

Etude expérimentale d'une boucle de refroidissement diphasique à minicanaux.

Boubakeur MECHERI¹, Stephane LE MASSON², Hasna LOUAHLIA-GUALOUS¹,
David NORTERSHAUSER².

¹Institut FEMTO ST-MN2S, CNRS UMR 6174, UTBM, Batiment F, rue Thierry Mieg, 90010 Belfort.

²France Télécom, 2, Avenue Pierre Marzin - 22307 – Lannion

Résumé- L'utilisation des boucles de refroidissement diphasique offre l'avantage d'assurer le refroidissement des systèmes sans l'intervention de système de pompage mécanique. Dans cet article, des résultats expérimentaux sur une boucle diphasique destinée au refroidissement d'armoires de télécommunication de France Télécom sont présentés. Ces résultats portent principalement sur la réponse de la boucle afin de maintenir une limite thermique de fonctionnement en régime transitoire, en particulier au moment du démarrage

Nomenclature

P	pression, Pa	e	entrée
r	rayon, m	s	sortie
T	Température, °C	L	liquide
σ	tension superficielle, m	V	vapeur
θ	angle de contact	<i>évap</i>	évaporateur
<i>indices :</i>		<i>cond</i>	condenseur
c	capillaire		

1. Contexte de l'étude et introduction

Afin de déployer les services à haut débit, France Télécom va déployer des armoires de télécommunication dont la puissance est limitée à cause de la dissipation thermique des équipements actifs qui entraîne une augmentation de leur température interne. La puissance des équipements limite ainsi le nombre de clients qu'il est possible de connecter à ces services. En plus de cette contrainte, les armoires sont soumises à des effets liés au climat (ensoleillement) qui peuvent être sévères et difficiles à maîtriser. Ceci nécessite l'intégration de systèmes de refroidissement permettant de maintenir la température des composants en dessous de la limite imposée (55°C). C'est dans cet objectif que nous avons mené des études sur les boucles diphasiques. En effet, en accord avec sa politique de développement durable France Télécom ne souhaite pas utiliser de système actif de refroidissement comme par exemple des climatiseurs.

Le refroidissement par changement de phase est favorisé pour maintenir la température de fonctionnement du système stable et pour être utilisé dans les systèmes à haute densité de puissance. Les boucles diphasiques sont des systèmes de refroidissement pour le contrôle thermique et fonctionnent passivement sans pompage mécanique du fluide caloporteur. Le principe de fonctionnement des boucles diphasiques réside sur le changement de phase liquide-vapeur du fluide caloporteur dans l'évaporateur et le changement de phase inverse (vapeur-liquide) après passage du fluide caloporteur dans le condenseur. L'évaporateur constitue l'élément principal de la boucle qui permet la dissipation des calories contenues dans le système à refroidir. La puissance appliquée au niveau des évaporateurs sert à chauffer

le liquide en provenance du condenseur jusqu'à la saturation, à le vaporiser et éventuellement à le surchauffer.

Dans les boucles diphasiques à pompage capillaire, l'évaporateur est muni d'un milieu capillaire. La pression capillaire assure la mise en circulation du fluide caloporteur dans la boucle. Elle dépend du rayon moyen du milieu créant l'effet capillaire dans l'évaporateur (milieu poreux) :

$$\Delta P_c = \frac{2\sigma}{r_p} \cos \theta \quad (1)$$

Où r_p est le rayon moyen des pores, θ est l'angle de mouillage, σ est la tension superficielle du fluide.

Cette différence de pression capillaire doit compenser l'ensemble des chutes de pression générées par la circulation du fluide dans les différents éléments de la boucle.

$$\Delta P_c = \Delta P_{LL} + \Delta P_{LV} + \Delta P_{\text{évap}} + \Delta P_{\text{cond}} \quad (2)$$

Les applications des boucles diphasiques sont destinées principalement au refroidissement à l'intérieur des satellites et autres systèmes spatiaux. Elles sont aussi utilisées comme remplaçant des microcaloducs pour le refroidissement des composants électroniques. Vu l'intérêt du refroidissement par boucle diphasique, de nombreuses publications et études sont présentes dans la littérature [1-4].

Dans cet article, nous présentons les résultats d'une étude expérimentale sur un prototype de boucle de refroidissement diphasique à minicanaux. Le banc d'essais et la procédure d'étude expérimentale suivie sont décrits. Des mesures de pression et des températures sont effectuées dans tout le circuit. Les résultats obtenus sont présentés et analysés en régime transitoire.

2. Dispositif et procédure expérimentaux

La photo du dispositif expérimental utilisé dans le cadre de cette étude est représentée sur la figure 1a. Il se compose principalement de deux éléments moteurs : un évaporateur et un condenseur. Des capteurs de pression sont placés pour mesurer la perte de pression au niveau du condenseur, de l'évaporateur et des lignes liquide et vapeur. L'évaporateur est constitué de trois blocs en cuivre : (i) un réservoir liquide situé en contact directe avec le bloc chauffant, (ii) un bloc central où plusieurs mini-canaux sont pratiqués pour assurer la circulation de la vapeur produite par dissipation de la chaleur de la source chauffante, (iii) un troisième bloc qui constitue le réservoir de la vapeur. Dans ce réservoir, une ouverture centrale est pratiquée afin d'assurer l'évacuation de la vapeur vers le condenseur. La figure 2a présente une photo des trois blocs constituant l'évaporateur. Les trois réservoirs montés sont présentés en figure 1c. Le réservoir du liquide est placé en dessous du bloc central à mini-canaux afin de récupérer le condensat. Le réservoir de la vapeur est placé au dessus du bloc central à minicanaux et est connecté vers l'entrée du condenseur par un tuyau isolant en PTFA d'une longueur de 70 mm. Le bloc chauffant en cuivre a une forme parallélépipédique à face carrée dans lequel sont placées deux résistances chauffantes de forme cylindrique. Ces résistances ont un diamètre de 10 mm et une puissance de 400 W chacune. Dix microthermocouples Chromel-Alumel de diamètre $75\mu\text{m}$ sont insérés dans le bloc chauffant suivant sa longueur et espacés de 20 mm (figure 1c). Ils sont placés à deux niveaux : à 1 mm et à 7 mm de la surface de contact entre le réservoir liquide et le bloc chauffant. Ces microthermocouples sont placés dans le but d'évaluer la puissance thermique dissipée localement et d'estimer les pertes thermiques. Pour chaque puissance imposée, la masse de la vapeur produite est condensée

dans un échangeur à courant parallèle présenté en figure 1b. Cet échangeur est refroidi par circulation d'eau en contre courant par rapport à l'écoulement de la vapeur. Le débit d'eau de refroidissement ainsi que sa température d'entrée et de sortie sont mesurés afin d'évaluer la puissance échangée pour condenser la vapeur. A la sortie du condenseur, la masse condensée est reconduite vers l'entrée de l'évaporateur dans un tuyau isolant en PTFA. A ce niveau, on a placé 4 vannes en croix (figure 1a). Une première vanne fermant la boucle diphasique, une deuxième vanne de vidange du circuit, une troisième vanne permettant la connexion de la boucle à une pompe à vide et une quatrième vanne de remplissage de la boucle. Cette dernière vanne est reliée à un tube transparent permettant de contrôler la masse du fluide caloporteur qu'on souhaite utiliser pour le fonctionnement de la boucle.

La figure 2b présente la vue de face du bloc central de l'évaporateur. Ce bloc est formé par des ailettes de profondeur 10 mm, d'épaisseur 1 mm et espacées de 2 mm et d'une zone centrale à mini-canaux. Cette zone regroupe quatre lignes dont chacune contient 26 mini-canaux de 1,5 mm de diamètre et de longueur 24 mm.

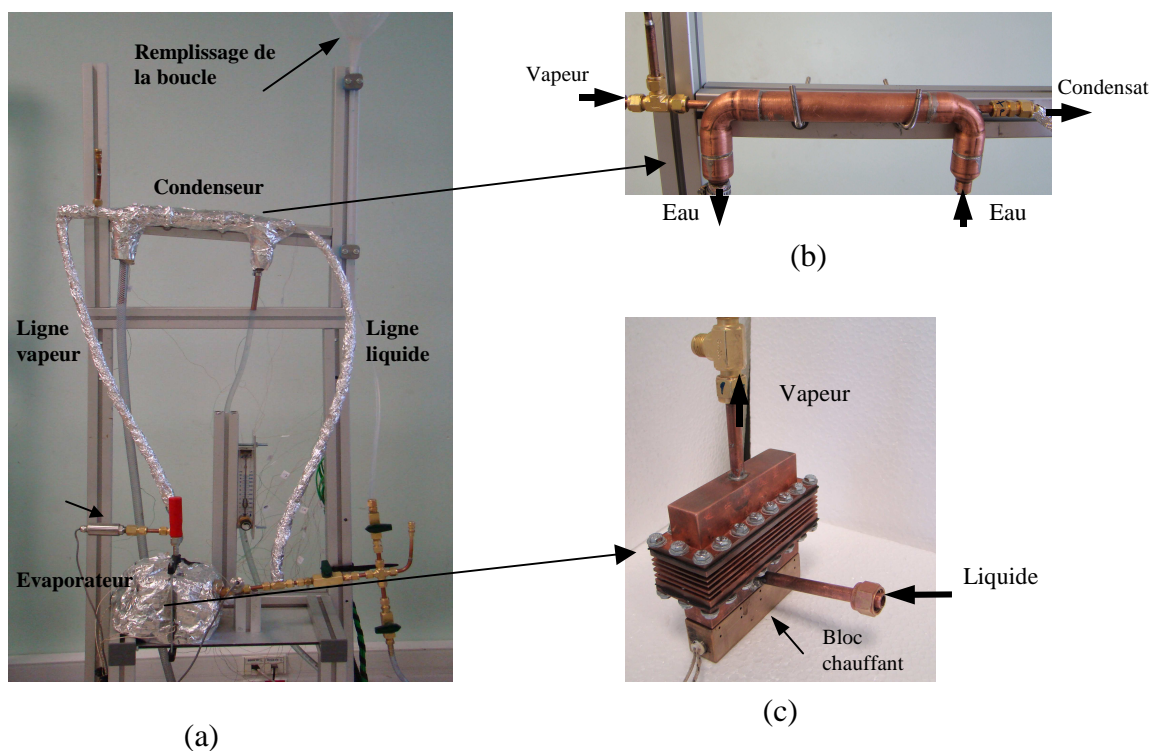


Figure 1. Dispositif expérimental : (a) banc d'essais, (b) condenseur, (c) évaporateur.

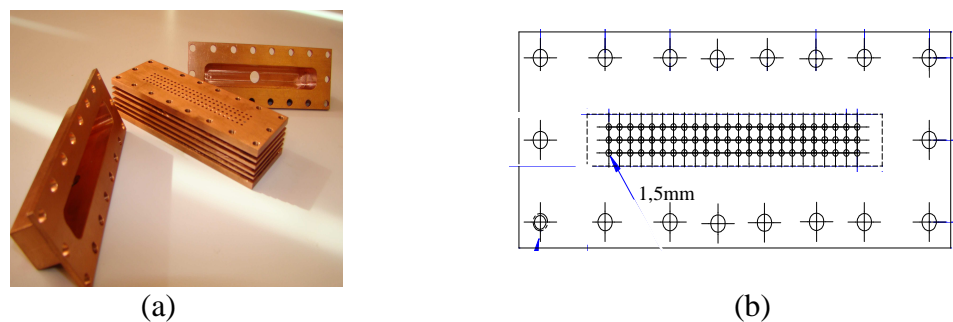


Figure 2. Evaporateur : (a) photo de l'ensemble évaporateur, (b) mini-canaux de circulation de la vapeur

Nous avons effectué des premiers essais sur la boucle diphasique en utilisant de l'eau distillée comme fluide caloporteur. Avant de commencer les essais, nous avons utilisé une pompe à vide pour mettre la boucle sous vide. Ensuite, nous avons rempli le réservoir du liquide de l'évaporateur avec une masse d'eau distillée de 14,4 g. Le bloc chauffant de l'évaporateur est connecté à un variateur de puissance afin de faire varier la tension d'alimentation. Un wattmètre est utilisé pour mesurer la puissance imposée au niveau de l'évaporateur. L'ensemble des capteurs de pression et des microthermocouples est relié à un système d'acquisition Labview géré par un ordinateur.

3. Résultats et discussions

Nous avons effectué des essais sur la boucle diphasique en imposant une puissance de chauffage à une valeur qui reste constante durant chaque essai. Le débit d'eau de refroidissement ainsi que sa température d'entrée sont également maintenus constants pour chaque essai. La figure 3 présente les températures mesurées en régime transitoire, à l'entrée et à la sortie de l'évaporateur et du condenseur. Les résultats de la figure 3 sont obtenus à une puissance imposée de 27 W, un débit d'eau de refroidissement de 18g/s et une température d'entrée de l'eau de 10°C. Les pressions absolues mesurées durant cet essai sont présentées dans la figure 4. On remarque qu'au niveau de l'évaporateur, les pressions commencent à augmenter au bout de 1400s ce qui indique le démarrage du processus évaporation. La vapeur produite doit parcourir la ligne vapeur avant d'entrer dans le condenseur ; ce qui explique le décalage dans le temps (environ $\Delta t=1000s$) existant entre le début des montées en pression dans le condenseur et l'évaporateur. A l'entrée du condenseur, la pression ne débute sa montée qu'à partir de $t=2800s$. La boucle diphasique commence à se stabiliser au bout de 5400s. A cet instant, les figures 3 et 4 montrent que les pressions et les températures mesurées atteignent le régime permanent.

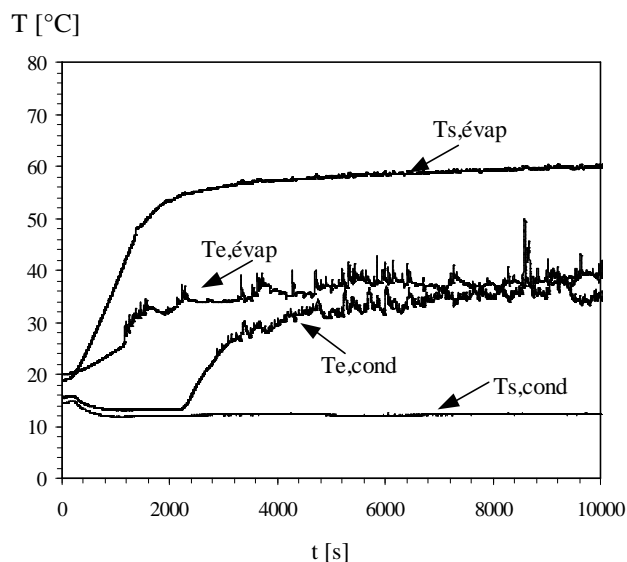


Figure 3: Températures entrée et sortie évaporateur et condenseur $P = 27 w$

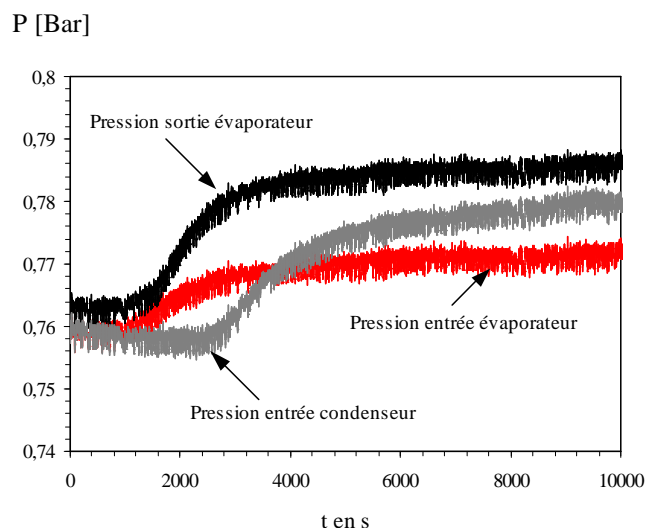


Figure 4: Pressions absolues entrée et sortie évaporateur et entrée condenseur $P = 27 w$

En augmentant la puissance de la source de 27W à 42W, les figures 5 et 6 présentent les températures et les pressions mesurées au niveau de l'évaporateur et du condenseur. En comparant les figures 4 et 6, on remarque que le temps de stabilité de la boucle diminue en

augmentant la puissance du bloc chauffant. Pour $P=42$ W, la courbe de la pression à l'entrée du condenseur débute sa montée au bout de 2200 s ; donc un retard de 600s par rapport au cas où $P=27$ W. Sachant que le début de la montée en pression à l'entrée du condenseur est synonyme d'arrivée de la vapeur. La température à la sortie de l'évaporateur s'est stabilisée à 70°C pour $P=42$ W et à environ 58°C pour $P=27$ W.

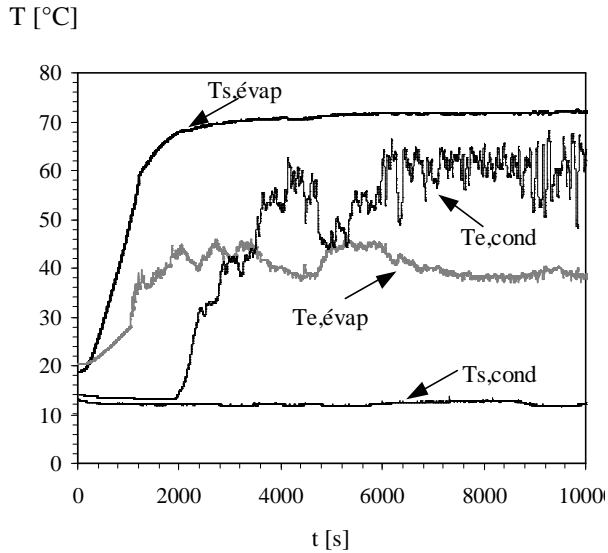


Figure 5: Températures entrée et sortie évaporateur et condenseur $P = 42$ w

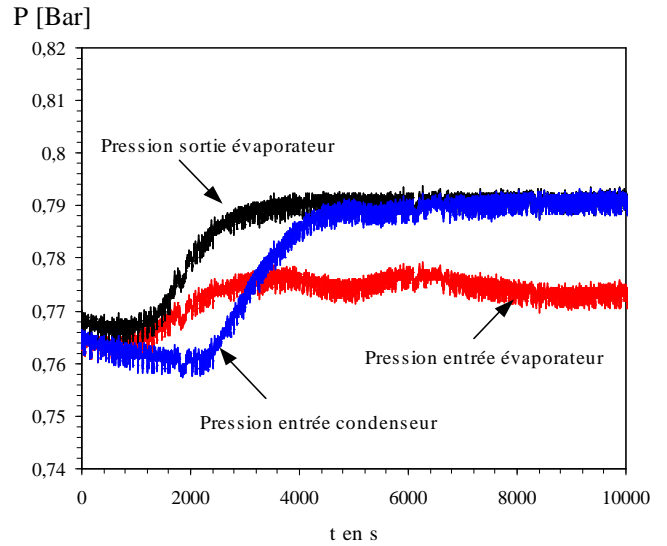


Figure 6: Pressions absolues entrée et sortie évaporateur et entrée condenseur $P = 42$ w

Les figures 7 et 8 montrent les évolutions temporelles des pertes de charge dans l'évaporateur, dans la ligne vapeur ainsi que dans la ligne liquide et le condenseur. La chute de pression dans l'évaporateur augmente avec la puissance dissipée car le débit évaporé augmente avec la puissance du bloc chauffant. Elle atteint 130 kPa à 27 W et de 180 kPa à 42 W en régime permanent. La chute de pression dans la ligne vapeur devient négligeable en régime permanent par rapport à celle mesurée dans l'évaporateur. Elle garde la même allure pour les deux puissances testées.

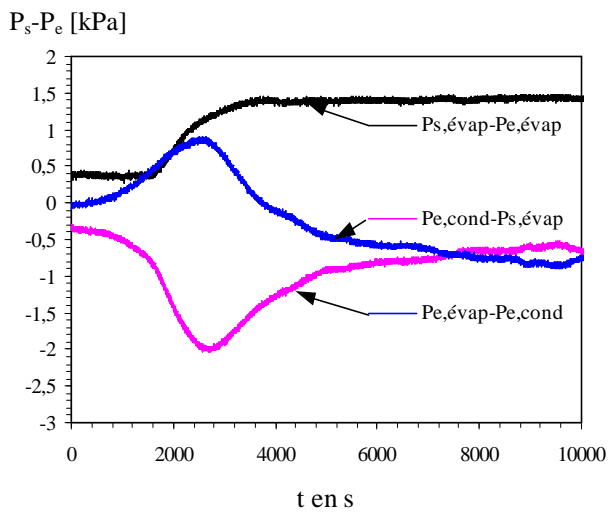


Figure 7: Chutes de pression pour $P= 27$ W

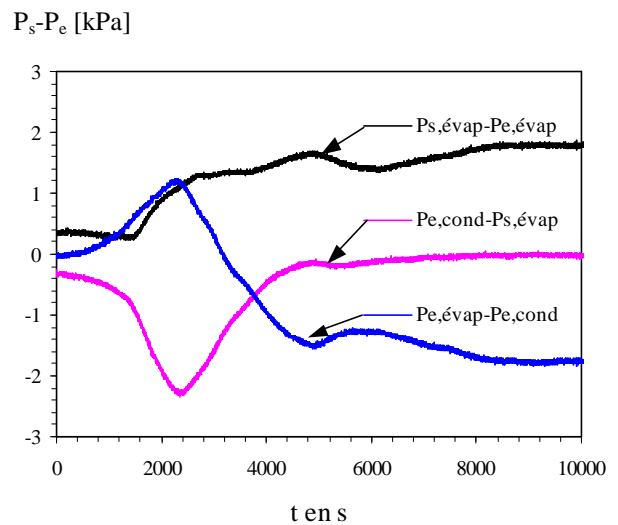


Figure 8: Chutes de pression pour $P= 42$ W

Contrairement à la chute de pression dans l'évaporateur, celle dans la ligne vapeur présente un pic dû principalement à l'évolution enregistrée de la pression à l'entrée du condenseur. La chute de la pression dans la ligne vapeur diminue et tend vers sa valeur minimale correspondant à l'état d'équilibre de la boucle. L'effet de la variation de la puissance du système sur la pression à l'entrée et à la sortie de l'évaporateur est présenté en figure 8. Contrairement aux essais précédents, nous avons, dans ce cas, fait varier la puissance du bloc chauffant sans veiller à ce que les températures initiales de la boucle pour chaque puissance soient les mêmes (la boucle est en fonctionnement continu). Durant cette série d'essais, on a relevé la réponse des capteurs de pression au niveau de l'évaporateur. La figure 8 montre que le système à un temps de réponse rapide. En effet, pour une variation de puissance de 20 à 60W, le temps de réponse du système est d'environ 20 mn.

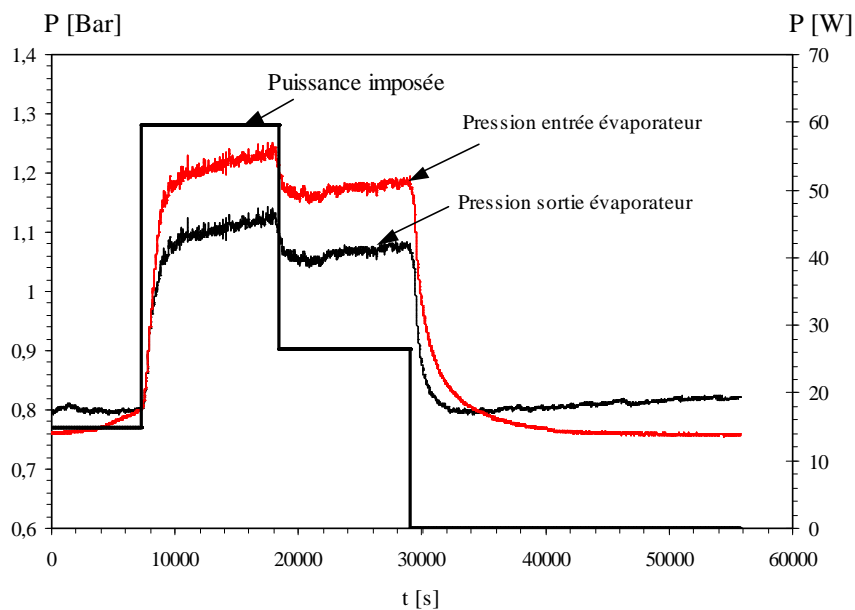


Figure 8: Réponse du système à une variation brusque de puissance

4. Conclusions

Dans cet article, nous avons présenté les résultats d'une étude expérimentale sur une boucle diphasique destinée pour le refroidissement des composants électroniques dans une armoire de télécommunication de France Télécom. Les résultats présentés concernent le fonctionnement de la boucle en utilisant un bloc chauffant pour assimiler la puissance dissipée dans l'armoire de télécommunication. Cette étude sera poursuivie afin d'effectuer des essais sur le refroidissement d'une armoire dans laquelle le chauffage de l'évaporateur sera fait par convection naturelle ou par rayonnement solaire.

Références

- [1] R. Greif, Natural circulation loops, *J. Heat Transfer.*, (1988), vol. 110, 1243– 1258.
- [2] Yu. F. Maydanik, Loop heat pipe, *Applied Thermal Engineering.*, (2004), 635–657.
- [3] K. E. Torrance and V. W. C. Chan, Heat transfer by a free convection loop embedded in a heat-conducting solid, *Int. J. Heat Mass Transfer.*, (1980), vol. 23, pp. 1091–1097,
- [4] H. H. Bau and K. E. Torrance, on the stability and flow reversal of an asymmetrically heated open convection loop, *Journal of Fluid Mechanics.*, (1981), vol. 106, pp. 417–433,