

Etude expérimentale de l'encrassement des échangeurs de chaleur à plaques lors d'une phase de traitement thermique du lait d'une installation industrielle Algérienne

Youcef MAHDI ^{a,b,*}, Samia KEBIRI ^b, Abdelkader MOUHEB ^b, Asmaa GHOBIRINI ^b

^a Université de Médéa, Faculté des Sciences et de la Technologie, Pôle Universitaire Médéa 26000, Algérie.

^b Laboratoire des Phénomènes de Transfert, Faculté de Génie Mécanique et de Génie des Procédés, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene USTHB, Bab-Ezzouar, Alger 16111, Algérie.

mahdiyoussef@yahoo.fr, mouhebka@yahoo.fr, skebiri@usthb.dz, aghobrini@usthb.dz

Résumé : On s'est proposé d'étudier l'encrassement par le lait d'un échangeur de chaleur à plaques de type H7-RC qui compose principalement un stérilisateur industriel du Complexe Laitier d'Alger (COLAITAL) lors de la production du lait stérilisé UHT (Ultra Haute Température). La mise en évidence de cet encrassement est montrée, d'une part, par des suivis de la perte de charge et, d'autre part, par des analyses des différentes eaux de rinçage qui ont confirmées la présence de ce dépôt composé essentiellement de protéines et de sels. Cet encrassement de nature isolante génère des perturbations hydrauliques et thermiques qui affectent la production en raison des arrêts pour nettoyage des équipements affectés. Les coûts annuels des cycles de nettoyage de ce stérilisateur, sans considérer les coûts énergétiques, sont estimés à 170.000 Euros. Une limite de la nécessité d'introduire le cycle de nettoyage a été établie dans cette étude.

Mots clés : Echangeur de chaleur à plaques, Lait, Ecoulement, Perte de charge, Dépôt.

1. Introduction

L'encrassement de part sa diversité, sa complexité et les problèmes économiques qu'il engendre dans les industries pétrochimiques et alimentaires a suscité l'intérêt de beaucoup de chercheurs. Il est défini comme l'accumulation de matières et de substances indésirables sur une surface, et il est considéré comme l'un des problèmes majeurs non résolus dans le domaine des échangeurs de chaleur [1], plus particulièrement dans les industries agro-alimentaires, de point de vue thermo-sensibilité des constituants des produits alimentaires et stabilisation thermique. L'industrie laitière est un excellent exemple et de ce fait, un thème central de la présente étude. Ce problème n'est pas encore maîtrisé, car les mécanismes réactionnelles ne sont pas parfaitement connus; la composition du dépôt est quant à elle relativement connue.

Le lait est un produit générateur d'encrassements lors de sa pasteurisation, de sa stérilisation. Le dépôt formé réduit la section de passage du fluide entraînant une perte de charge supplémentaire, et fait diminuer l'efficacité thermique du système de chauffage car le dépôt est de nature isolante. De plus, des pertes économiques importantes sont dues au pompage et au nettoyage fréquent des installations. Des frais supplémentaires sont notés afin de remplacer les équipements détériorés.

L'objectif de ce travail est d'étudier expérimentalement l'encrassement d'un échangeur de chaleur à plaques lors du traitement thermique du lait en suivant l'évolution des paramètres qui peuvent mettre en évidence l'encrassement.

2. Description du système et méthodes

2.1. Description du système et mécanisme d'encrassement

La stérilisation a lieu dans un ensemble d'échangeurs de chaleur à plaques par chauffage et refroidissement indirect. Elle consiste à un chauffage intense du lait à une température élevée (135 à 140 °C) pendant un temps très court (4 secondes) afin d'éliminer l'action pathologique des bactéries. Une fois le lait chauffé à une température supérieure à 65 °C, la protéine β -lactoglobuline devient instable et se transforme en précurseur de dépôt selon deux mécanismes possibles (Figure 1) [2,3] :

✓ La protéine β -lactoglobuline naturelle (noté N) subit une altération de sa structure (noté D) en dévoilant ses groupements (-SH) et devient ainsi réactive.

✓ Une réaction de polymérisation irréversible donne naissance à des particules insolubles sous forme d'agrégats (amas de matière, noté A).

Les cinétiques sont connues [4]. Un transfert de masse des trois formes de la protéine a lieu entre le fluide et la couche limite. Le dépôt est formé principalement par la protéine agrégée. Il est primordial de connaître les différents paramètres physico-chimiques des différents phénomènes [5-7].

Le deuxième type d'encrassement est celui du phosphate de calcium qui possède une solubilité inverse par rapport à la température (Figure1), due probablement à la dureté trop élevée des eaux de forages employées pour la préparation du lait. Lors du chauffage du lait, les sels sédimentent sous forme cristalline et se déposent sur la paroi [8].

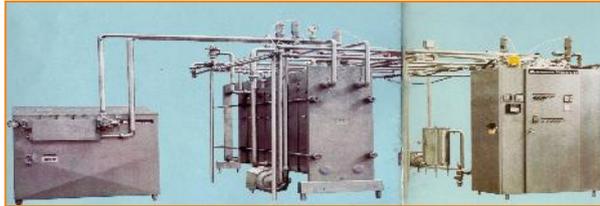
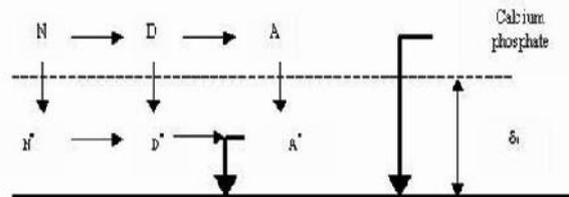


Figure 2. Présentation du stérilisateur de laiterie de Birkhadem Alger.



Mur, surface Dépôt des protéines et des sels
Figure 1: Encrassement des protéines et des sels [9].

2.2. Dispositif expérimentale et cycle de production

Le stérilisateur considéré est celui de laiterie de Birkhadem du Groupe COLAITAL [10], est composé de trois compartiments (préchauffage, stérilisation et pré-refroidissement) spécialisée dans la transformation et la production de divers produits laitiers. L'installation est composée d'un échangeur de chaleur à plaques de la société Alfa Laval, d'une armoire de commande et d'un homogénéisateur représentés dans la Figure 2. Avant la stérilisation, le lait poudre est recombéné. Cette opération consiste à mélanger dans une eau les différents composants du lait à savoir : la poudre de lait spray et la matière grasse (MGLA).

3. Résultats et discussions

3.1. Analyses du lait et des eaux employées

Des analyses quotidiennes s'effectuent pour vérifier la conformité du mélange eau poudre ou du lait cru avant et après toute stérilisation, elles sont représentées sur le Tableau 1 [10]:

Tableau 1. Exemple d'analyses physico-chimiques du mélange (eau-poudre de lait) avant et après stérilisation.

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

En second lieu des analyses microbiologiques, par la méthode du phosphatase alcaline dans les produits laitiers, sont effectuées pour vérifier si la stérilisation est suffisante ou pas [11].

Pour les eaux employées dans la production, des prélèvements sont effectués, en premier lieu, afin de contrôler sa qualité, à citer l'eau de ville, de forage et celle de pré-stérilisation (Tableau 2). Il est à noter que les eaux employées, en particulier pour recombéné le lait poudre, sont considérées comme très dure par rapport aux normes requises soit 180 mg de CaCO_3 par litre (TH égal à 18°F) [12]. En second lieu, des analyses microbiologiques sont effectuées pour vérifier l'absence de germes dans les eaux employées.

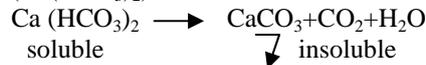
Tableau 2. Analyses physico-chimiques de l'eau.

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

3.2. Analyses des eaux de rinçage

En raison de la difficulté d'ouvrir l'échangeur, nous avons opté, en premier lieu, pour une mise en évidence qualitatif indirecte de l'encrassement en analysant les eaux de rinçage après stérilisation. Les analyses des eaux de rinçage du stérilisateur dont données dans le Tableau 3.

Nous pouvons confirmer que les composés du dépôt enlevés par ces eaux contiennent en plus des composants du lait (MG et ESD) des sels minéraux (titres alcalimétriques et pH) dues à la dureté trop élevée des eaux employées. En particulier, Le tartre CaCO_3 (Titre TH) résultant d'une eau dure portée à ébullition contenant du bicarbonate de calcium ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) soluble. Cette réaction se traduit par [12] :



Nous préconisons ainsi une déminéralisation partielle des eaux employées.

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

Acidité (°D)	MG (g/l)	pH	T (°C)	ESD (g/l)	TA (°F)	TH (°F)	TAC (°F)	Cl ⁻ (mg Cl/l eau)	Cl ⁻ (mg NaCl/l eau)
3	0.3	6,18	32	0,7	0	13,7	13	192	316

3.3. Perte de pression lors d'un cycle de production

Les prises de pression, représentées sur la Figure 3, ont été relevées par lecture sur des manomètres placés à l'entrée et à la sortie de chaque section de l'échangeur.

✓ P=Ps-Psl: perte de pression au niveau du compartiment de préchauffage et de pré-refroidissement.

✓ P=Pe-Ps: perte de pression au niveau du compartiment stérilisation.

✓ P=Pe-Psl: perte de pression au niveau de tout l'échangeur.

L'évolution de la perte de pression au niveau du compartiment de préchauffage et de pré-refroidissement, est constante autour de 2bars due aux pertes de pression conventionnelles, ce qui présage une faible présence de dépôt. Le lait ne subit pas un changement brusque de température. Par contre, au niveau du compartiment stérilisation, les allures sont croissantes, traduisant une formation du dépôt suite à la dénaturation et l'agrégation des protéines et la sursaturation des sels. Il est à noter, que la même allure croissante est observée au niveau de tout l'échangeur, ce qui reflète la formation du dépôt. La présence de pics au niveau des courbes est due au passage du lait dans l'homogénéisateur avant sa stérilisation. Nous constatons aussi, une présence de paliers représentant l'arrêt instantané de la production par manque de vapeur d'eau. A la lumière des résultats obtenus, il est possible de conclure que l'encrassement est repéré dans le compartiment stérilisation.

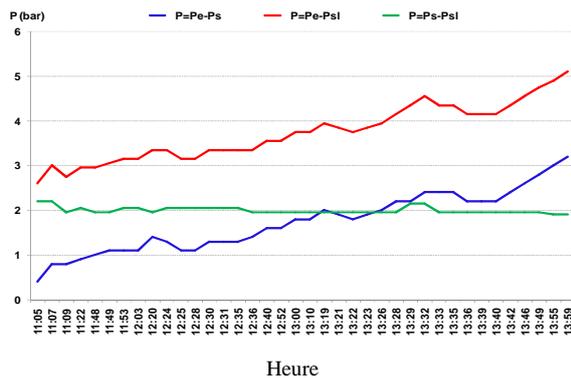


Figure 3. Exemple de perte de pression dans les différents compartiments pour une journée de production (heure).

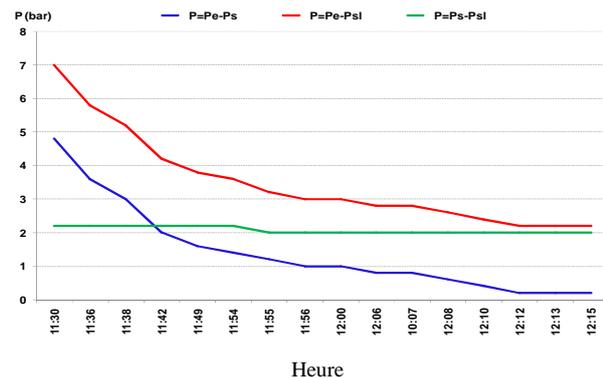


Figure 4. Exemple de perte de pression dans les différents compartiments pour un cycle de nettoyage (heure).

3.4. Perte de pression lors d'un cycle de nettoyage

La perte de pression, représentée sur la Figure 4, enregistrée au niveau du compartiment de préchauffage et de pré-refroidissement, présente relativement la même valeur, autour de 2 bars, que celle relevée lors du cycle de production, traduisant ainsi, l'absence de dépôt. Par contre, au niveau du compartiment stérilisation, une chute brutale de cette dernière est observée, reflétant l'action de la solution d'hydroxyde de sodium sur le dépôt, puis,

la courbe se stabilise durant les autres phases hydroxyde de sodium. Le passage de la solution de l'acide nitrique entraîne également, une chute de pression jusqu'à atteindre une valeur presque nulle, expliquant l'élimination du dépôt. L'allure de la perte de pression observée au niveau de tout l'échangeur, représente la même allure que celle examinée dans le compartiment stérilisation, à savoir que la dernière phase de nettoyage correspond à la perte de pression enregistrée dans le compartiment propre. A cet effet, nous pouvons considérer l'échangeur comme nettoyé. En conclusion, ce résultat confirme la prédominance de la présence du dépôt dans le compartiment stérilisation de l'échangeur car la perte de pression est relativement faible lors du nettoyage. A ce propos, ces aboutissements, traduisent que le dépôt riche en protéines, formé dans la zone de récupération d'énergie, est éliminé par la solution d'hydroxyde de sodium. Par contre, ce détergent n'a aucun effet significatif sur le dépôt riche en minéraux, la solution acide provoque son élimination.

3.5. Degré d'encrassement d'un échangeur de chaleur

Le degré d'encrassement (χ), représenté sur la Figure 5, est défini par la différence des diamètres hydrauliques de l'échangeur propre et encrassé rapporté au diamètre hydraulique initial:

$$\chi = \frac{D_0 - D_e}{D_0} \quad (1)$$

Ainsi :

- ✓ $\chi = 0$ lorsque l'échangeur est propre.
- ✓ $\chi = 1$ lorsque l'échangeur est encrassé.

Il est possible d'établir une relation entre la perte de pression et les diamètres hydrauliques avant et après encrassement selon [13]:

$$\chi = 1 - \sqrt[3]{\frac{\Delta P_0}{\Delta P}} \quad (2)$$

L'évolution du degré d'encrassement présente une croissance suivant une allure asymptotique, à remarquer que sa valeur initiale n'est jamais nulle ce qui s'explique par le passage du lait entre les plaques. Plusieurs mois d'observation nous ont permis de constater également, que la valeur 0.6 du degré d'encrassement représente la limite maximale à partir de laquelle il est nécessaire de procéder au nettoyage de l'échangeur.

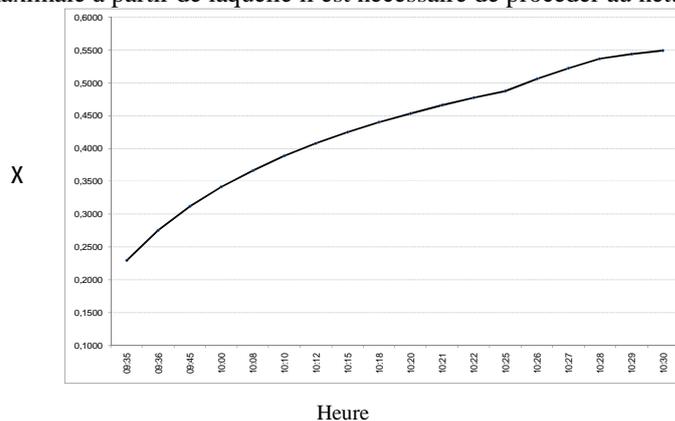


Figure 5. Exemple de l'évolution du degré d'encrassement pour un cycle de production (heure).

3.6. Estimation du coût de l'encrassement

Il existe peu de données permettant une estimation précise du coût de l'encrassement. Cette estimation de coût ne considère pas la consommation supplémentaire d'énergie, les pertes dues à l'arrêt de l'installation ainsi que les frais de maintenance. Elle concerne uniquement les coûts du nettoyage.

Coûts liés à la perte de la poudre du lait en dépôt. Le dépôt constitue une perte en matière première et cela a été confirmé lors du calcul de l'extrait sec dégressif (E.S.D) avant et après stérilisation. La perte en extrait sec dégressif (E.S.D) est évaluée à 1g/l. Les pertes économiques totales annuelles engendrées par l'encrassement durant cette étude serait, par conséquent d'environ dix-huit millions de dinars Algériens (≈ 181.000 euros) par

stérilisateur. Cette estimation connaîtra une augmentation, si les coûts dus à l'apport d'énergie supplémentaire et au frais de démontage et de montage de l'installation étaient pris en considération.

4. Conclusion

On s'est intéressé dans ce travail à mettre en évidence l'encrassement d'un échangeur de chaleur à plaques de l'unité de production du lait stérilisé UHT du Complexe Laitier d'Alger (COLAITAL) et ce en considérant, d'une part, le suivi de la perte de charge et les différentes analyses des eaux de rinçages d'autre part. Les résultats montrent une perte de pression qui confirme la présence d'un dépôt contenant tous les composants du lait ainsi que les sels minéraux. Les analyses des eaux de rinçage montrent également cette tendance. Le dépôt encrassant nécessite des cycles de nettoyage quotidiens, à partir d'une valeur de 0.6 du degré d'encrassement du stérilisateur, avec des coûts supplémentaires estimés à plus de 18 millions de DA/an. Ces estimations excluent les coûts énergétiques.

Nomenclature:

Symbole

A	Protéine Agrégée
D	Protéine dénaturée
D ₀	Diamètre hydraulique initial, <i>m</i>
D _e	Diamètre hydraulique de l'échangeur encrassé, <i>m</i>
ESD	Extrait Sec Dégressif, <i>g/l</i>
MG	Matière grasse, <i>g/l</i>
N	Protéine Native
T	Température, °C
TA	Titre Alcalimétrique, °F, avec TA = [OH ⁻] + $\frac{1}{2}$ [CO ₃ ²⁻]

TAC Titre Alcalimétrique Complet, °F, TAC= [OH⁻] + [CO₃²⁻]+[HCO₃⁻]

TH Titre Hydrométrique, °F, teneur en calcium et en magnésium

Symboles grecs :

	Degré d'encrassement
ΔP ₀	Perte de charge d'un échangeur à plaques propre, <i>bar</i>
ΔP	Perte de charge d'un échangeur à plaques encrassé, <i>bar</i>
δ ₁	Epaisseur de la couche limite dynamique, <i>m</i>

Références

- [1] J. Taborek, T. Aokim, R.B. Ritter, J.W. Palen et J.G. Kundsén, Fouling the major unresolved problem in heat transfer, *Chemical Engineering Proceeding*, (68) N 2, Pages 59–67, 1972.
- [2] M. Lalande, J.P. Tissier et G. Corrieu, Fouling of a Plate Exchanger Used in Ultra-High-Temperature Sterilisation of Milk, *Journal Dairy Researches*, (51), Pages 557-568, 1984.
- [3] M. Lalande, J.P. Tissier et G. Corrieu, Fouling of Heat Transfer Surfaces Related to -Lactoglobulin Denaturation during Heat processing of Milk, *Biotechnology Progress*, (1), Pages 131-139, 1985.
- [4] T.J.M. Jeurink, Fouling of Milk with Various Calcium Concentrations, *Presented at Fouling and Cleaning in Food Processing*, Jesus College, Univ. Cambridge, Cambridge, UK, 1994.
- [5] M. Lalande et F. Reno, Fouling by Milk and Dairy Product and Cleaning of Heat Exchange Surfaces In Fouling Science and Technology, *L. F. Melo, T. R. Bott et C. A. Bernardo Edition.*, NATO ASI Series E, Kluwer, Amsterdam, Netherlands, (145) Pages 557-573, 1984.
- [6] J. Vissier et T.J.M. Jeurruink, Fouling of Heat Exchangers in the Dairy Industry, *Experimental Thermal Fluid Sciences*, (14) Pages 407-424, 1997.
- [7] F. Delaplace, J.C. Leulliet et J.P. Tissier, Fouling Experiments of a Plate Heat Exchanger by Whey Protein Solutions, *Trans IChemE*, 72(C) Pages 163-169, 1994.
- [8] T. Hagglund, New estimation techniques for adaptative control, *PhD Thesis*, Department of Automatic Control, Lund University, Lund, Sweden, 1983.
- [9] Y. Mahdi, L. Oufer, Simulation numérique de l'encrassement des échangeurs de chaleur à plaque par le lait lors d'une phase de pasteurisation, *VIIème Colloque Interuniversitaire Franco-québécois sur la Thermique des Systèmes* 23-25 mai, Saint-Malo France, 2005.
- [10] Manuel technique de la laiterie de Birkhadem du Groupe COLAITAL de l'installation du stérilisateur, *STERITHERM Le système UHT le plus économique sur le marché*, 2010.
- [11] Y. Mahdi, Simulation et modélisation du phénomène d'encrassement par le lait dans un échangeur de chaleur, *Mémoire de Doctorat*, USTHB, FGMGP, 2009.
- [12] C.L. Vigola, Science et technologie du lait - transformation du lait, Québec, *Presses internationales polytechnique scientifique*, Ecole polytechnique de Montréal, 2002.
- [13] N. Kebiri, Encrassement d'un échangeur de chaleur lors de la stérilisation du lait, *Mémoire de Magistère*, USTHB, FGMGP, 2010.