

Modélisation et simulation de l'intégration d'un système de stockage latent à une installation de rafraîchissement solaire couplée à un bâtiment tertiaire.

Olivier MARC*, Paul GUILLOU, Frantz SINAMA, Jean CASTAING-LASVIGNOTTES

Laboratoire de Physique et Ingénierie Mathématique appliquées à l'Energie, à l'environnement et au bâtiment (PIMENT) - Université de La Réunion : IUT Département Génie Civil 97410 Saint Pierre.

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

Résumé - Les exigences de confort des occupants du secteur tertiaire à La Réunion induisent une part croissante des besoins en climatisation. Une alternative à la production frigorifique classique consommatrice d'électricité, réside dans la mise en œuvre de systèmes thermiques tels que les cycles à absorption. Parallèlement, le gisement solaire Réunionnais est important et coïncide dans le temps avec cette demande de climatisation. Il existe donc bien une opportunité à la mise en œuvre de tels cycles et, dans cette logique, une installation de rafraîchissement solaire à absorption de 30 kW a été installée en 2008 par le laboratoire PIMENT à l'IUT de Saint-Pierre. Dotée de 90 m² de panneaux solaires thermiques plans, elle permet de rafraîchir 200 m² de salles d'enseignement durant la totalité de la saison chaude (novembre-mars). L'analyse des données expérimentales de ce système depuis son installation a permis de cibler trois comportements dommageables :

- lorsque les charges thermiques des locaux sont trop faibles (inoccupation, conditions climatiques moins chaudes), le système peut surchauffer et conduire l'installation dans une zone de fonctionnement critique,
- lorsque la ressource solaire est faible, la production frigorifique peut ne pas couvrir entièrement les besoins du bâtiment et augmenter la sensation d'inconfort,
- le potentiel thermique du weekend est inexploité alors qu'il pourrait être valorisé la semaine suivante en cas de passages nuageux ou afin de démarrer l'installation plus tôt le matin.

Une des réponses proposées pour pallier ces problèmes est l'ajout d'un système de stockage thermique afin de lisser la production frigorifique et de disposer d'une réserve d'énergie en cas de besoin. Nous avons choisi dans cet article d'étudier l'influence d'un stockage côté chaud sur le comportement dynamique de l'ensemble et sur les performances globales. Ce choix est dicté d'une part par les contraintes technologiques liées à l'éventuelle surchauffe des capteurs, et que l'on souhaite éviter, et la relative plus grande facilité à stocker de la chaleur que du froid. Parmi les solutions possibles, les systèmes à matériaux à changement de phase (MCP) se révèlent très intéressants du fait de leur densité de stockage élevée et de leur maturité technologique suffisamment avancée pour envisager une intégration réaliste au dispositif. Fort de nombreux travaux de simulation effectués et validés jusqu'à présent sur l'installation actuelle, nous proposons dans ce travail d'intégrer cette fonction stockage dans le modèle général. Un des degrés de liberté associés à l'utilisation des MCP est la température de fusion et trois cas sont envisagés selon la disponibilité des matériaux : 79, 84 et 90°C. Nous avons étudié notamment l'influence de ce paramètre sur les indicateurs de performances suivants : le rendement de la boucle solaire, le coefficient de performance thermique, le ratio d'énergie primaire, l'énergie frigorifique distribuée dans le bâtiment et le taux de couverture de l'installation. En outre, plusieurs scénarios d'occupation ont été envisagés selon l'heure de démarrage de la machine à absorption (8h, 9h, 10h). Les dimensionnements optimaux du stock sont étudiés et discutés pour tous les cas envisagés.

Nomenclature

C_p	Capacité calorifique massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	L_f	Chaleur latente de fusion, $J.kg^{-1}$
COP_{th}	Coefficient de performance thermique, -	\dot{m}	Débit massique, $kg.s^{-1}$
dt	Pas de temps, s	PER	Ratio d'énergie primaire, -
K	Coefficient de perte thermique, $W.K^{-1}.m^{-2}$	\dot{Q}	Puissance, W

Q	Energie thermique, J	<i>cond</i>	Condenseur
R_{sol}	Rendement de la boucle solaire, -	<i>dist</i>	Distribution
S	Surface du ballon primaire, m^2	<i>elec-prod</i>	Electrique de production
T	Température, K	<i>ext</i>	Extérieur
τ_{conv}	Taux de couverture du stock, -	<i>evap</i>	Evaporateur
U	Energie interne, J	<i>fusion</i>	Fusion
W	Energie électrique, J	<i>gen</i>	Générateur
X_l	Fraction de liquide, -	<i>mcp</i>	Matériau à Changement de Phase
		P_1, P_2	Plage 1 et 2
		<i>sol</i>	Boucle solaire
		<i>souhaitée</i>	Souhaitée
		<i>stock 1</i>	Stock sensible chaud
		<i>stock 2</i>	Stock latent
		<i>8h, 9h, 10h</i>	Scénario de démarrage
<i>Indices et exposants</i>			
<i>liq</i>	liquide		
<i>vap</i>	vapeur		
<i>abs</i>	Absorbeur		
<i>capt</i>	Capteur		

1. Introduction

Les procédés à absorption sont une bonne alternative à la climatisation à compression mécanique de vapeur afin de limiter les consommations électriques en utilisant l'énergie solaire pour la compression thermochimique [1]. Ainsi, en 2008, un système de rafraîchissement solaire à absorption simple effet a été installé par le laboratoire PIMENT à l'IUT de Saint-Pierre [2, 3]. D'une puissance frigorifique de 30 kW, la machine à absorption utilise le couple Eau/Bromure de lithium ($H_2O/LiBr$), respectivement comme fluide frigorigène et absorbant. L'installation est dotée de 90 m^2 de panneaux solaires thermiques plans, permettant de rafraîchir 200 m^2 d'un bâtiment tertiaire, ici des salles d'enseignement, durant la totalité de la saison chaude (novembre-mars). Le retour d'expérience de sept années de fonctionnement de l'installation RAFSOL a permis d'identifier trois principaux problèmes :

- Le premier problème peut subvenir lorsque les charges du bâtiment sont faibles avec un ensoleillement important. Dans ce cas, on observe une baisse de la température de la source froide, jusqu'à la température limite basse de 7°C, entraînant l'arrêt de la machine par mesure de sécurité. Simultanément, le rayonnement toujours présent occasionne la surchauffe de la boucle solaire du fait de l'absence de découplage rayonnement solaire/champ de capteurs.
- Le deuxième est l'incapacité de l'installation à couvrir les besoins frigorifiques sur certaines plages horaires. En effet, la demande frigorifique peut s'étendre de 8h à 17h du fait de l'occupation des salles d'enseignement. Cependant, la mise en régime de la boucle solaire et de la machine ne permet une distribution de froid qu'à partir de 10h30 dans le meilleur des cas (la température de démarrage de la machine à absorption est de 80°C). De plus, durant la phase de fonctionnement de l'installation, une baisse importante d'ensoleillement peut affecter la puissance frigorifique produite et ainsi la placer en deçà de la demande en rafraîchissement. Ces deux cas peuvent ainsi mettre les utilisateurs en situation d'inconfort.
- Le troisième est l'inexploitation de la ressource solaire le weekend. En effet, le rafraîchissement solaire de bâtiments tertiaires induit une inoccupation le weekend tandis que la ressource solaire est toujours présente. Aujourd'hui, un fonctionnement de l'installation ainsi qu'une distribution frigorifique est forcé le weekend pour limiter les risques de surchauffes de la boucle solaire, induisant des consommations sans besoins frigorifiques réels du bâtiment.

Ainsi cette étude propose l'ajout d'un système de stockage (Fig. 1) en utilisant la ressource du weekend, qui viendra alimenter l'installation en cas d'insuffisance de la ressource solaire la semaine. Le choix de la technologie de stockage s'est porté sur les matériaux à changement de phase (MCP) pour leur densité énergétique intéressante, leur application technologique possible et la maîtrise de la température d'alimentation du stock. Seul le réservoir côté chaud

est exploré dans ces travaux pour limiter les problèmes de surchauffe de la boucle solaire et stabiliser la température d'alimentation du générateur.

Dans un premier temps, nous étudions l'énergie à stocker en fonction des données extraites de la plate-forme expérimentale. Dans un second temps, un modèle de ballon de stockage latent est présenté venant compléter les précédents travaux de modélisation de l'installation [4, 5, 6]. Les entrées du modèle global sont les données météo et le fichier de charge du bâtiment. Enfin, cinq indicateurs de performances sont présentés permettant de mesurer l'influence de l'ajout d'un stockage au système existant. Trois matériaux à changement de phases ont été choisis dans la littérature en fonction de leur température de fusion [7] : 79, 84 et 90°C. Les simulations sont réalisées selon chaque température citée précédemment et selon trois scénarios de démarrage.

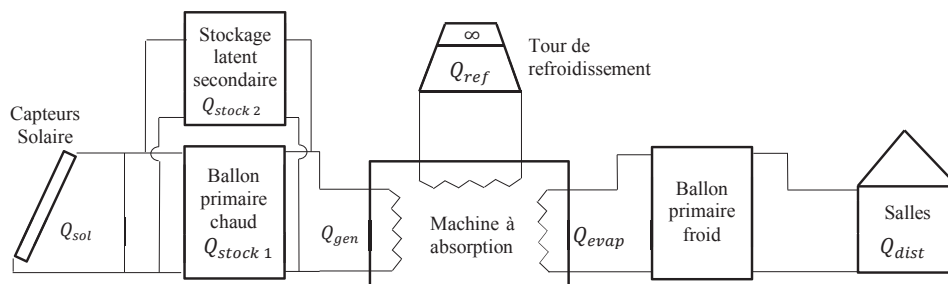


Figure 1 : Schéma de l'installation avec l'ajout d'un stockage latent.

2. Analyse énergétique

L'objectif de l'installation est de distribuer une énergie frigorifique permettant de combattre les charges thermiques des salles d'enseignement. Une journée type de fonctionnement est présentée en figure 2. La puissance souhaitée ($\dot{Q}_{souhaitée}$) correspond aux résultats de simulations thermiques dynamiques réalisés sur le bâtiment. La puissance distribuée ($\dot{Q}_{distribuée}$) correspond à la production délivrée actuellement dans les salles (sans stockage). Deux plages horaires (p_1 et p_2) ont été identifiées où la production frigorifique est inférieure à la puissance souhaitée. En effet dans un premier temps, la mise en régime de la boucle solaire et de la machine ne permet une distribution frigorifique qu'à partir de 10h30. Or les charges du bâtiment induisent une puissance souhaitée dès 8h. On observe ainsi une énergie manquante en début de journée (Q_{p1}). Dans un deuxième temps, une diminution d'ensoleillement est observée vers 12h30 entraînant une réduction de la puissance distribuée tandis que les charges du bâtiment sont présentes jusqu'à 17h ; l'installation distribue une énergie frigorifique inférieure à celle souhaitée (Q_{p2}). Ainsi Q_{p1} , Q_{p2} de même que l'énergie totale souhaitée sont définies par :

- $Q_{p1} = \int_{p_1} Q_{souhaitée} \cdot dt$: Energie manquante en début de journée.
- $Q_{p2} = \int_{p_2} (Q_{souhaitée} - Q_{distribuée}) \cdot dt$: Energie manquante en journée.
- $Q_{totale} = Q_{p1} + Q_{p2}$ Energie totale manquante sur la journée.

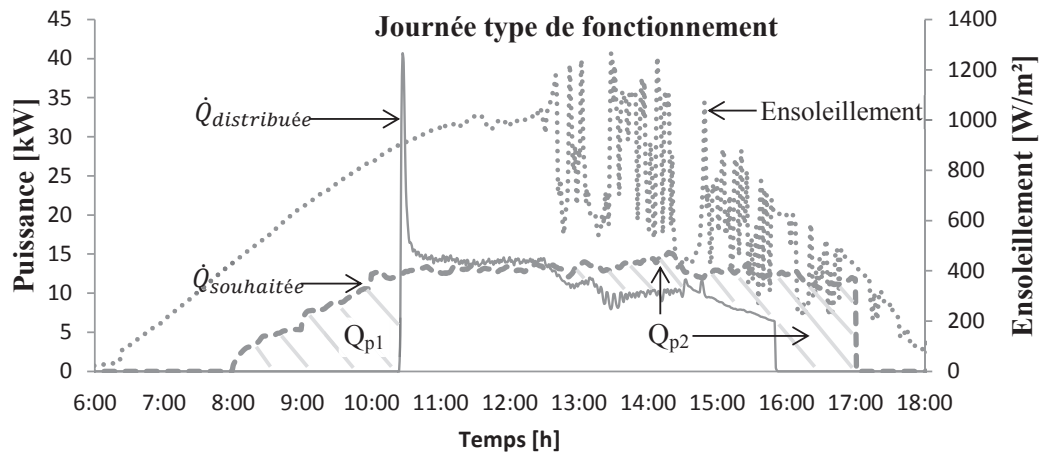


Figure 2 : Analyse d'une journée type de fonctionnement.

L'analyse réalisée sur une journée type de fonctionnement a été généralisée sur une semaine complète afin de quantifier les principales énergies de l'installation du weekend et du lundi au vendredi (Tab. 1). L'énergie solaire du weekend ($Q_{sol\ weekend}$) représente le potentiel thermique solaire récupéré par le fluide caloporteur durant le weekend ; l'énergie frigorifique distribuée (Q_{dist}) est l'énergie de rafraîchissement apportée dans les salles la semaine, du lundi au vendredi ; ΔQ représente l'énergie totale manquante c'est-à-dire le différentiel, entre l'énergie frigorifique souhaitée et l'énergie distribuée, du lundi au vendredi pour différents scénarios de démarrage (8h, 9h, 10h). Les résultats présentés sont les moyennes hebdomadaires des semaines étudiées :

Energie	$Q_{sol\ weekend}$ (a)	$Q_{dist\ semaine}$ (b)	ΔQ_{8h} (c)	ΔQ_{9h} (d)	ΔQ_{10h} (e)
Moyenne [kWh]	297,5	324,6	-246,4	-221,1	-184,0

Tableau 1 : (a) Energie solaire stockable le weekend ; (b) Energie frigorifique distribuée la semaine ; (c) Energie frigorifique nécessaire pour un démarrage à 8h ; (d) Energie frigorifique nécessaire pour un démarrage à 9h ; (e) Energie frigorifique nécessaire pour un démarrage à 10h.

L'objectif est de valoriser le potentiel solaire thermique du weekend ($Q_{sol\ weekend}$) afin de combler le manque de froid distribué dans le bâtiment la semaine (ΔQ). Ainsi la charge de stockage latent s'effectue le weekend lorsque la température de la boucle solaire dépasse la température de fusion du MCP choisi. La décharge s'effectue au cours de la semaine, c'est-à-dire du lundi au vendredi, lorsque la température du ballon d'eau chaude primaire est inférieure à 75°C et qu'il existe une demande en rafraîchissement dans le bâtiment.

3. Présentation du modèle de stockage latent et des indicateurs de performance

L'objectif de ce paragraphe est de présenter le modèle de stockage latent venant s'ajouter aux autres composants de l'installation dont les modèles ont déjà été développés et validés dans de précédents travaux [4, 5, 6]. De plus, cinq indicateurs sont définis afin de comparer et quantifier l'influence des paramètres étudiés sur les performances de l'installation.

3.1. Le modèle de stockage latent

Différentes approches permettent de modéliser un stockage latent [8, 9, 10]. Dans ce travail, une approche simplifiée a été utilisée où la variation d'énergie interne du MCP est donnée par :

1^{er} cas : $T_{mcp} < T_{fusion}$ et $X_l=0$

$$m_{tot} C_s \frac{dT_{mcp}}{dt} = m \cdot C_{eau} \cdot (T_{e_mcp} - T_{s_mcp}) + K_{mcp} \cdot S_{mcp} \cdot (T_{ext} - T_{mcp}) \quad (1)$$

2^{ème} cas : $T_{mcp} = T_{fusion}$ et $0 < X_l < 1$

$$m_{tot} \cdot L_{fusion} \frac{dX_l}{dt} = \dot{m} \cdot C_{eau} \cdot (T_{e_mcp} - T_{s_mcp}) + K_{mcp} \cdot S_{mcp} \cdot (T_{ext} - T_{mcp}) \quad (2)$$

3^{ème} cas : $T_{mcp} > T_{fusion}$ et $X_l=1$

$$m_{tot} C_l \frac{dT_{mcp}}{dt} = m \cdot C_{eau} \cdot (T_{e_mcp} - T_{s_mcp}) + K_{mcp} \cdot S_{mcp} \cdot (T_{ext} - T_{mcp}) \quad (3)$$

Où T_{fusion} est la température de fusion du matériau à changement de phase, X_l est la fraction de liquide (m_l/m_{tot}), K_{mcp} est le coefficient de perte thermique global du ballon de stockage latent et S_{mcp} la surface d'échange de ce ballon avec le milieu extérieur. Ces deux derniers paramètres sont imposés par l'expérience et fixés comme entrées du modèle.

3.2. Définition des indicateurs de performances

Cinq indicateurs de performances sont utilisés afin de mesurer l'influence des différents paramètres sur les performances de l'installation à l'échelle de la semaine. Le Coefficient de Performance Thermique (COP_{th}), le Ratio d'Energie Primaire (PER) et le Rendement de la boucle solaire (R_{sol}) sont définis dans les travaux de Julia Nowag *et al.* [11]. Le taux de couverture (τ_{couv}) représente le pourcentage de couverture du besoin de l'installation. Enfin la quantité de froid distribué Q_{dist} concrétise l'objectif à atteindre.

Indicateur	COP_{th} [-]	PER [-]	R_{sol} [-]	τ_{couv} [-]	Q_{dist} [kWh]
Définition	$\frac{Q_{evap}}{Q_{gen}}$	$\frac{Q_{dist}}{\Sigma W}$	$\frac{Q_{gen}}{Q_{sol}}$	$\frac{Q_{dist}}{Q_{souhaitée}}$	

Q_{evap} est l'énergie produite à l'évaporateur (Fig. 1) ; Q_{gen} représente l'énergie consommée par le générateur de la machine à absorption ; Q_{dist} est l'énergie frigorifique distribuée dans le bâtiment ; ΣW représente l'énergie électrique consommée par l'installation ; Q_{sol} est l'énergie solaire reçue par le champ de capteurs solaires ; $Q_{souhaitée}$ représente l'énergie frigorifique souhaitée par le bâtiment.

4. Résultats et analyse

L'étude s'est focalisée sur trois niveaux de température de fusion (79, 84 et 90°C) et selon trois scénarios de démarrage de l'installation : 8h, 9h ou 10h (l'arrêt de l'installation est fixé à 17h). Les salles d'enseignement sont occupées de 8h à 17h tous les jours du lundi au vendredi. Les simulations sont réalisées lors d'une semaine type de fonctionnement avec une phase de stockage le weekend et une phase de déstockage la semaine lorsque la température du ballon d'eau chaude primaire est trop faible pour alimenter le générateur de la machine à absorption, c'est à dire inférieure à 75°C. La quantité de chaleur stockée le weekend, évaluée à environ 300 kWh, est issue de l'analyse des données expérimentales présentées précédemment (Tab.1a). La masse de MCP associée à cette énergie est fonction de la chaleur latente de fusion du MCP choisie. Dans un premier temps, l'objectif est d'observer le

comportement du stock latent lors des phases de charge et de décharge. Ensuite, les résultats des simulations seront étendus sur une semaine complète suivant les trois scénarios de démarrage et les trois températures de fusion des MCP choisis.

Références	Types de matériau	Température de fusion (°C)	Chaleur latente de fusion (kJ/kg)	Masse de MCP (kg)
RT 80	Paraffine	79	209	5100
Wax 84	Paraffine	84	85	12500
RT90	Paraffine	90	197	5400

Tableau 2 : Caractéristiques des trois matériaux à changement de phase utilisés [7]

4.1. Comportement du stock latent lors des phases de charge et de décharge

La figure 4 présente une semaine type de fonctionnement. L'énergie thermique stockée le weekend (environ 300 kWh), correspondant au potentiel énergétique solaire moyen identifié précédemment (Tab. 1). Pour le stockage latent, la température de fusion du MCP est de 79°C [7], la chaleur latente de fusion est de 209 kJ/kg et la masse associée à l'énergie à stocker est d'environ 5100 kg. Dans cet exemple, le scénario de démarrage de l'installation a été choisi à 9h. La phase de charge stocke l'énergie du champ de capteur solaire durant le weekend (Fig.4 : en haut) lorsque la température de sortie de la boucle solaire est supérieure à la température de fusion du matériau. Dans le cas contraire, le fluide caloporteur réalimente les panneaux solaires jusqu'à une température suffisante. La décharge est réalisée durant la semaine, du lundi au vendredi, lorsque le ballon d'eau chaude alimentant le générateur de la machine à absorption n'atteint pas une température suffisante fixée à 75°C. Cette situation peut survenir notamment lors de passages nuageux importants et/ou répétés. On remarque plusieurs situations de décharge durant la semaine :

- La première situation a lieu entre 9h et 10h30 tous les jours du fait du scénario de démarrage pris à 9h ; la machine à absorption puise dans le stock pour pouvoir assurer la distribution frigorifique à partir de 9h. A 10h30, la boucle solaire prend le relai si l'ensoleillement est suffisant.
- La deuxième situation de décharge intervient régulièrement en fin de journée à partir de 16h environ où, par manque d'ensoleillement, la machine à absorption puise dans le stock latent pour pouvoir assurer la distribution frigorifique jusqu'à 17h.
- Enfin, la troisième situation de décharge est ponctuelle et intervient lors d'un passage nuageux important, comme par exemple dans notre cas le lundi matin et le vendredi en soirée où la machine à absorption a dû puiser respectivement 25% et 15% du stock global pour pouvoir assurer la distribution de froid dans le bâtiment.

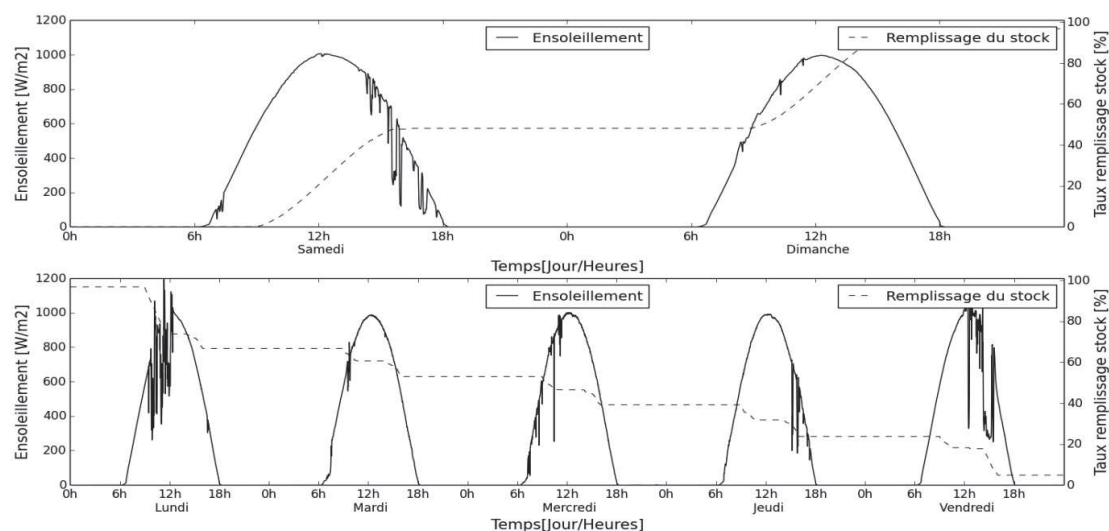


Figure 4 : Charge (en haut) et décharge (en bas) du stockage latent

4.2. Analyse énergétique d'une semaine type

La figure 5 présente les différents indicateurs de performance pour les trois températures de fusion et pour les trois scénarios de démarrage considérés sur une semaine d'étude. Les résultats sont comparés aux performances de l'installation fonctionnant sans stockage, représentés par la base 100. Les premiers résultats mettent en avant une forte augmentation du taux de couverture et de l'énergie frigorifique distribuée pour les scénarios de démarrage de 8h et 9h, avec des valeurs comprises entre 120 % et 135 %. On note ainsi que dans ces conditions il est préférable de choisir une température de fusion assez faible (79°C) si l'on souhaite augmenter ces deux critères de performance. En ce qui concerne le PER, le même comportement est remarqué pour les scénarios 8h, 9h ou 10h avec des valeurs croissantes en fonction de la température de fusion. La valeur maximale est donnée pour une température de 90°C. En effet, plus la température de la source chaude de la machine à absorption est élevée, plus la puissance frigorifique produite l'est aussi, sans pour autant augmenter la consommation électrique de l'installation. En revanche, le rendement de la boucle solaire R_{sol} est inversement proportionnel à l'augmentation de la température de fusion pour les scénarios 8h et 9h. Ceci vient du fait que lorsqu'on augmente la température de fusion du MCP, les pertes thermiques de la boucle solaire (tuyauteries, capteurs et stockages primaire & secondaire) augmentent également. Le COP_{th} de l'installation quant à lui ne varie que très peu avec des valeurs allant de 101 à 102 % sur l'ensemble des simulations réalisées. Enfin le taux d'utilisation du stock (Fig. 5d) met en avant l'intérêt de stocker à 79°C pour les scénarios de démarrage de 8h et 9h. La tendance inversée pour le scénario de 10h s'explique par la bonne couverture de l'installation existante durant la plage 10h-17h où la boucle solaire parvient à alimenter le générateur au-dessus de 75°C.

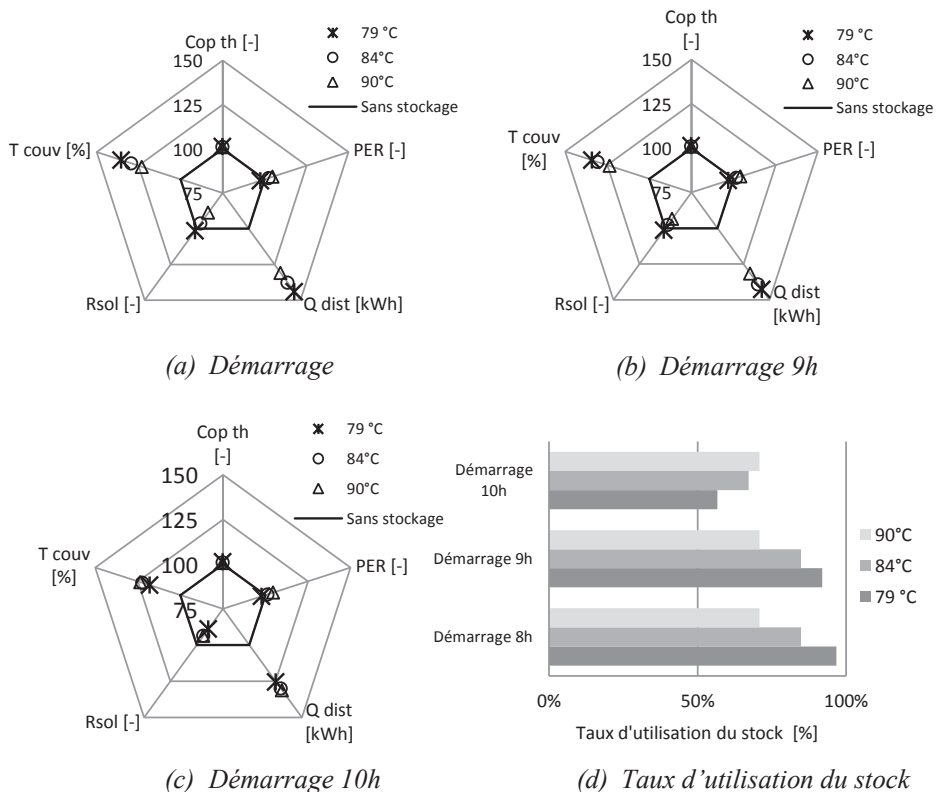


Figure 5 : Evolution des indicateurs de performance (a,b,c) et du taux d'utilisation du stock (d).

5. Conclusion et perspectives

Ce travail a consisté à étudier et évaluer l'intérêt de l'ajout d'un système de stockage, côté chaud, sur une installation de rafraîchissement solaire à absorption couplée à un bâtiment tertiaire. Le fonctionnement intégrant le stockage a été comparé avec l'installation de base grâce à différents indicateurs de performances (COP_{th} , PER , R_{sol} , τ_{couv} , Q_{dist}). Grâce à l'étude menée sur trois températures de fusion (79°C, 84°C et 90°C), il apparaît que la température de fusion la plus intéressante, permettant d'améliorer le taux de couverture, le COP_{th} , le R_{sol} et le taux d'utilisation du stock, est 79°C. A l'inverse, l'amélioration du PER la plus importante est donnée pour une température de fusion à 90°C. Les premiers résultats présentés dans ce travail permettent d'améliorer les connaissances sur l'influence d'un ajout de stockage sur une installation de rafraîchissement solaire à absorption couplée à un bâtiment du tertiaire. Par la suite, le compromis entre les performances de l'installation et le service rendu à l'utilisateur fera l'objet de l'intégration d'un nouvel indicateur. Il permettra d'évaluer le confort thermique des utilisateurs grâce à l'intégration des conditions de température et d'humidité au sein du bâtiment. Enfin dans les prochains travaux, une étude complète sur une saison de fonctionnement sera présentée avec l'intégration de l'influence du positionnement du stock (chaud/froid) sur les indicateurs de performances de l'installation.

Références

- [1] H. M. Henning, Solar assisted air conditioning of buildings - an overview, Applied Thermal Engineering 27 (2007) 1734–1749
- [2] 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
- [3] O. Marc, Etude expérimentale, modélisation et optimisation d'un procédé de rafraîchissement solaire à absorption couplé au bâtiment. Université de La Réunion, 12/2010, Directeur de thèse F. Lucas.
- [4] O. Marc, J-P. Praene, A. Bastide, F. Lucas, Modeling and experimental validation of the solar loop for absorption solar cooling system using double-glazed collectors, Applied Thermal Engineering 31 (2011) 268-277
- [5] O. Marc, F. Sinama, F. Lucas, Decision making tool to design solar cooling system coupled with building under tropical climate, Energy and Buildings 49 (2012) 28–36
- [6] 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
- [7] L.F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia, A.I. Fernández, Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 1675–1695
- [8] A.J. Callego, A. Ruiz-Pardo, A. Cerezuela-Parish, J. Sanchez, C. Martin-Macareno, L.F. Cabeza, E.F. Camacho, E. Oro, Mathematical Modeling of a PCM storage tank in a solar cooling plant, Solar Energy 93 (2013) 1–10
- [9] B.Fortunato, S.M.Camporeale, M.Torresi, M. Albano, Simple Mathematical Model of a Thermal Storage with PCM, AASRI Procedia 2 (2012) 241–248
- [10] M. Rostamizadeha, M. Khanlarkhani, S. Mojtaba Sadrameli, Simulation of energy storage system with phase change material (PCM), Energy and Buildings 49 (2012) 419–422
- [11] 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