

Etude de l'influence du fluide caloporteur sur les dimensions des conduites d'une boucle diphasique à pompage thermocapillaire

Laurent LACHASSAGNE^{1*}, Vincent AYEL¹, Cyril ROMESTANT¹, Yves Bertin¹

¹Laboratoire d'études Thermiques

1, avenue Clément ADER - 86961 Futuroscope CHASSENEUIL

* (auteur correspondant : laurent.lachassagne@let.ensma.fr)

Résumé - Dans cette étude, on cherche à déterminer les performances d'une boucle fluide diphasique à pompage thermocapillaire (BFDPT) vis-à-vis des caractéristiques du fluide sur une plage de température donnée et ceci pour six fluides différents tout en considérant figés l'évaporateur, la puissance thermique imposée et le condenseur. L'équation d'équilibre mécanique est résolue pour répondre à deux objectifs complémentaires. Il s'agit de définir un critère simple de choix de fluide basé sur ses propriétés thermophysiques et sur les spécifications thermiques. Il est aussi nécessaire de minimiser l'encombrement du système et le volume de fluide nécessaire pour répondre aux spécifications du monde automobile en matière de puissance, de température mais aussi de sécurité.

Nomenclature

D	diamètre, m	ε	porosité
e	épaisseur, m	μ	viscosité dynamique, $Pa.s$
g	accélération de pesanteur, $m.s^{-2}$	ΔP	perte de charge, Pa
h	hauteur, m	ΔP_{cap}	saut de pression capillaire, Pa
h_{lv}	chaleur latente de vaporisation, $J.kg^{-1}$	ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$
k	perméabilité, m^2	σ	tension de surface, $N.m^{-1}$
L	longueur, m	ξ	coefficient de pertes de charge, $Pa.s.kg^{-1}$
\dot{m}	débit de vaporisation, $kg.s^{-1}$	<i>Indices et exposants</i>	
n	nombre d'artères du poreux	a	artère du poreux
\dot{Q}	puissance à transférer, W	$cond$	condenseur
Re	nombre de Reynolds	$évap$	évaporateur
r_{pores}	rayon moyen de pores, m	$grav$	gravité
S	section de conduite, m	h	hydraulique
T	température, K	liq	conduite liquide
U	vitesse du liquide dans le poreux, $m.s^{-1}$	vap	conduite vapeur
V	volume, m^3	l	liquide
<i>Symboles grecs</i>		v	vapeur
α	taux de vide de la zone diphasique du condenseur	p	poreux
γ	dilatation volumique en fonction de la Puissance	m	mérite
		max	maximal

1. Introduction

Les boucles fluides diphasiques à pompage thermocapillaire (BFDPT) sont des systèmes de transfert thermique passifs déjà fortement répandus dans l'industrie spatiale et dont l'application est envisagée dans le domaine du transport automobile. D'après Maydanik [1], dans ces systèmes, l'extraction et le transport de la chaleur d'une source chaude vers une

source froide sont assurés par le concours de deux phénomènes. D'une part, le changement de phase du fluide contenu dans la boucle permet d'extraire une quantité de chaleur équivalente obtenue par vaporisation de ce fluide; d'autre part, un milieu poreux joue le rôle de moteur mécanique pour le fluide grâce aux forces de capillarité qui s'y exercent et qui compensent les pertes de charge générées par le fluide en écoulement. La synthèse de Launay *et al.* [2] montre qu'une BFDPT peut être remplie avec différents fluides de manière à comparer les performances obtenues sur banc expérimental. Cependant disposer d'un modèle thermohydraulique comme celui développé par Launay *et al.* [3] permet de réaliser des études paramétriques sur les différentes propriétés thermophysiques et de mettre en évidence l'influence de la chaleur latente de vaporisation, de la chaleur spécifique et de la conductivité thermique du liquide. Dans cette étude on cherchera plutôt à étudier l'influence du choix du fluide par l'intermédiaire d'un nombre de mérite tel celui décrit par Dunbar et Cadell [4] dont le calcul est fondé sur l'équilibre mécanique dans la BFDPT. L'objectif de cette étude dans un contexte automobile est de minimiser l'encombrement et la masse de fluide dans la boucle à performances équivalentes.

2. Méthode de calcul

L'objectif de ce calcul est de déterminer pour un fluide donné le volume à injecter dans la boucle pour permettre son fonctionnement sur la gamme de puissances désirée. Ce volume de boucle (réservoir non inclus) est calculé à partir des diamètres de conduites choisis comme paramètres du calcul pour une puissance injectée donnée.

2.1. L'équation utilisée

Ce calcul est fondé sur l'équation d'équilibre des pressions de la boucle diphasique (1). En effet une boucle diphasique ne peut fonctionner que si la pression capillaire engendrée par les ménisques dans le milieu poreux est égale à la somme des pertes de charges dans la boucle :

$$\Delta P_{cap} = \Delta P_{liq} + \Delta P_{vap} + \Delta P_{cond} + \Delta P_{p,évap} + \Delta P_{grav} \quad (1)$$

Comme :

$$\dot{Q} = \dot{m} h_{lv} \quad (2)$$

Le flux maximum transférable peut alors être évalué à partir du pompage capillaire maximal :

$$\Delta P_{cap,max} = \frac{2\sigma}{r_{pores}} = (\xi_{liq} + \xi_{vap} + \xi_{cond} + \xi_{p,évap}) \frac{\dot{Q}_{max}}{h_{lv}} + (\rho_l - \rho_v) g (h_{évap} - h_{cond}) \quad (3)$$

Les pertes de charges singulières (coudes de conduites, changement de diamètre, ...) ont été négligées dans ce calcul. Le calcul des pertes de charge dans les conduites est effectué avec les corrélations classiques en régime laminaire ou turbulent. Dans le calcul des pertes de charge au sein du condenseur, la solution de modèle dit « homogène » a été choisie. C'est un modèle d'écoulement monophasique utilisant des propriétés thermodynamiques de mélange, avec α le taux de vide dans le condenseur pris égal à 0,8 :

$$\begin{cases} \mu_{cond} = \alpha \mu_v + (1-\alpha) \mu_l \\ \rho_{cond} = \alpha \rho_v + (1-\alpha) \rho_l \end{cases} \quad (4)$$

Le rayon de pores est obtenu à l'aide de la relation de Kozeny-Karmann [5] (5). Les pertes de charge à travers le poreux sont ensuite calculées avec l'équation de Darcy (6). Ce calcul est mené en géométrie 1D.

$$r_{pores} = \frac{1}{2} (1-\varepsilon) \sqrt{\frac{180k}{\varepsilon^3}} \quad (5)$$

$$\nabla P = -\frac{\mu_l U}{k} \quad (6)$$

Après intégration de cette équation on obtient :

$$\xi_{p, \text{évap}} = \frac{\mu_l e_p}{k \rho_l \pi n D_a L_{\text{évap}}} \quad (9)$$

2.2. Le déroulement du calcul

Dans ce calcul, outre la température de fonctionnement de la BFDPT et la puissance dissipée à l'évaporateur, de nombreux paramètres géométriques peuvent être choisis : perméabilité, porosité et épaisseur du poreux, nombre et diamètre des artères dans l'évaporateur, longueurs de l'évaporateur et du condenseur, fraction volumique de vapeur dans le condenseur, différence de hauteur entre l'évaporateur et le condenseur, longueurs de la conduite de liquide et de la conduite de vapeur et enfin coefficient de sécurité pour le calcul du volume. Les diamètres de la conduite de liquide ou de vapeur sont les paramètres du solveur. En effet c'est la taille des conduites et du condenseur qui détermine le volume de fluide à l'intérieur de la boucle. Le diamètre du condenseur est par défaut égal au diamètre de la ligne de vapeur. Le diamètre optimal pour la configuration étudiée est donc obtenu à l'issue du calcul. Le tableau 1 donne les caractéristiques géométriques de la BFDPT de cette étude :

Perméabilité k	Porosité ε	Rayon de pore r_{pores}	Epaisseur du poreux e_p	Nombre d'artères	Diamètre d'artère
m^{-2}		m	m		m
$5,0 \cdot 10^{-13}$	0,7	$2,43 \cdot 10^{-6}$	$8,0 \cdot 10^{-3}$	3	$8,0 \cdot 10^{-3}$
Longueur de la ligne de liquide	Longueur de la ligne de vapeur	Longueur de l'évaporateur	Longueur du condenseur	Différence de hauteur entre évaporateur et condenseur	
m	m	m	m	m	
0,7	0,7	0,3	0,6	0,5	

Tableau 1 : Géométrie du problème

Le volume de la boucle (réservoir non inclus) et la masse de fluide dans la BFDPT sont alors calculés pour six fluides différents : ammoniac, éthanol, méthanol, acétone, hexane et pentane. Les propriétés thermodynamiques des fluides étudiés sont également disponibles. L'eau n'est pas adaptée à une utilisation automobile puisqu'elle gèle à 0°C et c'est pourquoi elle n'a pas été retenue. Par contre ce choix de fluides ne tient pas compte des normes en vigueur dans le milieu automobile en matière de toxicité. Un calcul préliminaire du volume de fluide est effectué pour plusieurs valeurs du diamètre de la conduite de liquide et pour chaque température de l'intervalle [-40°C ; 100°C], plage de température classique du milieu automobile. Le diamètre choisi en entrée du calcul principal est le plus petit diamètre de conduite de liquide qui permet de vérifier l'équation (3) sur l'ensemble de cette plage de température. Le calcul principal effectué à l'aide du solveur Excel fournit ensuite la valeur optimisée du diamètre de la conduite de vapeur. Tous les paramètres nécessaires au calcul du volume des conduites et du condenseur sont alors disponibles.

3. Résultats et analyse

3.1. Puissances à transférer de 400 et 1800 W

La figure 2 illustre la masse de fluide nécessaire en fonction de la température pour les six fluides étudiés et une puissance injectée de 1800 W. Cette masse découle directement du

volume de fluide calculé à partir des diamètres optimisés décrits au paragraphe 2.2. Le fluide le plus intéressant dans notre contexte automobile sera celui qui pour une même puissance transférée présentera le plus faible encombrement et la plus petite masse. Dans la suite de cet article nous exprimerons cette idée par les termes « fluide performant ». On voit dans la figure 2 que la masse d'ammoniac nécessaire au bon fonctionnement de la boucle diphasique reste quasi-constante avec la température au regard des autres fluides. Les autres fluides présentent une augmentation significative du volume (et donc de la masse) nécessaire quand la température diminue. Cette tendance est particulièrement prononcée pour les alcools : éthanol et méthanol. A basse température (-20°C par exemple) les fluides sont ici tous compris entre 50 g (ammoniac) et 250 g (éthanol). Cependant le volume et la masse des fluides ont augmenté avec la puissance dans des proportions différentes pour chaque fluide. La figure 3 représente γ , la variation relative de volume de fluide en fonction de la puissance de dimensionnement. Elle se définit ainsi :

$$\gamma = \frac{V(1800) - V(400)}{V(400)} \quad (11)$$

Cette grandeur montre que le dimensionnement d'une boucle à ammoniac est beaucoup moins sensible à la puissance demandée et à la température considérée par rapport aux autres fluides. Dans la plage de basse température (-30°C/0°C) la variation de volume est de 20% pour l'ammoniac et est comprise entre 70% et 140% pour les autres fluides.

3.2. Comportement à basse température

3.2.1. Nombre de mérite des fluides étudiés

Dunbar et Cadell [4] ont défini un nombre de mérite (12) à partir de l'équation d'équilibre (3) pour un fluide de travail utilisé dans une BFDPT qui n'est pas soumise à la gravité terrestre :

$$N_m = \frac{\rho_v \sigma h_{lv}^{1,75}}{\mu_v^{0,25}} \quad (12)$$

Le calcul de ce nombre est effectué grâce à l'hypothèse stipulant que les pertes de charge liées au liquide sont négligeables par rapport à celles dues à la vapeur dans une boucle. La figure 4 représente N_m pour les fluides de cette étude. La supériorité de l'ammoniac en termes de performance par rapport aux autres fluides, déjà observée sur les figures 2 et 3, est ici confirmée. Cette figure montre aussi une perte de performances des alcools à basse température plus appuyée que celle de l'acétone. On retrouve ici des résultats cohérents avec les volumes de fluide calculés précédemment. La figure 5 montre l'évolution de la masse de fluide nécessaire à 1800 W en fonction du nombre de mérite. Cette représentation permet de bien situer les fluides qui offrent les meilleures performances. En effet il faut s'intéresser à la localisation de l'ensemble des points concernant un fluide donné. La position de chaque courbe ainsi obtenue est alors représentative de la performance du fluide sur tout l'intervalle de température étudié. Les points concernant l'ammoniac sont concentrés dans la zone de faible masse et de nombre de mérite élevé qui constitue la zone de performance optimale. En revanche la courbe de l'éthanol est très mal située par rapport aux autres (faible nombre de mérite et masse élevée). La courbe du pentane apparaît en décalage dans une zone de plus faible masse que les autres fluides. Ceci montre que les propriétés thermophysiques du liquide ont aussi une influence sur nos résultats. En effet, le pentane se démarque des autres fluides par ses propriétés avantageuses (*cf.* §3.2.2) sachant que le calcul a été effectué à diamètre de conduite de liquide fixé sur tout l'intervalle de température. Une caractérisation des fluides uniquement basée sur le nombre de mérite doit donc être complétée.

3.2.2. Influence des propriétés sur les résultats

La légère diminution du nombre de mérite de l'ammoniac aux fortes températures ($T > 40^{\circ}\text{C}$, figure 4) peut s'expliquer par l'évolution de sa tension de surface et de sa chaleur latente. En effet, elles décroissent environ deux fois plus vite avec la température par rapport aux autres fluides. Par contre, la masse nécessaire évolue peu au regard des autres. En effet, la forte augmentation de la masse volumique de sa vapeur relativement aux autres fluides permet de minimiser les pertes de charge générées et ainsi expliquer le fait que la masse de fluide à introduire dans la boucle n'augmente pas. Il reste donc le fluide dont l'utilisation est la plus avantageuse (même au dessus de 20°C). Les pertes de charge d'un fluide dans la boucle dépendent de sa viscosité cinématique de la vapeur (figure 6). Plus cette viscosité est grande, plus les pertes de charge dans la vapeur sont importantes, ce qui entraîne une augmentation du diamètre calculé (et donc du volume). En effet, à -40°C par exemple, on peut remarquer que la viscosité cinématique de la vapeur du pentane est cinq fois plus grande que celle de l'ammoniac et celle de l'hexane vingt fois plus grande. Ceci nous apporte un élément de réponse pour expliquer la différence de performances observée entre ces deux fluides et l'ammoniac à basse température. Quant aux alcools, elle est beaucoup plus élevée comme dans le cas du liquide, ce qui les pénalise en termes d'efficacité. Les variations de la chaleur latente de vaporisation et de la tension de surface en fonction de la température ont également été observées. Les alcools ont globalement une meilleure chaleur latente que l'acétone, l'hexane et le pentane. A basse température l'ammoniac présente les meilleures chaleur latente et tension de surface. Celles-ci diminuent ensuite considérablement et sa tension de surface est même la plus faible au-delà de 80°C , ce qui détériore son nombre de mérite alors que sa masse n'augmente pas.

Le nombre de mérite étant considéré pour un environnement 0-g, il est aussi nécessaire de s'intéresser à l'évolution de la masse volumique du liquide. En effet, même si cette masse volumique varie peu avec la température au regard des autres propriétés, la perte de charge gravitaire vient diminuer le saut de pression capillaire disponible pour équilibrer les pertes de charge dans la boucle (3). La masse volumique du liquide (figure 7) est plus élevée pour les alcools. Or on a vu que cette propriété agit directement sur le saut de pression gravitaire qui vient s'ajouter aux pertes de charges du système. L'augmentation de la masse volumique du liquide à basse température est donc un facteur limitant pour les performances des BFDPT utilisées dans des applications terrestres. Une fois encore, l'ammoniac est le plus avantageux de tous les fluides étudiés ici et sa masse volumique de liquide constitue un atout supplémentaire pour ses performances.

4. Conclusion

L'efficacité d'un fluide pour des applications de type boucles diphasiques est déterminée dans cette étude par l'intermédiaire du volume à injecter dans la BFDPT pour que celle-ci fonctionne à une puissance appliquée donnée. Une étude complémentaire des nombres de mérite des fluides au sens de Dunbar et Cadell [4] permet de mettre en évidence l'action des propriétés thermophysiques suivantes sur les performances observées : tension de surface, chaleur latente, viscosité cinématique et masse volumique de la vapeur. Les résultats obtenus sont des ordres de grandeur : la géométrie de la boucle et l'expression des pertes de charge sont simplifiées dans ce calcul. Ces ordres de grandeurs obtenus pour les volumes et masses de fluide dans la boucle sont très raisonnables et ne remettent pas en cause l'utilisation d'une boucle diphasique dans le cadre d'une application automobile.

Remerciements - Cette étude entre dans le cadre du projet européen HI-CEPS : « Highly Integrated Combustion Electric Propulsion System » pour le co-développement entre différents partenaires industriels et universitaires d'un véhicule automobile hybride. Cf. <http://www.hi-ceps.eu/>

Références

- [1] Yu. F. Maydanik, Loop heat pipes, *Applied Thermal Engineering*, 25 (2005), 635-657.
- [2] S. Launay, V. Sartre, J. Bonjour, Parametric analysis of loop heat pipe operation: a literature review, *International Journal of Thermal Science*, 46 (2006), 621-636.
- [3] S. Launay, V. Sartre, J. Bonjour, Effect of fluid thermophysical properties on loop heat pipe operation, *14th International Heat Pipe Conference* (Florianopolis, Brésil, 22-27 avril 2007).
- [4] N. Dunbar, P. Cadell, Working fluids and figure of merit for CPL/LHP applications, *The Aerospace Corporation* (CPL-98 Workshop, 1998) 1.3-1-1.3-6.
- [5] S. Bories, M. Prat, Transferts de chaleur dans les milieux poreux, *Techniques de l'ingénieur, traité génie énergétique*, B 8 250.

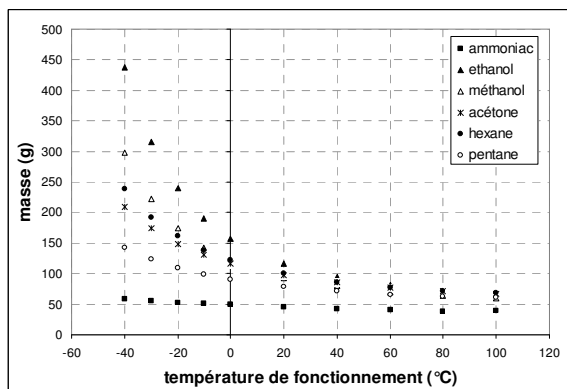


Figure 2 : Masse de fluide à 1800W

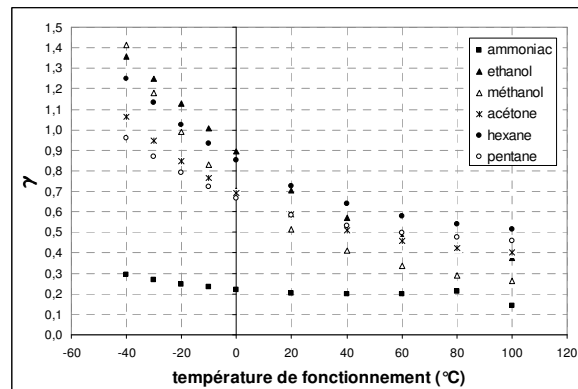


Figure 3 : Variation relative de volume

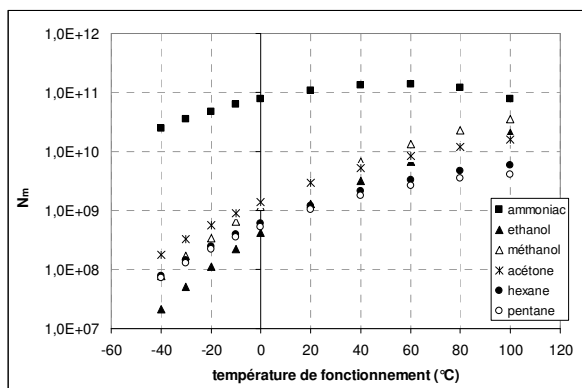


Figure 4 : Nombre de mérite

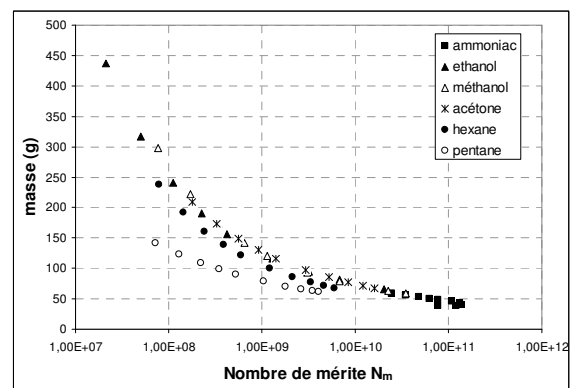


Figure 5 : Masse de fluide et nombre de mérite

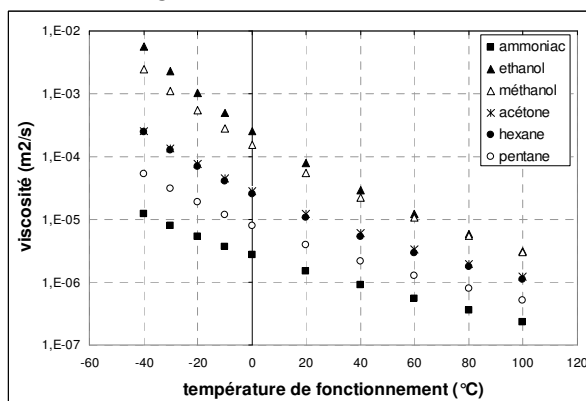


Figure 6 : Viscosité cinématique vapeur

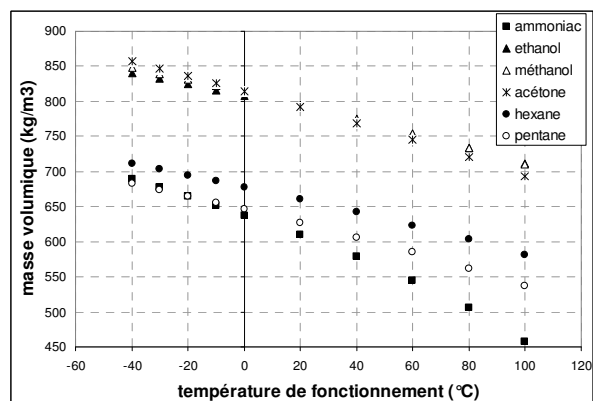


Figure 7 : Masse volumique liquide