

Coefficients d'échanges superficiels pour la réfrigération et la congélation d'aliments immergés dans un coulis de glace

Gonzalo Torres-de María, José Abril, Ana Casp*

Tecnología de Alimentos. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Universidad Pública de Navarra. Campus Arrosadía s/n, E-31006, Pamplona, España

Reçu le 1 décembre 2004; reçu en forme révisée le 3 février 2005; accepté le 14 mars 2005
Available online 4 June 2005

Résumé

Les coulis de glace sont des mélanges de microcristaux de glace en solutions aqueuses incongelables dans les conditions de fonctionnement. Une de leurs applications potentielles dans l'industrie agroalimentaire est la réfrigération et la congélation d'aliments par contact direct. Le transfert par chaleur latente de fusion de la glace permet d'améliorer les coefficients d'échanges superficiels par rapport à ceux obtenus pour des fluides monophasiques conventionnels. Dans cette étude, on a comparé les coefficients obtenus par immersion d'un cylindre de cuivre ($l=0,03$ m, $D=0,02$ m) dans différents milieux monophasiques (saumures) et des coulis de glace. On a analysé l'influence de la fraction massique de glace, de l'agitation, et l'évolution temporelle des coefficients, ainsi que les relations entre les nombres adimensionnels Nu , Re et Pr .

© 2005 Elsevier Ltd and IIR. All rights reserved.

Mots clés : Réfrigération ; Congélation ; Produit alimentaire ; Immersion ; Coulis de glace ; Coefficient de transfert de chaleur

Surface heat transfer coefficients for refrigeration and freezing of foods immersed in an ice slurry

Abstract

Ice slurries are mixtures of microcrystals of ice in aqueous solutions that do not freeze under the operating conditions used. One potential application of ice slurries in the food industry is the chilling and freezing of foods using direct contact. The latent heat of melting of the ice makes it possible to improve the superficial coefficients of exchange with respect to those obtained using conventional single-phase fluids. In this study, the authors compared the coefficients obtained using immersion in a copper cylinder ($l=0.03$ m, $D=0.02$ m) in various single-phase media (brines) with those obtained using ice slurries. They also analysed the influence of the ice mass fraction, stirring, the evolution of coefficients over time, and the relationships between dimensionless numbers (Nu , Re and Pr).

© 2005 Elsevier Ltd and IIR. All rights reserved.

Keywords: Chilling; Freezing; Foodstuff; Immersion; Ice slurry; Heat transfer coefficient

* Corresponding author. Tel.: +34 948 169 139; fax: +34 948 169 893.

E-mail address: acasp@unavarra.es (A. Casp).

Nomenclature

A	surface d'échange du cylindre (m^2)	T_{cg}	température du coulis de glace ($^{\circ}C$)
Bi	nombre de Biot	V_{cu}	volume du cylindre (m^3)
C_1	coefficient de refroidissement (s^{-1}), Eq. (3)	v	vitesse linéaire relative entre le milieu d'immersion et l'échantillon ($m s^{-1}$)
C_p	capacité thermique massique ($J kg^{-1} K^{-1}$)	X_s	fraction massique de NaCl dans le milieu d'immersion ($kg NaCl kg milieu^{-1}$)
D	diamètre du cylindre (m)	X_g	fraction massique de glace ($kg glace kg coulis de glace^{-1}$)
E	variation d'énergie de l'échantillon (J)		
Gr'_{e}	nombre de Grashof généralisé pour le mode statique ($Re=0$)	Lettres grecques	
h	coefficient d'échange superficiel ($W m^{-2}K^{-1}$)	β	coefficient d'expansion volumique du fluide (K^{-1})
J_1	facteur de retard, Eq. (3)	\varnothing	diamètre de la circonférence décrit par l'échantillon dans le réservoir d'immersion (m)
k	indice de consistance du fluide ($Pa s^n$)	λ	conductivité thermique ($W m^{-1} K^{-1}$)
l	hauteur du cylindre (m)	μ	viscosité dynamique ($Pa s$)
Nu	nombre de Nusselt	ρ	masse volumique ($kg m^{-3}$)
n	indice de comportement de l'écoulement	ω	vitesse de rotation du cylindre de cuivre ($tr min^{-1}$)
Pr	nombre de Prandtl	Indices	
Pr'	nombre de Prandtl généralisé	cg	coulis de glace
Pr'_{e}	nombre de Prandtl généralisé pour le mode statique ($Re=0$)	cu	cuivre
q_c	chaleur reçue ou cédée par l'échantillon (J)	e	mode statique
R^2	coefficient de corrélation	f	final
Re	nombre de Reynolds	g	glace
Re'	nombre de Reynolds généralisé	i	initial
t	temps (s)	s	solution (NaCl)
T	température ($^{\circ}C$)		
T_{cu}	température au centre du cylindre ($^{\circ}C$)		
T_{∞}	température du milieu d'immersion ($^{\circ}C$)		

1. Introduction

La réfrigération et la congélation par immersion (RCPI) consistent à immerger un aliment dans un fluide aqueux. En fonction de la présence de glace ou non dans le fluide, on

peut distinguer deux types de fluides: les fluides monophasiques liquides et les fluides diphasiques, formés de cristaux de glace en solutions aqueuses.

Au niveau industriel, l'emploi de mélanges de glace (pilée ou en écailles) et de liquides pour les produits

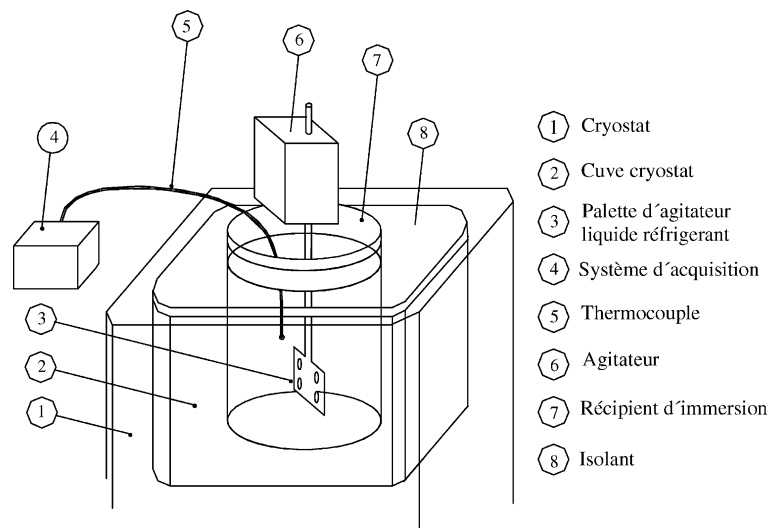


Fig. 1. Dispositif expérimental pour la génération du coulis de glace.

maritimes et pour certaines viandes et légumes en traitement postcueillette existe depuis plusieurs décennies. Récemment, avec le développement de nouvelles techniques de génération de coulis de glace proposées en substitution aux fluides frigorigènes du type CFC et HCFC, les processus d'immersion en mélanges diphasiques ont suscité un nouvel intérêt.

Les coulis de glace sont des mélanges de microcristaux de glace (20–500 μm) en solutions aqueuses incongelables. Ils se différencient des autres mélanges diphasiques (glace pilée ou en écailles dans une saumure ou de l'eau) par la géométrie et la taille des cristaux, ainsi que par le procédé de génération de la glace, qui est souvent un évaporateur à surface raclée. L'utilisation des coulis de glace dans l'industrie agroalimentaire, en raison de leurs propriétés (transfert par chaleur latente provenant du changement d'état de la glace, possibilité de stockage dans des réservoirs et transport en canalisation) est avantageuse.

De nos jours, les études réalisées sur ce sujet sont très rares. La détermination des coefficients de transfert de chaleur par immersion constitue un premier pas vers la connaissance des caractéristiques de transfert de ces fluides. Ces coefficients dépendent de divers facteurs, comme les propriétés thermiques du produit et de son environnement (Dincer, [1]). Ils dépendent de la couche limite qui se forme à la surface du produit, fonction elle-même des paramètres dynamiques du fluide et des

conditions aux limites du produit. L'importante dépendance des transferts de chaleur par rapport à la vitesse ou l'agitation du milieu d'immersion est à l'origine d'une représentation des résultats sous la forme de relations entre des nombres adimensionnels.

En ce qui concerne les saumures formées d'eau et de NaCl, les coefficients d'échange h sont compris entre 300–900 $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ (Cipolletti et al. [2]). Certains auteurs ont proposé d'améliorer ces coefficients en employant des coulis de glace au lieu de fluides monophasiques, en raison du transfert par chaleur latente de fusion des particules de glace à la surface du produit [3–5]. Bartlett [6] a observé, pour certains fluides diphasiques formés de mélanges binaires eau-sucre, un transfert de chaleur jusqu'à deux fois plus rapide qu'en liquide pour la congélation de fraises. Récemment, Fikiin et Fikiin [7] ont indiqué des coefficients de 1000 à 2000 $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ pour la congélation de fruits de petite taille par hydrofluidisation avec un coulis de glace.

Cette étude est consacrée tout d'abord à une comparaison des coefficients d'échange obtenus avec un coulis de glace et une saumure dans des conditions opérationnelles similaires. Par ailleurs, l'influence de certains paramètres du processus sur les coefficients d'échange, comme la fraction massique de glace, l'agitation, et l'évolution temporelle des coefficients, a été étudiée.

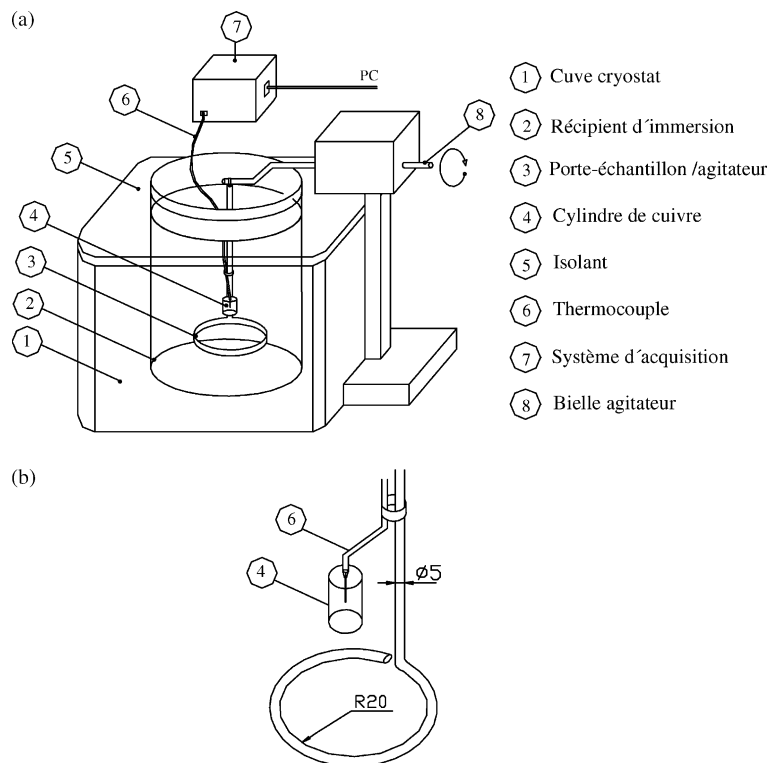


Fig. 2. (a) Dispositif expérimental d'immersion; (b) détail du porte-échantillon/agitateur.

2. Matériels et méthodes

2.1. Préparation des milieux d'immersion

Les milieux d'immersion sont préparés en mélangeant du NaCl de qualité commerciale avec de l'eau courante. La proportion de NaCl est mesurée au moyen d'un réfractomètre portable Atago S28 et d'un conductimètre Crison GLP32.

La fabrication du coulis de glace est réalisée au laboratoire avec un dispositif similaire à celui employé par d'autres auteurs, comme Matsumoto et al. [8] et Lucas et al. [9]. Comme le montre la Fig. 1, le dispositif est constitué d'un récipient (2 l) placé dans la cuve d'un cryostat Thermo Haake C30P, contrôlé par un équipement Thermo Haake Phoenix P1. Le coulis de glace a été obtenu à partir d'un liquide binaire eau-NaCl maintenu en dessous de la courbe du liquidus. Le milieu d'immersion a un système d'agitation variable de 15 à 300 tr min⁻¹ Heidolph RZR. La nucléation des cristaux de glace a été spontanée.

Après la nucléation, la température du cryostat a été réglée pour obtenir une fraction de glace déterminée dans chaque cas. Ce dispositif expérimental a permis de refroidir les saumures et aussi de générer les coulis de glace avec une déviation maximale correspondant à une température de 0,1 °C.

2.2. Détermination des coefficients d'échanges superficiels

Pour déterminer les coefficients d'échanges, on a utilisé un cylindre de cuivre avec un thermocouple du type K, de diamètre 2 mm, implanté au centre du cylindre et connecté à une centrale de mesures AMR, qui enregistre la température toutes les deux secondes. Le cylindre de cuivre, du fait de sa conductivité thermique élevée ($\lambda_{\text{cu}} = 406 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $C_{\text{cu}} = 380 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\rho_{\text{cu}} = 8900 \text{ kg m}^{-3}$) et de sa petite

taille ($l = 0,03 \text{ m}$, $D = 0,02 \text{ m}$), a une résistance thermique interne négligeable ($Bi < 0,1$) par rapport à celle qui correspond aux échanges superficiels. La variation des propriétés thermophysiques du cuivre avec la température a été négligée, comme l'ont déjà fait d'autres auteurs (Verboven et al. [10]).

Le cylindre a été placé sur un porte-échantillon spécifique (Fig. 2(b)), qui réalise également la fonction d'agitateur du milieu d'immersion. Le porte-échantillon, avec le cylindre métallique à une température initiale déterminée, a été placé dans le réservoir d'immersion, rempli de saumure ou de coulis de glace à la température désirée (Fig. 2(a)).

Les essais ont été effectués en mode statique (0 tr min⁻¹) et avec des agitations de 15, 30 et 60 tr min⁻¹. En agitation, le cylindre, en position verticale, décrit une circonférence d'un diamètre de 0,09 m à l'intérieur du réservoir d'immersion (Fig. 3).

Le bilan d'énergie (chaleur absorbée par le milieu égale à la variation d'énergie du cylindre) s'écrit:

$$-hA_{\text{cu}}(T_{\text{cu}} - T_{\infty}) = \rho_{\text{cu}}V_{\text{cu}}C_{p,\text{cu}} \frac{dT_{\text{cu}}}{dt} \quad (1)$$

En intégrant l'Eq. (1) et en substituant à la température dans le cylindre T_{cu} la température réduite T_{cu}^* telle que:

$$T_{\text{cu}}^* = \frac{T_{\text{cu}} - T_{\infty}}{T_{i,\text{cu}} - T_{\infty}} \quad (2)$$

on obtient une évolution exponentielle de T_{cu}^* en fonction du temps, dont le coefficient C_1 permet de calculer (Arce et Sweat, [11]) le coefficient d'échange:

$$T_{\text{cu}}^* = J_1 e^{-\left(\frac{hA_{\text{cu}}}{\rho_{\text{cu}}V_{\text{cu}}C_{p,\text{cu}}}\right)} \quad \text{ou} \quad T_{\text{cu}}^* = J_1 e^{C_1 t} \quad (3)$$

L'analyse des résultats a été effectuée à l'aide du logiciel Statgraphics Plus 5.1. Pour ajuster les mesures, on a employé la méthode décrite par Verboven et al. [10]. Les intervalles de confiance ont été calculés avec une probabilité de 95%.

2.3. Détermination des nombres adimensionnels

Pour étudier les relations entre les nombres adimensionnels à partir des données expérimentales, on a calculé le nombre de Nusselt, le nombre de Reynolds et le nombre de Prandtl définis par:

$$Nu = \frac{hD}{\lambda_{\text{cg}}}, \quad Re = \frac{\rho_{\text{cg}}vD}{\mu_{\text{cg}}}, \quad Pr = \frac{C_{\text{cg}}\mu_{\text{cg}}}{\lambda_{\text{cg}}} \quad (4)$$

Dans les équations précédentes, la vitesse linéaire relative entre le milieu d'immersion et l'échantillon ($v = \pi\varnothing\omega$ avec \varnothing le diamètre de la circonférence décrit par l'échantillon et ω la vitesse de rotation de l'échantillon) a été déterminée, dans chacun des cas, en considérant le mouvement du cylindre de cuivre dans le réservoir d'immersion (Fig. 3).

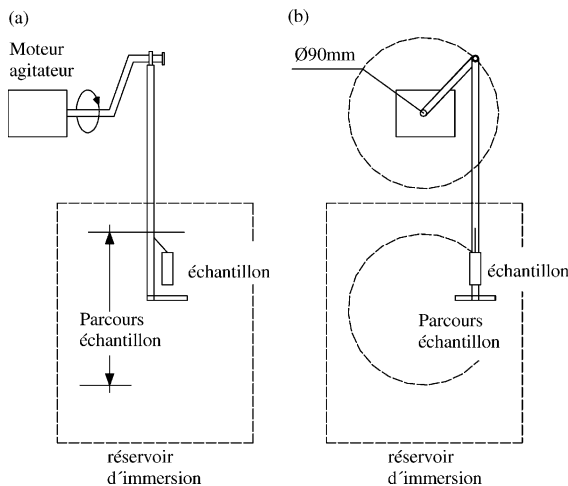


Fig. 3. (a) Vue latérale; (b) vue frontale du mouvement du porte-échantillon/agitateur dans le réservoir d'immersion.

Tableau 1
Propriétés thermophysiques du coulis de glace ($X_{s,i}=0,030$; $X_{s,i}=0,070$)

$X_{s,i}$	T_{cg} (°C)	X_g (kg kg ⁻¹)	λ_{cg} (W m ⁻¹ K ⁻¹)	ρ_{cg} (kg m ⁻³)	μ_{cg} (Pa s)	$C_{p,cg}$ (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	k (Pa s ⁿ)	n
0,030	-2,0	0,14	0,77	1014	0,017	100000	0,008	1,13
	-2,5	0,30	1,05	998	0,046	83300	0,392	0,53
	-3,0	0,41	1,31	988	0,074	66300	0,201	0,73
	-3,5	0,49	1,54	981	0,148	49200	0,477	0,72
	-4,0	0,55	1,75	975	0,210	32200	0,664	0,75
0,070	-5,0	0,14	0,75	1043	0,044	39400	0,123	0,76
	-5,5	0,21	0,84	1038	0,052	35500	0,230	0,62
	-6,0	0,26	0,92	1032	0,076	31600	0,353	0,60
	-7,0	0,34	1,08	1023	0,184	23900	2,074	0,44

Dans le **Tableau 1** sont données les propriétés thermophysiques des coulis de glace utilisés dans cette étude. Elles ont été déterminées à partir d'expressions théorético-expérimentales et des résultats décrits par Torres-de María [12] et Bel et Lallemand [13]. L'influence de la fraction de glace entraîne une variation des propriétés thermophysiques et rhéologiques du coulis de glace, qui influent sur les valeurs des nombres adimensionnels.

Pour des fractions massiques de glace faibles ($X_g < 0,10$), le comportement des coulis de glace est considéré comme newtonien dans la majorité des études de la littérature [12, 13]. Dans ce cas, on peut employer les nombres de Reynolds et de Prandtl (Re et Pr). Pour des fractions massiques supérieures à 0,10, on utilise les nombres de Reynolds et Prandtl généralisés (Re' et Pr') en raison du comportement rhéologique du fluide, qui suit une loi de puissance. On adopte les équations citées par Verboven et al. [10], valables pour des corps sphériques immergés dans des fluides qui suivent des lois rhéologiques de puissance:

$$Re' = \frac{\rho_{cg} v D}{k \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n 2^{n-3} \left(\frac{v}{D} \right)^{n-1}} \quad (5)$$

$$Pr' = \frac{k \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n 2^{n-3} \left(\frac{v}{D} \right)^{n-1} C_{p,cg}}{\lambda_{cg}} \quad (6)$$

Les valeurs de k et n , indices rhéologiques de comportement du fluide, ont été obtenues par Torres-de María [12]; elles proviennent de la caractérisation rhéologique des coulis de glace avec un viscosimètre rotatif, après un ajustement des données expérimentales ($R^2 > 0,97$) avec l'équation d'Ostwald de Waele ($\tau = k\gamma^n$). Avec des

coefficients d'échange élevés, la forme du corps joue un rôle minime et on peut assimiler les cylindres à des sphères (Ghisalberti et Kondjoyan, [14]).

Pendant les essais effectués en mode statique (coulis de glace et cylindre au repos), des corrélations ont été obtenues avec les nombres de Prandtl et de Grashof, puisqu'il n'existe, dans ces conditions, que la convection naturelle. Les nombres sont calculés au moyen des expressions décrites par Baptista et al. [15], où g représente l'accélération gravitationnelle et β le coefficient de dilatation volumique du fluide, pris dans les mêmes conditions que celui correspondant à l'eau dans les conditions d'essais:

$$Pr'_e = \frac{C_{p,cg} \mu_{cg}}{\lambda_{cg}} \quad (7)$$

$$Gr'_e = \frac{D^3 g \beta \rho_{cg}^2 \left(\frac{T_i - T_e}{2} \right)}{\mu_{cg}^2} \quad (8)$$

3. Résultats et discussion

3.1. Comparaison entre les fluides monophasiques et diphasiques

Dans le **Tableau 2** sont donnés les coefficients h obtenus après immersion du cylindre de cuivre dans une saumure et dans un coulis de glace, à la même température. Les coefficients d'échanges obtenus avec le coulis de glace sont supérieurs à ceux trouvés pour la saumure. Pour l'ensemble

Tableau 2

Coefficients d'échanges obtenus pour un cylindre de cuivre immergé dans une solution monophasique ($X_s=0,110$, $X_g=0$) et dans un coulis de glace ($X_{s,i}=0,070$, $X_g=0,32$) à -7 °C

Milieu d'immersion	Régime	$T_{i,cu}$ (°C)	$T_{f,cu}$ (°C)	J_1	C_1 (s ⁻¹)	h (W m ⁻² K ⁻¹)	R^2
Saumure	Statique	30,0	-6,9	0,41	0,016	204 ± 83	0,98
	30 tr min ⁻¹	30,0	-6,9	1,65	0,083	1056 ± 97	0,99
Coulis de glace	Statique	30,0	-6,9	0,38	0,027	367 ± 69	0,99
	30 tr min ⁻¹	30,0	-6,9	1,12	0,161	1969 ± 172	0,98

Tableau 3

Effet de l'agitation sur les coefficients d'échanges. Cylindre immergé dans une saumure ($X_s=0,050$, $X_g=0$) et dans un coulis de glace ($X_{s,i}=0,030$, $X_g=0,30$) à $-2,5$ °C pour différentes agitations

Agitation (tr min ⁻¹)	h (W m ⁻² K ⁻¹)	
	Saumure	Coulis de glace
0	220 ± 77	355 ± 49
15	834 ± 131	1873 ± 193
30	1002 ± 116	2237 ± 157
60	1261 ± 157	2692 ± 159

des essais effectués, selon l'agitation du fluide et ses propriétés, les coefficients peuvent être de l'ordre de 1,5 à 2,5 fois supérieurs à ceux obtenus avec des fluides monophasiques.

3.2. Effet de l'agitation du coulis de glace

Dans le Tableau 3 sont données les différences entre les coefficients obtenus pour les modes statique et avec agitation, en employant une saumure et un coulis de glace. Dans les deux cas, les coefficients augmentent avec l'agitation. Cependant, l'effet de l'agitation conduit à des coefficients d'échange pour l'immersion dans le coulis de glace plus élevés. Ainsi, pour l'immersion dans le coulis à $-2,5$ °C, la différence entre les coefficients d'échange au repos (355 ± 49 W m² K⁻¹) et en agitation à 15 tr min⁻¹ (1873 ± 193 W m² K⁻¹) est plus grande. Pour la saumure, cette différence est moindre; les coefficients augmentent de 220 ± 77 W m² K⁻¹ (0 tr min⁻¹) à 834 ± 131 W m² K⁻¹ (15 tr min⁻¹).

3.3. Effet de la fraction de glace

D'une manière générale, on peut affirmer que, pour de faibles fractions massiques de glace, les coefficients d'échanges superficiels augmentent avec la fraction massique de glace présente dans le fluide. Cependant, cette augmentation se produit jusqu'à une fraction de glace

maximale à partir de laquelle les coefficients d'échange diminuent.

L'effet de la fraction massique de glace sur les coefficients d'échange obtenus pour un coulis de glace formé à partir de solutions initiales $X_{s,i}=0,03$, $X_{s,i}=0,07$ et $X_{s,i}=0,174$ est donné dans les Tableaux 4 et 5.

En agitation (Tableau 4), pour des fractions de glace élevées ($0,35 < X_g < 0,50$), selon la concentration de NaCl de la solution initiale, les coefficients d'échange h sont égaux ou inférieurs à ceux obtenus pour des fractions de glace moyennes. Cette baisse du transfert de chaleur peut être due à l'augmentation des transferts de chaleur conductifs, en raison de la grande fraction de glace. Par ailleurs, la fraction maximale de glace à partir de laquelle les nombres de Nusselt diminuent dépend de la solution initiale (pour les coulis de glace formés à partir de faibles concentrations, la fraction maximale de glace est plus grande que pour les coulis de glace formés pour des solutions initiales plus concentrées).

En statique, les coefficients d'échange augmentent également avec la fraction massique de glace (Tableau 5).

3.4. Evolution temporelle du coefficient d'échange h

Le Tableau 6 donne les coefficients d'échange pour des coulis de glace maintenus dans le dispositif expérimental adiabatique pendant une heure, au repos. On observe une diminution des coefficients d'échange de 19% approximativement par rapport à ceux obtenus immédiatement après la génération du coulis. Cela peut être dû aux changements de la distribution spatiale des cristaux de glace dans le réservoir d'immersion, en particulier aux phénomènes de stratification, décrits par d'autres auteurs (Bel et Lallemand, [16]).

3.5. Analyse des nombres adimensionnels en mode statique

En mode statique, les coefficients d'échange varient de 283 à 408 W m² K⁻¹, ce qui correspond approximativement aux valeurs du nombre de Nusselt de 3,7 à 9. L'équation employée est la suivante:

$$Nu_e = a + b(Pr_e)^i (Gr_e)^j \quad (9)$$

Compte tenu du nombre d'essais et du fait que les

Tableau 4

Effet de la fraction massique de glace (X_g). Coefficients d'échanges obtenus avec trois coulis de glace formés à partir de diverses solutions initiales, en mode agitation (30 tr min⁻¹)

$X_{s,i}=0,030$			$X_{s,i}=0,070$			$X_{s,i}=0,174$		
T_{cg} (°C)	X_g (kg kg ⁻¹)	h (W m ⁻² K ⁻¹)	T_{cg} (°C)	X_g (kg kg ⁻¹)	h (W m ⁻² K ⁻¹)	T_{cg} (°C)	X_g (kg kg ⁻¹)	h (W m ⁻² K ⁻¹)
-2,0	0,15	1814 ± 54	-5,0	0,14	1765 ± 66	-15,5	0,11	1718 ± 97
-2,5	0,30	2237 ± 157	-5,5	0,20	1927 ± 110	-17,0	0,16	1969 ± 134
-3,0	0,41	2689 ± 172	-6,0	0,24	2291 ± 122	-18,0	0,19	1843 ± 118
-	0,49	2663 ± 235	-7,0	0,32	1969 ± 172	-	-	-
-	0,55	2484 ± 157	-	-	-	-	-	-

Tableau 5

Effet de la fraction massique de glace (X_g). Coefficients d'échanges obtenus avec trois coulis de glace formés à partir de solutions initiales différentes, en mode statique (0 tr min^{-1})

$X_{s,i}=0,030$			$X_{s,i}=0,070$			$X_{s,i}=0,174$		
T_{cg} (°C)	X_g (kg kg ⁻¹)	h (W m ⁻² K ⁻¹)	T_{cg} (°C)	X_g (kg kg ⁻¹)	h (W m ⁻² °C ⁻¹)	T_{cg} (°C)	X_g (kg kg ⁻¹)	h (W m ⁻² K ⁻¹)
-2,0	0,15	310 ± 62	-5,0	0,14	283 ± 39	-15,5	0,11	301 ± 67
-2,5	0,30	355 ± 49	-5,5	0,20	380 ± 62	-17,0	0,16	295 ± 43
-3,0	0,41	386 ± 76	-6,0	0,24	393 ± 77	-18,0	0,19	316 ± 78
-3,5	0,49	405 ± 57	-7,0	0,32	367 ± 69	-	-	-
-4,0	0,55	408 ± 98	-	-	-	-	-	-

exposants i et j ne peuvent pas être déterminés correctement sans utiliser différentes tailles d'échantillons, on a pris pour i et j , respectivement les valeurs $1/3$ et $1/2$, comme c'est l'usage dans ce type d'équations (Baptista et al. [15]). Les coefficients a et b ont été obtenus par régression linéaire par la corrélation suivante:

$$Nu_e = 3,30 + 0,028(Pr'_e)^{1/3}(Gr'_e)^{1/2} \quad (R^2 = 0,93) \quad (10)$$

avec $2207 < Pr'_e < 5014$ et $6 < Gr'_e < 161$. La Fig. 4 montre un bon accord entre les valeurs prédites et les valeurs expérimentales.

3.6. Analyse des nombres adimensionnels avec mouvement du cylindre

Sur la Fig. 5 le nombre de Nusselt (Nu) est représenté en fonction du nombre de Reynolds généralisé (Re') pour des échantillons immergés dans le coulis de glace ($0,030 < X_{s,i} < 0,070$, $10 < Re' < 110$).

Pour décrire le procédé sur un domaine plus grand, en incluant les nombres adimensionnels pour des conditions statiques ($Re' = 0$), on emploie la corrélation proposée par Baptista et al. [15]:

$$Nu = Nu_e + a(Pr')^b(Re')^c \quad (11)$$

La relation entre le nombre de Nusselt et les nombres de Reynolds et de Prandtl généralisés, sur le domaine $0 \leq Re' < 110$, pour des coulis de glace formés à partir de solutions

Tableau 6

Effet du temps de stockage du coulis de glace sur h pour un cylindre immergé (à $t=0$ min et à $t=60$ min) dans deux coulis de glace de concentration initiale $X_{s,i}=0,030$ et $X_{s,i}=0,070$, nouvellement formés et 1 h après la génération, sans perte de chaleur

$X_{s,i}$ (kg kg ⁻¹)	T_{cg} (°C)	X_g (kg kg ⁻¹)	h (W m ⁻² K ⁻¹)	
			$t=0$ min	$t=60$ min
0,030	-2,5	0,30	2237 ± 157	1749 ± 156
0,030	-3,0	0,41	2689 ± 172	2269 ± 204
0,070	-5,0	0,14	1765 ± 66	1375 ± 137
0,070	-6,0	0,24	2291 ± 122	1893 ± 79
0,070	-7,0	0,32	1969 ± 172	1721 ± 112

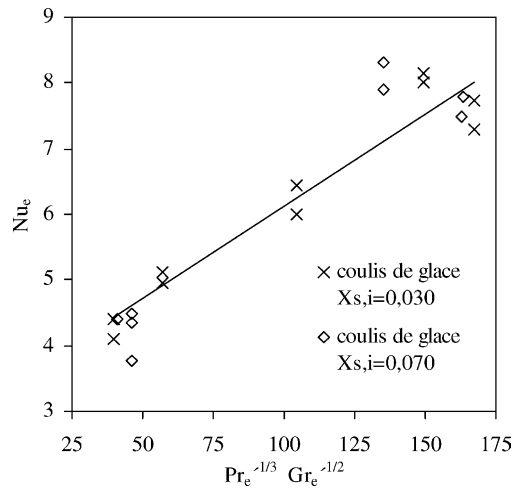


Fig. 4. Variation du nombre de Nusselt avec les nombres de Prandtl et de Grashof en mode statique.

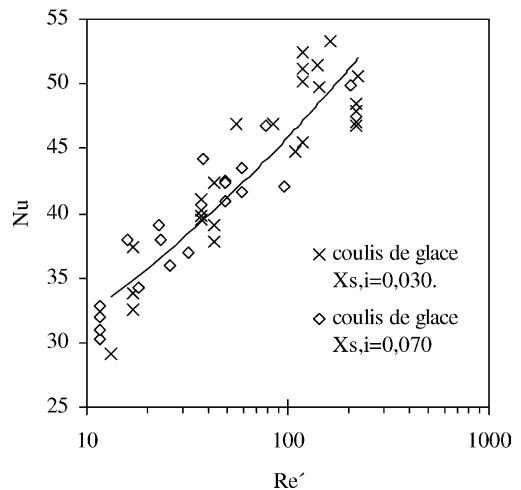


Fig. 5. Relation entre le nombre de Nusselt (Nu) et le nombre de Reynolds généralisé (Re').

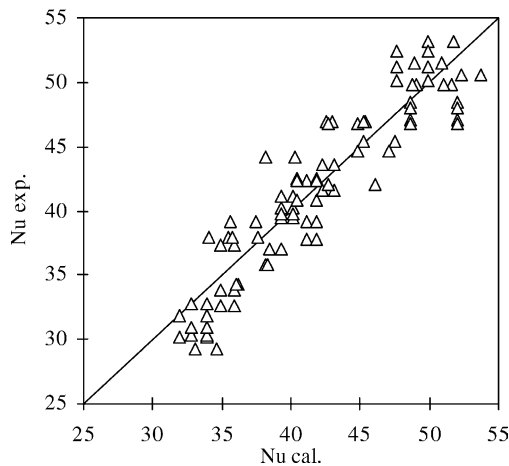


Fig. 6. Relation entre les nombres de Nusselt calculés et expérimentaux en employant l'Eq. (12).

$0,030 < X_{s,i} < 0,070$, avec des fractions massiques de glace $0,10 < X_g < 0,50$, est la suivante:

$$Nu = Nu_e + 11,62(Pr')^{0,065}(Re')^{0,142} \quad (R^2 = 0,89) \quad (12)$$

La Fig. 6 montre un bon accord entre les valeurs prédites par l'Eq. (12) et les valeurs expérimentales.

4. Conclusions

Ce travail a permis d'obtenir des premiers résultats concernant les coefficients d'échanges superficiels de petits produits cylindriques immergés dans des coulis de glace, ainsi que les principaux facteurs qui influent sur le processus.

Les coefficients d'échanges varient entre 200 et $450 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ au repos, et entre 1600 et $2900 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ en agitation. On a observé l'influence de l'agitation, ainsi que l'évolution temporelle des coefficients obtenus après repos du coulis de glace pendant une heure et sans perte de chaleur.

Les coefficients dépendent de la fraction massique de glace existante dans le coulis de glace. Pour des fractions de glace faibles, les coefficients d'échange augmentent avec la fraction de glace, mais il existe une fraction de glace maximale ($0,35 < X_g < 0,5$) à partir de laquelle les coefficients n'augmentent plus. Au-delà de cette valeur, ces coefficients se dégradent.

Enfin, on a proposé des corrélations basées sur des nombres adimensionnels, valables pour la RCPI de petits échantillons cylindriques dans un coulis de glace en conditions statiques et avec agitation.

References

- [1] I. Dincer, Surface heat transfer coefficients of cylindrical food products cooled with water, *Trans ASME* 116 (1994) 764–767.
- [2] J.C. Cipoletti, G.H. Robertson, D.F. Farkas, Freezing of vegetables by direct contact with aqueous solution of ethanol and sodium chloride, *J Food Sci* 42 (4) (1977) 911–916.
- [3] P. Rivet, Refroidissement des denrées dans un mélange diphasique, *Rev Gén Froid* 86 (968) (1996) 43–47.
- [4] S.F. Pearson, J. Brown, Use of pumpable ice to minimise salt uptake during immersion freezing, Proceedings of the conference IIR in 'Natural Working Fluids' Oslo, Norway, 1998, p. 712–22.
- [5] T. Lucas, A.L. Raoult-Wack, Immersion and freezing in aqueous refrigerating media: review and future trends, *Int J Refrigeration* 21 (6) (1998) 419–429.
- [6] L.H. Bartlett, Quick freezing of foodstuffs. US Patent, 2.418.745; 1947.
- [7] K.A. Fikiin, A.G. Fikiin, Novel cost-effective ice-slurry based technology for individual quick freezing of foods by hydrofluidisation, Proceedings of the 20th international congress on refrigeration, Sydney, Australia, vol. IV, 1999 [Paper 271].
- [8] K. Matsumoto, Y. Shiokawa, M. Okada, T. Kawagoe, C. Kang, Ice storage system using water–oil mixture. Discussion about influence of additive on ice formation process, *Int J Refrigeration* 25 (2002) 11–18.
- [9] T. Lucas, C. Favier, J.M. Chourot, A.L. Raoult-Wack, R.B. Aïm, Immersion chilling and freezing of a porous medium, *Int J Food Sci Technol* 35 (6) (2000) 583–598.
- [10] P. Verboven, N. Scheerlinck, B. Nicolai, Surface heat transfer coefficients to stationary spherical particles in an experimental unit for hydrofluidisation freezing of individual foods, *Int J Refrigeration* 26 (2003) 328–336.
- [11] J. Arce, V.E. Sweat, Survey of published heat transfer coefficients encountered in food refrigeration processes, *Trans ASHRAE* 86 (1980) 235–260.
- [12] G. Torres-de María, Aplicación de hielos líquidos a procesos de refrigeración y congelación de alimentos. Tesis Doctoral. Universitat de Lleida: Lleida, España; 2005.
- [13] O. Bel, A. Lallemand, Study of a two-phase secondary refrigerant. 1: intrinsic thermophysical properties of an ice slurry, *Int J Refrigeration* 22 (1999) 164–174.
- [14] L. Ghisalberti, A. Kondjoyan, Convective heat transfer coefficients between air flow and a short cylinder. Effect of air velocity and turbulence. Effect of body shape, dimensions and position in the flow, *J Food Eng* 42 (1) (1999) 33–44.
- [15] P.N. Baptista, F.A.R. Oliveira, J.C. Oliveira, S.K. Sastry, Dimensionless analysis of fluid-to-particle heat transfer coefficients, *J Food Eng* 31 (1997) 199–218.
- [16] O. Bel, A. Lallemand, Study of a two-phase secondary refrigerant. 2: experimental analysis of thermal and rheological behaviour, *Int J Refrigeration* 22 (1999) 175–187.