République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE DE MEDEA

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**

THEME

Contribution à l'étude des phénomènes de l'encrassement et du décrassage d'un pasteurisateur industriel lors du traitement thermique du lait

Dirigé par :
Dr. YOUCEF MAHDI

Réalisé par :
M^{elle} DOUAKH FELLA

PROMOTION JUIN 2013



REMERCIEMENT

Avant tout, nous remercions Dieu tout puissant de nous avoir aidé et donné la force pour achever ce projet

Je tiens s tout d'abord à remercier ***ALLAH*** *pour m'avoir guidé vers le bon chemin de la lumière et du savoir et pour m'avoir donné du courage, de la volonté afin de pouvoir réaliser ce modeste travail.*

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon promoteur le ***DR. YOUCEF MAHDI****pour l'encadrement de ce mémoire son aide, sa patience et sa confiance qu'il m'a accordées tout au long de cette œuvre*

Encore, je remercie beaucoup Monsieur ***SAID BILEL*** *qui m'a apporté sa précieuse aide.*

Je tiens à remercier : le Président du jury le ***DR. MOHAMED TIR*** *et les examinateurs* ***DR. YAMINA ZOUAMBIA*** *et* ***M. DJAMEL ATSAMNIA*** *pour avoir accepté de juger mon travail.*

Mes sincères remerciements vont également à tous les enseignants du département de Génie des Procédés de l'université de Médéa, et à tous les enseignants depuis le début qui ont participé à ma formation ainsi que ma promotion 2013 .
Enfin je remercie tous ceux et celles qui ont contribué de prés ou de loin à la Réalisation de ce mémoire

MERCI

Dédicaces

A mes chers parents :

Tous les mots du monde ne sauraient exprimer l'immense amour que je vous porte, ni la profonde gratitude que je vous témoigne pour tous les efforts et les sacrifices que vous n'avez jamais cessé de consentir pour mon instruction et mon bien-être.

Papa *qui m'a poussé vers l'avant et vers le succès, l'ange de ma vie qui a beaucoup compté sur moi qui m'a fait confiance, tu mérite plus qu'un remerciement tu mérite un livre dont je parle de toi et c'est possible que je ne trouverai aucun mot qui peut décrire l'amour que je te porte dans mon cœur.*

Maman *ma perle précieuse, ma jolie fleur, mon âme, ma source d'affection et du courage, merci maman j'espère que je suis la fille que tu pourras toujours être fière d'elle, je t'aime maman.*

A mon mari :

Mohamed

Merci pour la joie que tu me procures et merci infiniment pour tes précieux conseils et ton aide à la réalisation de ce travail.

Puisse ALLAH Le Tout Puissant Nous accorde à jouir de notre vie, Nous comble d'avantage, Nous apporte bonheur, Nous aide à réaliser tous nos vœux présents et à venir.

A mes chers frères:

Omar, Othmane et Abderrahamene

Qu'ALLAH vous garde pour moi, je vous souhaite tout ce qui est beau comme vous, le bonheur, le succès dans vos vies et le sourire que vous devez toujours le garder, je vous aime.

A mes belles sœurs *:*

Amina et Wissam

Que le grand bonheur vous accompagne aussi et surtout de la réussite dans tout ce que vous désirez réaliser.

A mes charmants neveux *:*

khalilou, ayoub et farès

A mes oncles, mes tantes, mes cousins et cousines : *grands et petits.*

À Ma belle famille

Qu'ALLAH vous protège

A mes amies : Ma très chère copine ***Asma*** *aussi* ***Soria****,* ***Nawal,Selma****,****Leila et Siham*** *merci pour les bons moments que nous avons passé ensemble, de vos soutien et serviabilité, vous m'avez appris comment rire du fond du cœur, et tous mes amies à celles qui me sont chères que j'ai involontairement omis de citer.*

Fella

RESUME :

On étudie, par modélisation expérimentale, le phénomène d'encrassement dans les échangeurs de chaleur par le lait lors d'une phase de traitement thermique appelé pasteurisation. Le modèle mathématique proposé est basé, principalement, sur les différents échanges massiques et thermiques ayant lieu dans le procédé. Une relation entre la perte de charge et la résistance thermique d encrassement est établie.

Globalement, les résultats montrent que la résistance thermique d'encrassement est proportionnelle à la perte de pression. Elle augmente avec l'augmentation de la perte de charge lors de la phase de production, en particulier dans l'échangeur principal, et inversement lors de la phase de lavage. Le dépôt affecte les échanges thermiques entre les deux fluides. Le dépôt formé de nature isolante fait chuter le coefficient d'échange global lors de la phase de production, en particulier dans l'échangeur principal, et inversement lors de la phase de lavage.

Mots Clés : *Lait - Pasteurisation - Encrassement - Echangeur de chaleur – Résistance thermique d'encrassement- Modélisation– lavage*

ABSTRACT:

Is studied by experimental modelling the fouling phenomenon in heat exchangers by the milk during pasteurization phase. The proposed mathematical model is based mainly on the different mass and thermal balance. A relationship between the pressure drop and the thermal resistance of fouling is established.

Overall, the results show that the thermal resistance of fouling is proportional to the pressure loss. It increases with the increase in the pressure drop during the production phase, particularly in the principal exchanger, and reverse during the cleaning phase. The fouling affects the heat exchange between the two fluids. The deposit formed of insulating nature brings down the overall heat transfer coefficient during the production phase, particularly in the principal exchanger, and reverse during the cleaning phase.

Keywords: Milk - Pasteurization - Fouling - Heat Exchanger - Thermal resistance of fouling-Modeling-cleaning

ملخص:

يتم دراستها من قبل النمذجة التجريبية ظاهرة الترسب في المبادلات الحرارية من الحليب خلال خطوة المعالجة الحرارية دعا البسترة. ويستند النموذج الرياضي المقترح أساسا على التبادل الحراري و الكتلي التي تحدث في العملية. يتم تأسيس علاقة بين انخفاض الضغط والمقاومة الحرارية لترسب.

وعموما، فقد بينت النتائج أن المقاومة الحرارية لترسب يتناسب مع فقدان الضغط. لأنه يزيد مع زيادة في انخفاض الضغط خلال مرحلة الإنتاج، ولا سيما في مبادل الرئيسي، والعكس بالعكس أثناء مرحلة الغسيل. يؤثر على الايداع تبادل الحرارة بين السوائل اثنين. إيداع شكلت الطبيعة العازلة يهبط معامل الشاملة نقل الحرارة خلال مرحلة الإنتاج، ولا سيما في مبادل الرئيسي، والعكس بالعكس أثناء مرحلة الغسيل.
كلمات البحث: الحليب - البسترة - الترسب - مبادل حراري - المقاومة الحرارية للترسب -النمذجة- غسل

INTRODUCTION GENERALE ……...…….……1

Chapitre I : LE LAIT ET LES PRODUITS LAITIERS

I.1. GENERALITE ……...…4

I.2. LAIT ET PRODUIT LAITIERS DE BASE ……...……5

I.2.1 Le Lait de vache……...…5

I.2.1.1. Composition chimique……5

I.2.1.2. Etats de dispersion dans le lait ou « structure » du lait……..……5

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

I.2.2. LAIT EN POUDRE……...8

Chapitre II : LES TRAITEMENTS THERMIQUES

II.1. INTRODUCTION……...……10

II.2. PRINCIPALES CATEGORIES DE TRAITEMENT THERMIQUE DANS L'INDUSTRIE LAITIERE ……...……10

II.2.1. Thermorésistance des bactéries et des microorganismes……...……..10

II.2.2. Laits pasteurisés……..…….11

II.2.3. Laits stérilisés……...…….12

II.2.4. Laits concentrés……...…….13

II.2.5. Laits secs (laits en poudre ou granulés)…….……13

II.2.6. Laits fermentés…….14

II.2.7. Laits emprésurés et gélifiés……..……14

II.2.8. Laits spéciaux……...……14

II.3. MISE EN ŒUVRE DU TRAITEMENT THERMIQUE ……...…….15

II.3.1. Objectifs……...……15

II.3.2. Pasteurisation……...……15

II.3.2.1. Pasteurisation en mode discontinu: dite aussi (« batch »)……15

II.3.2.2. Pasteurisation en mode continu …….16

Chapitre III : LES ECHANGEURS DE CHALEUR

III.1. INTRODUCTION ……..…….18

III.2. NOTIONS GENERALES SUR LES ECHANGEURS……..……..18

III.2.1. Principaux modes d'écoulement des deux fluides …….. ….....19

III.2.1.1. Ecoulement des deux fluides parallèles et de même sens ……..….19

III.2.1.2. Ecoulement des deux fluides parallèles mais de sens contraires ...20

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

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

III.3. Echangeurs à plaques ……..…..22

III.3.1. Généralités ……22

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

Chapitre IV : ENCRASSEMENT DES EQUIPEMENTS

IV.1. INTRODUCTION…….……25

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

IV.2.1. La corrosion …….……..26

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

IV.2.3. L'encrassement par réaction chimique……..…….27

IV.2.4. L'entartrage ……...…….27

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

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

IV.3.1. Initiation ……...…….28

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

IV.3.3. Adhésion des particules ……...……..28

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

IV.3.5. Vieillissement du dépôt ……...…….29

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

IV.4.1. Revue bibliographique ……..……29

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

IV.4.3. Encrassement par cristallisation ……..31

IV.5. CONCLUSION ……31

CHAPITRE V: MODELISATION DU PHENOMENE DE L'ENCRASSEMENT LORS D'UNE PHASE DE PASTEURISATION DU LAIT

V.1.INTRODUCTION ……..…….……...…33

V.2. CYCLE DE PRODUCTION……...…..……33

V.2.1. Les étapes de production ……..……34

V.2.2. Le cycle de vapeur ……..…34

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

V.3.1. INTRODUCTION ……..……...……35

V.3.2. MODELE DE CALCUL …….……..……37

V.3.3. CALCUL DU COEFFICIENT DE TRANSFERT DE CHALEUR GLOBAL……40

V.3.4. Calcul des paramètres à mesurer du mélange (lait) ……40

V.3.5. Calcul des paramètres à mesurer de l'eau chaude ……..…42

V.3.6. Calcul du coefficient de transfert de chaleur avant encrassement …...…...42

V.3.7. Evolution du coefficient global d'échange de chaleur…….....43

Chapitre VI : RESULTATS ET DISCUSSIONS

VI.1.EVOLUTION DE LA RESITANCE THERMIQUE D'ENCRASSEMENT……...49

VI.1.1. Lors d un cycle de production…….....49

VI.1.1.1. changeur de récupération …….....……49

VI.1.1.2. Echangeur pasteurisation ……...……50

VI.1.1.3. Echangeur global …….51

VI.1.1.4. Conclusion …….51

VI.1.2. Lors d un cycle de lavage …….……..…52

VI .1.2.1. EVOLUTION LA PERTE DE CHARGE EN FONCTION DU TEMPS ……..……..……52

VI.1.2.2. Echangeur de récupération …….…..……53

VI.1.2.3. Echangeur pasteurisation …….…….……53

VI.1.2.4. Echangeur global…….……54

VI.2. EVOLUTION DE COEFFICIENT D'ECHANGE GLOBAL …….……55

VI.2.1. Cycle de production …….……55

VI.2.1. Cycle de lavage ……..……56

VI.3. CONCLUSION …….……57

Conclusion générale……..……59

Chapitre *I : LE LAIT ET ES PRODUITS LAITIERS*

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

Figure I.2 : Technique de production du lait en poudre…….8

Chapitre II : LES TRAITEMENTS THERMIQUES

Figure II.1 : dispositif de chauffage du lait en cuve agitée à double enveloppe……..16

Figure II.2 : schéma général d'une installation de traitement thermique en contenu…….16

Chapitre III : LES ECHANGEURS DE CHALEURS

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

Figure III.2 : Evolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire ou à plaques……...…20

Figure III.3 : Exemples d'échangeurs à courants croisés……....21

Chapitre IV : ENCRASSEMENT DES EQUIPEMENTS

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

Figure IV-2 : Encrassement des protéines……...…30

CHAPITRE V: MODELISATION DU PHENOMENE DE L'ENCRASSEMENT LORS D'UNE PAHE SE PASTEURISATION DU LAIT

Figure V.1 : Cycle de Pasteurisation du Lait……..35

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

Figure. V.3 : Résistance des films pour une plaque encrassée……....37

Figure. V.4 : Schématisation de la direction de l'écoulement entre deux plaques……..40

Figure. V.5 : Schématisation des rainures des plaques……..……..45

Chapitre VI : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Figure VI.1 : Evolution de la résistance d'encrassement en fonction du la perte de charge(Compartiment I-III)……..…49

Figure VI.2 : Evolution de la résistance d encrassement en fonction du la perte de charge (Compartiment II)……50

Figure VI.3 : Evolution de la résistance d encrassement en fonction du la perte de charge (Compartiment I-III)…….51

Figure VI.4 : Evolution de de la perte de charge en fonction du temps (échangeur global)…….52

Figure VI.5 : Evolution de la résistance d encrassement en fonction du la perte de charge (Lavage –compartiment I -III)……...…53

Figure VI.6 : Evolution de la résistance d encrassement en fonction du la perte de charge (Lavage- compartiment II)……....54

Figure VI.7 : Evolution de la résistance d encrassement en fonction du la perte de charge (lavage-global)……...55

Figure VI.8 : Evolution de coefficient d'échange global en fonction du la perte de charge…….……56

Figure VI.9: Evolution de coefficient d'échange global en fonction du la perte de charge…….57

Les produits agroalimentaires subissent des transformations de plus en plus élaborées afin de présenter des qualités organoleptiques et une texture désirable. Les équipementiers ainsi que les transformateurs cherchent à définir les lignes de processus fournissant le produit recherché 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. Ces derniers ont la particularité de limiter les performances des équipements thermiques augmentant ainsi le coût de production. En outre, ils peuvent influer considérablement sur la qualité des produits laitiers en aval des chaînes de production.

Une variété de traitements thermiques est utilisée dans les industries agroalimentaires ; Un exemple typique est la pasteurisation du lait qui consiste en une opération de chauffage de ce dernier. L'augmentation de la température du lait modifie certaines de ces propriétés et le rend instable. Par la suite, un dépôt de solides est formé sur la surface de l'échangeur de chaleur qui n'affecte pas considérablement la composition du lait. Cependant, ce dépôt génère des perturbations thermiques et hydrauliques qui affectent la production et qui créent ainsi le besoin de nettoyer les équipements concernés. Cette opération de nettoyage est nécessaire afin de reconstituer la surface initiale propre de l'échangeur et assurer ainsi la qualité et l'hygiène des productions ultérieures. Dans l'industrie laitière, c'est pratique courante de procéder au nettoyage des échangeurs toutes les 5 à 10 heures. A titre d'exemple, les frais de nettoyage des équipements thermiques sujets à l'encrassement par le lait ont été estimés à environ 140 millions de dollars par an aux Etats-Unis [1].

Dans ce travail, on s'intéresse principalement à l'évaluation de la résistance thermique de la couche 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 l'organigramme suivant :

Dans le premier chapitre quelques notions sur le lait et les produits laitiers en général sont présentées.

Le deuxième chapitre est consacré à une présentation des traitements thermiques du lait.

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

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

Dans le cinquième chapitre, la modélisation de l’encrassement des échangeurs de chaleur à plaques du lait lors d’une phase de pasteurisation est présentée.

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

A la fin une conclusion est présentée avec quelques recommandations.

I .1. GENERALITES

Le lait a été toujours considéré, dans toutes les civilisations, comme un produit noble en raison de son adaptation parfaite aux besoins nutritionnels et physiologiques de l'être humain. Cependant, son instabilité biologique et physicochimique constitue un facteur limitant de son utilisation en l'état. Au cours des siècles, l'homme a, sur la base d'observations, su empiriquement trouver les moyens de le stabiliser ou d'en extraire les éléments essentiels dans une forme plus stable. Cette recherche de report de consommation s'observe tout particulièrement dans les régions de production laitière à forte saisonnalité (montagnes par exemple)[2].

Les opérations technologiques les plus anciennes consistent à réduire la teneur en eau et à créer dans la phase aqueuse résiduelle des conditions physicochimiques stabilisantes par acidification et salage.

Les lipides et protéines, éléments les plus intéressants d'un point de vue nutritionnel, se trouvent dans le lait à l'état dispersé (globules gras, micelles de caséine). Ils sont instables au plan thermodynamique, ce qui facilite leur séparation et leur concentration : les fondements de la fabrication du beurre (crémage- barattage) et de la transformation du lait en fromages (coagulation – égouttage) ont été établis sur la base d'observations de phénomènes de déstabilisation se produisant naturellement.

Les travaux de Nicolas Appert et de Louis Pasteur au XIX^{e} siècle ont permis de mieux comprendre les bases biologiques et physicochimiques de l'instabilité des aliments. Les traitements thermiques (pasteurisation et stérilisation en particuliers) sont apparus comme un moyen efficace pour améliorer leur conservation. La deuxième technique majeure de stabilisation des aliments, en particulier du lait et des produits laitiers, est le séchage industriel, qui date des années 1900.

La maîtrise de la qualité et des coûts de revient des produits élaborés a beaucoup progressé grâce à une parfaite connaissance des matières premières et des mécanismes impliqués dans leur transformation, ainsi qu'à une bonne appréhension des phénomènes physiques et thermodynamiques qui régissent chacune des opérations unitaires.

Si les cadres de l'industrie laitière ont en général une très bonne connaissance de la matière première et de sa transformation, il leur est parfois plus difficile de maîtriser le domaine du génie alimentaire. Celui –ci permet pourtant de faire des bilans rigoureux

d'énergie et de matière, d'identifier les facteurs limitant des différents types de transfert (Énergie, matière ou quantité de mouvement) et de sélectionner les leviers les plus pertinents et efficaces pour améliorer les performance d'une opération unitaire ou d'un procédé [1].

I.2. LAIT ET PRODUIT LAITIERS DE BASE

Pour les industries agroalimentaires, le lait est surtout le lait de la vache, matière première complexe, hétérogène, contenant une flore bactérienne, et donc conservation difficile [3].

I.2.1. Le Lait de vache

I.2.1.1. Composition chimique [3]

Le lait est un liquide complexe essentiellement aqueux (90% d'eau) contenant :

- les trois grands groupes de substances alimentaires en proportions équilibrées :

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

- un éventail intéressant de substances particulières :

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

I.2.1.2. Etats de dispersion dans le lait ou « structure » du lait [3]

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.1).

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

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

- 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 5 μm 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 à0.3 μm) formés de submicelles (associations sphéroïdes 15 à 20 nm de caséines phosphoprotéines «insolubles») reliées entre elles par un « ciment » intersubmicellaire constitué de phosphate de calcium ; ce sont des structures « spongieuses » gorgées d'eau (65%) dont le matériau constitutif (35%) comprend 92% de caséines et 8% de phosphate de calcium.

I.2.1.3. Produits laitiers essentiels de la filière lait [3] :

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 C), 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

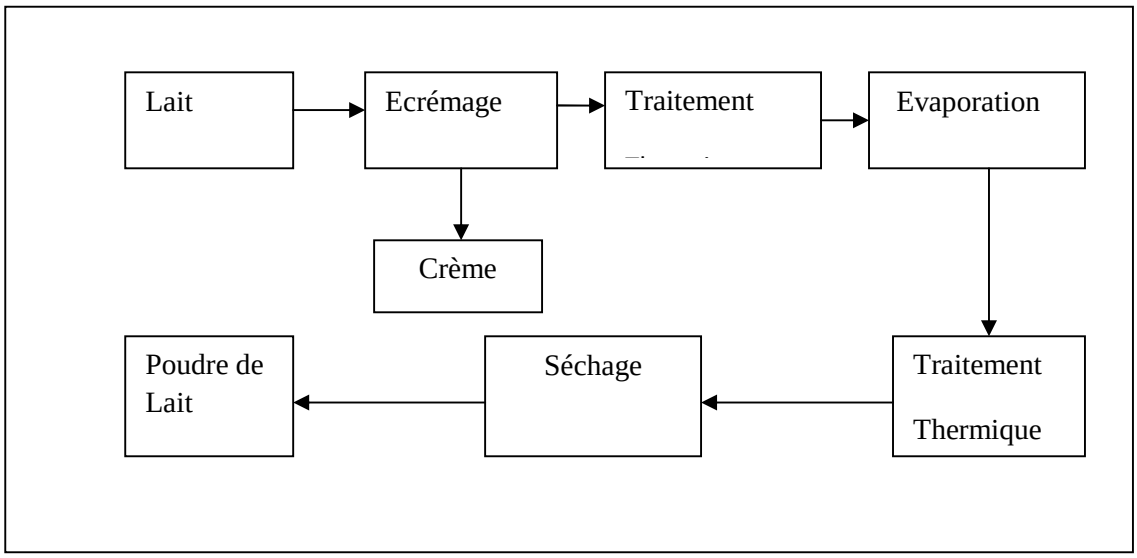
C'est une émulsion de type eau dans huile contenant un peu d'eau (phase dispersée discontinue) dans au moins 82% de matière grasse laitière (phase principale continue). Il s'agit donc d'un concentré des lipides du lait obtenu par une agitation de crème maturée (la maturation, grâce aux ferments lactiques, 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.3. LAIT EN POUDRE [4]

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



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

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

II.1. INTRODUCTION [2]

Les traitements thermiques aux produits laitiers ont plusieurs objectifs :

- détruire des 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, voire sur le rendement des opérations technologiques mises en œuvre ultérieurement. Par exemple on peut chercher à dénaturer certaines protéines pour améliorer texture et rendement en technologie fromage ;

- générer des produits de la réaction de Maillard pour certaines applications (chocolaterie par exemple).

II.2. 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].

II.2.1. Thermo résistance des bactéries et des microorganismes [4]

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

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

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

-Peu acide : pH > 5,3

-Modérément acide : pH entre 4,5 et 5,3

-Acide : pH < 4,5

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

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

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

II.2.2. 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.

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

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

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

II.2.3. 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.

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

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

Convoyées mécaniquement, les bouteilles sont préchauffées dans la première colonne d'eau, stérilisées à 115-120 °C pendant 15 à 20 minutes sous vapeur, puis progressivement refroidies dans la seconde colonne d'eau; ce procédé assure une qualité hygiénique parfaite et une longue conservation (150Jours) 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.

II.2.4. Laits concentrés [3]

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

Homogénéisé, refroidi, il est distribué en boîtes métalliques 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 donc être moins intense. Après concentration à 50 % environ, le lait est rapidement refroidi et réparti en boîtes ou tubes stériles.

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

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

II.2.5. 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.

II.2.6. 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.

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

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

II.2.7. Laits emprésurés et gélifiés [3]

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

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

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

II.2.8. 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.

II.3. MISE EN ŒUVRE DU TRAITEMENT THERMIQUE

II.3.1. Objectifs

Parmi les traitements thermiques destinés à améliorer la qualité hygiénique ou à assurer une longue conservation, on distingue la pasteurisation et la stérilisation. Dans la présente étude on s'intéresse uniquement à la pasteurisation.

II.3.2. 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).

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 et la réaction de Maillard pour éviter brunissement, goût de cuit et perte de lysine dans le cas de la stabilisation des laits de consommation.

II.3.2.1. Pasteurisation en mode discontinu: dite aussi (« batch »)

Un traitement de pasteurisation peut être réalisé par chauffage du lait dans une cuve agitée (Figure II.1).

Comme la montre la figure II.1, l'eau chaude circulant dans l'enveloppe va chauffer le lait qui se trouve à l'intérieur de la cuve jusqu'à sa température de pasteurisation.

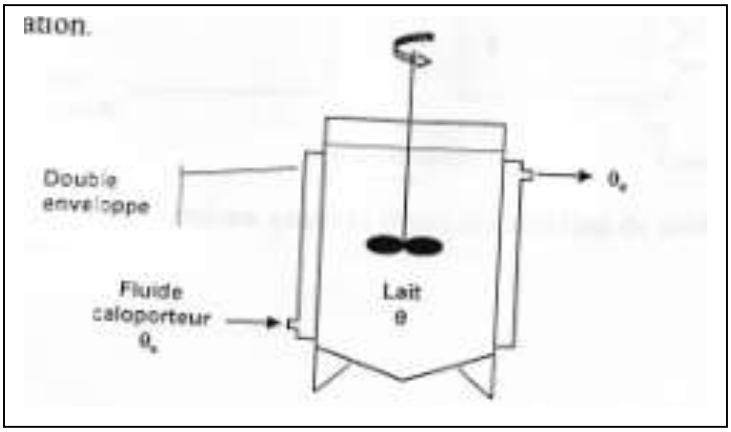


Figure II.1 : Dispositif de chauffage du lait en cuve agitée à double enveloppe

II.3.2.2. 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 (Figure II.2).

Pour réduire les coûts énergétique, il est possible dans une partie de l'échangeur, appelé zone de récupération, de réchauffer 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 r_q de l'installation est habituellement de l'ordre de 90- 92%.

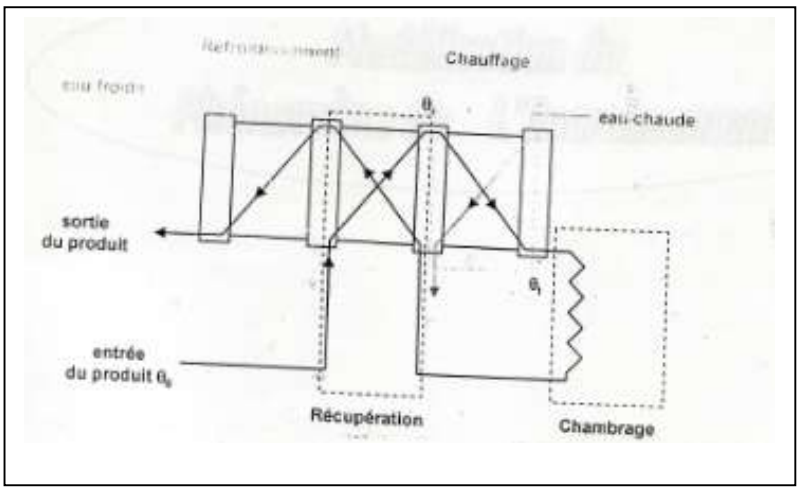


Figure II.2 : Schéma général d'une installation de traitement thermique en contenu

III.1. INTRODUCTION

Dans les sociétés industrielles, l'échangeur de chaleur est un élément essentiel de toute politique de maîtrise de l'énergie et donc, par voie de conséquence, de protection de l'environnement. Une grande part de l'énergie thermique (90%) utilisée dans les procédés industriels transite au moins une fois par un échangeur de chaleur, aussi bien dans les procédés eux-mêmes que dans les systèmes de récupération de l'énergie thermique de ces procédés. Ils sont utilisés principalement dans les secteurs de l'industrie (chimie, pétrochimie, sidérurgie, agro-alimentaire, production d'énergie, etc.), du transport (automobile, aéronautique), mais aussi dans le secteur résidentiel et tertiaire (chauffage, climatisation, … etc.) [5].

Ils constituent donc un des dispositifs clé du thermicien, et sont un composant quasi inévitable dans la maîtrise de l'énergie. Compte tenu de leurs multiples utilisations, les difficultés rencontrées par les utilisateurs d'échangeurs de chaleur sont diverses et variées. Toutefois, un des principaux problèmes de fonctionnement auxquels ils se heurtent a trait aux phénomènes d'encrassement. En effet, l'encrassement reste encore, de nos jours, l'un des phénomènes le moins compris et le moins prédictible de l'industrie.

III.2. NOTIONS GENERALES SUR LES ECHANGEURS [6]

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.

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

On peut distinguer trois modes d'écoulement différents.

III.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 III.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.

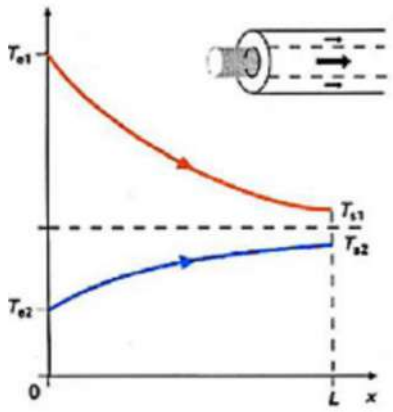


Figure III.1 : Evolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire co-courant

III.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 III.2). Les températures sont repérées à l'aide d'indices **e** signifiant entrée et **s** sortie.

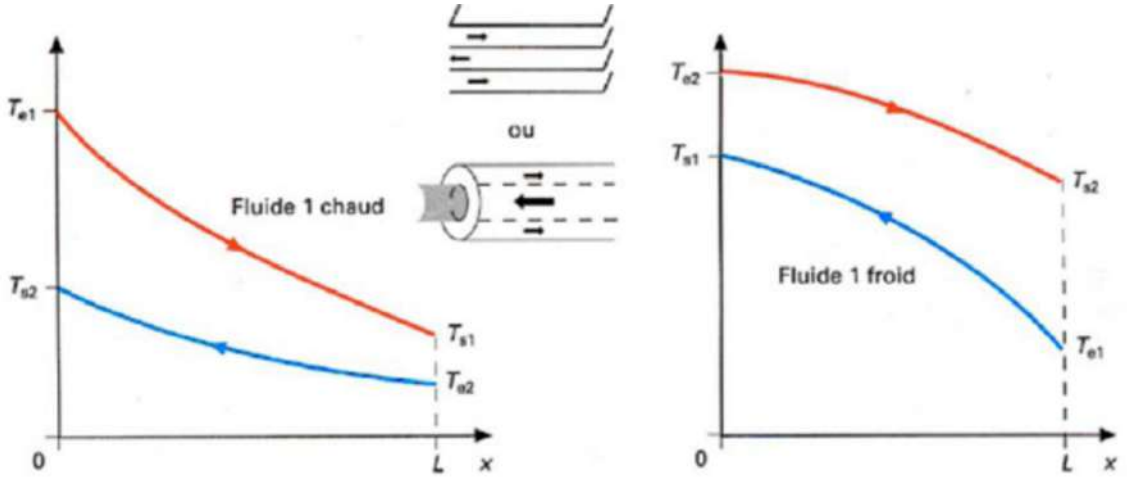


Figure III.2 : Evolution qualitative des températures dans un échangeur tubulaire ou à plaques

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.

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

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

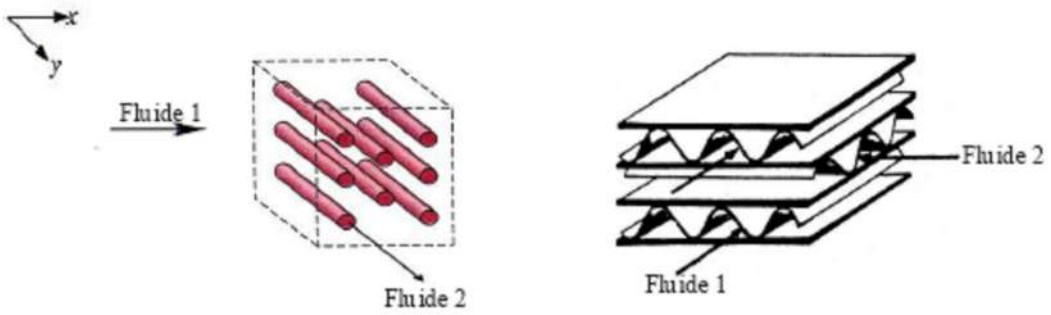


Figure III.3 : Exemples d'échangeurs à courants croisés

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 corrigées, choisies pour un fluide qui imposent la même géométrie pour l'autre.

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

III.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.

III.3. Echangeurs à plaques [7]

III.3.1. Généralités

Le concept d'échangeurs à plaques date du début du siècle. Ces échangeurs ont été étudiés à l'origine pour répondre aux besoins de l'industrie laitière, puis utilisés ensuite dans diverses branches de l'industrie : chimie, nucléaire, …

On regroupe, sous ce vocable d'échangeurs à plaques, différentes technologies dont certains sont d'un développement assez récent. On peut distinguer, suivant le type de géométrie de canal utilisé, les échangeurs à surface primaire et les échangeurs à surface secondaire.

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

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

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

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

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

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

- les débits primaire et secondaire qui déterminent les dimensions des tubulures de raccordement de l'échangeur et, par là même, fixent approximativement les dimensions des plaques (dans le cas des échangeurs à plaques et joints).

- le nombre d'unité s de transfert (NUT) qui détermine le service thermique demandé. Qualitativement, ce nombre est défini comme étant la différence de température sur un fluide rapportée à l'écart de température moyen entre les deux fluides. Ce nombre est relié aux caractéristiques thermo hydrauliques des plaques (coefficient d'échange de chaleur et pertes de pression) et peut aides à choisir le type de cannelure le mieux adapté au problème posé.

- la perte de pression qui est, imposée par l'utilisateur.

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

1. Avantage

Les avantages offerts par un échangeur à plaques sont : [**8-9**]

- 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.

2. Inconvénients [9]

- 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.

IV.1. INTRODUCTION [6]

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

Le couplage encrassement – dégradation des échanges thermiques a de fortes répercutions sur la rentabilité de l'opération. Les coûts liés à l'encrassement des échangeurs avoisinent les 700 millions d'euros par an. Ces coûts intègrent les dépenses liées, d'une part, au dimensionnement (surdimensionnement de la surface d'échange à mettre en œuvre, incorporation d'équipements de nettoyage) à hauteur de 20 % et, d'autre part, au fonctionnement (perte de production, diminution du transfert, frais de maintenance et nettoyage) à hauteur de 80 %. Malgré les efforts considérables déployés depuis les premiers travaux de Kern et Seaton.

L'encrassement demeure encore un phénomène bien mal compris où l'empirisme reste le moyen le plus couramment utilisé. En effet, la large gamme d'écoulements et la panoplie des conditions industrielles existantes contribuent grandement à la méconnaissance du phénomène.

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

IV.2. NOTIONS SUR L'ENCRASSEMENT DES ECHANGEURS [10]

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.

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.

IV.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.

IV.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.

IV.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.

IV.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.

IV.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 .

IV.3. APPARITION ET DEVELOPPEMENT DE L'ENCRASSEMENT [11]

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 :

IV.3.1. Initiation :

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

IV.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.

IV.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.

IV.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 IV.1) ; lorsqu'il concerne des agglomérats de particules, il correspond à un phénomène d'écaillage.

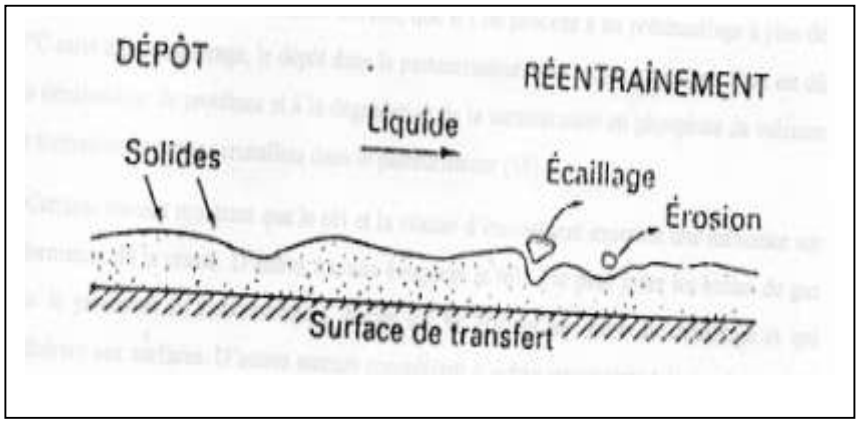


Figure IV-1 : Représentation schématique des phases de dépôt et de réentraînement de l'encrassement dans le cas d'un liquide

IV.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**.**

IV.4. ENCRASSEMENT PAR LE LAIT

IV.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 [12]. Sa structure lui confère un rôle déterminant dans le processus de l'encrassement, donc on peut confondre entre l'encrassement des protéines et encrassement β-lactoglobuline. Des considérations thermodynamiques approuvent également l'idée, que l'encrassement est dû uniquement à la protéine β-lactoglobuline [13].

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.

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 [14].

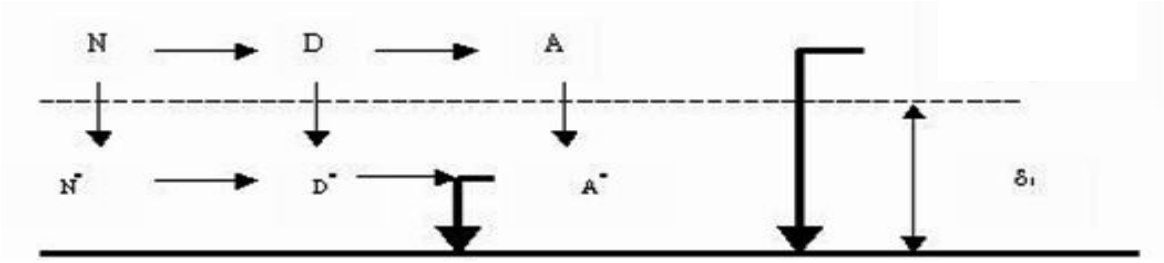
Certains travaux montrent que le pH et la vitesse d'écoulement exercent une influence sur la formation de la crasse. D'autres travaux évoquent le rôle que peut jouer les bulles de gaz dans le processus de l'encrassement, bulles qui se libèrent au cours du chauffage et qui s'adhérent aux surfaces. D'autres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

Sur un autre article, l'auteur s'est intéressé à l'étude du rapport Ca : P dans la crasse et a trouvé une valeur proche de la valeur caractéristique du $Ca_3(PO_4)_2$ de 1,5. Ceci confirmera l'hypothèse d'un encrassement par cristallisation du phosphate du calcium [15].

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 protéineβ-lactoglobuline) et par cristallisation [1].

IV.4.2. Mécanisme de l'encrassement des protéines

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

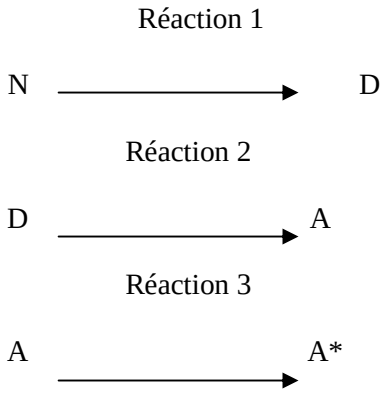


Mur, surface Dépôt de protéines.

Figure IV-2 : Encrassement des protéines.

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

affinité avec la surface hydrophobe et s'adsorbe sur cette dernière, A*. A partie 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].

IV.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].

IV.5. CONCLUSION

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

V.1. INTRODUCTION

Dans le cadre du présent travail, on se propose de quantifier 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 ainsi que lors de la phase de lavage des équipements concernés en partant de la perte de charge causée par cet encrassement.

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.

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 (MGLA), pour réaliser un produit le plus voisin possible du lait initial. Le mélange se fait en circuit fermé et selon le mode opératoire suivant [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 (MGLA) ou 15 g/l sont ajoutées.

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

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

V.2.1. Les étapes de production

Les étapes de production dans l'unité UHT se résument comme suit (Figure V.1) [17] :

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 (1). 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 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 par une injection de la vapeur (4) 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 (5).

4. Refroidissement (récupération de chaleur): Il se fait par un échange de chaleur dans le compartiment I entre l'eau chaude et le lait pasteurisé et dans le compartiment III 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 (6).

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.

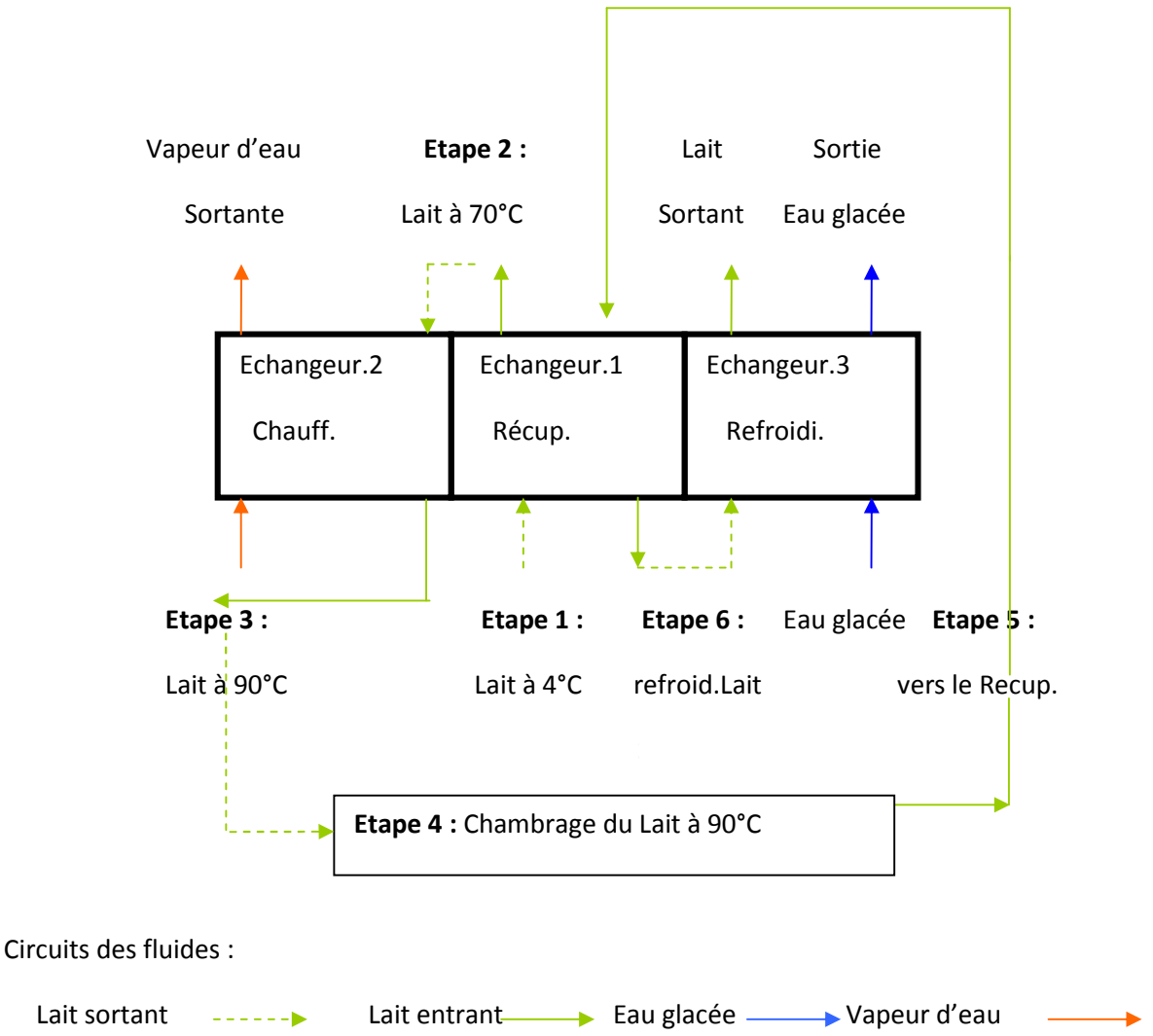


Figure V.1. Cycle de Pasteurisation du Lait.

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

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 :

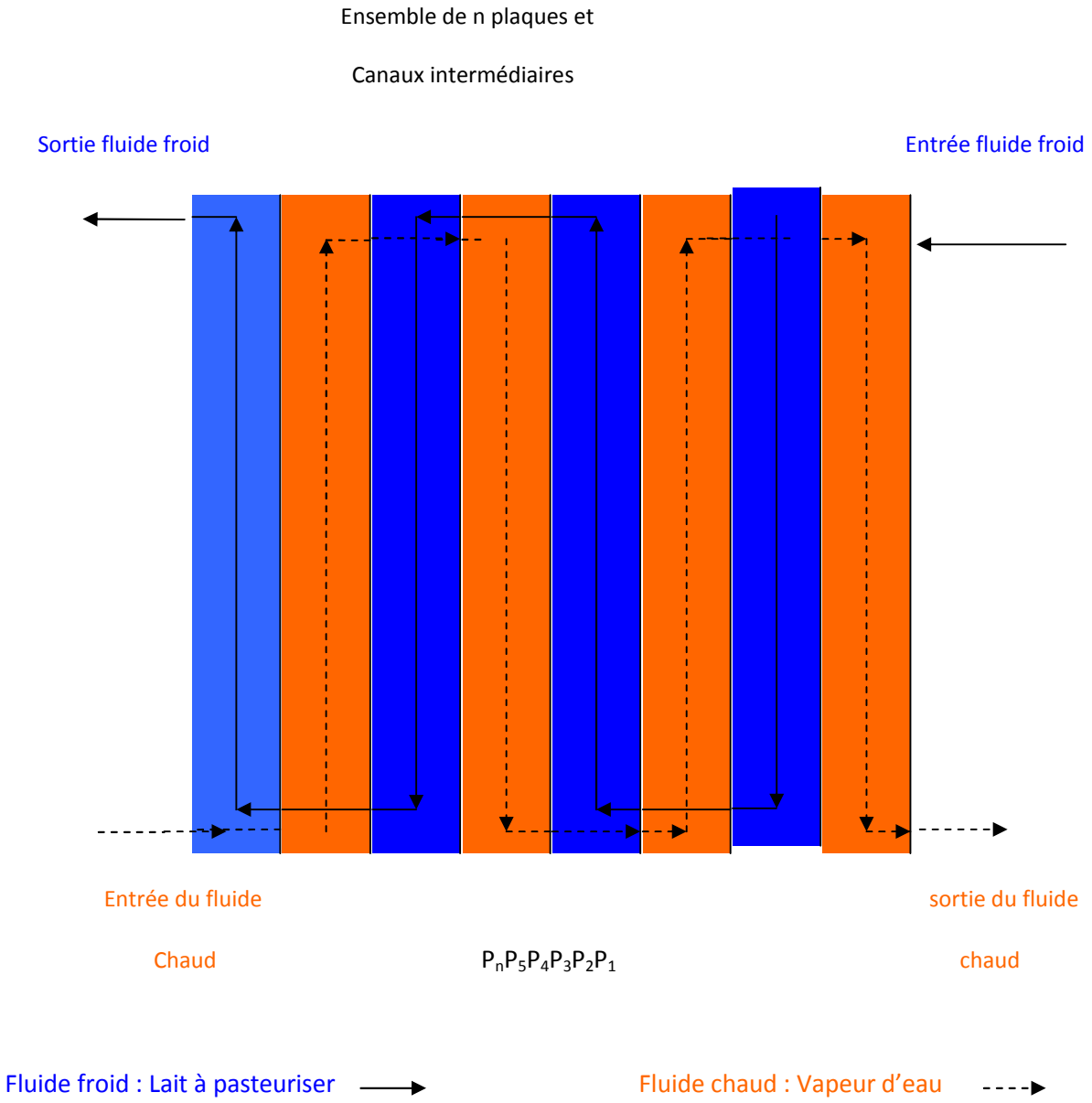


Figure V.2. Arrangement des plaques de l'échangeur de pasteurisation et sens de circulation des fluides.

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.

V.3.2. Modèle de calcul

Notre approche permettant l'évaluation de l'encrassement dans le compartiment pasteurisation du lait, est basée sur la méthode de Kern. Etant donné la variation des conditions opératoires au cours du temps, il a été nécessaire d'évaluer le coefficient global de transfert de chaleur, à travers une simple comparaison avec la valeur calculée qu'aurait ce même coefficient si l'appareil était propre. Ainsi, nous obtiendrons l'expression de la résistance thermique créée par le dépôt et s'opposant au transfert de chaleur. Il est utile d'ajouter que le comportement hydrodynamique du fluide est pris en compte pour les calculs qui nécessiteront l'introduction du paramètre perte de charge, et qui seront mieux détaillés dans les paragraphes qui suivent.

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

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

En termes de quantité de chaleur nous avons:

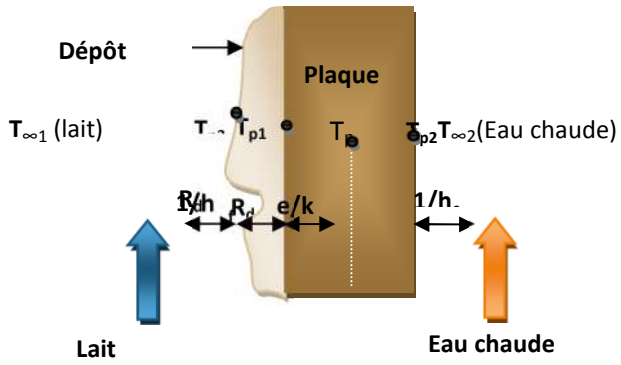


Figure. V.3 : Résistance des films pour une plaque encrassée.

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

$$q_1 = h_f A\left(T_{\infty 1} - T_{p3}\right) \qquad \textbf{(V.2)}$$

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

$$q_2 = h_c A\left(T_{\infty 2} - T_{p2}\right) \qquad \textbf{(V.3)}$$

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

$$q_3 = \frac{\left(T_{p1} - T_{p2}\right)}{\frac{e}{K \times A}} \qquad \textbf{(V.4)}$$

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

$$q_4 = \frac{\left(T_{p3} - T_{p1}\right)}{R_d} \qquad \textbf{(V.5)}$$

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:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_f} + \frac{1}{h_C} + \frac{e}{k_1} + R_d \qquad \textbf{(V.6)}$$

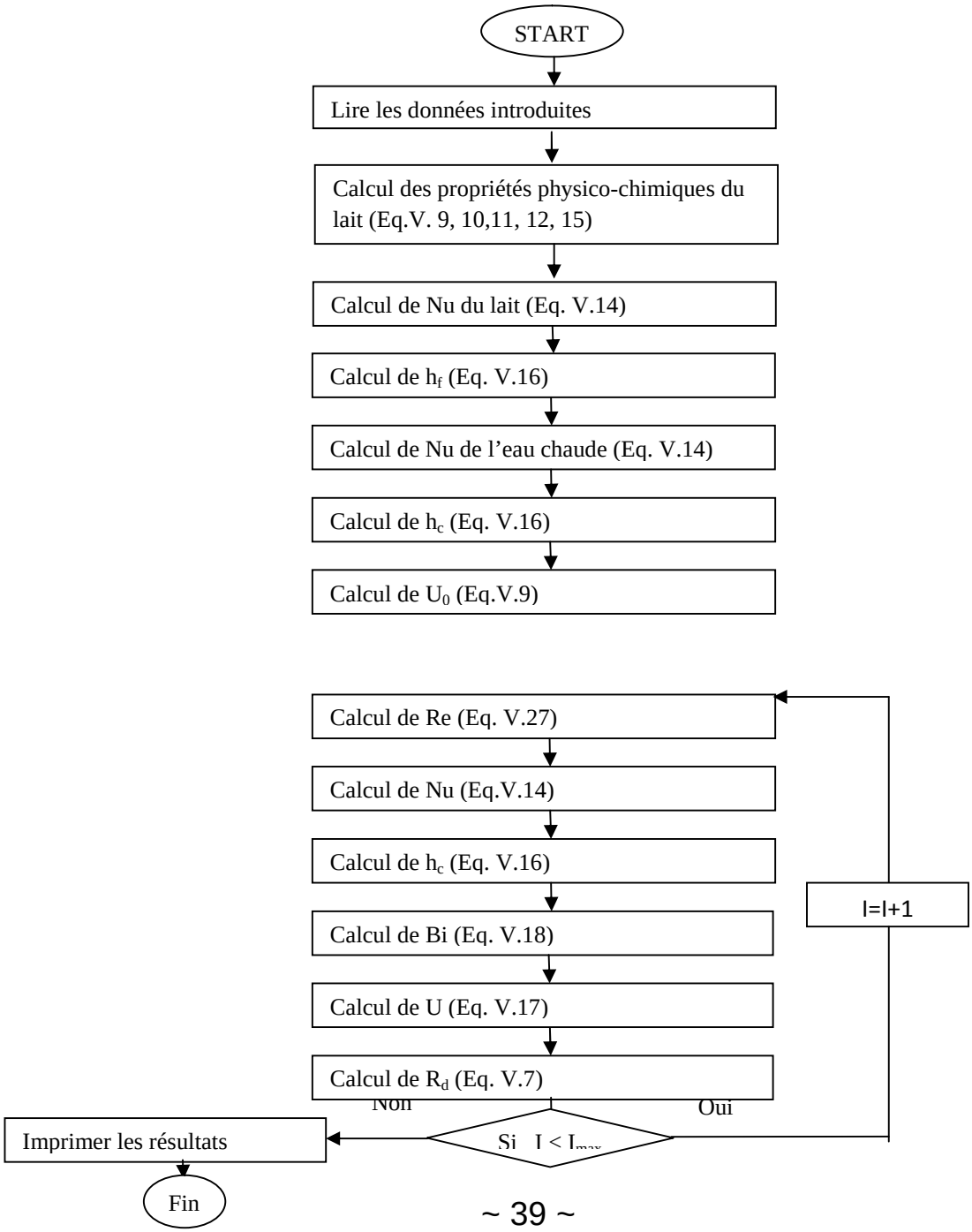
La résistance d'encrassement apparaît donc comme la différence entre la résistance thermique globale de l'échangeur à l'état encrassé et celle de l'échangeur à l'état propre.

Où :

$$R_d = \frac{1}{U} - \frac{1}{U_0} \qquad \textbf{(V.7)}$$

$$\frac{1}{U_0} = \frac{1}{h_f} + \frac{1}{h_c} + \frac{e}{K_1} \qquad \textbf{(V.8)}$$

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:



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.

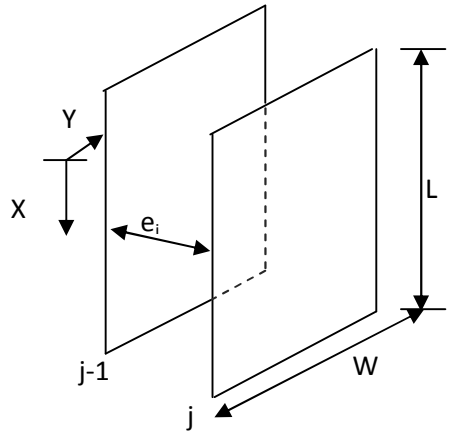


Figure. V.4 : Schématisation de la direction de l'écoulement entre deux plaques.

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

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

$$\mu + \mu_0 (1 + 2{,}5\varphi) \qquad \textbf{(V.9)}$$

φ = (volume des particules)/ (volume total). **(V.10)**

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

-A partir de la relation **(V.10)**, 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 II) est :

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

- A partir de la relation **(V.9)** nous parvenons à :μ

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

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

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

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

4. **Vitesse du mélange :** S'écrit :

$$u = \frac{Q}{A} \qquad \textbf{(V.11)}$$

$$A = e_j \times W$$

-Donc à partir de la relation **(V.11):** on obtient **u**

5. **Nombre de Reynolds :**

$$Re = \frac{\rho_f \times u \times d_e}{\mu_f} \qquad \textbf{(V.12)}$$

$$d_e = 2 \times e_j \qquad \textbf{(V.13)}$$

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

$$Nu = 0.214\left(Re^{0.662} - 3.2\right)Pr^{0.4} \qquad \textbf{(V.14)}$$

$$Pr = \frac{Cp \times \mu}{K} \qquad \textbf{(V.15)}$$

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

6. Coefficients de transfert de chaleur (h_f):

Pour calculer le coefficient de transfert de chaleur côté fluide froid (h_f), la corrélation **(V.14)** et les équations **(V.12)** et **(V.15)** sont utilisées :

$$k = 0,00133T + 0,53991 \text{ [19]}$$

D'où avec l'équation **(V.15)**: Pr = 2

La corrélation **(V.14)** donne : Nu = 173.11

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

D'où : $h_f = \frac{Nu \times K}{d_e}$ **(V.16)**

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.11)** :

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

-D'où avec l'équation **(V.12)** et **(V.15)** on obtient: Re , Pr

-Avec la corrélation **(V.14)** on obtient : Nu

-De l'équation **(V.16)** on obtient: h_c

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.8)** : sachant que k_1= 15.1 (W/m°C) [33] et e= 4,5 10^{-3} m, ce qui donne : **U_0**

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]:

$$U = \frac{U_0}{1+Bi} \qquad \textbf{(V.17)}$$

$$\text{Le nombre de Biot : } Bi = \frac{e/K_1}{\frac{1}{\frac{1}{h_f}+\frac{1}{h_c}}} \qquad \textbf{(V.18)}$$

Ce qui nécessite la détermination de h_f au cours du temps à travers la relation **(V.14).** 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:

$$\frac{dP}{dx} + \tau_{xy} = 0 \qquad \textbf{(V.19)}$$

Après intégration de l'équation **(V.19**) et pour $y = \frac{e_j}{2}$ et x = L, nous obtenons :

$$\tau_p = \frac{e_j}{2}\frac{\Delta P}{L} \qquad \textbf{(V.20)}$$

D'autre part :

Le facteur de friction f s'écrit :

$$f = \frac{\tau_p}{\frac{1}{2}\rho \times u^2} \qquad \textbf{(V.21)}$$

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.20)** tout en remplaçant les paramètres τ_p et e_j tirés des équations **(V.13)** et **(V.14)** est

$$\Delta P_0 = 2 \times f \left(\frac{L}{d_e}\right) \rho \times u \qquad \textbf{(V.22)}$$

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

$$\Delta P_0 = \left(2\frac{L}{d_e}\right) k_1 Re^{k_2} \rho \times u^2 \qquad \textbf{(V.23)}$$

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

$$\Delta P_0 = \left(8\frac{L \times n}{d_e^3 w^2}\right) k_1 Re^{k_2} \rho \times Q^2 \qquad \textbf{(V.24)}$$

La relation **(V.24),** est simplifiée en :

$$\Delta P_0 = K_3 \times Re^{K_2} \rho \times Q^2 \qquad \textbf{(V.25)}$$

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] :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{\cos}{\sqrt{0.045\tan}\ \frac{f_0}{\cos}} + 1 - \frac{}{3.9\, f_1} \qquad \textbf{(V.26)}$$

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

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

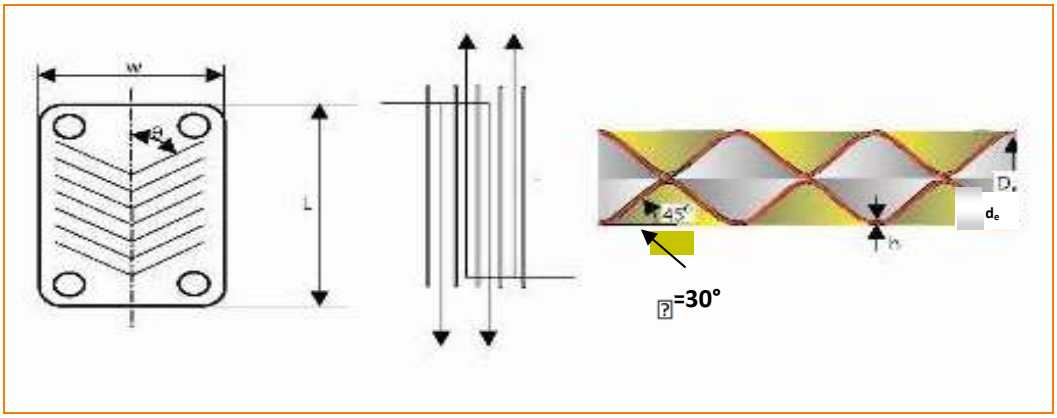


Figure. V.5 : Schématisation des rainures des plaques

Alors pour :

θ=30°

f_0 = 0.08 et f_1 = 0.6

Donc:

f=0.55 et de l'équation **(V.22)** ΔP_0=0.457 bars

A partir de la relation **(V.25)** : k2= 1,23

De la relation **(V.25)** l'équation reliant le nombre de Reynolds à la perte de charge (déterminée expérimentalement) s'écrit:

$$Re = \sqrt[k_2]{\frac{\Delta P}{K_3 \rho \times Q^2}} \qquad \textbf{(V.27)}$$

A partir des équations : (**V.14), (V.18)** et **(V.25)** on a aboutit à l'évaluation du coefficient global de transfert de chaleur au cours du temps à travers la relation **(V.17).**

(voir programme MATLAB en Annexe9).

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.6)) est déterminée, à travers une simple comparaison avec la valeur calculée qu'aurait ce même coefficient si l'appareil était propre. A cet effet :

$$R_d = \frac{1}{U} - \frac{1}{U_0} \qquad \textbf{(V.28)}$$

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 9. La variation de la résistance d'encrassement au cour du temps est illustrée dans les figures qui suivent

V.4. CYCLE DE NETTOYAGE

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 pendant

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

VI.1.1. Lors de cycle de production

VI.1.1.1. Echangeur de récupération

L'évolution de la résistance thermique d'encrassement en fonction de la perte de charge est représentée sur la Figure VI.1 pour les compartiments de préchauffage (I) et de pré-refroidissement (III) (ΔP=Ps-Psl). Selon le graphe, 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 .16 10-3 m^2.K/W.

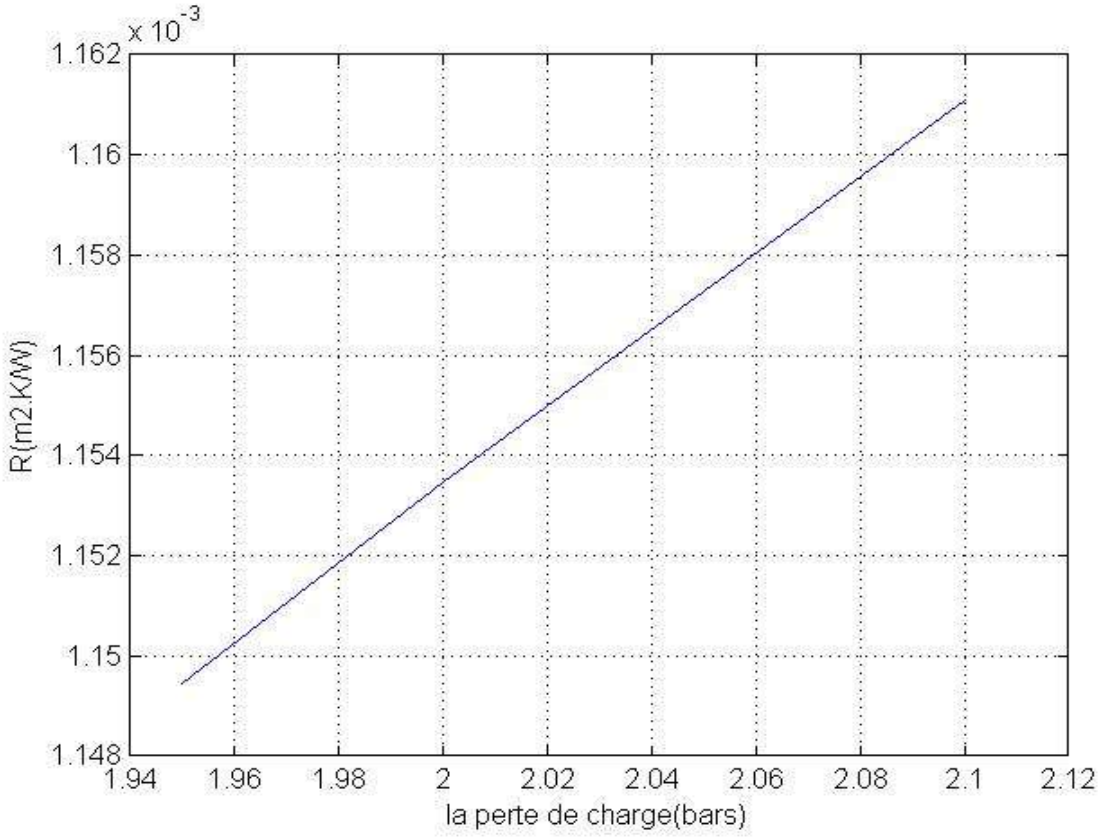


Figure VI.1 : Evolution de la résistance d'encrassement en fonction du la perte de charge

(Compartiment I-III)

Le dépôt n'est pas important dans cette partie de l'installation car 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].

VI.1.1.2. Echangeur pasteurisation

L'évolution de la résistance thermique d'encrassement en fonction de la perte de charge est représentée sur la Figure VI.2 pour le compartiment de chauffage (ΔP=Pe-Ps).

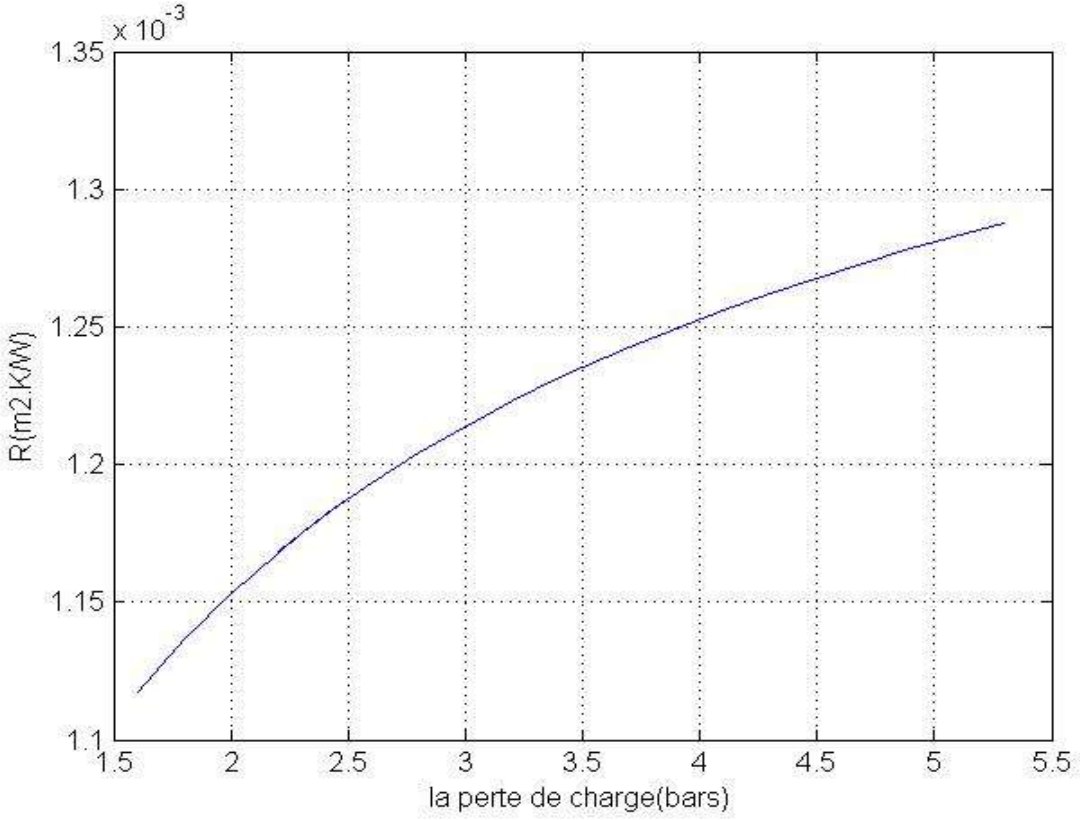


Figure VI.2 : Evolution de la résistance d encrassement en fonction du la perte de charge (Compartiment II)

L'allure montre une augmentation plus sensible de la résistance thermique d'encrassement car la perte de charge est plus importante pour atteindre une valeur maximale de l'ordre de 1 .35 m^2.K/W. 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 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.

VI.1.1.3. Echangeur global

L'évolution de la résistance thermique d'encrassement en fonction de la perte de charge est représentée sur la Figure VI.3 pour tout le pasteurisateur composé de trois échangeurs. La même allure est observée globalement pour tout l'échangeur (ΔP=Pe-Psl).

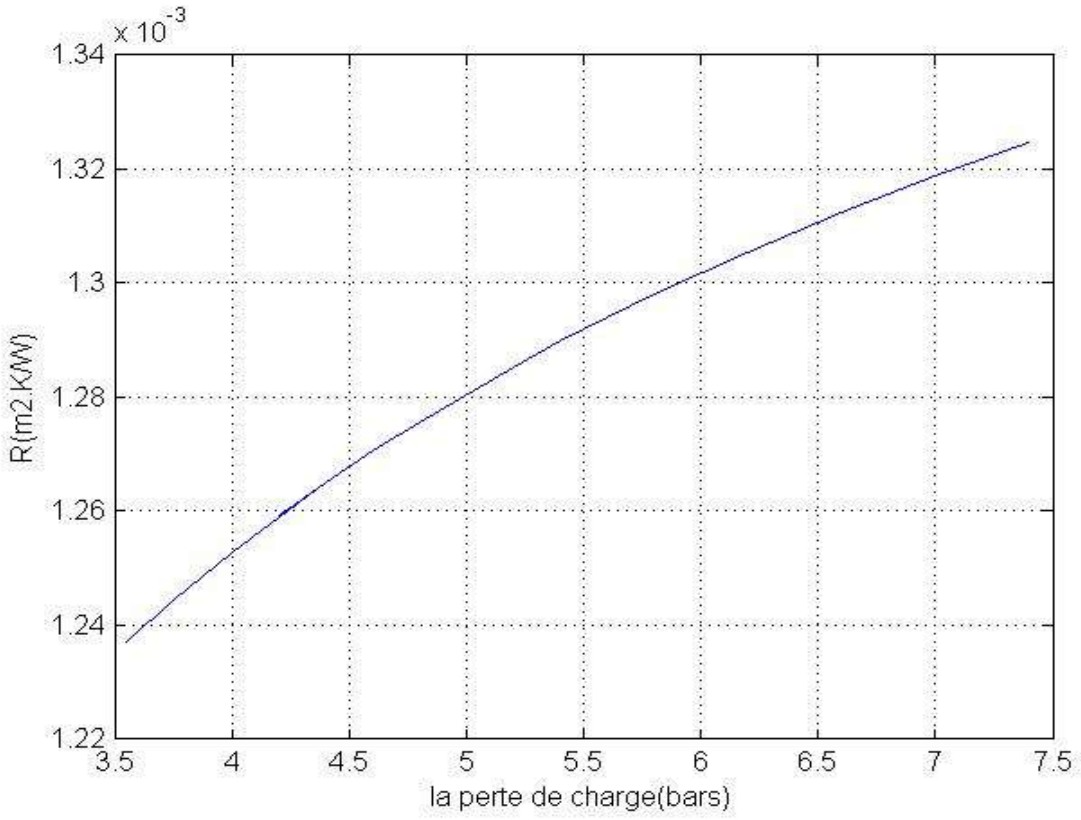


Figure VI.3 : Evolution de la résistance d encrassement en fonction du la perte de charge (Compartiment I-III)

Cette allure reflète la formation du dépôt sur les plaques au cours du temps. Les prises de pression sont relevées à l'entrée et à la sortie de l'échangeur.

VI.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].

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.

VI.1.2. Lors de cycle de lavage

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

Les données expérimentales de l'évolution de la perte de charge en fonction du temps de fonctionnement sont représentées sur la Figure VI.4.

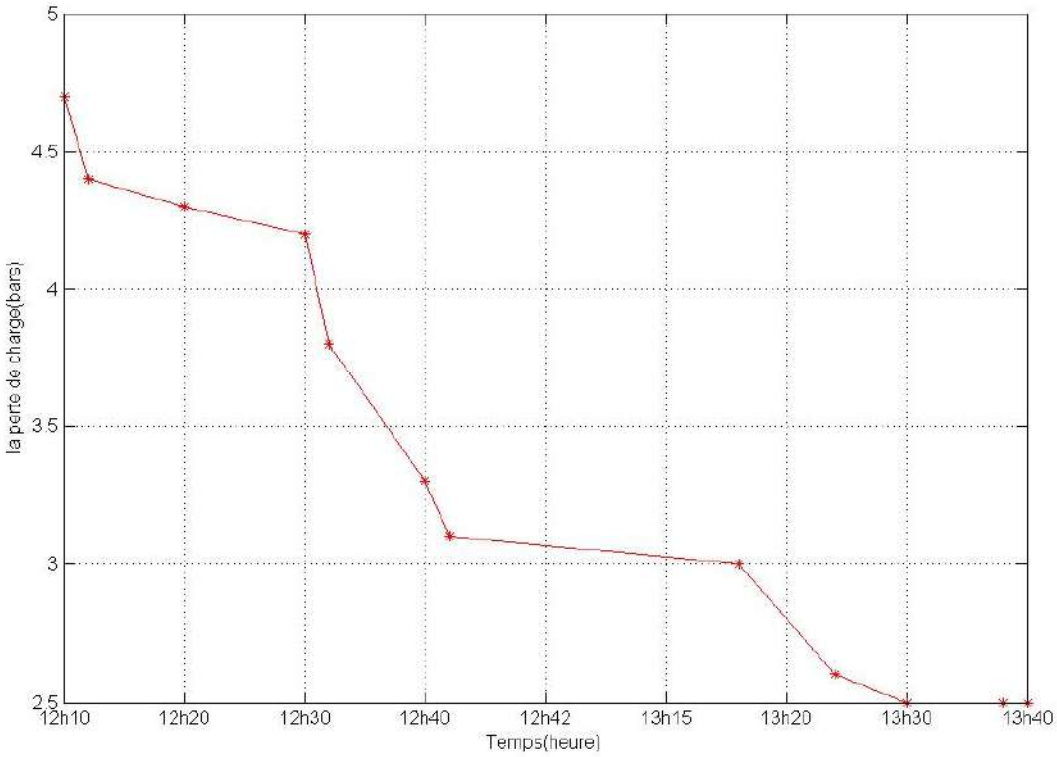


Figure VI.4 : Evolution de de la perte de charge en fonction du temps (échangeur global).

La perte de charge 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.

VI.1.2.2. Echangeur de récupération

L'évolution de la résistance thermique d'encrassement en fonction de la perte de charge est représentée sur la Figure VI.5 pour les compartiments préchauffage et pré refroidissement.

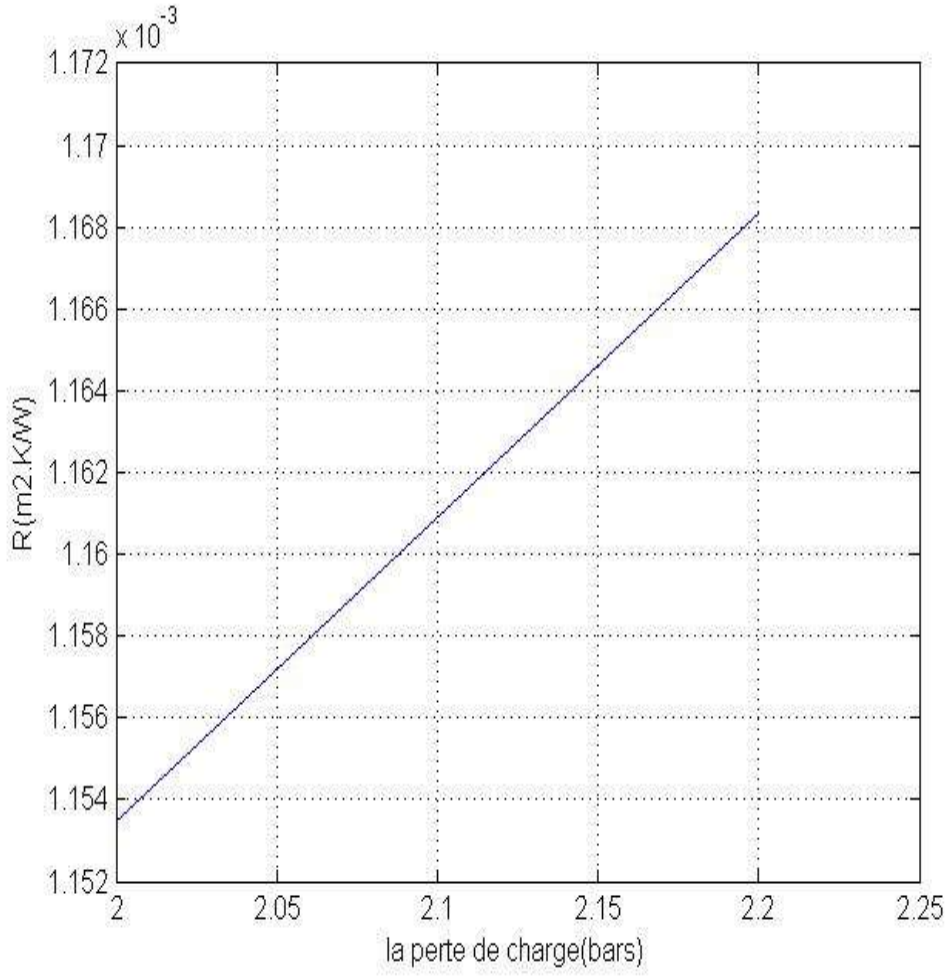


Figure VI.5 : Evolution de la résistance d encrassement en fonction du la perte de charge (Lavage –compartiment I -III)

L'entrainement et l'enlèvement de la crasse fait reconstituer la surface initiale de l'échangeur propre et fait ainsi diminuer la perte de charge.

VI.1.2.3. Echangeur pasteurisation

L'évolution de la résistance thermique d'encrassement en fonction de la perte de charge est représentée sur la Figure VI.6 pour le compartiment pasteurisation.

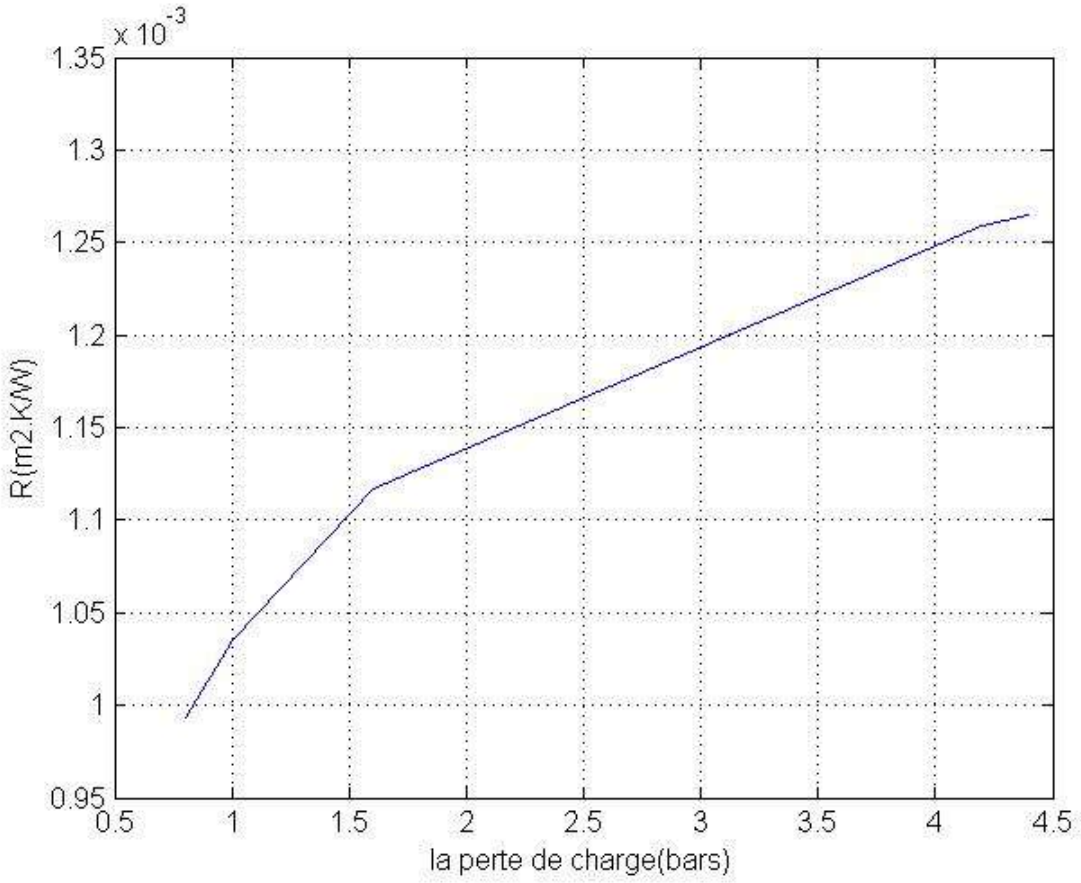


Figure VI.6 : Evolution de la résistance d encrassement en fonction du la perte de charge (Lavage- compartiment II)

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.

VI.1.2.4. Echangeur global:

L'évolution de la résistance thermique d'encrassement en fonction de la perte de charge est représentée sur la Figure VI.7 pour tout l'échangeur lors de la phase de nettoyage.

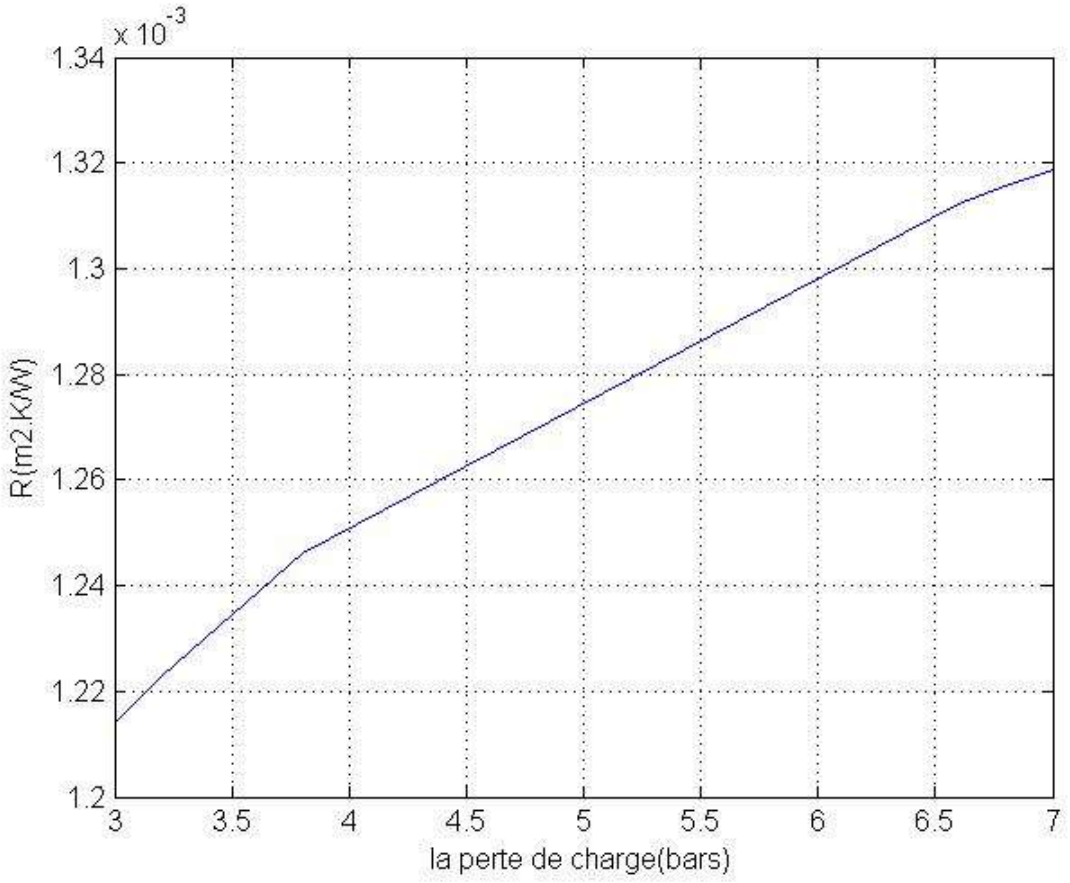


Figure VI.7 : Evolution de la résistance d encrassement en fonction du la perte de charge (lavage-global)

La perte de pression diminue globalement 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.

VI.2. EVOLUTION DE COEFFICIENT D'ECHANGE GLOBAL

VI.2.1. Cycle de production

L'évolution du coefficient d'échange global lors d'un cycle de production est représentée en fonction de la perte de charge sur la Figure VI.8.

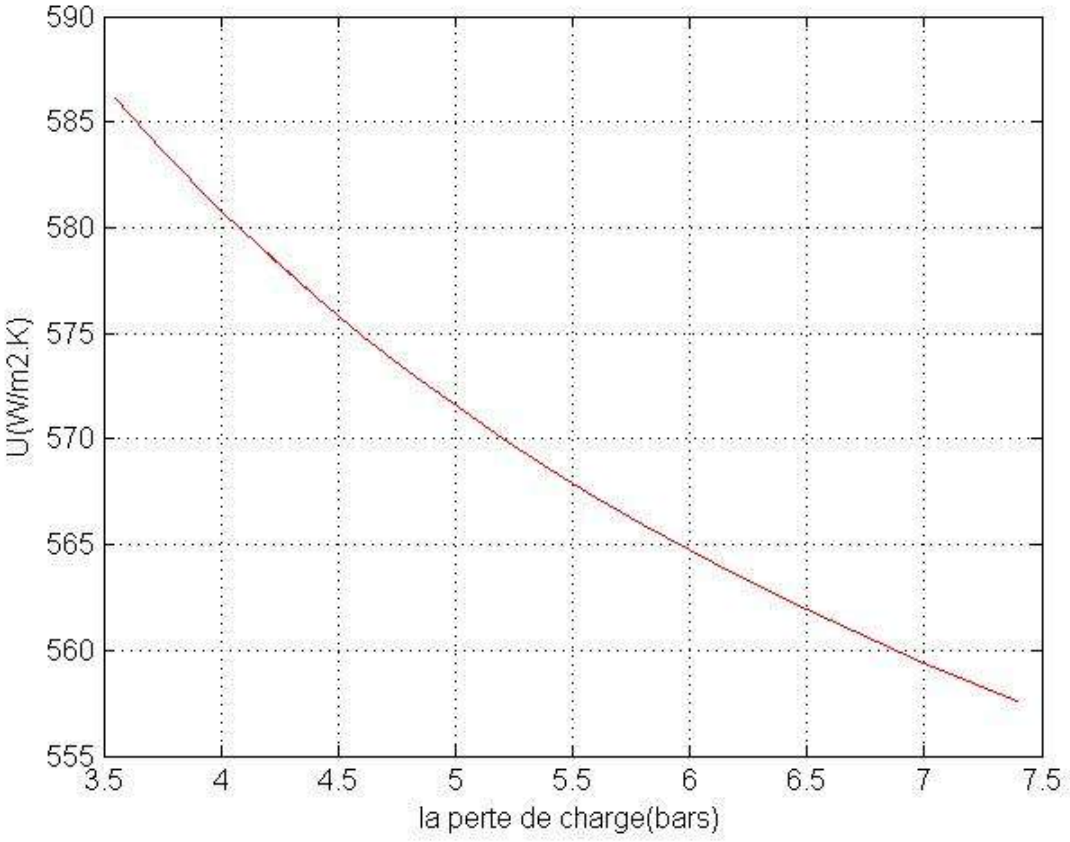


Figure VI.8 : Evolution de coefficient d'échange global en fonction du la perte de charge

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 ($W/m^2.K$).

VI.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 VI.9.

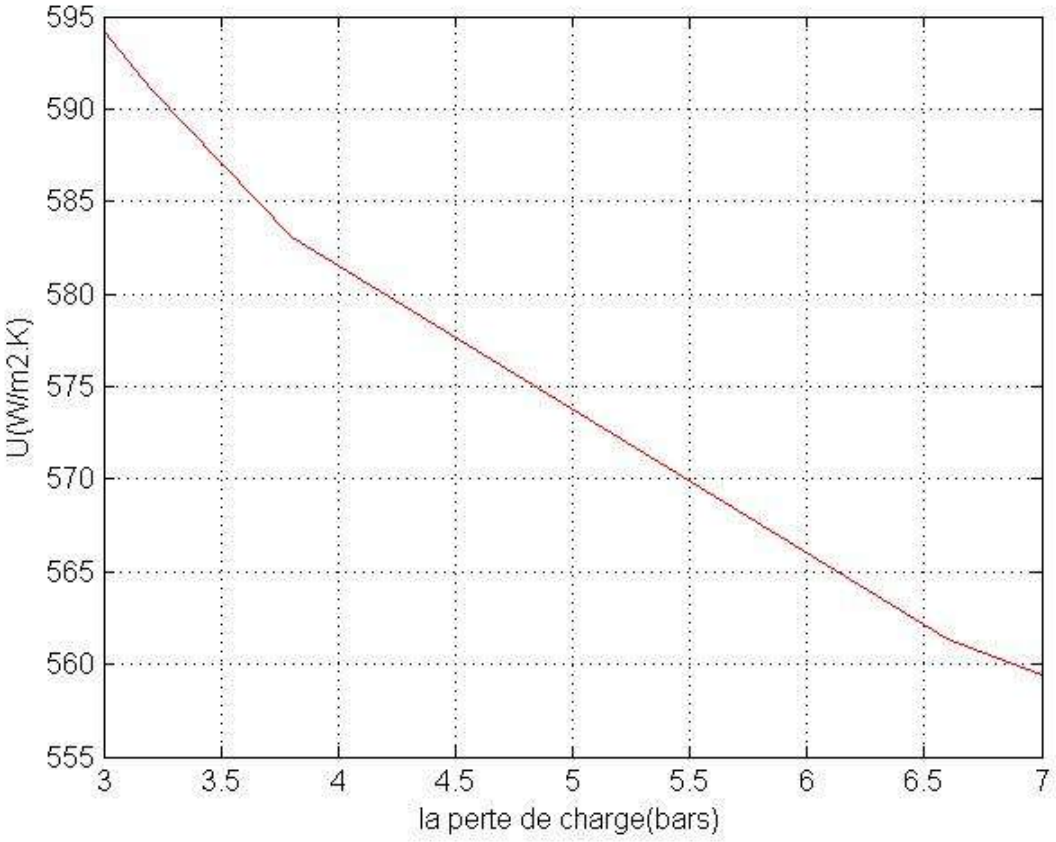


Figure VI.9: Evolution de coefficient d'échange global en fonction du la perte de charge

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.

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

VI.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.

La modélisation du phénomène de l'encrassement des échangeurs de chaleur à plaques lors de la pasteurisation de lait a été réalisée à partir des données de base obtenues d'une laiterie industrielle.

Les résultats obtenus lors d'un suivi journalier de la perte de pression confirment la présence d'un dépôt. Le dépôt qui se forme au niveau du compartiment pasteurisation, résulte du chauffage lait et qui modifié certaines de ses propriétés 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 du 1^{er} ordre. L'encrassement généré, enregistre donc, des perturbations hydrauliques et thermiques qui affectent la production ce qui conduit aux arrêts fréquents pour raison de nettoyage de l'installation.

Les résultats montrent que l'augmentation de la perte de charge lors du cycle de production, en particulier dans l'échangeur principal de pasteurisation, donne une augmentation de la résistance thermique d'encrassement en raison du caractère isolant de la couche de dépôt formé.

Cependant, Autant de cycles de nettoyage que de cycles de production sont effectués chaque jour et les pertes en matière première, ce qui conduit à des pertes économiques assez importantes, et donc une diminution de la production due à ces multiples interruptions.

Les résultats montrent que le lavage qui élimine la couche de dépôt fait ainsi diminuer la résistance thermique d'encrassement, en particulier dans l'échangeur principal de pasteurisation.

Donc pur diminuer l'encrassement on peut proposer quelques recommandations :

-diminuer la température de pasteurisation, sans altérer la qualité microbiologique du lait et la santé des consommateurs.

-diminuer la dureté d'eau utilisée pour la préparation à partir des poudres de lait.

-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

Et comme suite de ce travail, nous proposons la réalisation d'un programme pour le calcul de la résistance d'encrassement 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, Simulation numérique de l'encrassement des échangeurs de chaleur à plaques lors d'une phase de pasteurisation, VII^{ème} Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes 23-25 mai 2005, Saint-Malo France.

[2] Romain Jeantet, Michel Roignant, Gérard Brulé.

Génie des procédés appliqués à l'industrie laitiers. Editions Tec et Doc, (2000).

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

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

[5] fascicule de technique d'Ingénieur « Echangeur de chaleur : description des échangeur » B2 341, 5-(1995).

[6] 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.

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

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

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

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

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

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

[12] 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).

[13] 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).

[14] 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).

[15] 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).

[16] CHARPENTIER, J., C., “Techniques de l’ingénieur”, J1080 p 9.

[17] Manuel technique de l’installation” STERITHERM Le système UHT le plus économique sur le marché”.

[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

ANNEXE2

Partie production

temps	ΔP=Ps-Psl	Coefficient d'échange global U ($W/m^2.K$)	Résistance d'encrassement R_f ($m^2.K/W\ 10^{-3}$)
09 :50	1.95	617.9340	0.0011
09 :51	1 .95	617.9340	0.0011
09 :56	2	616.4076	0.0012
10 :00	2 .1	613.5147	0.0012
10 :01	2.1	613.5147	0.0012
10 :02	2.1	613.5147	0.0012
10 :03	2	616.4076	0.0012
10 :04	2	616.4076	0.0012
10 :05	2	616.4076	0.0012
10 :06	2	616.4076	0.0012
10 :13	2	616.4076	0.0012
10 :15	2	616.4076	0.0012
10 :16	2.1	613.5147	0.0012
10 :18	2.1	613.5147	0.0012
10 :20	2.1	613.5147	0.0012
10 :21	2.1	613.5147	0.0012
10 :22	2.1	613.5147	0.0012
10 :23	2.1	613.5147	0.0012
10 :24	2.1	613.5147	0.0012
10 :25	2.1	613.5147	0.0012
10 :26	2.1	613.5147	0.0012

ANNEXE3

temps	ΔP=Pe-Ps	Coefficient d'échange global U ($W/m^2.K$)	Résistance d'encrassement R_f ($m^2.K/W\ 10^{-3}$)
09 :50	1.6	630.4732	0.0011
09 :51	1.8	622.8750	0.0011
09 :56	2	616.4076	0.0012
10 :00	2.3	608.2881	0.0012
10 :01	2.5	603.6837	0.0012
10 :02	2.5	603.6837	0.0012
10 :03	2.4	605.9160	0.0012
10 :04	2.2	610.8151	0.0012
10 :05	2.4	605.9160	0.0012
10 :06	2.6	601.5778	0.0012
10 :13	2.8	597.7009	0.0012
10 :15	3.2	591.0417	0.0012
10 :16	3.3	589.5649	0.0012
10 :18	3.5	586.7993	0.0012
10 :20	3.7	584.2564	0.0012
10 :21	4.1	579.7304	0.0013
10 :22	4.3	577.7039	0.0013
10 :23	4.5	575.8118	0.0013
10 :24	4.7	574.0399	0.0013
10 :26	4.9	572.3759	0.0013
10 :27	5.3	569.3312	0.0013

ANNEXE4

temps	**ΔP=Pe-Psl**	**Coefficient d'échange global U ($W/m^2.K$)**	**Résistance d'encrassement R_f ($m^2.K/W\ 10^{-3}$)**
09 :50	3.55	586.1439	0.0012
09 :51	3.75	583.6521	0.0012
09 :56	4	580.7992	0.0013
10 :00	4.4	576.7420	0.0013
10 :01	4.6	576.7420	0.0013
10 :02	4.6	574.9116	0.0013
10 :03	4.4	576.7420	0.0013
10 :04	4.2	578.6994	0.0013
10 :05	4.4	576.7420	0.0013
10 :06	4.6	574.9116	0.0013
10 :13	4.8	573.1951	0.0013
10 :15	5.2	570.0598	0.0013
10 :16	5.4	568.6226	0.0013
10 :18	5.6	567.2622	0.0013
10 :20	5.8	565.9719	0.0013
10 :21	6.2	563.5790	0.0013
10 :22	6.4	562.4666	0.0013
10 :23	6.6	561.4047	0.0013
10 :24	6.8	560.3895	0.0013
10 :25	7	559.4178	0.0013
10 :26	7.4	557.5927	0.0013

ANNEXE 5

Partie lavage

Temps (heure)	ΔP (bars)
12:10	4.7
12:12	4.4
12:20	4.3
12:30	4.2
12:32	3.8
12:40	3.3
12:42	3.1
13:15	3
13:24	2.6
13:30	2.5
13:38	2.5
13:40	2.5

ANNEXE6

temps	**ΔP= Ps-Psl**	**Coefficient d'échange global U ($W/m^2.K$)**	**Résistance d'encrassement R_f ($m^2.K/W\ 10^{-3}$)**
10 :16	2.2	584.1956	0.0012
10:18	2.2	584.1956	0.0012
10:20	2.2	584.1956	0.0012
10:24	2.2	584.1956	0.0012
10:25	2.2	584.1956	0.0012
10 :35	2 :2	584.1956	0.0012
11:06	2.2	584.1956	0.0012
11:11	2.2	584.1956	0.0012
11:13	2	584.1956	0.0012
11:15	2	584.1956	0.0012
11:17	2	584.1956	0.0012
11:20	2	584.1956	0.0012
11:22	2	584.1956	0.0012
11:28	2	584.1956	0.0012
11:30	2	584.1956	0.0012
11:42	2	584.1956	0.0012
11:55	2	584.1956	0.0012
12:06	2	584.1956	0.0012

ANNEXE7

temps	ΔP= Pe-Ps	Coefficient d'échange global U ($W/m^2.K$)	Résistance d'encrassement R_f ($m^2.K/W\ 10^{-3}$)
10 :16	4.4	553.6352	0.0013
10:18	4.6	551.9966	0.0013
10:20	4.8	550.4602	0.0013
10:24	1.6	601.8774	0.0012
10:25	1	633.0073	0.0011
10:35	0.8	650.1406	0.0011
11:06	0.8	650.1406	0.0011
11:11	3	569.2875	0.0013
11:13	2.2	584.1956	0.0012
11:15	2	589.2221	0.0012
11:17	2	589.2221	0.0012
11:20	2.2	584.1956	0.0012
11:22	2.2	584.1956	0.0012
11:28	2.2	584.1956	0.0012
11:30	2.2	584.1956	0.0012
11:42	2.2	584.1956	0.0012
11:55	2	589.2221	0.0012
12:06	2	589.2221	0.0012

ANNEXE8

temps	ΔP= Pe-Psl	Coefficient d'échange global U ($W/m^2.K$)	Résistance d'encrassement R_f ($m^2.K/W\ 10^{-3}$)
10 :16	7	538.1391	0.0014
10:18	6.8	539.0076	0.0014
10:20	6.6	539.9150	0.0014
10:24	3.8	559.2930	0.0013
10:25	3.2	566.4473	0.0013
10:35	3	569.2875	0.0013
11:06	2.4	579.7948	0.0012
11:11	2.1	586.6216	0.0012
11:13	1.9	592.0191	0.0012
11:15	1.6	601.8774	0.0012
11:17	1.2	620.1680	0.0011
11:20	1	633.0073	0.0011
11:22	0.9	640.8966	0.0011
11:28	0.4	714.4252	0.0009
11:30	0.2	797.5363	0.0008
11:42	0.1	900.9445	0.0006

ANNEXE9

PROGRAMME MATLAB :

```
clear
clc
format short
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=[];
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 valeurs 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

t=[0 1 6 10 11 12 13 14 15 16 23 25 26 28 30 31 32 33 34 35 36]; % temps en heures
figure
plot(t,dp,'m')
xlabel('Temps')
ylabel('la perte de charge')

grid
```