

Etude expérimentale des transferts de masse et de chaleur pour un absorbeur à film ruisselant

Carolina FLORES¹, Igor KIPER¹⁺, Maxime PERIER-MUZET^{1*}, Cédric POINARD¹, Thierry GOLDIN¹, Benoit STUTZ¹

¹LOCIE, UMR 5271 – Université de Savoie, Polytech Annecy- Chambéry Savoie Technolac - 73376 Le Bourget du Lac

⁺soutenu par une bourse de la région Rhône-Alpes

^{*}(auteur correspondant : maxime.perier-muzet@univ-savoie.fr)

Résumé - L'objectif de cette étude est de comparer expérimentalement les performances d'absorbeurs plans à film ruisselant avec différentes structurations de la surface de ruissellement. Après un descriptif du fonctionnement du banc expérimental qui a été conçu pour cette étude, le protocole expérimental est décrit. Enfin, les résultats obtenus pour trois structurations différentes de la surface de ruissellement des absorbeurs (inox non traité, anodisé, rainuré) sont présentés.

Nomenclature

A_{eff}	aire effective d'échange %	<i>Symboles grecs</i>	
L	largeur de l'absorbeur, m	β	coefficient de transfert de masse, $kg.mbar^{-1}.m^{-1}$
\dot{M}	débit massique, $kg.s^{-1}$	<i>Indices et exposants</i>	
\dot{m}	débit massique par unité de surface d'échange, $kg.s^{-1}.m^{-2}$	<i>abs</i>	absorbé
P	pression, bar	<i>gen</i>	générateur
Q	débit volumique $l.min^{-1}$	<i>0</i>	entrée absorbeur
T	température, $^{\circ}C$	<i>1</i>	module évaporateur/absorbeur
Y_B	concentration en LiBr, $kg_{LiBr}.kg_{sol}^{-1}$	<i>2</i>	module générateur/condenseur
		<i>out</i>	sortie absorbeur

1. Introduction

Les machines à absorption offrent une alternative à l'utilisation des machines à compression mécanique de vapeur pour la réfrigération et notamment pour le rafraîchissement des ambiances [1, 2]. De part leur mode de fonctionnement, les machines à absorption consomment principalement de l'énergie thermique. Elles permettent donc de valoriser des sources de chaleur non exploitées ou de la chaleur produite à partir d'énergie renouvelable (solaire thermique) et ainsi, d'économiser de l'énergie électrique par rapport aux machines de rafraîchissement conventionnelles.

Le coût d'investissement et l'encombrement important des machines à absorption sont aujourd'hui un frein à leur utilisation pour l'habitat. L'absorbeur est connu pour être l'élément le moins performant de ces machines à cause de la difficulté de réaliser l'absorption d'une vapeur dans un élément compact. Des études précédentes ont proposé l'utilisation d'absorbeur à film tombant sur des tubes verticaux ou des plaques verticales afin d'augmenter la compacité de cet élément [2]. Cependant, très peu de données expérimentales sont disponibles pour caractériser les transferts de masse et de chaleur dans ces dispositifs et les études qui ont été menées se sont majoritairement intéressées aux géométries cylindriques. Dans les machines de faible puissance le paramètre limitant pour l'utilisation de ces technologies est le faible débit de circulation de la solution qui ne permet pas toujours d'obtenir une surface

mouillée satisfaisante. Pour lever cette difficulté des structurations spéciales de la surface des absorbeurs peuvent être mis en œuvre [3].

L'objet de cette étude est d'analyser expérimentalement les performances d'absorbeurs plans à film ruisselant avec différentes structurations de la surface de ruissellement. A cet effet, un banc d'essais incluant ce type d'absorbeur a été conçu, fabriqué et expérimenté. Des essais ont été menés en faisant varier les conditions opératoires comme le débit ou la concentration de la solution.

Dans cet article le principe de fonctionnement du banc expérimental et l'instrumentation utilisée sont décrit. La méthodologie et les principales hypothèses qui ont été formulées pour comparer les performances des absorbeurs sont discutées. Enfin, les résultats obtenus pour les différentes conditions opératoires sont présentés.

2. Description du banc expérimental

2.1. Principe de fonctionnement

Le Banc expérimental est constitué des éléments communs des machines de réfrigération à absorption H₂O-LiBr (fig. 1). Il est donc principalement constitué, d'un absorbeur, d'un évaporateur, d'un générateur, d'un condenseur, d'une pompe de circulation (Pc) et d'échangeurs de chaleur (E1 et E2).

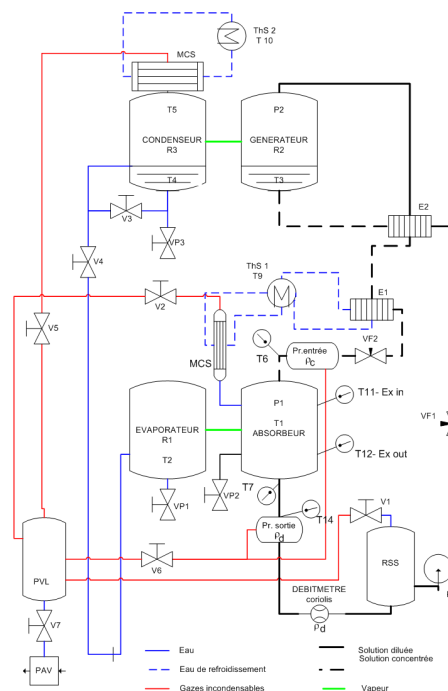


Figure 1 : Schéma de principe du banc expérimental

Afin de pouvoir observer les différentes transformations (évaporation, condensation, absorption, désorption) subies par les fluides de travail, les modules d'évaporation/absorption et désorption/condensation sont chacun constitué de deux colonnes de verre connectées entre elles (fig. 2 et fig. 3). Ces colonnes d'un volume d'environ 30 l sont chacune équipées d'un fond et d'un couvercle également en verre. Ces éléments sont pourvus d'orifices pour assurer la circulation des fluides de travail entre les différents modules et pour permettre l'implantation d'instruments de mesure (capteurs de pression, thermocouples). L'absorbeur est équipé de deux orifices latéraux sur lesquels peuvent être disposés des hublots pour la

visualisation des écoulements ou pour la mise en œuvre de mesure de températures par thermographie infrarouge (fig. 2).

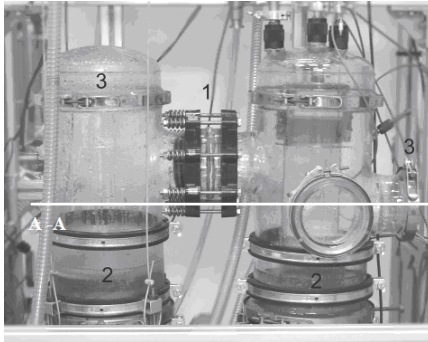


Figure 2 : Photographie du module évaporation/absorption



Figure 3 : Photographie du module désorption/condensation

Le fonctionnement du banc est analogue à celui d'une machine à absorption H₂O-LiBr avec un taux de recirculation nul. Dans ces machines, l'eau joue le rôle de fluide frigorigène et la solution de LiBr de sorbant. Par convention la composition de la solution est dans cette description exprimée en fonction de la concentration en fluide frigorigène (H₂O).

Au niveau du désorbeur, la solution est à haute pression (P_2) et elle est chauffée à T_{gen} par une résistance chauffante afin de désorber le réfrigérant. À la sortie du désorbeur, le réfrigérant pur en phase vapeur circule vers le condenseur alors que la solution liquide pauvre en réfrigérant, circule en direction de l'absorbeur. Avant d'atteindre l'absorbeur, la solution est refroidie via deux échangeurs de chaleur (E1 et E2) et détendu à travers la vanne VF2 pour atteindre la température T_{in} et la pression P_2 . Au niveau du condenseur, de la chaleur est rejetée vers le thermostat ThS2 de manière à refroidir et à condenser le fluide réfrigérant qui passe ainsi de l'état vapeur surchauffée à l'état liquide. Ce liquide à haute pression (P_1) est ensuite détendu dans le détendeur (V4) pour entrer dans l'évaporateur à basse pression (P_2). Dans ce dernier, le fluide pompe de la chaleur à une résistance électrique pour s'évaporer. À sa sortie, le réfrigérant est en phase vapeur à basse pression et il circule en direction de l'absorbeur. Dans celui-ci, la solution liquide pauvre en réfrigérant absorbe le réfrigérant en phase vapeur à basse pression. Avec ce dispositif expérimental, cette absorption (exothermique) peut être menée de manière adiabatique ou en assurant un refroidissement de la solution en évacuant de la chaleur vers le thermostat ThS3. La solution fortement concentrée en réfrigérant passe ensuite dans la pompe (PC) et l'échangeur récupérateur (E1) pour augmenter sa pression et sa température avant de rejoindre à nouveau le désorbeur. Ce banc expérimental, composé de l'intégralité des éléments constitutifs des machines de réfrigération à absorption, permet de contrôler et de modifier de manière indépendante les conditions opératoires de l'absorbeur (la concentration, la température et le débit de la solution en entrée de l'absorbeur et la pression dans le module évaporation/absorption).

Les pressions de fonctionnement du banc expérimental sont inférieures à la pression atmosphérique ($P_1 \leq 10$ mbar). De plus, pour assurer convenablement les différentes transformations que doivent subir les fluides de travail la présence de gaz incondensables doit être la plus faible possible. Pour atteindre ces conditions opératoires et les maintenir tout au long des essais, les différents éléments de la machine sont reliés à un système de purge des incondensables, composé d'un piège à incondensables (MCS) et d'une pompe à vide (PAV).

Afin de contrôler et de pouvoir modifier les conditions opératoires du banc expérimental des dispositifs de régulation ont été installés. Ainsi, la température de la solution dans le désorbeur (T_{gen}), la pression dans le module haute pression (P_2) et dans le module basse

pression (P_1) sont contrôlées par la régulation des puissances injectées respectivement au niveau du désorbeur, du condenseur et de l'évaporateur. Le débit (Q) et la température (T_{in}) de solution circulant à l'entrée de l'absorbeur sont respectivement imposés par l'ouverture de la vanne VF1 et par le contrôle de la température du thermostat ThS2.

2.2. Absorbeur à plaque à film ruisselant

Les absorbeurs à film ruisselant qui ont été expérimentés au cours de cette étude sont composés (fig. 4) : d'un distributeur qui assure une répartition que l'on suppose homogène du fluide à l'entrée de la surface de ruissellement, une surface de ruissellement sur laquelle est réalisée l'absorption et d'un collecteur qui récupère la solution riche en fluide frigorigène en bout de plaque. La répartition du fluide au niveau du distributeur de la surface rainurée sera étudiée prochainement afin de vérifier l'homogénéité de la distribution.

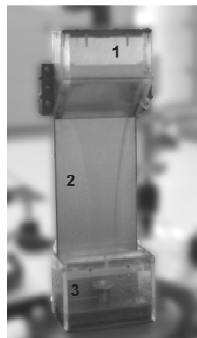


Figure 4 : Absorbeurs adiabatiques à plaque verticale



Figure 5 : Absorbeur adiabatique à plaque rainurée

Au cours de cette étude trois structurations de la surface de ruissellement ont été testées : acier inoxydable non traité, micro-structurée par anodisation et macro-structurée avec des rainures. Ces essais ont été réalisés avec des plaques non-refroidies qui sont appelées dans cet article configuration adiabatique. La structuration (micro ou macro-structuration) a pour objectif d'homogénéiser la distribution du fluide le long de la plaque afin d'éviter l'apparition de rivulets qui réduisent la surface d'absorption.

Les essais en configuration adiabatique ont été réalisés sur les surfaces ruisselantes suivantes :

- Plaque de référence : plaque plane en acier inoxydable (316L), sans traitement superficiel, Dimensions 110 x 300 x 2 mm.
- Plaque rainurée acier inox (316L), rainures d'épaisseur 2 mm, profondeur 1 mm et espacement 2 mm. Dimensions 110 x 300 x 5 mm.
- Plaque anodisée : acier inox (316L), électropolie et anodisé, dimensions 110 x 350 x 3 mm.

2.3. Instrumentation

Le banc d'essais est instrumenté afin de pouvoir caractériser thermodynamiquement les fluides au sein du condenseur, de l'évaporateur, du désorbeur et à l'entrée et la sortie de l'absorbeur. A cet effet, des mesures de températures, de pressions et de masses volumiques sont réalisées à différents points du procédé (fig. 1). L'acquisition de ces mesures se fait via une centrale d'acquisition Agilent 34970A qui est pilotée à partir d'un programme réalisé avec le logiciel LabView®.

Les mesures de températures sont réalisées avec des thermocouples de type K, chemisés en acier réfractaire, connectés à un boîtier isotherme. Ces thermocouples ont fait l'objet d'une procédure d'étalonnage avec l'intégralité de la chaîne d'acquisition.

Les mesures de pressions sont réalisées à l'aide de quatre capteurs de pression capacitifs. Deux capteurs sont installés sur chaque module afin de comparer la précision des capteurs Keller (série 41X) et des capteurs Adixen (série ASD2000).

Une mesure de la masse volumique de la solution est réalisée à la sortie de l'absorbeur avec un débitmètre Coriolis Micro Motion (F025S série F) qui permet également une mesure du débit massique de la solution en ce point.

Des échantillonnages de la solution peuvent également être réalisés à l'entrée et à la sortie de l'absorbeur afin de déterminer la concentration en LiBr par titration et la masse volumique de la solution à l'aide d'un pycnomètre.

3. Méthodologie et résultats expérimentaux

3.1. Méthodologie et définitions

L'objectif des essais qui ont été réalisés au cours de cette étude est de pouvoir comparer les performances en terme de transfert de masse des différentes configurations d'absorbeur présentées dans la section précédente. Afin de les comparer, l'aire mouillée, le coefficient de transfert de masse moyen ainsi que le débit massique de vapeur absorbé associé à chaque absorbeur ont été déterminés pour les différentes conditions d'essais. Ces indicateurs ont été calculés à l'aide des mesures de température, de pression, de masse volumique et de débit qui ont été réalisées lors des essais et à partir des hypothèses de travail suivantes :

- La concentration de la solution à la sortie de l'absorbeur est déterminée à l'aide, de la mesure de la masse volumique et de la température de la solution et de la corrélation reliant ces trois grandeurs [4].
- La solution est supposée être à l'équilibre dans le désorbeur. Ainsi, la concentration de la solution dans cet élément (et donc également à l'entrée de l'absorbeur) peut être calculée à partir, de la mesure de la température et de la pression au niveau de l'absorbeur et des équations régissant l'équilibre solution/vapeur [4]. Cette hypothèse forte sera vérifiée au cours d'une prochaine campagne d'essais par des mesures de la masse volumique de la solution à l'entrée de l'absorbeur.

L'acquisition des mesures (de températures, de pressions et du débit) est réalisée lorsque la machine a atteint un état de fonctionnement stationnaire. Pour limiter la présence de gaz incondensables, avant chaque période de mesure un tirage au vide du module évaporateur/absorbeur est réalisé. Afin de réduire l'incertitude de mesure l'acquisition est réalisée sur une période de 10 minutes minimum.

Les essais qui sont présentés dans cette section ont été réalisés avec une pression fixe dans l'absorbeur (P_1) de 10 mbar et avec une température d'entrée de la solution (T_0) constante et égale à 15 °C. Une étude de sensibilité paramétrique a été menée avec le débit et la concentration de la solution à l'entrée de l'absorbeur qui évoluent respectivement entre 0,18 et 1 l/min et entre 0,52 et 0,58 $\text{kg}_{\text{LiBr}}/\text{kg}_{\text{sol}}$.

L'aire effective d'échange (A_{eff}) est définie comme le rapport entre l'aire mouillée et l'aire totale de l'absorbeur. Dans le cas de l'absorbeur rainuré la surface mouillée des parois latérales des canaux n'est pas considérée dans le calcul de l'aire mouillée.

Le coefficient de transfert de masse moyen (β) est calculé à partir de [5] :

$$\beta = \dot{M}_{SOL}^{OUT} \frac{1 - Y_B^{OUT} / Y_{B0}}{\Delta P^{IN} L} \quad (1)$$

Où \dot{m}_{SOL}^{OUT} est le débit massique de la solution à la sortie de l'absorbeur, Y_B^{OUT} et Y_{B0} sont respectivement les concentrations en LiBr en sortie et en entrée de l'absorbeur, L est la largeur de l'absorbeur et ΔP^{IN} est le potentiel d'absorption défini par :

$$\Delta P^{IN} = P_1 - P_0(Y_{B0}, T_0) \quad (2)$$

Où P_1 est la pression au niveau de l'absorbeur et $P_0(Y_{B0}, T_0)$ est la pression d'équilibre aux conditions de température et de concentration de la solution à l'entrée de l'absorbeur.

Le débit massique de vapeur absorbée (\dot{m}_{abs}) est obtenu par :

$$\dot{m}_{abs} = \dot{m}_{SOL}^{OUT} (1 - Y_B^{OUT} / Y_{B0}) \quad (3)$$

3.2. Distribution de la solution sur la surface de ruissellement

Afin de caractériser la qualité de la répartition de la solution sur la surface de ruissellement, l'aire effective d'échange a été déterminée pour chacun des absorbeurs (fig. 6). La surface plane anodisée offre la meilleure distribution du fluide avec une aire effective d'échange de plus de 90 % alors que cette dernière est seulement d'un peu plus de 42 % avec la plaque plane non traitée. Malgré une très bonne répartition du fluide dans les rainures, l'aire effective d'échange de l'absorbeur rainuré est pénalisée par la présence des parois qui séparent les canaux. Il a également été observé que sans structuration de la surface (surface plane non traitée) la distribution du fluide devient très instable avec la présence de rivulets à faible débit (fig. 7).

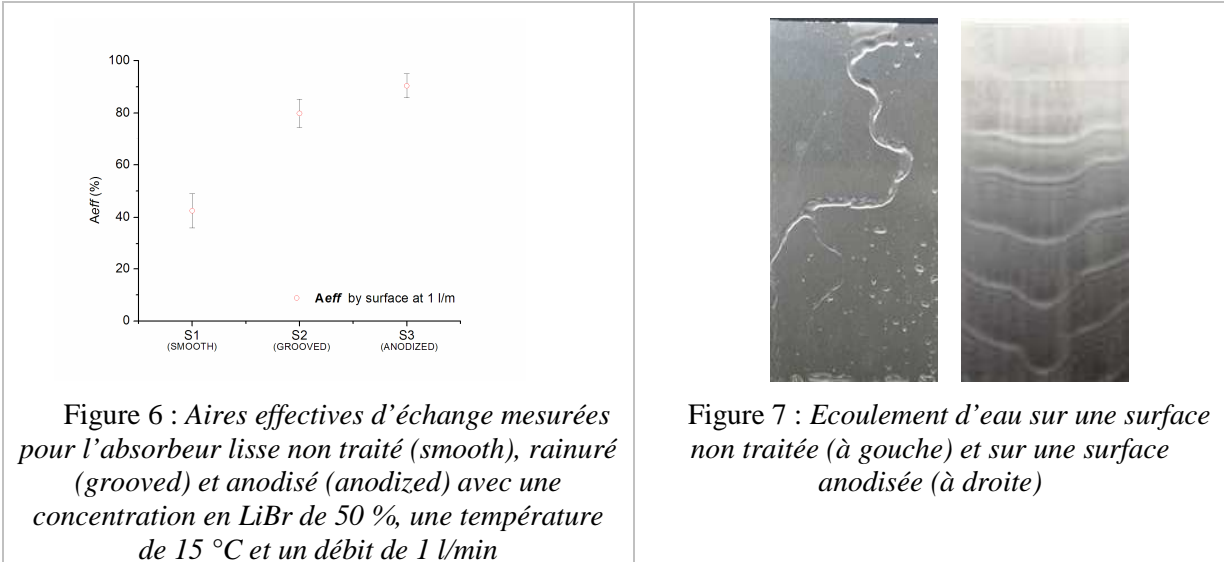


Figure 6 : Aires effectives d'échange mesurées pour l'absorbeur lisse non traité (smooth), rainuré (grooved) et anodisé (anodized) avec une concentration en LiBr de 50 %, une température de 15 °C et un débit de 1 l/min

Figure 7 : Ecoulement d'eau sur une surface non traitée (à gauche) et sur une surface anodisée (à droite)

3.3. Etude de sensibilité paramétrique

L'évolution de la masse de vapeur absorbée et de la masse de vapeur absorbée par unité de surface mouillée pour différentes concentration de solution à l'entrée de l'absorbeur sont représentées dans la figure 8. Quelle que soit la concentration de la solution à l'entrée, la masse de vapeur absorbée est maximale avec l'absorbeur anodisé et minimale pour

l'absorbeur plan non traité. Ceci s'explique par la différence d'aire mouillée entre les différents absorbeurs (fig. 6) mais également par le comportement du fluide sur la surface de ruissellement. En effet, l'analyse de la masse de vapeur absorbée par unité de surface mouillée met en avant que l'absorption est meilleure sur l'absorbeur plan anodisé que sur les deux autres absorbeurs indépendamment de la surface d'échange. Ce phénomène s'explique par la présence de vaguelettes, observée à l'interface liquide vapeur avec l'absorbeur plan anodisé (fig. 7). Comme dans le cas de la condensation en film ruisselant [6], ces vaguelettes intensifient l'échange entre la vapeur et la solution et donc augmente la masse absorbée par rapport aux deux autres configurations sur lesquelles ces vaguelettes ne sont pas visibles [6]. En effet la présence des parois de canaux (absorbeur rainuré) et celle des rivulets (absorbeur plan non traité) empêche la formation des vaguelettes. L'anodisation de la surface ruisselante de l'absorbeur plan permet d'obtenir une surface microporeuse dont la taille des pores est inférieure au micron et l'épaisseur est de l'ordre de quelques microns. Les essais que nous avons menés étant réalisés en écoulement laminaire, la rugosité de cette surface n'a aucun impact sur le transfert thermique. Pour tous les absorbeurs, l'augmentation de la concentration en LiBr de la solution en entrée d'absorbeur (qui se traduit par une augmentation du potentiel d'absorption), génère un accroissement de la masse absorbée.

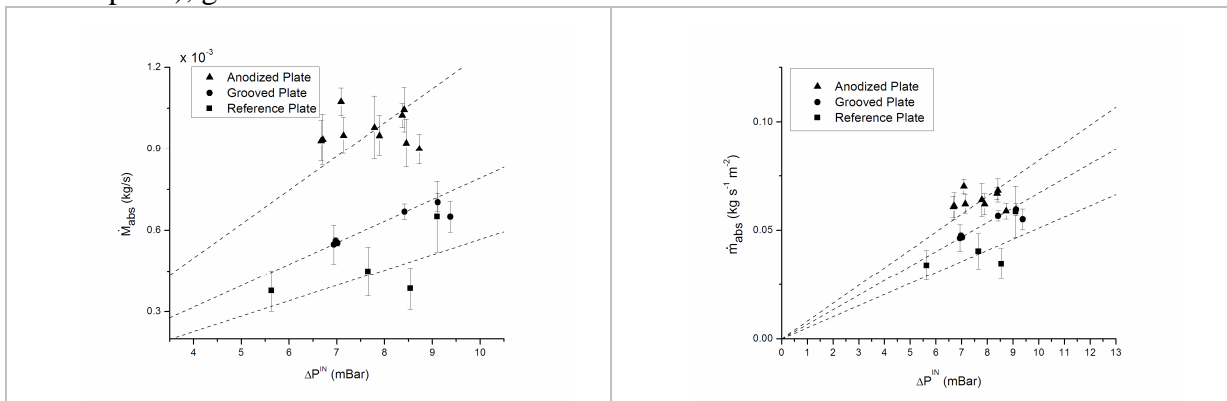


Figure 8 : Evolution de la masse de vapeur absorbée (à gauche) et de la masse de vapeur absorbée par unité de surface d'échange (à droite) en fonction du potentiel d'absorption pour l'absorbeur lisse non traité (reference plate), rainuré (grooved plate) et anodisé (anodized plate) avec un débit et une température d'entrée de la solution respectivement de 1 l/min et de 15 °C

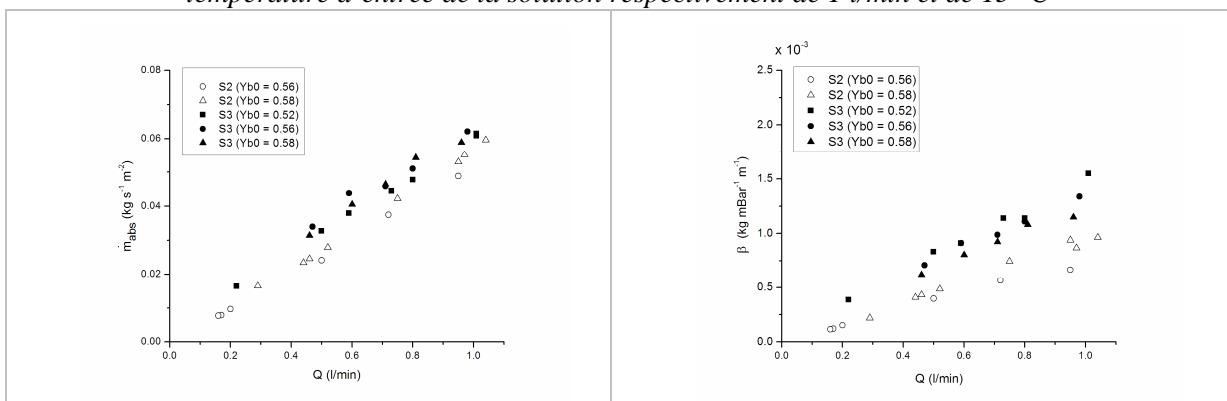


Figure 9 : Evolution de la masse de vapeur absorbée par unité de surface d'échange (à gauche) et du coefficient d'échange de masse moyen (à droite) en fonction du débit volumique de la solution pour l'absorbeur rainuré (S2) et anodisé (S3) pour différentes concentrations d'entrée de la solution et une température d'entrée de la solution de 15 °C

Les variations de la masse absorbée par unité de surface d'échange et du coefficient d'échange de masse moyen en fonction du débit volumique de la solution pour l'absorbeur anodisé et l'absorbeur rainuré, sont présentées dans la figure 9. On observe que quel que soit

le débit, la masse absorbée par unité de surface d'échange et le coefficient d'échange de masse moyen obtenus avec l'absorbeur anodisé sont supérieurs à ceux obtenus avec l'absorbeur rainuré. Pour les deux configurations, l'accroissement du débit volumique de la solution, implique une augmentation de la masse absorbée et du coefficient moyen de transfert de masse.

4. Conclusion

Un banc expérimental permettant de tester différentes configurations d'absorbeurs à plaque à film ruisselant dans différentes conditions opératoires a été décrit. Les résultats obtenus pour trois surfaces de ruissellement différentes (acier inox non traitée, rainurée et anodisée) ont été présentés. Ces essais ont mis en évidence l'intérêt d'utiliser un absorbeur plan anodisé pour réaliser l'étape d'absorption. En effet quel que soit les conditions opératoires qui ont été testées, les performances obtenus avec cet absorbeur étaient supérieures à celles des deux autres absorbeurs. Malgré les précautions qui ont été prises pour assurer le confinement des différents éléments et le tirage à vide avant chaque essai, la présence de gaz incondensables a été révélée par l'analyse des cartographies de températures de la surface libre du film, obtenus par thermographie infrarouge. En effet les températures de film mesurées sont bien plus faibles que celles prédites par les modèles pour une absorption adiabatique ce qui indique une limitation du phénomène d'absorption que l'on attribue aux gaz incondensables. La présence de ces gaz impactant grandement les performances des absorbeurs [7, 8] des modifications devront être apportées au banc expérimental pour assurer un meilleur confinement du module évaporateur/absorbeur et un meilleur piègagement des gaz incondensables afin de pouvoir faciliter leur évacuation. Les résultats présentés ici sont fortement conditionnés à la validité de l'hypothèse sur l'équilibre de la solution à la sortie du générateur qui sera prochainement vérifiée par une mesure de la masse volumique de la solution à la sortie de cet élément.

Références

- [1] M. R. Islam, N. E. Wijesundera, J. C. Ho, « Heat and mass transfer effectiveness and correlations for counter-flow absorbers », *Int. J. Heat Mass Transf.*, 49-22 (2006), 4171-4182.
- [2] I. Fujita, E. Hihara, « Heat and mass transfer coefficients of falling-film absorption process », *Int. J. Heat Mass Transf.*, 48-13 (2005), 2779-2786.
- [3] D. S. Kim, C. A. Infante Ferreira, « Flow patterns and heat and mass transfer coefficients of low Reynolds number falling film flows on vertical plates: Effects of a wire screen and an additive », *Int. J. Refrig.*, 32-1 (2009), 138-149.
- [4] Z. Yuan, K. E. Herold, « Thermodynamic Properties of Aqueous Lithium Bromide Using a Multiproperty Free Energy Correlation », *HVACR Res.*, 11-3 (2005), 377-393.
- [5] R. Goulet, *Development and analysis of an innovative evaporator/absorber for automotive absorption based air conditioning systems: investigation of the simultaneous heat and mass transfert*, Institut National des Sciences Appliquées, Université de Lyon (2011).
- [6] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th Edition, John Wiley & Sons (2006).
- [7] K. Kim, N. Berman, D. S. Chau, B. Wood, « Absorption of water vapour into falling films of aqueous lithium bromide », *Int. J. Refrig.*, 18-7 (1995), 486-494.
- [8] B. Kim, C. Lee, « Non-absorbable gas effects on heat and mass transfer in falling film absorption », *KSME Int. J.*, 17-4 (2003), 581-589.

Remerciements

Ce travail a été financé dans le cadre du projet ANR ECOSS et par le programme ARC ENERGIE de la région Rhône-Alpes.