

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère De l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene

U.S.T.H.B.

Faculté de Génie Mécanique et de Génie des Procédés



**MEMOIRE**

**Présenté pour l'obtention du diplôme de MAGISTER**

**EN : Génie des Procédés**

**Spécialité : Energétique des Procédés**

**Par : KEBIRI Samia**

**THEME**

**Encrassement d'un échangeur de chaleur à plaques  
lors de la stérilisation du lait**

Soutenu publiquement, le 19/05/2010, devant le jury composé de :

Mme F.BENTAHAR	Professeur USTHB	Présidente
Mr A. MOUHEB	Maître de conférences USTHB	Directeur de Mémoire
Mr M.BELMADANI	Maître de conférences USTHB	Examinateur
Mme L.TOUMI	Maître de conférences USTHB	Examinatrice

## **REMERCIEMENTS**

*Je tiens à remercier très sincèrement Monsieur le Professeur **L.OUFER**, pour m'avoir accueilli au sein de son équipe de recherche du laboratoire de phénomènes de transfert de la Faculté de Génie Mécanique et de Génie des Procédés, de l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene. Je lui souhaite un prompt rétablissement.*

*Ce travail a été supervisé et dirigé par Monsieur **A. MOUHEB**, Maître de conférences à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene d'Alger (USTHB), à qui j'exprime ma profonde gratitude pour l'aide et l'attention qui m'ont été apportées.*

*J'adresse mes aimables remerciements à Madame **F.BENTAHAR**, Professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene d'Alger (USTHB) qui a accepté de présider le Jury de soutenance.*

*Des remerciements sont également adressés à Madame **L.TOUMI**, Maître de conférences à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene d'Alger (USTHB) et à Monsieur **M.BELMADANI**, Maître de conférences à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene d'Alger (USTHB), lesquels ont accepté d'apprécier ce travail de recherche.*

*J'exprime aussi toute ma reconnaissance **aux membres de l'équipe du laboratoire et à tous ceux qui m'ont aidés et encouragés** pendant la durée de ce travail.*

*Un grand merci à tout le personnel de **l'unité UHT** et du **laboratoire d'analyses de COLAITAL** pour leurs bons soins.*

*Des sentiments respectueux à Monsieur **S.GUESSOUM** pour **l'accueil, l'aide et le temps consacré.***

*Je ne remercierai jamais assez, **ma Famille** qui m'a encouragée à mener à terme ce travail.*

☆ Dédicace ☆



*Je dédie ce travail à :*

*La mémoire de tous ceux qui me sont chers et qui sont partis trop tôt,*

*qu'ils reposent en paix ;*

*à toute ma famille qui n'a jamais cessé de croire en ma volonté et mon ambition ;*

*À tout mes ami(e)s qui se reconnaissent ;*

*À Monsieur L. OUFER, qui m'a appris que la persévérance est la clef du succès ;*

*À mon futur mari qui m'a toujours soutenu.*

*Samia.*

## **RESUME**

Ce travail consiste à étudier l'encrassement par le lait écrémé dans un échangeur de chaleur à plaques de type H7-RC. La première partie est une description de l'installation U.H.T permettant de comprendre la circulation du lait à l'intérieur de cet échangeur ainsi que le procédé de production et celui de nettoyage, en donnant ensuite le mécanisme et les types d'encrassement existant (encrassement par entartrage). Dans la deuxième partie, l'augmentation de la perte de charge au cours du temps et l'étude des caractéristiques de la poudre (solubilité, dispersibilité, etc.), confirment la formation d'un dépôt contenant tous les composants du lait (essentiellement protéines et sels minéraux) et enfin une évaluation économique des pertes causées par ce phénomène a été faite pour aboutir à une conclusion générale ouvrant à de nouvelles perspectives à travers les différentes recommandations proposées.

Mots clés : Echangeur de chaleur à plaques, Poudre de lait écrémé, Ecoulement turbulent, Perte de charge, Résistance d'encrassement, Dépôt

## **ABSTRACT**

This work consists to study the fouling of skimmed milk in plate heat exchangers. The first part in the description of installation allows understanding the circulation of milk inside this exchanger, and the process of production and cleaning. After that we give the mechanism and kinds of fouling (exceptionally fouling by chemical reaction and entartrage). In the second part, the increase of pressure drop and study of characteristics of powder, confirm presence of deposit containing all component of milk (essentially protein, mineral salt) and finally, an economic analysis to this phenomena is done in order to leave to the final conclusion and some recommendation proposed.

Key words: Plate heat exchangers, Powder of skimmed milk, Turbulent flow, Pressure drop, Fouling resistance, Deposit.

## NOMENCLATURE

Symbole	Définition	Unité
A	Surface d'échange de chaleur	m <sup>2</sup>
Bi <sub>p</sub>	Nombre de Biot	-
C	Quantité totale de NaOH utilisée	Kg
C <sub>1</sub>	Quantité de NaOH utilisée lors du premier passage	Kg
C <sub>2</sub>	Quantité de NaOH utilisée lors du deuxième passage	Kg
C <sub>3</sub>	Quantité de HNO <sub>3</sub> utilisée	Kg
C <sub>p</sub>	Chaleur spécifique	J/Kg°C
d <sub>e</sub>	Diamètre hydraulique de l'échangeur encrassé	m
D <sub>0</sub>	Diamètre hydraulique de l'échangeur propre (diamètre initial)	m
e	Épaisseur de la plaque	m
e <sub>j</sub>	Distance entre les plaques	m
h <sub>f</sub>	Coefficient de transfert de chaleur du fluide froid	W/m <sup>2</sup> °C
h <sub>c</sub>	Coefficient de transfert de chaleur du fluide chaud	W/m <sup>2</sup> °C
k <sub>1</sub>	Conductivité thermique de la plaque	W/m°C
k <sub>2</sub>	Conductivité thermique du dépôt	W/m°C
m <sub>T</sub>	Masse totale	Kg
Nu	Nombre de Nusselt	-
N	Coût de nettoyage	DA
N <sub>1</sub>	Coût de NaOH	DA
N <sub>2</sub>	Coût de HNO <sub>3</sub>	DA
N <sub>3</sub>	Coût d'eau	DA
P	Pression du fluide	bars
PJ	Production journalière	l
P <sub>1</sub>	Coût de poudre de lait utilisée	DA/J
P <sub>2</sub>	Coût dû à la formation du dépôt	DA/J
P(x)	Masse du dépôt	Kg
Pr	Nombre de Prandtl	-
Q	Débit du fluide	m <sup>3</sup> /s
Q <sub>1</sub>	Débit d'eau	m <sup>3</sup> /s
Q	Quantité totale d'eau utilisée lors du nettoyage	l
q <sub>1</sub>	Quantité de poudre de lait utilisée	Kg
q <sub>2</sub>	Quantité du dépôt formée	Kg
Re	Nombre de Reynolds	-
R <sub>d</sub>	Résistance d'encrassement pour une surface sale	m <sup>2</sup> °C/W
R <sub>m</sub>	Résistance d'encrassement pour une surface propre	m <sup>2</sup> °C/W
R <sub>∞</sub>	Résistance asymptotique d'encrassement	m <sup>2</sup> °C/W
T	Température moyenne du fluide	°C
t <sub>d</sub>	Temps d'induction	s
U	Coefficient global de transfert de chaleur pour une surface propre	W/m <sup>2</sup> °C
U <sub>0</sub>	Coefficient global de transfert de chaleur pour une surface sale	W/m <sup>2</sup> °C
U	Vitesse du fluide	m/s
V <sub>p</sub>	Volume des particules du fluide	m <sup>3</sup>
V <sub>T</sub>	Volume total du fluide	m <sup>3</sup>

TH	Titre Hydrométrique	°F
TA	Titre Alcalimétrique	°F
TAC	Titre Alcalimétrique Complet	°F
EST	Extrait Sec Total	g/l
ESD	Extrait Sec Dégressif	g/l

- **SYMBOLES GRECQUES :**

- $\rho_d$  : Masse volumique du dépôt,  $\text{kg/m}^3$
- $v_d$  : Vitesse de formation du dépôt,  $\text{m/s}$
- $v_r$  : Vitesse de réentraînement,  $\text{m/s}$
- $\rho_0$  : Viscosité dynamique de l'eau,  $\text{kg/m.s}$
- $\rho$  : Viscosité dynamique du mélange,  $\text{kg/m.s}$
- $\tau$  : Couche limite thermique
- $\theta$  : Constante de temps
- $D$  : Diffusivité de l'échangeur
- $\alpha$  : Degré d'encrassement


- **INDICES :**

- c** : Chaud
- d** : Dépôt
- e** : Entrée du lait dans le compartiment stérilisation
- m** : Mélange
- max** : Maximum
- p** : paroi de la plaque
- s** : Sortie du lait dans le compartiment stérilisation
- sl** : Sortie du lait de l'échangeur
- T** : Total
- ve** : Vapeur entrante
- vs** : Vapeur sortante

# Sommaire

---

<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	1
<b>CHAPITRE I : RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES</b>	
I.1 TRAITEMENT UHT	3
I.2 ENCRASSEMENT DES ECHANGEURS DE CHALEUR A PLAQUES PAR LE LAIT	5
I.3 LES ETAPES D'ENCRASSEMENT	10
I.4 CLASSIFICATION DES DEPÔTS	14
I.5 QUELQUES TRAVAUX RELATIFS A L'ENCRASSEMENT	15
<b>CHAPITRE II : DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET METHODES</b>	
II.1 DESCRIPTIF DE L'INSTALLATION	18
II.2 CYCLE DE PRODUCTION	22
II.3 SPECIFICATION DU MELANGE DE CHARGE ET ANALYSES	26
II.4 CYCLE DE NETTOYAGE	33
<b>CHAPITRE III : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION</b>	
III.1 INTERPRETATION DES RESULTATS D'ANALYSES	34
III.2 DETERMINATION DES COMPOSANTS DU DEPOT	36
<b>CHAPITRE IV : PERTE DE PRESSION</b>	
IV.1 PERTE DE PRESSION LORS D'UN CYCLE DE PRODUCTION	38
IV.2 PERTE DE PRESSION LORS D'UN CYCLE DE NETTOYAGE	44
<b>CHAPITRE V : MODELISATION DE L'ENCRASSEMENT</b>	
V.1 CALCUL DU COEFFICIENT DE TRANSFERT DE CHALEUR GLOBAL	51
V.2 EVOLUTION DE LA RESISTANCE D'ENCRASSEMENT AU COURS DU TEMPS	58
V.3 EVOLUTION DU DEGRE D'ENCRASSEMENT AU COURS DU TEMPS	62
<b>CHAPITRE VI : IMPACT ECONOMIQUE</b>	66
<b>CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS</b>	68
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	
<b>ANNEXES</b>	



*Introduction Générale*

Profusément longtemps, l'encrassement de part sa diversité, sa complexité et les problèmes économiques qu'il engendre dans les industries pétrochimiques et alimentaires a suscité l'intérêt de beaucoup de chercheurs. Il est défini comme l'accumulation de matières et de substances indésirables sur une surface chauffée, est considéré comme l'un des problèmes majeurs non résolus dans le domaine des échangeurs de chaleur (Taborek et al., 1972), plus particulièrement dans les industries agro-alimentaires, de point de vue *thermosensibilité des constituants des produits alimentaires (protéines, sels minéraux, vitamines, etc.) et stabilisation thermique de ces derniers*. L'industrie laitière est, à ce propos, un excellent exemple et de ce fait, un thème central de la présente étude. A savoir que de nos jours, ce problème n'est pas encore maîtrisé, car les réactions chimiques qui existent lors de l'échange thermique en présence du lait ne sont pas connues ; la composition du dépôt est quant à elle connue.

Le lait, est donc un produit générateur d'encrassements lors de sa pasteurisation, de sa stérilisation et éventuellement de sa concentration. Le dépôt formé réduit la section de passage du fluide, ce qui conduit à une diminution de l'efficacité thermique entraînant en même temps une augmentation de la perte de charge. De plus, des pertes économiques importantes sont dues au pompage et au nettoyage (mécanique ou chimique) fréquent des installations pour préserver les qualités hygiéniques de ces dernières et celles du produit traité. Des frais d'achat supplémentaires sont notés afin de remplacer les équipements détériorés au fil des années. Ces arrêts entraînent également une perte de la production.

L'objectif de ce travail dont la partie expérimentale est réalisée au Complexe Laitier d'Alger (COLAITAL) de BIRKHADEM, est d'étudier l'encrassement par réaction chimique et par entartrage d'un échangeur de chaleur à plaques (cas d'un steritherm) lors du chauffage du lait à Ultra Haute Température (UHT). Le besoin de cette étude est dicté par les perturbations hydrauliques, thermiques, ainsi que les pertes économiques qui résultent du nettoyage des stérilisateur pour des raisons de sécurité alimentaire évidentes après *chaque arrêt fréquent* de la production enregistré par jour.

Les objectifs spécifiques peuvent se résumer en deux principaux points:

- 1) Essayer de proposer des solutions à cette problématique et donc limiter les coûts liés au nettoyage et à l'arrêt de la production (coûts énergétique et de process), tout en suivant les paramètres opératoires, ce qui consiste à :
  - relever les paramètres de marche (température du fluide, pression).
  - suivre la qualité de la charge.
  - suivre l'évolution de la perte de charge.
  - analyser le dépôt.
- 2) Modéliser l'encrassement.

Dans ce but, et afin de poursuivre les travaux réalisés dans le projet de mémoire de fin de études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en Génie des Procédés, le travail est axé sur six chapitres, organisés comme suit:

**Le chapitre I** est relatif à des données de la littérature portant sur le traitement UHT, les étapes et les types d'encrassement par le lait, ainsi qu'un rappel sur quelques travaux réalisés sur ce phénomène. **Le chapitre II** est une description du dispositif expérimental et du process. **Le chapitre III** concerne la partie expérimentale portant sur le suivi des paramètres de marche et sur les analyses à effectuer. **Le chapitre IV** est consacré au suivi de la perte de pression expérimentale lors des cycles de production et de nettoyage. **Le chapitre V** est une modélisation du dépôt basée sur un programme Fortran. **Le chapitre VI** présente le calcul de l'impact économique engendré par l'encrassements. Enfin, vient la conclusion générale du présent travail, ouvrant à de nouvelles perspectives à travers les différentes recommandations proposées.

# *Chapitre I*

## *Rappels Bibliographiques*

### INTRODUCTION :

Les contraintes économiques ont poussé les chercheurs à s'intéresser de plus près à l'encrassement afin de lutter efficacement contre ce problème.

Pour mieux comprendre ce phénomène qui se produit au niveau de COLAITAL, il est nécessaire de définir d'abord, le type de traitement que subit le lait, ensuite, d'introduire une classification pour les différents types d'encrassement, et enfin, d'essayer de comprendre le mécanisme de ces derniers.

### I.1 TRAITEMENT UHT :

#### I.1.1 Définition du lait :

Le lait est un liquide opaque blanc mat, plus ou moins jaunâtre, il est caractérisé par ses différentes phases en équilibre instable [1] :

- Une phase aqueuse contenant en solution des molécules de sucre, des ions et des composés azotés.
- Des phases colloïdales, constituées de deux types de colloïdes protéiniques.
- Des globules gras en émulsion dans la phase aqueuse.

La densité du lait est de 1,030 à 1,034 et son pH est proche de la neutralité: 6,6 à 6,8.

#### I.1.2.Composition :

C'est un mélange complexe constitué de 90% d'eau. Le diagramme (I.1) ne fait apparaître que les grandes catégories de constituants du lait et les valeurs données sont des valeurs moyennes. On remarque que le constituant principal est l'eau avec 902 g/l tandis que la matière sèche représente que 130 g/l [1].

### I.1.3 Le lait stérilisé à Ultra-Haute-Température (U.H.T) [2] :

C'est un lait soumis à un chauffage intense et bref généralement à des températures *de 135-140°C pendant quatre secondes* pour la destruction des enzymes et des micro-organismes pathogènes présents dans le produit. Il est ensuite conditionné aseptiquement dans un récipient stérile et hermétiquement clos.

Le procédé s'opère en continu et en circuit fermé pour prévenir tout risque de contamination.

Deux méthodes de traitement U.H.T peuvent se pratiquer au choix :

- *Chauffage et refroidissement indirect* dans un échangeur de chaleur.
- *Chauffage direct* par injection de vapeur et refroidissement par expansion sous vide.

**Remarque :** le traitement indirect est le plus fréquent pour des raisons énergétiques à savoir qu'il concerne 70% des installations [2].

### I.1.4 Les avantages de ce traitement [3] :

- Economie de vapeur.
- Economie d'eau de refroidissement.
- Grande plage de débit 1.000 - 30.000 l/h.
- Fiabilité.
- Excellente qualité des produits car ce traitement n'a pas un effet négatif sur le goût, la valeur nutritive et la teneur en vitamines comparé à un produit pasteurisé.

### I.2 ENCRASSEMENT DES ECHANGEURS DE CHALEUR A PLAQUES PAR LE LAIT:

L'encrassement est un phénomène que rencontrent les industries, défini comme étant la déposition de matières indésirables sur la surface d'échange de chaleur [4].

Six catégories d'encrassement ont été identifiées par Epstein [5] à savoir :

- 1. Encrassement particulaire :** Il s'agit du dépôt puis de l'accumulation sur les surfaces d'échange de particules transportées par l'écoulement des fluides industriels.
- 2. 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 de la réaction qui se forment, restent sur la surface d'échange et 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 du type particulaire.
- 3. Encrassement par entartrage :** Il est généralement associé à la production d'un solide cristallin à partir d'une solution liquide, il dépend donc de la composition de l'eau industrielle.
- 4. Encrassement Biologique :** Il est dû au développement de micro-organismes (bactéries, algues ou champignons) qui créent un film au contact de la surface d'échange.
- 5. Encrassement par réaction chimique :** On rencontre ce type d'encrassement quand une réaction chimique se produit près d'une surface d'échange et que les solides produits par la réaction s'y déposent. Cette réaction est souvent une polymérisation. Il en résulte la formation d'un dépôt. Les domaines concernés sont essentiellement l'industrie pétrochimique, l'industrie agro-alimentaire (Pasteurisation et stérilisation du lait) et les circuits de chauffage utilisant des fluides organiques.

**6. Encrassement par solidification :** Il s'agit de la solidification d'un liquide pur au contact d'une surface d'échange sous-refroidie (formation d'une couche de glace à l'intérieur des conduites ou de givre) ou du dépôt d'un constituant à haut point de fusion d'un liquide au contact d'une surface de transfert de chaleur froide (dépôt des hydrocarbures paraffiniques).

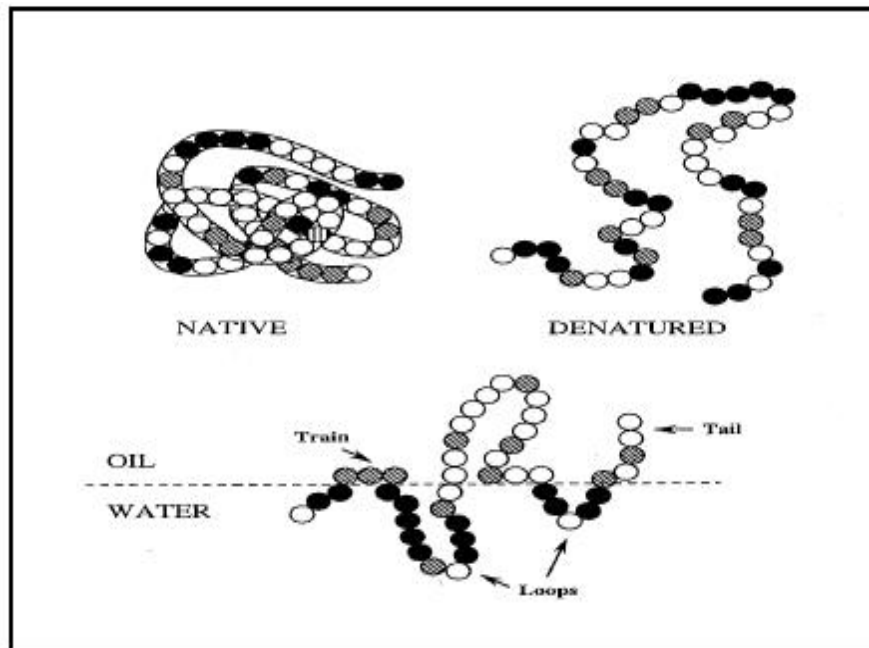
En général, les dépôts formés sont le résultat de la combinaison d'au moins deux de ces types d'encrassement. A cet effet, *l'encrassement par réaction chimique et par entartrage* observés simultanément, feront l'objet de notre étude. Ils résultent de l'augmentation de la température du lait qui modifie certaines de ses propriétés et le rend instable, ce qui entraîne la formation d'un dépôt de solides sur la surface interne de l'échangeur de chaleur n'affectant pas considérablement la composition du lait. Cependant, ce dépôt génère des perturbations hydrauliques et thermiques conduisant à l'arrêt de la production pour le nettoyage des équipements concernés afin de reconstituer la surface initiale propre de l'échangeur et assurer ainsi la qualité et l'hygiène des productions ultérieures. Ces deux types d'encrassement qui se forment sur les plaques de l'échangeur de chaleur sont définis comme suit :

### I.2.1 Encrassement par réaction chimique :

Le lait se divise en deux grandes familles de protéines: *les caséines* qui représentent 80-85% du total, et *les albumines et globuline* représentant le reste. Chaque protéine a une conformation native qui pourrait être modifiée par plusieurs facteurs tels que *la concentration de sel, la température, le changement de milieu et aussi l'effet thermique intense*, et donnera lieu au phénomène de la *dénaturation des protéines*. Elles se passe en trois étapes :

- Déroulement des protéines.
- Formation du dépôt s-s.
- Précipitation sous l'influence des ions calcium.

Le schéma de la figure I.1 traduit cette dénaturation :



**Fig. I.1 : Schéma de la dénaturation thermique des protéines de lait à l'interface solide-liquide [1]**

Le rôle joué par les protéines et spécialement la  $\beta$ -lactoglobuline (figure I.2) a été reconnu dans beaucoup d'études récentes sur l'encrassement par le lait. Elle représente à elle seule 50% des changements thermiques du lait. C'est une protéine globulaire composée de 162 acides aminés et qui présente un poids moléculaire de 18,3.

La température influence la structure tridimensionnelle de la  $\beta$ -LG; bien qu'elle se trouve principalement sous forme dimérique au pH du lait ; les dimères se dissocient en monomères lorsque la température atteint environ 65°C.

Parallèlement aux changements structuraux induits par la hausse de la température et/ou du pH, surviennent aussi des réactions d'échange sh/s-s. Ces réactions sont impliquées dans le mécanisme de dénaturation de la  $\beta$ -LG, de même que dans sa gélification et sont favorisées à pH neutre ou basique.

Malgré l'abondance des travaux réalisés pour comprendre la  $\beta$ -LG; sa fonction physiologique n'est pas complètement élucidée. Toutefois, sa structure similaire à celle des lipocalines

## CHAPITRE I : RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES

---

pourrait lui conférer un rôle de transport. En outre, sa capacité de liaison des molécules hydrophobes, en particulier le rétinol, est maintenant connue [1].

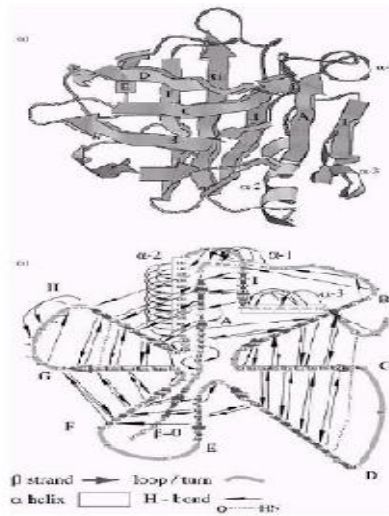


Fig. I.2 : Structure de la  $\alpha$ -LG [1]

L'alpha-lactalbumine (figure I.3) est aussi une protéine du lait qui participe à la dénaturation thermique mais à des proportions moindres et son poids moléculaire est de 14,2. Elle est composée de 123 acides aminés et peut lier une molécule de calcium qui aide à stabiliser sa conformation et à améliorer sa résistance aux traitements thermiques.

La conformation tridimensionnelle de l'alpha-LA, avec ou sans ion calcium fait l'objet de plusieurs études afin de comprendre les mécanismes de la dénaturation de cette protéine.

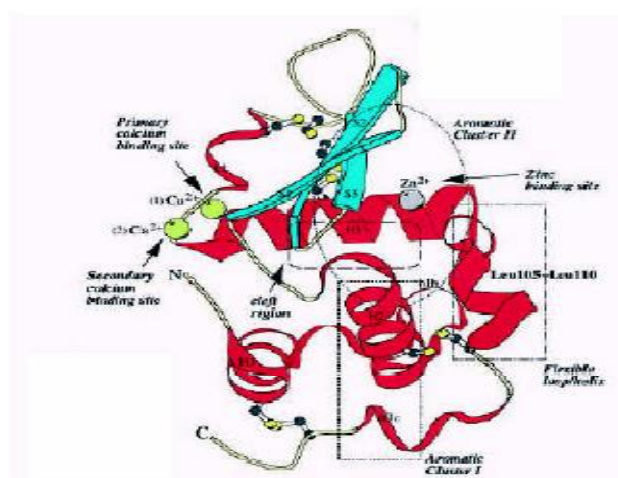


Fig. I.3 : Structure de l'alpha-LA [1]

## CHAPITRE I : RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES

Le modèle de Toyota et Fryer (1997) initialement proposé par DE JONG & al (1992) est l'un des modèles les plus utilisés [6]. Pour un lait chauffé au dessus de 65°C, les protéines natives "N" (  $\beta$ -lactoglobuline) deviennent thermiquement instables, et sont donc exposées à une dénaturation moléculaire. Ces protéines sont polymérisées d'une manière irréversible et donnent des particules totalement insolubles [7] par une réaction du 1<sup>er</sup> ordre. Ces dernières réagissent pour donner des protéines de type "A", réaction qui se fait dans la couche limite thermique.

Le débit de la formation du dépôt est proportionnel à la concentration des protéines entières car seule une protéine entière se dépose sur la plaque (Fig. I.4).

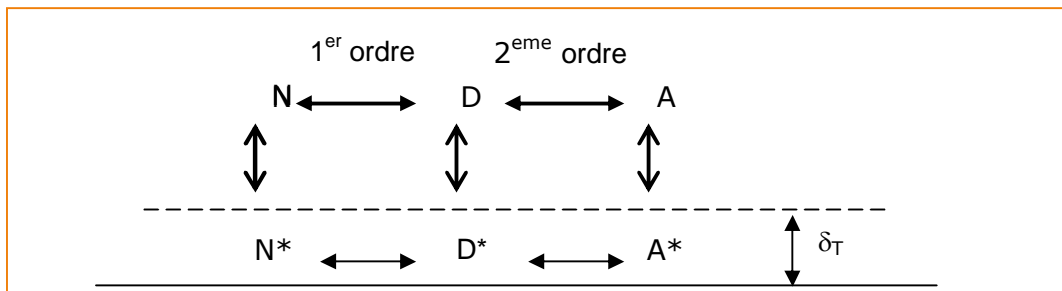


Fig. I.4 : Schéma du dépôt des protéines ([6]).

**Remarque :** La  $\beta$ -lactoglobuline se dénature à 72 °C [8].

### I.2.2 Encrassement par entartrage :

Le dépôt formé contient en plus des protéines du lait, les sels minéraux issus de l'eau de process et de la poudre de lait (Voir chapitre II), ce type d'encrassement dépend donc de la composition de l'eau industrielle sur la surface d'échange et se forme à une température supérieure à 100°C comme suit [5]:

Lorsque les sels dissous sont à solubilité inverse, le liquide devient sursaturé au voisinage de la surface d'échange plus chaude. La cristallisation se produit alors sur la surface et dans ce cas, le dépôt est dur et adhérent. Dans le cas contraire d'une cristallisation se produisant au sein même d'un liquide plus chaud que la surface, le dépôt est plus mou et friable.

### I.3 LES ETAPES D'ENCRASSMENT:

Les étapes d'encrassement peuvent se décomposer chronologiquement en cinq phases comme suit [9]:

#### 1. Initiation :

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

#### 2. Transfert des particules à la paroi :

Les particules sont transportées jusqu'au voisinage de la paroi grâce aux forces extérieures (thermique, électrique, etc.).

#### 3. Adhésion des particules :

L'adhésion des particules vers la paroi suivant les forces d'attraction moléculaire (forces de Van der Waals), et les forces électriques ou capillaires.

#### 4. Réentraînement des particules déposées :

Il est lié aux forces de cisaillement s'exerçant sur le dépôt et se produit de deux façons:

- **Par érosion :** Lorsque la force aérodynamique est supérieure aux forces d'adhésion des particules.
- **Par écaillage :** Lorsqu'il concerne des agglomérations de particules.

#### 5. Vieillissement du dépôt :

Le changement de la texture du dépôt d'origine chimique ou cristalline implique soit sa consolidation soit son écaillage.

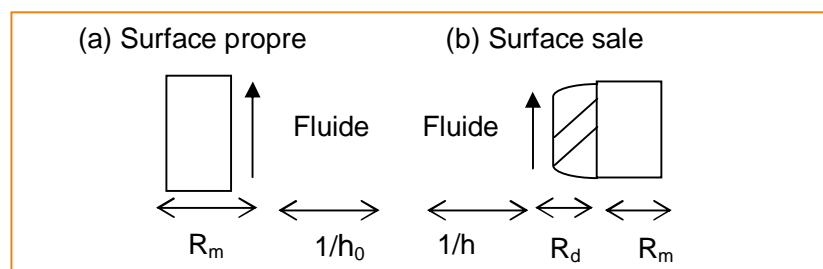
### I.3.1 Paramètres influençant l'encrassement par réaction chimique :

Il y a plusieurs paramètres qui influencent la formation du dépôt, ce qui rend difficile l'étude de ce phénomène. Parmi ces paramètres, on peut citer :

- La température de l'interface fluide-métal est un paramètre important dans le cas de produits polymérisables contenant des chaînes insaturées (oléines) car une surchauffe peut provoquer une réticulation des gommés présentes [10].
- Les propriétés physico-chimiques du fluide [11].
- Présence de microorganismes dans le lait [5].
- La concentration des réactifs dont l'augmentation implique en général plus de formation du dépôt [12].
- La vitesse du fluide : plus elle est importante, plus l'encrassement est faible [5].
- Le type et les caractéristiques de l'échangeur de chaleur [12].

### I.3.2 Résistance d'encrassement :

L'augmentation de la résistance thermique ( $R_d$ ) issue de la couche de dépôt formé, implique une diminution des performances de l'échangeur de chaleur car, cette couche possède une conductivité thermique plus faible que celle du métal constituant la surface.



**Fig. I.2: Schématisation des différentes résistances thermiques pour une surface propre (a) et une surface encrassée (b) ([9]).**

### I.3.2.1 Evolution de la résistance d'encrassement :

L'évolution de cette résistance au cours du temps peut avoir différentes allures décrites ci-après [9] :

#### a) Evolution linéaire :

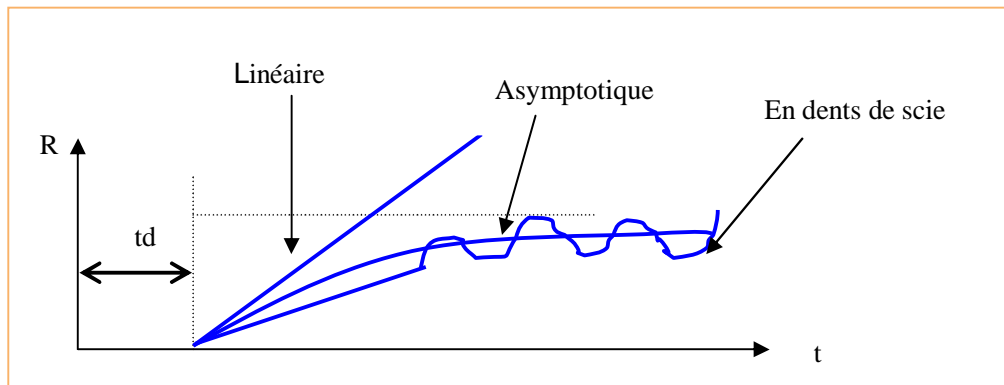
Elle concerne les dépôts durs, sans processus de réentraînement. Elle peut aussi avoir lieu lorsque la différence entre la vitesse de formation du dépôt et la vitesse de réentraînement est constante ( $\dot{\delta}d - \dot{\delta}r = \text{cte}$ ).

#### b) Evolution asymptotique :

Elle concerne le dépôt mou et friable, la vitesse de dépôt est constante et celle de réentraînement est proportionnelle à l'épaisseur de ce dernier.

#### c) Evolution en dents de scie :

Dans la pratique, le réentraînement d'une partie du dépôt modifie l'évolution de la résistance d'encrassement en fonction du temps.



**Fig. I.3: Diverses formes d'évolution de la résistance d'encrassement en fonction du temps ([9]).**

### I.3.2.2 Temps d'induction (td) :

Il correspond à la période d'initiation précédant le démarrage du phénomène de déposition. Dans le cas général, et en faisant un bilan thermique, la résistance d'encrassement peut être définie comme étant la différence entre l'inverse des coefficients globaux de transfert de chaleur pour une paroi sale et propre:

$$R_d = \frac{1}{h_{d,s}} - \frac{1}{h_{d,p}} \quad (\text{m}^2\text{C/W})$$

$$\text{Avec : } \frac{1}{h_{d,p}} = \frac{1}{k_1} + \frac{e}{k_2} + \frac{1}{h_{d,p,ext}}$$

$k_1$  : Conductivité thermique des plaques.

$e$  : Epaisseur des plaques.

**Remarque:** Une étude comparative entre les échangeurs calandre-tube et les échangeurs à plaques a été faite pour montrer la différence de la résistance d'encrassement dans les deux cas. On fait alors appel aux facteurs correctifs recommandés par BEAMA (British Electrical Manufacturer's Association).

### I.3.3 Pénalités dues à l'encrassement :

C'est un phénomène très coûteux pour toutes les industries. A titre d'exemple, les industries agroalimentaire au Netherlands ont dépensé plus de 40 million US\$ (Visser and Jeurink, 1997) [13]. Ces pertes sont dues aux facteurs suivants [14]:

- Arrêt et donc perte de la production pour le nettoyage des équipements seulement.
- Une consommation importante d'énergie résultant d'une puissance de pompage élevée.
- Frais de nettoyage : 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, et 125 million d'Euro en France en 1991 [16].
- Remplacement des appareils détériorés : tubes, joints, etc.

### I.4 CLASSIFICATION DES DEPÔTS:

Le dépôt formé est constitué par des protéines ( -Lactoglobulin, -lactalbumine, caséines), des minéraux et de la matière grasse. Le pourcentage des composés le formant varie selon la température de chauffage du fluide. Lorsque le lait est porté à une température variant entre 75-110°C, le dépôt est protéinique, composé principalement de la -Lg (Lyster 1970; Lalande et autres 1985; Gotham et autres 1992; Delplace et autres 1994; Bylund 1995), les Caséines sont plus résistant à la chaleur mais précipitent suite aux réactions d'acidification (Fox 1989; Visser et Jeurnink 1997). Lorsqu'il est chauffé à une température supérieure à 110°C, il contiendra essentiellement des minéraux.

L'encrassement par le lait peut être classé en deux types d'après :

- a) Burton 1968; Lund et Bixby 1975; Changanani et autres 1997; Visser et Jeurnink 1997: *type A et type B [17]*.

**Type A (protéines) :** Le dépôt est blanc, soft et spongieux et se forme à une température variant entre 80 à 105°C. Il est composé de 50-70% de protéines, 30-40% minéraux et 4-8% d'acides gras.

**Type B (minéraux) :** le dépôt se forme à une température excédant les 100°C, selon Burton le dépôt est de couleur grise caractérisé par une grande granulométrie. Il est formé par 70-80% de minéraux, 15-20% de protéines et par 4-8% d'acides gras.

- b) ATKINS chaque dépôt est formé par deux couches [9] :

- **Une couche molle** en contact avec le fluide.
- **Une couche dure** en contact avec la paroi d'échange thermique.

### I.5 QUELQUES TRAVAUX RELATIFS A L'ENCRASSEMENT :

Dans le cas des industries laitières, plusieurs études sur l'encrassement par le lait (entier ou écrémé) ont été réalisées mais ce problème n'est pas encore résolu, car les transformations chimiques qui existent lors de l'échange thermique en présence du lait ne sont pas connues, la composition du dépôt est quant à elle connue.

Les études relatives à l'évaluation et à la compréhension des phénomènes d'encrassement et de nettoyage ont enregistré leurs premiers progrès significatifs aux environs des années 1965-1970 (Jennings, 1965; Lyster, 1965; Burton, 1968; Schlussler et al.1970). Ces dernières années, après une longue période de stagnation et grâce à l'amélioration des moyens disponibles, des progrès sont intervenus dans les domaines d'analyse de la composition du dépôt, et ceux relatifs à la cinétique et aux mécanismes des réactions (Gallot-Lavallee et al. 1984; Hege, 1984; Lalande et al. 1984 a, b, 1985; Nassauer et Kessler, 1985; Plett, 1985). Les résultats industriels de ces avancées sont néanmoins modestes, dans la mesure où ils se limitent à la conception des échangeurs de chaleur (pasteurisateurs, stérilisateurs) et à leur mode de fonctionnement (écart de températures entre le produit traité et les fluides de service, cycles de nettoyage). Sur la base des expériences réalisées à l'échelle pilote (Corrieu et al. 1979; Lalande et Corrieu, 1979), un capteur apte à mesurer en ligne le degré d'encrassement d'un stérilisateur industriel de lait fonctionnant à Ultra Haute Température (UHT) selon le procédé indirect d'échange de chaleur a été mis au point. Par contre, aucune autre tentative inscrite dans ce sens n'a été réalisée même si, à l'échelle du laboratoire, certains systèmes expérimentaux ont été décrits (Burton, 1966; Ling et Lund, 1978; Fryer et al., 1985; Zilver et al., 1985) [18].

Une récente étude réalisée sur une installation semi-pilote au niveau du laboratoire des phénomènes de transfert (MOUHEB, 2008) qui a pour objectif d'étudier l'influence de deux paramètres opératoires à savoir, la température de la surface d'échange et la vitesse d'écoulement du fluide sur l'encrassement par le lait d'une section chauffée [1]. Les résultats expérimentaux obtenus ont montré que le modèle exponentiel élaboré par Kern et Seaton semble s'appliquer au lait. D'autre part, il a été constaté que l'encrassement avait tendance à diminuer en fonction du débit et à augmenter en fonction de la puissance de chauffe donc de la température de la paroi solide.

## CHAPITRE I : RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES

---

Pour ce qui est des travaux réalisés pour la compréhension du mécanisme de réaction de la dénaturation de la bêta lactoglobuline, Delplace et al (1994) ont montré que le dépôt comprend 3.6% de cette dernière et 5% pour les travaux de Lalande et al (1985). Selon Delsing & Hiddink (1983) et Visser & Jeurink (1997) les protéines se déposent en premier après une durée d'environ 4 secondes, ensuite se déposeront les minéraux. Par contre selon l'étude de Tissier & Lalande (1986), Foster et al (1989) ; Fryer & Belmar-Beiny (1991), les minéraux qui se déposeront en premier suivis des protéines. La dénaturation de ces dernières prédomine l'encrassement selon Lalande et autres(1985), Hege et Kessler (1986), Arne brant et autres (1987), Kessler & Beyer (1991). D'un autre côté, Lalande & René (1988), Gothan et autres (1992) ont observé que les protéines agrégées contrôlent l'encrassement. Delplace et autres (1997) ont conclu que ce type de protéines contribuera à réduire l'encrassement.

D'autres recherches relatives aux étapes qui peuvent contrôler l'encrassement, ont été poursuivies, à citer : Belmar-Beiny et autres (1993), Schreier & Fryer (1995), de Jong & Van der Linden (1992), de Jong et autres (1992), Grijspeerd et autres (2004), sahuo et autres (2005), Nema & Datta (2005), qui ont montré que le transfert de chaleur existant entre la surface d'échange et le lait contrôle l'encrassement. Par contre, Toyoda et autres (1994), Georgiadis et autres (1998), Georgiadis et Machietto (2000), Bansal & Chen (2005), Bansal et autres (1998, 200, 2001), Chen (2000), Bansal & Chen (2005), Bansal et autres (2005) l'ont considéré dépendant plus du transfert de masse.

Le tableau I.1 résume les aspects des mécanismes d'encrassement relatifs aux différentes études [11].

## CHAPITRE I : RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES

**Tableau I.1 :** Aspects des mécanismes d'encrassement

Aspects	Références
La réaction de la dénaturation des protéines est réversible.	de Wit et Swinkles (1980), Anema et McKenna (1996), Changani et al (1997), Chen et al (1998a)
La réaction de la dénaturation des protéines est irréversible.	Ruegg et al (1987), Gotham et al (1992), Roef et de Kruif (1994), Karlsson et al (1996)
Les protéines agrégées résultent d'une réaction irréversible.	Mulvihill et Donovan (1987), Anema et McKenna (1996), Changani et al (1997), Chen et al (1998a)
Les protéines dénaturées gouvernent la réaction.	Lalande et al (1987), Kessler et Beyer (1991), de Jong et al (1992)
Les protéines agrégées gouvernent la réaction.	Lalande et René (1988), Gotham et al (1992), Delplace et al (1997)
La formation des protéines agrégées peut réduire l'encrassement.	de Jong et al (1992), Delplace et al (1997), van Asselt et al (2005)
L'encrassement est essentiellement issu des protéines agrégées. L'encrassement dépend uniquement de réactions protéiniques.	Toyoda et al (1994) de Jong et van del Linden (1992), de Jong et al (1992), Belmar-Beiny et al (1993), Delplace et al (1994, 1997), Schreier et Fryer (1995), Grijspeerdt et al (2004), Sahoo et al (2005), Nema et Datta (2005)
Encrassement dépend du transfert de masse	Toyoda et al (1994), Georgiadis et al (1998), Georgiadis et Macchietto (2000) Chen et al (1998a, 2000, 2001), Bansal et Chen (2005), Bansal et al (2005).

Nous pouvons remarquer, que les résultats de ces travaux réalisés diffèrent d'un chercheur à un autre ce qui explique la difficulté de résoudre ce phénomène qui touche principalement les industries laitières.



*Chapitre II*  
*Dispositif Expérimental*  
*et Méthodes*

### INTRODUCTION :

Pour atteindre les objectifs énoncés précédemment, il est nécessaire de s'appuyer sur des données expérimentales. A cet effet, une description du dispositif expérimental et éventuellement, le cycle de production et de nettoyage s'impose. Les spécifications du mélange de charge (eau-poudre de lait) et les analyses à effectuer sont également décrits.

### II.1 DESCRIPTIF DE L'INSTALLATION:

Le stérilisateur considéré est celui de la laiterie de Birkhadem du *Groupe COLAITAL*, spécialisée dans la transformation et la production de divers produits laitiers tels que le beurre, le lait pasteurisé et le lait stérilisé.

L'installation est composée *d'un échangeur de chaleur à plaques de la société Alfa Laval, d'une armoire de commande et d'un homogénéisateur* représentés dans la figure II.1 :

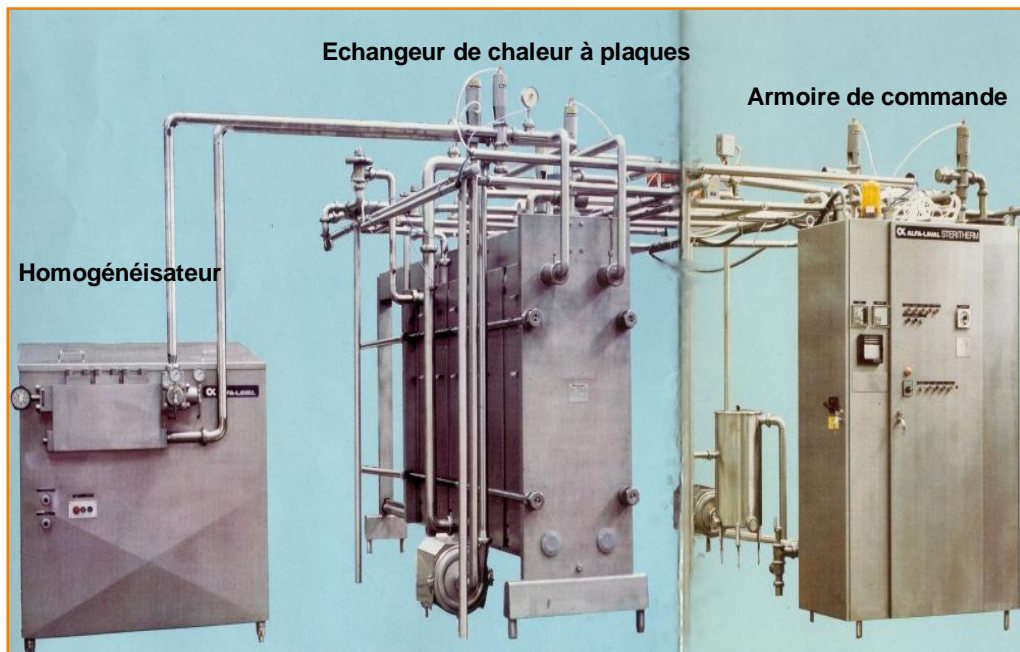


Fig. II.1: Photo du steritherm ([19]).

### 1. Echangeur de chaleur à plaques :

La première conception des échangeurs de chaleur fût en 1923 par Richard Seligman, en 1930 fût leur application dans l'industrie laitière [17]. L'échangeur de chaleur à plaques est considéré comme le cœur du steritherm, il traite un débit de 4400 l/h, de lait entier ou demi-écrémé selon les impératifs de la production. Il est constitué de [19] :

- Un bâti, une barre support, une barre guide et une colonne joint en un cadre stationnaire.
- Un plateau de serrage suspendu entre la colonne et le bâti ; ce dernier glisse sur la barre support et est guidé par la barre guide en bas.
- Une série de plaques de transfert de chaleur suspendue entre le bâti et le plateau de serrage, *disposées en parallèle* de telle sorte qu'un passage sur deux est accessible à chacun des deux fluides. Ces plaques sont façonnées par *estompage*, ce qui assure un *passage turbulent et une haute transmission de chaleur*, elles sont accrochées de telle sorte que la face garniture d'étanchéité faisant face au plateau de serrage et le dos regardant le bâti. Il y a deux types de plaques : *V et H*. Ces dernières peuvent s'intervertir, donc une plaque V retournée à 180° peut se transformer en H et vice versa.

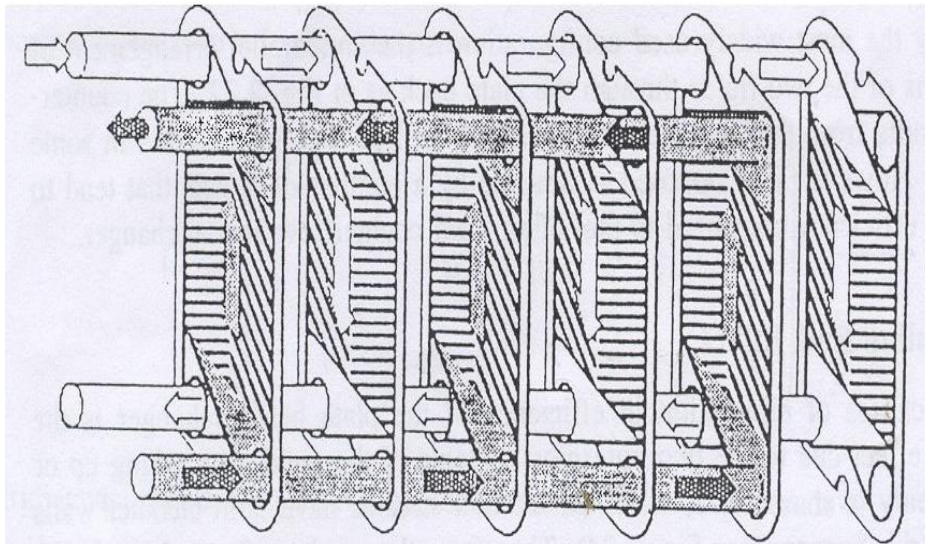


Fig. II.2 : Arrangement parallèle des plaques ([20]).

- Les joints collés dans une rainure le long du bord de la plaque. Les plaques V et H avec joints sont identiques, mais utilisés dans la pile de plaques alternativement retournées à 180° elles auront une fonction différente, étant donné que les joints autour des trous de coins ferment le passage à tous les deux interstices de plaques.

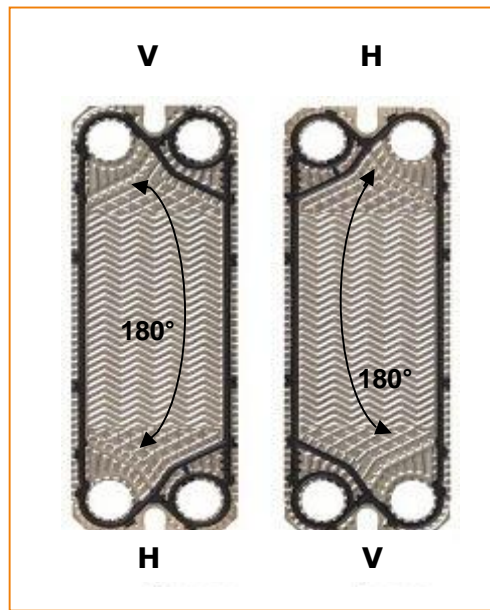


Fig. II.3: Types de plaques ([20]).

- Les cadres intermédiaires ont pour but de diviser l'échangeur de chaleur en diverses sections. Ils sont munis de blocs angulaires *échangeables* et constituent l'organe de liaison entre les sections et/ou les raccords de tuyauterie.
- Deux tubulures de jonctions placées dans le bloc angulaire raccordées à leurs sections respectives dans l'échangeur de chaleur à plaques.

### a. Les Caractéristiques de l'échangeur à plaques utilisé sont:

- Type de l'échangeur : H7-RC.
- Poids de l'échangeur : 1800 Kg.
- Volume du liquide dans l'échangeur : 360 l.
- Pression maximale : 10 bars.
- Température maximale : 150°C.

### b. Avantages et inconvénients de l'échangeur à plaques :

#### Les avantages offerts par l'échangeur à plaques sont [19]:

- Haut rendement thermique dû au rapport élevé surface/ volume ainsi qu'à la forte turbulence engendrée par la géométrie des plaques [21].
- Récupération élevée de l'énergie thermique soit un taux de 90% environ.
- Flexibilité : Selon le nombre de plaques et leur groupage. La capacité de l'échangeur et ses caractéristiques thermiques est déterminée. La disposition des plaques peut être modifiée.
- Faible encombrement: sa taille est inférieure de 20-30% de la taille d'un échangeur de chaleur de type calandre tube. De plus, toutes les opérations de chauffage et de refroidissement du procédé steritherm sont réalisées dans l'échangeur.
- Contrôle rapide.

#### Les inconvénients de l'échangeur à plaques sont énumérés ci-après [19] :

- Ne peut pas s'utiliser pour des fluides très visqueux à cause du faible espace entre les plaques.
- Importante perte de charge.
- Domaines de température relativement faibles même si certains échangeurs à plaques peuvent aller jusqu'à 300°C.
- Faibles débits de fluide.

### 2. Armoire de commande :

Le steritherm est une installation entièrement automatique, donc toutes les opérations sont asservies et surveillées par un programme de service contrôlé par des instructions d'alarme ainsi que d'arrêt d'urgence en cas de fonctionnement perturbé du système. Tous ces organes de commande et de visualisation sont regroupés sur la paroi frontale de l'armoire qui est divisée en trois compartiments de gauche à droite et comprenant [19] :

- Equipement de haute tension.
- Equipement de basse tension.
- Equipement d'asservissement logique.

### 3. Homogénéisateur [3] :

L'homogénéisateur, monté en aval de la section de chauffage PHE I (voir Fig.II.4 de la page 23) et du chambreur, est une technique qui assure une meilleure stabilité du lait à travers la réduction de la taille des globules de la matière grasse de 3 à 6 $\mu$ m à 1 $\mu$ m environ, pour que les protéines se fixent sur leurs surface (augmenter les surfaces d'échange avec le milieu environnant) et les protègent. La poudre de lait est plus soluble est plus fluide car il y a moins de matière grasse libre.

Une plaque supplémentaire avec raccord de soutirage est installée dans l'échangeur thermique à plaque PHE III, pour faire passer le produit dans l'homogénéisateur aseptique, le produit étant retourné au PHE III pour en achever le refroidissement. Du fait qu'il n'y a pas d'homogénéisateur en amont, une pompe est montée dans le circuit pour maintenir la pression nécessaire au niveau de la section de chauffage. Les pressions d'entrée et de sortie de cet homogénéisateur sont de 30 et 6.2 bars respectivement.

## II.2 CYCLE DE PRODUCTION:

Avant de décrire les étapes de production, il est important de connaître l'opération qui en précède, il s'agit de la charge (lait) du steritherm qui en résulte du procédé de recombinaison. Elle consiste à 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 [22] :

- 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.
- 400 Kg de matière grasse (MGLA) ou 15 g/l sont ajoutées.
- Passage dans un homogénéisateur pour fusionner les particules de la matière grasse et rendre le mélange donc plus homogène.
- Dans des tanks 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 stériliser.

### II.2.1 Les étapes de production :

Les étapes de production dans l'unité UHT se résument comme suit [19] :

#### II.2.1.1 Pré-stérilisation :

L'installation doit être stérilisée pendant une trentaine de minutes avec de l'eau chaude portée à la température de 137-140°C. Le cycle de production commence dès que la partie en aval de l'installation est refroidie.

#### II.2.1.2 Production :

Elle se fait selon les étapes suivantes :

- **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.
- **Préchauffage** : Il est assuré dans le compartiment III de l'échangeur à plaques par une récupération de chaleur avec le produit stérilisé.
- **Homogénéisateur (3)** : Voir la page 22.
- **Stérilisation** : Assurée dans le compartiment I par une injection de la vapeur (4) dans de l'eau, cette opération se fait à une température de 135-140 °C et une pression de 4,4 bars.

Le mélange est maintenu à cette température pendant 4 secondes dans un chambreur tubulaire extérieur (5).

- **Refroidissement (récupération de chaleur):** Il se fait par un échange de chaleur dans le compartiment II entre l'eau chaude et le lait stérilisé 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.
- **Conditionnement aseptique :** C'est la dernière étape de la production du lait (6).

### II.2.1.3 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.

**Remarque :** Les compartiments IV et V sont des compartiments supplémentaires de refroidissement utilisés entre autre lors de la pré-stérilisation.

Les étapes de production sont représentées dans la Fig. II.7 :

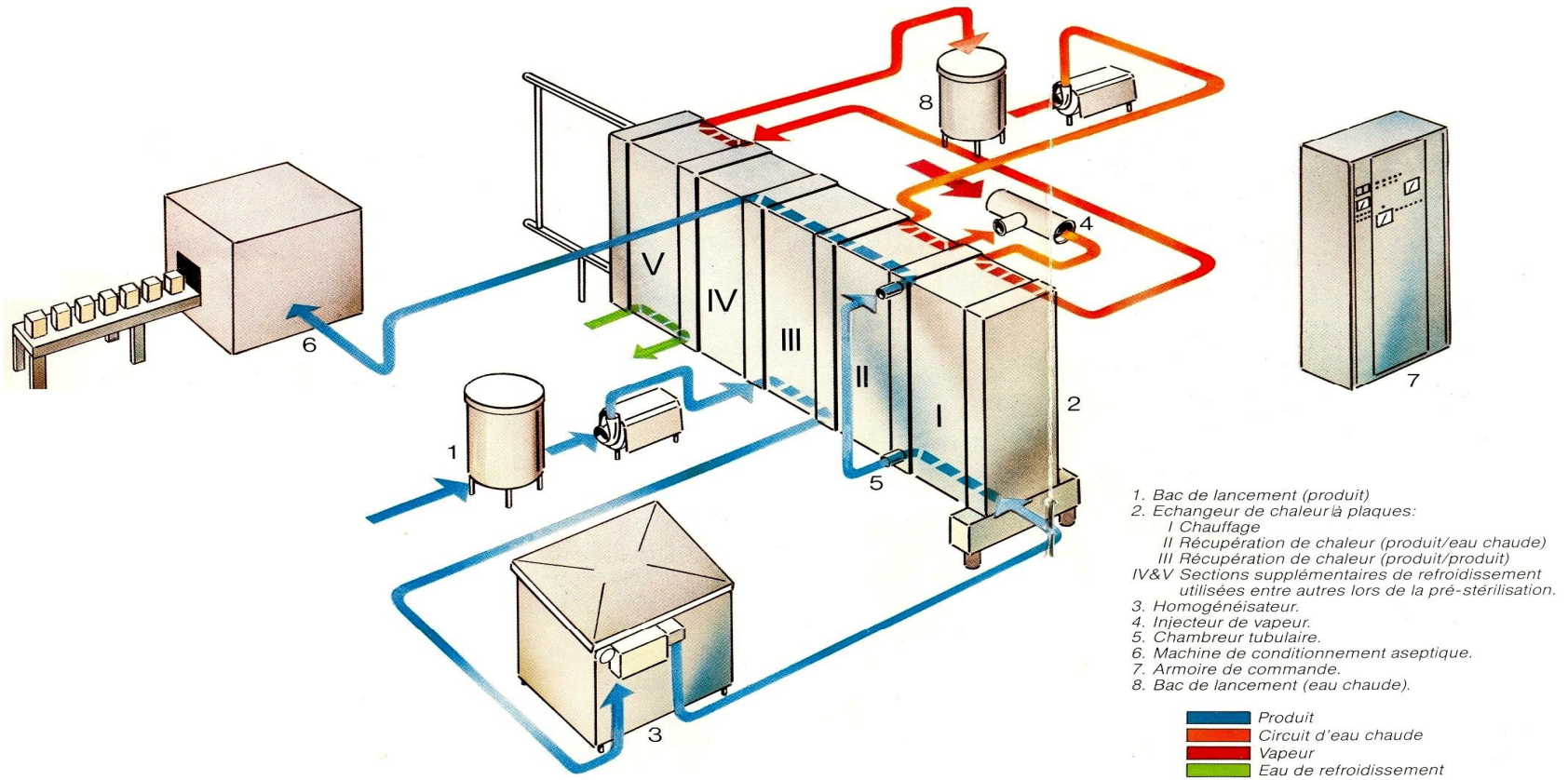


Fig. II.4 : Schéma du cycle de production ([19]).

### II.3 SPECIFICATION DU MELANGE DE CHARGE :

Nous avons cité dans le chapitre précédent, que parmi les facteurs qui peuvent contrôler l'encrassement, les propriétés physico-chimiques du fluide (la charge). A cet effet, une description relative au procédé de production de la poudre de lait et aux méthodes d'analyses des constituants de la charge (eau-poudre de lait) s'impose, afin de déterminer la composition du dépôt formé lors de la production du lait UHT.

#### II.3.1 Poudre de lait:

Le procédé de production généralisé à tout type de poudre est illustré dans la figure suivante à savoir que le type de poudre de lait utilisé est celui du *lait demi-écrémé* :

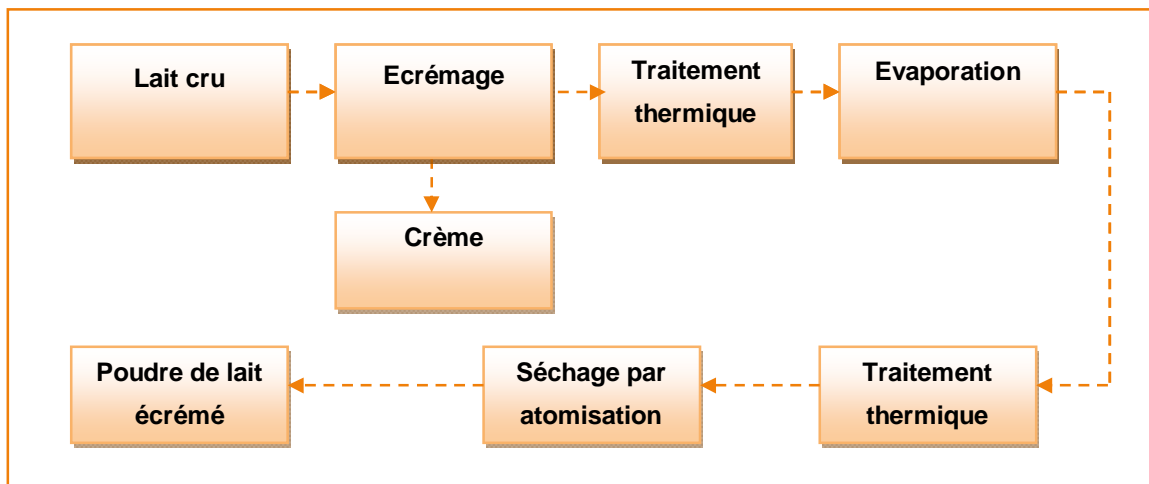


Fig. II.5 : Technique de production du lait en poudre ([2]).

Le lait cru subit au début un traitement thermique avant sa concentration; les principaux objectifs de ce traitement sont :

- La réduction des micro-organismes contenus dans la poudre.
- La vérification des qualités fonctionnelles du lait en poudre (solubilité, mouillabilité, pénétration et dispersibilité), qui sont contrôlées au moyen de l'intensité du couple : température-durée de 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. L'atomisation se fait soit dans :

1. Une boîte de séchage avec buses d'atomisation.
2. Une chambre de séchage cylindrique à fond plat.
3. Une chambre de séchage cylindrique à fond conique.

Pour obtenir une poudre de lait demi-écrémé ayant une bonne qualité, il est fait appel à la méthode d'agglomération des particules. Pendant cette opération, les petites particules individuelles produites par atomisation s'agglomèrent pour former des particules plus épaisses ayant également une bonne porosité, quand ces agglomérats poreux viennent au contact de l'eau, l'effet de capillarité entraîne une mouillabilité rapide, évitant la formation de grumeaux. Cette agglomération se fait selon deux principes différents [23] :

1. **Méthode directe:** Obtention des agglomérats dans la tour d'atomisation lors du séchage.
2. **Méthode indirecte :** Réhumidification de la poudre déjà obtenue par atomisation classique puis séchage.

L'intensité du traitement chimique subit par le lait au cours du séchage et la quantité de protéines non dénaturées restées à l'état soluble lors de ce traitement, nous permet de les classer comme suit [2]:

1. **Low heat "**: Traité à basse température.
2. **Médium heat "**: Traité à une température moyenne.
3. **High heat "**: Traité à une température élevée.

## CHAPITRE II : DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET METHODES

---

Ces trois poudres correspondent à des indices de dénaturation des protéines solubles différentes le plus souvent désignées par les initiales anglaises "WPNI". **Plus cet indice de protéines est élevé, plus faible a été la dénaturation**, comme indiqué dans le tableau II.1 [24]:

**Tableau II.1:** Indice de protéines des poudres de lait

Type de poudre	L'indice "WPNI"
Low heat	> 6
Medium heat	4.5 < WPNI < 5,9
Medium High heat	1,5 < WPNI < 4,4
High heat	< 1,5

Lors du procédé de séchage du lait, des accidents peuvent se produire ayant un impact sur la qualité de la poudre de lait tel que ceux décrits ci-après [2] :

- Inflammation spontanée de la poudre, et cela par une réaction chimique exothermique appelée **réaction de Maillard** entre le lactose et les protéines du lait. C'est une réaction qui débute à 37°C, des particules de la poudre sont brûlées et il y a risque d'une caramélisation rapide lors de la stérilisation du lait. Cette réaction nécessite un faible niveau d'énergie pour son initiation mais présente des qualités auto catalytiques dès son démarrage, elle est affectée par les propriétés physico-chimiques qui sont présents au contact avec la paroi, à savoir: ***elle est proportionnelle à la chaleur appliquée, le niveau du pH régnant (les pH alcalins la favorisent fortement, le milieu acide tend à l'inhiber), son intensité est maximale pour des humidités relatives de l'ordre de 40 à 70%*** [25].

Auto inflammation de la poudre de lait lors du séchage, lorsqu'elle est portée à une température au delà de 245°C et celle de l'air est de 270°C. De plus, le type de sécheur a un effet important sur la qualité de la poudre, car un sécheur à un seul étage donne une poudre de mauvaise solubilité, dispersibilité et une densité plus faible (petites particules de 60-80 µm, ce qui fait que la poudre se humidifie difficilement au contact de l'eau) que celle d'un sécheur à deux étages.

## CHAPITRE II : DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET METHODES

---

Le tableau II.2, résume l'effet de la taille des particules sur les propriétés de la poudre telles que solubilité, dispersibilité et densité [2] :

**Tableau II.2:** Effet de la taille des particules sur les propriétés de la poudre

<b>Diamètre (<math>\mu</math> m)</b>	250	330
<b>Dispersibilité %</b>	97,2	96
<b>Mouillabilité (sec)</b>	40	25
<b>Masse volumique (g/ml)</b>	0,74	0,63

### II.3.2 Spécifications du mélange eau-poudre de lait et leur effets sur l'épaississement :

#### II.3.2.1 Analyses physico-chimiques du lait:

Des analyses quotidiennes s'effectuent au niveau du laboratoire pour vérifier (contrôler) la qualité du mélange qui sont résumées ci-après:

**a. Masse volumique :** Elle correspond au poids en kg d'un litre de lait à 15°C, mesurée à l'aide d'un lactomètre.

**b. Teneur en matière grasse :**

- **Technique d'analyse :** C'est la dissolution de la matière grasse par l'acide sulfurique sous l'influence de la force centrifuge et grâce à l'ajout d'une petite quantité d'alcool amylique. Ce mélange se fait dans un butyromètre qui donne par lecture directe le pourcentage en masse de la matière grasse.
- **Effet :** Plus il y a de particules libres de la matière grasse, plus le mélange est moins soluble et moins fluide, donc le contact mélange-surface d'échange sera plus élevé.

### c. Acidité :

- **Technique d'analyse :** Le titrage se fait par une solution alcaline (oxyde de sodium) en présence d'un indicateur coloré (phénolphtaléine).
- **Effet :** Lorsque l'acidité du mélange augmente, la caséine se précipite à chaud.

### d. pH :

- **Technique d'analyse :** Sa détermination s'effectue par une simple lecture sur le pH-mètre.
- **Effet :** Dans le lait, le pH contrôle les processus suivant [16]:
  1. La coagulation du lait.
  2. Le développement des bactéries: Certains micro-organismes s'activent dans des milieux basiques ou acides pouvant provoquer la formation d'un film le long de la surface d'échange (encrassement biologique) dans la section de préchauffage.

### e. Extrait sec :

- **Technique d'analyse :** C'est la masse restante après une dessiccation complète basée sur l'évaporation de l'eau d'un certain volume du lait. L'extrait sec est composé de l'Extrait sec total (EST) et de l'Extrait sec dégressif (ESD). Ce dernier est obtenu en retranchant la quantité de la matière grasse de l'EST.
- **Effet :** Plus la quantité de *poudre dans le mélange est importante*, plus l'extrait sec de ce dernier *sera plus élevé*. Son effet sur l'encrassement dépend de la quantité des protéines qui vont être dénaturées lors de la stérilisation, qui est proportionnelle à la quantité de la poudre présente dans le mélange. Lorsque cette dernière est élevée, la vitesse de circulation du lait à l'intérieur de l'échangeur sera plus faible (mélange visqueux). Autrement dit, le contact mélange-surface d'échange sera plus grand, donc le dépôt devient important.

## CHAPITRE II : DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET METHODES

---

Le tableau II.3 regroupe les normes et les valeurs réelles du mélange avant et après la stérilisation pour apprécier l'effet de cette dernière sur les propriétés physico-chimiques et cela pour une poudre de lait low heat :

**Tableau II.3:** Analyses physico-chimiques du mélange avant et après stérilisation pour une poudre de lait low heat

	Densité	Acidité (°D)	pH	MG (g/l)	ESD (g/l)
<b>Normes</b>	1030-1034	15-16	6,6-6,8	14-15	90-92
<b>Avant stérilisation</b>	1034	15	6,65	15	94
<b>Après stérilisation</b>	1032	15	6,57	15	93

**Remarque :** En plus de la densité, du pH, etc., d'autres propriétés du lait doivent être vérifiées lors de chaque arrivage [28].

### II.3.2.2 Analyses microbiologiques et toxicologiques:

Des analyses microbiologiques sont effectuées au niveau du laboratoire pour vérifier l'efficacité de la stérilisation, autrement dit, vérifier l'absence des micro-organismes pathogènes (la présence de quelques micro-organismes est tolérée).

### II.3.2.3 Analyses physico-chimiques de l'eau [27]:

Trois prélèvements ont été effectués sur les eaux afin de contrôler la qualité de l'eau utilisée lors de la production, à citer *l'eau de ville, de forage et celle de pré-stérilisation*.

L'objectif de ces analyses regroupées dans le tableau II.4 est de déterminer :

- Le titre hydrométrique (TH) pour la teneur en calcium et magnésium
- Le titre alcalimétrique (TA) avec  $TA = [\text{OH}^-] + \frac{2}{2} [\text{CO}_3^{2-}]$ .
- Le titre alcalimétrique complet (TAC) avec  $TAC = [\text{OH}^-] + [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{HCO}_3^-]$ .
- Le pH.

## CHAPITRE II : DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET METHODES

---

- La teneur en chlorures (par la méthode de Mohr).

**Tableau II.4:** Analyses physico-chimiques de l'eau

	TH (°F)	TA (F°)	TAC (°F)	pH	T (°C)	Cl <sup>-</sup> (mgCl <sup>-</sup> /leau)	Cl (mgNaCl/1 eau)
<b>Eau de ville</b>	42,3	0	19	7,04	19,6	142	234
<b>Eau de forage</b>	27	0	24	7,20	22,7	78,1	128,7
<b>Eau de pré-stérilisation</b>	24	0	18	6,58	30,1	78,1	128,7

### II.3.2.4 Analyses bactériologiques :

Des analyses microbiologiques s'effectuent tous les trois (03) jours au niveau du laboratoire de l'unité pour vérifier l'absence des espèces tel que : les coliformes, les streptocoques, les clostridium sulfite-réducteurs qui ne doivent pas être présent dans l'eau. La présence de quelque germes totaux, ne constituent pas un indice suffisant pour ne pas utiliser cette eau lors de la production.

Les résultats sont regroupés dans le tableau II.5 et cela pour l'eau de ville :

**Tableau II.5:** Analyses bactériologiques de l'eau

Espèces	Résultats
Coliformes	Absence
Streptocoques	Absence
Clostridium - Sulforeducteur	Absence
Germes totaux	2

### II.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 [22] :

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 soude 1.

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

**But :** Eliminer le NaOH.

6. Passage de l'acide nitrique (HNO<sub>3</sub> 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 10 min.

# *Chapitre III*

*Résultats Expérimentaux*

*et Discussion*

### INTRODUCTION :

Des analyses préalables sur l'eau utilisée ont été faites au niveau du laboratoire de l'unité pour déterminer sa dureté. L'eau de rinçage a été également analysée afin de déterminer la composition du dépôt et ce, en raison de la difficulté d'interrompre la production pour ouvrir l'échangeur afin de prendre un échantillon du dépôt directement.

### III.1 INTERPRETATION DES RESULTATS D'ANALYSES :

Il existe plusieurs paramètres pour classer les eaux selon leurs dépôts sur les métaux. Il a été fait appel à la méthode *de classification basée sur la dureté et à celle de Noisette (basée sur la mesure de TH et pH)* bien qu'il existe une troisième méthode dite *la classification de RYZNER* [27].

Comme les analyses sont basées sur les moyens disponibles au laboratoire, il a été fait appel à la méthode de classification basée sur la dureté et à celle de Noisette.

#### II.1.1 La classification basée sur la dureté :

Tableau III.1: Dureté de l'eau

Dureté de l'eau	TH (°F)	Tendance
Dureté moyenne	12-25	Incrustante à chaud Corrosive par aération
Très dure	30-50	Très incrustante

D'après les résultats du tableau II.4 (page 32), nous pouvons conclure que *l'eau de ville et celle de forage sont des eaux très dures* et ont donc des tendances très incrustantes. Par contre celle de *la pré-stérilisation est moyennement dure* car cette dernière a subi une déminéralisation partielle.

### III.1.2 La classification de Noisette :

Tableau III.2: Classification de noisette

Dureté de l'eau	TH (°F)	pH	Tendances
Moyennement minéralisée	12-35	7,1-7,9	Incrustante et agressive Agressive et corrosive à chaud
Fortement minéralisée	40	6,8-7,5	Peu réactive à froid Très incrustante à chaud

Le tableau III.2, permet de connaître la teneur en sels minéraux selon la valeur du TH et du pH à travers les résultats d'analyse du tableau II.4 (page 32). Il est constaté que *l'eau de ville est fortement minéralisée* et celle *de forage et de Pré-stérilisation sont moyennement minéralisées*.

Enfin, il est à noter que ces résultats expérimentaux ne correspondent pas aux caractéristiques recommandées pour une eau chimiquement convenable utilisée pour la recombinaison.

Les conditions requises en matière de qualité d'eau sont [27 ]:

1. Une dureté totale inférieure à 180 mg de CaCO<sub>3</sub> par litre (18° F).
2. Une concentration en chlorines inférieure à 0,2 ppm (mesuré en Cl<sub>2</sub>).
3. Une concentration en chlorides inférieure à 30 ppm (mesuré en Cl<sup>-</sup>).
4. Un pH supérieur à 7 pour éviter les problèmes de corrosion.

***En conclusion, cette eau doit subir un traitement de déminéralisation partielle pour être apte à la recombinaison du lait.***

## CHAPITRE III : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

Les eaux très chargées en sels minéraux dissous présentent des inconvénients dans certains usages. Dans ce cas, il faut éliminer certains ions gênants tels que  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  en utilisant plusieurs méthodes, parmi elles [8] :

- **Osmose inverse** qui réduit non seulement la teneur en sel, mais aussi la teneur en impuretés organiques en métaux lourds et en germes.
- **Échange d'ions** qui permet l'échange de ces deux cations contre des ions de sodium dont les sels sont nettement plus solubles.

### III.2 DETERMINATION DES COMPOSANTS DU DEPOT :

En dépit de la difficulté d'interrompre la production afin d'ouvrir l'échangeur pour prendre un échantillon du dépôt directement, une analyse préalable sur l'eau de rinçage a été faite au niveau du laboratoire de l'unité. Il a été confirmé que la composition du dépôt contient en plus des composants du lait (protéine, MG, etc.) des sels minéraux. Les résultats sont regroupés dans le tableau III.3 :

**Tableau III.3:** Propriétés physico-chimiques de l'eau de rinçage

Acidité (°D)	MG (g/l)	pH	T (°C)	ESD (g/l)	TA	TH (°F)	TAC	Cl <sup>-</sup> (mg Cl/l eau)	Cl <sup>-</sup> (mg NaCl/l eau)
3	0,3	6,18	32	0,7	0	13,7	13	192	316

D'après ces analyses, nous pouvons confirmer que la composition du dépôt contient en plus des composants du lait (protéine, MG, etc.) des sels minéraux :

#### a. Dépôt qui contient les composants du lait :

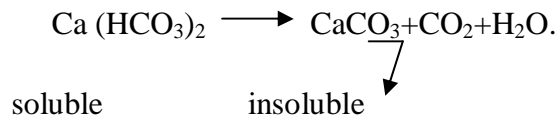
Les résultats représentent les propriétés de l'eau de rinçage pour une poudre de lait *Médium heat*. Il est constaté que quelques particules de MG (0,3g/l) subsistent car le mélange contenait au départ des particules de MG libres probablement à cause d'une mauvaise homogénéisation du mélange. Pour l'ESD, nous avons trouvé 0,7g/l de poudre de lait contenue dans l'eau de rinçage. C'est la masse du dépôt mou formé entre les plaques.

### b. Dépôt qui contient les sels minéraux :

Nous avons filtré le mélange et effectué des analyses sur l'eau. Les résultats indiquent que c'est une eau moyennement dure et moyennement minéralisée. Nous remarquons aussi que la teneur en chlore est très élevée comparée à celle trouvée pour l'eau de ville, l'eau de forage et l'eau de pré-stérilisation, ce qui est dû à la présence de sels minéraux (plus exactement du chlore) dans la poudre de lait. Cela prouve que le dépôt contient, en plus des composants du lait, une quantité importante de sels minéraux.

Les sels minéraux qui composent le dépôt sont :

- Le tartre  $\text{CaCO}_3$  résultant d'une eau dure portée à ébullition contenant du bicarbonate de calcium ( $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ) soluble. Cette réaction se traduit par [27] :



- Le magnésium forme du sulfate qui est un sel difficilement soluble et qui conduit à des précipitations indésirables.
- Le calcium associé à la caséine contribue à la formation du phospho-caséinate de calcium.
- Les chlorines (mesuré en  $\text{Cl}_2$ ).
- Les chlorides (mesuré en  $\text{Cl}$ ).

La structure du dépôt du lait demi-écrémé est représentée dans la figure ci-dessous :

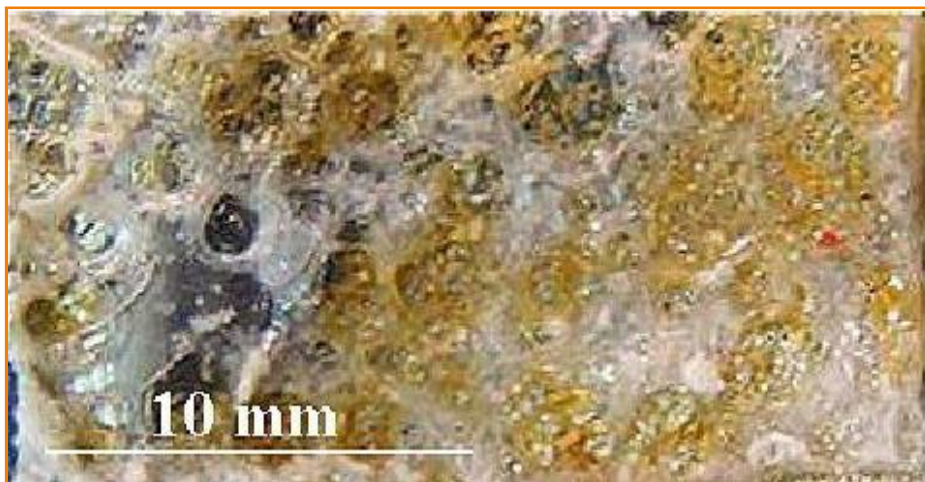


Fig. III.1: Structure du dépôt du lait demi-écrémé ([29]).

*Chapitre IV :*

*Perte de pression*

### INTRODUCTION :

Les différentes prises de pression ont été relevées au cours du temps par simple lecture sur des manomètres placés à l'entrée et à la sortie de chaque section de l'échangeur (de stérilisation, de préchauffage et de pré-refroidissement) afin de situer le dépôt.

### IV.1 PERTE DE PRESSION LORS D'UN CYCLE DE PRODUCTION:

La perte de pression est déterminée expérimentalement à travers différentes prises de pressions relevées au cours du temps au niveau du compartiment stérilisation où le dépôt se forme. La présence du dépôt dans ce compartiment, a été identifié lors des travaux réalisés dans le cadre du mémoire de fin d'études, par simple comparaison entre la perte de pression des différents compartiments de *Stérilisation (PHE I), de préchauffage et de pré-refroidissement (PHE II, PHE III, PHE IV, PHE V) et dans tout l'échangeur* [22]. Ceci n'exclut pas une vérification de ces résultats à partir de nouvelles prises de pression représentées dans les figures qui suivent, avec:

- **$P=Ps-Psl$** : perte de pression au niveau du compartiment de **préchauffage et de pré-refroidissement**
- **$P=Pe-Ps$** : perte de pression au niveau du **compartiment stérilisation**
- **$P=Pe-Psl$** : perte de pression au niveau de **tout l'échangeur**

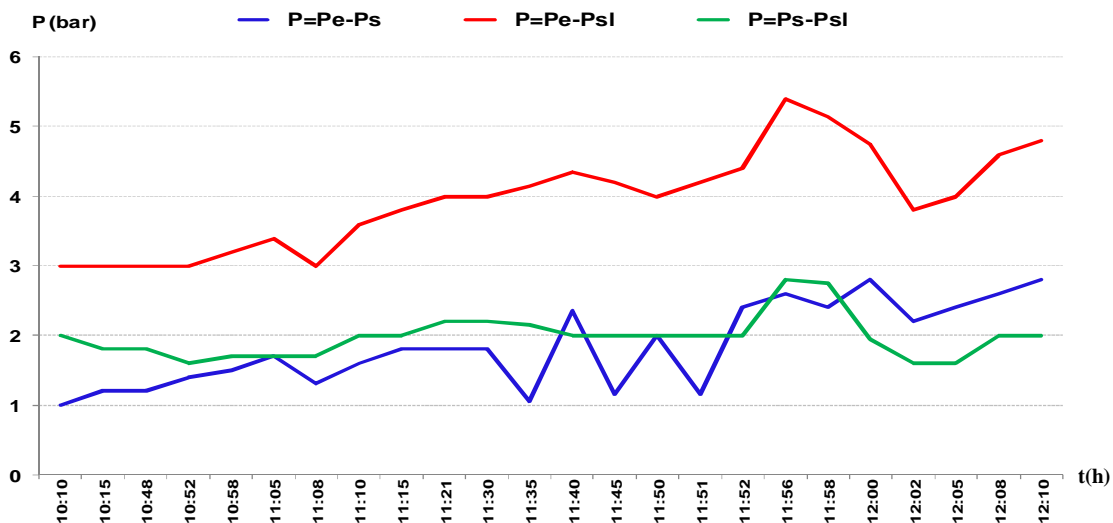


Fig. IV.1 : Perte de pression enregistrée lors de l'opération de production du 07/01/06.

## CHAPITRE IV: PERTE DE PRESSION

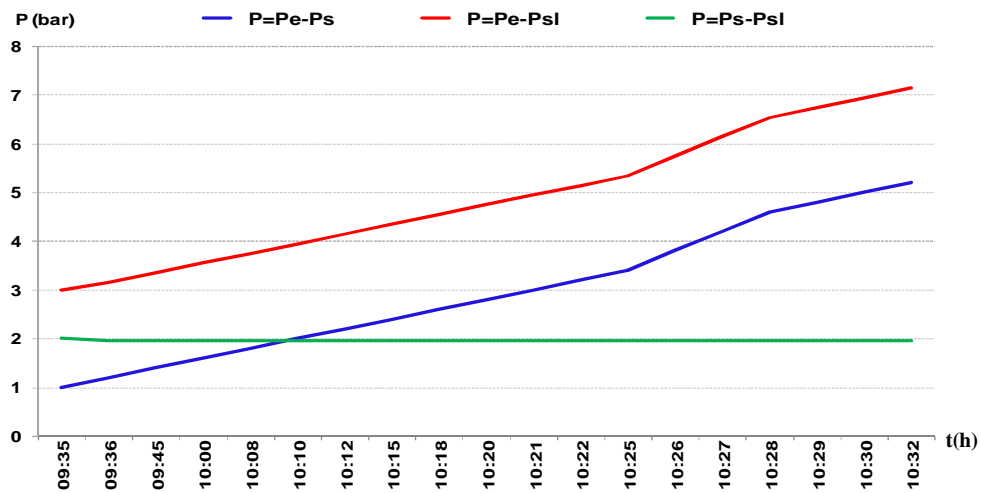


Fig. IV.2 : Perte de pression e enregistrée lors de l'opération de production du 08/01/06.

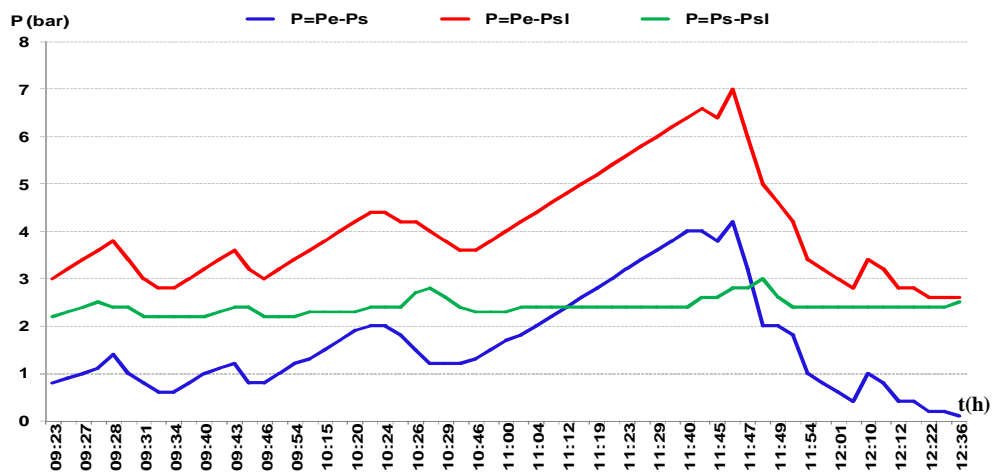


Fig. IV.3 : Perte de pression enregistrée lors de l'opération de production du 25/01/06.

## CHAPITRE IV: PERTE DE PRESSION

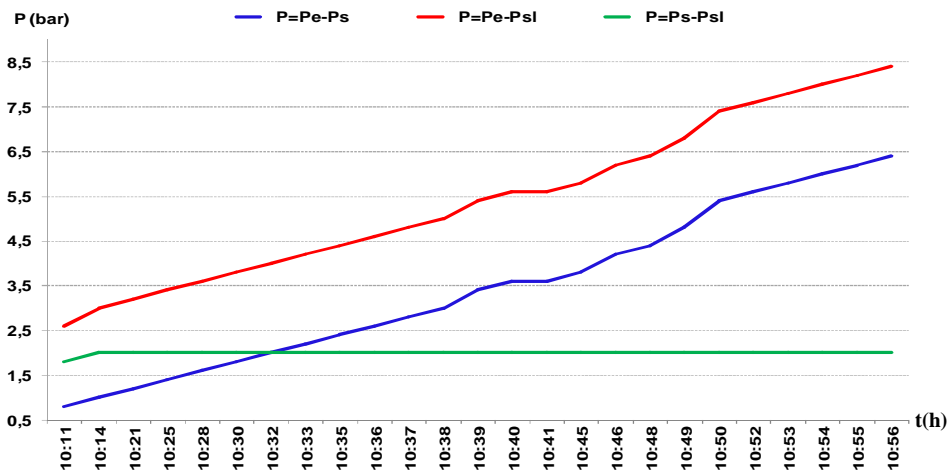


Fig. IV.4 : Perte de pression enregistrée lors de l'opération de production du 29/01/06.

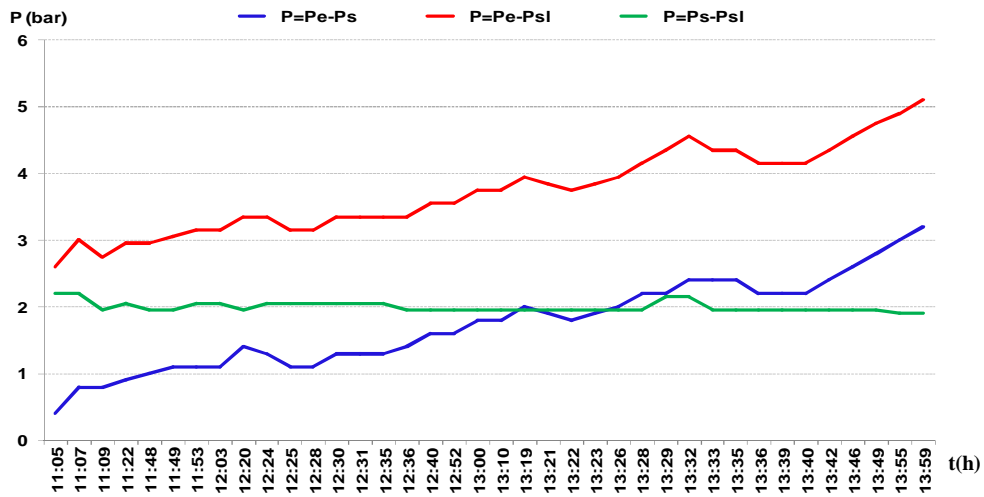


Fig. IV.5 : Perte de pression enregistrée lors de l'opération de production du 12/02/06.

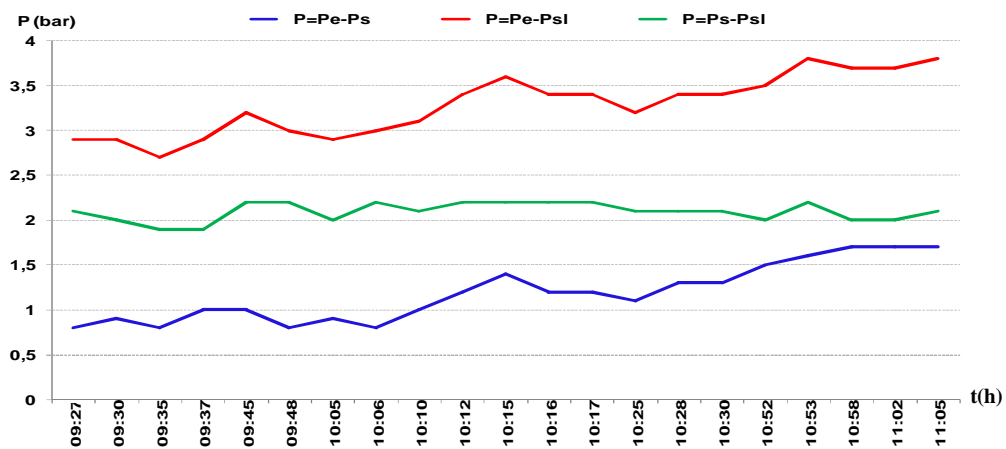


Fig. IV.6 : Perte de pression enregistrée lors de l'opération de production du 13/02/06.

## CHAPITRE IV: PERTE DE PRESSION

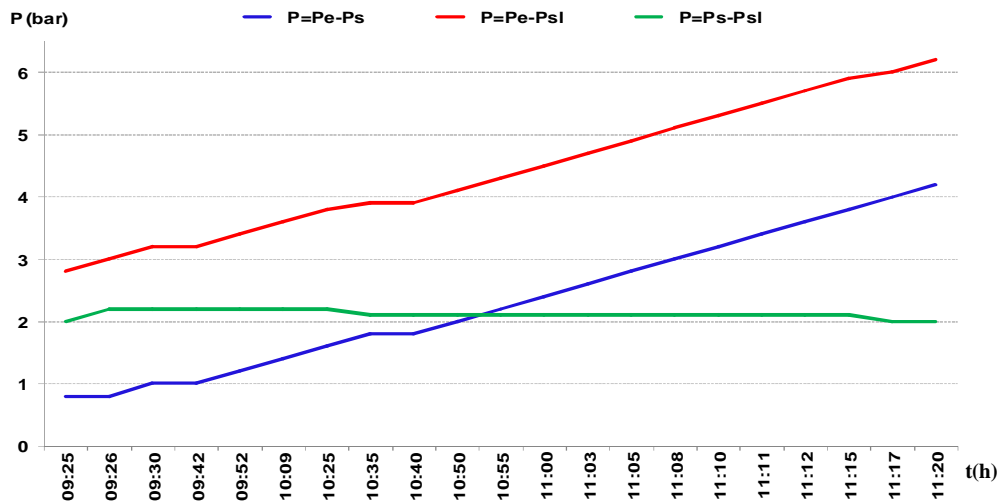


Fig. IV.7 : Perte de pression enregistrée lors de l'opération de production du 19/02/06.

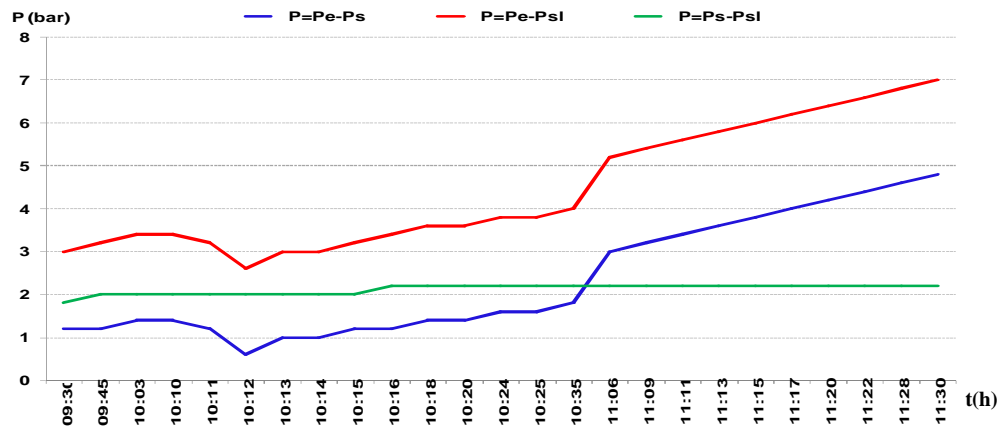


Fig. IV.8 : Perte de pression enregistrée lors de l'opération de production du 26/03/06.

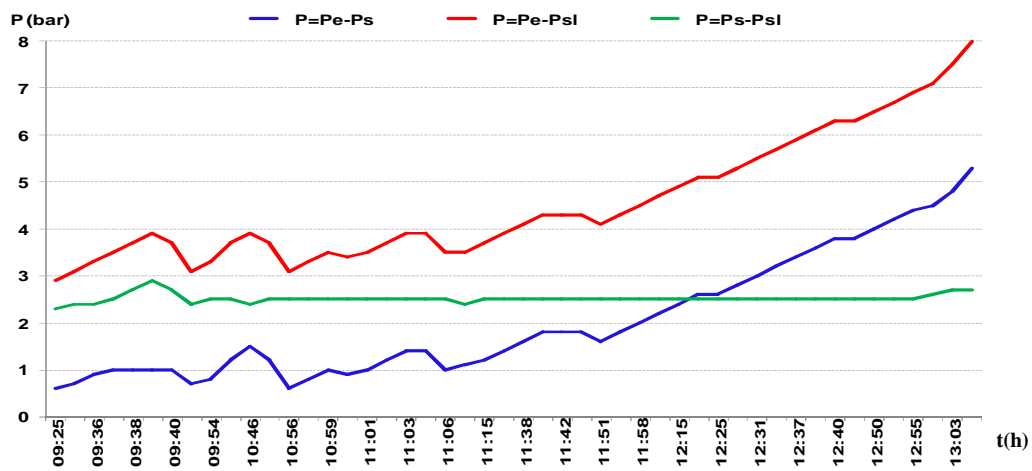


Fig. IV.9 : Perte de pression enregistrée lors de l'opération de production du 08/05/06.

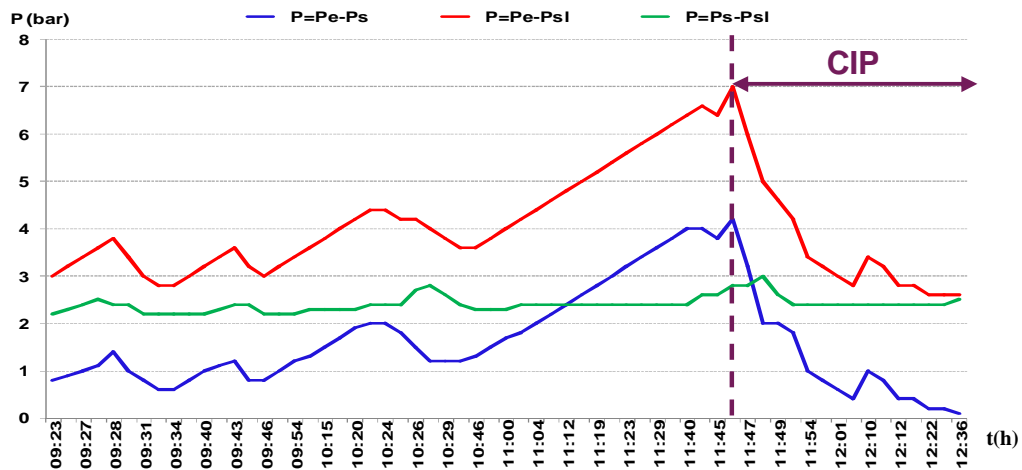


Fig. IV.10 : Perte de pression enregistrée lors de l'opération de production du 09/05/06.

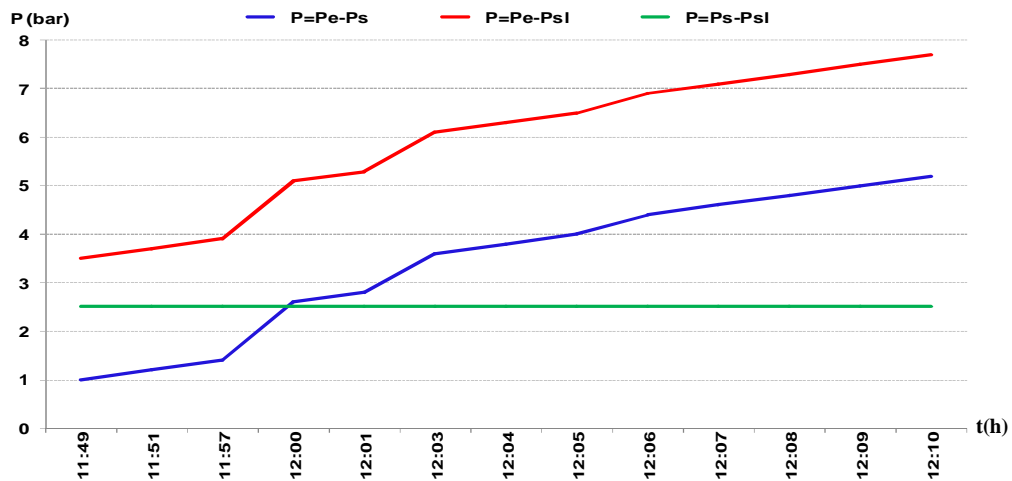


Fig. IV.11 : Perte de pression enregistrée lors de l'opération de production du 13/05/06.

#### IV.1.1 Interprétation des résultats:

L'allure des graphiques de la perte de pression au niveau *du compartiment de préchauffage et de pré-refroidissement* ( $P=Ps-Psl$ ), est relativement constante (autour de 2 bars), ce qui explique une faible présence de dépôt dans cette partie de l'échangeur. En effet, le lait ne subit pas un changement *brusque de température*, car il passe par deux phases de refroidissement. Par contre, au niveau du *compartiment stérilisation* ( $P=Pe-Ps$ ), les courbes présentent une *allure croissante*, traduisant *une formation du dépôt au cours du temps*. Cette

## CHAPITRE IV: PERTE DE PRESSION

---

formation, est le résultat de l'importante différence de température existant entre la paroi et le fluide traversant cette section chaude (64-67°C). Il est à noter, que la même allure des graphiques (*courbe croissante*) est observée au niveau *de tout l'échangeur* ( $P=P_e-P_s$ ), ce qui 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.

La présence de pics au niveau des courbes est dûs au passage du lait dans l'homogénéisateur avant sa stérilisation. Nous constatons aussi, une présence de paliers représentant l'arrêt instantané de la production par manque de vapeur d'eau.

A la lumière des résultats obtenus, il est possible de conclure que l'encrassement est repéré dans le compartiment stérilisation de l'échangeur. Cette conclusion a été plusieurs fois confirmée par les mêmes observations constatées lors des différentes prises de pressions relevées durant les autres jours de production représentées dans les figures précédentes.

## IV.2 PERTE DE PRESSION LORS D'UN CYCLE DE NETTOYAGE:

La perte de pression déterminée expérimentalement au niveau des différents compartiments de l'échangeur lors de la procédure de nettoyage décrite dans le chapitre II (page 33), est représentée dans les figures qui suivent :

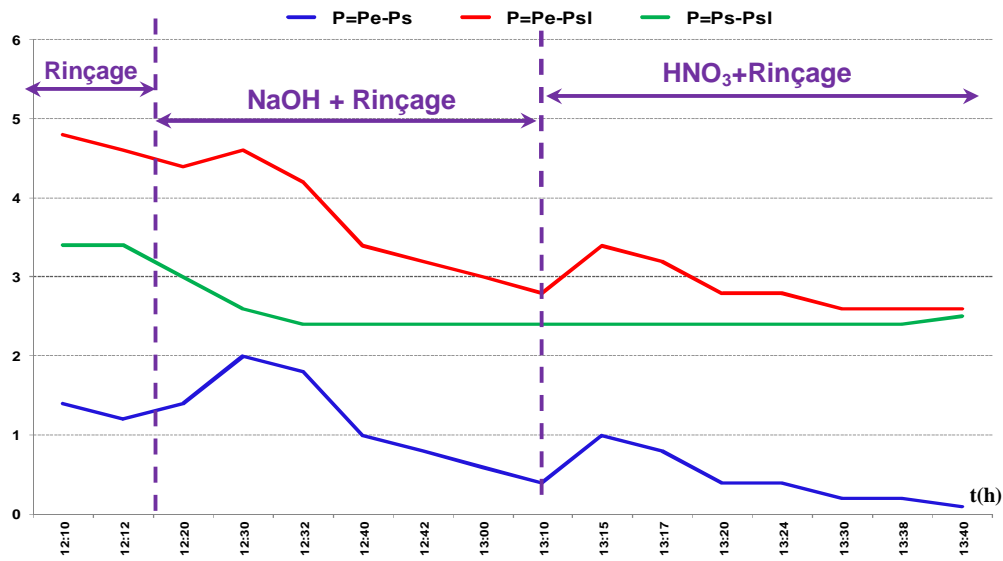


Fig. IV.13 : Perte de pression enregistrée lors du nettoyage du 07/01/06.

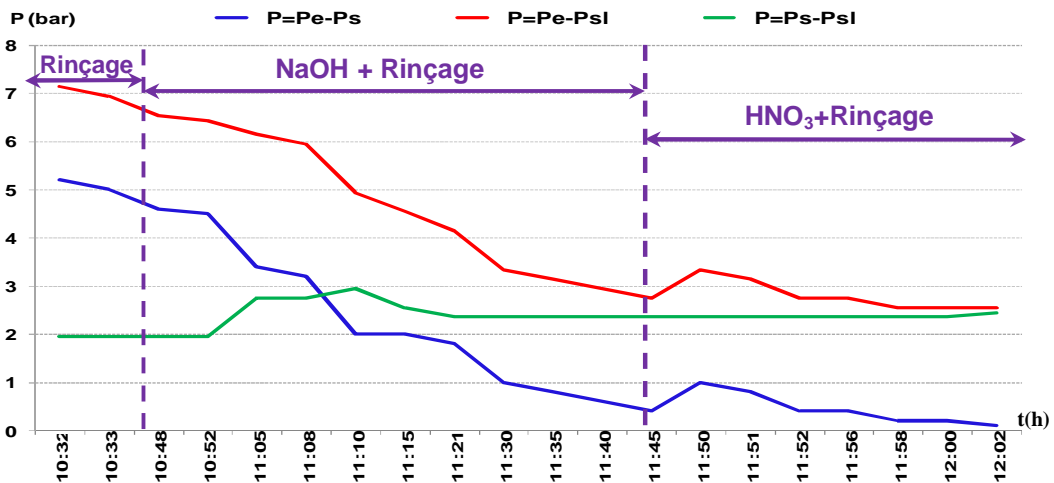


Fig. IV.14 : Perte de pression enregistrée lors du nettoyage du 08/01/06.

## CHAPITRE IV: PERTE DE PRESSION

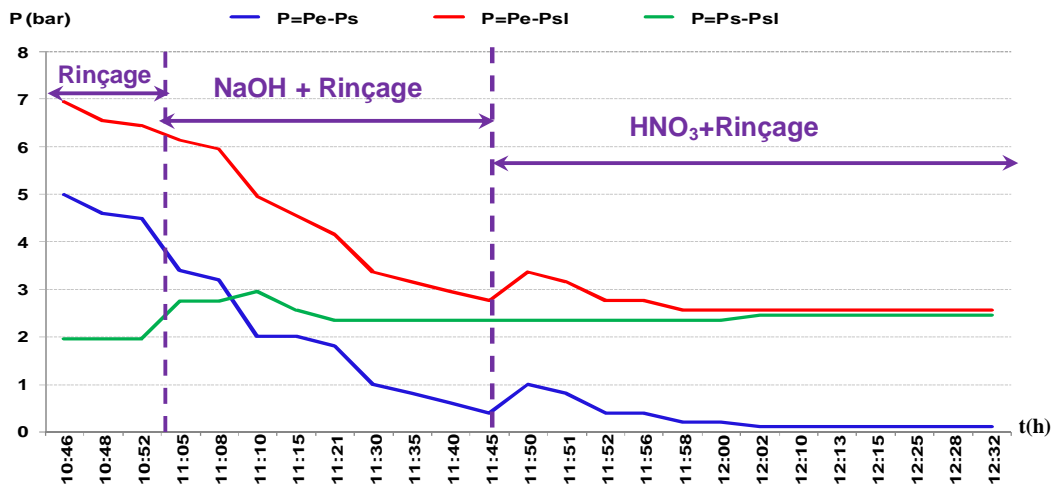


Fig. IV.15 : Perte de pression enregistrée lors du nettoyage du 22/01/06.

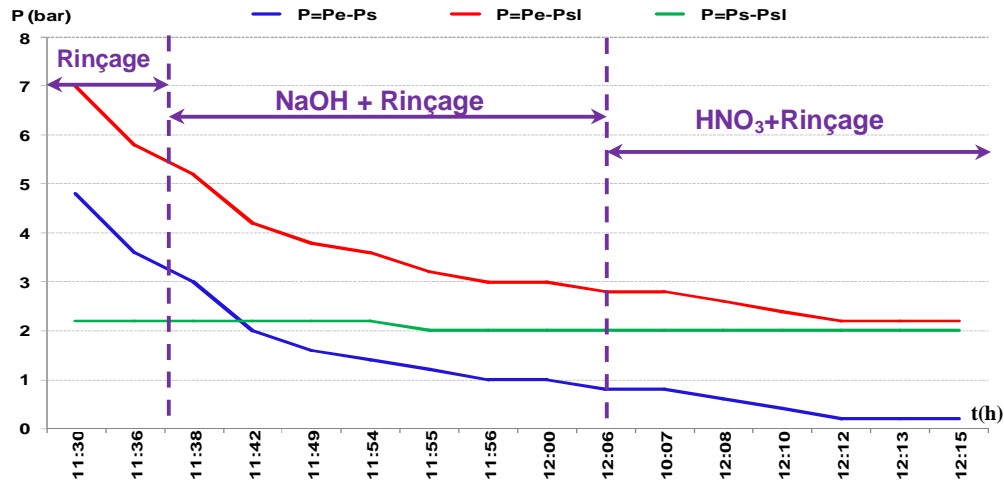


Fig. IV.16 : Perte de pression enregistrée lors du nettoyage du 26/03/06.

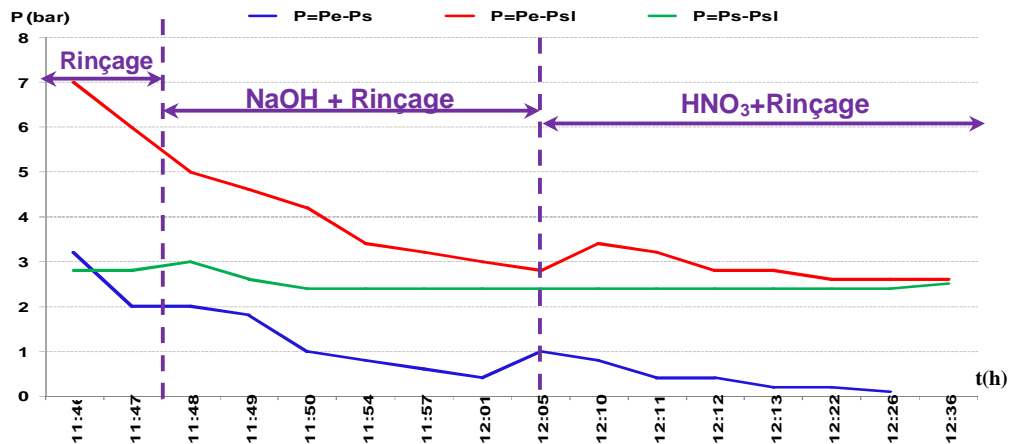


Fig. IV.17 : Perte de pression enregistrée lors du nettoyage du 09/05/06.

### IV.2.1 Interprétation des résultats:

La perte de pression enregistrée au niveau *du compartiment de préchauffage et de pré-refroidissement* ( $P=P_s-P_{sl}$ ), *présente relativement la même valeur (autour de 2 bars) que celle relevée lors du cycle de production*, traduisant ainsi, l'absence de dépôt dans cette section de l'échangeur. Par contre, au niveau du *compartiment stérilisation* ( $P=P_e-P_s$ ), une chute brutale de cette dernière est observée, reflétant l'action de la solution de NaOH sur le dépôt, puis, la courbe se stabilise durant les phases soude (1) et (2). Le passage de la solution de l'acide nitrique entraîne également, une chute de pression jusqu'à atteindre une valeur proche du zéro, expliquant l'élimination du dépôt formé. L'allure de la perte de pression observée au niveau *de tout l'échangeur* ( $P=P_e-P_{sl}$ ), représente la même allure que celle examinée dans le compartiment stérilisation, à savoir que la dernière phase de nettoyage correspond à la perte de pression enregistrée dans le compartiment *propre de préchauffage et de pré-refroidissement* ( $P=P_s-P_{sl}$ ). *A cet effet, nous pouvons considérer l'échangeur comme nettoyé.*

En conclusion, ces résultats (Fig. IV.14-15-16-17-18) confirment la prédominance de la présence du dépôt dans le compartiment stérilisation de l'échangeur car la perte de pression est relativement nulle lors du nettoyage. A ce propos, ces aboutissements, traduisent que le dépôt riche en protéines, formé dans la zone de récupération d'énergie, est éliminé par la solution de soude (chute de la perte de pression). Par contre, ce détergent n'a aucun effet significatif sur le dépôt riche en minéraux, la solution acide provoque son élimination (la perte de pression baisse de nouveau).

*Chapitre V :*  
*Modélisation de*  
*L'encrassement*



- La première et la dernière plaque sont adiabatiques.
- Conservation du débit volumique dans chaque canal.
- Pertes de chaleur sont négligeables.
- La diffusivité ( ) de l'échangeur est constante sachant que :  $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0$

Notre approche permettant l'évaluation de l'encrassement dans le compartiment stérilisation 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 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 :

$$A \cdot m \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial x} = U A (T_{\hat{O}1} - T_{\hat{O}2}) \quad (V.1)$$

En termes de quantité de chaleur nous avons:

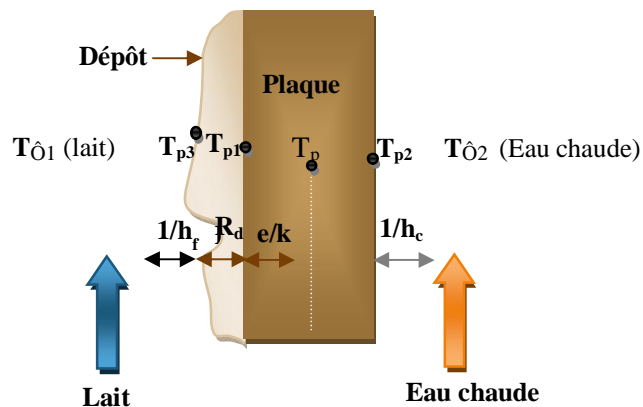


Fig. V.2 : Résistance des films pour une plaque encrassée.

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

$$q_1 = h_f A (T_{\hat{O}1} - T_{p3}) \quad (V.2)$$

## CHAPITRE V : MODELISATION DE L'ENCRASSEMENT

---

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

$$q_2 = h_f A (T_{\hat{O}2} - T_{p2}) \quad (V.3)$$

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

$$q_3 = \frac{(T_{\hat{O}2} - T_{\hat{O}1})}{\frac{e}{\lambda}} \quad (V.4)$$

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

$$q_4 = \frac{(T_{\hat{O}1} - T_{\hat{O}2})}{\frac{e_d}{\lambda_d}} \quad (V.5)$$

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

On obtient :

$$U A (T_{\hat{O}1} - T_{\hat{O}2}) = \frac{(T_{\hat{O}2} - T_{\hat{O}1})}{\frac{1}{h_f A} + \frac{e}{\lambda A} + \frac{e_d}{\lambda_d A}}$$

Donc:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_f} + \frac{e}{\lambda} + \frac{e_d}{\lambda_d} + R_d \quad (V.6)$$

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 :

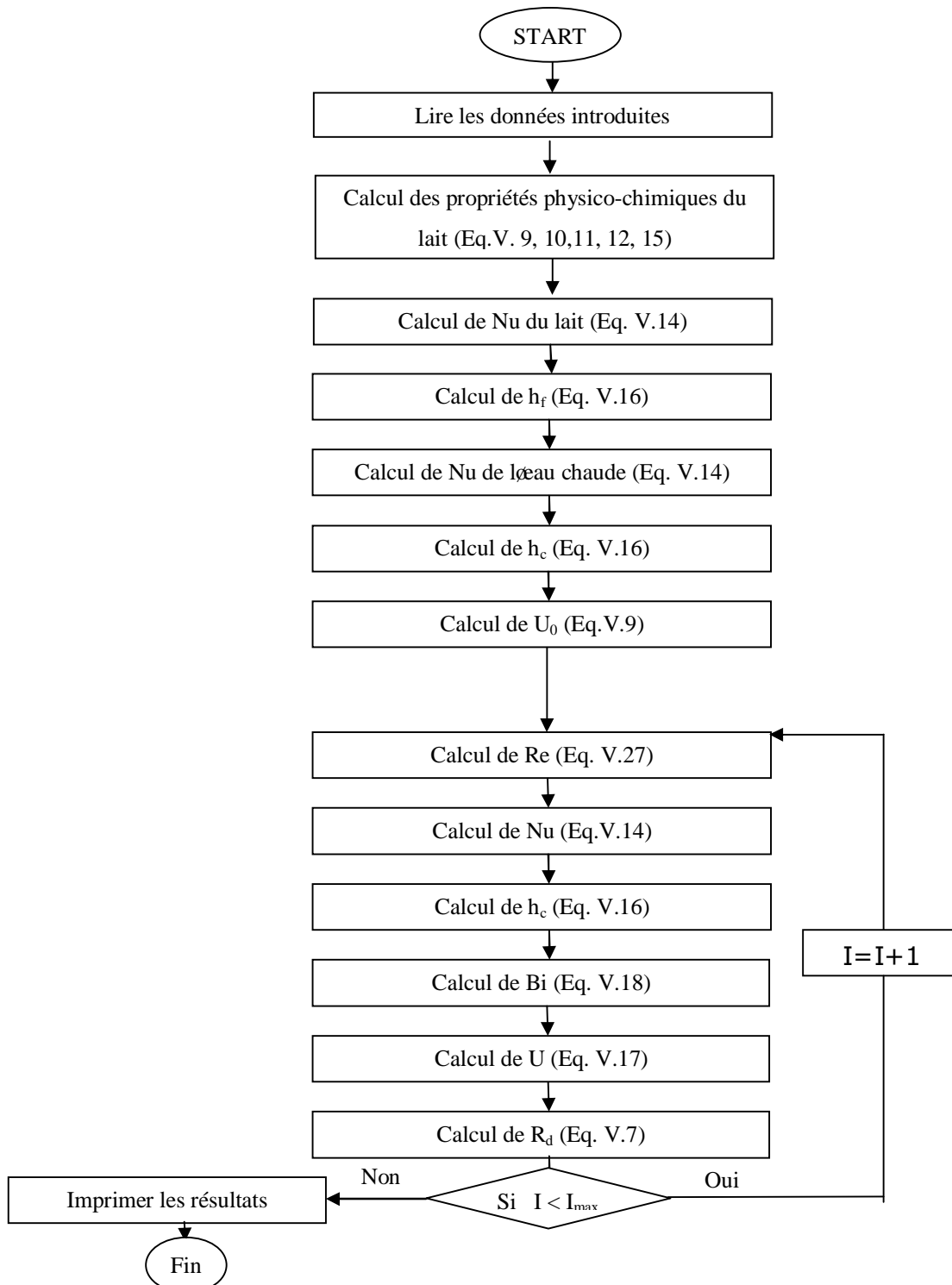
$$R_d = \frac{1}{U} - \frac{1}{U_0} \quad (V.7)$$

Avec :

$$\frac{1}{U_0} = \frac{1}{h_f} + \frac{e}{\lambda} + \frac{e_d}{\lambda_d} \quad (V.8)$$

## CHAPITRE V : MODELISATION DE L'ENCRAUSSEMENT

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 process 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.1 CALCUL DU COEFFICIENT DE TRANSFERT DE CHALEUR GLOBAL:

La figure V.3, représente le schéma de l'écoulement du fluide entre deux plaques parallèles de l'échangeur de chaleur.

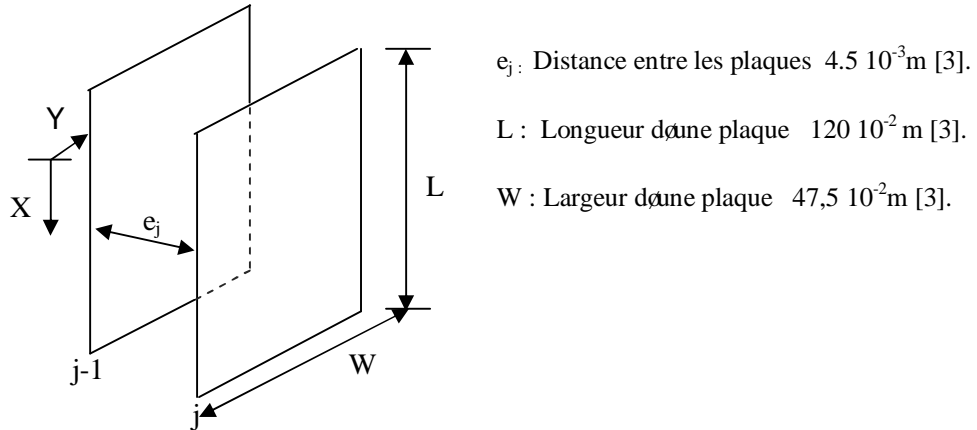


Fig. V.3 : Schématisation de la direction de l'écoulement entre deux plaques.

V.1.1 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 :

$$\mu = \mu_0 \times (1 + 2,5 \phi) \quad (\text{V.9})$$

$$\phi = (\text{volume des particules}) / (\text{volume total}) \quad (\text{V.10})$$

Nous avons :  $v_T = m_T / m$  tel que :  $m = 1032 \text{ kg/m}^3$  (valeur mesurée)

$$v_T = (23000 + 400 + 2650) / 1032. \text{ (Voir Chapitre II page 21)}$$

$$v_T = 25,24 \text{ m}^3$$

$$v_T = v_p + v_{\text{eau}} \text{ d'où : } v_p = 25,14 \text{ ó } 23$$

$$v_p = 2,24 \text{ m}^3$$

A partir de la relation (V.10), nous obtenons :  $= 2,24/25,24$

D'où :  $= 0,089$

La température moyenne du compartiment stérilisation permettant la détermination de  $\mu_0$  à partir du tableau des caractéristiques de l'eau (Annexe II) est :

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

$$T_{\text{moy}} = 101^\circ\text{C} = 374 \text{ K}$$

D'où :  $\mu_0 (101^\circ\text{C}) = 0,2763 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m.s.}$

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

$$\mu = 0,3378 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m.s}$$

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

$$C_p = 1,68T + 3864,2 \text{ [31].}$$

$$C_p (101^\circ\text{C}) = 4033,88 \text{ J/kg }^\circ\text{C}$$

**3. Débit du mélange :**

$$Q = 4400 \text{ l/h.}$$

$$Q = 1,22 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

**4. Vitesse du mélange :** S'écrit :

$$u = Q/A. \tag{V.11}$$

$$A = e_j \times W$$

$$A = (4,5 \cdot 10^{-3} \times 47,5 \cdot 10^{-2})$$

$$A = 2,14 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Donc à partir de la relation (V.11) :

$$u = 0,57 \text{ m/s}$$

### 5. Nombre de Reynolds :

$$Re = \rho_f \times u \times d_e / \mu_f. \quad (\text{V.12})$$

$$d_e = 2 \times e_j \quad [\text{6}]. \quad (\text{V.13})$$

$$d_e = 2 \times 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ d'où : } d_e = 9 \cdot 10^{-3} \text{ m.}$$

$$\rho_f = 1033,7 - 0,2308 \cdot T - 0,00246 \cdot T^2 \quad [\text{31}].$$

$$\rho_f = 985,3 \text{ kg/m}^3$$

$$\mathbf{Re = 14963}$$

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 [22].

Pour le transfert de chaleur en régime turbulent dans un échangeur à plaques, la corrélation suivante peut être utilisée [22]:

$$\mathbf{Nu = 0,2536 \times Re^{0,65} \times Pr^{0,4}} \quad (\text{V.14})$$

$$\text{Et : } Pr = C_p \times \mu / k \quad (\text{V.15})$$

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 élevée), 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 :

$$\text{Tel que : } k = 0,00133T + 0,53991 \quad [31]$$

$$k = 0,67 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

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

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

$$\text{Sachant que: } Nu = h_f d_e / k.$$

$$\text{D'où : } h_f = Nu k / d_e \quad (V.16)$$

$$h_f = 12887 \text{ W/m}^2\text{C}$$

### V.1.2 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  $T = (142 + 116) / 2$  d'où  $T = 129^\circ\text{C}$ .

$$k = 0.68 \text{ W/m}^\circ\text{C} \quad [32].$$

$$\mu = 0.2147 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m.s} \quad [32].$$

$$C_p = 4241 \text{ J/kg }^\circ\text{C} \quad [32].$$

$$\rho = 937.5 \text{ kg/m}^3 \quad [32].$$

Avec la relation (V.11) :

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

D'où avec l'équation (V.12) et (V.15) on obtient:

$$Re = 20435$$

$$Pr = 1.3$$

Avec la corrélation (V.14) on obtient:

$$Nu = 178.4$$

De l'équation (V.16) on obtient:

$$h_c = 13479 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

### **V.1.3 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  $k_1 = 15.1 \text{ (W/m}^2\text{°C)}$  [33] et  $e = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ , ce qui donne :

$$U_0 = 2223 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

### **V.1.4 Evolution du coefficient global d'échange de chaleur:**

La méthodologie à suivre dans le présent chapitre, 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 [15]:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{e}{k_1}} \quad (V.17)$$

$$\text{Le nombre de Biot : } Bi = \frac{h_c \cdot e}{k_1} \quad (V.18)$$

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 stérilisation est pris en

## CHAPITRE V : MODELISATION DE L'ENCRAISSEMENT

---

considération. Les principales hypothèses à tenir en compte, en dehors de celles déjà énoncées (page 47-48) sont :

- L'écoulement du fluide est unidirectionnel et unidimensionnel.
- Le lait est considéré comme fluide parfait incompressible :  $\rho = \text{constante}$
- Ecoulement stationnaire :  $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$  (i : direction de l'écoulement)
- Ecoulement établi :  $\frac{\partial v}{\partial x} = 0$
- $W \gg L$  :  $\frac{\partial v}{\partial x} = 0$  et  $v = 0$  (v : vitesse de l'écoulement du lait selon la direction oy)

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

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

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \quad (\text{V.19})$$

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

$$p = -\frac{\mu}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \quad (\text{V.20})$$

D'autre part :

Le facteur de friction f s'écrit :

$$f = \frac{\tau_w}{\rho v_m} \quad (\text{V.21})$$

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 ( $\hat{e} P_0$ ) déduite de l'équation (V.20) tout en remplaçant les paramètres  $\tau_w$  et  $v_m$  tirés des équations (V.13) et (V.14) est:

$$\hat{e} P_0 = 2f \left( \frac{u}{\lambda} \right)^2 u^2 \quad (V.22)$$

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

$$\hat{e} P_0 = 2 \frac{f}{\lambda} k \operatorname{Re} \frac{u}{\lambda} u^2 \quad (V.23)$$

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

$$\hat{e} P_0 = 2 \frac{f}{\lambda} k \operatorname{Re} \frac{u}{\lambda} Q^2 \quad (V.24)$$

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

$$P_0 = K \operatorname{Re} \frac{u}{\lambda} Q^2 \quad (V.25)$$

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

D'autre part :

f est calculé selon Martin 1996 [33] :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{0,046}{\operatorname{Re}^{0,2}} + 1 - \frac{0,046}{\operatorname{Re}^{0,2}} \quad (V.26)$$

$f_0$  et  $f_1$  dépendent du régime du fluide, en régime turbulent et pour  $\operatorname{Re} > 2000$ :

$$f_0 = \frac{0,046}{\operatorname{Re}^{0,2}} \quad \text{et} \quad f_1 = \frac{0,046}{\operatorname{Re}^{0,2}}$$

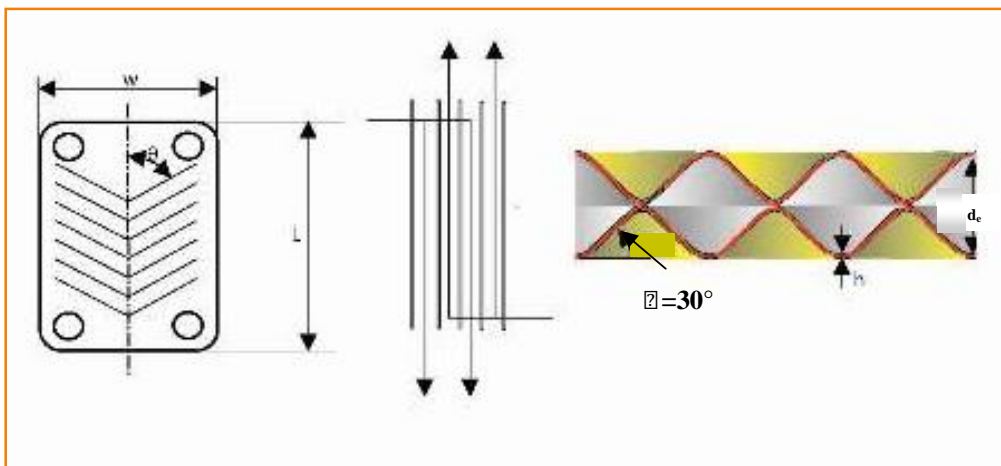


Fig. V.4 : Schématisation des rainures des plaques.

Alors pour :

$$\alpha = 30^\circ$$

$$f_0 = 0.08 \text{ et } f_1 = 0.6$$

Donc:

$$f = 0.55 \text{ et de l'équation (V.22) } \Delta P = 0.457 \text{ bar}$$

$$\text{A partir de la relation (V.25) : } k_2 = 1.23$$

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

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \quad (V.27)$$

A partir des équations : (V.14), (V.18) et (V.25) nous aboutissons à l'évaluation du coefficient global de transfert de chaleur au cours du temps à travers la relation (V.17) (voir programme Fortran en Annexe III).

## V.2 EVOLUTION DE LA RESISTANCE D'ENCRASSMENT 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 :

$$R_d = \frac{1}{U} - \frac{1}{U_0}$$

## CHAPITRE V : MODELISATION DE L'ENCRASSEMENT

---

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

# CHAPITRE V : MODELISATION DE L'ENCRASSEMENT

Rd\*10-4  
(M<sup>2</sup>C/W)

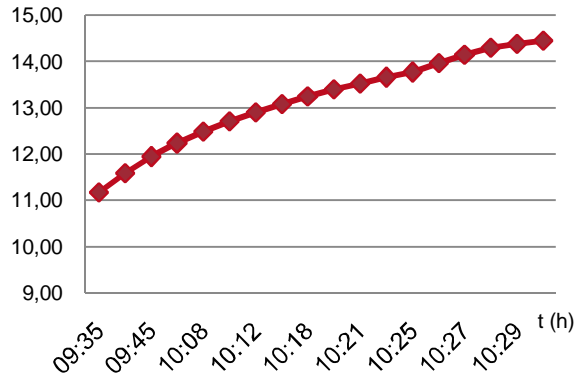


Fig. V.5 : évolution de R<sub>d</sub> enregistrée lors de l'opération de production du 08/01/06.

Rd\*10-4  
(M<sup>2</sup>C/W)

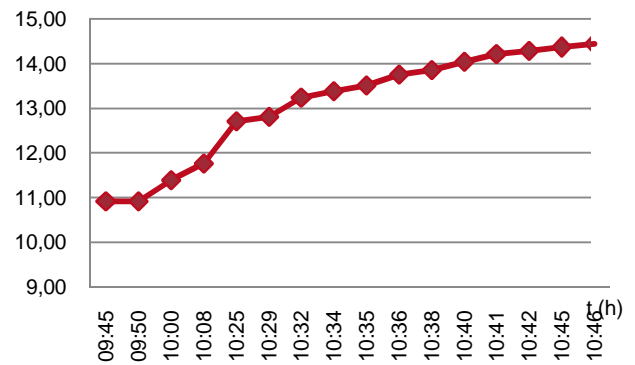


Fig. V.6 : évolution de R<sub>d</sub> enregistrée lors de l'opération de production du 22/01/06.

Rd\*10-4  
(M<sup>2</sup>C/W)

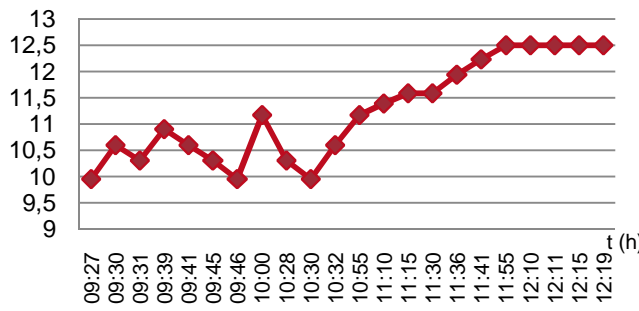


Fig. V.7 : évolution de R<sub>d</sub> enregistrée lors de l'opération de production du 25/01/06.

Rd\*10-4  
(M<sup>2</sup>C/W)

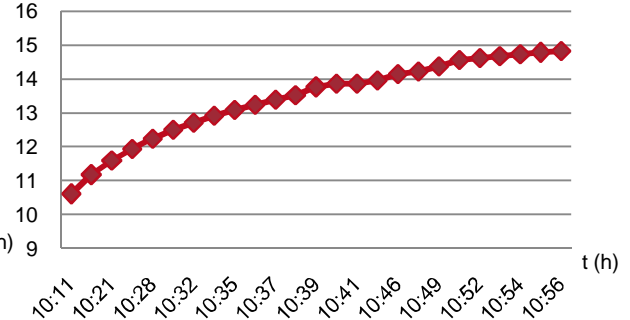


Fig. V.8 : évolution de R<sub>d</sub> enregistrée lors de l'opération de production du 29/01/06.

Rd\*10-4  
(M<sup>2</sup>C/W)

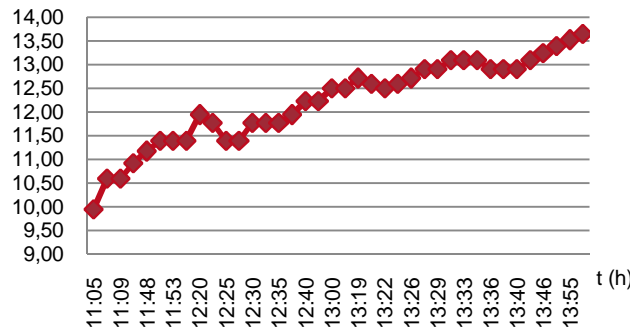


Fig. V.9 : évolution de R<sub>d</sub> enregistrée lors de l'opération de production du 12/02/06.

Rd\*10-4  
(M<sup>2</sup>C/W)

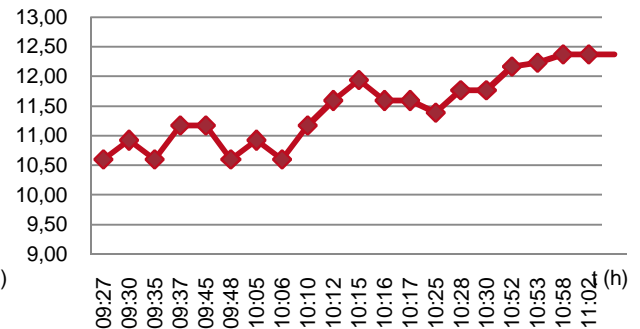


Fig. V.10 : évolution de R<sub>d</sub> enregistrée lors de l'opération de production du 13/02/06.

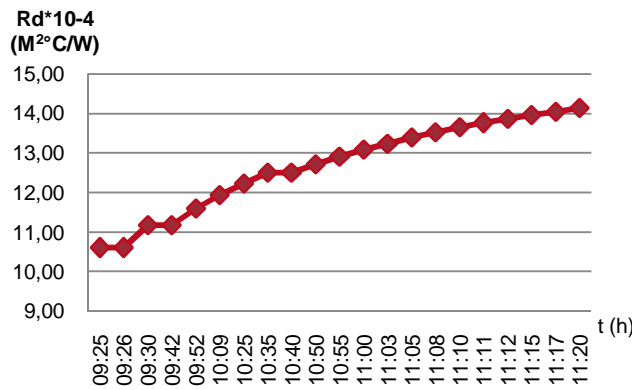


Fig. V.11 : évolution de  $R_d$  enregistrée lors de l'opération de production du 19/02/06.

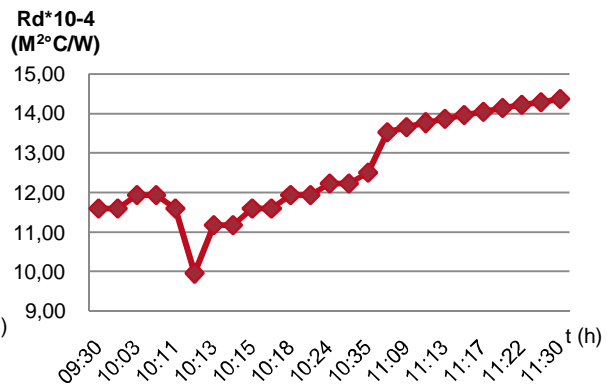


Fig. V.12 : évolution de  $R_d$  enregistrée lors de l'opération de production du 26/03/06.

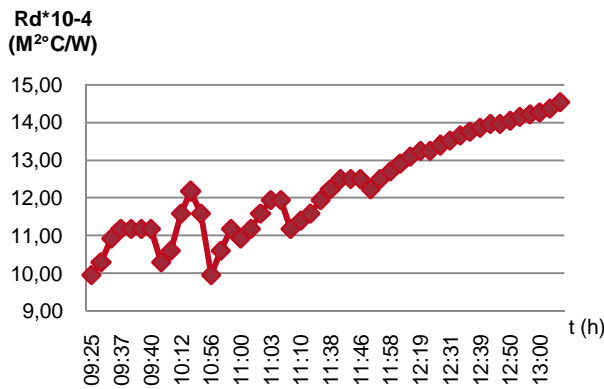


Fig. V.13 : évolution de  $R_d$  enregistrée lors de l'opération de production du 08/05/06.

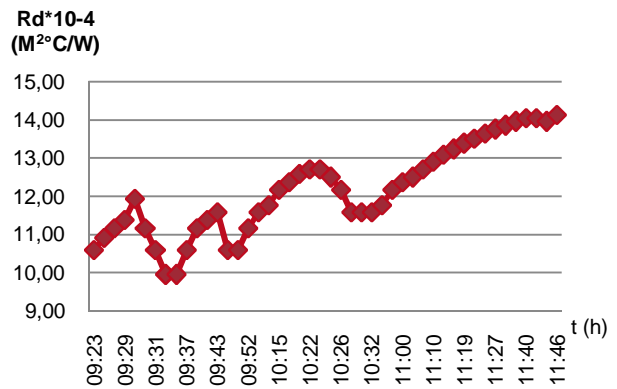


Fig. V.14 : évolution de  $R_d$  enregistrée lors de l'opération de production du 09/05/06.

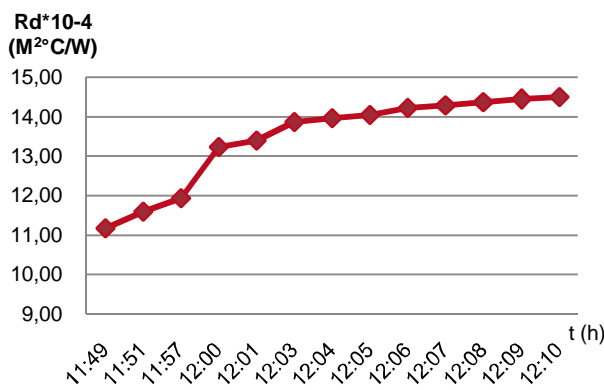


Fig. V.15 : évolution de  $R_d$  enregistrée lors de l'opération de production du 13/05/06.

## CHAPITRE V : MODELISATION DE L'ENCRASSEMENT

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. En effet, une valeur asymptotique de la résistance d'encrassement durant la période de cette étude est observée et ce, malgré l'existence de quelques fluctuations (journées du 25/01/06,13/02/06, 26/03/06,08/05/06 et du 09/05/06). Ces dernières sont dues, soit à la variation du débit (arrêt momentané de la production) qui, en agissant sur la contrainte de cisaillement à la paroi provoque le réentrainement des particules du dépôt ou leur déposition, soit au réentrainement des particules ; sous l'effet de l'impact entre ces dernières et les particules incidentes dont l'énergie cinétique est suffisamment élevée pour arracher les particules déposées de la surface de la plaque de l'échangeur [4].

Un modèle exponentiel a été établi. Il apparaît sur les figures précédentes, que les points expérimentaux suivent une allure exponentielle s'accordant avec le modèle de Kern et de Seaton à savoir qu'une régression a été utilisée sur les valeurs expérimentales. L'équation du modèle est synthétisée dans le tableau V.1 qui est orienté par journée de production.

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

avec :

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

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

**Tableau V.1: Récapitulatif des équations de la modélisation de l'encrassement**

Journée de production	Equation	$R_d^*$ ( $m^2 \cdot C/kW$ )	( $s^{-1}$ )
08/01/06	$R_d = 14,45[1 - \exp(-0,00024t)]$	14,45	0,00024
22/01/06	$R_d = 14,45 [1 - \exp(-0,00011t)]$	14,45	0,00011
23/01/06	$R_d = 14,55 [1 - \exp(-0,00029t)]$	14,55	0,00029
25/01/06	$R_d = 12,6[1 - \exp(-0,00057t)]$	12,60	0,00057
29/01/06	$R_d = 14,84 [1 - \exp(-0,00021t)]$	14,84	0,00021
12/02/06	$R_d = 13,66[1 - \exp(-0,00040t)]$	13,66	0,00040
13/02.06	$R_d = 12,4[1 - \exp(-0,00014t)]$	12,40	0,00014
19/02/06	$R_d = 14,15[1 - \exp(-0,00033t)]$	14,15	0,00033
26/03/06	$R_d = 14,4[1 - \exp(-0,00002t)]$	14,40	0,00002
08/05/06	$R_d = 14,55[1 - \exp(-0,00004t)]$	14,55	0,00004
09/05/06	$R_d = 14,15[1 - \exp(-0,00019t)]$	14,15	0,00019
13/05/06	$R_d = 14,5[1 - \exp(-0,00024t)]$	14,50	0,00024

V.3 EVOLUTION DU DEGRE D'ENCRASSEMENT AU COURS DU TEMPS :

Le degré d'encrassement ( ) est défini par la différence des diamètres hydrauliques de l'échangeur propre (diamètre initial) et encrassé rapporté au diamètre hydraulique initial (échangeur propre):

$$\frac{(D_{i} - D_{e})}{D_{i}} \tag{V.28}$$

Ainsi :

- =0 lorsque l'échangeur est propre.
- =1 lorsque l'échangeur est encrassé.

A partir de la relation (V.23) et (V.26), on obtient une expression de fonction de la perte de charge :

$$= 1 - \frac{D_{e}^5}{D_{i}^5} \tag{V.29}$$

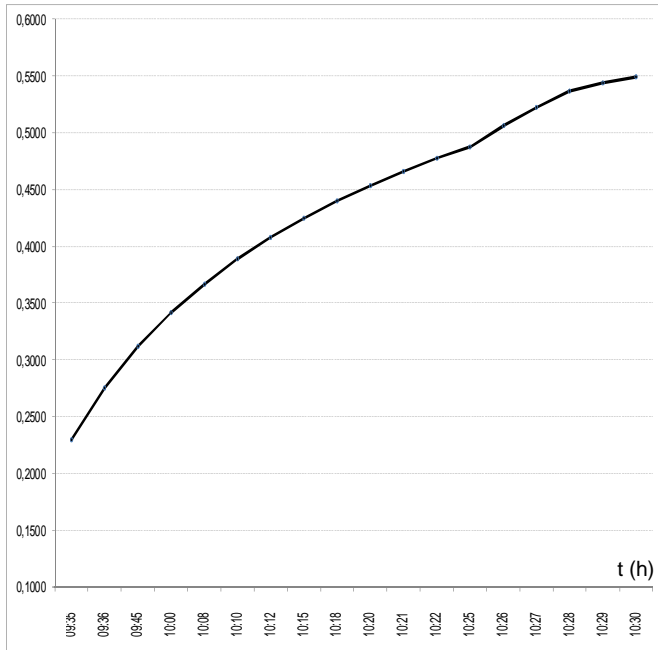


Fig. V.16 : évolution de enregistrée lors de l'opération de production du 08/01/06.

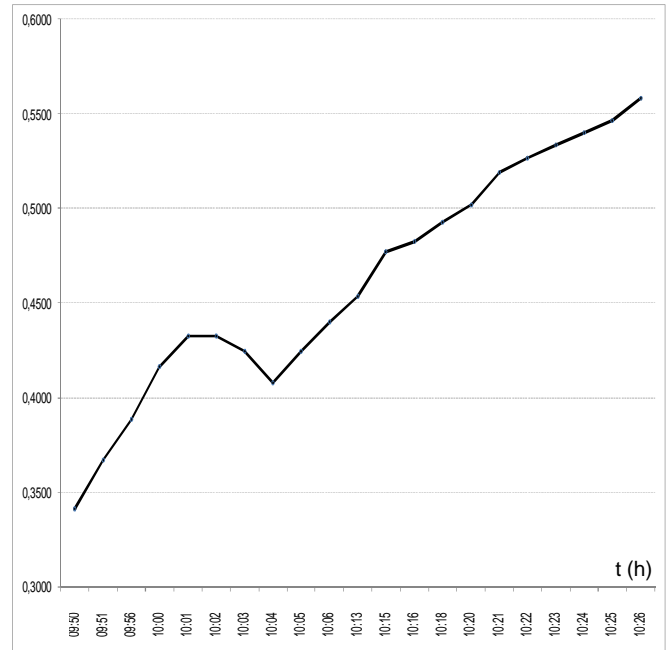
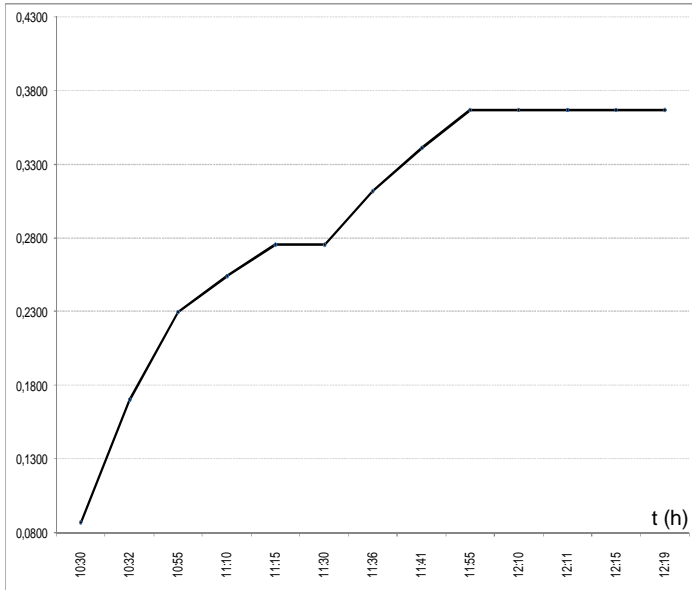
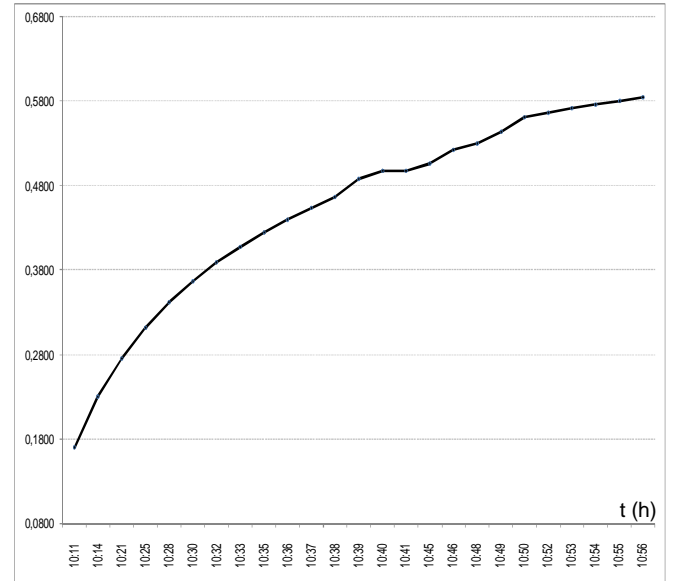


Fig. V.17 : évolution de enregistrée lors de l'opération de production du 23/01/06.

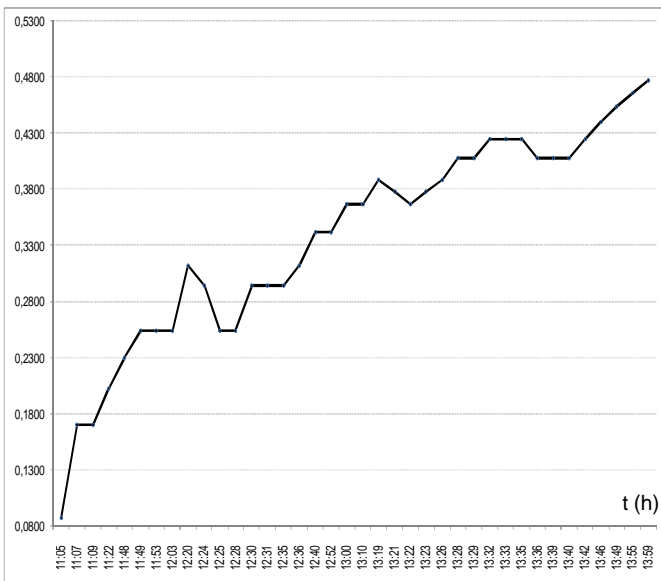
# CHAPITRE V : MODELISATION DE L'ENCRASSEMENT



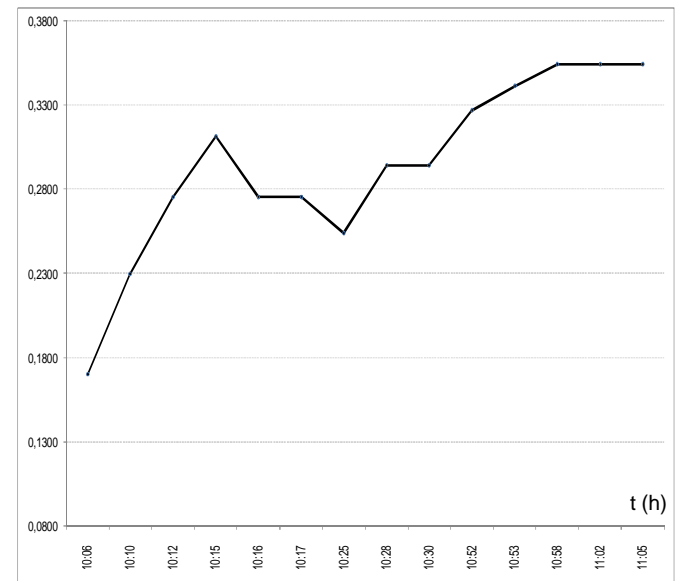
**Fig. V.18 :** évolution de  $\dots$  enregistrée lors de l'opération de production du 25/01/06.



**Fig. V.19 :** évolution de  $\dots$  enregistrée lors de l'opération de production du 29/01/06.



**Fig. V.20 :** évolution de  $\dots$  enregistrée lors de l'opération de production du 12/02/06.



**Fig. V.21 :** évolution de  $\dots$  enregistrée lors de l'opération de production du 13/02/06.

# CHAPITRE V : MODELISATION DE L'ENCRASSEMENT

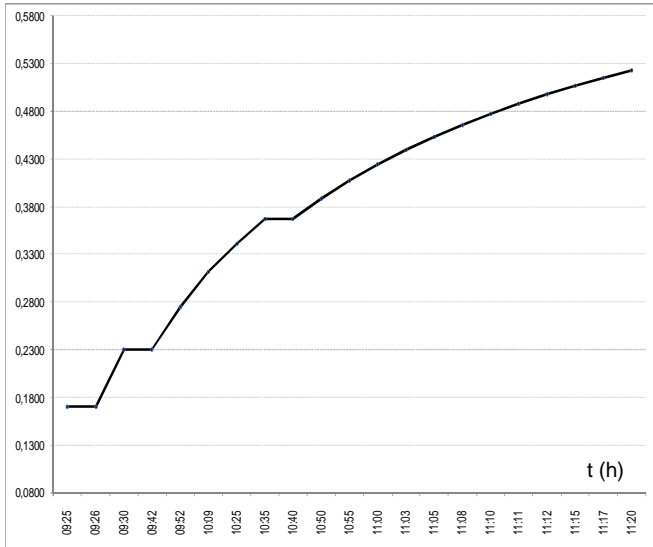


Fig. V.22 : évolution de enregistrée lors de l'opération de production du 19/02/06.

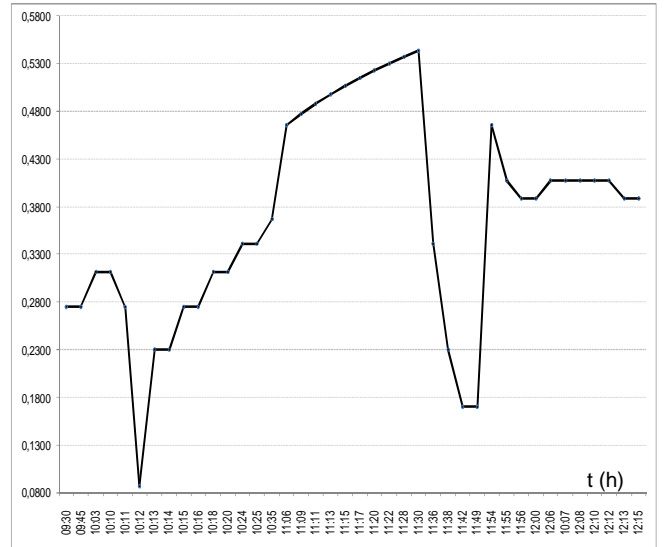


Fig. V.23 : évolution de enregistrée lors de l'opération de production du 26/03/06.

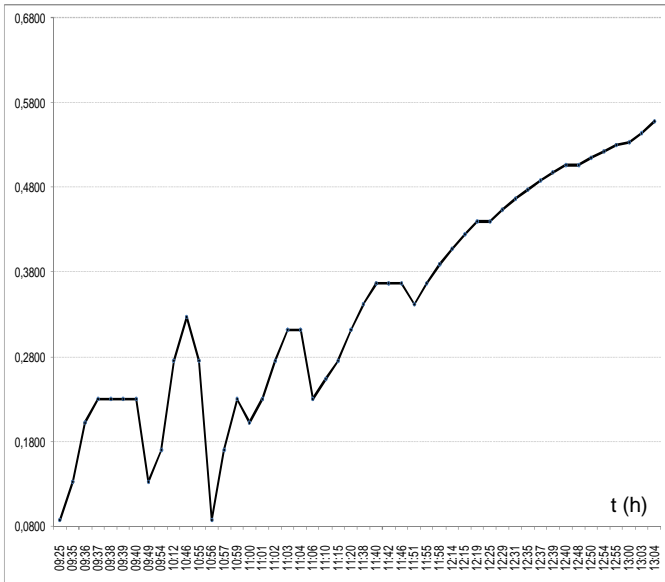


Fig. V.24 : évolution de enregistrée lors de l'opération de production du 08/05/06.

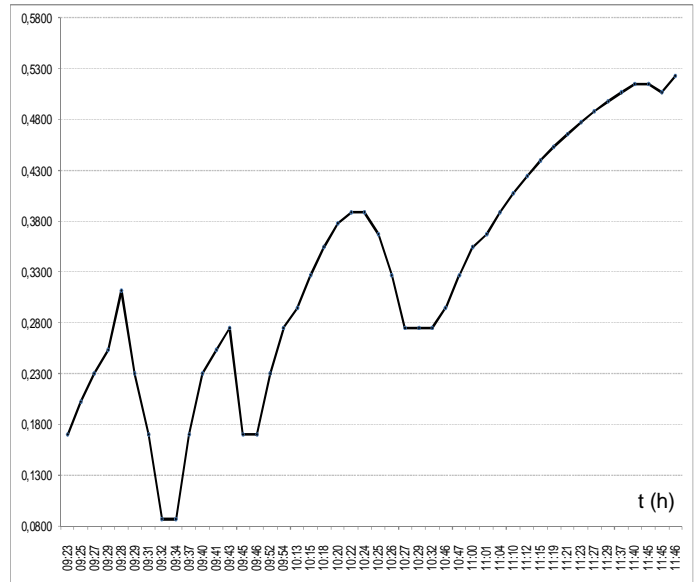


Fig. V.26 : évolution de enregistrée lors de l'opération de production du 29/05/06.

Il est à noter que l'évolution du degré d'encrassement présente une croissance régulière suivant une allure asymptotique, à remarquer que sa valeur initiale n'est jamais nulle ce qui explique le passage du lait entre les plaques provoquant une perte de charge sensiblement supérieure. La présence de pics reflétant l'arrêt momentané de la production (problème au niveau de la chaudière) est observée pour les journées du 12/02/06, 13/02/06, 26/03/06, 08/05/06 et 29/05/06. Plusieurs mois d'observation nous ont permis de constater également, que la **valeur 0.6 du degré d'encrassement** représente **la limite maximale** à partir de laquelle **il est nécessaire de procéder au nettoyage de l'échangeur**.

*Chapitre VI :*

*Impact Economique*

## CHAPITRE VI : IMPACT ECONOMIQUE

---

### INTRODUCTION :

L'encrassement est un problème néfaste pour toutes les industries en général. Néanmoins, il existe peu de données permettant une estimation précise du coût de l'encrassement. Ce coût renferme la consommation supplémentaire d'énergie, les pertes dues à l'arrêt de l'installation ainsi que les frais de maintenance (nettoyage, remplacement des appareils corrodés, etc.).

Dans le but de prouver l'effet de l'encrassement par le lait sur l'industrie laitière en général et du Complexe Laitier d'Alger (COLAITAL) en particulier, une étude économique simplifiée a été menée sur l'installation Steritherm de l'unité UHT.

### VI.1 Prix de nettoyage de l'installation(N) :

C'est la somme de tous les coûts des solutions de nettoyage.

#### VI.1.1 Coût de NaOH (N<sub>1</sub>) :

C<sub>1</sub>: Quantité de NaOH utilisée lors du premier passage = 13 kg.

C<sub>2</sub> : Quantité de NaOH utilisée lors du deuxième passage = 12 kg.

Donc, la quantité totale de NaOH utilisée :  $C = C_1 + C_2$

D'où :  $C = 25$  kg.

Le prix d'un kg de NaOH est estimé à 44 DA.

Donc,  $N_1 = 44 \times 25 = 1100$  DA.

#### VI.1.2 Coût de HNO<sub>3</sub> (N<sub>2</sub>) :

Une quantité  $C_3 = 25$  kg de HNO<sub>3</sub> est utilisée pour le nettoyage de l'installation. Son prix est estimé à 52 Da/Kg

Donc,  $N_2 = 25 \times 52 = 1300$  DA.

## CHAPITRE VI : IMPACT ECONOMIQUE

---

### VI.1.3 Coût de l'eau utilisée lors du nettoyage ( $N_3$ ) :

La détermination de la quantité d'eau totale utilisée lors du nettoyage  $q$ , nécessite le calcul des différentes quantités utilisées lors de la pré-stérilisation et du rinçage de l'échangeur, ajoutons que, 800 l d'eau sont utilisés pour préparer les mélanges de NaOH et de HNO<sub>3</sub> (400 l pour chaque mélange).

Pour un débit d'eau de 4400 l/h circulant dans l'échangeur, on obtient :

- La quantité d'eau  $q_3$  utilisée *lors de la pré-stérilisation* d'une durée de 30 minutes est estimée à :

$$q_3 = (4400 \times 1/2) / 1 \text{ d'où } q_3 = \mathbf{2200 \text{ l.}}$$

- Pour le rinçage, à savoir que quatre cycles d'une durée de 10 minutes sont programmés lors du processus de nettoyage, la quantité d'eau  $q_4$  est estimée à :

$$q_4 = (40 \times 4400) / 60 \text{ d'où } q_4 = \mathbf{2933,33 \text{ l.}}$$

Donc, la quantité totale est estimée à  $q = q_3 + q_4 + 400 + 400 = \mathbf{5933,33 \text{ l}}$ ,

$$\text{D'où: } q = \mathbf{5,93 \text{ m}^3}.$$

Le prix d'un mètre cube d'eau = 24,70 DA

A cet effet le prix de l'eau utilisé lors du nettoyage est estimé à  $N_3 = 24,70 \times 5,93$

$$N_3 = \mathbf{146,5 \text{ DA}}$$

### VI.1.4 Coût de nettoyage ( $N$ ) :

Le coût de nettoyage est évalué à :

$$N = N_1 + N_2 + N_3$$

$$N = 1100 + 1300 + 146,5 \text{ d'où } N = \mathbf{2546,5 \text{ DA}} \text{ par cycle.}$$

## CHAPITRE VI : IMPACT ECONOMIQUE

---

Prenons comme hypothèse qu'en moyenne l'échangeur est nettoyé une fois par jour, donc *le coût annuel de nettoyage* est estimé à:  $N = 2546,5 \times 365 = 929.472,5 \text{ DA}$

### VI.2 Manque à gagner :

Nous avons :

D'une part, la quantité de poudre de lait utilisée chaque jour est  $q_1 = 106 \times 25 = 2650 \text{ kg}$ . Le Prix d'un kilo de poudre de lait 0% MG est de 154 DA. Le prix de la poudre de lait utilisée est estimé à :  $P_1 = 2650 \times 154 = 408100 \text{ DA/J}$ .

D'autre part, le dépôt constitue une perte en matière première et cela a été confirmé lors du calcul E.S.D avant et après stérilisation (voir page 31). Avant stérilisation, l'extrait sec dégressif (E.S.D) était de 94 g/l alors qu'après stérilisation, cette concentration était de 93 g/l. Par conséquent, les pertes sont évaluées à 1g/l. A titre d'exemple, les calculs sont présentés pour une production journalière de 14200 l (cas présenté dans la journée du 08/05/06). Ces pertes représentent 15.44 kg de poudre de lait pour cette même production sont estimées à  $p_2 = 15,44 \times 408100 / 2650$ . Donc,  $p_2 = 2378 \text{ DA}$ . *Ce coût est estimé annuellement à:*

$$2378 \times 365 = 867.970 \text{ DA}$$

Les pertes *économiques totales annuelles* engendrées par l'encrassement durant cette étude serait, par conséquent:

$$P = 929.472,5 + 867.970 = 17.974.442,5 \text{ DA}.$$

Donc, le Complexe Laitier d'Alger (COLAITAL) *a dépensé pour les cycles de nettoyage de l'unité de production du lait stérilisé, plus de 17 millions de DA/an*. Cette estimation des dépenses connaîtra une augmentation, si les coûts dus à l'apport d'énergie supplémentaire et au frais de démontage et de montage de l'installation (arrêt de la production) étaient pris en considération.

*Conclusion Générale et  
Recommandations*

### CONCLUSION GENERALE :

L'objectif du présent travail a été d'étudier le phénomène d'encrassement d'un échangeur de chaleur à plaques dans l'unité de production du lait stérilisé UHT se trouvant au niveau du Complexe Laitier d'Alger (COLAITAL). Cette étude a porté sur le suivi de la perte de charge au cours du temps, les différentes analyses faites au niveau du laboratoire de l'unité et enfin une évaluation économique des pertes causées par ce phénomène.

Au début de la présente étude, les résultats obtenus lors d'un suivi journalier de la perte de pression confirment la présence d'un dépôt contenant tous les composants du lait ainsi que les sels minéraux qui proviennent de l'eau de process et celle de pré-stérilisation. A cet effet, plusieurs analyses ont été effectuées aux niveaux du laboratoire de l'unité entre autre celle de l'eau de process, de pré-stérilisation et de rinçage qui sont des eaux dures fortement ou moyennement minéralisées, ce qui nécessite une déminéralisation partielle avant utilisation.

Le dépôt qui se forme au niveau du compartiment stérilisation, résulte du chauffage intense et bref du lait, modifiant certaines de ses propriétés et le rendant instable (dénaturation des protéines qui deviennent polymérisées d'une manière irréversible et donnent des particules totalement insolubles par une réaction du 1<sup>er</sup> 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.

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 pour nettoyage engendrant des coûts économiques estimés à plus de 17 millions de DA/an. Ces estimations excluent les coûts énergétiques.

## CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

---

### RECOMMANDATIONS :

A la lumière des problèmes rencontrés lors de la présente étude, les recommandations suivantes sont à suggérer :

- Utiliser une eau traitée pour la pré-stérilisation et pour le mélange eau-poudre de lait.
- Micro filtrer le lait pour une réduction bactérienne moyenne de 99,9% de la flore totale où le lait est chauffé pendant 5 à 10 secondes autour de 100°C soit un écart de plus de 40°C comparativement au procédé UHT. Ce procédé permet d'obtenir un lait ayant de meilleures qualités organoleptiques que celles du lait UHT : la teneur en lactulose du lait micro filtré est très inférieure à celle du lait UHT (36 mg/kg versus 125 mg/kg), ce qui *atteste d'un faible niveau de réaction de Maillard* [35].
- Utiliser des émulsifiants 100 % d'origine végétale issues du saccharose et de la matière grasse végétale dont la propriété est de former des complexes avec les protéines. Ainsi ils sont protégés de la dénaturation qui résulte des traitements thermiques ou de l'acidité du milieu, ce qui facilite également le nettoyage de l'échangeur [36].
- Utiliser des gélifiants qui ont le pouvoir de former un gel avec les milieux aqueux et en présence des ions K et Ca, ce gel est mou et élastique [2].

En dehors des ces recommandations, il serait souhaitable *d'abaisser la température de stérilisation (paramètres opératoires affectant l'encrassement)* à moins de 137°C car elle se situe entre *135-140°C* [2]. Les résultats de calcul utilisant l'algorithme de la page 50 pour une température de stérilisation égale à 135°C sont représentés dans le tableau 1 :

**Tableau 1: Propriétés physiques du mélange et caractéristiques hydrodynamiques et thermiques du process**

	Fluide froid	Fluide chaud
$\mu$ (cP) $10^{-3}$	0,3417	0,2147
Cp (J/kg°C)	4032,2	4241
k (W/m°C)	0,67	0,68
Q (m <sup>3</sup> /s) $10^{-3}$	1,22	1,11
A (m <sup>2</sup> ) $10^{-3}$	2,14	2,14
u (m/s)	0,57	0,52
d <sub>e</sub> (m) $10^{-3}$	9	9
Re	14803	20435

## CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

---

	Fluide froid	Fluide chaud
<b>Pr</b>	2	1,3
<b>Nu</b>	171,9	178,4
<b>h (W/m<sup>2</sup>°C)</b>	12797	13479

D'où :

Le coefficient global de transfert de chaleur avant encrassement  $U_0$  calculé à travers l'expression (V.8) est :

$$U_0 = 2220 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Le coefficient global de transfert après encrassement  $U$  calculé à travers l'expression est :

$$U = \frac{U_0}{1 + Bi} \text{ avec le nombre de Biot : } Bi = 1,96 .$$

Donc :

$$U = 750 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

A cet effet, à travers l'équation  $R_d = \frac{1}{U} - \frac{1}{U_0}$  :

$$R_d = 8,83 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2\text{°C/ W}$$

## CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

---

En conclusion, en comparant ces résultats avec la moyenne calculée (programme Fortran) du coefficient globale de transfert de chaleur et celle de la résistance d'encrassement (exemple la journée du 29/01/06) dont les valeurs sont **563,31 W/m<sup>2</sup>•C** et **13,41 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>°C/W** respectivement, nous obtiendrons :

Une augmentation du coefficient globale de transfert de chaleur de **33,14%**, ce qui conduit à une baisse de la résistance thermique de l'encrassement de **34,16 %** .

En sommes, avec une simple baisse de la température de stérilisation (rester toujours dans l'intervalle de stérilisation), nous obtiendrons **une réduction de près d'un tiers de la résistance d'encrassement**, ce qui engendrera éventuellement, une diminution des coûts économiques plus précisément, les coûts dus à l'apport d'énergie supplémentaire.

*Références*

*Bibliographiques*

## Références bibliographiques

---

- [1]: MOUHEB, A., **Etude du phénomène d'encrassement dans les échangeurs de chaleur**, mémoire de Doctorat, USTHB, FGMGP (2008).
- [2]: LUQUET, F., M., **Laits et produits laitiers VACHES BREBIS CHEVRES. Les produits laitiers transformation et technologies**, Paris, Technique et Documentation Lavoisier, Tome 2, deuxième édition (1990).
- [3] : **Manuel d'instruction de COLAITAL**.
- [4] : LABSI, N., **Etude de l'encrassement des échangeurs de chaleur du circuit préchauffe de la raffinerie d'Alger**, mémoire de Magister, USTHB, FGMGP (2003).
- [5] : LALLEMARD, A., **Technique de l'ingénieur**, BE6, p B2344 - 1-B2344 ó 3 (1998).
- [6]: GEORGIADIS, M., C., MACCHIETTO, S., **Dynamic modelling and simulation of plate heat exchangers under milk fouling**, Chemical Engineering Science, N° 55 (2000).
- [7]: JONG, P. De., VAN DER LINDEN, H. J. L. J., **Design and operation of reactors in the dairy industry**, Chemical Engineering Science, N°47 (1992).
- [8]: LEMOINE, R., **Fast pour évaluer l'impact du traitement thermique sur le lait**, RLF Revue Laitière Française, N° 606, p25-26 (2000).
- [9] : DUFFAU, C., GRILLOT, J., M., NAVARRO, J., M., VIDIL, R. **L'encrassement dans les échangeurs. Description. Prévention. Remèdes**, GRET deuxième édition (1991).
- [10] : MASRI, M. A., BOUKHALFA, S.E., **Etude de l'encrassement des échangeurs de préchauffe de l'unité de reforming catalytique II (RA1/K)**, 4èmes. Jour. Sci. de Sonatrach (2000).
- [11]: Bipan Bansal, Xiao Dong Chen, **A Critical Review of Milk Fouling in Heat Exchangers**, Vol. 5, comprehensive reviews in food science and food safe (2006).
- [12]: BENADJI, M., GOUERA, M., **Modélisation de la vitesse d'encrassement par réaction chimique**, Mémoire d'ingénieur, USTHB, FGMGP (1995).

[13]: WATKINSON, P., MULLER-STEINHAGEN, H., MALAYERI, M.R., **Fundamentals and Applications**, ECI Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning: Santa Fe, New Mexico, USA (2003).

[14]: OUFER, L., **fouling characteristics of organic fluids**, Phd, Oregon State university, USA (1990).

[15]: MAHDI, Y., OUFER, L., **Simulation numérique de l'encrassement des échangeurs de chaleur à plaque par le lait lors d'une phase de pasteurisation**, VIIème Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes 23-25 mai 2005, Saint-Malo.

[16]: CLAUDAGNE, D., M. BOHNET, T. R. BOTT, A. J. KARABELAS, P. A. PILAVACHI, R. SRMARRIA., R. VIDIL, **Fouling Costs in the Field of Heat Exchange Equipment in the French Market. In Fouling Mechanisms: Theoretical and Practical Aspects**, pp. 21-25, Editions Europrennes Thermique et Industrie, Paris, France, (1991).

[17]: VISSER, J, TH. J., M, JEURNINK, **Fouling of Heat Exchangers in the Dairy Industry**, ELSEVIR Received April 17, 1996; revised September 15, (1996) NIZO, 6710 BA Ede, Netherlands

[18]: CORRIEU, G., LALANDET, M., R, FERRET, **Mesure en Ligne de l'Encrassement et du Nettoyage d'un Stérilisateur UHT Industriel**, Journal of Food Engineering 5 (1986) 231-248 INRA- Laboratoire de Génie Industriel Alimentaire, 369, rue Jules Guesde, F-59650 Villeneuve d'Ascq, France

[19]: Manuel technique de l'installation **STERITHERM Le système UHT le plus économique sur le marché**.

[20]: HOLGER,M., **Heat Exchangers**, Canada, Hemisphere (1992).

[21]: KNUDSEN, J.,G **Fouling heat exchangers**, New York, Handbook of design G-F Hewit, (1996).

[22] : CHARPENTIER, J., C., **Techniques de l'ingénieur**, J1080 p 9.

- [23]: BOUDIER, J., F., LUQUET, F., M., **«Dictionnaire laitier»**, Paris, Technique et Documentation, deuxième édition (1981).
- [24] : **«Document de la Société MILK TRADE»**.
- [25] : ADRIAN, J., FRANGNE, R., **«La science alimentaire de A à Z»**, Paris, Technique et Documentation Lavoisier (1986).
- [26] : **«Technologie Laitière »**, p 3-4-8-10.
- [27] : VIGNOLA, C.,L., **«Science et technologie du lait - transformation du lait»**, Québec, presses internationales polytechnique scientifique, Ecole polytechnique de Montréal, (2002).
- [28] : **«Fiche technique du cahier de charge de la MILK TRADE»**.
- [29]: HINTON, A, R., **«Thermophile Adhesion to Stainless Steel and Milk Fouling from Static Cultures»** MASSE UNIVERSITY. New Zealand (2000).
- [30]: LECLERC- PERLAT, M. N., LALANDE, M., **«A review on the modelling of the removal of porous contaminant deposited on heat transfer surfaces»**, International Chemical Engineering, N° 31 (1991)
- [31]: 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).
- [32]: ECKERT, E.R.G., DRAKE, R.M., **«Heat and Mass Transfer»** Mc Graw-Hill (1972).
- [33]: ALONG, C., **«Essential Heat Transfer»** British Library (1999).
- [34]: FITNÝ, R.,**« FEMINA (Finite Element Method for thermal, flow, stress and residence time distribution analysis) Part II. Theoretical manual»** Grant Agency of Czech Republic as the project 101/02/0649; FEM3AII.DOC last update (25.2.2005).
- [35]: **«MICROFILTRATION DU LAIT»**, ENSIA (Ecole Nationale Supérieure des Industries Agricoles et Alimentaires) ; FETE DE LA SCIENCE 17-19 octobre (2003).
- [36] **« Des émulsifiants qui évitent la dénaturation des protéines»**, RLF revue laitière française, N° 596 (1999), p31.



*Annexes*

## ANNEXE I

### BULLETIN D'ANALYSE

Produit : **POUDRE DE LAIT DEMI-ECREME**

Origine : **BELGIQUE**

Fournisseur : **SUISSE**

Acheteur : **MILK TRADE**

### RESULTATS D'ANALYSES ET TESTS

Test / Analyse	Moyenne*	Spécifications
Matière grasse	1,24 %	Ö1,25 %
Teneur en eau	3,9 %	Ö4 %
Acidité	0,11 %	Ö0,15 %
pH	6,6 %	Ö6,6
Inhibiteur	Absence	Absence
Additifs	Nil	Aucun
Phosphatase	Négatif	Négatif
Solubilité	99,9 %	× 99 %
Epreuve filtration	A	Disque A/ tolérance disque B  (Ö15 mg/25 gr)
Dispérsibilité	74,6 %	× 70 %
Babeurre ou lactosérum	Absence	Absence
Lactose	52 %	Ö52 %
Protéines (NX6,39)	35 %	× 34 %
Sels minéraux	8 %	8 % moyenne
Indice WPI	3,9 mg/gr	1,51 à 5,99 mg/gr
Germes aérobies revivifiables	3100/gr	Ö50 000
Germes coliformes	0/gr	Absence
E.coli	0	Absence
Salmonelles	Absence	Absence
Staphylocoques aureus	0	Absence
Clostridium sulfite-réducteurs	< 10/gr	Ö10
Clostridium S.R à 46°C	0/gr	Absence
Levures et moisissures	< 20/gr	Ö50
Antiseptique	0	Absence
Antibiotique	0	Absence
Dioxine	0	Absence
Mycotoxines	0	Ö10 ppm
Fer	< 4 ppm	Ö1,5 ppm
Cuivre	< 1 ppm	Ö0,15 ppm
Aldrine	< 0,1 ppm	Ö0,15 ppm
Endrine	< 0,2 ppm	Ö0,20 ppm
Heptachlore et epoxyheptachlore	< 0,1 ppm	Ö0,125 ppm

Octochlore ou chlorante	< 0,05 ppm	0,05 ppm
DDT/DDE/DDD (ensemble)	< 1 ppm	Ö1 ppm
HCH alpha	< 0,2 ppm	Ö0,20 ppm
HCH beta	< 0,02 ppm	Ö0,02 ppm
HCH gamma	< 0,02 ppm	Ö0,02 ppm
HCB	< 0,1 %	Ö0,1 %
Fenitron	< 5 ppm	Seuil de détection (OMS/FAO)
Américium 241	< 0,2 Bq/Kg	Ö1
Iode 131	< 10 bq/Kg	Ö67
Cesium 137	< 20 Bq/Kg	Ö267
Cesium 134	< 20 Bq/Kg	Ö202
Plutonium 239	< 0,1 Bq/Kg	Ö1
Strontium 90	< 10 Bq/Kg	Ö67
Pesticides organochlorées	Conformes	Normes FDA (USA) et codex alimentarius

( \* ) : Analyses effectuées sur échantillons prélevés en cours de conditionnement.

Les résultats ci-dessus représentent la moyenne des résultats effectués sur les totalités des lots.

**CONCLUSION :** Les résultats obtenus sont conformes aux spécifications techniques du cahier de charges de la MILK TRADE ; voir les spécifications techniques de la poudre de lait citées ci-dessous :

## SPECIFICATIONS TECHNIQUES POUDRE DE LAIT DEMI-ECREME

### 1.1° / Caractéristiques Physiques et organoleptiques

- Goût agréable, sans odeur de cuit.
- Couleur : blanc / crème.
- Aspect : homogène, sans grumeaux durs, ni points noirs.
- Absence d'impuretés.

### 1.2° / Caractéristiques Physico-chimiques

Teneur en matière grasse	1,25 % maximum
Teneur en eau	4 % maximum
Acidité titrable ADMI	0,15 % maximum
pH	6,6 environ
Neutralisants / inhibiteur	Absence
Additifs	Aucun
Phosphatase	Négative
Solubilité	99% minimum
Epreuve de filtration	Disque A, tolérance disque B(15mg/25 gr maximum)
Dispérsibilité	70 % minimum
Babeurre et/ ou lactosérum	Absence
Lactose	52% maximum (Moyenne 50%)
Protéines (NX6,39)	34% minimum (Moyenne 37%)
Sels minéraux	8% en moyenne
Indice WPNI	Medium Heat 1,51 à 5,99 mg/gr
Indice WPNI	Low Heat >/ 6,0 mg/gr

### 1.3° / Caractéristiques Bactériologiques

Germes aérobies revivifiables / gr	50.000 Maximum
Germes coliformes /gr	01 Maximum
Germes pathogènes au toxinogène	Absence
E. coli / 0,1 gr	Absence
Salmonelles / 25 Grs	Absence
Staphylocoques aureus / 0,1 gr	Absence
Clostridium sulfite réducteurs /gr	10 Maximum
Clostridium S.R à 46° C (perfringens)/gr	Absence
Levures et moisissures /gr	50 Maximum

#### 1.4° / Caractéristiques Toxicologique

Antiseptique	Absence
Antiseptique	Absence
Dioxine	Absence
Mycotoxines	Absence
Fer (Max)	10 ppm
Cuivre (Max)	1,5 ppm

#### 1.5° / Limite Maximale de Tolérance en résidus pesticides

Aldrine	0,15 ppm
Dieldrine	0,15 ppm
Endrine	0,20ppm
Heptachlore et epoxyheptachlore	0,125ppm
Octachlore ou chlorane	0,05ppm
D.D.T, D.D.E ,D.D.D (ensemble)	1,00ppm
H.C.H alpha	0,2ppm
H.C.H beta	0,02ppm
H.C.H gamma	0,02ppm
H.C.B	0,1%
Fenitrothion	Seuil de détection (OMS/FAO)

#### 1.6° / Tolérance Maximales des concentrations radioactives

Iode 131	67 becquerels /kg
Césium 137	267 becquerels /kg
Césium 134	202 becquerels /kg
Strontium 90	67 becquerels /kg
Americium 241	01 becquerels /kg
Plutonium 239	01 becquerels /kg

#### QUELQUES DEFINITIONS :

**1- La caséine :** Complexe protéique de lait précipitant à pH = 4,6, sa teneur moyenne dans le lait est de 27 g/l, elle présente des caractères amphotères dus à la présence des molécules (COOH) et (NH<sub>2</sub>).

Il y a trois types de la caséine :

- a- Caséine .
- b- Caséine .
- c- Caséine .

**2- Le degré DORNIC :** Unité de l'acidité avec  $1^{\circ}D = 0,1$  acide lactique.

**3- Le degré français :** Unité de la dureté de l'eau avec  $1^{\circ} F = 1/5$  mg/

## ANNEXE II

### CARACTERISTIQUES DE L'EAU

T (°C)	$\mu$ (kg/m.s) $\times 10^{-3}$	T (°C)	$\mu$ (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

**CARDOT, C., F, LAFARGE., N, ORTEGA.,(2001)**

## ANNEXE III

### PROGRAMME FORTRAN

```
program milkfouling
```

```
real
```

```
U0,hc,hf,k1,Visf,e,Vis0,Visc,G,Vp,Vt,Q1,Q2,v1,v2,A,Mvf,Mvc,de,Cp1,Cp2,k,k2,k3,kp,n,  
Re1,Pr1,Nu1,Re2,Pr2,Nu2,dp(100),Re(100),Bi(100),hf1(100),Nu(100),U(100),Rd(100)
```

```
print 10
```

```
read*,Vis0
```

```
print 20
```

```
read*,Vp
```

```
print 30
```

```
read*,Vt
```

```
print 40
```

```
read*,Q1
```

```
print 50
```

```
read*,Q2
```

```
print 60
```

```
read*,A
```

```
print 70
```

```
read*,Mvf
```

```
print 80
```

```
read*,Mvc
```

```
print 90
```

```
read*,de
```

```
print 100
```

```
read*,Cp1
```

```
print 110
read*,Cp2
print 120
read*,k
print 130
read*,Visc
print 140
read*,k1
print 150
read*,k2
print 160
read*,kp
print 170
read*,k3
print 180
read*,e
print*,'n='
read*,n
do i=1,n
print 190,i
read*,dp(i)
enddo
```

$$G=Vp/Vt$$

```
print*,'G=',G
```

$$\text{Visf}=\text{Vis0}*(1+2.5*G)$$

print\*, 'Visf=', Visf

$$v1=Q1/A$$

print\*, 'v1=', v1

$$\text{Re1}=(Mvf*v1*de)/\text{Visf}$$

print\*, 'Re1=', Re1

$$\text{Pr1}=(\text{Visf}*Cp1)/k$$

print\*, 'Pr1=', Pr1

$$\text{Nu1}=0.2536*(\text{Re1}^{**0.65})*(\text{Pr1}^{**0.5})$$

print\*, 'Nu1=', Nu1

$$hf=(\text{Nu1}*k)/de$$

print\*, 'hf=', hf

$$v2=Q2/A$$

print\*, 'v2=', v2

$$\text{Re2}=(Mvc*v2*de)/\text{Visc}$$

print\*, 'Re2=', Re2

$$\text{Pr2}=(\text{Visc}*Cp2)/k1$$

print\*, 'Pr2=', Pr2

$$\text{Nu2}=0.2536*(\text{Re2}^{**0.65})*(\text{Pr2}^{**0.5})$$

print\*, 'Nu2=', Nu2

$$hc=(\text{Nu2}*k1)/de$$

print\*, 'hc=', hc

$$U0=1/((1/hf)+(1/hc)+(e/kp))$$

print\*, 'U0=', U0

do i=1,n

$$\text{Re}(i) = (\text{dp}(i) / (k3 * \text{Mvf} * \text{Q1} ** 2)) ** (1/k2)$$

$$\text{Nu}(i) = 0.2536 * (\text{Re}(i) ** 0.65) * (\text{Pr1} ** 0.5)$$

$$\text{hf1}(i) = \text{Nu}(i) * k / \text{de}$$

$$\text{Bi}(i) = (e/kp) / ((1/hc) + (1/hf1(i)))$$

$$\text{U}(i) = \text{U0} / (1 + \text{Bi}(i))$$

$$\text{Rd}(i) = (1/\text{U}(i)) - (1/\text{U0})$$

print\*, 'hf(', i, ')=' , hf(i)

print\*, 'Rd(', i, ')=' , Rd(i)

enddo

10 format(2x, 'valeur de Vis0=', \$)

20 format (/2x, 'valeur de Vp=', \$)

30 format (/2x, 'valeur de Vt=', \$)

40 format (/2x, 'valeur de Q1=', \$)

50 format (/2x, 'valeur de Q2=', \$)

60 format (/2x, 'valeur de A=', \$)

70 format (/2x, 'valeur de Mvf=', \$)

80 format (/2x, 'valeur de Mvc=', \$)

90 format(/2x, 'valeur de de=', \$)

100 format(/2x, 'valeur de Cp1=', \$)

110 format(/2x, 'valeur de Cp2=', \$)

120 format(/2x, 'valeur de k=', \$)

130 format(/2x, 'valeur de Visc=', \$)

140 format(/2x, 'valeur de k1=', \$)

150 format(/2x,'valeur de k2=',)\$

160 format(/2x,'valeur de kp=',)\$

170 format(/2x,'valeur de k3=',)\$

180 format(/2x,'valeur de e =',)\$

190 format(2x,'dp('i3,')=',)\$

End

## NOMENCLATURE DU PROGRAMME FORTRAN

Symbole	Définition	Unité
A	Surface d'échange de chaleur	m <sup>2</sup>
Bi	Nombre de Biot	-
d <sub>e</sub>	Diamètre hydraulique	m
e	Épaisseur de la plaque	m
h <sub>f</sub>	Coefficient de transfert de chaleur du fluide froid	W/m <sup>2</sup> °C
h <sub>c</sub>	Coefficient de transfert de chaleur du fluide chaud	W/m <sup>2</sup> °C
K	Conductivité thermique de l'eau	W/m°C
k <sub>l</sub>	Conductivité thermique du lait	W/m°C
K <sub>p</sub>	Conductivité thermique de la plaque	W/m°C
k <sub>2</sub> , k <sub>3</sub>	Constantes de la relation (23) : $P_{\square} = k_3 Re^{\square} Q^2$	-
Pr <sub>1</sub>	Nombre de Prandtl du fluide froid	-
Pr <sub>2</sub>	Nombre de Prandtl du fluide chaud	-
Q <sub>2</sub>	Débit du lait	m <sup>3</sup> /s
Q <sub>1</sub>	Débit d'eau	m <sup>3</sup> /s
Re <sub>1</sub>	Nombre de Reynolds du fluide froid	-
Re <sub>2</sub>	Nombre de Reynolds du fluide chaud	-
R <sub>d</sub>	Résistance d'encrassement pour une surface sale	m <sup>2</sup> °C/W
U	Coefficient global de transfert de chaleur pour une surface propre	W/m <sup>2</sup> °C
U <sub>0</sub>	Coefficient global de transfert de chaleur pour une surface sale	W/m <sup>2</sup> °C
v <sub>1</sub>	Vitesse du fluide froid	m/s
v <sub>2</sub>	Vitesse du fluide chaud	m/s
V <sub>p</sub>	Volume des particules du fluide	m <sup>3</sup>
V <sub>T</sub>	Volume total du fluide	m <sup>3</sup>
D <sub>p</sub>	Perte de charge	bar
Nu <sub>1</sub>	Nombre de Nusselt	-
Nu <sub>2</sub>	Nombre de Nusselt	-
C <sub>p1</sub>	Chaleur spécifique du lait	J/Kg°C
C <sub>p2</sub>	Chaleur spécifique de l'eau chaude	J/Kg°C
M <sub>vc</sub>	Masse volumique d'eau	Kg/m <sup>3</sup>
M <sub>vf</sub>	Masse volumique du lait	Kg/m <sup>3</sup>
G	équation (9) : (volume des particules)/ (volume total)	-
Visc <sub>0</sub>	Viscosité dynamique de l'eau	Kg/m.s
Vis <sub>f</sub>	Viscosité dynamique de l'eau chaude	Kg/m.s
Visc	Viscosité dynamique du lait	Kg/m.s