



Avril 2017 / 34<sup>e</sup> Note d'Information sur les technologies du froid

## Le froid solaire

*L'IIF publie régulièrement des Notes d'Information à l'intention des décideurs du monde entier. Ces notes présentent une synthèse des connaissances sur des thèmes clés liés aux technologies du froid et à ses applications. Chaque note propose des axes de développement prioritaires pour l'avenir et expose les recommandations de l'IIF en ce sens.*

Le froid solaire est une technologie respectueuse de l'environnement prometteuse, qui pourrait contribuer à répondre à la demande croissante de refroidissement des espaces partout dans le monde.

La production de froid solaire peut être obtenue par des technologies diverses. Les deux principaux systèmes commercialisables sont d'une part les refroidisseurs à compression de vapeur à entraînement photovoltaïque et d'autre part les machines frigorifiques à entraînement thermique alimentées par des capteurs solaires.

Les équipements frigorifiques thermiques peuvent être associés à différents types de capteurs solaires, de rendement et de coût différents.

Les rendements globaux des systèmes photovoltaïques et des systèmes solaires thermiques peuvent être relativement proches.

Une analyse économique montre que la solution photovoltaïque représente un coût d'investissement au moins moitié moins élevé que les autres systèmes.

Le froid solaire, en réduisant l'utilisation des énergies fossiles, peut avoir un effet très positif sur l'environnement. Cette technologie pourrait bientôt concurrencer les équipements frigorifiques traditionnels.

*Cette Note d'Information a été préparée par Renato Lazzarin, Président de la Section E de l'IIF, avec l'aide du siège de l'IIF, et a été revue par plusieurs experts du réseau de l'IIF.*



INTERNATIONAL INSTITUTE OF REFRIGERATION  
INSTITUT INTERNATIONAL DU FROID

[www.iifir.org](http://www.iifir.org)

[iif-iir@iifir.org](mailto:iif-iir@iifir.org)



[#refrigeration](https://twitter.com/refrigeration)

177, boulevard Malesherbes, 75017 PARIS – France

T: 33 (0) 1 42 27 32 35 – F: 33 (0) 1 47 63 17 98

## Introduction

Le chauffage et le refroidissement d'espaces représentent une importante proportion de la demande globale en énergie. Bien que la demande en énergie pour le chauffage d'espaces soit actuellement plus importante que la demande en énergie pour le refroidissement d'espaces, un certain nombre de facteurs semblent indiquer que cette tendance devrait s'inverser :

- dans les pays en développement, la croissance économique est synonyme d'exigences plus élevées en termes de confort, d'où une demande croissante pour le refroidissement d'espaces ;
- isoler un bâtiment du froid extérieur est relativement aisé, tandis que limiter la pénétration du rayonnement solaire, en particulier dans les bâtiments constitués en grande partie de verre, est plus difficile ;
- l'utilisation accrue d'équipements électriques dans les foyers et les bureaux, ainsi que d'autres charges de branchement entraîne une augmentation des gains internes ;
- il faut également tenir compte du réchauffement planétaire.

L'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) estime que l'utilisation d'énergie pour le refroidissement d'espaces s'élève à 3,5 EJ/an (exajoules,  $10^{18}$  J), et prévoit que cette demande atteigne plus du double d'ici 2050<sup>[1]</sup>, soit 9 EJ/an.

La demande en froid étant liée à l'intensité du rayonnement solaire, il n'est pas étonnant de constater que de nombreuses études se sont penchées sur le froid solaire, depuis la première crise énergétique de 1973. À l'époque, des installations pilotes ont été mises en place et ont permis de réaliser des premières expériences<sup>[2, 3, 4, 5, 6, 7]</sup>. Plusieurs technologies de froid solaire ont alors été développées.

Un système de froid solaire comprend une partie dédiée au captage du rayonnement solaire (la partie solaire) et à sa transformation en chaleur ou en électricité, et une partie constituée d'un équipement utilisant la chaleur ou l'électricité pour produire du froid. Le développement de systèmes de froid solaire va donc de pair avec l'amélioration du rendement et la réduction des coûts liés à la partie solaire. *Par souci de clarté, nous parlerons ici de machines frigorifiques photovoltaïques et de machines frigorifiques thermiques pour désigner ces technologies à entraînement photovoltaïque ou thermique.* Les progrès rapides des capteurs solaires thermiques ont d'abord favorisé le développement d'équipements frigorifiques thermiques, mais le meilleur rendement et la réduction significative des coûts des cellules photovoltaïques rendent aujourd'hui les équipements frigorifiques électriques plus attractifs.

Afin de bien comprendre la situation actuelle et les perspectives dans ce domaine, cette note d'information présente une synthèse des principales alternatives permettant de transformer l'énergie solaire en froid.

Les technologies passives de froid solaire ne seront pas évoquées ici. Ces technologies produisent du froid grâce à l'évaporation, la ventilation naturelle et d'autres techniques de dissipation de la chaleur, associées à une régulation de la chaleur et du rayonnement solaire, et à une optimisation de la chaleur<sup>[8]</sup>.

Le froid solaire passif devrait toujours être pris en compte lors de la conception ou de la rénovation d'un bâtiment.

## La partie solaire

La partie solaire comprend divers panneaux solaires, constitués soit de panneaux photovoltaïques (PV), soit de capteurs solaires thermiques.

### Panneaux photovoltaïques

Actuellement, la plupart des modules photovoltaïques sont à base de cellules de silicium monocristallin ou polycristallin. Un petit segment du marché est couvert par des systèmes dits de « deuxième » et « troisième génération », qui fonctionnent respectivement avec un revêtement en couche mince (en général du silicium amorphe) et avec des technologies de couche mince avancées comme le CIS (di-séléniure de cuivre-indium) et le CdTe (tellurure de cadmium). Il s'agit là certainement d'applications possibles dans un futur proche.

Un module photovoltaïque est constitué de plusieurs séries de cellules photovoltaïques reliées entre elles. Son rendement correspond au ratio entre l'énergie électrique produite et le rayonnement solaire incident sur une même période. Il est donc possible de calculer aussi bien le rendement instantané que le rendement journalier, mensuel, etc. En conditions standards (intensité de rayonnement de  $1000 \text{ Wm}^{-2}$ , température des cellules à  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ), le rendement des modules photovoltaïques s'établit entre 13 et 17 %. La température des cellules doit être précisée, car des températures très élevées ont un impact négatif sur le rendement, en particulier en ce qui concerne les cellules au silicium. Autrement dit, le rendement est moindre lorsque la journée est chaude et ensoleillée.

Le rendement des modules photovoltaïques est en constante augmentation, et devrait atteindre 19 % en 2020 et 21 % en 2030<sup>[9]</sup>. Parallèlement, leur coût ne cesse de baisser, avec notamment une réduction impressionnante au cours des dix dernières années. Ce coût est généralement exprimé en € ou en  $\text{\$Wp}^{-1}$ , où Wp signifie watt-crête (watt-peak), c'est-à-dire pour une intensité de rayonnement maximale de  $1000 \text{ Wm}^{-2}$  en conditions standards. L'effet cumulé de l'augmentation du rendement et de la réduction des coûts a permis de passer à un coût d'environ  $5 \text{ €Wp}^{-1}$  en 2005 à un coût de 3 € en 2010 et de 1,5 € en 2015. Outre les panneaux solaires, une installation photovoltaïque comprend les autres composants du système, parmi lesquels un onduleur, dont le rôle principal est de transformer le courant continu variable (CC) produit par les panneaux en courant alternatif (CA). Le coût de ces autres composants peut atteindre environ 10 à 20 % du prix des modules photovoltaïques et encore plus dans le cas des petites installations.

### Capteurs solaires thermiques

Le capteur solaire est le dispositif permettant de transformer le rayonnement solaire en énergie thermique. Seuls les capteurs solaires à fluide caloporteur liquide seront évoqués ici, c'est-à-dire les capteurs qui réchauffent de l'eau, souvent mélangée à un additif antigel.

Les capteurs solaires peuvent être fixes (cas le plus courant) ou à traqueur solaire, ces derniers suivant le soleil afin d'optimiser l'angle d'incidence du rayonnement solaire et de concentrer les rayons solaires sur un foyer.



Figure 1 : Capteurs à surface plane

Le capteur solaire fixe le plus courant est le capteur à surface plane, dans lequel l'énergie solaire est absorbée par une plaque métallique à canaux (Figure 1).

L'énergie thermique est produite à des températures pouvant dépasser 80 à 90 °C ; la différence de température avec l'air ambiant engendre donc des pertes thermiques. Ces dernières sont atténuées par un ou plusieurs écrans de protection transparents, souvent en verre, par une épaisseur adéquate d'isolant à l'arrière et sur le côté du capteur (7 à 10 cm), et par un revêtement sélectif au niveau de la plaque absorbante<sup>[10]</sup>. « Sélectif » signifie ici que la surface est très absorbante à faible longueur d'onde, là où la plupart du rayonnement solaire se concentre, et hautement réfléchissante et donc faiblement émissive en infrarouge, c'est-à-dire à des longueurs d'onde correspondant à la plupart des pertes thermiques. Des capteurs à tubes sous vide peuvent fonctionner à des températures plus élevées sans pertes par convection, grâce au vide entre la plaque (revêtement sélectif) et le verre à la forme tubulaire caractéristique qui permet une meilleure résistance à la pression<sup>[11, 12]</sup> (Figure 2).



**Figure 2 : Capteurs à tubes sous vide**

Tous ces capteurs sont installés selon une inclinaison fixe qui optimise leur performance pour une période donnée : pour un usage estival, l'inclinaison correspondant à la latitude  $\Phi$  moins 10 ° est considérée comme optimale.

La performance des capteurs solaires dépend de plusieurs facteurs :

- la température moyenne  $t_m$  du fluide à l'intérieur du capteur (en °C) ;
- la température extérieure de l'air  $t_a$  (en °C) ;
- l'intensité du rayonnement solaire  $I_\beta$  (en  $Wm^{-2}$ ).

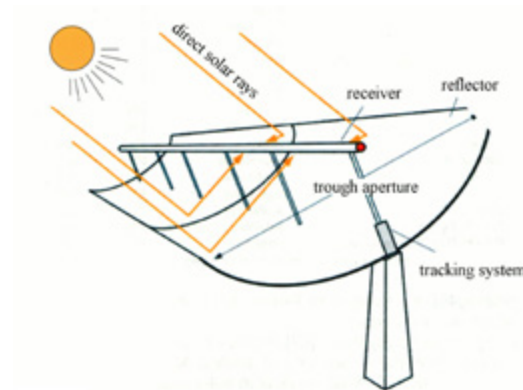
Le rendement du capteur thermique correspond au ratio entre l'énergie thermique utile captée  $Q_u$  et le rayonnement solaire incident au cours de la même période ( $A_c$  désigne la surface du capteur) :

$$\eta = \frac{\int \frac{Q_u}{A_c} dt}{\int I_\beta dt}$$

D'autres technologies de capteurs solaires fixes existent, telles que la structure en nids d'abeille ou le concentrateur parabolique. Toutefois, seuls les capteurs à surface plane

sélective et les capteurs à tubes sous vide seront évoqués, car ils sont de loin les plus répandus. De même, il existe plusieurs types de capteurs à traqueurs solaires, mais la technologie la plus courante est celle du concentrateur cylindro-parabolique<sup>[13]</sup>.

Dans ce concentrateur, un réflecteur concentre les rayonnements solaires directs parallèles dans l'axe du capteur en direction du récepteur placé sur la ligne focale<sup>[14, 15, 16]</sup> (Figure 3). Le capteur est équipé d'un système de traqueur solaire à axe unique, généralement d'est en ouest.



**Figure 3 :** Schéma d'un concentrateur cylindro-parabolique

Une technologie fondée sur les lois de la réflexion de la lumière de Fresnel a récemment été introduite sur le marché. Ces réflecteurs particuliers concentrent la lumière du soleil vers un point focal où un récepteur chauffe un fluide jusqu'à une température pouvant dépasser 200 °C. Ce type de capteur sert surtout à exploiter le rayonnement solaire direct, à la manière du concentrateur cylindro-parabolique. Ces deux technologies ont des caractéristiques similaires en ce qui concerne le rendement et le coût des capteurs. De ce fait, ce type de capteur peut être évalué sur les mêmes bases que le concentrateur cylindro-parabolique.

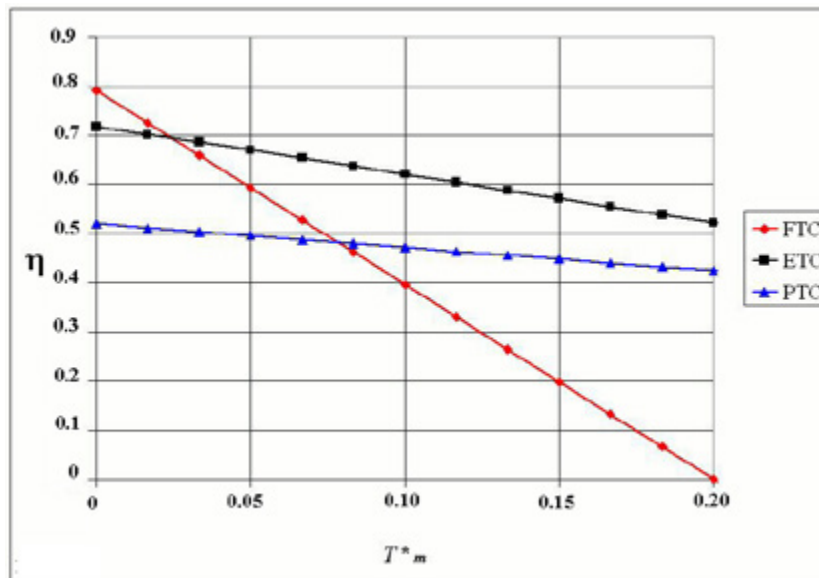
Des équations permettent de décrire le comportement des capteurs mentionnés ci-dessus. Cependant, il est ici préférable de représenter le rendement par une fonction d'une variable  $T_m^*$  qui désigne la différence entre la température moyenne du fluide dans le capteur et la température ambiante, divisée par l'intensité du rayonnement solaire<sup>[17]</sup>.

$$T_m^* = \frac{t_m - t_a}{I_\beta} \quad t_m = t_{in} + \frac{\Delta T}{2}$$

La Figure 4 présente les trois courbes de rendement correspondant aux capteurs à surface plane, aux capteurs à tubes sous vide et au concentrateur cylindro-parabolique. La figure part de l'hypothèse d'une fraction diffuse du rayonnement de 25 % (le rayonnement diffus correspond au rayonnement solaire ne provenant pas directement du soleil ; il peut correspondre à une fraction de 15 % du rayonnement solaire total lorsque le ciel est très clair, et peut même atteindre 100 % si le ciel est très couvert)<sup>[18]</sup>. La fraction diffuse du rayonnement solaire est souvent évaluée en fonction de l'indice de clarté  $K_h$ , c'est-à-dire le ratio entre le rayonnement solaire quotidien incident sur une surface horizontale et le rayonnement correspondant hors de l'atmosphère. Sur une base quotidienne, l'indice de clarté peut varier entre 0,25 (ciel couvert) et 0,75 (ciel très clair).

On observe que la température de fonctionnement a plus d'impact sur les capteurs à surface plane, tandis que les capteurs à tubes sous vide et les réflecteurs cylindro-paraboliques ont une inclinaison moindre de leur courbe de rendement, ce qui

leur permet de conserver un rendement appréciable, même lorsque les capteurs à surface plane ne sont plus à même de capter de l'énergie utile. Le rendement initial à abscisse zéro (pour une température de fonctionnement égale à la température ambiante) montre une moindre transparence des capteurs à tubes sous vide, et l'incapacité des concentrateurs cylindro-paraboliques à exploiter au maximum le rayonnement diffus.



**Figure 4 :** Courbes de rendement des trois types de capteurs étudiés (capteur à surface plane (FTC), capteur à tubes sous vide (ETC), concentrateur cylindro-parabolique(PTC))

Les capteurs solaires thermiques peuvent avoir des prix très variés, non seulement en fonction de la technologie utilisée, mais aussi en fonction de la taille de l'installation et des talents de négociation de l'acheteur. Ce prix peut atteindre environ 350 €/m<sup>2</sup> pour les capteurs à surface plane, 650 pour les capteurs à tubes sous vide et 450 pour les concentrateurs cylindro-paraboliques. Ces prix proviennent de listes d'articles vendus avec une remise de 40 %, pour l'installation de capteurs dans les pays développés. Dans les pays en développement, ces prix peuvent être moitié moindres. Cependant, le critère de la parité de pouvoir d'achat (PPA) devrait être pris en compte : le prix devrait être calculé en fonction du revenu par habitant dans chaque pays. Pour comparer les différentes technologies, le rendement journalier est un paramètre plus approprié que le rendement instantané.

En ce qui concerne les systèmes photovoltaïques, la technologie la plus répandue sur le marché est la cellule de silicium mono ou polycristallin dont le rendement de référence est de 15 %. Le rendement instantané dépend en grande partie de la température de la cellule, c'est pourquoi cette température doit être évaluée à plusieurs moments de la journée. L'estimation de la production d'électricité pour un jour estival moyen dépend également du rendement de l'onduleur. Évaluer le rendement de l'onduleur à 90 % correspond à des valeurs probablement dépassées puisque des prévisions fiables estiment ce rendement à plus de 95 % pour un futur proche.

Lors d'une journée ensoleillée, avec un rayonnement solaire de 7,6 kWhm<sup>-2</sup> sur une surface horizontale, la production d'électricité peut dépasser 0,90 kWhm<sup>-2</sup>jour<sup>-1</sup> avec un rendement journalier tournant autour de 12 %. Ce chiffre est plus bas que le rendement de référence de 15 % à cause des pertes de l'onduleur et de la baisse de production au cours des heures les plus chaudes, lorsque le rayonnement solaire est plus intense.

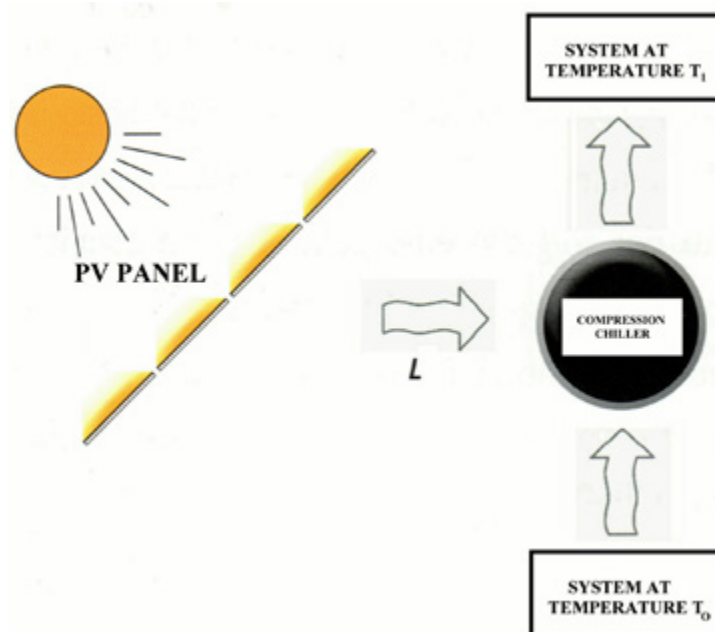
Afin d'évaluer la quantité d'énergie utile captée par les panneaux solaires thermiques, les températures de fonctionnement doivent être indiquées, car elles jouent beaucoup sur le rendement. Trois températures de fonctionnement ont été choisies : 70 °C, 90 °C et 160 °C. Le Tableau 1 indique la quantité journalière d'énergie utile captée par les trois capteurs différents, aux trois températures de fonctionnement différentes au cours de la journée ensoleillée considérée précédemment pour les panneaux photovoltaïques (entre parenthèses : rendement journalier).

**Tableau 1 :** Quantité journalière d'énergie utile captée ( $kWhm^{-2}day^{-1}$ ) par les trois capteurs différents, aux trois températures de fonctionnement différentes considérées ; entre parenthèses : rendement journalier.

Température de fonctionnement	Capteur à surface plane	Capteur à tubes sous vide	Concentrateur cylindro-parabolique
70 °C	3,59 (47 %)	4,47 (59 %)	2,99 (39 %)
90 °C	2,88 (38 %)	4,26 (56 %)	2,89 (38 %)
160 °C	0,86 (11 %)	3,51 (46 %)	2,52 (33 %)

### Équipements frigorifiques photovoltaïques

Il existe une large gamme de techniques frigorifiques entraînées par énergie solaire<sup>[19, 20, 21]</sup>. Pour un système photovoltaïque, l'option la plus évidente est la compression de vapeur, très similaire à la technique utilisée dans les équipements frigorifiques traditionnels, où la compression peut éventuellement être entraînée par un moteur à courant continu (Figure 5). C'est bien connu, dans un système à compression de vapeur, le frigorigène s'évapore à une pression permettant la production d'un effet frigorifique, puis le compresseur permet d'amener la vapeur à une pression telle qu'elle puisse se condenser à une température supérieure à celle d'un puits ambiant ; enfin les condensats retournent dans l'évaporateur à travers une vanne d'étranglement.



**Figure 5 :** Schéma d'un panneau photovoltaïque alimentant un refroidisseur à compression

La performance du système est généralement indiquée par le COP (coefficient de performance), calculé comme suit :

$$\text{COP} = \frac{q_0}{E}$$

où  $q_0$  est l'énergie utile de refroidissement et  $E$  l'énergie (électricité) consommée par le système.

Le COP dépend de nombreuses variables, telles que les caractéristiques de l'équipement, la température du froid produit et la température du puits de chaleur (températures de l'évaporateur et du condenseur). Actuellement, les équipements de conditionnement d'air refroidis par air et refroidis par une tour de refroidissement peuvent avoir respectivement un COP de 3 et de 4. La performance peut être améliorée grâce à des machines récemment développées, mais leur coût actuel est bien supérieur à celui des options traditionnelles. Le COP de ces machines à haute performance peut dépasser 4 (refroidissement par air) et même 5-6 (refroidissement par eau)<sup>[22]</sup>.

## Équipements solaires thermiques

De nombreuses possibilités existent en matière d'équipements solaires à entraînement thermique. La chaleur solaire peut alimenter des machines à cycle direct comme les moteurs Stirling ou Rankine, qui à leur tour alimentent un cycle à compression de vapeur. Au-delà, de nombreux systèmes exploitent la capacité d'une substance à extraire la vapeur du frigorigène depuis un évaporateur, où l'effet frigorifique est produit, à la manière d'un cycle à compression de vapeur traditionnel. L'option du cycle direct s'est avérée trop coûteuse et pas particulièrement rentable pour une installation d'une taille compatible au conditionnement d'air d'un bâtiment, qui nécessite une concentration de capteurs solaires et des températures élevées (jusqu'à 400 °C ou plus) pour atteindre un rendement acceptable<sup>[23]</sup>.

L'essentiel des études et des expériences est dédié à l'effet mentionné ci-dessus, c'est-à-dire la capacité d'extraction, correspondant au froid à sorption. Le froid à sorption s'appuie sur l'attraction physique ou chimique entre un couple de substances pour produire du froid. Il existe deux types de procédés par sorption : l'adsorption et l'absorption. L'adsorption consiste en la fixation d'un gaz ou d'un autre matériau sur la surface d'un solide. L'absorption permet la formation d'une solution liquide à partir d'un absorbant et de fluides actifs.

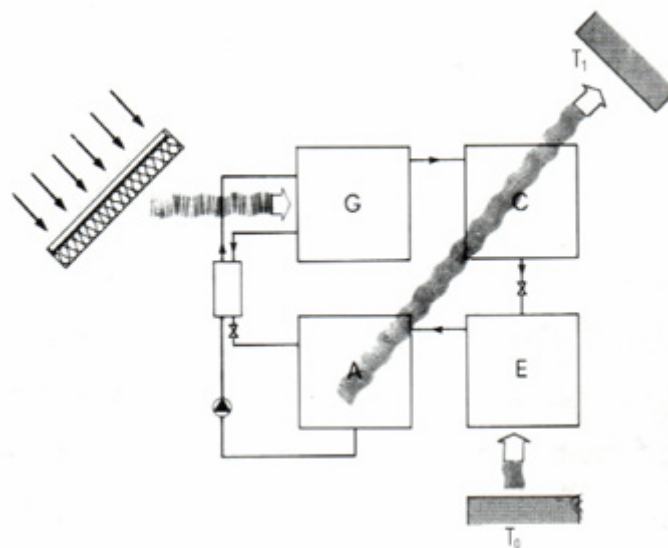
Le procédé par sorption peut fonctionner dans un cycle fermé, dans lequel le refroidisseur à entraînement thermique produit de l'eau glacée destinée à un équipement de conditionnement d'espace, ou encore dans un cycle ouvert, où la déshumidification par un déshydratant de l'air extérieur ou recyclé selon un procédé de sorption est suivie d'un refroidissement évaporatif permettant un traitement direct de l'air dans le système de ventilation.

### Équipement à sorption en cycle fermé

Des équipements frigorifiques thermiques (chauffage direct ou grâce à de l'eau chaude ou de la vapeur) étaient disponibles sur le marché bien avant la crise énergétique de 1973. Ces équipements utilisaient les couples  $\text{H}_2\text{O-LiBr}$  (bromure de lithium) et  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ . Pour le premier couple, le frigorigène est l'eau et le sorbant est une solution aqueuse de LiBr, tandis que pour le second, l'ammoniac est le frigorigène et le sorbant est une solution aqueuse d'ammoniac. Le principe de fonctionnement repose sur la sorption d'un frigorigène depuis l'évaporateur jusqu'à un récipient appelé absorbeur. Une pompe de faible puissance transfère le mélange du frigorigène et du sorbant dans un récipient à plus haute pression (générateur). La chaleur sépare alors une partie du frigorigène du mélange, qui est ainsi



régénéré et acheminé de nouveau dans l'absorbeur, refermant le cycle du sorbant. Issue du générateur, la vapeur du frigorigène est condensée dans un échangeur de chaleur refroidi par l'air ambiant ou par l'eau d'une tour de refroidissement. Le frigorigène liquide peut ensuite retourner dans l'évaporateur, refermant son cycle (Figure 6). L'ensemble absorbeur-pompe-générateur fonctionne comme un compresseur à entraînement thermique, puisque la vapeur du frigorigène à basse pression est finalement désorbée sous la haute pression du générateur. Au cours du procédé, le condenseur doit être refroidi, au même titre que dans les systèmes frigorifiques traditionnels. Mais ici, l'absorbeur doit aussi être refroidi, puisque le procédé de sorption est exothermique et dégage un peu plus de chaleur que la vaporisation du frigorigène absorbé.



**Figure 6 :** Schéma d'un capteur solaire thermique alimentant un refroidisseur à sorption

Plus tard, le procédé d'adsorption a également été utilisé dans les systèmes frigorifiques thermiques<sup>[24, 25, 26, 27]</sup>. Les adsorbants (zéolite, gel de silice, charbon actif, alumine) peuvent capter et maintenir sur leur surface les frigorigènes en provenance de l'évaporateur. Le procédé prend fin lorsque l'adsorbant est saturé ; il doit alors être régénéré par la chaleur. La vapeur désorbée à haute pression peut être condensée au moyen de ce procédé, avant son retour dans l'évaporateur. Pour un fonctionnement en continu, au moins deux lits d'adsorbants sont nécessaires, sans quoi le dispositif est discontinu.

Les performances de toutes ces machines thermiques sont exprimées par un COP, qui cette fois correspond au ratio entre l'effet frigorifique ( $q_0$ ) et la chaleur apportée au générateur ( $q_g$ ) (le travail de la pompe est souvent négligé, car il représente généralement une petite fraction de l'énergie apportée au générateur).

$$\text{COP}_{\text{th}} = \frac{q_0}{q_g}$$

Le  $\text{COP}_{\text{th}}$  dépend de l'équipement, de la température de la chaleur apportée au générateur, de la température de l'absorbeur et du condenseur, et bien sûr de la température de l'eau glacée produite. En général, les installations de froid solaire produisent de l'eau à 7-10 °C, ce qui convient pour un usage normal dans les bâtiments au moyen de ventilo-convecteurs. Toutefois, il est aussi possible de produire de l'eau à des températures

plus élevées (12 ou 15 °C par exemple). Cela permet d'augmenter à la fois l'efficacité (COP) et la puissance frigorifique du refroidisseur à sorption. Cette option peut rendre difficile la déshumidification de l'air.

Pour le conditionnement d'air, le couple H<sub>2</sub>O-LiBr ainsi que l'équipement d'adsorption doivent être refroidis par l'eau de la tour de refroidissement : le refroidissement par air pourrait entraver le fonctionnement du système si la température extérieure dépasse 35 °C. La température du générateur doit être de 85-90 °C pour les machines fonctionnant au couple H<sub>2</sub>O-LiBr, permettant un COP d'environ 0,8<sup>[28,29]</sup>. Les refroidisseurs à adsorption peuvent quant à eux fonctionner même à 70 °C, mais le COP ne dépassera pas alors 0,4<sup>[30,31]</sup>. Des refroidisseurs à double effet H<sub>2</sub>O-LiBr peuvent être utilisés lorsque la chaleur de la condensation à très haute température peut servir à la désorption avancée du mélange. Le COP peut alors atteindre 1,2, à condition que la chaleur apportée au générateur à haute pression soit à une température d'environ 160 °C.

Un système fonctionnant au NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O présente l'avantage de pouvoir être refroidi à l'air et de produire du froid à moins de 0 °C. Cependant, même dans sa configuration la plus efficace (GAX), son COP n'est pas supérieur à 0,6<sup>[32]</sup> et la chaleur fournie doit être à une température de 140 à 160 °C.

Concernant le coût de l'équipement, pour une puissance frigorifique adéquate au conditionnement d'air de petit bâtiments (10-50 kW), les prix seront les suivants : de l'ordre de 300 €kW<sup>-1</sup> pour un refroidisseur à compression de vapeur traditionnel ; 400 pour un refroidisseur à absorption simple effet (LiBr-H<sub>2</sub>O ou H<sub>2</sub>O-NH<sub>3</sub>) ; 600 pour un refroidisseur à adsorption et 700 pour un refroidisseur à absorption double effet.

### Équipement à sorption en cycle ouvert

Le refroidissement à sorption en cycle ouvert peut fonctionner avec un déshydratant à l'état liquide<sup>[33-44]</sup> ou à l'état solide<sup>[45-49]</sup>. Le mode de fonctionnement le plus courant est le mode dit par « ventilation », qui fonctionne en tout air neuf. Un flux d'air extérieur est déshumidifié par un déshydratant. Le flux d'air est alors chaud et sec, il est ensuite refroidi par l'air repris depuis l'espace conditionné, refroidi en premier par l'évaporation directe de l'eau. L'air repris, alors chaud et humide, est ensuite chauffé davantage par la chaleur solaire, afin qu'il puisse régénérer le déshydratant. L'air extérieur, refroidi dans l'échangeur de chaleur par l'air repris, peut alors être directement fourni à l'espace conditionné en tant qu'air sec, ou bien être refroidi par refroidissement évaporatif adéquat. Il existe de nombreux dispositifs différents, dont certains sont disponibles sur le marché.

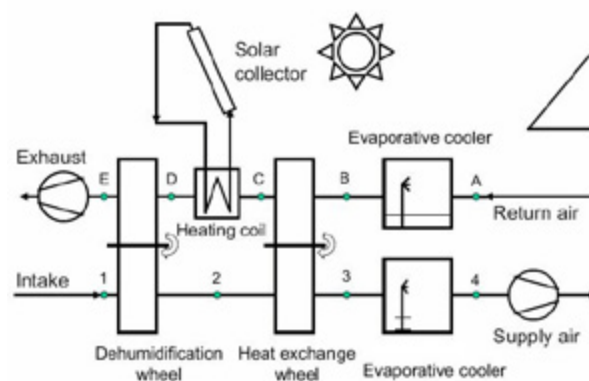


Figure 7 : Schéma d'un système frigorifique à déshydratant solide équipé de capteurs solaires pour la régénération de la roue dessicante

La Figure 7 illustre un dispositif possible, fonctionnant avec une roue dessiccante à déshydratant solide, un échangeur de chaleur rotatif et des refroidisseurs évaporatifs. Un serpentin de chauffage alimenté par un capteur solaire permet la régénération du déshydratant.

Comparer les performances de ces systèmes avec des équipements en cycle fermé n'est pas facile. La sorption en cycle ouvert ne produit pas d'eau glacée mais traite directement l'air de ventilation. Elle requiert un système « tout air », et n'est en général pas compatible avec la rénovation de bâtiments existants, à moins qu'ils soient déjà équipés d'un système « tout air ». Ce type d'installation ne sera donc pas comparé avec les technologies décrites plus haut.

Le refroidissement par sorption en cycle ouvert alimenté par des capteurs solaires thermiques est une option envisageable pour des bâtiments neufs à forte demande en ventilation ou en déshumidification. Cette solution permettrait une performance proche de celle des équipements en cycle fermé, avec l'avantage d'un traitement direct de l'air de ventilation.

La production de froid solaire peut passer par d'autres principes physiques, soit grâce à l'électricité photovoltaïque avec le froid thermoélectrique, thermoacoustique ou magnétique, soit grâce à l'énergie thermique avec des systèmes à éjecteur<sup>[50]</sup>. Toutes ces technologies sont encore en cours de développement, et très peu de produits voire aucun équipement ne sont disponibles à la vente.

La Figure 8 présente les voies alternatives décrites plus haut pour transformer l'énergie solaire en froid ; seule la sorption en cycle ouvert n'est pas illustrée.

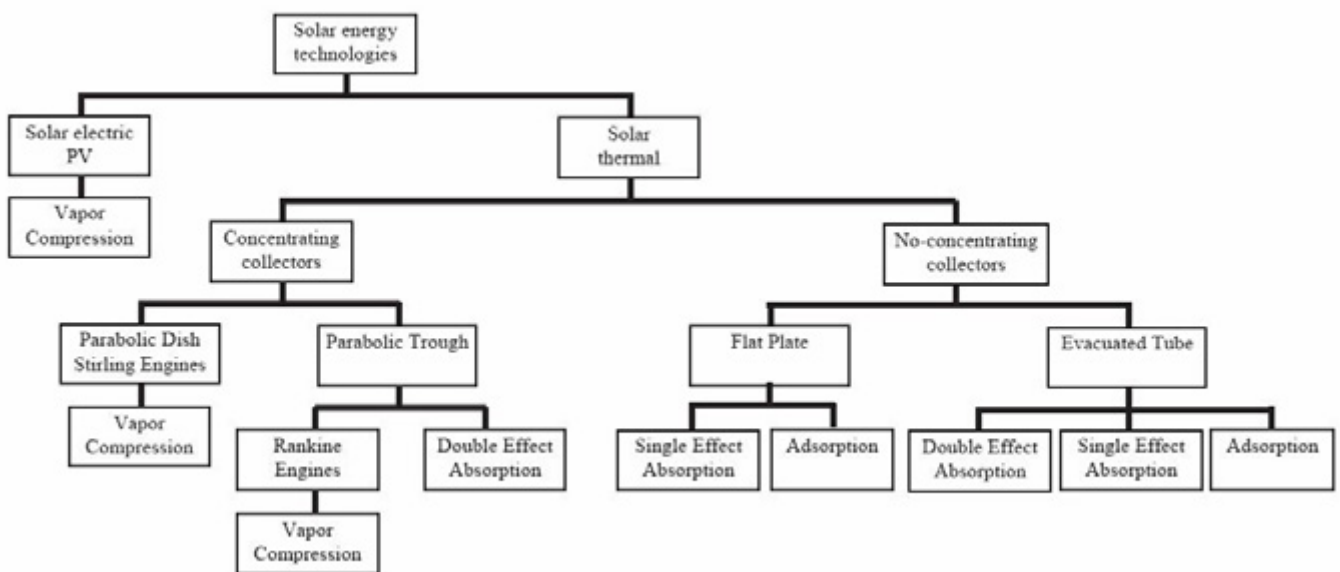


Figure 8 : Voies possibles depuis l'énergie solaire jusqu'à la production de froid

## Rendement global

Une évaluation thermodynamique du système de froid solaire peut être réalisée au moyen du rendement global du système (Overall System Efficiency OSE), défini comme le ratio entre l'effet frigorifique spécifique ( $q_o$ ), c'est-à-dire l'effet frigorifique produit par une unité de surface de panneau solaire, et l'intensité du rayonnement solaire incident ( $\theta$ ), c'est-à-dire le rayonnement solaire incident sur une unité de surface de panneau solaire, intégrés pendant une durée adéquate, par exemple un jour, un mois ou une saison complète de conditionnement d'air.

Dans le cas du froid solaire thermique, ce ratio peut être corrélé à la performance du refroidisseur à sorption, déterminée par le COP<sub>th</sub> thermique, autrement dit le ratio entre l'effet frigorifique et l'énergie thermique apportée au refroidisseur  $q_g$ , qui est l'énergie thermique fournie par le panneau solaire, de manière à ce que :

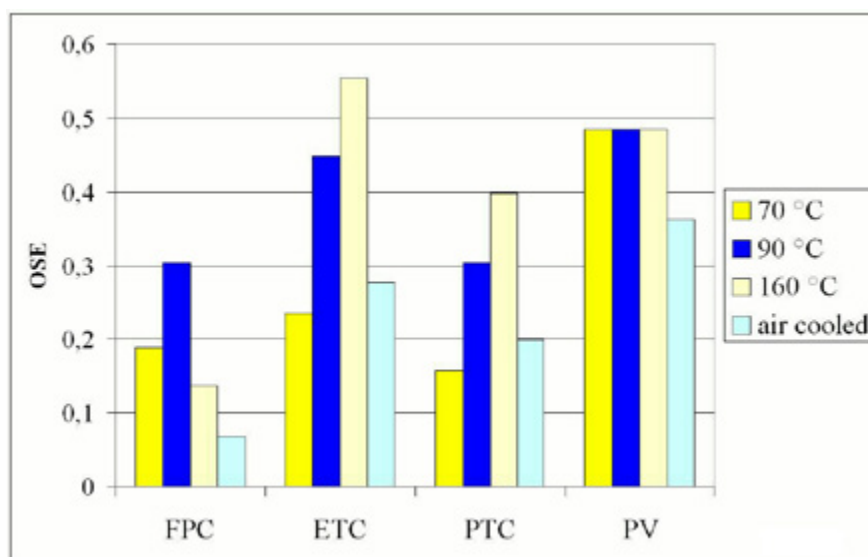
$$OSE = \frac{q_0}{I_\beta} = \frac{q_0}{q_g} \frac{q_g}{I_\beta} = COP_{th} \cdot \eta$$

Dans le cas des systèmes de froid solaire photovoltaïques :

$$OSE = \frac{q_0}{I_\beta} = \frac{q_0}{E} \frac{E}{I_\beta} = COP \cdot \eta$$

L'indice th du COP souligne qu'il se réfère à un apport thermique, alors que le suivant concerne l'électricité. Dans les deux équations,  $\eta$  représente respectivement le rendement du capteur solaire et du panneau photovoltaïque.

L'évaluation de l'OSE de différents systèmes au cours d'un jour estival moyen représentatif de la performance mensuelle permet une première comparaison notable. L'ensoleillement du jour choisi peut être caractérisée par l'indice de clarté  $K_h$ , c'est-à-dire le ratio mentionné plus haut entre le rayonnement solaire quotidien incident sur une surface horizontale et le rayonnement correspondant hors de l'atmosphère. Des analyses numériques ont été effectuées pour un indice de clarté  $K_h$  de 0,65, représentatif du climat à Rome en juillet. On considère que l'indice  $K_h$  ne dépasse jamais 0,75.



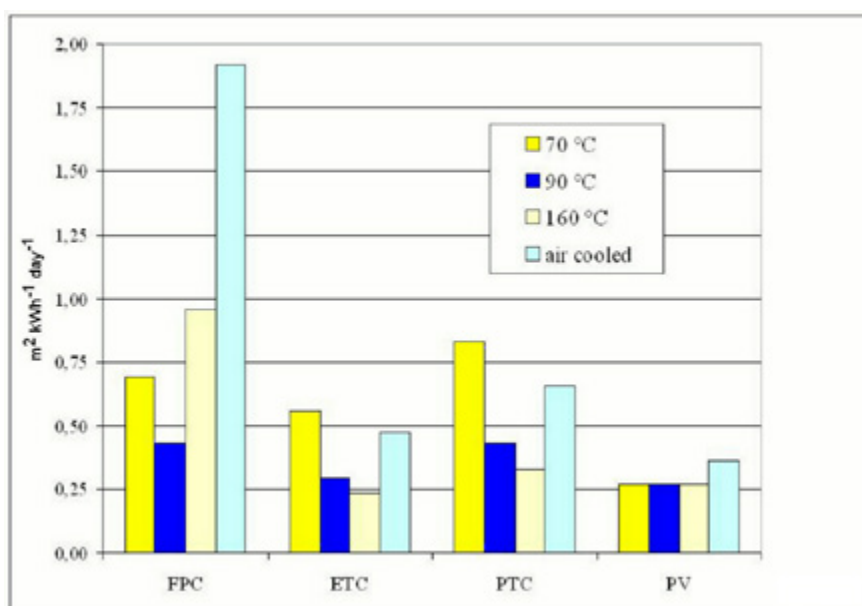
**Figure 9 :** Rendement global journalier du système frigorifique à 70, 90 et 160 °C (adsorption, absorption simple effet, refroidissement par eau double effet) et à 160 °C (refroidi par air, GAX ammoniac-eau) - Comparaison des trois capteurs solaires étudiés avec un refroidisseur à compression traditionnel alimenté par un système photovoltaïque

La Figure 9 reprend les résultats examinés pour les différents systèmes (à entraînement thermique ou électrique), ainsi que pour les refroidisseurs à air et à eau. Pour ce qui est du refroidissement par air du condenseur/absorbeur, la chaleur solaire ne concerne que les

refroidisseurs à cycle GAX ammoniac-eau, puisque la plupart des systèmes fonctionnant au couple LiBr-H<sub>2</sub>O nécessitent une tour de refroidissement à eau, comme mentionné plus haut.

L'OSE le plus élevé, jusqu'à 55 %, est atteint par les systèmes à double effet alimentés par des capteurs à tubes sous vide, suivis de près par les systèmes photovoltaïques, qui peuvent atteindre un OSE proche de 50 % lorsqu'ils sont refroidis par eau. Selon l'évaluation proposée, un système à adsorption à basse température présente un OSE bien inférieur à celui d'un système à absorption, car l'amélioration du rendement du capteur solaire grâce à une température plus basse ne contrebalance pas la diminution du COP. De bonnes performances sont réalisées par les systèmes à simple effet alimentés par des capteurs à tubes sous vide (45 %) et par les systèmes à double effet alimentés par des concentrateurs cylindro-paraboliques (40 %). Si l'OSE des systèmes thermiques est supérieur à celui des systèmes photovoltaïques à refroidissement par eau, les systèmes thermiques refroidis par air sont bien moins performants, à cause de l'effet combiné d'un rendement moindre des capteurs solaires et d'un faible COP du refroidisseur. L'OSE ne dépasse pas 28 %, contre 36 % pour le photovoltaïque.

D'une manière similaire mais plus concrète, il est possible d'établir une comparaison à partir de l'évaluation de la surface de captation permettant d'obtenir 1 kWh de froid au cours d'un jour d'été. La Figure 10 présente cette comparaison. On estime que les meilleurs résultats sont d'environ 0,24-0,33 m<sup>2</sup>kWh<sup>-1</sup>jour<sup>-1</sup> pour un système thermique et 0,27-0,36 pour un système photovoltaïque.



**Figure 10 :** Surface des capteurs (en m<sup>2</sup>) nécessaire pour produire 1 kWh de froid au cours d'une journée ensoleillée ( $K_h=0,6$ ) en fonction des différents systèmes étudiés

La comparaison ne tient pas compte de l'énergie parasite qui doit être ajoutée aux systèmes solaires thermiques. On estime très grossièrement que la zone de captation nécessaire devrait être 10 % plus étendue pour tenir compte du surplus d'énergie parasite dans le cadre d'un système photovoltaïque; ce chiffre étant évalué en termes d'énergie primaire<sup>[51]</sup>. Une comparaison correcte doit aussi tenir compte des pompes du refroidisseur à absorption. Les pompes servent non seulement à la circulation de la solution pour que celle-ci soit régénérée entre l'absorbeur et le générateur, mais également à la circulation de l'eau chaude qui chauffe le générateur et de l'eau froide qui refroidit l'absorbeur et le

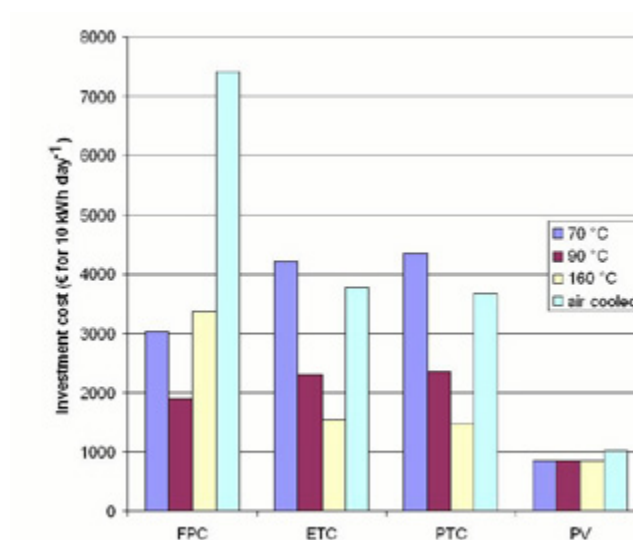
condenseur. En principe, pour des machines de faible puissance (jusqu'à 20 kW), il ne faut pas compter moins de 300 à 900 W d'électricité, et encore plus pour les machines à double effet et pour les refroidisseurs ammoniac-eau. Il est primordial de concevoir soigneusement les circuits hydrauliques. Si la taille des tubes ou des raccords (par exemple les vannes) est mal dimensionnée, la demande en électricité pourrait augmenter et être du même ordre que pour un refroidisseur traditionnel pour la seule alimentation des pompes, comme les premières installations pilotes l'ont montré. Dans le cas d'une conception adaptée, 3 à 7 kWh d'électricité supplémentaire par jour doivent être ajoutés à l'électricité requise pour les circuits des capteurs solaires.

## Analyse économique

Les installations à énergie renouvelable sont souvent synonymes d'un important investissement initial. Le froid solaire n'échappe pas à la règle. Une comparaison complète des prix (coûts d'investissement et de fonctionnement pour toute la durée de vie de l'installation) nécessiterait des précisions sur le climat, la fonction et les caractéristiques du bâtiment, la gestion de l'installation, etc. Une analyse économique simplifiée est présentée ici, sur la base des coûts d'investissement pour une installation de conditionnement d'air solaire dans un petit bâtiment administratif (10-50 kW de charge frigorifique).

On considère un jour estival moyen avec un ciel dégagé (représentatif d'un jour de juillet à Rome, avec un indice de clarté de 0,65, comme précédemment). Afin de pouvoir étendre facilement les résultats à différentes puissances d'installations, les coûts d'investissement sont évalués en fonction des données suivantes : on considère une puissance de refroidissement moyenne de 1 kW, en fonctionnement pendant les 10 heures d'ouverture des commerces et des bureaux. Une production de froid quotidienne de 10 kWh est ensuite fournie.

Des structures d'entreposage d'une taille adéquate permettent à l'installation d'alimenter la puissance nominale du moteur pendant 10 heures. Autrement dit, la zone de captation permet de fournir au refroidisseur l'énergie nécessaire à la production de 10 kWh de froid pour ce jour donné.



**Figure 11 :** Estimation des coûts d'investissement pour une installation produisant 10 kWh de froid au cours d'une journée ensoleillée en fonction des différentes technologies étudiées

La Figure 11 présente l'évaluation qui rend compte de tous ces calculs. Elle présente le coût d'investissement pour la zone de captation nécessaire et pour le refroidisseur, pour une production de froid de l'ordre de 10 kWh par jour d'été, et ce pour les trois différents capteurs solaires et les quatre différentes technologies du froid (adsorption à 70 °C, absorption à simple effet à 90 °C, absorption à double effet à 160 °C, absorption GAX à l'ammoniac refroidi à l'air à 160 °C), ainsi que pour du froid solaire photovoltaïque (refroidi à l'eau pour les trois premières valeurs, et à l'air)\*.

Le besoin de stockage pour les systèmes solaires thermiques complexifie la comparaison avec le froid solaire photovoltaïque<sup>[52]</sup>. Pour limiter l'alternance marche/arrêt du moteur lors des fluctuations de demande en froid du bâtiment, un stockage de la chaleur mais aussi du froid est en effet nécessaire<sup>[53, 54]</sup>. En fait, de nombreux cycles marche/arrêt peuvent même réduire de moitié le COP journalier d'un refroidisseur à absorption de faible puissance<sup>[55]</sup>. De plus, pour un refroidisseur à absorption avec un COP inférieur à 1, on a constaté que pour une chute de température similaire (de l'ordre de 5 K), le stockage de froid est de taille plus réduite que le stockage d'eau chaude, et semble impliquer moins de pertes de chaleur (voire des gains). Le coût du stockage thermique peut varier entre 20 et 100 € kWh<sup>-1</sup><sup>[56]</sup>. La capacité de stockage nécessaire à un apport en froid de 1 kWh dépend du COP du refroidisseur. Pour un refroidisseur à absorption simple effet, cette capacité peut être de 1,25 kWh. Comme la chute de température utile dans le générateur est d'environ 5 K, la contenance en eau du stockage peut être d'environ 200 l kWh<sup>-1</sup> de froid. Un stockage avec des matériaux à changement de phase permet de plus faibles volumes et une meilleure performance, mais est plus coûteux<sup>[57]</sup>.

L'importante baisse des prix des panneaux photovoltaïques au cours des trois dernières années semble écarter toute possibilité de concurrence du froid solaire thermique avec les systèmes photovoltaïques. Les meilleures alternatives au photovoltaïque sont les refroidisseurs à double effet à capteur à tubes sous vide ou à concentrateur cylindro-parabolique. Cependant, ils sont deux fois plus coûteux que le photovoltaïque (1536 ou 1478 € contre 843 € d'investissement). Les refroidisseurs refroidis par air sont trop chers s'ils sont à entraînement thermique, tandis que les refroidisseurs photovoltaïques refroidis par air représentent un coût additionnel de 20 %.

En outre, un coût supplémentaire indicatif de 500 € doit être pris en compte dans le calcul du coût du stockage.

Pour une comparaison minutieuse, il faut aussi songer à équiper le système de froid solaire photovoltaïque d'un système de stockage par batterie, dont le coût sera bien plus élevé que pour un stockage thermique. On estime ce coût à environ 120 € kWh<sup>-1</sup><sup>[58]</sup>. Cependant, étant donné qu'une réserve de 1 kWh permet de produire autour de 3 kWh de froid, le coût total serait du même ordre que pour un stockage thermique équivalent. Il est également important de garder à l'esprit que les systèmes photovoltaïques sont en général reliés à

---

\* Afin de rendre plus clairs les calculs effectués, il faut considérer un refroidisseur à simple effet, alimenté à 90 °C par un capteur à tubes sous vide dont le coût est estimé à 650 € m<sup>2</sup>. Le coût spécifique relatif à la puissance du refroidisseur est estimé à 400 € kWh<sup>-1</sup>. Pour obtenir 10 kWh, il faut 2,92 m<sup>2</sup> de capteurs. En fait, pour le jour estival moyen considéré, le rayonnement solaire quotidien sur le capteur est de 7,6 kWh m<sup>-2</sup> jour<sup>-1</sup>, le rendement journalier de ces capteurs est de 56 % et l'OSE est de 45 % (COP estimé = 0,8), ce qui fait que la zone spécifique requise est de 0,292 m<sup>2</sup> kWh<sup>-1</sup> jour<sup>-1</sup>.

Le coût d'investissement est donc estimé comme suit:

$$2,92 \times 650 + 400 = 2,298 \text{ € pour } 10 \text{ kWh jour}^{-1}.$$

L'analyse est très similaire pour une installation photovoltaïque. Son rendement journalier est évalué à 12 %. Chaque kWh d'électricité produit 4 kWh de froid (COP=4). L'énergie électrique quotidienne peut être évaluée à 7,6 x 0,12 = 0,91 kWh m<sup>-2</sup> j<sup>-1</sup> avec un effet frigorifique 4 fois supérieur (3,65 kWh m<sup>-2</sup> j<sup>-1</sup>). La zone de captation photovoltaïque requise est alors de 10/3,65 = 2,74 m<sup>2</sup>. Le coût du refroidisseur est estimé à 300 € kWh<sup>-1</sup> et l'investissement total (panneaux photovoltaïques avec onduleur à 200 € m<sup>2</sup>) est le suivant:

$$2,74 \times 200 + 300 = 843 \text{ € pour } 10 \text{ kWh jour}^{-1}.$$

un réseau, qui alimente en général le système de stockage. Les systèmes de froid solaire thermiques sont eux-mêmes souvent connectés au réseau, qui fournit l'électricité nécessaire aux différentes pompes (parfois plus de 1 kW). Cette électricité pourrait bien sûr être apportée par un système photovoltaïque, mais l'analyse deviendrait alors très complexe.

Lors de la conception d'une installation de froid solaire, un autre paramètre essentiel est à prendre en compte : la fraction  $f$ . Ce paramètre intervient dans d'autres installations solaires comme le chauffage solaire de bâtiments ou le chauffage d'eau chaude à usage domestique. La lettre  $f$  signifie ici « free » (gratuite), autrement dit la part de demande en froid satisfaite par l'énergie solaire. Les installations solaires les plus courantes ne permettent pas de satisfaire la totalité de la demande. L'installation est donc équipée d'un système auxiliaire, souvent un refroidisseur à compression de vapeur traditionnel, ou encore un générateur qui alimente le refroidisseur à absorption lorsque l'énergie solaire ne suffit pas à faire fonctionner le système thermique, du fait du manque ou de l'absence d'insolation et de la faible capacité de stockage.

Le choix de la fraction  $f$  dépend de nombreux paramètres : conditions météorologiques (rayonnement solaire, température en saison de refroidissement), quantité et modalité de la demande en froid des bâtiments, coût de l'énergie conventionnelle (réseau électrique, gaz naturel ou autres combustibles), coût de la partie solaire et du stockage, paramètres économiques (taux d'actualisation notamment).

## Données sur le développement du froid solaire

Fin 2014, environ 1.175 systèmes de froid solaire étaient installés dans le monde entier<sup>[59]</sup>.

De 2004 à 2014, le marché a connu une croissance très rapide, bien que le taux de croissance ait montré une tendance à la baisse de 32 % en 2007-2008 à 12 % en 2013-2014. Environ trois quarts des installations de froid solaire dans le monde se trouvent en Europe, surtout en Espagne, en Allemagne, en Italie et en Grèce. La plupart de ces installations sont équipées de capteurs à surface plane et de capteurs à tubes sous vide très performants. La technologie de froid solaire thermique la plus couramment utilisée dans le monde est de loin la technologie à absorption (72 %), suivie par les technologies à adsorption (17 %) et à déshydratant solide (10 %)<sup>[60, 61]</sup>. La technologie à déshydratant liquide ne représente que 1 % des installations. Étonnamment, la littérature ne mentionne que peu d'applications photovoltaïques. Mais la récente chute des prix des cellules photovoltaïques laisse présager un regain d'intérêt pour ces applications dans les années à venir.

## Aspects environnementaux

En réduisant l'utilisation d'énergies fossiles, le froid solaire pourrait avoir un impact environnemental très positif. Le bénéfice environnemental peut être calculé en fonction de la quantité d'émissions de CO<sub>2</sub> évitées, qui peut atteindre 0,5-1,0 kg CO<sub>2</sub> kWh<sup>-1</sup> pour le réseau électrique, selon différentes combinaisons de production d'électricité dans plusieurs pays. Pour chaque kWh de froid par énergie solaire (COP=3), la quantité de CO<sub>2</sub> évitée est de l'ordre de 160-330 g CO<sub>2</sub>. Cependant, les installations de froid solaire thermiques ont besoin d'énergie parasite supplémentaire (pompes et ventilateurs). Cette énergie parasite pouvant représenter 10 % de l'énergie renouvelable fournie, son coup environnemental pourrait donc être évalué à 50-100 g CO<sub>2</sub> par kWh pour un refroidisseur à absorption simple effet. De plus, le temps de retour énergétique (le temps nécessaire pour produire une énergie égale à celle dépensée pour la fabrication du dispositif) doit être évalué pour les panneaux photovoltaïques et pour les capteurs thermiques. Ces points ont généré de nombreux débats, qui n'ont mené à aucun consensus. Toutefois, afin de permettre des prévisions plus claires, le temps de retour énergétique des panneaux photovoltaïques est estimé à 1,5 à 3 ans pour les cellules au silicium, et à moins de 1an pour les cellules en



couche mince, selon le climat (le temps de retour énergétique sera d'autant plus court que le rayonnement solaire sera important). Des chiffres similaires s'appliquent aux capteurs solaires thermiques. Les bénéfices doivent aussi être évalués selon la durée de vie de l'installation, qui peut-être d'environ 20 ans.

L'estimation dépend de nombreuses variables, comme le climat ou l'utilisation de l'installation. En première approximation, un panneau photovoltaïque en silicium pourrait produire 100 à 200 kWhm<sup>-2</sup> d'électricité par an. Pour toute sa durée de vie, l'installation pourrait produire 2000 à 4000 kWhm<sup>-2</sup> d'électricité, pour un coût en énergie de 150-300 kWh, autrement dit, le gain net en électricité serait de 1700-3850 kWh, ce qui permettrait d'éviter 850 à 3850 kg CO<sub>2</sub>m<sup>-2</sup> d'émissions de CO<sub>2</sub>.

## Conclusions

Parmi les technologies de froid solaire disponibles sur le marché, plusieurs ont été examinées ici. Deux grandes familles ont été distinguées : le froid solaire thermique et le photovoltaïque.

Si l'on compare le rendement global, les systèmes thermiques sont parfois plus efficaces que les systèmes photovoltaïques. En fait, un refroidisseur à absorption double effet alimenté par des capteurs à tubes sous vide permet un OSE de 55 %, contre 48 % pour les systèmes photovoltaïques. Cependant, si l'on concentre la comparaison sur les coûts d'investissement, les systèmes thermiques perdent leur avantage concurrentiel, car investir dans un système photovoltaïque coûte environ deux fois moins cher que sa meilleure alternative thermique. D'importantes économies d'échelle sur les panneaux photovoltaïques ont permis la transition entre une quasi-parité des prix entre les deux systèmes il y a quelques années et la situation actuelle. En dépit d'une forte croissance de leur production, bien que moins importante que celle de panneaux photovoltaïques, les panneaux solaires thermiques n'ont jusqu'à aujourd'hui pas bénéficié d'une telle réduction des coûts.

Dans un futur proche, une nouvelle baisse des coûts des panneaux photovoltaïques est attendue, accompagnée d'une hausse de leur rendement. Au cours des dix prochaines années, une réduction des coûts par deux devrait permettre à ces systèmes de concurrencer directement les systèmes de froid traditionnels. Ceci, associé à une possible augmentation du COP des refroidisseurs à compression de vapeur, jusqu'à 5 ou 6, semble éliminer toute concurrence avec les systèmes de froid solaire thermiques. Cependant, la production massive de capteurs à tubes sous vide et de concentrateurs cylindro-paraboliques pourrait engendrer une baisse des prix et permettre d'approcher les prix des capteurs à surface plane. Une quasi-parité avec les systèmes photovoltaïques serait alors possible.

La comparaison ne tient pas compte de la technologie de refroidissement à déshydratant. Comme mentionné plus haut, cette technologie ne concerne que les bâtiments équipés d'un système « tout air ». Elle peut donner d'excellents résultats dans ces bâtiments, à la fois en termes de performance et de coûts, lorsque le taux de renouvellement d'air est élevé et/ou les charges latentes importantes, en particulier dans les climats chauds et secs.

Pour finir, il faut souligner que la technologie solaire thermique doit être appréciée sur l'ensemble de l'énergie produite annuellement, y compris lorsque le froid n'est pas nécessaire. Les systèmes solaires thermiques peuvent également alimenter un bâtiment en chauffage et en eau chaude. De même, les systèmes photovoltaïques doivent être évalués en les couplant à une pompe à chaleur pour le chauffage en hiver.

Ainsi, l'estimation du retour sur investissement par rapport à un système traditionnel doit tenir compte de l'utilisation annuelle de l'installation et du niveau des prix.



## Recommandations

Le froid solaire, en réduisant l'utilisation d'énergies fossiles, pourrait avoir un effet très positif sur l'environnement et pourrait bientôt concurrencer les équipements de froid traditionnels. C'est pourquoi l'IIF insiste sur la nécessité de :

- lancer des campagnes mondiales pour sensibiliser les utilisateurs potentiels, les responsables politiques et les représentants de l'industrie aux avantages économiques et environnementaux du froid solaire,
- former les professionnels du froid aux technologies du froid solaire, en incluant des cours spécifiques aux programmes de formation et en développant des outils de simulation et de modélisation de pointe pour les concepteurs et les installateurs,
- promouvoir et financer la recherche sur les technologies de froid solaire,
- soutenir la mise en place du froid solaire à l'échelle nationale et internationale, en attribuant des subventions aux utilisateurs, en particulier dans les pays en développement,
- élaborer des mesures incitatives afin de promouvoir l'utilisation du froid solaire, par exemple au moyen d'exonérations fiscales pour les utilisateurs.

## Références

- [1] IEA Solar\_Heating\_Cooling\_Roadmap\_2012\_WEB
- [2] Ward D.S., Weiss T.A., Löf G.O.G., 1976. Preliminary performance of CSU Solar House I heating and cooling system, *Solar Energy*, 18, 541-548.
- [3] Ward D.S., Smith C.C., Ward J.C., 1977. Operational modes of solar heating and cooling systems, *Solar Energy*, 19, 55-61.
- [4] Ward D.S., Löf G.O.G., Uesaki T., 1978. Cooling subsystem design in CSU Solar House III, *Solar Energy*, 20, 119-126.
- [5] Ward D.S., Ward J.C., 1979. Design considerations for residential solar heating and cooling systems utilizing evacuated tube solar collectors, *Solar Energy*, 22, 113-118.
- [6] Ward, D.S., 1979. Solar absorption cooling feasibility, *Solar Energy*, 12, 259-268.
- [7] Nakahara N., Miyakawa Y., Yamamoto M., 1977. Experimental study on house cooling and heating with solar energy using flat plate collector, *Solar Energy*, 19, 657-662.
- [8] Santamouris, M., Kolokotsa, D., 2013. Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: the state of the art. *Energy Build.* 57, 74-94.)
- [9] IEA Solar Photovoltaic Energy Technology Roadmap, 2014 Edition
- [10] Eaton C.B., Blum H.A., 1975. The use of moderate vacuum environments as a means of increasing the collection efficiencies and operating temperatures of flat-plate solar collectors», *Solar Energy*, 17, 151-158.
- [11] Ward D.S., Ward J.C., 1979. Design considerations for residential solar heating and cooling systems utilizing evacuated tube solar collectors, *Solar Energy*, 22, 113-118.
- [12] Roberts G.T., 1979. Heat loss characteristics of an evacuated plate-in-tube collector», *Solar Energy*, 22, 137-140.
- [13] González MI, Rodríguez LR. Solar powered adsorption refrigerator with CPC collection system: collector design and experimental test. *Energy Convers Manage* 2007; 48(9):2587-94.
- [14] Kalogirou SA. 2002. Parabolic trough collectors for industrial process heat in Cyprus, *Energy* 27, 813-30.
- [15] Price H, Lufert E, Kearney D, Zarza E, Cohen G, Gee R, 2002. Advances in parabolic trough solar power technology. *J. of Solar Energy Engn., Transactions of the ASME*, 424, 109-25.
- [16] Cabrera F.J., Fernández-García A., Silva R.M.P., Pérez-García M, 2013. Use of parabolic trough collectors for solar refrigeration and air-conditioning applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20,
- [17] Duffie J. A., Beckman, W. A., 1980. *Solar Engineering of Thermal Processes*, Wiley, New York.
- [18] Collares-Pereira M. and Rabl A., 1979. The average distribution of solar radiation. Correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values, *Solar Energy*, 22, 155-164.
- [19] Henning, H.M. 2007. Solar assisted air conditioning of buildings: an overview, *Applied Thermal Engn.*, 27, 1734-1749.
- [20] Kim D.S., Infante Ferreira C.A., 2008. Solar refrigeration options: a state of the art review, *Int. J. Refrigeration*, 31, 3-15.

- [21] Infante Ferreira C.A., 2011. Advancement in solar cooling, Proc. ISHPC 2011, Padova, 23-46.
- [22] Otanicar T., Taylor R.A., Phelan P.E., 2012. Prospects for solar cooling: an economical and environmental assessment, Solar Energy, 86, 1287-1299.
- [23] Fernandez-Garcia, A., Zarza, E., Valenzuela, L., Perez, M., 2010. Parabolic-trough solar collectors and their applications. Renew. Sust. Energ. Rev. 14, 1695-1721.
- [24] Meunier F., Guilleminot J.J., Mischler B., Simonot M.H., 1979. On the use of a zeolithe 13X – H<sub>2</sub>O intermittent cycle for the application to solar climatization of buildings, SUN II, Proc. ISES Silver Jubilee Cong., Atlanta, 739-743.
- [25] Guilleminot J.J., Meunier F., Mischler B., 1980. Utilisation d'un cycle intermittent zeolithe 13X – H<sub>2</sub>O pour la réfrigération solaire, Pro. in Refrig. Sci. and Tech., Proc. XVth Int. Cong. of Refrig., Venezia, vol. IV, 989-993.
- [26] Guilleminot J.J., Meunier F., 1981. Étude expérimentale d'une glacière solaire utilisant le cycle zeolithe 13 X- eau, Rev. Gen. Therm. Fr., 239, 825-834.
- [27] Worsoe-Schmidt P., 1979. A solar powered solid-absorption refrigeration system, Int. J. Refrigeration, 2, 75-84.
- [28] Lazzarin R.M., Rizzon E., Sovrano M., Boldrin B., Scalabrin G., 1978. Performance predictions of a LiBr absorption air conditioner utilizing solar energy, Sun Mankind's Future Source of Energy, 3, Pergamon, 1572-1580.
- [29] Yazaki, 2016. [www.yazakienergy.com/docs/WFCUL-OI-1A2-0413.pdf](http://www.yazakienergy.com/docs/WFCUL-OI-1A2-0413.pdf)
- [30] Wang, R.Z., Oliveira, R.G., 2006. Adsorption refrigeration – an efficient way to make good use of waste heat and solar energy. Prog. Energ. Combust. 32, 424-458.
- [31] Choudhury B., Saha B. B., Chatterjee P. K., Sarkar J.P., 2013. An overview of developments in adsorption refrigeration systems towards a sustainable way of cooling, Applied Energy 104 (2013) 554-567.
- [32] Robur, 2013. <http://www.roburheatpumps.co.uk/products/cooling-only/>
- [33] Kakabaev A., Klyshchneva O., Khandurdyev A., Kurbanov N., 1977. Experience in operation a solar absorption cooling plant with open solution regenerator. Geliotekhika 13, 73-76.
- [34] Baum V., Kakabaev A., 1978. Utilizing solar energy for creating comfortable room conditioner in Turkmenia, Sun Mankind's Future Source of Energy, Proc. ISES Cong. New Delhi. Pergamon Press, New York, 1556-1560.
- [35] Gupta M.C., Gandhidasan P., 1978. Open cycle 3-ton solar air-conditioner: concept, design and cycle analysis, Sun Mankind's Future Source of Energy, Proc. ISES Cong. New Delhi, Pergamon Press, New York, 1991-1996.
- [36] Grossman G., Shwarts I., 1978. An open absorption system utilizing solar energy for air conditioning, Energy Conservation in Heating Cooling and Ventilating Buildings, Hemisphere Publ. Co., Washington, 641-647.
- [37] Bolzan M., Lazzarin R.M., 1979. Comparison between two absorption cooling systems of the open type under different climate conditions, Int. J. Refrigeration, 3, 143-149.
- [38] Collier R.K., 1979. The analysis and simulation of an open cycle absorption refrigeration system. Solar Energy 23, 357-366.
- [39] Haim I., Grossman G., Shavit A., 1992. Simulation and analysis of open cycle absorption systems for solar cooling. Solar Energy 49, 515-534.

- [40] Grossman G., 2002. Solar-powered systems for cooling, dehumidification and air-conditioning. *Solar Energy* 72, 53-62.
- [41] Gommed K., Grossman G., 2004. A liquid desiccant system for solar cooling and dehumidification. *Transactions ASME, Journal of Solar Energy Engineering* 126, 879-885.
- [42] Gommed K., Grossman G., Experimental investigation of a liquid desiccant system for solar cooling and dehumidification, 2007. *Solar Energy*, 81, 131-138.
- [43] Gommed K., Grossman G., Ziegler F., 2004. Experimental investigation of a LiCl-water open absorption system for cooling and dehumidification. *Transactions ASME, Journal of Solar Energy*
- [44] Lazzarin R.M., D'Ascanio A. 2007. Investigation of an open cycle liquid desiccant system for the air conditioning of an university building. *Int. J. of Energy Res.*, 31, 376-389.
- [45] Nelson J.S., Beckman W.A., Mitchell J.W., Duffie J.A., Close D.J., 1978. Simulation of the performance of open cycle desiccant cooling systems, *Solar Energy*, 21, 273-278.
- [46] Rush W.F., 1974. Solar desiccant systems, *Workshop Proc., Solar Cooling*.
- [47] Rush W.F., 1977. Solar desiccant systems for heating and cooling, *Internal Report, Institute of Gas Technology, Chicago*.
- [48] Shelpuk B.C., Hooker D.W., 1979. Development programmes in solar desiccant cooling for residential building, *Int. J. Refrigeration*, 2, 173-179.
- [49] E.E. Anyanwu, Review of solid adsorption solar refrigeration II: an overview of the principles and theory, *Energy Convers. Manage.* 45 (2004) 1279-1295.
- [50] Infante Ferreira C.A., Kim D.S. 2014. Techno-economic review of solar cooling technologies based on location-specific data, *Int. J. Refrigeration*, 39, 23-37.
- [51] Noro, M., Lazzarin, R.M. 2014. Solar cooling between thermal and photovoltaic: an energy and economic comparative study in the Mediterranean conditions, *Energy*, 73, 453-464.
- [52] Chidambaram L.A., Ramana A.S., Kamaraj G., Velraj R., 2011. Review of solar cooling methods and thermal storage options, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 3220-3228.
- [53] Lazzarin R.M. 2007. Solar cooling plants: how to arrange solar collectors, absorption chiller and the load. *Int. J. of Low Carbon Tech.*, 2, 376-390.
- [54] Lazzarin R.M., 2007. Solar cooling plants: some characteristic system arrangements. *Int. J. of Low Carbon Tech.*, 2, 391-404.
- [55] Lazzarin R. M., 1980. Steady and transient behaviour of LiBr absorption chillers of low capacity, *Int. J. Refrigeration*, 3, 213-218.
- [56] EIA, 2010. Solar Thermal Collector Manufacturing Activities. Energy Information Administration. <[https://www.eia.gov/renewable/annual/solar\\_thermal/](https://www.eia.gov/renewable/annual/solar_thermal/)>.
- [57] Noro M., Lazzarin R.M., Busato F., 2014. Solar cooling and heating plants: An energy and economic analysis of liquid sensible vs phase change material (PCM) heat storage. *Int. J. of Refrigeration*, 39, 104-116.
- [58] Wang R.Z., Ge T.S., Chen C.J., Ma Q., Xiong Z.Q., 2009. Solar sorption cooling systems for residential applications: Options and guidelines, *Int. J. Refrigeration*, 32, 638-660.
- [59] Lazzarin, R.M., 2014. Solar cooling: PV or thermal? A thermodynamic and economical analysis. *Int. J. Refrigeration*, 39, 38-47.

[60] Tecsol, Etat des lieux de la climatisation /chauffage solaire en Europe'. [En ligne]. Disponible: <http://www.tecsol.fr/Rafrsol2/stateofart.htm> [Visité le: 29 novembre 2016].

[61] Intelligent Energy Europe, Collated and updated list of solar cooling installations in participating countries; version 1.3 2012. [En ligne]. Disponible: <http://www.estif.org/solarkeymarknew/images/downloads/QAiST/qaist%20d5.3%20tr5.3.1%20list%20of%20solar%20cooling%20installations.pdf> [Visité le: 29 novembre 2016].



Informatory Notes on Refrigeration Technologies: Archives	Notes d'information de l'IIF sur les technologies du froid : Archives
<b>17<sup>th</sup> Note:</b> How to improve energy efficiency in refrigerating equipment (November 2003)	<b>17e Note :</b> Comment améliorer l'efficacité énergétique des équipements frigorifiques (novembre 2003)
<b>18<sup>th</sup> Note:</b> Evaporative Cooling and Legionella, A Risk which can be Prevented by Using Good Practices (February 2006)	<b>18e Note :</b> Refroidissement évaporatif et Legionella, un risque maîtrisable grâce à de bonnes pratiques (février 2006)
<b>19<sup>th</sup> Note:</b> Liquefied Natural Gas: Current Expansion and Perspectives (November 2006)	<b>19e Note :</b> Gaz Naturel Liquéfié : Expansion actuelle et défis (novembre 2006)
<b>20<sup>th</sup> Note:</b> Magnetic Refrigeration at Room Temperature (October 2007)	<b>20e Note :</b> Le froid magnétique à température ambiante (octobre 2007)
<b>21<sup>st</sup> Note:</b> Sustainable Refrigerated Road Transport (December 2011)	<b>21e Note :</b> Le transport frigorifique routier durable (décembre 2011)
<b>22<sup>nd</sup> Note:</b> Applications of Cryosurgery (July 2012)	<b>22e Note :</b> Les applications de la cryochirurgie (juillet 2012)
<b>23<sup>rd</sup> Note:</b> Risk Inherent in the Use of Counterfeit Refrigerants (November 2012)	<b>23e Note :</b> Risques liés à l'utilisation de fluides contrefaits (novembre 2012)
<b>24<sup>th</sup> Note:</b> Containment of Refrigerants within Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pump Systems (January 2014)	<b>24e Note :</b> Confinement des frigorigènes dans les systèmes de froid, de conditionnement d'air et de pompes à chaleur (janvier 2014)
<b>25<sup>th</sup> Note:</b> Refrigerant Charge Reduction in Refrigerating Systems (May 2014)	<b>25e Note :</b> Réduction de la charge en frigorigène dans les systèmes frigorifiques (mai 2014)
<b>26<sup>th</sup> Note:</b> Overview of Regulations Restricting HFC Use, Focus on the EU F-Gas Regulation (January 2015)	<b>26e Note :</b> Tour d'horizon des réglementations limitant l'utilisation des HFC. Le point sur le Règlement F-gaz de l'UE (janvier 2015)
<b>27<sup>th</sup> Note:</b> Evaporative Cooling (January 2015)	<b>27e Note :</b> Le refroidissement évaporatif (janvier 2015)
<b>28<sup>th</sup> Note:</b> Qualification and Certification of Refrigeration Technicians (September 2015)	<b>28e Note :</b> Qualification et certification des techniciens du froid (septembre 2015)
<b>29<sup>th</sup> Note:</b> The Role of Refrigeration in the Global Economy (Novembre 2015)	<b>29e Note :</b> Le rôle du froid dans l'économie mondiale (novembre 2015)
<b>30<sup>th</sup> Note:</b> Heat-Sensitive Health Products (Januray 2016)	<b>30e Note :</b> Les produits de santé thermosensibles (janvier 2016)
<b>31<sup>st</sup> Note:</b> Current long-term alternative refrigerants and their possible applications (Avril 2016)	<b>31e Note :</b> Frigorigènes alternatifs : les options actuelles sur le long terme et leurs applications (avril 2016)
<b>32<sup>nd</sup> Note:</b> Harmonization of Life Cycle Climate Performance Methodology (October 2016)	<b>32e Note :</b> Harmonisation de la méthode de calcul de l'indice de performance climatique sur le cycle de vie (octobre 2016)
<b>33<sup>th</sup> Note:</b> Cogeneration/Trigeneration (January 2017)	<b>33e Note :</b> Cogénération/Trigénération (janvier 2017)

- These Information Notes can be accessed at [www.iifir.org/Publications/Informatory Notes](http://www.iifir.org/Publications/Informatory%20Notes). The latest Informatory Note published is available to IIR Members only.
- Ces Notes d'Informations sont accessibles sur le site [www.iifir.org/Publications/Notes d'information](http://www.iifir.org/Publications/Notes%20d'information). La dernière note d'information publiée est réservée aux membres de l'IIF.