
Programme de recherche
Solaire actif • Réfrigération

Rapport final

Pré-étude de petites unités de froid solaire thermique

Elaboré par :

MM. F. Buchter, Y. Pfister, O. Renoult
Ecole d'ingénieurs du Canton de Vaud
1, rte de Cheseaux
1400 Yverdon-les-Bains

Chef de Projet : **Ph. Dind**

Sur mandat DIS C N°56948 de :

l'office fédéral de l'énergie
3003 - Berne

Avril 1998

Bibliographie	p.1
1 Abstract	p.2
2 Résumé	p.2
3 Introduction	p.2
4 Marchés national et international de la réfrigération solaire	p.3
4.1 Types de marchés et exigences	p.3
4.2 Marché de la climatisation (10° à 20°C)	p.3
4.3 Marché de la réfrigération (0 à 10°C) et de la congélation (-20 à 0°C)	p.3
5 Systèmes existants testés à ce jour	p.3
5.1 Photovoltaïque	p.4
5.2 Sorption continue (production du froid en phase avec l'apport énergétique)	p.4
5.3 Sorption intermittente simple effet	p.4
5.4 Sorption solide pseudo continue à régénération de chaleur	p.5
5.5 Cycles ouverts fonctionnant en continu	p.5
6 Coût estimatif des solutions	p.6
7 Tableau récapitulatif des principales caractéristiques des systèmes testés	p.6
8 Critères influençant le choix d'un système	p.8
8.1 Critères de première priorité :	p.8
8.2 Critères de seconde importance :	p.8
9 Objectifs à atteindre	p.8
10 Quelques solutions et schémas de principe	p.9
10.1 Réfrigération par une installation solaire d'un local dans un alpage isolé du réseau électrique	p.9
10.2 Réfrigérateur solaire thermique autonome.	p.10
10.3 Installations solaires de climatisation.	p.11
11 Synthèse et conclusions	p.13
12 Annexes	p.14

Bibliographie

- [1] Basler & Hofmann , Ganzjährige Nutzung der Solarenergie in Bürogebäuden, BEW 1995 N° ENET 9201131.

- [2] Dr. Jean-Ph. Borel, Bilan et perspectives de la réfrigération solaire, Office fédéral de l'énergie 1995, projet 2732 N° ENET 9300531.

- [3] F. Buchter, Petites unités de réfrigération solaire, Travail de diplôme 1997 EINEV.

- [4] R.Z. Wang, Y. Teng, A Continuous Heat Regenerative Adsorption Refrigerator Using Spiral Plate Heat Exchanger as Adsorbers, Ab-Sorption 96 proceedings Vol. II, pp. 587-594, 1996.

- [5] N.K. Bansal, J. Blumenberg, H.J. Kavasch, T. Roettinger, Performance Testing and Evaluation of Solid Absorption Solar Cooling Unit. Solar Energy Vol. 61, No 2, pp. 127-140, 1997.

- [6] T. Brisbane, G. Cler, G. Löf, Performance of a Solar Dessicant Cooling System, Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 110, pp. 165-171, August 1988.

1 Abstract

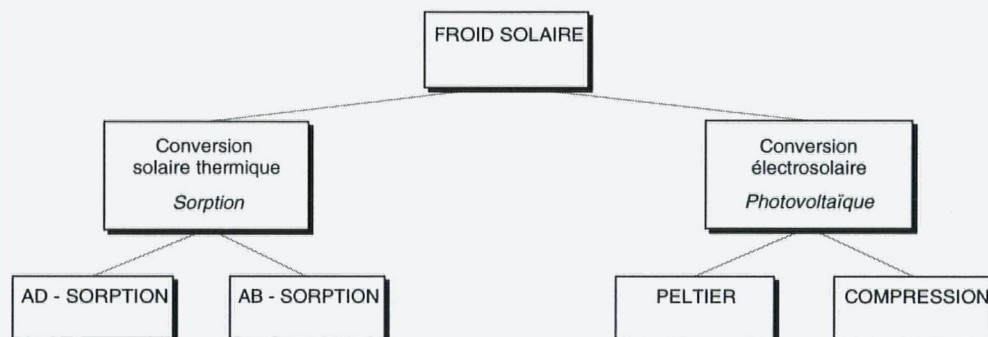
This paper presents the categories of solar cold production techniques and most of the systems tested and used until today. Thermal sorption systems are particularly studied as an alternative solution to electrosolar systems. A table summarizes the performances and the utilization range of the different systems. This table allows the evaluation of the technical level and therefore, indirectly, the cost of each system. We show a first approach of the different markets for the solar thermal refrigeration. Finally a few cases have been studied and developed more in details for both refrigeration and climatisation.

2 Résumé

Ce texte présente les grandes familles de systèmes de production de froid solaire utilisés et testés à ce jour. L'accent est mis sur l'étude des systèmes thermiques à sorption comme alternative aux systèmes électrosolaires. Un tableau récapitulatif contenant un maximum d'informations a été réalisé. Ce tableau permet de situer les performances ainsi que les domaines d'utilisation des différentes installations. Il donne également la possibilité d'évaluer le niveau technique requis par chaque système et d'en déduire indirectement leur coût. Une première approche des différents marchés potentiels pour la réfrigération solaire thermique est effectuée. Pour terminer, quelques solutions adaptées à différents cas d'utilisation sont développées plus en détail tant pour la réfrigération que pour la climatisation.

3 Introduction

Les installations de réfrigération solaire se divisent actuellement en deux grandes familles, utilisant soit la conversion thermique soit la conversion électrique du rayonnement solaire :



1. La première famille, «classique», comprend principalement les systèmes à compression et les systèmes à effet Peltier. On observe dans cette voie une certaine stagnation des performances due à plusieurs facteurs :
Le rendement des capteurs photovoltaïques du commerce n'augmente que faiblement depuis de nombreuses années (rendement de 10-12%) ; et le COP de fonctionnement des installations frigorifiques à compression ne dépasse guère la valeur 3.
2. La seconde famille quant à elle, connaît un regain d'intérêt considérable depuis quelques années. Le développement de ces systèmes à sorption tient principalement à trois raisons :
 - La première est l'interdiction des CFC et l'interdiction prochaine des HFC.
 - La seconde est justement la stagnation des performances des installations photovoltaïques.
 - La troisième est la réduction de la consommation électrique pour la climatisation.

On peut dès lors penser que les systèmes thermiques à sorption pourraient être amenés à jouer un rôle de plus en plus important au sein du marché de la réfrigération classique et de la réfrigération solaire. Il faut cependant noter que si les systèmes électrosolaires peuvent tous fonctionner en phase avec l'apport énergétique solaire (et donc avec la demande de froid), il n'en va pas de même pour tous les systèmes à sorption. De fait, on trouve deux types de fonctionnements :

- Les systèmes fonctionnant "au fil du soleil", en phase avec la demande.
- Les systèmes intermittents qui "produisent" le froid durant la nuit pour le restituer le jour.

Ces deux familles de production de froid correspondent à deux types bien distincts de capteurs solaires, photovoltaïques ou thermiques, de ce fait tant leur gestion que leurs éléments constitutifs et leurs rendements respectifs diffèrent grandement.

4 Marchés national et international de la réfrigération solaire

4.1 Types de marchés et exigences

La définition d'un marché concernant le froid en général (classique ou solaire) est quelque chose d'assez délicat. De manière générale, on peut distinguer trois domaines d'utilisation; la climatisation, la réfrigération et la congélation, ces domaines correspondent bien souvent à des marchés distincts dépendants assez étroitement de la situation géo-économique d'un pays.

4.2 Marché de la climatisation (10° à 20°C)

Ce marché vise tant les secteurs privé que commercial et industriel; il concerne principalement les deux types de pays suivants :

1. Pays développés où la demande en climatisation est élevée (USA, Japon, Israël) avec des pointes de consommation électrique en été dues au fonctionnement des climatiseurs.
2. Pays développés ou en voie de développement où la climatisation est en expansion avec l'accroissement du niveau de vie (Europe du sud, Asie, bassin méditerranéen, etc...).

4.3 Marché de la réfrigération (0 à 10°C) et de la congélation (-20 à 0°C)

Ce marché concerne les pays suivants :

1. Pays en voie de développement ou peu développés, où bien souvent, malgré l'extension des réseaux électriques, de nombreuses régions extra-urbaines restent privées de courant électrique. La demande de ces pays est plutôt orientée vers la réfrigération pour la conservation de denrées alimentaires ou le stockage de médicaments. Le marché de la réfrigération vise des besoins vitaux (conservation de médicaments et aliments), alors que la climatisation fait plutôt office de produit de luxe de seconde importance pour ces contrées.
2. Pays développés à climat tempéré ou continental, dans ces pays, c'est plutôt le marché commercial et industriel qui est prédominant pour un éventuel développement de la réfrigération solaire.

Dans ces pays la climatisation n'est pas indispensable par la nature du climat. Cependant avec l'utilisation de plus en plus importante des systèmes de chauffage solaire, la récupération des surplus thermiques durant la saison chaude ouvre des perspectives intéressantes de développement pour les techniques de froid solaire.

5 Systèmes existants testés à ce jour

Il s'agit ici d'un éventail de plusieurs solutions testées toutes dans le domaine du froid solaire. Les points suivants donnent le principe de base utilisé par chaque système et les performances sont décrites dans le tableau du point 7.

5.1 Photovoltaïque

⇒ Systèmes à compression

Ces systèmes utilisent le cycle traditionnel : compression, condensation, détente, évaporation.

⇒ Systèmes à effet Peltier

Ces systèmes sont basés sur le phénomène de la thermoélectricité : un effet pompe à chaleur entre deux sources est obtenu si l'on fait circuler un courant électrique à travers deux conducteurs (ou semi-conducteurs) en série.

5.2 Sorption continue (production du froid en phase avec l'apport énergétique)

⇒ Absorption continue GAX avec pompe de solution

Ces systèmes utilisent en fait l'absorption comme phénomène permettant de remplacer la compression traditionnelle d'une machine frigorifique normale, qui se fait en phase gazeuse, par une compression en phase liquide à l'aide d'une pompe. L'énergie électrique requise pour la compression s'en trouve fortement diminuée et le principal apport énergétique est assuré par une source thermique. Le GAX (Generator Absorber heat eXchange) est en fait un récupérateur de chaleur qui restitue la chaleur d'adsorption au niveau du générateur (désorption).

⇒ Absorption continue sans pompe de solution avec «pompe à bulles»

Ce type de machine utilise en fait le phénomène d'absorption comme "pompe à bulles", ce qui permet de se passer de pompe de solution et le froid proprement dit est réalisé par le système classique de condensation-détente-évaporation d'un fluide frigorigène. Il n'est donc théoriquement plus nécessaire d'avoir recours à l'électricité pour le fonctionnement de telles unités (si l'on excepte la régulation).

⇒ Absorption-diffusion (cycles à trois fluides et pompe à bulles)

Ce type d'installation, utilise lui aussi le phénomène d'absorption comme pompe à bulles, et c'est le phénomène d'évaporation et de diffusion d'un gaz dans un autre qui produit le froid.

5.3 Sorption intermittente simple effet

⇒ Solide à adsorption

Ces cycles utilisent pour la production du froid le phénomène d'adsorption à proprement parler. La principale différence par rapport aux cycles précédents est que le froid est produit durant la nuit; il doit par conséquent être stocké. On dit que le système est réfrigéré par intermittence car le froid est produit durant la nuit. On utilise ici le phénomène d'adsorption d'un fluide en phase gazeuse par un corps solide adsorbant microporeux (par exemple: charbon actif, zéolithe). Lors d'applications solaires, le capteur plan sert directement de générateur-adsorbant.

⇒ Solide à absorption

Pour ce qui est de leur principe de fonctionnement, ces systèmes sont identiques en tous points, aux systèmes à adsorption solide intermittents. Seule la nature des produits utilisés est différente : les sorbants sont des composés à réaction chimiques.

⇒ Liquide à absorption

Le principe reste identique aux autres systèmes intermittents, mais la conception du capteur est très différente de par l'utilisation d'un absorbant liquide. Deux éléments majeurs sont à ajouter au système de base : le rectificateur ainsi qu'un absorbeur «chimique» (en effet le capteur plan n'a plus ici qu'un rôle de générateur).

5.4 Sorption solide pseudo continue à régénération de chaleur

Il s'agit là d'un des systèmes les plus récents (leur étude a commencé au début des années 90). Ce cycle n'a jamais été testé avec des panneaux solaires, mais le domaine de température (80-90°C) utilisé par certaines études montre que son application au domaine solaire est envisageable [4]. Le principe se base sur l'utilisation de deux cycles intermittents simples en opposition de phase (pendant que le premier désorbe, l'autre adsorbe), ce qui permet une production du froid «au fil du soleil» en inversant périodiquement les phases d'adsorption-désorption. De plus, les performances sont améliorées par rapport au cycle simple par récupération de l'énergie d'adsorption.

5.5 Cycles ouverts fonctionnant en continu

⇒ Dessiccation solide

On utilise ici des roues à dessiccation, qui adsorbent de l'eau d'un côté et sont régénérées de l'autre. Ces systèmes utilisent le phénomène d'adsorption (ou absorption) pour assécher un flux d'air. L'air est ensuite refroidi par un échangeur de chaleur avant d'être refroidi par évaporation directe d'eau dans ce flux d'air (refroidissement dit «adiabatique»).

⇒ Dessiccation liquide

C'est aussi le phénomène d'absorption pour assécher un flux d'air qui est utilisé, mais l'absorbant est liquide (par conséquent on n'utilise plus de roues). Le principe de production du froid est identique à celui utilisé par la dessiccation solide.

⇒ Cycles à absorption ouverts : OCAR (Open Cycle Absorption Refrigeration system)

Le concept de cycle ouvert à absorption est de régénérer la solution concentrée en fluide frigorigène par évaporation de ce dernier dans l'atmosphère au lieu de le récupérer dans un condenseur. L'eau qui fait office de réfrigérant est donc soutirée au réseau de distribution, puis elle est absorbée par une solution absorbante (LiBr ou LiCl) en soutirant de l'énergie à un fluide caloporteur à réfrigérer. Elle est ensuite désorbée et évaporée dans l'air en ruisselant sur un absorbeur thermique.

⇒ Cycle hybride ouvert à absorption (OCAR) et dessiccation liquide

Dans les climats très humides avec une température ambiante élevée de jour comme de nuit, on constate un très mauvais fonctionnement de certaines installations à sorption [5]. Pour améliorer les performances de ces installations on combine un cycle ouvert OCAR à un cycle à dessiccation liquide. C'est le système à dessiccation qui refroidit l'air ambiant, mais l'évaporateur du cycle OCAR permet de diminuer la température de retour de la solution qui passe dans le système à dessiccation. Ceci favorise l'absorption en refroidissant l'absorbeur (chimique) du système à dessiccation.

⇒ Ejection de vapeur (SFVER)

Ces systèmes utilisent le phénomène d'entraînement et compression d'une vapeur par la détente d'une autre à haute pression pour créer la circulation et la différence de pression nécessaire au fonctionnement d'un cycle frigo traditionnel. Avantage de ce principe : il permet de comprimer le fluide frigorigène sous forme liquide, ce qui demande moins d'énergie électrique. En contrepartie, c'est de l'énergie thermique qui est principalement fournie au système pour permettre l'évaporation des vapeurs de réfrigérant.

6 Coût estimatif des solutions

Pour des installations à compression avec capteurs photovoltaïques, il est relativement aisé d'établir un coût approximatif de construction puisque tous les éléments sont commercialisés, cependant il est très difficile d'en faire de même pour les systèmes solaires thermiques car, pour la plupart des cas, il s'agit de prototypes. Les principales études de coût d'installations à sorption ont été réalisées pour les systèmes à adsorption continue sans pompe [1,2].

Il n'est pas simple d'évaluer le coût de fabrication de chaque prototype en ne tenant compte que des prix de détail de chaque élément, mais il est encore plus difficile de donner un prix qui tiendrait compte d'une éventuelle fabrication industrielle en série.

Malgré tout, il est possible de se faire une idée des coûts relatifs des différents systèmes les uns par rapport aux autres en évaluant le niveau technique de chaque installation. La colonne «éléments techniques particuliers» a été insérée à cette intention dans le tableau 7 ; elle permet de donner un aperçu des principales caractéristiques techniques des installations et de voir par exemple si une installation devrait employer des capteurs évacués (plus chers) ou plans traditionnels, si le circuit sera simple avec peu d'éléments ou plus complexes avec différents éléments plus ou moins onéreux.

Enfin il ne faudra pas oublier de mettre en relation le «niveau technique» avec les performances en terme de COP du système, sans oublier les problèmes liés au stockage de l'énergie. Ces points sont relevés également dans une étude réalisée qui montre clairement pour une même machine frigorifique de très grandes différences de coûts en fonction des solutions techniques retenues (type et surface de capteurs, taille du stock, etc...) [1]. La liste des critères de choix d'une installation du point 1.6 peut également aider à mieux appréhender ces problèmes

7 Tableau récapitulatif des principales caractéristiques des systèmes testés

Pour une meilleure compréhension du tableau présenté à la page suivante, le COP et le COPS sont définis comme suit :

$$COP = \frac{Q_{th}}{Q_{fr}} \text{ (rapport entre l'énergie thermique reçue au générateur et l'énergie frigorifique produite)}$$

$$COPS = \frac{G_{sk}}{Q_{fr}} \text{ (rapport entre l'énergie solaire reçue dans le plan des capteurs et l'énergie frigorifique produite)}$$

Signification des exposants utilisés dans le tableau :

* : sans modifications des concentrations et des débits par rapport à un système avec brûleur à gaz)

: avec absorbants du type $SrCl_2-NH_3$ pour la réfrigération

Cycle	Congélation n (-40 à -20 °C)	Réfrigération n (-20 à 0 °C)	Climatisation n (0 à 20 °C)	Couples utilisés (Sorbant - sorbat)	Temp. générateur [°C]	COPS (COP)	Domaine de pressions [kPa]	Eléments techniques particuliers	Avantages	Inconvénients
Compression	X	X	X	R22, R12, etc...	PV	0.3-0.36 (2.5-3)	50-1000	- Compresseur - Batteries - Régulateur - Panneaux photovoltaïques	- Souplesse d'utilisation - Bon COPS - Eléments produits en grande série	- Batteries à renouveler (3-4 ans) - Composants chers (Capteurs, batteries, régulation)
Pelletier		X	X	-	PV	0.01-0.02 (0.1-0.2)	-	- Batteries - Régulateur - Panneaux photovoltaïques	- Eléments de froid peu encombrants - Pas de pièces en mouvement	- Très mauvais COPS - Puissance frigo limitée - Batteries à renouveler - Eléments, capteurs, et batteries chers
Absorption continue GAX avec pompe		X	X	LiBr - H ₂ O H ₂ O - NH ₃	70-120	0.25-0.4 (0.5-0.8)	5-70	- Pompe de solution + régulation - Circuit en dépression - Tour de refroidissement - Capteurs évacués ou plans	- Bon COP - Machines et capteurs commercialisés	- Que pour puissance frigo > 100kW - Consom. d'électricité pour pompe - Tour de refr. donc consommation d'eau
Absorption continue sans pompe		X	X	H ₂ O - NH ₃ LiBr - H ₂ O	60-100	0.25-0.3 (0.5-0.6)	5-70	- Circuit en dépression - Tour de refroidissement - Régulation - Capteurs évacués ou plans	- Pas de pièces en mouvement - Machines et capteurs commercialisés - Utilisation possible de capteurs plans à eau chaude	- Que pour puissance frigo > 400kW - Tour de refr. donc consommation d'eau - Utilisation de pompes pour circuit d'eau froide et la circulation dans les capteurs.
Absorption - diffusion		X	X	H ₂ -H ₂ O - NH ₃	105 145-195*	0.1-0.3	100-2500	- Circuit complexe sous haute pression - Capteurs évacués ou à concentration	- Totalelement autonome électriquement - Températures d'évaporateurs basses - Pas de pièces en mouvement	- Puissances limitées à 250w - Températures du générateur élevées avec une limite supérieure et inférieure - Hautes pressions et liquides dangereux
Solide intermittent à adsorption	X	X		AC - CH ₄ O, AC - NH ₃ zéolithe 13X- H ₂ O	70-110	0.1-0.2	5-70	- Circuit en dépression - Capteur générateur-adsorbant plan	- Circuit très simple - Pas de pièces en mouvement - Autonome électriquement et avec l'eau - Bon COPS à temp. générateur basse	- Cycle intermittent -> stock de glace - Capteurs non commercialisés au stade de prototypes
Solide intermittent à absorption		X	X	LiCl-CH ₃ NH ₂ SrCl ₂ -NH ₃	90-140	0.05-0.15	66-2000	- Circuit sous pression élevée - Absorbants composites - Capteurs évacués - Ev. capt. plans générateur-absorbants	- Pas de pièces en mouvement - Autonome électriquement et avec l'eau	- Cycle intermittent -> stock de glace - Capteurs non commercialisés au stade de prototypes - Temp. gén. élevée pour capteurs plans
Liquide intermittent à absorption		X	X	H ₂ O - NH ₃	70-120	0.1-0.2	50-1000	- Circuit sous pression élevée - Rectificateur - Capteur plan générateur - Absorbant (chimique) séparé	- Pas de pièces en mouvement - Autonome électriquement et avec l'eau	- Cycle intermittent -> stock de glace - Capteurs non commercialisés (protos) - Générateur séparé de l'absorbant - Circuit sous pression élevée.
Régénération de chaleur		X [#]	X	13X- H ₂ O	80-100	0.25-0.5 (0.5-1)	5-70 66-2000 [#]	- Circuit en dépression avec adsorbants - Circuit en surpression avec adsorbants - Pompe + régulation - Capteurs évacués ou plans à ec	- Très bon COPS - Utilisation possible de capt. plans à ec - Autonome avec l'eau (si refroidissement suffisant)	- Prototypes non commercialisés - Utilisation de pompes - Sorbants composites chers (à l'état de prototypes)
Dessiccation solide	X	X	X	silica gel-H ₂ O alumina gel-H ₂ O	60-80	0.4-0.6 (0.8-1.2)	100	- Echangeurs rotatifs - Pompes et laveurs d'air - Ventilateurs - Capteurs plans à ec	- Eléments commercialisés - Circuit ouvert à pression atm. - Très bon COPS et temp. gén. basse - Utilisation de capteurs plans à ec	- Utilisation de pompes et ventilateurs - Consommation d'eau - Uniquement pour la ventilation
Dessiccation liquide			X	LiBr - H ₂ O LiCl-H ₂ O	50-70	0.4-0.5 (0.8-1)	100	- Pompes et laveurs d'air - Ventilateurs - Capteurs plans à ec	- Très bon COPS et temp. gén. basse - Circuit ouvert à pression atm. - Utilisation de capteurs plans à ec	- Utilisation de pompes et ventilateurs - Consommation d'eau - Uniquement pour la ventilation - Absorbant (chim.) à l'état de prototype
OCAR			X	LiBr-H ₂ O, LiCl-H ₂ O LiZnCl-H ₂ O	50-70	0.1-0.45	100	- Circuit en partie en dépression - Pompe + régulation - Capteurs plan ouverts à ruissellement	- Stockage d'énergie chimique - Temp. gén. basse - Capteurs de fabrication simple	- Utilisation de pompes - Consommation d'eau - Uniquement pour ventilation - Capteurs à l'état de prototypes
OCAR + dessiccation			X	silica gel-H ₂ O + LiBr - H ₂ O	65	0.14 (0.27)	100	- Circuit en partie en dépression - Pompes + laveurs d'air - Ventilateurs - Capteurs plans ouverts à ruissellement	- Bon COPS et temp. gén. basse pour zones humides - Capteurs de fabrication simple	- Utilisation de pompes et ventilateurs - Consommation d'eau - Uniquement pour ventilateurs - Capteurs à l'état de prototypes
SFVER		X		R134a, H ₂ O	80	0.12-0.16	190-1400	- Pompe - Circuit sous pression élevée - Tuyère d'éjection	- Utilisation de capteurs plans à ec - Températures d'évap. assez basses	- Utilisation de pompes, régulation et ventilateurs

8 Critères influençant le choix d'un système

8.1 Critères de première priorité :

- *Température de la source thermique* : elle détermine directement quels sont les cycles qui seront susceptibles de fonctionner avec des capteurs solaires d'un type donné (plan, évacué, à concentration, etc...). Les capteurs plans sont moins chers que les capteurs évacués, mais ces derniers permettent de maintenir une température de générateur plus élevée. La concentration est uniquement réservée aux très hautes températures et elle demande en général un système de poursuite du soleil.
- *Température de l'évaporateur* : elle est déterminante quant à la possibilité de réaliser de la climatisation, de la réfrigération ou de la congélation. Ceci influence directement le choix du fluide frigorigène donc de l'ad- ou ab-sorbat.
- *Le scénario temporel de la production de froid* : selon que la machine doit produire le froid à n'importe quel instant (à l'instar d'une machine à compression), au fil du soleil ou de façon intermittente (de nuit par exemple), le système choisi sera différent.

8.2 Critères de seconde importance :

- *Le mode de stockage de l'énergie* : cette dernière peut être stockée sous forme de "chaleur" ou de "froid". Le mode de stockage est généralement déjà déterminé par la température de l'évaporateur ou par le scénario temporel de la production du froid. Dans certains cas (OCAR ou d'une certaine façon la régénération de chaleur) un stock d'énergie sous forme chimique peut être réalisé, ce qui élimine le problème des pertes thermiques.
- *Indépendance énergétique* : ce critère est lié à l'autonomie totale ou partielle de l'installation par rapport au réseau électrique, par rapport à un apport thermique, ou encore à un réseau d'eau.
- *Puissance frigorifique requise* : ce point concerne surtout les systèmes déjà commercialisés. Par exemple certaines machines type GAX ou absorption continue sans pompe, ne sont pas commercialisées en-dessous de 50 kW de puissance frigorifique, alors que pour des installations à absorption-diffusion il n'existe pas d'installations de plus de 250W. Mais dans le cas de prototypes, rien ne limite a priori la puissance frigorifique.
- *Fiabilité, simplicité et entretien* : une des caractéristiques les plus intéressantes des systèmes à sorption est justement le fait qu'ils ne possèdent pas ou peu de pièces en mouvement; les circuits des systèmes intermittents sont généralement très simples. Selon la nature des produits utilisés des problèmes de corrosion peuvent se présenter.
- *Toxicité et nuisances* : cet aspect peu ou pas évoqué dans la littérature est important, car si les systèmes à sorption n'utilisent pas de CFC ou de HFC, ils utilisent toutefois des produits tels que l'ammoniac, toxique, ou d'autres produits explosifs ou inflammables tels que l'hydrogène ou le méthanol. L'aspect dépression ou surpression du circuit est important pour savoir s'il y aura une infiltration (pollution du système) ou une fuite de produit (pollution de l'environnement).

9 Objectifs à atteindre

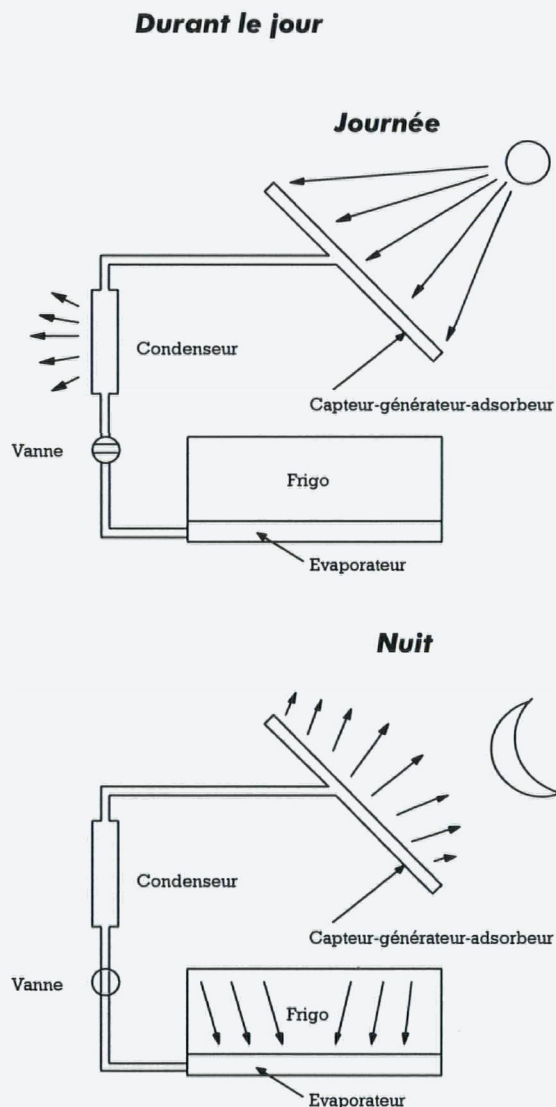
Conformément au cahier des charges de notre mandat, nous avons jeté les bases de petites unités de réfrigération solaire thermique de la gamme comprise entre 1 et 10kW. L'objectif est d'une part de présenter une alternative aux frigos à compression alimentés par systèmes électrosolaires, dont l'électronique est souvent le maillon délicat dans les pays à faible infrastructure technologique. D'autre part, les unités de réfrigération pourront à l'avenir être combinées, dans nos pays, aux installations de chauffage solaire thermique présentant des excédents d'énergie-chaleur en été.

10 Quelques solutions et schémas de principe

10.1 Réfrigération par une installation solaire d'un local dans un alpage isolé du réseau électrique

Une pré-étude de petites unités de réfrigération solaire a été réalisée pour une cave à fromage de 30 m³ à réfrigérer entre 12 et 14°C utilisée pendant les mois chauds d'été [3]. Un système à adsorption solide intermittent (capteur-générateur-adsorbeur, stock de glace) a été comparé à un système électrosolaire.

Pour un tel cas isolé un système à adsorption solide intermittente semble particulièrement adapté; la figure 1 explique le principe de fonctionnement des systèmes intermittents à adsorption. Un appoint électrique fourni par un panneau photovoltaïque et une batterie serait nécessaire pour entraîner un ventilateur et alimenter une régulation. L'installation frigorifique est très simple, sans pièces en mouvement, donc fiable. De plus, le système possède un bon COPS. La variation de la surface de capteurs en fonction de la capacité du stock tampon est donné en annexe 1.



Le matin, le charbon actif qui se trouve dans le capteur a une concentration élevée en méthanol. On ferme la vanne, ce qui ne laisse en liaison que le condenseur et le capteur. Le soleil, durant la journée chauffe le capteur et le charbon actif, ce qui fait augmenter la pression et la température du gaz dans le circuit. Le condenseur se trouve, lui, à une température proche de celle ambiante. La pression augmente donc jusqu'à ce qu'elle atteigne la pression de saturation à la température du condenseur. A cet instant le méthanol condense et va s'accumuler au fond du condenseur. Dès que la condensation débute, la pression n'augmente plus si la température du condenseur reste constante. Mais le méthanol contenu dans le charbon commence à désorber jusqu'à la fin de l'ensoleillement.

Durant la nuit

Le soir, lorsqu'il n'y a plus d'apport solaire, on ouvre la vanne qui relie le condenseur à l'évaporateur, le méthanol coule donc dans l'évaporateur. Une fois qu'il est complètement transféré dans l'évaporateur, on ventile les capteurs (en ouvrant des clapets ou par convection naturelle) et de ce fait, la pression et la température à l'intérieur du circuit diminuent. L'évaporateur étant à basse température, le méthanol se refroidit rapidement. La pression diminue jusqu'à atteindre la pression d'évaporation du méthanol à basse température. Celui-ci commence donc à s'évaporer en soutirant de l'énergie au frigo. Les vapeurs de méthanol sont alors adsorbées dans le charbon actif du capteur durant toute la nuit. Le lendemain il suffit de fermer la vanne de liaison et le cycle peut recommencer.

Figure 1 : Schéma et principe de fonctionnement des systèmes de réfrigération à adsorption intermittente

Le système à adsorption utilise des capteurs-générateurs-adsorbeurs (figure 2) et un stock de glace isolé placé à l'intérieur de la cave (figure 3). Pour maintenir la température de consigne du local, le transfert de chaleur au milieu ambiant se fait par quatre ventilateurs qui aspirent l'air «chaud» du local pour le faire passer au contact du stock et le pulsent une fois refroidi dans la pièce.

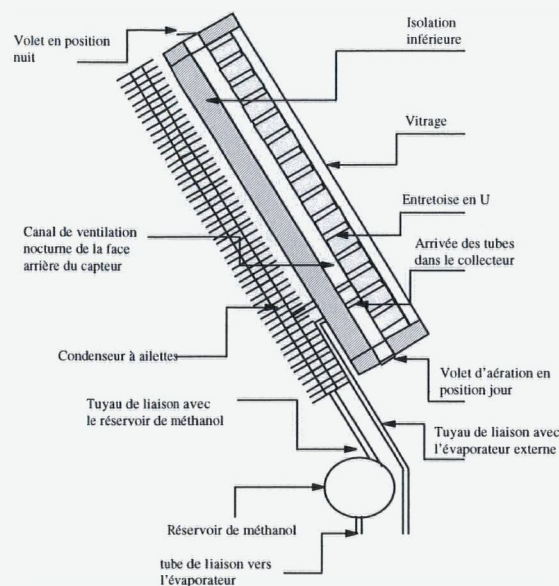


Figure 2: Vue latérale du

capteur-générateur-adsorbeur avec les volets d'aération et le condenseur (on remarquera les entretoises en U contre l'écrasement du capteur dû à la différence de pression et pour permettre la circulation du gaz dans le lit poreux)

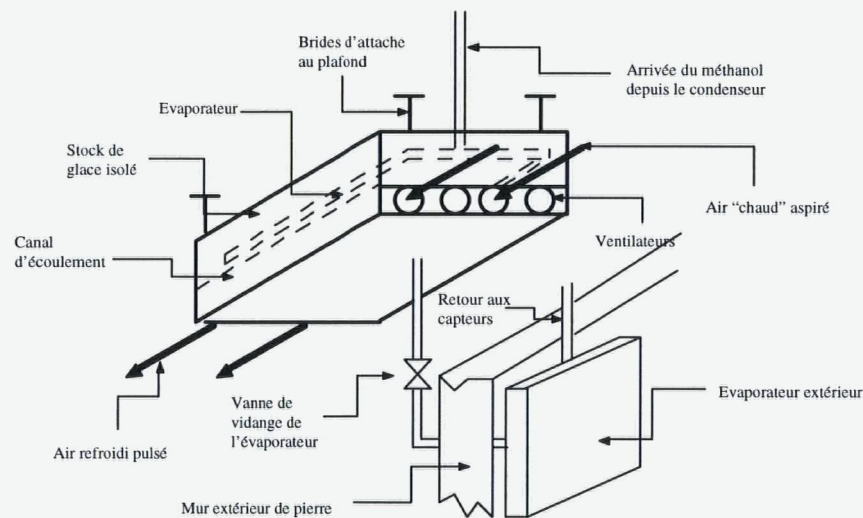


Figure 3: Bloc évaporateur-stock de glace avec évaporateur externe en cas de sous-refroidissement du local.

Le COPS d'une installation photovoltaïque équivalente (COPS de 0,3 à 0,36) est supérieur à celui d'une installation à adsorption (COPS de 0,1 à 0,2), cependant le système à adsorption peut entièrement exploiter son stock d'énergie contrairement aux systèmes électrosolaires avec stockage électrique. En effet il n'est pas conseillé de décharger des batteries en-dessous de 50% de leur charge nominale alors que l'on peut totalement fondre un stock de glace.

10.2 Réfrigérateur solaire thermique autonome.

C'est une installation entièrement autonome d'un volume de 1 m^3 pour le stockage de médicaments ou de denrées alimentaires (entre 0 et 8°C) dans les pays du Sahel. Son utilisation est envisagée pour des pays ou des zones sans électricité où l'eau est un bien précieux (on ne peut donc pas utiliser de systèmes ouverts). Bien que de petit volume, ce frigo est déjà nettement plus grand que ceux

généralement utilisés dans les ménages (100-200 l). Le prédimensionnement d'une telle unité a été réalisé pour une installation à adsorption intermittente utilisant le couple charbon actif-méthanol [3].

Les capteurs utilisés sont les mêmes que ceux décrits à la figure 2. La figure 4 montre le schéma d'un tel réfrigérateur, l'annexe 2 donne le graphique de la variation de la surface de capteur en fonction du volume du stock de glace.

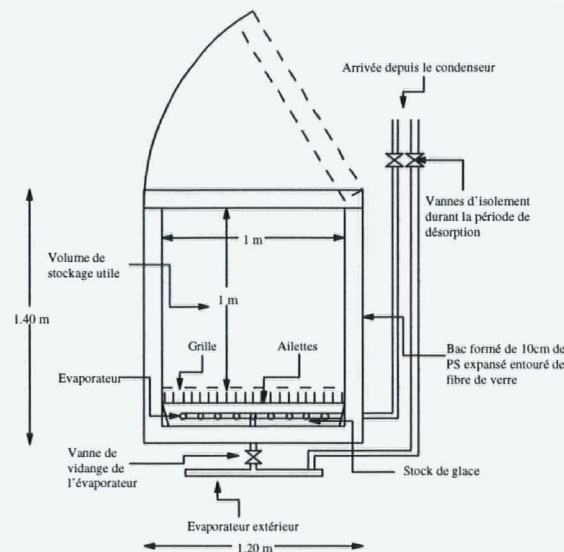


Figure 4 : Schéma d'un frigo d'environ 1m^3 de contenance avec un stock de glace de 100 l.

10.3 Installations solaires de climatisation.

Les installations évoquées ici sont destinées à être combinées à des systèmes de chauffage et/ou ecs solaire. Il n'y a plus ici de contrainte concernant l'utilisation de courant électrique ou de l'eau. L'intérêt de telles installations est de permettre la récupération des surplus thermiques présents durant la période estivale. Ces surplus pourraient être avantageusement utilisés pour produire du froid et réfrigérer ainsi des locaux.

Deux systèmes semblent être particulièrement adaptés :

- Les systèmes à dessiccation solide: le circuit d'eau chaude des capteurs solaires alimente directement les échangeurs de chaleur de l'installation (figure 5). Il s'agit là d'une climatisation par ventilation exigeant un réseau de ventilation.
- Les systèmes intermittents à adsorption ou à régénération de chaleur : ces systèmes peuvent facilement s'intégrer à une installation combi en ré-injectant de l'eau refroidie dans une dalle chauffante (figure 6).

Remarque :

Il faut préciser d'emblée que le but ici est uniquement de récupérer des surplus thermiques pour climatiser des locaux lorsque ces surplus le permettent et non pas de partir du principe que les pièces doivent être climatisées en permanence. En effet, le fait de climatiser en continu occasionnerait une consommation supplémentaire d'énergie d'appoint durant l'été (effet observé dans [1]). Avec une climatisation occasionnelle, on utilise au mieux l'énergie thermique disponible et le risque d'avoir des jours où la climatisation est insuffisante est faible puisque les jours où les charges thermiques sont élevées, correspondent le plus souvent aux jours avec le plus d'apport solaire au niveau des capteurs.

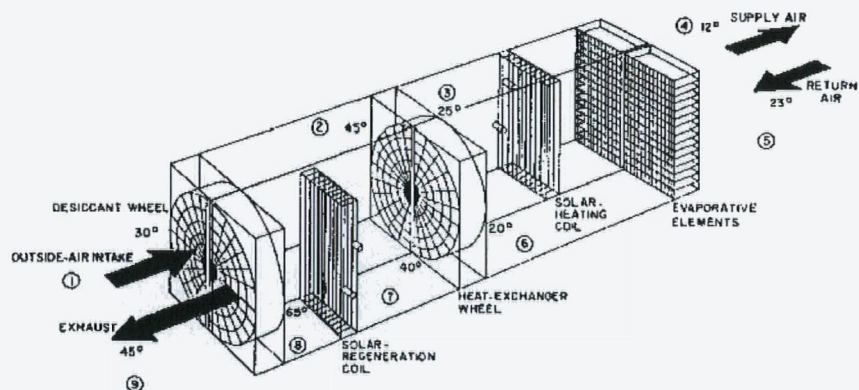


Figure 5 : Schéma d'une installation à dessiccation (tirée de [6])

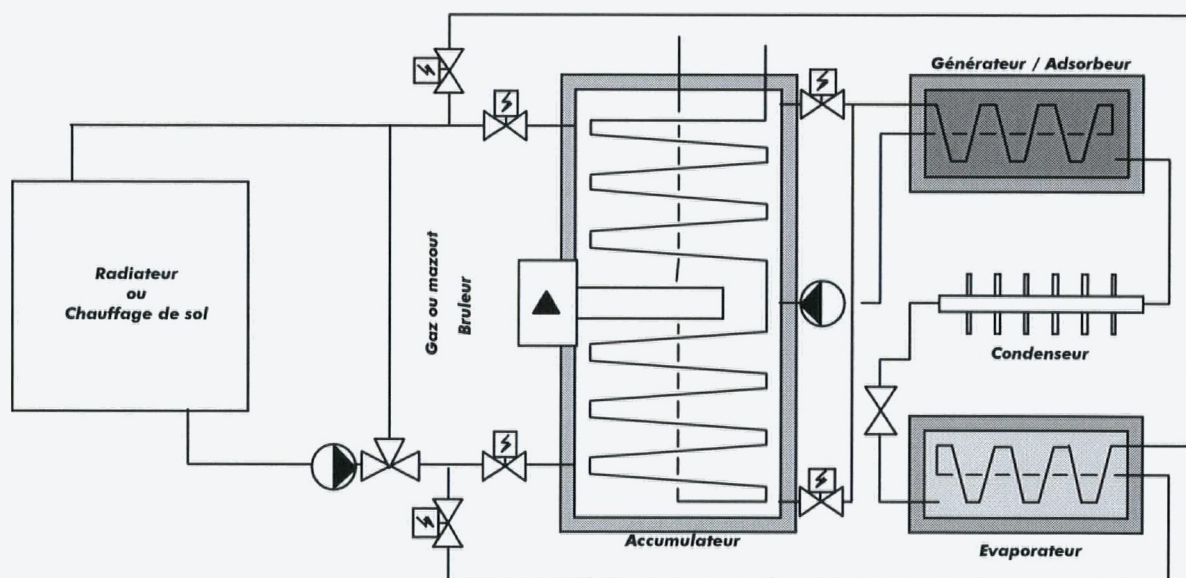


Figure 6 : Schéma de principe d'un système combi avec une installation à adsorption intermittente

11 Synthèse et conclusions

Comme le montre le tableau 7, beaucoup de solutions existent et chacune est adaptée à un marché très particulier et à des conditions précises. Comme l'objectif de ce rapport est d'étudier les petites puissances, les cas présentés au point 10 présentent les principales solutions et les principales questions à résoudre pour différents types d'installations et d'utilisations. Tout d'abord il faut savoir si le système devra être totalement autonome ou non. Pour la climatisation, il faut déterminer si l'utilisateur veut effectuer une climatisation en continu durant toute la période estivale ou de manière occasionnelle pour mieux rentabiliser une installation solaire durant l'été et la rendre plus polyvalente.

Pour ce qui est des systèmes autonomes, les systèmes à adsorption intermittente semblent particulièrement indiqués pour les raisons suivantes :

- leur bonne performance globale (proche de celles des systèmes électrosolaires),
- leur simplicité de fabrication,
- leur faible entretien,
- l'absence de batteries «maillon faible des systèmes électrosolaires».

Ces avantages devraient permettre de les produire à des coûts compétitifs avec le passage à une fabrication industrielle.

Le besoin de telles installations est très grand pour les pays du tiers-monde ou pour des organismes tels que l'OMS, l'UNESCO, etc... En Suisse, un certain marché existe qu'il faudrait dynamiser (alpages, chalets isolés, campings, etc...).

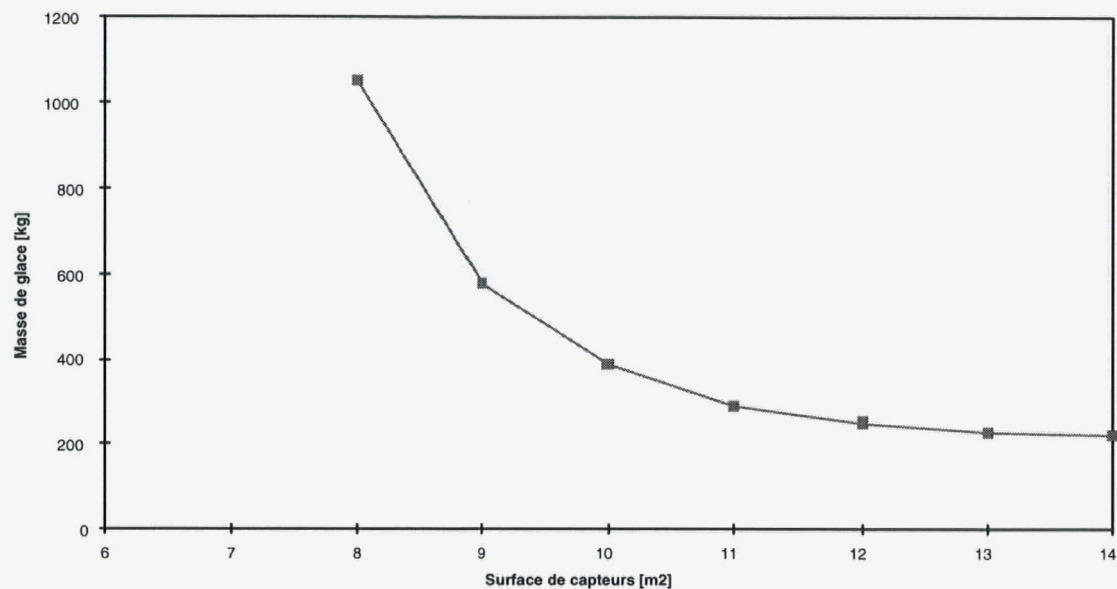
Concernant la climatisation solaire de locaux, il y a un marché intéressant en Suisse. Une climatisation par récupération des surplus pour le domaine privé (avec système à adsorption intermittente) est intéressante si elle permet avec un faible coût supplémentaire de climatiser des locaux durant les jours les plus chauds. L'installation à adsorption illustrée à la figure 6 semble particulièrement indiquée pour des villas ou maisons individuelles car elle permet d'exploiter le réseau de chauffage (sol ou radiateurs) sans avoir recours à des gaines de ventilation si on utilise la dessiccation (il n'y a que très rarement de la ventilation dans les maisons individuelles traditionnelles).

Pour la climatisation continue dans le secteur industriel, les installations à dessiccation sont prometteuses car dès l'instant où l'on possède un réseau de ventilation, cette technique devient la plus favorable de par son bon COP et par le fait que tous ses éléments sont déjà commercialisés dans le domaine de la ventilation.

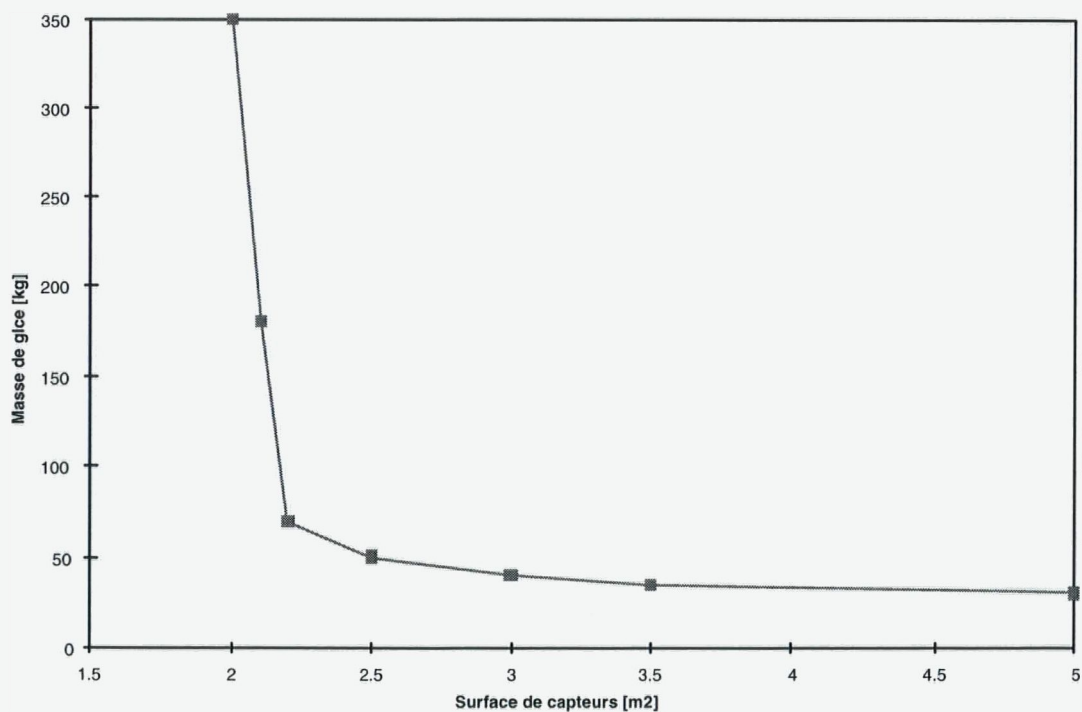
On peut ajouter que l'utilisation des systèmes à dessiccation est préférable même pour la climatisation continue dans le secteur privé s'il s'agit d'une construction réalisée selon le standard MINERGIE. Les conditions du standard MINERGIE imposent en effet un système de ventilation pour le contrôle du renouvellement d'air avec le plus souvent une récupération de chaleur entre le flux d'air entrant et le flux d'air sortant. Dans ce cas il suffit d'intégrer une roue à dessiccation dans le monobloc de traitement d'air.

Dans le cas d'une production industrielle d'eau glacée de moyenne puissance, il est plutôt préférable d'utiliser des installations à régénération de chaleur pour leur COP élevé (bien que leur coût risque d'être plus élevé qu'un système à adsorption intermittente de par leur complexité). On peut également utiliser une machine type GAX pour les très grandes puissances.

12 Annexes



Annexe 1 : Evolution en fonction de la surface de capteurs de la masse du stock minimum nécessaire à une fraction solaire de 1 pendant la période estivale.



Annexe 2: Evolution en fonction de la surface de capteurs, de la masse du stock minimum nécessaire à une fraction solaire de 1 pendant une année type avec le climat de Ouagadougou..