

Etude des performances d'une boucle frigorifique de coulis de glace.

Ikram EL ABBASSI, Jean-Pierre BEDECARRATS, Jean CASTAING-LASVIGNOTTES*.

Laboratoire de Thermique, Energétique et Procédés (LaTEP), Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA), BP 1155 – 64013 Pau, France.

*(auteur correspondant : jean.castaing@univ-pau.fr)

Résumé - La prise en compte des contraintes environnementales dans la production, le transport et la distribution du froid ont conduit à repenser les habitudes de dimensionnement de ces équipements. Le confinement des installations a, en particulier, participé au développement de fluides secondaires tels que les coulis de glace pour stocker, transporter et distribuer le froid. Nous présentons un modèle de simulation d'un réseau de distribution de froid par fluide frigoporteur monophasique et diphasique. Dans un premier temps l'un des objectifs est d'étudier la variation de la température à l'entrée de l'échangeur et la variation de la puissance de pompage en fonction des différents paramètres de l'installation.

Nomenclature

d	diamètre, m
f	facteur de frottement
h	enthalpie massique, J/kg
L	longueur, m
\dot{m}	débit massique, kg/s
T	température, K
\dot{P}	puissance, W
ΔP	pertes de pression, Pa
W	fraction
\dot{Q}	flux de chaleur, W
V	vitesse, m/s

Symboles grecs

ρ masse volumique, kg/m^3

η_{pompe} rendement pompe

Indices et exposants

app application

e,s entrée, sortie

eq équivalent

d diphasique

f frigoporteur

g glace

v volumique

1. Introduction

Les dernières avancées technologiques dans le domaine de la production, le transport et la distribution du froid consistent à intégrer un circuit intermédiaire entre la machine frigorifique et le dispositif utilisateur du froid parcouru par un fluide frigoporteur [1]. Ce fluide peut être de deux natures : monophasique ou diphasique. Cette technique permet de transporter l'énergie frigorifique en grande quantité sous forme latente dans le cas des coulis de glace, qui sont des fluides frigoporteurs diphasiques constitués de particules de glace dispersées dans de l'eau ou des solutions aqueuses. Ils possèdent de nombreux avantages (rendement élevé grâce à la chaleur latente de fusion, incidence écologique nulle, recours à des équipements standards...). Du point de vue de ses potentialités énergétiques, de nombreux travaux [2, 3] ont démontré l'intérêt de son utilisation, en terme de densité énergétique volumique notamment et des opportunités de stockage de froid qui en découlent.

Cependant, peu de travaux ont quantifié les avantages énergétiques et économiques (notamment en matière de fonctionnement) d'une installation dans son intégralité, c'est-à-dire en considérant dans une même étude, à la fois, la production de froid, son stockage, son

transport et son utilisation en régime permanent et a fortiori lors des évolutions transitoires de stockages/ déstockages.

L'étude préliminaire présentée dans cet article se limitera ici à comparer l'utilisation d'un fluide frigoporteur monophasique ou diphasique dans une installation de distribution de froid indirect, sans stockage et en régime permanent et à la mise en place de la méthodologie correspondante.

2. Description du modèle

La Figure 1 représente le procédé que nous allons étudier en détail dans ce travail. Il s'agit d'une installation de distribution du froid. Ce procédé est destiné à absorber une quantité de chaleur \dot{Q}_{app} à une température d'application T_{app} donnée.

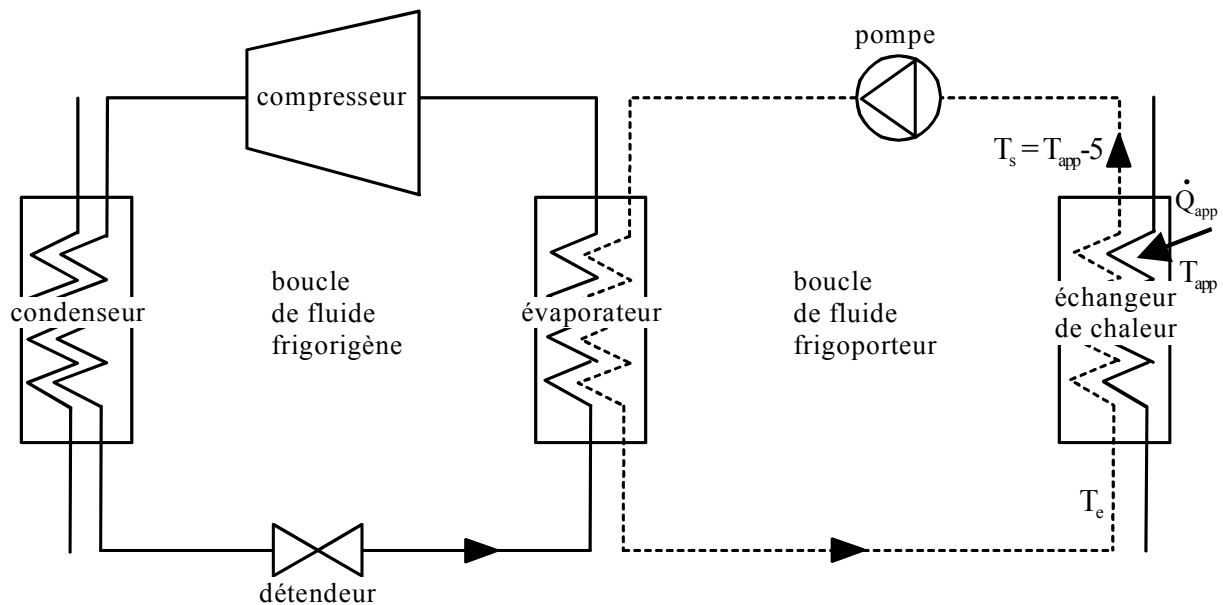


Figure 1 : Représentation schématique du procédé de production et de distribution du froid.

Le procédé est composé essentiellement de deux boucles :

- La boucle de production du froid, constituée ici d'une machine frigorifique à compression mécanique de vapeurs.
- La boucle de distribution du froid constituée d'une pompe et de deux échangeurs de chaleur : un qui reçoit la production frigorifique provenant de l'évaporateur, l'autre qui reçoit la quantité de chaleur \dot{Q}_{app} de l'application correspondant à la charge frigorifique selon :

$$\dot{Q}_{app} = \dot{m}_f \cdot (h_{f,s} - h_{f,e}) \quad (1)$$

La puissance absorbée par la pompe se calcule d'après l'équation suivante :

$$\dot{P}_{pompe} = \frac{(\Delta P_e + \Delta P_s) \cdot \dot{m}_f}{\rho_s \cdot \eta_{pompe}} \quad (2)$$

où η_{pompe} est le rendement global de pompage, ΔP_e et ΔP_s sont respectivement les pertes de charges à l'entrée et à la sortie de l'échangeur (circuit aller et circuit retour). Elles sont calculées par la relation suivante :

$$\Delta P_{e,s} = \frac{f_{e,s} \cdot \rho_{e,s} \cdot V_{e,s}^2 \cdot L_{e,s}}{2 \cdot d} \quad (3)$$

où d et $L_{e,s}$ sont respectivement le diamètre et la longueur du réseau de distribution.

Le facteur de frottement f est différent suivant le régime d'écoulement (caractérisé par le nombre de Reynolds Re) et la nature du fluide.

Dans le cas monophasique f est déterminé par la loi de Hagen-Poiseuille en régime laminaire et celle de Blasius en régime turbulent. Pour le coulis de glace, nous reprenons les résultats des travaux de Snoeck et al. [4] qui proposent de calculer f_d selon :

$$f_d = f \cdot (1 + 0.119 \cdot W_{v,g}^{0.2422} + 0.02425 \cdot W_{v,g}^{0.3996} \cdot d^{-0.2845}) \quad (4)$$

avec $W_{v,g}$, la fraction volumique de glace, donnée par :

$$W_{v,g} = \frac{\rho_d}{\rho_g} \cdot W_{m,g} = \frac{\rho_d}{\rho_g} \cdot \left(1 - \frac{W_{ai}}{W_a}\right) \quad (5)$$

où W_a est la fraction massique de l'éthanol dans la solution et W_{ai} sa valeur initiale.

Les hypothèses de fonctionnement du procédé sont les suivantes :

- La température du fluide frigoporteur à la sortie de l'échangeur est imposée de 5°C inférieure à la température de la source chaude T_{app} : $T_s = T_{app} - 5$
- Le rendement global de pompage η_{pompe} est fixé arbitrairement à 0.7.
- Le diamètre des conduites est obtenu en fixant une vitesse débitante à l'entrée $V_e = 1$ m/s.
- Les longueurs des conduites aller et retour sont de 20 m chacune.

Les paramètres que nous ferons varier dans la suite de ce travail ainsi que leurs plages de variation sont regroupés dans le tableau 1 :

	\dot{Q}_{app}	\dot{m}_f
	kW	kg/s
Min	20	1
Max	120	25

Tableau 1 : Plage de variation des principaux paramètres du modèle.

3. Résultats et discussion

Nous avons choisi dans notre étude le mélange eau/éthanol comme fluide frigoporteur dans le cas monophasique et diphasique. Pour calculer ses propriétés thermophysiques telles que la masse volumique, la viscosité dynamique, ou l'enthalpie massique, nous avons repris la démarche utilisée par M.A. Ben Lakhdar [5] et C. Peuvrel [6].

Considérant une application dont la température T_{app} se situe à 5°C, conduisant à une température de sortie de l'échangeur T_s imposée de 0°C, nous avons évalué la température à l'entrée de l'échangeur pour un débit variable (cf tableau 1) et une concentration massique initiale en éthanol de 5% et différentes puissances d'application \dot{Q}_{app} (figure 2).

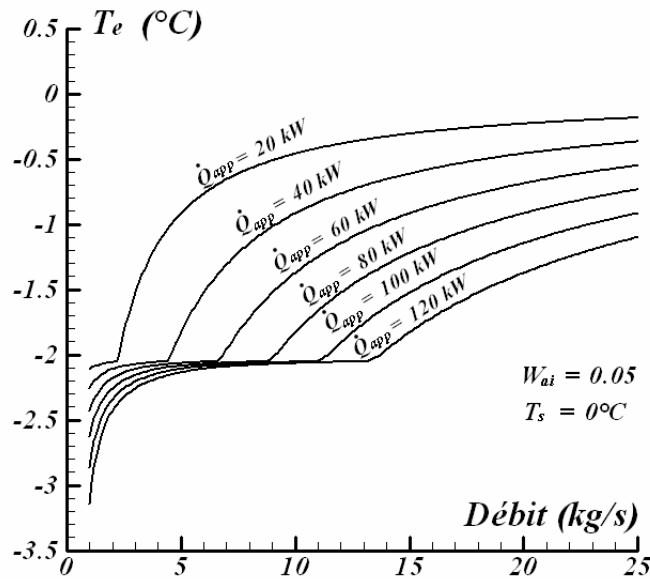


Figure 2 : Evolution de la température à l'entrée de l'échangeur en fonction du débit de fluide frigoporteur et pour différentes puissances d'application.

L'observation de la figure 2 conduit à séparer chaque évolution en 2 zones. La première à faible débit, où le mélange eau/éthanol est diphasique (présence de cristaux de glace dans le fluide frigoporteur). Cette zone s'achève lorsque la température du fluide atteint la température de fusion pour la concentration initiale d'éthanol (5% ici, correspondant à une température d'environ -2.2°C). Au-delà de ce point, à débit plus important, l'utilisation d'un fluide frigoporteur simplement monophasique est suffisant.

A température d'entrée constante, plus la puissance est élevée, plus le débit à mettre en œuvre est important. On notera qu'il augmente d'autant plus lorsque le fluide est monophasique (zone où $T_e > -2.2^{\circ}\text{C}$) par comparaison avec le cas diphasique (zone où $T_e < -2.2^{\circ}\text{C}$).

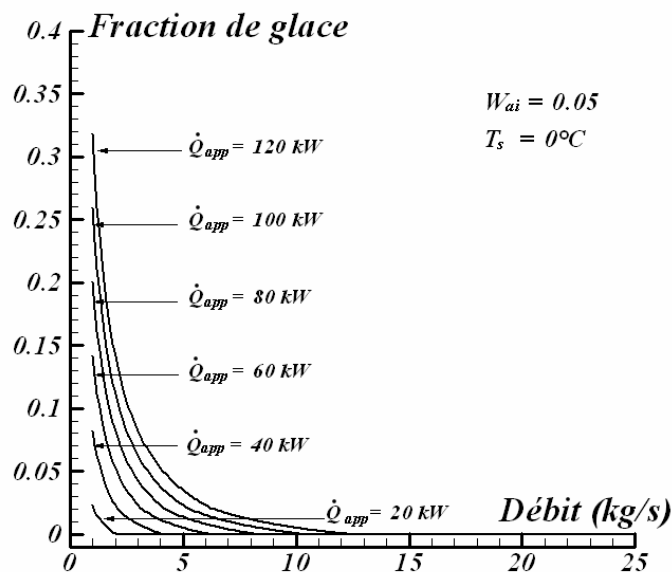


Figure 3 : Variation de la fraction de glace en fonction du débit de fluide frigoporteur et pour différentes puissances d'application.

Outre la valeur de sa température, lorsque le fluide frigoporteur à l'entrée de l'échangeur est diphasique, il peut être aussi caractérisé par sa fraction massique de glace. Celle-ci est représentée dans la figure 3 et correspond aux conditions de la figure 2 où $T_s = 0^\circ\text{C}$ et $W_{ai} = 5\%$. On note que les valeurs de fraction de glace obtenues restent en dessous de 30% (valeur au-delà de laquelle nous le verrons plus tard, les pertes de charges induites par l'écoulement deviennent rapidement importantes) lorsque le fluide à l'entrée de l'échangeur est diphasique, pour tendre vers 0 lorsque, à débit plus important, l'utilisation d'un fluide monophasique s'avère suffisant.

Conformément aux équations 2, 3 et 4, nous avons calculé ensuite les niveaux de puissance de pompage nécessaires aux différentes configurations présentées jusqu'ici. Les résultats sont reportés dans la figure 4.

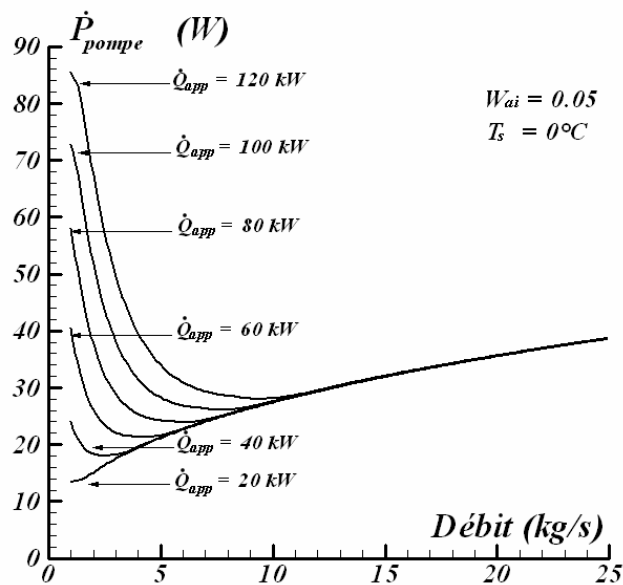


Figure 4 : Evolution des puissances de pompage en fonction du débit de fluide frigoporteur pour différentes puissances d'application.

On retrouve dans les évolutions des puissances de pompage, la séparation entre la zone diphasique (lorsque les débits sont faibles) et celle monophasique. On observe par ailleurs une évolution particulière de cette puissance qui diminue tout d'abord avec le débit, semble passer (pour toutes les puissances envisagées) par un minimum et enfin réaugmente avec le débit. Si cette dernière croissance s'explique par la dépendance naturelle des pertes de charge avec le débit dans la zone monophasique, elle s'avère beaucoup plus dépendante des propriétés du coulis (notamment sa viscosité) dans la zone diphasique à cause de la variation de proportion de cristaux de glace comme nous pouvons le constater dans la figure 3.

4. Conclusion

Devant l'importance de l'objectif d'étudier l'intégralité des opérations de production, distribution, stockage et utilisation du froid dans l'association d'un générateur frigorifique et d'une boucle de fluide frigoporteur en régime transitoire, nous avons tout d'abord opté pour un cas plus simple. Il s'agit ici de considérer seulement la boucle de fluide frigoporteur et d'estimer, pour une application donnée (production 0°C), les conditions de fonctionnement à

appliquer pour différentes puissances requises. Les premiers résultats nous permettent de quantifier les débits, les diamètres des conduites, les pertes de charges liées à l'écoulement et les puissances de pompage correspondantes. On observe en particulier la présence d'un minimum de puissance autour de la zone de transition entre monophasique et diphasique.

Les étapes que nous envisageons par la suite sont dans un premier temps d'étendre l'étude à des applications plus froides (froid commercial et industriel) afin de quantifier notamment la part de puissance de pompage sur la puissance frigorifique. L'intégration de la boucle de fluide frigorigène constituera ensuite l'étape suivante dans l'objectif de compléter le modèle.

Remerciements

Ce travail a été réalisé avec le soutien du Comité Mixte Interuniversitaire Franco-Marocain dans le cadre de l'Action Intégrée Volubilis n° MA/06/152.

Références

- [1] W. Egolf, Ice slurry : a promising technology, *International Institute of Refrigeration*, July 2004.
- [2] P. Haberschill, A. Lallemand, Etude comparative de l'intérêt de l'emploi des fluides frigoporteurs monophasiques et diphasiques pour la climatisation, *COFRET'04, Nancy-France, 22-24 avril*, p158-165, 2004.
- [3] T. David, J. Castaing-Lasvignottes, J. P. Bedecarrats, F. Strub, Energetic benefits using ice slurry in refrigeration industry, *JITH, Tanger – Maroc*, 15, 16 et 17 Novembre 2005.
- [4] C.W Snoeck, S. Walosik, R.P Gupte, Ice slurry transport for district cooling networks. Slurry handling and pipeline. Transport-hydrotransport 12 Snoeck C.ed, *Mechanical Engineering Publication Ltd*, London 1993 pp.511-524.
- [5] M. A. Ben Lakhdar, Comportement thermo-hydraulique d'un fluide frigoporteur diphasique le coulis de glace. Etudes théorique et expérimentale, *Thèse INSA Lyon*, 18 Novembre (1998).
- [6] C. Peuvrel, Etude des transferts thermiques lors de la circulation dans un échangeur d'un fluide frigoporteur à changement de phase solide-liquide, *Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour*, 15 décembre (2003).