

Modélisation numérique et intégration d'un générateur/rectifieur à plaques et films tombants dans un prototype de machine à absorption NH₃/H₂O

Numerical modeling and integration of a falling film plate generator/rectifier in a NH₃/H₂O absorption machine prototype

M. Wirtz^{1,2,*}, B. Stutz², H.T. Phan¹, F. Boudehenn¹

¹ Univ. Grenoble Alpes, CEA, LITEN, DTCH. F-38000 Grenoble, France

² LOCIE, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS UMR5271, Savoie Technolac, 73376 Le Bourget Du Lac France

* Auteur correspondant : mathilde.wirtz@cea.fr

Résumé – La production efficace de froid d'une machine à absorption NH₃/H₂O nécessite l'utilisation d'un rectifieur en sortie du générateur, afin d'éliminer l'eau contenue dans la vapeur d'ammoniac. Le présent travail à la fois numérique et expérimental décrit le fonctionnement d'un « générateur combiné » à plaques et films tombants associant la génération de la vapeur et sa purification par réabsorption partielle. Le modèle numérique met en œuvre des corrélations de la littérature, des bilans de masse et de chaleur ainsi que des équations d'équilibre à l'interface liquide-vapeur. Un prototype de générateur combiné est implanté dans une machine à absorption de capacité 5 kW de froid. Une analyse de ses performances expérimentales est présentée, ainsi qu'une première validation du modèle numérique.

Mots-clefs : Générateur combiné ; Machine à absorption NH₃/H₂O ; Modélisation numérique ; Prototype expérimental

Abstract – The efficient cold production of an NH₃/H₂O absorption machine requires the use of a rectifier at the output of the generator, in order to remove water contained in the ammonia vapor. This numerical and experimental work describes the operation of a falling film and plate combined generator involving vapor generation and purification by partial reabsorption. The numerical model is developed through correlations of the literature, heat and mass balances and equilibrium equations at the liquid-vapor interface. The combined generator is implemented in a 5 kW cold capacity absorption machine. An analysis of its experimental performances is presented, as well as a first validation of the numerical model.

Keywords: Combined generator; NH₃/H₂O Absorption machine; Numerical modeling; Experimental prototype

Nomenclature

<i>Grandeurs</i>				
\dot{m}	Débit massique	[kg/h]	C	Caloporteur
\dot{Q}	Puissance	[kW]	L	Liquide
T	Température	[°C]	V	Vapeur
x	Fraction liquide d'ammoniac	[-]	i	Interface
y	Fraction vapeur d'ammoniac	[-]	in	Entrée (<i>inlet</i>)
ε	Efficacité	[-]	out	Sortie (<i>outlet</i>)
			ch	Source chaude
			int	Source intermédiaire
<i>Indices</i>				

H_2O Eau
 NH_3 Ammoniac
 m Massique

f Source froide
 SR Solution riche
 ECP Echangeur de chaleur à plaques

1. Introduction

On observe un regain d'intérêt ces dernières années pour les machines à absorption, grâce à leur capacité à produire du froid pour l'industrie ou la climatisation des bâtiments, à partir d'énergie fatale ou de sources thermiques renouvelables. Ces machines présentent comme autre avantage d'utiliser des fluides de travail naturels à très faible impact environnemental. Parmi les différents fluides utilisés, le couple NH_3/H_2O présente des propriétés physiques intéressantes permettant de produire du froid à des températures positives et négatives, et d'utiliser des échangeurs de chaleur à plaques (ECP) conventionnels [1], connus pour leur compacité et leur efficacité [2][3].

Le faible écart de volatilité entre l'absorbant (H_2O) et le réfrigérant (NH_3) induit cependant la présence de traces d'eau dans la vapeur en sortie de générateur, qu'il faut réduire au moyen d'un rectifieur pour assurer le bon fonctionnement du système. Afin de garantir une configuration de machine NH_3/H_2O compacte et efficace, un nouveau composant tirant partie des avantages de la technologie des ECP à films tombants est proposé. Ce « générateur combiné » se compose d'une section génératrice de vapeur en partie basse, soumise à un apport de chaleur via un fluide caloporteur circulant à contre-courant, et d'une section adiabatique en partie haute qui permet la purification de la vapeur générée par réabsorption partielle de celle-ci par la solution eau-ammoniac. Les écoulements de liquide et de vapeur s'effectuent à contre-courant : la solution s'écoule vers le bas tandis que la vapeur générée s'échappe vers le haut. Cette configuration s'avère plus efficace que la configuration d'écoulement à co-courant [4]. La combinaison des sections chauffée et adiabatique permet de réunir en un même composant les fonctions du générateur et du rectifieur. Cela permet de se passer de bouteilles de séparation liquide-vapeur que l'on trouve en sortie des désorbeurs à plaques noyés, et donc de réduire les coûts d'investissement. Cette solution qui combine les avantages des colonnes à distiller et des ECP à films tombants offre des gains particulièrement intéressants en termes de compacité et de performances [5][6].

Un modèle numérique du générateur combiné mettant en œuvre des bilans de masse, d'espèces et d'enthalpie, des corrélations de transfert de masse et de chaleur, ainsi que des équations d'équilibre à l'interface solution-vapeur a été développé. Il permet de décrire les phénomènes physiques s'opérant en son cœur, et de caractériser ses performances. Les résultats du modèle sont comparés aux résultats expérimentaux obtenus sur un prototype de générateur combiné implanté dans une machine à absorption NH_3/H_2O de capacité 5 kW de froid. Une campagne expérimentale a permis de mesurer les performances globales de la machine.

2. Fonctionnement et modèle du générateur combiné

2.1. Le générateur combiné

Un ECP innovant appelé « générateur combiné » associant la production et la rectification de la vapeur de réfrigérant a été conçu. Il est composé de deux jeux de plaques verticales, chauffées et adiabatiques, qui mettent en jeu des films tombants. Dans la partie haute, le mélange eau-ammoniac à forte concentration en ammoniac (appelé solution riche) est injecté dans un bac distributeur par un assemblage de flûtes. Cette solution est ensuite distribuée sur

les plaques adiabatiques, ondulées et perforées, ce qui permet d'améliorer la distribution du fluide sur leurs deux faces. La solution s'écoule ensuite le long de plaques chauffées et rainurées, disposées perpendiculairement aux plaques adiabatiques. Dans cette partie « désorbeur » chauffée, le fluide caloporteur circule à contre-courant de la solution ruisselante. L'apport de chaleur permet de générer de la vapeur composée essentiellement d'ammoniac, avec des traces d'eau. Le rainurage des plaques (de 4 mm de largeur) permet de garder un taux de mouillage acceptable des plaques en limitant les phénomènes d'agrégation du fluide sous l'effet de la tension superficielle (formation de ruisselets). La vapeur produite qui circule de bas en haut de l'échangeur interagit avec les films ruisselants s'écoulant le long des plaques adiabatiques. La réabsorption partielle de la vapeur par la solution permet de réduire la fraction d'eau contenue dans la vapeur et donc de la purifier. Des canaux d'échappement de forme rectangulaire appelés « cheminées » sont implantés dans le bac de rétention de la solution, et permettent à la vapeur issue des plaques adiabatiques de s'échapper en partie haute de l'échangeur. Le fonctionnement du générateur combiné est présenté sur la Figure 1. Les dimensions caractéristiques du générateur combiné sont présentées dans le Tableau 1.

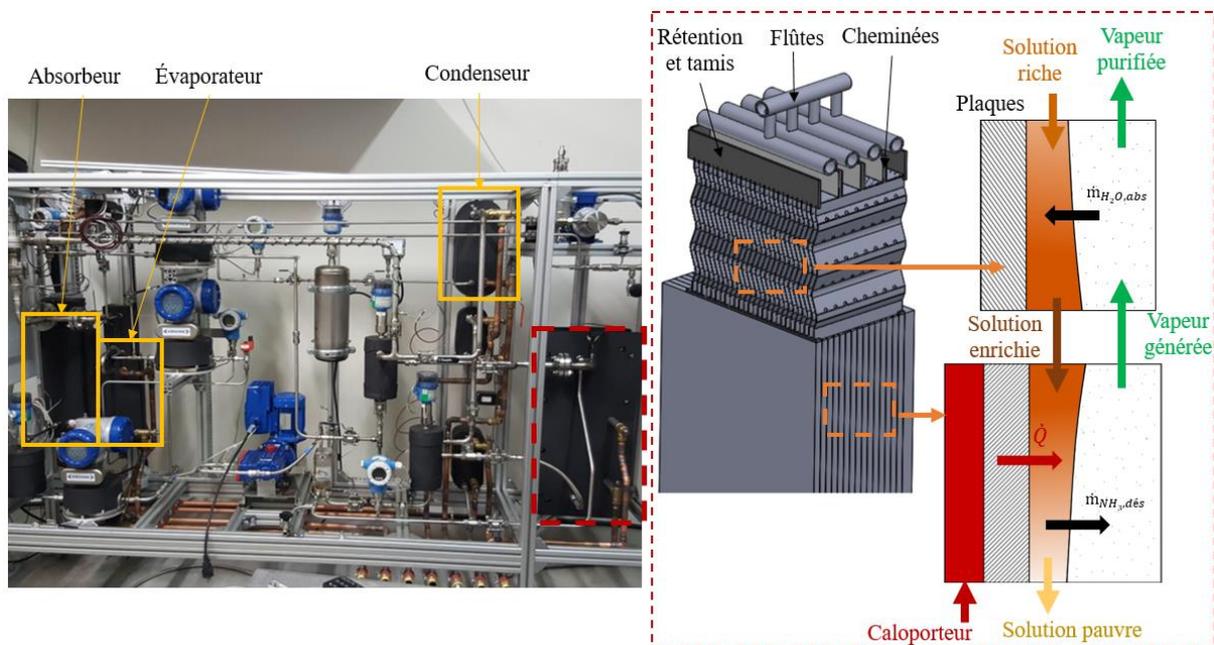


Figure 1 : Générateur combiné implanté dans la machine à absorption ; schémas des écoulements et transferts entre les plaques.

	Plaques chauffées	Plaques adiabatiques
Longueur	0.32 [m]	0.10 [m]
Largeur	0.150 [m]	0.09 [m]
Épaisseur	0.006 [m]	0.0008 [m]
Nombre	14	28

Tableau 1. Géométrie du générateur combiné.

2.2. Modèle numérique

Un modèle numérique, basé sur les travaux de D. Triché [7], permet l'étude des transferts de chaleur et de masse. Il met en œuvre des corrélations de la littérature, des bilans de masse et de chaleur ainsi que des équations d'équilibre à l'interface liquide-vapeur. Une nouvelle méthode de résolution a été développée, permettant de simuler les configurations d'écoulement en co ou en contre-courant [4]. Ce nouveau modèle peut reproduire à la fois les processus

d'absorption et de désorption, ce qui est essentiel pour ce nouveau générateur combinant les deux processus.

La Figure 2a et la Figure 2b montrent l'évolution des températures et des fractions d'ammoniac le long du générateur combiné, comprenant la partie réabsorption en haut et la partie désorption en bas. Les valeurs d'entrée correspondent aux conditions nominales de fonctionnement de la machine à absorption (Tableau 2). Dans le cas de la Figure 2, la solution issue de l'économiseur est refroidie avant son entrée dans le générateur combiné afin d'améliorer le processus de purification de la vapeur.

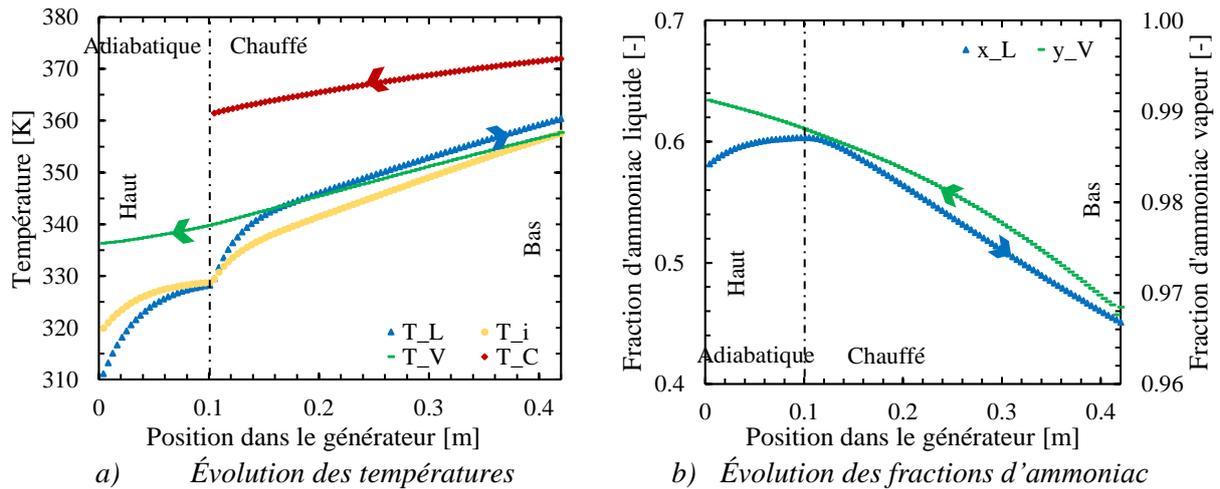


Figure 2 : Évolution des températures et des fractions d'ammoniac dans le générateur, cas nominal.

Le fluide caloporteur entre en bas du générateur et donne sa chaleur à la solution eau-ammoniac, en remontant le long des plaques chauffées. Le film tombant de solution riche est chauffé à la paroi par le caloporteur, et refroidi à l'interface liquide-vapeur en raison du processus d'évaporation. À l'interface, l'écart à l'équilibre des phases liquide et vapeur est suffisamment faible pour être négligé. La température d'interface T_i peut alors être calculée à partir de la pression et des fractions d'ammoniac à l'interface dans les phases liquide et vapeur x_i et y_i . Le débit de vapeur, nul en bas de l'échangeur, augmente avec la hauteur. La température de vapeur T_V en bas de l'échangeur correspond à la température d'interface T_i . La température de vapeur le long de l'échangeur dépend de la température de l'interface où elle est générée et de la température de la vapeur produite plus bas avec laquelle elle se mélange. Le chauffage à contre-courant induit l'augmentation de la température de la solution avec sa distance à l'entrée. Ce qui explique la diminution de la température de vapeur T_V lors de son ascension, sa valeur restant supérieure à la température d'interface T_i . Dans la partie adiabatique, la solution sous-refroidie en entrée est chauffée par absorption de la vapeur émise en partie basse ($T_L < T_i$). La température du film de solution augmente et tend vers l'état d'équilibre au bas de la partie adiabatique, où $T_L \approx T_i$. Étant donné les conditions d'équilibre thermodynamique, la vapeur est principalement composée d'ammoniac. En conséquence, la fraction d'ammoniac x_L dans le film de solution augmente pendant le processus d'absorption et diminue pendant le processus de désorption. La diminution de la température d'interface T_i le long de l'écoulement de la vapeur s'accompagne d'une diminution de la fraction d'eau générée à l'interface, et par conséquent d'une augmentation de la fraction d'ammoniac y_V dans la vapeur tout au long de son écoulement. Elle varie de $y_V = 0.968$ en bas de l'échangeur, où elle est égale à la fraction d'équilibre à l'interface, à $y_V = 0.987$ en sortie de la section générateur, et atteint $y_V = 0.991$ en sortie de de la section adiabatique.

2.3. Implantation dans le prototype de machine à absorption NH₃/H₂O

Le prototype de générateur combiné est implanté à la place de l'ensemble générateur - rectifieur dans la machine à absorption simple-effet NH₃/H₂O de capacité 5 kW frigorifiques développée au laboratoire. Il est chauffé par un circuit d'eau dont la température peut être ajustée sur la gamme (80°C - 120°C). Il est alimenté par la solution riche issue de l'absorbeur et préchauffée dans un économiseur (ECP implanté entre l'absorbeur et le désorbeur) [8]. Les premiers essais portant sur les performances du générateur ont été réalisés dans les conditions standard de fonctionnement de ce type de composants : la solution est légèrement surchauffée en entrée. Elle subit alors une détente flash en sortie des flûtes d'injection. La vapeur générée lors de cette désorption flash se mélange avec la vapeur issue des plaques adiabatiques. Après la détente, la solution, proche de l'équilibre, est recueillie dans le bac distributeur puis répartie sur les plaques adiabatiques où elle échange avec la vapeur générée au niveau des plaques chauffées. Le quart inférieur des plaques chauffées, noyé par la solution, est le siège de transferts par ébullition.

L'étude a été poursuivie en explorant une large gamme de conditions de fonctionnement de la machine, tant en ce qui concerne les températures des sources chaude T_{ch} , intermédiaire T_{int} et froide T_f que pour les débits de solution riche \dot{m}_{SR} et de fluide caloporteur \dot{m}_c (Tableau 2).

	T_{ch} [°C]	T_f [°C]	T_{int} [°C]	\dot{m}_c [kg/h]	\dot{m}_{SR} [kg/h]
Plage de valeurs	85 - 110	10 - 22	22 - 33	800 - 1800	70 - 145
Valeur nominale	100	18	27	1600	115

Tableau 2. Plage de valeurs des paramètres d'entrée, et leurs valeurs nominales.

La Figure 3 représente les évolutions du débit de vapeur générée et de la fraction d'ammoniac dans la vapeur en sortie du générateur combiné en fonction de la surchauffe de la solution riche injectée en entrée. Plus la surchauffe de la solution en entrée est faible, plus le débit de vapeur générée diminue et plus la fraction massique d'ammoniac dans la vapeur augmente. Ces évolutions sont induites par la détente flash et les mécanismes de réabsorption partiel de la vapeur par la solution. Certaines mesures dépassent la limite physique de concentration ($y_{Vout} > 1$). Ceci est dû aux incertitudes de mesures, qui sont de l'ordre de 1%. La fraction massique d'ammoniac dans la vapeur générée en sortie du générateur pourra être améliorée en sous-refroidissant la solution en entrée. Un échangeur-refroidisseur sera prochainement implanté en entrée du désorbeur pour permettre cette étude.

Avant la mise en place du nouveau générateur combiné, la vapeur était produite par ébullition de la solution dans un échangeur à plaques, séparée de la solution dans une bouteille séparatrice, puis déshydratée dans un rectifieur. La Figure 4 compare les fractions d'ammoniac de la vapeur en sortie du nouveau générateur (mesurées à l'aide d'un débitmètre en sortie condenseur), et de l'ancien générateur (via différents bilans de masse), en fonction du débit de vapeur générée. Le nouveau design, bien que fonctionnant dans des conditions encore non optimales, permet de générer une vapeur de qualité bien meilleure que celle obtenue avec l'ancien dispositif, et suffisamment pure pour permettre de se passer de rectifieur pour la production de froid positif. La mise en place d'un refroidisseur en entrée devrait permettre d'améliorer encore les performances actuelles en favorisant la réabsorption de l'eau par la solution, et en supprimant la production de vapeur par détente flash au niveau des flûtes d'injection.

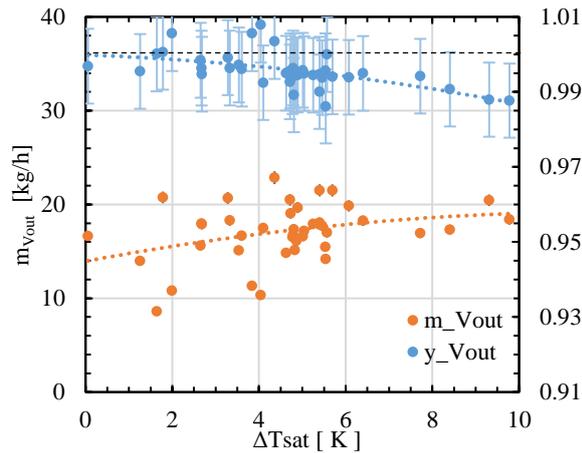


Figure 3 : Évolution du débit et de la fraction d'ammoniac dans la vapeur générée en sortie du générateur en fonction de la surchauffe de la solution riche en entrée.

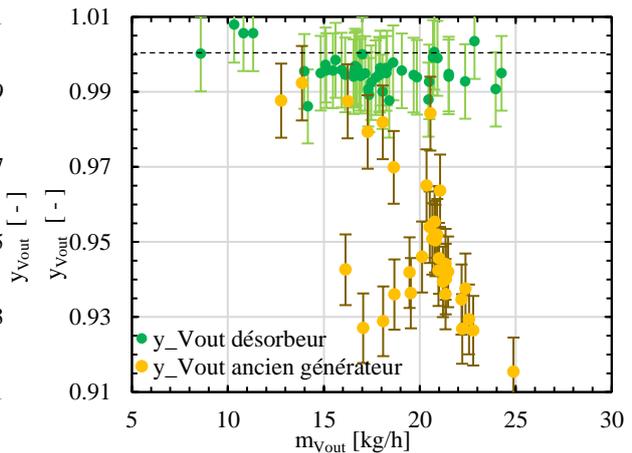


Figure 4 : Évolution des fractions d'ammoniac dans la vapeur en fonction du débit de vapeur générée pour le générateur combiné et par l'ancien générateur associé au rectifieur.

L'efficacité massique du générateur compare le débit massique de vapeur produite avec le débit maximal de vapeur qui pourrait être produit en présence d'un générateur infiniment long, chauffé à contre-courant, et pour lequel les écoulements de vapeur et de solution circulent dans le même sens (calcul réalisé à partir de bilans de masse, espèces et enthalpies) :

$$\varepsilon_m = \frac{\text{Débit de vapeur générée en sortie du désorbeur}}{\text{Débit maximal de vapeur atteignable en sortie du désorbeur}} \quad (1)$$

La Figure 5 présente l'évolution de l'efficacité massique du générateur en fonction du débit massique du caloporteur en entrée. Les paramètres d'entrée sont fixés aux valeurs nominales présentées dans le Tableau 2, sauf pour le débit de fluide caloporteur qui varie dans sa plage de données. Le fluide limitant est la solution riche. La Figure 5 montre une augmentation de l'efficacité massique avec l'augmentation du débit de caloporteur. Le régime d'écoulement du fluide caloporteur étant laminaire sur l'ensemble de la plage de débit, le coefficient d'échange reste donc constant. L'augmentation du débit de caloporteur s'accompagne d'une augmentation et d'une homogénéisation de la température de paroi. L'augmentation de l'efficacité massique observée résulte de cette augmentation de la température de paroi. Elle plafonne à des valeurs comprises entre 0.45 et 0.5. Ces valeurs sont inférieures aux valeurs attendues, obtenues en supposant un mouillage complet des plaques. Les faibles valeurs des efficacités massiques semblent ainsi pouvoir être attribuées à des problèmes de mouillabilité des plaques.

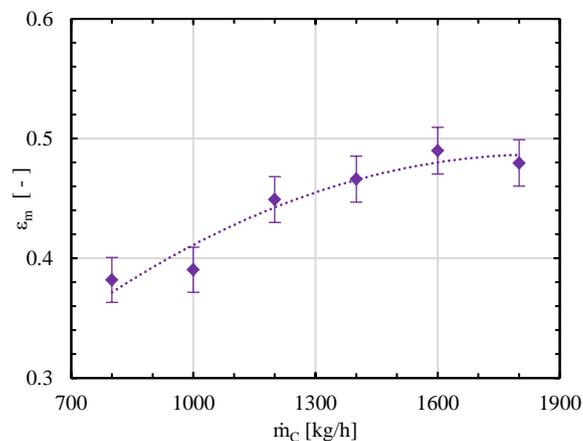


Figure 5 : Évolution de l'efficacité massique du générateur en fonction du débit caloporteur.

3. Validation numérique/expérimentale

Les valeurs mesurées sur la plage de débit de solution [100-140 kg/h] sont comparées aux résultats du modèle numérique (partie 2.1). Les paramètres d'entrée du modèle correspondent aux valeurs mesurées en entrée du générateur :

- Températures du fluide caloporteur et de la solution riche ;
- Débits du fluide caloporteur et de la solution riche ;
- Fraction d'ammoniac dans la solution riche ;
- Pression dans le désorbeur.

Le phénomène de désorption flash se développant en sortie des flûtes est pris en compte dans le modèle numérique au travers des bilans de masse, espèce et enthalpie permettant à la solution de revenir à l'état d'équilibre. La vapeur générée est mélangée à la vapeur provenant des plaques adiabatiques. L'ébullition libre se développant dans la partie noyée des plaques est également prise en compte à l'aide d'un modèle d'ébullition libre en supposant que la solution se comporte comme un mélange idéal (modèle de Rohsenow [9]). L'impact des phénomènes de diffusion sera prochainement intégré au modèle d'ébullition.

La Figure 6a compare la puissance fournie au générateur combiné par le fluide caloporteur, dans le modèle numérique et sa mesure. La correspondance entre les résultats du modèle et les valeurs expérimentales présente un écart maximal de 41%, dû à une surestimation de la puissance dans le modèle. Les écarts maximums correspondent à des conditions de températures de source extrêmes.

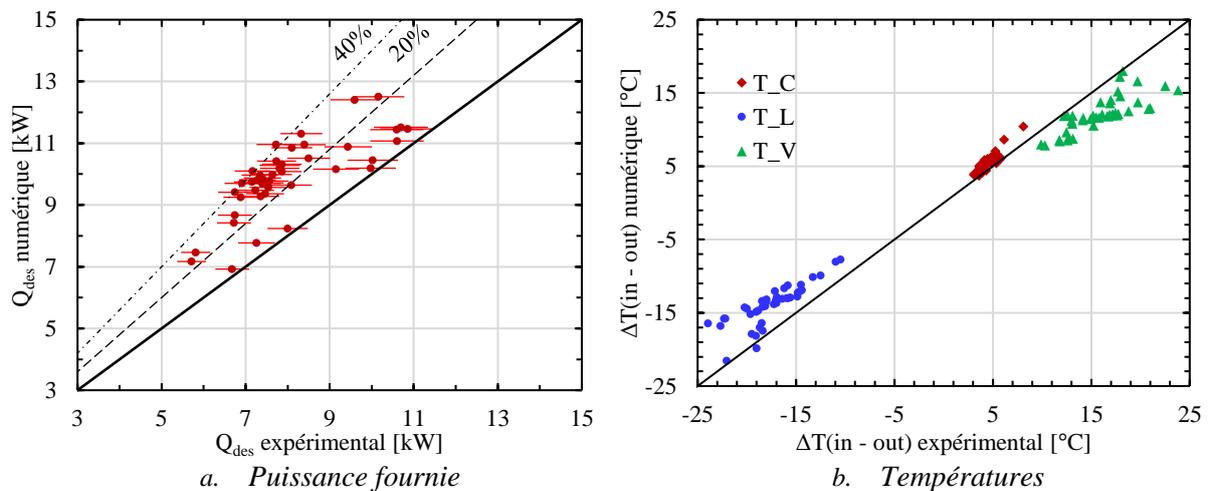


Figure 6 : Comparaison numérique/expérimentale des performances du désorbeur.

La Figure 6b compare les différences de températures calculées et mesurées entre l'entrée et la sortie du générateur pour le fluide caloporteur, la solution et la vapeur générée. La diminution de la température du caloporteur le long du générateur est légèrement plus importante pour le modèle numérique (de 4 à 10°C) que pour les mesures (de 3 à 8°C). Dans le prototype, le réchauffement de la température de solution de l'entrée à la sortie varie entre 8 et 24°C, tandis que numériquement la solution s'échauffe de 7 à 22°C. Dans le modèle la température de la vapeur diminue entre 7 à 18°C tandis qu'expérimentalement elle diminue entre 8 et 24°C en remontant dans le générateur. Les écarts peuvent s'expliquer par des problèmes de mouillabilité au niveau des films ruisselants qui impactent les transferts thermiques. Une amélioration du modèle d'ébullition est également envisagée afin de caractériser au mieux les phénomènes s'y déroulant.

4. Conclusion

Un générateur à plaques et films ruisselants comprenant une section de désorption chauffée, ainsi qu'une section de réabsorption adiabatique a été conçu et implanté dans une machine à absorption NH₃/H₂O de capacité 5 kW. Son comportement a été également modélisé numériquement. Sur l'ensemble des tests menés, la vapeur est générée avec une pureté en ammoniac supérieure à 0.98, permettant de s'affranchir de la mise en place d'un rectifieur pour la production de froid positif. Le débit et la pureté de la vapeur produite dépendent de la surchauffe de la solution en entrée du désorbeur. Plus celle-ci est faible, plus la fraction d'ammoniac dans la vapeur générée en sortie est élevée. La mise en place d'un sous-refroidissement de la solution apparaît être une piste d'étude prometteuse pour la production de froid négatif demandant une forte pureté en ammoniac. De plus, ce premier travail de comparaison expérimentale/numérique des performances du générateur montre une bonne concordance des résultats. Des améliorations doivent être apportées au modèle numérique afin de mieux représenter les phénomènes expérimentaux comme l'assèchement des plaques et les phénomènes de diffusion de masse dans la zone d'ébullition. L'impact du générateur sur les performances globales de la machine à absorption sera également prochainement étudié.

Références

- [1] Sun J., Fu L., Zhang S., "A review of working fluids of absorption cycles". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 1899 – 1906
- [2] Khan M.S., Khan T.S., Chyu M.C., Ayub Z.H., "Evaporation heat transfer and pressure drop of ammonia in a mixed configuration chevron plate heat exchanger". *International Journal of Refrigeration* 41 (2014) 92-102
- [3] Jiménez-García J.C., Rivera W., "Parametric analysis on the experimental performance of an ammonia/water absorption cooling system built with plate heat exchangers". *Applied Thermal Engineering* 148 (2019) 87 – 95
- [4] Wirtz M., Phan H.T., Stutz B., Boudéhenn F., "Modélisation numérique d'un générateur à plaques et films tombants pour machine à absorption NH₃/H₂O", *Congrès Annuel de la Société Française de Thermique 2020*, https://www.sft.asso.fr/DOEditions/CFT2020/PDF/32_doi.pdf
- [5] Staedter M. A., Garimella S. "Direct-coupled desorption for small capacity ammonia-water absorption systems", *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, 127 (2018) 196-205
- [6] Golden J.H., "Ammonia-water desorption in flooded columns", *Georgia Institute of Technology*, 2012.
- [7] Triché D., "Étude numérique et expérimentale des transferts couplés de masse et de chaleur dans l'absorbeur d'une machine à absorption ammoniac-eau", Université de Grenoble Alpes, 2016
- [8] Boudéhenn F., Demasles H., Wytenbach J., Jobard X., Chèze D., Papillon P., "Development of a 5kW cooling capacity ammonia-water absorption chiller for solar cooling applications", *Energy Procedia* 30 (2012) 35 – 43
- [9] Rohsenow W.M., « A method of correlating heat transfer data for surface boiling of liquids », Technical report 5, Massachusetts Institute of Technology, 1951

Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude au Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energy Alternatives (CEA) qui a soutenu ces travaux.