

1ère partie  
Production  
de la vapeur

2ème partie  
Utilisation  
de la vapeur

**3ème partie**  
**Production**  
**de glace**



4ème partie  
Memento  
Technologique

5ème partie  
vers d'autres  
horizons

**3ème Partie** Liste des chapitres:

► **Chap I Présentation générale et conception de la machine à glace**

Chap II - La Documentation disponible

Chap III – Etude

Chap IV – Construction

Chap V – Fonctionnement et Performances

Chap VI - Les principaux choix et leur discussion

Chap VII – Documentation technique et Fournisseurs.

## **Chapitre I PRESENTATION GENERALE ET CONCEPTION DE LA MACHINE à GLACE**

pages

1	Section I – Evaporation, froid, compression et adsorption
3	Section II – Première approche de la machine à glace
5	Section III – Description rapide de la machine à glace
8	Section IV – Fonctionnement de la machine à glace
10	Section V – L'eau dans tous ses états
10	Section VI - Quelles performances ?
12	Section VII – Utilisation de la glace.

### **SECTION I – EVAPORATION, FROID, COMPRESSION ET ADSORPTION**

#### **§ 1 - LA NOTION DE CHALEUR LATENTE**

La quasi totalité des machines à production de froid fonctionne sur le principe de l'évaporation d'un fluide frigorigène dans une chambre froide.

L'évaporation, c'est à dire le passage d'un fluide de l'état liquide à l'état gazeux, nécessite une très grande quantité d'énergie thermique dénommée chaleur latente, sans pour autant que la température du fluide varie. La connaissance de ce phénomène physique, universel pour tous les corps, n'est pas communément répandue car sa perception n'est pas très intuitive.

Lors de la production de froid, la chaleur latente nécessaire à l'évaporation du fluide frigorigène est prélevée dans la chambre froide, dont le niveau de température est abaissé en conséquence – ce qui est le but recherché.

La chaleur latente prélevée lors de la vaporisation est intégralement restituée lorsque le fluide frigorigène repasse de l'état gazeux à l'état liquide, lorsqu'il se condense.

Le phénomène réversible de chaleur latente est également valable lors du passage d'un fluide de l'état liquide à l'état solide, par exemple l'eau qui devient glace, ou le beurre qui fond au soleil ou dans la poêle.

Le cas échéant, voir les notions de chaleur latente (changement d'état) et de chaleur sensible (changement de température) sur Wikipedia, ou dans le Memento technologique de la quatrième partie de la documentation.

## §2 – COMPRESSION OU SORPTION ?

Dans le cas d'une machine à production de froid, une fois que le fluide frigorigène s'est vaporisé en prélevant de la chaleur dans l'enceinte frigorifique, il faut bien faire quelque chose de cette vapeur. Il y a alors deux solutions.

La première solution consiste à aspirer et compresser ces vapeurs à l'aide d'une pompe et d'un moteur jusqu'à liquéfier le fluide frigorigène, puis à le refroidir, et à l'envoyer à nouveau s'évaporer dans l'enceinte frigorifique. C'est le principe du **froid par compression**, c'est sur ce schéma que fonctionnent la quasi totalité des installations de froid industriel et de froid domestique. L'évaporation du fluide frigorigène a lieu dans les petits tubes qui entourent le bac à glace du réfrigérateur. Puis les vapeurs frigorigènes sont aspirées, compressées et liquéfiées par le compresseur, ce faisant elles restituent les calories précédemment prélevées dans l'enceinte frigorifique. Il faut donc refroidir le frigorigène liquide, c'est le rôle du radiateur installé à l'arrière du réfrigérateur. Les fluides frigorigènes actuellement utilisés sont des productions hautement sophistiquées de l'industrie chimique.

La seconde solution consiste à faire absorber les vapeurs par un autre corps qui joue le rôle d'une éponge avide de les attirer. C'est le principe du **froid par sorption**. Mais une fois que l'éponge est saturée, il faut l'essorer, la désorber, par exemple en la chauffant, puis recommencer un autre cycle. L'"éponge" peut être un liquide (de l'ammoniac) ou un solide (par exemple: de la zéolite). Si une réaction chimique se produit entre l'éponge et les vapeurs de fluide frigorigène, on utilise le terme d' *absorption*. Si aucune réaction chimique ne se produit, s'il s'agit uniquement d'un phénomène physique, comme par exemple dans le cas de la zéolite avec de l'eau, on parle d' *adsorption*.

Le froid par compression nécessite de l'énergie mécanique/électrique, le froid par ad/absorption utilise de l'énergie thermique – et le capteur "soleil-vapeur" est là pour en fournir.

Le froid par compression est un processus continu de vaporisation / liquéfaction, alors que la production de froid par sorption est un processus par alternance sorption/ désorption, plus adapté à l'alternance jour/nuite de l'énergie solaire.

NB Il existe des procédés par absorption fonctionnant en continu, par exemple le procédé Electrolux, ou bien des systèmes au bromure de lithium. Il s'agit là de systèmes "haute technologie", et/ou dont le niveau de température n'est pas adapté à la production de glace.

## SECTION II – PREMIERE APPROCHE DE LA MACHINE à GLACE

Dans le cas de la machine à glace de "soleil-vapeur", le choix s'est porté sur

- un système à adsorption, utilisant
- l'eau comme fluide frigorigène, et
- la zéolite comme adsorbent.

La soleil permettant, la machine effectue un cycle par jour: désorption pendant la journée, et production de glace au petit matin. L'utilisation de la glace sous forme de galettes, qui est une forme de stockage de l'énergie solaire, est à la discrétion de l'utilisateur. La conduite de la machine est entièrement manuelle. L'utilisation de la zéolite et l'utilisation de l'eau comme fluide frigorigène nécessitent de disposer d'une petite pompe à vide du type "pompe à vide de frigoriste", d'une puissance de 150 W, à utiliser pendant quelques quarts d'heure par jour. Un panneau photovoltaïque d'un petit mètre carré est donc suffisant. Pour les puristes, ce pourrait être une pompe à motricité humaine.

### **Adsorption**

Soit un premier récipient métallique cylindrique vertical isolé thermiquement, dénommé évaporateur, avec un couvercle étanche en partie supérieure, et dans lequel sont disposés des plateaux contenant chacun deux à trois centimètres d'eau.

On fait le vide dans l'évaporateur. Conformément aux lois de la physique transcrites dans les tables de vapeur du prochain chapitre, à partir d'un certain niveau de vide, l'eau se met à bouillir et à s'évaporer (sans aucun apport de chaleur).

Soit un second récipient cylindrique horizontal isolé thermiquement, dénommé réacteur, contenant de la zéolite qui est un matériau en petites billes, constitué d'une "infinité" de petites cavernes, et dont la particularité est entre autres d'attirer avidement à elle toute vapeur d'eau passant à sa proximité, pour peu que les conditions de température et de pression s'y prêtent.

L'évaporateur et le réacteur sont reliés par une canalisation avec un robinet. La vapeur provenant de l'ébullition sous vide est happée par la zéolite, l'eau continue donc à bouillir. Mais il faut lui fournir de l'énergie thermique pour qu'elle se transforme en vapeur. L'évaporateur étant isolé thermiquement, la vapeur en formation prélève sa chaleur latente là où elle peut, c'est à dire dans l'eau bouillante contenue dans les plateaux. De ce fait, cette dernière se refroidit jusqu'à se transformer en glace, et c'était justement le but recherché.

Lorsque l'eau-vapeur se précipite dans les innombrables cavités de la zéolite, elle retrouve son état liquide, elle restitue alors la chaleur latente prélevée lors de la vaporisation, donc la température de la zéolite augmente. Or la capacité de la zéolite à adsorber de l'eau dépend de la pression mais aussi de la température. Pour un meilleur fonctionnement de l'ensemble, il convient de refroidir la zéolite. La zéolite est donc parcourue par un échangeur thermique à ailettes dans lequel on fait transiter un fluide froid, en l'occurrence de l'eau provenant d'un baquet à température ambiante.

Si la machine est correctement proportionnée, toute l'eau des plateaux est congelée lorsque la zéolite arrive à saturation. On constate que 1/6ème environ de l'eau des plateaux s'est évaporée, et que le reste est transformé en glace, ce qui n'est pas très éloigné des données des tables de vapeur d'eau (voir chapitre suivant).

On peut faire la comparaison entre l'évaporateur de la machine à glace et le bouilleur du capteur. Dans l'évaporateur, conformément aux tables de vapeur, l'eau se vaporise parce qu'elle est soumise au vide, l'énergie thermique nécessaire à la vaporisation provenant d'un *prélèvement effectué à l'intérieur* de l'évaporateur.

Dans le bouilleur, conformément aux tables de vapeur, l'eau se vaporise parce qu'elle est soumise à un niveau de température élevé, et plus ça bout, plus la pression monte. L'énergie thermique nécessaire à la vaporisation provient d'un *apport effectué à l'extérieur* du bouilleur.

Ici les termes "chaleur", "froid", ou "énergie thermique" sont interchangeables.

L'évaporateur, c'est un bouilleur fonctionnant à l'envers... et vice versa.

La phase d'adsorption est donc la phase de fabrication de la glace

Le conducteur de la machine à glace récolte les galettes de glace et en fait l'usage souhaité..

Le fluide frigorigène de l'installation est la fraction de l'eau initialement déposée dans les plateaux et qui a servi à fabriquer la glace. Elle est désormais prisonnière de la zéolite. Il faut donc maintenant désorber la zéolite avant d'envisager une nouvelle séance de fabrication de glace.

L'adsorption est un phénomène de surface par lequel des molécules de gaz (entre autres) se fixent sur une surface solide, la désorption étant le phénomène inverse.

### **Désorption**

Dans l'échangeur thermique qui parcourt la zéolite, on fait maintenant transiter un fluide thermique chaud, en l'occurrence de la vapeur d'eau provenant du capteur solaire. Sous l'effet de la chaleur, l'eau contenue dans la zéolite se transforme à nouveau en vapeur. On pourrait laisser simplement le fluide frigorigène s'évaporer dans l'atmosphère, mais pour une meilleure performance de l'opération il est préférable qu'elle se déroule sous vide, dans une enceinte fermée, ce sera explicité au prochain chapitre, dans la documentation sur la zéolite.

Le réacteur est donc relié à un condenseur, qui est par exemple un simple récipient fermé parcouru par un serpentin de cuivre où circule de l'eau à température ambiante. La vapeur d'eau se précipite cette fois sur le tube de cuivre qui est "la source froide" du système (et non plus sur la zéolite, car les conditions de température ne sont plus les mêmes...), elle s'y condense en restituant sa chaleur latente, et retombe goutte à goutte à l'état liquide au fond du condenseur.

Quand il n'y a plus de gouttes de condensation à se former sur le tube de cuivre, on considère que la désorption est achevée. Le conducteur arrête sa machine, et évacue les condensats de l'ancien frigorigène accumulés au fond du condenseur.

Nota: le condenseur de la future machine à glace sera peut-être différent de celui présenté ici, mais peu important pour le moment le type et le mode de fonctionnement du condenseur.

Dans l'ouvrage "la climatisation solaire" -de Francis Meunier et Daniel Mugnier, Dunod- Mai 2013 le chapitre 9 est consacré à la réfrigération solaire, et les auteurs y font magistralement le tour de la question. De facto l'ouvrage fait également le tour de la question en ce qui concerne les capteurs solaires dédiés au froid.

## **SECTION III - DESCRIPTION RAPIDE de la machine à glace / printemps 2013**

On décrit ici le prototype en cours de construction au printemps 2013, qui n'est pas une machine de production, mais qui est une machine destinée à être auscultée pour pouvoir éventuellement dimensionner une machine de production.

Les principaux organes de la machine à glace sont

- 1- Un évaporateur**, dans lequel sont disposés des petits récipients plats et ouverts contenant de l'eau à transformer en glace, mais dont une fraction servira de fluide frigorigène..
- 2 - un réacteur**, contenant de la **zéolite**, et parcouru par un **échangeur thermique à ailettes**, dans lequel transitent alternativement un fluide chaud et un fluide froid.
- 3- un condenseur.**
- 4 – un circuit de vide d'air et une pompe à vide.**
- 5 – un conduit avec robinet**, entre l'évaporateur et le réacteur.
- 6 – un conduit avec robinet**, entre le réacteur et le condenseur.
- 7 – un caisson isolé**, contenant l'évaporateur et le réacteur.
- 8 - une source chaude, ici de la vapeur** produite par le capteur solaire, ou par tout autre moyen.
- 9 - une source froide, ici un baquet d'eau** à la température ambiante

### **§ 1- UN EVAPORATEUR**

C'est une capacité métallique verticale isolée avec un couvercle supérieur étanche, dans lequel sont disposés les plateaux ou récipients contenant l'eau à transformer en glace, mais dont une partie sert de fluide frigorigène..

Le corps de l'évaporateur est muni d'un hublot permettant d'observer dans les récipients plats le phénomène d'ébullition de l'eau sous vide, puis de formation de la glace. Le couvercle de l'évaporateur est muni d'un joint torique pour l'étanchéité, et d'un petit hublot pour l'éclairage.

L'évaporateur est raccordé au circuit de vide d'air.

### **§ 2 - UN REACTEUR**

C'est une capacité métallique horizontale contenant de la zéolite, qui est un matériau poreux avide d'eau. La zéolite est parcourue par un échangeur thermique à ailettes, dans lequel transitent alternativement, sous la gouverne du conducteur de la machine, un fluide froid pendant l'adsorption (à savoir: de l'eau à température ambiante provenant d'un baquet) et un fluide chaud pendant la désorption (à savoir: de la vapeur provenant du capteur)

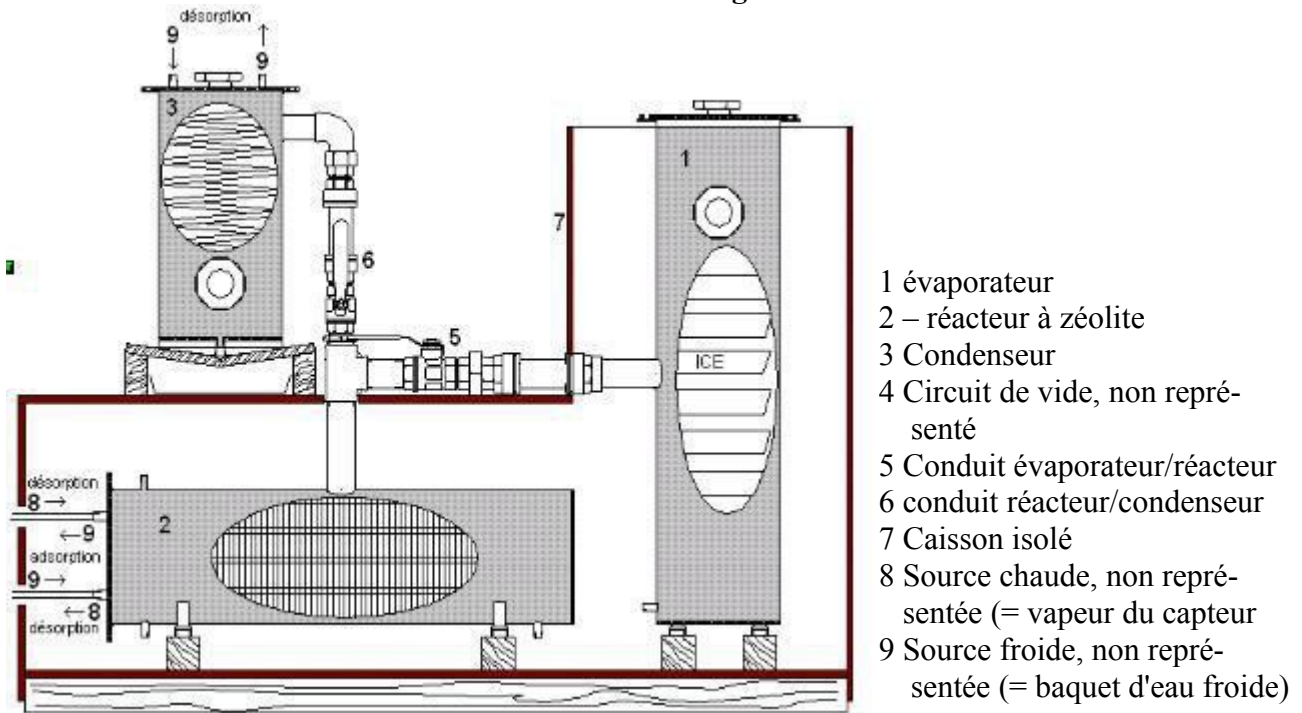
Le réacteur est raccordé au circuit de vide d'air.

### **§ 3 - UN CONDENSEUR**

Il s'agit ici d'un petit récipient, relié au réacteur lors de la désorption, et parcouru par un serpentin en cuivre où circule de l'eau froide provenant d'un baquet identique à celui évoqué au § 2 ci dessus. La vapeur d'eau en provenance de la désorption se dirige naturellement vers la zone froide (c'est à dire le serpentin), s'y condense, retombe en gouttes au fond du condenseur, et s'y accumule.

Deux hublots permettent d'éclairer et d'observer le phénomène de condensation. Lorsque le goutte à goutte cesse, on considère que la machine à glace a atteint ses limites de désorption. Le conducteur évacue alors les condensats par un petit robinet placé en partie basse du condenseur.

## Vue d'ensemble de la machine à glace à zéolite



Dans les installations à vapeur industrielles, les condensats sont évacués en permanence à l'aide d'une pompe. La petite dimension de la machine à glace ne justifierait pas une telle complication.

Il existe de nombreuses configurations de condenseurs, le choix définitif portera peut-être sur une autre configuration que celle ci dessus, mais il s'agit là d'un aspect secondaire sans interférence majeure avec la machine à glace.

Le condenseur est raccordé au circuit de vide d'air.

### § 4 - UN CIRCUIT DE VIDE D'AIR ET UNE POMPE à VIDE

Le dessin du circuit de vide, de l'emplacement et des détails d'exécution des points de tirage au vide est un des aspects les plus ardues et les plus subtils de la conception de la machine à glace, auquel sont consacrées deux sections du prochain chapitre.

La pompe à vide est une pompe utilisée couramment par les frigoristes, débit 40 litres/ mn, puissance 150 Watt environ, poids quelques kg .

Un vacuomètre (électronique !) permet au conducteur de connaître à tout moment le niveau de vide régnant dans l'installation.

### § 5 - UN CONDUIT AVEC ROBINET entre l'évaporateur et le réacteur.

Le robinet est manoeuvré par le conducteur de la machine. Il est fermé lors de la désorption, et ouvert lors de l'adsorption, pendant la fabrication de la glace. C'est donc dans ce conduit que transite la vapeur d'eau à une très faible pression, ce qui permet l'ébullition/ évaporation de l'eau dans les plateaux à eau de l'évaporateur.

La vapeur d'eau à très faible pression occupe un volume important, de l'ordre de plusieurs centaines de mètres-cubes par kilogramme de vapeur, il faut donc en tenir compte lors du dimensionnement de ce conduit. Du côté de l'évaporateur, une petite portion du conduit est en matériau transparent. Un petit morceau de tôle-témoin léger et brillant, suspendu à l'intérieur du tube transparent et agité par le flux ténu de vapeur, permet de visualiser le phénomène de désorption.

Lorsque l'agitation de la petite pièce de tôle-témoin cesse, ou bien lorsque l'on constate à travers le hublot de l'évaporateur que toute l'eau d'un récipient est prise en glace, on considère que la machine à glace a atteint ses limites d'adsorption et que la fabrication de la glace est achevée.

#### **§ 6 - UN CONDUIT AVEC ROBINET** entre le réacteur et le condenseur.

Le robinet est manoeuvré par le conducteur de la machine. Il est fermé lors de l'adsorption, et ouvert lors de la désorption, lorsque sous l'action de la chaleur la zéolite restitue la vapeur d'eau qu'elle avait emprisonnée. La désorption s'effectue à une pression plus élevée que l'adsorption, la vapeur est plus dense (cf les tables de vapeur), la section de ce conduit est moins importante que le conduit précédent. Quant à la visualisation du phénomène de désorption, il est inutile ici de disposer d'une portion transparente du conduit, c'est la formation et l'écoulement plus ou moins rapide de gouttes de condensation le long du serpentin du condenseur qui fait foi.

#### **§7 - UN CAISSON ISOLE** contenant l'évaporateur et le réacteur

C'est un caisson en contreplaqué, englobant principalement l'évaporateur et le réacteur, garni d'isolation du type laine de verre et/ ou de vermiculite.

**§8 - UNE SOURCE CHAUDE**, en l'occurrence de la vapeur produite par le capteur solaire, mais de la vapeur provenant de n'importe quelle autre source convient aussi bien, sous réserve de caractéristiques convenables de débit, et de pression/température.

Pour des premiers essais, et afin de s'affranchir des contraintes d'ensoleillement, on peut par exemple avoir recours à une chaudière électrique du type de celles utilisées dans les laveries de linge/ magasins "pressing", voire même une ou deux chaudières de centrale de repassage à usage ménager.

**§ 9 - UNE SOURCE FROIDE**, en l'occurrence un ou deux baquets d'eau à la température ambiante.

Compte tenu des faibles puissances en jeu, un baquet de quelques dizaines de litres d'eau froide, dont la température redescend à la température ambiante entre deux cycles de production de glace, est suffisant. On peut faire circuler l'eau à l'aide d'une petite pompe d'une dizaine de Watt, du type pompe pour fontaine de jardin, ou bien plus simplement surélever quelque peu le baquet, fonctionner par gravité, et relever manuellement l'eau à l'aide d'un seau.

-----

L'organisation de la machine à glace telle que présentée ci dessus ne fera probablement pas l'objet de remaniements majeurs. Par contre tous les détails sont susceptibles de modifications, notamment la configuration du condenseur et les détails du tirage au vide.

Selon le principe de Carnot, l'efficacité d'une machine thermique est d'autant plus importante que la différence entre la source froide et la source chaude est importante. Comme le rappelle Claude Bienvenu dans son ouvrage "la saga de l'énergie", 1994, "le principe de Carnot ne s'applique pas seulement à la machine à vapeur ou au moteur à explosion, , mais, de la même manière, aux réactions thermochimiques ou thermoélectriques..." (page 39)

Le principe de Carnot permet de calculer le rendement théorique maximum possible d'une machine, *non compris les inévitables pertes thermiques*, selon la formule :

$$\text{Rendement maximum "R"} = 1 - \frac{\text{Température de la source froide}}{\text{Température de la source chaude,}}$$

les températures étant exprimées en degrés Kelvin,  $0^\circ \text{ K} = \text{zéro absolu}$ ,  $273^\circ \text{ K} = 0^\circ \text{ C}$

Soit une source froide à  $25^\circ \text{ C} = 298^\circ \text{ K}$  (en pays chaud, il ne faut pas espérer beaucoup moins, ; sinon on n'aurait pas besoin de réfrigération), et une source chaude à  $90^\circ \text{ C} = 363^\circ \text{ K}$ .

Le rendement maximum théorique est  $R = 1 - (298/363) = \mathbf{0,18}$

Si l'on dispose d'une source chaude de  $160^\circ \text{ C} = 433^\circ \text{ K}$ , (par exemple : vapeur à 5 bar)

$$R = 1 - (298/433) = \mathbf{0,31}$$

Si l'on dispose d'une source chaude de  $200^\circ \text{ C} = 573^\circ \text{ K}$  (par exemple : vapeur à 15 bar)

$$R = 1 - (298/573) = \mathbf{0,48}$$

Le rendement final d'une installation de froid solaire est égal au rendement R maximum de Carnot, auquel "s'ajoutent" les différents rendements dus aux pertes thermiques du capteur solaire ( $R_c$ ), de l'installation de froid ( $R_f$ ), etc... le terme "s'ajoutent" étant impropre car les rendements, comme les pertes, ne s'ajoutent pas, ils sont multiplicatifs :  $R_{\text{final}} = R \times R_c \times R_f \times r \dots$ , ceci étant valable pour toutes les installations ou machines thermiques.

D'où l'intérêt de disposer d'une source chaude élevée, et de soigner l'isolation de la machine.

## **Section IV – FONCTIONNEMENT DE LA MACHINE À GLACE**

### **§ 1 - LA PRODUCTION DE GLACE** - phase d'adsorption

Le conducteur de la machine garnit d'eau les petits récipients, (environ un demi-litre, soit une hauteur de 2.5 cm), les installe dans le panier vertical en fil métallique, descend le panier dans l'évaporateur et referme le couvercle étanche. Il fait le vide dans le réacteur puis dans l'évaporateur, et ouvre lentement le robinet 5. Le robinet 6 est fermé.

Compte tenu du vide et conformément aux immuables tables de vapeur, l'eau entre en ébullition et se vaporise. La zéolite attire à elle les vapeurs d'eau. Lorsque la pression descend en dessous de 6 mbar, de la glace se forme à la surface de l'eau bouillante. L'énergie thermique nécessaire à la vaporisation est prélevée dans l'eau des récipients dont la température s'abaisse. Après que la couche superficielle de l'eau soit entièrement solidifiée en glace, l'adsorption de la vapeur d'eau par la zéolite se poursuit se poursuit par évaporation directe de la glace, conformément au phénomène de sublimation, jusqu'à ce que la totalité de l'eau contenue dans les récipients soit transformée en glace. Le conducteur maintient un vide de l'ordre de 2 à 3 mbar. Tous ces phénomènes peuvent être visualisés là travers le hublot de l'évaporateur. Si l'on a pris soin de placer dans l'évaporateur, en face du hublot, un petit récipient-témoin transparent contenant de l'eau, le



conducteur visualise aussi la couche de glace qui s'épaissit depuis la surface vers le fond, il sait donc quand la production de glace est achevée. Cette information est à recouper avec l'observation de la petite tôle témoin à travers la portion transparente de tube (6) entre l'évaporateur et le réacteur. Environ 1/6 de l'eau contenue dans les récipients s'est évaporée en tant que fluide frigorigène, le reste se transforme en glace.

Lorsque la vapeur est adsorbée par la zéolite, elle retourne à l'état liquide et donc cède sa chaleur latente, celle là même qu'elle vient de prélever dans l'eau des petits récipients de l'évaporateur. Il s'ensuit une élévation de température de la zéolite. Or les capacités d'adsorption de la zéolite diminuent lorsque sa température augmente. Le conducteur fait donc circuler de l'eau froide dans l'échangeur du réacteur. Une alimentation par gravité à partir d'un bidon de quelques dizaines de litres disposé à quelques dizaines de centimètres plus haut que le réacteur est amplement suffisant, mais on pourrait aussi utiliser une pompe électrique de 10 ou 12 Watt du type de celles utilisée pour les fontaines de jardin.

La durée d'une séance de production de la glace est de l'ordre de deux à trois heures. En fin de séance, le conducteur ouvre l'évaporateur et récolte la glace pour en faire l'usage souhaité. Afin de minimiser les pertes thermiques, une bonne solution consiste à transférer tout le panier avec les petits récipients et la glace directement dans l'armoire réfrigérée contenant les denrées à conserver.

La production de la glace peut avoir lieu n'importe quand, du moment que la zéolite a été préalablement régénérée. Un bon choix consiste à produire la glace au petit matin, avant de procéder à la régénération de la zéolite grâce à l'énergie solaire via la vapeur.

## § 2 - LA REGENERATION DE LA ZEOLITE - phase de désorption

Il s'agit maintenant de chauffer la zéolite pour évacuer l'eau qu'elle contient, pour la régénérer.

Le conducteur ferme le robinet 5, ouvre le robinet 6 entre le réacteur et le condenseur, et tire l'évaporateur et le condenseur au vide. Il relie le capteur solaire (ou toute autre source de vapeur) à l'échangeur thermique

La zéolite chauffe, l'eau qu'elle contient se transforme en vapeur qui se dirige vers la zone froide, à savoir le condenseur dont le serpentin est parcouru par un courant d'eau froide identique à celui qui circulait précédemment dans l'échangeur du réacteur. Au contact du serpentin, la vapeur d'eau se condense, les condensats gouttent et s'accumulent dans le fond du condenseur.

Un petit hublot sur le corps du condenseur permet de visualiser le phénomène. Lorsque le goutte à goutte cesse, on considère que, compte tenu des caractéristiques de l'énergie thermique disponible (notamment son niveau de température), la désorption a atteint ses limites. Le conducteur arrête sa machine, et évacue les condensats.

Le niveau de vide maintenu au condenseur lors de la désorption est de l'ordre de 40 mbar, dépendant étroitement du niveau de température de la source froide disponible (voir les tables de vapeur). La durée de la désorption dépend étroitement des caractéristiques de l'énergie thermique disponible. Dans le cas d'utilisation d'énergie solaire, il y a bien sûr intérêt à utiliser au maximum les capacités du capteur, et à dimensionner correctement l'un en fonction de l'autre (ce qui n'est pas le propos immédiat de la petite machine à glace décrite ci dessus...)

La machine à glace à zéolite est donc une machine fonctionnant par cycles, et non pas en continu.

## SECTION V - L'EAU DANS TOUS SES ÉTATS

Dans la machine à glace, on retrouve l'eau sous toutes ses formes, dans différents circuits.

**L'eau sous forme de glace :** la production de glace est le but recherché. Historiquement, la production de froid s'est effectuée pendant la première moitié du 20ème siècle, en grande partie sous forme de glace, ce qui permettait entre autres la commercialisation et le transport du froid, avant le développement des unités de production de froid de petite taille à usage ménager. La glace est un moyen de stockage de l'énergie, notamment de l'énergie solaire.

**L'eau sous forme de vapeur frigorigène :** elle permet d'extraire la chaleur contenue dans l'eau que l'on souhaitait transformer en glace.

**L'eau sous forme de vapeur en tant que fluide thermique :** elle est la source chaude du système, elle permet de transférer l'énergie solaire jusqu'au coeur de la zéolite afin de la chauffer et de la désorber.

**L'eau liquide de refroidissement à température ambiante** est la source froide du système, elle permet de refroidir la zéolite pendant l'adsorption, lorsque les vapeurs frigorigènes viennent s'y condenser. Elle permet aussi de refroidir le serpentin du condenseur, contre lequel les vapeurs de désorption (qui sont les mêmes que les vapeurs d'adsorption) viennent se condenser après avoir été expulsées de la zéolite.

En fin de cycle, l'eau est rendue à l'environnement et retrouve sa température initiale, la glace fond et fait de même, mais entre-temps l'utilisateur aura bénéficié d'une certaine quantité de froid, par exemple pour conserver des denrées alimentaires. Hormis la construction et la déconstruction de la machine, son fonctionnement n'aura donné lieu à aucun prélèvement ni aucune dégradation de l'environnement.

## SECTION VI - QUELLES PERFORMANCES ?

La machine à glace telle qu'elle est prévue dans le cadre de cette documentation est une petite machine, contenant environ 10 kg de zéolite, et produisant seulement quelques kilogrammes de glace par cycle. Elle devrait permettre

- de tester la viabilité de la configuration générale, notamment l'utilisation de la vapeur qui permet de porter l'énergie thermique au coeur de la zéolite afin de résoudre le délicat problème du transfert thermique à travers ce matériau.

- de calibrer une machine plus grande.

Il s'agit d'un pilote de démonstration, et non d'une machine de production.

### QUELLES DIMENSIONS ?

Une machine à glace à zéolite ne peut pas être une petite machine produisant une demi douzaine ou une douzaine de kilogrammes de glace par jour, tout d'abord en raison du redoutable effet d'échelle en matière de machine thermique. Le rapport entre les surfaces et le volume d'une machine

thermique augmente d'autant plus rapidement que sa taille diminue. Or les pertes sont notamment proportionnelles aux surfaces alors que la puissance croît avec le volume. En dessous d'une certaine taille critique, on arrive de fait à une impossibilité.

De plus, la machine à glace est prévue pour être couplée à un capteur d'énergie solaire thermique, qui lui aussi subit la loi de l'effet d'échelle en matière de machine thermique. Or les rendements sont multiplicatifs... et les pertes aussi. *Il est inutile de courir au devant d'un double échec en fabriquant une machine trop petite*, il vaut mieux porter l'effort sur une analyse détaillée de chaque composant..

Dans le cas de l'utilisation du capteur solaire thermique pour effectuer de la stérilisation médicale, on peut déplacer quelque peu le curseur de la taille minimale, l'intérêt médical étant prioritaire au regard de la rentabilité économique. Pour la simple cuisson alimentaire, comme pour la production de glace, le propos est différent.

D'autre part, une machine à glace à zéolite, qui plus est à conduite manuelle, ne peut pas être une petite machine pour des raisons économiques. Compte tenu de la baisse des prix des panneaux photovoltaïques, des réfrigérateurs à usage domestique sur panneaux électro-solaires sont désormais disponibles en abondance sur le marché à des prix abordables. C'est une évolution irréversible.

Si la production de glace par zéolite en utilisant l'énergie solaire devait trouver quelque utilité, ce serait probablement dans un domaine professionnel ou artisanal, avec une production au minimum de l'ordre de la centaine de kg de glace par cycle. Quand au domaine industriel... ce n'est pas celui de soleil-vapeur.org

## **QUEL COEFFICIENT DE PERFORMANCE ?**

Le coefficient de performance d'une machine frigorifique est le rapport entre la quantité de froid-énergie produite et la quantité d'énergie consommée. Il permet de comparer l'efficacité des différentes machines frigorifiques, à ceci près qu'il ne faut pas comparer le COP d'une machine à compression, qui utilise de l'énergie mécanique/ électrique, au COP d'une machine à sorption, qui utilise principalement de l'énergie thermique, sauf à introduire dans le calcul le rendement énergétique de la centrale électrique ou du moteur thermique (cf les groupes de réfrigération des camions frigorifiques)

Mais le COP ne prend pas en compte les prélèvements non remboursables sur l'environnement, notamment concernant l'énergie, pas plus que les dégradations irréversibles. La signification du COP est aussi tronquée que celle du Produit National Brut en économie, qui augmente avec la pollution et les efforts faits pour l'enrayer...Et pour être complet il conviendrait d'intégrer dans le calcul comparé des COP le raisonnement sur la forêt et le capteur, tel que présenté en page d'accueil de la documentation .

Bien sûr il faudra bien aussi, in fine, constater un poids de glace obtenu par mètre carré de capteur, mais tout le travail sur cette machine à glace n'a de sens que dans l'optique d'une redistribution des cartes en matière d'approvisionnement énergétique et d'impact environnemental..

On ne poursuivra pas ici le débat, tout en reconnaissant que le mot de la fin appartient à l'acheteur-utilisateur qui, comme tout le monde, raisonne en fonction de son intérêt immédiat, et de ce point de vue la production de froid par adsorption avec zéolite ou autre n'a pas encore la partie gagnée. Tant qu'il restera des pots de confiture gratuits dans l'armoire...

## SECTION VII – UTILISATIONS DE LA GLACE

Dans les régions technologiquement développées, où l'énergie électrique est disponible en tous points du territoire, on est habitué maintenant à une production de froid sur le lieu même de son utilisation: entrepôt frigorifique, étal commercial alimentaire, ou réfrigérateur domestique. Mais il n'en n'a pas toujours été ainsi.

Compte tenu des technologies disponibles, la production de froid à ses débuts, c'est à dire au cours de la première moitié du 20ème siècle, s'effectuait exclusivement dans de très grandes installations industrielles: entrepôts frigorifiques ferroviaires, maritimes, navires frigorifiques, brasseries. Une partie du froid servait à la production de glace en barres de plusieurs dizaines de kg, à la température moyenne de -5° C, transportées ensuite en charrettes à cheval ou autre, puis livrées à dos d'homme chez les particuliers et installées dans un compartiment prévu à cet effet dans le haut de l'armoire frigorifique. Et pendant très longtemps, la glace a servi de moyen de refroidissement des wagons frigorifiques lors des transports ferroviaires.

En ce début de 21ème siècle, malgré la dissémination des installations de production de froid individuelles, on trouve aux Etats Unis dans tous les magasins de grande distribution alimentaire, des armoires réfrigérées contenant des centaines de kilogrammes de glace sous forme de gros glaçons, en sacs de 15 ou 20 kg, disponibles à la vente.

Dans le cadre de la production de glace solaire, son utilisation la plus simple consiste à l'introduire immédiatement après fabrication dans une armoire réfrigérée . Afin d'éviter les pertes thermiques dûes notamment au démoulage, il est préférable de transférer l'ensemble glace + petits récipients, à récupérer et recycler ultérieurement.

D'autres modes d'utilisation de la glace, ou de la machine à glace, sont envisageables mais il est prématuré de s'étendre sur le sujet.