

Rapport annuel 2001, 15 décembre 2001

Construction et test d'un réfrigérateur solaire à adsorption transportable

Auteur et coauteurs	Julien Mayor, Catherine Hildbrand, Philippe Dind
Institution mandatée	HES-SO / EIVD
Adresse	rte de Cheseaux 1, CH-1400 Yverdon-les-Bains
Téléphone, e-mail, site Internet	024/423 23 83, philippe.dind@eivd.ch, http://www.eivd.ch/igt/lesbat
N° projet / n° contrat OFEN	39789 / 81689
Durée prévue du projet (de - à)	De février 2001 à novembre 2001

RÉSUMÉ

Ce mandat a permis de développer au sein de la HES-SO/Ecole d'Ingénieurs du Canton de Vaud un prototype de réfrigérateur solaire autonome à adsorption utilisant le couple silicagel-eau. Ce système se caractérise par sa compacité et la possibilité de le transporté. D'un volume utile de réfrigération de 100 litres environ, la surface de capteur-adsorbeur est de 1 m². La masse totale du système atteint environ 150 kg.

La machine a été construite avec des matériaux permettant de minimiser la masse du système. L'utilisation de panneaux isolants sous-vide (PIV) pour la fabrication du bahut de réfrigération a permis de réduire considérablement les pertes thermiques tout en conservant un volume de réfrigération exploitable. Un système de clapet anti-retour fut développé afin de supprimer toute manipulation humaine lors du fonctionnement.

Ce système de réfrigération a été dimensionné pour pouvoir refroidir une charge équivalente en eau de 2.5 kg de 30 K quotidiennement et ceci dans un climat chaud de type sahélien. L'énergie stockée sous forme de glace dans l'évaporateur permet de couvrir 3 jours de mauvais temps.

La construction du réfrigérateur solaire s'est faite en collaboration avec des PME et ateliers régionaux.

Ce système sera testé durant la saison chaude 2002.

Buts du projet

Ce projet s'inscrit dans la continuité des développements réalisés depuis trois ans au sein du Laboratoire d'énergétique solaire et de physique du bâtiment (LESBAT) de l'Ecole d'Ingénieurs du Canton de Vaud (HES-SO/EIVD) visant à maîtriser la filière de réfrigération solaire à adsorption. Cette filière a comme objectif d'offrir une alternative "énergétiquement propre" aux systèmes de réfrigérateurs existants (groupes électrogènes, gaz), dans les zones dépourvues de réseau électrique. De plus, l'utilisation du couple silicagel / eau rend ces systèmes à adsorption sans aucun danger pour les utilisateurs.

A la suite des essais concluants obtenus en Suisse et au Burkina-Faso par nos prototypes de réfrigérateurs solaires à adsorption d'environ 400 litres, la construction d'un système identique mais plus petit nous est apparue indispensable. Ce mandat répond aux objectifs suivants :

- Création d'une machine formant un ensemble "compact", transportable dans une fourgonnette
- Système totalement autonome (la seule énergie utilisée étant l'énergie solaire)
- Transfert technologique Nord-Sud de la technique du froid solaire à adsorption (appropriation par des ONG travaillant pour le développement durable dans les pays en voie de développement).

Travaux effectués et résultats acquis

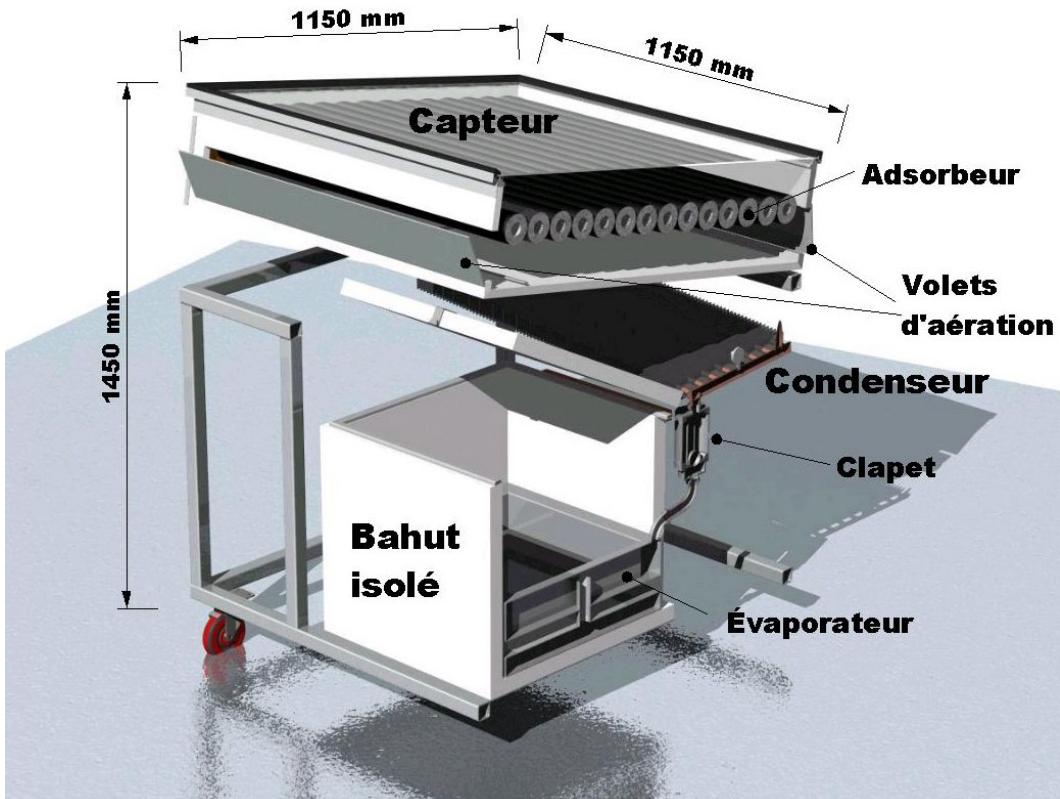


Fig. 1 : Vue en coupe du réfrigérateur solaire à adsorption et de ses principaux composants

Etude et dimensionnement

La première partie du projet a consisté à dimensionner la machine pour le climat sahélien. Pour répondre aux exigences demandées par les programmes de vaccination, nous avons considéré des conditions de températures extrêmes de 43°C durant la journée et 35°C pour la nuit avec une irradiation quotidienne moyenne de 5 kWh/m² j. Ces exigences ont été tirées des *Normes de performance pour le matériel utilisé dans le cadre du Programme élargi de Vaccination* [1] publié par l'Organisation Mondiale de la Santé.

Le dimensionnement a permis de mettre en évidence les limites de la miniaturisation de tels systèmes de réfrigération solaire. La masse propre de l'adsorbant (silicagel) ainsi que celle de l'évaporateur auto-stockeur imposent une limite dans la réduction de la taille : en-dessous de cette limite, le volume utile devient insignifiant vis-à-vis de la masse totale du réfrigérateur.

Le dimensionnement a abouti à une surface de captage solaire de 1m² et un volume utile de réfrigération d'environ 100 litres. Ce relativement grand volume a pu être obtenu grâce à l'utilisation de panneaux isolants sous-vide (PIV) faisant partie du programme de recherche de l'OFEN [2]. Ces isolants ont des coefficients de conduction thermique λ (W/m*K) théoriques 5 fois inférieurs aux isolants traditionnels. Cette option a permis de diminuer la surface de l'enveloppe tout en augmentant le volume utile de réfrigération. A masse total, masse de glace stockée et surface de capteur égales, la surface d'échange de l'enveloppe s'est réduite de 3,5 à 2,3 m² et le volume utile est passé de 35 à 100 litres.

Type d'isolant	Surface du capteur	Volume utile	Stock de glace	Dimensions externes du bahut	Masse totale
PIV, 40 mm	1 m ²	100 l	15 kg	649x649x579 mm	~160 kg
PS, 200 mm	1 m ²	35 l	15 kg	864x864x665 mm	~160 kg

Fig. 2: Comparaison de dimensionnement entre PIV et isolant traditionnel

En ce qui concerne le capteur-adsorbeur différentes configurations de géométrie et de matériaux ont été testées avec le programme de simulation élaboré avec le LIMSI-CNRS. L'expérience acquise pendant les 3 ans de développement du froid solaire à adsorption dans notre laboratoire ainsi que la collaboration avec la PME valaisanne *Energie Solaire SA* à Sierre ont permis l'aboutissement de l'adsorbeur solaire. Celui-ci est composé de 14 tubes de 1 mètre de long en acier inoxydable d'une épaisseur de 0,5 mm. Ces tubes sont revêtus de la surface sélective à basse émissivité C3-97 d'*Energie Solaire SA*.

Afin de rendre ce réfrigérateur transportable, la réduction de sa masse a été une priorité. L'utilisation de l'aluminium et de matériaux composites a été indispensable :

- Le bahut réfrigéré est réalisé en résine époxy et fibre de verre.
- L'évaporateur auto-stockeur est entièrement en aluminium soudé.
- Un condenseur industriel aluminium-cuivre a été adapté aux besoins de la machine.
- Le clapet anti-retour double-effet est un assemblage de pièces de décolletage en aluminium.
- Le châssis de la machine est composé de tubes carrés en aluminium soudés.

La mise au point et le test d'un clapet anti-retour double effet a permis d'automatiser l'intervention humaine sur la vanne de l'évaporateur (matin et soir). Un système photovoltaïque commandant un

vérin électrique se substitue à la deuxième intervention humaine quotidienne, consistant à fermer et à ouvrir les volets d'aération du capteur (matin et soir).

Construction

Les tubes en acier inoxydable de l'adsorbeur ont été traités galvaniquement puis soudés au collecteur par *Energie Solaire SA*. Les étapes intermédiaires (collage de graphite à l'intérieur des tubes et remplissage de ceux-ci avec le silicagel) ont été réalisées par nos soins à Sierre (voir Fig. 3).



Fig. 3 : Fermeture des tubes remplis de silicagel puis soudage avec le collecteur.

Le bahut isolé et le boîtier du capteur ont été réalisés par *l'atelier Jacques Borghini* à Lausanne. L'accent a été mis sur la réduction des ponts de froid par l'assemblage des panneaux PIV de manière jointive et en les recouvrant, dans une seconde étape, avec de la fibre de verre et résine époxy.

Le boîtier du capteur est composé d'un assemblage de panneaux sandwichs composites *Ecopan*. Le clapet anti-retour est constitué de pièces de décolletage usinées dans l'atelier mécanique de la *HES-SO/EIVD*. Les pièces devant être usinées sur une machine à commande numérique ont été sous-traitées à l'extérieur.

Le condenseur aluminium-cuivre industriel a été transformé dans l'atelier mécanique de la *HES-SO/EIVD*.

L'assemblage complet de la machine solaire s'est fait dans les ateliers mécanique de la *HES-SO/EIVD*.



Fig. 4 : Le réfrigérateur solaire à adsorption dans son état actuel

Test et mesures

Le système se trouvant en dépression par rapport à la pression atmosphérique, une petite infiltration d'air dans le circuit peut sérieusement perturber le bon fonctionnement de la machine. De ce fait, l'étanchéité au vide de chaque pièce a dû être soigneusement testée. Pour ce faire, un détecteur de fuites à hélium ainsi que des sprays de détection de fuites ont été utilisés.

L'adsorbeur a été testé en trois étapes :

- Avec surpression d'hélium et spray de détection pour fuites grossières (détection jusqu'à 10^{-3} mbar/l*s).
- Avec surpression d'hélium et détecteur muni d'une sonde de reniflage (localisation des petites fuites).
- En dépression, par pompage en série avec le détecteur à hélium (détection jusqu'à 10^{-8} mbar/l*s).

Nous avons procédé à la détection durant 7 jours à Sierre car il a fallu effectuer plusieurs retouches avant d'obtenir des soudures parfaitement étanches. Nous avons constaté qu'une bonne préparation des pièces et un soudeur qualifié sont primordiaux pour l'obtention de soudures étanches.

Pour les autres éléments, un simple test par pompage avec détecteur s'est en général montré suffisant. Toutefois, quelques soudures ont dû être retouchées sur l'évaporateur en aluminium (Fig. 5).



Fig. 5 : Retouches de soudures sur l'évaporateur en aluminium

Afin de déterminer les pertes thermiques du bahut et de vérifier les performances des isolants sous-vide nous avons procédé à trois différents tests permettant de définir le coefficient moyen de déperditions thermique :

- Une mesure de croissance de la température d'une charge d'eau froide placée à l'intérieur.
- Deux mesures, sur une période donnée, de la quantité de glace fondu d'un mélange glace/eau à 0°C.

La Fig. 6 résume les résultats obtenus :

mesures	1	Croissance de température	$A^*U=0.74 \text{ W/K}$	moyenne 0.77 W/K
	2	Glace fondu	$A^*U=0.76 \text{ W/K}$	
	3	Glace fondu	$A^*U=0.80 \text{ W/K}$	
Valeur calculée (PIV, 40 mm)				0.36 W/K

Fig. 6 : Résultats des différents tests effectués comparés à la valeur calculée

Les trois tests effectués donnent des résultats semblables, ce qui valide nos mesures. En revanche, la valeur calculée lors du dimensionnement apparaît sous-estimée (0.36 W/K). Une analyse qualitative du bahut au moyen d'une caméra thermographique a permis de mettre en évidence des ponts thermiques, causes de cette différence.

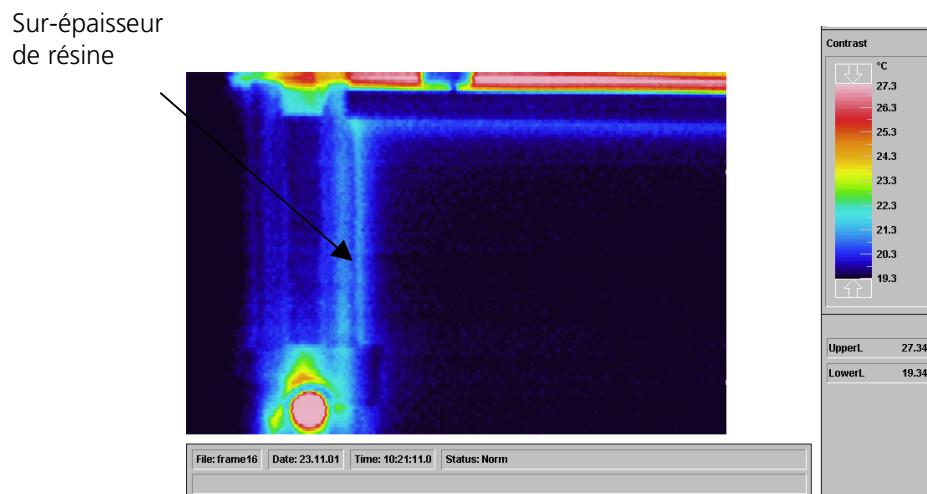
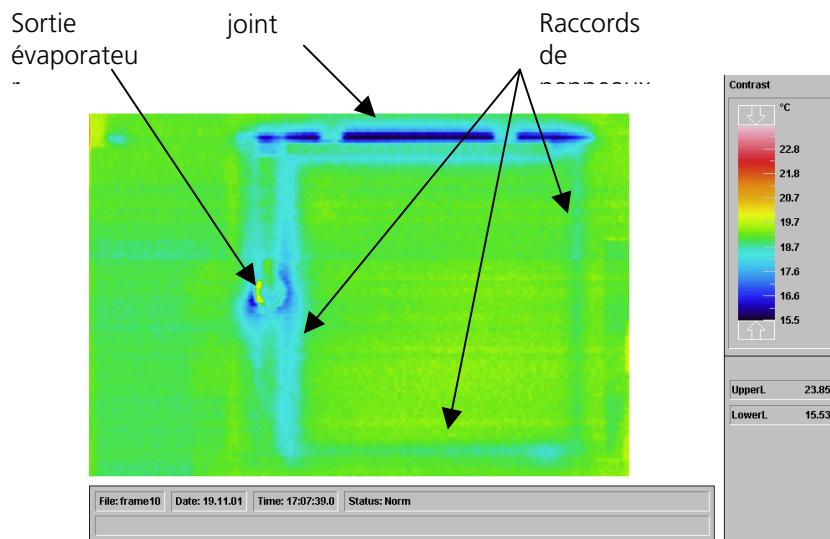


Fig. 7 : Analyse qualitative de l'isolation par thermographie (face arrière du bahut)

Nous avons observé différents points faibles dans la construction du bahut :

- défaut d'isolation causé par le joint de fermeture du couvercle.
- ponts de froid créés aux points de contact des panneaux.
- pont de froid créé par la tubulure de liaison de l'évaporateur.

Les ponts de froid dus à la liaison entre les panneaux semblent inévitables malgré un assemblage par contact direct. La conduction thermique moyenne des panneaux étant faible, les ponts thermiques ont une influence proportionnellement importante dans la perte thermique globale du bahut

Collaboration nationale

Centre Ecologique Albert Schweizer (CEAS), ONG, Neuchâtel : Collaboration pour l'évaluation des besoins en froid dans les pays sahéliens et pour l'établissement du cahier des charges.

Energie Solaire SA, Sierre : Collaboration pour la construction de l'adsorbeur.

Atelier composite Jacques Borghini, Lausanne : Réalisation en matériaux composites du capteur et du bahut isolé.

Despraz SA, Granges-Marnand : Construction de l'évaporateur tout aluminium.

Herren Frères et Cie, Yverdon-les-Bains : Fabrication du châssis tubulaire en aluminium.

Atelier mécanique de la HES-SO/EIVD, Yverdon-les-Bains : Fabrication du clapet et assemblage de l'ensemble du réfrigérateur.

Collaboration internationale

CNRS/LIMSI, Paris, France : Collaboration pour l'utilisation du modèle de simulation de dimensionnement de systèmes solaires à adsorption.

CEAS, Ouagadougou, Burkina-Faso : Collaboration en vue d'un transfert technologique à mener à la suite du projet.

Évaluation de l'année 2001 et perspectives pour 2002

A la fin des dix mois prévus initialement dans le présent mandat, le réfrigérateur solaire à adsorption compact est totalement assemblé. Cependant, nous devons constater que cette période ne nous a pas permis de procéder au test de fonctionnement de cette machine. L'association de plusieurs facteurs explique ce retard (longs délais de fabrication de quelques fournisseurs, période de tests d'étanchéité du capteur plus longue que prévue,...). Nous sommes tout de même très confiants sur la bon fonctionnement du système car aucun aspect de fabrication n'a été "sacrifié" au profit d'un gain de temps.

Ce mandat nous a permis de créer le premier prototype de réfrigérateur solaire à adsorption de Suisse, prototype s'approchant d'un produit fini et susceptible d'être industrialisé. La mise au point du clapet anti-retour double effet permettant l'automatisation d'une des deux interventions humaines quotidiennes ainsi que l'utilisation des panneaux isolants sous-vide pour la construction du bahut ont présenté deux innovations essentielles pour atteindre les objectifs fixés.

La première partie de l'année 2002 sera consacrée à la mise en service, et aux premiers tests de fonctionnement. Quelques améliorations seront apportées à la machine(modification du joint du bahut) pour lutter contre l'effet des ponts thermiques. Ensuite, ce prototype sera envoyé au CEAS de Ouagadougou pour une évaluation de ses performances dans le climat pour lequel il a été dimensionné. Cette perspective est très encourageante dans le cadre des activités du LESBAT. Elle permettra d'apporter de nouvelles réponses quant au bon fonctionnement du système dans des conditions réelles et contraignantes. D'une manière plus générale, il est prévu de remplacer le système photovoltaïque d'ouverture de volets par un système thermomécanique plus fiable et mieux approprié aux pays à faible niveau de développement technique et de trouver des solutions permettant d'automatiser différents procédés de fabrication (soudage des flasques en bout de tube, pose du graphite à l'intérieur des tubes,...).

Références

- [1] **Normes de performance pour le matériel utilisé dans le cadre du Programme élargi de Vaccination**, Série Logistique et santé,(WHO/EPI/LHIS/91.1), 1991.
- [2] **Hochleistungs-Wärmedämmung HLWD**, Forschungsprogramm "Rationelle Energienutzung in Gebäuden", BFE, 2000.