

Note technique sur les technologies du froid

Les coulis de glace : une technologie prometteuse

Depuis des siècles, la glace est utilisée efficacement pour la conservation des denrées à des températures voisines de 0°C. Utiliser de la glace en lieu et place de l'eau glacée permet de diviser la taille des réservoirs de stockage par 2 à 10, selon la température de fonctionnement du système. L'explication de ce phénomène réside dans l'utilisation de la chaleur latente de changement de phase de l'eau qui est très élevée. Pour un corps pur, sous pression constante, à la température de congélation, une grande quantité d'énergie est exigée pour former une structure cristalline régulière, correspondant à la phase solide. Dans le processus opposé de la fusion, les cristaux disparaissent et l'énergie est libérée à cette même température, appelée température de fusion. Pour des températures différentes de 0°C, les matériaux à changement de phase (PCM – Phase Change Materials) peuvent être employés. Pour la plupart des applications techniques, ce sont des mélanges qui sont utilisés. Ceux-ci engendrent un glissement de température (transition continue) pendant le changement de phase.

Si un PCM est finement dispersé dans un fluide porteur, on obtient un coulis à changement de phase. Les particules doivent être stables et ne pas produire, sous l'effet de la poussée, de phénomènes de stratification marqués dans le système. Les coulis à changement de phase peuvent être des micro-émulsions, des paraffines à forme stable, des clathrates, des coulis à changement de phase micro-encapsulée, etc.¹ En avril 2003, en Suisse, une conférence internationale et un forum professionnel étaient organisés sur les thèmes nouveaux des PCM et du stockage d'énergie utilisant ces matériaux.² Pour ce type de stockage d'énergie, les PCM – du fait d'une densité d'énergie thermique élevée et d'une température stable due au changement de phase – sont aussi utilisés comme médiums pour le transport de la chaleur ou du froid. Les coulis de glace sont les substances les plus anciennes et les plus généralement utilisées dans le groupe des coulis à changement de phase. Cette note technique expose brièvement l'état de l'art de cette technologie prometteuse.

Définitions

Dans l'Antiquité, pour refroidir leurs aliments, les Romains utilisaient des coulis de glace naturels, par exemple les mélanges neige-eau, la glace pilée, la glace en écailles, etc. Au siècle dernier, les coulis de glace furent créés artificiellement. Initialement, il s'agissait d'eau avec de grandes particules de glace dont le diamètre caractéristique allait de un à plusieurs centimètres. Ces coulis étaient principalement utilisés pour refroidir les mines de charbon, d'argent ou d'or. La production de coulis de glace à cristaux fins a alors permis à cette technique d'être appliquée dans des systèmes de plus petite taille, par exemple les meubles de vente dans les supermarchés (voir la *Figure 1*).

Il est difficile de définir les "coulis de glace". Ils peuvent cependant être classifiés en utilisant les définitions suivantes³ :

Définition 1 : Un coulis de glace est une substance qui se compose de particules solides de glace dans un liquide formant ainsi une suspension diphasique.

Définition 2 : Un coulis de glace à cristaux fins est une substance caractérisée par des particules de diamètre caractéristique moyen inférieur ou égal à 1 mm.

La définition 2 est un peu arbitraire, mais tout de même très utile. Cette note technique traite seulement des coulis de glace à cristaux fins, fabriqués par exemple à l'aide d'un générateur de coulis de glace de type racleur. Avec cette méthode, les particules de glace obtenues ont un diamètre caractéristique d'environ 200 µm.

Application dans les systèmes frigorifiques et avantages vis-à-vis de l'environnement

L'expérience montre que les systèmes conventionnels à évaporation directe sont habituellement peu coûteux et sont techniquement très fiables. Cependant, ils emploient le même fluide – le frigorigène – pour produire et transporter le froid de l'unité frigorifique centrale aux postes d'utilisation (par exemple, les meubles de vente). Par conséquent, ces systèmes contiennent des charges importantes de frigorigène et, dans le cas de fuites permanentes ou accidentelles, peuvent engendrer des pertes élevées avec d'importantes conséquences pour l'environnement. En outre, des charges importantes de frigorigènes génèrent des frais plus élevés, car les nouveaux frigorigènes utilisés pour remplacer les CFC et HCFC sont plus coûteux.

Dans les systèmes indirects, la production du froid et son transport sont séparés. Le froid est transféré du circuit primaire au circuit secondaire par un échangeur de chaleur. Les systèmes indirects facilitent l'utilisation de frigorigènes tels que l'ammoniac (R-717) ou le propane (R-290). Un grand nombre de fluides sont disponibles et utilisés comme « frigoporteurs liquides ». L'utilisation de coulis de glace constitue un progrès dans les systèmes indirects puisque le changement de phase permet, pour une puissance donnée, une réduction du débit massique si on le compare au débit nécessaire avec un frigoporteur liquide.

Les difficultés liées à la recherche de frigorigènes de substitution aux CFC et HCFC, progressivement interdits, ont favorisé le développement de la technologie des coulis de glace.

Méthodes de production

Actuellement, les techniques de production de coulis de glace les plus utilisées sont de type mécanique. En général, le frigorigène est évaporé dans un évaporateur cylindrique à double paroi. Au niveau structurel, le mélange de l'eau et d'un additif provoque la formation de cristaux de glace sur la paroi ; ceux-ci sont ensuite enlevés mécaniquement. Lorsque les cristaux tombent dans le liquide, le nombre de particules de glace par unité de volume – c'est-à-dire la concentration en glace – augmente. Des générateurs mécaniques de type racleur ont fait leur apparition sur le marché et sont maintenant largement utilisés en laboratoire ainsi que dans certaines installations. Ils sont équipés de :

- lames rotatives
- tiges racleuses rotatives (voir la *Figure 2*)
- brosses rotatives
- vis d'Archimède

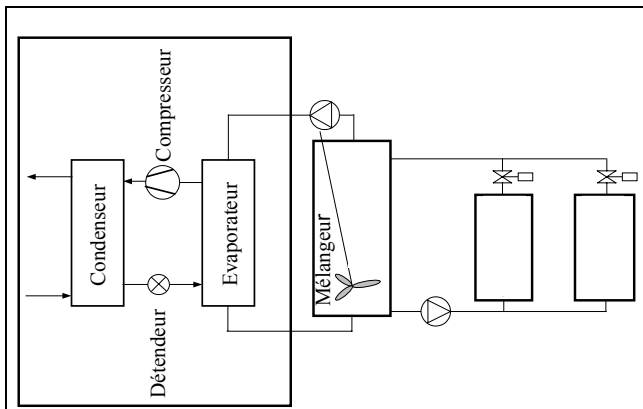


Figure 1. Schéma d'un système à coulis de glace et des postes utilisateurs, par exemple dans un supermarché. La partie gauche représente le générateur de coulis de glace

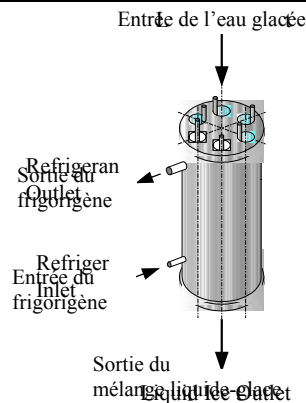


Figure 2. Le principe d'un générateur de coulis de glace à plaques rotatives permet d'obtenir une vitesse de production de glace élevée

D'autres types de générateurs de coulis de glace sont à l'étude :

- générateurs de type écoulement à vortex (les remous liquides turbulents enlèvent les particules de glace des surfaces traitées spécialement pour être peu adhésives)
- générateurs de type à injection directe ou à échange de chaleur direct (le frigorigène est directement injecté dans l'eau)
- générateur à lit fluidisé (l'écoulement entraîne des sphères en acier ou en verre qui, en heurtant les parois, décollent les cristaux de glace)
- générateurs utilisant de l'eau en surfusion avec différents types d'initiation de la nucléation :
 - par diminution de la quantité de mouvement (écoulement perpendiculaire à une paroi froide)
 - par champ ultrasonique
 - par nucléation de bulles
- générateurs de glace sous vide (la pression est abaissée jusqu'au point triple de l'eau)
- générateur de coulis de glace par raclage thermo-hydro-mécanique.

Avantages de la technologie des coulis de glace

Les avantages potentiels des systèmes à coulis de glace énumérés dans cette section restent valables lorsqu'on compare ces systèmes aux systèmes à évaporation directe et/ou aux systèmes frigorifiques indirects utilisant des saumures comme frigoporteur :

- puissance frigorifique élevée du fait de l'utilisation de la chaleur latente
- diamètres de canalisations plus faibles (A)
- consommation énergétique des pompes plus faible (B)
- les expérimentations menées tendent à prouver que la "qualité" du froid produit par les systèmes de coulis de glace est améliorée : meilleure stabilité de la température, gestion plus simple de l'humidité et du givrage/dégivrage...
- associée à un stockage d'énergie, la capacité thermique élevée du système permet de supporter des coupures d'électricité de courte durée
- possibilité de profiter d'une électricité moins coûteuse et d'une pression de condensation plus basse durant la nuit
- sécurité accrue grâce au stockage de froid dans des réservoirs
- plus faibles quantités de frigorigène dans les circuits primaires
- si la durée des besoins de refroidissement d'un système existant nécessite d'être étendue, la puissance électrique n'a pas besoin d'être augmentée, puisque la production de froid peut être prolongée sur 24 heures
- la puissance frigorifique disponible en période de pointe est bien plus importante dans un système à coulis de glace que dans un système de stockage conventionnel (par exemple bacs de glace).

Le concepteur du système peut choisir entre (A) ou (B) ou tirer partiellement profit de chacun des deux. Des coefficients élevés de transfert de chaleur sont possibles car les particules de glace sont très finement dispersées dans le liquide. La *Figure 3* montre des particules de glace dans un coulis de glace et la *Figure 4* la surface des particules de glace pour un kilogramme de coulis de glace.

Inconvénients et limites

Les systèmes à coulis de glace présentent également quelques inconvénients significatifs, énumérés ci-après :

- nécessité d'un échangeur de chaleur supplémentaire entre le système frigorifique primaire et le système secondaire
- nécessité d'une pompe supplémentaire
- consommation d'énergie supplémentaire par la pompe pour alimenter le réservoir de stockage et faire fonctionner le dispositif de mélange
- nécessité d'un système supplémentaire pour contrôler et suivre la qualité du coulis de glace
- inadaptés au conditionnement d'air sauf lorsque l'économie offerte par cette technologie compense la contrainte thermodynamique due au refroidissement en dessous de 0°C pour assurer un refroidissement à 12-14°C seulement
- les systèmes glace-eau sont les plus avantageux aux températures proches du point de congélation de l'eau.

Les deux derniers points cités ont récemment mené au développement d'autres PCM, par exemple des paraffines. Avec de telles substances, le point de fusion peut être continuellement ajusté aux exigences dictées par l'application spécifique.

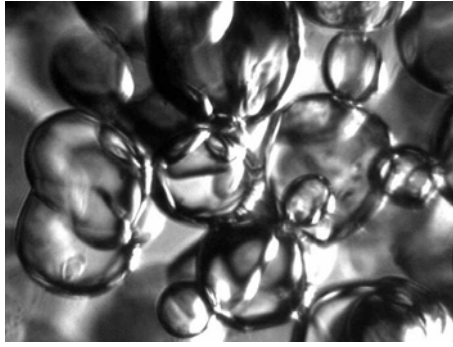


Figure 3. Photographie microscopique d'un coulis de glace.³ Après leur formation, la taille des particules de glace augmente légèrement en fonction du temps, ce qui mène à une évolution des propriétés physiques également en fonction du temps

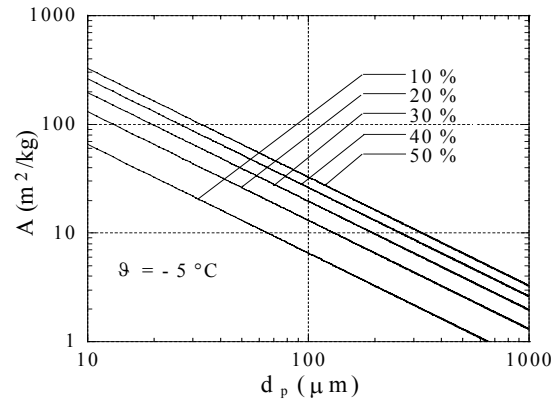


Figure 4. Surface totale A de toutes les particules de glace dans un kilogramme de coulis de glace, pour différentes valeurs de la fraction massique de glace. Ces résultats s'appliquent aux particules sphériques d'un diamètre d_p

Applications actuelles

Les systèmes à coulis de glace peuvent être utilisés pour les applications frigorifiques dans les secteurs suivants :

- supermarchés
- laiteries et fromageries
- brasseries
- refroidissement rapide de produits alimentaires
- refroidissement des avions dans les aéroports (transport du froid sur de longues distances vers les lieux de stationnement)
- refroidissement des parcs pharmaceutiques (analogues aux technoparcs, mais consacrés à la recherche pharmaceutique)
- immersion directe des produits alimentaires (par exemple les crevettes)
- stockage du froid dans l'industrie agroalimentaire, le conditionnement d'air et les réseaux urbains de distribution de froid

Cette liste d'exemples est loin d'être exhaustive.

Possibles applications dans le futur

Des applications sont attendues dans les domaines suivants :

- production de matières plastiques : la stabilité de la température conduit à des profils de température plus homogènes dans les équipements d'extrusion plastique, augmentant ainsi la qualité du produit.
- refroidissement pour les procédés chimiques
- arrêt immédiat d'un procédé chimique par injection directe de coulis de glace dans le réacteur de manière à absorber le plus de chaleur possible, pour des raisons de sécurité
- mélange du béton avec un coulis de glace d'une quantité telle qu'après la fusion des particules de glace, la masse d'eau ajoutée au béton est exactement celle désirée. La chaleur latente sera utilisée pour absorber la chaleur de réaction. En particulier, dans la construction de routes et de tunnels ferroviaires, le système de refroidissement pourrait ainsi être de taille plus réduite ou même inutile.

Le Groupe de travail de l'IIF sur les coulis de glace, créé en 1998, a organisé cinq ateliers et publié les comptes rendus des communications. Ces contributions couvrent tous les sujets importants dont les recherches doivent être poursuivies afin de permettre le développement de cette technologie : notamment les propriétés physiques des coulis de glace et leur comportement en fonction du temps, la dynamique des fluides (par exemple les calculs de chute de pression dans les tuyauteries), le transfert de chaleur (fonctions de Nusselt) pour les écoulements laminaires et turbulents, la production de glace, le stockage, les mélanges, les tuyauteries, etc. Un numéro spécial de la *Revue Internationale du Froid* sur les coulis de glace sera publié en 2004. Toutes les connaissances pratiques et utiles disponibles seront rassemblées dans un *Manuel de l'IIF sur les coulis de glace*, à paraître en 2005.

Conclusion

Les coulis de glace constituent indiscutablement une technologie prometteuse qui doit être encouragée en raison de ses nombreux avantages en termes d'économies d'énergie et d'impact sur l'environnement notamment.

Il faut intensifier les travaux de recherche et développement, surtout sur les techniques de production des coulis de glace efficaces, fiables et économiques et sur les propriétés thermophysiques et les techniques de mesure afin d'ouvrir cette technologie à un éventail d'applications plus large encore.⁵

Références

1. Inaba H. et al. New Challenge in Advanced Thermal Energy Transportation Using Functionally, Thermal Fluids, *Int. J. Therm. Sci.*, 39, 991-1003, 2000.
2. Proceedings of the *Phase Change Material and Slurry Scientific Conference and Business Forum*, Editors Egolf P.W., Sari O. Yverdon-les-Bains, Switzerland, April 23-26, 2003.
3. Egolf P.W., Sari O. A Review from Physical Properties of Ice Slurries to Industrial Ice Slurry Applications. *Proceedings of the Phase Change Material and Slurry Scientific Conference and Business Forum*, 15-25, Yverdon-les-Bains, Switzerland, April 23-26, 2003.
4. Brühlmeier J, Egolf PW. Flüssigeis - ein neuer Kälteträger. Booklet printed in the framework of a special prize donated by the Swiss Bank Association (UBS), 1996.
5. Granryd E. Perspectives on ice slurries, *Proceedings of the Fifth IIR Workshop on Ice Slurries*, Stockholm, Sweden, 2002.

Cette note technique a été préparée par Peter W. Egolf, ancien Président du Groupe de travail de l'IIF sur les coulis de glace et actuel Président du groupe de travail de l'IIF sur le froid magnétique. Elle a fait l'objet d'une relecture par des experts de l'IIF du monde entier.