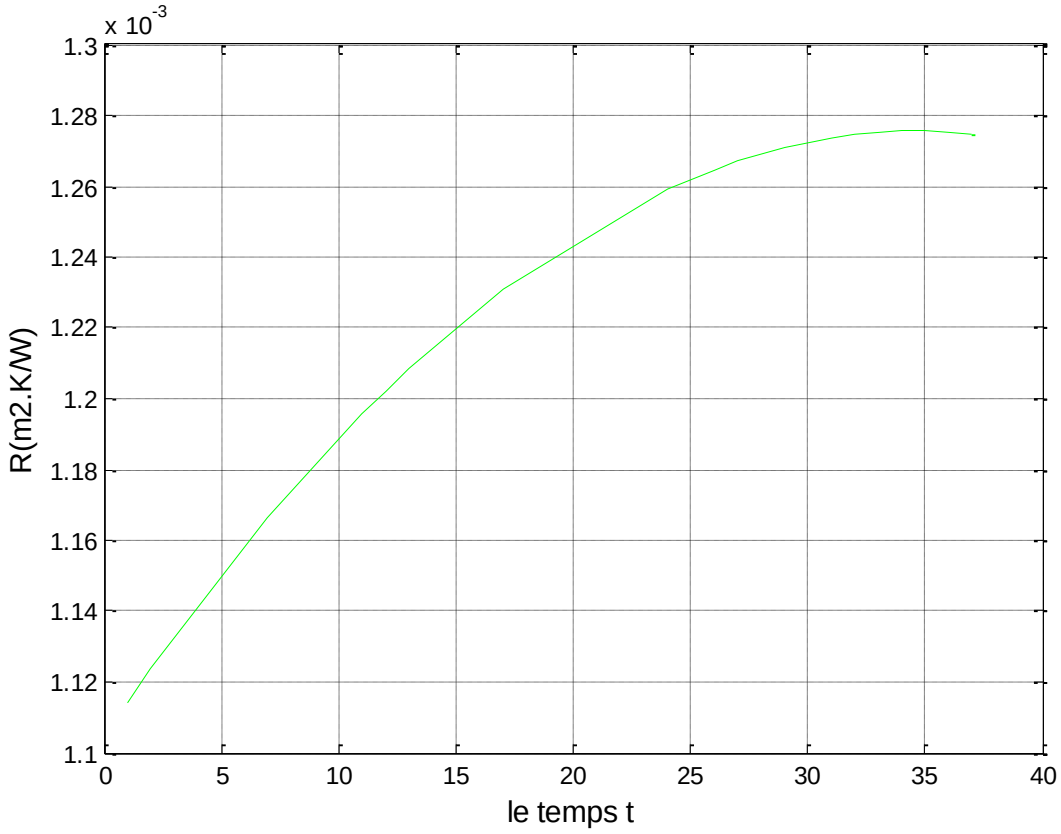


Figure V.4 : Evolution de la résistance d'encrassement en fonction du temps (s)

(Compartiment II)

V.1.1.3. Echangeur global

L'évolution de la résistance thermique d'encrassement R_d en fonction de la perte de charge ΔP et en fonction du temps t sont représentées sur les Figures V.5 et V.6 pour tout le pasteurisateur composé de trois échangeurs successivement, la même allure est observée globalement pour tout l'échangeur (compartiment de préchauffage compartiment de refroidissement et de pasteurisation). Les allures montrent une augmentation de la résistance thermique d'encrassement R_d en fonction de ΔP et en fonction de temps t jusqu'à une valeur maximale de 1.32 10^{-3} m^2.K/W pour une perte de charge ΔP de 7.43 bars et pour un temps de 36 S.

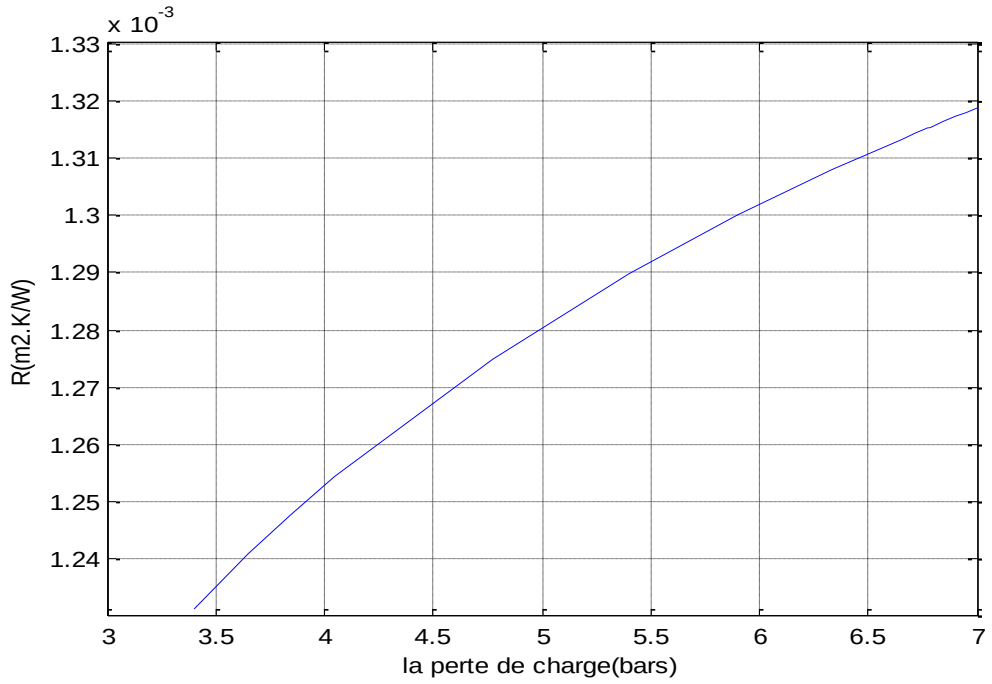


Figure V.5 : Evolution de la résistance d encrassement en fonction du la perte de charge

(Compartiment I-II-III)

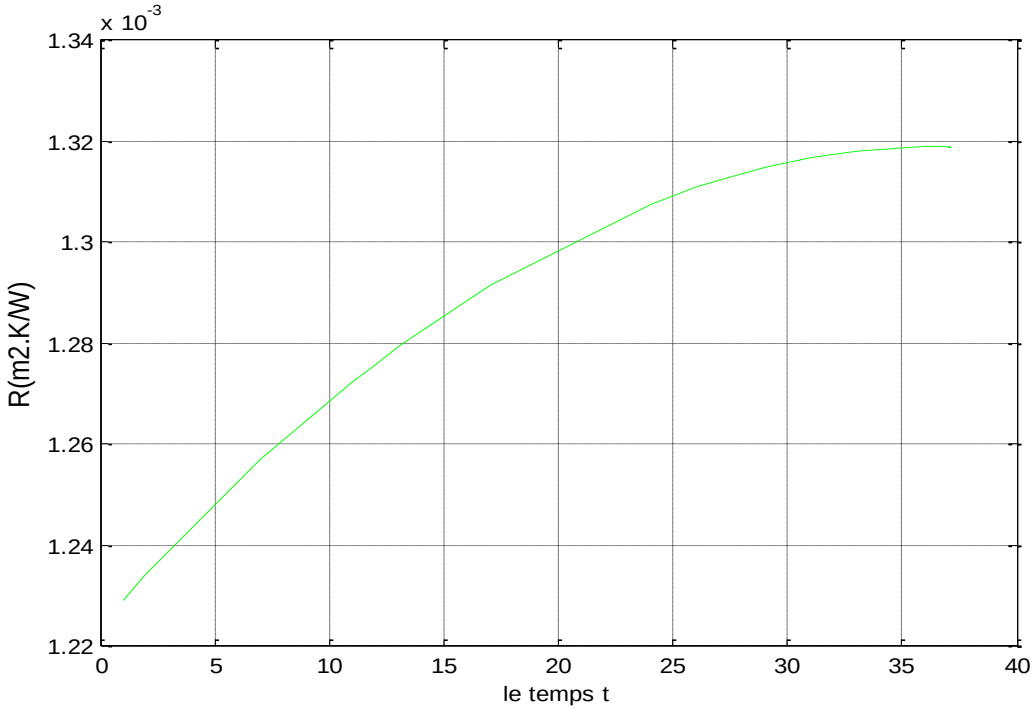


Figure V.6: Evolution de la résistance d encrassement en du temps (s)

(Compartiment I- II -III)

Cette augmentation reflète la formation du dépôt sur les plaques au cours du temps. Ce qui engendre une augmentation de la résistance thermique d'encrassement R_d. La perte de charge ΔP et Les prises de pression sont relevées à l'entrée et à la sortie de l'échangeur (ΔP=Pe-Psl).

V.1.1.4. Conclusion

D'après ces résultats, les courbes suivent une allure typique dans laquelle après une période initiale de formation du dépôt, la résistance d'encrassement tend à atteindre une valeur presque constante ce qui correspond au modèle de Kern et de Seaton [21].

Un modèle exponentiel a été établi. Il apparait sur les figures précédentes, que les points expérimentaux suivent une allure exponentielle s'accordant avec le modèle de Kern et de Seaton à savoir qu'une régression a été utilisée sur les valeurs expérimentales. L'équation du modèle est synthétisée dans le tableau suivant.

Graphe du	Equation	R_d^* (m^2°C/kW) 10^{-3}	β (s^{-1}) 10^{-2}
Figure V.2	R_d=1.17[1-exp(0.126t)]	1.17	0.126
Figure V.4	R_d =1.287[1-exp(-0,133t)]	1.28	0.133
Figure V.6	R_d 1.30[1-exp(-0,130t)]	1.30	0.130

Tableau V.1 représente les valeurs de R_d^* et de β lors de cycle de production

L'identification des paramètres du modèle de Kern et de Seaton donné par la relation $R_d = R_d^* [1-\exp(-\beta t)]$ est comme suit :

Avec :

R_d^* (m^2°C/kW) : valeur asymptotique de la résistance d'encrassement lorsque $t \to \infty$

β (s^{-1}): paramètre représentant l'inverse du temps de relaxation. Il dépend des propriétés du système.

Il est claire que tout l'échangeur est encrassé suite à la formation du dépôt sur les parois des plaques ce qui forme une couche résistante à l'échange thermique entre les deux fluides circulant dans l'échangeur.

V.1.2. Lors de cycle de lavage

V.1.2.1. Evolution la perte de charge en fonction du temps

L'évolution de la perte de charge ΔP (bars) en fonction du temps t est représentée sur la figure V.7 pour tout le pasteurisateur composé de trois échangeurs où Les prises de pression sont relevées à l'entrée et à la sortie de l'échangeur (ΔP=Pe-Psl).

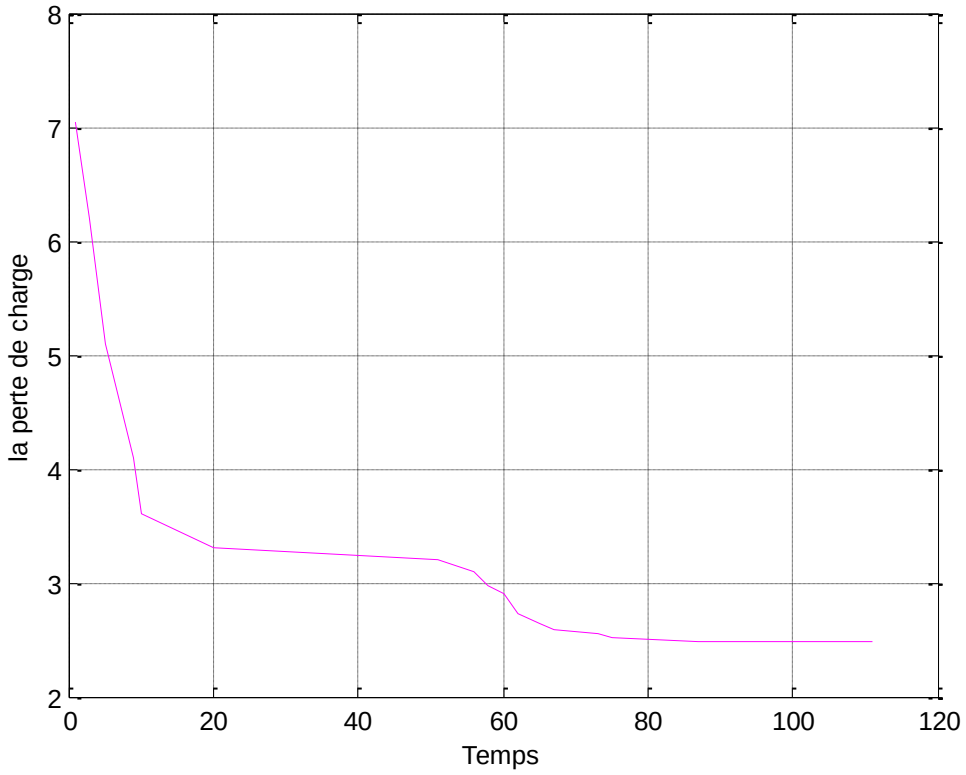


Figure V.7. : Evolution de de la perte de charge en fonction du temps (s)

(Échangeur global).

La perte de charge ΔP est considérée comme étant la différence de pression entre l'entrée et la sortie de tout l'échangeur. Lors des mesures expérimentales, la perte de charge chute durant la phase de nettoyage suite à l'élimination du dépôt et la reconstitution de la surface initiale.

V.1.2.2. Echangeur de récupération

L'évolution de la résistance thermique d'encrassement R_d en fonction de la perte de charge ΔP est représentée sur la Figure V.8 pour les compartiments préchauffage et refroidissement, compartiment I et III , où (ΔP=Ps-Psl).

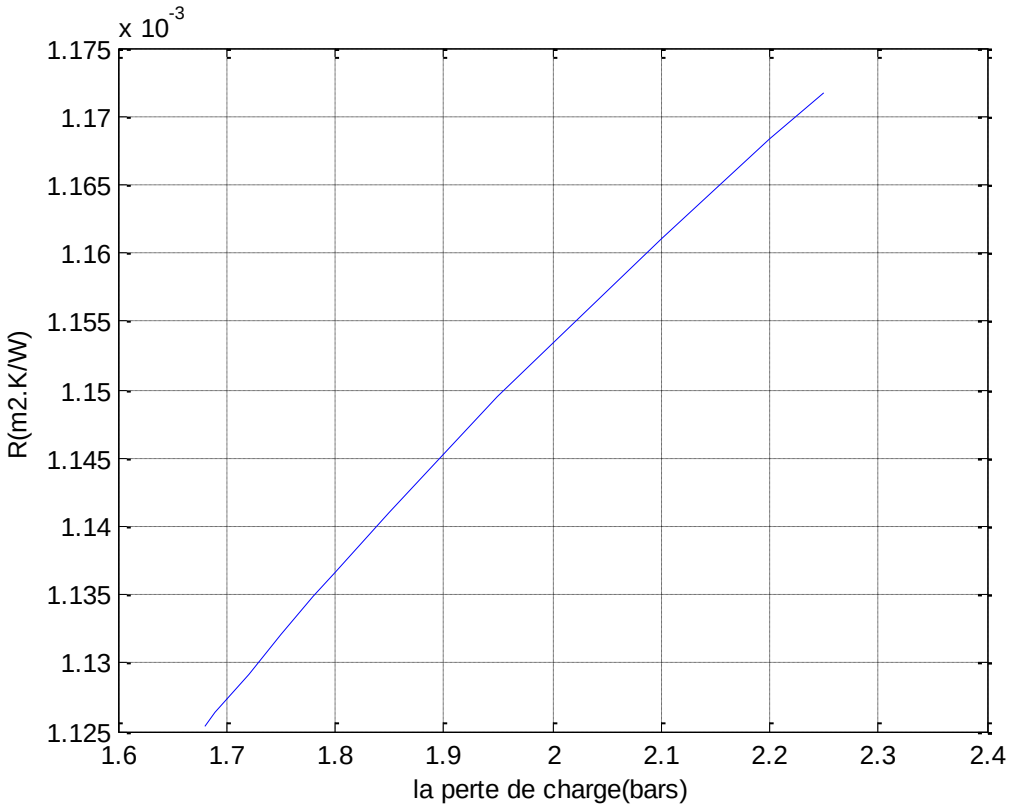


Figure V.8 : Evolution de la résistance d'encrassement en fonction du la perte de charge (Lavage –compartiment I -III)

Sur La figure V.9 est représentée l'évolution de la résistance thermique d'encrassement en fonction temps t pour les compartiments préchauffage et refroidissement, compartiment I et III.

L'allure de la figure V.8 montre une diminution de la résistance thermique d'encrassement en fonction de la perte de charge, R_d diminue quand ΔP diminue jusqu'à ce que R_d atteinte la valeur minimale 1.11 10^{-3} m^2.K/W, ceci traduit par l'enlèvement de la crasse fait reconstituer la surface initiale de l'échangeur propre.

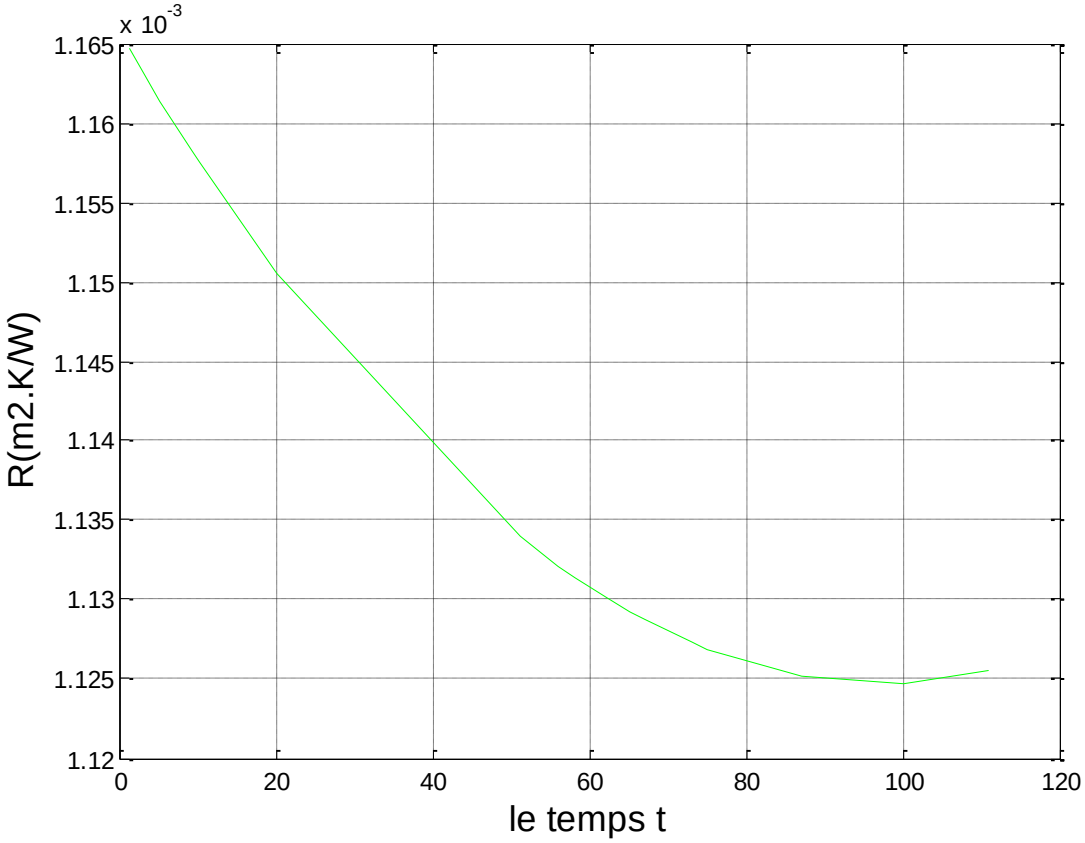


Figure V.9 : Evolution de la résistance d encrassement en fonction du temps (s)

(Lavage –compartiment I -III)

L'allure de la figure V.9 montre une diminution de R_d en fonction de temps t. Elle R_d varie entre 1.17 10^{-3} m^2.K/W et 1.11 10^{-3} m^2.K/W dans un intervalle de temps entre 0 et 66 S et de reste constante jusqu'à 110 S. La couche de dépôt n'est pas importante dans cette partie d'installation parce que la surface initiale est rapidement reconstitue.

V.1.2.3. Echangeur de pasteurisation

L'évolution de la résistance thermique d'encrassement R_d en fonction de la perte de charge ΔP, est représentée sur la Figure V.10 pour le compartiment pasteurisation. où (ΔP=Pe-Ps).

L'allure de la figure V.10 montre que la perte de pression diminue plus sensiblement durant la phase de nettoyage des plaques de l'échangeur principal. L'entrainement et l'enlèvement de la crasse fait donc reconstituer la surface initiale de l'échangeur propre et fait ainsi diminuer la perte de charge. Elle entraine ainsi la diminution de la perte de charge. L'allure de la figure V.11 montre que R_d varie entre 1.28 10^{-3} m^2.K/W et 0.93 10^{-3} m^2.K/W en un

temps de 86 secondes ce qui présage que la couche de dépôt est importante dans la compartiment II et la reconstitution de la surface propre demande un temps plus long que dans les deux autres compartiments.

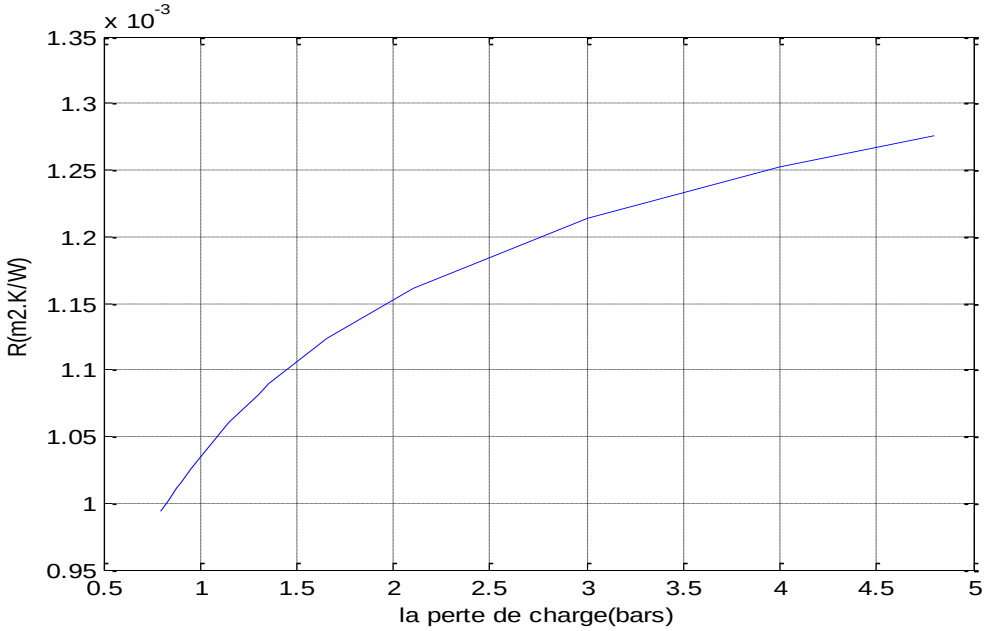


Figure V.10 : Evolution de la résistance d encrassement en fonction du la perte de charge (Lavage- compartiment II)

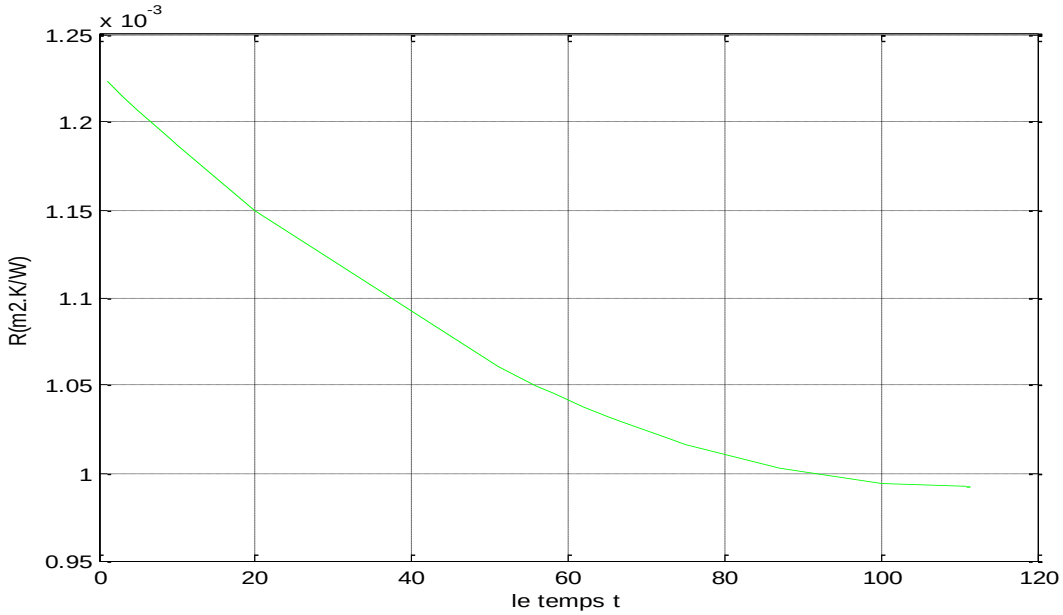


Figure V.11 : Evolution de la résistance d encrassement en fonction du temps (s)

(Lavage- compartiment II)

V.1.2.4. Echangeur global:

L'évolution de la résistance thermique d'encrassement en fonction de la perte de charge et en fonction de temps est représentée sur la Figure V.12 et V.13 successivement pour tout l'échangeur lors de la phase de nettoyage.

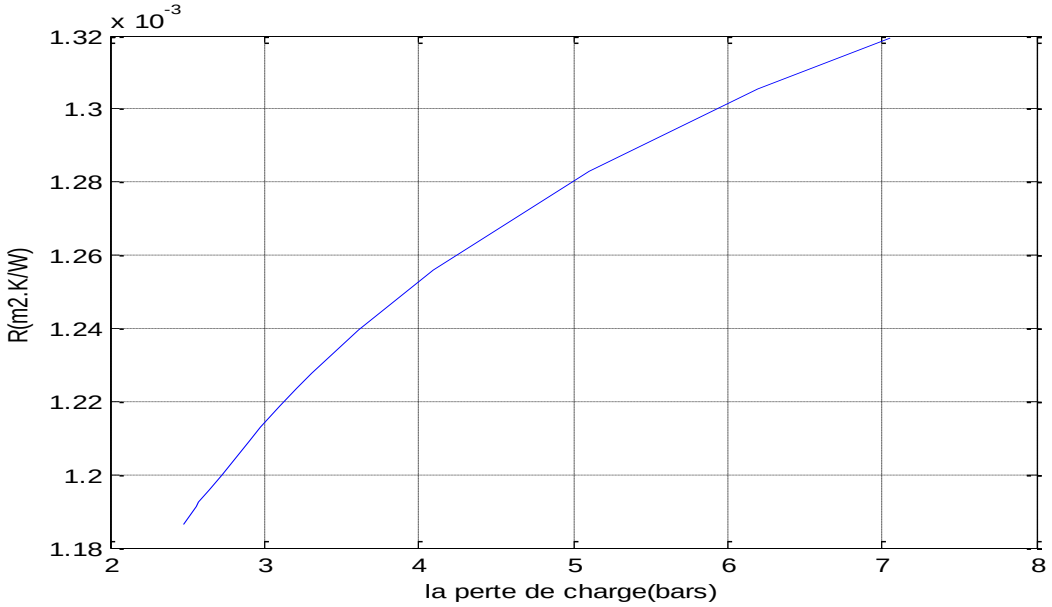


Figure V.12 : Evolution de la résistance d encrassement en fonction du la perte de charge (lavage-global)

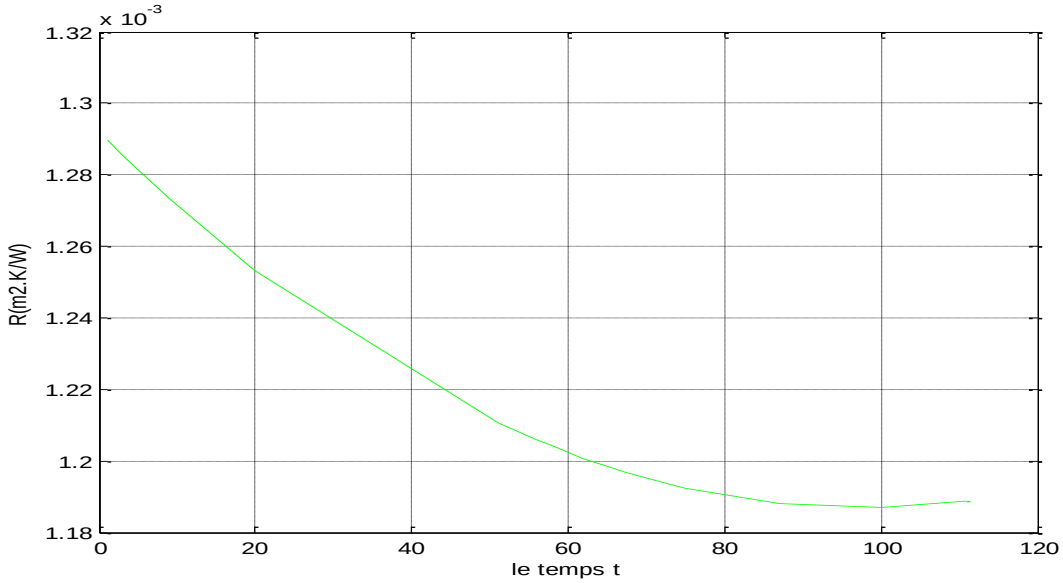


Figure V.13 : Evolution de la résistance d encrassement en fonction du temps (s) (lavage-global)

La perte de pression ΔP diminue globalement en fonction de R_d et cette dernière diminue en fonction de temps t durant la phase de nettoyage des plaques de tout l'échangeur. L'entrainement et l'enlèvement du dépôt de nature isolante fait reconstituer la surface initiale de l'échangeur propre et fait ainsi diminuer la perte de charge. Elle entraine ainsi la diminution de la perte de charge sur tout l'échangeur.

V.2. EVOLUTION DE COEFFICIENT D'ECHANGE GLOBAL

V.2.1. Cycle de production

L'évolution du coefficient d'échange global U lors d'un cycle de production est représentée en fonction de la perte de charge ΔP sur la Figure V.14.

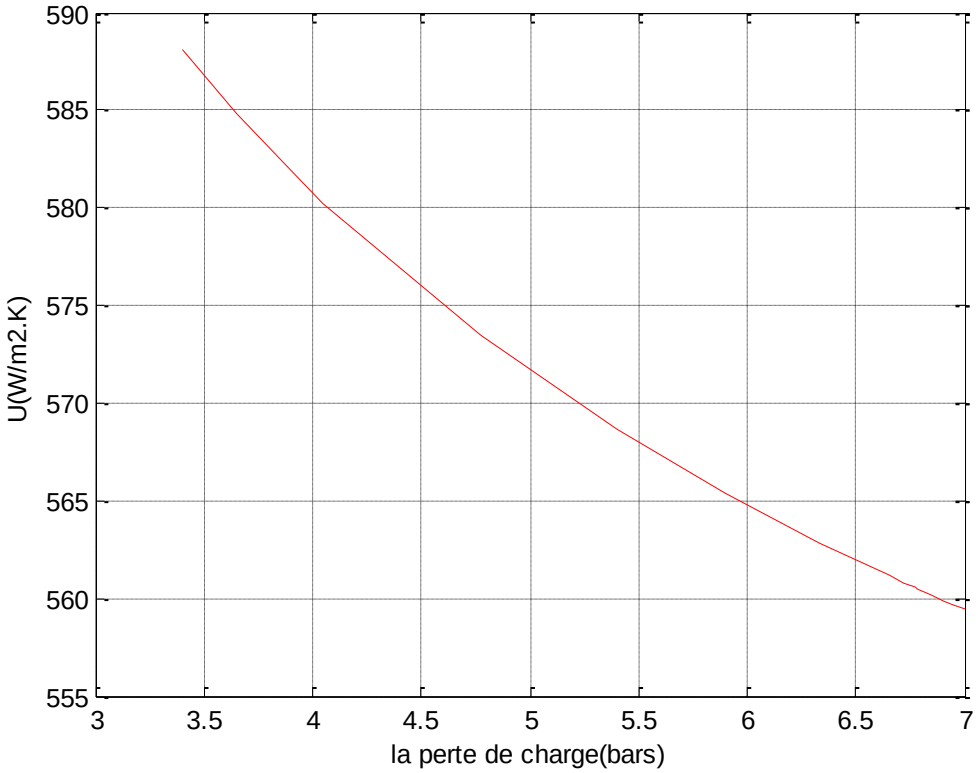


Figure V.14 : Evolution de coefficient d'échange global en fonction du la perte de charge

L'allure montre une diminution du coefficient d'échange globale suite à la formation du dépôt encrassant de nature isolante. Cette nature isolante fait chuter la qualité de l'échange entre les deux fluides de part et d'autres des plaques de l'échangeur jusqu'à une valeur de l'ordre de 557 ($W/m^2.K$).

V.2.2. Cycle de lavage

L'évolution du coefficient d'échange global lors d'un cycle de nettoyage est représentée en fonction de la perte de charge sur la Figure V.15.

L'allure montre une augmentation du coefficient d'échange global quand la perte de charge diminue qui fait suite au nettoyage de l'échangeur. La perte de charge lors du cycle de nettoyage diminue en fonction du temps. Cette diminution montre que le nettoyage permet de retrouver la surface propre.

La reconstitution de la surface initiale propre de l'échangeur qui reprend ainsi ses qualités thermiques.

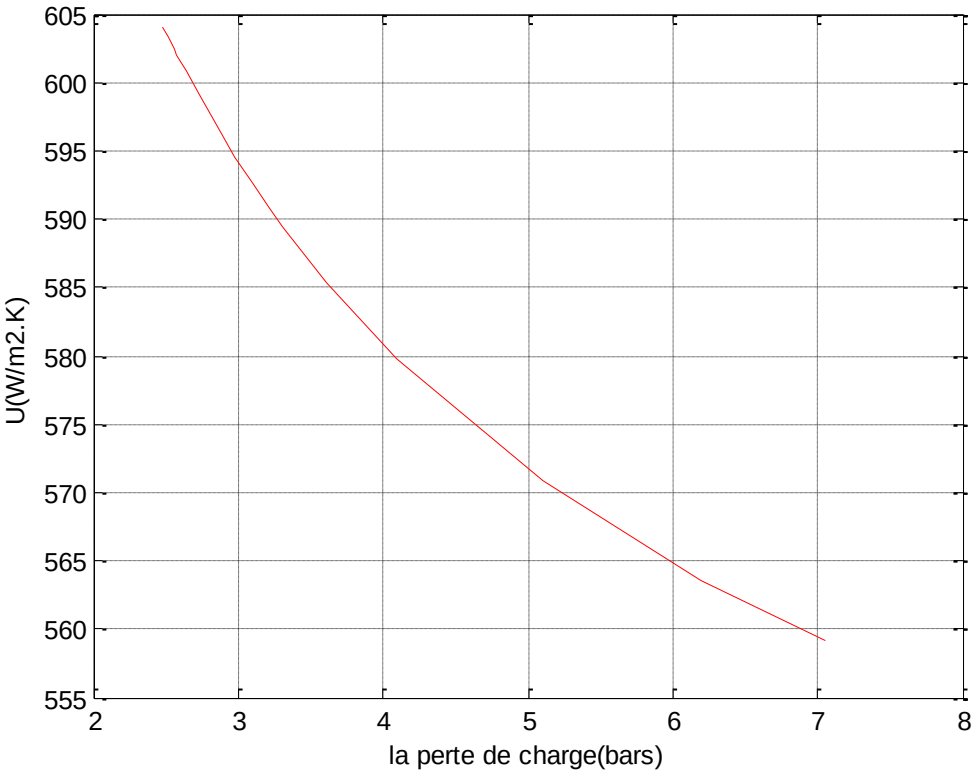


Figure V.15: Evolution de coefficient d'échange global en fonction du la perte de charge

V.3. CONCLUSION

En conclusion, ces résultats confirment la prédominance de la présence du dépôt dans le compartiment pasteurisation. Le dépôt, formé dans la zone de pasteurisation, est éliminé lors de la phase de nettoyage.

D'après les résultats trouvés, lors de la phase de production les courbes suivent une allure typique dans laquelle après une période initiale de destruction du dépôt, la résistance d'encrassement R_d tend à atteindre une valeur minimale presque constante ce qui correspond à une identification au modèle de Kern et de Seaton [21].

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons considéré l'identification expérimentale de la résistance thermique d'encrassement par la modélisation du phénomène de l'encrassement des échangeurs de chaleur à plaques lors de la pasteurisation de lait selon le modèle de Kern et Seaton (1959).

Les relevés de la perte de charge donnent des résultats qui montrent la présence d'un dépôt. Ce dépôt se forme au niveau de l'échangeur principal du pasteurisateur composé de trois échangeurs de chaleur à plaques.

Cette formation de dépôt est due à l'augmentation de la température car cette dernière provoque la modification certaines propriétés de lait et le rendant instable suite à une dénaturation des protéines qui deviennent polymérisées d'une manière irréversible et donnent des particules totalement insolubles par une réaction cinétique connue. L'encrassement généré engendre des perturbations hydrauliques et thermiques qui affectent la production du lait pasteurisé.

L'encrassement lors de cycle de production donne une augmentation de perte de charge suivi par une augmentation de la résistance d'encrassement thermique. Cette augmentation prend un comportement asymptotique, qui se traduit en fonction de temps à l'allure exponentielle conforme au modèle de Kern et Seaton. Lors de cycle de lavage la résistance d'encrassement diminue d'une manière exponentielle dont le comportement de diminution de la résistance thermique de l'encrassement et aussi asymptotique , Ce type de comportement est caractéristique par des dépôts fragiles, mou, s'écaillant facilement sous l'influence des forces de cisaillement provoquées par le passage du fluide , donc d'après le modèle de Kern et Seaton l'élimination de dépôt devient plus facile que possible.

Des cycles de nettoyage sont nécessaires à cause de l'encrassement. Il y a donc une grande perte de production ce qui conduit à des pertes économiques assez importantes.

Pour diminuer l'encrassement et réduire le cout on peut proposer quelques recommandations :

1. diminuer la température de pasteurisation, sans altérer la qualité microbiologique du lait et la santé des consommateurs.
2. diminuer la dureté d'eau utilisée pour la préparation à partir des poudres de lait.

3. l’ajout d’un émulsifiant comme « polysaccaride » permet de réaliser des émulsions stable car ce dernier à une utilisation très facile, formation d'émulsions très stables possible au fouet manuel, très bonne stabilité des émulsions dans une large gamme de pH .

Une étude économique de rentabilité est nécessaire dans ce cas.

Et comme suite de ce travail, nous proposons la réalisation d’un programme pour le calcul de la résistance d’encrassement lors de la stérilisation du lait et prévoir un système de contrôle automatique pour signaler le déclenchement de l’encrassement et éventuellement déclencher automatiquement le nettoyage.

[1] Y. Mahdi, L. Oufer, Contribution à la formulation du problème d'encrassement des échangeurs de chaleur lors du traitement thermique du lait, 2ème Journées nationale de Mécanique, 15 – 17 mars Ouargla 2005.

[2] 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 23-25 mai 2005, Saint-Malo France.

[3] http://soutien67.free.fr/sommaire.htm

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

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

[6] VIDIL R., GRILLOT J.M., RATEL G., MERCIER P., MARVILLET C.

Les échangeurs à plaques: description et éléments de dimensionnement. Édition GRETH, Septembre (1990).

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

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

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

[10] Hamza Chérif SADOUK , Modélisation de l'encrassement en régime turbulent dans un échangeur de chaleur à plaques avec un revêtement fibreux sur les parois , 15 Juin 2009 Université de Paris-Est .

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

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

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

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

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

[16] Manuel technique de l'installation" STERITHERM Le système UHT le plus économique sur le marché".

[17] Y.Mahdi.Simulation et modélisation du phénomène d'encrassement par le lait dans les échangeurs de chaleur. Thèse doctorale. USTHB 2009.

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

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

[20] ALONG, C., "Essential Heat Transfer" British Library (1999).

[21] Mahdi, Y., Mouheb, A., Oufer, L., ''A dynamic model for milk fouling in a plate heat exchanger'', Appl. Mathe. Mode., 33 Issue 2, 648–662 (2009).

ANNEXE 1:

CARACTERISTIQUES DE L'EAU

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

ANNEXE

ANNEXE2

Partie production

temps	ΔP=Ps-Psl	Coefficient d'échange global U ($W/m^2.K$)	Résistance d'encrassement R_f ($m^2.K/W$)
9.50	1.8	622.8750	0.00113
9.52	1.85	621.1637	0.00114
9.57	1.92	618.8772	0.00114
10.01	1.95	617.9339	0.00114
10.02	1.98	617.0114	0.00115
10.03	2	616.4076	0.00115
10.07	2.1	613.5146	0.00116
10.14	2.13	612.6855	0.00116
10.16	2.15	612.1420	0.00116
10.17	2.17	611.6059	0.00116
10.19	2.18	611.3405	0.00116
10.21	2.19	611.0769	0.00116
10.22	2.2	610.8150	0.00116
10.23	2.2	610.8150	0.00116
10.24	2.2	610.8150	0.00116
10.25	2.2	610.8150	0.00116
10.26	2.2	610.8150	0.00116
10.27	2.2	610.8150	0.00116

ANNEXE 3

temps	**ΔP=Ps-Psl**	**Coefficient d'échange global U ($W/m^2.K$)**	**Résistance d'encrassement R_f ($m^2.K/W$)**
09 :50	1.6	630.4731	0.00111
09 :52	1.8	622.8750	0.00113
09 :57	1.92	618.8772	0.00114
10 :01	2.1	613.5146	0.00116
10 :02	2.8	597.7009	0.00120
10 :03	3.4	588.1522	0.00123
10 :07	3.8	583.0595	0.00124
10 :14	4.2	578.6994	0.00125
10 :16	4.5	575.8118	0.00126
10 :17	4.55	575.3580	0.00126
10 :19	4.59	575.0003	0.00127
10 :21	4.6	574.9116	0.00127
10 :22	4.65	574.4723	0.00127
10 :23	4.7	574.0398	0.00127
10 :24	4.75	573.6142	0.00127
10 :25	4.8	573.1950	0.00127
10 :26	4.8	573.1950	0.00127
10 :27	4.8	573.1950	0.00127

ANNEXE 4

temps	**ΔP=Ps-Psl**	**Coefficient d'échange global U ($W/m^2.K$)**	**Résistance d'encrassement R_f ($m^2.K/W$)**
09 :50	3.40	588.1522	0.00123
09 :52	3.65	584.8729	0.00124
09 :57	3.84	582.5936	0.00124
10 :01	4.05	580.2599	0.00125
10 :02	4.77	573.4457	0.00127
10 :03	5.40	568.6226	0.00128
10 :07	5.90	565.3511	0.00129
10 :14	6.33	562.8500	0.00130
10 :16	6.65	561.1466	0.00131
10 :17	6.72	560.7902	0.00131
10 :19	6.77	560.5389	0.00131
10 :21	6.78	560.4890	0.00131
10 :22	6.85	560.1426	0.00131
10 :23	6.90	559.8984	0.00131
10 :24	6.95	559.6567	0.00131
10 :25	7.00	559.4177	0.00131
10 :26	7.00	559.4177	0.00131
10 :27	7.00	559.4177	0.00131

Partie lavage **ANNEXE 5**

temps	ΔP= Ps-Psl	Coefficient d'échange global U ($W/m^2.K$)	Résistance d'encrassement R_f ($m^2.K/W$)
10 :17	2.25	609.5311	0.00117
10:19	2.2	610.8150	0.00116
10:21	2.1	613.5146	0.00116
10:25	2	616.4076	0.00115
10:26	1.95	617.9339	0.00114
10 :36	1.9	619.5181	0.00114
11:07	1.85	621.1637	0.00114
11:12	1.8	622.8750	0.00113
11:14	1.78	623.5788	0.00113
11:16	1.75	624.6563	0.00113
11:18	1.72	625.7609	0.00112
11:21	1.69	626.8935	0.00112
11:23	1.68	627.2776	0.00112
11:29	1.68	627.2776	0.00112
11:31	1.68	627.2776	0.00112
11:43	1.68	627.2776	0.00112
11:56	1.68	627.2776	0.00112
12:07	1.68	627.2776	0.00112

ANNEXE6

temps	**ΔP= Ps-Psl**	**Coefficient d'échange global U ($W/m^2.K$)**	**Résistance d'encrassement R_f ($m^2.K/W$)**
10 :17	4.8	573.1950	0.00127
10:19	4	580.7991	0.00125
10:21	3	594.2087	0.00121
10:25	2.1	613.5146	0.00116
10:26	1.66	628.0556	0.00112
10 :36	1.41	639.0785	0.00109
11:07	1.36	641.6246	0.00108
11:12	1.3	644.8630	0.00108
11:14	1.2	650.7649	0.00106
11:16	1.15	653.9863	0.00106
11:18	1	664.9828	0.00103
11:21	0.95	669.1831	0.00102
11:23	0.9	673.7085	0.00101
11:29	0.88	675.6194	0.00101
11:31	0.84	679.6316	0.00100
11:43	0.8	683.9223	0.00099
11:56	0.8	683.9223	0.00099
12:07	0.8	683.9223	0.00099

ANNEXE7

temps	ΔP= Ps-Psl	Coefficient d'échange global U ($W/m^2.K$)	Résistance d'encrassement R_f ($m^2.K/W$)
10 :17	7.05	559.1812	0.00131
10:19	6.20	563.5789	0.00130
10:21	5.10	570.8093	0.00128
10:25	4.10	579.7304	0.00125
10:26	3.61	585.3750	0.00123
10 :36	3.31	589.4207	0.00122
11:07	3.21	590.8910	0.00122
11:12	3.10	592.5878	0.00121
11:14	2.98	594.5425	0.00121
11:16	2.90	595.9108	0.00120
11:18	2.72	599.2016	0.00120
11:21	2.64	600.7682	0.00119
11:23	2.58	601.9894	0.00119
11:29	2.56	602.4057	0.00119
11:31	2.52	603.2527	0.00118
11:43	2.48	604.1196	0.00118
11:56	2.48	604.1196	0.00118
12:07	2.48	604.1196	0.00118

ANNEXE 8

La méthode de calcule de constante de temps β (s^{-1})

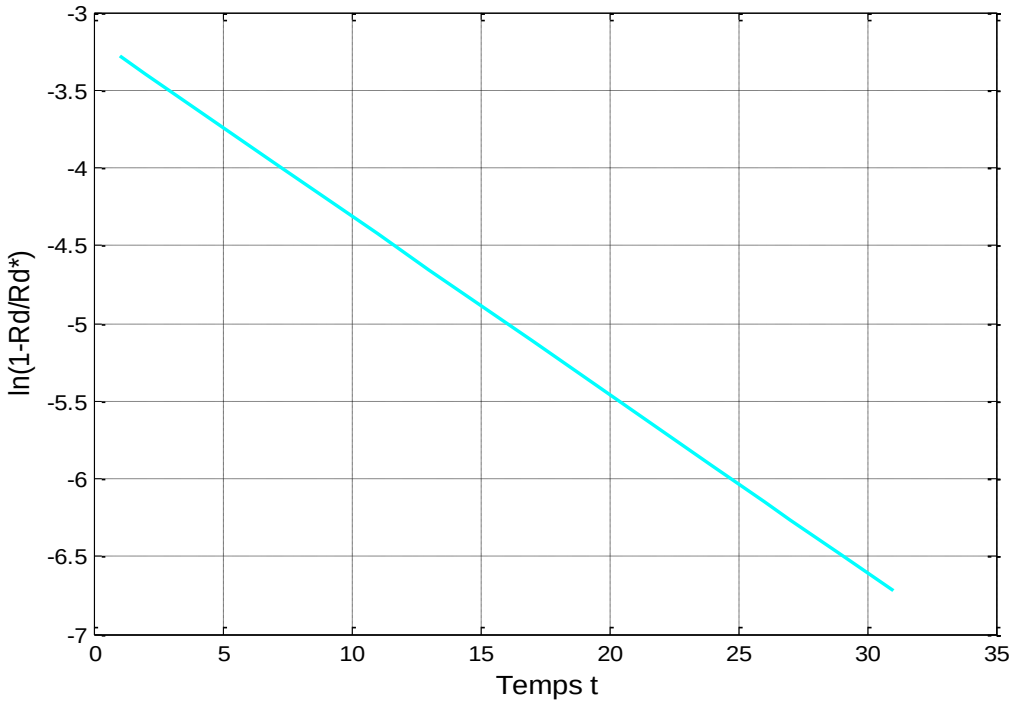
On utilise la relation : $R_d = R_d^* [1-\exp(-\beta t)]$

A partir du programme MATLAB on trace $\ln(1-(R_d/ R_d^*))$ en fonction de t on obtient une courbe linéaire de l'équation Y=-AX par la conformité avec $\ln(1-(R_d/ R_d^*))=-\beta t$

Exemples :

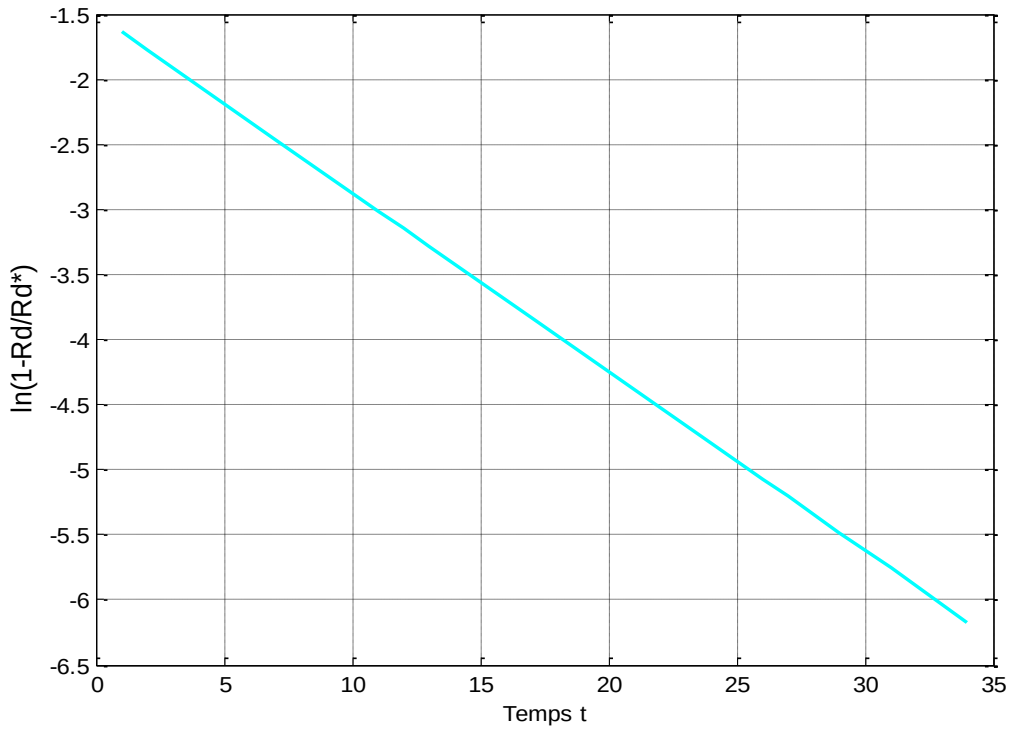
1- Lors de la partie de production :

Pour l'échangeur de récupération on obtient la courbe suivante :



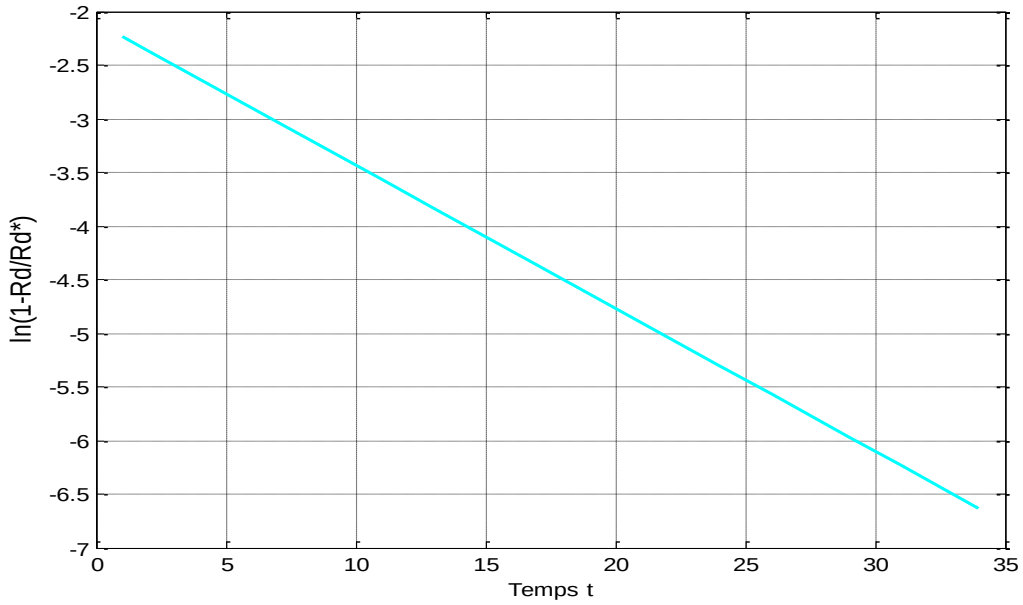
Cette courbe représentée l'évolution de $\ln(1-(R_d/ R_d^*))$ en fonction de temps dans la compartiment de récupération ou la pente est égale -0.126 donc β est égale à 0.126 .

Pour le compartiment de chauffage on a la courbe suivante :



Dans ce cas la pente est égale -0.133 donc β est égale 0.133.

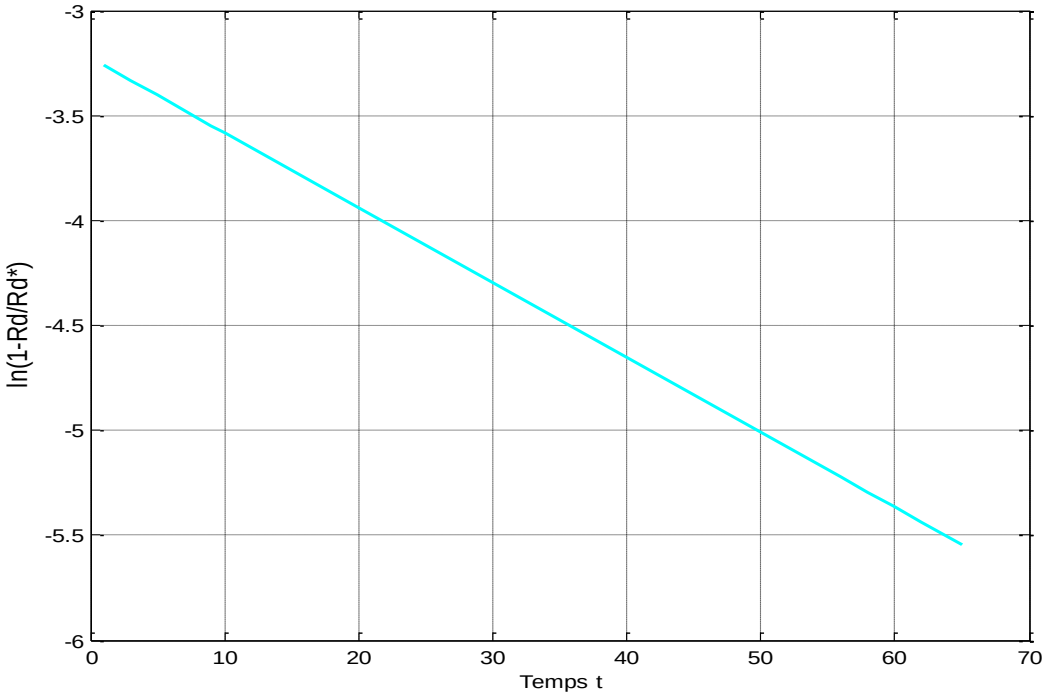
Pour l'échangeur global on obtient la courbe suivante :



Dans ce cas la pente est égale -0.13 donc β est égale 0.13.

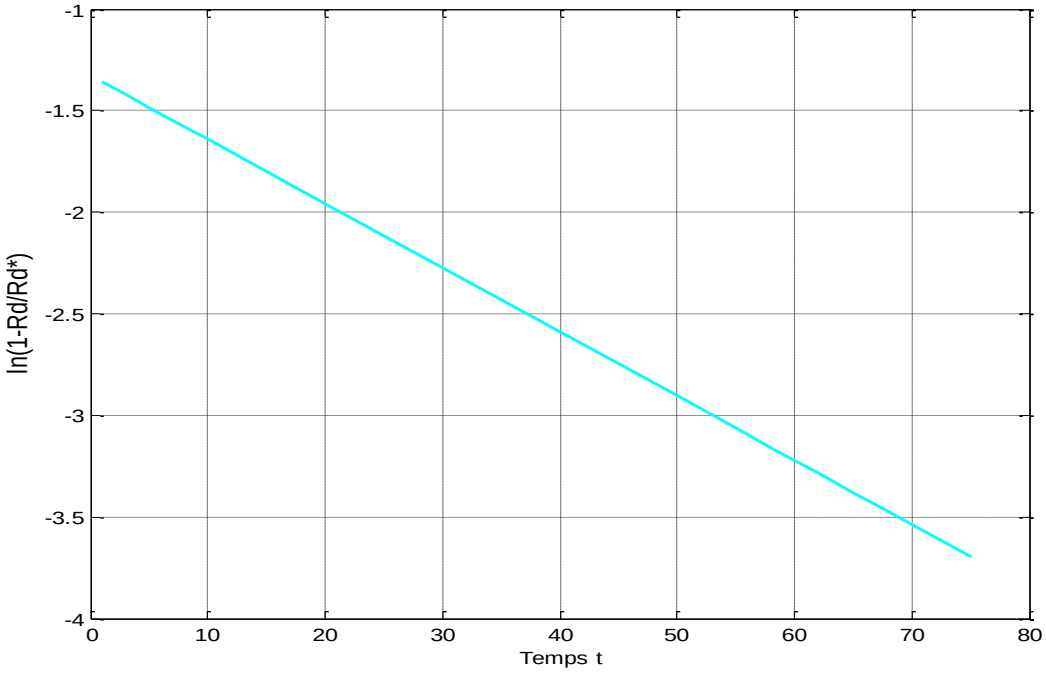
2- Lors de la partie de lavage :

Pour l'échangeur de récupération on a la courbe suivante :



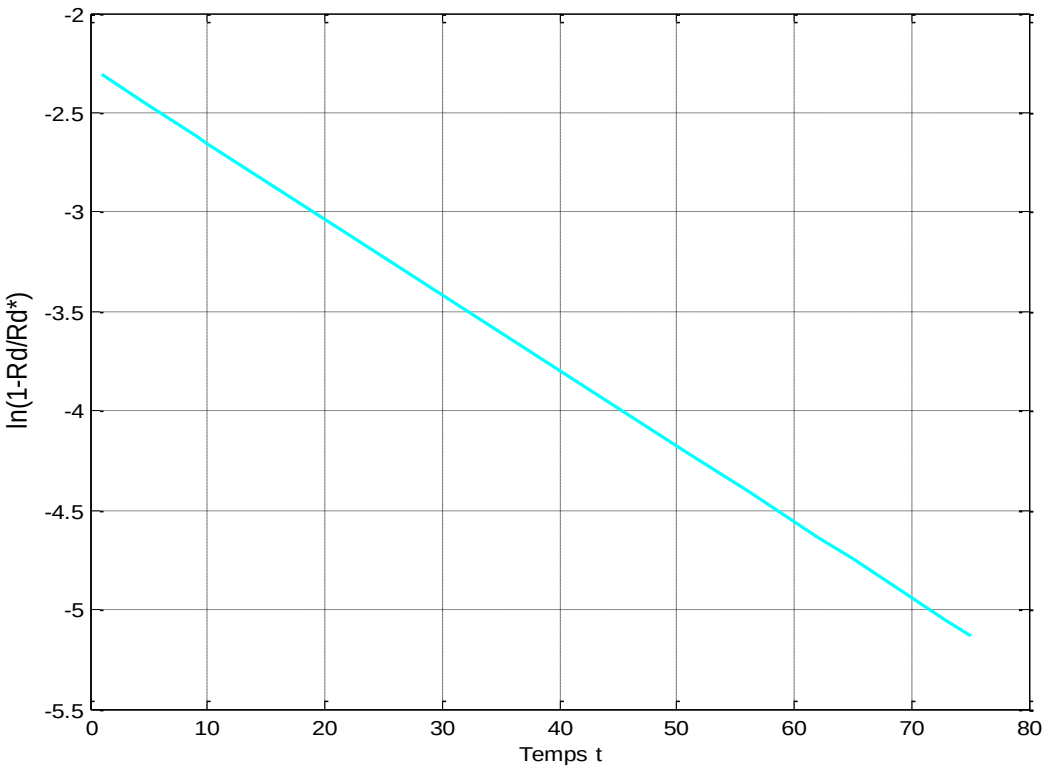
Dans ce cas la pente est égale -0.032 donc β est égale 0.032.

Pour l'échangeur de pasteurisation on obtient la courbe suivante :



Dans ce cas la pente est égale -0.034 donc β est égale 0.034.

Pour l'échangeur global on a la courbe suivante :



Dans ce cas la pente est égale -0.035 donc β est égale 0,035.

ANNEXE 9

```
clear
clc
format long
m=26050;
rof=1030;
ve=23;
mu0=0.3698e-3;
Tmoyf=77.5;
qu=1.11e-3;
e=4.5e-3;
w=47.5e-2;
mu00=0.2702e-3;
Tmoyc=103;
K1=15.1;
K2=1.23;
K3=2.16e-3;
l=120e-2;
vt=m/rof;
vp=vt-ve;
v=vp/vt;
muf=mu0*(1+2.5*v);
cp=1.68*Tmoyf+3864.2;
A=e*w;
u=qu/A;
d=2*e;
rof=1033.7-0.2308*Tmoyf-0.00246*Tmoyf^2;
re=rof*u*d/muf;
K=0.00133*Tmoyf+0.53991;
pr=cp*muf/K;
nu=0.2536*re^0.65*pr^0.4;
hf=nu*K/d;
muc=mu00*(1+2.5*v);
cp=1.68*Tmoyc+3864.2;
A=e*w;
u=qu/A;
d=2*e;
roc=1033.7-0.2308*Tmoyc-0.00246*Tmoyc^2;
re=roc*u*d/muc;
K=0.00133*Tmoyc+0.53991;
pr=cp*muc/K;
nu=0.2536*re^0.65*pr^0.4;
hc=nu*K/d;
u0=1/(1/hf+1/hc+e/K1);
I=1;
dP=[];
R=[];
```

```
U=[];
disp('------   donner les valeurs enregistrées de delta_P    ----
----------')
t=input('t=');%temps en heures
disp('------   donner les valeurs enregistrées de delta_P    ----
----------')
dp=input('deltap=');
Imax=length(dp);
for i=1:Imax
    deltap=dp(i);
    re=(deltap/(K3*rof*(qu^2)))^(1/K2);
    nu=0.2536*re^0.65*pr^0.4;
    hc=nu*K/d;
    bi=(e/K1)/(1/hf+1/hc);
    u=u0/(1+bi);
    U=[U u];
    r=1/u-1/u0;
    R=[R r];
end
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%afichage des valeur de r et u
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
disp('r='),disp(R')
disp('u='),disp(U')
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%trace de r en fonction de delta
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%subplot(121);
figure
plot(dp,R,'b')
xlabel('la perte de charge(bars)')
ylabel('R(m2.K/W)')
grid
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%trace de u en fonction de delta
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%subplot(122);
figure
plot(dp,U,'r')
xlabel('la perte de charge(bars)')
ylabel('U(W/m2.K)')
grid

figure
plot(t,dp,'m')
xlabel('Temps')
ylabel('la perte de charge')
grid
```

```
figure
plot(t,R,'g')
xlabel('Temps')
ylabel('R(m2.K/W)')
grid

p=polyfit(t,R,2);
r=p(1)*t.^2+p(2)*t+p(3);
figure
plot(t,r,'b')
title('tracé approximatif de Rd en fonction du temps')
xlabel('le temps t')
ylabel(' Rd ')
grid


rde=max(R);


for i=1:length(R)
    if R(i)==rde

        R(i)=0;
       t(i)=0;
    end
end
R=R([find(R)]);
t=t([find(t)]);

figure
plot(t,log(1-R/rde))
title('tracé de { ln(1-Rd/Rd*)=beta.t }')
xlabel(' Temps t')
ylabel('ln(1-Rd/Rd*)')
grid

% interpolation polynomiale
p=polyfit(t,log(1-R/rde),1);
y=p(1)*t+p(2);
figure
plot(t,y,'b')
grid
title('tracé approximatif de {ln(1-Rd/Rd*)=beta.t }')
xlabel(' Temps t')
ylabel('ln(1-Rd/Rd*)')

beta=(y(5)-y(3))/(t(5)-t(3))
```