

# Contribution à l'étude de l'encrassement par le lait dans un échangeur de chaleur à plaques

S. Amine AOUANOUK<sup>1\*</sup>, Abdelkader MOUHEB<sup>1</sup>, Rafik ABSI<sup>2</sup>, M. Rafik ZAZOUN<sup>1</sup>, Youcef MAHDI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire des Phénomènes de Transfert, FGMGP, USTHB  
BP. 32 EL ALIA, 16111 Bab Ezzouar, Alger, Algérie

<sup>2</sup>EBI, Inst. Polytech. St-Louis  
32, boulevard du Port, 95094 Cergy-Pontoise cedex, France

\*(auteur correspondant: aouanouk.a@gmail.com)

**Résumé** – La pasteurisation du lait est l'une des principales opérations dans le secteur de l'industrie laitière. Elle consiste en un traitement thermique du lait pour garantir un produit de bonne qualité microbiologique avec une longue durée de conservation. Cependant, durant le traitement thermique du lait, certains de ses constituants, particulièrement la protéine  $\beta$ -lactoglobuline, deviennent instables thermiquement, subissant une altération d'ordre chimique dont les produits forment un dépôt sur les parois de l'équipement. Le phénomène d'encrassement dans l'industrie agroalimentaire est d'une importance primordiale car en plus de la détérioration des équipements, l'encrassement affecte aussi la qualité bactériologique du produit final. Cette étude est une contribution à la modélisation 2D de l'encrassement par le lait dans un canal d'un échangeur de chaleur à plaques. Le modèle d'encrassement utilisé est principalement fondé sur le travail de Jun et Puri [1]. La procédure numérique est basée sur la méthode des volumes finis permettant de résoudre les équations différentielles, en régime instationnaire, régissant l'écoulement, laminaire, et les transferts thermique et massique. Les résultats obtenus sont en accord avec les données expérimentales de Georgiadis et Macchietto [2], avec une erreur relative de 0,66%. Ils permettent aussi de cerner l'influence de la température d'entrée du lait sur l'épaisseur et la masse du dépôt d'encrassement, ainsi que la température de sortie du fluide.

## Références

- [1] S. Jun et V. M. Puri, A 2D dynamic model for fouling performance of plate heat exchanger, *Journal of Food Engineering*, 75 (2006), 364-374.
- [2] M. C. Georgiadis, S. Macchietto, Dynamic modelling and simulation of plate heat exchanger under milk fouling. *Chemical Engineering Science*, 55 (2000), 1605-1619.

## Nomenclature

$Bi$	nombre de Biot	$U_0$	coefficient global d'échange thermique en conditions propres, $W.m^{-2}.K^{-1}$
$C$	concentration massique, $kg.m^3$	$V$	volume moléculaire de la particule, $m^3$
$D$	coefficient de diffusion, $m^2.s^{-1}$	<i>Symboles grecs</i>	
$D_e$	diamètre équivalent, $m$	$\alpha$	diffusivité thermique, $m^2.s^{-1}$
$E$	énergie d'activation, $J/mol$	$\delta_T$	épaisseur de la couche limite thermique, $m$
$e$	épaisseur du canal, $m$	$\mu$	viscosité dynamique du lait, $kg/m.s$
$k_m$	coefficient de transfert de matière, $m/s$	<i>Indices et exposants</i>	
$p$	pression, $Pa$	$O$	initial
$Pr$	nombre de Prandtl	$N$	native
$Re$	nombre de Reynolds	$U$	dénaturée
$Sh$	nombre de Sherwood	$A$	agrégée
$Sc$	nombre de Schmidt	$d$	dépôt
$T$	température, $K$		
$t$	temps, $s$		

## 1. Introduction

Afin d'obtenir un produit final de bonne qualité microbiologique avec une longue durée de conservation, le traitement thermique du lait et de ses dérivés est une opération importante dans l'industrie laitière. Le procédé de pasteurisation est un exemple typique du traitement thermique du lait. Il consiste à faire chauffer le lait à une température d'environ 85°C, puis le maintenir à cette température pendant quelques secondes afin d'obtenir un produit de bonne valeur nutritionnelle et répondant aux normes d'hygiène et de qualité.

Depuis quelques décennies, les échangeurs de chaleur à plaques sont de plus en plus répandus dans divers domaines industriels tels que l'industrie chimique, pharmaceutique et alimentaire. Ils offrent d'excellentes caractéristiques de transfert de chaleur qui permettent un design d'installations plus compact qu'avec les échangeurs de chaleur tubulaires.

Le problème majeur rencontré dans les unités industrielles utilisant les échangeurs de chaleur est le phénomène d'encrassement. L'effet néfaste de ce phénomène apparaît dans la réduction des performances thermiques de l'équipement et l'augmentation des pertes de charge. Ce phénomène est, généralement, dû à la présence simultanée de plusieurs mécanismes physiques et chimiques. Des cycles de nettoyage réguliers sont alors nécessaires, engendrant ainsi des pertes en termes de capital, d'énergie, de temps de maintenance et de production.

Un grand nombre d'investigations ont été faites pour mieux comprendre le mécanisme d'encrassement par le lait. Les protéines contenues dans le lait, plus précisément la protéine  $\beta$ -lactoglobuline, jouent un rôle clé dans la formation du dépôt. La formation du dépôt sur les surfaces d'échange thermique est gouvernée par la dénaturation de cette protéine [1].

L'approche numérique a été largement utilisée pour étudier l'encrassement par le lait dans les échangeurs de chaleur à plaques. Les profils de température ont été déterminés dans un échangeur de chaleur à plaques constitué de 13 plaques, ce qui a permis l'explication de l'irrégularité de la formation du dépôt dans les canaux de l'échangeur [2]. La détermination du coefficient global de transfert de chaleur et de la perte de pression a été faite en fonction du temps. Un modèle statistique de l'encrassement par le lait, lors du traitement UHT, dans les échangeurs de chaleur à plaques a été développé [3]. Un modèle d'encrassement qui prend en considération le transfert de masse entre l'écoulement du fluide et la couche limite a été

présenté [4]. Récemment, un modèle bidimensionnel prenant en compte l'écoulement du fluide pour la prédiction de la distribution de la température avec plus de précision a été réalisé [5]. Jun et Puri [6] ont appliqué ce dernier à un modèle 2D dynamique permettant une prédiction de la masse du dépôt sur les surfaces des plaques avec plus de précision.

L'intérêt de ce papier est d'analyser l'impact d'une pasteurisation du lait utilisant un préchauffage sur la quantité du dépôt accumulée sur les parois d'un échangeur de chaleur à plaques. A cet effet, le modèle d'encrassement de Jun & Puri [6] a été reproduit en considérant un canal bidimensionnel plan représentant le canal d'un échangeur de chaleur à plaques.

## 2. Formulation mathématique

Dans le but d'analyser l'effet de la température d'entrée du lait dans l'échangeur de chaleur sur la quantité du dépôt d'encrassement sur les plaques, une étude numérique, comprenant l'hydrodynamique et les transferts de chaleur et de matière, lors de l'écoulement du lait, est réalisée. La géométrie considérée est un canal plan (entre deux plaques lisses et parallèles). Les plaques sont fabriquées en acier inoxydable 316Ti de 75 cm de longueur et 20 cm de largeur. L'épaisseur du canal est de 4 mm et l'écoulement du fluide est ascendant (Figure 1).

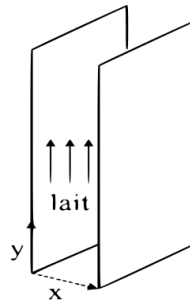


Figure 1 : Schéma descriptif du canal.

### 2.1. Equations de l'écoulement et de l'énergie

Les équations 1-3 représentent les équations régissant l'écoulement du lait dans le canal incluant, respectivement, l'équation de continuité et les équations de quantité de mouvement selon les axes horizontal et vertical.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left[ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right] = \mu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2)$$

$$\rho \left[ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right] = \mu \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] - \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3)$$

où  $u$  et  $v$  représentent, respectivement, les composantes horizontale et verticale de la vitesse,  $p$  la pression statique au point considéré,  $\rho = 1027 \text{ kg.m}^{-3}$  la masse volumique du fluide et  $\mu = 7,75.10^{-4} \text{ kg/m.s}$  sa viscosité. L'équation 4 exprime la distribution de la température du fluide dans le canal, où  $T$  est la température du fluide et  $\alpha$  la diffusivité thermique du fluide.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (4)$$

## 2.2. Modèle d'encrassement

Le modèle d'encrassement utilisé dans cette étude, qui est représenté par la figure 2, est le modèle adopté par Jun & Puri [6]. Ce modèle a été proposé pour la première fois par de Jong et al. [7].

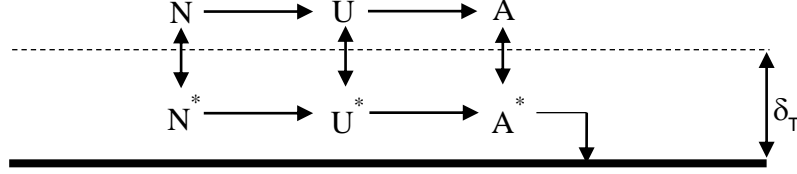


Figure 2: Schéma de réaction de la protéine

A partir de 65°C, la protéine  $\beta$ -lactoglobuline native N devient instable thermiquement, elle est sujette à une réaction chimique du premier ordre produisant une protéine dénaturée U comportant un groupement sulfhydryque qui engendre la polymérisation de cette protéine par une réaction du second ordre donnant ainsi une forme agrégée A de la protéine. Les réactions chimiques ont lieu au cœur de l'écoulement du fluide et dans la couche limite thermique.

Pour les trois formes de la protéine, un transfert de masse, du fluide en écoulement vers la couche limite thermique prend place. Seule la protéine agrégée dans la couche limite thermique adhère à la surface d'échange thermique augmentant ainsi la résistance au transfert de chaleur.

Les équations du bilan de matière, respectivement pour les trois formes de la protéine native, dénaturée et agrégée, sont les suivantes :

$$\frac{\partial C_N}{\partial t} + u \frac{\partial C_N}{\partial x} + v \frac{\partial C_N}{\partial y} = D_N \left[ \frac{\partial^2 C_N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_N}{\partial y^2} \right] - k_{N_0} \exp\left(\frac{-E_N}{RT}\right) C_N \quad (5)$$

$$\frac{\partial C_U}{\partial t} + u \frac{\partial C_U}{\partial x} + v \frac{\partial C_U}{\partial y} = D_U \left[ \frac{\partial^2 C_U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_U}{\partial y^2} \right] + k_{N_0} \exp\left(\frac{-E_N}{RT}\right) C_N - k_{U_0} \exp\left(\frac{-E_U}{RT}\right) C_U^2 \quad (6)$$

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + u \frac{\partial C_A}{\partial x} + v \frac{\partial C_A}{\partial y} = D_A \left[ \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} \right] + k_{U_0} \exp\left(\frac{-E_U}{RT}\right) C_U^2 \quad (7)$$

Avec  $C_N$ ,  $C_U$  et  $C_A$  sont les concentrations de la protéine native, dénaturée et agrégée, respectivement,  $D_i$  sont les coefficients de diffusion des protéines,  $E_i$  les énergies d'activation,  $k_{i_0}$  les vitesses de réactions et  $R$  la constante des gaz parfaits.

Le transfert massique s'effectuant à l'interface entre la couche limite thermique et le fluide en écoulement, dans chacune des trois équations précédentes est rajouté, au second membre, le

terme  $\left[ -\frac{k_{m_i}}{\delta_T} (C_i - C_i^*) \right]$ , où  $k_{m_i}$  sont les coefficients de transfert massique,  $C_i^*$  les

concentrations à l'intérieur de la couche limite thermique et  $\delta_T$  l'épaisseur de la couche limite

thermique. L'adhésion de la protéine agrégée à la paroi est reliée dans l'équation (7) par le

terme  $\frac{k_w}{\delta_T} C_A$ , où  $k_w = 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$  est la constante de réaction chimique à la paroi, ce terme est

soustrait dans le second membre de cette équation.

Les coefficients de transfert massique sont déterminés par l'équation (8), pour chaque forme de la protéine. Les coefficients de diffusion massique sont estimés par l'équation de Wilke-Chang [8].

$$k_{m_i} = \frac{D_i}{\delta} \quad i = N, U, A \quad (8)$$

$$D_i = \frac{1,3 \cdot 10^{-7} \cdot T}{\mu \cdot V_i^{0,6}} \quad i = N, U, A \quad (9)$$

$$V_i = \frac{\pi}{6} N_{AV} d_i^3 \quad i = N, U, A \quad (10)$$

où  $V_i$  représentent les volumes des particules de la protéine,  $d_i$  leurs diamètres et  $N_{AV}$  le nombre d'Avogadro. Les valeurs des différentes constantes utilisées dans cette étude sont regroupées dans le tableau 1.

	$d$ m	$E$ kJ.mol <sup>-1</sup>	$k_0$ s <sup>-1</sup>
Protéine native	9,92.10 <sup>-11</sup>	261	3,37.10 <sup>37</sup>
Protéine dénaturée	9,92.10 <sup>-11</sup>	312	1,36.10 <sup>43</sup>
Protéine agrégée	5.10 <sup>-10</sup>	-	-

Tableau 1: Données cinétiques de la protéine

L'épaisseur de la couche limite hydrodynamique  $\delta$ , est reliée au nombre de Sherwood [7] :

$$\delta = \frac{D_e}{Sh}, \quad Sh = 0,214 \cdot (Re^{0,662} - 3,2) \cdot Sc \quad (11)$$

$$Sc = \frac{\mu}{\rho \cdot D_N} \quad (12)$$

où  $D_e$  est le diamètre équivalent,  $Re$  le nombre de Reynolds et  $Sc$  le nombre de Schmidt. L'épaisseur de la couche limite thermique est calculée par l'équation suivante :

$$Pr^{1/3} = \frac{\delta_T}{\delta} \quad (13)$$

Le nombre de Biot permet le couplage entre les transferts thermique et massique à la paroi, il est calculé par l'équation (14), où  $\beta$  est un coefficient déterminé expérimentalement, il dépend de la géométrie des plaques.

$$\frac{\partial Bi}{\partial t} = \beta \cdot k_w \cdot C_A \quad (14)$$

Finalement, la masse du dépôt en chaque point de la paroi est exprimée comme suit :

$$M(0, y) = \frac{\rho_d \cdot Bi(y) \cdot \lambda_d}{U_0} \quad (15)$$

avec  $\rho_d = 1030 \text{ kg.m}^{-3}$  [5] est la masse volumique du dépôt,  $\lambda_d = 0,5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  sa conductivité thermique et  $U_0$  le coefficient global de transfert thermique du canal propre. La masse moyenne du dépôt sur la surface de la plaque est définie par :

$$\bar{M} = \int M(y) \cdot dy \cdot dz = W \cdot \int M(y) \cdot dy \quad (16)$$

où  $W$  est la largeur de la plaque. En considérant la symétrie de l'écoulement, la masse du dépôt sur la plaque droite est identique à celle de la plaque gauche.

### 2.3. Conditions initiales et aux limites

A l'entrée du canal, la température du fluide  $T_0$  est constante et uniforme, sa concentration en  $\beta$ -lactoglobuline native est de  $5 \text{ kg.m}^{-3}$  et il ne contient pas les autres formes de la protéine, et ce, tout au long de l'opération de pasteurisation qui dure 24000 secondes.

Les parois sont initialement maintenues à une température  $T_1 = 90^\circ\text{C}$ , ensuite la température à la paroi est fonction du nombre de Biot qui représente la résistance au transfert de chaleur du dépôt accumulé à la paroi. La condition implémentée est la suivante :

$$T(0, y) = T(x = e, y) = \frac{T_1}{1 + \text{Bi}(y)} \quad (17)$$

Les concentrations initiales aux parois sont nulles, puis les conditions suivantes sont imposées :

$$C_N = C_U = 0, \quad \frac{\partial C_A}{\partial x} = 0 \quad (18)$$

Les conditions imposées à la sortie du canal sont :

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial C_N}{\partial y} = \frac{\partial C_U}{\partial y} = \frac{\partial C_A}{\partial y} = 0 \quad (19)$$

## 2.4. Procédure numérique

Le système d'équations présenté ci-dessus est un système d'équations aux dérivées partielles. Un code de calcul, en langage Fortran 90, a été réalisé pour simuler le problème et résoudre le système d'équations. Ce code de calcul utilise la méthode des volumes finis avec un schéma en puissance pour la discrétisation des équations aux dérivées partielles, le couplage pression/vitesse est effectué par l'algorithme SIMPLE[9]. Le maillage considéré est constitué de  $40 \times 160$  nœuds sur deux grilles décalées, l'une sur laquelle sont calculées les variables vectorielles (les composantes de la vitesse) et l'autre pour le calcul des variables scalaires (pression, température,...). Le terme de variation temporelle est discrétisé par la méthode explicite avec un pas en temps de 4,8 secondes respectant, ainsi, le critère de convergence. Le système d'équations algébriques obtenu est résolu par la méthode Line-by-line. Elle consiste à utiliser une méthode directe dans une direction spatiale et une méthode itérative dans l'autre direction.

## 3. Résultats

Cette étude ayant pour but de déterminer l'impact de la température d'entrée du lait dans le canal, après validation du code de calcul et du modèle d'encrassement utilisé, des simulations ont été faites pour différentes valeurs de la température du lait à l'entrée du canal.

### 3.1. Validation du modèle d'encrassement

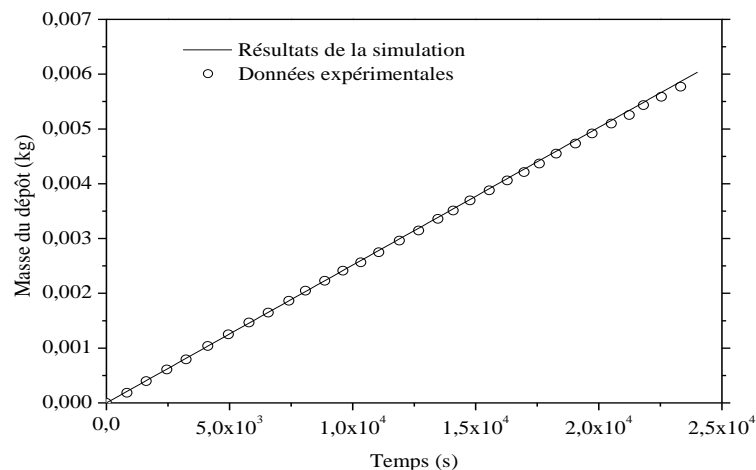


Figure 3 : comparaison des résultats de la simulation aux données expérimentales

Le code de calcul a été validé en comparant les résultats obtenus aux données expérimentales [5] correspondantes au premier canal de l'échangeur de chaleur à plaques, tel que le lait entre dans le canal à 60°C avec un débit volumique de  $0.833 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Les plaques étant maintenues à température constante de 90°C (Température du fluide caloporteur). La figure 3 représente l'évolution de la masse moyenne du dépôt d'encrassement en fonction du temps. La masse du dépôt croît de façon linéaire. L'erreur relative entre les résultats de la simulation et ceux des données expérimentales est de 0,66%.

### 3.2. Evolution de la température de sortie

La figure 4 illustre l'évolution de la température moyenne du lait à la sortie du canal en fonction du temps pour différentes températures à l'entrée du canal.

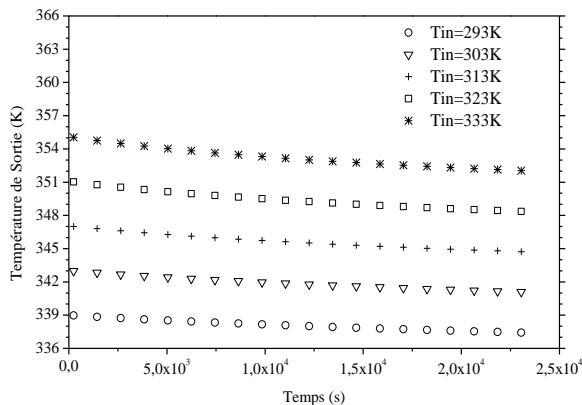


Figure 4 : Evolution de la température du lait à la sortie du canal

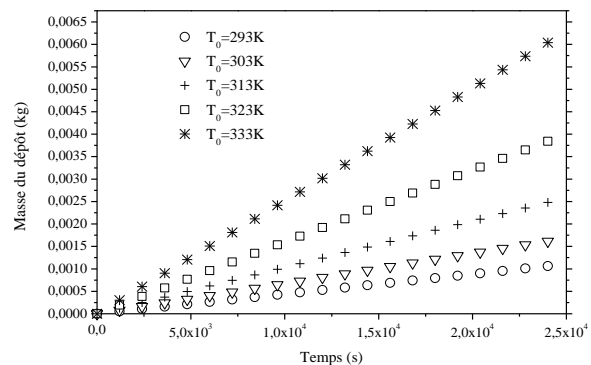


Figure 5: Evolution de la masse du dépôt sur la plaque

Les graphes ont tous la même allure, la température de sortie du canal est décroissante. La chute de température diffère selon la température d'entrée du lait dans le canal, elle varie de 1,58°C pour une température d'entrée de 20°C à 3,06°C pour 60°C. Le tableau suivant mentionne les différentes chutes de température pour chaque configuration.

Température d'entrée (°C)	20	30	40	50	60
Chute de température (°C)	1,58	1,94	2,33	2,72	3,06

Tableau 2: Diminution de la température du lait à la sortie du canal à la fin de l'opération

Ceci peut être expliqué par une augmentation de l'instabilité thermique de la protéine  $\beta$ -lactoglobuline, ce qui revient à une augmentation de la masse du dépôt à la paroi et donc à une diminution des performances thermiques des plaques.

### 3.3. Evolution de la masse du dépôt

La figure 5 regroupe la masse du dépôt obtenue par les simulations pour les différentes valeurs de la température du lait dans le canal. Il est clair que la température d'entrée du lait joue un rôle dans la vitesse d'encrassement des parois solides. Les masses totales obtenues après 24000 secondes de fonctionnement, qui correspond à la moyenne journalière de fonctionnement d'une unité de pasteurisation avant de procéder à un nettoyage de l'équipement, sont regroupées dans le tableau 3. Une température élevée induit à la dénaturation plus rapide de la protéine  $\beta$ -lactoglobuline et, donc à une plus grande quantité de dépôt.

Température d'entrée (°C)	20	30	40	50	60
Masse totale du dépôt (g)	1,06	1,62	2,48	3,84	6,04

Tableau 3: Masse du dépôt d'encrassement après 6,66h de fonctionnement

## 4. Conclusion

Le modèle d'encrassement a été simulé par un code de calcul, résolvant les équations de l'écoulement, de l'énergie et des bilans de matière des concentrations de la  $\beta$ -lactoglobuline dans un canal bidimensionnel plan par la méthode des volumes finis, dans le but d'étudier l'effet de la température du lait à l'entrée du canal sur la masse d'encrassement. Les résultats sont en accord avec les données expérimentales [5], avec une erreur relative de 0,66%. Les simulations ont aussi permis de prédire la quantité et la vitesse du dépôt sur les parois. L'utilisation d'une charge préchauffée engendre un dépôt important réduisant considérablement les performances thermiques de l'échangeur de chaleur. Cependant, pour une charge sans préchauffe l'utilisation d'un plus grand nombre de plaques est nécessaire pour atteindre la température minimale pour la pasteurisation. Il est donc recommandé d'utiliser un échangeur de chaleur à plaques à plusieurs canaux avec des charges moyennement préchauffées ou froides. Cela permet de réduire les arrêts de production nécessaire au nettoyage de l'échangeur de chaleur.

## Références

- [1] F. Delplace, J. C. Leuliet, J.P. Tissier, fouling experiments of plate heat exchangers by whey proteins solutions. *Transaction of the Institution of Chemical Engineers, Part C*, 72 (1994), 163-169.
- [2] P. J. Fryer et al., A statistical model for fouling of a plate heat exchanger by whey protein solution at UHT conditions. *Transaction of the Institution of Chemical Engineers, Part C*, 74 (1996), 189-199.
- [3] I. Toyoda, P. J. Fryer, A computational model for reaction and mass transfer in fouling from whey protein solutions. *Fouling mitigation of industrial heat exchange equipment* (1997), 589-600.
- [4] M. C. Georgiadis, S. Macchietto, Dynamic modelling and simulation of plate heat exchanger under milk fouling. *Chemical Engineering Science*, 55 (2000), 1605-1619.
- [5] S. Jun et V. M. Puri, A 2D dynamic model for fouling performance of plate heat exchanger, *Journal of Food Engineering*, 75 (2006), 364-374.
- [6] P. de Jong et al., Fouling of heat transfer equipment in relation to the denaturation of  $\beta$ -lactoglobulin. *Journal of the Society of Dairy Technology*, 45 (1992), 3-8.
- [7] R. H. Perry, D. Green, *Perry's chemical engineering handbook*, sixth edition, McGraw Hill Inc. (1984).
- [8] P. de Jong, Modelling and optimisation of thermal treatments in the dairy industry. Ponsen and Loojin, NIZO Research Report V341 (p. 165), The Netherlands (1996).
- [9] S.V. Patankar, D. B. Spalding, A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 15 (1972), 1787.