

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITÉ de BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de Génie des Procédés



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER EN GENIE CHIMIQUE

Option : Génie catalytique.

Présenté par :

Melle Hanane BOUCHEKOUK

**Modélisation des phénomènes d'encrassement des
échangeurs de chaleurs dans le procédé de pasteurisation
du lait**

Encadreurs:

Dr. Sofiane SOUKANE, Université de Blida 1

Dr D MOKHBI-SOUKANE, Université de Blida1

Juin 2015

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord, notre vénéré ALLAH, le tout puissant, à qui nous devons le tout.

Il m'est agréable d'exprimer ma reconnaissance à toutes les personnes qui, à titres divers m'ont apporté leur aide pour mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer ma gratitude à mon responsable de recherche monsieur Soukane Sofiane, maître de conférences à l'université de Blida-1, pour avoir dirigé mes travaux de recherche. Je le remercie également pour ses précieux conseils et particulièrement pour sa disponibilité.

Je remercie vivement Madame D.Mokhbi-Soukane d'avoir accepté de co-encadrer ce travail, ainsi que pour sa disponibilité depuis le début de ce travail. J'ai eu l'honneur de la connaître d'avantage et de bénéficier de ses judicieux conseils mais aussi de ses encouragements auxquels j'avais vraiment besoin.

Mes remerciements vont aussi au professeur Issaadi Rachid responsable de ma spécialité pour ses conseils et l'aide qu'il m'a apportée.

J'exprime toute ma gratitude à monsieur Naceur M.Wahib, professeur à Université de Blida-1, pour les orientations et les conseils qu'il m'a transmis pendant mon travail.

Mes vifs remerciements à tous les professeurs du département génie des procédés qui m'ont aidé tout au long de mon cursus universitaire.

Je remercie mon Papa, qui m'a suivie et toujours soutenue dans mon parcours et qui a mis à ma disposition tous les moyens requis pour mon éducation et mon instruction.

Enfin, très nombreux sont les gens de près ou de loin qui ont participé à la réalisation de ce travail ; tout en m'excusant de ne pas les citer, je leur exprime mes remerciements les plus sincères.

RESUME

Durant le procédé de pasteurisation, le traitement du lait et ses dérivés dans les échangeurs de chaleur à plaques est limité par l'agrégation des protéines. Le mécanisme d'encrassement sur les surfaces des plaques chaudes est dû à la dénaturation et l'agrégation de la β -lactoglobuline (β -Lg). Une compréhension des mécanismes qui régulent ce dépôt est fournie partiellement par des études expérimentales. Des investigations numériques complémentaires doivent s'y ajouter pour analyser les principaux paramètres qui affectent l'encrassement des échangeurs de chaleur à plaques.

Dans ce travail, une étude numérique d'un modèle bidimensionnel a été effectuée pour simuler localement la dénaturation et l'agrégation de la protéine induite par la chaleur. La conception des géométries et des maillages a été réalisée en utilisant des logiciels commerciaux. Pour chaque conception, la vitesse d'entrée du fluide est altérée dans le but d'évaluer son effet sur le niveau de dénaturation de la β -Lg.

Une influence directe des paramètres géométriques est observée sur la dénaturation et l'agrégation de la β -Lg induite par la chaleur lors de la pasteurisation du lait. Les modèles étudiés ont montré que le niveau de dénaturation et l'agrégation de la β -Lg pouvait diminuer en changeant le design de l'échangeur de chaleur, ce qui entraîne une plus faible consommation d'énergie et une réduction dans les étapes de nettoyage, au profit de l'entreprise.

Mots clés : β -Lactoglobuline; Encrassement des protéines; La dénaturation thermique; L'agrégation; Echangeur de chaleur à plaques; CFD.

ABSTRACT

During the pasteurization process, the treatment of milk and its derivatives in plate heat exchangers is limited by protein aggregation; the mechanism of fouling on the surfaces of the hot plates is due to the denaturation and aggregation of β -lactoglobuline. An understanding of the mechanisms that regulate the deposit is partially provided by experimental studies. Additional numerical investigations must be added to analyze the main parameters that affect the fouling of plate heat exchangers.

In the present work, a numerical study of a two-dimensional model was conducted to locally simulate the denaturation and aggregation of the protein caused by heat. Geometries and meshes were created using commercial software. For each design, the fluid inlet velocity is altered in order to evaluate its effect on the level of the β -Lg denaturation.

A direct effect of the geometrical parameters is observed on the denaturation and aggregation of the β -Lg induced by heat during the milk pasteurization process. Results emphasize that the level of denaturation and aggregation of β -Lg could decrease by changing the design of the heat exchanger, hence improving the company's performance and benefit by decreasing the cleaning steps and the energy consumption.

Key words: β -Lactoglobuline; Protein fouling; Thermal denaturation; Aggregation; Plate heat exchanger; CFD.

ملخص

أثناء عملية البسترة، معالجة الحليب و مشتقاته داخل مبادلات الحرارة ذات الصفائح تكون محدودة بتجمع البروتينات، ترجع آلية الترسيب على مساحة الصفائح الساخنة لتحول و تجمع البيتالاغلوبولين (β -Ig). و لفهم هذه الآلية التي تنظم هذا الترسيب جزئيا من خلال دراسات تجريبية. و إستقصاءات عددية مكملة يجب إضافتها لتحليل العناصر الرئيسية التي تؤثر على آلية الترسيب في مبادلات الحرارة ذات الصفائح.

في هذا العمل دراسة عددية لنموذج ثنائي الأبعاد لمحاكاة محليا تحول و تجمع البروتين الحراري، وتم تصميم النماذج الهندسية و الشبكات باستعمال برمجيات عملية. من أجل كل تصميم هندسي قمنا بتغيير سرعة السائل الداخل بهدف تقييم تأثيرها على تحول β -Ig .

تم ملاحظة التأثير المباشر لخصائص النموذج الهندسي على تحول و تجمع β -Ig التي تسببها الحرارة خلال عملية بسترة الحليب . بينت النماذج المدروسة أنه يمكن إنقاص مستوى تحول و تجمع β -Ig يؤدي الاقتصاد في إستهلاك الطاقة و تسهيل عملية التنظيف، لفائدة الشركة.

كلمات مفتاح:

بيتالاغلوبولين – ترسيب البروتينات – التحول الحراري – التجمع – مبادلات الحرارة ذات الصفائح – ديناميك

السوائل الحسابية

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	I
RESUME.....	II
ABSTRACT.....	III
TABLE DES MATIERES	V
Liste des tableaux.....	VII
Liste des figures.....	VIII
NOMENCLATURE.....	XI
INTRODUCTION	13
I GENERALITES	3
I.1 Echangeurs de chaleur	3
I.1.1 Définition générale des échangeurs de chaleur	3
I.1.2 Principe général de fonctionnement	3
I.1.3 Types d'échangeurs de chaleur	4
I.2 Pasteurisation du lait	6
I.2.1 Composition du lait	6
I.2.2 Structure de la β -lactoglobuline	7
I.2.3 Définition du procédé de pasteurisation	9
I.2.4 La composition de l'unité de pasteurisation	10
I.2.5 Procédé de pasteurisation (HTST).....	10
I.2.6 Avantages du procédé de pasteurisation	11
I.2.7 Opérations de nettoyage des échangeurs de chaleur à plaques après la pasteurisation	12
I.3 Notions sur l'encrassement des échangeurs de chaleur	12
I.3.1 Définition de l'encrassement	12
I.3.2 Types d'encrassement	13
I.3.3 Méthodes d'évaluation de l'encrassement	13
II REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	15
II.1 Etudes expérimentales de l'encrassement dans les échangeurs de chaleur lors de la pasteurisation	15
II.1.1 Composition chimique du lait et du dépôt laitier	15
II.1.2 Mécanisme d'encrassement par des protéines de lactosérum	16

II.1.3	Mécanisme de dénaturation de la β -Lg	17
II.1.4	Mécanisme d'encrassement de la β -Lg	19
II.1.5	Lieu d'encrassement	19
II.1.6	Mécanisme d'adhésion et de formation du dépôt	20
II.1.7	Moyens de prévention de l'encrassement	21
II.2	Etudes numériques les plus récentes sur l'encrassement des échangeurs de chaleur lors de la pasteurisation	22
III	PRE-PROCESSING -PREPARATION DES CALCULS DE CFD	24
III.1	Objectif du travail	24
III.2	Définition de l'outil informatique utilisé	24
III.2.1	L'outil de maillage « GAMBIT »	24
III.2.2	L'outil ANSYS-fluent	25
III.2.3	L'outil Tecplot	27
III.3	Paramètres physico-chimiques du lait	27
III.4	Données sur le fluide chauffant	28
III.5	Modèle cinétique de dénaturation	28
IV	RESULTATS ET DISCUSSION	30
IV.1	Analyse d'un cas de base	31
IV.1.1	Etude hydrodynamique	31
IV.1.2	Etude thermique	33
IV.1.3	Etude de la distribution des espèces chimiques	34
IV.1.4	Effet de la vitesse d'entrée du lait	37
IV.2	Modification des conceptions	38
IV.2.1	Première conception	38
IV.2.2	Deuxième conception	41
IV.3	Comparaison entre les 3 géométries	43
	CONCLUSION.....	45
	REFERENCES	47
	ANNEXE.....	51

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Les avantages et les inconvénients des échangeurs de chaleur à plaques.....	6
Tableau I.2 : Les proportions des différentes protéines du lait.....	7
Tableau III.1 : Paramètres physico-chimique du lait.....	27
Tableau III.2 : Paramètres physico-chimiques de l'eau.....	28
Tableau III 3 : Paramètres cinétiques pour le schéma réactionnel d'encrassement du lait.....	29
Tableau IV.1 : Paramètres de l'échangeur de chaleur à plaques.....	30

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Echangeur thermique.....	3
Figure I.2 : Echangeur de chaleur à plaques.....	5
Figure I.3 : Structure tertiaire de la β -Lg	8
Figure I.4 : Formes oligomériques de la β -Lg en fonction du pH.....	9
Figure II.1 : Comportement thermique de la β -Lg.....	18
Figure II.2 : Schéma de la réaction des protéines.....	19
Figure II.3 : Mécanisme d'adhésion des protéines de la β -Lg sur les surfaces d'acier inoxydable.....	21
Figure IV.1 : Géométrie de base de l'échangeur à plaques.....	30
Figure IV.2 : Maillage non structuré de l'échangeur.....	31
Figure IV.3 : Perte de charge (Pa) le long de l'échangeur.....	32
Figure IV.4 : Lignes de courant au niveau du 8ème et u 9ème canal de l'échangeur de chaleur à plaques.....	32
Figure IV.5 : La distribution du module de vitesse ($m.s^{-1}$) dans le 8ème et le 9ème canal de l'échangeur de chaleur à plaque.....	33
Figure IV.6 : Représentation du profil de la température (K) tout au long de l'échangeur.....	33
Figure IV.7 : Distribution de la température (K) au niveau d'un zoom au 8ème et au 9ème canal de l'échangeur de chaleur à plaques.....	34
Figure IV.8 : Distribution de la fraction massique de la β -Lg dans l'échangeur.....	34

Figure IV.9 : Distribution de la fraction massique de la β -Lg native proche de la zone de connexion entre les plaques.....	35
Figure IV.10 : Distribution de la fraction massique de la β -Lg native dans la zone de connexion entre les plaques.....	35
Figure IV.11 : Distribution de la fraction massique de la β -Lg dénaturée dans l'échangeur.....	36
Figure IV.12 : Distribution de la fraction massique de la β -Lg dénaturée proche de la zone de connexion entre les plaques.....	36
Figure IV.13 : Distribution de la fraction massique de la β -Lg dénaturé dans la zone de connexion entre les plaques.....	37
Figure IV.14 : Niveau de dénaturation de la β -Lg en fonction de la vitesse d'entrée du lait.....	38
Figure IV.15 : Géométrie et maillage de la modification de la zone de connexion.....	39
Figure IV.16 : Distribution de la fraction massique de la β -Lg native au niveau de la nouvelle zone de connexion.....	39
Figure IV.17 : Distribution de la fraction massique de la β -Lg dénaturée au niveau de la nouvelle zone de connexion.....	40
Figure IV.18 : Niveau de dénaturation de la β -Lg en fonction de la vitesse d'entrée du lait après réduction de la zone de connexion entre les plaques.....	41
Figure IV.19 : Modification de la deuxième conception par décalage des plaques de chauffage.....	41
Figure IV.20 : Distribution de la fraction massique de la β -Lg native proche de la zone de connexion entre les plaques	42
Figure IV.21 : Distribution de la fraction massique de la β -Lg dénaturée proche de la zone de connexion entre les plaques	42

Figure IV.22 : Niveau de dénaturation de la β -Lg en fonction de la vitesse d'entrée du lait.....43

Figure IV.23 : Diagramme récapitulatif des niveaux de dénaturation en fonction des vitesses d'entrée du lait dans les 3 géométries.....44

NOMENCLATURE

Lettres latines :

Rd :	La résistance du dépôt encrassent	$(m^2.K.W^{-1})$
U_0 :	Coefficient d'échange global à l'état propre	$(W.m^{-2}.K^{-1})$
U_d :	Coefficient d'échange à l'état encrassé (dépôt)	$(W.m^{-2}.K^{-1})$
Cp :	Chaleur spécifique	$(j.Kg^{-1}.K^{-1})$
Ea :	Energie d'activation	$(j.mol^{-1})$
R :	Constante des gaz parfaits	$(j.mol^{-1}.K^{-1})$
K_0 :	Coefficient pré-exponentiel	$(g^{1-n}.L^{n-1}.s^{-1})$
T :	Temperature	(K)
K_{unf} :	Coefficient pré-exponentiel de la réaction de dénaturation	$(g^{1-n}.L^{n-1}.s^{-1})$
K_{agg} :	Coefficient pré-exponentiel de la réaction d'agrégation	$(g^{1-n}.L^{n-1}.s^{-1})$
Ea_{unf} :	Energie d'activation de la réaction de dénaturation	$(j.mol^{-1})$
Ea_{agg} :	Energie d'activation de la réaction d'agrégation	$(j.mol^{-1})$
Qv :	Débit volumique	$(m^3.s^{-1})$
V :	Vitesse du fluide	$(m.s^{-1})$
S :	Section de passage du fluide	(m^2)
λ :	Conductivité thermique du fluide	$(W.m^{-1}.K^{-1})$
h :	Coefficient d'échange thermique	$(W.m^{-2}.K^{-1})$
D_i :	Coefficient de Diffusion dans le composé majeur	$(m^2.s)$
Re :	Nombre e Reynold	
Nu :	Nombre de Nusselt	
Pr :	Nombre de Prandtl	

Symboles grecs :

Φ_c :	Flux de chaleur	$(W.m^{-2})$
ρ :	Masse volumique	$(Kg .m^{-3})$
ν :	Viscosité cinématique	$(m^2.s^{-1})$
μ :	Viscosité dynamique	$(Kg.m^{-1}.s^{-1})$

Indice :

- MPa : Méga Pascal (unité de pression)
- BSA : Sérum Albumine Bovins
- β -Lg : Beta lactoglobuline
- α -La : alpha lactalbumine
- KD : kilo Dalton (unité de mesure de la masse des atomes)
- Cys : Cystéine
- HTST : Température élevée courte durée
- s : sortie
- e : entrée
- pH : Potentiel d'hydrogène
- SH : Groupement sulfhydryle
- N : Protéine native
- U : Protéine dénaturée
- A : Protéine agrégé
- CFD : Computationnelle dynamique fluides
- n : Ordre de la réaction
- DL : Niveau de dénaturation

Introduction

INTRODUCTION

Dans l'industrie laitière; la difficulté majeure rencontrée lors du chauffage des aliments dans un échangeur de chaleur généralement à plaques, est la perte de performance due aux dépôts sur l'acier inoxydable après quelques heures de production. Ce phénomène entraîne un encrassement responsable de la réduction de l'efficacité du transfert de chaleur.

La dégradation des performances thermiques et hydrauliques de l'échangeur est due à la faible conductivité thermique de l'encrassement qui présente une résistance, et à la modification du diamètre hydraulique qui décroît la section de passage et augmente les pertes de charge à travers l'équipement thermique. Par conséquent; la consommation d'énergie augmente et les étapes de nettoyage deviennent fréquentes impliquant une augmentation des coûts.

De ce fait, la réduction de l'encrassement reste un enjeu économique très important puisque la diminution de la fréquence de nettoyage permet d'augmenter la productivité industrielle. En outre la prédiction et l'analyse dynamique de l'encrassement fondées sur une bonne compréhension de la chimie et de la mécanique des fluides sont très utiles pour prédire l'état des échangeurs, où l'encrassement est fortement associé à la dénaturation thermique de la β -Lg.

Cependant, une compréhension des mécanismes qui régulent l'encrassement est offerte partiellement par des études expérimentales. Des investigations numériques complémentaires doivent s'y ajouter pour analyser les principaux paramètres qui affectent l'encrassement des échangeurs de chaleur à plaques. De telles études auront pour but d'identifier l'effet de plusieurs paramètres tels que la géométrie des plaques et les conditions aux limites sur le niveau de dénaturation de la β -Lg.

La présente étude est entamée par des définitions générales sur le procédé de la pasteurisation et sur l'encrassement et son environnement. Le deuxième chapitre est consacré à la revue de la littérature des recherches expérimentales et numériques effectuées sur le phénomène d'encrassement. La préparation des géométries et des maillages est élaborée dans le troisième chapitre. Pour chaque conception, la vitesse d'entrée du fluide est modifiée pour évaluer son effet sur le niveau de dénaturation de la β -Lg. Les résultats ainsi obtenus sont présentés et discutés dans le chapitre IV.

A long terme, ces recherches participent dans la prévention de l'encrassement et le nettoyage conséquent des plaques des échangeurs de chaleur dans le procédé de pasteurisation au profit des entreprises et du consommateur.

Chapitre I : Généralités

I GENERALITES

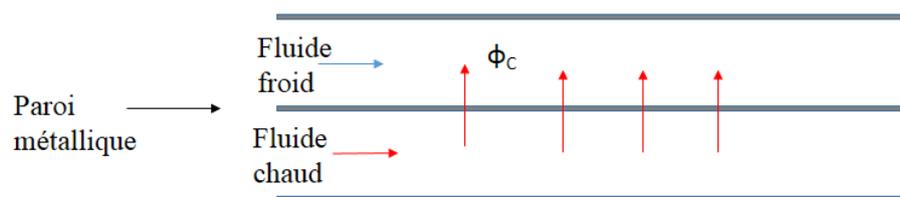
I.1 Echangeurs de chaleur :

I.1.1 Définition générale des échangeurs de chaleur :

Les échangeurs de chaleur sont des dispositifs qui permettent le transfert d'énergie thermique entre deux fluides séparés par une surface solide. Ils représentent des instruments clés dans un champ d'application très large : la production d'énergie mécanique ou électrique à partir de l'énergie thermique, la récupération de l'énergie résiduelle, le chauffage et le conditionnement de l'air, différentes industries-chimiques, alimentaires ou manufacturières, la technique de réfrigération...etc (1).

I.1.2 Principe général de fonctionnement :

Le principe général consiste à faire circuler deux fluides à travers des conduits qui les mettent en contact thermique à travers une paroi qui est le plus souvent métallique (Figure I.1). Un fluide chaud cède de la chaleur à un fluide froid en tout point de l'échangeur, puisque la température du fluide chaud reste partout supérieure à celle du fluide froid. Le principe est simple mais il donne lieu à un grand nombre de réalisations différentes par la configuration géométrique. Le principal problème consiste à définir la surface d'échange suffisante entre les deux fluides pour transférer la quantité de chaleur nécessaire dans une configuration donnée. Les flux de chaleur transférés vont dépendre des températures d'entrée et des caractéristiques thermiques des fluides (chaleur spécifiques, conductivité thermique...etc) ainsi que des coefficients d'échange par convection (2).



FigureI.1 : Echangeur thermique

I.1.3 Types d'échangeurs de chaleur :

Les principaux types d'échangeurs de chaleur sont présentés ci-dessous :

a. Echangeurs à tubes et calandres :

C'est de loin le type d'échangeur le plus répandu mais la part qu'il représente ne cesse de diminuer au profit de configurations plus efficaces. Dans ce type d'échangeurs, l'un des fluides circule dans un réservoir autour des tubes qui le traversent tandis que l'autre fluide circule à l'intérieur des tubes. Le modèle le plus simple est constitué d'un réservoir dans lequel sera plongé un serpentin. Tandis que le modèle le plus courant est constitué d'un faisceau de tubes traversant un réservoir de manière longitudinale (2).

b. Echangeurs tubulaires coaxiaux :

Dans cette configuration, l'un des fluides circule dans le tube central tandis que l'autre circule dans l'espace annulaire entre les deux tubes. On distingue deux types de fonctionnement selon que les 2 fluides circulent : on parle de configuration en co-courant quand les 2 fluides circulent en même sens. Dans le deuxième cas, on parle de configuration en contre-courant, quand ils circulent en sens contraire (2).

c. Echangeurs à courants croisés :

Dans ce type d'échangeurs, l'un des fluides circule dans une série de tubes tandis que l'autre fluide circule perpendiculairement autour des tubes. Dans la plupart des cas, c'est un liquide qui circule dans les tubes tandis qu'un gaz circule autour. Les tubes sont presque toujours munis d'ailettes qui permettent d'augmenter le flux de chaleur échangé en augmentant la surface d'échange (2).

d. Echangeurs de chaleur à plaques :

L'échangeur à plaques est un type d'échangeur de chaleur qui connaît un usage croissant dans l'industrie. Il est composé d'un grand nombre de plaques disposées en forme de millefeuilles et séparées les unes des autres d'un petit espace (quelques millimètres) où circulent les fluides. Le périmètre des plaques est bordé d'un joint qui permet par compression de la structure d'éviter les fuites.

Les plaques ne sont pas plates, mais possèdent une surface ondulée selon un schéma bien précis qui permet de canaliser les fluides se déplaçant à la surface vers les coins de la plaque et d'augmenter ainsi la surface d'échange entre le fluide chaud et le fluide froid.

Le fluide se déplace, par exemple, du coin inférieur gauche vers le coin supérieur gauche de la plaque, où un orifice lié à un tuyau lui permet de passer de l'autre côté de la plaque et de sauter une couche du millefeuille (un espace entre 2 plaques) avant de s'écouler à nouveau le long de la plaque suivante. Ainsi chaque fluide ne circule parallèlement à une plaque que tous les 2 espaces. La Figure I.2 illustre le fonctionnement d'un tel échangeur (2).

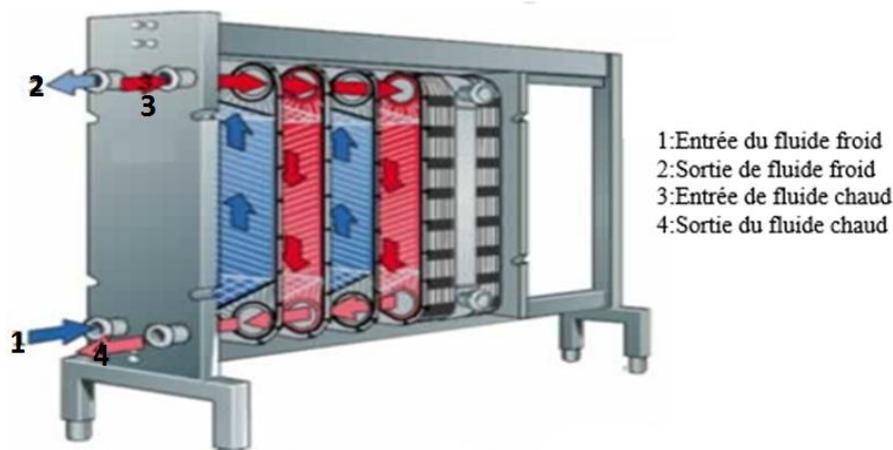


Figure I.2 : Echangeur de chaleur à plaques

L'avantage de ce type d'échangeur est sa simplicité : c'est un échangeur peu coûteux et facilement adaptable par ajout/retrait de plaques afin d'augmenter/réduire la surface d'échange en fonction des besoins (la surface ne peut être augmentée de manière infinie à cause de la perte de charge). La surface en contact avec l'extérieur est réduite au minimum, ce qui permet de limiter les pertes thermiques. L'étroitesse de l'espace où circulent les fluides ainsi que le profil des plaques assurent un excellent transfert de chaleur. Toutefois, ce confinement entraîne une importante perte de charge qui limite le nombre de passages des fluides entre les plaques. Cette perte de charge ne peut être compensée par une pression d'entrée des fluides élevée (< 2.5 MPa) car une trop grande pression causerait des fuites au travers des joints placés entre les plaques. De même; la différence de température entre les 2 fluides ne doit pas être trop grande pour éviter une déformation des plaques par

dilatation/contraction de ces dernières qui empêcherait les joints entre les plaques d'être parfaitement étanches.

Les échangeurs à plaques sont très utilisés dans l'industrie agroalimentaire (pasteurisation du lait). Où les plaques sont généralement en acier inoxydable pour des raisons évidentes d'hygiène et de santé publique (2). Dans le Tableau I.1 on représente les avantages et les inconvénients des échangeurs de chaleur à plaques :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Compacité. • Rendement thermique très élevé. • Economique. • Flexible. • Facilité d'installation et maintenance. 	<ul style="list-style-type: none"> • Faible écart de température possible. • Perte de charge importante. • Pression de travail limitée.

Tableau I.1 : Les avantages et les inconvénients des échangeurs de chaleur à plaques

I.2 Pasteurisation du lait :

I.2.1 Composition du lait :

Le lait est un milieu extraordinairement complexe, à la fois aliment et boisson d'un grand intérêt nutritionnel. Le lait est composé de 87,7 % d'eau, 3,3 % de dérivés azotés, 3,6 % de matière grasse, 4,7 % de glucides et 0,7 % de minéraux. Le lait de vache contient de nombreuses protéines qui sont classiquement regroupées en deux groupes principaux : les caséines, fraction insoluble à pH 4,6 à 20°C et les protéines du lactosérum.

Le lait a une teneur en protéines de l'ordre de 30 - 35 g.l⁻¹. Environ 78 % de ces protéines sont des caséines, comprenant quatre composants majeurs, dénommés α_1 , α_2 , β et k, respectivement à 40 - 10 - 35 et 12 %. Ces caséines sont organisées dans le lait sous forme de micelles, constituées à 92% de protéines et à 8% de minéraux inorganiques,

essentiellement du phosphate de calcium. Les caséines précipitent à un pH voisin de 4,6 à 20°C. Les fractions des protéines du lactosérum contiennent un très grand nombre de composants. Les principaux, dans le lait bovin, sont : la β -Lg, l' α -lactalbumine, le sérum-albumine et les immunoglobulines. La β -Lg est majoritaire suivie de l' α -lactalbumine: elles représentent 70% des protéines totales du lactosérum. En plus de ces protéines, quelques protéines dites mineures, appelées ainsi en raison de leur faible présence mais dont l'intérêt est croissant du fait de leurs propriétés bioactives, complètent la fraction protéique du lactosérum : ce sont notamment la lactoferrine et la lactoperoxydase. Dans le Tableau I.2 on représente les proportions des différentes protéines du lait :

Protéines de lait	
Protéines solubles (sériques) 15 à 25 %	Caséine 5 à 85 %
<ul style="list-style-type: none"> • β-lactoglobuline 7 à 12% • Alpha-lactoglobuline 2 à 5% • Protéose peptone 2 à 4 % • Immunoglobuline 2 à 3% • Sérum albumine bovine (BSA) environ 1% 	<ul style="list-style-type: none"> • Caséine α_{S1} 39 à 46 % • Caséine α_{S2} 8 à 11 % • Caséine β 25 à 35 % • Caséine k 8 à 15% • Caséine γ 3 à 7%

Tableau I.2 : Les proportions des différentes protéines du lait (3)

En plus de ces composés chimiques, le lait cru contient une flore bactérienne, pathogène ou non, relativement importante, liée aux conditions d'hygiène de la ferme, à l'état de santé de l'animal et au respect de la chaîne de froid entre la collecte et le transport.

Pour réduire ou détruire la quasi-totalité des germes présents dans le lait, ce dernier doit subir un traitement thermique par pasteurisation ou stérilisation (4).

I.2.2 Structure de la β -lactoglobuline :

La β -Lg est la protéine la plus abondante dans le lactosérum. Elle est présente à des concentrations allant de 2 à 4 g/l. Cette protéine est composée d'un assemblage de 162 acides aminés et porte un poids moléculaire de 18,3 kD (5).

a. La structure primaire de la β -Lg

Elle comprend cinq résidus cystéine, dont quatre sont engagés dans la formation de ponts disulfures (cys66-cys160, cys106-cys119). En effet si le pH du milieu le permet, cette cystéine est à l'origine d'attaques nucléophiles de ponts disulfures et conduit à l'échange de ces ponts, par voie intra ou inter-protéiques lors du stockage et lors du traitement thermique à haute température (6).

b. La structure secondaire de la β -Lg :

Elle contient environ 50% de feuillets β , 15% d'hélice et 30% d'enroulements aléatoires (Sawyer et Kontopidis, 2000). La quantité importante de feuillets β pourrait être responsable d'interactions entre les protéines pouvant aller jusqu'à l'agrégation et la gélification.

c. La structure tertiaire de la β -Lg :

Consiste en cinq feuillets antiparallèles composés de 9 fils enroulés, comme montre la figure I.3 (7).

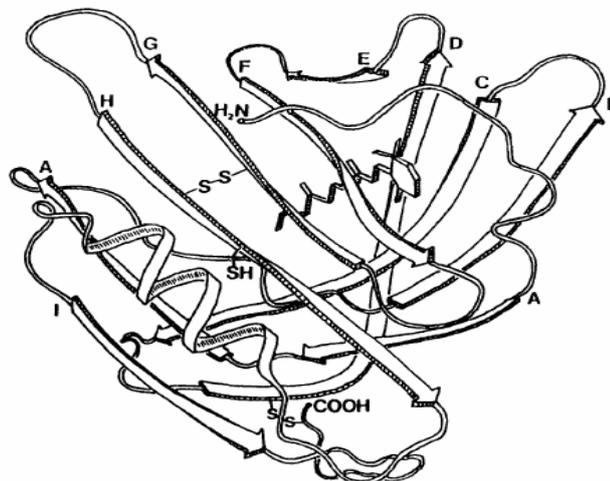


Figure I.3 : Structure tertiaire de la β -Lg (7)

d. La structure quaternaire de la β -Lg :

La stabilité de sa configuration résulte de l'équilibre entre les forces attractives et répulsives dans le polypeptide lui-même (interactions électrostatiques, liaisons hydrogènes

induites par la présence d'un corps hydrophobe, liaisons de Van der Waals et ponts disulfures) mais également entre le polypeptide et les molécules de solvant. Cette structure est influencée par les conditions environnementales.

Le pH semble définir la forme oligomérique de la protéine (monomère, dimère ou octamère) (Figure I.4). De plus; la présence d'autres paramètres environnementaux tels que :

la température et la variation de l'environnement minéral de la protéine, influent sur cette forme oligomérique.

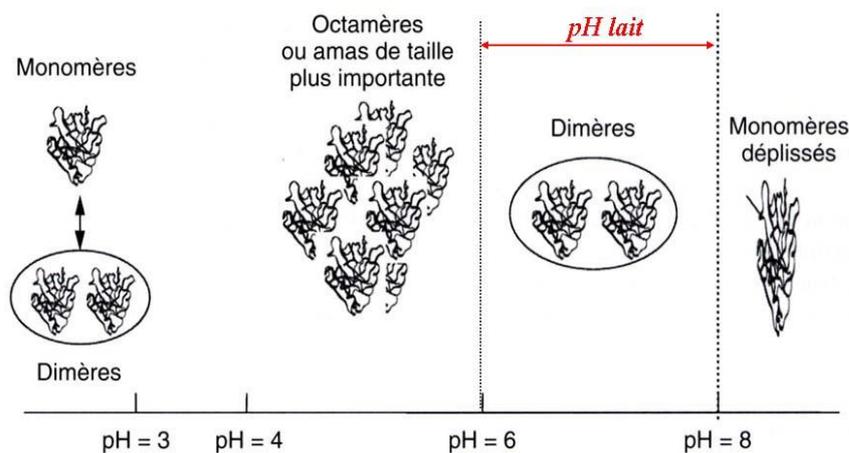


Figure I.4 : Formes oligomériques de la β -Lg en fonction du pH (6)

I.2.3 Définition du procédé de pasteurisation :

La pasteurisation tient son nom du scientifique français Louis Pasteur qui a découvert au XIXe siècle, que chauffer du lait à une certaine température élevée puis le refroidir rapidement avant sa mise en bouteille pourrait le garder frais plus longtemps.

Aujourd'hui, le procédé de pasteurisation est largement utilisé dans l'industrie agro- alimentaire. La pasteurisation permet de s'assurer que le lait est bon à consommer et permet également de prolonger sa durée de vie.

Contrairement à la stérilisation, la pasteurisation n'est pas destinée à éliminer tous les micro-organismes dans les aliments. Elle vise plutôt à réduire le nombre de pathogènes vivants afin qu'ils ne soient pas susceptibles de provoquer une maladie (en supposant que le

produit pasteurisé est stocké comme indiqué et est consommé avant sa date de péremption) (8).

Le procédé de pasteurisation HTST (Hight Temperature Short Time) consiste à chauffer le lait pendant au moins 15 secondes (et pas plus de 25 secondes) à une température comprise entre 72 °C et 75 °C. Une fois le lait chauffé, il est ensuite refroidi rapidement jusqu'à 4°C (9). L'équipement qui est utilisé pour chauffer et refroidir le lait est appelé un «échangeur de chaleur».

I.2.4 La composition de l'unité de pasteurisation :

L'unité de pasteurisation est constituée de plusieurs éléments:

a. Le chambreur :

C'est un tube en serpentin calorifugé dont le volume permet, selon le débit, de maintenir la température de pasteurisation durant le temps nécessaire.

b. Un échangeur à plaques :

Il est constitué de 5 sections :

- Deux sections de chauffage à l'entrée et la sortie de l'échangeur.
- Une section de refroidissement.
- Deux sections de récupération de chaleur : préchauffage et pré-refroidissement.

c. Pompe de dégazage :

C'est une pompe qui sert à éliminer les mauvaises odeurs qui se trouvent dans le lait.

d. Homogénéisateur :

C'est un appareil servant à fractionner les grains de gras dans le lait grâce à un système de haute et de basse pression (150 bars à l'entrée et 50 bars à la sortie).

I.2.5 Procédé de pasteurisation (HTST):

La préparation du lait pasteurisé comporte les étapes suivantes (10):

1. La poudre de lait est mélangée à l'eau dans un bac appelé tank de poudrage lait (TPL).
2. Le lait est acheminé vers un autre bac appelé bac de lancement en y maintenant toujours un niveau constant avec un système de soupape.
3. A l'aide d'une pompe de soutirage, le lait est acheminé vers la section de préchauffage grâce à la chaleur du lait chauffé auparavant : ceci permettra d'un

côté, de chauffer le nouveau lait et de l'autre, de refroidir le lait déjà pasteurisé. La température du lait sortant de cette section est d'environ 59°C.

4. Le lait préchauffé va regagner la colonne de dégazage ; cette colonne permet d'éliminer les mauvaises odeurs.
5. Le lait continue son chemin vers l'homogénéisateur.
6. Le lait est ensuite dirigé vers l'échangeur de la section de chauffage ou il sera chauffé à 75 °C grâce à l'eau chaude.
7. Pour pasteuriser le lait, celui –ci doit passer dans le chambreur en serpentin. Ce dernier est calorifugé et est conçu pour que le lait y séjourne durant 15 secondes à la température de 75°C.
8. Le lait pasteurisé va rejoindre la section de pré-refroidissement puis la section de refroidissement où sa température diminue jusqu'à 4°C grâce à l'eau froide qui circule dans l'échangeur.
9. Le produit fini sera stocké dans des cuves, puis conditionné.

I.2.6 Avantages du procédé de pasteurisation :

La pasteurisation offre trois avantages en comparaison aux autres procédés de conservation des aliments :

- Elle permet d'offrir des aliments moins dangereux pour la santé. En effet, les bactéries pathogènes (qui peuvent causer des maladies) ne peuvent survivre lors d'une exposition à une température trop élevée.

- Elle prolonge le temps de conservation des aliments puisqu'ils ne sont plus soumis à l'action des bactéries nuisibles. On peut donc transporter les aliments sur de plus longues distances et limiter les pertes économiques dues à leur dégradation.
- Elle préserve les propriétés nutritives des aliments. En effet, la pasteurisation affecte très peu l'aspect, le goût et la valeur nutritive des aliments (9).

I.2.7 Opérations de nettoyage des échangeurs de chaleur à plaques après la pasteurisation:

Le terme nettoyage désigne l'ensemble des opérations de désinfection, rinçage et nettoyage associées à la pasteurisation du lait. En règle générale, la désinfection précède la pasteurisation proprement dite. Lorsqu'elle fait appel à un procédé chimique, elle est suivie par un rinçage avec de l'eau distillée qui précède l'introduction du lait. Après pasteurisation, le rinçage à l'eau entraînant le lait résiduel, est suivi par le nettoyage alcalin qui élimine la majeure partie des dépôts solides fixés aux plaques, en particulier leurs constituants organiques. Un éventuel lavage acide élimine les dépôts solides de type minéral, il est suivi par le rinçage final (11).

I.3 Notions sur l'encrassement des échangeurs de chaleur :

I.3.1 Définition de l'encrassement :

L'encrassement qui, sous sa forme la plus générale, peut être défini comme l'accumulation d'éléments solides indésirables ou de substances non désirées sur une interface, affecte un grand nombre d'opérations industrielles.

Ce dépôt qui évolue dans le temps, peut être constitué de cristaux, de sédiments, de résidus biologiques, des produits d'une réaction chimique ou bien encore être la combinaison de plusieurs de ces éléments. Il est très important de considérer ce phénomène pour être en mesure de choisir un échangeur thermique avec les dimensions appropriées, car l'encrassement peut réduire considérablement la capacité de transfert de chaleur et d'augmenter la chute de pression. Un nettoyage et un entretien périodiques sont requis. Comme l'encrassement et les difficultés de maintenance augmentent avec le temps, les nettoyages doivent être fréquents (12).

I.3.2 Types d'encrassement :

a. L'encrassement par réaction chimique

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

b. L'entartrage

L'entartrage d'une surface d'échange est généralement associé à la production d'un solide cristallin à partir d'une solution liquide. Il dépend donc fortement de la composition des eaux industrielles. L'entartrage se matérialise par une formation d'incrustations adhérentes et dures sur les surfaces d'échanges généralement métalliques. Il est produit principalement par la dissipation des sels inorganiques dans le processus d'écoulement, il présente une super saturation durant le chauffage ou le refroidissement.

I.3.3 Méthodes d'évaluation de l'encrassement :

a. Variation du coefficient d'échange global ou Résistance thermique :

Le coefficient global d'échange thermique est l'inverse de la résistance globale, qui est une combinaison des résistances partielles des différents domaines traversés par l'énergie transférée. Dans un échangeur à plaque, le flux de chaleur traverse un premier fluide chaud, une paroi solide, puis un deuxième fluide froid, chaque domaine ayant sa propre résistance selon le mode de transfert y régnant (convection, conduction). La différence entre les inverses des coefficients globaux de transfert thermique à l'état encrassé et propre respectivement, représente la résistance de l'encrassement notée par R_d et définie par :

$$R_d = \frac{1}{u_d} - \frac{1}{u_0}$$

Où U_0 et U_d ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) étant les coefficients d'échange globaux, respectivement, à l'état propre et encrassé, et R_d la résistance totale du dépôt encrassant ($\text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$).

b. Efficacité ou température de sortie :

En présence de dépôt, la performance de l'échangeur diminue et sa capacité d'échange est inférieure à l'objectif de son calcul. Le fluide froid sort moins chaud que prévu. On dit que l'efficacité a diminué.

Cette notion d'efficacité est exprimée par le rapport de la quantité de chaleur réellement échangée sur la quantité maximale pouvant être échangée dans le cas idéal correspondant à un échangeur adiabatique de longueur infinie. En relation mathématique, elle peut être présentée comme :

$$eff = \frac{C_c (T_{ce} - T_{cs})}{C_{min} (T_{ce} - T_{fe})}$$

Où C_c étant la capacité calorifique du fluide chaud, et C_{min} la capacité minimale entre les deux fluides.

T_{ce} et T_{fe} étant les températures à l'entrée et T_{cs} et T_{fs} à la sortie des fluides chauds et froids respectivement.

Chapitre II : Revue bibliographique

II REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Dans cette revue de littérature, on donnera un aperçu sur les études expérimentales et numériques relatives au phénomène d'encrassement rencontré dans les échangeurs de chaleur lors du procédé de pasteurisation.

II.1 Etudes expérimentales de l'encrassement dans les échangeurs de chaleur lors de la pasteurisation

Dans les dérivés du lait; les protéines du lactosérum (β -Lg) jouent un rôle important dans le mécanisme de dépôt des agrégats de la β -Lg. Le phénomène de colmatage implique la dénaturation et l'agrégation de la β -lactoglobuline induite par la chaleur (13).

L'approche de la réaction de la cinétique chimique est généralement utilisée pour prévoir la transformation de la β -lactoglobuline. Petit et al (14) ont démontré l'importance du couplage de l'écoulement du fluide avec le transfert de chaleur sur la dénaturation thermique de la β -Lg.

Il est important de prendre en considération la distribution du temps de résidence et la distribution de la chaleur à l'intérieure de l'échangeur de chaleur pour comprendre la transformation et d'autres phénomènes de dépôt.

II.1.1 Composition chimique du lait et du dépôt laitier :

Sur la base d'essais sur la pasteurisation du lait dans des échangeurs à plaques, Burton (15) a pu classer les dépôts laitiers en deux types :

- **Le type A** : ce dépôt se forme à des températures comprises entre 70°C et 110°C. Il contient 50-60 % de protéines, 30-35 % de minéraux et 10-15 % de matière grasse; Il est de couleur blanchâtre, spongieux et peu dense, ce qui entraîne une forte augmentation de la perte de charge dans l'échangeur.
- **Le type B** : ce dépôt apparaît à des températures supérieures à 110°C. Il est de couleur brunâtre et plus dense. Il a une teneur en sels minéraux jusqu'à 75 %.

Dans les années quatre-vingts, il a été démontré que le dépôt de « type A » est plus riche que le lait en protéines et minéraux. De même, la proportion de caséines est diminuée au profit des protéines solubles, principalement la β -Lg. La fraction protéique présente une structure spongieuse; la fraction minérale s'insère dans ce réseau sous forme d'agrégats mais forme aussi une couche dense fine entre la paroi de l'échangeur et le dépôt spongieux (16).

Le dépôt de type A est particulièrement gênant, par son volume et sa présence en quantité importante. Ce dépôt est le plus souvent responsable de l'arrêt des installations lors du traitement des produits laitiers. Sachant que ce dépôt est majoritairement protéique, il est alors intéressant de connaître la nature et les proportions des protéines impliquées lors de sa formation, Bell & Sanders.(17), sont les premiers à apporter un élément de réponse à cette question. Ces auteurs ont cherché des moyens pour réduire l'encrassement en modifiant le procédé de traitement thermique. Ils ont prouvé que l'utilisation d'une zone de préchauffage avant de passer dans la zone de chauffage réduit l'encrassement dans les échangeurs de chaleur (15). Le principal effet de préchauffage est la dénaturation de la β -Lg et son association avec la caséine micellaire et donc une réduction du montant des dépôts de type A.

Bell & Sanders.(17), ont montré que les protéines solubles du lait jouaient un rôle important dans la formation du dépôt de type A. Les modifications de ces protéines induites par la chaleur lors du préchauffage les rendent incapables d'adhérer aux surfaces d'échange (4). Plus tard, Lalande et al.(18), Hiddnik et al.(19), et De Jong et al.(20), ont montré le rôle fondamental que jouaient les protéines du lactosérum dans la formation du dépôt de type A car :

- Cette protéine est la plus abondante dans le lactosérum.
- La dénaturation de cette protéine devient irréversible à des températures de l'ordre de 70°C; cette température correspond à celle du début de l'apparition des phénomènes d'encrassement (21).
- Le dépôt formé lors de la pasteurisation du lait contient une grande quantité de β -Lg (22).

II.1.2 Mécanisme d'encrassement par des protéines de lactosérum :

En raison de l'encrassement, il existe une possibilité de dégradation de la qualité du produit, car le fluide de traitement ne peut pas être chauffé à la température requise (pasteurisation).

De plus, les dépôts délogés par le fluide en écoulement peuvent provoquer une contamination (23). Les protéines majoritaires dans le lactosérum sont la β -lactoglobuline (β -Lg), la α -lactalbumine (α -Lg) et la Bovine Sérum Albumine (BSA).

Bien que les mécanismes exacts et les réactions entre les différents composants du lait ne sont pas encore entièrement compris, une relation entre la dénaturation de β -Lg native et l'encrassement des échangeurs de chaleur a été établie (24). Lors du chauffage du lait, les protéines natives (β -Lg) sont dénaturées, Ces derniers exposent le noyau contenant des groupes sulfhydryle réactifs. Les molécules de protéines dépliées ou dénaturées réagissent ensuite avec les types de molécules de protéines telles que la caséine et α -lactoglobuline et forment des agrégats ou d'autres semblables. Selon Changani et al.(25), l'encrassement se produit lorsque l'agrégation a lieu à côté des surfaces chauffées.

Récemment Khaladi et al.(26), ont étudié l'effet de la teneur en calcium dans le lait et le régime d'écoulement de l'encrassement et le nettoyage dans un échangeur de chaleur à plaques dans le procédé de la pasteurisation; une analyse dimensionnelle avec les mesures expérimentales, à mener vers une relation permettant de prévoir la quantité de masse sèche déposée localement en fonction de la teneur en calcium connue, le nombre de Reynolds et de la température du fluide.

II.1.3 Mécanisme de dénaturation de la β -Lg :

Le mécanisme de dénaturation de la β -Lg débute, lors du chauffage, par la dissociation de la structure dimérique de la molécule (dans les conditions de pH et de concentration du lait). La rupture de la structure quaternaire et les modifications de structures tertiaires et secondaire de la bi-unité de la β -Lg conduisent à deux grands évènements :

- L'explosion du groupement sulfhydryle de la protéine qui entraîne des échanges de ponts disulfures au sein de la même molécule ou avec une protéine voisine. Il s'établit donc des liaisons inter-protéiques par échange de ponts disulfure selon un mécanisme pH dépendant (27).

• Le déploiement de la protéine conduit à l'exposition de ces zones hydrophobes internes et consécutivement, à l'association de plusieurs zones hydrophobes entre elles (d'une même protéine ou de deux unités différentes). Ceci permet de former des agrégats protéiques par l'intermédiaire d'interactions physico-chimiques (28). Il est important de signaler que le niveau et la vitesse de dénaturation de la protéine est directement lié au couple temps/température du traitement.

La dénaturation de la β -Lg peut être aussi provoquée par des agents chimiques tels que les détergents, les solutés organiques...etc, ou des facteurs physiques tels que la pression. Dans le cas de l'encrassement laitier, seul la réaction de dénaturation thermique nous intéresse. Entre 30 et 60°C, la structure tertiaire de la protéine varie très légèrement et la dénaturation de la protéine durant le chauffage est observée due à l'affaiblissement des liaisons intra- et intermoléculaires, ce qui entraîne une exposition des groupements hydrophobes, des groupements thiols et des ponts disulfures qui peuvent ainsi interagir avec des sites d'autres molécules protéiques (i.e. associations intermoléculaires) et qui favorisera l'agrégation ultérieure. Autour de 70°C, le monomère devient thermiquement instable et la molécule se déploie (réaction irréversible) en démasquant le groupement (S-H) qui peut réagir avec d'autres groupements (S-H) libres, et créer des ponts S-S intermoléculaire comme le montre la Figure II.1 (29).

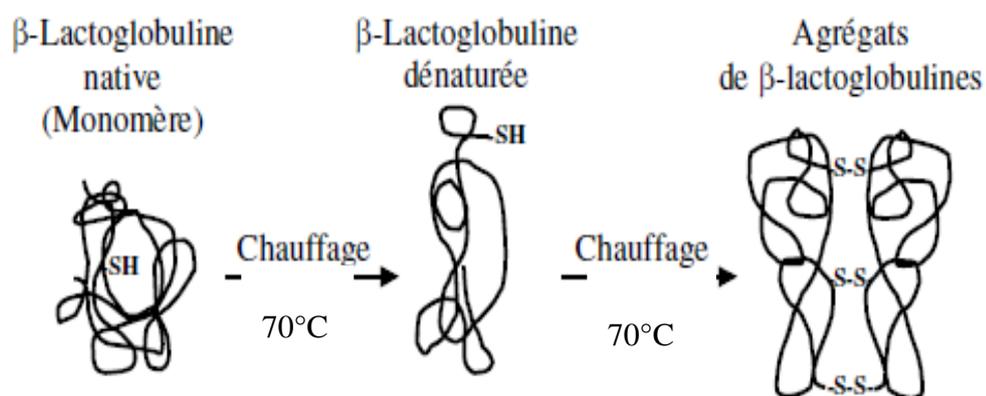


Figure II.1 : Comportement thermique de la β -Lg (29)

Les étapes de la dénaturation et l'agrégation de la β -lg au cours du traitement thermique dépendent de l'environnement minéral qui est un des paramètres importants qu'il convient de contrôler.

II.1.4 Mécanisme d'encrassement de la β -Lg :

Le mécanisme d'encrassement présenté dans la Figure II-2 suit les étapes suivantes (30) :

1- Les protéines agissent à la fois dans le volume et dans la couche limite thermique du lait. Un certain nombre de protéines natives **N** sont transformées en protéines dénaturées **U** ; dans une réaction du premier ordre .La protéine dénaturée réagit ensuite pour donner une protéine agrégée **A** dans une réaction de deuxième ordre.

2- Le transfert de masse entre la masse et la couche limite thermique à lieu pour chaque protéine.

3- Seule la protéine agrégée est déposée sur la paroi.

4- La vitesse de dépôt est proportionnelle à la concentration de protéine agrégée dans la couche limite thermique.

5- La résistance de l'encrassement au transfert de chaleur est proportionnelle à l'épaisseur du dépôt.

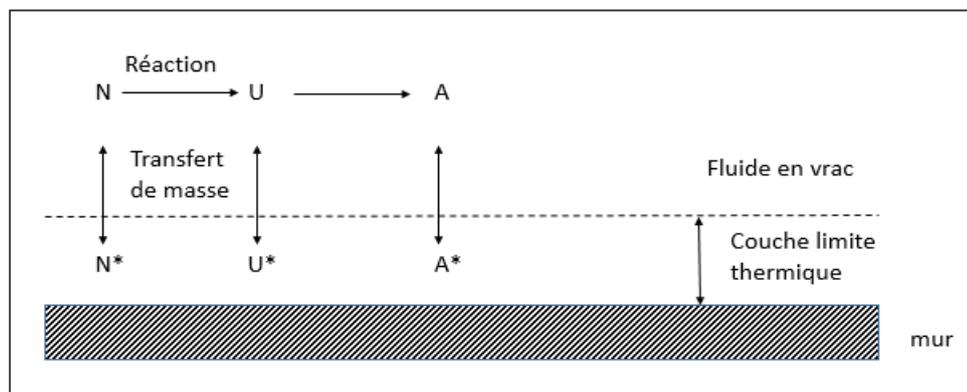


Figure II.2 : schéma de la réaction des protéines (30)

II.1.5 Lieu d'encrassement:

Les réactions de dénaturation des protéines et d'agrégation ont lieu dès que le lait est chauffé. Les quantités relatives de protéines dénaturées et agrégées dépendent d'un certain nombre de facteurs tels que les conditions d'exploitation, le type et la conception de l'échangeur de chaleur, et les propriétés de surface de transfert de chaleur .Toutefois, le lait traité à la sortie de l'échangeur de chaleur aurait encore beaucoup de protéines dénaturées et

agrégées. Il en résulterait un encrassement sévère à divers endroits plus en aval. Par conséquent, le contrôle de l'encrassement dans l'échangeur de chaleur ne peut pas donner des résultats efficaces et une stratégie globale est nécessaire pour atténuer l'encrassement sur toute la configuration (31). Un exemple d'une telle stratégie est le préchauffage du lait avant la section de chauffage tel que mentionné précédemment (15), l'installation d'une section supplémentaire à une température constante (section de maintien ou de chambrage) dans la cascade d'échangeurs de chaleur peut également réduire l'encrassement (20). Ce résultat est dû au fait que la β -Lg dénaturée est transformée en β -Lg agrégée dans la section de maintien.

Cette forme agrégée est inactive et est incapable de former des agrégats avec d'autres composants du lait et donc ne joue pas un rôle actif dans le processus d'encrassement dans les sections en aval (20). Par conséquent, l'atténuation de l'encrassement dépend du contrôle des conditions thermiques et hydrauliques locales ainsi que des propriétés de surface pas seulement à l'intérieur des échangeurs de chaleur mais dans toute la plaque.

II.1.6 Mécanisme d'adhésion et de formation du dépôt :

Le mécanisme de l'encrassement des surfaces d'échange de chaleur par le lait, proposé par Daufin et al. (32), peut être résumé de la manière suivante: dès les premiers instants de l'encrassement, des lipides, en faible quantité, ainsi que des protéines, des phosphates et du calcium sont présents sur la surface de l'acier inoxydable. Il semble difficile d'attribuer aux lipides un rôle moteur, tant dans l'élaboration des premières couches que dans la croissance des dépôts. Par contre, les ions calcium constituent un élément-clé (26). Ils sont en effet susceptibles d'interactions avec les protéines, notamment au niveau des groupements carboxylates des protéines solubles et de la caséine.

Sur la Figure (II.3) le mécanisme de formation du dépôt et son initiation sur les surfaces d'acier inoxydable sont notées. Selon Hiroshi et al.(33), à basse température (25 °C), les molécules de la β -Lg sont adsorbées sur les surfaces jusqu'à formation de la monocouche. Cette interaction protéine surface dépend de plusieurs facteurs tels que le pH, la température, la conformation de la protéine et les propriétés de surface du matériau. A haute température (75 °C), après la formation instantanée de cette monocouche, la chaleur dénature les molécules de β -Lg activant ainsi le groupement S-H initialement masqué. La molécule de la

β -Lg dénaturée, devenue thermiquement instable, peut alors s'orienter vers deux destinations différentes :

- Migration vers la paroi formant ainsi des ponts S-S avec les molécules déjà adhérees.
- Formation d'agrégats de molécules de β -Lg. Ces agrégats peuvent soit rester dans la solution (au cœur du fluide), soit migrer vers la paroi pour former des ponts S-S avec les molécules existantes, favorisant ainsi le développement des couches de dépôt.

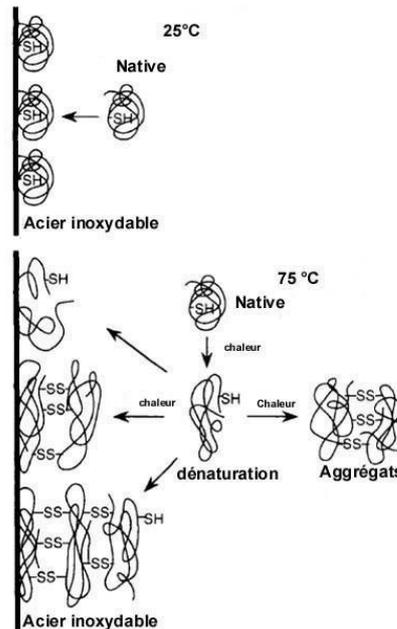


Figure II.3 : Mécanisme d'adhésion des protéines de la β -Lg sur les surfaces d'acier inoxydable (33)

II.1.7 Moyens de prévention de l'encrassement :

Généralement, l'encrassement du lait est si rapide que les échangeurs de chaleur doivent être nettoyés tous les jours pour maintenir la capacité et l'efficacité de production et répondre à des normes d'hygiène strictes (23). Dans un échangeur de chaleur traitant du lait ou un fluide laitier, il existe une zone où le dépôt est plus abondant. Cette zone critique est déterminée par la concentration en protéines solubles activées. L'encrassement peut être réduit en maîtrisant la formation de ces protéines. Pour se faire, il existe plusieurs méthodes :

- Installer une zone de chambrage avec un rapport élevé volume/aire. En utilisant une cuve agitée comme chambreur, le dépôt est réduit de 50 % (25) (34).

- Appliquer un profil de température, dans les échangeurs de chaleur à plaques, tel que l'encrassement soit réparti uniformément dans les passes de l'échangeur afin d'éviter que lorsqu'une seule passe est tellement encrassée, elle bloque tout l'équipement (35). Un effet similaire peut être obtenu en effectuant un préchauffage du lait avant pasteurisation. En pratique, le choix des températures de préchauffage réalise un compromis consistant à réduire le dépôt en aval sans trop augmenter l'encrassement dans la zone de préchauffage (36).
- Modifier la conception de l'échangeur de chaleur, soit en modifiant la configuration ou la finition de surface (25).

II.2 Etudes numériques les plus récentes sur l'encrassement des échangeurs de chaleur lors de la pasteurisation :

Dans ses simulations Koen Grijspeerdt a effectué une analyse numérique bidimensionnelle et tridimensionnelle de l'écoulement du lait entre deux plaques ondulées en utilisant la CFD. Le calcul bidimensionnel montre l'influence de la forme des ondulations, et les calculs tridimensionnels s'avèrent nécessaires pour évaluer l'importance de l'orientation de l'ondulation. L'influence de l'écoulement d'entrée se prolonge seulement jusqu'à trois ondulations. La CFD peut être considérée comme un assistant précieux pour la conception optimale des échangeurs de chaleur à plaques (37).

Soojin Jun et Virendra M Puri ont modélisé l'encrassement dans le procédé de la pasteurisation du lait avec des échangeurs de chaleur à plaques en considérant un modèle tridimensionnel en utilisant la CFD. Basés sur les performances hydrodynamiques et thermodynamiques de l'échangeur de chaleur à, les équations de réactions chimiques utilisées pour la dénaturation des protéines et absorption sur la surface de l'acier inoxydable ont été couplées en utilisant le logiciel ANSYS-fluent. Bien que les efforts de calcul requis étaient assez intensifs, le modèle tridimensionnel a été validé comme un outil efficace pour la conception d'une nouvelle forme de plaque et le profil d'ondulation optimisé pour minimiser l'encrassement du lait.(38)

En 2006, Bansal et al ont montré l'écoulement turbulent en utilisant une contrainte de cisaillement et l'échange thermique entre deux canaux dans une configuration à contre-courant, en développant un modèle tridimensionnel d'un échangeur de chaleur à plaques à un faible nombre de Reynolds (écoulement laminaire).(23)

Récemment, Bouvier et al 2014 ont effectué une analyse bidimensionnelle d'un échangeur de chaleur à plaques en utilisant la CFD pour simuler des mécanismes de dénaturation des protéines induites par la chaleur. Leurs résultats qui ont été validés avec des données expérimentales prouvent l'efficacité de l'outil numérique dans la simulation des réactions chimiques. Les auteurs ont confirmé les étapes de la dénaturation de la β -Lg N- U- A, et la difficulté d'estimer les paramètres cinétiques de la réaction d'agrégation. Leurs résultats dénotent l'influence du gradient de température sur les parois de l'échangeur, et suggèrent sa prise en considération dans les études antérieures.(39)

Chapitre III : Préparation des calculs CFD

III RE-PROCESSING -PRÉPARATION DES CALCULS DE CFD

III.1 Objectif du travail :

Comme pour tout procédé il y a un besoin constant de minimisation de coût de conception des équipements tout en recherchant des performances élevées. Cependant, l'accès à de puissants microprocesseurs a ouvert la voie à l'utilisation de la CFD. Il est très clair que l'utilisation de modèles numériques détaillés pour optimiser la conception des équipements peut entraîner des avantages économiques substantiels en comparaison avec les études expérimentales.

Puisque les phénomènes d'encrassement sont considérés très importants dans le procédé de pasteurisation et que les investigations expérimentales pour étudier l'impact de ces phénomènes sur les produits laitiers s'avèrent coûteuses et longues, il est important d'avoir recours à des modèles analytiques et numériques.

C'est dans ce contexte que cette recherche est entreprise afin d'étudier l'effet de la conception de l'échangeur de chaleur à plaques sur la performance du procédé de pasteurisation. Une étude numérique paramétrique sera effectuée dans le but de minimiser le niveau de dénaturation de la β -Lg, ce qui va entraîner une plus faible consommation d'énergie et une réduction dans les étapes de nettoyage, au profit de l'entreprise.

La préparation des géométries et des maillages est élaborée en utilisant des logiciels commerciaux. Pour chaque conception, la vitesse d'entrée du fluide est modifiée pour évaluer son effet sur le niveau de dénaturation de la β -Lg.

III.2 Définition de l'outil informatique utilisé :

III.2.1 L'outil de maillage « GAMBIT » :

GAMBIT est un logiciel qui permet de créer des géométries et des maillages pouvant être exportés vers ANSYS-fluent. Il permet de générer un maillage structuré ou non structuré bi ou tri dimensionnel sur lequel seront résolues les équations de transport de quantité de mouvement de chaleur et de matière.

a. Construction d'un maillage :

La construction d'un maillage débute par la représentation géométrique du domaine de calcul. La géométrie est un ensemble d'entités simples (point, arête, face, volume) raccordées les unes aux autres. Un maillage non structuré est souvent produit par une triangulation du domaine de calcul où les triangles produits sont de taille similaire.

b. Conditions aux limites :

Avant d'exporter un maillage vers ANSYS-fluent, il est possible de définir au préalable les conditions aux limites. Pour chacun des phénomènes de transport analysés, des conditions aux limites s'imposent. Les suivantes sont retenues :

Transport de quantité de mouvement :

- Vitesse imposée à l'entrée.
- Vitesse nulle au bord (condition de non glissement).

Transfert de chaleur :

- Température imposée à l'entrée.
- Une condition d'échange par convection pour les plaques.

Transfert de matière :

- Fraction massique de chaque espèce chimique imposée à l'entrée.
- Condition flux définie par la cinétique chimique dans le cas de réaction au bord.

III.2.2 L'outil ANSYS-fluent :

ANSYS-fluent est un code de calcul CFD basé sur la méthode des volumes finis. Il permet la résolution simultanée des équations de transport de quantité de mouvement, de chaleur et de matière avec cinétique chimique. Dans le cas d'un écoulement bidimensionnel d'un fluide incompressible en régime permanent, les équations de transport s'expriment en coordonnées cartésiennes :

Equation de continuité :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

Quantité de mouvement :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} * \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right]$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} * \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right]$$

Transfert de chaleur :

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\lambda}{\rho * c_p} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right]$$

Transfert de matière pour espèce i :

$$u \frac{\partial C_i}{\partial x} + v \frac{\partial C_i}{\partial y} = D_i \left[\frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_i}{\partial y^2} \right] + R_i$$

Où R_i : production nette de l'espèce

Parmi les avantages majeurs de l'utilisation de code de CFD est la possibilité de tester plusieurs géométries et conceptions différentes. Pour un procédé donné, différentes conditions aux limites ainsi que les paramètres physiques de calcul peuvent être modifiés à des fins d'optimisation de conception. L'utilisation de ANSYS-fluent s'effectue selon les étapes suivantes :

- Chargement du maillage exporté par GAMBIT.
- Création des espèces chimiques constituant le fluide.
- Introduction des conditions aux limites.
- Choix des paramètres de calcul.
- Initialisation des variables.
- Lancement du calcul.

A la convergence des résultats sont sauvegardés dans un fichier approprié.

III.2.3 L'outil Tecplot :

L'exploitation des résultats de ANSYS-fluent s'effectuent à l'aide du logiciel Tecplot. Ce dernier est un post-processeur puissant permettant non seulement la visualisation des résultats donnés directement par fluent tels que les composantes du vecteur vitesse, la pression, la température, les fractions massiques des espèces chimiques mais aussi le calcul de grandeurs tels que le module de la vitesse, la vorticité...etc.

III.3 Paramètres physico-chimiques du lait:

Avant d'effectuer les simulations, il est nécessaire d'introduire les caractéristiques physico-chimiques du fluide analysé, en l'occurrence le lait. Ce dernier est un mélange complexe d'eau, de protéines, de glucides, de matières grasses et de minéraux. Il comprend aussi des minéraux et des vitamines hydrosolubles. Le pH du lait est proche de la neutralité, variant entre 6,6 et 6,8. Les propriétés physiques et thermiques du lait et celles du dépôt encrassant retenues dans nos calculs sont : la masse volumique (ρ), la viscosité dynamique (μ), la conductivité thermique (λ) et la chaleur spécifique (Cp).

Les lois de variations de ces grandeurs en fonction de la température sont regroupées dans le Tableau III.1. Elles sont tirées directement des travaux de Georgiadis et al (30).

Paramètres	Valeurs calculée	source
Viscosité du lait (Pa.s)	$\mu = (-0.00445 \times T + 0.947) \times 10^{-3}$	Sahoo (2001)
Conductivité thermique du lait ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	$\lambda = 0.00133 \times T + 0.539911$	Sahoo (2001)
Densité du lait ($Kg.m^{-3}$)	$\rho = 1033.7 - 0.2308 \times T - 0.00246$	Sahoo (2001)

Chaleur spécifique du lait (J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹)	$C_p=2.976 \times T+3692$	Bertstch (1982)
Densité du dépôt du lait (Kg.m ⁻³)	$\rho= 1030$	Georgiadis et al (1998)

Tableau III.1 : Paramètres physico-chimiques du lait (La température en Celsius)

III.4 Données sur le fluide chauffant :

L'eau est utilisée dans l'échangeur de chaleur pour chauffer le lait. Les paramètres physico-chimiques de l'eau sont regroupés dans le tableau suivant :

Paramètres	Valeurs
Masse volumique (kg.L ⁻¹)	$\rho =10^3$
Viscosité dynamique (Pa.s)	$\mu =10^{-3}$
Capacité calorifique (j.Kg ⁻¹ .K ⁻¹)	$C_p =4185$
Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	$\lambda = 0.6$

Tableau III.2 : Paramètres physico-chimique de l'eau

III.5 Modèle cinétique de dénaturation:

La cinétique de la dénaturation et agrégation de la β -Lg avec la température est décrite par l'équation d'Arrhenius. La constante K de la vitesse en fonction de la température T est donnée par :

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

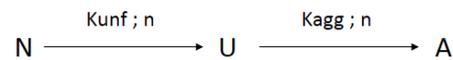
Où :

E_a : Energie d'activation ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$).

R : Constante des gaz parfaits ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$).

k_0 : Facteur pré-exponentiel ($\text{g}^{1-n} \cdot \text{L}^{n-1} \cdot \text{s}^{-1}$).

Comme le montre certains auteurs (40), le processus de dénaturation de la β -Lg induite par la chaleur peut être décrit par deux réactions successives tel qu'illustré ci-dessous (40) :



Dans cette équation, n représente l'ordre de la réaction, K_{unf} et K_{agg} sont les facteurs pré-exponentiels des réactions de dénaturation et d'agrégation respectivement, et $E_{a \text{ unf}}$ et $E_{a \text{ agg}}$ représentent l'énergie de ces réactions. Les paramètres cinétiques utilisés ont été calibrés à partir des données cinétiques reportées en Annexe A-1 (14). La conversion des cinétiques aux unités acceptées par ANSYS-fluent est détaillée en Annexe.

Paramètres cinétiques	Valeurs
$E_{a \text{ unf}}$ ($\text{Kj} \cdot \text{mol}^{-1}$)	242.6
K_{unf}° ($\text{g}^{1-n} \cdot \text{L}^{n-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.08×10^{33}
n	1.5
$E_{a \text{ agg}}$ ($\text{Kj} \cdot \text{mol}^{-1}$)	95.9
K_{agg}° ($\text{g}^{1-n} \cdot \text{L}^{n-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	2.12×10^{11}
n	2

Tableau III.3 : Paramètres cinétiques pour le schéma réactionnel d'encrassement du lait (40)

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV RESULTATS ET DISCUSSION

Dans le présent travail, il est montré à l'aide de simulations numériques, les zones d'un échangeur à plaques les plus sujettes à l'encrassement au cours de son fonctionnement. Dans ce but, une géométrie de base est adoptée, en l'occurrence celle présentée par Bouvier et al.(39). Cette dernière est une géométrie à l'échelle pilote, elle consiste en une configuration à contre-courant composée de 10 canaux avec un angle d'ondulation de 90 degrés (voir Figure IV.1). Les principaux paramètres décrivant l'échangeur de chaleur sont regroupés dans le Tableau IV.1.



Figure IV.1 : Géométrie de base de l'échangeur à plaques

Paramètres	Valeurs
Matériel	Acier inoxydable
Angle d'ondulation	90°
Largeur de la plaque	0.15 m
Epaisseur de la plaque	$8 \cdot 10^{-4}$ m
Ecart entre les plaques	$4 \cdot 10^{-3}$ m
Hauteur de la plaque	0.495m

Tableau IV.1: Paramètres de l'échangeur de chaleur à plaques (39)

La géométrie ainsi que le maillage ont été construits à l'aide de GAMBIT. Etant donné la complexité de la géométrie, un maillage non structuré raffiné avec une taille de maille de $3 \cdot 10^{-4}$ est produit (voir Figure IV.2).

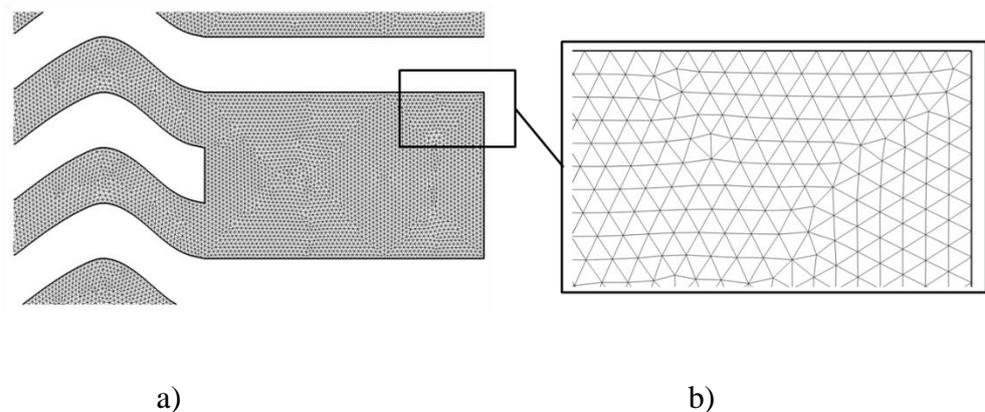


Figure IV.2 : Maillage non structuré de l'échangeur : a) Vue générale; b) Zoom au niveau d'un angle.

IV.1 Analyse d'un cas de base :

Une analyse détaillée des phénomènes hydrodynamiques de transfert de chaleur et de matière est effectuée sur un cas de base. La température d'entrée du fluide est fixée à 297,1 K et le débit d'entrée à 401,1 L/h. La vitesse d'entrée correspondant au débit fixé est aisément calculée par la relation de Stokes moyennant la section d'entrée (Voir Annexe). La vitesse d'entrée pour le cas de base est estimée à 0,185 m/s. La température du fluide chauffant est imposée à 370 K avec un débit de 1000 L/h menant ainsi à une valeur du coefficient d'échange $h = 2339,25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ (Voir Annexe A-3). Quant à la nature du lait, des conditions initiales similaires à celles utilisées par Bouvier et al. Sont fixée (39) à savoir une fraction massique de la β -Lg dans le lait de 0.09.

IV.1.1 Etude hydrodynamique :

La chute de pression dans le système figure parmi les résultats de base fournis par le code de calcul. On remarque, à partir de la Figure IV.3; une perte de charge d'environ 7500 Pa tout le long de l'échangeur de chaleur à plaques.

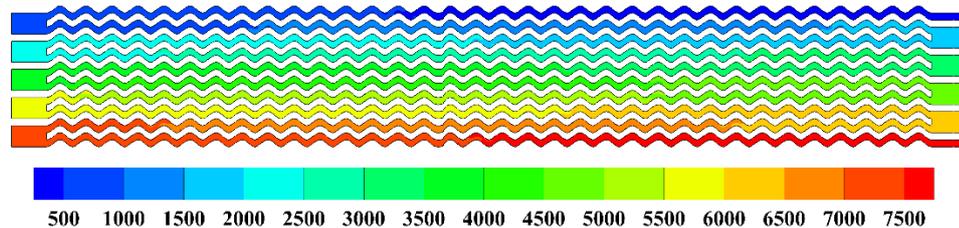


Figure IV.3 : Perte de charge (Pa) le long de l'échangeur

La représentation des lignes de courant révèle le comportement du fluide dans l'échangeur. Tel qu'illustré sur la figure IV.4, on remarque la présence de plusieurs boucles de recirculation dans le domaine de calcul. La boucle la plus importante est située dans la zone connectant deux canaux consécutifs ainsi que deux zones de recirculation plus petites au niveau des coins. En raison de la forme sinusoïdale du canal, le flux principal n'est pas centré et un écrasement des lignes de courant est observé au niveau des courbures internes du canal. Par conséquent, des petites zones de recirculation sont observées au niveau des courbures externes. Il est important de noter que ces zones causent une augmentation du temps de résidence des espèces chimiques et risquent d'avoir un effet notable sur la distribution des fractions massiques de la β -Lg native et dénaturée.

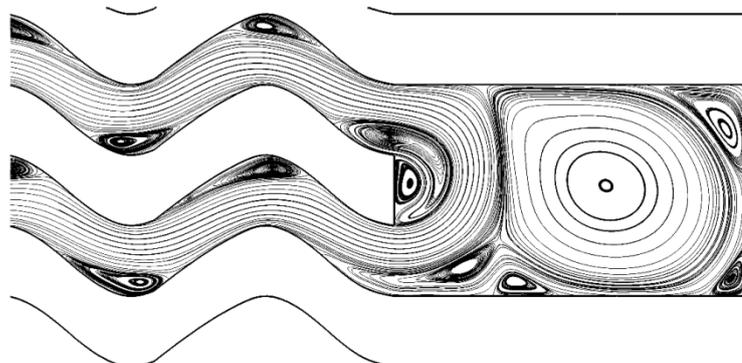


Figure IV.4 : Lignes de courant au niveau du 8eme et du 9eme canal de l'échangeur de chaleur à plaques

La Figure IV.5 montre les variations du module de vitesse au niveau du 8^{ème} et 9^{ème} canal de l'échangeur. On remarque que les plus faibles valeurs sont observées dans la zone de connexion à cause de l'élargissement de la section d'écoulement à ce niveau. Similairement, la vitesse baisse du côté externe des ondulations dû à la présence de boucles de recirculation.

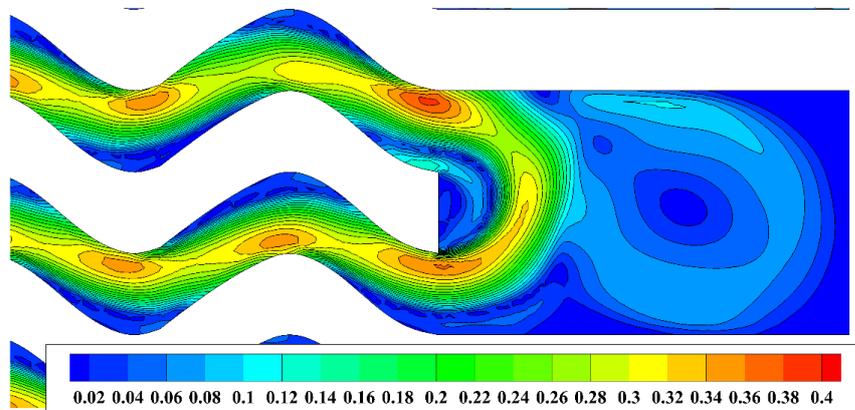


Figure IV.5 : Distribution du module de vitesse ($m.s^{-1}$) dans le 8ème et le 9ème canal de l'échangeur de chaleur à plaques

IV.1.2 Etude thermique :

L'évolution de la température tout le long de l'échangeur est représentée sur la Figure IV.6. On remarque que la température évolue entre la valeur d'entrée du fluide froid et la température du fluide chauffant. On peut noter que le fluide atteint des températures supérieures à 360 K à partir du 5^{ème} canal.

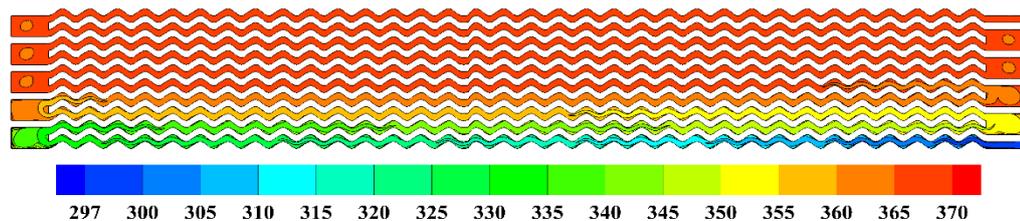


Figure IV.6 : représentation du profil de la température (K) tout au long de l'échangeur

Un zoom au niveau de la zone de connexion du 8^{ème} et du 9^{ème} canal apporte plus de précision sur l'effet du mouvement du fluide sur la distribution de la température. En effet, la forme des isothermes au sein de cette zone est intimement liée à la forme des lignes de courant, alors qu'une augmentation plus importante de la température est observée au niveau des coins (Figure IV.7)

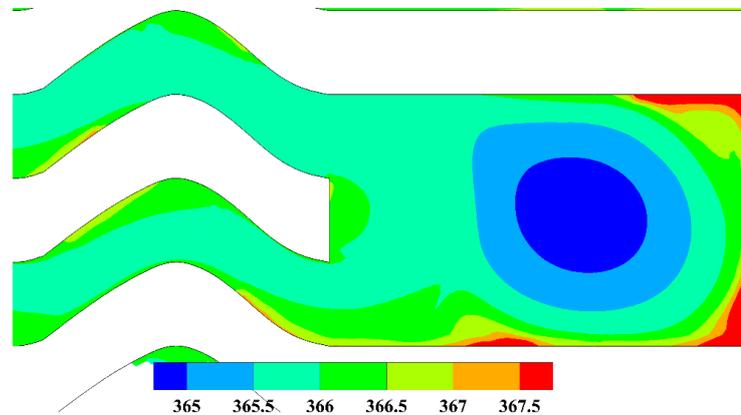


Figure IV.7 : Distribution de la température (K) au niveau d'un zoom au 8ème et 9ème canal de l'échangeur de chaleur à plaques

IV.1.3 Etude de la distribution des espèces chimiques :

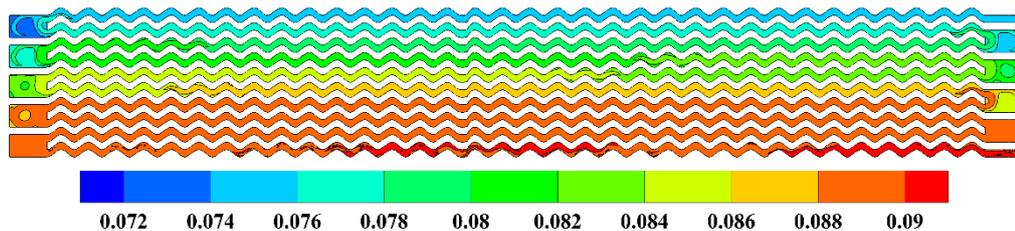
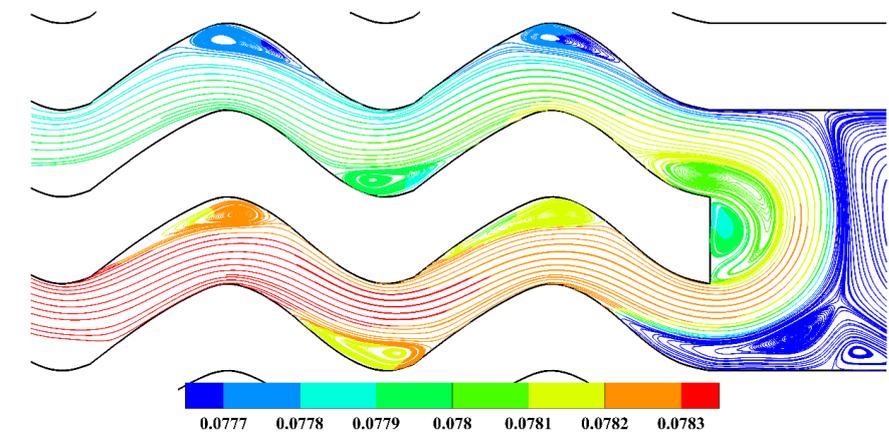


Figure IV.8 : Distribution de la fraction massique de la β -Lg dans l'échangeur

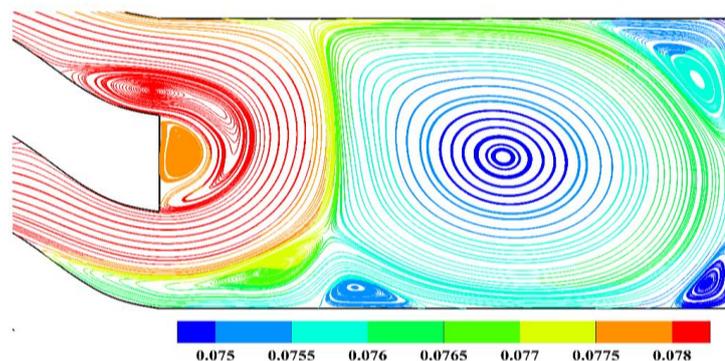
La Figure IV.8 présente les domaines de concentration de la β -Lg native dans l'échangeur de chaleur. La fraction massique de 9% à l'entrée commence à diminuer à partir du 4^{ème} canal causée par la réaction de dénaturation. Cette dernière étant favorisée par l'élévation de la température dans le canal. Dans ce cas de base, la fraction massique moyenne de la β -Lg native telle que reportée par Bouvier et al.(39) à la sortie est égale à 7.473%. Dans notre cas, cette valeur est obtenue après calibration de la constante cinétique de la réaction de dénaturation à la valeur de $2.8 \times 10^{32} \text{ kgmol.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$.

Un zoom sur la distribution de la fraction massique de la β -Lg native entre les plaques (Figure IV.9) révèle une diminution plus élevée au niveau des courbures externes des ondulations, ceci à cause d'une température plus élevée près des plaques ainsi que des boucles de recirculation présentes à ce niveau, où un encrassement plus important est par conséquent attendu.



FigureIV.9 : Distribution de la fraction massique de la β -Lg native proche de la zone de connexion entre les plaques

Un zoom sur la zone de connexion entre deux plaques (Figure VI.10) montre une consommation plus élevée de la protéine au centre de la boucle de recirculation ainsi qu'au niveau des coins du à un temps de résidence plus élevé. Ce qui indique les coins comme les zones les plus susceptibles de s'encrasser.



FigureVI.10 : Distribution de la fraction massique du β -Lg native dans la zone de connexion entre les plaques.

A l'entrée de l'échangeur de chaleur à plaques la formation du β -Lg dénaturé n'a pas encore eu lieu (Figure IV.11). On remarque sa formation à partir du quatrième canal, une fois que la température est assez élevée pour activer la réaction de dénaturation.

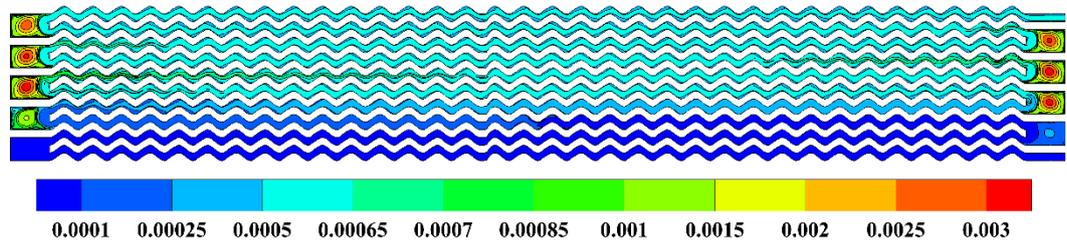


Figure IV.11 : Distribution de la fraction massique de la β -Lg dénaturée dans l'échangeur

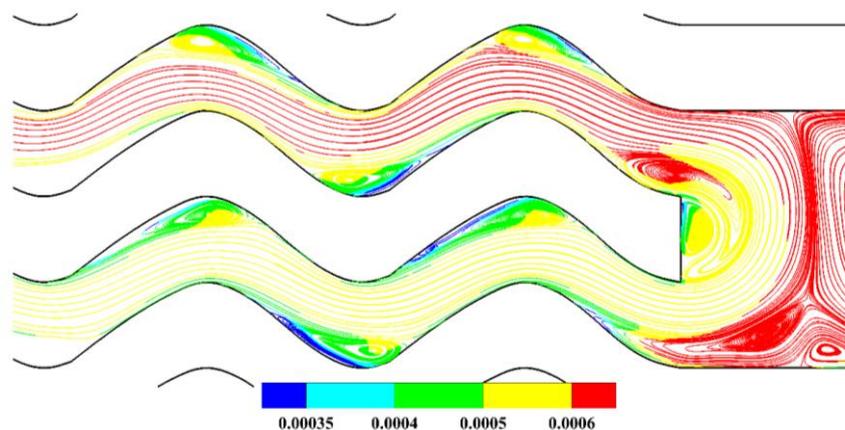


Figure IV.12 : Distribution de la fraction massique de la β -Lg dénaturée proche de la zone de connexion entre les plaques

La Figure IV.12 montre la fraction massique de la β -lactoglobuline dénaturée dans les ondulations du 8ème et 9ème canal. On remarque un gradient de concentration du centre jusqu'aux parois des plaques. Ce comportement est expliqué par la transformation de la forme dénaturée par la réaction d'agrégation à la surface des plaques, menant ainsi à l'encrassement. Un zoom au niveau de la zone de connexion entre les 8^{ème} et 9^{ème} plaques montre encore une fois que la fraction massique de la forme dénaturée est faible aux parois par rapport au centre de la boucle de recirculation.

En comparant la Figure IV.13 avec la Figure IV.10 on remarque qu'au centre de cette boucle où la consommation de la β -Lg native est élevée; la fraction massique de la forme dénaturée reste élevée vu qu'elle est loin des parois de l'échangeur.

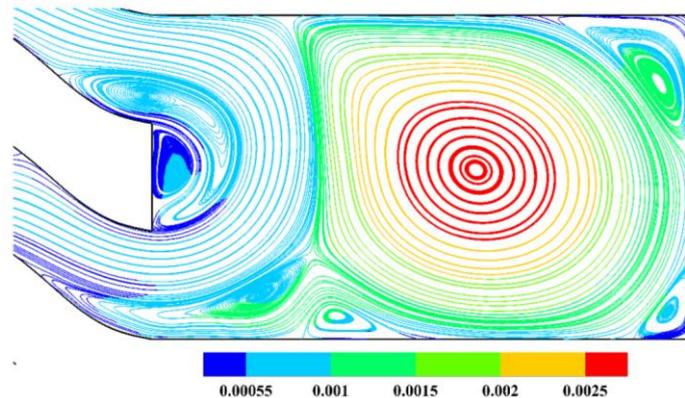


Figure IV.13 : Distribution de la fraction massique de la β -Lg dénaturée dans la zone de connexion entre les plaques

IV.1.4 Effet de la vitesse d'entrée du lait

Plusieurs simulations sont effectuées pour analyser l'effet de la vitesse d'entrée du lait sur les performances de l'échangeur. Le critère de performance choisit est le niveau de dénaturation DL de la β -Lg. Ce dernier est exprimé par :

$$DL = 1 - \frac{C_{sortie}}{C_{entrée}}$$

Où,

C_{sortie} : Concentration de la β -Lg à la sortie de l'échangeur.

C_{entrée} : Concentration de la β -Lg à l'entrée de l'échangeur.

Le cas le plus favorable correspond donc au niveau de dénaturation de β -Lg le plus faible. Les vitesses d'entrée sont variées de 0,05 m.s⁻¹ à 0,25 m.s⁻¹ ce qui correspond à des débits de 108 L.h⁻¹ à 540 L.h⁻¹ respectivement.

Les résultats de calcul sont regroupés dans Annexe A-4. On remarque bien sur la Figure IV.14 que le taux de dénaturation tend à diminuer avec une augmentation de la vitesse d'entrée, ceci dû à des temps de résidence plus faibles.

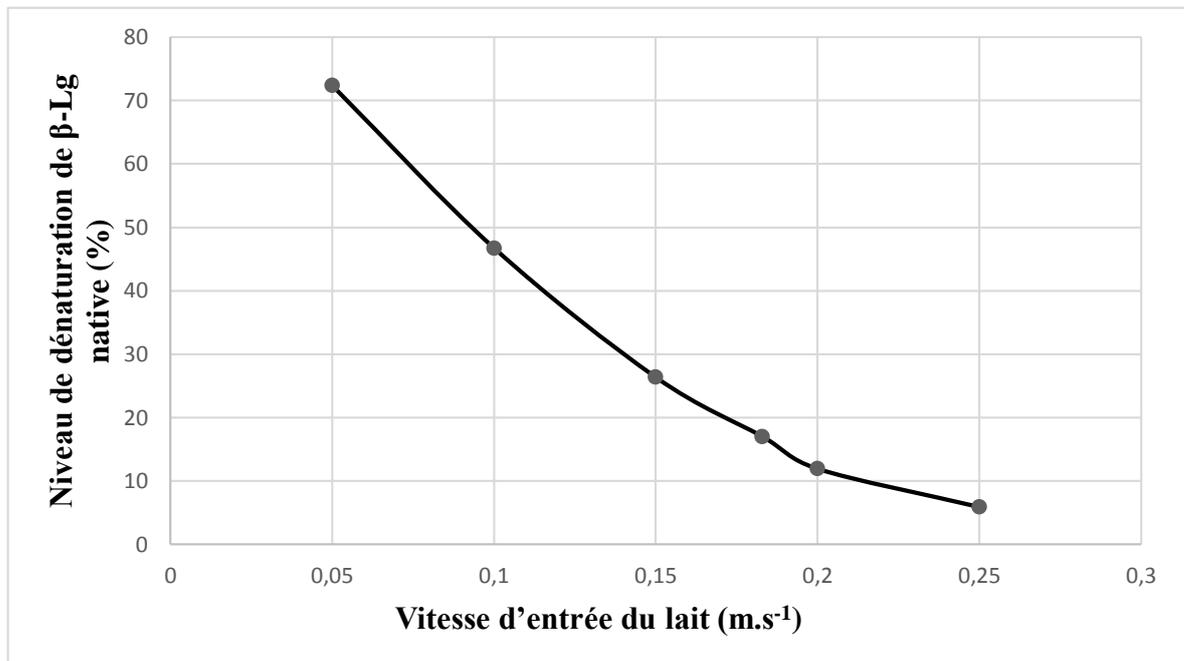


Figure IV.14 : Niveau de dénaturation de la β -Lg en fonction de la vitesse d'entrée du lait

On remarque d'après l'étude hydrodynamique et thermique ainsi que l'analyse de distribution des espèces chimiques que la zone de connexion des canaux et les courbures externes présentaient des zones de consommation relativement élevée de β -Lg native ce qui mène à un encrassement plus important. Le but de la prochaine section est de montrer l'effet du changement de la conception de l'échangeur sur le niveau de dénaturation de la β -Lg.

IV.2 Modification des conceptions

IV.2.1 Première conception

Dans cette section, des modifications géométriques sont apportées au modèle initial. Pour chacune de ces nouvelles géométries, l'effet de la variation de la vitesse d'entrée est analysé. La première modification de la géométrie consiste à réduire la taille de la zone de connexion entre les plaques de l'échangeur. Tel qu'illustré sur la Figure IV.15, la zone de

connexion est remplacée par une continuité de courbure reliant deux plaques successives avec une même densité de maillage.

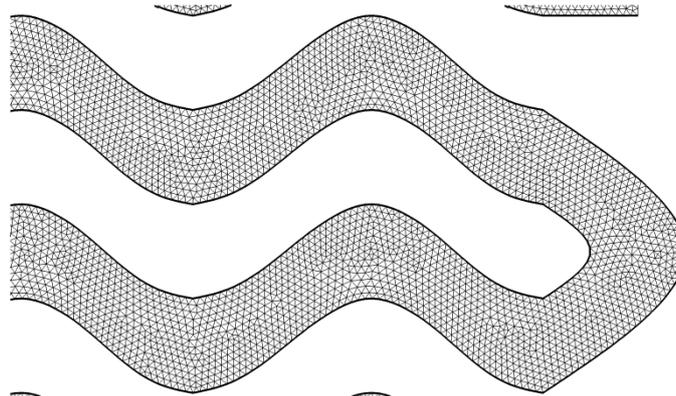


Figure IV.15 : Géométrie et maillage de la modification de la zone de connexion

Le cas de base est analysé pour cette nouvelle géométrie. D'après la Figure IV.16 on remarque une légère augmentation de la fraction massique de la β -Lg native au niveau des courbures externes des plaques. La réduction de la zone de connexion diminue le risque d'encrassement par l'élimination des différentes boucles de recirculation présentes dans la conception de départ. La Figure IV.16 montre que la fraction massique de β -Lg est plus uniforme en passant d'une plaque de chauffage à une autre.

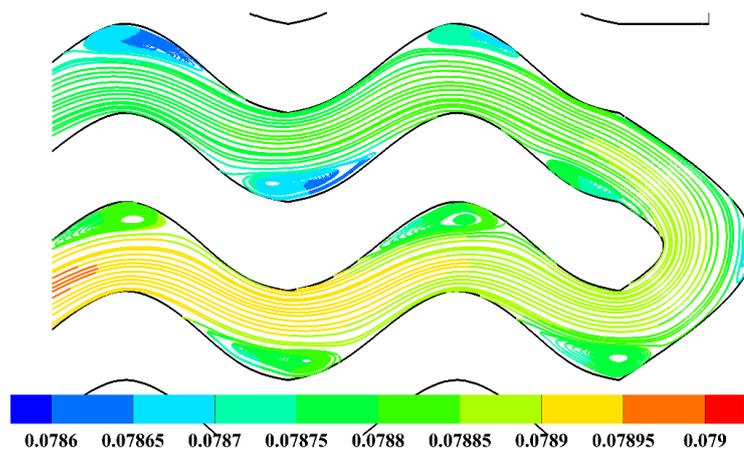
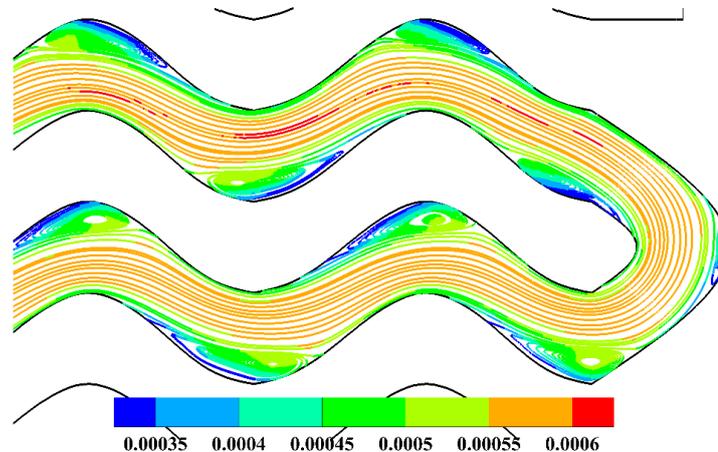


Figure IV.16 : Distribution de la fraction massique de la β -Lg native au niveau de la nouvelle zone de connexion

La production de β -Lg dénaturée est rendue plus faible après la modification géométrique tel qu'observé sur la Figure IV.17. Il est aussi important de noter la diminution

de la fraction massique de la forme dénaturée du centre du canal vers les plaques à cause de la consommation de la forme agrégée au niveau de la surface. Toutefois, les zones à courbure élevée restent les plus sujettes à encrassement vu la valeur la plus faible de la fraction massique à ce niveau.



FigureIV.17 : Distribution de la fraction massique de la β -Lg dénaturée au niveau de la nouvelle zone de connexion

D'une manière similaire à la conception initiale, plusieurs simulations sont effectuées en variant la vitesse d'entrée du fluide. Les taux de dénaturation obtenus sont regroupés dans le tableau en Annexe A-5.

D'une manière similaire à la conception de base, on remarque d'après la Figure IV.18 que le niveau de dénaturation de la β -Lg diminue avec une augmentation de la vitesse d'entrée du lait dans l'échangeur. Toutefois, pour une vitesse d'entrée de 2,5 m/s le niveau de dénaturation est égal à 4,1 % ce qui est inférieur à 5,9% obtenu pour la première géométrie. De même, à la plus faible vitesse d'entrée le niveau de dénaturation est de 59,1 % nettement inférieur à la valeur de 72,3 %. La modification de la géométrie par réduction de la zone de connexion présente donc une amélioration considérable, particulièrement lors de la diminution de la vitesse d'entrée du fluide.

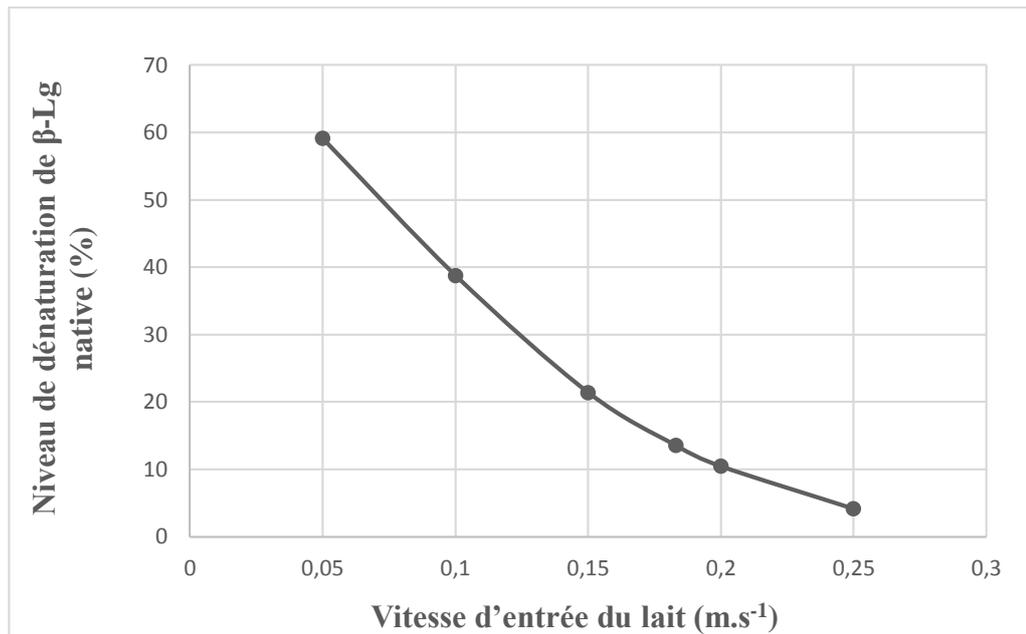


Figure IV.18 : Niveau de dénaturation de la β -Lg en fonction de la vitesse d'entrée du lait après réduction de la zone de connexion entre les plaques

IV.2.2 Deuxième conception :

La nouvelle géométrie diffère de la précédente en créant une asymétrie par le décalage des plaques de chauffage. Tel que montré sur la Figure IV.19, la même densité de maillage que dans les cas précédents est utilisée.

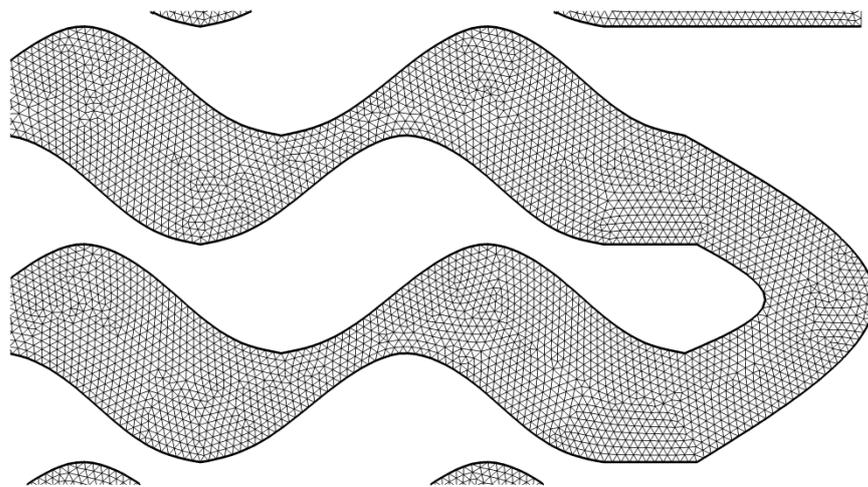


Figure IV.19 : Modification de la deuxième conception par décalage des plaques de chauffage

La figure IV.20 représente la fraction massique de la β -Lg native proche de la zone de connexion entre les plaques. Dans les zones à courbure élevée la taille des boucles de recirculation augmente tel que le montre les lignes de courant. Ces zones de recirculation couvrent l'ensemble de la zone supplémentaire fournie par le décalage des plaques, présentant ainsi un risque plus élevé à l'encrassement.

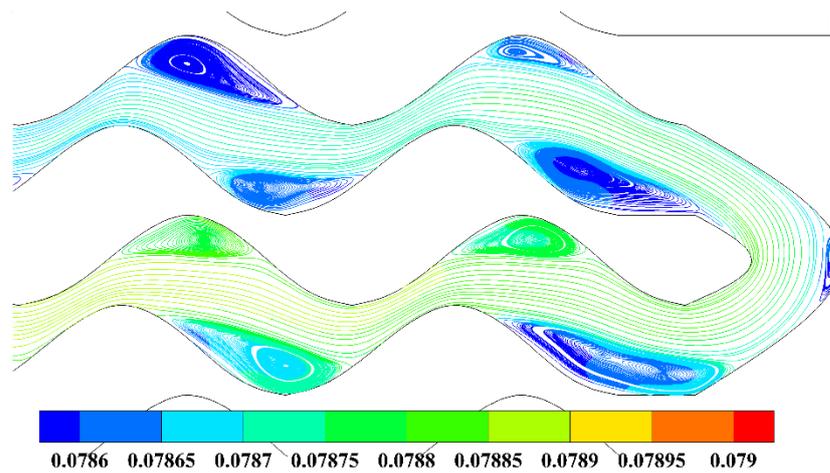


Figure IV.20 : Distribution de la fraction massique de la β -Lg native proche de la zone de connexion entre les plaques.

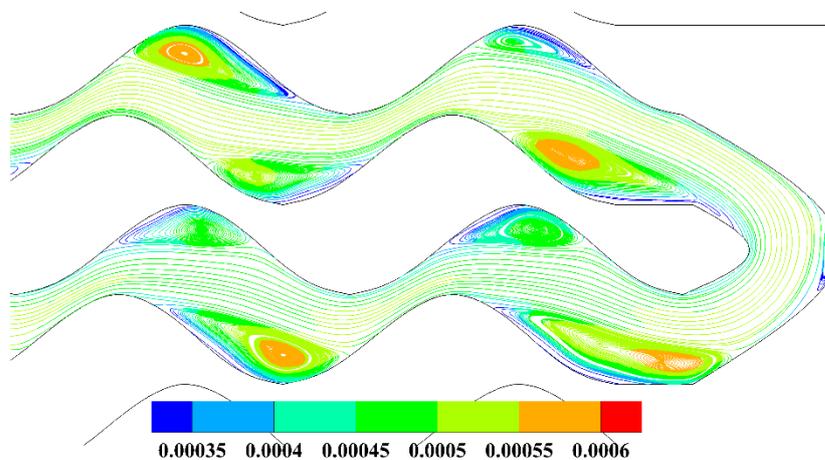


Figure IV.21 : Distribution de la fraction massique de la β -Lg dénaturée proche de la zone de connexion entre les plaques

La conséquence de l'augmentation de la taille des zones de recirculation est l'augmentation du temps de résidence de la protéine et de son taux de conversion à ce niveau, menant à une croissance de la fraction massique de la forme dénaturée (voir Figure IV.21).

L'étude paramétrique de la vitesse d'entrée du fluide, rapportée dans le tableau en Annexe A-6 montre des taux de dénaturation similaires à la conception précédente.

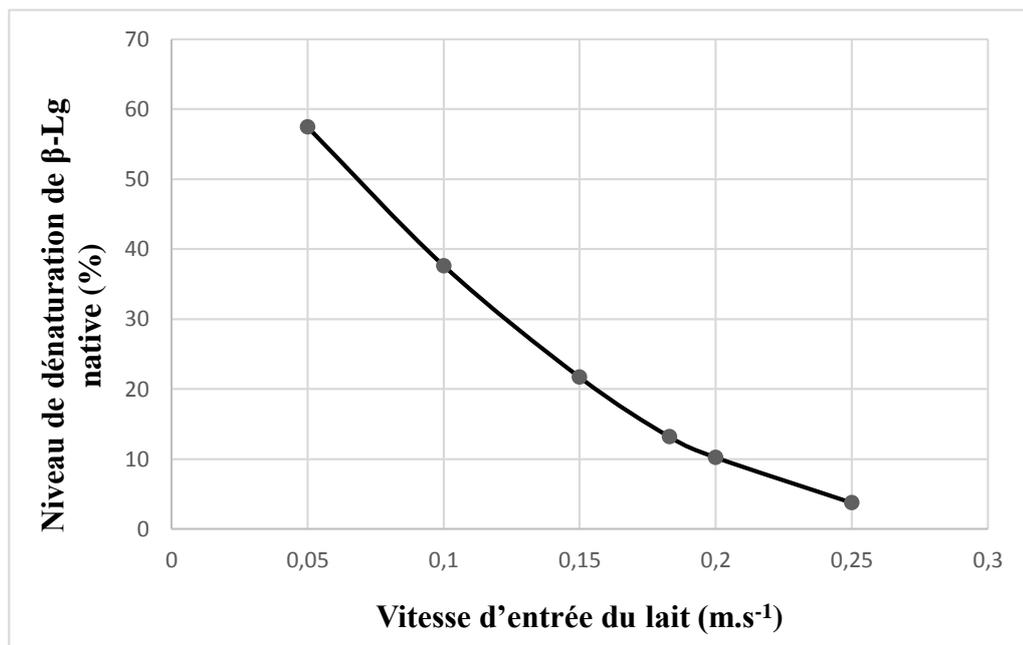


Figure IV.22 : Niveau de dénaturation de la β -Lg en fonction de la vitesse d'entrée du lait

D'après la Figure IV.22 on remarque que le niveau de dénaturation de la β -Lg native diminue en augmentant la vitesse d'entrée du lait dans l'échangeur de chaleur.

IV.3 Comparaison entre les 3 géométries :

Dans la Figure IV.23 un diagramme récapitulatif du niveau de dénaturation en fonction des vitesses d'entrée du lait dans les 3 géométries est présenté (tableau récapitulatif de ce diagramme est présenté en Annexe).

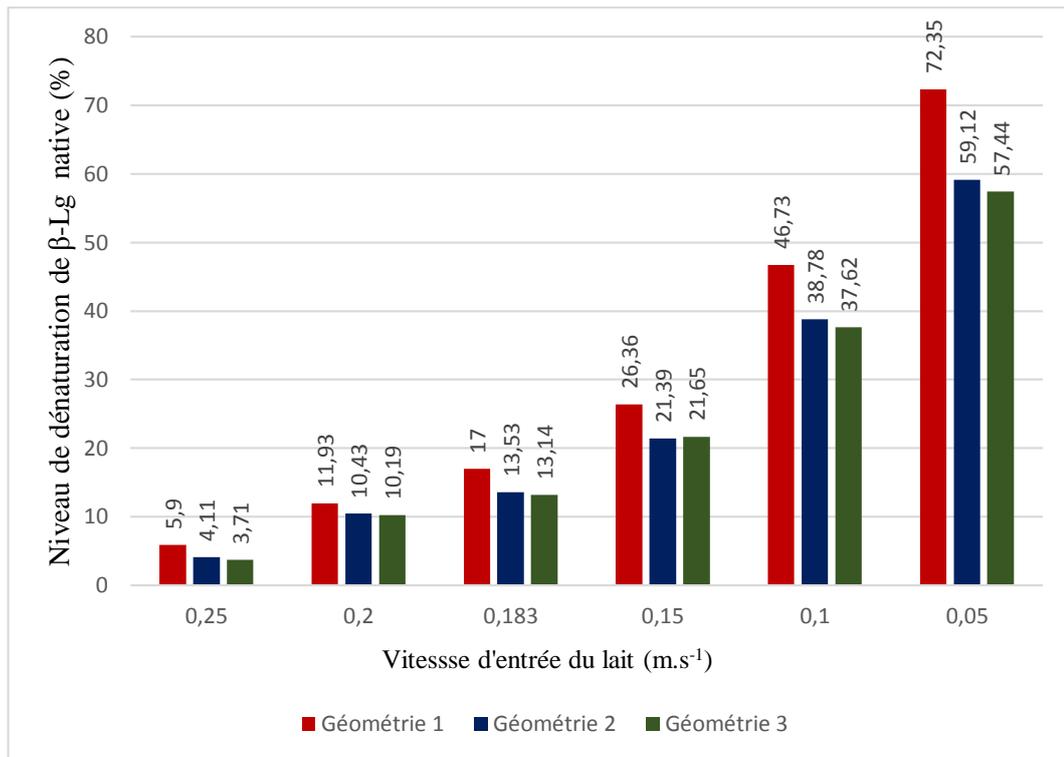


Figure IV.23 : Diagramme récapitulatif des niveaux de dénaturation en fonction des vitesses d'entrée du lait dans les 3 géométries

Pour toutes les géométries analysées, les taux de dénaturation les plus faibles sont observés aux vitesses les plus élevées. Ceci est naturellement dû à la diminution des temps de séjour et donc des taux de conversion des espèces chimiques. Toutefois, la dernière géométrie étudiée montre le taux de dénaturation le plus faible même si elle peut conduire à des taux d'encrassement plus élevés comparé à la deuxième géométrie. Avec la diminution de la vitesse d'entrée du fluide, les écarts entre les performances deviennent beaucoup plus importants. En effet, pour la vitesse la plus faible, environ 40% de différence dans les taux de dénaturation sont observés entre les géométries modifiées et la géométrie de départ.

Conclusion

CONCLUSION

Le phénomène de dénaturation de la β -Lg est un mécanisme complexe, en particulier lorsque le procédé de dénaturation induit par la chaleur à lieu dans des échangeurs de chaleur à plaques.

Dans ce travail, un modèle numérique bidimensionnel a été développé, en se basant sur trois géométries différentes. L'objectif principal de cette recherche est l'étude à l'échelle pilote de l'effet du design de l'échangeur de chaleur à plaques dans le procédé de pasteurisation, sur la dénaturation de la β -Lg qui conduit directement à l'encrassement de l'échangeur. Une étude paramétrique a été effectuée dans le but de minimiser le niveau de dénaturation de la β -Lg.

La simulation numérique a montré les zones d'un échangeur à plaques les plus exposées à l'encrassement au cours de son fonctionnement. Dans ce but, une analyse détaillée des phénomènes hydrodynamiques, de transfert de chaleur et de matière a été effectuée sur le cas de base; il en résulte:

- la présence de plusieurs boucles de recirculation dans le domaine de calcul, qui conduisent à une baisse de la vitesse plus exactement dans la zone de connexion et au côté externe des ondulations, et qui par la suite causent une augmentation du temps de résidence des espèces chimiques et affectent la distribution des fractions massiques de la β -Lg native et dénaturée.
- La distribution de la température dans l'échangeur de chaleur à plaques est intimement reliée à la distribution du module de vitesse.
- La réaction de dénaturation est favorisée par l'élévation de la température dans le canal; elle est importante lorsque la vitesse d'écoulement est faible et la température est élevée, dans la région où un encrassement plus important est attendu. On remarque que le niveau de dénaturation de la β -Lg tend à diminuer avec l'augmentation de la vitesse d'entrée et avec des temps de résidences faibles.

Dans la deuxième étape de cette étude; deux autres configurations de l'échangeur ont été considérées en se basant sur la géométrie de base, afin de monter l'effet du changement de la conception sur le niveau de dénaturation de la β -Lg, la première avait pour but d'éliminer les différentes boucles de recirculation présentes dans la conception de départ

afin de diminuer l'encrassement dans les courbes externes et la zone de connexion; la deuxième conception diffère des précédentes en créant une asymétrie par le décalage des plaques de chauffage. L'étude des 3 géométries a révélé qu'à des vitesses élevées le niveau de dénaturation de la β -Lg devient faible; confirmant ainsi que la géométrie joue un rôle important sur l'encrassement.

En conclusion, la CFD est encore une fois prouvée utile comme outil d'aide à la conception d'équipement de procédé. Dans le cas du procédé de pasteurisation elle se révèle appropriée pour l'étude et la prévention de l'encrassement.

Même si les résultats obtenus dans le modèle bidimensionnel s'avèrent représentatifs; une analyse tridimensionnelle demeure plus réaliste; et devrait être considérée dans les futures recherches.

Références

REFERENCES

1. Bianchi A, Yves A, Etay J. Transfert thermique Première édition 2004.
2. Pascal T. Echangeurs de chaleurs. 14 Mars 2002.
3. Fox P. Développement in dairy chemistry. 4^{ème} édition. Elsevier science applied. 1989.
4. Ayadi M. Traitement thermique des fluides alimentaires encrassants par la technologie du chauffage ohmique en géométrie rectangulaire . Nancy-I, France. 2005.
5. Visser J, Jeurenick T. Fouling of heat exchanger in dairy industry. Experimental thermal and fluid science. 1997. 407-24.
6. Caussin F, Bouhallab S. Environnement minéral et propriétés fonctionnelles des protéines sériques. Minéraux et produits laitiers. 2004.
7. Papiz M, Hambling S, Sawyer L, Eliopoulos E, Yewdall S, North A, et al. β -lactoglobulin: a function from a structure. Journal of Molecular Graphics. 1986. 237.
8. Montville T, Matthews R. Food microbiology an introduction. American society for microbiology press. 2005. 30.
9. Phoebe X, Ren D, Xiao Y, Tomasula P. Effect of homogenization and pasteurization on the structure and stability of whey protein in milk 1. Journal of Dairy Science. 2015. 97.
10. Tamime A. Milk processing and qualite management. series Sodt. editor 2009.
11. Daufin G. Procédés modernes de nettoyage et de désinfection dans l'industrie laitière. 1977. 94-148.
12. Jun S, Puri V. Fouling models for heat exchangers in dairy processing : a review Journal of Food Process Engineering. 2005. 1-34.
13. Erabit N, Flick D, Alvarez G. Formation of β -lactoglobulin aggregates during thermomechanical treatments under controlled shear and temperature conditions. Journal of Food Engineering. 2014. 57-68.

14. Petit J, Herbig A, Moreau A, Delaplace G. Influence of calcium on β -lactoglobulin denaturation kinetics: Implications in unfolding and aggregation mechanisms. *Journal of Dairy Science*. 2011. 94-810.
15. Burton H. Reviews of the progress of dairy science (Deposits from whole milk in heat treatment plant). *Journal of Dairy Research*. 1967. 30.
16. TISSIER J, Lalande M. Experimental device and methods for studying milk deposit formation on heat exchange surfaces. *Biotechnology progress*. 1986.29.
17. Bell R, Sanders C. Prevention of milkstone formation in high-temperature-shorttime heater by preheating milk and whey. *Journal of Dairy Science*. 1944. 499-504.
18. Lalande M, Rene F, Tissier J. Fouling and its control in heat exchangers in the dairy industry. *Biofouling*. 1989.50.
19. Hiddinik J, Lalande M, Maas A, Streuper A. Heat treatment of whipping cream. Fouling of the pasteurization equipment. 1986.
20. De Jong P, Bouman S, Van Der L. Fouling of heat treatment equipment in relation with the denaturation of β -lactoglobulin. *Journal of society of Dairy Technology*. 1992. 3-8.
21. Rene F. Optimisation de l'encrassement et du nettoyage des échangeurs en laiterie [PHd]. France. 1987.
22. Lalande M, Tissier J, Corrieu G. Fouling of heat transfer surfaces related to β -lactoglobulin denaturation during heat processing of milk. *Biotechnology progress*. 1985. 131.
23. Bansal B, Xiao Dong C. A Critical Review of Milk Fouling in Heat Exchangers. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2006. 27-33.
24. Dalgleish D. Denaturation and aggregation of serum proteins and caseins in heated milk. *J Agric Food Chem*. 1990. 38.
25. Changani S, Belmar-Beiny M, Fryer P. Engineering and chemical factors associated with fouling and cleaning in milk processing. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 1997. 392-406.

26. Khaldi M, Blanpain-Avet P, Guérin R, Ronse G, Bouvier L, André C, et al. Effect of calcium content and flow regime on whey protein fouling and cleaning in a plate heat exchanger. *Journal of Food Engineering*. 2015. 68-78.
27. Kella N, Kinsella J. Structural stability of β -lactoglobulin in the presence of kosmotropic salts. *International Journal of Peptide Protein Research*. 1988. 367.
28. Hines M, Foegeding E. Interactions of β -lactalbumin and bovine serum albumin with β -lactalbumin in thermally induced gelation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1993. 341.
29. Gothman S, Fryer P, Pritchard A. Fouling and Cleaning. *Food Processing*. 1989.1-13.
30. Georgiadis M, Macchietto C. Modeling and simulation of plate heat exchangers under milk fouling. *chemical Engineering and Processing*. 2000. 19.
31. Grijspeerdt K, Mortier L, R. R. Applications of modeling to optimize ultra high temperature milk heat exchangers with respect to fouling. *Food Control* .2004. 30.
32. Daufin G, Labbee J, Quemerai A, Brule G, Michel F, Roignant M, and al. Fouling of a heat exchange surface . *Lait*. 1987. 64.
33. Hiroshi I, Nagata A, Toyomasu T, Sakiyama T, Nagai T, Saeki T, and al. Adsorption of β -Lactoglobulin onto the surface of stainless steel particles. *Bioscience Biotechnology and Biochemistry*. 1995. 51.
34. De Jong P, Bouman S, Van Der L. Fouling of heat treatment equipment in relation with the denaturation of β -lactoglobulin. *Journal of society of Dairy Technology*. 1992. 3-8.
35. Delaplace F. Identification des échangeurs de chaleur à plaques, application à l'étude de l'encrassement par les produits laitiers. Université Henri Poincaré-Nancy I, France. 1995.
36. Burton H. Fouling of heat exchangers (Ultra-high-temperature processing of milk and milk products). Elsevier Applied Science. 1988.

37. Grijspeerdt K, Hazarika B, Vucinic D. Application of computational fluid dynamics to model the hydrodynamics of plate heat exchangers for milk processing. *Journal of Food Engineering*. 2003. 42.
38. Jun S, Puri, Virendra M. 3D milk-fouling model of plate heat exchangers using computational fluid dynamics. *International Journal of Dairy Technology*. 2005. 24.
39. Bouvier L, Moreau A, Ronse G, Six T, Petit J, Delaplace G. A CFD model as a tool to simulate β -lactoglobulin heat-induced denaturation and aggregation in a plate heat exchanger. *Journal of Food Engineering*. 2014. 56-63.
40. Tolkach A, Kulozik U. Reaction kinetic pathway of reversible and irreversible thermal denaturation of β -lactoglobulin. *Dairy Sci*. 2007. 15.

Annexes

ANNEXE

A-1. Conversion des données cinétiques

La masse molaire de β -Lg = 18300 kg/kmol.

-Première réaction de dénaturation : N \longrightarrow U

- $$E_{a \text{ unf}} (\text{j} \cdot \text{kgmol}^{-1}) = 1000 \cdot E_{a \text{ unf}} (\text{j} \cdot \text{mol}^{-1})$$
$$= 1000 \cdot 242.6 \cdot 10^3$$

$$E_{a \text{ unf}} (\text{j} \cdot \text{kgmol}^{-1}) = 2.4259 \cdot 10^8$$

- $$K^{\circ}_{\text{unf}} (\text{kg} \cdot \text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}) = K^{\circ}_{\text{unf}} (\text{g}^{1-n} \cdot \text{L}^{n-1} \cdot \text{s}^{-1}) \times M_{\beta\text{-lg}}^{0.5}$$
$$= 1.08 \times 10^{33} \cdot 18300^{0.5}$$

$$K^{\circ}_{\text{unf}} (\text{kg} \cdot \text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}) = 1.4635 \cdot 10^{35}$$

-Deuxième réaction de dénaturation : U \longrightarrow A

- $$E_{a \text{ unf}} (\text{j} \cdot \text{kgmol}^{-1}) = 1000 \times E_{a \text{ unf}} (\text{j} \cdot \text{mol}^{-1})$$
$$= 1000 \times 95.9 \cdot 10^3$$

$$E_{a \text{ unf}} (\text{j} \cdot \text{kgmol}^{-1}) = 9.59 \times 10^7$$

$$K^{\circ}_{\text{unf}} (\text{kg} \cdot \text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}) = K^{\circ}_{\text{unf}} (\text{g}^{1-n} \cdot \text{L}^{n-1} \cdot \text{s}^{-1}) \times M_{\beta\text{-lg}}^{0.5}$$
$$= 2.12 \times 10^{11} \times 18300^{0.5}$$

$$K^{\circ}_{unf} (\text{kg.mol.m}^{-3}.\text{s}^{-1}) = 2.8712 \times 10^{13}$$

Après cette conversion on peut introduire ces résultats directement dans ANSYS-fluent.

Paramètres cinétiques	Valeurs
$E_{a\ unf} \text{ (j . kgmol}^{-1}\text{)}$	$2,4259 \times 10^8$
$K^{\circ}_{unf} \text{ (kgmol.m}^{-3}.\text{s}^{-1}\text{)}$	$1,4635 \times 10^{35}$
n	1,5
$E_{a\ agg} \text{ (j . kgmol}^{-1}\text{)}$	$9,59 \times 10^7$
$K^{\circ}_{agg} \text{ (kgmol.m}^{-3}.\text{s}^{-1}\text{)}$	$2,8712 \times 10^{13}$
n	2

Tableau A.1 : Conversion de paramètres cinétiques pour le schéma réactionnel d'encrassement du lait selon l'unité utilisés dans Fluent

Paramètres cinétiques	Valeurs
$E_{a\ unf} \text{ (j . kgmol}^{-1}\text{)}$	2.4259×10^8
$K^{\circ}_{unf} \text{ (kgmol/m}^3.\text{s}\text{)}$	2.8×10^{32}
n	1.5
$E_{a\ agg} \text{ (j . kgmol}^{-1}\text{)}$	9.59×10^7
$K^{\circ}_{agg} \text{ (kgmol/m}^3.\text{s}\text{)}$	2.8712×10^{13}
n	2

Tableau A.2: Données cinétiques après calibration

Après cette conversion on peut introduire ces résultats directement dans ANSYS-fluent.

A-2. Calcul des vitesses d'entrée

-Les vitesses d'entrées sont calculées à partir des débits d'entrées (L.h⁻¹)

$$QV = V \times S$$

QV : Débit volumique en (m³.s⁻¹)

V : Vitesse du fluide en (m.s⁻¹)

S : Section du passage en (m²)

$$V = \frac{QV}{S} = \frac{\frac{1000 \times 10^{-3}}{3600}}{0.15 \times 4 \times 10^{-3}} = 0.462 \text{ m.s}^{-1}$$

A-3. Calcul du coefficient d'échange h

Le coefficient d'échange h est calculé à partir du nombre de Nusselt

- Régime laminaire entre 2 plaques :

$$Nu = \frac{h \times 2 \times e}{k}$$

$$\overline{Nu} = 3.4$$

- Régime turbulent entre 2 plaques :

$$Nu = \frac{h \times 2 \times e}{k}$$

Le nombre du Nusselt est donnée par :

$$\overline{Nu} = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.33} \quad (\text{Formule COLBURN})$$

Où *Re* est donnée par :

$$Re = \frac{\rho \times 2 \times e \times V_m}{\mu}$$

Et Pr par :

$$\text{Pr} = \frac{c_p \times \mu}{k}$$

Avec :

V_m : Vitesse moyenne du fluide (m.s^{-1}).

ρ : Masse volumique du fluide kg.m^{-3} .

c_p : Chaleur spécifique du fluide $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

μ : Viscosité dynamique du fluide Pa.s .

λ : Conductivité thermique du fluide $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

-Calcul du coefficient h du côté du fluide chaud (eau) :

$$\text{Re} = \frac{2 \times 4 \times 2.77 \times 10^{-4} \times 10^{-3} \times 10^3}{\frac{0.15 \times 4 \times 10^{-3}}{10^{-3}}}$$

$$\text{Re} = 3693.33 > 2300 \quad \text{régime turbulent.}$$

- Régime turbulent entre 2 plaques :

$$\text{Nu} = \frac{h \times 2 \times e}{k}$$

$$\overline{\text{Nu}} = 0.023 \times \text{Re}^{0.8} \times \text{Pr}^{0.33} \quad (\text{Formule COLBURN})$$

$$\text{Pr} = \frac{c_p \times \mu}{k}$$

$$= \frac{4185 \times 10^{-3}}{0.6}$$

$$\text{Pr} = 6.975$$

$$\overline{\text{Nu}} = 0.023 \times \text{Re}^{0.8} \times \text{Pr}^{0.33}$$

$$= 0.023 \times 3693.33^{0.8} \times 6.975^{0.33}$$

$$\overline{Nu} = 31.19$$

$$h = \frac{Nu \cdot k}{2 \cdot e} = \frac{31.19 \cdot 0.6}{2 \cdot 4 \cdot 10^{-3}}$$

A-4. Résultats de niveau de dénaturation de β -Lg native en fonction de la vitesse d'entrée du lait et sa température de sortie.

Les détails sont présentés dans le tableau suivant :

Vitesse d'entrée du lait (m.s ⁻¹)	Température de sortie du lait (K)	Fraction massique de la β -Lg à l'entrée de l'échangeur	Fraction massique de la β -Lg à la sortie de l'échangeur	Niveau de dénaturation de la β -Lg (%)
0.250	364	0.09	$8,4 \times 10^{-2}$	5,9
0.200	365	0.09	$7,9 \times 10^{-2}$	11,9
0.183	366	0.09	$7,4 \times 10^{-2}$	17,4
0.150	367	0.09	$6,6 \times 10^{-2}$	26,3
0.100	368	0.09	$4,7 \times 10^{-2}$	46,7
0.050	369	0.09	$2,4 \times 10^{-2}$	72,3

Tableau A-4 : Résultats de niveau de dénaturation de la β -Lg native en fonction de la vitesse d'entrée du lait et sa température de sortie

A-5. Résultats de l'effet de la variation de la vitesse d'entrée après élimination de la zone de connexion

Vitesse d'entrée du lait (m/s)	Température de sortie du lait (K)	Fraction massique de la β -Lg à l'entrée de l'échangeur	Fraction massique de la β -Lg à la sortie de l'échangeur	Niveau de dénaturation de la β -Lg %
0.250	364	0.09	$8,6 \times 10^{-2}$	4,1
0.200	365	0.09	$8,0 \times 10^{-2}$	10,4
0.183	366	0.09	$7,7 \times 10^{-2}$	13,5
0.150	367	0.09	$7,0 \times 10^{-2}$	21,3
0.100	368	0.09	$5,5 \times 10^{-2}$	38,7
0.050	369	0.09	$3,6 \times 10^{-2}$	59,1

Tableau A-5 : Résultats de l'effet de la variation de la vitesse d'entrée après élimination de la zone de connexion

A-6. Résultats de l'effet de la variation de la vitesse d'entrée après décalage des plaques de chauffage

Vitesse d'entrée du lait (m/s)	Température de sortie du lait (K)	Fraction massique de β -Lg à l'entrée de l'échangeur	Fraction massique de β -Lg à la sortie de l'échangeur	Niveau de dénaturation de β -Lg %
0.250	364	0.09	$8,6 \times 10^{-2}$	3,7
0.200	365	0.09	$8,0 \times 10^{-2}$	10,1
0.183	366	0.09	$7,7 \times 10^{-2}$	13,1
0.150	367	0.09	$7,0 \times 10^{-2}$	21,6
0.100	368	0.09	$5,6 \times 10^{-2}$	37,6
0.050	369	0.09	$3,8 \times 10^{-2}$	57,4

Tableau A-6 : Résultats de l'effet de la variation de la vitesse d'entrée après décalage des plaques de chauffage