

Retour d'expérience sur une installation de rafraîchissement solaire.

Olivier MARC^{1*}, Kevin FONTAINE^{1, 2}, Mathieu DAVID¹, Franck LUCAS¹, Frantz SINAMA¹, Jean CASTAING-LASVIGNOTTES¹

¹Laboratoire PIMENT, Université de La Réunion : IUT Département Génie Civil 97410 Saint Pierre

²EPF, Ecole d'ingénieurs, 3 bis rue Lakanal, 92330 Sceaux

* (auteur correspondant : olivier.marc@univ-reunion.fr)

Résumé - La recherche de confort thermique dans les bâtiments en zone tropicale est aujourd'hui un des grands postes de consommation électrique, notamment en raison d'une utilisation fréquente de climatiseurs à compression durant les périodes de fortes chaleurs. Une alternative possible est l'utilisation de systèmes de rafraîchissement solaire permettant d'exploiter la chaleur provenant du soleil souvent disponible et en phase avec le besoin.

Si des travaux ont déjà été effectués sur le dimensionnement et l'optimisation du fonctionnement de ces installations, leur comportement sur le long terme demeure encore peu étudié. Le retour d'expérience de ce type de système sur une longue période d'exploitation pourrait permettre de fiabiliser cette technologie et de favoriser son développement. C'est dans ce cadre que se situe le travail présenté dans ce papier. L'installation de rafraîchissement solaire à absorption du Laboratoire PIMENT, située à l'IUT de Saint-Pierre à La Réunion, fonctionne depuis mars 2008 et rafraîchit depuis cette date quatre salles d'enseignement au fil du soleil. Une analyse des données expérimentales extraites des sept saisons d'exploitation est donc réalisée afin de visualiser les évolutions des performances globales du système et d'identifier les différents problèmes rencontrés sur cette période. L'étude est réalisée en utilisant les principaux indicateurs de performances définis dans la littérature, tels que les coefficients de performances thermiques et électriques, les rendements des capteurs solaires et des dispositifs de stockage chaud et froid, la consommation d'eau ainsi que le prix du kWh de froid distribué dans le bâtiment. Ces indicateurs sont ensuite analysés et comparés afin d'identifier les éventuelles dérives poste par poste et année par année. En ce qui concerne les capteurs solaires ainsi que les ballons de stockage chaud et froid, on observe une faible baisse des performances qu'il serait possible d'attribuer au vieillissement naturel des matériaux. En revanche, pour ce qui est du rendement de la machine, on observe une forte baisse s'accompagnant d'une augmentation de la consommation d'énergie électrique et d'eau. Cette baisse ne peut être la conséquence du seul vieillissement des composants, mais pourrait s'expliquer par la modification de la composition de la solution LiBr/H₂O pouvant être due à une augmentation de sa concentration en LiBr du fait de l'utilisation répétée de la pompe à vide chargée d'évacuer les éventuels condensats.

Nomenclature

<i>COP</i>	Coefficient de performance	<i>eau</i>	Eau
<i>C_{eau}</i>	Consommation d'eau, $L.kWh^{-1}$	<i>élec</i>	Energie électrique
<i>E</i>	Energie électrique, <i>J</i>	<i>évap</i>	Evaporateur
<i>P</i>	Puissance, <i>W</i>	<i>gen</i>	Générateur
<i>Q</i>	Quantité de chaleur, <i>J</i>	<i>pertes</i>	Pertes
<i>η</i>	Rendement	<i>ref</i>	Refroidissement
<i>€</i>	Coût, $€.kWh^{-1}$	<i>sol</i>	Solaire

Indices et exposants

csol Circuit solaire

dist Distribution

1. Introduction

Les systèmes de rafraîchissement solaires à absorption font partie des solutions intéressantes pour atteindre un niveau de confort thermique satisfaisant dans le bâtiment tout en réduisant les consommations électriques souvent élevées en raison de l'utilisation fréquente de climatiseurs à compression mécanique de vapeur. La littérature présente de nombreuses études réalisées sur différents types de système, dont la plupart utilisent un système d'appoint chaud et/ou froid [1, 2 et 3]. Si des recherches ont déjà été effectuées sur le dimensionnement et l'optimisation du fonctionnement de ces installations, leur comportement sur le long terme demeure encore inconnu. Le retour d'expérience de ce type de système sur une longue période d'exploitation permettrait de fiabiliser cette technologie et de favoriser son développement. C'est dans ce sens que l'installation de rafraîchissement solaire à absorption du Laboratoire PIMENT a vu le jour en 2008.

L'objectif du travail présenté dans cet article porte sur l'analyse des données expérimentales extraites des sept saisons d'exploitation de cette installation. Cette analyse est réalisée afin de visualiser les évolutions des performances globales du système sur cette période et d'identifier les différents problèmes rencontrés. Dans un premier temps, l'installation de rafraîchissement solaire est présentée et les différents indicateurs de performances sont définis. Une analyse de ces indicateurs est ensuite réalisée année par année afin d'identifier et d'analyser les dérives de performance.

2. Présentation de l'installation

L'installation (Figure 1) a été implantée dans le cadre du projet ORASOL [4] en 2008 à l'IUT de Saint-Pierre à la Réunion dans un climat tropical et fonctionne sans aucun apport de chaleur. Une présentation de l'installation composant par composant ainsi que de l'instrumentation du système global sont détaillées dans des travaux précédents [5, 6, 7]. Le but de l'ensemble du dispositif est d'assurer le confort thermique dans quatre salles d'enseignement. Pour cela, de l'eau est dans un premier temps chauffée par l'intermédiaire d'un champ de capteurs solaires thermiques avant d'être stockée dans un ballon tampon chaud pour ensuite alimenter le générateur de la machine à absorption. Grâce à cette source chaude, la machine à absorption peut produire du froid qui est ensuite stocké dans un ballon tampon avant d'être utilisé pour alimenter le bâtiment. En parallèle, une tour de refroidissement ouverte est chargée d'évacuer la chaleur d'absorption et de condensation de la machine. Celle-ci démarre lorsque la température du ballon chaud atteint 80°C. L'eau chaude alimente le générateur et chauffe la solution binaire composée d'eau pure et de bromure de lithium (l'eau pure étant le fluide frigorigène et le bromure de lithium l'absorbant). Cet apport de chaleur au générateur permet de désorber l'eau présente dans la solution pour être ensuite acheminée vers le condenseur de la machine à absorption où elle se condense. Elle subit ensuite une détente avant de recharger d'état dans l'évaporateur et produire le froid nécessaire au rafraîchissement du bâtiment. La vapeur d'eau est ensuite absorbée par la solution riche en bromure de lithium, provenant du générateur. Cette réaction étant exothermique il est nécessaire de refroidir ce composant grâce à la tour de refroidissement. Cette tour étant « ouverte », l'air ambiant échange directement de la chaleur avec l'eau de refroidissement entraînant l'évaporation d'une partie de celle-ci. Il est par conséquent indispensable de rajouter régulièrement de l'eau dans ce composant. De plus, ce type de tour est soumis à déclaration auprès de la préfecture puisque faisant partie des installations classées pour la

protection de l'environnement (ICPE). Son fonctionnement est assez coûteux puisque l'eau de refroidissement doit être traitée pour éviter le risque de légionellose. Les critères de consommation d'eau et le prix du kilowatt de froid distribué dans le bâtiment sont des éléments importants à prendre en compte, en plus des aspects énergétiques.

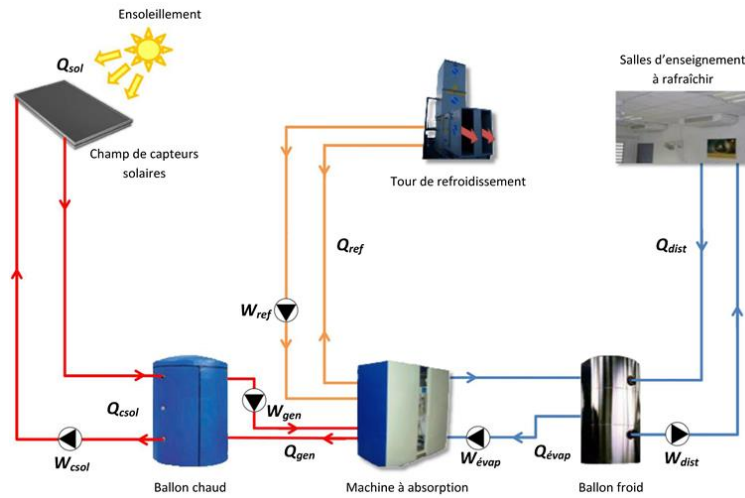


Figure 1 : Schéma simplifié de l'installation avec les principales énergies mises en jeu

3. Définition des indicateurs de performances

Dans le but d'étudier le fonctionnement de l'installation, année par année, il est nécessaire de définir un certain nombre d'indicateurs de performance poste par poste (champ de capteurs solaires, ballons de stockage, machine à absorption) [8]. Ces indicateurs sont présentés dans le Tableau 1 et les énergies mises en jeu sont identifiées sur la Figure 1.

Indicateur	Désignation	Définition
η_{capt}	Rendement du champ de capteurs solaires	$\frac{Q_{csol}}{Q_{sol}}$
η_{global}	Rendement global de l'installation	$\frac{Q_{dist}}{Q_{sol}}$
η_{bc}	Rendement du ballon chaud	$\frac{Q_{gen}}{Q_{csol}}$
η_{bf}	Rendement du ballon froid	$\frac{Q_{dist}}{Q_{évap}}$
COP_{th}	Coefficient de performance thermique de la machine à absorption	$\frac{Q_{évap}}{Q_{gen}}$
COP_{elec}	Coefficient de performance électrique de l'installation globale	$\frac{Q_{dist}}{E_{tot}}$
C_{eau}	Consommation d'eau en litre par kWh de froid distribué	$\frac{C_{eau}}{Q_{dist}}$
ϵ_{kWh}	Coût du kWh de froid distribué	$\frac{\epsilon_{elec} * E_{tot} + C_{eau} * \epsilon_{eau}}{Q_{dist}}$

Tableau 1 : Définition des indicateurs de performances de l'installation

4. Résultats et analyse

Lors de sa mise en service (2008), l'installation a fonctionné deux mois et plusieurs problèmes de fonctionnement se sont déclarés : décharge du ballon d'eau chaude la nuit, régulation de la tour de refroidissement non adaptée, problème interne au niveau de la machine à absorption ; le retour d'expérience sur la mise en service de l'installation a fait l'objet d'une publication dans la revue générale du froid et du conditionnement d'air en 2015 [9]. Dans cet article, nous allons nous focaliser sur les sept années d'exploitation, après la mise en service, c'est-à-dire de 2009 à 2015. Notons toutefois que l'installation n'a pas fonctionné en 2013 du fait d'un dysfonctionnement au niveau de la tour de refroidissement.

4.1. Bilan énergétique sur la machine à absorption

Avant d'effectuer l'analyse des différents indicateurs de performance de l'installation année par année, un bilan énergétique réalisé sur la machine à absorption a permis de s'assurer de la cohérence des énergies mises en jeu.

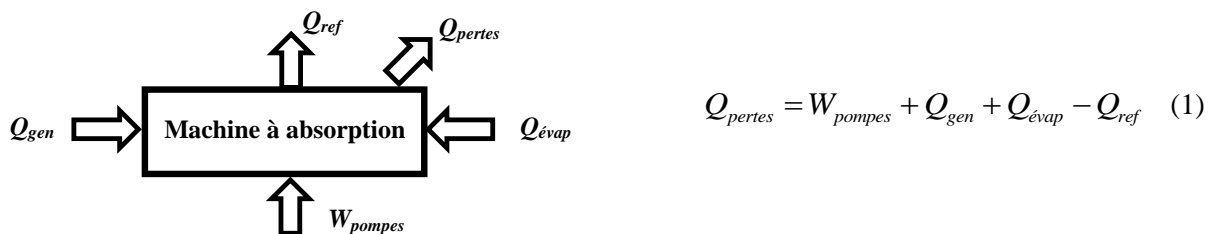


Figure 2 : Représentation schématique des énergies mises en jeu aux bornes de la machine à absorption

La Figure 2 présente un schéma énergétique de la machine à absorption avec les différentes énergies mises en jeu. L'objectif de ce bilan est d'estimer les pertes thermiques de la machine à absorption et de les rapporter à l'énergie de refroidissement (Q_{ref}).

Saisons	2009	2010	2011	2012	2014	2015
Q_{pertes} [kWh]	110	1067	350	380	412	494
Q_{ref} [kWh]	20453	23349	13329	10732	17148	11106
Q_{pertes}/Q_{ref} [%]	0,5	4,6	2,6	3,5	2,4	4,5

Tableau 2 : Evolutions des pertes thermiques et de l'énergie de refroidissement de la machine

Comme nous pouvons le voir dans le Tableau 2, les pertes thermiques de la machine à absorption ne dépassent pas 5% de l'énergie de refroidissement pour toutes les années étudiées ce qui nous amène à penser que les données expérimentales, enregistrées aux bornes de la machine à absorption, sont cohérentes et exploitables dans les bilans et l'analyse à venir.

4.2. Analyse des résultats expérimentaux

Les Figures 3 à 5 présentent tous les indicateurs de performance de l'installation année par année. Sur la Figure 3 nous pouvons constater que les rendements du champ de capteurs solaires (η_{capt}) et des ballons de stockage chaud et froid (η_{BC} et η_{BF}) restent relativement constants au cours du temps. La légère baisse des rendements après les trois premières années pourrait être en partie liée à un vieillissement des matériaux (isolants...), mais la durée de l'étude n'est pas encore assez longue pour pouvoir le confirmer. Le rendement global de l'installation (η_{global}) qui correspond à l'énergie frigorifique distribuée dans le bâtiment

divisée par l'énergie solaire reçue par le champ de capteurs thermiques, subit, quant à lui, une baisse significative au cours du temps.

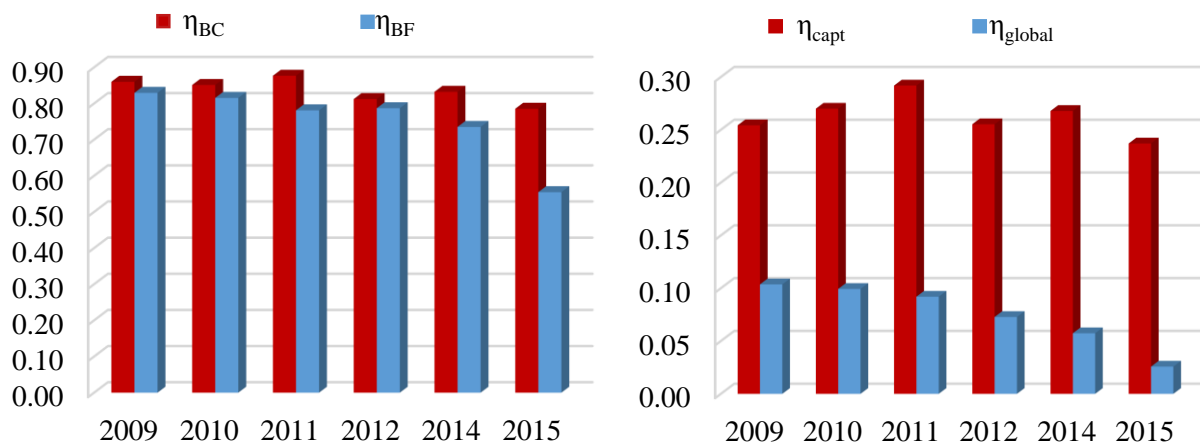


Figure 3 : Evolutions des rendements de l'installation saison par saison

La même tendance est constatée lorsqu'on observe, sur la Figure 4, les évolutions des coefficients de performance thermique de la machine à absorption (COP_{th}) et électrique de l'installation globale (COP_{elec}).

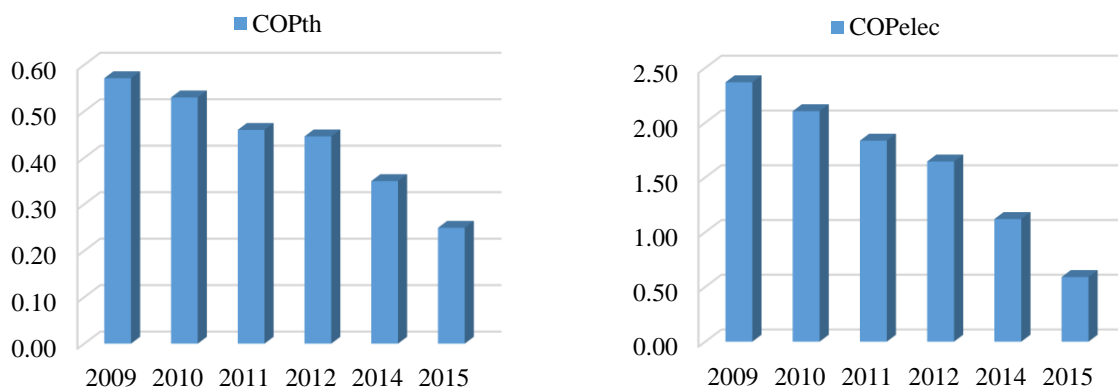


Figure 4 : Evolutions des coefficients de performance thermique et électrique saison par saison

De plus, on observe, sur la Figure 5, une augmentation à la fois de la consommation d'eau et du coût d'exploitation de l'installation rapportée à l'énergie frigorifique distribuée dans le bâtiment (C_{eau} et €kWh) année après année, avec un pic important la dernière année.

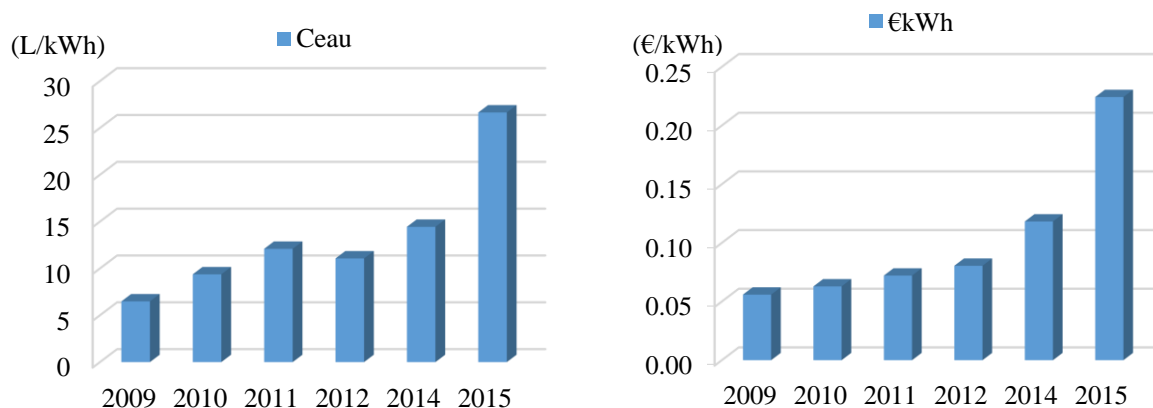


Figure 5 : Evolutions de la consommation d'eau et du coût d'exploitation de l'installation saison par saison

Ces diminutions importantes des performances globales de l'installation ne peuvent être uniquement la conséquence du vieillissement des matériaux et/ou de l'encrassement des échangeurs de chaleur, mais s'expliquent par une baisse des performances de la machine à absorption comme on peut le voir sur l'évolution du COP_{th} au cours du temps (Figure 4). Après analyse, il apparaît que la composition de la solution binaire, bromure de lithium / eau, à l'intérieur de la machine à absorption a changé année après année entraînant une modification des conditions de fonctionnement du cycle à absorption et probablement une diminution du débit de fluide frigorigène (l'eau pure) circulant dans le condenseur, le détendeur et l'évaporateur.

Cette modification de la composition de la solution est très certainement due à des tirages au vide qui interviennent après une coupure de courant assez courte et lorsque la machine à absorption était en fonctionnement avant cette coupure. En effet, dans ce cas, de la vapeur d'eau présente dans le condenseur et l'évaporateur pourrait être extraite de la machine par accident lors du tirage au vide. Ceci viendrait donc de la régulation de la machine à absorption qui active automatiquement la pompe à vide lorsque la machine redémarre après une coupure de courant, sans vérifier les températures dans le générateur par exemple ni la proximité dans le temps de l'éventuel précédent tirage au vide. Dans ces conditions, de la vapeur d'eau est extraite de la machine à absorption et la solution devient de plus en plus concentrée en bromure de lithium entraînant une baisse significative du COP_{th} de la machine au cours du temps.

De plus, on note, la dernière année, une forte diminution à la fois du rendement du ballon froid, du rendement global de l'installation et du coefficient de performance électrique, accompagnée d'une augmentation marquée des consommations d'eau et du coût du kilowatt de froid distribué. Ceci s'explique par une diminution très importante de l'énergie frigorifique distribuée dans le bâtiment (Q_{dist}) en 2015. Après analyse, il apparaît que le froid produit à l'évaporateur n'est pas suffisant pour atteindre la consigne de température dans le ballon froid (17°C), et démarrer la distribution frigorifique dans le bâtiment. En d'autres termes, dans certains cas, la dernière année, le froid produit par la machine à absorption n'est pas distribué dans le bâtiment et reste donc dans le ballon froid entraînant une augmentation des déperditions et donc une diminution de son rendement. Ce froid produit n'est donc pas utilisé par le bâtiment ce qui entraîne une surconsommation d'eau et d'électricité et une augmentation du coût d'exploitation de l'installation.

4.3. Amélioration des performances de l'installation

Dans le but de remédier au problème identifié précédemment, nous avons décidé de corriger la composition de la solution en rajoutant de l'eau pure dans la machine à absorption. La quantité d'eau a été choisie pour se rapprocher des conditions initiales fixées lors de la mise en service, c'est-à-dire une concentration en LiBr d'environ 47%. Cette concentration est déterminée en fonction des conditions de pressions et températures, identiques dans le générateur et l'absorbeur et mesurées en début de journée, lorsque la machine est en équilibre thermique avec son environnement.

Après vérification, à la fin de l'année 2015, la concentration en LiBr dans la machine était d'environ 54,4%. Nous avons donc dû rajouter près de 30 litres d'eau dans la machine pour se rapprocher des conditions initiales.

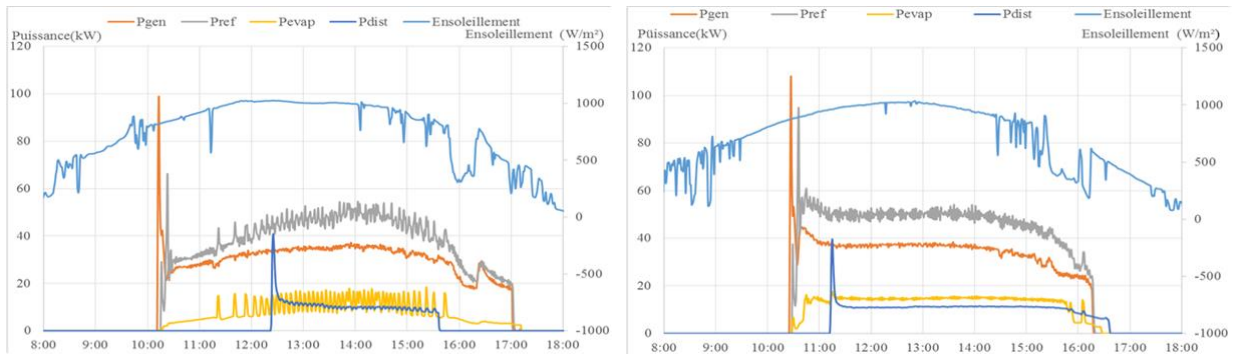


Figure 6 : Evolutions des principales puissances de l'installation au cours d'une journée avant (gauche) et après (droite) ajout d'eau

La figure 6 présente les évolutions de l'ensoleillement et des principales puissances de l'installation avant et après l'ajout d'eau pure dans la machine. Deux journées présentant des caractéristiques climatiques proches ont été choisies afin de rendre la comparaison pertinente. Enfin, le tableau 3 présente toutes les quantités de chaleur de l'installation ainsi que trois principaux indicateurs de performance sur les deux journées étudiées.

	Q_{sol} [kWh]	Q_{csol} [kWh]	Q_{gen} [kWh]	Q_{ref} [kWh]	$Q_{évap}$ [kWh]	Q_{dist} [kWh]	COP_{th} [-]	COP_{elec} [-]	η_{global} [-]
Avant	679	247	210	263	58	35	0.28	0.89	0.05
Après	672	247	206	272	79	59	0.38	1.64	0.09
Ecart	1%	0%	2%	3%	27%	41%	26%	46%	44%

Tableau 3 : Quantités de chaleur, indicateurs de performance et écarts les deux journées étudiées

On note que, dans le tableau 3, les trois premières quantités de chaleur (Q_{sol} , Q_{csol} et Q_{gen}) constituant la source chaude de la machine à absorption, sont à peu de chose près identiques pour les deux journées étudiées. En revanche, les énergies frigorifiques produites à l'évaporateur et distribuées dans le bâtiment ont augmenté respectivement de 27% et 41% avec l'ajout d'eau. Par voie de conséquence, les coefficients de performance thermique et électrique ainsi que le rendement global de l'installation ont aussi augmenté de 26%, 46% et 44% respectivement. En observant les évolutions des puissances au cours de la journée avant l'ajout d'eau pure (Figure 6), on remarque une oscillation importante de la puissance de l'évaporateur due très probablement à la grande variation du débit de fluide frigorigène dans la machine. Ce phénomène n'est plus visible après l'ajout d'eau dans la machine. Nous avons donc pu corriger les performances de la machine en modifiant la composition de la solution LiBr/H₂O.

5. Conclusion

Les travaux présentés dans cet article ont permis, grâce à l'exploitation de données expérimentales, de mieux appréhender le comportement sur le long terme d'une installation de rafraîchissement solaire. Les résultats montrent qu'au bout de sept années de fonctionnement, les performances des capteurs solaires et des ballons de stockages restent globalement constantes. Cependant, les performances de la machine à absorption baissent de manière significative et notamment la dernière année, entraînant une hausse considérable de la consommation d'eau et du prix du kilowatt de froid distribué dans le bâtiment. Cette baisse est essentiellement due à la modification de la concentration de la solution de la machine à absorption au cours des années de fonctionnement. Une correction de la composition de la

solution est ensuite apportée en rajoutant 30 litres d'eau à la machine et les résultats montrent une hausse significative des performances. Il apparaît donc que la concentration de la solution en LiBr est un paramètre important ayant une influence considérable sur les performances de telles installations et il convient de contrôler régulièrement sa valeur. Par ailleurs, il peut être intéressant de déterminer la concentration optimale assurant le meilleur rendement possible de la machine et pouvoir profiter d'un coût de production de froid minimum avec l'aide de la modélisation numérique.

Références

- [1] H. Sun, Z. Xu, H. Wang, et R. Wang, A Solar/gas Fired Absorption System for Cooling and Heating in a Commercial Building, *Energy Procedia*, vol. 70, p. 518-528, mai 2015.
- [2] J. Stalin, Barath, et G. manikandan, Air Conditioning Using Waste Heat and Solar Energy with Phase Change Materials, *Energy Procedia*, vol. 52, p. 579-587, 2014.
- [3] M. Pérez de Viñaspre, M. Bourouis, A. Coronas, A. García, V. Soto, et J. M. Pinazo, Monitoring and analysis of an absorption air-conditioning system, *Energy Building*, 36, no 9, p. 933-943, 2004.
- [4] M. Pons, G. Anies, F. Boudehenn, P. Bourdoukan, J. Castaing-Lasvignottes, G. Evola, A. Le Denn, N. Le Pierrès, O. Marc, N. Mazet, D. Stitou, F. Lucas. Performance comparison of six solar-powered air-conditioners operated in five places, *Energy* 46, 2012, 471-483.
- [5] O. Marc, Etude expérimentale, modélisation et optimisation d'un procédé de rafraîchissement solaire à absorption couplé au bâtiment, Doctorat à l'Université de la Réunion, 2010.
- [6] O. Marc, F. Lucas, F. Sinama, E. Monceyron, Experimental investigation of a solar cooling absorption system operating without any backup system under tropical climate, *Energy and Buildings* 42, 2010, 774-782.
- [7] O. Marc, F. Sinama, J-P. Praene, F. Lucas, J. Castaing-Lasvignottes. Dynamic modeling and experimental validation elements of a 30 kW LiBr/H₂O single effect absorption chiller for solar application. *Applied Thermal Engineering* 90, 2015, 980-993.
- [8] J. Nowag, F. Boudéhenn, A. Le Denn, F. Lucas, O. Marc, M. Radulescu, P. Papillon. Calculation of performance indicators for solar cooling, heating and domestic hot water systems, *Energy Procedia* 30, 2012, 937 – 946.
- [9] J-P. Praene, O. Marc, A. L. Andriamamonjy Razakaniaina, F. Lucas. Retour d'expérience sur une installation de froid solaire : expérimentation et modélisation. *Revue Générale du Froid & du conditionnement d'air* 103 (1149), 2015, 30-37.

Remerciements

L'ensemble du prototype RAFSOL a été conçu et construit dans le cadre de l'ANR ORASOL 2006-2010. Les auteurs remercient l'appui fourni par Jérôme Vigneron pour la maintenance et les essais.