

LA REFRIGERATION SOLAIRE A ADSORPTION

Catherine Hildbrand, Olivier Cherbuin, Julien Mayor
Chef de projet : Philippe Dind

HEIG-Vd, Rte de Cheseaux 1, CH-1401 Yverdon-les-Bains
Tel. : ++41 (0)24 557 63 50, E-mail : catherine.hildbrand@heig-vd.ch,
Web : <http://igt.eivd.ch/lesbat>

Cet article présente une application de la technologie de l'adsorption à de petites unités de réfrigérateurs solaires réalisables dans les pays en développement.

RESUME

Le Laboratoire d'Énergétique Solaire et de Physique du Bâtiment¹ (LESBAT) de la Haute Ecole d'Ingénieurs et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD) en Suisse est actif dans le domaine des énergies renouvelables depuis plus de deux décennies. Le développement de réfrigérateurs solaires à adsorption est l'un des axes principaux de recherche appliquée de ces dernières années. Ces systèmes ont été prévus initialement pour la production de froid dans des zones non électrifiées des pays de la zone du Sahel où la réfrigération est recherchée pour la conservation de produits médicaux et alimentaires.

Sur la base de travaux réalisés par différentes équipes de chercheurs dans les années 80, nous avons réalisé en 1999 un prototype de démonstration, puis différents prototypes de laboratoire pour aboutir à un réfrigérateur solaire à adsorption dont la construction est réalisable en petites séries dans les pays en développement.

Nous avons accompagné nos développements par un transfert technologique avec le Centre Ecologique

Albert Schweitzer² au Burkina Faso (CEAS-BF). Cette collaboration a permis de mettre en place une unité de construction opérationnelle et indépendante pour la réalisation, l'entretien et la réparation de réfrigérateurs solaires à Ouagadougou.

Dans cet article, nous présentons le principe de fonctionnement des réfrigérateurs solaires à adsorption, des exemples d'évolutions constructives ainsi que le transfert technologique vers le Burkina Faso.

Le financement de ce développement expérimental a été principalement assuré par la FONDATION GEBERT RÜF (Bâle - Suisse).

ABSTRACT

The "Laboratoire d'Énergétique Solaire et de Physique du Bâtiment" (LESBAT) of the University of Applied Sciences and Management in Yverdon-les-Bains (Switzerland) works in the domain of renewable energies since two decades. The adsorptive solar refrigeration development has been one of the main axes of applied research in the last years. Thermal solar refrigerators have been planned initially to meet cooling needs in non electrified areas of the Sahel countries where an important demand exists for the refrigeration of medicine and for food conservation.

¹ <http://igt.eivd.ch>

² www.ceas-ong.net

On the basis of papers published by different teams of researchers in the eighties, we achieved in 1999 a first machine as conclusion of a feasibility study. Different prototypes have been built then after, with two main objectives: 1) to perform both reliability and simplicity of our adsorptive solar refrigerators 2) to make as easy as possible their manufacturing in developing countries.

At the same time as we were developing our own competence in solar refrigeration field, we initiated a North to South transfer of technology toward the Centre Ecologique Albert Schweitzer in Burkina Faso (CEAS-BF), a daughter of a non governmental organization of the same name in Switzerland.

This collaboration has allowed promoting an operational and independent workshop in Ouagadougou for assembly, maintenance and repair of solar refrigerators, which must begin its activities in the second semester of the year 2005.

In this article, we present the working principle of solar adsorption refrigerators, the evolution of our prototypes and the technological transfer toward Burkina Faso.

Financial support of this work has been mostly provided by the GEBERT RÜF STIFTUNG (Basel - Switzerland)

LA REFRIGERATION SOLAIRE A ADSORPTION : POURQUOI ?

À la suite du choc pétrolier de 1973, le monde occidental a brusquement pris conscience de sa dépendance vis-à-vis du pétrole et des ressources non renouvelables; il en est résulté de nouvelles politiques énergétiques, résolument orientées vers le développement de différentes sources d'énergies renouvelables.

D'autre part, l'essor conjoint des grandes organisations humanitaires et des moyens de communications de la seconde moitié

du 20^{ème} siècle a mis en évidence les conditions de vie précaires des habitants de maints pays en voie de développement et les besoins en technique de réfrigération pour la conservation de vaccins, médicaments et denrées alimentaires.

Ces besoins, dans les régions où le réseau électrique est déficient ou absent, ont été couverts le plus souvent par des réfrigérateurs à absorption (avec brûleur) ou par des réfrigérateurs classiques alimentés par une génératrice. Ces deux solutions utilisent des hydrocarbures comme source d'énergie.

Les problèmes liés à l'émission de gaz à effet de serre et les difficultés d'approvisionnement et transport de pétrole rendent difficilement justifiable une expansion du marché de tels réfrigérateurs.

La production et la mise sur le marché de panneaux photovoltaïques de qualité a permis l'essor de la réfrigération électrosolaire à partir des années 80. A la suite du renforcement de la législation sur l'utilisation des fluides frigorigènes d'une part et des problèmes relatifs à l'entretien des installations (batteries d'accumulation électrique et électronique de régulation) d'autre part, le bien-fondé de l'option "électrosolaire" a été remis en cause dans les pays en développement.

Cherchant une voie palliant à ces défauts, notre laboratoire s'est intéressé au tournant du millénaire aux cycles de réfrigération à adsorption utilisant la conversion directe de l'énergie solaire thermique. A la suite de fructueux contacts avec le Dr Michel Pons du CNRS-LIMSI³ [2 et 3], le LESBAT s'est lancé, durant l'année 1998, dans le développement de réfrigérateurs solaires fonctionnant sur le principe de l'adsorption.

Notons que durant les années 80, plusieurs équipes internationales ont développé et

³ Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur (LIMSI) du CNRS, Université Paris VI, Orsay

expérimenté la technique de réfrigération et de congélation solaire à adsorption [1 à 3]. Ces groupes de travail se sont dissous au début des années 90. Actuellement, d'autres groupes travaillent également dans le domaine de la réfrigération, de la congélation et des analyses numériques de ces systèmes [4 à 13].

En plus de l'intérêt scientifique porté au développement de la réfrigération solaire à adsorption, nous avons cherché à concevoir un système de réfrigérateur solaire dont la fabrication, la mise en service et l'exploitation pourraient se faire dans le pays même. Cette dernière condition a été accentuée par une demande de la Direction du Développement et de la Coopération (DDC) de la Confédération Suisse au Burkina Faso⁴.

Nous nous sommes ainsi approchés du siège international du CEAS⁵, organisation non gouvernementale Suisse bien implantée au Burkina Faso possédant un atelier de fabrication (en particulier de chauffe-eau solaires et séchoirs solaires) et avons mis sur pied un programme de coopération avec ce partenaire.

LA REFRIGERATION SOLAIRE A ADSORPTION : COMMENT ?

L'adsorption est le phénomène qui apparaît lors de l'établissement d'un équilibre entre un gaz et un solide. La concentration des molécules du gaz est toujours plus grande à proximité de la surface du solide que dans la phase gazeuse. Ainsi, dans tout solide, les atomes de surface sont sujets à des forces d'attraction non compensées, perpendiculaires à la surface. L'équilibre de ces forces est partiellement rétabli par l'adsorption des molécules gazeuses.

Il est fréquemment parlé de couple lorsque l'on fait référence à l'adsorption. Le couple

est composé d'un adsorbant (solide) et d'un adsorbat (liquide faisant office de fluide frigorigène).

Les corps utilisés en tant qu'adsorbants sont généralement des corps qui présentent une très grande surface extérieure. Nous pouvons citer les alumines activées, les charbons actifs, les gels de silice et les zéolites. Le choix de l'adsorbant se fera en fonction de la température désirée au niveau de l'évaporateur et de la température à disposition au niveau de la source chaude (capteur solaire). L'autre partie du couple (l'adsorbat) doit répondre à deux conditions essentielles : posséder une grande chaleur latente d'évaporation et être constituée de petites molécules, facilement adsorbables. Les fluides possédants ces caractéristiques sont notamment l'eau, l'ammoniac, le méthanol et le dioxyde de carbone. En plus de ces deux conditions à caractères "physiques", il faut prendre en considération la nature du fluide ainsi que sa dangerosité (inflammabilité, toxicité,..). Nos applications ont utilisés successivement les couples charbon actif-méthanol, silicagel-eau et zéolite-eau. L'utilisation de ces couples impose un niveau de vide moyen (10^{-3} mbar) afin de diminuer au minimum la présence de gaz incondensables pouvant obstruer le passage des vapeurs d'adsorbat.

Le cycle fonctionne par intermittence, car le froid est produit seulement durant la nuit.

Les réfrigérateurs tels que conçus dans nos développements comportent quatre éléments principaux :

⁴ www.ddc-burkina.org/

⁵ www.ceas.ch

- **Le capteur-adsorbeur** : partie contenant l'adsorbant qui est chauffé par le rayonnement solaire, avec pour effet la désorption de l'adsorbat.
- **Le condenseur** : cet élément sert à condenser les vapeurs d'adsorbat désorbées dans le capteur-adsorbeur.
- **L'enceinte frigorifique** : cet élément est la partie utile du réfrigérateur, composée de l'enceinte isolée et de l'évaporateur comprenant l'adsorbat sous forme liquide et solide.
- **La vanne autonome** : Organe permettant de séparer la partie haute pression de la partie basse pression. Cet organe développé au LESBAT est automatique et ne possède aucune électronique (modèle déposé).

La figure 1 présente le prototype industrialisable de réfrigérateur solaire à adsorption développé au LESBAT. Nous pouvons voir sur cette photographie les quatre éléments décrits ci-dessus :

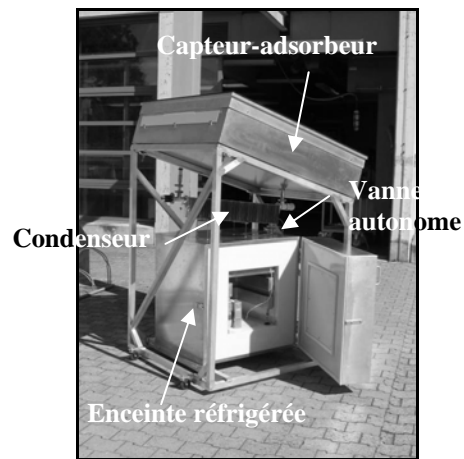


Figure 1 : Vue d'ensemble du réfrigérateur solaire à adsorption développé par le LESBAT (réfrigérateur testé dans un centre de santé en Erythrée dès l'automne 2005)

Le réfrigérateur solaire fonctionne selon un cycle thermique à adsorption. Le cycle peut être découpé en quatre phases distinctes comme expliqué dans le tableau 1. Nous donnons également dans ce tableau le cycle représenté dans le diagramme de Clausius-Clapeyron ($\ln P$ (pression) en fonction de $(-1/T$ (température))) :

Phase	Descriptif	Schéma	Diagramme
Chauffage isostérique ⁶ (8h-10h)	Le rayonnement solaire chauffe le capteur-adsorbant. La pression de vapeur et la température augmentent dans le système.		
Désorption (10h-16h)	Lorsque la pression de saturation correspondant à la température du condenseur est atteinte, les vapeurs se condensent et s'écoulent vers l'évaporateur.		
Refroidissement isostérique (16h-19h)	Lorsque l'ensoleillement diminue, le capteur se refroidit et la pression diminue dans le système pour atteindre la pression de l'évaporateur. Le refroidissement est favorisé par l'ouverture d'un volet d'aération en face arrière du capteur-adsorbant.		
Adsorption – production de froid (19h-8h)	En continuant son refroidissement, l'adsorbant se trouve physiquement en déséquilibre et va se "recharger" en adsorbant la vapeur contenue dans le système. Cette vapeur est produite par évaporation du liquide se trouvant dans l'évaporateur, en produisant l'effet frigorifique désiré. Lorsque la température dans l'évaporateur atteint le point de congélation, il y a formation d'un stock de glace qui permet à l'enceinte de rester à basse température pendant la journée suivante, éventuellement plusieurs jours (2-3) en cas de conditions météorologiques défavorables.		

Tableau 1 : Principe de fonctionnement d'un réfrigérateur solaire à adsorption (avec de l'eau comme adsorbat) + représentation du cycle dans diagramme de Clausius-Clapeyron ($\ln P$ (pression) en fonction de $-1/T$ (température))

⁶ isostérique : concentration constante d'adsorbat dans l'adsorbant

ÉVOLUTIONS CONSTRUCTIVES DU CAPTEUR-ADSORBEUR

Le circuit d'un système de réfrigération solaire à adsorption se trouve en dépression par rapport à l'atmosphère. La qualité du circuit (soudures) doit être irréprochable pour éviter toute infiltration d'air. Pour limiter le risque de fuites, nous avons recherché à minimiser le nombre et la longueur des soudures, ceci en particulier pour le capteur-adsorbeur.

Nous montrons dans la figure 2 une vue d'un des premiers capteurs-adsorbeurs solaires fabriqués dans notre laboratoire.



Figure 2 : Vue du capteur-adsorbeur à tubes

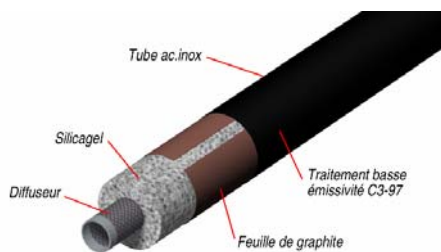


Figure 3 : Détail de construction d'un tube

La figure 3 illustre la construction d'un tube dont la fabrication nécessite un grand nombre de soudures. Les nombreux composants de cet élément ne permettent pas une construction simple et industrialisable et ne garantissent pas une étanchéité parfaite sur le long terme. C'est pourquoi nous avons développé un capteur plan permettant de pallier à ces difficultés. Nous en présentons une vue éclatée à la figure 4.

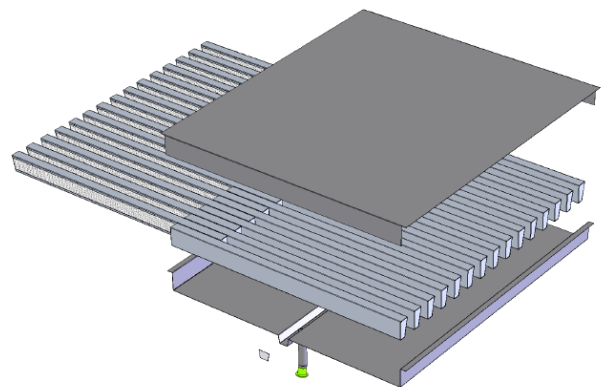


Figure 4 : Vue éclatée du capteur-adsorbeur plan

Cette configuration se compose de 30 éléments longitudinaux en aluminium contenant la zéolite (pour 1 m² de capteur). Ils assurent plusieurs fonctions, celle de transférer la chaleur de la tôle supérieure vers l'adsorbant, de permettre le passage de la vapeur vers le reste du système et de renforcer mécaniquement le boîtier soumis au vide afin d'éviter son écrasement. Les soudures étanches se résument à l'assemblage de la tôle supérieure (traitée avec un revêtement sélectif) avec la tôle inférieure. Les épaisseurs de tôle sont de l'ordre du millimètre. Il s'est avéré que ces soudures étaient de loin plus faciles à réaliser que les soudures en bout de tubes. Cette nouvelle configuration donne des performances quasi identiques à la version précédente tout en diminuant les problèmes de construction.

CALCUL DE PERFORMANCES DU SYSTEME

Comme pour les systèmes basés sur un cycle à compression, la performance de notre installation s'évalue à l'aide d'un nombre adimensionnel appelé COP_s (COP solaire). Celui-ci est défini comme étant le rapport entre la quantité de froid produit et le rayonnement solaire capté par le capteur, durant une période donnée :

$$COP_s = \frac{Q_{\text{évap}}}{H \cdot S} = \frac{V \cdot \rho \cdot L_m - V \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_c - T_e)}{H \cdot S} \quad [-] \quad (1)$$

$Q_{\text{évap}}$: Énergie soutirée à l'évaporateur [J]
c_p	: Chaleur massique de l'adsorbat [J/kg K]
V	: Volume d'adsorbat condensé [m ³]
ρ	: Masse volumique de l'adsorbat [kg/m ³]
T_c	: Température du condenseur [°C]
T_e	: Température de l'évaporateur [°C]
L_m	: Chaleur latente d'évaporation de l'adsorbat [J/kg]
H	: Irradiation dans le plan du capteur [J/m ²]
S	: Surface du capteur [m ²]

Il est difficile de donner une valeur définie de COP_s pour une machine de réfrigération à adsorption. En effet, le COP_s évolue grandement en fonction de la température extérieure et de l'irradiation. L'article cité en [14] explique en détail ces différentes influences. Le COP_s moyen journalier de nos systèmes se situe entre 0.10 et 0.18. Un réfrigérateur classique alimenté par une installation photovoltaïque possède un COP global du même ordre de grandeur. Nos réfrigérateurs sont donc tout à fait compétitifs en termes de performance énergétique.

TRANSFERT DE TECHNOLOGIE

Dès le début de nos travaux, nous avons étroitement collaboré avec le CEAS-BF pour permettre à cette ONG de s'approprier la technique de réfrigération solaire à adsorption grâce à son atelier bien équipé sis à Ouagadougou. Notre but n'était en effet pas d'exporter vers les pays du Sahel des réfrigérateurs, mais bien de faire acquérir aux artisans soudeurs le savoir-faire pour produire, mettre en service et faire le suivi de tels systèmes. Ce transfert s'est fait en plusieurs étapes :

- Un premier prototype fonctionnant au charbon actif / méthanol fut développé dans notre laboratoire puis assemblé à Ouagadougou sous la responsabilité d'un de nos ingénieurs. Ce prototype a

permis à l'équipe de l'atelier d'Ouagadougou de se familiariser avec la réfrigération solaire à adsorption.

- Dès le début des années 2000 et ceci durant 2 ans, une appropriation de la technique s'est faite progressivement. Celle-ci s'est traduite par différents stages d'un soudeur et d'un ingénieur du CEAS-BF dans différentes entreprises et établissements suisses. Dans le but d'assurer la maîtrise des techniques de soudure par nos partenaires africains, différents échantillons de pièces (tubes fermés par des flasques, évaporateur,...) ont été fabriqués au CEAS-BF en guise d'exercices puis envoyés dans notre laboratoire afin que l'on puisse vérifier la qualité des soudures au moyen d'un détecteur à hélium.
- Durant l'été 2002, un prototype fabriqué au LESBAT a été envoyé au CEAS-BF pour tester ses performances. Durant la même période, l'équipe de Ouagadougou a construit un prototype équivalent avec le soutien d'un ingénieur du LESBAT. Nous montrons dans la figure 5 ce prototype "made in Burkina Faso".



Figure 5 : Prototype "made in Burkina", système avec capteur-adsorbent à tubes, silicagel-eau, 1 m² de capteur solaire et 80 litres de volume réfrigéré

- Durant l'année 2003, l'équipe du CEAS-BF a construit un nouveau réfrigérateur, dont le capteur-adsorbant a été séparé de l'enceinte frigorifique pour être placé sur la toiture.

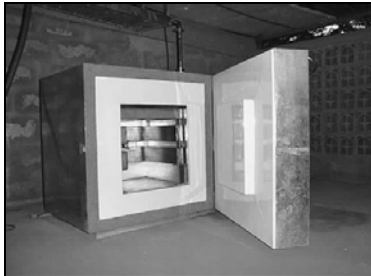


Figure 6 : Prototype construit par le CEAS-BF. Le capteur-adsorbant solaire (1m²) se trouve sur la toiture et l'enceinte frigorifique (80 litres) est à l'intérieur du bâtiment

- La dernière étape de développement du CEAS-BF a été la mise sur pied d'un atelier entièrement consacré au travail de l'acier inoxydable dont l'une des vocations est la fabrication de réfrigérateurs solaires à adsorption. Cet atelier est fonctionnel depuis cette année.
- Actuellement, l'équipe du CEAS construit deux prototypes basés sur nos derniers développements (capteur plan, zéolite – eau). Ils seront installés dans des centres de santé et testés en conditions réelles.

En l'état, le transfert de technologie mis en oeuvre entre le LESBAT et le CEAS-BF peut-être considéré comme achevé.

ASPECTS ECONOMIQUES

Concernant le coût de fabrication d'un réfrigérateur solaire à adsorption construit selon la description faite dans cet article, il est très difficile d'articuler des chiffres. Le coût d'un prototype développé en Suisse ou en France n'a rien à voir avec le prix de revient d'un réfrigérateur construit à quelques dizaines d'exemplaires par année au Burkina Faso avec la main d'œuvre qualifiée du pays (but visé dans un premier temps). Ce prix chuterait d'autant plus en cas de fabrication en série à des milliers d'exemplaires par an dans une chaîne automatisée ici ou en Afrique.

Une étude de marché réalisée en 2002 au Burkina Faso par le CEAS-BF a montré que plus d'une centaine de réfrigérateurs solaires à adsorption de 300 litres pourraient être écoulés par année et ceci durant trois ans auprès d'ONG, d'hôpitaux, d'hôtels et de coopératives agricoles burkinabés à condition que le prix de vente ne dépasse pas 750'000 F CFA (environ 1'250 €).

Le défi est donc double: répondre à la demande du marché après un début de fabrication à un rythme artisanal et pouvoir produire sans dépasser le prix de vente évoqué ci-dessus. Les conditions actuelles du marché et le prix de la main d'œuvre burkinabé nous font penser que le CEAS-BF est à même de relever ce défi. Dans le cas contraire, un subventionnement initial d'organismes de financement international ou de fonds de coopération devrait aider à réaliser cet objectif après quelques années.

CONCLUSION

Les expériences menées dans le domaine de la réfrigération solaire à adsorption au sein du LESBAT ont permis d'appréhender l'ensemble des difficultés inhérentes à cette technique. Afin que celle-ci puisse se propager sans subir des échecs pouvant la discréditer, il est indispensable d'accompagner la transmission de connaissances vers les pays en développement par la création ou le renforcement des compétences effectives sur place, comme nous nous sommes efforcés de la faire dans le cadre de notre collaboration avec le CEAS-BF.

Les évolutions constructives de nos systèmes de réfrigérateurs solaires ont visé une simplification constructive tout en

conservant les performances. Cet objectif est atteint.

La suite du projet a pour but le développement de petites chambres froides. Il s'agira de définir la taille optimale de la chambre en tenant compte des limites technologiques fixées par notre système.

La réfrigération solaire à adsorption fait partie de l'éventail des solutions aux problèmes environnementaux qu'engendrent nos excès de consommation d'énergies fossiles. De plus, elle devrait permettre d'améliorer la qualité de vie d'un grand nombre de personnes, des pays du Sahel en particulier, en leur donnant accès à la conservation de médicaments, de vaccins et de denrées alimentaires.

REFERENCES

- [1] Grenier et al., Solar powered solid adsorption cold store, 1988, A.S.M.E. Trans.-J. Solar Energy Eng. 110, 192-197
- [2] Pons et al., Experimental data on a solar-powered ice maker using activated carbon and methanol adsorption pair, 1987, J. Solar Energy Eng., ASME Trans. 109, 303-310
- [3] Pons et al., Design of an experimental solar-powered, solid-adsorption ice maker, 1986, J. Solar Energy Eng., ASME Trans., 108, 332-337
- [4] Leite et al., Dimensioning, thermal analysis and experimental heat loss coefficients of an adsorptive solar icemaker, Renewable Energy, Volume 29, Issue 10, August 2004, Pages 1643-1663
- [5] Anyanwu et Ogueke, Thermodynamic design procedure for solid adsorption solar refrigerator, Renewable Energy, Volume 30, Issue 1, January 2005, Pages 81-96
- [6] Anyanwu et Ezekwe, Design, construction and test run of a solid adsorption solar refrigerator using activated carbon/methanol adsorbent/adsorbate pair. Energy Convers Manage 44, 2003, Pages 2879-2892.
- [7] Boubakri, A new conception of an adsorptive solar-powered ice maker, Renewable Energy, Volume 28, Issue 5, April 2003, Pages 831-842
- [8] Boubakri et al., Experimental study of adsorptive solar-powered ice makers in Agadir (Morocco)—1. Performance in actual site, Renewable Energy, Volume 2, Issue 1, February 1992, Pages 7-13
- [9] Boubakri et al., Experimental study of adsorptive solar-powered ice makers in Agadir (Morocco)—2. Influences of meteorological parameters, Renewable Energy, Volume 2, Issue 1, February 1992, Pages 15-21

- [10] Wang and al., An energy efficient hybrid system of solar powered water heater and adsorption ice maker, *Solar Energy*, Volume 68, Issue 2, February 2000, Pages 189-195
- [11] Critoph and al., Solar sorption refrigerator, *Renewable Energy*, Volume 12, Issue 4, December 1997, Pages 409-417
- [12] Critoph, An ammonia carbon solar refrigerator for vaccine cooling, *Renewable Energy*, Volume 5, Issues 1-4, August 1994, Pages 502-508
- [13] Mhiri et al., Etude d'un réfrigérateur solaire à adsorption solide avec le couple charbon actif-méthanol, *Revue Générale de Thermique*, Volume 35, Issue 412, April 1996, Pages 269-277
- [14] Hildbrand Catherine et al, A new solar powered adsorption refrigerator with high performance, *Solar Energy*, Volume 77, Issue 3, September 2004, Pages 311-318