

LA RÉFRIGÉRATION SOLAIRE A ADSORPTION

Philippe Dind, Olivier Cherbuin, Catherine Hildbrand, Julien Mayor

Ecole d'Ingénieurs du Canton de Vaud, Rte de Cheseaux 1, CH-1400 Yverdon-les-Bains
Tel. : +41 (0)24 423 23 83, E-mail : catherine.hildbrand@eivd.ch, Web : <http://igt.eivd.ch>

POURQUOI DÉVELOPPER LA REFRIGÉRATION SOLAIRE À ADSORPTION ?

Après le choc pétrolier de 1973, beaucoup d'États ont pris conscience de l'importance qu'il y avait à développer les énergies renouvelables et en particulier l'énergie solaire. Durant la même période, les grandes organisations humanitaires ont dévoilé aux pays occidentaux les conditions de vie des habitants des pays en voie de développement. Cette association de facteurs a entraîné l'évolution de systèmes de réfrigération fonctionnant grâce à l'énergie solaire. Ces systèmes sont particulièrement adaptés aux régions où l'ensoleillement est élevé et où il n'y a pas de possibilité d'être raccordé à un réseau électrique.

Depuis les années 80, les installations utilisant la conversion électrosolaire ont l'ascendant sur celles exploitant la conversion solaire thermique. Toutefois, depuis quelques années, la conversion solaire thermique connaît un fort regain d'intérêt. Ceci est essentiellement dû à trois facteurs :

- Le rendement des panneaux photovoltaïques commercialisés n'augmente que faiblement depuis de nombreuses années ($\eta = 10$ à 15 %).
- Le champ des applications des systèmes solaires thermiques s'élargit.
- Les problèmes environnementaux liés à l'utilisation de fluides frigorigènes (CFC et HCFC) contenus dans les circuits des systèmes frigorifiques à compression. Ces fluides frigorigènes sont interdits à cause de leurs effets néfastes sur la couche d'ozone.

Le LESBAT s'est lancé, durant l'année 1997, dans le développement de systèmes de réfrigération solaire fonctionnant sur le principe de l'adsorption. Ces systèmes autonomes de réfrigération solaire cherchent à pallier l'absence de réseau électrique dans maintes régions du monde et l'impossibilité de conservation à basse température. Au cours de nos travaux, il s'est avéré qu'en plus du besoin de froid dans le domaine médical, une forte demande en froid existe également pour la conservation des semences, plantons, fruits et légumes.

Nous voyons bien l'importance de l'essor des systèmes de réfrigération et de congélation solaire pour les pays en voie de développement. Pour les habitants de ces pays, l'accès à de telles installations peut participer à l'amélioration des conditions sanitaires et économiques des populations.

DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT DES RÉFRIGÉRATEURS SOLAIRES À ADSORPTION

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

- **Le capteur-adsorbeur** : partie contenant l'adsorbant (charbon actif, silicagel ou zéolite) qui est chauffé par le rayonnement solaire, avec pour effet la désorption de l'eau, du méthanol ou de l'ammoniac constituant l'adsorbat (appelé aussi collecteur solaire).
- **Le condenseur** : cet élément sert à condenser les vapeurs d'adsorbat désorbées dans le capto-adsorbeur.
- **L'enceinte frigorifique** : cet élément est la partie utile du réfrigérateur, il se compose de l'enceinte isolée réfrigérée et de l'évaporateur comprenant le fluide (eau, méthanol ou ammoniac) sous forme liquide et/ou solide.

Le réfrigérateur solaire fonctionne selon un cycle thermique à adsorption. Le cycle peut être découpé en quatre phases distinctes:

1. Chauffage isostérique*

3. Refroidissement isostérique

2. Désorption

4. Adsorption

Nous décrivons dans les figures suivantes le principe pour un système fonctionnant avec le couple silicagel / eau.

1. Chauffage isostérique (8h à 10h)

Le rayonnement solaire chauffe le collecteur-adsorbant qui contient l'adsorbant. La pression augmente dans le système.

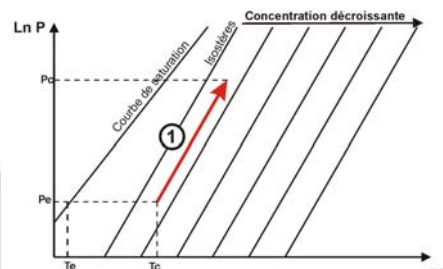
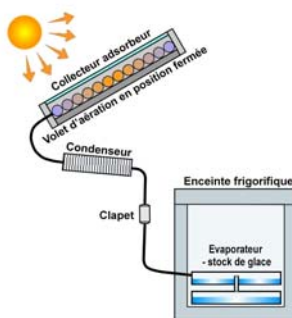


Figure 1 : Phase 1 – Chauffage isostérique

2. Désorption (10h à 16h)

Lorsque le capteur a atteint la pression de saturation correspondant à la température du condenseur, la vapeur de l'adsorbant se condense et s'écoule dans l'évaporateur.

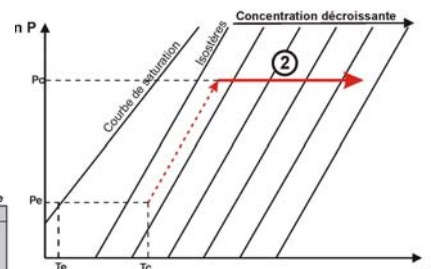
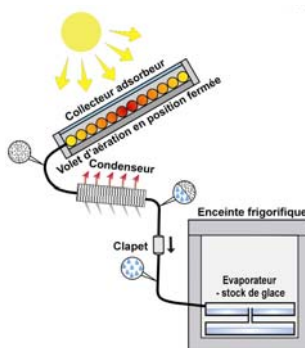


Figure 2 : Phase 2 – Désorption

3. Refroidissement isostérique (16h à 19h)

En fin d'après-midi, avec la diminution de l'ensoleillement, le capteur se refroidit et la pression diminue dans le système. Le refroidissement est éventuellement favorisé par l'ouverture d'un volet d'aération en face arrière du collecteur-adsorbant.

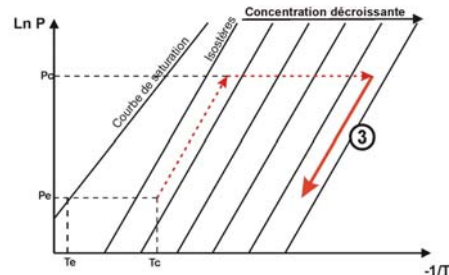
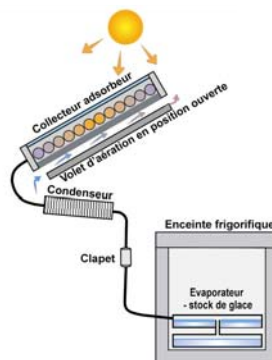


Figure 3 : Phase 3 – Refroidissement isostérique

4. Adsorption (19h à 8h)

C'est la phase pendant laquelle le froid est produit. La température et la pression ayant diminué, l'adsorbant se trouve physiquement en déséquilibre et va se "recharger" en adsorbant l'eau contenue dans l'évaporateur. Cette vapeur est produite par évaporation du liquide contenu dans l'enceinte frigorifique, évaporation qui produit du froid par soutirage de chaleur au liquide (chaleur

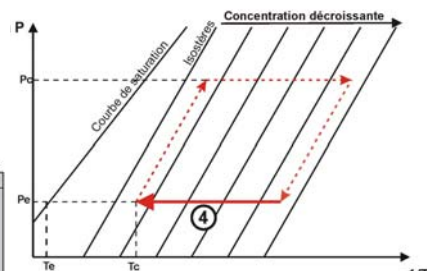
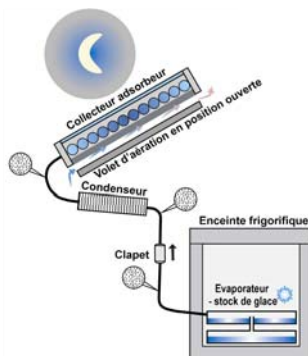


Figure 4 : Phase 4 – Adsorption

* isostérique : concentration constante d'adsorbant dans l'adsorbant

latente d'évaporation). Lorsque le niveau de température atteint le point de congélation, il se solidifie et forme un stock "de froid" 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.

PROTOTYPES DEVELOPPÉS À L'EIVD

Année	Couple	Surface capteur	Type de capteur	Volume de réfrigération	Lieu de tests
1999	Charbon actif / méthanol	2 m ²	Tubes	320 litres	Yverdon-les-Bains (Suisse)
1999	Charbon actif / méthanol	2 m ²	Tubes	350 litres	Ouagadougou (Burkina Faso)
2000	Silicagel / eau	2 m ²	Tubes	320 litres	Yverdon-les-Bains
2001	Silicagel / eau	1 m ²	Tubes puis plan	100 litres	Ouagadougou et Yverdon-les-Bains
2003	Silicagel / eau Zéolite / eau	2 x 0.25 m ²	Plan	2 x 30 litres	Rabat (Maroc)
2005	Zéolite / eau	1 m ²	Plan	100 litres	Yverdon-les-Bains et Érythrée

Figure 5 : Tableau récapitulatif des différents prototypes construits et planifiés à l'EIVD



Figure 6 : Prototypes développés à l'EIVD; prototypes 2000 à gauche et 2001 à droite

Les évolutions qu'ont subies les différents prototypes sont de plusieurs types :

- **Couple adsorbant/adsorbat** : le couple charbon actif / méthanol a été abandonné au profit du couple silicagel / eau pour des raisons de sécurité (inflammabilité et toxicité). Le silicagel s'avère être un adsorbant qui fonctionne bien. Cependant, l'évolution de nos recherches tend à nous faire penser que celui-ci subit des transformations irrémédiables lorsqu'il est chauffé à une température supérieure à 120°C. C'est essentiellement pour cette raison que nous projetons de tester le couple zéolite / eau dans le prototype 2005.
- **Capteur à tubes / capteur plan** : La complexité constructive du capteur à tubes nous a fait opter pour une construction plane (cf § suivant) malgré les bonnes performances atteintes par les systèmes à tubes.

ÉVOLUTIONS CONSTRUCTIVES DU CAPTEUR SOLAIRE

Le circuit des systèmes de réfrigération solaire à adsorption est sous vide. De ce fait, la qualité des soudures doit être irréprochable afin d'éviter toute infiltration d'air dans le circuit. Cette contrainte nous a obligé à minimiser le nombre de soudures du capteur solaire.

Nous montrons dans la Figure 7 une vue éclatée des premiers capteurs solaires fabriqués à l'EIVD avec un détail des tubes.

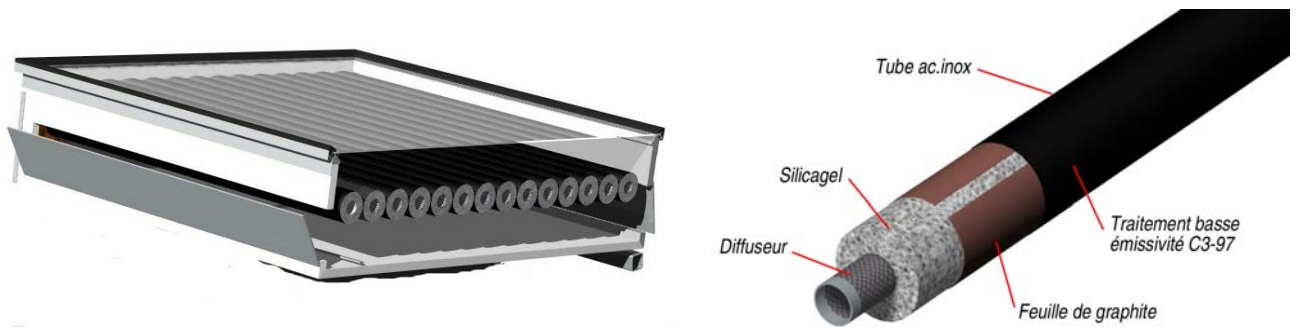


Figure 7 : Vue du capteur à tubes et détail de construction d'un tube

La figure ci-dessus illustre la construction du capteur à tubes nécessitant un grand nombre de soudures. C'est pourquoi nous avons développé un capteur plan permettant d'en diminuer le nombre. Nous en voyons une vue éclatée à la Figure 8.

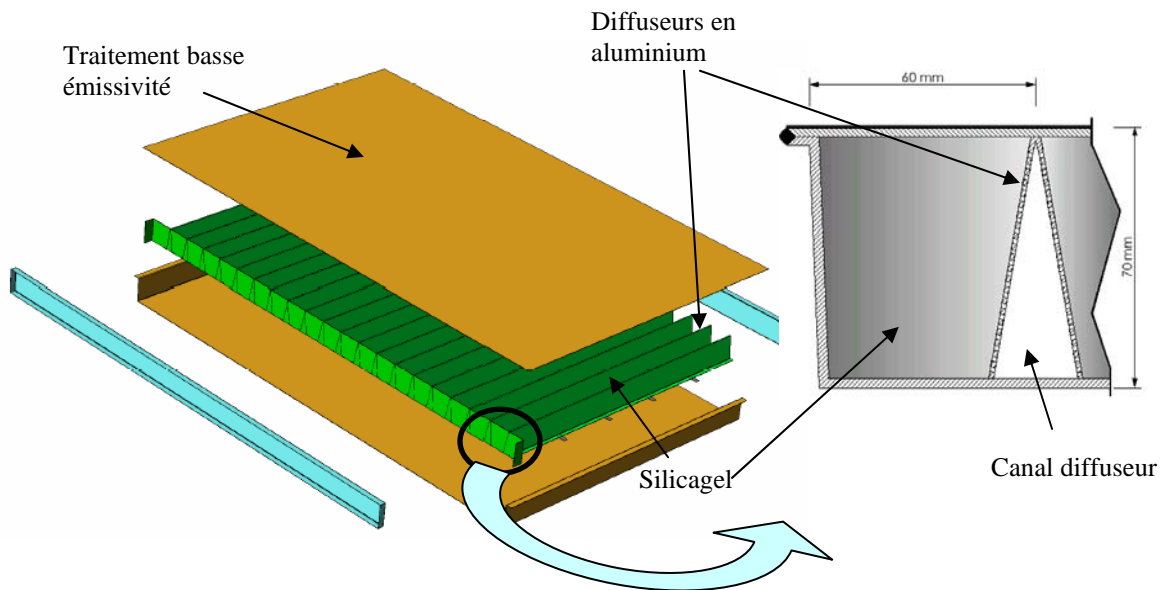


Figure 8 : Vue éclatée du capteur plan et détail d'un canal diffuseur

Cette nouvelle configuration donne des performances quasi identiques à la version précédente tout en diminuant les problèmes de construction. Actuellement, nous sommes en train d'améliorer le transfert de chaleur dans le lit d'adsorbant afin d'en augmenter les performances.

COEFFICIENT DE PERFORMANCE

Le coefficient global journalier de performance des systèmes à adsorption se calcule au moyen de la formule suivante :

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

$Q_{\text{évap}}$: Énergie journalière soutirée à l'évaporateur	[J]
c_p	: Chaleur massique de l'adsorbant	[J/kg K]
V	: Volume d'adsorbant condensé en 1 jour	[m ³]
ρ	: Masse volumique de l'adsorbant	[kg/m ³]
T_c	: Température du condenseur	[°C]
T_e	: Température de l'évaporateur	[°C]
L_m	: Chaleur latente d'évaporation de l'adsorbant	[J/kg]
H	: Irradiation journalière dans le plan du capteur	[J/m ²]
S	: Surface du capteur	[m ²]

Il est très difficile de donner un COP_s défini pour chaque système. En effet, le COP_s évolue grandement en fonction de la température extérieure journalière moyenne et de l'irradiation. L'article

cité en [1] explique en détail ces différentes influences. Le COP_s moyen de nos systèmes se situe entre 0.10 et 0.18.

D'une manière générale, nos systèmes sont capables de refroidir une charge équivalente en eau de 20 kg de 20 K par mètre carré de capteur (ce qui correspond à une énergie d'environ 1.8 MJ/m².j) durant un beau jour ensoleillé (irradiation de 26 MJ/m²). En plus de ce refroidissement, l'énergie captée est utilisée pour créer un stock de glace qui permet de garantir le niveau de température dans le réfrigérateur durant les jours de faible irradiation.

TRANSFERT DE TECHNOLOGIE

Dès le début du projet, nous avons étroitement collaboré avec le Centre Écologique Albert Schweitzer (CEAS) afin de permettre à leur atelier de Ouagadougou de s'appropriier la technique de réfrigération solaire à adsorption. Notre but n'était pas d'envoyer dans les pays du Sahel des réfrigérateurs finis mais bien de faire acquérir dans ces pays le savoir-faire pour produire de tels systèmes.

A ce jour, nous pouvons dire que le but est atteint. La Figure 9 montre le dernier réfrigérateur solaire à adsorption construit par l'équipe du CEAS de Ouagadougou, fonctionnant à satisfaction.



Figure 9 : Prototype construit par le CEAS – Ouagadougou – Le capteur solaire se trouve sur le toit de l'atelier alors que l'enceinte frigorifique est à l'intérieur

CONCLUSION

Les expériences faites à ce jour confirment qu'il est possible de fabriquer et d'exploiter des petites unités de réfrigérateurs solaires à adsorption dans des pays tels que le Burkina Faso. Cependant, la construction (en particulier les soudures) doit être de qualité supérieure. La suite du projet vise le domaine des chambres froides. Il s'agira de définir dans quelle mesure la technique à adsorption développée au LESBAT pourra être appliquée à un grand volume ou si une solution découplant le capteur solaire de l'adsorbeur devrait être envisagée.

Depuis l'automne 2003, une nouvelle collaboration s'est créée entre le LESBAT et le laboratoire d'Énergie Solaire de l'Université Mohammed V de Rabat (Maroc). Ce laboratoire travaille depuis quelques années dans le domaine de la réfrigération solaire à adsorption. Notre collaboration s'inscrit dans un projet de développement de la filière agronomique du haricot vert (projet helvético-marocain CORAMS). Le but est de développer et de construire une chambre frigorifique d'environ 10 m³ fonctionnant grâce au principe de l'adsorption. En effet, il existe au Maroc une forte demande de petits producteurs de légumes pour la conservation de leur récolte durant quelques jours. Nous espérons pouvoir mettre à contribution des entreprises marocaines lors de la construction de cette chambre frigorifique.

RÉFÉRENCE

[1] Hildbrand Catherine et al, *A new solar powered adsorption refrigerator with high performance*, Solar Energy, Volume 77, Issue 3, September 2004, Pages 311-318