

## Évaluation d'un chauffe-fluide par induction magnétique pour la pasteurisation du lait

R Martel<sup>1</sup>, Y Pouliot<sup>1</sup>, A Charette<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université Laval, centre de recherche STELA, Sainte-Foy, Qué, Canada, G1K 7P4

<sup>2</sup> Laboratoire des technologies électrochimiques et électrotechnologies (LTÉE) d'Hydro-Québec  
Shawinigan, Qué, Canada, G9N 7N5

(Reçu le 10 juin 1991; accepté le 20 février 1992)

**Résumé** — Le chauffage par induction magnétique repose sur le principe suivant : un courant alternatif peut induire, dans un corps métallique, des courants électriques qui, par effet Joule, l'échauffent en le parcourant. Un chauffe-fluide à induction magnétique a été adapté pour le remplacement de la section de chauffage d'un pasteurisateur à plaques conventionnel. En pratique, le fluide à chauffer circulait à l'intérieur d'un tube constituant le bobinage secondaire d'un transformateur, ayant un enroulement primaire de fils conducteurs d'électricité. Le secondaire était donc constitué d'un tube conducteur enroulé en spires court-circuitées les unes aux autres. Le prototype à l'essai possédait une puissance maximale de 19 kW sous tension primaire de 600 V à une fréquence de 60 Hz et le secondaire était constitué d'un tube d'acier inoxydable (SS 304) de 10,75 mm de diamètre interne enroulé sur 24 spires. Typiquement, l'appareil permettait la pasteurisation de 800 l de lait/h, utilisant une puissance moyenne de 12 kW. Des essais de mise en régime et de pasteurisation sur une longue période ont été effectués afin d'évaluer les performances du chauffe-fluide. Les résultats indiquent que cette technologie permet une régulation rapide et précise des températures et que l'application d'un champ magnétique n'induit pas d'encrassement supplémentaire de l'échangeur de chaleur.

**pasteurisation / chauffage / lait / induction / électricité**

**Summary** — **Testing of a magnetic induction fluid heater for milk pasteurisation.** *Heating by magnetic induction operates on the principle that an alternate current induces an electric current in a metallic body, and that the metallic body is heated by the Joule effect. A plate pasteurizer was modified to replace the conventional heating section with a magnetic induction fluid heater. The secondary coil of the transformer consisted of a wound tube in short circuit through which the heating fluid was circulated, with electrical wires forming the primary coil of the transformer. The secondary coil was made of stainless steel tube (SS 304) 10.75 mm in internal diameter and with 24 turns. The prototype had a maximum power of 19 kW at 600 V, 60 Hz, and it permitted the pasteurization of 800 liters per hour, using an average power of 12 kW. Trials on warming up procedure and pasteurization over a long period were carried out in order to evaluate the heating system performance. The results showed that this technology could effect a rapid and precise temperature control and that the application of a magnetic field did not cause any more fouling in the heating section than that resulting from conventional heating.*

**pasteurization / heating / milk / induction / electricity**

## INTRODUCTION

Le chauffage du lait impliqué dans le procédé de pasteurisation est traditionnellement effectué dans un système d'échangeurs à plaques. La chaleur ainsi transmise par conduction indirecte au lait est générée, soit par la vapeur, soit par l'eau chaude. Ce dispositif nécessite donc la production de vapeur dont l'ensemble des équipements (chaudières) requiert un entretien régulier en plus d'occuper une superficie appréciable dans une usine laitière.

Depuis quelques années, l'utilisation d'électrotechnologies offre à l'industrie laitière la possibilité de substituer l'électricité à la vapeur pour certaines opérations unitaires, dont le chauffage des fluides. Par exemple, la stérilisation ultrahaute température (UHT) du lait peut être effectuée par rayonnement infrarouge (système Actini, France); il s'agit d'un système tubulaire, où l'acier inoxydable conduit au lait la chaleur émise par une résistance d'émission infrarouge à travers un tube de quartz. Une autre application des électrotechnologies consiste à chauffer un échangeur tubulaire par résistance électrique; un courant électrique est appliqué directement à la tubulure d'acier inoxydable qui agit alors comme résistance et dégage la chaleur nécessaire au chauffage du lait. Il est à noter qu'une partie du courant appliqué est transférée au lait. Une technologie apparentée à cette dernière fait intervenir directement la résistance électrique du liquide, au moyen de 2 électrodes sous tension placées dans une colonne de chauffage (système Ohmic, APV Crepaco); ce procédé, bien que disponible commercialement, n'a pas encore été appliqué au chauffage du lait. On peut, par ailleurs, appréhender un encrassement important des électrodes sous l'effet du champ électrique.

Le chauffage par induction magnétique repose sur le principe suivant : un courant

alternatif, par la création d'un champ magnétique, peut induire dans un corps métallique un courant électrique qui, par effet Joule, l'échauffe en le parcourant. Le corps métallique alors échauffé transmet sa chaleur au liquide par conduction. Les performances électriques d'un système à induction dépendent d'une part, des propriétés électriques du matériau conducteur et d'autre part, des caractéristiques électriques de l'inducteur (Orfeuil, 1987). L'induction magnétique constitue une technologie dont l'efficacité énergétique repose sur 3 propriétés :

- la chaleur est produite directement dans le corps à chauffer;
- le système possède une très faible inertie thermique;
- une densité de puissance élevée peut être obtenue.

Les avantages de cette technologie sont multiples : bon rendement énergétique ( $\geq 90\%$ ), haute densité de puissance ( $\geq 5\,000\text{ kW/m}^2$ ), mise en route et arrêt instantanés, constante de temps thermique et déperditions thermiques faibles, distribution uniforme de la puissance appliquée à toute la surface de chauffage (Séguin et Langhame, 1987). Les applications industrielles connues sont nombreuses dans le domaine de la métallurgie pour la fonte des métaux, ou dans divers autres domaines, pour le chauffage de corps métalliques.

La société Hydro-Québec est actuellement propriétaire d'un brevet canadien (Consommation et Corporation Canada, 1986 - n° 1 253 556) pour la conception d'un «*chauffe-fluide comprenant un noyau magnétique non conducteur ayant un enroulement primaire de fils conducteurs d'électricité*». Selon les revendications de cette invention, le fluide à chauffer circule à l'intérieur du manchon secondaire d'un transformateur, ayant un enroulement primaire de fils conducteurs d'électricité

(fig 1). Le secondaire est donc constitué d'un tube conducteur enroulé en spires court-circuitées les unes aux autres. L'enroulement primaire est reliée à une source de tension au moyen d'un gradateur. Ce concept de chauffe-fluide à induction magnétique a été appliqué pour la construction d'un prototype pouvant servir à la pasteurisation du lait.

La présente étude a été menée dans le but d'évaluer les performances de ce prototype pour le remplacement de la section chauffage d'un pasteurisateur à plaques.

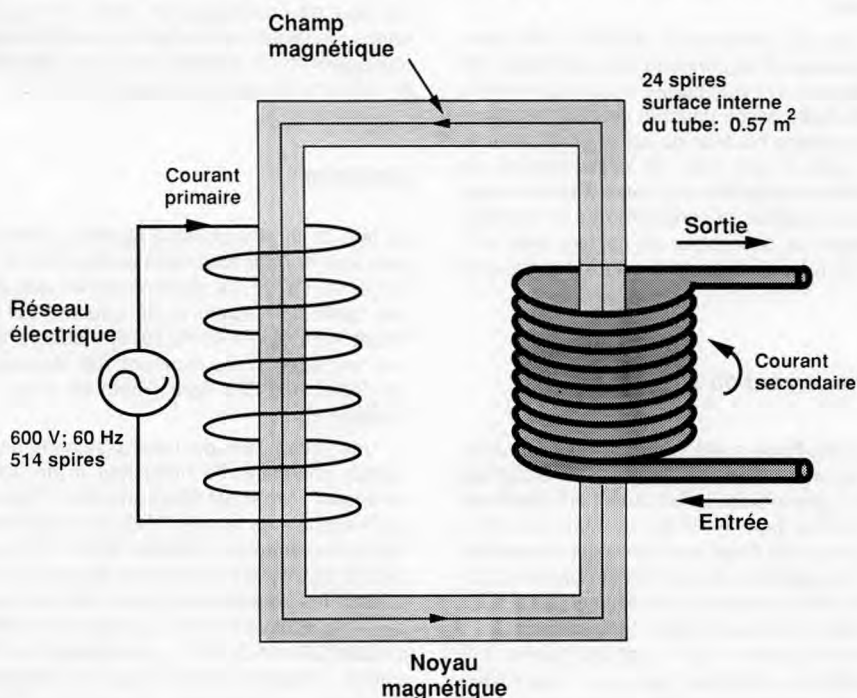
## MATÉRIEL ET MÉTHODES

Un banc d'essai a été constitué à partir d'un pasteurisateur à plaques d'une capacité maximale de 800 l/h (modèle A3, APV Crepaco, Chi-

cago, IL USA). Des essais témoins de mise en marche du pasteurisateur ont été effectués avec l'eau chaude comme source de chaleur et par la suite à l'aide de l'inducteur. Par la suite, un essai de pasteurisation en continu sur 25 h a été conduit en vue de simuler une durée d'utilisation industrielle.

### Caractéristiques du chauffe-fluide à induction

Le prototype conçu pour cette étude a été calibré de façon à fournir une puissance adéquate pour un différentiel de température de 10–15 °C à 800 l/h. Ainsi la puissance électrique disponible était de 19 kW sous une tension primaire de 600 V (monophasé) et un courant de 31,7 A à fréquence industrielle (60 Hz pour l'Amérique du Nord). Le noyau magnétique constitué d'acier (Grain oriented silicon steel, Arnold Engineering CO n° AA-578) portait une bobine de



**Fig 1.** Principe de fonctionnement du chauffe-fluide à induction magnétique.  
Principle of the magnetic induction fluid-heater.

514 tours de fil électrique carré de 28 mm<sup>2</sup> de section, soit 5,3 x 5,3 mm (fil # 4 AWG avec vernis) constituant le primaire. Le secondaire était constitué d'un tube d'acier inoxydable SS304 de 10,75 mm de diamètre interne enroulé sur 24 spires, pour une surface totale d'échange thermique de 0,57 m<sup>2</sup>. La vitesse moyenne du liquide a été calculée afin d'assurer un régime turbulent à l'aide de la relation suivante :

$$Re = \bar{v} D/\nu$$

où *Re* est le nombre de Reynolds (38 200),  $\bar{v}$  est la vitesse moyenne du liquide (2,45 m/s), *D* est le diamètre interne du tube (10,75 · 10<sup>-3</sup> m) et  $\nu$  est la viscosité cinématique (0,69 · 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup> · s<sup>-1</sup>) (Loncin, 1976). Le différentiel moyen de température entre l'échangeur et le lait a été ajusté pour une température de 3–6 °C. La régulation de température (± 0,1 °C) a été assurée par un contrôleur-programmeur Eurotherm modèle 818 (Eurotherm Worthing, England) dont la régulation était assurée par un algorithme de type PID (Proportionnel, Intégral, Différentiel).

En ce qui concerne la sécurité d'utilisation, l'électronique et le panneau de commande ont été disposés dans un boîtier et l'alimentation du chauffe-fluide passe dans un conduit métallique à une certaine hauteur du sol et sont correctement isolés à leur point de raccordement. Un dispositif de détection des fuites à la terre augmente la sécurité de l'ensemble de l'installation électrique. Le susceptible en contact avec le liquide et le restant de la tubulure est mis à la terre.

### **Raccordement du susceptible**

Le chauffe-fluide a été raccordé au pasteurisateur en dérivation de la section chauffage (fig 2). Typiquement, le lait provenant de la section préchauffage à 62–63 °C était chauffé à 74 °C pour être dirigé vers la section de récupération. La perte de charge causée par le raccordement du susceptible a été estimée à 130 kPa. Des thermocouples de type J (fer-constantan) à une incertitude de ± 0,5 °C ont été insérés à divers points du montage (fig 2) pour suivre l'évolution des températures des fluides dans les diverses sections du système. La température à

la sortie de la section de chambrage a été ainsi vérifiée par le thermomètre relié au système pneumatique de la valve de by-pass à ± 0,5 °C près. Un système d'acquisition de données a été utilisé pour le stockage des valeurs de températures lues par les thermocouples.

Le barème de pasteurisation minimal a été de 72 °C - 16 s; cependant la valve de by-pass a été ajustée à 73 °C par mesure de sécurité. La durée de chambrage a été vérifiée à l'aide d'un chronomètre relié à un conductimètre et d'une solution saline. La mesure de la durée de chambrage d'un pasteurisateur s'effectue en plaçant un conductimètre à l'entrée et un autre à la sortie du tube de chambrage. La procédure consiste à faire circuler de l'eau dans le système de pasteurisation et à introduire une saumure une fois le système à l'équilibre. Lorsque la saumure entre dans la section de chambrage, le conductimètre à l'entrée de la section de chambrage active le chronomètre et le conductimètre à la sortie arrête la mesure du temps. Il est alors possible d'ajuster la durée de chambrage en modifiant, dans un premier temps, la longueur du tube de chambrage et, dans un deuxième temps, en faisant un réglage fin du débit du pasteurisateur sans modifier de façon appréciable le débit final du système de pasteurisation.

### **Analyses**

Le test de la phosphatase alcaline a été utilisé pour vérifier l'efficacité de la pasteurisation (Murthy *et al*, 1979). Le dénombrement des bactéries de la flore totale a été effectué sur Plate Count Agar (Clark *et al*, 1978) incubé à 37 °C. Les bactéries coliformes ont été dénombrées sur Violet Red Bile Agar (Hartman *et al*, 1978) incubé à 20 °C.

Une estimation de l'encrassement dans la section chauffage de l'inducteur a été obtenue en dosant l'azote par Micro-Kjeldahl (Fédération internationale de laiterie, 1986) et le calcium par absorption atomique (Brooks *et al*, 1970); après rinçage et vidange du système de pasteurisation à l'eau, les constituants étaient mis en solution par la recirculation d'une solution de NaOH 2% pendant 30 min à 50 °C. L'encrassement a été estimé indépendamment pour la surface de chauffage de l'inducteur et pour la surface de chambrage.

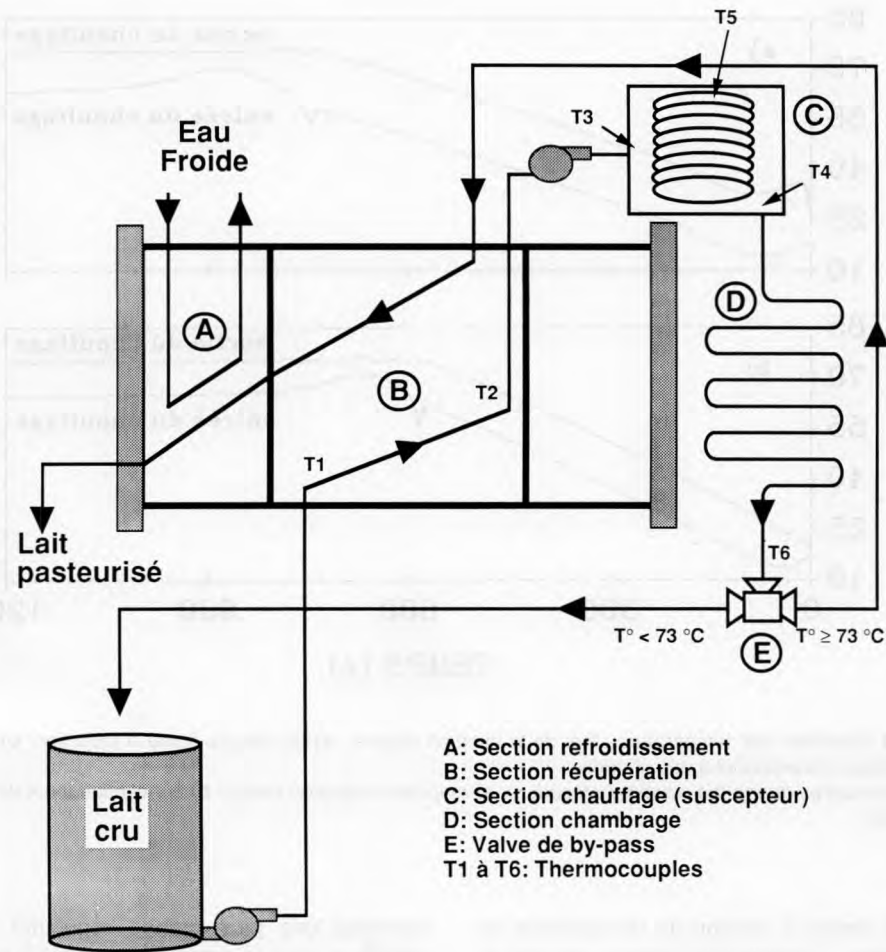


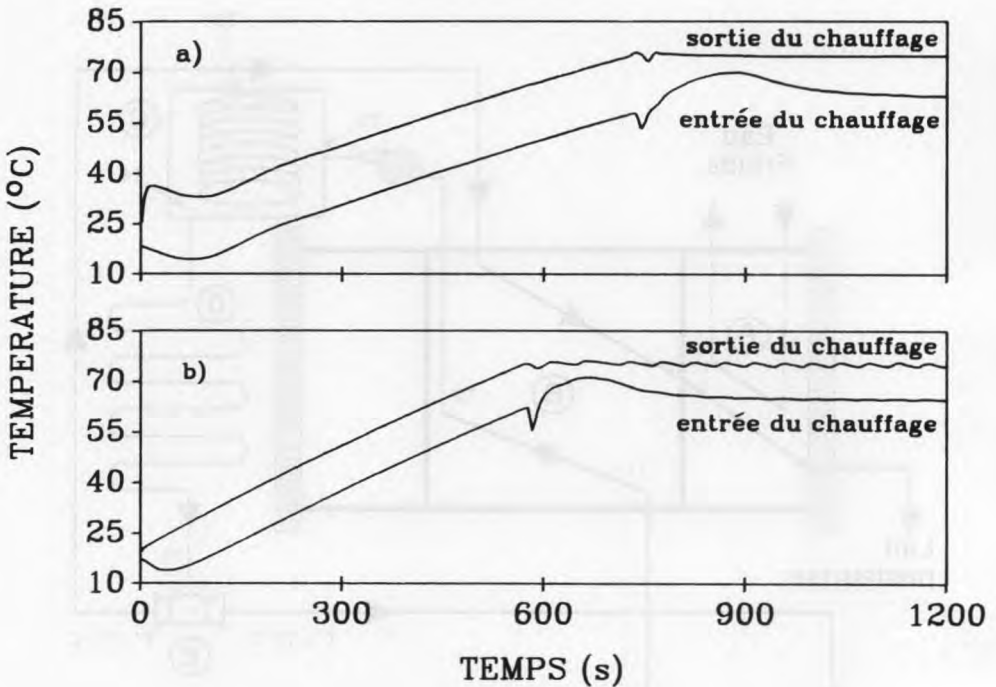
Fig 2. Raccordement du chauffe-fluide à l'unité de pasteurisation.  
 Installation of the fluid-heater for pasteurization.

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

### Courbes de température

La figure 3 montre les températures obtenues à l'entrée et à la sortie de la section chauffage du système de pasteurisation

lors de la mise en régime. La figure 3a a été obtenue en utilisant l'inducteur magnétique et la figure 3b en utilisant le chauffage à eau chaude obtenue par une source de vapeur. Les 2 courbes de température à l'entrée des systèmes de chauffage montrent, par une baisse subite et une augmentation de température, le moment auquel la valve de by-pass ouvre



**Fig 3.** Évolution des températures lors de la mise en régime : **a)** du chauffe-fluide à induction, **b)** du système conventionnel à eau chaude.

*Temperatures during the warming procedure: a) magnetic induction heater; b) conventional hot water system.*

pour mettre la section de récupération en fonction. L'information retenue de ces figures est que le système de chauffage à induction magnétique requiert un peu plus de temps pour devenir opérationnel, soit 12–15 min, au lieu de 10 pour le système à eau chaude. Ce délai est inversement proportionnel à la puissance de chauffage installée et peut être réduit en augmentant cette dernière. Cependant, ce délai de mise en régime est sans importance en regard de la durée d'exploitation de ce système.

Les courbes de température à la sortie des systèmes de chauffage après la mise en marche du système de récupération

montrent une plus grande régularité du chauffage pour le système à induction magnétique, la variation de la température est de  $\pm 0,1$  °C. Pour le système à eau chaude, des oscillations observées d'environ  $\pm 1$  °C, pour la température de sortie du chauffage indiquent que le temps de réponse du système de régulation pour l'eau chaude est relativement long comparativement au chauffage par induction magnétique.

La figure 4 montre les températures obtenues à l'entrée et à la sortie du système de chauffage par induction magnétique pour l'essai de pasteurisation sur une période continue de 25 h. De plus, un ther-

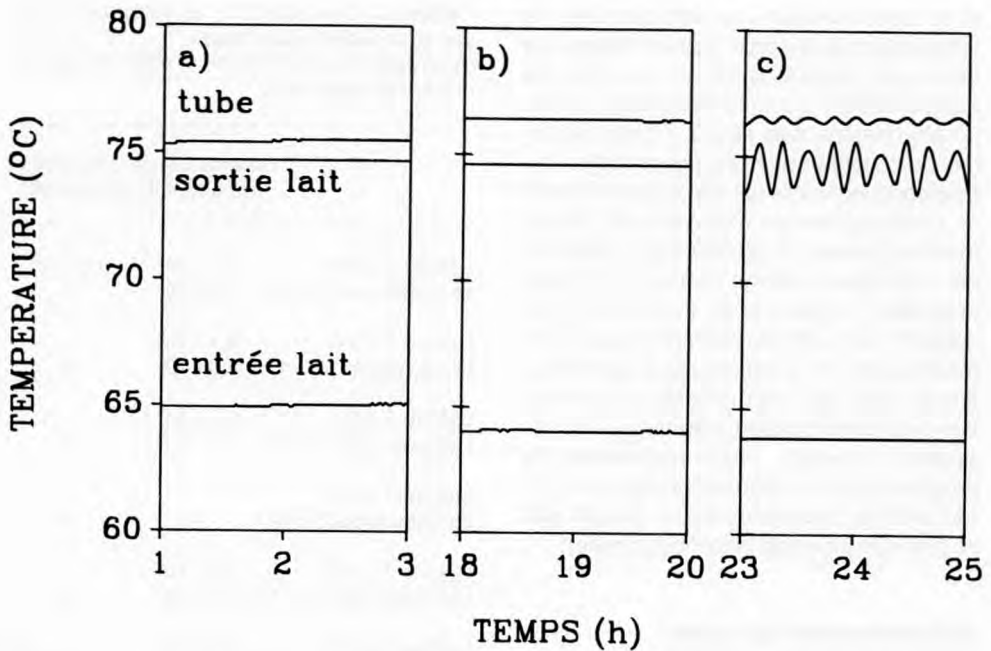


Fig 4. Évolution des températures en cours de chauffage prolongé utilisant le chauffe-fluide à induction : a) début du traitement, b) en cours de traitement, c) fin de traitement.

Temperatures during extended heating using a magnetic induction heater: a) at the beginning, b) mid- and c) end of treatment.

mocouple situé à la surface externe du tube (suscepteur), a servi d'indicateur d'encrassement en montrant la différence de température entre l'extérieur du tube et le produit chauffé. Les évolutions des températures ont été examinées en début de traitement (fig 4a entre la 1<sup>re</sup> et la 3<sup>e</sup> h) et en cours de traitement (fig 4b entre la 18<sup>e</sup> et la 20<sup>e</sup> h) et à la fin du traitement (fig 4c entre la 23<sup>e</sup> et la 25<sup>e</sup> h).

La différence de température entre le milieu chauffé et la surface du tube a été d'environ 0,7 °C au début de la pasteurisation et d'environ 1,7 °C vers la fin de la pasteurisation. Si la surface interne du tube avait été très encrassée, une augmentation de température beaucoup plus importante aurait été notée, du fait que le

régulateur du système aurait augmenté la chaleur de la tubulure pour contrebalancer le mauvais transfert de chaleur.

Dans une usine laitière, il est d'usage d'effectuer un mélange constant du lait cru à l'intérieur des silos d'entreposage, pour éviter l'écémage et ainsi s'assurer d'une certaine uniformité de la matière grasse laitière. Compte tenu que le lait utilisé pour l'expérimentation provenait d'un camion citerne, sans équipement de mélange mécanique, il s'est produit un phénomène naturel d'écémage. La figure 4c montre le profil de température vers la fin de l'expérience. Des variations importantes de demande de puissance ont été notées se traduisant par des variations de températures de 3-4 °C à la sortie du chauffage. Même

si de telles variations se sont produites, la température à la sortie du chambrage est demeurée au-dessus de la consigne de pasteurisation. Quoique l'écémage ait été un phénomène non désiré, il nous a permis de constater que la programmation initiale conçue pour le lait ne convenait pas à un produit contenant alors plus de 16% de matière grasse. Ce phénomène s'explique par le fait que la crème n'a pas les mêmes propriétés physiques et thermiques que celles du lait à 3% de matière grasse. Une modification de la boucle de programmation du régulateur de l'inducteur ou une option de programmation automatique du régulateur révisant automatiquement la programmation à intervalles réguliers aurait évité ce problème (qui ne devrait pas se produire en exploitation industrielle).

### Dénombrements bactériens

Le tableau I résume les résultats des dénombrements de germes totaux et de coliformes. La moyenne des germes totaux pour le lait cru est de  $1,04 \cdot 10^4$  germes/g et pour le lait pasteurisé de  $2,15 \cdot 10^3$  germes/g. Le traitement thermique détruit environ 80% de la flore totale. En ce qui concerne les comptes des coliformes, la pasteurisation les a complètement éliminés tout au long de l'essai.

### Phosphatase alcaline

Il est d'usage en industrie laitière d'effectuer un test de présence de phosphatase alcaline dans le lait pasteurisé. Cette enzyme a une courbe de destruction thermique légèrement supérieure à la courbe de destruction des microorganismes pathogènes du lait, de telle sorte que lorsque la phosphatase alcaline n'est plus détectable, les conditions de pasteurisation sont

**Tableau I.** Germes totaux et coliformes à diverses périodes durant l'essai.

*Total bacteria and coliforms at different periods during the experiment.*

	Germes totaux (nb bact/ml)	Coliformes (nb bact/ml)
Lait cru T = 0 h	$3,1 \cdot 10^4$	$9,0 \cdot 10^2$
Lait pasteurisé T = 0 h	$5,8 \cdot 10^3$	0
Lait cru T = 4 h	$4,1 \cdot 10^3$	—
Lait pasteurisé T = 4 h	$6,5 \cdot 10^2$	0
Lait cru T = 8 h	$3,0 \cdot 10^3$	—
Lait pasteurisé T = 8 h	$2,3 \cdot 10^3$	0
Lait cru T = 12 h	—	—
Lait pasteurisé T = 12 h	—	0
Lait cru T = 16 h	$1,9 \cdot 10^3$	—
Lait pasteurisé T = 16 h	$1,6 \cdot 10^3$	0
Lait cru T = 20 h	$3,4 \cdot 10^3$	—
Lait pasteurisé T = 20 h	$9,3 \cdot 10^2$	0
Lait cru T = 24 h	$1,9 \cdot 10^4$	—
Lait pasteurisé T = 24 h	$1,6 \cdot 10^3$	0

adéquates pour assurer une innocuité microbiologique. Même si la réduction de la flore bactérienne n'a pas toujours été constante, le lait était propre à la consommation du fait que le test de phosphatase alcaline a été négatif tout au long de l'essai.

### Encrassement du système

Le faible encrassement du susceptible constitue un point positif de ce système; des mesures de protéines et de calcium déposés sur la surface chauffante du susceptible et à l'intérieur du tube de chambrage (tableau II) démontrent que le chauffage du tube du susceptible apporte un peu plus d'encrassement que le simple

**Tableau II.** Protéines et calcium déposés par unité de surface. Surface du suscepteur : 0,487 m<sup>2</sup>; surface de chambrage : 0,58 m<sup>2</sup>.  
*Proteins and calcium deposited per unit surface area.*

	Protéines (g·m <sup>-2</sup> )	Calcium (g·m <sup>-2</sup> )
Inducteur	21,6	4,4
Tube de chambrage	7,8	2,7

contact du lait chaud avec l'intérieur du tube de chambrage. Les résultats obtenus nous montrent que la quantité de protéines récupérées sur la surface de chauffage n'est pas très importante, compte tenu de la durée d'opération par comparaison à la quantité de protéines récupérées sur une surface non chauffée. La récupération de calcium est imputable à l'accumulation de pierre de lait (phosphate de calcium). Donc, l'effet de chauffage ou d'autres effets non mesurés, comme un courant induit dans le lait par exemple, n'a pas provoqué un encrassement plus important.

Globalement, une observation visuelle de la surface chauffante nous a permis de retrouver une mince pellicule blanchâtre dont l'épaisseur ne pouvait évidemment pas limiter l'écoulement du lait.

## CONCLUSIONS

Le présent prototype a démontré des performances acceptables pour la pasteurisation du lait. L'utilisation du chauffage à induction magnétique, incorporé à un système classique d'échangeur à plaques, démontre plusieurs avantages par comparaison à un système utilisant la vapeur :

- les installations de production de vapeur (chaudières) nécessitent un entretien régulier;

- l'ensemble des équipements de chauffage à la vapeur occupe une superficie appréciable dans une usine laitière;

- des problèmes de pollution et de salubrité peuvent être engendrés par la présence de chaudières en usine;

- le chauffage à induction magnétique permet une régulation facilitée et précise de la température de traitement;

- ce dernier mode permet aussi une diminution de l'entretien des plaques car celles normalement en contact avec la vapeur vive ou l'eau de chauffage doivent être fréquemment vérifiées.

La substitution de la section de chauffage à plaques par un système de chauffage à induction magnétique ne requiert pas de changements majeurs aux systèmes déjà existants. À la limite, les plaques inutilisées servant à la section de chauffage peuvent être ajoutées à la section de récupération ou de refroidissement pour augmenter l'efficacité énergétique du système, ou servir de pièces de remplacement.

## RÉFÉRENCES

- Brooks IB, Luster GA, Easterly DG (1970) A procedure for the rapid determination of the major cations in milk by atomic absorption spectrophotometry. *Atom Absorpt Newsl* 9, 93-94
- Clark W, Brazis AR, Fowler JL, Johns CK, Nelson FE (1978) Standard plate count method. *In: Standard method for the examination of dairy products*. 14<sup>e</sup> edn (Am Publ Health Assoc Inc) Springfield USA, 77-94
- Consommation et Corporation Canada (1986) *Un chauffe-fluide comprenant un noyau magnétique non conducteur ayant un enroulement primaire de fils conducteurs d'électricité*. Brevet canadien n° 1-253-556
- Fédération internationale de laiterie (FIL) (1986) *Determination of nitrogen content (Kjeldahl*

method) and calculation of crude protein. *Int Dairy Fed Stand* 20A

Hartman PA, Green WL, Huskey GE, Salinger AC (1978) Coliform bacteria. In: *Standard method for the examination of dairy products*. 14<sup>th</sup> edn (Am Publ Health Assoc Inc Springfield), USA 95-106

Loncin M (1976) *Génie industriel alimentaire, aspects fondamentaux*. Masson, France

Murthy GK, Martin R, Rhea US, Peeler ST (1979) Rapid colorimetric test for alkaline phosphatase in dairy products. *J Food Prot* 42, 794-799

Orfeuil M (1987) *Electric process heating*. Battelle Press, Columbus Ohio, USA

Séguin JN, Langhame Y (1987) *Panorama des électrotechnologies industrielles*. Comité Canadien Électrotechnol (CCE)

REFERENCES

Brooks B, Lurie DA, Feinberg DB (1970) A procedure for the rapid determination of pH in milk by means of a colorimetric method. *J Dairy Sci* 53, 100-104

Food W, Brown AR, Foster JR, Johns CK (1970) The pH (7.0) standard plate count method: an improved method for the examination of dairy products. *J Dairy Sci* 53, 100-104

Committee of Canadian Council (1988) *Quality Assurance Program for Dairy Milk*. Report No. 1. Ottawa: Health Canada, 1988. 1-24

Association of Official Agricultural Chemists (1980) *Official Methods of Analysis*. Washington, DC: AOAC, 1980. 1-24

CONCLUSIONS

Un présent prototype a démontré que les données acceptables pour la préservation de la qualité de la lait peuvent être obtenues en utilisant un chauffage à un système électrique alternatif à plusieurs stades. Les données obtenues ont démontré que les données acceptables pour la préservation de la qualité de la lait peuvent être obtenues en utilisant un chauffage à un système électrique alternatif à plusieurs stades.

— les installations de production de lait (industriel) nécessitent un chauffage alternatif.