

# Etude expérimentale du changement de phase liquide/vapeur dans un milieu poreux d'une boucle diphasique à pompage capillaire

R. BOUBAKER<sup>a</sup>, S. HARMAND<sup>b</sup>

a. Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines  
Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis

Email: boubaker.riadh@gmail.com

b. Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines  
Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis

Email: souad.harmand@univ-valenciennes.fr

## Résumé :

*Cet article présente une étude expérimentale sur le transfert de masse et de chaleur avec changement de phase dans un milieu poreux en mousse de cuivre. L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet des pertes de charge gravitaires et les propriétés du matériau (porosité, diamètre moyen de pores) sur le transfert de masse et de chaleur dans la mèche poreuse. Les résultats expérimentaux montrent qu'une augmentation des pertes de charges gravitaires entraîne une augmentation de la température du bâti métallique, ce qui fait chuter le coefficient d'échange thermique. Pour l'effet de la porosité et le diamètre moyen des pores, on constate que la variation de ces deux paramètres a un impact direct sur le phénomène de changement de phase ainsi que sur la température de la culasse.*

## Abstract :

*This paper presents an experimental study on the heat and mass transfer with phase change in a porous media made of copper foam. The aim of this work is to study the effect of the adverse hydrostatic head and the wick properties (porosity, average pore diameter) on the heat and mass transfer inside the porous media. The experimental results show that an increase in the adverse hydrostatic head causes an increase in the casing temperature and reduces the heat transfer coefficient. For the wick properties effects, it is found that the porosity and the average pore diameter have a significant impact on the phase change phenomenon inside the porous wick and the casing temperature.*

**Mots clefs : Changement de phase, milieu poreux, capillarité, transfert thermique**

## 1 Introduction

Les phénomènes de changement de phase en milieux poreux occupent une place importante dans un grand nombre d'applications, en particulier les systèmes de transfert thermique tels que les boucles fluides diphasiques à pompage capillaire. Les boucles diphasiques à pompage capillaire sont des dispositifs qui utilisent la circulation d'un fluide et les propriétés du changement d'état liquide-vapeur

dans un corps poreux pour transférer d'importantes quantités de chaleur sur des distances qui peuvent atteindre quelques mètres.

La simulation numérique du phénomène de changement de phase dans un milieu poreux contenu dans l'évaporateur fait l'objet d'intenses recherches depuis des années. Kaya [1] a étudié numériquement le transfert de masse et de chaleur dans la structure poreuse d'une boucle LHP, en s'intéressant en particulier à la limite d'ébullition. Son travail est inspiré du modèle développé par Demidov et Yatsenko [2]. Il a montré l'existence d'une poche de vapeur lorsque la température du fluide dépasse de quelques degrés la température de saturation, remettant ainsi en question l'hypothèse habituelle suivant laquelle la mèche est saturée en liquide. Huang [3] a également développé un modèle instationnaire pour étudier le transfert de chaleur et de masse avec changement de phase dans la mèche poreuse de l'évaporateur d'une boucle diphasique à pompage capillaire. Dans ce travail, le milieu est divisé en 3 régions : deux monophasiques (liquide et vapeur) et une diphasique, où s'opère le changement de phase. Les résultats obtenus montrent que l'épaisseur de l'interface liquide-vapeur est non nulle. Récemment, Boubaker [4] a présenté un modèle mathématique instationnaire d'un évaporateur plan d'une boucle diphasique à pompage capillaire. Le modèle développé décrit les transferts de chaleur et de masse ainsi que les phénomènes de changement de phase au sein de la mèche poreuse. L'étude expérimentale du phénomène de changement de phase dans un milieu poreux est encore peu courante. Liao [5, 6] a réalisé une expérience pour étudier les processus de transfert de masse et de chaleur dans une structure poreuse rectangulaire. Les résultats expérimentaux montrent l'existence d'une poche vapeur qui se développe à l'intérieur de la mèche poreuse. Il a montré aussi que le champ de température dans le milieu poreux dépend des pertes de charge gravitaires, du sous refroidissement à l'entrée de la mèche et du rayon des pores. Une étude expérimentale a été menée par Coquard [7] pour visualiser le phénomène de vaporisation dans un milieu poreux constitué de billes métalliques.

L'objectif de cet article est d'étudier l'effet des pertes de charge gravitaires et les propriétés du matériau (porosité, diamètre moyen de pores) sur le transfert de masse et de chaleur dans la mèche poreuse.

## **2 Etude théorique**

### **2.1 Bilan de quantité de mouvement**

Avant l'instant initial correspondant au début de l'application de la charge thermique, le liquide est sous-refroidi de manière uniforme dans la mèche. La charge thermique appliquée sur le bâti métallique commence par traverser la mèche par conduction jusqu'à sa surface opposée. Au fil du temps, ce flux de chaleur augmente la température de la mèche et du liquide qu'elle contient. Le liquide dans la mèche s'échauffe jusqu'à ce qu'il atteigne la température de saturation (correspond à la pression saturante de la vapeur dans les cannelures). La vaporisation commence alors au point le plus chaud de la surface supérieure de la mèche, c'est à dire à la surface de contact avec la panne chauffante. Le liquide provenant du réservoir est en contact avec la surface intérieure de la mèche. Le liquide est pompé par capillarité vers la surface extérieure de la mèche.

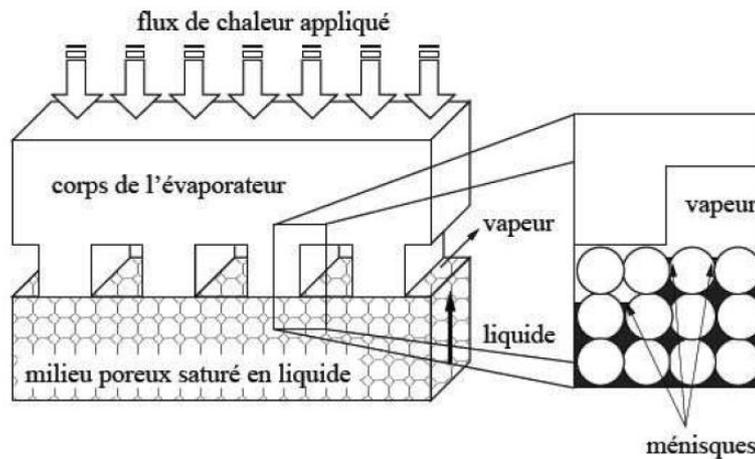


Fig 1 : zone d'évaporation

La capillarité joue donc un rôle essentiel dans le fonctionnement des boucles diphasiques à pompage capillaire. C'est la courbure de l'interface liquide-vapeur, formée d'un très grand nombre de ménisques qui prennent appui sur la structure poreuse, qui permet de générer le saut de pression capillaire  $\Delta p_{cap}$  qui assure la mise en circulation du fluide dans la mèche poreuse. La surpression de la vapeur au-dessus de la surface de vaporisation impose sa migration vers les cannelures. Le liquide est « aspiré » dans la mèche par la dépression qui règne sous les ménisques de l'interface de vaporisation, ce qui assure alors la poursuite du processus de vaporisation.

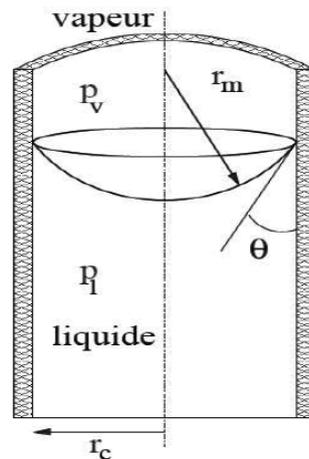


Fig 2 : vue du ménisque dans un tube capillaire

En supposant l'interface liquide-vapeur sphérique, le saut de pression capillaire est inversement proportionnel au rayon de courbure de cette interface suivant la loi de Young-Laplace:

$$\Delta p_{cap} = p_v - p_l = \frac{2\sigma}{r_m} \quad (1)$$

En régime permanent, le saut de pression capillaire doit compenser exactement les pertes de pression  $\Delta p_{mèche}$  générées par l'écoulement du fluide dans la mèche.

$$\Delta p_{cap} = \Delta p_l + \Delta p_{lv} + \rho_l g \Delta h \quad (2)$$

où  $\Delta p_l$  est les pertes de charges de la phase liquide dans le poreux,  $\Delta p_{lv}$  les pertes de charges dans la zone diphasique et  $\rho_l g \Delta h$  représente les pertes de charges gravitaires,  $\Delta h$  étant la distance entre la

partie supérieure de la structure poreuse et le niveau de liquide dans le réservoir. Les pertes de charge gravitaires dans la zone vapeur sont négligeables.

Les pertes de charge due à l'écoulement de la phase liquide dans la structure poreuse, peuvent être évaluées par la loi de Darcy comme :

$$\Delta p_l = \frac{\dot{m} \nu_l L}{K} \quad (3)$$

où  $\dot{m}$  est le débit massique liquide,  $\nu_l$  est la viscosité cinématique,  $L$  la longueur de la zone liquide dans la mèche poreuse et  $K$  la perméabilité.

## 2.2 Bilan d'énergie

La charge thermique appliquée à la mèche poreuse remplit plusieurs fonctions : une partie sert à vaporiser le liquide, une autre est mobilisée pour réchauffer jusqu'à la température de saturation le liquide qui se déplace dans la mèche, la partie complémentaire parvenant à traverser la mèche pour réchauffer le liquide qui, provenant du réservoir, se présente pour alimenter la mèche (flux parasite  $\phi_p$ ).

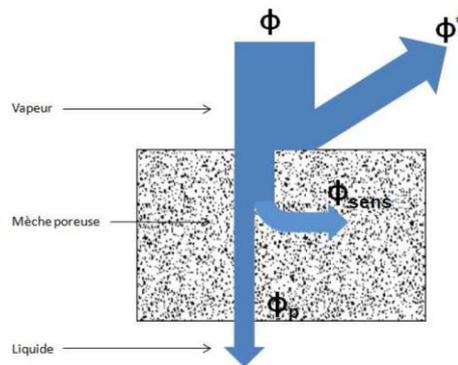


Fig 3 : Flux de chaleur dans l'évaporateur

Le flux de chaleur appliqué à la mèche vérifie

$$\phi = \phi^* + \phi_{sen} + \phi_p \quad (4)$$

où  $\phi^*$  est le flux vaporisé,  $\phi_{sen}$  le flux de chaleur sensible qui réchauffe le liquide jusqu'à la température de saturation et  $\phi_p$  le flux parasite.

$$\phi = \dot{m} [L_v + C_{pl}(T_{sat} - T_l)] + \phi_p$$

où  $L_v$  est la chaleur latente de vaporisation,  $\dot{m}$  est le débit massique,  $T_{sat}$  est la température de saturation et  $T_l$  est la température du liquide à l'entrée de la mèche.

$$\dot{m} = \frac{\phi - \phi_p}{L_v + C_{pl}(T_{sat} - T_l)}$$

Le flux parasite est calculé de la manière suivante

$$\phi_p = \int_{y=0} \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} dx$$

## 2.3 Bilan d'énergie du liquide à l'entrée de la mèche

Le bilan d'énergie du volume de liquide libre qui alimente la mèche s'écrit comme suit :

$$\rho_l C_{pl} \Omega_{M,e} \frac{\partial T_{M,e}}{\partial t} = \dot{m} C_{pl} (T_{R,s} - T_{M,e}) + \phi_p + \phi' \quad (5)$$

où  $T_{R,s}$  est la température du liquide à la sortie du réservoir,  $\phi_p$  est le flux parasite,  $\Omega_{M,e}$  est le volume de liquide avant d'entrer dans la mèche et  $\phi'$  est la charge thermique appliquée en bas du réservoir.

## 2.4 Coefficient d'échange thermique

Pour décrire les performances globales de l'évaporateur, nous définissons le coefficient d'échange thermique d'évaporateur :

$$h = \frac{\phi}{S(T_C - T_{M,e})} \quad (6)$$

où  $\phi$  est la charge thermique appliquée à l'évaporateur,  $T_C$  est la température de la paroi extérieure du bâti métallique et  $T_{M,e}$  la température du liquide à l'entrée de la mèche et  $S$  désigne la surface de chauffage.

## 3 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental que nous avons mis en place vise à représenter une section d'évaporateur d'une boucle diphasique à pompage capillaire. C'est un système ouvert contenant une mèche poreuse en mousse de cuivre. Cet « évaporateur » est relié à un réservoir à niveau constant qui permet d'alimenter la mèche en fluide sous-refroidi. Les pertes de charges gravitaires sont contrôlées par l'élévation  $\Delta h$  (la distance entre la partie supérieure de la structure poreuse et le niveau d'eau). Une résistance chauffante est installée pour réchauffer le fluide avant d'entrer dans la mèche poreuse. La surface supérieure de la structure poreuse est chauffée par le biais d'un bloc de laiton rainuré dans lequel est positionnée une cartouche chauffante. Afin de minimiser les pertes de chaleur avec le milieu environnant, le bloc de chauffe est isolé thermiquement à l'aide d'isolant en bakélite. Le système est instrumenté en thermocouples pour mesurer la température de la culasse  $T_C$  et la température du fluide à l'entrée de la mèche  $T_{M,e}$ .

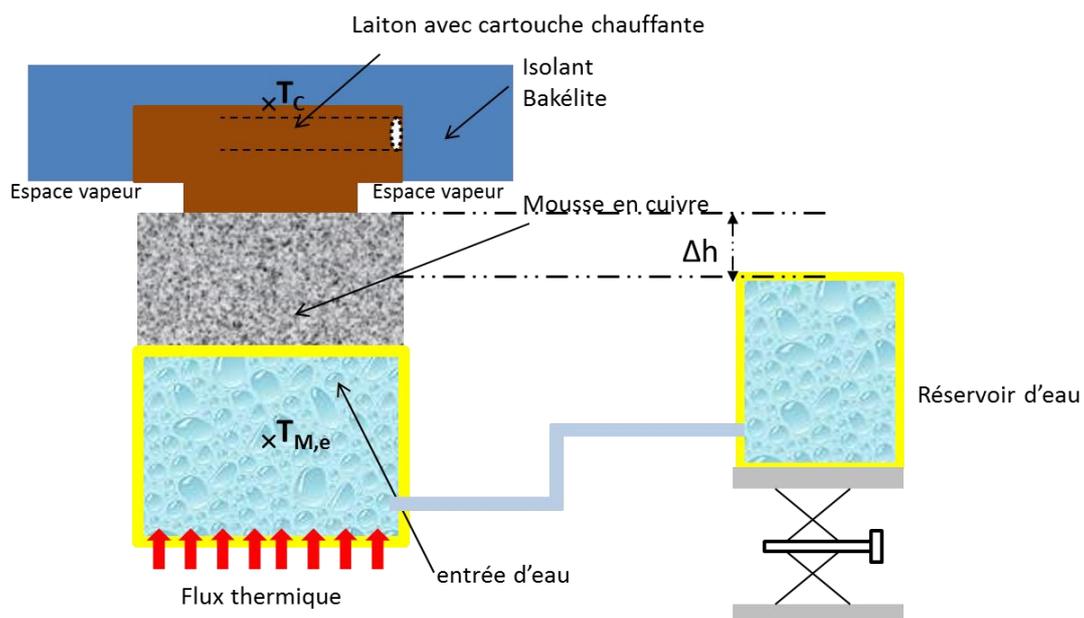


Fig 4 : Banc expérimental

## 4 Résultats

### 4.1 Effet des pertes de charge gravitaire

La figure 5 présente les évolutions temporelles de la température de la paroi de la surface extérieure de la culasse et la température à l'entrée de la mèche suite à une succession de paliers de puissance croissants appliqués uniformément sur l'évaporateur pour différentes hauteurs. L'importance de la diffusivité thermique et la faiblesse de l'épaisseur de la culasse métallique de l'évaporateur font que cette dernière réagit rapidement à toute variation de la charge thermique appliquée. La température du bâti augmente logiquement en fonction de la puissance appliquée. Comme le montre les figures 5.c et 5.d, la température du bâti métallique ne cesse pas d'augmenter pour  $\Delta h = 1.5\text{ cm}$  et  $\Delta h = 2\text{ cm}$  à la fin de la sollicitation de puissance, contrairement au cas où  $\Delta h = 0.5\text{ cm}$  et  $\Delta h = 1\text{ cm}$ . Cette augmentation de température est causée certainement par la pénétration du vapeur dans le milieu poreux (voir figure 6).

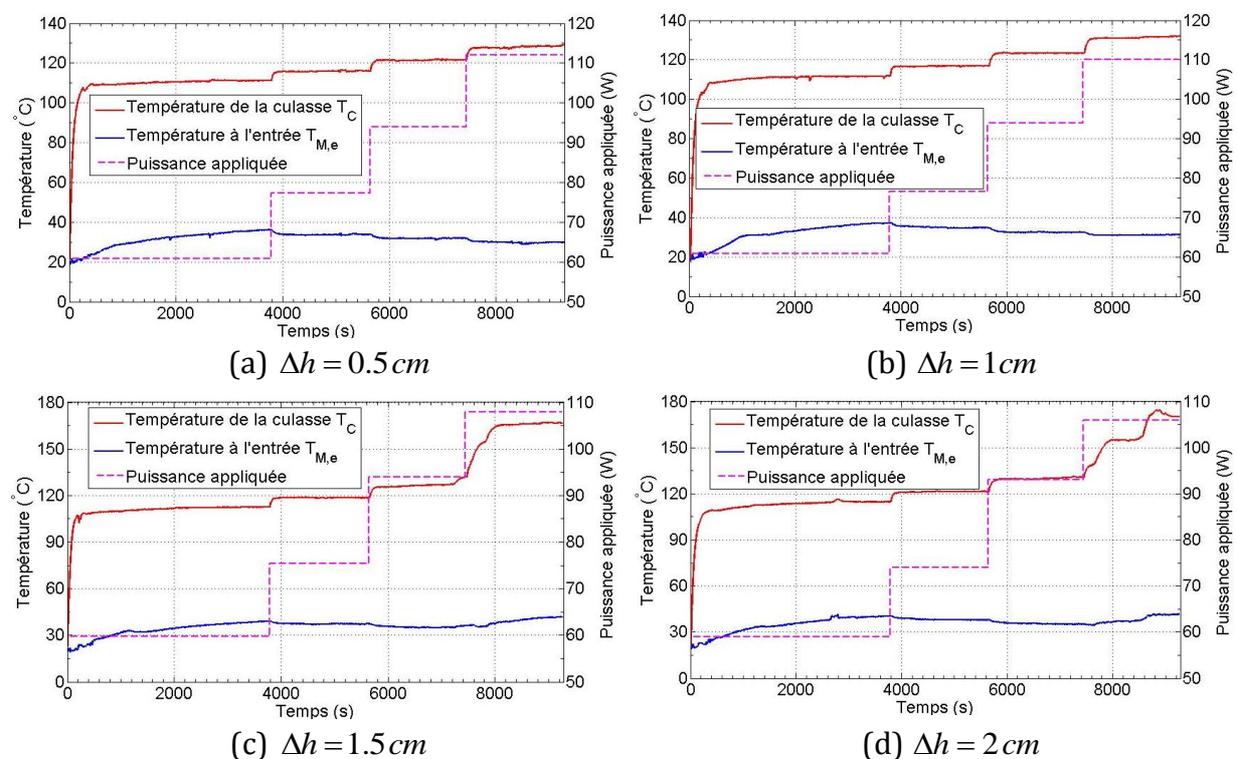


Fig 5 : Effet des pertes de charges gravitaires sur la température de la culasse et du fluide à l'entrée de la mèche

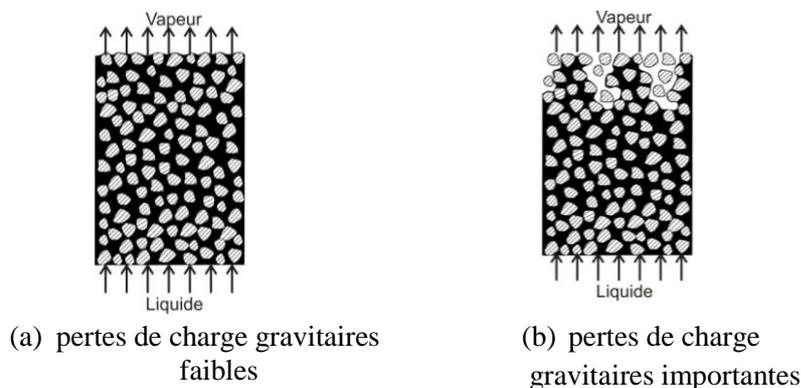


Fig 6 : Interface de vaporisation en fonction des pertes de charges

On peut constater que la température du bâti métallique augmente en augmentant les pertes de charges gravitaires. Ceci peut s'expliquer, selon les équations 2 et 3, qu'une augmentation de  $\Delta h$  provoque une baisse du débit massique de liquide provenant du réservoir. Par conséquent, la vapeur s'enfonce dans la mèche poreuse.

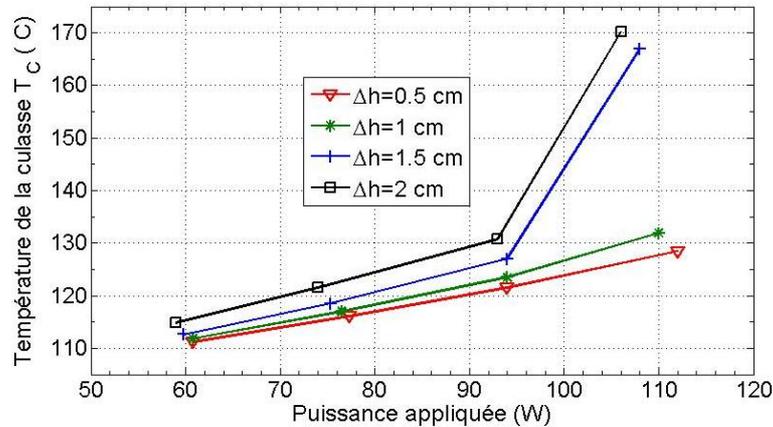


Fig 7 : Variation de la température de la culasse en fonction des pertes de charges

A l'entrée de la mèche, la température du liquide dépend de celle du liquide en provenance du réservoir et, dans l'autre sens, du flux parasite qui a traversé la mèche et le flux appliqué en bas du réservoir. Pour  $\Delta h = 0.5$  cm et  $\Delta h = 1$  cm l'augmentation de la puissance entraîne toujours une diminution de la température à l'entrée de la mèche malgré l'augmentation du flux parasite ; cette baisse de température est principalement due à l'arrivée en plus grande quantité de liquide à température plus basse délivré par le réservoir. Par contre, pour  $\Delta h = 1.5$  cm et  $\Delta h = 2$  cm, on remarque que la température du liquide à l'entrée de la mèche commence par diminuer puis augmente à la fin de la sollicitation de puissance. En effet, le flux parasite augmente brutalement à partir du moment où le front de la poche vapeur s'enfonce dans le poreux.

Comme auparavant et pour les mêmes raisons, la température du liquide à l'entrée de la mèche augmente en fonction de  $\Delta h$ , due à la baisse du débit massique de liquide provenant du réservoir.

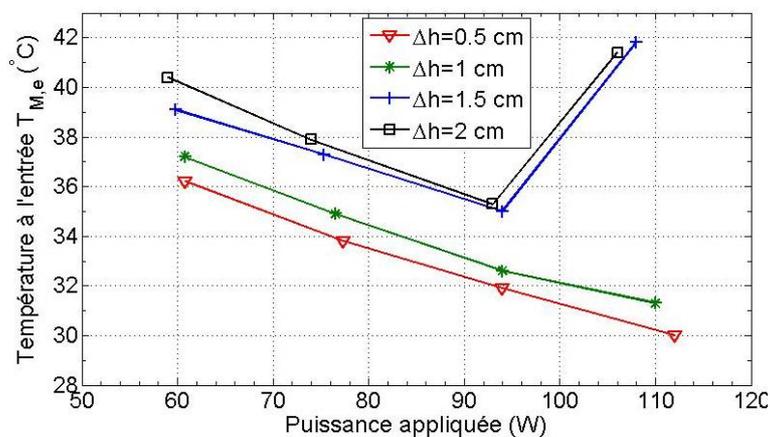


Fig 8 : Variation de la température à l'entrée de la mèche en fonction des pertes de charges

La variation du coefficient d'échange en fonction des pertes de charges gravitaires est présentée dans la figure 9. On constate que le coefficient d'échange thermique et le flux de chaleur critique ont baissé

avec l'augmentation de  $\Delta h$ . En effet, pour  $\Delta h$  grand, les surchauffes dans le bâti métallique sont plus élevées car la poche vapeur est plus grande, ce qui fait chuter le rendement de l'évaporateur.

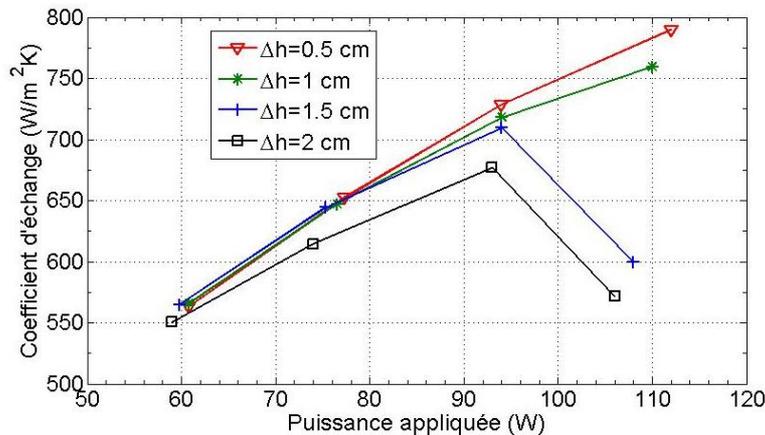


Fig 9 : Effet des pertes de charges sur le coefficient d'échange thermique

## 4.2 Effet du poreux

Dans ce paragraphe, nous étudions l'impact de la porosité et le diamètre moyen de pore sur le transfert de masse et de chaleur dans la mèche poreuse. Le tableau 1 présente les propriétés des matériaux de deux milieux poreux étudiés ayant des porosités et diamètres moyens de pore différents.

	Poreux #1	Poreux #2
Diamètre moyen des pores (mm)	0.423	0.635
Porosité (%)	90	96
Perméabilité (m <sup>2</sup> )	$7.24 \cdot 10^{-8}$	$1.238 \cdot 10^{-6}$
Conductivité thermique effective (W/mK)	39.61	16.24

Tab1 : Propriétés des milieux poreux

La porosité est l'un des paramètres macroscopiques qui caractérise le milieu poreux dont l'influence est la plus importante. Elle intervient à la fois au niveau de la dynamique du fluide dans la mèche (la perméabilité qui intervient dans la loi de Darcy dépend directement de la porosité) et au niveau des transferts thermiques (la porosité intervient dans la conductivité thermique effective). En effet, d'une part, une augmentation de la porosité accroît la quantité de fluide contenu dans la mèche, fluide dont la conductivité thermique liquide ou vapeur est plus faible que celle de la structure de la mèche en cuivre utilisée ici, ce qui diminue la conductivité thermique effective. D'autre part, une augmentation de la porosité provoque une augmentation de la perméabilité.

Le diamètre de pore a aussi un impact direct sur la perméabilité et la pression capillaire maximale. En effet une augmentation de diamètre de pore provoque une diminution de la pression capillaire maximale et une augmentation de la perméabilité.

La figure 10 présente l'évolution de la température à l'entrée de la mèche en fonction de la puissance appliquée pour les deux milieux poreux étudiés avec les mêmes pertes de charge gravitaires  $\Delta h = 0.5 \text{ cm}$ . La température à l'entrée de la mèche pour le milieu poreux **Poreux #1** est supérieure à celle du milieu poreux **Poreux #2**. En effet, le milieu poreux **Poreux #1** possède une conductivité thermique effective plus grande, ce qui conduit à un flux parasite plus élevé.

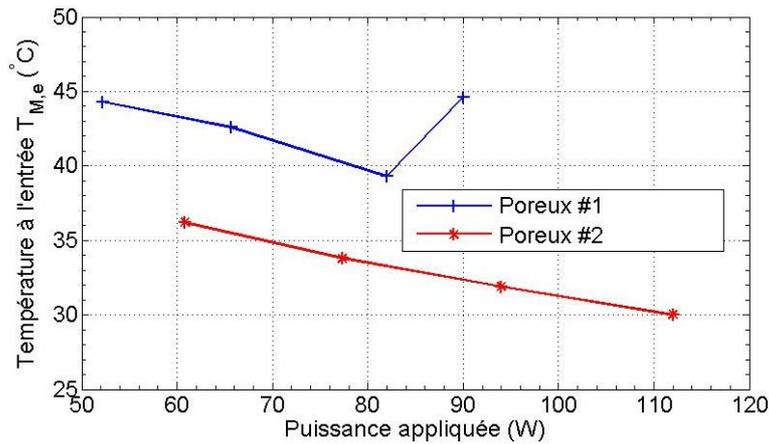


Fig 10 : Effet du milieu poreux sur la température à l'entrée de la mèche

La figure 11 décrit la variation de la température du bâti métallique en fonction de la puissance appliquée pour les deux milieux poreux étudiés. On peut constater qu'au début la température du bâti pour la mèche poreuse **Poreux #1** est inférieure à celle de la mèche poreuse **Poreux #2** ensuite elle augmente brutalement. Le comportement pendant la première phase est expliqué par le fait que la mèche poreuse **Poreux #1** possède une conductivité thermique effective importante (le poreux transfère plus facilement la chaleur lorsque la conductivité est importante) et un pompage capillaire élevé. En effet, lorsque le diamètre moyen des pores est petit, la pression capillaire des liaisons situées en limite supérieure de mèche est suffisante pour maintenir l'interface liquide/vapeur à la surface de la mèche pour de faibles flux. L'augmentation brusque de la température de la culasse pendant la deuxième phase pour le milieu poreux **Poreux #1** s'explique par la pénétration de la vapeur dans le poreux. En effet, en augmentant la puissance appliquée, les pertes de charge dans la phase vapeur et la phase liquide pour le **Poreux #1** deviennent très importantes (la perméabilité de **Poreux #1** est inférieure à celle de **Poreux #2**). Les pertes de charge sont, dans ce cas, largement supérieures au seuil de rupture capillaire des liaisons, donc l'interface liquide/vapeur pénètre facilement à l'intérieur de la mèche et la vapeur sature rapidement la mèche. C'est pour cette raison que la saturation de la vapeur est plus importante lorsque la perméabilité est petite. Ceci entraîne une surchauffe plus élevée du bâti métallique et une chute très rapide du rendement de l'évaporateur.

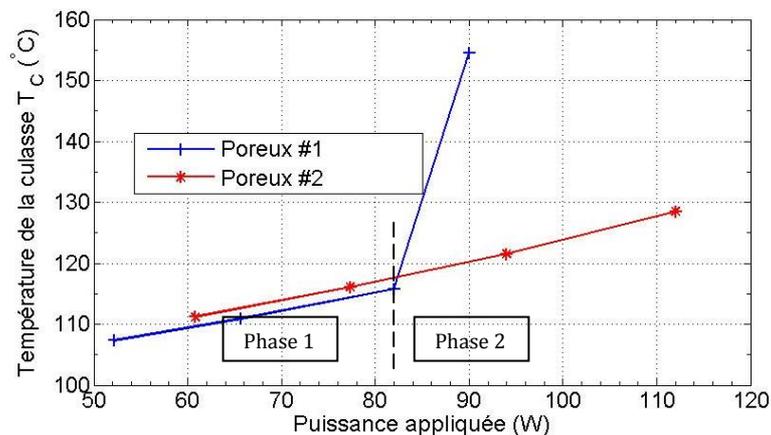


Fig 11 : Effet du milieu poreux sur la température de la culasse

L'effet de la porosité et du diamètre moyen des pores sur le coefficient d'échange thermique est présenté dans la figure 12. Au début, le coefficient d'échange du milieu poreux **Poreux #1** est

largement meilleur. Ensuite, son rendement chute brutalement à cause de l'envahissement du milieu poreux par la phase vapeur.

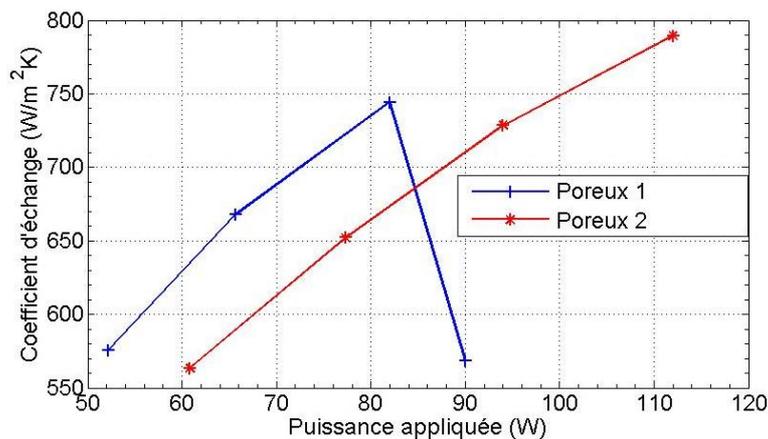


Fig 12 : Effet du milieu poreux sur le coefficient d'échange

## Conclusion

Ce travail présente une étude expérimentale du phénomène de changement de phase dans un milieu poreux. Les résultats expérimentaux sur l'effet des pertes de charge et les propriétés du matériau permettent d'aboutir aux conclusions suivantes :

- La température de la culasse métallique augmente avec les pertes de charges gravitaires.
- Le coefficient d'échange thermique diminue en augmentant les pertes de charges gravitaires.
- La porosité et le diamètre moyen des pores ont un impact significatif sur le phénomène de changement de phase et le coefficient d'échange thermique.

## Nomenclature

Symbole

$C_p$  capacité thermique massique à pression constante,  $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$   
 $g$  accélération de la gravité,  $m\ s^{-2}$   
 $L$  longueur,  $m$   
 $h$  coefficient d'échange thermique,  $Wm^{-2}K^{-1}$

$L_v$  chaleur latente massique de vaporisation,  $J\ kg^{-1}$

$p$  pression,  $Pa$

$S$  surface,  $m^2$

$T$  température,  $K$

$\dot{m}$  débit massique,  $kg\ s^{-1}$

$K$  perméabilité,  $m^2$

Symboles grecs

$\nu$  viscosité cinématique,  $m^2s^{-1}$

$\lambda$  conductivité thermique,  $Wm^{-1}K^{-1}$

$\phi$  flux de chaleur,  $W$

$\rho$  masse volumique,  $kg\ m^{-3}$

$\Omega$  volume,  $m^3$

$\Delta h$  différence d'hauteur,  $m$

$\Delta p$  pertes de charges,  $Pa$

$\sigma$  tension de surface,  $Nm^{-1}$

Exposant, Indices

C culasse métallique

r rayon

cap capillaire

eff effective

e entrée

R réservoir

l liquide

p parasite

s sortie

sat saturation

v vapeur

M mèche

m ménisque

## Références

- [1] T. Kaya, J. Goldak, Numerical analysis of heat and mass transfer in the capillary structure of a loop heat pipe, *Int. J. Heat Mass Transfer* 49 (2006) 3211-3220
- [2] A. Demidov, E. Yatsenko, Investigation of heat and mass transfer in the evaporation zone of a heat pipe operating by the 'inverted meniscus' principle, *Int. J. Heat Mass Transfer* 37 (1994) 2155-2163.
- [3] X.M. Huang, W. Liu, A. Nakayama, S.W. Peng, Modeling for heat and mass transfer with phase change in porous wick of CPL evaporator, *Heat Mass Transfer* 41 (2005) 667-673.
- [4] R. Boubaker, V. Platel, A. Berges, M. Bancelin, E. Hannezo. Dynamic model of heat and mass transfer in an unsaturated porous wick of capillary pumped loop, *Appl Therm Eng* 76 (2015)1-8
- [5] Q. Liao, T.S. Zhao, Evaporative Heat Transfer in a Capillary Structure Heated by a Grooved Block, *AIAA Journal of Thermophysics and Heat Transfer* 13 (1999) 126-133
- [6] Q. Liao, T.S. Zhao, A visual study of phase-change heat transfer in a two-dimensional porous structure with a partial heating boundary, *Int. J. Heat Mass Transfer* 43 (2000) 1089-1102
- [7] T. Coquard, Transferts couplés de masse et de chaleur dans un élément d'évaporateur capillaire, Thèse, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2006.