



Climatisation solaire à absorption, mode de fonctionnement et description des différents éléments d'une unité de climatisation solaire dans le monde : Revue de littérature

Agnimoan Constant ALIHONOU^{1,2}, Clotilde Tognon GUIDI^{1,2},
Mathias Léandre VISSOH¹, Antoinette ADJAGODO³, Emile A. SANYA² et
Micheline AGASSOUNON DJIKPO TCHIBOZO^{3*}

¹ *Laboratoire des Procédés et d'Innovations Technologiques, Institut Universitaire et Technologique (IUT) de Lokossa, BP : 133 RB, Lokossa, Bénin.*

² *Laboratory for Energy and Applied Mechanics (LEMA/UAC), University of Abomey-Calavi, Bénin.*

³ *Laboratoire des Normes et de Contrôle de Qualités Microbiologique, Nutritionnelle et Pharmacologique (LNCQMNP), Faculté des Sciences et Techniques (FAST), Université d'Abomey-Calavi (UAC), 01BP : 1636 RP, Cotonou, Bénin.*

* *Auteur correspondant ; E-mail: tchibowo@yahoo.fr; guiclot@yahoo.fr*

RESUME

Cette synthèse bibliographique est une compilation des différentes technologies de climatisation solaire à absorption, des modes de fonctionnement, de la description des différents éléments d'une unité de climatisation solaire. Elle prend en compte aussi les avantages et les inconvénients liés à son utilisation. Les sources d'informations utilisées sont les publications, les ouvrages, les rapports d'activités de mémoires de thèses et les notes techniques. La synthèse met en exergue la technologie utilisée pour la climatisation solaire à absorption, qui désigne l'ensemble des techniques de climatisation utilisant l'énergie solaire comme ressource énergétique primaire dans le but final de refroidir l'air d'une pièce ou d'un volume donné grâce au système à absorption couplé à des capteurs solaires thermiques. Les fluides frigorigènes utilisés ont un faible impact environnemental et contribuent à la réduction des émissions de CO₂ liées à la climatisation. Ces technologies efficaces et silencieuses, qui mettent en jeu moins de machines tournantes, ont une durée de vie plus longue que les systèmes de réfrigération classiques tout en ayant une consommation électrique très faible, voire négligeable pour certaines configurations. Toutefois, cette technologie présente des inconvénients tels que les coûts d'achat et d'installation élevés, le besoin de disposer d'un grand espace pour l'installation des capteurs solaires thermiques, etc. Mais la climatisation solaire reste l'une des solutions prometteuses pour endiguer les changements climatiques.

© 2019 International Formulae Group. All rights reserved

Mots clés: climatisation solaire, absorption, capteurs thermiques, développement durable, changements climatiques.

Solar absorption Air Conditioning, mode of operation, description of the various elements of a solar air conditioning unit: literature review

ABSTRACT

This review takes stock of the various absorption solar air-conditioning technologies, the operating modes, the description of the various elements of a solar air-conditioning unit, as well as the advantages and

drawbacks of using them. The sources of information are publications, books, activity reports of dissertations and technical notes. The synthesis highlights the technology used for solar absorption air conditioning, which refers to all air conditioning technologies using solar energy as a primary energy resource with the ultimate goal of cooling a room, thanks to the absorption system coupled to solar thermal collectors. The refrigerants used have a low environmental impact and contribute to the reduction of CO₂ emissions. Efficient and quiet, these technologies that involve fewer rotating machines, have a longer life than conventional refrigeration systems, while having a very low or even negligible power consumption. However, this technology has drawbacks such as high purchase and installation costs, the need for a large space for the installation of solar thermal collectors, etc. But solar air conditioning remains one of the promising solutions to stem climate change.

© 2019 International Formulae Group. All rights reserved

Keywords: solar air conditioning, absorption, solar thermal collectors, sustainable development, climate change.

INTRODUCTION

La climatisation vise à la création des conditions satisfaisantes pour le confort humain dans les habitats, les bureaux, les centres commerciaux, les usines, les transports, les voitures, etc. Pour atteindre ce but, plusieurs paramètres sont contrôlés, il s'agit de la température, de l'hygrométrie, du renouvellement et de la filtration de l'air (Marvillet, 2015). En associant utilité et confort, ce secteur a toujours occupé une place primordiale pour le confort et le bien-être de l'homme. La climatisation répond à un besoin de confort qui est devenu incontournable de nos jours (Dardour, 2012). Le marché mondial des systèmes de climatisation a connu un élan remarquable en enregistrant une forte augmentation du volume des ventes (Wood, 2011 ; Bsria, 2012). Dans le monde et plus particulièrement en Afrique, les systèmes de climatisation commercialisés sont pour la plupart des machines à compression de vapeur. Bien que leurs performances frigorifiques soient toujours en nette amélioration, ils consomment pour leur fonctionnement, des quantités élevées d'énergie électrique. Environ 15% de toute l'électricité produite dans le monde est employée pour la réfrigération et la climatisation (Aebischer et al., 2007 ; Grignon-Masse, 2010). La consommation d'énergie pour les systèmes de climatisation a récemment été estimée à 45% de l'ensemble de l'énergie consommée par les bâtiments résidentiels et tertiaires (Fan et al.,

2007). L'énergie électrique utilisée par ces systèmes est produite pour la plupart à partir des combustibles fossiles (le charbon, le gaz naturel, etc.), ce qui contribue activement au réchauffement climatique de la terre, auquel le monde fait face aujourd'hui (Chedop et al., 2016). L'impact de ces machines frigorifiques à compression de vapeur sur l'environnement peut être évalué de façon directe. En effet, ces appareils utilisent comme fluide frigorigènes des gaz nocifs à l'environnement tels que les chlorofluorocarbones (CFCs), les hydrochlorofluorocarbones (HCFCs) et les hydrofluorocarbures (HFCs). Ces gaz contribuent à l'appauvrissement de la couche d'ozone et à l'augmentation de l'effet de serre (Cop 21, 2015). Soulignons que les CFCs sont peu utilisés dans les pays en développement. Dans les pays occidentaux, les CFCs sont progressivement écartés du marché des fluides, à cause de leurs potentiels de réchauffement planétaire (PRP) élevés et aussi pour respecter les obligations de l'Amendement de Kigali au Protocole de Montréal qui exige aux pays l'utilisation des fluides frigorigènes à faible PRP. Ces derniers ont laissé place aux fluides frigorigènes naturels tels que les hydrocarbures, le dioxyde de carbone et le gaz ammoniac (Poggi, 2018 ; Colbourne, 2018).

Par ailleurs, les préoccupations environnementales grandissantes conduisent à réexaminer les performances des systèmes classiques de production et de consommation d'énergie afin d'apporter des améliorations

(Vitte, 2007). La protection de l'environnement contre les effets nocifs des diverses machines et leurs équipements, y compris le fonctionnement des installations frigorifiques à compression mécanique, est un problème urgent pour toute l'humanité.

Vu ces nombreux effets néfastes que produisent les systèmes de climatisation à compression sur l'environnement et de leurs consommations d'énergie électrique élevées, l'utilisation d'autres systèmes s'en suit plus prometteuse. Ainsi, la climatisation des habitats à partir de la chaleur du soleil, qui est une source d'énergie naturelle semble être plus économique à long terme et moins polluante. Le développement de l'utilisation de l'énergie solaire sera lié non seulement à ses avantages économiques (qui grandiront au fur et à mesure que les réserves d'énergie fossiles diminueront), mais surtout à des considérations liées à la protection de l'environnement : pas de rejet polluant (fumées contenant du CO₂ et des NO_x par les centrales thermiques) ; pas de danger radioactif et de déchets encombrants (centrales nucléaires) (Coulibaly et Tian, 2010).

Cette revue de littérature constitue donc une étape dans la constitution d'une base de données pouvant permettre de mieux appréhender la technologie de climatisation solaire à absorption, son mode de fonctionnement et la description des différents éléments d'une unité de climatisation solaire, avec les avantages et inconvénients de cette technologie.

Cette synthèse bibliographique a été élaborée en faisant recours aux résultats publiés par des chercheurs. Les sources d'informations utilisées sont les publications d'article, les ouvrages, les rapports de mémoires et de thèses, les notes techniques. Les recherches ont porté essentiellement sur la climatisation solaire à absorption, son mode de fonctionnement, la description des différents éléments d'une unité de climatisation solaire, les avantages et les inconvénients de cette technologie.

CLIMATISATION SOLAIRE

La climatisation solaire désigne l'ensemble des techniques de climatisation utilisant l'énergie solaire comme ressource énergétique primaire (Aubade. 2018).

Techniques de production du froid à partir de l'énergie solaire

Il existe quatre différentes techniques de production du froid à partir de l'énergie solaire:

- Utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque pour alimenter en électricité un climatiseur à compression mécanique,
- Conversion de l'énergie solaire thermique en énergie mécanique couplée avec un climatiseur à compression mécanique,
- Utilisation de l'énergie solaire thermique pour alimenter une machine à froid dite "à sorption" (absorption ou adsorption),
- Utilisation de l'énergie solaire thermique pour alimenter un système de conditionnement d'air par évaporation ou par dessiccation (solide ou liquide).

Parmi ces possibilités, la technique de climatisation solaire à absorption est la plus couramment utilisée. Elle représente plus de 82% des technologies de climatisation solaire utilisées dans le monde (Aniès, 2011). Cette machine dissocie par ébullition un frigorigène à faible impact environnemental de la solution porteuse. En climatisation solaire, le couple binaire eau-bromure de lithium (LiBr-H₂O) est souvent adopté. L'eau étant le réfrigérant.

Les machines à absorption

Les machines à absorption sont des dispositifs existants depuis l'invention des machines frigorifiques à compression mécanique (autour de 1850). L'absorption a précédé les systèmes à compression (Denis et al., 2013). Le cycle du fluide frigorigène dans la machine à absorption est similaire à celui d'une climatisation électrique traditionnelle, à la différence que la compression mécanique est remplacée par une «compression

thermochimique» (plus précisément, une augmentation de la température et de la pression par apport d'énergie thermique au bouilleur et par absorption du réfrigérant en basse pression dans l'absorbeur) (Castaing, 2001; Aniès, 2011).

La machine à absorption fonctionne à un régime de température au générateur compris entre 70 et 95 °C. Il faut donc des technologies de capteurs solaires thermiques pour récupérer une source d'énergie provenant d'une production de chaleur « perdue » lors d'autres procédés, d'une énergie peu chère (gaz naturel) ou bien d'énergies renouvelables (soleil, biomasse), qui permettent d'atteindre ces températures (Puygrenier, 2009). Avec un rendement faible, les fluides frigorigènes utilisés dans les machines à absorption ne sont pas des gaz à effet de serre comme ceux des machines à compression mécanique (Adrien, 2009). D'après, certains auteurs (Castaing, 2001; Clodis et al., 2013 ; Morel et al., 2015), les deux couples frigorigène et absorbant, qui ont dominé le marché des machines à absorption sont:

- Bromure de Lithium + Eau (LiBr – H₂O), l'eau étant le fluide frigorigène et le bromure de lithium absorbant,
- Ammoniac + Eau (NH₃ /H₂O), l'ammoniac étant le fluide frigorigène et l'eau absorbant.

Cependant, l'utilisation d'autres solutions telles que les couples LiCl/H₂O, NH₃/LiNO₃ (Aniès, 2011) ; LiBr/HO(CH₂)OH (Lee et al., 2000 ; Aniès 2011) est possible. L'emploi de certains couples reste encore du domaine de la recherche et du développement, ou entraîne de moins bonnes performances que les deux solutions les plus courantes (Lee et al., 2000 ; Sencan, 2005 ; Aniès 2011).

Pour une climatisation à une température supérieure à 0 °C, le couple (LiBr – H₂O), est le plus utilisé. Tandis que pour la réfrigération (température inférieure à 0 °C), le couple (NH₃ /H₂O) est préféré.

MODE DE FONCTIONNEMENT DES MACHINES A ABSORPTION

Les puissances standard de climatisation se situent dans une gamme allant

de quelques kilowatts (kW) jusqu'à quelques centaines de kilowatts (kW) (Wiemken et Ise, 2009). Généralement, ces groupes sont alimentés avec la chaleur fatale des réseaux de chaleur, généralement au-dessus de 85 °C et les valeurs moyennes de coefficient de performance (COP) se situent entre 0,6 et 0,8. Le deuxième modèle des machines à LiBr/H₂O est celui à double effet : Ces machines nécessitent de plus hautes températures motrices (> 180 °C) et permettent d'atteindre un coefficient de performance (COP) allant jusqu'à 1,2 (Dardour, 2012). Les machines à absorption offrent des perspectives très intéressantes en termes de réduction de l'impact environnemental lié au rafraîchissement des ambiances (rafraîchissement solaire) (Le Pierres, 2011).

Description du cycle thermodynamique d'une machine à absorption

La Figure 1 (voir annexe) décrit le principe d'une machine à absorption fonctionnant au couple bromure de lithium / eau (LiBr/H₂O). Le fluide frigorigène (eau) s'évapore en prélevant de la chaleur du fluide à refroidir (air). L'aspiration de la vapeur d'eau (10) par pulvérisation du bromure de lithium est injectée dans l'absorbeur. Lors de la réaction exothermique au niveau de l'absorbeur, la chaleur se dissipe et laisse place au mélange de bromure de lithium et de vapeur de réfrigérant «solution riche » (1). Cette solution riche est ensuite pompée (2) à travers un échangeur de chaleur (3) vers le générateur. Dans le générateur, la solution de bromure de lithium / eau (LiBr/H₂O) «solution riche» chauffée et bouillie par une source de chaleur externe pour libérer la vapeur de réfrigérant (7), produisant une solution de bromure de lithium / eau (LiBr/H₂O) peu concentrée en eau «solution pauvre » (4). Cette dernière retourne à l'absorbeur à travers l'échangeur de chaleur et d'une vanne de détente sous la forme d'un spray (6). La vapeur réfrigérante quittant le générateur est liquéfiée (8) dans le condenseur et est dirigée vers l'évaporateur à travers une vanne de détente (9).

CLIMATISATION SOLAIRE A ABSORPTION

La climatisation solaire utilise l'énergie du soleil pour refroidir l'air d'une pièce ou d'un volume donné grâce au système à absorption couplé à des capteurs solaires (Adrien, 2009). Une unité de climatisation solaire à absorption est constituée de plusieurs éléments (capteurs solaires thermiques, réservoir de stockage, compresseur thermochimique, etc.) reliés entre eux (Figure 2, voir annexe). Chaque élément interagit avec les éléments auxquels il est connecté (Florides et al., 2003). La chaleur générée par le champ de capteurs solaires thermiques permet de chauffer le fluide caloporteur (eau) qui circule en son sein. Une partie de ce fluide chauffé est stockée dans le réservoir à eau chaude, et lorsque sa température atteint la température nominale nécessaire pour faire fonctionner la machine, le générateur de la machine à absorption se met sous tension. La machine à absorption produit du froid au niveau de son évaporateur au cours du fonctionnement. Le froid est ensuite distribué dans le local de manière identique à un système de climatisation classique. Et, l'absorbeur et le condenseur de la machine à absorption sont refroidis par une tour de refroidissement (Florides et al., 2003 ; Kühn et al., 2005).

La machine frigorifique à absorption doit être sélectionnée pour fonctionner en fonction des températures de travail du réseau de capteurs solaires thermiques installés. Généralement, le système intègre en son sein un réservoir d'eau chaude de stockage et une chaudière qui peut fournir de l'eau chaude pendant les jours de faible ou de non-enseulement (Dardour, 2012).

Utilisation de la machine à absorption dans les systèmes de froid solaire

A la fin de 2014, environ 1175 systèmes solaires ont été installés dans le monde entier (Lazzarin, 2014), la machine à absorption reste la plus utilisée (72%), suivie des machines à adsorption (17%) et à déshydratant solide (10%). La machine à déshydratant liquide ne représente que 1% des

installations (Bjöm, 2012 ; Morel, 2016). La plupart de ces installations sont équipées de capteurs à surfaces planes et de capteurs à tubes sous vide très performants.

ANALYSE THERMODYNAMIQUE DES MACHINES A ABSORPTION

De nombreuses recherches ont été consacrées au cours de ces dernières années à l'amélioration des machines à absorption solaire. Le principal moyen pour améliorer l'efficacité de la machine à absorption, est de faire son analyse thermodynamique (énergétique et exergetique) (Sözen, 2001 ; Misra et al., 2006).

Analyse énergétique des machines à absorption

L'analyse énergétique concerne l'application de la première loi de la thermodynamique qui décrit la conservation de l'énergie au sein des différents éléments de la machine à absorption. L'optimisation de la première loi aboutit à la maximisation du coefficient de performance (COP) de la machine (Muhsin et al., 2007), assurant ainsi une évacuation maximale de la chaleur pour un minimum de puissance à son entrée. La première loi de la thermodynamique reste la méthode la plus couramment utilisée dans l'analyse des systèmes thermiques, dont celle des machines à absorption (Yumrutas et al., 2002). Plusieurs travaux ont été menés dans ce sens. Kim et al. (2006) ont présenté les corrélations pour le calcul de l'enthalpie, l'entropie, le coefficient osmotique et l'énergie libre de Gibbs de la solution de bromure de lithium-eau (LiBr / H₂O). Lyes et al. (2012) ont fait la simulation numérique d'un cycle à absorption solaire (LiBr/H₂O). Les résultats ont montré l'existence d'un seuil de température de bon fonctionnement de la machine à absorption. Ainsi, la température du générateur et de l'évaporateur ont une influence sur le fonctionnement du cycle. Touaibi et al. (2012) ont réalisé une analyse énergétique et exergetique d'un système à absorption simple effet de 10kW utilisant le couple Eau – Bromure de lithium. Cette étude a montré

que l'augmentation de l'efficacité de l'échangeur thermique fait augmenter le coefficient de performance et le rendement exergetique. L'efficacité exergetique augmente significativement avec l'augmentation de la température du générateur et de l'évaporateur.

Analyse exergetique des machines à absorption

L'analyse exergetique concerne l'application de la deuxième loi de la thermodynamique. Cette méthode est un puissant outil de conception, d'optimisation et d'évaluation des performances des systèmes d'énergie, tout en décrivant la qualité d'énergie et de la matière mise en jeu (Yumrutas et al., 2002). La méthode exergetique (analyse de la seconde loi de la thermodynamique), permet de calculer la perte d'exergie causée par l'irréversibilité au sein des systèmes d'énergie; elle est une propriété thermodynamique très importante qui mesure le travail utile pouvant être produit par une substance ou la quantité de travail nécessaire pour achever un processus (Talbi et al., 2000). Dans la littérature, plusieurs recherches ont abordé le concept de l'exergie telles que Sencan et al. (2005) ont évalué l'effet des conditions de fonctionnement sur le coefficient de performance (COP) et l'efficacité exergetique d'une machine à absorption utilisant le couple eau-bromure de lithium, tout en énumérant les principaux facteurs qui sont à la base de la destruction par exergie dans les systèmes à absorption. Morosuk et al. (2008) ont proposé une méthode de détermination de la destruction par exergie au niveau des différentes parties d'une machine à absorption afin de faciliter la compréhension et l'amélioration de ces systèmes.

DIFFERENTS ELEMENTS D'UNE UNITE DE CLIMATISATION SOLAIRE A ABSORPTION

Les capteurs solaires thermiques

Le capteur solaire thermique est un système permettant de transformer le

rayonnement solaire en énergie thermique (chaleur). En fonction de la position du soleil sur sa trajectoire journalière, les performances des capteurs solaires thermiques varient de façon importante (Mauthner, 2012). L'efficacité d'un capteur dépend du rayonnement solaire reçu, plus le rayonnement sera perpendiculaire, plus l'efficacité du capteur sera maximum. Il dépend aussi du choix, de la qualité de matériaux utilisés pour sa conception afin de capter et transmettre la chaleur au fluide caloporteur (Mauthner, 2012). Les capteurs solaires thermiques permettent de répondre à différents besoins (voir Figure 3; annexe).

Selon Soteris et al. (2004), Foster et al. (2009) et Giordanou (2009), en fonction de la technologie et de la température, il existe essentiellement trois types de capteurs solaires thermiques (capteur plan ; capteur à tube sous vide ; capteur à concentration). Les capteurs plan et à tube sous vide sont d'une plus grande utilisation dans les applications de climatisation solaire.

Capteur plan

La production de l'énergie thermique à partir de l'énergie solaire par les capteurs plans connaît de nos jours de nombreuses applications vu leurs innombrables intérêts économiques et environnementaux. Pour les capteurs plans, l'absorbeur est généralement recouvert d'un boîtier en tôle d'acier, en aluminium ou en acier inoxydable et d'un cache avant en verre de sécurité solaire pauvre en fer qui le protège contre les intempéries (Viesmann, 2016) (voir Figure 5 ; annexe). Ce capteur est un convertisseur d'énergie solaire en énergie thermique et peut être utilisé dans beaucoup d'applications nécessitant des températures basses et modérées, telles que le chauffage des locaux et des piscines, le séchage des produits agricoles, du bois ou encore les plantes médicinales (Grine et al., 2014).

Capteur solaire à tube sous vide

Les capteurs solaires à tubes sous vide sont des capteurs solaires qui ont une meilleure performance que les capteurs plans

pour un fonctionnement à haute température dans l'intervalle de 77 à 170 °C. Ils sont bien adaptés pour les applications de chauffage commercial et industriel ainsi que pour les applications de climatisation (Soteris et al., 2004 ; Foster et al., 2009). Le capteur solaire à tubes sous vide est constitué de rangées de tubes de verre parallèles, reliées à un tuyau d'en-tête (voir Figure 6 ; annexe). L'étanchéité des tubes constitue la condition indispensable pour garantir la fiabilité et la longue durée de vie des capteurs à tubes sous vide (Viesmann, 2016). La Figure 4 (voir annexe), montre le rendement des capteurs plan et sous vide en fonction des températures de fonctionnement.

Les tours de refroidissement

Une tour de refroidissement est un échangeur d'un type particulier qui permet de rejeter de la chaleur dans l'air environnant sous forme à la fois de chaleur sensible et de chaleur latente du fait de l'augmentation de son humidité (Gicquel, 2006). Plusieurs moyens (eau, air) existent pour refroidir les machines à absorption. Pour la plupart des machines, la température d'utilisation est comprise entre 23 °C et 35 °C. La température de refroidissement impacte de manière importante le fonctionnement de la machine (Morel et al., 2014). Les contraintes météorologiques du site d'implantation, la localisation (zone urbaine) et la disponibilité de la ressource eau sont les paramètres qui influencent le plus le choix d'un système de refroidissement et son dimensionnement. La technologie de refroidissement la plus répandue pour les groupes froids thermiques est le refroidissement humide, à l'aide de tours de refroidissement ouvertes. Cette technologie est très efficace dans les climats appropriés (dotés d'une hygrométrie raisonnable, soit moins de 80% en moyenne) et, en principe la température limite de retour de l'eau refroidie est proche de la température de bulbe humide de l'air (3 °C à 5 °C au-dessus de la température humide).

Le réservoir de stockage d'eau chaude

L'intérêt d'un réservoir vient du fait que l'énergie solaire est intermittente et qu'il

faut néanmoins assurer son adéquation avec la charge qu'elle doit alimenter. A cet effet, le réservoir de stockage joue un rôle important de régulation dans les systèmes solaires. En fonction du mode de fonctionnement, un réservoir de stockage peut présenter une différence de température pouvant aller jusqu'à 5 °C entre le haut et le bas (Aniès, 2011). Ce phénomène est dû au tirage d'eau destiné à être chauffé par les capteurs depuis le bas du réservoir et réinjecté en haut, avant de la renvoyer plus froide en bas du réservoir de stockage (stratification liée à la différence de densité). Un réservoir d'eau chaude qu'il soit alimenté par des panneaux solaires, soit par une résistance électrique, ou par un appoint de chaudière à gaz, est un dispositif clé des systèmes à haute efficacité énergétique de demain (Ortolas, 2013). Il est à souligner que l'utilisation d'un réservoir d'eau chaude dans les pays en développement serait alimenté pour la plupart que par des panneaux solaires à cause des problèmes énergétiques que rencontre ces pays, et vu aussi la disponibilité du rayonnement solaire. Pour des systèmes de production et de stockage d'eau chaude solaire, les réservoirs de stockage d'eau chaude à stratification sont les plus utilisés (Solarfocus, 2018). La température moyenne de stockage d'eau pour les applications de climatisation solaire est de 80 °C.

AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA CLIMATISATION SOLAIRE

Avantages de la climatisation solaire

Quelle que soit la technique utilisée, la climatisation solaire offre une solution de climatisation propre. Les fluides frigorigènes employés sont totalement inoffensifs pour l'environnement (à la différence des fluides utilisés dans les systèmes conventionnels). Par ailleurs, la climatisation solaire permet de réduire les émissions de CO₂ (Audrey, 2009). Elle a aussi pour avantage de pouvoir fournir le plus de froid quand il fait le plus chaud, dans les périodes où le soleil est le plus disponible (adéquation entre besoin et disponibilité de la ressource primaire). Efficaces et silencieuses, ces technologies ont une durée de vie plus longue que les systèmes

de réfrigération classiques (25 ans contre 10 ou 15 ans pour un système classique) (Aubade, 2018). La Consommation électrique d'une unité de climatisation solaire est très faible comparée à celle due à la compression mécanique (Mugnier et Meunier, 2013). De plus, ces systèmes peuvent être opérationnels avec un minimum de pièces mobiles. Il en résulte de faibles vibrations, une simplicité mécanique, une fiabilité et une longue durée de vie (Aniès, 2011). Dans un futur proche, la climatisation solaire deviendra, sans aucun doute, un produit phare.

Inconvénients de la climatisation solaire

Malgré ses avantages (voir Tableau 1 ; annexe), comme pour tout produit technologiquement innovant, et relativement rare le prix pour la climatisation solaire reste élevé. Ainsi, ces dispositifs n'étant pas encore totalement démocratisés, ils restent chers à l'achat (Audrey, 2009). Un autre inconvénient est que la climatisation solaire s'appuie sur l'énergie solaire pour fonctionner, donc elle ne fonctionnera pas la nuit (Aubade, 2018), sauf avec disposition particulière (stockage). Si par exemple, les conditions météorologiques d'une journée étaient médiocres, le système ne serait pas capable de produire du froid (Aniès, 2011).

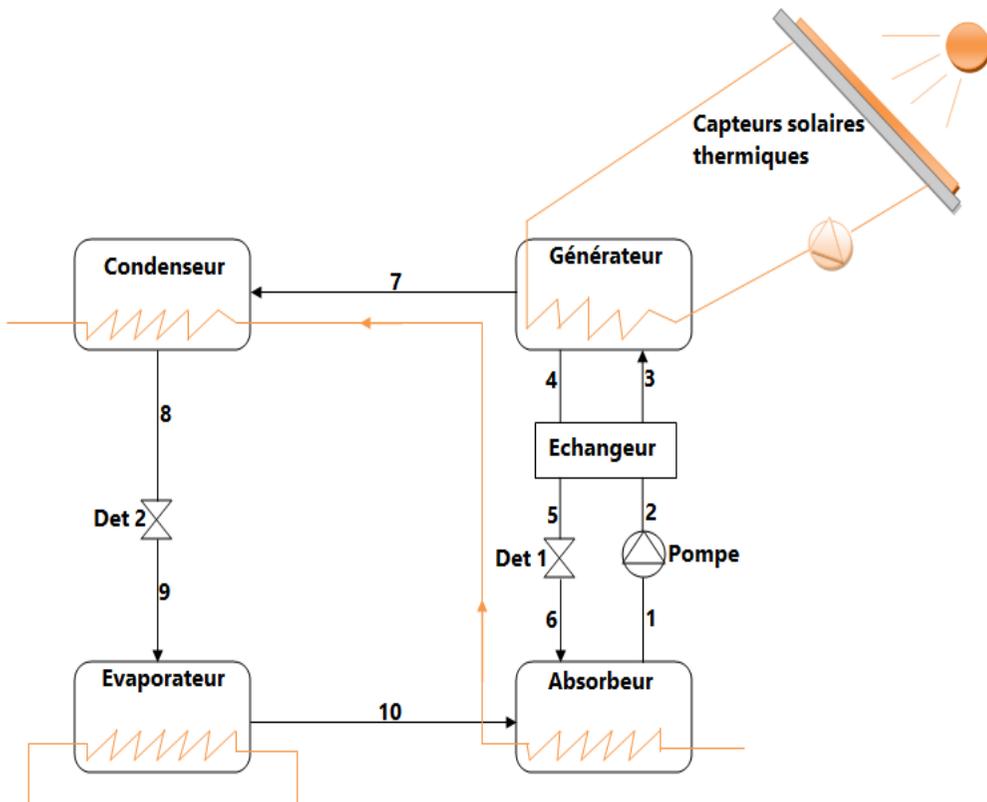


Figure 1 : Schéma de principe d'une machine à absorption solaire fonctionnant au (LiBr/H₂O) (Mugnier et Meunier, 2013).

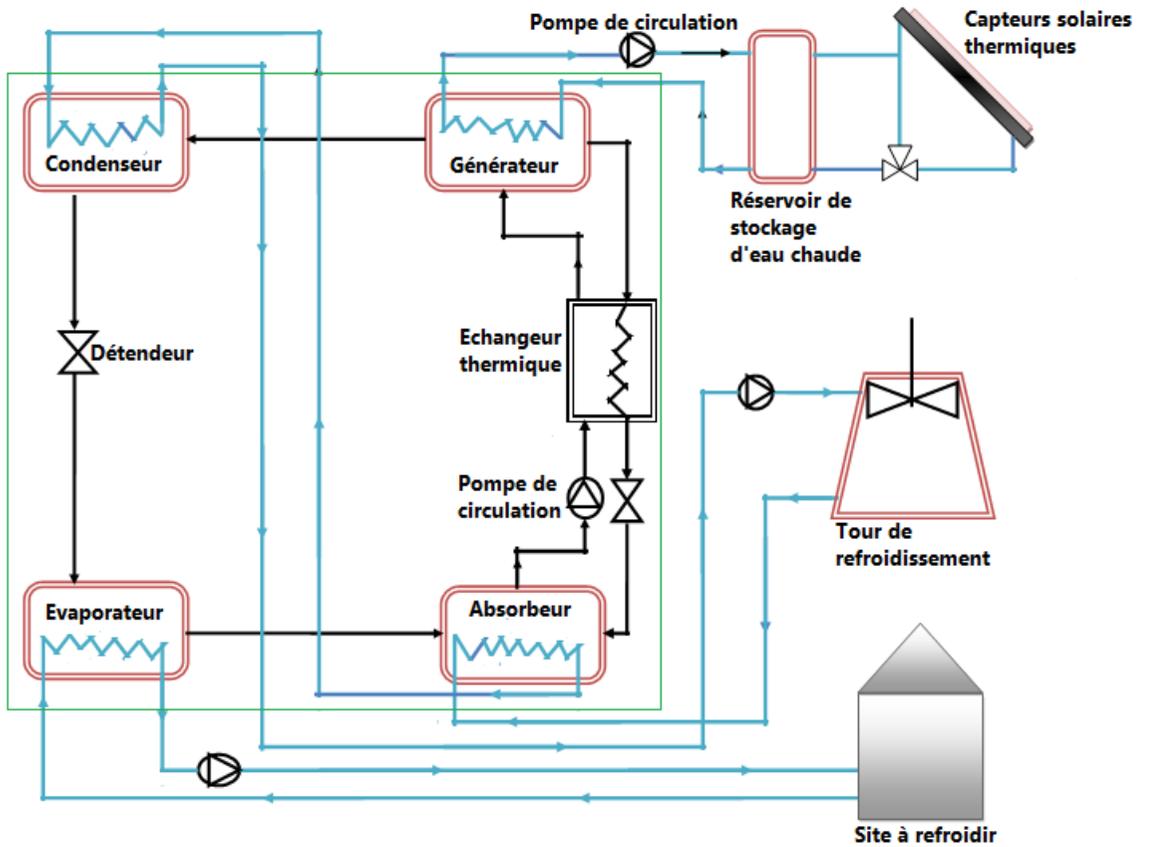


Figure 2 : Principe de fonctionnement d'une installation de climatisation solaire à absorption.

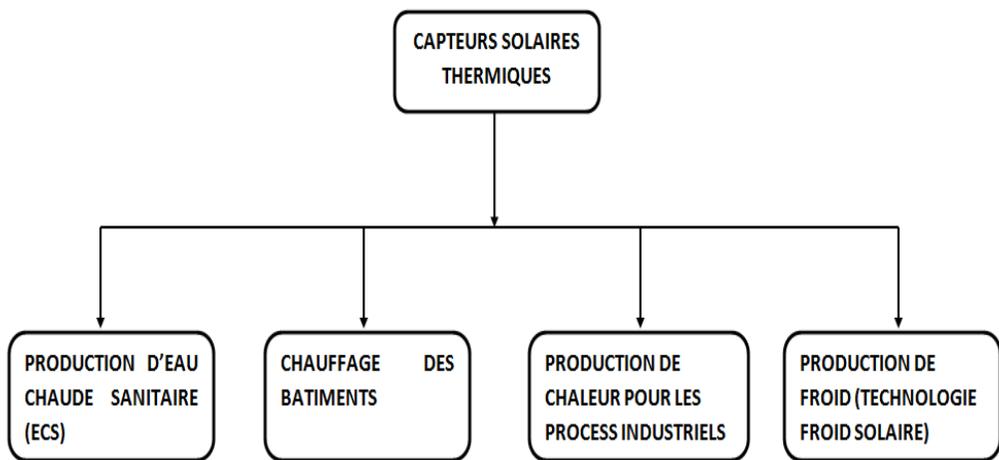


Figure 3 : Différents domaines d'applications des capteurs solaires thermiques.

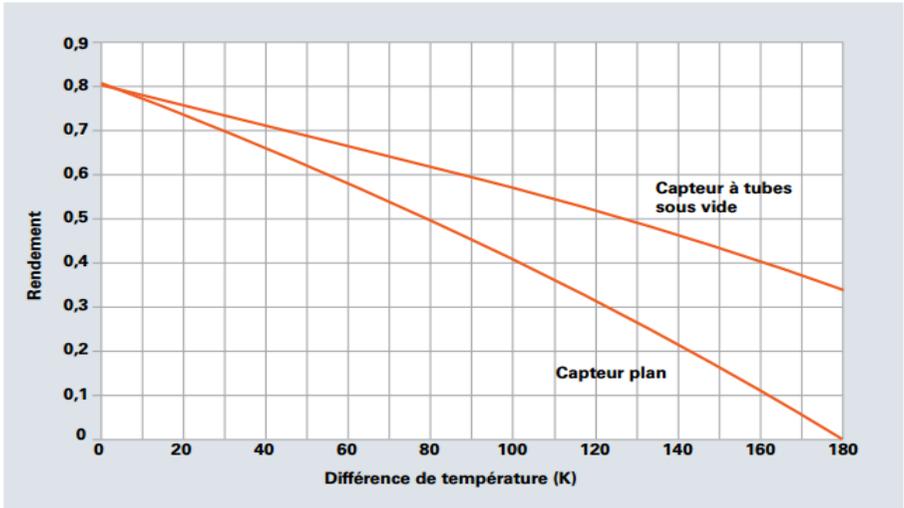


Figure 4 : Comparaison du rendement de différentes technologies de capteurs solaires (plan et à tubes sous vide) en fonction de leur température de fonctionnement (Mauthner, 2012).



Figure 5: Capteur solaire plan.



Figure 6: Capteur solaire à tube sous vide.

Tableau 1: Récapitulatif des avantages et inconvénients de la climatisation solaire (Audrey, 2009, Aniès, 2011, Mugnier et Meunier, 2013, Aubade, 2018).

N°	Avantages	N°	Inconvénients
1	Disponibilité d'un rayonnement solaire élevé pendant la période où le refroidissement est nécessaire; l'applicabilité de l'énergie thermique en tant qu'énergie motrice	1	Coûts d'achat et d'installation encore élevés (en moyenne 3 fois plus cher qu'une climatisation traditionnelle)
2	Faibles coûts d'exploitation (grande réduction de la facture énergétique)	2	Surface conséquente des capteurs solaires thermiques pour garantir l'efficacité du système

3	Faible puissance électrique (beaucoup moins énergivore avec une consommation d'électricité 20 fois moins élevée que celles des systèmes conventionnels)	3	Espace nécessaire pour le stockage de la chaleur et le système de secours supplémentaire nécessaire.
4	Durabilité (espérance de vie de fonctionnement peut atteindre 25 ans)	4	Système ne pouvant pas fonctionner la nuit, sauf avec stockage thermique et appoint
5	Compatibilité environnementale (réduction drastique du taux d'émission des gaz à effet de serre) les fluides frigorigènes utilisés sont complètement inoffensifs pour l'environnement		

CONCLUSION

Cette étude bibliographique a permis de recueillir des données sur la climatisation solaire à absorption, qui est une technique de rafraîchissement non polluant, fiable et nécessitant moins de pièces mobile pour son fonctionnement. La description des différents éléments constitutifs d'une unité de climatisation solaire a été abordée ainsi que leur mode de fonctionnement. La climatisation solaire a un coût d'achat et d'installation très élevé, mais elle reste une des solutions prometteuses pour le ralentissement des changements climatiques. Dans les travaux futurs, il sera intéressant de faire l'étude paramétrique des performances d'une machine à absorption fonctionnant au couple Eau-Bromure de Lithium (Eau-LiBr), afin d'analyser et d'étudier l'influence de différents paramètres sur l'efficacité du système et sur la performance de chaque composant constituant la machine à absorption.

REFERENCES

Adrien D. 2009. Economiser sur les groupes de froid, Information et Conseil Energie Eau Consommation (ICEEC).
 Aebischer B, Jakob M, Henderson G, Catenazzi G. 2007. *Impact of Climate Change on Thermal Comfort, Heating and Cooling Energy Demand in Europe*. Proceedings Summer Study, Saving Energy: France.

Aubade. 2018. climatisation, energies renouvelables, tendances. <https://www.infochauffage.fr/pourquoi-opter-pour-la-climatisation-solaire/> consulté en août 2018.

Audrey. 2009. Gralon: la climatisation solaire, principe et avantages, <https://www.gralon.net/articles/commerce-et-societe/industrie/article-la-climatisation>, consulté en août 2018.

Aniès G. 2011. Modélisation, simulation dynamique, validation expérimentale et optimisation énergétique d'une unité de rafraîchissement solaire par absorption, thèse de doctorat de l'université de Pau et des Pays de l'Adou. la Réunion.

Bjöm Ehrismann. 2012. Collated and updated list of solar cooling installations in participating countries, version 1.3. [En ligne]. Disponible : <http://www.estif.org/solarkeymarknew/images/downloads/QAiST/gaist%20d5.3%20list%20of%20solar%20cooling%20installations.pdf> [visité le 29 novembre 2016].

Bsria. 2012. Presse Release, World air conditioning study. URL: <http://www.bsria.co.uk>.

Castaing-Lasvignottes Jean. 2001. Aspects thermodynamiques et techno-économiques des systèmes à absorption liquide, p 2.

Chedop A, Djongyang N, Tchinda R, Zaatri A, Kana JD. 2016. a field study of

- indicators of the performance of four absorption chillers in the sudano-sahelian region of Cameroon.
- Clodis Denis, Xueqin Pan–Ereie, Eric Devin, Thomas Michineau–Stephanie Barrault. 2013. Alternatives aux HFC a fort GWP dans les applications de réfrigération et de climatisation, rapport final.
- Coulibaly H, Tian M. 2010. Conception et réalisation d'un prototype de climatisation solaire de 5 kW froid au Burkina Faso, Mémoire de fin d'études ; option : Energie, 2iE.
- Colbourne Daniel. 2018. Normes internationales de sécurité – climatisation, réfrigération et pompes à chaleur, <https://www.lemoniteur.fr/article/climatisation-ce-que-les-nouveaux-fluides-changent-aux-regles-d-installation.2011824>. Consulté en novembre 2018.
- COP21: Conférence de Paris de 2015 sur le Climat et les obligations de protection de l'environnement. www.cop21.gouv.fr
- Denis C, Pan XE, Devin E, Michineau Th, Barrault S. 2013. Alternatives aux HFC a fort GWP dans les applications de réfrigération et de climatisation, rapport final.
- Dardour H. 2012. Etude des machines frigorifiques à absorption et à absorption-diffusion utilisant un mélange d'alcanes : étude systémique et modélisation rigoureuse de l'absorbeur.
- Fan Y, Luo L, Souyri B. 2007. Review of solar sorption refrigeration technologies: Development and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*: 1758-1775.
- Florides GA, Kalogirou SA. 2003. Design and construction of a LiBr–water absorption machine. *Energy Conversion and Management*, **44**: 2483–2508.
- Foster R, Ghassemi M, Cota A. 2009. solar energy, renewable energy and the environment.
- Gicquel R. 2006. Fiche-guide de TD sur la modélisation de tours de refroidissement.
- Giordanou. 2009. flat-plate solar collectors for water heating with improved heat transfer for application in climatic, thesis, university of durham.
- Grignon-Masse L. 2010. Développement d'une méthodologie d'analyse coût-bénéfice en vue d'évaluer le potentiel de réduction des impacts environnementaux liés au confort d'été : cas des climatiseurs individuels fixes en France métropolitaine, thèse à l'école des Mines de Paris.
- Grine A, Asma R, Seghir M, Souad H. 2014. Modélisation analytique du transfert thermique dans un capteur solaire plan à air.
- Kim DS, Infante Ferreira CA, A Gibbs. 2006. Energy equation for LiBr aqueous solutions. *International Journal of Refrigeration*, **29**: 36–46.
- Kühn A, Ziegler F. 2005. Operational results of a 10 kW absorption chiller and adaptation of the characteristic equation, In: Proc. First Int. Conference Solar Air Conditioning, Bad-Staffelstein.
- Lazzarin RM. 2014. Solar cooling: PV or thermal? A thermodynamic and economical analysis. *Int. J. Refrigeration*, **39**: 38-47.
- Lyes B, Abdelhamid B, Abdelaziz B, Toufik C. 2012. Simulation numérique d'un cycle à absorption solaire (LiBr/H₂O). 2ème séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables.
- Lee H, Koo K, Jeong S, Kim JS, Leec H, Park R, Baek S. 2000. Thermodynamic design data and performance evaluation of the water + lithium bromide + lithium iodide + lithium nitrate + lithium chloride system for absorption chiller. *Applied Thermal Engineering*, **20**: 707-720.
- Le Pierres N. 2011. Procédé de stockage de chaleur solaire inter saisonnier par absorption LiBr-H₂O, Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement (LOCIE), CNRS UMR5271.
- Marvillet C. 2015. Usage et production de froid, Article : 074.
- Mauthner F, Weiss W. 2012. Solar heat worldwide: Market and contribution of the Energy Supply, P 62.

- Misra RD, Sahoo PK, Gupta A. 2006. Thermoeconomic evaluation and optimization of an aqua-ammonia vapour-absorption refrigeration System. *Int J Refrig.*, **29**: 47–59.
- Morel M. 2016. Etat des lieux de la climatisation /chauffage solaire en Europe. [en ligne]. Disponible: <http://www.tecsol.fr/Rafrsol2/stateofart.htm> [visité le 29 novembre].
- Morel M. 2015. Fiche explicative détaillée n°2 : Machines frigorifiques à sorption.
- Morel M. 2014. Fiche Préconisations pour le pré-dimensionnement des installations collectives, p11.
- Morosuk T, Tsatsaronis G. 2008. A new approach to the exergy analysis of absorption refrigeration machines. *Energy*, **33**:890–907.
- Mugnier D, Meunier F. 2013. La climatisation solaire: Thermique ou photovoltaïque ; Edition: Dunod, 300 pages (extraits : Livre numérique , <https://www.quelleenergie.fr/climatisation-solaire>, consulté en août 2018.
- Muhsin Kilic, Kaynakli O. 2007. Second law-based thermodynamic analysis of water-lithium bromide absorption refrigeration system. *Energy*, **32**: 1505–1512.
- Ortolas J. 2013. *ClimaMaison : Le guide expert du confort thermique*.
- Poggi P. 2018. *Climatisation : ce que les nouveaux fluides changent aux règles d'installation*.
- Puygrenier S. 2009. *Climatisation solaire de bureaux et de commerces : le projet pilote du quartier de l'Arche Jacques Cœur à Montpellier (34)*.
- Sencan A, Yakuta KA, Kalogirou SA. 2005. Exergy analysis of lithium bromide/water absorption systems. *Renewable Energy*, **30**: 645–657.
- Soteris A, Kalogirou. 2004. Solar thermal collectors and applications, progress in energy and combustion. *Science*, **30**: 231–295.
- Solarfocus.2018. <https://www.solarfocus.com/fr/produits/ballon-tampon-et-d-eau-chaude/ballon-tampon-a-stratification>, consulté en août 2018.
- Sözen A. 2001. Effect of heat exchangers on performance of absorption refrigeration systems. *Energy Convers Manage*, **42**(14): 1699–1716.
- Talbi MM, Agnew B. 2000. Exergy analysis: an absorption refrigerator using lithium Bromide and water as the working fluids. *Appl Therm Eng.*, **20**(7): 619–630.
- Touaibi R, Elena EV, Michel F, Abdelhamid K, Miloud TA, Benyoucef K. 2012. Etude paramétrique d'un système de réfrigération par absorption à simple effet utilisant le couple Eau –Bromure de lithium. Efficacité énergétique–sources d'énergies renouvelables –protection de l'environnement COFRET'12, Sozopol, Bulgarie.
- Viesmann. 2016. *climat of innovation : Brochure technique sur le solaire thermique*.
- Vitte T. 2007. *Le froid solaire par dessiccation appliqué au bâtiment : proposition d'une stratégie de régulation du système*. Thèse, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- Wiemken E, Ise F. 2009. *Solaire, Eléments de conception des petites et moyennes installations de climatisation/chauffage solaire*, p29-37.
- Wood L. 2011. *Air conditioning systems: A global Strategic Business Report*, Inc,(GIA).
- Yumrutas, R, Kunduz M, Kanoglu M. 2002. Exergy analysis of vapor compression refrigeration systems. *Exergy, Int. J.*, **2** : 266–272.