

Fiche explicative détaillée #2

Machines frigorifiques à sorption

1 Objet et limites du document

Ce document est intimement lié au CCTP type (cahier des clauses techniques particulières), spécifique aux systèmes de climatisation et de chauffage solaire, qui a été réalisé dans le cadre du projet de recherche et développement MeGoPICS (projet ANR). Cette fiche fait partie du livrable MeGoPICS L32 « Fiche détail CCTP ».

Cette fiche technique a pour objectif de présenter les différentes technologies de machines frigorifiques à sorption, de souligner leurs avantages et leurs inconvénients, puis dans un deuxième temps, d'expliquer quelles sont les répercussions du choix de tel ou tel système sur le CCTP type.

Etant donné le nombre d'installations déjà réalisées, leur degré de maturité, et pour être en accord avec l'orientation prise par le CCTP type existant, seuls les procédés à transformation de chaleur et à cycle fermés (absorption et adsorption – cf. paragraphe 2.1) seront développés dans ce document.

Il ne sera décrit ici que les caractéristiques générales communes à chaque catégorie de machine. Néanmoins, chaque machine est régie par ses propres caractéristiques et possède son propre comportement, il faudra donc dans tous les cas se référer à la documentation technique du fabricant de machine pour dimensionner le système de climatisation et chauffage solaire, et pour rédiger le CCTP du projet.

2 Présentation des technologies disponibles

2.1 Généralités : production de froid grâce au soleil

Plusieurs différents procédés sont possibles pour rafraîchir les bâtiments en utilisant l'énergie du soleil (liste non exhaustive).



Procédés électriques

Cette technique consiste à connecter directement des modules photovoltaïques à un système de climatisation classique à haute efficacité. Néanmoins, à l'heure actuelle, tant que le tarif de rachat de l'électricité photovoltaïque est élevé, il est plus avantageux de vendre toute l'électricité produite sur le réseau. Néanmoins cette solution pourra connaître un très fort essor lorsque le coût de production d'un kWh électrique sera au même niveau du coût d'achat d'un kWh sur le réseau ou/et que la notion d'autoconsommation sera privilégiée.

Procédés thermomécaniques

A la différence des autres procédés, ces systèmes ont besoin d'un fluide à plus haute température (200°C) pour assurer le fonctionnement de l'installation. Ainsi, pour atteindre ces niveaux de température, de l'huile thermique doit être utilisée des capteurs solaires à concentration. De ce fait, les procédés thermomécaniques ne sont utilisés que pour les grandes puissances frigorifiques (>100kW) et dans des régions très ensoleillées.

Procédés à transformation de chaleur

Ce sont ces systèmes qui sont les plus développés et utilisés. Ils se décomposent en deux grandes familles : les cycles ouverts et les cycles fermés.

Les cycles fermés

Les machines à cycle fermé utilisent un procédé de refroidissement à sorption (absorption si l'agent de sorption est liquide, ou adsorption s'il est solide) pour produire de l'eau glacée. Ces machines utilisent généralement de l'eau comme réfrigérant, mais d'autres fluides peuvent être utilisés comme l'ammoniac par exemple.

Les cycles ouverts

Les machines à cycle ouvert sont en contact avec l'atmosphère et agissent directement sur l'air. En d'autres termes, ces installations produisent directement de l'air froid et non pas de l'eau glacée comme pour les cycles fermés. En conséquence, ces systèmes utilisent toujours l'eau comme réfrigérant. La technologie la plus utilisée pour les cycles ouverts utilise les roues à dessiccation en rotation. La dessiccation par procédé liquide est commercialement disponible mais très limitée en termes de solutions disponibles.

Cycle du réfrigérant	Réfrigérant en cycle fermé		Réfrigérant en cycle ouvert, en contact direct avec l'air	
Principe	Production d'eau glacée		Déshumidification de l'air et refroidissement par évaporation	
Phase du sorbant	Solide	Liquide	Solide	Liquide
Couple réfrigérant / absorbant habituellement utilisés	Eau / Silica gel ; Eau / Zéolite	Eau / Bromure de lithium ; Ammoniac / Eau	Eau / Silica gel ; Eau / Chlorure de lithium	Eau / Chlorure de calcium ; Eau / Chlorure de lithium
Technologie disponible	Machines à adsorption	Machines à absorption	Systèmes à dessiccation (DEC)	Bientôt introduit sur le marché
Capacité frigorifique	5,5 – 500 kW	10 kW – 5 MW	20 – 350 kW (par module)	-
Coefficient de performance *	0,4 – 0,7	0,6 – 0,75 (simple effet)	0,5 - >1	> 1
Température de fonctionnement	65 – 90 °C	70 – 110 °C	50 – 95 °C	50 – 70 °C
Capteurs solaires	Capteurs plans ou sous vide	Capteurs sous vide ou plans	Capteurs plans ou à air	Capteurs plans ou à air

* Coefficient de performance = COP = Froid produit / Chaleur fournie

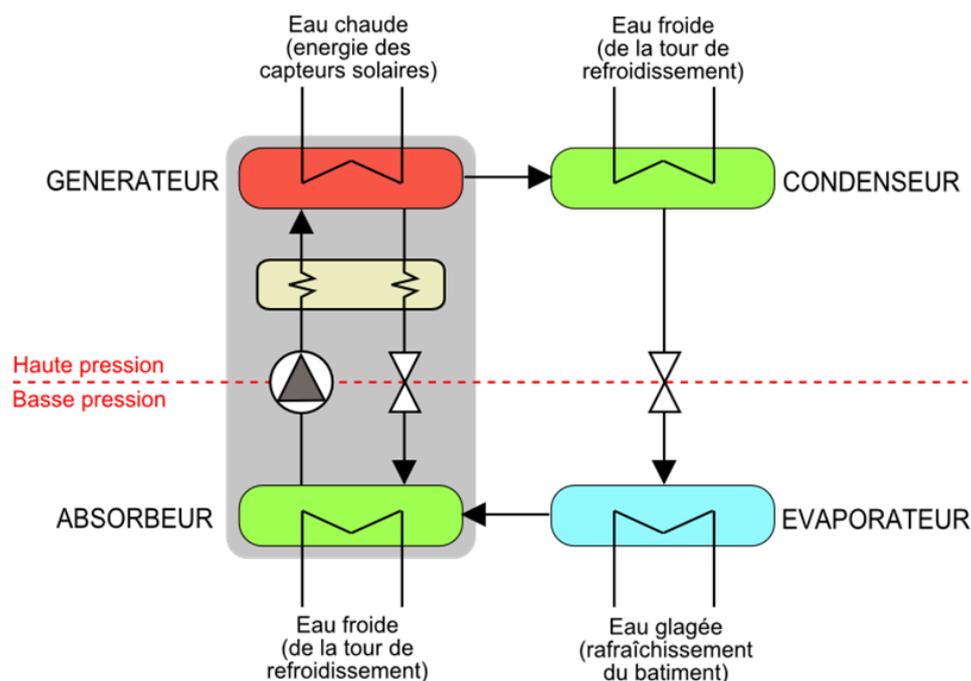
NB : Comme dit précédemment, seuls les procédés à transformation de chaleur et à cycle fermés (absorption et adsorption) seront développés plus loin dans ce document.

2.2 Machines à absorption

Les machines à absorption sont les systèmes frigorifiques thermiques les plus répandus dans le monde.

2.2.1 Principe de l'absorption

Du point de vue de l'évaporateur et du condenseur, le principe général de fonctionnement d'une machine à absorption est le même que pour un système de refroidissement à compression classique : A l'évaporateur, le liquide est vaporisé en récupérant de la chaleur d'un circuit à basse température. La vapeur est ensuite compressée pour atteindre un niveau de pression supérieur et se condense à haute température dans le condenseur. Dans le cas d'une machine à absorption, la compression de la vapeur n'est pas effectuée via un compresseur, mais grâce au couplage de deux composants : l'absorbeur et le générateur. Ainsi, la compression du réfrigérant est effectuée en utilisant une solution liquide réfrigérant/sorbant et une source de chaleur qui remplace la consommation électrique d'un compresseur électrique.



Le cycle à absorption passe par les étapes suivantes :

- Evaporation du réfrigérant dans l'évaporateur, ce qui a pour effet d'extraire la chaleur d'une source de chaleur à faible température. Cette étape est à l'origine du rafraîchissement utile et désiré du bâtiment.
- Le réfrigérant est ensuite dirigé vers l'absorbeur dans lequel il est absorbé par une solution concentrée d'absorbant. La chaleur latente d'absorption ainsi que le chaleur de mélange doivent être rejetés. Pour cela, une tour de refroidissement est habituellement utilisée.
- La solution diluée est ensuite pompée vers le générateur dans lequel l'énergie solaire est utilisée pour chauffer la solution au dessus de son point d'ébullition. Ainsi, le réfrigérant et d'absorbant concentré sont séparés. Le réfrigérant sous forme vapeur et sous haute pression est envoyé vers le condenseur, et l'absorbant concentré est renvoyé vers l'absorbeur.

- Le réfrigérant se condense alors, et l'énergie libérée par ce changement de phase doit être évacuée. Pour cela, une tour de refroidissement est habituellement utilisée, de même que pour l'absorbeur.
- La pression du réfrigérant est ensuite brutalement réduite en passant à travers une vanne de détente avant de retourner dans l'évaporateur.

2.2.2 Différentes technologies d'absorption disponibles

Habituellement, pour produire de l'eau glacée à une température supérieure à 0°C, le couple H₂O/LiBr est utilisé avec l'eau comme réfrigérant. Cependant, d'autres couples sont possibles comme le couple H₂O/LiCl ou encore NH₃/H₂O permettant de produire aussi de l'eau glacée à des températures inférieures à 0°C.

De nombreuses machines à absorption sont disponibles sur le marché, cependant habituellement la capacité frigorifique de ces machines est de l'ordre de quelques kW. Pendant plusieurs années, la plus petite machine disponible avait une capacité de 35 kW. Pour une machine à simple effet, la température de la source chaude doit habituellement être au dessus de 80°C (certaines fonctionnent encore jusqu'à 65°C, une fois mis en régime nominal), le coefficient de performance est alors de l'ordre de 0,6 à 0,8. Les machines à double effet utilisant un générateur sur deux étages nécessitent habituellement une température d'au moins 140°C, mais peuvent atteindre des COP de 1 à 1,2.

Néanmoins grâce à de récents progrès dans la filière, plusieurs constructeurs proposent désormais des machines de capacités inférieures à 50kW (jusqu'à 10 kW). Pour les problématiques de rafraîchissement et climatisation solaire, ce sont ces machines qui sont les plus souvent adoptées. De plus, récemment un modèle de machine simple effet a été conçu pouvant fonctionner à plus faible température : à partir de 65°C, et ayant un COP toujours aux alentours de 0,7. Cela montre le fort potentiel d'amélioration des performances des machines à absorption. Les nouveaux développements pour les machines de petites et moyennes capacités ont été récemment réalisés par les fabricants européens et asiatiques dans le but de couvrir les besoins de rafraîchissement pour des bâtiments de faibles surfaces de l'ordre de 200 m² à 500 m². Les fabricants européens sont implantés en Allemagne, Autriche, Espagne, Suède, Italie, et Portugal. La plupart de ces récents matériels sont déjà testés dans des installations pilotes, de recherche ou de démonstration.

2.2.3 Avantages et inconvénients des machines à absorption

Avantages :

- Technologie sensiblement plus mature que les autres technologies de froid solaire
- Coefficient de performance plus élevé (de l'ordre de 0,6 à 0,8)

Inconvénients :

- Nécessité de plus hautes températures au générateur
- Les éléments mobiles sont plus nombreux (pompe) d'où une consommation électrique légèrement plus importante.

2.3 Machines à adsorption

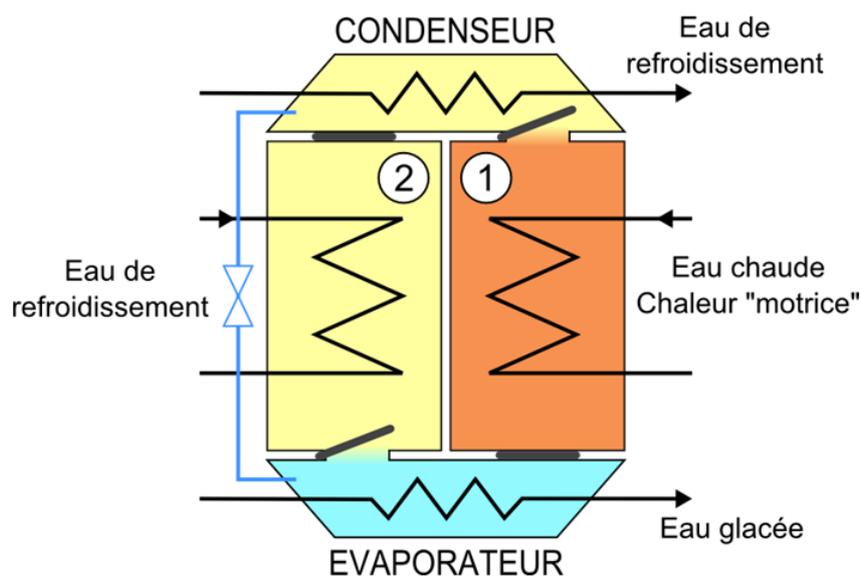
2.3.1 Principe de l'adsorption

Ici, au lieu d'une solution liquide, un matériau solide (un adsorbant) est utilisé.

La machine comprend deux compartiments remplis d'adsorbant (compartiments 1 et 2), un évaporateur, et un condenseur.

L'adsorbant du premier compartiment est régénéré par chauffage (eau chaude solaire), la vapeur d'eau ainsi générée étant envoyée dans le condenseur où elle se condense. L'eau liquide, via une vanne de détente, est envoyée à basse pression dans l'évaporateur où elle s'évapore (phase de « production de froid »).

L'adsorbant du compartiment 2 maintient la basse pression en adsorbant cette vapeur d'eau. Ce compartiment doit être refroidi pour entretenir le processus d'adsorption. Lorsque la production de froid diminue (saturation de l'adsorbant en vapeur d'eau), les fonctions des deux compartiments sont permutées par ouverture et fermeture de clapets.



2.3.2 Différentes technologies d'adsorption disponibles

Les systèmes disponibles sur le marché utilisent l'eau comme réfrigérant et le silicagel comme adsorbant. Mais récemment, quelques constructeurs préfèrent utiliser du zéolithe comme solution alternative au silicagel. Ainsi, ces deux technologies sont maintenant disponibles.

Actuellement, seuls quelques fabricants asiatiques et européens produisent des machines à adsorption. Les deux acteurs historiques étaient japonais, mais récemment un fabricant allemand est entré sur le marché. Avec une température de source chaude d'environ 80°C, ces systèmes obtiennent des COP d'environ 0,6 mais peuvent fonctionner jusqu'à des températures d'environ 60°C. La capacité frigorifique de ces machines va de 7 kW à 500 kW.

2.3.3 Avantages et inconvénients des machines à adsorption

Avantages :

- Robustesse
- Aucun danger de cristallisation, et donc, pas de contrainte sur la température intermédiaire de refroidissement
- Il n'y a pas de pompe à solution ; les consommations électriques sont donc particulièrement réduites
- La température requise au générateur est généralement plus faible

Inconvénients :

- Taille et poids élevés (mais il existe cependant un potentiel important d'amélioration au niveau des échangeurs dans les compartiments d'adsorption, et donc de réduction de poids et de volume pour les futures générations de machines à adsorption)
- Coefficient de performance est plus faible (de l'ordre de 0,4 à 0,6).

3 Modifications à apporter dans le CCTP en fonction de la solution technique choisie

Sur le principe du système de climatisation/chauffage solaire global, aucune différence fondamentale n'est à noter : en effet, que l'on utilise une machine à absorption ou une machine à adsorption, le schéma de principe du système ne change pas (les circuits sont les mêmes, les éléments constitutifs du système sont les mêmes, etc.).

Les seules différences envisageables au niveau du système global viennent du fait que les niveaux de température (au générateur, condenseur, évaporateur) sont différents entre un procédé d'absorption et d'adsorption :

- Les machines à absorption ont besoin d'une température plus élevée au générateur que les machines à adsorption. Ainsi on peut s'attendre à ce qu'un système utilisant la technologie d'absorption ait proportionnellement plus tendance à utiliser des capteurs à tubes sous vide ou à haute efficacité (double vitrage, revêtement téflon, etc.). Alors qu'une machine à adsorption pourra être plus facilement adaptée à des capteurs plans.
- De même pour la température de réjection de chaleur : elle doit souvent être plus basses pour les machines à absorption, d'où un recours à une tour de refroidissement plutôt qu'à un aéroréfrigérant sec. Ce n'est pas le cas pour les machines à adsorption, notamment celles utilisant des zéolites.
- De plus, toujours à cause de ces différences de niveau de température aux entrées et sorties de la machine, les seuils d'enclenchement et de déclenchement dans la régulation du système seront différents.
- De même, à cause de cette différence de température, il faudra choisir des éléments constitutifs du système fonctionnant dans la bonne fourchette de température (par exemple, les débitmètres sont particulièrement sensibles à la température).

Il faut ainsi noter que si la technologie utilisée est de l'absorption avec le couple Ammoniac / Eau, il est alors possible de produire à l'évaporateur de l'eau glacée ayant une température inférieure à 0°C. Les circuits évaporateur et de distribution ainsi que leurs éléments constitutifs (fluide, composants, métrologie) devront donc pouvoir fonctionner à une température négative.

Attention ! Comme dit précédemment, ces affirmations sont des généralités et devront absolument être vérifiées en se référant à la notice technique du constructeur de la machine.

En effet, pour donner un exemple parmi beaucoup d'autres, certains fabricants commercialisent une machine qui n'a pas besoin de ballon chaud pour fonctionner correctement.