

Rapport final décembre 2002

Construction et test d'un réfrigérateur solaire à adsorption transportable

Rédigé par

Julien Mayor et Philippe Dind

Ecole d'ingénieurs du Canton de Vaud / HES-SO / LESBAT - EIVD

Rte de Cheseaux 1, CH-1400 Yverdon-les-Bains

Construction et test d'un réfrigérateur solaire à adsorption portable

J.Mayor

Chef de projet : Ph. Dind

31 mars 2003

Laboratoire d'Energétique Solaire et de Physique du bâtiment, HES-SO/EIVD, Route de Cheseaux 1, CH-1400 Yverdon-les-Bains

Résumé

Ce mandat a permis de développer au sein de la HES-SO/EIVD un prototype de réfrigérateur solaire à adsorption autonome utilisant le couple silicagel-eau. Ce système se caractérise par sa compacité et par son aptitude à être transporté. D'un volume utile de réfrigération de 100 litres environ, la surface du capto-adsorbeur est de 1 m². Sa masse totale 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 important par rapport au volume d'encombrement. Un système de vanne autonome fut développé afin de supprimer toute manipulation humaine lors du fonctionnement.

Ce système de réfrigération a été dimensionné pour permettre de refroidir quotidiennement de 30 degrés K une charge équivalente en eau de 2.5 à 3.7 kg dans un climat chaud de type sahélien. L'énergie stockée sous forme de glace dans l'évaporateur permet de couvrir 3 jours de fonctionnement en absence de soleil.

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

La collaboration avec une organisation non gouvernementale a donné l'occasion de tester le système en Afrique sub-saharienne durant les mois de mai à septembre 2002. Un modèle similaire y a été construit, utilisant des matériaux disponibles sur place. Parallèlement une étude générale de marché sur les réfrigérateurs solaires a été réalisée, ainsi qu'une étude de marché ciblée sur le Burkina Faso. Les résultats de cette étude devraient permettre d'orienter les choix pour la création, à court terme, d'un atelier de production de réfrigérateurs solaires au Burkina Faso.

Cette étude a été accomplie sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie. L'auteur est seul responsable du contenu et des conclusions.
--

Zusammenfassung

(Titel : “Konstruktion und Test eines transportfähigen Adsorbierungs-Solarkühlschrank.”)

Dieses Mandat hat im Rahmen der HES-SO/EIVD, die Entwicklung eines Prototyps für einen autonomen Adsorbierungs Solarkühlschrank ermöglicht, der mit dem Paar Silicalgel-Wasser funktioniert. Dieses System kennzeichnet sich durch seine Kompaktheit und Transportfähigkeit. Für ein brauchbares Volumen von ungefähr 100 Liter, braucht es einen Adsorbierungskollektor einer Fläche von 1 m². Im Ganzen erreicht das Gerät eine Masse von ungefähr 150kg.

Die Maschine wurde mit Materialien konstruiert, die die Masse des Systems so klein wie möglich halten. Die Verwendung von Hochleistungs-Wärmedämmung (VIP), für die Konstruktion des gekühlten Behälters, hat es ermöglicht die thermischen Verluste stark zu reduzieren, ohne die Grösse des gekühlten Volumens zu verkleinern. Ein Anti-Rücklauf-Klappensystem wurde entwickelt, um während des Betriebs, jegliche menschliche Manipulation zu beseitigen.

Dieses Kühlungssystem wurde so bemessen, dass in einem Klima des sahelischen Typs, täglich eine gleichwertige Last von 2.5 bis 3.7 kg Wasser, um 30 Grad K gekühlt wird. Die gespeicherte Energie, in Form von Eis im Verdunster, ermöglicht 3 sonnenlose Tage zu überbrücken.

Die Konstruktion des Solarkühlschranks wurde in Zusammenarbeit mit kleineren Unternehmen und regionalen Werkstätten realisiert.

Die Zusammenarbeit mit einer NGO (non governmental organization) hat es ermöglicht, das System während der Monate Mai bis September 2002, in einer subsaharischen Region Afrikas zu testen. Dort wurde ein ähnliches Modell mit local verfügbaren Materialien gebaut. Parallel wurde eine gesamte Markstudie und eine andere Marktstudie für das Burkina Faso, über Solarkühlschränke durchgeführt. Die Resultate dieser Studie sollten die nötigen Entscheidungen für die Schaffung einer Produktionswerkstatt von Solarkühlschränken in Burkina Faso orientieren.

Summary

(Title : Manufacturing and Testing of a Transportable Solar Adsorption Refrigerator.)

This project aimed to develop within the HES-SO/EIVD, an autonomous solar adsorption refrigerator with the ability to be transported.

The usable refrigeration volume is about 100 liters, for 1 m² area collector. Low density materials were used to reduce the weight. The total weight of the system is 150 kg. Vacuum insulation panels were used for the refrigeration box. This has made possible to significantly reduce the thermal losses without reducing the usable refrigeration volume. A special valve was developed to replace two manual taps which were operated twice a day on our previous prototypes.

The refrigerator has the capacity to cool down a mass of 2.5 to 3.7 kg of water of 30 Kelvin in a sahelian climate. The cold is stored as ice in the chiller. Thus, the temperature of 8 degrees Celsius in the cooling box can be maintained up to three days without sun .

Collaboration with a non-governmental organization has made possible the testing of the system in subsaharan Africa during the period from May to September 2002. At the same time, a similar refrigerator as been manufactured by locals using locally available materials. Likewise a market study has been undertaken in Burkina Faso to analyse the potential development of solar adsorption refrigerators in this region. Therefore in the near future a production workshop for solar refrigerators will be started in Burkina Faso.

Table des matières

1	Buts du projet	6
2	Principe de fonctionnement du réfrigérateur solaire à adsorption	6
2.1	Fonctionnement du cycle de production de froid (voir figure 1)	7
3	Étude, dimensionnement et construction	9
3.1	Description du réfrigérateur solaire	9
3.2	Dimensionnement	9
3.3	Capto-adsorbeur	11
3.3.1	adsorbeur	11
3.3.2	Volets de refroidissement	12
3.4	Condenseur	12
3.5	Vanne autonome	12
3.6	Bahut de conservation	13
3.7	Évaporateur auto-stockeur	14
4	Tests et résultats	15
4.1	Contrôles d'étanchéité	15
4.2	Caractérisation thermique du bahut	16
4.2.1	Contrôle thermographique du bahut	17
4.3	Mise en service, test du prototype en climat sahélien et construction d'un équivalent africain.	18
4.3.1	Coefficient de performance	19
4.3.2	Programme de simulation	20
4.3.3	Construction d'un équivalent africain	21
5	Étude de marché et coût	22
6	Avantages techniques du réfrigérateur solaire à adsorption	23
7	Conclusion	23
8	Remerciements	24
9	liste des symboles	24

Table des figures

1	Illustration des phases du cycle d'adsorption	8
2	Vue en coupe du réfrigérateur solaire.	9
3	Organigramme de dimensionnement et valeurs caractéristiques indicatives moyennes journalières.	10
4	Éclaté d'un tube de l'adsorbeur.	11
5	Vue du condenseur à air de 3 m ² de surface d'échange.	12
6	Vanne autonome testée pour la première fois sur le réfrigérateur transportable.	13
7	Renforts de l'isolation du bahut par des plaques en PUR de 40mm.	14
8	Vue de l'évaporateur auto-stockeur.	15
9	Stand de détection de fuites avec détecteur à hélium.	16

10	Mesure des pertes thermiques du bahut avec de la glace.	17
11	Mise en évidence des défauts d'isolation par clichés thermographiques (face arrière du bahut).	18
12	Exemple de mesures effectuées sur le prototype compact à Ouagadougou.	19
13	Comparaison entre simulation et mesures.	21
14	Premier réfrigérateur solaire à adsorption entièrement fabriqué au Burkina Faso . . .	22

Liste des tableaux

1	Comparaison d'isolants et influence sur le dimensionnement.	14
2	Résultats des différents tests effectués comparés à la valeur calculée.	17
4	Hypothèse de stock de glace formé et COP_s correspondant à partir de $COP_{estim} = 0.10$ et $COP_{estim} = 0.15$	20

1 Buts du projet

Ce projet s'inscrit dans la continuité des développements menés depuis trois ans au sein du LESBAT¹ 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 (réfrigérateurs à gaz ou à pétrole, ou à compresseur alimenté à partir d'un groupe électrogène), dans les zones dépourvues de réseau électrique. Ces systèmes relativement simples de conception peuvent être réalisés, avec un matériel limité, mais par des personnes qualifiées. De plus, l'utilisation du couple silicagel-eau rend ces systèmes à adsorption sans aucun danger pour les utilisateurs et pour l'environnement.

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 sur une camionnette.
- Système totalement autonome (la seule énergie utilisée étant l'énergie solaire), construit dans une optique de prototype pré-industriel.
- Garantir le transfert technologique Nord-Sud de la technique du froid solaire à adsorption (appropriation de la technique par des ONG travaillant pour le développement durable dans les pays en voie de développement).

2 Principe de fonctionnement du réfrigérateur solaire à adsorption

(voir figure 2 pour la description des composants du réfrigérateur)

Le système thermique, objet de cette étude, est une machine passive fonctionnant uniquement avec l'énergie solaire selon un principe connu qui a donné lieu à de nombreuses publications dès les années 80 [2, 3, 4]. Cette machine peut s'apparenter à un réfrigérateur classique ayant comme organes fonctionnels, un évaporateur, un condenseur, et un compartiment isolé, dont le compresseur et le détendeur ont été remplacés par un adsorbant situé dans le capteur solaire. Le fluide frigorigène utilisé est l'eau. Ce fluide a l'avantage d'être non polluant et disponible en abondance sur terre. L'eau présente également l'avantage de servir à la fois de fluide frigorigène et de moyen de stockage de l'énergie. Une autre caractéristique importante de ce système est son cycle, fermé et intermittent qui s'accomplit en 24 heures.

L'adsorption est la réaction produite dans l'adsorbant solaire entre l'adsorbant (le silicagel) et le fluide frigorigène (l'eau) appelé adsorbat. Cette réaction de physi-sorption, exothermique, est caractérisée par la fixation des molécules d'adsorbat à la surface de l'adsorbant.

L'intermittence du cycle de production de froid du réfrigérateur solaire, est synchronisée avec celle de la source énergétique solaire :

- La journée, le chauffage de l'adsorbant par le soleil produit la réaction endothermique de désorption. A ce moment-là, la pression augmente et les vapeurs d'eau chassées du silicagel se condensent.
- La nuit le refroidissement de l'adsorbant fait chuter la pression et engendre la réadsorption par le silicagel (adsorbant) "sec" de l'eau (adsorbat) condensée durant la journée. L'eau est évaporée de l'évaporateur.

¹LESBAT, Laboratoire d'Energétique Solaire et de Physique du Bâtiment, École d'Ingénieurs du Canton de Vaud (EIVD/HES-SO), Route de Cheseaux 1, CH-1400 Yverdon-les Bains

2.1 Fonctionnement du cycle de production de froid (voir figure 1)

(Pour la signification des grandeurs, voir liste des symboles §9)

Phase 1, Chauffage isostérique

Début de journée : Au lever du soleil, le capteur-adsorbeur se trouve à basse température T_i (env. température ambiante) et la pression du système P correspond alors à la pression de saturation de l'adsorbat à la température de l'évaporateur T_e : $P = P_e = P_s(T_e)$. A cet instant, la vanne autonome et les volets d'aération du capto-adsorbeur sont fermés, l'évaporateur est isolé de l'adsorbeur et du condenseur. La puissance rayonnée par le soleil (irradiance), en augmentant, chauffe le capteur-adsorbeur et la pression du système augmente de façon globalement isostérique

Phase 2, Désorption et condensation

Milieu de matinée : La pression du système atteint la pression de saturation correspondante à la température (T_c) du condenseur, la condensation débute. L'irradiance et par conséquent la température du capteur-adsorbeur augmentent encore, toutefois en supposant que le condenseur est idéal, la pression du système va suivre la pression de saturation correspondant à la température du condenseur (dans la figure 1 la température de l'air ambiant est supposée constante, $P = P_c = P_s(T_c = T_{amb})$). Dans le sens de la phase 2, la concentration de fluide dans l'adsorbant diminue. Cette quantité de fluide désorbé correspond à la quantité de fluide condensé qui s'écoule dans l'évaporateur, au travers de la vanne autonome, au fur et à mesure de la condensation .

Phase 3, Refroidissement isostérique

Fin d'après midi : Après le midi solaire, l'irradiance diminue régulièrement mais la température du capteur-adsorbeur augmente encore tant que le flux des pertes thermiques est inférieur aux gains (part de l'irradiance absorbée par le capto-adsorbeur). Il arrive un moment dans l'après-midi où les pertes thermiques compensent les gains. Cet instant correspond, dans le cycle théorique de la figure 1, à la température maximale du capto-adsorbeur, à la fin de la condensation et à la concentration minimale adsorbat dans d'adsorbant. Les condensats ont été totalement transférés dans l'évaporateur au travers de la vanne autonome et le volet d'aération du capteur est ouvert pour favoriser le refroidissement de l'adsorbeur. L'adsorbeur est déconnecté de l'évaporateur et le refroidissement se fait de façon globalement isostérique.

Phase 4, Adsorption et évaporation

Nuit : Avec le refroidissement de l'adsorbant, la pression du capto-adsorbeur diminue et finit par atteindre la pression de saturation correspondant à la température de l'évaporateur T_e : $P = P_e = P_s(T_e)$. La vanne autonome est à cet instant ouverte pour toute la durée de la nuit. La température du capto-adsorbeur continue de diminuer mais la pression $P = P_e$ du système reste constante car l'évaporateur se trouve à 0°C (mélange eau-glace) et reste constante tant que l'eau contenue dans l'évaporateur n'est pas entièrement transformée en glace. L'adsorbat contenu dans l'évaporateur et aspiré par l'adsorbant, il s'évapore à pression constante en soutirant de l'énergie à l'évaporateur. Les volets d'aération sont ouverts jusqu'au matin (début de la phase 1) pour permettre un refroidissement maximum du capteur-adsorbeur (le phénomène d'adsorption étant exothermique).

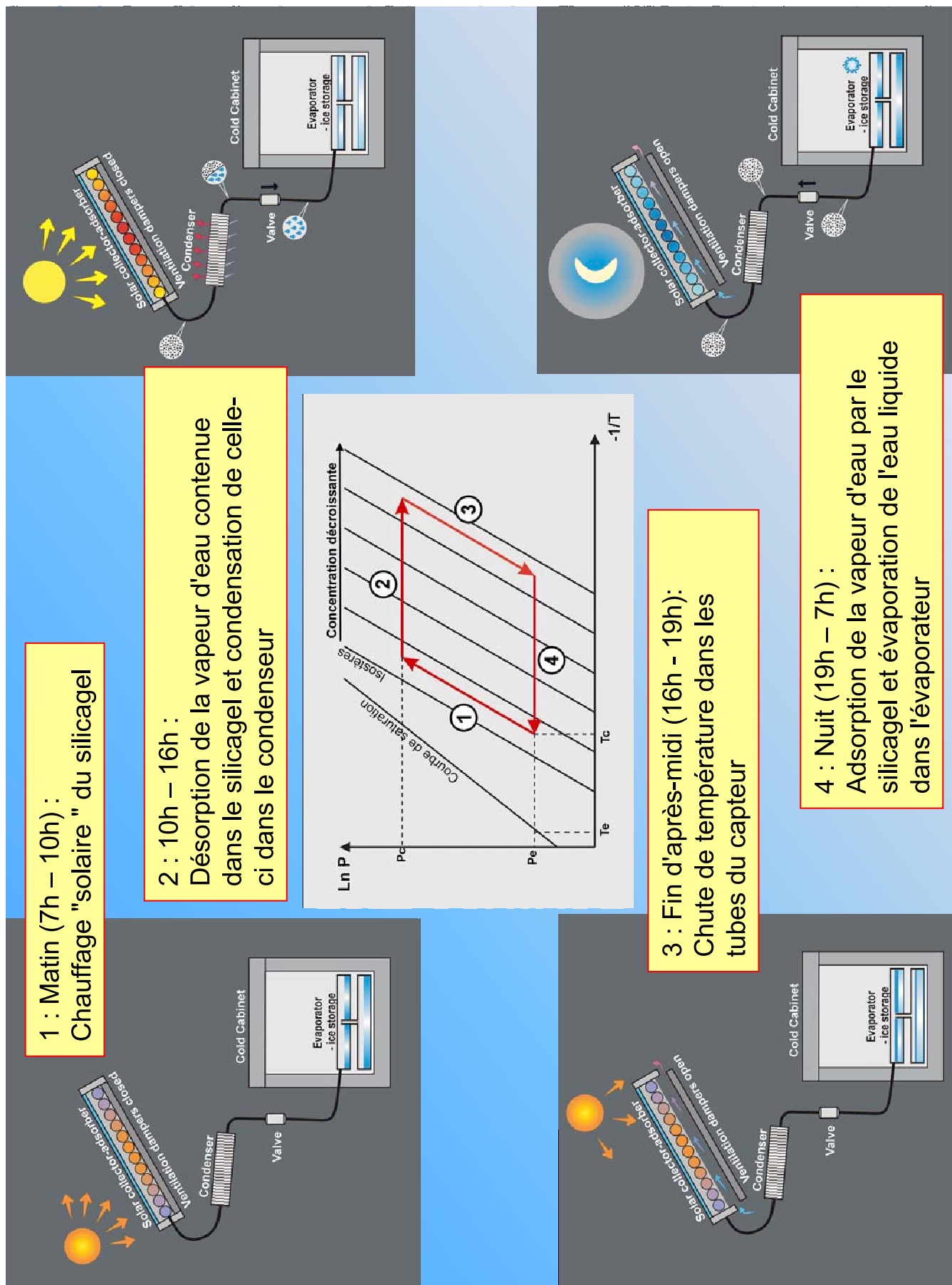


FIG. 1 – Illustration des phases du cycle d'adsorption

3 Étude, dimensionnement et construction

3.1 Description du réfrigérateur solaire

Une vue détaillant les principaux composants du réfrigérateur est montrée à la figure 2.

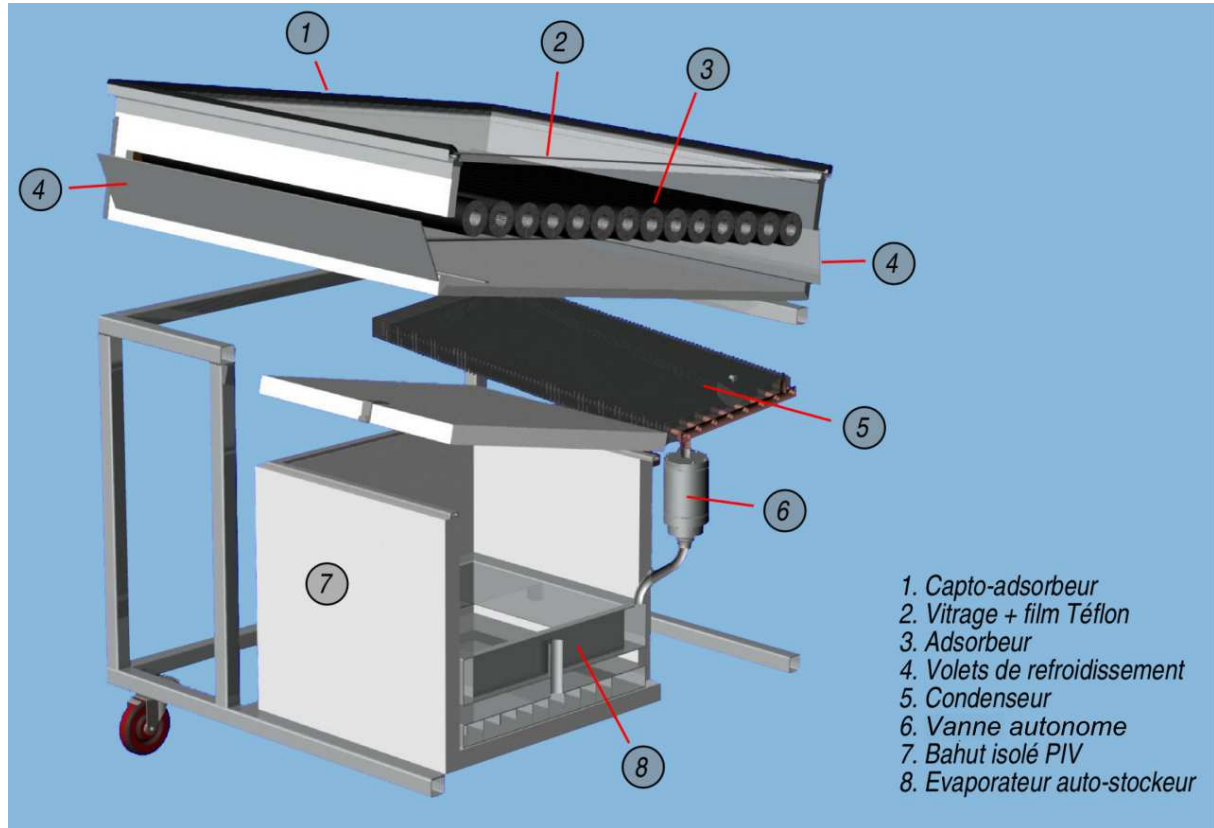


FIG. 2 – Vue en coupe du réfrigérateur solaire.

3.2 Dimensionnement

Le réfrigérateur solaire a été dimensionné pour répondre aux exigences demandées par les programmes de vaccination en climat sahélien. Le choix de ce type de climat a été fait en fonction des besoins évidents dans ces régions, avec le CEAS International², notre partenaire pour le transfert de la technique au Sud et qui est représenté au Burkina Faso. Nous avons considéré des conditions de températures extrêmes de 43°C durant la journée et 35°C la nuit, et une irradiation moyenne de $5 \left[\frac{kWh}{m^2.j} \right]$. Ces exigences ont été tirées des Normes de performance pour le matériel utilisé dans le cadre du Programme élargi de vaccination [8] publié par l'Organisation Mondiale de la Santé (WHO/OMS).

L'autonomie sans soleil a été choisie égale à 3 jours consécutifs avec une température à l'intérieur de l'enceinte frigorifique comprise entre 0 et 8°C. Ce choix est justifié par l'analyse de la base de donnée Meteonorm pour le climat sahélien : l'occurrence de plus de 3 jours successifs avec couverture nuageuse permanente y est quasi improbable, affirmation corroborée par les observations. La réserve d'énergie "froid" est faite sous forme de glace dans l'évaporateur. Lorsque le réfrigérateur

²Centre Écologique Albert Schweizer (CEAS International), Route de la Côte 2, CH-2000 Neuchâtel. Partenaire du LESBAT pour le transfert Nord-Sud de techniques appropriables.

est mis en service il faut attendre environ 3 jours que tout le stock de glace se soit formé avant de commencer à ajouter la charge à refroidir. Ensuite, le régime permanent atteint, le réfrigérateur est capable de refroidir d'une température de 30 K une charge allant jusqu'à 3.7 kg d'eau en 24 heures. En cas extrême de mauvais temps (3 jours), nous considérons que le consommateur s'adapte aux conditions et n'ajoute aucune charge à refroidir. Au retour du beau temps, toute la glace est consommée et 5 jours sont alors nécessaires au réfrigérateur pour refaire le stock tout en refroidissant une charge réduite de 2.5 kg, de la température donnée ci-dessus.

Le dimensionnement a abouti à une surface de captage solaire de 1m² pour un volume utile de réfrigération d'environ 100 litres. Ce relativement grand volume a pu être obtenu grâce à l'utilisation de panneaux isolants PIV³ faisant partie du programme de recherche de l'OFEN⁴[10].

L'organigramme de la figure 3 présente les différentes étapes du dimensionnement ainsi que les valeurs journalières moyennes caractéristiques.

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 taille critique au dessous de laquelle le volume utile de réfrigération devient insignifiant vis-à-vis de la masse totale du réfrigérateur et de son prix de fabrication.

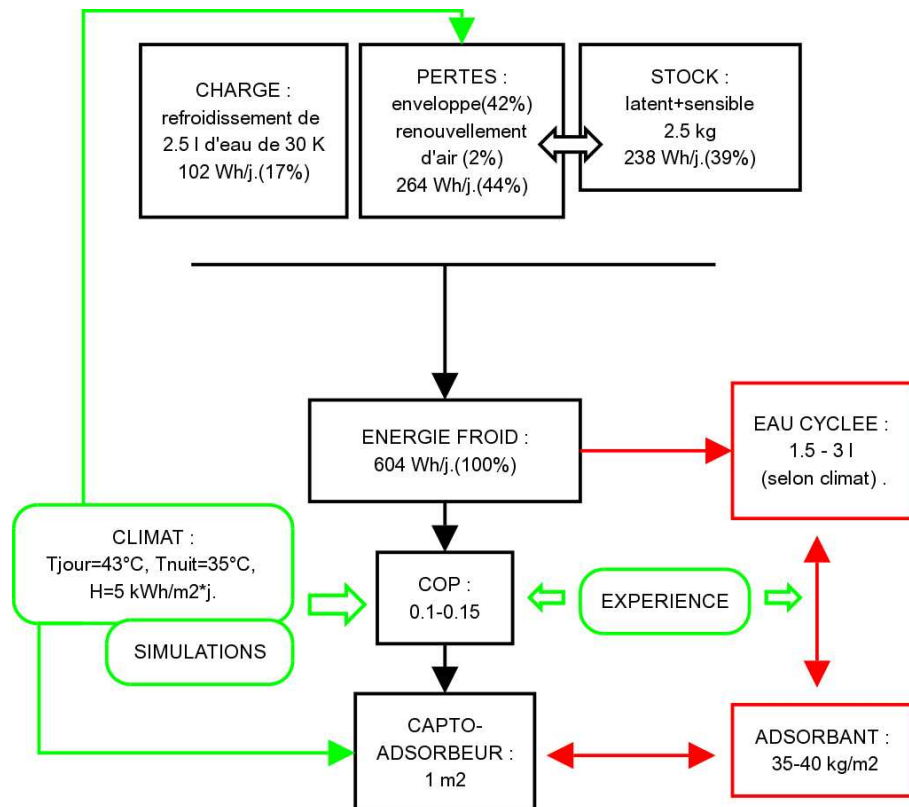


FIG. 3 – Organigramme de dimensionnement et valeurs caractéristiques indicatives moyennes journalières.

³PIV : Panneaux Isolants sous Vide, VIP en anglais.

⁴OFEN : Office Fédéral de l'Energie - BFE : Bundesamt Für Energie

3.3 Capto-adsorbeur

Différentes configurations de géométrie et de matériaux ont été testées avec le programme de simulation [13] élaboré en collaboration avec le LIMSI-CNRS⁵. 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 Énergie Solaire SA à Sierre ont permis de mettre au point un adsorbeur haute performance testé sur le prototype de laboratoire de 2m² en fonctionnement à Yverdon-Les-Bains [12]. Un adsorbeur de 1m², de même technologie, est utilisé par le réfrigérateur compact.

Le capto-adsorbeur est formé d'un boîtier isolé, fermé sur sa face supérieure par un double vitrage formé d'un verre extra-blanc à l'extérieur et d'un film en Téflon tendu, à l'intérieur. Les faces frontale et postérieure du capteur sont fermées par un volet de refroidissement. L'adsorbeur est enfermé à l'intérieur.

3.3.1 adsorbeur

L'adsorbeur est composé de 14 tubes de 1m de longueur, en acier inoxydable de 0.5mm d'épaisseur, remplis de 35kg de silicagel. Ces tubes sont revêtus d'une surface sélective à basse émissivité (C3-97 d'Énergie Solaire SA). La quantité optimale de 35 à 40kg de silicagel par m² de surface d'adsorbeur a été déterminée grâce aux simulations ainsi qu'aux mesures réalisées sur notre prototype de laboratoire.

L'utilisation de tubes fins permet de réduire la masse inerte d'acier de manière significative car la structure est optimale pour la résistance mécanique au vide. Afin de compenser la résistance thermique de l'acier inoxydable, une couche de graphite a été appliquée à l'intérieur des tubes pour améliorer le transfert de chaleur périphérique vers la demi-circonférence inférieure du tube. Outre la conduction périphérique de la chaleur, le film de graphite améliore le transfert de chaleur à l'interface entre le silicagel et le tube métallique [14].

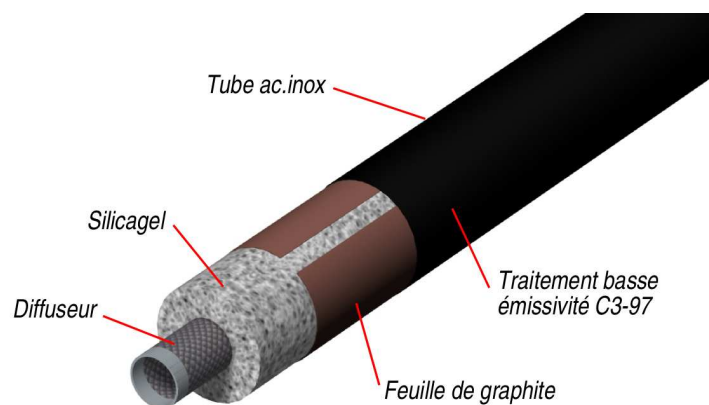


FIG. 4 – Éclaté d'un tube de l'adsorbeur.

Le silicagel est emprisonné entre la paroi du tube et un fin grillage cylindrique servant de diffuseur. Le lit uniforme de silicagel ainsi formé a une épaisseur d'environ 20mm.

⁵LIMSI-CNRS : Laboratoire d'informatique pour la mécanique et les sciences de l'ingénieur, Université de Paris-Sud F-91403 Orsay(France)

3.3.2 Volets de refroidissement

Les faces frontale et postérieure du capteur sont fermées par un volet de refroidissement. Ils sont actionnés par un vérin électrique commandé par un minuteur et alimenté par une petite cellule photovoltaïque. Ce système permet d'ouvrir et fermer automatiquement les volets d'aération respectivement le soir et le matin, pour favoriser la réaction exothermique d'adsorption en refroidissant le capteur pendant la nuit.

3.4 Condenseur

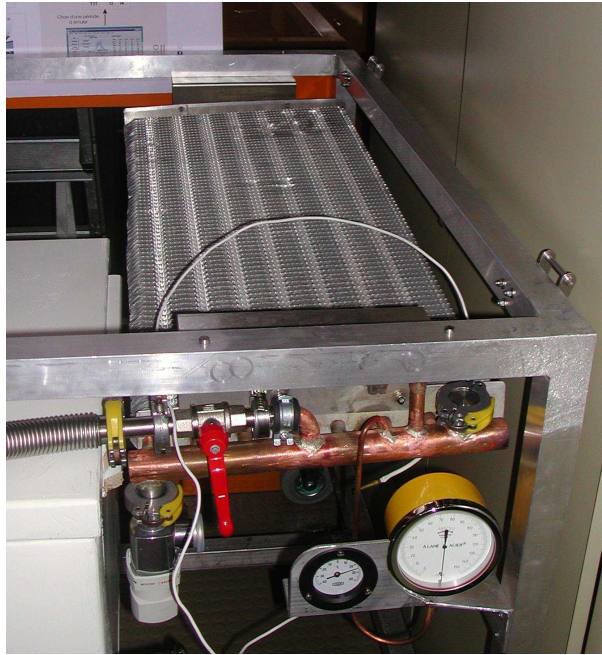


FIG. 5 – Vue du condenseur à air de 3 m² de surface d'échange.

Le condenseur à air est refroidi par convection naturelle il forme une surface d'échange de 3 m². Il a été fabriqué à partir d'un condenseur industriel transformé pour répondre au besoins du réfrigérateur solaire. Les 4 voies du condenseur sont connectées au collecteur en parallèle afin de diminuer les longueurs de conduites, néfastes au bon fonctionnement des systèmes sous vide. Le dimensionnement a été fait de manière à ne pas dépasser un ΔT de 10K lors de fortes désorptions sous le climat choisi.

3.5 Vanne autonome

La vanne autonome a été développée dans le but de supprimer la manipulation de vannes sur le réfrigérateur, deux fois par jour.

Durant un cycle de 24 heures, la vanne autonome doit remplir trois rôles distincts :

1. Le matin, avant la phase de condensation, la vanne autonome isole la partie supérieure du circuit(adsorbeur, condenseur) de l'évaporateur, permettant à celle-ci de monter en pression. A ce moment-là la vanne autonome ne permet pas le passage de la vapeur.
2. En fin de matinée, lorsque la partie supérieure du circuit a atteint la pression de saturation de l'eau à la température du condenseur (température extérieure) la condensation commence. A



FIG. 6 – Vanne autonome testée pour la première fois sur le réfrigérateur transportable.

ce moment la vanne autonome laisse passer les condensats vers l'évaporateur, tout en continuant à retenir les vapeurs.

3. Le soir et durant la nuit la pression de la partie supérieure du circuit est inférieure à la pression régnant dans l'évaporateur. A ce moment-là il n'y a plus de condensats au niveau de la vanne autonome et celle-ci laisse passer dans l'autre sens, les vapeurs retournant au capteur.

3.6 Bahut de conservation

L'isolation du bahut de conservation constitue un élément clef de la conception du réfrigérateur, car les contraintes de fonctionnement sont particulièrement élevées : le climat sahélien présente une faible amplitude thermique, et le caractère intermittent du cycle nécessite de produire un stock de glace la nuit pour conserver le froid durant la journée et pendant les jours sans soleil. De même le fonctionnement de ce réfrigérateur, étant exclusivement passif, et reposant sur le seul apport énergétique du soleil durant toute l'année, ces critères imposent une excellente isolation thermique du compartiment de réfrigération ($U \leq 0,125[\frac{W}{m^2K}]$). Ce coefficient impose une épaisseur d'au moins 20 cm d'isolation conventionnelle (PUR⁶), ayant par conséquent un volume d'encombrement élevé par rapport au volume utile de notre système compact. Pour éviter cet encombrement, nous avons opté pour les panneaux isolants sous vide, récemment apparus sur le marché.

Ces isolants ont des coefficients de conduction thermique $\lambda[\frac{W}{mK}]$ théoriques 4 à 5 fois inférieurs aux isolants traditionnels PUR. Dans notre cas, cela se traduit par la réduction de la surface de l'enveloppe et une augmentation du volume utile de réfrigération. Ainsi pour un réfrigérateur identique (déperditions thermiques, masse de glace stockée, surface de capteur, masse totale) la surface d'échange de l'enveloppe du bahut a été réduite de 35% et le volume utile augmenté, de 40 à 100 litres.

Le tableau 1 compare les résultats du dimensionnement obtenus avec 2 différents types d'isolation :

⁶PUR : polyuréthane

isolant	surface de capteur	volume utile	stock de glace	dimensions externes du bahut	masse du bahut
PIV, 40mm	1m ²	100 L	13kg	650x650x580mm	25kg
PS, 200mm	1m ²	40 L	13kg	864x864x665mm	25kg

TAB. 1 – Comparaison d’isolants et influence sur le dimensionnement.

Le bahut de conservation des produits réfrigérés a été réalisé en panneaux PIV Vacucomp⁷ recouverts de fibre de verre dans les ateliers composites Borghini à Lausanne. Une attention particulière a été portée sur la réduction des ponts thermiques. Les panneaux isolants ont été assemblés avec une légère pression de manière à avoir un minimiser l’espace entre ceux-ci au moment de les recouvrir. Ensuite une couche de 2mm de résine et de fibre de verre a été déposée sur l’ensemble pour former le bahut. Chaque paroi de ce dernier est constituée d’un seul panneau PIV afin de réduire les longueurs de jonctions de panneaux créant des faiblesse d’isolation.

Après une première série de mesures des déperditions thermiques du bahut nous avons constaté une faiblesse de l’isolation par rapport aux prévisions. Nous avons procédé a un renforcement de l’isolation ; des plaques de PUR de 40mm ont été ajoutées sur la face intérieure du couvercle et sur la moitié supérieure des faces intérieures du bahut. Le joint de fermeture a été remplacé par un joint plat en mousse, permettant de rapprocher le couvercle du bahut. Ces améliorations ont alors permis d’atteindre les objectifs fixés lors du dimensionnement.

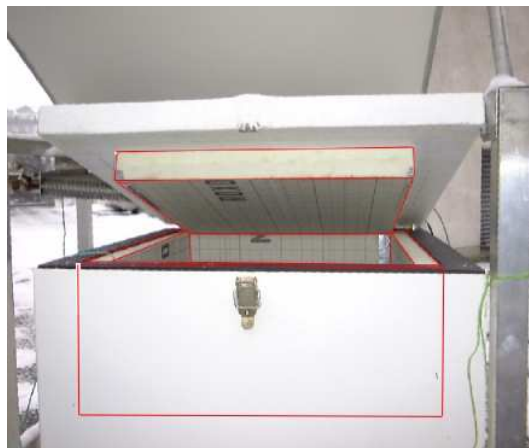


FIG. 7 – Renforts de l’isolation du bahut par des plaques en PUR de 40mm.

3.7 Évaporateur auto-stockeur

C’est dans l’évaporateur que se fait la production nocturne de froid, par évaporation de l’eau réadsorbée par le silicagel. Une quantité d’eau suffisante et ne participant pas au cycle est présente en permanence pour former une masse de glace qui sert de réserve énergétique pour la journée et les périodes sans soleil(3 jours maximum). Le stockage de l’énergie sous forme latente permet, en régime nominal, d’avoir une température de l’évaporateur constante égale à 0°C. L’évaporateur a été dessiné en faisant un compromis entre maximisation de la surface d’évaporation (pour réduire les effets de la formation de bouchons de glace à l’interface liquide-glace) et encombrement minimum de l’espace utile. Ci-dessous son résumées les principales caractéristiques de l’évaporateur :

- Surface d’échange : 0.7 m²

⁷Vacucomp et une marque de panneaux isolants sous vide (PIV) vendue par la société SS-Wancor AG

- Volume d'eau servant de stock énergétique : 13 litres
- Volume d'eau cyclé quotidiennement : environ 1.5 litres (saison chaude en climat sahélien)

L'écoulement des condensats se faisant par gravité, l'évaporateur doit se trouver dans la partie la plus basse du circuit. Ainsi pour réduire la hauteur de la machine solaire, l'évaporateur a été placé dans la moitié inférieure du compartiment de réfrigération (voir Figure 2) .

Dans le but de réduire la masse du système, l'évaporateur a été réalisé en aluminium.



FIG. 8 – Vue de l'évaporateur auto-stockeur.

4 Tests et résultats

4.1 Contrôles d'étanchéité

Le réfrigérateur solaire ne comporte aucune pièce mobile sujette à l'usure et fonctionne de manière entièrement passive ; c'est pourquoi une petite infiltration d'air dans le circuit sous vide peut conduire à son non-fonctionnement, par apparition de bouchons d'air empêchant la condensation.

Une réalisation soignée des soudures est déterminante pour assurer le fonctionnement des réfrigérateurs solaires à adsorption.

Lors de la mise en service, le circuit reliant l'adsorbeur à l'évaporateur est rempli de la quantité d'eau distillée nécessaire au stock de glace et au cycle de sorption. Le système est ensuite connecté à une pompe à palette pour être "tiré" au vide. Cette opération est répétée plusieurs fois afin d'éliminer tous les résidus de gaz incondensables apparaissant dans le circuit, après plusieurs cycles de chauffage. Une fois la mise en service terminée, plus aucune intervention n'est nécessaire au fonctionnement. Le système se trouve en dépression par rapport à la pression atmosphérique ; la pression minimum d'équilibre est 6 mbar (pression de vapeur saturante de l'eau autour du point triple de l'eau). C'est pourquoi l'étanchéité au vide de chaque pièce doit être soigneusement vérifiée au moyen d'un détecteur de fuites à hélium ainsi que de sprays de détection de fuites à base de savon.

L'adsorbeur est la partie la plus délicate à tester car elle comprend la plus grande densité de soudure avec notamment 28 flasques en acier inoxydable de 75mm servant à boucher les deux extrémités de chaque tube. La détection de fuite a été opérée de la manière suivante :

- Avec surpression d'hélium et spray de détection pour fuites grossières (détection jusqu'à $10^{-3} [\frac{mbar}{ls}]$).
- Avec surpression d'hélium et détecteur muni d'une sonde renifleuse (localisation des petites fuites).
- En dépression, par pompage en série avec le détecteur à hélium (détection jusqu'à $10^{-8} [\frac{mbar}{ls}]$).



FIG. 9 – Stand de détection de fuites avec détecteur à hélium.

Pour les autres éléments, un simple test par pompage avec le détecteur s'est généralement montré suffisant. Toutefois, quelques soudures ont dû être retouchées sur l'évaporateur en aluminium. Il est impératif de toujours nettoyer correctement les brasures avant de procéder à la détection, car des résidus de brasure peuvent cacher de petites fuites qui ne sont alors pas détectables, mais qui peuvent apparaître avec le temps.

4.2 Caractérisation thermique du bahut

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

- Une mesure de croissance de la température d'une charge d'eau froide placée à l'intérieur, le bahut étant placé dans une ambiance contrôlée à 20°C.
- Deux mesures, sur une période donnée (48 heures), de la quantité de glace fondue d'un mélange glace/eau à 0°C (figure 10) placé dans le bahut. Ce dernier étant dans les mêmes conditions de température ambiante que ci-dessus.

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 2 :

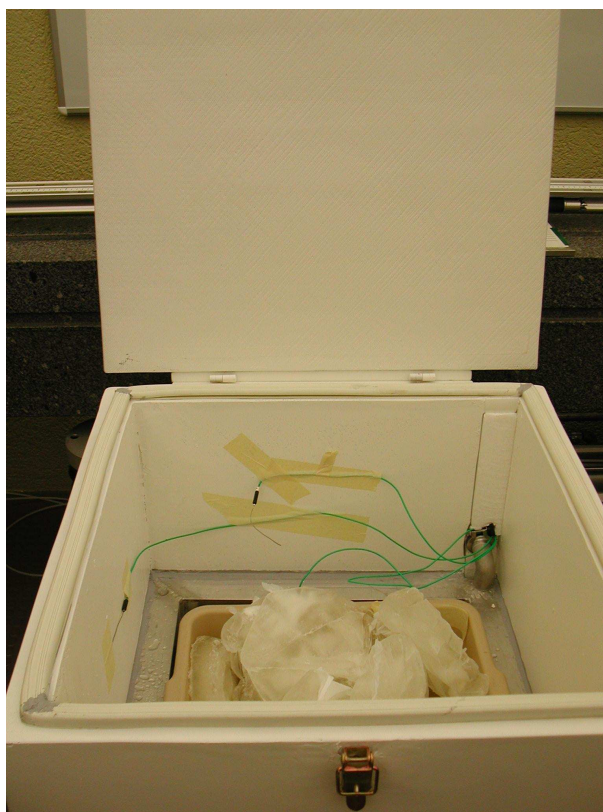


FIG. 10 – Mesure des pertes thermiques du bahut avec de la glace.

mesures	1	Croissance de température	$AU = 0.74 \left[\frac{W}{K} \right]$	$moyenne = 0.77 \left[\frac{W}{K} \right]$
	2	Fusion de glace	$AU = 0.76 \left[\frac{W}{K} \right]$	
	3	Fusion de glace	$AU = 0.80 \left[\frac{W}{K} \right]$	
Mesure après isolation complémentaire (finale)				$0.44 \left[\frac{W}{K} \right]$
Valeur calculée (PIV, 40 mm)				$0.36 \left[\frac{W}{K} \right]$

TAB. 2 – Résultats des différents tests effectués comparés à la valeur calculée.

4.2.1 Contrôle thermographique du bahut

Une étude qualitative de l'isolation du bahut avec panneaux PIV a été menée afin de mettre en évidence d'éventuels ponts thermiques dus à l'influence des joints de panneaux. Une série de clichés a été réalisée au moyen d'une caméra thermographique⁸.

Les clichés de la figure 11 laissent facilement apparaître les pont-de-froid entre les panneaux isolants ainsi qu'au niveau du joint du bahut. Les ponts thermiques sont causés par l'enveloppe des panneaux qui est métallisée : les joints entre panneaux induisent une conduction élevée que nous avons contrée en appliquant une couche supplémentaire de 40 mm d'isolation traditionnel (PUR).

Les modifications apportées à l'isolation (voir 3.6), ont permis de diminuer la température de surface interne de panneaux PIV, en réduisant le gradient thermique de leur face communiquant vers l'extérieur. Ainsi les pertes globales du bahut ont pu être sensiblement réduites, d'une valeur moyenne de $0.77 \left[\frac{W}{K} \right]$ lors de la première mesure, à $0.44 \left[\frac{W}{K} \right]$ après renforcement de l'isolation (voir tableau 2).

⁸Caméra thermographique Avio TBS 2200ST, plage de sensibilité 3 - $5.4 \mu m$.

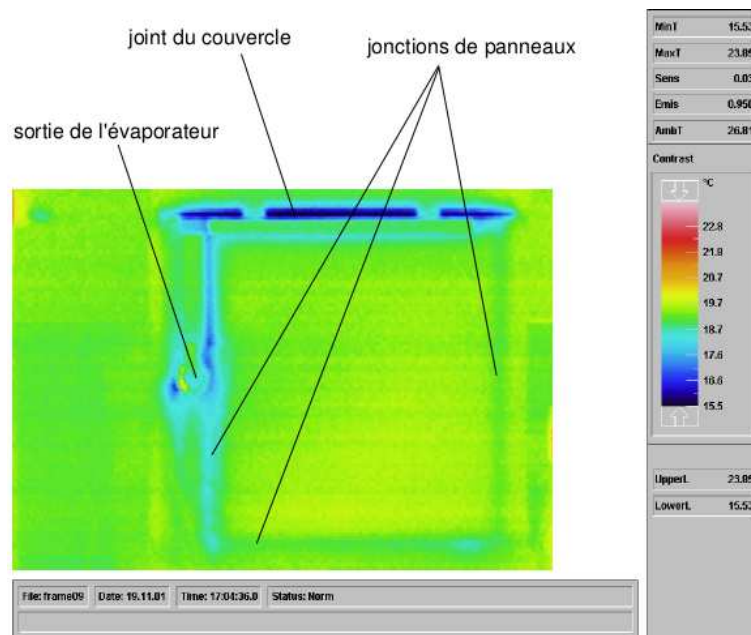


FIG. 11 – Mise en évidence des défauts d’isolation par clichés thermographiques (face arrière du bahut).

4.3 Mise en service, test du prototype en climat sahélien et construction d’un équivalent africain.

La construction du réfrigérateur solaire a été terminée au début de l’année 2002 durant la saison hivernale. Pour des raisons climatiques évidentes, aucune mesure n’a pu être faite à ce moment. La mise en service et la mesure ont été réalisées durant la période de mai à septembre 2002, à l’occasion d’une mission de transfert de la technologie du froid solaire, menée dans l’atelier de techniques appropriées du CEAS à Ouagadougou (Burkina Faso). Cette opportunité permis de tester le réfrigérateur solaire compact en conditions réelles afin de corriger les défauts de jeunesse et d’en estimer le coefficient de performance.

Ce prototype est un modèle expérimental ayant une vocation pré-industrielle. Il comprend un équipement de contrôle restreint, constitué d’un manomètre mécanique indiquant la pression régnant au niveau du condenseur et d’un thermomètre à gaz indiquant la température de l’enceinte réfrigérée. D’autre part, les vannes permettant d’isoler le capteur et l’évaporateur, présentes sur les précédents prototypes, ont été supprimées et remplacées par la vanne autonome (voir 3.5). Il ne subsiste alors qu’une seule vanne permettant de faire le vide lors de la mise en service.

Des mesures ont été réalisées ponctuellement sur le réfrigérateur, principalement durant le mois de septembre 2002, après la saison des pluies en climat sahélien.

Les principales grandeurs du réfrigérateur solaire ont été relevées au moyen d’un acquiesiteur TESTO à six canaux d’enregistrement, elles sont énumérées ci-dessous :

1. Irradiance $\left[\frac{W}{m^2}\right]$, mesurée avec un pyranomètre Kipp&Zonen placé dans le plan du capteur.
2. Température de l’adsorbeur (thermocouple placé sur la surface inférieure du 7ème tube contenant le silicagel).
3. Température extérieure(thermocouple).
4. Température à l’entrée du condenseur.
5. Température à la sortie du condenseur ou température de surface de l’évaporateur.
6. Pression au niveau du condenseur.

La figure 12 présente les valeurs mesurées lors d'une journée du mois de septembre à Ouagadougou.

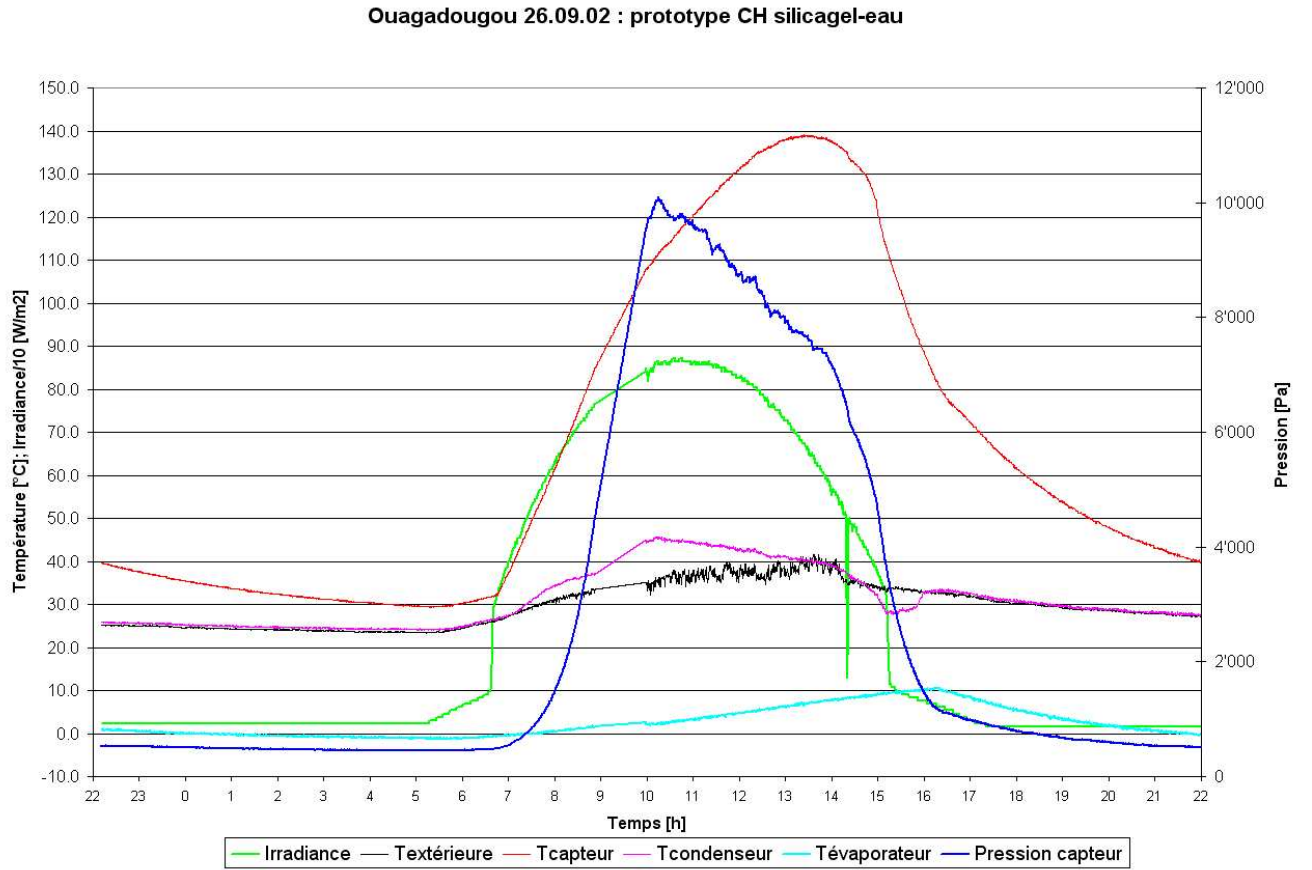


FIG. 12 – Exemple de mesures effectuées sur le prototype compact à Ouagadougou.

4.3.1 Coefficient de performance

(Pour la signification des grandeurs, voir liste des symboles §9)

Sur un cycle journalier, le coefficient de performance global (COP_s) est défini comme étant le rapport entre l'énergie soutirée à l'évaporateur et l'énergie solaire reçue par le capteur (Irradiation $H[\frac{kWh}{m^2}] \times$ Surface $S[m^2]$). Dans le cas d'un réfrigérateur de laboratoire tel que celui dont nous disposons à Yverdon-les Bains, un réservoir permet de récolter et mesurer la quantité d'adsorbat condensée pour calculer le COP_s selon (1).

$$COP_s = \frac{Q_{evap}}{HS} = \frac{V \cdot \rho \cdot L_{eau} - V \cdot \rho \cdot c_{eau} \cdot (T_{res} - T_{evap})}{H \cdot S} \quad (1)$$

Le prototype compact a été construit dans une optique de pré-industrialisation, les contraintes de réduction de taille, et l'utilisation de la vanne autonome n'ont pas permis de placer un réservoir de mesure de condensats. C'est donc par estimation, en connaissant la température et la masse de la charge introduite ainsi que les pertes du bahut (voir 4.2) que nous avons déterminé le COP_s .

$$COP_s = \frac{Q_{S,stock} + Q_{L,stock} + Q_{charge} + Q_{S,glace} + Q_{bahut}}{H \cdot S} \quad (2)$$

Nous devons parler ici d'estimation car nous ne connaissons pas la quantité de glace formée dans l'évaporateur : la relation (2) exprime le COP_s en prenant en compte les différentes formes d'énergie soutirées à l'évaporateur. La relation (3) est une forme simplifiée de (2) permettant d'estimer la limite inférieure du COP_s en ne prenant pas en compte l'énergie latente de congélation du stock d'eau ainsi que l'énergie sensible de refroidissement du stock de glace.

$$COP_s \geq COP_{estim} = \frac{Q_{evap}}{HS} = \frac{Q_{S,stock} + Q_{charge} + Q_{bahut}}{H \cdot S} \quad (3)$$

Les coefficients de performance estimés avec la relation (3) se situent entre 0.10 et 0.15 durant le mois de septembre 2002 à Ouagadougou. Une mesure selon (2) donnerait des valeurs supérieures comme calculées dans le tableau 4. Nos résultats sont donc bons en comparaison de ceux publiés dans la littérature, se situant autour de 0.10-0.12 [5].

Hypothèse de glace formée chaque nuit en régime permanent ($Q_{L,stock} \neq 0$) et majoration du COP obtenue par calcul à partir d'un $COP_{estim} = 0.10$:

$$Q_{L,stock} = m_{gl} \cdot L_{gl} \quad (4)$$

$COP_{estim} = 0.10$		$COP_{estim} = 0.15$	
$m_{gl}[kg]$	COP_s	$m_{gl}[kg]$	COP_s
1	0.12	1	0.17
2	0.14	2	0.19
4	0.15	3	0.20

TAB. 4 – Hypothèse de stock de glace formé et COP_s correspondant à partir de $COP_{estim} = 0.10$ et $COP_{estim} = 0.15$

4.3.2 Programme de simulation

Un programme de simulation décrit dans [13] a été développé en collaboration avec le LIMSI-CNRS pour modéliser le comportement des réfrigérateurs solaire à adsorption, sous différents climats. Un fichier météo journalier, mensuel ou annuel, est introduit dans le programme, ainsi que les paramètres physiques et géométriques des matériaux du capteur et du condenseur. Le programme simule l'évolution des températures et des pressions du cycle pour la période demandée, puis un COP_s est calculé. Les comportements de la charge et de l'évaporateur ne sont pas simulés ; les résultats sont donnés en terme de volume de liquide condensé.

Les résultats obtenus en comparaison avec les mesures réalisées in situ sont bons mais peuvent varier suivant la configuration de la simulation. Cet outil n'est pas capable d'annoncer un COP réel, mais il répond très bien à la comparaison de différentes options pour la construction du capteur et de l'adsorbeur, à partir de données météorologiques et des caractéristiques thermiques et mécaniques des matériaux.

La figure 13 montre un exemple de simulation réalisée avec le logiciel. Les courbes en traitillé proviennent de la simulation et les courbes continues, de la mesure. Les données météorologiques enregistrées sur place ont été introduites dans l'outil de simulation afin de calculer l'évolution de la pression et des températures dans le réfrigérateur et de comparer les résultats avec les mesures faites sur place.

Ouagadougou 18.09.02 : Comparaison entres mesures et simulations du proto CH
(avec linéarisation entre 7h et 9h)

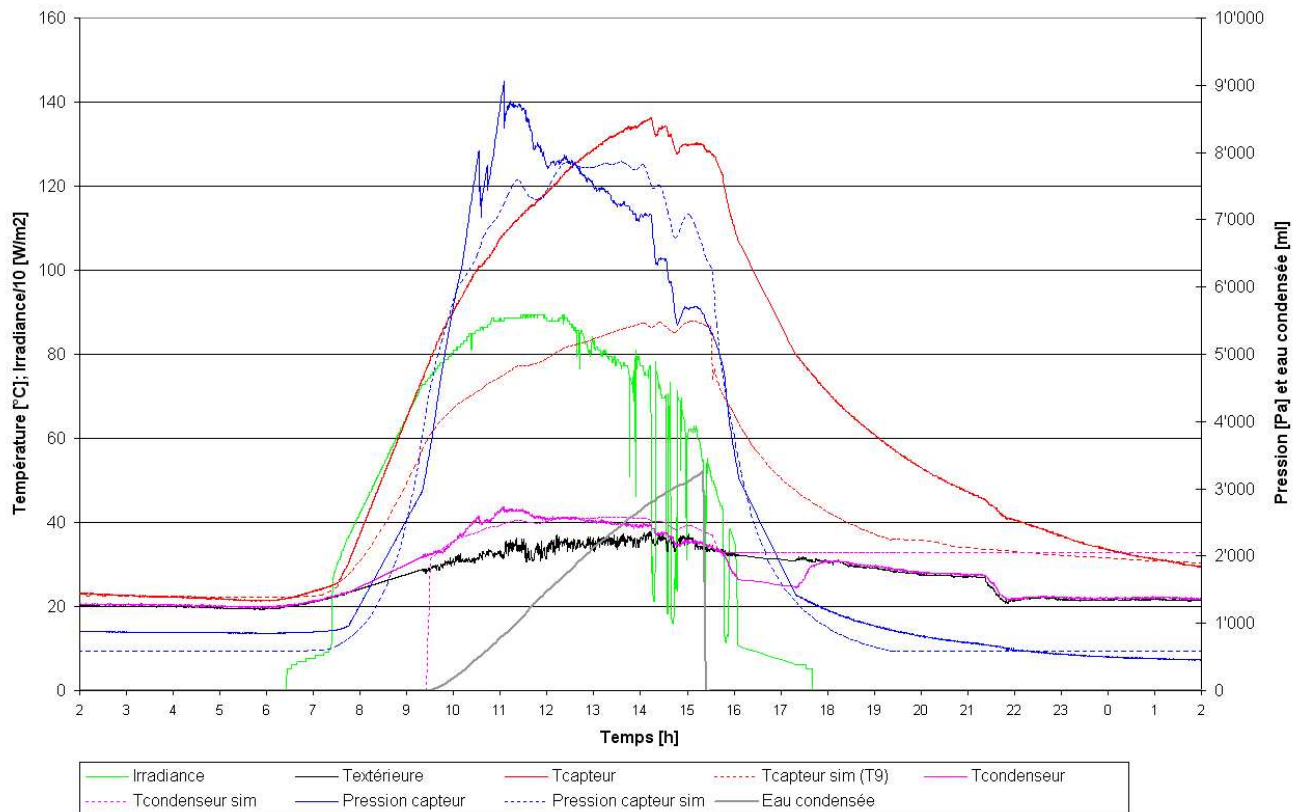


FIG. 13 – Comparaison entre simulation et mesures.

4.3.3 Construction d'un équivalent africain

En parallèle avec les mesures effectuées sur le prototype suisse au Burkina Faso, la construction d'un second réfrigérateur a été menée pour permettre aux acteurs Africains du projet d'assimiler la technique en se confrontant directement aux problèmes constructifs liés à ce type d'appareils.

Ce nouveau prototype a été réalisé avec des matériaux disponibles sur place, à l'exception de l'adsorbant pour lequel des tubes importés de Suisse ont été utilisés. Les soudures ont été faites par un ouvrier local qui avait suivi une formation en Suisse durant l'année 2001. Les caractéristiques de ce modèle sont identiques au réfrigérateur compact suisse, à quelques exceptions près : l'utilisation d'isolants traditionnels a réduit le volume de réfrigération à 60 litres pour 1m² de surface de captage, la masse totale est plus élevée en raison de l'utilisation d'acier pour la construction de tous les éléments structurels.

Le bilan de cette expérience est très positif car un réfrigérateur a pu être entièrement construit sur place et les différents problèmes rencontrés ont pu être résolus et discutés sur un cas réel.

Durant la fin de la mission de transfert technique, le prototype africain a pu être mis en service et son fonctionnement vérifié. Cependant, par manque de temps, aucune mesure n'a pu être réalisée à ce jour. Afin de continuer l'appropriation de la technique, un second prototype africain sera réalisé sur place dans le début de l'année 2003. Dans le futur proche, un atelier de production de réfrigérateurs solaires devrait voir le jour au Burkina Faso.



FIG. 14 – Premier réfrigérateur solaire à adsorption entièrement fabriqué au Burkina Faso

5 Étude de marché et coût

Deux études ont été confiées par le LESBAT et le CEAS à une société de consulting suisse. L'une est une analyse générale du marché des réfrigérateurs solaires, et l'autre une étude du marché potentiel des réfrigérateurs solaires au Burkina Faso.

Un consultant burkinabé a été chargé de l'étude dans son pays. Il a visité la plupart des centres de santé, les responsables de programmes élargis de vaccination, les ministères, ainsi que les structures de conservation de produits agro-alimentaires.

Les résultats de l'étude sont intéressants et font ressortir un vif intérêt pour ce produit, notamment de la part de certains ministères. L'intérêt est d'autant plus marqué que ce pays n'a pas d'accès côtier, raison pour laquelle l'électricité et les énergies fossiles sont parmi les plus coûteuses de la sous-région.

Il ressort de l'étude qu'un coût de réfrigérateur solaire à adsorption compris entre CHF 1500.- et CHF 2500.- serait acceptable. Un marché potentiel de plusieurs centaines de tels réfrigérateurs est envisageable au Burkina Faso les 2 à 3 prochaines années. La production de ces réfrigérateurs par un atelier spécialisé, dans ce pays africain, permettrait de garantir une main d'oeuvre qualifiée, locale, tout en diminuant de manière importante les coûts de fabrication. D'autre part nous pensons que le gouvernement ou des programmes d'aide au développement, par exemple au travers de subventions, pourraient offrir un soutien intéressant pour permettre au réfrigérateurs solaires de s'implanter sur le marché et ainsi créer de nouveaux emplois.

6 Avantages techniques du réfrigérateur solaire à adsorption

L'étude comparative, effectuée entre les différentes filières de réfrigération solaire (système à adsorption et système photovoltaïque), réalisée en l'an 2000 dans notre laboratoire [11], permet de mettre en évidence les points suivants :

Le coefficient de performance COPs (énergie "froid" produite sur énergie solaire captée §4.3.1) de nos systèmes à adsorption se situe aux alentours de 0.10-0.15. Le rendement seul des panneaux photovoltaïques se situe entre 10 et 12 %. C'est dire qu'en considérant la totalité de la chaîne photovoltaïque (batteries, régulateur de charge, ...), le COPs de ces systèmes ne peut être supérieur à 0.10. Les systèmes à adsorption sont donc plus performants.

Les systèmes à adsorption ne possèdent aucune pièce en mouvement contrairement aux réfrigérateurs conventionnels alimentés par des panneaux photovoltaïques. L'usure est moindre pour les systèmes à adsorption.

Les batteries, indispensables au fonctionnement des systèmes photovoltaïques lors des périodes non ensoleillées, sont source de problèmes : leur durée de vie est limitée et leur évacuation "écologique" n'est pas garantie dans les pays pour lesquelles ces systèmes sont prévus.

La technologie et les matériaux utilisés dans les systèmes à adsorption est à la portée d'une main d'oeuvre qualifiée dans les pays intéressés par leur utilisation. L'entretien sur place peut être garanti. Par contre, la technologie utilisée dans les systèmes photovoltaïques implique un recours aux pays industrialisés en cas de panne d'un composant.

Le réfrigérateur solaire à adsorption ne craint pas les conditions climatiques extrêmes des pays du sahel, à l'exception de la poussière omniprésente dans ces pays, qui impose de nettoyer régulièrement le capteur (même nécessité pour les systèmes photovoltaïques dans ces mêmes pays).

7 Conclusion

Ce mandat nous a permis de concevoir le premier prototype de réfrigérateur solaire à adsorption de Suisse, prototype s'approchant d'un produit fini industrialisable. La mise au point de la vanne autonome 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.

Ce prototype a pu être testé dans le Sahel, en conditions climatiques réelles. Nous avons pu estimer des coefficients de performance se situant entre 0.10 et 0.15. Ces résultats sont très encourageants pour ce type de climat, sachant que la température élevée durant la journée a tendance à faire chuter les performances des cycles de production de froid. Des mesures durant la saison chaude en Suisse devront donner des résultats de comparaison intéressants, ils seront entrepris durant l'été 2003 à Yverdon-les-Bains.

La vanne autonome a fait preuve de son bon fonctionnement sur plusieurs mois d'activité, aucun dysfonctionnement n'a été observé.

La miniaturisation de tels réfrigérateurs s'est montrée tout à fait réalisable. Les effets de bords liés à la réduction de taille se sont avérés maîtrisables et leur importance négligeable. Toutefois nous estimons que la machine construite représente la limite inférieure atteignable du point de vue de la taille des différents éléments.

L'étroite collaboration avec le CEAS International concrétisée par le transfert de technique vers le Sud a permis d'inscrire ce projet dans le cadre de l'aide au développement durable. La fabrication d'un réfrigérateur semblable en Afrique a démontré que cette technique est tout à fait accessible et appropriable par des pays à faible niveau de développement technique.

Ce prototype comporte différentes sophistications techniques empruntées aux prototypes réalisés jusqu'à maintenant dans nos laboratoires et ayant pour but d'atteindre les meilleurs niveaux de

performances. Toutefois la démarche n'est pas la même pour la technique destinée à être diffusée dans des pays à faible niveau de développement. Il est alors prévu dans le futur proche d'étudier l'influence de chaque optimisation introduite jusqu'ici sur le réfrigérateur et de trouver un compromis entre coûts de fabrication et performances.

8 Remerciements

- Nous remercions l'Office fédérale de l'énergie pour le soutien financier accordé.
- Nous remercions également la direction de la HES-SO / EIVD qui encourage nos développements de la filière de réfrigération solaire à adsorption et met à notre disposition les moyens que requiert ces développements.
- Enfin, nous associons à nos remerciements la Maison SS-Wancor AG pour le don des panneaux PIV, la maison Énergie Solaire SA à Sierre (Suisse), l'Atelier Borghini à Lausanne (Suisse), ainsi que toutes les personnes ayant participé de près ou de loin au projet.

9 liste des symboles

P_e :	Pression dans l'évaporateur [Pa]
P_c :	Pression dans le condenseur [Pa]
T_e :	Température de l'évaporateur [K]
T_i :	Température initiale du l'adsorbent (en début de journée) [K]
T_c :	Température du condenseur [K]
T_h :	Température maximale de l'adsorbent [K]
Q_{evap} :	Energie soutirée à l'évaporateur [kWh]
H :	Irradiation (énergie reçue par unité de surface) [$\frac{kWh}{m^2}$]
S :	Surface du capteur [m^2]
c_{eau} :	Chaleur massique de l'eau [$\frac{J}{kgK}$]
V :	Volume d'eau condensé [l]
m_{gl} :	Masse du stock de glace [kg]
ρ :	Masse volumique de l'eau [$\frac{kg}{m^3}$]
L_{eau} :	Chaleur latente d'évaporation de l'eau [$\frac{J}{kg}$]
L_{gl} :	Chaleur latente de fusion de la glace [$\frac{J}{kg}$]
T_{res} :	Température du réservoir [K]
T_{evap} :	Température de l'évaporateur [K]
$Q_{S,stock}$:	Énergie sensible de refroidissement du stock d'eau [kWh]
$Q_{L,stock}$:	Énergie latente de congélation de tout ou d'une partie du stock d'eau [kWh]
Q_{charge} :	Énergie sensible de refroidissement de la charge [kWh]
$Q_{S,glace}$:	Énergie sensible de refroidissement du stock de glace [kWh]
Q_{bahut} :	Pertes totales journalières du bahut [kWh]

Références

- [1] Chinnappa J.C.V. Performance of an intermittent refrigerator operated by a flat-plate collector. *Solar Energy*, 6 :143-150, 1962.
- [2] Exell R.H.B. and Kornsakoo S. The development of a solar powered refrigerator for remote village. In *Solar World Forum, proc I.S.E.S. Congress, 1981*, pages 1049-1053, Brighton, England, 1982.
- [3] Pons M. and Guillemot J.J. Design of an experimental solar-powered, solid-adsorption ice maker. *J. Solar Energy Eng., ASME Trans.*, 108 :332-337, 1986.
- [4] Pons M. and Grenier. Experimental data on a solar-powered ice maker using activated carbon and methanol adsorption pair. *J. Solar Energy Eng., ASME Trans.*, 109 :303-310, 1987.
- [5] Grenier Ph. Guillemot J.J. Meunier F. and Pons M. Solar powered solid adsorption cold store, *J. Solar Energy Eng., A.S.M.E Trans.*, 110 :192-197, 1998.
- [6] Meunier F. Sorption solar cooling. *Renewable Energy*, 5(1) :422-429, 1994.
- [7] Wang R.Z. Li M. Xu Y.X. and Wu J.Y. An energy efficient hybrid system of solar powered water heater and adsorption ice-maker. *Solar Energy*, 68(2) :189-195, 2000.
- [8] 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.
- [9] Meteotest, Meteoronorm version 3.0 global meteorological database for solar energy and applied climatology, CH-3012 Bern, Switzerland, 1997.
- [10] Hochleistungs-Wärmedämmung HLWD, Forschungsprogramm "Rationelle Energienutzung in Gebäuden", BFE, 2000.
- [11] Buchter F. Hildbrand C. Dind Ph. Comparaison de filières de réfrigération solaire, *Rapport final CCE HES-SO*, Décembre 2000.
- [12] Hildbrand C. Dind Ph. Buchter F. and Pons M. A new solar powered adsorption refrigerator with high performances. In *Eurosun 2002, ISES Europe Solar Congress, Bologna, Italy*, June 23-26 2002.
- [13] Buchter F. Modélisation d'un réfrigérateur solaire à adsorption. *Université de Fribourg, Switzerland*, juillet 2002.
- [14] Zhu D. S. and Wang S. W. (2002), Experimental Investigation of Contact Resistance in Adsorber of Solar Adsorption Refrigeration, *J. Sol. energy Vol. 73, No. 3, pp. 177-185*, 2002.

Annexes

1. Etude de marché, Réfrigérateur solaire (Etude financée par le fond stratégique de la HES-SO)
2. Etude de marché d'un réfrigérateur solaire au Burkina Faso (Etude financée par le fond stratégique de la HES-SO et le CCSO)