

Stérilisation des liquides dans des bouteilles d'axe horizontal

**Influence de la vitesse de rotation sur le transfert
de chaleur**

par

F. MARQUIS*, A. J. BERTSCH (1) et O. CERF

avec la collaboration technique de A. DEGAS, A. LELUBRE
et M. CAVARROC

Unité de génie alimentaire
Institut National de la Recherche Agronomique
78350 Jouy-en-Josas (France)

Résumé

Le transfert de chaleur dans des bouteilles cylindriques ou de section carrée couchées horizontalement peut être amélioré en les faisant tourner autour de leur axe, surtout si elles présentent des reliefs intérieurs. Toutefois, le transfert de chaleur reste essentiellement dû à la convection naturelle à l'intérieur des bouteilles.

Pour le calcul du coefficient de transfert de chaleur, la méthode de Lenz et Lund (1978) se révèle plus sensible aux variations des conditions expérimentales que la méthode de Ball et Olson (1957).

La rotation à des vitesses allant jusqu'à 20 r/min, même si les bouteilles cylindriques ont 8 reliefs de 2 mm de hauteur le long de leur paroi intérieure, ne fait pas disparaître ce phénomène et n'assure pas l'homogénéité de la température. Par conséquent, le calcul de l'efficacité stérilisatrice ou des altérations du produit ne peut être fait.

* Travail réalisé pour un Diplôme d'Etudes Approfondies, Ecole Nationale Supérieure des Industries Agricoles et Alimentaires (Département Génie Industriel Alimentaire), 1, rue des Olympiades - 91305 Massy cedex.

(1) Adresse actuelle : Departamento de Química y Tecnología, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela, 2101 Maracay (Venezuela).

Mots clés

Transfert de chaleur - Convection libre - Vitesse de rotation - Stérilisation - Lait.

Titre abrégé

Stérilisation en bouteille.

Summary

STERILIZATION OF LIQUIDS IN BOTTLES WITH HORIZONTAL AXIS. INFLUENCE OF ROTATIONAL FREQUENCY ON HEAT TRANSFER

When horizontal bottles, filled at 95 % of internal volume with water or milk, are heated with steam in an autoclave, heat transfer is mainly due to free convection. This phenomenon takes place in bottles with circular or square cross section. Heat transfer can be improved by rotating the bottles axially, particularly if they have internal roughness. Yet the heat transfer remains essentially due to natural convection inside the bottle. The Lenz and Lund (1978) method for calculating the heat transfer coefficient is more sensitive to the variation of experimental conditions than the method of Ball and Olson (1957). The rotation at speeds up to 20 r/min, even if cylindrical bottles have eight 2 mm internal reliefs along their wall, does not cancel this phenomenon and does not homogenize the temperature. Therefore calculations of sterilizing efficiency or product deterioration cannot be done. Improvement of heat transfer could result from an appropriate design of bottles.

Key words

Heat transfer - Free convection - Rotational frequency - Sterilization - Milk.

Symboles

CRITERES ADIMENSIONNELS

$$Nu = \frac{\alpha D}{2\lambda} \text{ nombre de Nusselt.}$$

$$Ra = \frac{(D/2)^3 g\beta (\theta_a - \theta_i)}{\nu\alpha} \text{ nombre de Rayleigh.}$$

SYMBOLES LATINS

- a, b, c coefficients.
- A surface (m²).
- Cp chaleur massique (J.kg⁻¹.K⁻¹).
- D diamètre des récipients cylindriques, côté des récipients à section carrée (m).

<i>f</i>	inverse de la pente de la droite de Ball et Olson (1957) (s ⁻¹).
<i>g</i>	accélération de la pesanteur (m.s ⁻²).
<i>j</i>	ordonnée à l'origine de la droite de Ball et Olson (1957) (—).
<i>m</i>	masse (kg).
<i>n</i>	fréquence de rotation (r/min).
<i>t</i>	temps (s).
<i>V</i>	tension électrique (V).

SYMBOLES GRECS

α	coefficient de transfert de chaleur (W.m ⁻² .K ⁻¹).
β	coefficient d'expansion thermique (K ⁻¹).
θ	température (°C).
θ^*	température réduite (—).
λ	conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹).
ν	viscosité cinématique (m ² .s ⁻¹).
ρ	masse volumique (kg.m ⁻³).

INDICES

<i>a</i>	autoclave.
<i>ai</i>	initial dans l'autoclave.
<i>af</i>	final dans l'autoclave.
<i>i</i>	initial dans le récipient.

INTRODUCTION

La stérilisation des bouteilles de lait est encore souvent faite dans des autoclaves discontinus où les bouteilles sont soit immobiles, soit agitées par rotation autour d'un axe perpendiculaire à leur axe de symétrie. Mais de plus en plus souvent la stérilisation est faite dans des autoclaves continus. Dans beaucoup de ces appareils les bouteilles sont soumises à un mouvement de rotation lente autour de leur axe de symétrie (quelques tours par minute).

Il est connu que dans un récipient immobile contenant un liquide peu visqueux et placé au sein d'un fluide plus chaud, le transfert de chaleur se fait par convection naturelle. Hiddink (1975) fait une revue des publications qui traitent de ce phénomène. Les travaux publiés, y compris ceux de Mouton et Roeck (1976), portent sur des récipients immobiles, sphériques, ou cylindriques à axe vertical, avec ou sans poche d'air.

Lenz et Lund (1978) et Duquenoy (1980) étudient quant à eux le transfert de chaleur dans les cylindres, dans des conditions expérimentales d'agitation telles que la température du liquide est uniforme à tout instant.

Le présent travail a pour objet la mesure du transfert de chaleur dans des cylindres horizontaux tournant autour de leur axe aux vitesses angulaires rencontrées dans les autoclaves continus actuellement utilisés dans l'industrie.

MATERIEL ET METHODES

Produits

On utilise de l'eau pour les essais. En outre quelques essais ont été faits avec du lait entier.

Réipients

Deux formes de boîtes en acier inoxydable d'épaisseur 2 mm sont utilisées :

- Des boîtes cylindriques dont les dimensions intérieures sont :

diamètre : 80 mm
hauteur : 198 mm
contenance : 1 dm³

- Des boîtes de section carrée dont les dimensions intérieures sont :

côté : 74 mm
hauteur : 202 mm
contenance : 1 dm³.

Les boîtes sont remplies avec 0,95 dm³ de produit. Dans les boîtes cylindriques couchées, la hauteur de produit est donc 72,2 mm. Dans les boîtes carrées couchées, elle oscille entre 70,3 et 88,9 mm, valeurs correspondants aux cas où les boîtes reposent sur leur flanc ou sur leur arête.

Pour augmenter la rugosité de la paroi des récipients cylindriques, des reliefs peuvent être créés en ajoutant des tiges d'acier de 2 mm de diamètre et de longueur égale à celle des récipients. Elles sont disposées à raison de 2, 4 ou 8 tiges équidistantes sur deux cercles d'acier qui coulisent dans les cylindres.

Autoclave

Les chauffages sont réalisés dans un simulateur de stérilisation (Ateliers et Chantiers de Bretagne).

Selon les essais, il faut de 100 à 200 s pour que la température dans l'autoclave atteigne sa valeur de consigne.

Les récipients sont fixés à une grille dont la vitesse de rotation peut varier de 0 à 20 r/min. Quatre sondes de températures placées à l'intérieur de l'autoclave sont connectées à un contacteur rotatif relié à un enregistreur sur le panneau de commande de l'autoclave.

Dans tous les essais la température de consigne est 130° C.

Mesures de températures

Les quatre sondes du simulateur sont remplacées par des thermocouples fins en cuivre-constantan (Thermoelectric HF/D 30 TT) dont la constante de temps est 1,5s pour une variation de température de 0 à 100° C. Ces thermocouples sont reliés aux bornes du contacteur rotatif du simulateur de stérilisation. Les bornes du contacteur ne sont pas en cuivre. Or pour le système de saisie de donnée utilisé, il est nécessaire d'utiliser ce métal, ce qui crée des thermocouples parasites.

Pour remédier à cet inconvénient, on utilise un fil « commun » en cuivre, des fils de constantan sont reliés aux quatre bornes correspondant à chaque thermocouple. Ces fils sont ensuite soudés à des fils de cuivre reliés aux bornes d'une carte relais de l'appareil de saisie de données, et les quatre soudures sont plongées dans la glace fondante.

Trois thermocouples sont utilisés simultanément. L'un est placé dans la vapeur. Les autres sont placés dans les boîtes, l'un à leur centre géométrique et l'autre en position excentrée dans le même plan perpendiculaire à l'axe que le précédent, et à 15 mm du centre.

Saisie de données

La tension des thermocouples est mesurée par une carte d'entrée analogique placée avec la carte de relais dans un multiprogrammeur (Hewlett-Packard 6940 B) placé sous le contrôle d'un micro-ordinateur (Hewlett-Packard 9825 A). Ce dernier commande la prise de mesure, collecte et traite les données. L'étalonnage de l'ensemble du système pour chaque thermocouple permet de décrire leur comportement par des équations de la forme :

$$\theta = aV + b\sqrt{V} + c$$

où θ est la température en ° C et V la tension en volts, et a , b , c , des coefficients numériques. L'écart type résiduel de chaque ajustement est 0,2° C.

Méthodes de calcul du coefficient de transfert de chaleur

a) Méthode de Ball et Olson (1957)

Le logarithme de la température réduite :

$$\theta^* = \frac{\theta_a - \theta}{\theta_a - \theta_i}$$

(θ température mesurée à l'instant t dans le liquide, θ_i température initiale du liquide, θ_a température de la vapeur dans l'autoclave à l'instant zéro) est porté sur un graphique en fonction du temps. Si l'inverse de la pente de la droite ajustée aux points expérimentaux

est désigné par f , le coefficient global de transfert de chaleur α est calculé par l'équation :

$$\alpha = 2,303 \frac{m Cp}{A f}$$

(α en $W.m^{-2}.K^{-1}$, m masse de liquide en kg, Cp chaleur massique du liquide en $J.kg^{-1}.K^{-1}$, A surface du liquide en contact avec la paroi du récipient en m^2 , f en s^{-1}). L'ordonnée à l'origine de la droite ci-dessus est désignée par j (sans dimension). On obtient une estimation optimale de f en n'utilisant pour l'ajustement que les valeurs de θ^* comprise entre 0,25 et 0,85 (A. Duquenoy, communication personnelle).

La méthode ci-dessus permet de calculer une valeur moyenne de α à condition que la température θ_a de l'autoclave soit constante et que la température θ à l'intérieur du récipient soit homogène.

b) Méthode de Lenz et Lund (1978)

L'équation différentielle :

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{A\alpha}{mCp} [\theta_a - \theta - (\theta_{af} - \theta_{ai}) \exp\left(-\frac{A\alpha}{mCp} t\right)]$$

(θ_{ai} température initiale de l'autoclave, θ_{af} température finale de l'autoclave, les autres symboles ont le même sens que précédemment) est résolue pour une valeur quelconque de α par la méthode de Runge-Kutta du quatrième ordre.

Le résultat est comparé aux valeurs expérimentales d'évolution de la température, puis le calcul est recommencé autant de fois qu'il le faut avec de nouvelles valeurs de α de façon à minimiser l'écart entre valeurs calculées et valeurs expérimentales. Le critère d'ajustement utilisé est la somme des carrés des écarts.

Comme la méthode précédente, la méthode ci-dessus permet de calculer une valeur moyenne de α à condition que la température à l'intérieur du récipient soit homogène, mais cette fois, quelles que soient les valeurs de la température dans l'autoclave.

Méthodes statistiques

Les méthodes recommandées par Bowker et Lieberman (1965) sont utilisées.

RESULTATS

1° Calcul du coefficient de transfert de chaleur à partir de la température au centre des récipients

Le tableau 1 correspondant au cylindre sans relief intérieur, montre qu'en moyenne le coefficient de transfert de chaleur calculé

TABLEAU 1 - TABLE 1

Influence de la vitesse de rotation n sur le coefficient de transfert de chaleur dans un récipient cylindrique sans reliefs intérieurs

Influence of rotational frequency n on heat transfer coefficient in a cylindrical container without internal reliefs

Vitesse de rotation Rotational frequency (r/min)	α (W.m ⁻² .K ⁻¹) calculé selon calculated following	
	BALL et OLSON (1957)	LENZ et LUND (1978)
0	850	698
	869	724
	869	740
	872	749
5,1	867	764
5,6	810	788
6,4	899	912
6,8	830	857
8,6	837	919
	879	942
9,9	845	929
	876	945
11,5	888	922
	899	947
14,1	821	897
	822	907
19,5	845	922
19,6	845	959
Moyenne \pm écart-type <i>Mean \pm standard deviation</i>	847 \pm 27	862 \pm 91
Seuil de signification de la régression <i>Significance level of regression</i>	> 0,10	0,01
Equation de la régression <i>Equation of regression</i>	—	$\alpha = 754 + 13,4 n$

par la méthode de Ball et Olson (1957) ne diffère pas significativement de celui calculé par la méthode de Lenz et Lund (1978). Toutefois, la première méthode ne met en évidence aucune influence de la vitesse de réaction, au contraire de la seconde. L'ordonnée à l'origine j (méthode de Ball et Olson, 1957) est en moyenne égale à 2,2, et la vitesse de rotation n'exerce pas d'influence significative sur sa valeur.

De même dans le tableau 2 qui correspond aux autres formes de récipients, il n'y a pas de différence significative entre les valeurs de α calculées par les deux méthodes, et seule la seconde méthode

TABLEAU 2 - TABLE 2

Influence de la forme du récipient et de la vitesse de rotation n sur le coefficient de transfert de chaleur.

Les indices a, b, c, d, indiquent que les valeurs correspondantes ne diffèrent pas significativement

Influence of container shape and rotational frequency n on heat transfer coefficient.

Letters a, b, c, d, indicate values which do not differ significantly

Vitesse de rotation Rotational frequency (r/min)	α (W.m ⁻² .K ⁻¹) calculé selon - <i>calculated following</i>							
	BALL et OLSON (1957)				LENZ et LUND (1978)			
	Récipient - <i>Container</i>				Récipient - <i>Container</i>			
	cylindrique avec - <i>cylindrical with</i>			carré <i>square</i> <i>sectionned</i>	cylindrique avec - <i>cylindrical with</i>			carré <i>square</i> <i>sectionned</i>
2	4 reliefs	8	2		4 reliefs	8		
5,5	894 —	958 995	1 024 1 025	937 959	900 —	924 972	972 980	911 936
8,1	933 953	1 025 —	1 136 —	957 988	930 939	981 —	1 040 —	925 944
10,3	981 990	986 1 073	1 060 1 094	982 997	936 965	1 023 1 027	1 176 1 181	996 1 002
15,2	966 969	1 034 —	1 110 —	972 —	901 926	1 064 —	1 156 —	1 046 —
Moyenne \pm écart-type <i>Mean \pm standard deviation</i>	955 \pm 33a	1 012 \pm 41b	1 075 \pm 46c	970 \pm 21d	928 \pm 23a	998 \pm 49b	1 084 \pm 98c	966 \pm 49d
Seuil de signification de la régression <i>Significance level of regression</i>	> 0,10	> 0,10	> 0,10	> 0,10	> 0,10	0,001	0,05	0,01
Equation de la régression <i>Equation of regression</i>	—	—	—	—	—	883 + 12,6n	881 + 22,2n	838 + 14,1n

met en évidence l'influence de la vitesse de rotation. L'étude statistique montre que pour la première méthode, le classement par ordre de coefficient de transfert croissant est :

2 reliefs \approx section carrée < 4 reliefs < 8 reliefs
 tandis que pour la seconde méthode le classement est :
 2 reliefs < section carrée \approx 4 reliefs < 8 reliefs

2° Mesures de températures dans le liquide en position excentrée

Dans un récipient cylindrique immobile, on observe que la température du liquide n'est pas homogène pendant la montée en température. La figure 1 montre qu'elle est plus élevée au-dessus du centre, moins élevée en-dessous du centre. Le centre lui-même est à une température intermédiaire, proche de la température la moins élevée. L'écart maximum entre les valeurs mesurées atteint ou dépasse 20° C. Le même phénomène se produit dans le récipient de section carrée.

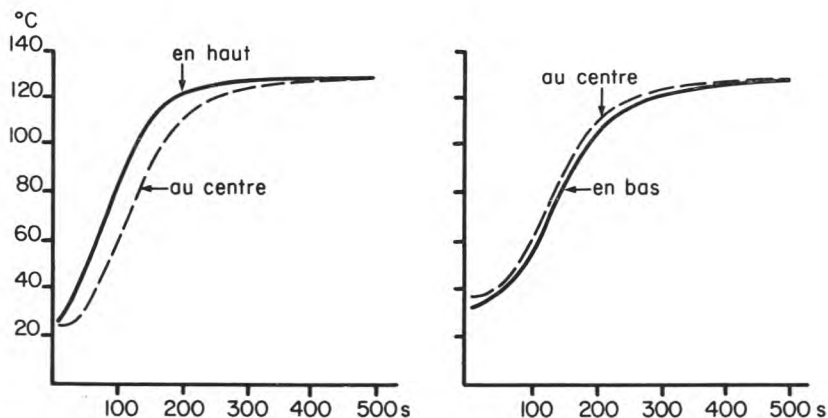


fig. 1

Exemple d'évolution de la température dans une boîte cylindrique immobile. Abscisses : temps, ordonnées : température.

A : la sonde excentrée est placée verticalement au-dessus du centre.

B : la sonde excentrée est placée verticalement au-dessous du centre.

----- sonde centrale.

————— sonde excentrée.

Example of temperature evolution in a motionless cylindrical container. Abscissa: time, ordinates: temperature.

A : eccentric thermocouple placed vertically above center.

B : eccentric thermocouple placed vertically under center.

----- central thermocouple.

————— eccentric thermocouple.

Dans un récipient cylindrique sans relief intérieur en rotation, la température de la sonde excentrée varie donc, lors de chaque révolution, entre des valeurs supérieures et inférieures à celle de la sonde centrale selon qu'elle passe au-dessus ou au-dessous de cette dernière. La figure 2 donne un exemple d'un essai où la saisie des données de sondes était faite en continu. La figure 3 montre l'enregistrement continu de la température de la sonde excentrée, pour les boîtes cylindriques avec ou sans relief. On voit que dans le

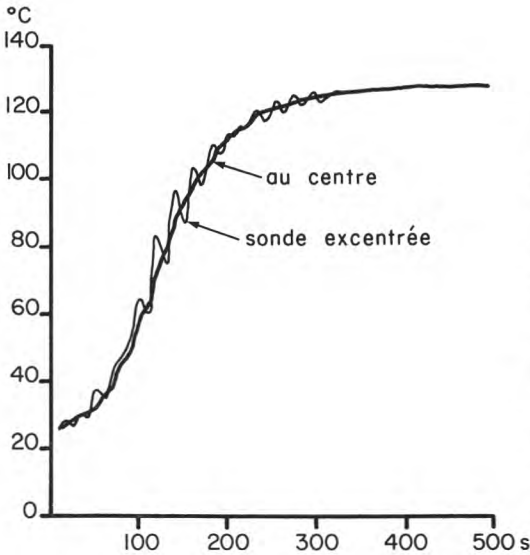


fig. 2

Exemple d'évolution de la température dans une boîte cylindrique tournant à 8,5 r/min. La sonde excentrée tourne à la même vitesse que la boîte. Abscisses : temps, ordonnées : température.

— sonde centrale.
— sonde excentrée.

Example of temperature evolution in a rotating cylindrical container (8.5 r/min). The eccentric thermocouple rotates at the angular speed of cylinder. Abscissa: time, ordinates: temperature.

— central thermocouple.
— eccentric thermocouple.

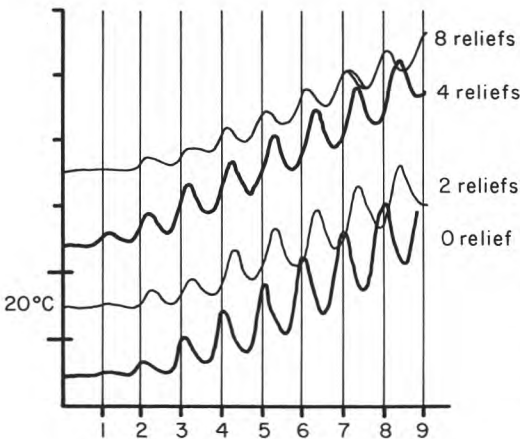


fig. 3

Influence de la vitesse de rotation des boîtes cylindriques, avec ou sans reliefs. Abscisses: numéros des tours, ordonnées : température (origines décalées).

La température initiale est toujours égale à 20° C.

Influence of rotational frequency of cylindrical containers, with or without internal reliefs, on temperature evolution. Abscissa: number of rotations, ordinates: temperature. Zeros are shifted on ordinate axis.

Initial temperature is always 20° C.

récepteur cylindrique sans relief intérieur, le maximum de température a bien lieu lorsque la sonde est en position haute, et le minimum en position basse. Dans les récepteurs cylindriques avec reliefs intérieurs, les extrema de température sont légèrement retardés. Une observation semblable peut être faite avec le récepteur de section carrée. La figure 4 montre enfin que dans le récepteur cylindrique sans relief intérieur, l'amplitude des écarts de température entre les deux sondes est réduite lorsque la vitesse de rotation augmente.

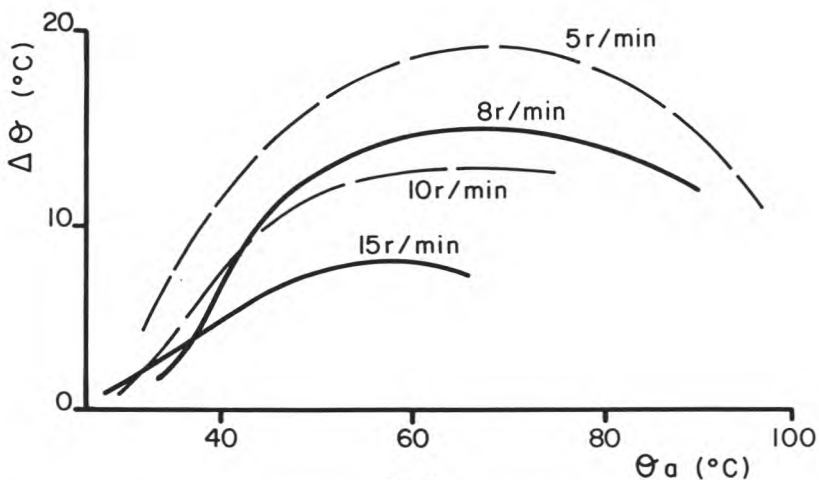


fig. 4

Influence de la vitesse de rotation d'une boîte cylindrique sans relief intérieur sur l'amplitude des écarts de température mesurés par la sonde excentrée. Abscisses : température au centre, ordonnées : écarts de températures.

Influence of rotational frequency of cylindrical container, without internal reliefs, on amplitude of temperature extremes, as measured with the eccentric thermocouple. Abscissa: central temperature, ordinates: temperature interval between successive extremes.

3° Essais avec du lait

Les essais réalisés dans le récepteur à 8 reliefs intérieurs en rotation de 6 à 15 r/min conduisent à des résultats équivalents à ceux obtenus avec l'eau en ce qui concerne la convection naturelle et l'influence de la vitesse de rotation. Toutefois, les coefficients de transfert de chaleur sont plus faibles que ceux de l'eau de 20 % en moyenne.

DISCUSSION

La comparaison entre les deux méthodes de calcul du coefficient de transfert indique que la méthode de Lenz et Lund (1978) est la seule capable de détecter l'influence de la vitesse de rotation. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'elle prend en compte la totalité des points expérimentaux. L'autre méthode, au contraire, ne tient compte que d'une partie de la courte période où la température de l'auto-clave est constante, période qui correspond à la fin de la montée en température. Or c'est justement à ce moment que la température est quasiment homogène à l'intérieur des récipients et ne doit plus beaucoup dépendre de la vitesse de rotation (fig. 4). La méthode de Lenz et Lund (1978) montre que :

— la rotation autour de leur axe des récipients couchés horizontalement améliore le transfert de chaleur ;

— la forme des récipients permet aussi d'améliorer le coefficient de transfert mais de façon modérée (17 % dans le cas le plus favorable) dans nos conditions expérimentales (tab. 2) ;

— l'amélioration apportée par la vitesse de rotation est peu influencée par la forme des récipients. En effet, elle peut être chiffrée à 16 % avec le récipient cylindrique sans relief intérieur, 15 % avec le récipient à section carrée, 13 % avec le récipient cylindrique à 4 reliefs, mais 23 % avec le récipient à 8 reliefs.

La publication de Hiddink (1975) rassemble les relations entre nombres sans dimensions qui ont été proposées par divers auteurs pour prévoir le coefficient de transfert de chaleur par convection naturelle. Elles sont de la forme :

$$Nu = a Ra^b$$

(Nu nombre de Nusselt, Ra nombre de Rayleigh, a coefficient compris entre 0,119 et 0,77, b coefficient compris entre 0,25 et 0,33) et sont valables pour des récipients cylindriques verticaux dont le rapport hauteur sur largeur est compris entre 0,25 et 2. Dans nos conditions expérimentales, le calcul conduit à Ra de l'ordre de 2.10^8 . Il est donc bien possible qu'il y ait convection naturelle. Cette valeur conduit à son tour à une valeur de α de l'ordre de $1\ 000\ \text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. On voit que malgré la différence de forme de récipient, l'ordre de grandeur des coefficients de transfert de chaleur expérimentaux est conforme aux prévisions.

Les essais réalisés en plaçant un thermocouple en position excentrée permettent effectivement de montrer que la température n'est pas homogène dans les récipients sauf en début et fin de montée en température, que le liquide chauffé soit de l'eau ou du lait. Ceci confirme les résultats des auteurs antérieurs cités dans l'introduction, obtenus dans des conditions expérimentales voisines, mais infirme

l'affirmation de Stumbo (1975) : « En raison du mouvement du produit dans les produits chauffés par convection, les températures dans l'ensemble du produit sont raisonnablement uniformes durant le chauffage et le refroidissement ». La figure 4 montre que la non-uniformité peut atteindre 20° C entre les deux sondes. L'écart réel de température entre le point le plus chaud et le point le plus froid est certainement plus élevé. En effet, Hiddink (1975) a montré que le point le plus chaud est situé très près de la surface du liquide. En revanche, les minima de températures qui sont mesurés sont vraisemblablement représentatifs de la température la plus basse dans les récipients. Hiddink (1975) montre que celle-ci est trouvée vers leur tiers inférieur.

Du fait de l'hétérogénéité de la température, le coefficient global de transfert de chaleur ne peut pas être utilisé pour simuler les effets du chauffage sur l'efficacité stérilisatrice, sur la destruction de vitamines ou sur toute autre réaction d'altération du produit. En effet, on ne possède aucune indication sur « l'histoire thermique » de chaque élément de volume du produit. Chacun passe alternativement dans la fine couche ascendante chauffée par la paroi (dont l'épaisseur et la vitesse sont inconnues), puis dans le noyau central qui redescend en se refroidissant. Hiddink (1975) a bien démontré ce phénomène. D'autre part, nous ne connaissons rien des phénomènes qui se produisent aux deux extrémités verticales des récipients directement en contact avec le fluide chauffant.

En conclusion, le transfert de chaleur pourrait être notablement amélioré, par exemple en utilisant des récipients ayant des formes plus complexes que ceux qui ont été utilisés pour ce travail, et en augmentant encore la vitesse de rotation. De plus, on obtiendrait plus rapidement l'homogénéité de température à l'intérieur des récipients, ce qui permettrait de modéliser les réactions microbiologiques ou chimiques provoquées par le chauffage. Une expérimentation complémentaire avec des récipients en matière plastique de formes diverses devrait permettre d'aboutir à des progrès notables.

Reçu pour publication en mars 1982.

Bibliographie

- BALL (C. O.) and OLSON (F. C. W.) (1957). — Sterilization in Food Technology. Mc Graw Hill, New York.
- BOWKER (A. H.) et LIEBERMAN (G. J.) (1965). — Méthodes statistiques de l'ingénieur. Dunod, Paris.
- DUQUENOY (A.) (1980). — Heat transfer to canned liquids. In «Food Process Engineering», volume I, ed. by Linko (P.), Malki (Y.), Olkku (J.) and Larinkari (J.). Applied Science Publishers, London.

- HIDDINK (J.) (1975). — Natural conduction heating of liquids with reference to sterilization of canned food. Center of Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen.
- LENZ (M. K.) and LUND (D. B.) (1978). — The lethality-Fourier number method. Heating rate variations and lethality confidence intervals for forced-convection heated foods in containers. *Journal of Food Processing*, 2, 227-271.
- MOUTON (H.) et ROECK (H. DE) (1977). — Convection naturelle au sein d'un liquide contenu dans une capacité cylindrique fermée soumise à un changement brusque de température ambiante. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 20, 627-634.
- STUMBO (C. R.) (1973). — Thermobacteriology in Food Processing. Academic Press, New York.
-