Evaporateurs à films ruisselants

Benoit Stutz, Amin Altamirano, Muriel Stepec, Nolwenn Le Pierrès

LOCIE - Univ. Savoie Mont Blanc / CNRS, F-73000 Chambéry, France
*(auteur correspondant : benoit.stutz@univ-smb.fr)

Résumé - La présente étude porte sur le développement d'évaporateurs à plaque et films ruisselants pour les machines à absorption travaillant avec de l'eau comme fluide frigorigène. On s'intéresse plus particulièrement aux problèmes de mouillage qui nécessitent la mise en place de structuration de surfaces. Deux structurations sont étudiées et comparées. Des premiers tests de performance sont réalisés sur des plaques rainurées.

Nomenclature

h	Coef. transfert thermique, $W.m^{-2}.K^{-1}$	g	Accélération pesanteur, $m.s^{-2}$
L	Largeur de plaque mouillée, m	γ	Tension de surface, $N.m^{-1}$
$\dot{M}$	Débit massique, $kg.s^{-1}$	λ	Conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
P	Pression, Pa	ν	Viscosité cinématique, $m^2.s^{-1}$
$\dot{Q}$	Flux de chaleur, W	μ	Viscosité dynamique, $Pa.s$
r	Facteur de rugosité	ρ	Masse volumique, $kg.m^{-3}$
Re	Nombre de Reynolds	θ	Angle de contact
S	Surface d'échange, m^2	*Indices et exposants*	
T	Température, K	i	interface
x	Distance, m	l	liquide
Symboles grecs		s	solide
ΔT	Ecart de température, K	sat	saturation
Δh_{lv}	Chaleur latente de chgt. de phase, $J.kg^{-1}$	v	vapeur
ε	Epaisseur de film, m	w	Wenzel

1. Introduction

La présente étude se place dans le cadre des machines à ab/ad sorption dédiées à la production de froid [1] ou de chaud et au stockage de chaleur [2] mettant en œuvre l'eau comme fluide frigorigène L'augmentation de la compacité de ces machines conduit à un regain d'intérêt pour le développement d'échangeurs à plaques et films ruisselants. Ces échangeurs présentent des compacités et des performances intéressantes, dès lors que l'on arrive à maitriser les problèmes de mouillabilité à bas débits. Le choix des matériaux est également un enjeu important. Les alliages cupro-nickel ou des aciers inoxydables couramment mis en œuvre présentent un frein au développement des machines compte tenu de leurs coûts et de leurs mises en œuvre. Les alliages d'aluminium présentent des potentiels intéressant pour ce types de machines vues l'aptitude de certains d'entre eux à résister à des environnements salin sévères, et de leur simplicité de mise en œuvre industriellement.

Le développement des évaporateurs mettant en œuvre l'eau comme fluide frigorigène est principalement limité par des problèmes de mouillabilité, l'eau présentant un angle de contact vis-à-vis de la plupart des surfaces métalliques proche de 90°. Les films ruisselants se rassemblent alors rapidement le long des surfaces d'échanges pour former des ruisselets, réduisant drastiquement les performances des échangeurs [3]. Deux techniques permettant d'accroitre la surface mouillée sont mise en œuvre pour des échangeurs en aluminium dans le cadre de cette étude : le rainurage (macro-structuration) [4] et la formation d'une couche microporeuse en surface (micro-structuration). La première partie de l'étude porte sur

l'évolution du taux de mouillage avec le débit. La seconde partie présente les premiers résultats de performances d'évaporateurs à surfaces rainurées.

2. Structuration des surfaces et mouillabilité :

Deux échelles de structurations des surfaces ont été étudiées, milimétrique (rainurage de la plaque) et micrométrique (réalisation d'une couche micro-poreuse sur la surface d'échange). La première vise à maintenir le film liquide en tirant partie des effets de tension superficielle. La seconde vise à réduire la formation de ruisselets en rendant la surface super-mouillante. Le taux de mouillage des échangeurs, a été étudié sur une large gamme de débit croissant et décroissant à pression atmosphérique pour des températures d'eau similaires à celles rencontrées en régime de fonctionnement des échangeurs. Une caméra infra-rouge a été mise en œuvre pour se faire, tirant parti de la différence d'émissivité de l'eau et de la paroi métallique de l'échangeur. Le taux de mouillage est déterminé à l'aide d'un seuillage des images (Figure 1).

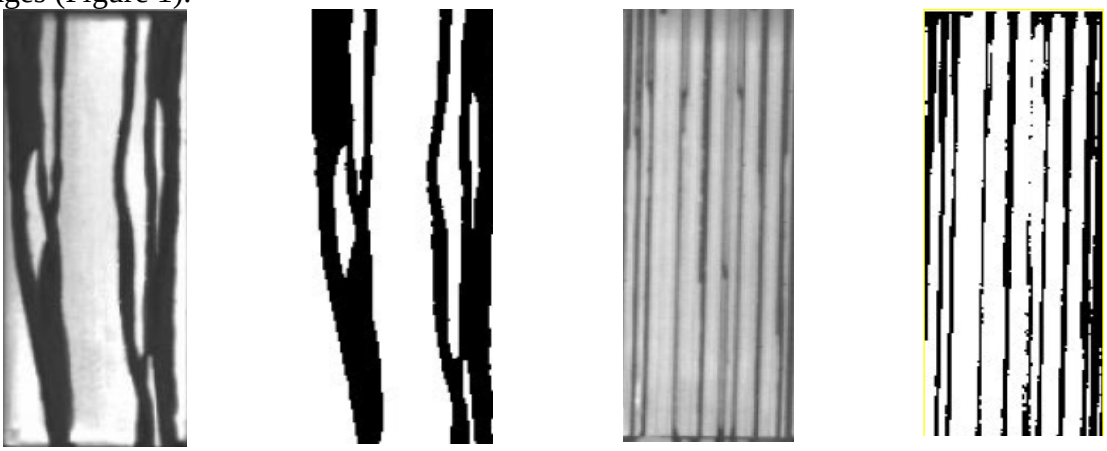


Image brute plaque plane | Image seuillée plaque plane | Image brute plaque rainurée | Image seuillée plaque rainurée

Figure 1 : *Détermination du taux de mouillage par traitement d'images IR*

2.1 Structuration millimétrique

Cette méthode est couramment mise en œuvre en génie des procédés pour les contacteurs liquide-vapeur [4]. L'idée est de stabiliser le film ruisselant en « étirant » l'interface entre les deux parois latérales d'un canal. La largeur de canal doit être suffisamment faible pour que les forces de tensions superficielles restent grandes vis-à-vis des forces d'inertie, et suffisamment grande pour permettre une bonne mouillabilité du canal et maximiser les surfaces interfaciales. Différentes largeurs de canal ont été testées. Pour des largeurs inférieures à la longueur capillaire (2,7 mm), le liquide a du mal à pénétrer dans le canal de sorte à ce qu'une partie sensible du liquide s'écoule à l'extérieur. Pour des largeurs sensiblement supérieures à la longueur capillaire (> 8 mm), le mouillage des canaux nécessite des débits très importants (Re > 3000). Le meilleur compromis a été atteint pour une largeur de canal de 4 mm. L'évolution du taux de mouillage défini comme la surface mouillée sur la surface projetée de l'échangeur, en fonction du débit est montré Figure 2

Le mouillage des rainures présente un fort effet d'hystérésis. Le mouillage total des rainures (75%) est atteint à débit croissant pour un Reynolds de 800 (les 25% de surface non mouillée correspondant aux épaulements des rainures). Le taux de mouillage reste à sa valeur maximale lorsque l'on réduit le débit, et ce pour des débits très faibles, montrant l'efficacité de ce type de structuration de surface.

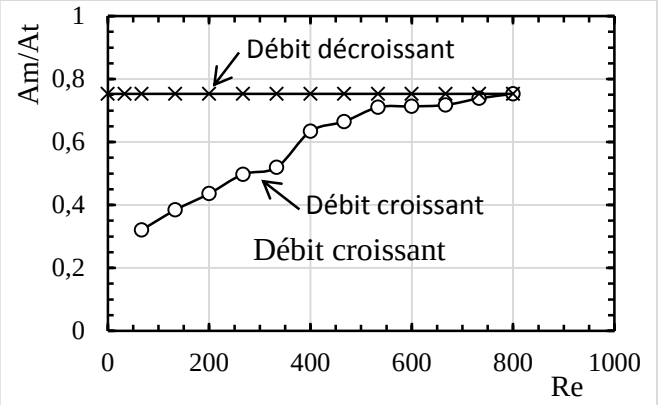


Figure 2 **:** *Evolution du taux de mouillage en fonction du Reynolds pour un échangeur rainuré*

Les rainures jouent cependant un rôle stabilisateur sur les instabilités de surfaces. Dans le cas des rainures étudiées de 4 mm de largeur, aucune instabilité de surface n'a pu être observée sur l'ensemble de la gamme de débit étudié. L'écoulement peut être considéré comme laminaire jusqu'à des Reynolds de 800.

2.2. Structuration micrométrique

La mouillabilité d'une surface dépend des caractéristiques physico-chimiques des surfaces mais également de leur structuration. L'aptitude d'un fluide à mouiller une surface parfaitement lisse dépend de l'angle de contact, fonction des énergies de surfaces solide - liquide γ_{sl}, liquide-gaz γ_{lv}et solide-gaz γ_{sv}. Il est donné par la loi de Young :

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos\theta \quad (1)$$

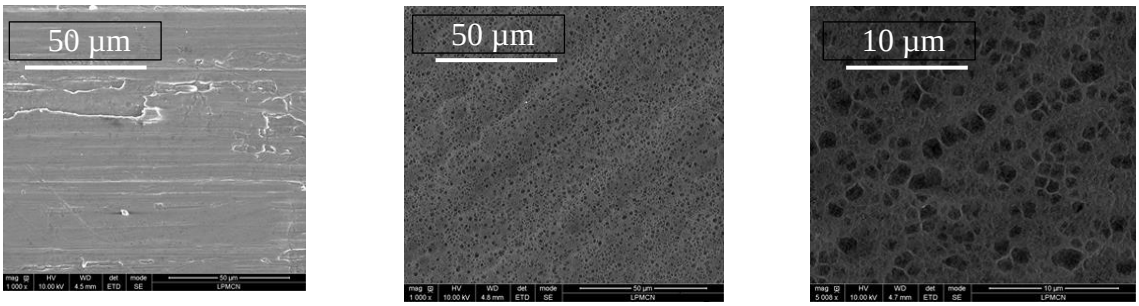
Lorsque la surface est structurée aux petites échelles, la loi de Wenzel montre que la rugosité de la surface a une forte influence sur l'angle de contact apparent. Ce dernier est alors donné par :

$$cos\theta_W = rcos\theta \quad (2)$$

Avec r le facteur de rugosité, défini comme le rapport entre la surface réelle et la surface projeté de la paroi solide, θ_W l'angle de contact apparent (de Wenzel) entre le liquide et le matériau. Le rapport r joue le rôle d'un amplificateur sur les propriétés de mouillabilité de la surface.

Il existe différents moyen de structurer les surfaces : par des procédés mécaniques, plasmas, chimiques… L'application de la technique aux échangeurs nécessite de choisir une technique facile à mettre en œuvre et très peu couteuse. Le choix s'est porté sur des attaques chimiques de type anodisation de surface, permettant de développer une couche microporeuse au niveau de la surface d'échange. Ces techniques électrochimiques sont utilisées à la base pour créer une couche de passivation sur les surfaces pour les protéger de la corrosion. La procédure mise en œuvre est tirée de l'étude [5] : La surface d'aluminium est préalablement dégraissée avec de l'acétone, puis placée dans une solution de soude (1.0 mol/l) pendant 1 heure. La plaque subie ensuite un électro-polissage dans une solution d'acide phosphorique et glycérine (5 wt%). Après rinçage à l'eau desionisée, l'anodisation est réalisée dans un bain d'acide phosphorique (0.3 mol/l)

L'observation de la surface, réalisée avant et après traitement par microscopie électronique (figure 3) montre clairement la formation d'une couche microporeuse en surface.



Surface brute Surface anodisée

Figure 3 : *Observation de la surface par microscopie électronique*

L'impact de ce traitement sur les propriétés de mouillabilité a été analysé par la méthode des gouttes sessile (Figure 4) pour une température de T=23°C, sous 45% d'humidité et à pression atmosphérique.

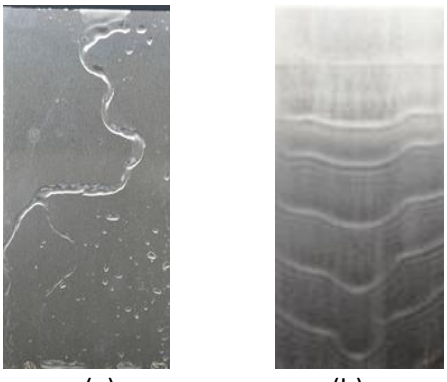
Surface *brute* Surface anodisée

Figure 4 : *Impact du traitement de surface sur la mouillabilité des surfaces*

La couche microporeuse augmente sensiblement l'angle de contact apparent (proche de 84,4° sur la surface brute). Les gouttes se repandent très rapidement sur la surface anodisée sous l'effet des forces capillaires dans la couche poreuse. L'angle de contact apparent est alors trop faible pour pouvoir être quantifié (< 5°). Il est possible d'estimer le facteur de rugosité à l'aide du modèle de Wenzel

$$r = \frac{cos\theta_W}{cos\theta} \geq 10 \qquad (3)$$

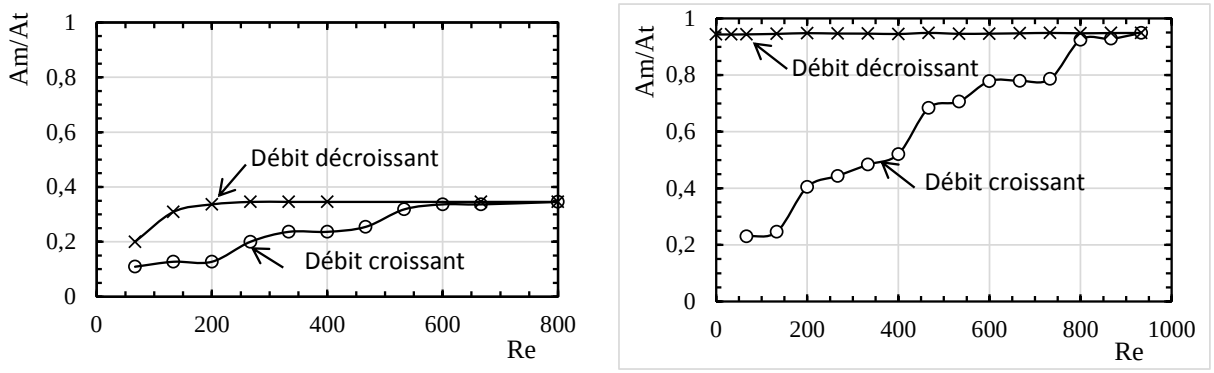
La micro-structuration de surface permet d'augmenter sensiblement le taux de mouillage des surfaces. Il est ainsi possible de conserver des films ruisselants pour de très bas débits (Figure 5). Il est également à noter que la technique d'anodisation de surface est très stable : Aucune dégradation de la surface n'a pu être observée sur les cyclages effectués.



(a) (b)

Figure 5 : *Ecoulement d'eau sur une surface brute (a) et sur une surface anodisée (b)*

Les évolutions du taux de mouillage en fonction du débit pour la plaque brute et la plaque anodisée sont montrées Figure 6. Tout comme les plaques rainurées, le taux de mouillage présente un effet d'hystérésis marqué. Le taux de mouillage de la plaque brute reste inférieur à 40% sur l'ensemble des débits testés. Le taux de mouillage de la plaque anodisé atteint 95% pour un Reynolds de 800. Il reste inchangé lorsque l'on réduit le débit.



Plaque brute Plaque anodisée

Figure 6 : *Evolution du taux de mouillage en fonction du Reynolds pour un échangeur rainuré*

Contrairement au cas des plaques rainurées, les films se développant le long des plaques planes anodisées sont instables par nature. Ils sont le siège d'instabilités de surfaces mettant en œuvre des ondes capillaires à très bas Reynolds (quelques unités), puis des ondes inertielles et capillaires pour les plus hauts débits. Les écoulements transitent à la turbulence pour des nombres de Reynolds élevés (supérieurs à 600).

Les ondes inertielles drainent une partie importante du débit de sorte à ce que l'épaisseur de film résiduel entre 2 ondes inertielles est environ 30% plus faible que celle prédite par la théorie de Nusselt (65 % du débit est alors transporté par l'onde inertielle). Cet amincissement du film est alors responsable d'une augmentation du coefficient de transfert thermique local d'environ 40% (le Reynolds du film résiduel étant alors divisé par 3).

3. Transferts thermiques en évaporation

3.1. Dispositif expérimental

Un dispositif expérimental a été spécifiquement conçu pour l'étude des performances des d'évaporateurs basse pression à films ruisselants. Il se compose d'une cuve (1) au sein de laquelle sont maintenues des conditions de vapeur saturante à la pression désirée (typiquement 10 mb) (Figure 7). La porte latérale est équipée d'un hublot de visualisation. La plaque évaporatrice étudiée (2) est chauffée à l'aide d'un fluide caloporteur connecté à une unité de puissance (3) régulée en température. Le film ruisselant est formé en haut de plaque grâce à un distributeur (4). La part de film liquide non évaporé est collectée en pied de plaque et dirigé dans un réservoir (5). Il est ensuite pompé pour être de nouveau injecté au niveau du distributeur. Le débit de liquide en entrée et sortie de la plaque est mesuré au moyen de deux débitmètres à effets Coriolis (6). Le débit de vapeur évaporé est condensé sur une plaque condenseur (7) placée en regard de la plaque évaporatrice. Sa température est régulée à l'aide d'un bain thermostaté (8) de sorte à maintenir la pression au niveau désiré. Le débit d'eau condensé est mesuré à l'aide d'un tube jaugé (9) avant d'être dirigé vers le réservoir. La cuve est équipée d'un piège à incondensable (10) permettant d'évacuer les gaz lors des processus de dégazage. Les connectiques de type ISO-KF sont mises en œuvre pour garantir un très faible niveau de taux de fuite (estimé à 10^{-4} mbar.l/mn).

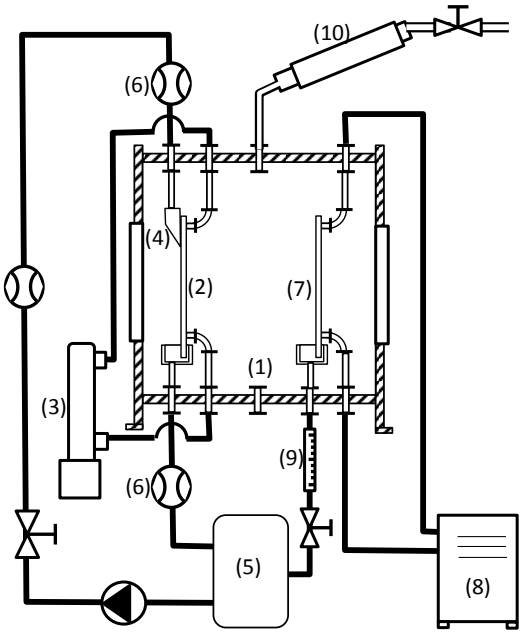


Figure 7 : *Dispositif expérimental*

Les températures de liquide sont mesurées à l'aide de thermocouple de type K connectés à la centrale d'acquisition via un boitier froid. L'étalonnage des sondes permet de garantir une incertitude de mesure de 0,1 K. La pression dans la cuve est mesurée à l'aide d'un capteur Adixen dont la précision est de 0,1 mbar. Les débits de fluide frigorigène sont mesurés en amont et en aval de la plaque à l'aide de deux débitmètres à effet Coriolis EMERSON de précision 0,1% de la valeur mesurée. Les acquisitions sont réalisées par l'intermédiaire d'une centrale AGILENT 34970A Pilotée par une interface Labview.

3.2. Estimation des coefficients de transferts

Les résultats expérimentaux sont comparés à deux modèles simples d'évaporation en régime laminaire. La température de plaque est imposée par le fluide caloporteur et égale à la température du film ruisselant en entrée. Le régime dynamique est considéré établi (profil de vitesse parabolique). L'épaisseur de film laminaire de référence est alors donnée par [7] :

$$\varepsilon = \sqrt[3]{\frac{3\dot{M}\nu}{\rho g L}} \tag{4}$$

Le modèle le plus simple considère une épaisseur de film constante (débit de vapeur évaporé négligeable vis à vis du débit de liquide ruisselant le long de la plaque) et un régime thermique établi. Le coefficient de transfert thermique entre la plaque et la vapeur ainsi que le débit de vapeur évaporé sont alors donnés par :

$$h = \frac{\lambda_l}{\varepsilon} \qquad \dot{M}_{evap} = \frac{\lambda_l S \Delta T_{sat}}{\varepsilon \Delta h_{lv}} \tag{5}$$

Il est possible de considérer l'impact de l'évaporation à l'aide d'un modèle similaire au modèle de Nusselt. L'épaisseur de film est alors donné par

$$\varepsilon(x) = \left({\varepsilon_i}^4 - \frac{4\mu_l \lambda_l \Delta T_{sat}}{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) \Delta h_{lv}} x \right)^{1/4} \tag{6}$$

Le coefficient de transfert thermique moyen entre la plaque et la vapeur est donné par :

$$\bar{h} = \frac{\rho_l (\rho_l - \rho_v) g \Delta h_{lv}}{3 L \mu_l \Delta T_{sat}} \left({\varepsilon_i}^3 - \left({\varepsilon_i}^4 - \frac{4\mu_l \lambda_l \Delta T_{sat}}{\rho_l \Delta \rho g \Delta h_{lv}} L \right)^{3/4} \right) \tag{7}$$

La comparaison entre ces deux modèles est présentée figure 8 pour une surchauffe de la paroi de 4 K, une longueur de plaque (265 mm) et une gamme de débit correspondant aux

débits expérimentaux étudiés. Le Reynolds est calculé avec le débit imposé en entrée. Les résultats diffèrent peu, excepté à bas débit pour lesquels la plaque ou les canaux sont partiellement mouillés. Pour des débits supérieurs à 5 kg/h (soit un Reynolds de 90) l'épaisseur de film ruisselant peut être considérée comme constante le long du film. Pour des débits inférieurs, l'évaporation s'accompagne d'un amincissement du film favorable aux transferts. Si le débit de film imposé est en dessous d'une vapeur limite correspondant à un Reynolds de 10, la totalité du film s'évapore avant d'atteindre la base de la plaque.

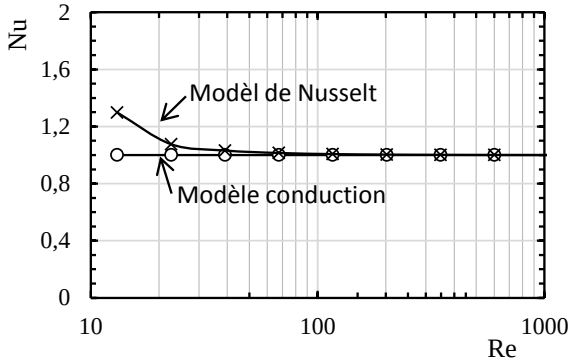


Figure 8 : *Evolution du coefficient de transfert thermique le long du film*

Dans le cas de films ruisselants sur des plaques planes super-mouillantes, le développement des ondes solitaires s'accompagne d'une amélioration des transferts : Ceci est dû à l'amincissement du film résiduel (de l'ordre de 30%) entre les ondes de surfaces, et aux effets de brassage induit lors de l'appareillement des ondes [6].

3.3. Résultats expérimentaux

Seuls les transferts en présence de plaques rainurées ont pu être étudiés. Les essais ont été réalisés en condition de température imposée (fort débit de fluide caloporteur) pour différentes surchauffes de paroi (2, 4, 8 et 16 K) et différents débits de films ruisselants. Les résultats expérimentaux présentés figure 9 sont comparés au modèle de conduction à travers le film d'épaisseur constante. Les résultats expérimentaux à débits croissants et décroissants sont assez semblables et peu sensibles au débit de film. Ceci est assez surprenant compte tenu de l'effet d'hystérésis observé sur le mouillage des plaques. Les transferts semblent montrer un optimum, fonction du débit et de la surchauffe de la paroi, le débit optimum augmentant avec la surchauffe. Le coefficient d'échange tend à diminuer avec l'augmentation de la surchauffe pariétale. Ainsi, si la puissance transmise augmente avec la surchauffe à la paroi, cet accroissement n'est pas linéaire. Ceci peut être attribué au développement de zones d'assèchement dans les canaux. A forte surchauffe, ($\Delta Tsat$ = 16 K), l'ébullition apparait au sein du canal et s'accompagne de projections de gouttelettes.

La surestimation des transferts à bas débit par le modèle provient vraisemblablement d'une mauvaise distribution du liquide au sein du canal, le liquide ayant tendance à se regrouper dans les coins et former des ruisselets à bas débit. Le fluide tend à mieux se répartir avec l'augmentation du Reynolds. La dégradation des transferts liée à l'épaississement du film liquide prédite par le modèle avec l'augmentation du débit semble compensée par une meilleur homogénéité du film et sans doute également un accroissement de la surface mouillée ce qui peut expliquer une certaine homogénéité du coefficient d'échange avec l'augmentation du Reynolds. Le modèle montre une bonne concordance avec les résultats expérimentaux à haut débit et pour de fortes surchauffes de paroi. Sans-doute est-ce en partie dû à des incertitudes de mesures qui diminuent lorsque la puissance échangée augmente (effet des pertes pertes thermiques encore non quantifiées).

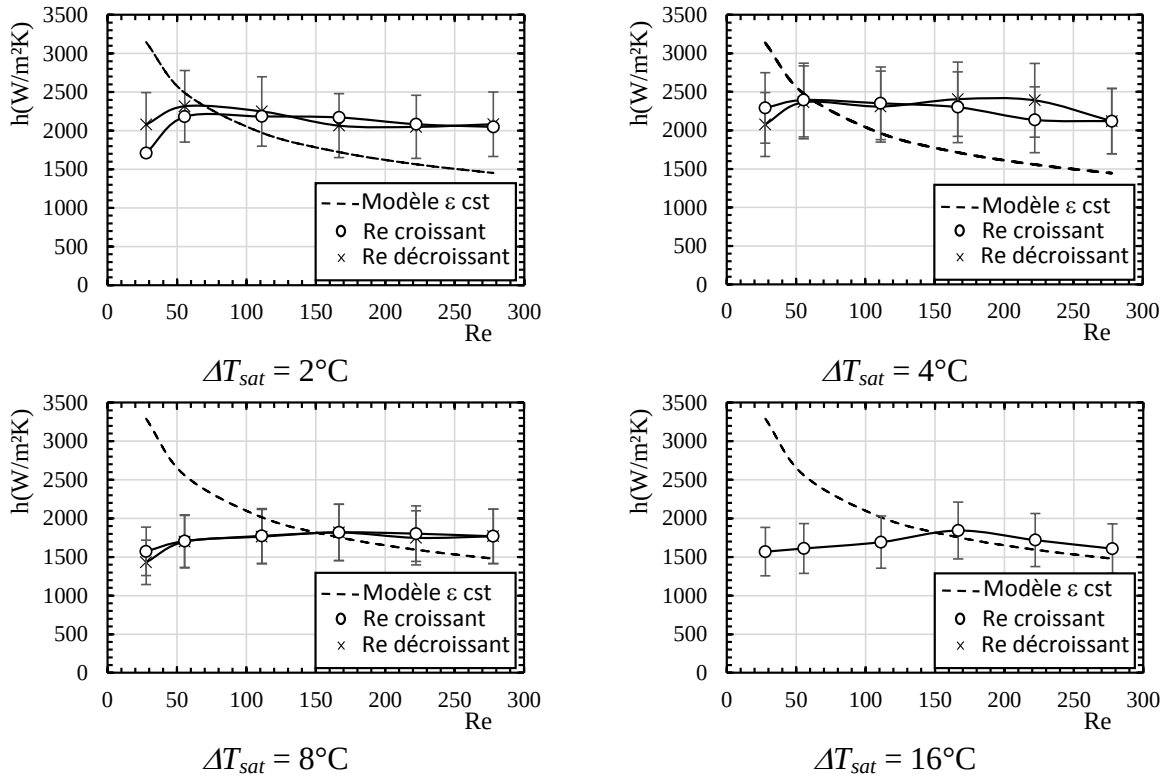


Figure 9 : *Evolution du coefficient d'échange moyen en présence de plaques rainurées*

4. Conclusion :

Cette étude montre des premiers résultats obtenus sur des évaporateurs à plaque films ruisselants pour machines à absorption fonctionnant avec de l'eau comme fluide frigorigène. Les problèmes de mouillabilité des surfaces apparaissent cruciaux pour ce type d'échangeurs. Le développement de surfaces rainurées permet d'obtenir un mouillage acceptable des plaques mais s'accompagnent de coefficient de transferts médiocre compte tenu de la stabilisation du film qu'il induit.

Références

[1] J.F. Cap, B. Stutz, F. Huaylla, Model of H2O/LiBr absorption machine using falling films, EuroSun conference, *Aix-les-Bains, 16 – 19 September (2014) pp 8*

[2] E. N'Tsoukpoe, N. Le Pierrès, L. Luo, Experimentation of a LiBr-H_2O absorption process for long-term solar thermal storage: Prototype design and first results, *Energy, 53 (2013), 179-198.*

[3] M. El-Genk, H. Saber, An Investigation of the Breakup of an Evaporating Liquid Film, Falling Down a Vertical, Uniformly Heated Wall, *J. Heat Transfer 124(1) (2001) 39-50.*

[4] H. Monnier, N. Mhiri, L.Falk, Falling liquid film stability in microgas/liquid absorption, Chemical Engineering and Processing: *Process Intensification 49(9) (2010): 953-957.*

[5] Y. Jiamin, Y. Qiming, Z. Yongliang, Superhydrophilicity of anodic aluminum oxide films: From honeycomb to bird's nest, *Thin Solid Films 517 (2009) 6012–6015*

[6] N. Kofman, Films liquides tombants avec ou sans contre-écoulement de gaz : application au problème de l'engorgement dans les colonnes de distillation, *thèse de doctorat, Univ. Paris VI* (2015), pp. 158

[7] C. Flores, Étude des transferts de masse et de chaleur au sein d'un absorbeur eau/bromure de lithium, *thèse de doctorat, Univ. de Grenoble* (2015), pp. 176

Remerciements : Ce travail a été financé dans le cadre du projet ANR ECOSS