

SIMPLIFICATION DU TRANSFERT THERMIQUE INSTATIONNAIRE LORS DE LA CONGELATION DES PRODUITS ALIMENTAIRES. EFFETS DE QUELQUES PARAMETRES SUR LE TEMPS.

M.N BOUAZIZ, S. HANINI

Laboratoire de thermique et de mécanique des fluides.
Centre Universitaire de Médéa, BP 164 Médéa 26000 (Algérie).
Fax : 213 25 58 46 93 ; E-mail : mn_bouaziz@email.com

RESUME

Le temps de congélation des produits alimentaires est une donnée économique essentielle. Dans cet article, on présente d'abord le modèle mathématique choisi et décrivant le processus de la congélation. On souligne particulièrement l'obtention de la distribution en instationnaire des températures qui sont des phases négligées dans l'approche de l'estimation pratique du temps de congélation des produits agroalimentaires.

Dans une première étape, l'analyse des solutions nous a permis d'effectuer une simplification du modèle dans ces phases. Dans une seconde étape, l'écriture d'un programme nous a conduit à analyser l'effet de quelques paramètres sur le temps global de congélation.

Pour un produit de forme parallélépipédique rectangulaire, nous reportons à titre d'exemple ces effets. Les résultats montrent que le temps des phases avant et après changement de phase ne sont pas négligeables d'une part, et que l'influence de la largeur, de la température du milieu réfrigérant ainsi que le coefficient d'échange est importante, d'autre part.

Mots-clés : congélation, produit alimentaire, transfert thermique, température, temps.

NOMENCLATURE

b	Constante suivant la forme géométrique du produit 0 pour tranche infinie, 1 pour un cylindre infini, 2 pour une sphère	
B_i	Nombre de Biot	
D	Epaisseur ou diamètre du produit	m
F	Nombre de Fourier ($4 \alpha t / D^2$)	
h	Coefficient de convection	$W.m^{-2}.K^{-1}$
j	Ordonnée à l'origine de l'approximation (éq. 9)	
J_0, J_1	Fonction de Bessel de première espèce et d'ordre 0 et 1	
N	Temps nécessaire pour un cycle logarithmique (éq. 9), $N = f(D, B_i)$	s
t	Temps	s
T	Température	K
u_n, v_n, w_n	Solutions d'équations transcendentes (éq. 6, 7 et 8)	
a	Diffusivité thermique	$m^2.s^{-1}$
?	Conductivité thermique	$W.m^{-1}.K^{-1}$
?	Coordonnée d'espace, =x pour une tranche et =r pour cylindre et sphère	m
	<i>Indices pour les températures et temps</i>	
d	i avant changement de phase et e après	
e	Changement de phase	
f	e avant changement de phase et finale après	
i	initiale	
cav	Congélation avant	
cap	Congélation après	
ccp	Congélation changement de phase	
ct	Congélation total	
l	Milieu réfrigérant	

1.INTRODUCTION

Le temps de congélation des produits alimentaires est caractéristique du produit et du procédé. Il peut varier dans la pratique, de quelques minutes à plus de 24 heures, et son évaluation est capitale pour la maîtrise économique du processus. De nombreux procédés de calcul du temps de congélation des produits alimentaires ont été proposés [1-3]. Ils reposent principalement sur l'utilisation de la formule de Plank [4], qui décrit en réalité le processus du transfert de chaleur lors du changement de phase. Ainsi, le temps considéré n'est que la traduction de la période nécessaire au changement de phase, et par conséquent les résultats ne reflètent pas les temps de refroidissement avant la congélation ainsi que celui nécessaire pour porter le produit à la température de froid désirée.

Le problème de transfert non stationnaire complexe est d'abord analysé par évaluation des trois temps. Le modèle proposé pour les périodes citées a pour objectif la détermination de la distribution des températures de produits agroalimentaires durant le processus de congélation pour des géométries simples comme la tranche infinie, un parallélépipède rectangle, un cylindre infini et finalement une sphère.

Les conditions initiale et aux limites de convection appropriées complètent la description mathématique du processus.

Une simplification est obtenue dans le cas pratique où la congélation des aliments est caractérisée par un nombre de Fourier supérieur à 0.15 et les solutions analytiques sous forme de séries se simplifient si on adopte une expression exponentielle. Par conséquent, les temps des phases transitoires de la congélation avant et après le changement de phase peuvent être déterminées suivant les températures extrêmes de l'étape et à partir de coefficients précisés en relation au nombre de Biot, la forme géométrique et l'étape de congélation.

Notons que cette démarche est extensible à d'autres formes géométriques, et il y a lieu de préciser seulement les caractéristiques de combinaison des formes simples.

2.MODELE MAHEMATIQUE

Ce modèle est écrit dans le but de déterminer la distribution des températures des produits agroalimentaires durant le processus transitoire de congélation pour des géométries simples comme la tranche infinie, un parallélépipède rectangle, un cylindre infini ou fini et finalement une sphère, dans ces cas là on s'intéresse aux transferts thermiques non stationnaire sans changement de phase.

L'équation régissant le transfert de chaleur pour la congélation des produits et pour les différentes formes citées, peut se mettre sous la forme suivante :

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = a \left[\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + \frac{b}{\rho} \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right] \quad (1)$$

Le choix des conditions les plus appropriées, sont écrits de la manière suivante :

$$* \quad T = T_i \quad 0 < x < D/2 \quad \text{et} \quad t = 0 \quad (2.a)$$

$$* \quad -x \frac{\partial T}{\partial x} = h [T - T_i] \quad x = D/2 \quad (2.b)$$

$$* \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad x = 0 \quad (2.c)$$

Les solutions dans les divers cas de l'équation du transfert et compte tenu des conditions précédentes, s'obtiennent par la méthode classique de Fourier :

- Pour la tranche infinie :

$$\frac{T(x,t) - T_i}{T_i - T_1} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin u_n - \cos \left(\frac{2u_n x}{D} \right) \exp(-u_n^2 F)}{u_n + \sin u_n \cos u_n} \quad (3)$$

- Pour un cylindre infini :

$$\frac{T(r,t)-T_1}{T_i-T_1} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_1(\lambda_n)}{\lambda_n - [J_0^2(\lambda_n) \cdot J_1^2(\lambda_n)]} \cdot J_0\left(\frac{2\lambda_n r}{D}\right) \exp(-\lambda_n^2 F) \quad (4)$$

- pour une sphère :

$$\frac{T(r,t)-T_1}{T_i-T_1} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin w_n - w_n \cos w_n}{w_n - \sin w_n \cos w_n} \frac{\sin\left(\frac{2w_n r}{D}\right) \exp(-w_n^2 F)}{\left(\frac{2w_n r}{D}\right)} \quad (5)$$

les variables indicées, associées à ces distributions sont solutions des équations transcendantes suivantes :

$$\tan u_n = B_i \quad (6)$$

$$J_0(\lambda_n) / J_1(\lambda_n) = \lambda_n / B_i \quad (7)$$

$$\tan w_n = - (w_n / B_i) - 1 \quad (8)$$

3. SIMPLIFICATION DU MODELE

L'examen de la congélation des aliments montre que le processus est caractérisé par un nombre de Fourier supérieur à 0,15. Cette particularité allège considérablement les séries obtenues et par conséquent se simplifient si on adopte une forme exponentielle (ou sous forme logarithmique inverse pour les variables temps et température). Ceci est conforme aux observations expérimentales du processus de congélation et qui se résume comme suit :

* une période de refroidissement du produit et qui correspond à un transfert de chaleur non stationnaire dite "avant changement de phase"

* une période de changement de phase dans laquelle a lieu le passage de l'eau contenue dans le produit en glace. La température varie peu durant cette phase.

* une période de refroidissement additive lors de laquelle le produit va se refroidir jusqu'à ce qu'il atteigne la température de congélation désirée. Elle est dite "après changement de phase" et le transfert est ici également instationnaire.

Nous conservons la formule de Plank pour la phase intermédiaire, mais les autres périodes seront traitées en instationnaire et sous la forme suivante [5] :

$$t = N \text{ Log } j \frac{T_1 - T_d}{T_1 - T_f} \quad (9)$$

Notons que le coefficient N issu de la simplification et pouvant être précisé en relation au nombre de Biot, à partir de la forme géométrique et suivant l'étape de congélation [6]. Il en est de même pour j. Un traitement particulier sera apporté pour l'estimation du temps lors du changement de phase.

4. RESULTATS ET DISCUSSION

Un programme de calcul basé sur cette approche de simplification a été écrit en FORTRAN, à partir des calculs préliminaires des coefficients N et j pour les périodes avant et après le changement de phase. Dans cet article le temps global de la congélation est reporté et l'effet de quelques paramètres est montré pour une application - à titre d'exemple - à une forme parallélépipédique rectangulaire du produit.

4.1 effet des dimensions

La figure 1 montre une évidence, c'est que le temps de congélation augmente avec les dimensions du produit à congeler d'une part, d'autre part si les temps avant et après changement de phase (tcav et tcap) présentent une variation peu perceptible avec le diamètre du produit, par contre le temps consacré au changement de phase (tccp) se présente nettement d'une manière assez grande.

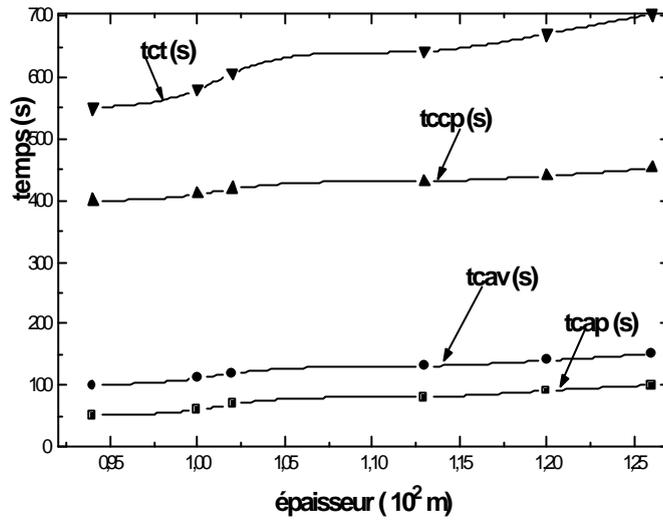


Figure 1 : Effet de l'épaisseur sur le temps de congélation pour un produit de forme parallélépipédique rectangulaire.

Dans la figure 2, on note une allure semblable pour le temps, mais l'influence de la largeur est très grande, même pour des augmentations relativement petites de cette variable. Il semble donc qu'on est en présence d'une égalisation plus homogène des températures lorsque le produit est plus large, conséquence des hypothèses du transfert.

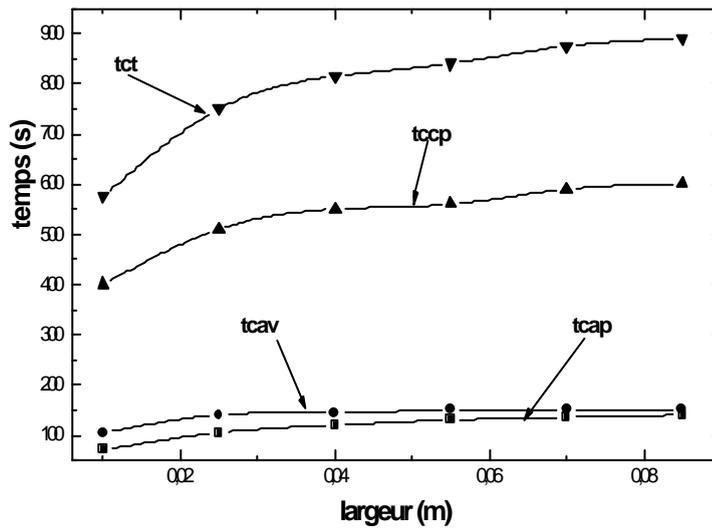


Figure 2 : Effet de la largeur sur le temps de congélation pour un produit de forme parallélépipédique rectangulaire.

4.2 effet du milieu réfrigérant

On confirme dans la figure 3 une pratique largement admise, c'est que la température du milieu réfrigérant influe énormément sur le temps de congélation. Cet effet est élevé dans la mesure où en agissant à -45°C au lieu de -25°C , le produit se congèle deux fois plus vite.

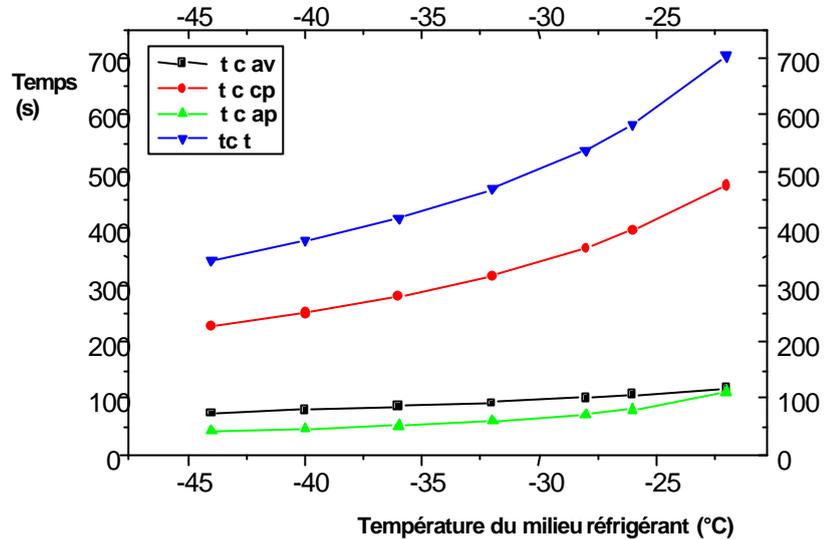


Figure 3: Effet de la température du milieu réfrigérant sur le temps de congélation pour un produit de forme parallélépipédique rectangulaire.

4.3 effet du coefficient de convection

Plus le coefficient d'échange est grand, plus le temps de congélation diminue d'une façon importante (figure4), surtout pour le temps consacré au changement de phase. Ainsi, parmi ces différents paramètres, le coefficient d'échange est un facteur prédominant dans la réduction des temps consacrés à la congélation.

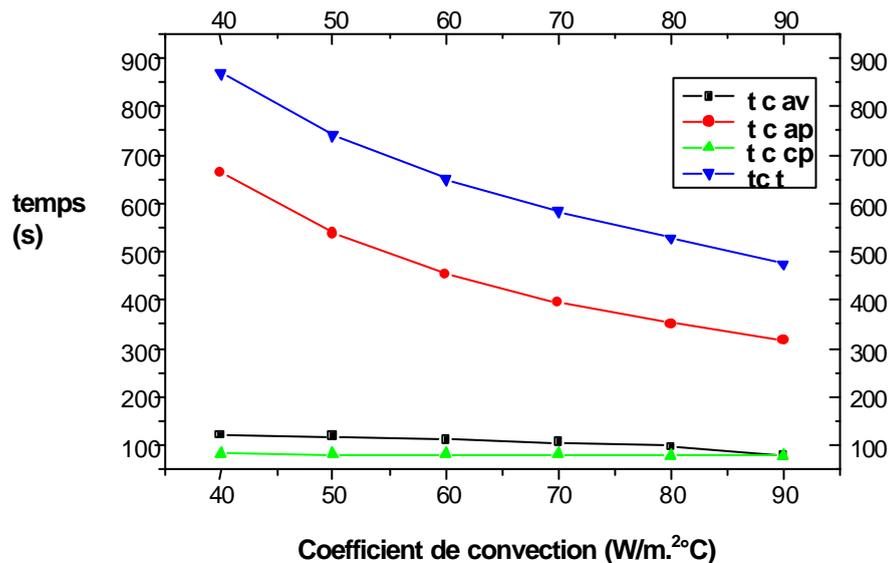


Figure 4 : Effet du coefficient de convection sur le temps de congélation pour un produit de forme parallélépipédique rectangulaire.

5.CONCLUSION

Cette simplification permet la détermination plus pratique et plus précise du temps de congélation , en incorporant les temps avant et après changement de phase. Le programme élaboré et mis au point met en évidence l'influence de quelques paramètres. De plus, on note (résultats non reportés dans ce papier), que la conductivité thermique du produit ainsi que la température initiale n'ont pas d'effets sensibles sur le temps suivant de larges intervalles. Par contre, la simulation du processus a montré un accroissement important du temps lorsque la température finale est plus poussée.

REFERENCES

- [1] Bonacina C. and Comini G.F, *on a numerical method for the solution of the unsteady state heat conduction equation with temperature dependent parameters*, In Proceedings. XIII Congr. Refrigeration 2: p.369, (1971).
- [2] Cleland A.C and Earle R.L, *Prediction of freezing times for foods in rectangular packages*, J. Food Sci. 44 (4), (1979), p. 958.
- [3] De Michelis A. and Calvelo A., *Freezing time predictions for brick and cylindrical shaped foods*, J. Food Sci. 48 (3), (1983), p.909.
- [4] Remy J., *Les moyens modernes de surgélation*, Revue générale du froid, (1/1985), pp. 21-49.
- [5] Pflug I.J and al., *developing temperate-time curves for objects that can be approximated by a sphere, infinite plate or infinite cylinder*, ASHRAE Trans. 71,1, (1965), p. 79.
- [6] Castaigne F. and Lacroix C., *Méthode simple permettant d'estimer les temps de congélation de produits ayant des formes simples*, Revue générale du froid, (4/1985), pp. 251-262.