

Amélioration des limites de fonctionnement d'une boucle diphasique à pompage capillaire par utilisation de fluides binaires

Riadh BOUBAKER^{1*}, Souad HARMAND¹, Vincent PLATEL²

¹Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines
Le Mont Houy 59313 Valenciennes cedex 09, France

²Laboratoire de Thermique, Energétique et Procédés (LaTEP)
Rue Jules Ferry, BP 7511, 64075 Pau Cedex

*(auteur correspondant : boubaker.riadh@gmail.com)

Résumé : L'objectif de cet article est d'étudier l'effet des fluides binaires (eau+butanol) sur les limites de fonctionnement d'une boucle de type CPL. Les travaux expérimentaux montrent que, contrairement aux fluides ordinaires, l'évolution de la tension de surface du fluide binaire en fonction de la température présente un gradient positif après une certaine valeur de la température. Les simulations numériques montrent que l'utilisation de fluides binaire (eau +butanol) comme fluide de travail permet d'améliorer les performances de la CPL pour les hautes températures de fonctionnement, en augmentant la charge thermique maximale que peut évacuer la boucle.

Mots clés : Boucle diphasique à pompage capillaire, fluide binaire, tension de surface, limite capillaire.

Symbole

a	coefficient d'accommodation
A	section droite, m^2
C_p	capacité thermique massique à pression constante, $J kg^{-1} K^{-1}$
g	accélération de la gravité, $m s^{-2}$
h	coefficient d'échange convectif, $W m^{-1} K^{-1}$
h_i	enthalpie massique, $J kg^{-1}$
L_v	chaleur latente massique de vaporisation, $J kg^{-1}$
D	diamètre, m
M	masse molaire, $kg mol^{-1}$
p	pression, Pa
R	constante des gaz parfaits, $J mol^{-1} K^{-1}$
S	surface, m^2
T	température, K
V	vitesse de Darcy, $m s^{-1}$
\dot{m}	débit massique, $kg s^{-1}$

Symboles grecs

α	titre volumique
κ	perméabilité, m^2
κ_r	perméabilité relative
μ	viscosité dynamique, $kg m^{-1} s^{-1}$
η	longueur de la zone diphasique du condenseur, m
λ	conductivité thermique, $W m^{-1} K^{-1}$
ϕ	flux de chaleur, W

$\dot{\Gamma}$	débit massique vaporisé par unité de volume, $kg m^{-3} s^{-1}$
ρ	masse volumique, $kg m^{-3}$
Ω	volume, m^3

Exposant, Indices

a	ambiance extérieure
b	partie basse du réservoir
h	partie haute du réservoir
C	condenseur
c	culasse de l'évaporateur
d	diamètre
eff	effective
e	entrée
E	évaporateur
L	conduite liquide
V	conduite vapeur
R	réservoir
l	liquide
p	parasite
s	solide, sortie
sat	saturation
v	vapeur
m	moyen
SR	sous-refroidi
SF	source froide
int	interne
ext	externe

1. Introduction

Les semi-conducteurs à large bande tels que le nitrure de gallium (GaN), le carbure de silicium (SiC) et le diamant sont considérés comme étant les matériaux les plus prometteurs pour les futurs composants électroniques. Ces semi-conducteurs intéressent plusieurs applications dans les domaines des hautes fréquences, des hautes températures et des fortes puissances. La filière SiC est actuellement étudiée par le site tarbais d'Alstom : elle est bien adaptée pour des applications dans les domaines des hautes fréquences, des hautes températures, des fortes puissances ou encore opérant en milieux hostiles. La fiabilité de fonctionnement de ces composants à des températures élevées a besoin de systèmes de régulation thermique très performants. Dans ce cadre, les boucles diphasiques à pompage capillaire, initialement développées pour l'industrie spatiale, ont des caractéristiques qui les rendent très intéressantes pour atteindre cet objectif.

Les boucles fluides diphasiques à pompage capillaire (BFDPC) 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.

Le fonctionnement des BFDPC présente certaines limites, par exemple les limites capillaire, d'ébullition, d'entraînement, sonore, visqueuse. En ce qui concerne le refroidissement de l'électronique de puissance, les limites capillaire et d'ébullition sont les plus importantes. La limite capillaire pendant le fonctionnement des BFDPC est atteinte lorsque les pertes de charge dans l'ensemble de la boucle dépassent la pression capillaire maximale créée à l'intérieur de la mèche poreuse :

$$\Delta p_{tot} \geq \Delta p_{cap,max} \quad (1)$$

Pour un liquide parfaitement mouillant, la pression capillaire maximale est définie par l'équation suivante :

$$\Delta p_{cap,max} = \frac{2\sigma}{r_p} \quad (2)$$

où σ est la tension de surface et r_p le rayon des pores.

La limite d'ébullition est caractérisée par la surchauffe nécessaire pour déclencher l'ébullition à l'intérieur de la mèche poreuse. L'équation classique pour estimer la surchauffe nécessaire à la nucléation est [1] :

$$\Delta T_{nuc} = \frac{2\sigma T_{sat}(p_v)}{\rho_v L_v} \left(\frac{1}{r_n} - \frac{1}{r_p} \right) \quad (3)$$

où r_n le rayon de nucléation.

Ces limites de fonctionnement sont essentiellement liées aux propriétés du fluide de travail et en particulier à la tension de surface. Pour cette raison, le choix du fluide de travail est important pour surmonter les limites précédemment listées et pour améliorer les performances de la boucle. Comme le montre la figure 1, pour les fluides ordinaires, la tension de surface diminue avec la température. Toutefois, pour les fluides de mélange binaire, appelés fluides auto-remouillants, la variation de la tension de surface en fonction de la température montre exceptionnellement une pente positive pour les températures élevées.

Dans la littérature, l'influence des fluides binaires sur les systèmes de transfert de chaleur a reçu une attention considérable. Savino [2] a étudié numériquement et expérimentalement la performance thermique de caloducs innovants basés sur les fluides binaires. Ces études ont démontré que les caloducs remplis de fluides binaires présentent de meilleures performances thermiques par rapport aux caloducs remplis avec de l'eau pure.

Fumoto [3] a étudié l'utilisation de fluides binaires dans les caloducs oscillants. Les résultats expérimentaux ont montré que ces fluides améliorent fortement la capacité maximale de transport de chaleur. Récemment, Wu [4] a fait une étude expérimentale pour étudier l'influence des fluides binaires sur les performances des boucles diphasiques de type Loop Heat Pipe (LHP). Les résultats expérimentaux ont montré que les fluides binaires permettent de réduire la température de fonctionnement et la résistance thermique totale des LHP. Ils améliorent également la capacité de transport de chaleur par 260 %.

Cet article présente une étude numérique sur l'influence des fluides binaires (butanol+eau) sur les limites de fonctionnement des boucles diphasiques à pompage capillaire de type Capillary Pumped Loop (CPL). Le modèle de la CPL développé décrit les phénomènes thermiques et hydrauliques couplés dans l'ensemble de la boucle. Une série de mesures de tension de surface pour différentes concentrations de solutions aqueuses de butanol est effectuée. Les limites d'ébullition et capillaires sont analysées pour l'eau et les fluides binaires.

2. Dispositif expérimental

La figure 2 illustre le dispositif expérimental. Le but du dispositif expérimental était de déterminer la relation entre la tension de surface et la température. La tension de surface des solutions aqueuses de butanol et d'eau est mesurée en utilisant la méthode de la goutte pendante [5]. Cette méthode est basée sur l'équation de Young-Laplace qui permet de déterminer la tension de surface en fonction de la forme de la goutte pendante.

3. Modèle Mathématique

La figure 3 présente l'architecture de la boucle diphasique étudiée dans cet article. Il s'agit d'une CPL classique au sens où elle est constituée des trois éléments principaux habituels : évaporateur, condenseur et réservoir thermiquement séparé de l'évaporateur. Les conditions initiales et aux limites associées aux équations de transfert ainsi que la méthodologie numérique sont présentés en détail dans le travail de Boubaker [6].

3.1. Evaporateur

L'évaporateur est l'élément moteur de toute boucle diphasique à pompage capillaire. Le modèle mathématique est décrit dans le travail de Boubaker et al [7]. Les équations de transfert de masse et de chaleur sont développées pour une partie de la mèche centrée autour de la panne chauffante.

Bilan de matière

Phase liquide

$$\frac{\partial(\rho_l \alpha_l)}{\partial t} + \text{div}(\rho_l \vec{V}_l) = -\dot{\Gamma} \quad (4)$$

Phase vapeur

$$\frac{\partial(\rho_v \alpha_v)}{\partial t} + \text{div}(\rho_v \vec{V}_v) = \dot{\Gamma} \quad (5)$$

Loi de Darcy

Phase liquide

$$\vec{V}_l = -\frac{\kappa \kappa_{rl}}{\mu_l} \vec{\nabla} p_l \quad (6)$$

Phase vapeur

$$\vec{V}_l = -\frac{\kappa\kappa_{rv}}{\mu_v}\vec{\nabla}p_v \quad (7)$$

Bilan d'énergie thermique

$$\overline{\rho C_p} \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho_l C_{pl} \vec{V}_l + \rho_v C_{pv} \vec{V}_v) \cdot \vec{\nabla} T = \lambda_{eff} \Delta T - \dot{\Gamma} L_v \quad (8)$$

Modèle de changement de phase

$$\dot{\Gamma} = a S_w \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} (p_{sat}(T) - p_v) \quad (9)$$

Modèle du bâti métallique

$$\rho_c C_{pc} \frac{\partial T_c}{\partial t} = \lambda_c \Delta T_c \quad (10)$$

3.2. Condenseur

Le condenseur est composé de deux zones (figure 3) : une zone diphasique suivie d'une zone de liquide sous-refroidi.

3.2.1. Zone diphasique

La zone diphasique est caractérisée par la longueur diphasique variable η . Les bilans de quantité de matière et d'enthalpie donnent les équations suivantes :

$$\rho_m A_c \frac{\partial \eta}{\partial t} = \dot{m}_c - \dot{m}_v \quad (11)$$

$$h_m A_c \frac{\partial \eta}{\partial t} = \dot{m}_v h_v - \dot{m}_c h_c - \phi_c \quad (12)$$

où $\rho_m = (1 - \alpha_c)\rho_l + \alpha_c\rho_c$ est la masse volumique moyenne, $h_m = (1 - \alpha_c)\rho_l h_l + \alpha_c\rho_v h_v$ est l'enthalpie massique moyenne.

ϕ_c est le flux thermique cédé à la source froide : $\phi_c = \pi D_c \eta h_c (T_c - T_{SF})$

3.2.2. Zone liquide

La zone diphasique est caractérisée par la longueur variable $L_c - \eta$. Les bilans de quantité de matière et de quantité de mouvement permettent d'écrire :

$$-\rho_l A_c \frac{\partial \eta}{\partial t} = \dot{m}_c - \dot{m}_l \quad (13)$$

$$\frac{L_c - \eta}{A_c} \frac{\partial \dot{m}_l}{\partial t} = p_c - p_{Le} - \Delta p_{c,l} \quad (14)$$

La température du liquide sous refroidi à la sortie du condenseur est supposée constante et égale à la température de la source froide :

$$T_{sr} = T_{SF} \quad (15)$$

3.3. Réservoir

Le réservoir est composé de deux parties : une partie basse de volume Ω_{Rb} qui ne contient que du liquide et une partie haute de volume Ω_{Rh} qui contient le fluide sous ses deux phases et un dispositif de régulation thermique (résistance électrique couplé à un régulateur PID) qui maintient la température de consigne.

3.3.1. Partie basse du réservoir

Le bilan de matière permet d'écrire (voir figure 3) :

$$\dot{m}_l = \dot{m}_R + \dot{m}_{RE} \quad (16)$$

La température de liquide dans la partie basse du réservoir est calculée par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} \rho_l \Omega_{Rb} C_{pl} \frac{\partial T_{Rb}}{\partial t} = \dot{m}_l C_{pl} T_{LR} - \dot{m}_{RE} C_{pl} T_{RE} - \dot{m}_R C_{pl} T_{Rbh} \\ + G_R (T_R - T_{Rb}) + h_{Rb,int} S_{Rb,int} (T_{Rbc} - T_{Rb}) \end{aligned} \quad (17)$$

Où T_{Rbh} est la température entre la partie basse et la partie haute du réservoir et G_R est une conductance qui décrit l'échange thermique entre les deux parties du réservoir. Le bilan d'énergie thermique dans la partie inférieure de la paroi du réservoir est :

$$\rho_{Rc} \Omega_{Rc} C_{Rc} \frac{\partial T_{Rbc}}{\partial t} = h_{R,ext} S_{Rb,ext} (T_a - T_{Rbc}) + h_{Rb,int} S_{Rb,int} (T_{Rb} - T_{Rbc}) \quad (18)$$

Où $h_{R,ext}$ est le coefficient d'échange convectif entre la paroi du réservoir et l'ambiance extérieure.

3.3.2. Partie haute du réservoir

Selon des résultats expérimentaux de kaled [8], la température de la partie supérieure de réservoir n'est pas influencée par le fonctionnement du reste de la boucle, même pendant les phases transitoires les plus critiques. Pour cette raison, la température est supposée constante :

$$T_R = cste \quad p_R = p_{sat}(T_R) \quad (19)$$

3.4. Conduites de transport liquide et vapeur

L'écoulement de vapeur est considéré comme incompressible et isotherme. Les conduites liquides ne sont pas isolées thermiquement. Les deux conduites sont discrétisées en petits volumes, afin de calculer les températures du liquide et de la paroi. Le modèle développé tient compte de l'échange thermique avec l'ambiance.

4. Résultats et Discussion

Les équations du modèle physique qui ont été présentées ci-dessus sont résolues par la méthode des éléments finis, par l'intermédiaire du logiciel FreeFem++. La convergence a été supposée avoir été atteinte lorsque la variation maximale de la température et la pression entre les itérations était inférieure à 10^{-6} .

4.1. Validation du modèle

Pour valider notre modèle, les résultats numériques sont comparés à quelques résultats expérimentaux effectués sur le dispositif développé pour Alstom Transport. La figure 4

présente les évolutions temporelles de la température de la paroi de la surface extérieure de la culasse de l'évaporateur, mesurée expérimentalement et calculée par notre modèle. Les résultats ont été obtenus pour du méthanol pur comme fluide de travail. Pendant le démarrage, il existe une différence entre les deux températures, due à la non prise en compte de l'effet des sites de nucléation à l'intérieur de la mèche poreuse. Après le démarrage, le modèle calcule une évolution tout à fait correcte de la température de la culasse, l'écart entre les températures expérimentale et théorique étant inférieur à 0,5 K.

4.2. Tension de surface

La figure 5 montre l'évolution de la tension de surface mesurée expérimentalement pour l'eau et les fluides binaires à différentes concentrations. Pour les solutions aqueuses de butanol, la tension de surface présente une pente positive lorsque la température dépasse 52 °C. On voit aussi que la tension de surface varie avec la concentration. Pour une concentration de 1.5 %, la tension de surface du fluide binaire dépasse celle de l'eau dès que la température dépasse 91°C. Par conséquent, l'utilisation des solutions aqueuses de butanol, comme fluide de travail, peut améliorer les performances de boucles diphasiques pour les températures de fonctionnement élevées.

4.3. Limite d'ébullition

La surchauffe initiale joue un rôle important dans la phase de démarrage de CPL. La figure 6 illustre l'évolution de la surchauffe nécessaire pour déclencher l'ébullition à l'intérieur de la mèche poreuse pour les fluides binaires avec une concentration de 1.5 % pour deux températures de fonctionnement. Pour une température de réservoir de 80 °C, la surchauffe nécessaire pour initier l'ébullition d'une solution aqueuse de butanol est inférieure à celle de l'eau, ce qui peut conduire à un démarrage de CPL plus en douceur. Cependant, pour une température de fonctionnement plus élevée (voir Figure 6b), les résultats montrent que l'utilisation d'une solution aqueuse de butanol, comme fluide de travail, nécessite une plus forte surchauffe au démarrage, ce qui peut conduire au désamorçage.

4.4. Limite capillaire

La figure 7 présente l'évolution de la pression capillaire maximale et les pertes de charge aux bornes de l'évaporateur (pertes de charge gravitaires, régulières et singulières) en fonction de la puissance appliquée. Lorsque la température du réservoir est fixée à 80°C, l'utilisation d'une solution aqueuse de butanol comme fluide de travail retarde, par rapport à l'eau, l'apparition de décrochage de la boucle. En fait, la limite capillaire est atteinte pour une puissance de 8.05 kW pour l'eau, alors qu'elle est atteinte pour une puissance de 8.21 kW pour une solution aqueuse de butanol. Pour une température de fonctionnement de 100 °C. La pente de la pression capillaire maximale pour les fluides binaires est supérieure à celle de l'eau. Le fluide binaire (eau+butanol) améliore significativement la limite capillaire en particulier pour des températures de fonctionnement élevées : la capacité de transport de chaleur de la CPL est passée à peu près de 11,2 kW à 13,4 kW, ce qui correspond à une augmentation de 20%.

5. Conclusion

Dans ce travail, l'effet des fluides binaires sur les performances des boucles diphasiques à pompage capillaire est étudié. Les résultats expérimentaux indiquent que la tension de surface pour les fluides binaires peut dépasser celle de l'eau pour une température

supérieure à une certaine valeur. Les résultats numériques montrent que la surchauffe nécessaire pour déclencher l'ébullition à l'intérieur de la mèche poreuse d'une solution aqueuse de butanol est inférieure à celle de l'eau pour des températures inférieures à 91 °C. En outre, la solution aqueuse de butanol améliore considérablement la limite capillaire de la CPL, en retardant l'apparition du décrochage.

Références

- [1] D. Mishkinis, J. M. Ochterbeck, Homogeneous nucleation and the heat-pipe boiling limitation, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics* 76 (2003) 813-818.
- [2] R. Savino, N. di Franciscantonio, R. Fortezza, Y. Abe, Heat pipes with binary mixtures and inverse marangoni effects for microgravity applications, *Acta Astronautica* 61 (1-6) (2007) 16-26.
- [3] K. Fumoto, M. Kawaji, T. Kawanami, Characteristics of an open-loop pulsating heat pipe and flow visualization using a transparent tube, in: 10th International Heat Pipe Symposium, 2011.
- [4] S.-C. Wu, Study of self-rewetting fluid applied to loop heat pipe, *International Journal of Thermal Sciences* 98 (2015) 374-380.
- [5] R.P. Woodward, Surface tension measurements using the drop shape method, *Technical Guide*, <http://www.firsttenangstroms.com/pdfdocs/STPaper.pdf>.
- [6] Riadh Boubaker. Modélisation thermodynamique instationnaire d'une boucle fluide diphasique à pompage capillaire pour la traction ferroviaire : étude du phénomène de changement de phase dans l'évaporateur. PhD thesis, *Thèse de Doctorat de l'université de Pau et des Pays de l'Adour*, Juillet 2014.
- [7] R. Boubaker, V. Platel, A. Berges, M. Bancelin and E. Hannezo, Dynamic model of heat and mass transfer in an unsaturated porous wick of capillary pumped loop, *Applied Thermal Engineering* 76 (2015) 1-8.
- [8] A. Kaled. Étude expérimentale et théorique d'une boucle diphasique à pompage capillaire dans le contexte de l'aéronautique. PhD thesis, *Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse*, Novembre 2013.

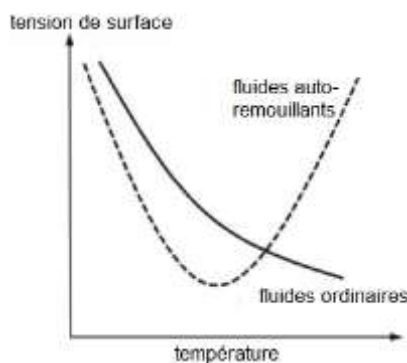


Figure 1 : Tension de surface.

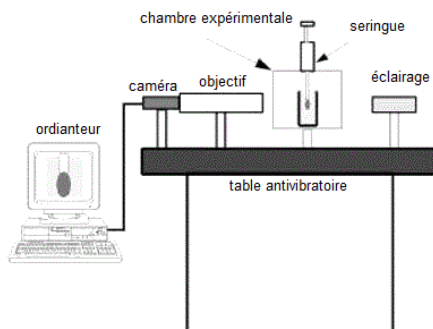


Figure 2 : Méthode de la goutte pendante [5].

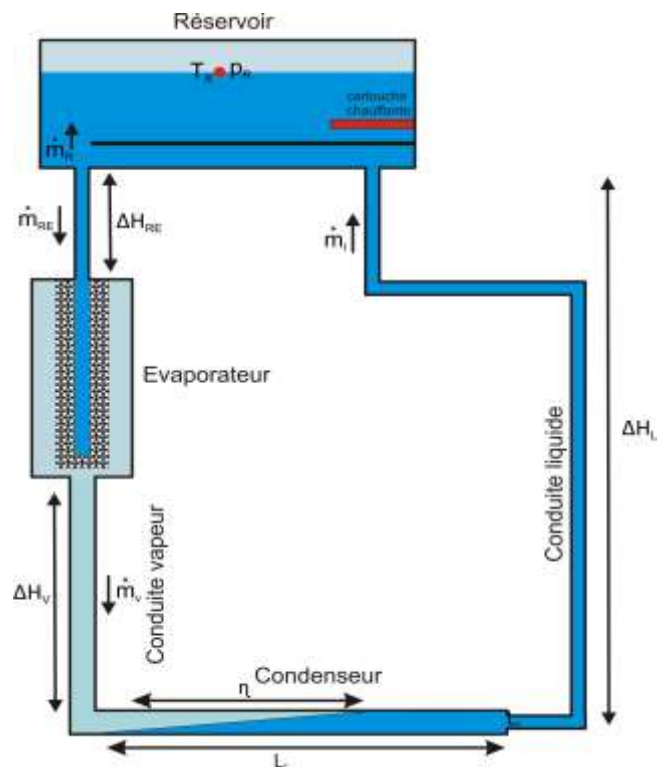


Figure 3 : Architecture de la CPL.

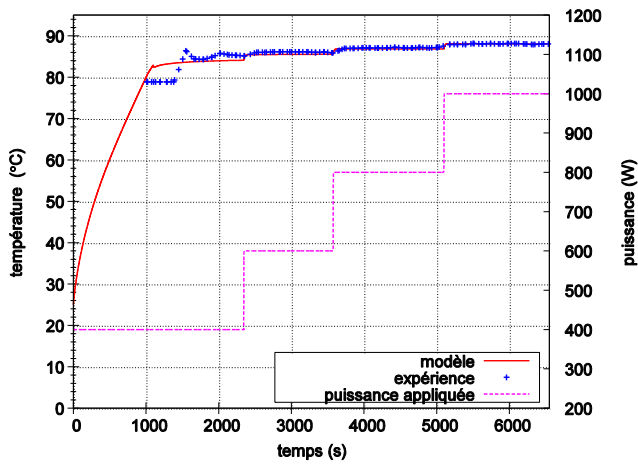


Figure 4 : Température de la surface extérieure de la paroi de la culasse.

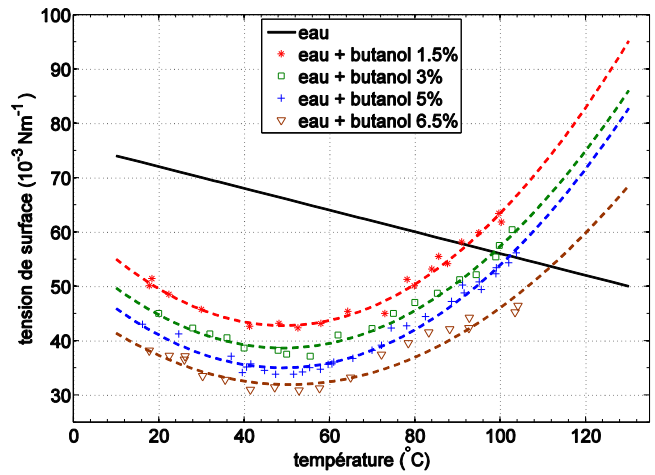


Figure 5 : Tension de surface de l'eau et des fluides binaires.

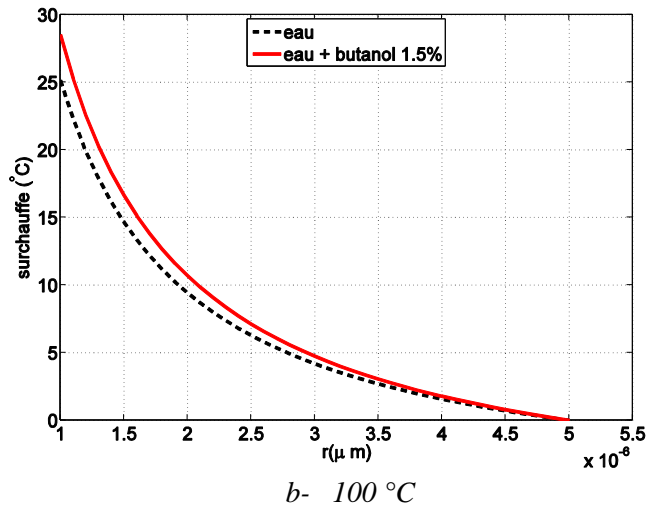
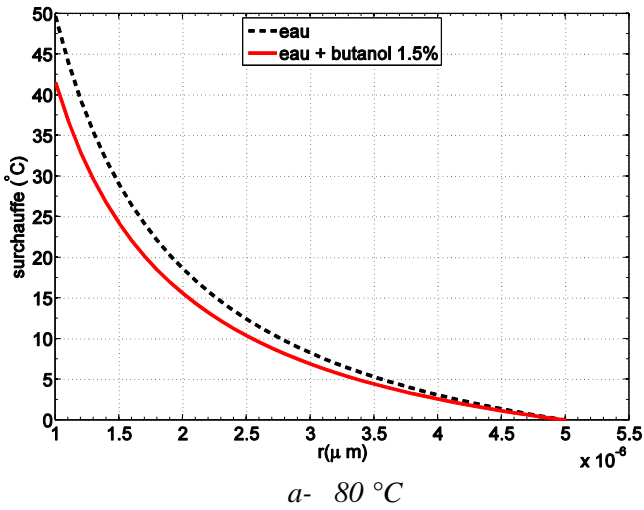


Figure 6 : Surchauffe nécessaire à la nucléation.

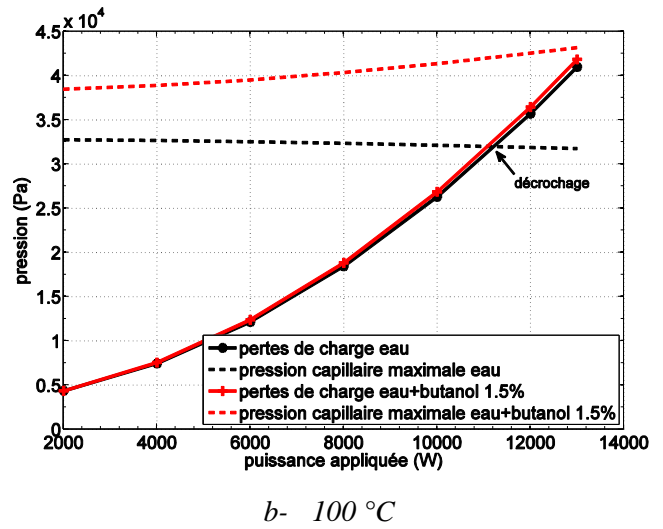
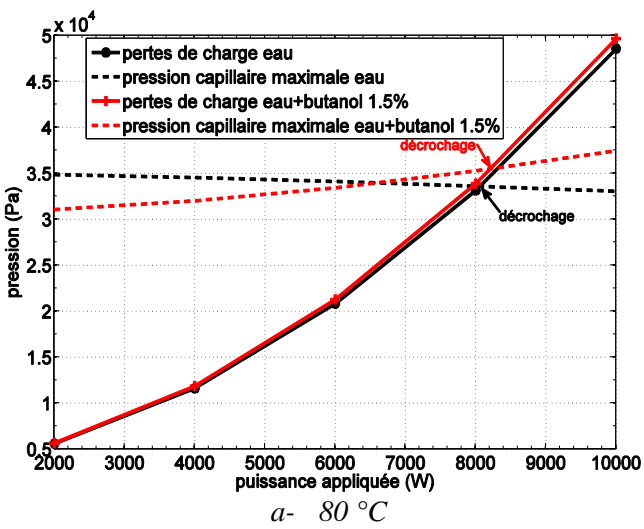


Figure 7 : Evolution de pertes de charge et de la pression capillaire.