

P V
1980
035

Collection «Technologies douces»

LE CHAUFFE EAU SOLAIRE

Thierry CABIROL, Albert PELISSOU
Daniel ROUX

ÉDISUD

UNIVERSITÉ NATIONALE DU BENIN
ÉCOLE DES SCIENCES AÉRONAUTIQUES
Cotonou - Rep. Pop. du Bénin

TECHNOLOGIES DOUCES

L'insolateur plan à effet de serre et
Le chauffe-eau solaire

- Fonctionnement
- Réalisation
- Coût

Thierry CABIROL, Albert PELISSOU,
Daniel ROUX

UNIVERSITE NATIONALE DU BENIN
FACULTE DES SCIENCES AGRONOMIQUES
Cotonou - Rep. Pop. du Benin

ÉDISUD
La Calade, 13090 Aix-en-Provence

Introduction

Pourquoi faudrait-il consommer dans dix ans deux fois plus d'énergie qu'aujourd'hui ?

Surconsommation, gaspillage, épuisement des sources d'énergie les plus accessibles, jusqu'à quand cela peut-il durer ?

Le pari nucléaire peut-il constituer une réponse ? Les centrales atomiques et les risques mal maîtrisés qu'elles comportent sont-ils acceptables ?

Face à ces problèmes, un mouvement s'est dessiné en faveur des énergies « douces », énergie solaire, éolienne, géothermique pour ne citer que les plus connues. Elles permettent une production :

- généralement plus simple,
- moins traumatisante pour la nature et pour les hommes,
- plus économique à long terme,
- décentralisée (utilisation sur place d'une énergie disponible sur place).

L'énergie solaire est l'une des plus facilement exploitables ; elle est en outre inépuisable. Comme la plupart des énergies douces, elle donne à l'utilisateur la possibilité de subvenir sans intermédiaire à une partie de ses besoins. Ses applications sont nombreuses et variées ; citons le chauffage des habitations, des piscines, des serres, la production d'eau chaude sanitaire, la distillation de l'eau, le four solaire, le pompage de l'eau ou la production d'électricité.

Mais elle n'est pas douce parce que solaire. Autant les petites centrales solaires permettront aux villages ou aux petits groupes de population de produire eux-mêmes l'essentiel de l'énergie dont ils ont besoin, autant les grandes centrales resteront dans la ligne de production toujours plus centralisée de notre système.

Parmi toutes les utilisations possibles de l'énergie solaire, le chauffage de l'eau à usage domestique est l'une des plus immédiates et des plus simples.

C'est aussi l'une des plus répandues. Plusieurs millions de chauffe-eau solaires sont en service dans le monde, en particulier au Japon, en Israël, en Australie. En France, il existe plus de trente fabricants d'insolateurs* et de chauffe-eau solaires, les dessins abondent, les plans aussi pour « faire soi-même ». Bref, on en parle beaucoup et il s'en fabrique de toutes sortes.

Mais si le principe en est simple, la mise en pratique présente de nombreux pièges qui sont souvent sources de désillusions. Par ailleurs, l'énergie solaire est assez dispersée, ce qui amène en général à utiliser de grandes surfaces de captage. Nous verrons que pour chauffer, par une journée moyenne, 200 litres d'eau à 60 degrés il faut, dans une région ensoleillée de la France, environ quatre mètres carrés de capteurs* bien conçus et bien fabriqués.

Il serait certes agréable de penser qu'un morceau de tôle noire avec un tuyau, de l'isolant, une caisse et une vitre permettent de se passer de fuel et d'électricité. Un tel capteur ne fonctionnera le plus souvent que pendant quelques semaines ou quelques mois avec un rendement parfois dérisoire ; puis les soudures sautent, l'isolant se mouille à la première pluie et met plusieurs jours à sécher... on ne tire presque plus rien du chauffe-eau. Et pourtant, celui qui l'a fabriqué aura pu mettre beaucoup de temps et parfois d'argent, alors qu'avec des notions simples mais précises il aurait pu obtenir facilement beaucoup mieux.

Ces notions ne peuvent être fournies par un simple plan qui, même s'il est bon, n'est généralement pas applicable tel quel. Il ne permet pas d'améliorer un système, ni de prévoir ce que donneront les modifications qu'on veut lui apporter. Aussi avons-nous cherché à donner aux réalisateurs de chauffe-eau solaires les éléments essentiels pour comprendre l'ensemble de l'installation et la mettre en œuvre : depuis les données physiques de base jusqu'au prix des matériaux, en passant par l'explication du fonctionnement de chaque élément et la justification de l'emploi de tel élément ou du choix de tel montage.

Afin d'éviter certaines confusions inutiles et pour répondre à deux critiques qui nous ont été formulées :

1. Les chauffe-eau solaires tels qu'ils sont décrits ici, et le plus couramment rencontrés dans le commerce, peuvent changer certaines de nos habitudes, soit sur le plan de l'installation, soit sur le plan du raisonnement. Pas question en effet, avec la seule énergie captée du soleil, d'obtenir une eau chaude à température constante comme à la sortie d'un chauffe-eau classique, ni d'avoir de l'eau chaude en quantité non limitée comme à la sortie d'un chauffe-eau au gaz.

Ainsi :

- soit, se contentant de ce qu'apporte le rayonnement solaire (et, souvent, ce n'est pas beaucoup en hiver), on attend qu'il y ait du soleil pour utiliser ou stocker de l'eau chaude ;

- soit on ajoute un système de chauffage auxiliaire (mazout, gaz, bois, électricité...) comme précisé au chapitre X. Dès lors le chauffe-eau solaire sert souvent de « préchauffeur » pour le chauffage auxiliaire qui se

* Nous emploierons indifféremment tout au long de ce livre les mots « insolateur » et « capteur » pour désigner l'élément captant l'énergie solaire. En fait nous décrirons ici les insolateurs plans avec vitrage et dont le fluide chauffé est l'eau ; le terme « capteur », plus général, englobe aussi les concentrateurs ou tout autre appareil convertisseur du rayonnement solaire.

contente d'ajouter la chaleur nécessaire pour atteindre le niveau de température souhaité. Dans ce cas, qui est le plus fréquent, le chauffe-eau solaire joue surtout un rôle d'économiseur d'énergie payante.

2. Il existe d'autres types de chauffe-eau solaires que ceux décrits ici. Nous nous sommes attachés à celui qui est le plus aisé à mettre en œuvre avec des moyens limités.

Nous n'avons pas exposé non plus les circuits pour le chauffage collectif de l'eau sanitaire.

Préface à la sixième édition

Depuis la parution de ce livre, début 1976, la situation du « marché » de l'énergie solaire a sensiblement évolué, notamment dans le domaine du capteur plan. A cette époque, on ne trouvait que peu de matériels, et à des prix généralement élevés. C'était l'un des aspects justifiant la démarche de fabrication des capteurs solaires qui fait l'objet de quelques pages de cet ouvrage.

En 1980, on trouve en France plus de 50 marques de capteurs solaires, et l'on a de moins en moins intérêt à les faire soi-même. Mais le lecteur qui n'a pas l'intention de réaliser lui-même ses capteurs n'en continuera pas moins à trouver, dans la première partie du livre, les éléments lui permettant d'apprécier qualités, défauts et performances des appareils qu'il pourra rencontrer ou souhaiter acquérir.

Au-delà de la stricte fabrication des capteurs, qui ne représente en moyenne que le tiers du prix total de l'installation vendue et réalisée dans le cadre de circuits professionnels, l'objet essentiel de ce livre est de faciliter la compréhension et la mise en œuvre par soi-même d'un chauffe-eau solaire. Les prix indiqués dans cet ouvrage ne sont donc valables que pour celui qui réalise lui-même son installation. Ils sont bien sûr inférieurs à ceux des installateurs qui ont à tenir compte du coût de la main-d'œuvre et du bénéfice. Ainsi, et même calculés au plus juste, les devis présentés par les professionnels dépassent généralement 10 000 F pour un chauffe-eau individuel installé. Il n'en demeure pas moins que, même à ce prix et compte tenu des coûts des énergies classiques, un chauffe-eau solaire s'amortit en moins de dix ans.

De tels chiffres nous obligent à prendre conscience du prix de l'énergie, alors que nous n'avions pas coutume d'y prêter grande attention.

À propos de prix, un chapitre entier de ce livre est consacré au prix de revient des matériaux et à l'amortissement financier des installations. Nous n'avons pas cherché à réactualiser les prix indiqués car ils évoluent très vite et de façon très inégale, dans le temps et selon les éléments. C'est ainsi par exemple que les prix de capteurs recommencent à augmenter alors qu'ils avaient initialement baissé en valeur relative par rapport à leur valeur en 1975, ou encore que le prix du tube cuivre a subi des augmentations nettement supérieures à la moyenne du marché. Le réajustement des prix indiqués ici aurait dès lors toutes les chances de se retrouver caduc en quelques mois.

Notons par ailleurs que l'évolution accélérée des prix des énergies classiques améliore de plus en plus la rentabilité des installations solaires. Mais là encore, nous n'avons pas jugé bon de remplacer les calculs d'amortissement effectués sur la base de juillet 1975 par des calculs réalisés sur celle de 1980. Ils ne seraient guère plus durables ni significatifs.

Généralités

Un système de chauffage solaire se compose en général de trois parties :

- le captage ;
- le stockage ;
- la distribution.

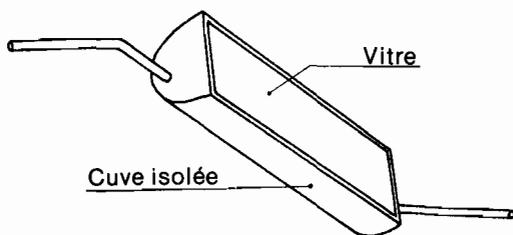
Pour le chauffe-eau, la distribution est celle de l'installation existante. Le système solaire s'intercale généralement entre l'arrivée du réseau et l'organe de chauffe traditionnel (chauffe-eau au gaz, cumulus électrique...).

Nous nous intéresserons ici aux systèmes dans lesquels le fluide chauffé est de l'eau.

Le captage du rayonnement solaire en vue du chauffage de l'eau à usage domestique utilise le plus souvent :

- les propriétés du « corps noir »* ;
- l'effet de serre**.

Dans le chauffe-eau le plus simple, captage et stockage sont groupés :



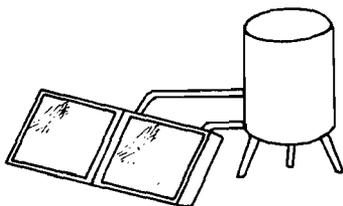
Ce système est compact et rustique, mais son rendement est faible. En effet, dès que le soleil est insuffisant pour augmenter la température de l'eau dans le réservoir (nuages, nuit...), la surface vitrée devient une

* Le corps noir est à la fois « absorbeur intégral » et « émetteur intégral », et cela pour toutes les longueurs d'onde. C'est ce que réalisent en partie les revêtements courants, foncés et mats, des absorbeurs. Nous verrons ainsi qu'en s'éloignant des propriétés du corps noir, certaines techniques plus sophistiquées peuvent permettre d'augmenter la quantité de chaleur captée ; voir, en annexe 2, les surfaces sélectives, mauvaises émettrices pour les grandes longueurs d'onde.

** Le phénomène d'effet de serre, décrit plus loin pour ce qui se passe dans l'insolateur, présente des différences avec ce qui se passe dans une serre. L'usage courant a néanmoins consacré cette expression que nous garderons ici.

grande source de déperditions ; aussi faut-il la couvrir d'un volet isolant dès que l'on estime que le soleil n'apporte plus assez de chaleur.

Nous étudierons les chauffe-eau avec captage et stockage séparés :



Ils sont plus chers, mais leur rendement est meilleur.

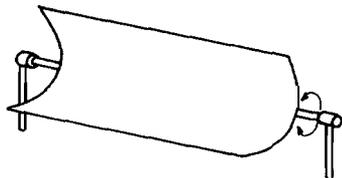
Nous choisissons par ailleurs l'insolateur **plan** à effet de serre, par opposition aux capteurs à concentration paraboliques ou cylindro-paraboliques. Ces derniers n'utilisent que le rayonnement **direct**, et négligent le rayonnement diffus, ce qui représente un manque à gagner de 10 à 20 %.

En outre, ces capteurs doivent être « pointés » en direction du soleil, ce qui nécessite un dispositif suiveur cher et compliqué.

Il est illusoire de penser que l'on a plus d'énergie avec ces appareils parce que la température obtenue est plus élevée.



Parabolique



Cylindro-parabolique

Nous étudierons ici le chauffe-eau individuel de 200 à 300 litres. Un chauffe-eau collectif de 500 ou 1 000 litres (plus économique que 3 ou 5 chauffe-eau de 200 l) peut se réaliser selon les mêmes principes. Mais le prix d'une telle installation permet alors d'envisager une régulation soignée, qui ouvre d'autres possibilités pour le chauffage d'appoint à utiliser les jours sans soleil. Il faut faire alors une étude plus complexe.

Il en est de même pour le chauffage des habitations. Remarquons simplement à ce sujet qu'il faudra 40 à 50 m² de capteurs pour assurer environ 70 % du chauffage d'une villa de 100 m². Cela revient très cher et n'est pas particulièrement esthétique s'ils sont simplement ajoutés à la construction.

Il est plus séduisant et intéressant de rechercher des solutions architecturales dès la conception de l'habitation.

Les chiffres relatifs aux ensoleillements donnés dans ce livre se rapportent à la Provence, pour l'unique raison que nous y habitons.

Partout ailleurs, les principes énoncés restent valables; seul l'ensoleillement change, ce qui conduit à faire varier les surface de captage. Nous donnons dans le texte les éléments suffisants pour apprécier cette différence.

Unités utilisées

Température

- **Degré Celsius** ou degré centigrade (°C)

C'est l'échelle de température courante.

Par définition, 0°C = température de fusion de la glace,

100°C = température d'ébullition de l'eau,

ces températures étant mesurées à la pression atmosphérique normale.

Énergie

- **Calorie** (cal)

C'est la quantité d'énergie nécessaire pour élever la température de 1 g d'eau pure de 1°C.

- **Kilocalorie** (kcal)

1 kcal = 1 000 cal, élève la température de 1 litre d'eau pure de 1°C.

- **Thermie** (th)

1 th = 1 000 kcal.

- **Joule** (J)

$1 \text{ J} = \frac{1}{4,18} \text{ cal}$; $1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$.

Puissance

- **Watt** (W)

Puissance de 1 joule par seconde; $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$.

- **Kilowatt** (kW)

1 kW = 1 000 W.

Énergie

- **Kilowatt-heure** (kWh)

C'est l'énergie fournie par un appareil de 1 kW qui a fonctionné pendant une heure.

1 kWh = 860 kcal; c'est une quantité d'énergie importante qui, par exemple, élève la température de 20 litres d'eau de 43°C.

1 kWh = 3 600 joules.

Pression

- **Kilogramme-force par mètre carré** (kgf/m²)

Pression exercée par une force de 1 kgf (ou un poids de 1 kg) sur une surface de 1 m².

- **Kilogramme-force par centimètre carré** (kgf/cm²)

Pression exercée par une force de 1 kgf (ou un poids de 1 kg) sur une surface de 1 cm².

$$1 \text{ kgf/cm}^2 = 10\,000 \text{ kgf/m}^2.$$

- **Millimètre de colonne d'eau** (mm CE)

Pression exercée par le poids d'une colonne d'eau de 1 mm de hauteur.

$$1 \text{ mm CE} = 1 \text{ kgf/m}^2.$$

Remarque

1 kgf/cm² = 10 m CE («mètres de colonne d'eau»),

voisin de 1 **bar**,

voisin de 1 **atmosphère** (atm), pression exercée à la surface de la terre (dans nos latitudes et au niveau de la mer) par le poids de la couche d'air qui environne la terre.

En chauffage, les pressions sont couramment exprimées en m CE.

CARPE DIEM



Première partie

Le rayonnement solaire et le capteur plan à effet de serre

Généralités sur le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire

Le soleil est une sphère de 1 400 000 km de diamètre qui rayonne autour de lui une énergie phénoménale grâce à des réactions nucléaires en chaîne.

Une partie de l'énergie qu'il produit sert à maintenir sa température, le reste est rayonné dans l'espace. La température apparente du soleil est de 6 000°K environ.

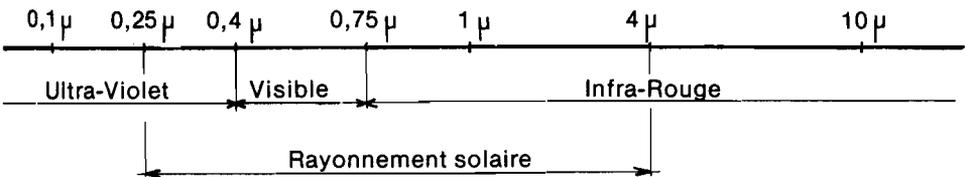
Une toute petite partie de cette énergie arrive à la surface de la terre.

Cette énergie nous parvient essentiellement sous forme d'ondes électromagnétiques comme celles utilisées dans les transmissions radio ou télé, mais de longueurs d'ondes plus courtes.

Le rayonnement solaire est une superposition d'ondes dont les «longueurs» vont de 0,25 micron à 4 microns. Celle qui sont utilisées en radio vont de 1 mètre à plusieurs kilomètres. Plus la longueur d'onde est courte, plus l'onde a d'énergie — d'où le danger des rayons «ionisants» dont les longueurs d'onde sont un million de fois plus courtes que celles du rayonnement solaire.

1 micron = 0,001 millimètre = μ 1 .

Noms couramment utilisés pour les différents domaines de longueurs d'onde



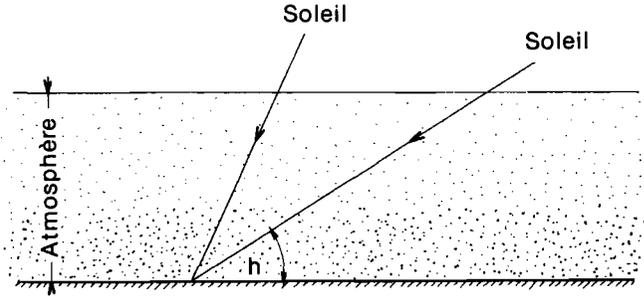
La densité moyenne de rayonnement solaire avant l'entrée dans l'atmosphère est de 1,4 kilowatt par mètre carré (1,4 kW/m²).

Cette valeur moyenne est appelée « constante solaire ». Elle varie selon les saisons (en fonction de la distance terre-soleil) d'environ 1 350 à 1 450 W/m².

Le rôle de l'atmosphère

- L'atmosphère dissipe une partie de l'énergie qui vient du soleil :
- par diffusion moléculaire (surtout pour l'ultra-violet);
 - par réflexion diffuse sur les aérosols (poussières, gouttelettes...);
 - par absorption gazeuse.

Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus la couche d'air traversée par les rayons est importante, moins il arrive d'énergie au sol.

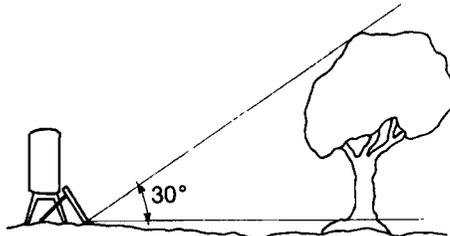


Lorsque l'angle que fait le plan horizontal du lieu avec les rayons solaires (h) devient inférieur à 15° , il est inutile de chercher à capter ces rayons. L'épaisseur d'air traversée a absorbé presque toute leur énergie.

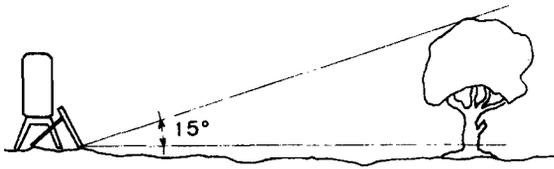
Cette remarque est intéressante car elle permet de juger si un obstacle au rayonnement est un « masque » pour le capteur. La détermination de ces masques dépend de plusieurs paramètres dont la saison, le moment dans la journée, etc.

A titre d'exemple

Si l'angle entre l'horizontale du lieu et la droite qui va du capteur au sommet de l'obstacle est supérieur à 15° , cet obstacle est un « masque » pour le capteur. Le soleil sera masqué, surtout en hiver. En été, le soleil étant plus haut dans le ciel, le problème se résout de lui-même.



MAUVAIS



BON

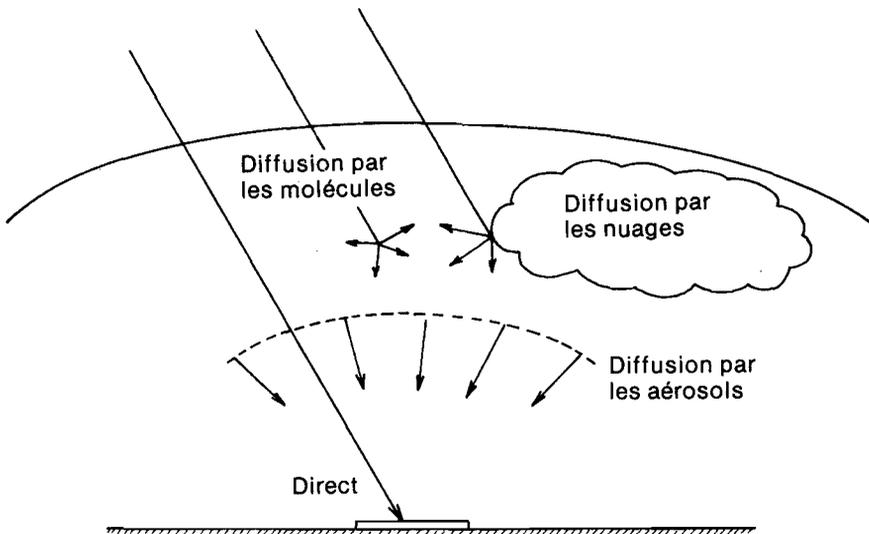
Les diverses actions de l'atmosphère vont donc diminuer une bonne partie de l'énergie solaire, surtout dans l'ultra-violet et dans l'infra-rouge.

Au sol, la composition du rayonnement solaire est la suivante :

| Longueur d'onde (microns) | % de l'énergie totale | Nature du rayonnement |
|------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 0,25 à 0,4 | 1 à 3 | ultra-violet |
| 0,4 à 0,75 | 40 à 42 | visible |
| 0,75 à 2,5 | 55 à 59 | infra-rouge |

Rayonnement solaire : rayonnement direct, rayonnement diffus, rayonnement global

L'action de l'atmosphère s'effectuant dans toutes les directions, une partie du rayonnement revient vers le sol en provenance de l'ensemble de



la voûte céleste. Ce « rayonnement diffus » s'ajoute au « rayonnement direct » du soleil pour donner le « rayonnement global ».

Un ciel complètement couvert éteindra le rayonnement direct, il ne restera plus que le rayonnement diffus.

D'autres phénomènes interviennent encore pour déterminer la somme des rayonnements au sol, car le sol réfléchit une partie du rayonnement vers l'atmosphère qui le rediffuse. Par ailleurs, le sol et l'atmosphère étant chauffés émettent leur rayonnement propre.

Les variations de l'énergie reçue

Elles sont fonction :

- de la durée d'ensoleillement ;
- de la masse d'atmosphère traversée ;
- de l'inclinaison des rayons ;
- de la nébulosité (nuages, brouillards...).

Ces facteurs sont déterminés par la saison, l'heure, la latitude, l'altitude, l'état du ciel. On ne peut pas prévoir exactement l'énergie qui arrivera sur une surface donnée pendant une certaine durée à venir. On ne peut raisonner que sur des moyennes calculées par la météo à partir des relevés qu'elle fait sur des années.

Par exemple, on estime qu'un mètre carré de mur vertical orienté vers le sud et situé dans la région de Marseille reçoit en moyenne sur l'année 2 kWh par jour.

Énergie effectivement reçue

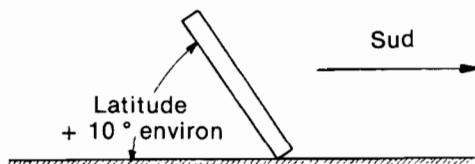
Elle dépendra de l'exposition de l'insolateur et de son environnement.

L'ensoleillement sera faible sur une surface située sur un versant nord ou derrière un rideau d'arbres. En plaçant cette surface perpendiculairement aux rayons du soleil, l'ensoleillement y sera maximum.

Comme des dispositifs simples ne permettent pas de suivre la trajectoire du soleil, on choisira la position fixe qui permettra au capteur d'absorber le plus possible d'énergie pour l'usage qu'on s'est fixé.

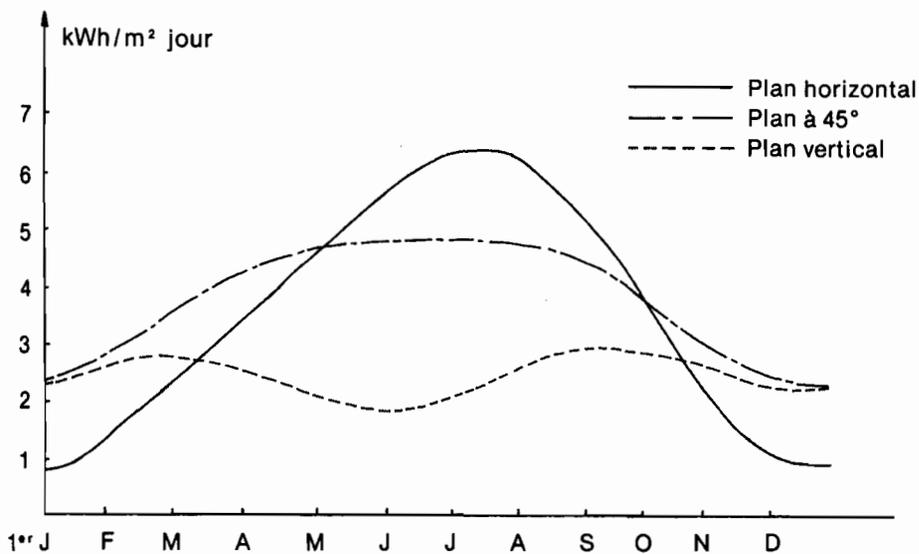
Comme on désire de l'eau chaude toute l'année, on placera le capteur ainsi :

- orienté vers le sud* ;
- incliné sur l'horizontale de façon à être perpendiculaire aux rayons solaires le plus souvent dans l'année, c'est-à-dire d'un angle égal à la latitude du lieu augmenté d'environ 10° , soit à peu près 50° pour Marseille.



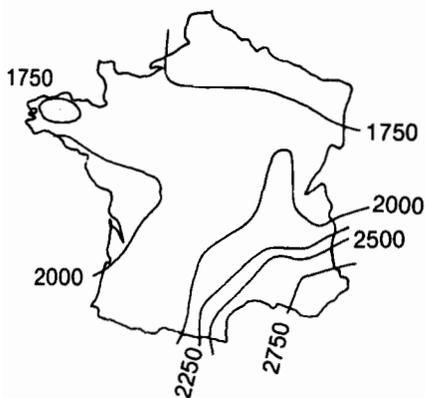
* Si l'on oriente les capteurs vers le sud-est ou le sud-ouest, on diminuera d'environ 15 % la quantité d'énergie captée.

**Courbes d'irradiation moyenne quotidienne
dans le SUD-EST de la France**

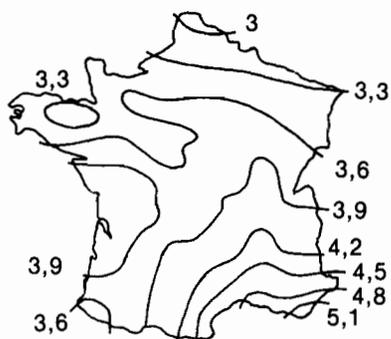


Ces courbes ont été établies à partir des relevés
de la Météorologie Nationale (Marseille-Marignane) depuis 20 ans

Ensoleillement annuel
moyen
en nombre d'heures



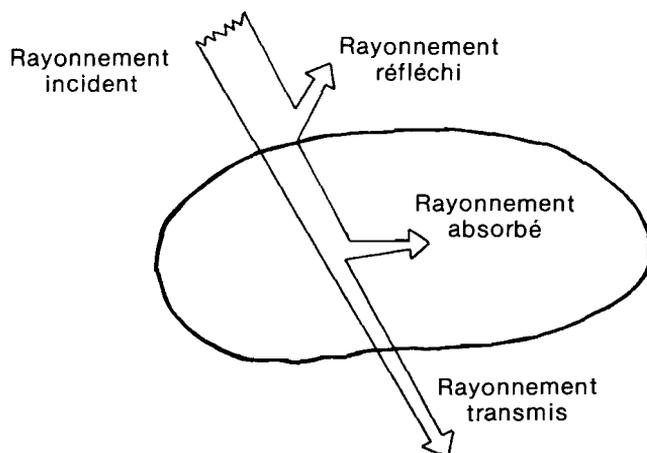
Energie moyenne
quotidienne
reçue au sol
(en kWh/m² jour)



D'après «Energie et Bâtiment» du Plan Construction

Comportement des corps vis-à-vis du rayonnement

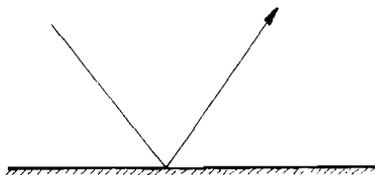
Un corps soumis à un rayonnement peut l'absorber, le réfléchir ou le laisser traverser. On peut caractériser le comportement de chaque corps vis-à-vis du rayonnement par trois coefficients :



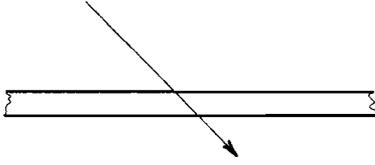
- un coefficient de réflexion, égal à la quantité d'énergie réfléchie divisée par la quantité d'énergie incidente : on l'appelle **R** ;
- un coefficient d'absorption, égal à la quantité absorbée divisée par la quantité incidente : c'est **a** ;
- un coefficient de transmission, égal à la quantité transmise divisée par la quantité incidente : c'est **T**.

On écrit alors que $a + R + T = 1$, ce qui veut dire que si l'on ajoute les rayonnements réfléchis, absorbés et transmis, on trouve le rayonnement incident.

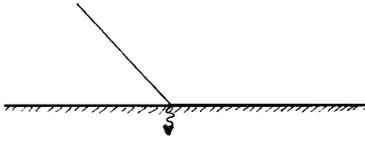
- Si $R = 1$, tout est réfléchi. C'est le miroir parfait.



- Si $T = 1$, tout est transmis. Le corps est parfaitement transparent.



- Si $a = 1$, tout est absorbé. Ce corps est appelé « corps noir ».



En fait, aucun de ces corps n'existe. Tous les corps sont plus ou moins absorbants, plus ou moins réfléchissants, plus ou moins transparents.

Tout se complique encore par le fait que ces coefficients peuvent varier avec la longueur d'onde, c'est-à-dire qu'un corps peut absorber certaines radiations et en réfléchir d'autres, etc.

Pour des questions de commodité, et pour un corps donné bien sûr, on considère que ces coefficients sont constants pour toutes les longueurs d'ondes comprises dans les domaines d'utilisation courante.

Une exception de taille à cette supposition : le **verre**. On verra son problème à l'occasion de l'effet de serre.

Les coefficients R , a , T dépendent de la nature du matériau, de sa couleur et de son état de surface. Un corps à surface polie réfléchira beaucoup plus que le même corps avec une surface mate, rugueuse (ou sale aussi). Les corps sombres absorberont le rayonnement solaire plus que les corps clairs.

Émission

Tous les corps émettent du rayonnement dans toutes les directions. On caractérise la facilité d'un corps à émettre du rayonnement par un facteur d'émission, ϵ , qui provient de sa comparaison au « corps noir ». Le « corps noir » étant celui qui émet le plus facilement, son coefficient ϵ est égal à 1.

Le coefficient ϵ d'un corps est égal à la quantité d'énergie qu'il émet, divisée par la quantité d'énergie qu'aurait émise un corps noir de même forme à la même température.

La quantité d'énergie émise par une surface dépend de la température de cette surface ainsi que de son coefficient ϵ :

- un corps noir à 50°C émet ϵ 630 watts par mètre carré ;
- un corps noir à 100°C émet 1 100 watts par mètre carré ;
- un corps noir à 150°C émet 1 800 watts par mètre carré.

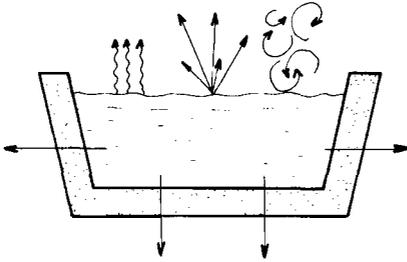
Une surface de coefficient $\epsilon = 0,6$ à 100°C émettra $1\ 100 \times 0,6 = 660$ W/m².

La température du corps définit aussi le domaine des longueurs d'ondes dans lequel le corps aura la possibilité d'émettre. Plus la température est élevée, plus les longueurs d'ondes des rayonnements émis seront courtes. Par exemple, le soleil à 6 000°C émet entre 0,25 et 4 microns. Les corps dont la température est de l'ordre de 60°C émettent entre 4 et 70 microns, soit uniquement dans l'infra-rouge. C'est précisément cette différence entre les longueurs d'ondes du rayonnement solaire et du rayonnement des corps à des températures de l'ordre de 100°C qui est exploitée dans les capteurs pour obtenir l'effet de serre (voir paragraphe «La couverture transparente»).

L'insolateur plan à effet de serre

C'est un appareil simple qui capte par une surface en général plane et fixe le rayonnement (direct et diffus) qui est immédiatement absorbé et transformé en chaleur. Les températures obtenues vont de quelques degrés au-dessus de la température ambiante (simple exposition d'une surface absorbante au soleil) à quelques dizaines de degrés au-dessus de la température ambiante (effet de serre simple ou double).

Si l'on exposait directement de l'eau au soleil, on constaterait une augmentation de sa température de quelques degrés, puis une stabilisation de cette température. A cette position d'équilibre, l'eau perd autant d'énergie qu'elle en reçoit, et de plusieurs façons :

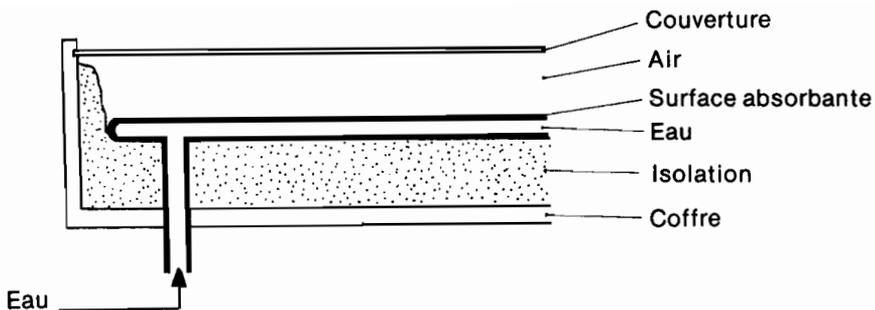


- par évaporation;
- par émission vers l'espace d'un rayonnement infra-rouge (voir paragraphe «Émission» au chapitre précédent);
- par convection de l'air ambiant (les courants d'air au-dessus de l'eau la refroidissent);
- par conduction dans les matériaux qui composent le récipient contenant l'eau.

Pour augmenter la température d'équilibre atteinte par l'eau, il faut diminuer les pertes. On y arrive en plaçant une vitre au-dessus de l'eau et en calorifugeant le récipient au mieux.

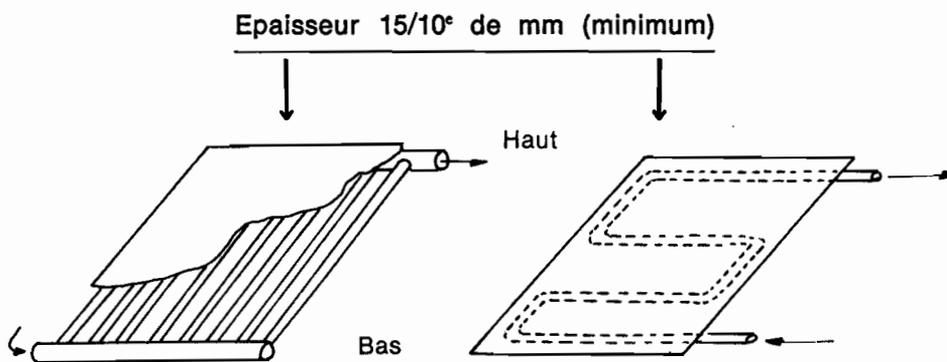
Ainsi, le plus souvent, un insolateur sera constitué :

- d'une surface absorbante (ou absorbeur);
- d'une isolation thermique latérale et arrière;
- d'une couverture transparente en avant de l'absorbeur;
- d'un circuit de fluide situé sous l'absorbeur et destiné à évacuer la chaleur produite vers le lieu d'utilisation ou d'accumulation.

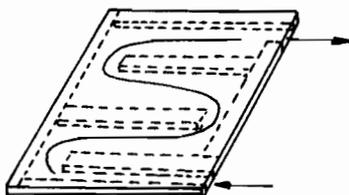


La figure ci-dessus représente un des modèles les plus simples, dans lequel l'eau circule dans un réservoir très plat (2 à 4 mm d'épaisseur) aménagé sous la surface absorbante.

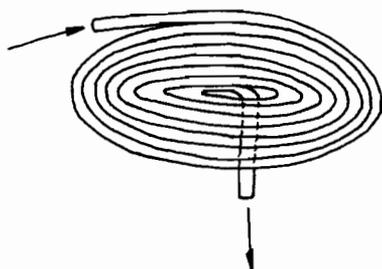
Mais de nombreuses autres possibilités existent pour réaliser une circulation de fluide sous l'absorbant.



Tubes soudés ou brasés sous la surface absorbante (distance entre les tubes inférieure à 5 cm).



Absorbant constitué par 2 tôles soudées sur des fers plats qui constituent des chicane pour le fluide.



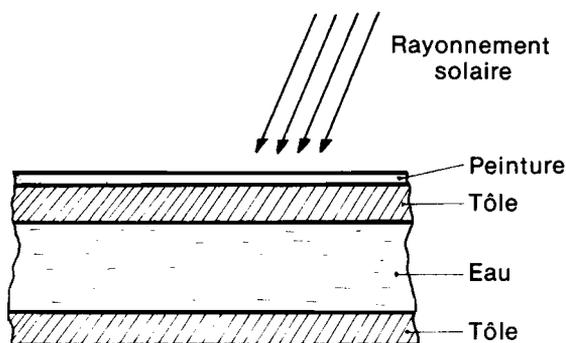
Tuyau souple de plastique (par exemple d'arrosage) roulé en spirale.

Surface absorbante et fluide caloporteur

L'absorbeur et le circuit du fluide caloporteur sont des éléments très importants d'un insolateur. C'est l'absorbeur qui capte le rayonnement. Il peut être en plastique, en cuivre (bien, mais cher), en aluminium ou en acier. L'aluminium est à déconseiller car il se crée dans le circuit complet (insolateur avec tuyauterie et ballon de stockage) des phénomènes de corrosion très rapides, si on n'utilise pas un fluide spécial, qui mettent l'ensemble hors d'usage rapidement. L'acier galvanisé est à déconseiller pour la fabrication de l'absorbeur, dont la température dépassera souvent 55°C.

L'absorbeur est recouvert d'une peinture mate (pour éviter les réflexions) et foncée (pour avoir un bon coefficient d'absorption) comme le marron, le bleu, le vert, le rouge, le noir. Cette peinture devra atteindre des températures avoisinant 100 à 110°C. Elle devra donc être résistante.

Cette couche de peinture sur l'absorbeur devra être la plus mince possible. En effet, les peintures sont en général des matières isolantes ou en tout cas mauvaises conductrices de la chaleur.

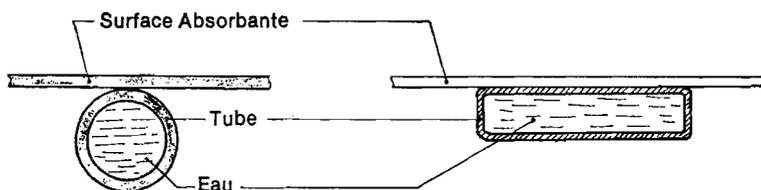


Plus cette couche de peinture est épaisse, plus la chaleur aura du mal à la traverser. La peinture va s'échauffer et rayonnera vers l'avant. Pour avoir de l'eau à 50°C, la couche de peinture sera à 55°C, par exemple. L'insolateur perd de l'énergie à un niveau de température supérieur à celui de l'eau qu'il fournit. C'est donc une baisse de rendement du capteur.

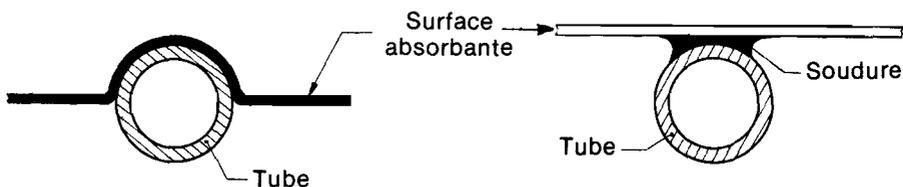
Lorsqu'on peint la surface avant de l'absorbeur, ne passer qu'une couche!

Toutefois, la peinture mate ne peut constituer une protection efficace de l'absorbeur contre la rouille s'il est en acier non inoxydable. Dans ce cas on passera une ou deux couches d'antirouille de bonne qualité sur la face avant, et deux au moins sur la face arrière (au pistolet si possible pour faire des couches plus fines); il vaut mieux un absorbeur qui «dure» longtemps, même s'il perd un petit peu à cause de la peinture.

Le circuit caloporteur doit permettre de récupérer la chaleur obtenue à l'absorbeur, donc avoir le meilleur contact « thermique » avec lui. Il faudra préférer un film d'eau de 2 à 4 mm d'épaisseur sous la surface absorbante à des tubes fins fixés sous cette surface.



Dans le cas d'emploi de tubes, la chaleur a du mal à passer de la plaque absorbante à l'eau qui circule dans les tubes. On a à peu près le même phénomène qu'avec une couche de peinture trop épaisse. La surface absorbante s'échauffe plus pour vaincre la « résistance thermique » supplémentaire, et rayonne beaucoup plus vers l'extérieur. Peu de calories vont donc à l'utilisation. Si on veut absolument utiliser des tubes, on déforme la plaque absorbante ou on soude les tubes sur toute leur longueur. Dans les deux cas, on a des solutions compliquées et chères.



Pour le choix des circuits de fluide, voir plus loin (deuxième partie, chapitre 1).

Surface absorbante - absorbeur

Bien qu'il soit relativement facile de recueillir à peu près 50 % de l'énergie solaire incidente à l'aide d'un insolateur bien fait, le bricolage de l'absorbeur est souvent source de désillusions.

Parmi les solutions possibles :

- a) **Tuyau de polyvinyle** de couleur foncée enroulé en spirale bien serrée. Le tuyau d'arrosage courant coûte aux alentours de 1,50 F le mètre. Une longueur de 50 m donnera, une fois enroulée, une surface de captation de l'ordre du mètre carré, donc c'est peu cher et facile à réaliser (voir un exemple en annexe 1).

Inconvénients : le plastique va rapidement vieillir sous l'action de la chaleur et des ultra-violet (ceux qui traversent la couverture transparente). Il faudra donc le changer de temps en temps. Une douche «solaire» réalisée de cette façon n'a résisté que quatre mois d'été, après quoi le plastique est devenu marron — il était vert — puis s'est fissuré. L'ensoleillement et les températures étant moins importants en hiver, ce type de capteur pourra y résister, mais sa durée de vie est tout de même assez courte.

Un tel montage sera intéressant si l'on veut faire des expériences pas trop chères et rapides à mettre en œuvre.

Plus résistant, le tuyau semi-rigide de polyéthylène noir donnera de bons résultats. Néanmoins, il supporte mal la pression lorsqu'il est chaud.

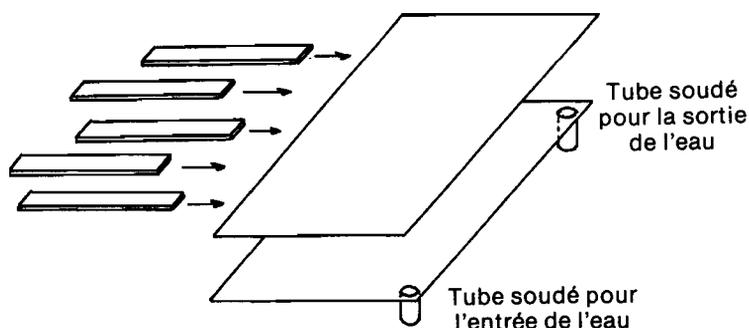
b) Réalisation d'un absorbeur métallique

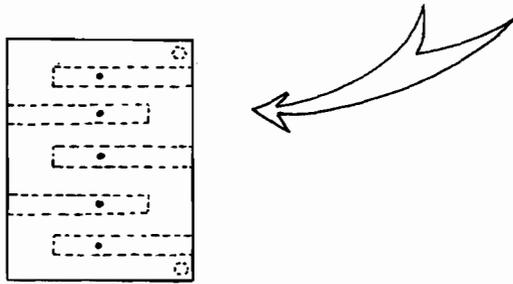
L'absorbeur est très délicat à réaliser; de plus, il demande un outillage complet et cher.

L'utilisation de tubes métalliques est à déconseiller pour la fabrication de l'absorbeur (voir la justification au paragraphe précédent). Il vaut mieux avoir sous la surface absorbante un «film» d'eau de 2 à 4 mm d'épaisseur.

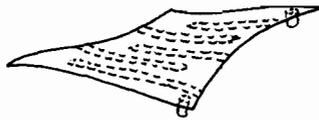
Pour cela, on prend deux tôles planes de 0,8 mm d'épaisseur, qu'on va superposer en ayant intercalé auparavant des fers plats de 2 à 4 mm d'épaisseur et 3 à 4 cm de large (voir les dessins ci-dessous). Ces fers plats vont maintenir l'espace nécessaire à la circulation de l'eau entre les tôles tout en la dirigeant rationnellement.

On soude sur tout le périmètre de l'absorbeur. Les fers plats sont juste soudés par des points à leurs extrémités. Il faut aussi «pointer» par soudure les tôles sur les fers plats comme indiqué sur le dessin pour éviter le gonflement de l'absorbeur sous la pression de l'eau.

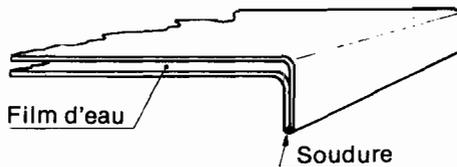




Malheureusement, si l'on soude les tôles sur leur périmètre, l'absorbeur obtenu sera complètement voilé.



Si l'on veut éviter un résultat de cette sorte, il est nécessaire de «tomber» les bords des deux tôles sur 3 cm avant soudure, pour nervurer l'ensemble et le raidir.



Nous avons réalisé un absorbeur de 1 m × 2 m, sur ce modèle. Il revient très cher, et même si ses performances sont bonnes, nous pensons que la solution suivante est plus intéressante car, pour des rendements identiques, les prix de revient sont moins élevés avec une plus grande durabilité.

En attendant d'avoir une production industrielle de capteurs spéciaux et bien adaptés, on aura presque toujours intérêt à utiliser des radiateurs de chauffage du commerce.

c) Utilisation de radiateurs de chauffage du commerce

Ils sont étudiés pour que l'eau chaude qui entre perde le plus vite possible ses calories dans l'espace environnant. Les contacts thermiques entre le circuit d'eau et la surface d'échange sont donc particulièrement bien faits. Si l'on ne dispose pas de matériel de soudure, de plieuse, etc.,

on peut acheter un radiateur de chauffage central dans le commerce — ou en récupérer un —, le peindre d'une couleur mate et foncée, pour obtenir un absorbeur qui fonctionnera très bien. Les résultats seront presque toujours meilleurs que ceux des bricolages; les fabricants d'insolateurs les utilisent de plus en plus.

Plus le radiateur est léger, moins il a d'inertie thermique. Par exemple, un insolateur avec un radiateur en acier démarrera plus vite le matin qu'un capteur avec un radiateur en fonte; on préférera les radiateurs légers et extra-plats aux radiateurs lourds.

Certaines marques ont mis au point des panneaux très plats à bonnes performances, pour des prix assez abordables (de 120 à 250 F le m² dans les dimensions qui nous intéressent). Ils sont légers et existent en dimensions variables: hauteurs de 20 cm à plus de 1 m et longueurs à la demande de quelques centimètres à plusieurs mètres.

Isolation thermique

L'isolation devra être très bonne autour de la cellule de captation. Le soleil nous donne de la chaleur, mais pas suffisamment pour se permettre de la gâcher. L'isolation est constituée en général par 5 à 10 cm de laine de verre (si possible avec pare-vapeur) située derrière l'absorbeur et sur les côtés.

Avantages de la laine de verre :

- elle est économique;
- c'est un excellent isolant;
- elle résiste à plus de 100°C.

Inconvénients majeurs : elle perd ses qualités isolantes dès qu'elle est humide. D'autre part, si elle est disposée sur un plan incliné, on constate qu'elle finit par se tasser. Pour y remédier, on peut utiliser de la laine de verre à fibres longues, en superposant deux matelas peu épais (4 cm), collés sur pare-vapeur, ou mieux des panneaux rigides de laine de verre; on prendra des panneaux de faible densité, ce sont les moins chers et leur résistance est ici déjà largement suffisante.

Si on utilise de la laine de verre, il faut théoriquement prévoir une coque d'insolateur parfaitement étanche, sinon l'eau (de pluie, de rosée, condensations...) finit par mouiller la laine qui devient conductrice de la chaleur, et on n'arrive même plus à chauffer un peu d'eau.

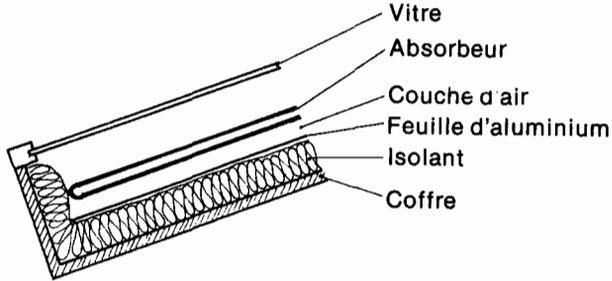
On peut également utiliser des mousses pour l'isolation : rigides ou non, mousse de polyuréthane, etc. Attention, car ces mousses ne résistent pas toutes à des températures voisines de 100°C. Par contre, elles sont légères, faciles à découper, coller, etc. La mousse de polyuréthane en bombe, souvent utilisée pour l'isolation des «cumulus», est très pratique, mais chère.

Enfin, on peut utiliser :

- les copeaux de bois tassés entre deux feuilles de contreplaqué ou d'Isorel;

- les panneaux de liège aggloméré.

On peut encore améliorer l'isolation d'un insolateur en plaçant une feuille d'aluminium entre le radiateur et l'isolant. Cette feuille réfléchira vers le radiateur l'infra-rouge que ce dernier émet vers l'arrière. Mais il convient de **laisser une couche d'air** entre le radiateur et la feuille réfléchissante d'environ 1 cm.



Une solution valable et pas trop chère consiste à combiner un panneau rigide de laine de verre de 4 cm d'épaisseur avec un panneau de 3 cm de mousse de polyuréthane. Ce deuxième panneau se trouve du côté du coffre, la laine de verre du côté de l'absorbeur. Elle encaissera les fortes températures et protégera la mousse qui, elle, ne craint pas l'humidité.

La couverture transparente : l'effet de serre

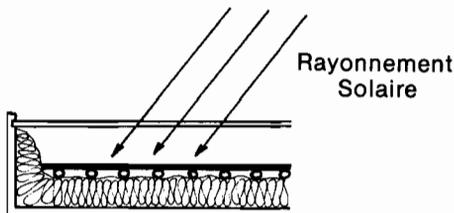
On utilise la couverture transparente devant l'absorbeur pour plusieurs raisons :

- **Isolation** : S'il n'y avait pas cette couverture, l'air extérieur viendrait contre l'absorbeur et ne lui permettrait pas de s'échauffer de beaucoup. La vitre limite les pertes par convection. L'espace optimal qu'il faut laisser entre la vitre et l'absorbeur est de 28 mm (en pratique de 25 à 40 mm).

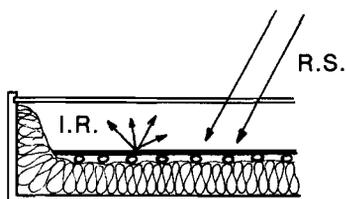
- **Effet de serre** : La couverture transparente doit réaliser l'effet de serre, c'est-à-dire qu'elle doit laisser passer le rayonnement solaire et récupérer le plus possible le rayonnement émis par l'absorbeur.

Que se passe-t-il dans un insolateur ?

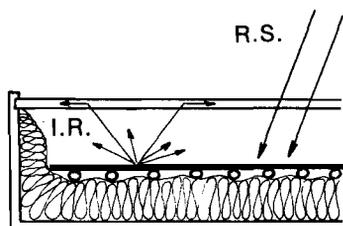
Le rayonnement solaire arrive devant la couverture transparente. Si celle-ci est une vitre, ce rayonnement va traverser presque intégralement et atteindre l'absorbeur.



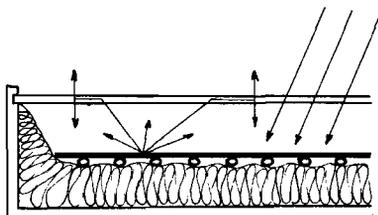
L'absorbeur a été peint de façon à s'approcher le plus possible du « corps noir ». Il va donc absorber tout le rayonnement solaire et s'échauffer. Sa température pourra monter de 40 à 100°C selon le débit d'eau qui va le traverser, et il va rayonner lui aussi, mais pas dans le même domaine de longueurs d'ondes que le soleil. Alors que le soleil rayonne entre 0,25 et 2,5 microns, l'absorbeur émettra entre 4 et 70 microns, c'est-à-dire dans l'infra-rouge (revoir au paragraphe « Comportements des matériaux »).



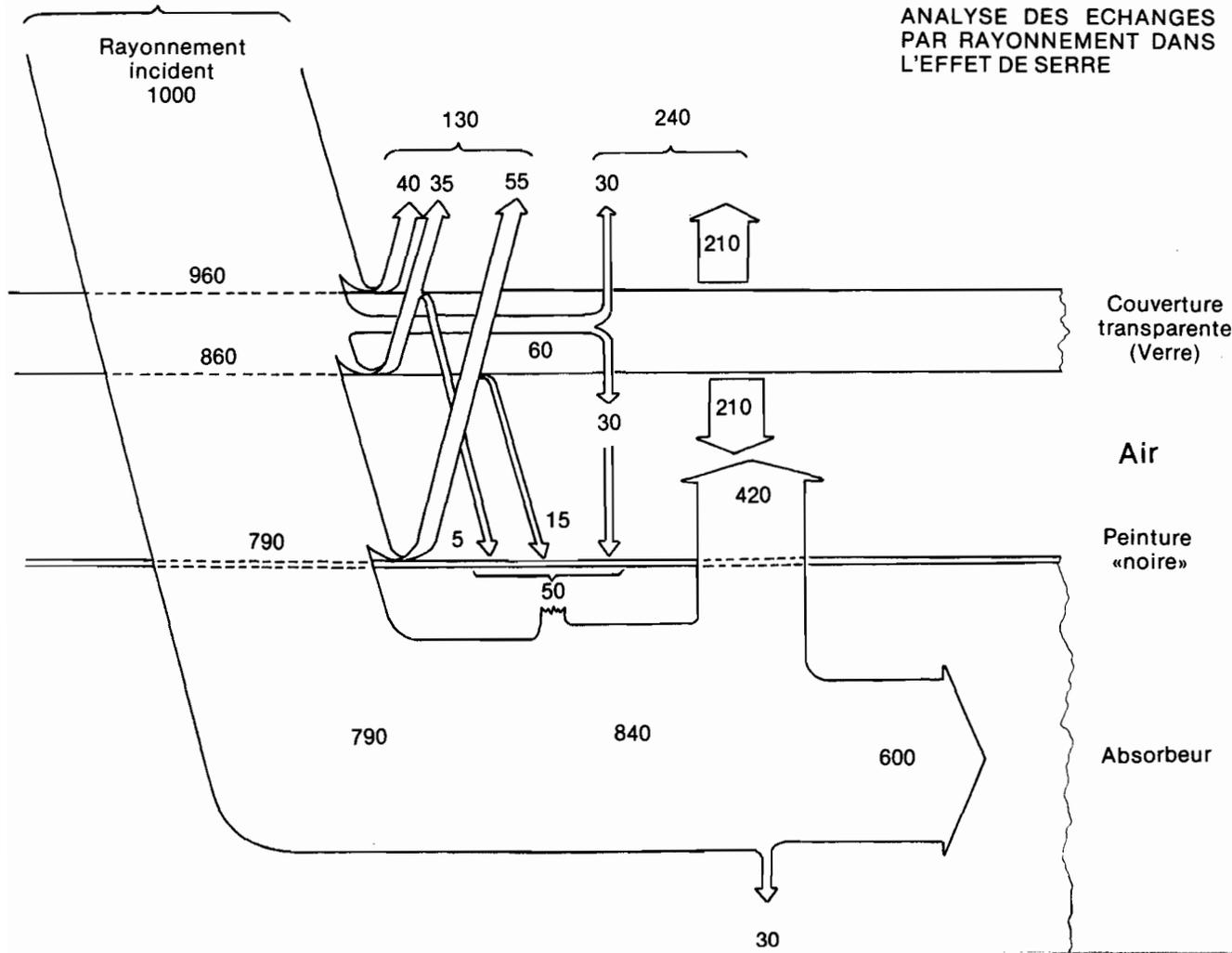
Ce rayonnement émis par l'absorbeur va essayer de sortir de l'insolateur et pour cela il arrive sur la vitre. Or, si le verre est transparent pour le rayonnement solaire (courtes longueurs d'ondes), il est opaque pour le rayonnement infra-rouge. La vitre va donc **absorber** tout le rayonnement émis par l'absorbeur.



En absorbant ce rayonnement, la vitre s'échauffe. Sa température est comprise, selon la température de l'absorbeur, entre 30 et 50°C. Elle va se comporter comme un corps noir — qu'elle est pour l'infra-rouge — et rayonner elle aussi par toute sa surface, c'est-à-dire à peu près autant par ses deux faces. L'absorbeur recevra donc le rayonnement solaire augmenté de la moitié du rayonnement de la vitre : c'est l'effet de serre.



ANALYSE DES ECHANGES
PAR RAYONNEMENT DANS
L'EFFET DE SERRE

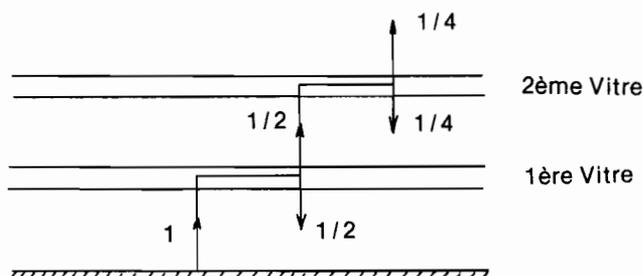


La figure suivante explique tous les échanges par rayonnement qui se passent entre la vitre et l'absorbeur pour un fonctionnement courant à 40°C.

Il ne faut pas «s'affoler» devant la complexité apparente de ce dessin. Il représente exactement le phénomène décrit auparavant, mais en y ajoutant toutes les réflexions et absorptions parasites. La vitre n'est pas complètement transparente et réfléchit 7,5 % du rayonnement incident. Elle absorbe aussi un peu de ce rayonnement (6 %) qu'elle réémet par ses deux faces, etc.

Dans le schéma présenté à la page suivante, les chiffres indiqués correspondent à un insolateur de 1 m² qui recevrait 800 W et en produirait 480, ce qui représente un **rendement instantané*** de 60 %. Pour une température extérieure de 15°C, l'absorbeur est alors à 45°C.

On pourrait penser augmenter le nombre des vitres devant l'absorbeur, et ainsi récupérer chaque fois un peu des pertes par rayonnement de l'absorbeur.



Ceci est vrai, mais en augmentant le nombre de vitres devant l'absorbeur, on diminue la transparence globale de la «couverture transparente». Le verre à vitre, par exemple, a un facteur de transparence égal à environ 0,87, c'est-à-dire que seulement 87 % du rayonnement solaire le traverse. Si on a deux vitres, la transparence globale des deux vitres n'est plus que de

$$0,87 \times 0,87 = 0,757.$$

L'absorbeur ne reçoit plus que les trois quarts du rayonnement solaire. Si l'on rajoute encore une vitre, la transparence n'est plus que de 0,658!

Avant de rajouter une vitre, il faut donc savoir si ce qu'on perd en transparence est compensé par ce qu'on récupère par effet de serre supplémentaire.

Ceci dépend du fonctionnement du capteur : si l'on a un «fort» débit

* Ce «rendement instantané» ne concerne que le capteur considéré à un moment donné. Il ne faut pas le confondre avec le rendement moyen d'installation sur une période donnée (rendement de journée, ou de mois, ou d'année) qui fait intervenir :

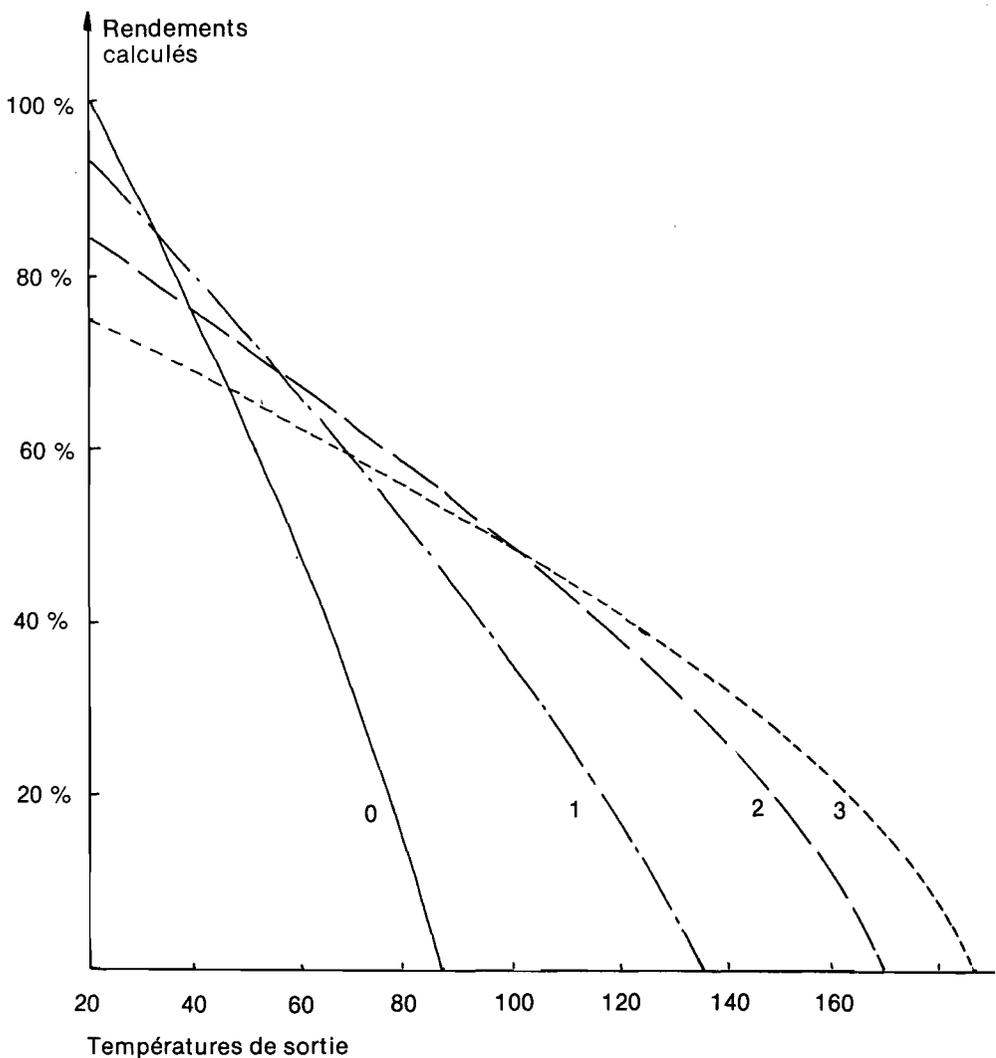
- la variation du rendement instantané tout au long de cette période et pour l'ensoleillement réel correspondant;

- les pertes de l'installation (stockage, distribution, régulation).

d'eau, la température sera faible. Le rayonnement de l'absorbeur le sera donc aussi et ajouter une vitre ne sera pas bénéfique, car la perte de transparence ne sera pas compensée par le faible rayonnement infrarouge qu'on aura récupéré par effet de serre (sans parler du surcoût de la deuxième vitre et des ennuis dus aux joints supplémentaires).

Si le débit d'eau est «faible», la température de l'absorbeur sera élevée et l'énergie émise par celui-ci le sera aussi. Dans ce cas, il peut alors être intéressant de rajouter une vitre. En aucun cas, pour le chauffage de l'eau, on ne doit arriver à trois vitres au-dessus d'un absorbeur.

Tout ceci a été calculé et se trouve représenté sur les courbes de la figure suivante. Attention, le calcul a été fait pour une température extérieure de 21°C.



Rendement d'un isolateur à absorbeur peint en noir, sous un rayonnement de $1\ 000\ \text{W/m}^2$.

La température extérieure est de 21°C .

L'eau est supposée entrer dans l'isolateur à la même température, 21°C .

Courbe ————— Insolateur sans vitre (0)

Courbe - - - - - Insolateur avec une vitre (1)

Courbe ———— Insolateur avec deux vitres (2)

Courbe - - - - - Insolateur avec trois vitres (3)

On peut constater que si on désire de l'eau entre 20 et 30°C il n'est pas nécessaire de mettre de vitre.

Si on désire de l'eau entre 30 et 55°C , il vaut mieux avoir une seule vitre, et si l'on veut avoir de l'eau très chaude, de 55 à 100°C , il faut placer deux vitres devant l'absorbeur.

On peut remarquer aussi une caractéristique générale des capteurs plans : plus leur température de fonctionnement est élevée, plus leur rendement baisse. Ceci veut dire qu'on capte toujours plus de calories à température basse qu'à température élevée. Malheureusement, l'eau à basse température n'intéresse personne...

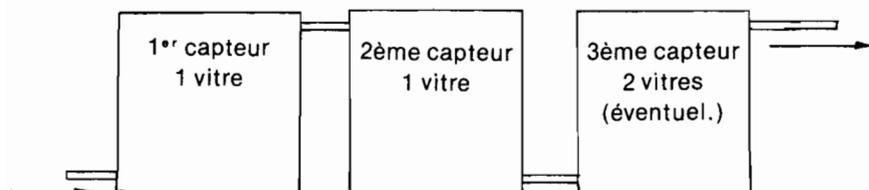
Par exemple, un capteur recevant $1\ 000\ \text{W/m}^2$, par température extérieure de 21°C , fonctionnera avec un rendement de $80\ \%$, s'il fournit de l'eau à 40°C , mais dans les mêmes conditions extérieures son rendement ne sera plus que de $60\ \%$ si on lui fait fournir de l'eau à 75°C . Il faut remarquer que $1\ 000\ \text{W/m}^2$ et une température extérieure de 21°C correspondent à des conditions estivales dans lesquelles on peut arriver aux rendements calculés ci-dessus, si le capteur est bon.

Pratiquement, on peut tirer de ces courbes qu'il vaut mieux avoir une seule vitre devant l'absorbeur dans presque tous les cas.

On peut également faire remarquer que, si l'isolateur a deux vitres, il est moins sensible au vent. Ceci est tout à fait exact. La différence reste néanmoins très faible.

Les inconvénients des doubles vitrages : jeux de dilatation, diminution de transparence, difficultés de montage, prix plus élevé, ne semblent donc pas compensés par le gain qu'on en retire.

On peut tout de même utiliser un double vitrage dans le cas d'utilisation de plusieurs capteurs en série. Les premiers isolateurs fonctionnant à basse et « moyenne » température ne nécessitent qu'une vitre. Le ou les derniers peuvent alors avoir deux vitres (voir aussi le paragraphe « Montage des capteurs »).



Matériaux à utiliser pour la couverture transparente

Le meilleur est le verre à vitre ordinaire le plus « blanc », et de 4 mm d'épaisseur pour des dimensions voisines de 1 m × 1 m. Ce verre est de plus en plus difficile à trouver car celui qui est vendu maintenant présente des reflets verts quand on le regarde sur la tranche, à cause des oxydes métalliques qu'on lui a adjoints. Toutefois l'action de ces oxydes reste minime pour le verre à vitre couramment utilisé dans le bâtiment, et on pourra donc l'utiliser.

Le verre « martelé » de qualité courante en 5 mm d'épaisseur peut être aussi employé pour des questions de résistance et d'économie ; on peut aussi le prendre « armé » si l'on craint la casse : même cassé il restera en place, et souvent sans laisser pénétrer l'eau de pluie.

Le verre trempé est aussi valable, mais très cher.

Les films plastiques (Mylar, Tedlar, Adlar...) sont également utilisables. Ils sont légers et peu chers, mais ils vieillissent sous l'action des ultra-violets et doivent être remplacés périodiquement. De plus, étant extrêmement minces, ils sont fragiles et souvent déchirés par le vent.

Il faut noter quand même que tous les films plastiques ne sont pas valables. Certains d'entre eux, comme le polyéthylène, sont transparents au rayonnement infra-rouge. Ils laisseront donc passer tout le rayonnement de l'absorbeur et ne réaliseront pas l'effet de serre. Les capteurs fonctionneraient donc avec de mauvaises performances.

(Pour les dimensions des vitrages, voir l'annexe « Les vitrages plans ».)

Problème de l'étanchéité

Pourquoi faut-il un insolateur parfaitement étanche ?

Parce que l'eau qui va pénétrer dans la caisse (pluie, humidité de l'air, rosée...) va diminuer le rendement de trois façons différentes :

a) Pendant les fonctionnements du capteur à basse température (démarrage, arrêt), l'humidité de l'air du capteur va se condenser sur la face interne de la vitre. Celle-ci, n'étant plus transparente, va absorber le rayonnement au lieu de le laisser traverser. Au démarrage du capteur, les condensations persisteront jusqu'à ce que la vitre soit assez chaude pour les faire évaporer. A ce moment, le rayonnement solaire pourra traverser la vitre et chauffer l'absorbeur.

Le soir, les condensations se formeront plus tôt.

Donc, un insolateur dont l'air est humide démarrera plus tard et s'arrêtera plus tôt que le même insolateur avec un air intérieur sec.

b) Si l'insolateur n'est pas étanche, les poussières et autres saletés entreront dans le capteur et se déposeront avec les condensations sur la vitre. Celle-ci se salira rapidement et sa transparence diminuera d'autant.

c) L'eau risque de mouiller l'isolant.

Certains isolants ne sont pas sensibles à l'humidité : toutes les mousses à « cellules fermées » comme la mousse de polyuréthane, la mousse de PVC, la mousse de verre (*foam-glass*), etc.

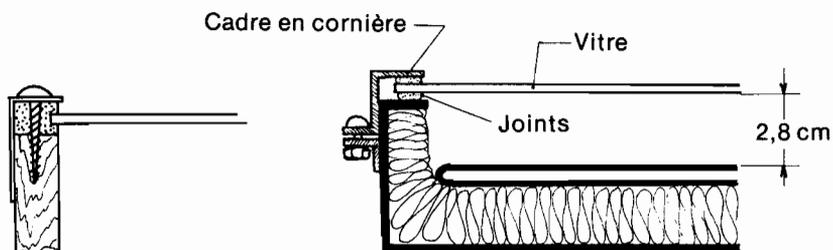
Par contre, les autres isolants sont très sensibles à l'humidité. La laine de verre est très caractéristique de ce défaut : une fois humide, elle devient pratiquement conductrice de la chaleur ! Si la laine de verre qui sert d'isolant à un capteur est mouillée, on est sûr que celui-ci ne produit presque plus rien.

En pratique, il est très difficile de réaliser une étanchéité parfaite. Il sera souvent moins mauvais de «ventiler» l'intérieur du capteur que de faire une mauvaise étanchéité : on percera quelques trous de 2 à 3 mm de diamètre dans la coque à l'abri de la pluie entre le radiateur et la vitre.

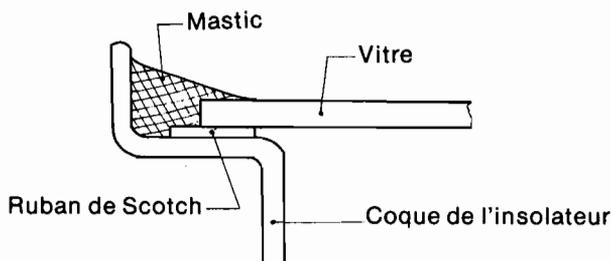
Montage des vitres

On n'utilisera pas le mastic ordinaire (mastic vitrier), car les dilata-tions fréquentes de la vitre font qu'il ne tient jamais longtemps. Il y a alors des fuites et le capteur fonctionne mal.

On peut fixer la vitre à l'aide d'un joint néoprène maintenu par un cadre en cornière. S'il est bien fait, ce montage donnera une bonne étan-chéité et sera résistant dans le temps.



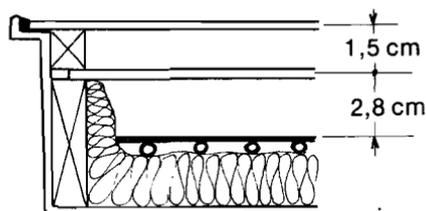
Les mastics au silicone donneront aussi de bons résultats et pourront souvent revenir meilleur marché. Leur application, qui se fait à l'aide d'un pistolet, est très rapide ; mais attention, ils sont délicats d'emploi car, une fois appliqués, ils adhèrent si fortement qu'on ne peut plus les travailler.



Le mastic doit pouvoir bouger lorsque la vitre se dilate, ce qui donne le montage ci-dessus.

Si on veut mettre deux vitres ou plus, on place toujours la première vitre à 2,8 cm environ de la face absorbante, puis les autres à 1,5 cm.

Très important : Seule la vitre supérieure doit être fixée rigidement. Les autres doivent pouvoir se dilater librement (2 mm de chaque côté), sinon elles éclatent.



La coque*

La fonction de la coque est de maintenir l'ensemble de façon rigide, et d'assurer l'étanchéité. Les contraintes mécaniques étant faibles, elle ne nécessite pas une grande résistance. En général, la coque est accrochée sur un support en cornières ancré au sol ou au bâtiment. Ce support absorbe les efforts dus au vent. Si l'isolation intérieure est bonne, la coque peut être métallique.

Nota : Le capteur peut bien sûr être « intégré » à une face sud du bâtiment (mur ou toit). Dès lors, c'est le bâtiment lui-même qui joue le rôle de coque : on fixe par exemple les radiateurs sur la charpente ; on isole la face arrière, un isorel, un contreplaqué... protège, s'il y a lieu, l'isolant ; il ne reste plus qu'à assurer l'étanchéité de la jonction du vitrage sur le mur ou sur le toit (cela revient à faire une verrière). C'est là une solution économique qu'il est souvent facile d'envisager pour l'habitat neuf, surtout si l'on y pense dès sa conception.

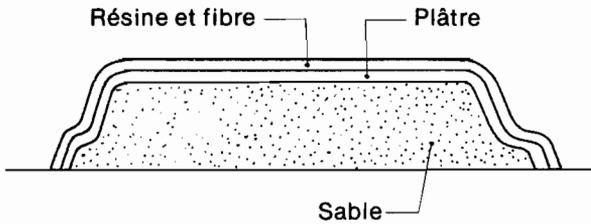
Matériaux possibles

- Tôle noire ordinaire 10/10. C'est bon marché, mais elle va faciliter les pertes thermiques. De plus, elle nécessitera un matériel important : plieuse, poste de soudure, etc.
- Bois : contreplaqué « marine », mais sa tenue dans le temps est discutable. Il vaut mieux ne pas l'utiliser.
- Plastique : fibre de verre et résine. C'est une solution pas très chère et très sûre, pas besoin de matériel particulier, mais beaucoup de soins. De plus en plus de fabricants l'utilisent.

1. Pour une coque nue

On fait un moule en sable et plâtre, sur lequel on pose la fibre (« mat ») en une épaisseur qu'on enduit de résine en évitant de laisser des bulles. Après séchage, on démoule, on ponce et on peut se servir de cette caisse soit comme moule pour les suivantes, si on met du démoulant à chaque fois, soit comme coque du capteur en rajoutant une deuxième épaisseur de fibre.

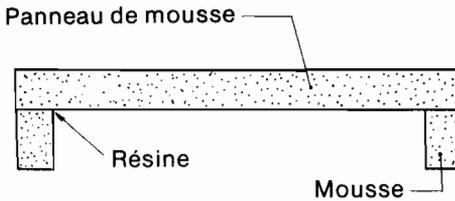
* On trouvera aussi dans la littérature les dénominations de « coffre » ou de « boîtier ».



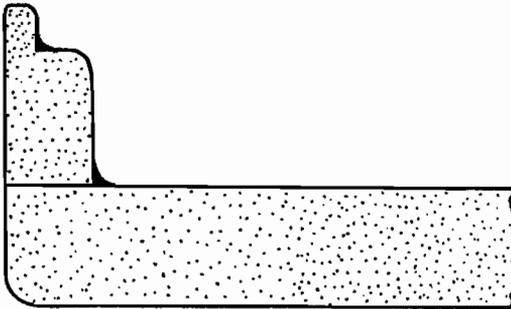
2. Coque isolante

Si on a décidé d'utiliser des mousses plastiques expansées rigides (mousse de polyuréthane, mousse de PVC), on peut se passer de sable et de plâtre en utilisant l'isolant comme support.

On utilise la résine comme colle des différents panneaux de mousse. Ne pas utiliser le polystyrène expansé, car la résine le dissout.



Une fois ce travail fait, on «tombe» les angles vifs, car la fibre ne tient pas bien sur les arêtes. Pour cela, il faut râper les angles sortants et mastiquer les angles rentrants.



Il ne reste plus qu'à poser la fibre et la résine, à l'intérieur et à l'extérieur. On obtient alors un panneau «sandwich» extrêmement rigide avec une seule couche de fibre.

Il est bon toutefois de passer sur tout l'extérieur (toutes les parties exposées aux intempéries) une couche supplémentaire de résine. En effet, celle-ci se dissout lentement dans l'eau : voir les toits des DS 19, DS 21,

etc., en plastique, au bout de trois ans on voit la laine de verre dépasser par endroits.

Cette dissolution est de l'ordre d'un demi-millimètre tous les cinq ans environ... Mais la coque reste étanche.

Conseils généraux pour la coque

La coque est une pièce assez simple de constitution : c'est une boîte avec un fond et quatre côtés.

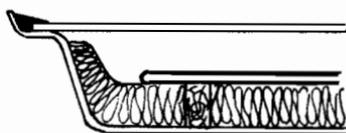
Le fond est plat ou ondulé pour donner de la rigidité, à la dimension de l'absorbeur augmenté en longueur et largeur de 5 à 10 cm pour isolation latérale.

Les côtés sont verticaux ou légèrement évasés pour faciliter un démou-
lage éventuel — et faire plus joli. Ils ont 5 à 10 cm pour l'isolation, plus 2 à 3 cm pour l'absorbeur, plus 2 à 3 cm pour la lame d'air, soit entre 10 et 16 cm de hauteur.

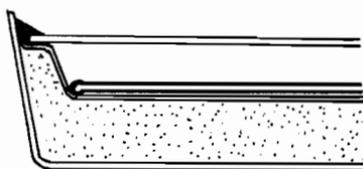
Les principaux problèmes qui se posent sont au niveau des «entrées et sorties» du fluide et des fixations des vitres.

Pour la fixation des vitres, il y a des solutions au paragraphe «Montage de vitres», mais on peut utiliser aussi celles-ci :

Montages utilisés sur des capteurs commercialisés



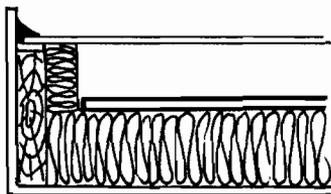
La coque simple est en fibre de verre, la vitre est mastiquée sur un épaulement de la coque.



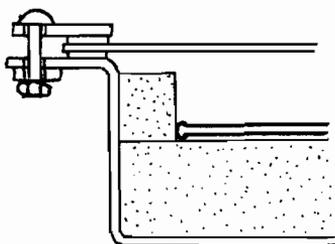
La coque double est en fibre de verre. La vitre est mastiquée sur la coque extérieure, la coque intérieure servant d'appui.

L'absorbeur est un radiateur extra-plat qui s'appuie aussi sur la coque intérieure.

Autres solutions possibles



La vitre repose sur un joint néoprène lui-même placé sur une planche de 1,5 à 2 cm sur tranche. Elle est mastiquée. La coque dans ce cas peut être métallique ou en fibre de verre.



Plutôt pour coque métallique. La vitre est maintenue entre un cadre en fer plat de 4 mm et le bord tombé de la coque. Il y a bien sûr deux joints.

Ces solutions ne sont bien sûr pas les seules, mais il faut se rappeler que le montage de la vitre (et par conséquent l'étanchéité du capteur) conditionne le fonctionnement de l'appareil.

Les entrées et sorties du fluide caloporteur

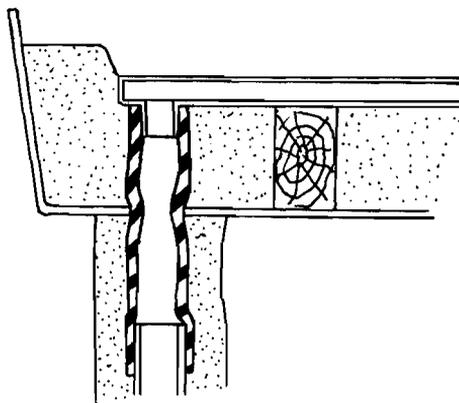
Il y a plusieurs problèmes au niveau de l'entrée ou de la sortie d'un tuyau de la coque d'un insolateur :

- nature du tuyau ;
- passage proprement dit à travers la coque.

A part le cas de l'insolateur « spirale plastique », les embouts soudés sur les absorbeurs sont métalliques. Il n'est pas intéressant de prolonger ces embouts par une canalisation métallique. Il faut alors souder ou visser, ce n'est pas facile, et il vaut mieux éviter toute tuyauterie rigide dans cette zone.

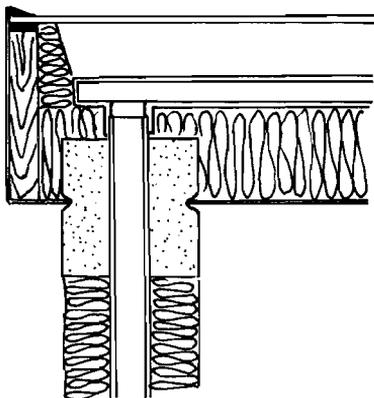
Le plus intéressant semble être le tuyau de caoutchouc de type « durite » qui va résister aux températures de sortie et permettre des branchements faciles grâce à sa flexibilité.

Plusieurs solutions sont possibles selon que la coque est fabriquée avec un matériau isolant ou non. Ici nous avons deux possibilités : coque en tôle noire ou en fibre de verre.



Coque fibre de verre

Une durite est fixée par collier sur l'embout de l'absorbeur. Elle passe ensuite à travers la coque par un trou de diamètre légèrement inférieur au sien (1 à 2 mm). Bien qu'elle soit en caoutchouc, il faut l'isoler, soit avec des coquilles de laine de verre, soit avec du tube souple isolant de type «Armaflex». La tuyauterie peut continuer en durite souple ou en rigide avec tube acier ou cuivre.



Coque en tôle

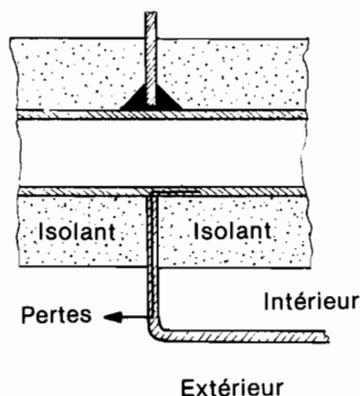
C'est un tube acier à bout fileté qui figure sur ce dessin — l'utilisation d'une durite est également possible. Ce tube est passé en force dans un bout de tuyau souple isolant type «Armaflex» de 1 cm d'épaisseur ou plus, lui-même passé en force dans un trou de la coque de 2 à 3 mm plus petit.

L'isolation continue soit avec le même tube souple isolant, soit avec des coquilles de laine de verre.

Ce qu'il faut éviter pour le montage des tuyauteries «entrée» et «sortie»

Pour un insulateur à coque métallique, il faut éviter de faire sortir ou entrer un tube (métallique ou pas) par un trou de même diamètre dans la coque.

Ce tube aura beau être isolé à l'intérieur et à l'extérieur de la coque, beaucoup de calories vont passer du tube à la paroi de la coque qui va les dissiper. Il doit y avoir nécessairement de l'isolant **entre** le tube et la coque.

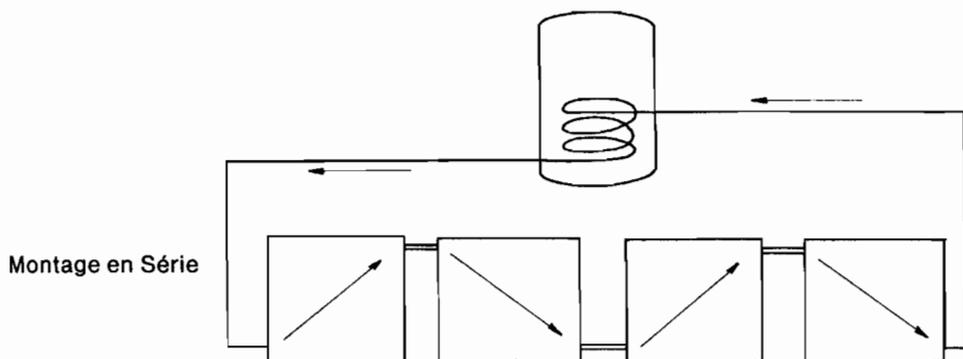


Il faut faire très attention à l'étanchéité à cet endroit. De l'eau peut entrer dans la coque et mouiller l'isolant. Les montages ci-dessus sont étanches.

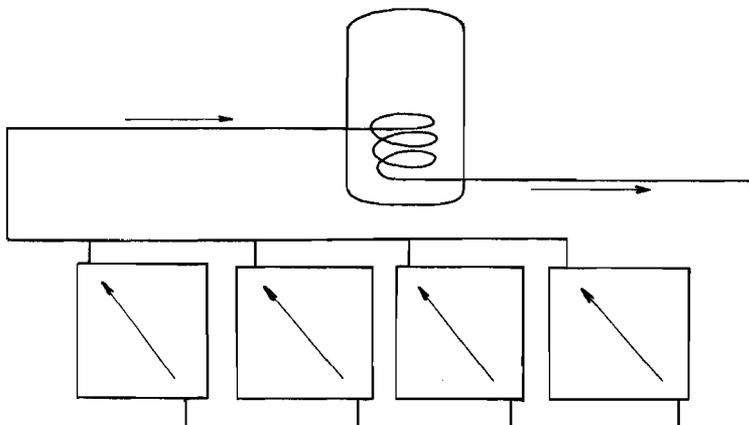
Dans ce cas, mastiquer le tube et la coque au niveau du passage ne sert à rien contre le passage de l'eau : les températures et les dilatations du tube et de la coque font que le mastic ne tient pas.

Montage des capteurs : série ou parallèle

Lorsque les capteurs sont montés «en série», c'est la même eau qui traverse tous les capteurs les uns après les autres, et va s'échauffer de plus en plus dans chacun d'eux.



Lorsque les capteurs sont montés en parallèle, chacun d'eux va faire monter en une seule fois la température de l'eau, mais sur une partie du débit seulement.



Montage en Parallèle

Dans le premier montage, on constate que les capteurs vont fonctionner à des températures différentes et croissantes depuis l'entrée jusqu'à la sortie. Plus la température de fonctionnement du capteur sera grande, moins son rendement sera bon. On pourra donc «soigner» particulièrement le ou les derniers capteurs avec une isolation plus forte et éventuellement un double vitrage.

Par contre, l'eau devra traverser les capteurs les uns après les autres et la résistance à son passage sera importante. Ce montage ne permettra donc pas un fonctionnement en thermosiphon et nécessitera un circulateur (voir chapitre «Fonctionnement du chauffe-eau»).

Dans le montage en parallèle, au contraire, la résistance à vaincre pour l'eau sera plus faible, et le thermosiphon sera possible.

Des capteurs montés en parallèle fonctionneront tous de la même façon, chacun élevant la température de l'eau qui le traverse de la même quantité, ceci en principe, car si l'on oublie une saleté quelconque qui bouche un des capteurs, celui ne fonctionnera pas, et on ne s'en apercevra pas ou très difficilement.

En conclusion, pour les petites installations telles que les chauffe-eau qui ne nécessitent que de faibles surfaces de captation, on montera les capteurs :

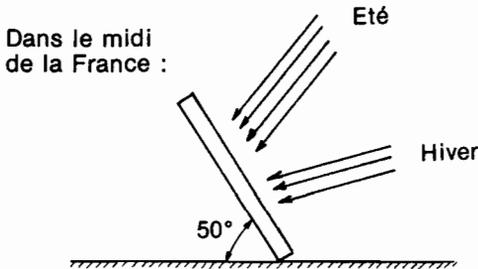
- en parallèle, si on veut fonctionner en thermosiphon;
- en série ou en parallèle, lorsqu'on dispose d'un circulateur, avec une préférence pour le montage en série dès que l'on n'est pas sûr de réaliser une circulation correcte en parallèle (pour ceux qui ne sont pas experts en plomberie).

Installation du capteur

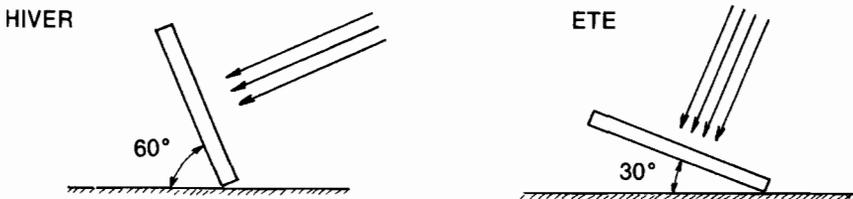
L'insolateur capte un maximum d'énergie lorsqu'il est perpendiculaire aux rayons du soleil. Or l'inclinaison des rayons varie au cours de la journée, et au cours des saisons (le soleil est plus bas dans le ciel en hiver).

Comme les capteurs seront nécessairement fixes, on les orientera au sud pour profiter au maximum des rayons pendant la journée. Par ailleurs, on inclinera les capteurs sur l'horizontale d'un angle égal à la latitude du lieu, augmenté d'environ 10 degrés. Pour la région marseillaise, la latitude est voisine de 43° .

L'inclinaison du capteur sera d'environ 50° . C'est celle qui permet de capter le maximum de rayons avec un capteur fixe.

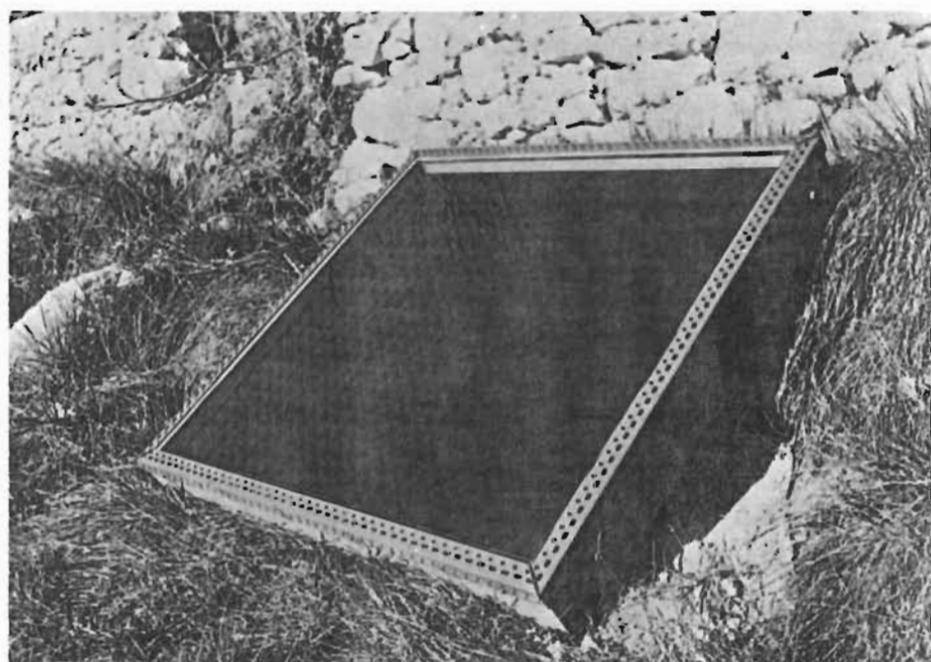
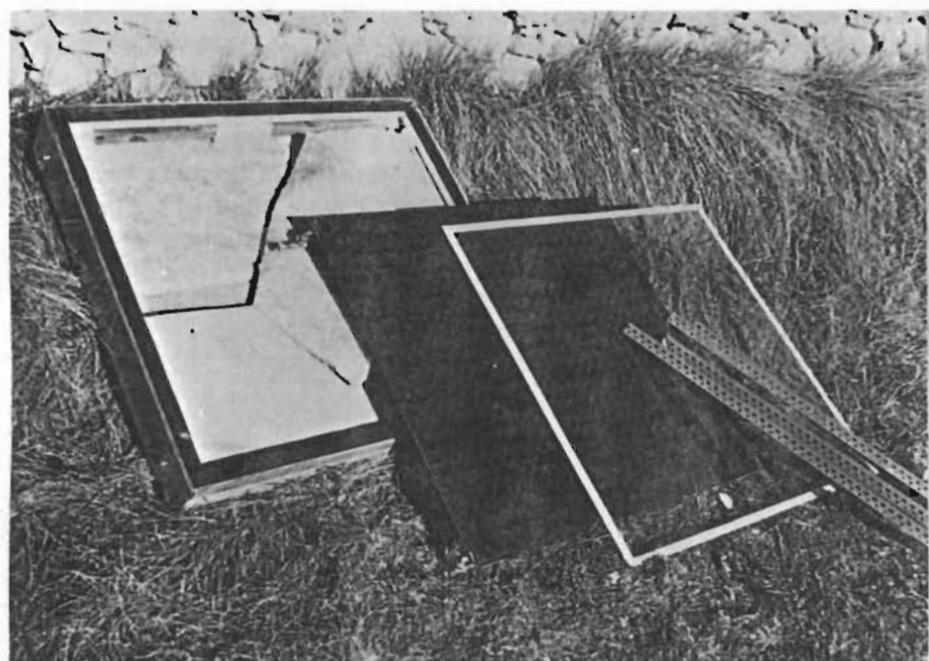


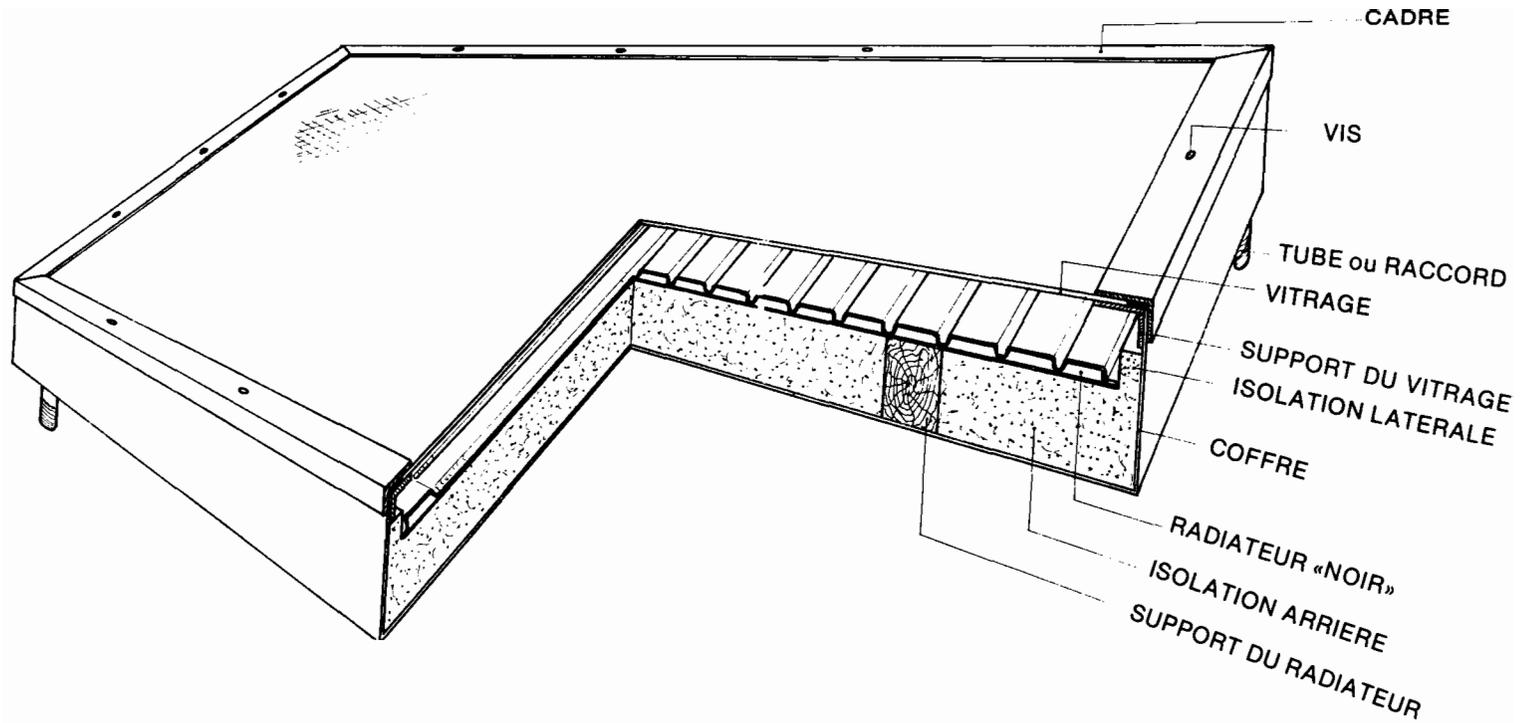
On peut avoir également un réglage saisonnier avec deux positions :



Ce double réglage nécessite des raccords souples de l'insolateur au ballon de stockage.

Dans tous les cas il est bon de placer les insolateurs le plus possible à l'abri des vents et des courants d'air.





**Constitution de l'insolateur
plan à effet de serre**

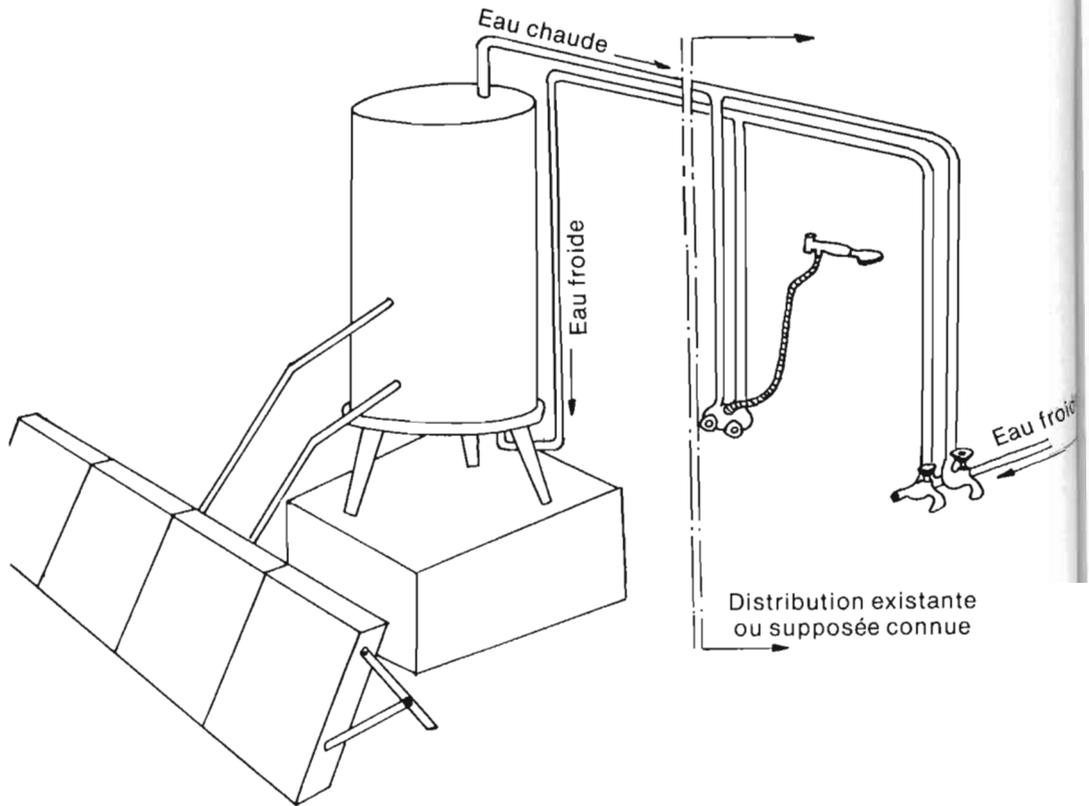
Deuxième partie

Utilisation des capteurs plans pour le chauffage de l'eau domestique

Nous étudierons ici les chauffe-eau constitués :

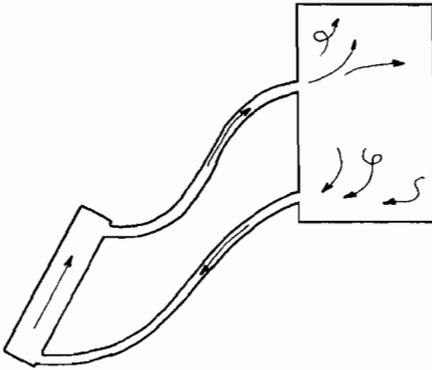
- d'un capteur plan à effet de serre, tel qu'il est décrit dans la première partie;
- d'un réservoir de stockage de l'eau chaude;
- d'un circuit de tuyauteries du capteur vers le réservoir.

Nous n'envisagerons que le cas du chauffe-eau individuel (capteur de quelques mètres carrés).



L'eau chauffée dans le capteur est envoyée dans le réservoir de stockage; elle est remplacée dans le capteur par de l'eau froide, qui s'échauffe à son tour, et ainsi de suite...

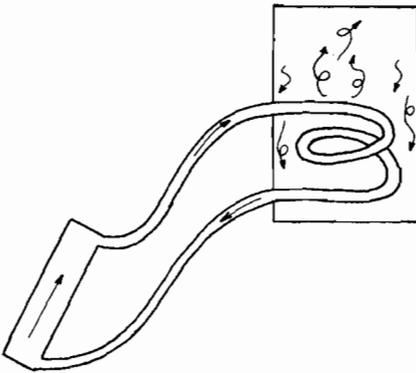
La circulation de l'eau dans le circuit doit être continue tant qu'il y a du soleil et de l'eau à réchauffer; elle est généralement assez lente.



l'eau chaude, plus légère que l'eau froide, s'accumule d'abord dans le haut du réservoir.

L'eau chaude venant du capteur peut aussi circuler à l'intérieur du réservoir dans un **échangeur** de chaleur : au contact de l'eau froide du réservoir, elle cède ses calories au travers de la paroi de l'échangeur et retourne se réchauffer dans le capteur.

L'eau chauffée dans le capteur reste ainsi dans un circuit fermé appelé «circuit primaire».



l'eau chauffée au contact de l'échangeur, monte dans le haut du réservoir.

l'eau froide descend et se fait réchauffer dans le bas du réservoir.

Nous verrons à propos du gel et de l'entartrage l'intérêt qu'on peut avoir à utiliser un échangeur.

Dans tous les cas, pour bien garder la chaleur, le réservoir doit être bien calorifugé.

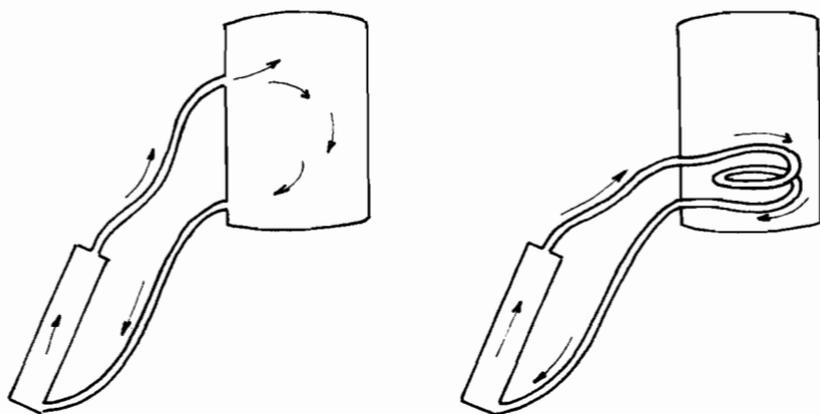
1. Mode de fonctionnement du chauffe-eau solaire

Dans son trajet insolateur - réservoir - insolateur, l'eau pourra circuler d'elle-même (circulation naturelle) ou être entraînée par une petite pompe (circulation forcée). Les positions relatives de l'insolateur et du réservoir sont essentielles pour décider du fonctionnement de l'ensemble.

1^{er} cas : fonctionnement par thermosiphon (circulation naturelle)

1. Principe

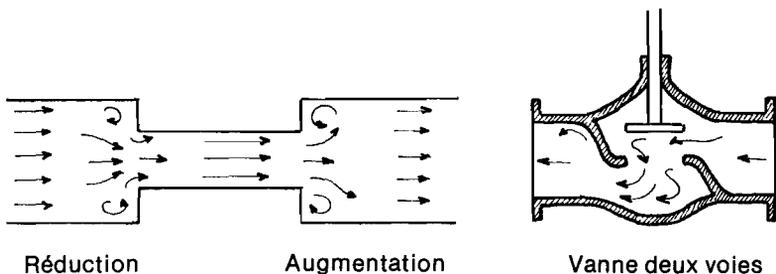
L'eau s'échauffe dans le capteur. Étant plus légère que l'eau froide à volume égal, l'eau chaude monte ; l'eau plus froide dans le bas du ballon descend, etc. Ainsi la circulation de l'eau se fait d'elle-même.



Les pertes de charge

Des résistances s'opposent au passage de l'eau dans le circuit ; on les appelle « pertes de charge ». Elles sont de deux sortes :

- le frottement de l'eau sur la paroi interne de la tuyauterie. Il est plus faible, bien sûr, dans les tuyaux lisses ;
- la résistance à l'écoulement provoquée par les accidents de parcours :



coudes, raccords de tubes de sections différentes, raccords de plusieurs canalisations, accessoires divers de réglage ou de sécurité.

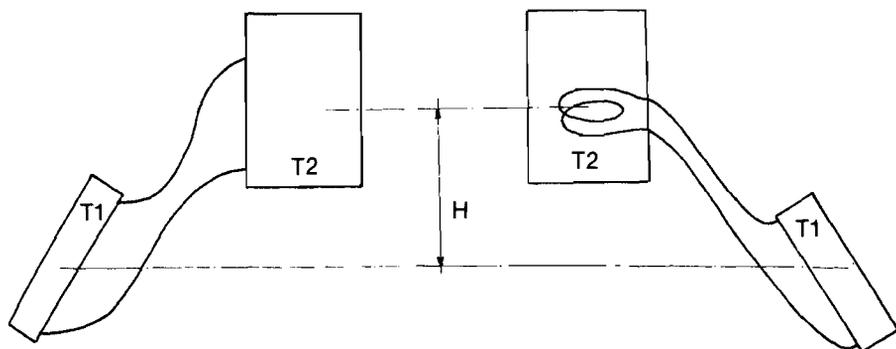
Si les pertes de charge sont trop importantes (tuyauterie trop longue et trop étroite, accidents de parcours trop nombreux), l'eau est trop « freinée » et peut même ne plus circuler.

Par contre, si la tuyauterie est trop large, l'eau circule librement, mais trop lentement, et le rendement est moins bon; et surtout le prix de revient est vite beaucoup plus élevé.

Charge d'une installation en thermosiphon

L'installation devra donc être suffisamment puissante pour vaincre ces pertes de charge. Le fonctionnement du thermosiphon est caractérisé par sa « charge hydromotrice », couramment appelée **charge**.

La charge dépend de deux facteurs :



- $\Delta T = T_1 - T_2$, qui est la différence de température de l'eau entre la sortie de l'insolateur et la sortie du réservoir;

- H , qui est la différence de hauteur entre le milieu du réservoir (ou de l'échangeur, s'il y en a un) et le milieu de l'insolateur.

Plus la charge est grande, c'est-à-dire plus ΔT et H sont grands, et plus la circulation de l'eau sera facile; le tube aura donc besoin d'être moins gros pour assurer cette circulation.

La charge est mesurée en « mètres de colonne d'eau » (m CE).

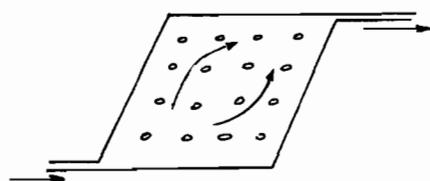
2. Contraintes d'installation

L'eau chaude doit toujours monter vers le réservoir et l'eau froide redescendre vers l'insolateur. Par ailleurs, si les pertes de charge sont trop importantes, le thermosiphon ne s'amorcera pas. En conséquence :

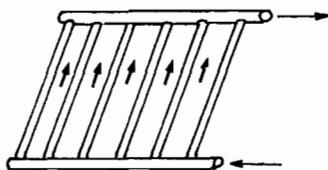
- on ne peut placer le réservoir au-dessous de l'insolateur;
- les tuyauteries horizontales doivent avoir une légère pente, 3 mm par mètre environ, vers le ou les « points hauts », lesquels sont toujours munis de purgeurs (cf. chapitre 5);
- les tuyaux doivent être suffisamment gros pour permettre la libre circulation de l'eau;
- pour que le thermosiphon s'amorce facilement, le circuit de l'eau dans l'insolateur doit lui être favorable.

Incidence de la forme du circuit d'eau dans l'insolateur sur le fonctionnement du thermosiphon :

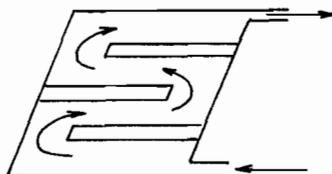
BON



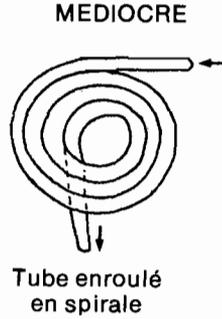
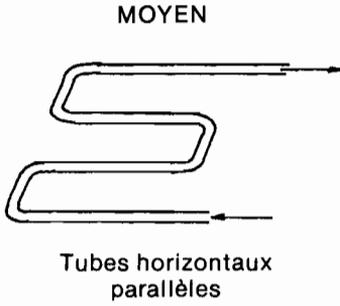
Plaques soudées
par points



Tubes verticaux
parallèles



Plaques soudées
sur fers plats



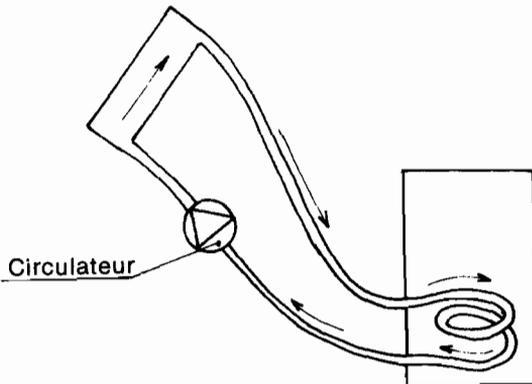
3. Avantages et inconvénients

Le principe du thermosiphon est très simple et donc très satisfaisant. Il n'y a pas si longtemps, toutes les installations de chauffage fonctionnaient ainsi. Mais leur mise au point était, et est toujours, souvent affaire de chauffagiste. Dès lors, méfiance, si l'on n'a pas un circuit très simple : **réservoir proche de l'isolateur et au-dessus de lui.**

Par ailleurs, le contrôle de la température de fonctionnement d'un thermosiphon est difficile ou coûteux. En l'absence de ce contrôle, on stockera parfois dans le réservoir de l'eau à plus de 60°C, ce qui favorisera l'entartrage. Ce sera une raison de plus pour préférer les circuits avec échangeur.

2^e cas : fonctionnement avec circulateur (circulation accélérée)

1. Principe



On fait appel à un circulateur électrique (type chauffage central, par exemple) pour faire circuler l'eau.

Ce circulateur donne au circuit une charge beaucoup plus importante qu'en thermosiphon. La vitesse de l'eau est donc plus grande; cela permet d'utiliser des tuyaux de plus petits diamètres.

Le débit qu'aura l'eau est fonction en particulier :

- de la puissance du circulateur;
- des pertes de charge du circuit (de même qu'en thermosiphon, elles sont dues au frottement de l'eau dans les tuyaux, et aux résistances opposées au passage de l'eau par les accidents de parcours).

Ainsi, un même circulateur placé dans un circuit court et simple fournira bien évidemment un débit plus important que dans un circuit long et tourmenté.

La charge est mesurée en « mètres de colonne d'eau » (m CE).

2. Contraintes d'installation

- Il faut disposer de l'électricité.
- Les circulateurs que l'on trouve généralement ne donneront pas satisfaction avec de très petites installations; le réchauffage d'un réservoir de 200 litres semble être minimum.

3. Avantages

- L'eau peut circuler au-dessous du niveau de l'isolateur; on placera le réservoir où l'on veut dans la maison.
- Il n'est pas obligatoire de placer les tuyauteries horizontales en légère pente (mais ne pas faire quand même de contre-pente!).
- Les tuyaux seront plus fins que pour une installation en thermosiphon, d'où économie sur ce point.
- Les pertes de charge ne pourront plus être une raison de non-fonctionnement du circuit : on trouvera toujours un circulateur adapté à une installation donnée.
- On pourra utiliser n'importe lequel des isolateurs décrits dans la première partie.
- Le contrôle de la température de fonctionnement est facile.
- La consommation électrique d'un circulateur est très faible.

4. Inconvénients

- C'est plus cher.
- C'est plus compliqué; il y aura donc plus d'éventualités de pannes, ce qui reste quand même assez rare.
- L'installation devra être bien réglée.
- Un circulateur est très sensible à l'entartrage; il est donc déconseillé dans les installations sans échangeur.

2. Dimension de l'insolateur

Nous effectuerons nos calculs sur la base d'une **production journalière de 200 litres d'eau chaude à 60°C**.

Si l'on suppose que l'eau à réchauffer est au départ à 10°C, cela nécessitera un apport calorifique de :

$$200 (60^\circ - 10^\circ) = 10\ 000 \text{ kilocalories par jour,}$$

ce qui équivaut à environ... **12 kilowatts-heure par jour**.

On admettra pour simplifier que ce besoin est constant tout au long de l'année.

Rendement d'un chauffe-eau solaire

Il n'est pas possible d'affecter à une installation solaire un rendement donné qui resterait fixe tout au long de l'année.

En effet, pendant la période d'hiver, les capteurs fonctionnent à basse température; ils recueillent alors une partie importante de l'énergie incidente. Inversement, en été, leur température de fonctionnement étant nettement supérieure, les rendements de journée ne dépassent pas 40 %.

Bien entendu, le plus faible pourcentage du rayonnement collecté en été est nettement supérieur au pourcentage collecté en hiver, même si celui-ci l'est avec un meilleur rendement.

En termes de bilan annuel, on pourra toutefois se rapporter à un rendement moyen qui tiendra compte des différents rendements mensuels ainsi que de l'énergie parfois excédentaire en été et qui est rejetée.

Pour un chauffe-eau solaire bien conçu et en rapport avec les besoins, ce rendement annuel moyen est voisin de 45 %.

Énergie captée

Des mesures faites dans la région marseillaise (notamment à la station météorologique de Marignane) permettent d'estimer qu'un bon insolateur correctement orienté et incliné à 50° sur l'horizontale produira, dans le sud de la France, en moyenne sur l'année, environ :

2 kilowatts-heure par m² de capteur et par jour.

| <i>DANS LE SUD-EST DE LA FRANCE :</i> | <i>Juillet</i> | <i>Janvier</i> | <i>Moyenne annuelle</i> |
|--|--------------------|--------------------|-----------------------------|
| Ensoleillement théorique maximum pour un plan incliné à 50° (kWh/m ² .jour) | 6,7 | 5,3 | 6,4 |
| Facteur d'ensoleillement (Marseille) | 0,80 | 0,48 | 0,62 |
| Énergie arrivant réellement sur le capteur (kWh/m ² .jour) . | 6,7 × 0,80 5,36 | 5,3 × 0,48 2,54 | 6,4 × 0,62 3,97 |
| Rendement d'installation | 40 % | 50 % | 45 % |
| Énergie réellement produite par mètre carré de capteur (kWh/m ² .jour) | 2,1 | 1,3 | 1,8 |

Dans le nord de la France, l'ensoleillement théorique maximum n'est pas beaucoup plus faible; par contre le ciel est plus souvent couvert, et c'est surtout le facteur d'ensoleillement qui est inférieur. Dans la région parisienne (station météorologique de Trappes), la dernière ligne du tableau devient :

| <i>RÉGION PARISIENNE :</i> | <i>Juillet (maximum)</i> | <i>Janvier (minimum)</i> | <i>Moyenne annuelle</i> |
|--|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Énergie captée par un bon insolateur en moyenne mensuelle (kWh/m ² .jour) | 1,7 | 0,6 | 1,3 |

Si l'on voulait couvrir la quasi-totalité des besoins pendant toute l'année, il faudrait se baser sur la quantité d'énergie captée en décembre. Cela nécessiterait d'employer de très grandes surfaces d'insolateurs (12 m² minimum dans le Midi); ce serait très cher pour le seul chauffage de l'eau sanitaire... et encore, on ne serait pas à l'abri des longues périodes nuageuses.

En pratique, on prendra un **insolateur de 3 à 4 m²**. Il économisera sur l'ensemble de l'année entre les deux tiers et les trois quarts de l'énergie qu'on aurait dépensée par des procédés classiques.

Ceux qui désirent avoir des chiffres précis sur l'ensoleillement de leur région pourront consulter le supplément au cahier n° 1 de l'AFEDES (voir bibliographie).

Nota : Le rendement d'un capteur solaire est défini par rapport à sa surface *hors-tout* et non par rapport à la surface de l'absorbeur. Dans ces conditions, un capteur moyen de 1 m² présentera une surface d'absorption utile d'environ 0,8 à 0,9 m².

3. Le problème du gel

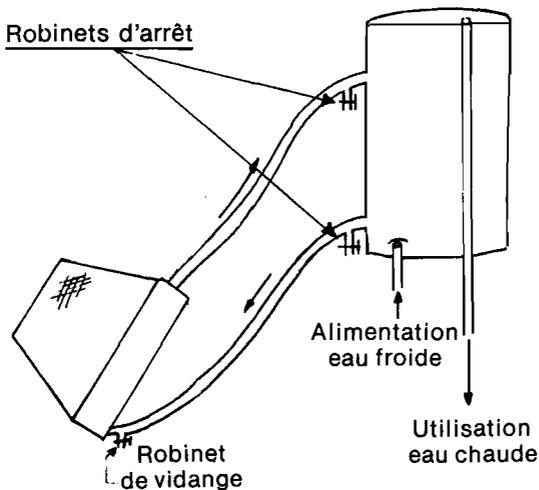
Comme pour tous les circuits de fluide en plein air, il faudra prévoir une protection contre le gel, pour éviter de faire éclater l'insolateur et les conduites en hiver (la nuit).

Or, pour un insolateur, la sensibilité au gel est accrue par le rayonnement propre de sa surface absorbante; il peut ainsi se produire à quelques degrés au-dessus de 0°C.

Il y a trois solutions :

1. Vider le circuit pendant les périodes où le gel peut se produire (nuits d'hiver et périodes sans utilisation); et gare à l'oubli!
2. Mettre de l'antigel dans le circuit.
3. Utiliser pour le circuit un matériau qui supporte les dilatations dues au gel.

La première solution va être économique, le circuit sera très simplifié.



L'eau que l'on tire du réservoir doit pouvoir être consommée. Aussi tous les éléments qui composent le circuit devront être fabriqués avec des matériaux dits « alimentaires » ou « sanitaires » (cuivre, bronze, acier galvanisé).

Par ailleurs, l'eau étant souvent renouvelée, l'apport de calcaire sera important; d'où risque d'entartrage à plus ou moins longue échéance (voir chapitre 4).

La deuxième solution est plus pratique, mais plus chère :

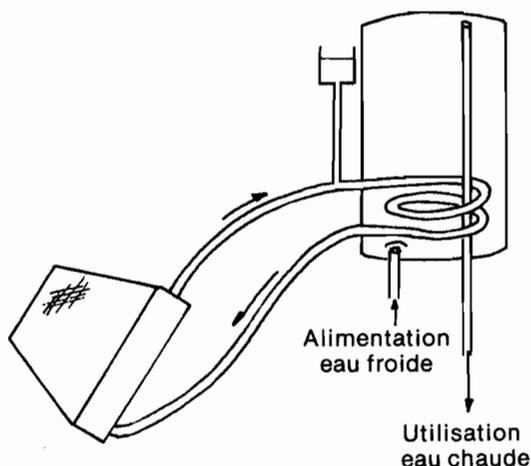
L'eau qui est dans l'insolateur contient de l'antigel. Elle ne pourra donc être consommée. Cela impose alors de faire circuler l'eau qui vient du capteur dans un circuit fermé ; on met un échangeur dans le réservoir ; ce circuit est appelé « **circuit primaire** ».

Le rendement sera un peu moins bon (il faut tenir compte des pertes à l'échangeur), mais on n'aura pas à se préoccuper du fonctionnement : pas de risque de casse.

Autre avantage : l'eau étant très rarement renouvelée dans le circuit primaire, il n'y aura pas d'entartrage des insolateurs (voir chapitre 4).

A titre indicatif, si l'on met 30 % d'antigel, le circuit sera protégé jusqu'à des températures de l'ordre de -15 à -20°C (variable selon les marques).

Il est souvent utile d'ajouter à l'antigel un « inhibiteur de corrosion » ; se renseigner auprès du fabricant d'antigel. De toute façon, prendre un antigel de bonne qualité destiné aux installations de chauffage (et non un antigel de voiture) et le changer tous les trois ou quatre ans.



La troisième solution est presque idéale !

Malheureusement, on n'a pas encore trouvé de matériau suffisamment résistant et bon marché.

La meilleure solution semble être d'utiliser le plastique (insolateur spirale plastique), mais cette matière vieillit au soleil et ne supporte pas indéfiniment le gel. Il pourra se produire des fissures avant un an de fonctionnement si l'on utilise des matières plastiques ordinaires.

4. Entartrage et corrosion

1. L'entartrage

L'eau de pluie, les eaux «douces» rincent mal le savon : le savon mousse sans être entraîné. Les eaux calcaires, également appelées eaux «dures», rincent bien le savon et laissent généralement à la longue un dépôt blanchâtre dans les casseroles.

En réalité, hormis l'eau de pluie, toutes les eaux naturelles contiennent des sels dissous en proportion variable. Sous l'action de la chaleur, il se forme un dépôt insoluble très dur appelé tartre qui s'accumule irrégulièrement sur les parois intérieures des différents éléments des circuits.

Ce dépôt est mauvais conducteur de la chaleur. Il provoquera une baisse des rendements de l'insolateur et de l'échangeur. En outre :

- étant irrégulier, il entraînera sous l'action de la chaleur une déformation irrégulière du circuit entraînant des tensions ;
- il y aura souvent corrosion aux endroits entartrés ;
- et puis, bien sûr, une canalisation entartrée voit son diamètre diminuer, et donc sa perte de charge augmenter.

Il y a aussi formation de boues qui peuvent obstruer certaines parties de l'installation.

2. La corrosion

Lorsqu'on utilise dans un même circuit des métaux de natures différentes, on observe des courants électriques qui entraînent la corrosion de l'un des métaux.

Ainsi, si l'on place dans un circuit de l'acier galvanisé après une partie en cuivre, on réalise une excellente pile électrique et l'acier galvanisé sera attaqué. Il peut s'ensuivre le fonctionnement défectueux d'accessoires ou la perforation de tuyauteries ou de réservoirs.

Par suite de la perforation de l'échangeur, le réservoir se remplira d'antigel. Celui-ci rendra l'eau toxique sans que l'on puisse s'en apercevoir. Pour éviter les accidents, on ajoutera dans le circuit primaire un colorant puissant non corrosif pour les tuyauteries et sans affinité chimique avec l'antigel. La fluorescéine semble faire l'unanimité quant à ses caractéristiques : colorante, neutre chimiquement et non toxique. On ne saurait toutefois, en l'état actuel des connaissances, garantir totalement la neutralité de ce colorant en toutes circonstances ; l'expérience, par contre, ne l'a pas encore démentie.

3. Comment les prévenir

En fait l'entartrage et la corrosion sont mal connus et on ne sait pas toujours les combattre. On sait néanmoins qu'ils dépendent essentiellement de la composition de l'eau. C'est ainsi que dans certaines régions les risques pourront être minimes, alors que dans d'autres il sera très difficile de les atténuer.

On pourra certes utiliser un adoucisseur d'eau ; mais cela coûte cher et crée par ailleurs parfois d'autres problèmes. Il est préférable de prendre certaines précautions.

Contre l'entartrage

- Choisir une installation avec **échangeur dans le réservoir** met tout le circuit primaire (circuit capteur-échangeur) à l'abri de l'entartrage. Le perfectionniste pourra remplir ce circuit avec de l'eau de pluie ou moitié eau de pluie - moitié eau distillée (l'eau distillée pure est corrosive). Si l'on prévoit en outre un démontage possible de l'échangeur, on pourra ainsi de temps en temps détartre sa face extérieure qu'il n'est pas possible de protéger.

Par contre, dans une installation sans échangeur :

- Ne pas utiliser d'eau à plus de 60°C (55°C si l'installation contient de l'acier galvanisé).

- Préférer des tuyauteries dont l'intérieur est lisse (cuivre).

- Ne pas employer des tuyauteries trop fines. Ceci est encore plus important avec le cuivre : pour des diamètres inférieurs à 14 mm, le novice risquera, au cours de son travail (notamment s'il fait des coudes), de faire des creux et bosses qui seront autant de lieux d'accumulation pour le tartre.

Contre la corrosion

- Faire une très bonne protection intérieure du réservoir.

- Utiliser des métaux semblables pour tous les éléments du circuit : installations «tout cuivre et bronze», installations «tout fer, fonte et acier». Et surtout **ne pas utiliser à la fois du cuivre et de l'acier galvanisé**.

Cette dernière condition sera parfois délicate à réaliser. En effet, pour des raisons de commodité et surtout d'économie, on ne réalisera pas des installations «tout cuivre et bronze» : on utilisera généralement pour l'insolateur des radiateurs en acier ; de même, on pourra acheter un réservoir dont l'échangeur est en acier. Mais comme les tubes acier sont difficiles à travailler pour l'amateur insuffisamment outillé, celui-ci préférera le tube cuivre. Dès lors il se retrouvera avec un circuit contenant du cuivre et de l'acier (acier noir).

Il sera alors particulièrement important de faire une bonne mise à la terre du circuit. Cette précaution n'empêchera pas totalement la corrosion, mais elle la limitera considérablement.

5. Tuyauteries et accessoires

1. Les tuyauteries

Pour la description et le travail des principaux types de tuyaux, se reporter à l'annexe 5.

a) Le tube acier soudé par rapprochement

C'est le tube acier le plus couramment utilisé et le moins cher. Il est souvent préféré afin de réaliser des installations «tout fer, fonte et acier» peu sensibles à la corrosion. Mais il présente pour l'amateur un inconvénient de poids : il demande un outillage important. De plus il nécessite l'emploi de raccords coûteux (coudes, tés...).

Signalons que ces tubes, dont l'intérieur n'est pas lisse, donnent plus facilement prise à l'entartrage.

Il en existe deux qualités : le tube noir et le tube galvanisé.

Ce dernier, environ 30 % plus cher que le tube noir, est utilisé lorsque l'eau qui y circule peut être consommée (installations avec réservoir sans échangeur). Mais il ne supporte pas l'eau à plus de 55°C et est donc déconseillé pour les installations dans lesquelles on ne contrôle pas la température de fonctionnement. Rappelons aussi qu'il est formellement déconseillé dans les installations comprenant des parties en cuivre (voir chapitre précédent sur la corrosion).

b) Le tube cuivre

Remarquons tout d'abord qu'on ne peut donner d'estimation précise du prix du cuivre. Le cours de ce métal varie en effet considérablement dans le temps et le prix que peut pratiquer un commerçant à une date donnée dépend essentiellement de la date à laquelle il a choisi de renouveler son stock.

Néanmoins, à titre indicatif, nous avons trouvé début 1975 que le tube cuivre était vendu environ deux fois plus cher que le tube acier noir soudé par rapprochement, dans le domaine des petits diamètres qui nous intéresse.

Malgré son prix supérieur, le tube cuivre est très apprécié car il présente de nombreux avantages :

- légèreté;
- moindre encombrement;
- facilité et rapidité de pose;
- peu de prise à l'entartrage (intérieur très lisse);
- bonne résistance à la corrosion.

Son principal inconvénient a été cité à propos de la corrosion : dans les circuits composés de métaux différents, le cuivre tiendra bien mais l'acier sera plus facilement attaqué.

c) Choix de la tuyauterie

En résumé :

| | | Tube cuivre | Tube acier soudé par rapprochement | |
|--------------|----------------|---|--|---|
| | | | Noir | Galvanisé |
| Thermosiphon | avec échangeur | OUI | OUI particulièrement intéressant pour de gros diamètres | inutile |
| | sans échangeur | | NON car l'eau passant dans les tubes doit pouvoir être consommée | NON car on n'est pas maître de la température de fonctionnement |
| Circulateur | avec échangeur | surtout intéressant pour les petits diamètres (jusqu'à 20 ou 25 mm) | OUI | Inutile |
| | sans échangeur | | NON car l'eau passant dans les tubes doit pouvoir être consommée | OUI |

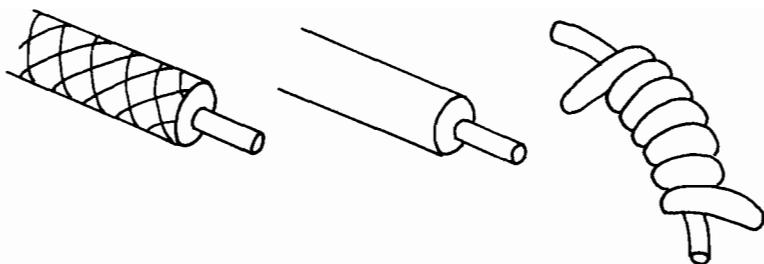
Attention! Ne pas mettre dans un même circuit du cuivre et de l'acier galvanisé.

2. Isolation des tuyauteries

a) Parties du circuit placées en extérieur (et voir annexe 4)

- Laine de verre, d'au moins 20 mm d'épaisseur, **avec isolation à la pluie** (matières plastiques collées, goudrons...).

On pourra utiliser de la laine de verre ordinaire retenue par exemple par un grillage, ou de la laine de verre en coquille, ou encore des bourrelets de laine de verre (particulièrement pratique dans les endroits difficiles).



- Tube en mousse de polyuréthane, d'au moins 13 mm d'épaisseur, avec isolation à la lumière et à la pluie. C'est un peu plus cher, mais très pratique et moins volumineux.

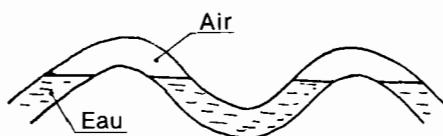
Inconvénient : Ce matériau craint le feu ; toutefois il s'éteint de lui-même et ne propage pas la flamme.

b) Parties du circuit placées en intérieur

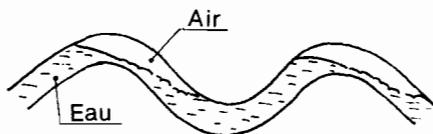
Le plus simple et le moins cher sera d'utiliser de la laine de verre protégée à l'aide de «platralfa». C'est ce qu'on utilise en chirurgie pour faire les plâtres. Il se présente sous la forme de bandelettes enrobant du plâtre, qu'on enroule autour des tuyauteries ; une fois posées, on les mouille, le plâtre prend et durcit. On peut peindre.

3. Les purgeurs

Aux «points hauts» de l'installation, l'air risque de s'accumuler, gênant ainsi la circulation de l'eau.



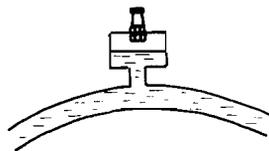
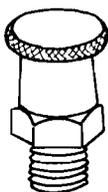
On voit ici que l'air fait coupure dans le circuit.



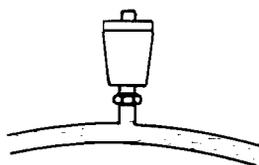
Ici, malgré l'action d'un circulateur puissant, le débit est très réduit ; d'où un fonctionnement presque nul.

Il faudra prévoir une évacuation de l'air à chaque point haut; on mettra :

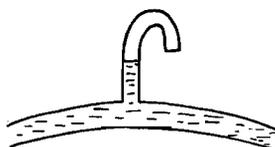
- soit un purgeur manuel; ce peut être un purgeur de radiateur monté sur un petit réservoir dans lequel l'air s'accumulera;



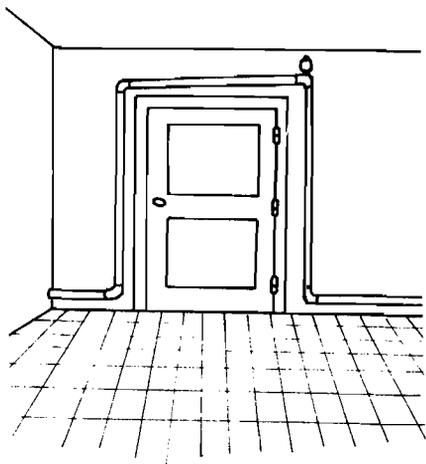
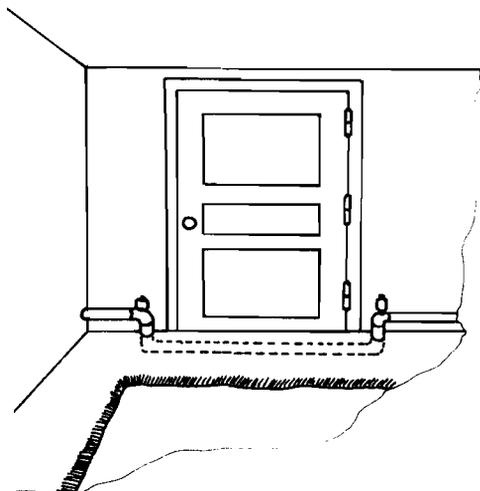
- soit un purgeur automatique;



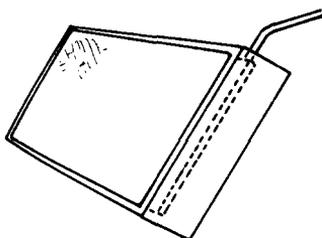
- soit un trop-plein à l'air libre situé au-dessus de l'installation (seulement pour une installation avec caisse à eau).



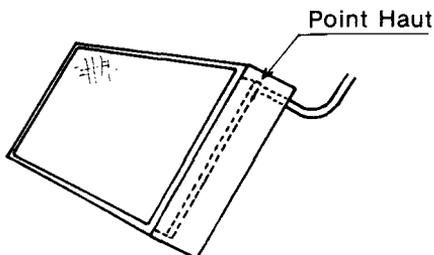
Exemple : passages de porte



En bref, il faudra faire très attention aux pentes que l'on donne aux tuyauteries. Faire attention en particulier au branchement des entrées-sorties de l'insolateur; celui-ci étant incliné par rapport à l'horizontale, certains montages pourraient avoir des points hauts une fois l'ensemble en position :



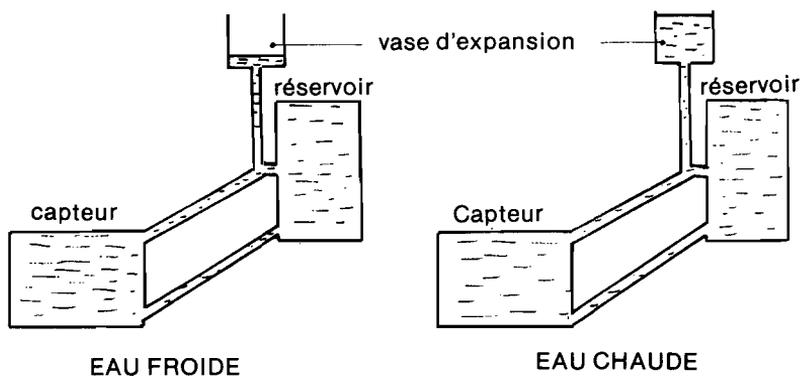
BON



MAUVAIS

4. Le vase d'expansion

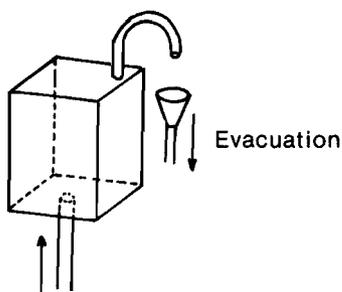
L'eau se dilate en chauffant. Pour éviter que l'installation n'éclate, on ajoute un vase d'expansion.



Son volume devra être suffisant pour encaisser la dilatation de l'eau entre 4°C et 90°C (pour le calcul du volume, voir annexe 6).

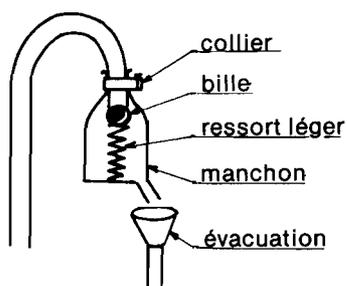
a) Vase d'expansion ouvert

Le vase sera un récipient en tôle, parallélépipédique ou cylindrique, plus haut que large.



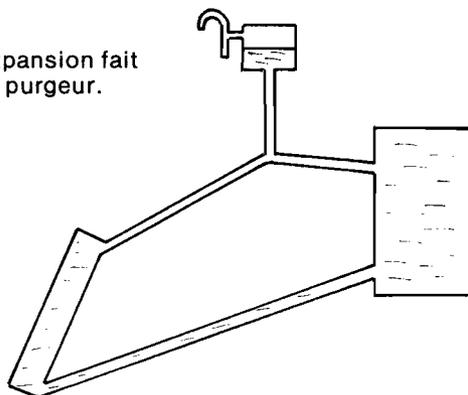
Il sera placé nettement au-dessus de la partie la plus haute de l'installation. Le trop-plein évacue l'eau en excédent.

Calorifuger le vase avec de la laine de verre, si l'on craint le gel.
 Pour limiter l'évaporation, on pourra faire le montage suivant :

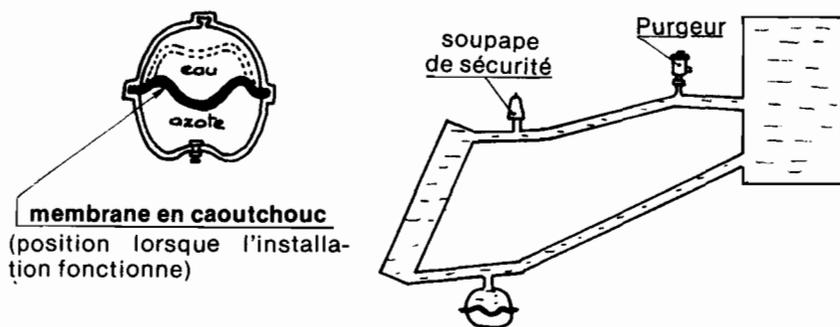


On peut souvent placer le vase d'expansion ouvert au point haut de l'installation; il fera ainsi en même temps office de purgeur.

Le vase d'expansion fait office de purgeur.



b) Vase d'expansion fermé



Avantages : Il n'y aura pas d'évaporation ; étant placé dans un local, il ne craindra pas le gel ; son raccordement ne demande que peu de tuyau, ce qui compense en partie l'achat du vase.

Inconvénient : C'est plus cher.

Il vaut mieux placer le vase avant l'insolateur : l'eau y sera plus froide et ne risquera pas de détériorer la membrane.

Il faudra toujours lui adjoindre dans le circuit une soupape de sécurité, qui laissera échapper la vapeur en excès si la pression devient trop forte (surchauffe).

Cette soupape sera tarée pour une pression de 2 à 3 kgf/cm².

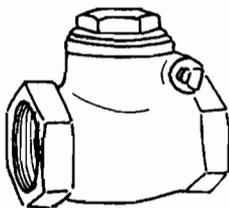


Le clapet non retour

Dans certains circuits, l'eau risque de se mettre à circuler en sens inverse lorsque la température de l'eau dans le réservoir est supérieure à celle de l'eau dans l'insolateur (la nuit notamment), ce qui a pour effet de

refroidir l'eau du réservoir. Pour éviter cette circulation inverse, on place dans le circuit un «clapet non retour».

Choisir un clapet non retour à battant vertical, plutôt qu'à battant horizontal; ces derniers seront généralement trop résistants en regard des faibles pressions régnant dans le circuit.

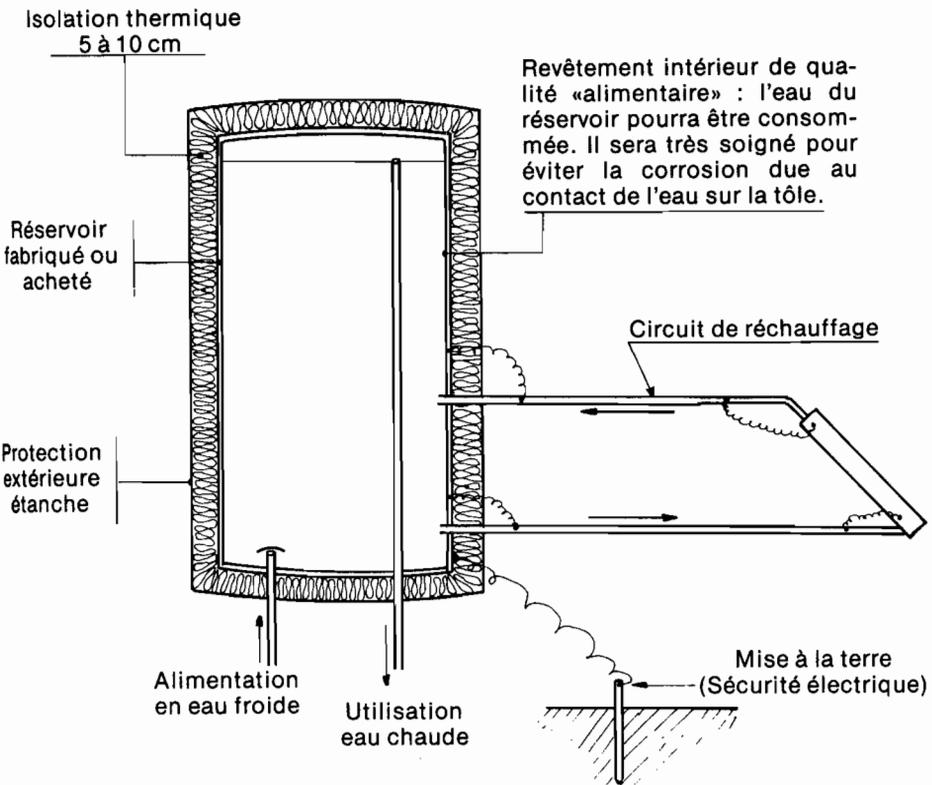


6. Le réservoir

L'eau chaude, étant plus légère que l'eau froide, s'accumule dans le haut du ballon. C'est pourquoi :

- on place généralement le réservoir verticalement ;
- la sortie d'eau chaude prend l'eau le plus haut possible dans le réservoir.

L'alimentation en eau froide est placée dans le bas et surmontée d'un petit chapeau pour éviter que, sous l'action de la pression (lorsqu'on tire de l'eau chaude), l'eau froide ne diffuse dans le réservoir.

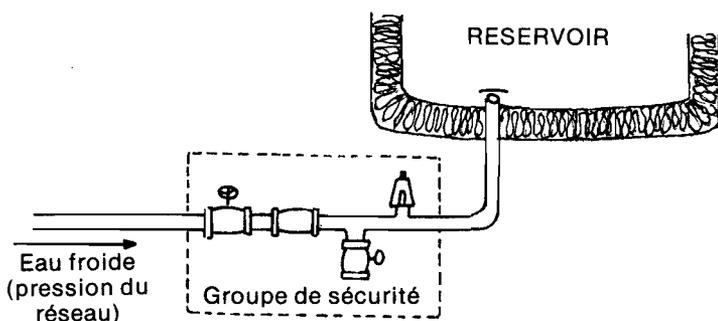


1. Branchement de l'alimentation d'eau froide

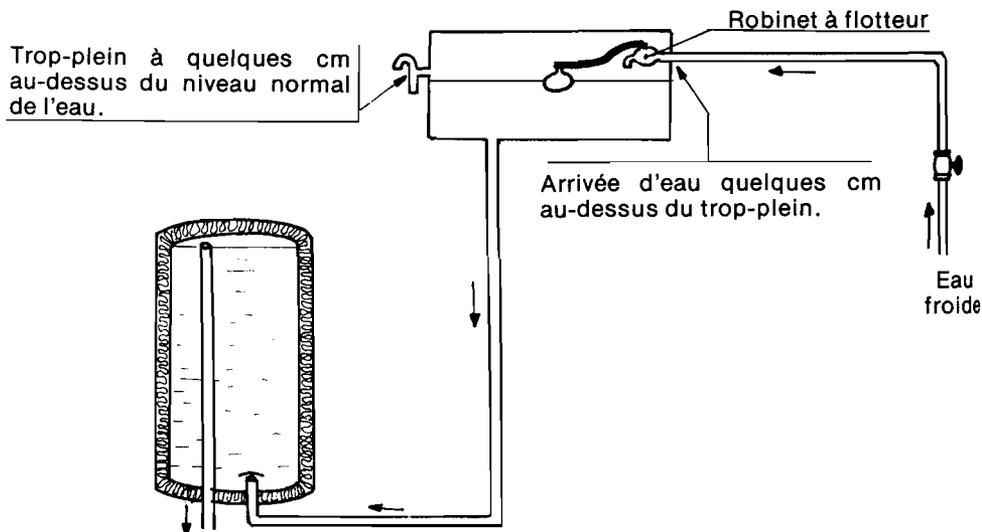
a) Alimentation directe par le réseau

Dans ce cas le réservoir est constamment sous la pression régnant dans le réseau. On placera alors sur l'arrivée d'eau froide un «groupe de sécurité» qui rassemble, en général en un seul accessoire, les quatre fonctions suivantes, placées dans cet ordre :

- robinet d'arrêt;
- clapet non retour : il évite un reflux de l'eau chaude en cas de baisse de la pression (tout puisage d'eau froide, par exemple);
- robinet de vidange;
- soupape de sûreté, obligatoire dans ce type d'installation; elle provoque un vidage du réservoir lorsque, en cas de fonctionnement défectueux, l'eau atteint une température trop élevée, entraînant un accroissement de la pression qui pourrait faire exploser le réservoir.



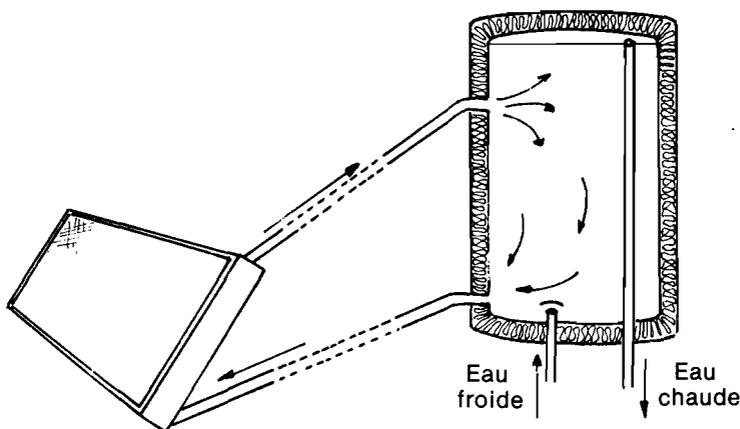
b) Alimentation par caisse à eau



Le niveau dans la caisse peut être maintenu constant à l'aide d'un robinet à flotteur. Dans ce cas le ballon sera sous une pression constante. La caisse à eau sera calorifugée si l'on craint le gel l'hiver.

Remarque : La pression obtenue dans le réservoir est fonction de la hauteur de la caisse à eau par rapport à celle du réservoir. Une caisse à eau qui serait à 3 mètres au-dessus du réservoir donnerait une pression de 300 grammes à la sortie du réservoir (100 g/cm² par mètre de hauteur d'alimentation).

2. Réservoir sans échangeur



On peut le fabriquer :

- à partir d'un fût métallique (pour un fût ayant contenu de l'huile, le rincer soigneusement au fuel, qui dissout l'huile, puis à l'essence, qui dissout le fuel);
- à l'aide de tôle noire de 10/10^e à 15/10^e d'épaisseur.

La tôle galvanisée est déconseillée car si on la soude elle est promise à une corrosion rapide; par ailleurs, elle est plus chère que la tôle noire.

Revêtement intérieur

Utiliser de la **peinture** résistant à la chaleur (pour un réservoir de 200 litres, agiter vigoureusement (!) un demi-litre de peinture). A refaire périodiquement (tous les cinq ans environ).

Il existe des peintures à base de résine époxyde très résistantes dans le temps, dont certaines sont prévues pour le contact alimentaire.

Dans des installations sans cuivre, et si l'on est certain que la température de l'eau ne dépassera pas 55°C, on peut aussi faire faire un **galvanisage** à froid.

Mieux : cimenter la paroi intérieure du réservoir avec du **ciment alumineux** ou, à défaut, du ciment blanc. Celui-ci donnera une excellente protection contre la corrosion et, s'il est bien fait, il tiendra très longtemps.

Inconvénient : Il est sensible aux chocs, surtout s'il est trop épais.

Mise en œuvre du ciment alumineux

- Décaper soigneusement la tôle avec de l'eau additionnée d'acide (10 % d'acide chlorhydrique du commerce).
- Préparer le ciment bien liquide, comme une peinture fluide.
- Introduire le ciment dans le réservoir que l'on tourne en tous sens; pour des surfaces accessibles, on pourrait aussi bien l'appliquer au pinceau.
- Laisser égoutter.
- Essuyer soigneusement les filetages.
- Faire trois couches pour obtenir un revêtement de 1 à 1,5 mm d'épaisseur; un revêtement plus épais serait fragile.

Isolation (et voir annexe 4)

- Laine de verre collée sur papier kraft goudronné (5 à 10 cm).
 - Matelas de laine de verre ou de laine de roche, cousu avec un fil de fer sur du grillage galvanisé (5 à 10 cm).
 - Mousse de polyuréthane en bombe : c'est très pratique mais environ trois fois plus cher pour un même pouvoir isolant (3,5 à 6,5 cm).
 - Débris de liège, copeaux de bois tassés... (10 cm minimum).
- A titre indicatif, pour de la laine de verre et si le ballon est rempli d'eau à 60°C, la température de l'eau s'abaissera environ :
- de 10°C par 24 h avec un matelas de 5 cm d'épaisseur;
 - de 6°C par 24 h avec un matelas de 10 cm d'épaisseur.

Protection extérieure

- Jaquette en tôle peinte.
- Logement en béton; placer le réservoir sur un trépied pour ne pas écraser l'isolant du fond. Inconvénient : il n'est pas démontable.
- Gaze et plâtre appliqués sur la face recouverte de papier kraft goudronné du matelas de laine de verre, ou «platralfa» (voir «Isolation des tuyauteries»).
- Gaze enduite de goudron de toiture. A ne faire que si le réservoir est placé dans des combles ventilés car l'odeur de goudron frais persiste assez longtemps.

3. Réservoir avec échangeur

Le réservoir est le même que précédemment ; on lui ajoute simplement un échangeur.

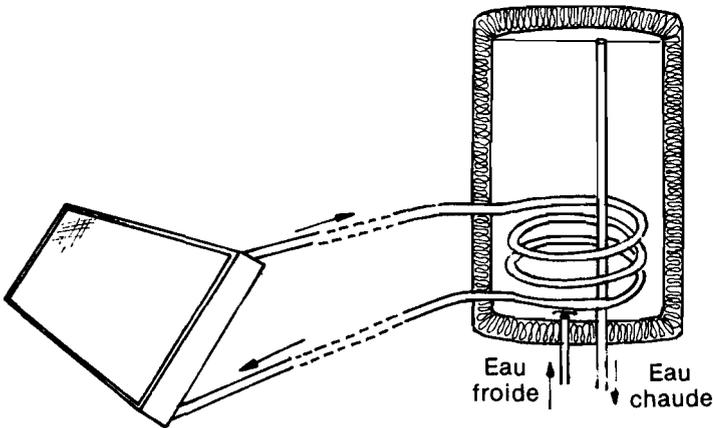
L'échangeur joue le rôle d'un radiateur ; l'eau chaude venant de l'insolateur perdra une partie de ses calories pour chauffer l'eau plus froide du réservoir.

L'échangeur sera donc placé dans le bas du réservoir, où l'eau est la plus froide.

Si l'eau dans le réservoir est très calcaire, ou si elle est à plus de 60°C , il y aura entartrage de la face extérieure de l'échangeur et celui-ci verra décroître ses caractéristiques au cours du temps. Il est alors intéressant de prévoir un démontage possible de l'échangeur pour détartre.

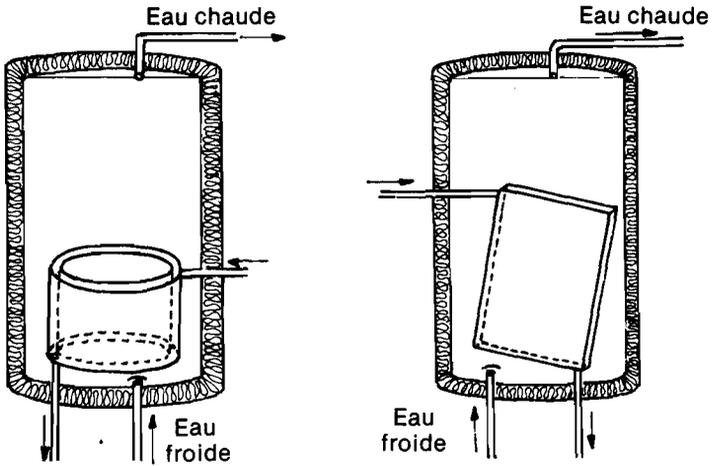
Pour l'estimation des dimensions de l'échangeur, voir annexe 7.

Le meilleur sur le plan de l'échange thermique sera le serpentin en tube de même section que dans le reste du circuit.



Si l'on place un circulateur dans le circuit, on préférera du tube plus petit (10 mm de diamètre intérieur) ; l'eau circulera plus vite et l'échange sera meilleur. Par ailleurs, comme on est en circuit fermé, le tube pourra être fin sans risque d'entartrage intérieur.

Autres formes d'échangeurs



a) **Anneau** : Deux cylindres de tôle enfilés l'un dans l'autre, distants de quelques millimètres, et soudés.

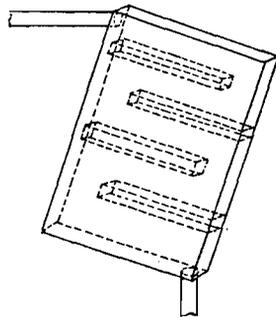
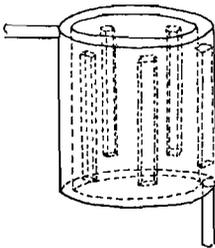
b) **Parallélépipède** : Deux tôles planes parallèles, distantes de quelques millimètres, et soudées. Cette forme sera moins bonne car l'échangeur arrivera très haut dans le ballon.

Dans le cas où de faibles pressions règnent dans l'installation (alimentation du réservoir par caisse à eau), on utilisera indifféremment l'un ou l'autre type d'échangeur en tôle de 6/10^e au moins.

Dans les autres cas, on utilisera l'échangeur annulaire en tôle de 15/10^e minimum.

Dans tous les cas, la fabrication de ces échangeurs sera très soignée pour éviter tout risque de fuite.

Si l'on met un circulateur dans le circuit (voir chapitre suivant), on pourra placer des chicanes dans l'échangeur pour forcer la turbulence; l'échange de chaleur sera meilleur.



En pratique, fabriquer soi-même un réservoir avec un échangeur est assez délicat. Le gain de prix n'est généralement pas compensé par les difficultés de réalisations et on aura souvent intérêt à l'acheter tout fait. On le prendra non isolé et on fera soi-même l'isolation.

4. Réservoirs du commerce

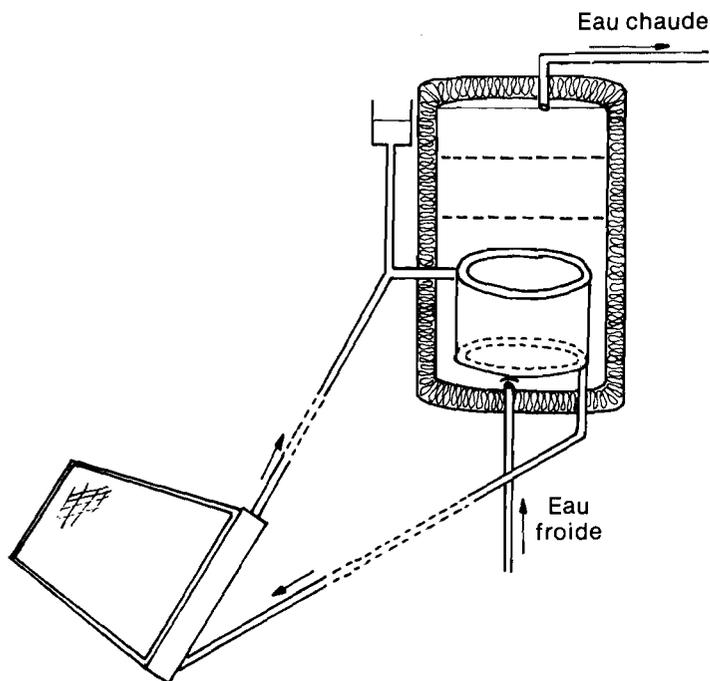
Il existe des modèles de réservoirs avec échangeur spécialement conçus pour l'utilisation en chauffe-eau solaire.

Leur fonction est :

- de maîtriser au maximum les mouvements de convection de l'eau dans le réservoir, c'est-à-dire d'éviter les mouvements inutiles de cette eau ;
- d'exploiter la stratification qui s'établit : eau chaude dans le haut du réservoir, eau froide dans le bas. Remarquons que l'eau étant assez mauvaise conductrice de la chaleur, la stratification est relativement stable en l'absence de mouvements de convection.

Cela peut être obtenu, par exemple, en interposant des grilles horizontales.

Ce dispositif est protégé. Des réservoirs équipés de ce dispositif sont vendus dans le commerce.



Les grilles renforcent la stratification de l'eau en limitant les mouvements de convection; l'eau la plus chaude reste mieux dans le haut du réservoir.

Des expériences seraient à faire pour mettre en évidence l'efficacité relative des différentes améliorations possibles en regard de leur coût.

Actuellement ces réservoirs présentent un inconvénient de poids : leur fabrication étant limitée, ils restent chers.

On trouve enfin dans le commerce des réservoirs plus classiques : avec ou sans échangeur, avec ou sans isolation thermique, équipés ou non d'une résistance électrique et d'un aquastat*.

A titre de comparaison, voici quelques prix moyens de réservoirs de 200 litres destinés à l'eau chaude sanitaire. (Les prix sont bien sûr variables selon les caractéristiques du matériel, les marques et les fournisseurs).

- Chauffe-eau mixte : réservoir isolé avec échangeur, résistance électrique et aquastat 1 500,00 F TTC
- Chauffe-eau électrique : réservoir isolé sans échangeur, avec résistance électrique et aquastat 1 100,00 F TTC
- Réservoir non isolé avec échangeur 700,00 F TTC
- Réservoir non isolé sans échangeur 300,00 F TTC

Signalons enfin qu'il est possible de récupérer ou d'acheter à bas prix de vieux chauffe-eau électriques. Il en existe, il suffit de les trouver.

En effet, lorsqu'on modernise une installation, le plus souvent l'ancien chauffe-eau reste inemployé. Il aurait suffi en général de changer ses résistances électriques pour le remettre en état de marche (pour un chauffe-eau de 100 l, une résistance de 1 200 W coûte environ 40 F).

Nota (4^e édition 1978) : Les fabricants de réservoirs mettent maintenant sur le marché et à des prix intéressants des réservoirs « spéciaux solaires » avec un échangeur solaire dans le bas, et un système de production de l'appoint dans le haut. Ce dernier est soit un deuxième échangeur pour branchement sur un générateur d'eau chaude (chaudière, cuisinière...), soit une résistance électrique thermostatée. L'utilisation de ces réservoirs est décrite au chapitre 10, paragraphe 3, 2.

* Un aquastat est un appareil destiné à maintenir la température de l'eau constante.

7. Chauffe-eau en thermosiphon

1. Accessoires

a) Un **vase d'expansion**, et une soupape de sécurité si l'on utilise un vase fermé.

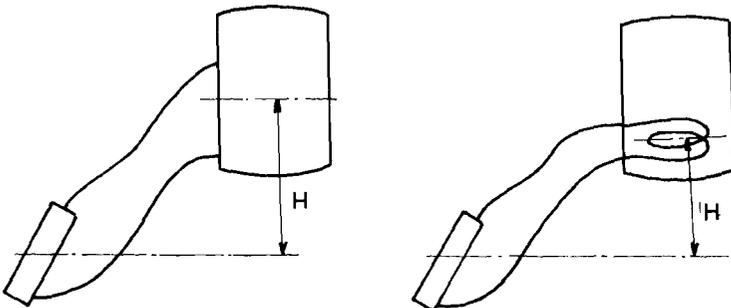
| Réservoir | | | |
|--|---------------------------------------|-----------------------|--|
| <i>avec échangeur</i> | | <i>sans échangeur</i> | |
| Vase ouvert (au-dessus de l'échangeur) | Alimentation du réservoir par : | caisse à eau | « trop-plein » plus haut que la caisse |
| ou vase fermé | | réseau (pression) | |

Les circuits sous pression avec réservoir sans échangeur sont généralement impossibles, car il est rare que l'insolateur puisse supporter la pression du réseau.

b) Un **purgeur** à chaque point haut du circuit (le vase d'expansion ouvert peut servir de purgeur s'il est à un point haut).

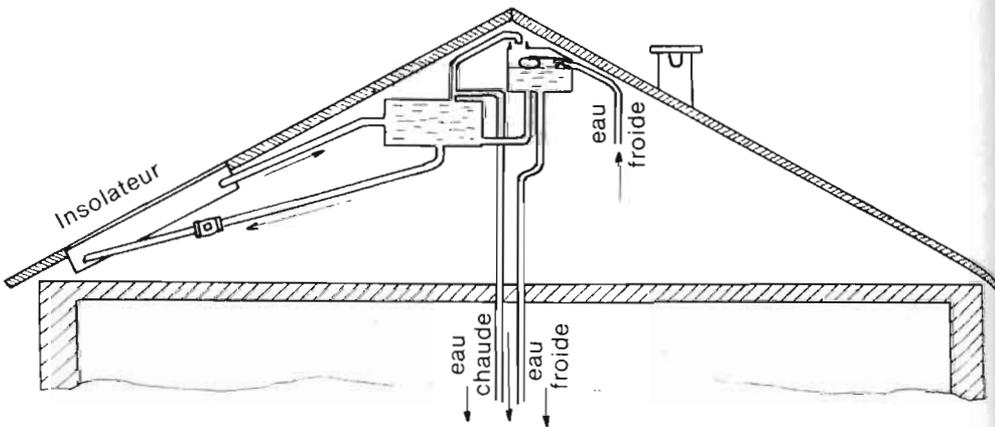
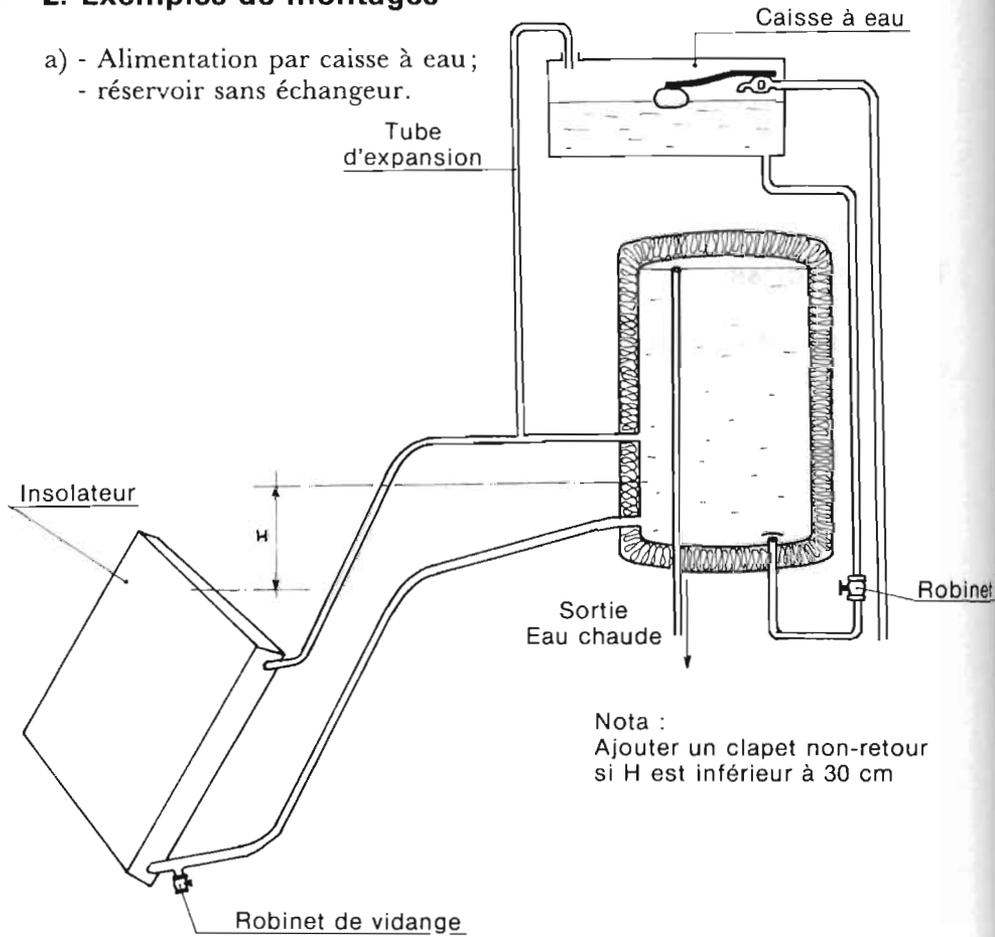
c) Un **robinet de vidange** de l'insolateur et de son circuit.

d) Si le réservoir n'est pas suffisamment haut, il faudra empêcher l'eau de se mettre à circuler en sens inverse lorsque l'insolateur est froid. Il faudra un **clapet non retour**; mais cela introduit une forte perte de charge dans un circuit dont la charge est déjà faible, puisque la hauteur de charge H (définie au chapitre 1) est petite. Cela conduit à prendre des tuyaux de gros diamètres.

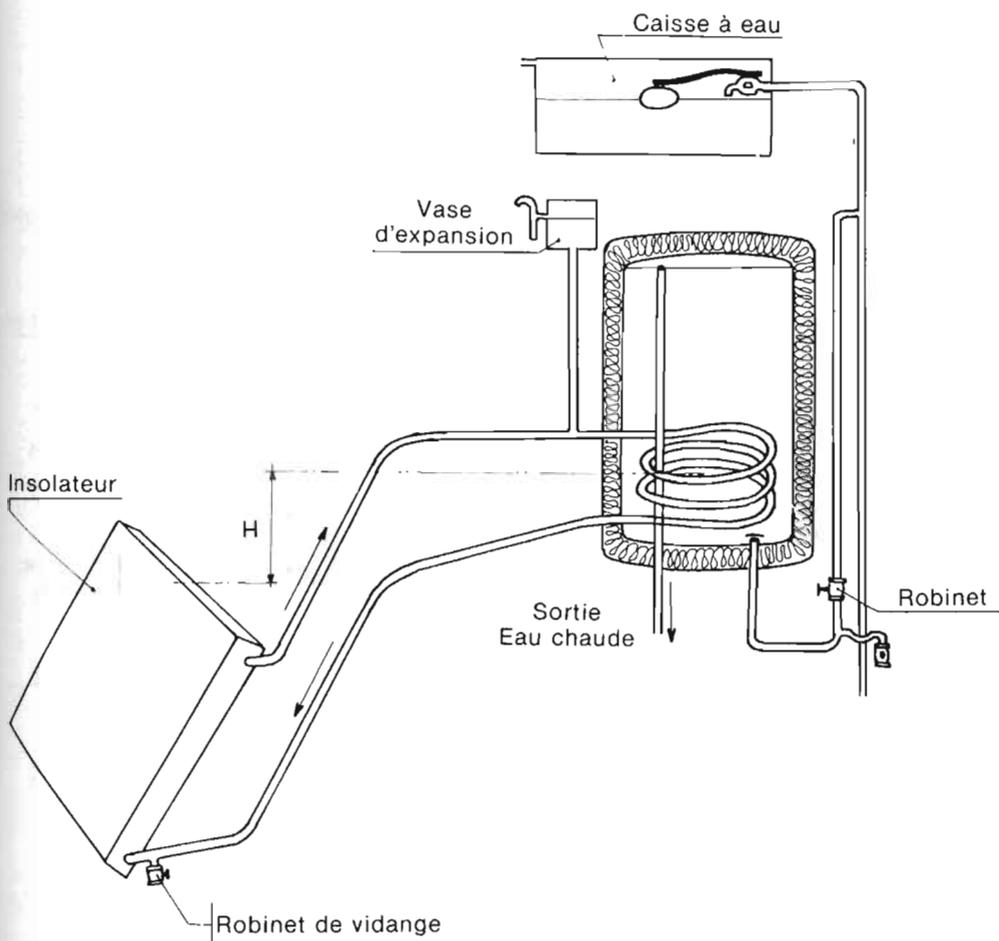


2. Exemples de montages

- a) - Alimentation par caisse à eau ;
- réservoir sans échangeur.



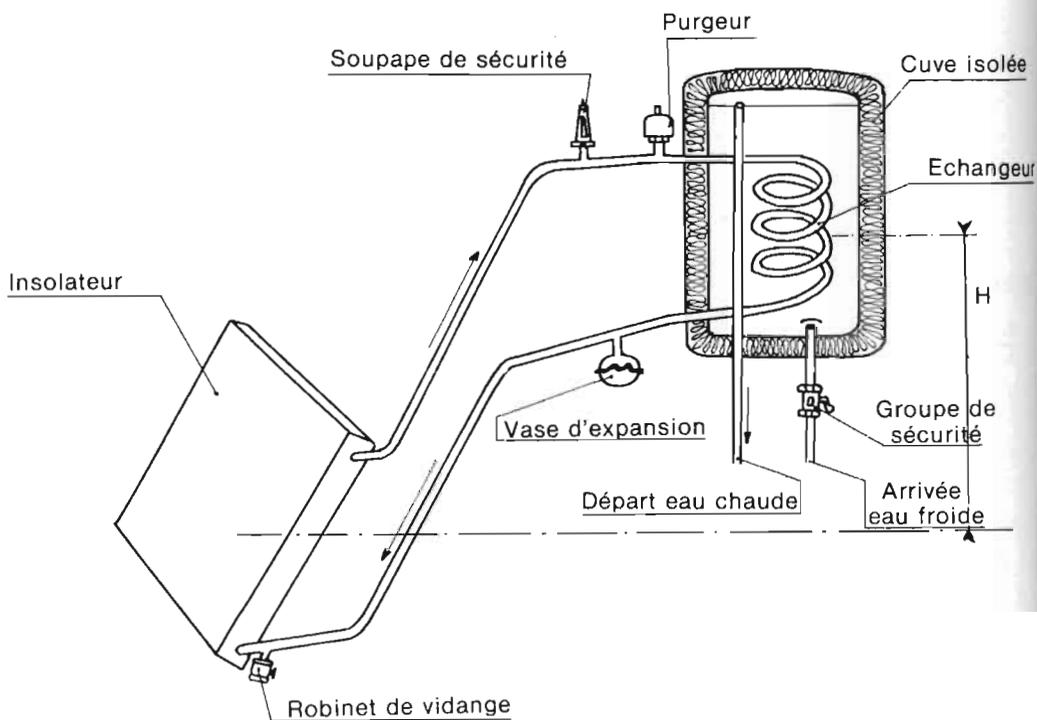
- b) - Alimentation par caisse à eau ;
 - réservoir avec échangeur ;
 - vase d'expansion ouvert.



Nota 1 :
 Ajouter un clapet non-retour si H est inférieur à 30 cm

Nota 2 :
 Pour une alimentation par le réseau, prévoir un groupe de sécurité sur l'alimentation en eau froide du chauffe-eau.

- c) - Alimentation par le réseau;
- réservoir avec échangeur;
- vase d'expansion fermé (et donc soupape de sécurité).



Nota : Pour $H < 30$ cm, un clapet non-retour est nécessaire.
 Nota : Le réservoir contenant un échangeur, le circuit primaire reste valable pour une alimentation par caisse à eau.

3. Choix du diamètre du tuyau

On connaît :

- la puissance de l'insolateur, c'est-à-dire surtout sa taille;
- le tracé exact du circuit, qui indique la hauteur de charge H, la longueur de tuyauterie, les accidents de parcours (coudes, tés, branchement des différents accessoires).

On choisit :

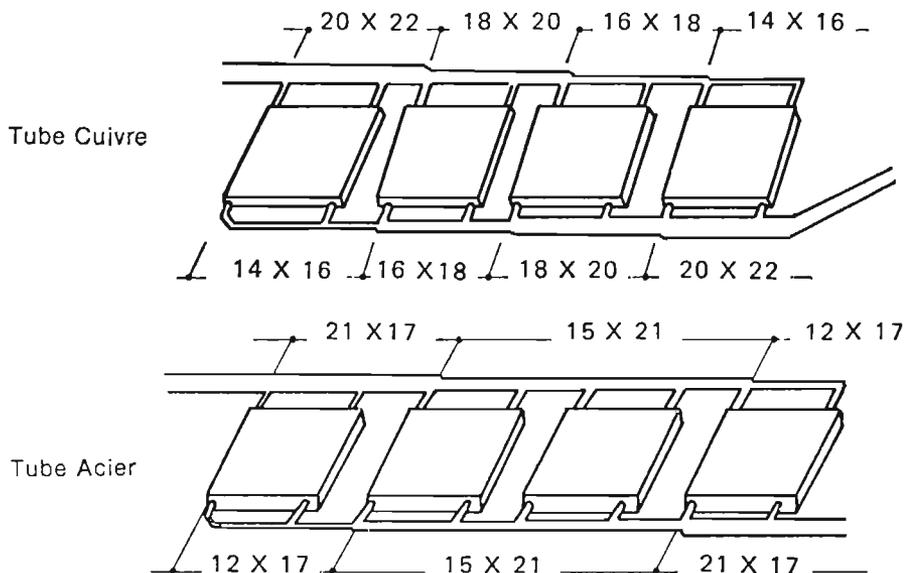
- la valeur de la température que l'on souhaite avoir pour l'eau à la sortie de l'insolateur;
- la valeur moyenne de la chute de température ΔT (l'expérience des installations de chauffage central conduit à prendre pour ΔT une valeur comprise entre 20 et 40°C).

On peut en déduire le diamètre à prendre pour les tuyaux afin que la circulation de l'eau soit suffisante et que l'échange de calories dans le réservoir se fasse correctement. Le calcul théorique est assez complexe; nous nous contenterons de donner quelques **ordres de grandeur pour des cas simples**.

Exemples

On suppose que :

- il y a 4 m² d'insolateurs pour chauffer un réservoir de 200 litres;
- les insolateurs sont équipés de radiateurs extra-plats de 1 mètre de hauteur, et sont inclinés à 50° sur l'horizontale;
- les insolateurs sont montés en parallèle et les collecteurs ont des diamètres croissants (ce qui n'est pas indispensable, mais préférable); ainsi, dans un circuit qui doit être équipé de tuyaux de diamètre intérieur 20 mm, les collecteurs peuvent être montés :



- les trajets des tuyaux sont très simples, sans détours inutiles, sans accessoires superflus;
- l'ensemble est très bien calorifugé.

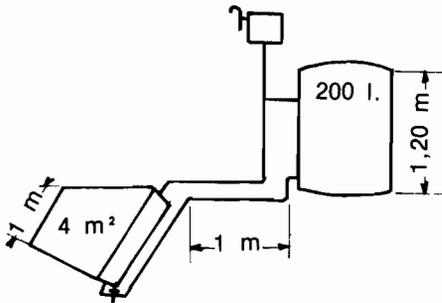
Et on choisit :

- température de l'eau à la sortie de l'insolateur comprise entre 50 et 70°C;
- chute de la température : $\Delta T = 30^\circ$ en moyenne.

Les résultats donnés ci-dessous ont été calculés pour obtenir un débit moyen de **70 litres par heure**, ce qui correspond, pour un insolateur de 4 m², à une chute de température de 30°C.

a) **Réservoir sans échangeur, proche de l'insolateur**

Le bas du réservoir est au niveau du haut de l'insolateur.

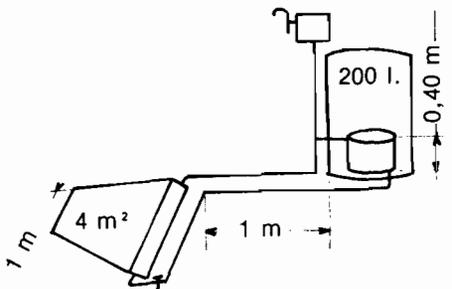


Tuyaux de diamètre intérieur 20 mm, ce qui correspond à :

- tube acier 21 × 27
- tube cuivre 20 × 22

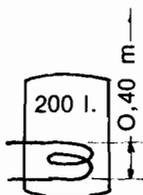
(pour les diamètres des tubes acier et cuivre, se reporter à l'annexe 5).

b) **Si l'on ajoute un échangeur**, les tuyaux seront plus gros, car l'échangeur étant placé dans le bas du réservoir la hauteur de charge est plus faible. Ils seront encore plus gros si l'échangeur est un serpentin car celui-ci introduit une grande longueur de tuyau supplémentaire :



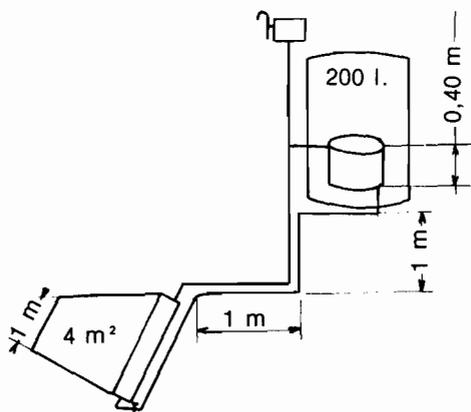
Diamètre intérieur : 22 mm

Même montage avec un échangeur serpentin :

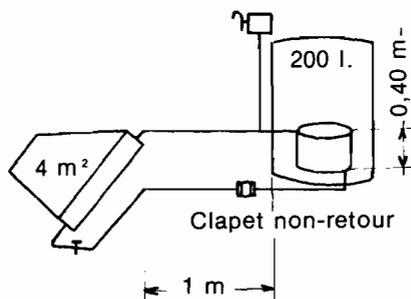


Diamètre intérieur ; **25 mm**

c) Influence de la hauteur



Diamètre intérieur : **18 mm**

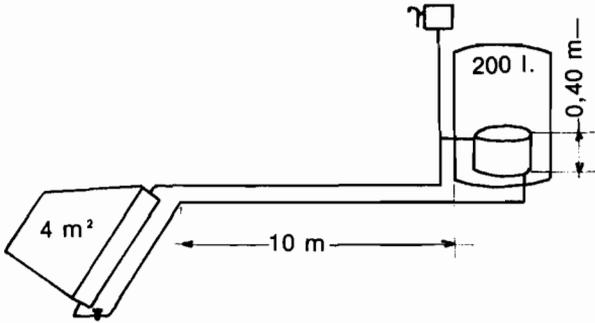


Diamètre intérieur : **34 mm**

Dans ce cas, il faut ajouter un clapet non retour, ce qui introduit une forte perte de charge supplémentaire.

d) Influence de la distance

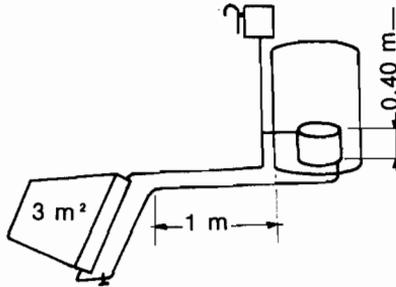
Les tubes doivent avoir une pente régulière et d'autant plus forte que les capteurs sont éloignés du réservoir.



Pente des tubes 10 cm/m
Diamètre intérieur : 25 mm

e) Influence de la taille de l'insolateur

Si l'insolateur est plus petit, on captera moins de calories, le débit sera donc plus faible; on prendra des tuyaux plus fins.



Diamètre intérieur : 18 mm

8. Chauffe-eau avec circulateur

1. Choix du circulateur

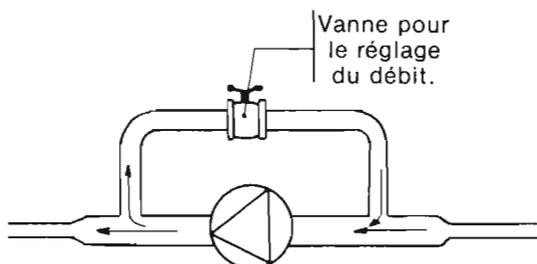
Avec un insolateur de 4 m², on cherchera à obtenir un débit moyen de **240 à 280 litres par heure**. Cela correspond à une chute de température ΔT voisine de 7°C.

Ce débit est faible. Un circulateur de **15 à 20 watts** sera presque toujours largement suffisant.

Il devra en outre supporter une température maximum de 100°C, et ne pas être attaqué par l'antigel. Il faudra toujours demander au fabricant du circulateur une garantie quant à sa résistance à ces deux facteurs.

Les circulateurs placés dans les circuits de chauffage central conviennent bien, mais sont en général trop puissants. Or, si le débit est trop rapide, l'eau chaude venant de l'insolateur n'aura que peu de temps pour céder ses calories dans le réservoir; elle reviendra encore chaude vers l'insolateur et celui-ci fonctionnera avec un mauvais rendement.

Pour pallier ces inconvénients, on pourra faire débiter le circulateur sur un «by-pass» :



Ainsi le débit dans l'installation sera inférieur au débit dans le circulateur.

Il existe des petits circulateurs en matière plastique (ce sont les moins chers, mais attention à leur résistance à la température et à l'antigel), en fonte et en bronze.

Par prudence, pour éviter toute détérioration due à la chaleur, on placera le circulateur avant l'insolateur : l'eau y sera moins chaude.

Éviter de disposer le circulateur au point bas de l'installation afin que les saletés s'y accumulant ne le détériorent pas.

Quant à l'antigel, on le choisira « spécial pour chauffage central » et de bonne qualité.

2. Commande du circulateur

Le circulateur doit fonctionner lorsque l'eau est à la fois :

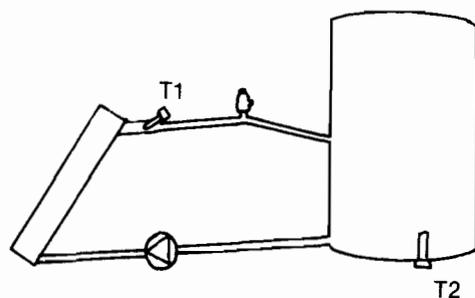
- suffisamment chaude dans l'insolateur;
- pas assez chaude dans le réservoir.

En général, et comme dans la plupart des circuits de chauffage de l'eau domestique, on limitera la température de l'eau dans le réservoir à 60°C (55°C si le circuit contient de l'acier galvanisé) afin de limiter l'entartrage et la corrosion.

Dès lors le système le plus simple est de mettre en marche le circulateur lorsque la température de l'eau dans l'insolateur atteint 65°C, sauf si l'eau dans le réservoir est déjà à 60°C.

En hiver on aura un meilleur rendement si l'on choisit des températures plus basses : 50°C dans l'insolateur et 45°C dans le réservoir.

Cela peut se faire à l'aide de deux aquastats :



Il est bien sûr meilleur d'avoir un système qui mette en marche le circulateur à chaque fois que la température de l'eau de l'insolateur est supérieure à celle de l'eau du réservoir.

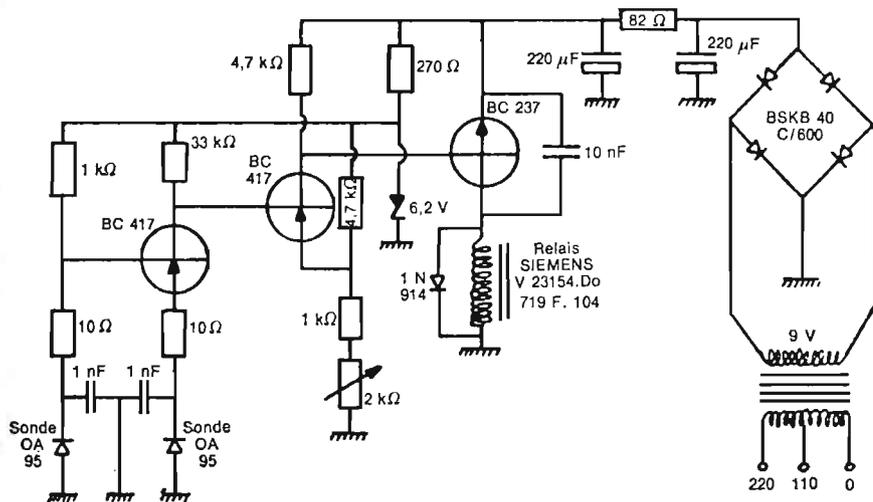
Dans ce cas la commande vient de l'examen de la différence des températures des capteurs et de la cuve de stockage. Cela s'appelle une régulation différentielle. Jusqu'en 1976, il était difficile de se procurer une de ces régulations à un prix inférieur à 1 000 F. Mais le développement de l'industrie solaire a amené sur le marché des régulations moins chères.

Chaque constructeur de capteurs solaires peut en vendre une, ainsi que les maisons spécialisées dans la régulation.

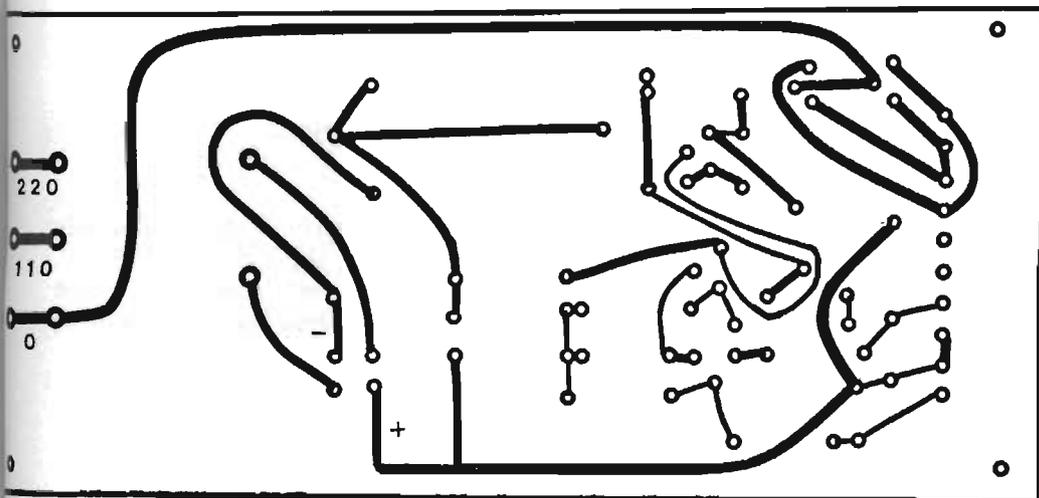
Les moins chères coûtent 450 F environ, ce qui n'est pas toujours négligeable. C'est pourquoi nous donnons ici un plan de régulation différentielle à faire soi-même. Elle revient à 150 F en matériel, et un exemplaire fonctionne depuis deux ans sans ennui. On peut trouver d'autres plans dans la littérature (par exemple dans *Radio-plans* de mai 1977).

a) **Principe de la régulation** : Les diodes sont très sensibles aux variations de température. Une diode est montée au contact d'un capteur solaire, une autre au contact de la cuve. Les températures évoluant différemment vont modifier les caractéristiques des diodes. Ceci permet de déséquilibrer la polarisation d'un transistor. Un deuxième transistor se trouve alors bloqué, permettant à un troisième de conduire le courant et d'exciter le relais, ou à l'inverse de ne pas conduire et de couper le relais pour arrêter le circulateur.

b) **Plan de la régulation**



c) **Plan du circuit imprimé (échelle 1)**



d) Liste des composants

Résistances

- 1 résistance (1 W) de 82Ω
- 2 résistances (1/2 W) de 10Ω
- 2 résistances (1/2 W) de $1\text{ k}\Omega$
- 2 résistances (1/2 W) de $4,7\text{ k}\Omega$
- 1 résistance (1/2 W) de $33\text{ k}\Omega$
- 1 potentiomètre de $2\text{ k}\Omega$

1 « strap » : c'est un bout de fil qui sert simplement à raccorder électriquement deux éléments que l'on n'a pas pu joindre par dessin sur le circuit.

Condensateurs

- 2 condensateurs (céramiques) de 1 nF
- 1 condensateur (200 V) de 10 nF
- 2 condensateurs (25 V) de $220\mu\text{F}$.

Diodes

- 2 diodes OA 95 (sondes)
- 1 diode 1 N 914
- 1 diode Zener de $6,2\text{ V}$
- 1 pont redresseur $250\text{ V } 600\text{ mA}$ Semikron BSK.B 40.C/600.

Transistors

- 1 transformateur $220/9\text{ V}$ (ou $110/9\text{ V}$) Ferrix 3837

Relais

- 1 relais Siemens V 23154 Do 719 F 104 avec support pour circuit imprimé.

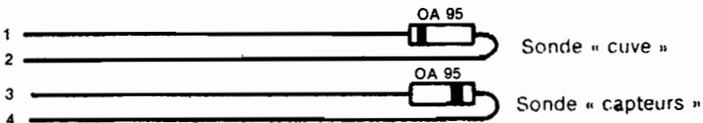
Connecteurs

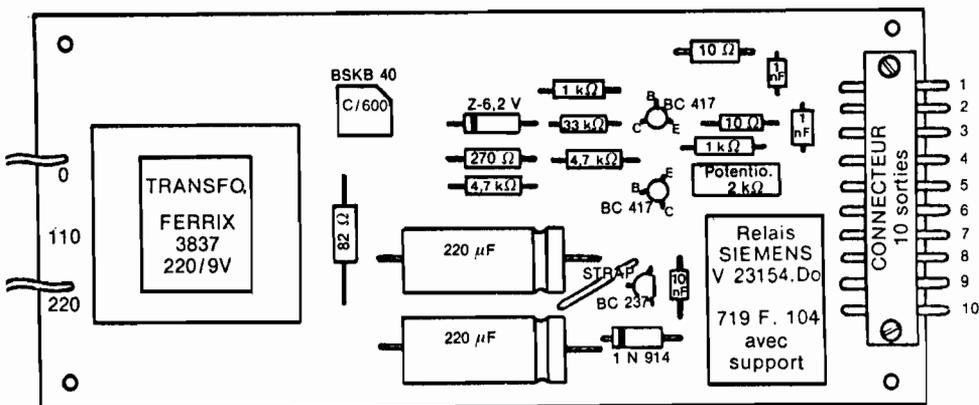
- 1 connecteur Socapex mâle 10 sorties
- 1 connecteur Socapex femelle 4 entrées.

e) Mise en place des éléments

Le courant électrique sous 220 V sera amené entre les points marqués 0 et 220. Le circulateur sera branché entre les points 220 et 8 ou 9.

Le 220 V étant sur la plaquette, on la fixera sur une plaque de bois en interposant des entretoises de 5 mm environ, suffisantes pour éviter de mauvais contacts et insuffisantes pour passer les doigts!





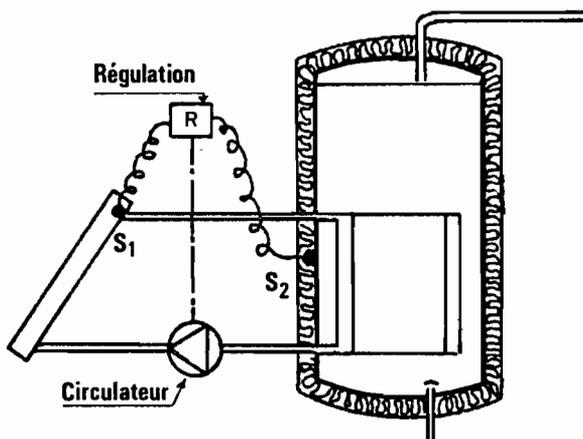
f) La place des sondes

Les sondes seront placées avec le meilleur contact thermique possible contre les capteurs et la cuve. Les fils seront bien isolés de façon à éviter tout « court-circuit » ou « mise à la masse » en touchant une partie métallique quelconque.

La sonde « capteur » sera collée (noyée dans l'araldite) contre le dos de l'absorbeur à côté de la sortie de l'eau chaude.

Pour la sonde « cuve », on a deux solutions selon la provenance du ballon.

Si c'est un ballon mixte acheté terminé, on enlève le thermostat de commande des résistances et on place la sonde dans le haut du logement de ce thermostat. Si c'est un simple ballon avec échangeur, et non isolé, on fixe la sonde de la même façon que sur le capteur, mais contre la cuve au niveau du milieu de l'échangeur, puis on isole la cuve.



g) Réglage de la régulation

Une fois réalisée, il faudra régler la régulation.

A cet effet, il y a dans le montage un potentiel réglable qui permettra de déclencher plus ou moins facilement. Il faudra donc s'armer des deux sondes que l'on a préalablement étanchées avec un vernis non conducteur, de deux verres d'eau, d'une casserole d'eau chaude, de deux thermomètres et de beaucoup de patience...

On place chaque sonde dans un verre d'eau et on fait varier les températures afin de régler avec le potentiomètre le **déclenchement** du relais (on l'entend très bien) lorsque la température des capteurs n'est plus que de 2 ou 3°C supérieure à celle de la cuve. L'enclenchement du relais se fera alors pour un écart d'environ 10°C.

3. Accessoires

a) Un **vase d'expansion**, et une soupape de sécurité si l'on utilise un vase fermé. Les différents cas possibles sont les mêmes que pour un chauffe-eau en thermosiphon (voir chapitre précédent), mais rappelons qu'avec un circulateur les installations sans échangeur sont vivement déconseillées.

Dans des installations d'aussi faibles puissances, la position relative du circulateur et du vase d'expansion n'aura que peu d'importance.

b) Un **purgeur** à chaque point haut du circuit.

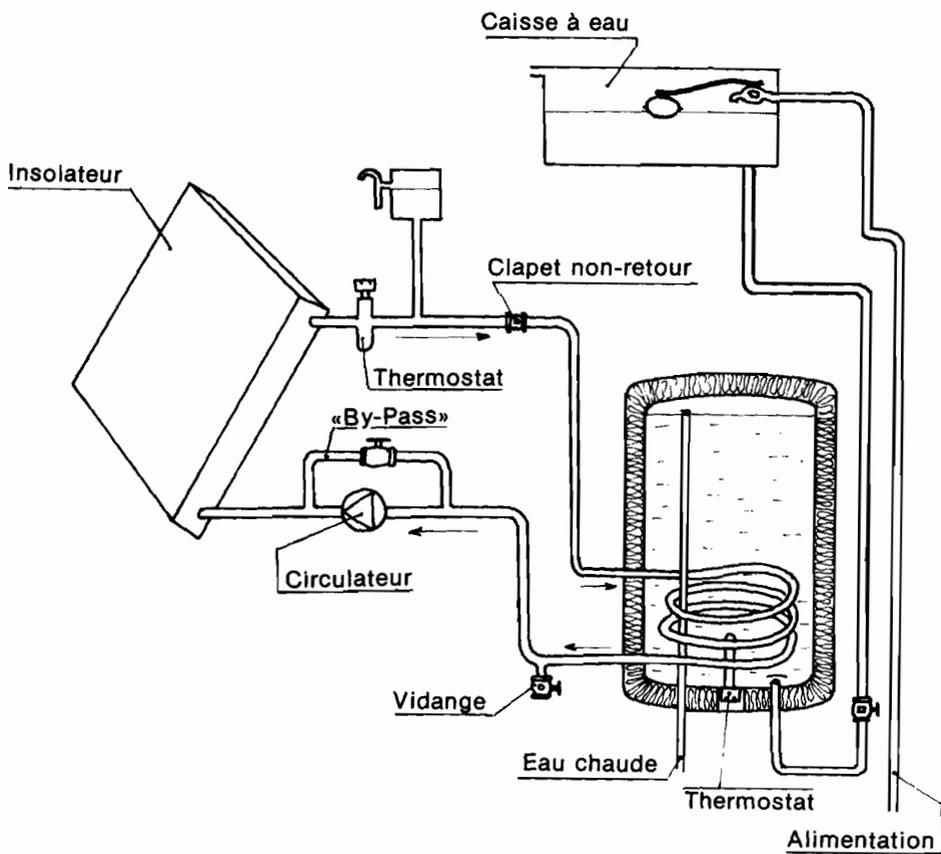
c) Un **robinet de vidange** de l'insolateur et de son circuit.

d) Un **clapet non-retour** sera souvent nécessaire puisque le réservoir est généralement dans ce cas en-dessous de l'insolateur. Dès lors, bien que les tuyaux soient de petits diamètres, un thermosiphon pourra se déclencher la nuit en sens inverse.

4. Exemples de montages

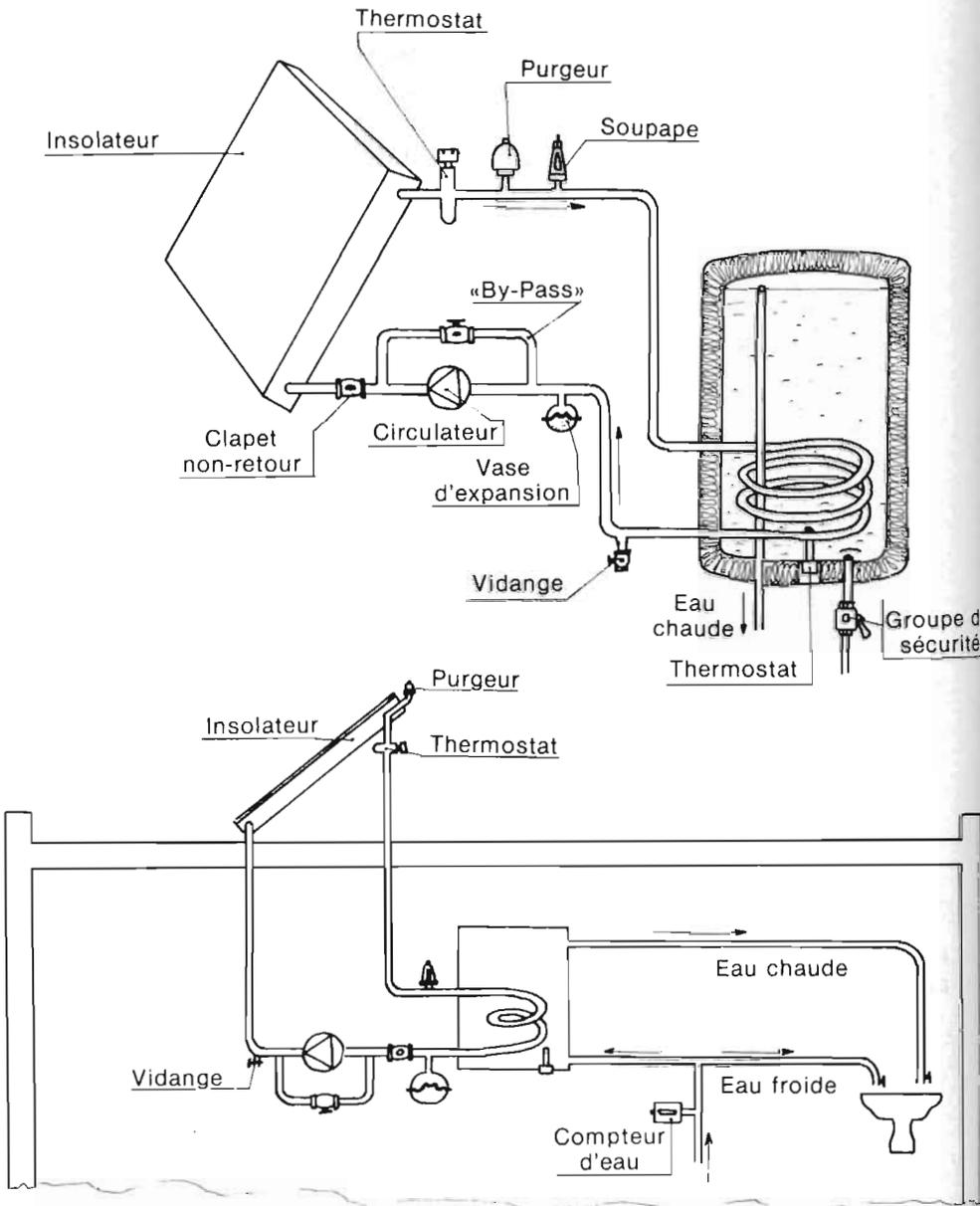
Rappelons tout d'abord que les installations sans échangeur sont vivement déconseillées, car un circulateur est très sensible à l'entartrage.

- a) - alimentation par caisse à eau
- réservoir avec échangeur
- vase d'expansion ouvert.



Nota : Le réservoir contenant un échangeur, le circuit primaire resté valable pour une alimentation par réseau.

- b) - alimentation par le réseau
- réservoir avec échangeur
- vase d'expansion fermé (1/10nc, soupape de sécurité)
- purgeur automatique.



Nota : Le réservoir contenant un échangeur, le circuit primaire reste valable pour une alimentation par caisse à eau.

5. Choix du diamètre des tuyaux

La connaissance de la taille de l'insolateur et le choix de la chute de température permettent d'estimer un débit optimal.

Par ailleurs, tout le tracé du circuit donne la longueur de tuyauterie et indique les accidents de parcours.

Pour déterminer le diamètre de tuyau capable d'assurer ce débit dans ce circuit, le calcul théorique est semblable à celui que l'on fait pour les installations en thermosiphon. Nous nous contenterons ici aussi de donner quelques **ordres de grandeur pour des cas simples**.

Exemples :

On suppose que :

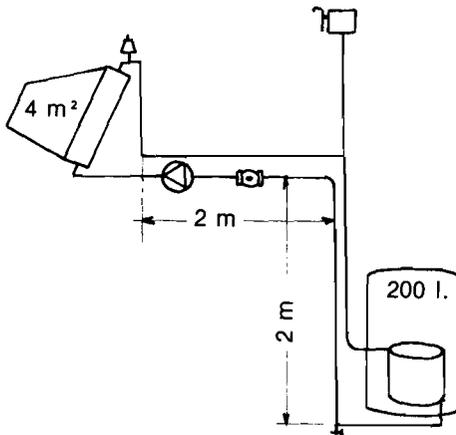
- il y a 4 m^2 d'insolateur pour chauffer un réservoir de 200 l;
- le réservoir contient un échangeur;
- les trajets des tuyaux sont très simples;
- l'ensemble est très bien calorifugé.

Et on choisit :

- température de l'eau à la sortie de l'insolateur comprise entre 40 et 60°C ;
- chute de la température : $\Delta T = 17^\circ\text{C}$ en moyenne.

Les résultats donnés ci-dessous ont été calculés pour obtenir, dans ces conditions, un **débit moyen de 260 litres par heure**.

a) Influence du type d'échangeur



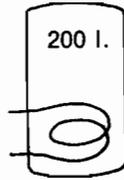
Avec un circulateur dont la charge :

$H = 0,6$ à $0,8 \text{ m CE}$,

lorsque le débit = 260 l/h ,

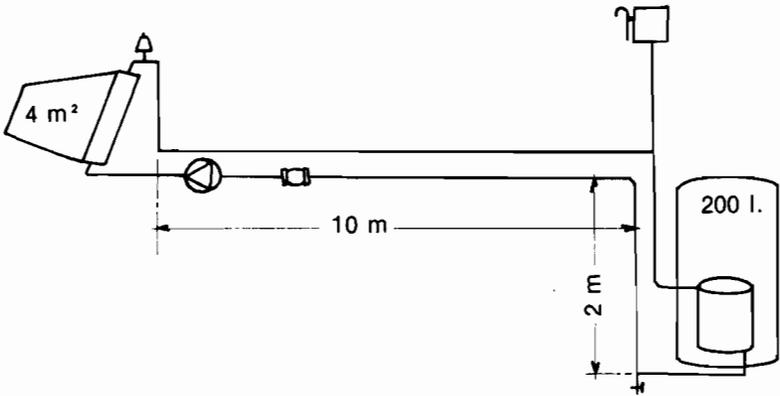
on prendra des tuyaux de diamètre intérieur : **14 mm**
 ce qui correspond à :
 tube acier 15 × 21
 tube cuivre 14 × 16;
 ou, si la charge est :
 $H = 0,2$ à $0,4$ m CE,
 on prendra des tuyaux de diamètre intérieur : **16 mm**.

Même montage que précédemment, avec échangeur serpentin :



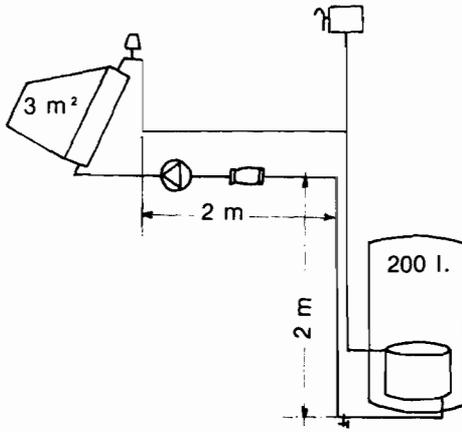
$H = 1$ à $1,3$ m CE
 Diamètre intérieur : **14 mm**;
 ou :
 $H = 0,2$ à $0,5$ m CE
 Diamètre intérieur : **16 mm**.

b) Influence de la longueur



$H = 0,9$ à $1,2$ m CE
 Diamètre intérieur : **14 mm**
 ou :
 $H = 0,3$ à $0,5$ m CE
 Diamètre intérieur : **16 mm**.

c) Influence de la taille de l'insolateur



$H = 0,3 \text{ à } 0,4 \text{ m CE}$

Diamètre : **14 mm.**

9. Compléments pratiques

1. Mise en service

Lorsque toutes les tuyauteries sont en place,

- bien rincer l'installation,
- faire un essai d'étanchéité, à 1,5 fois la pression de service pendant 48 heures.

Si l'on a choisi un réservoir avec échangeur, on mettra de l'antigel dans le circuit primaire. Le mélange eau-antigel doit être aussi homogène que possible, sinon l'antigel risquera de s'accumuler dans certains endroits : bien brasser l'eau et l'antigel avant de faire le plein.

Si les purgeurs sont manuels : purger au démarrage et au moins une fois par an.

2. Quelques conclusions

L'utilisation de **radiateurs du commerce** pour la confection de l'insolateur mettra à l'abri de bien des déboires.

Prévoir de **bonnes isolations** pour l'insolateur, les tuyauteries et le réservoir ; et ne pas oublier que la laine de verre, quand elle est mouillée, n'est plus isolante.

Préférer une installation avec **échangeur**. Plutôt que de fabriquer entièrement le réservoir, on aura généralement intérêt à acheter une cuve avec échangeur ; on la prendra non isolée et on l'isolera soi-même.

Le **thermosiphon**, bien que souvent préférable, n'est accessible à l'amateur que pour un **circuit court et simple**.

Celui qui est suffisamment outillé utilisera des tuyaux en acier pour réaliser une **installation « tout fer, fonte et acier »**.

Ne pas utiliser à la fois dans un circuit du cuivre et de l'acier galvanisé.

10. Utilisation de l'énergie complémentaire

Nous verrons d'abord ce que l'on peut espérer d'un chauffe-eau solaire bien conçu et soigneusement fabriqué. Bien sûr, pendant les jours très nuageux, on ne récupérera que très peu ou pas du tout de chaleur.

Si l'on veut quand même avoir de l'eau chaude, il faudra avoir recours à une autre source d'énergie. De l'utilisation du vent à celle de l'électricité, on peut envisager toutes sortes de solutions plus ou moins difficiles à mettre en œuvre et s'accouplant plus ou moins heureusement avec l'apport solaire. Il n'y a pas de solution miracle... cela se saurait!

1. Comparaison des énergies d'appoint facilement disponibles

La consommation en énergie d'appoint et son coût dépendront :

- de la source d'énergie utilisée;
- de la période pendant laquelle on veut disposer de cette énergie : en permanence, ou seulement la nuit (pour bénéficier du tarif heures creuses d'EDF), ou seulement l'hiver (branchement sur le chauffage);
- de la quantité minimum d'eau chaude qu'on accepte d'avoir les jours sans soleil (les fortes assurances coûtent cher!);
- du moment de la journée où l'on consommera l'eau chaude; dans certains cas, la différence pourra être très sensible.

Si nous comparons brièvement les prix des différentes sources d'énergie, nous trouvons par ordre croissant :

- le gaz naturel*;
- le fuel;
- le charbon, le gaz de ville* et l'électricité au tarif heures creuses*, que nous situerons grossièrement au même niveau de prix en tenant compte des rendements des divers types d'appareils;
- les gaz butane et propane, environ un tiers plus chers que le gaz de ville;
- l'électricité au tarif heures pleines*, plus de deux fois plus chère que l'électricité au tarif heures creuses.

* Compte non tenu du prix de l'abonnement.

Ces estimations sont en réalité très moyennes ; il faudrait tenir compte, par exemple, des différences entre le coke et l'anhracite, des différents types d'abonnements de gaz et d'électricité...

On pourrait aussi tenir compte de la plus ou moins grande facilité d'utilisation : l'électricité est particulièrement pratique, toujours présente, mais à un prix que la nature paie cher ; l'anhracite revient plus cher que les autres cokes mais, meilleur combustible, il faut en transporter moins...

Pour le prix de revient des énergies les plus courantes, voir annexe 8.

L'électricité

La solution la plus facile est certes d'utiliser le réseau électrique : il suffit de placer dans le réservoir une résistance couplée à un aquastat, ce qui ne coûte pas très cher.

On sait par contre à quel point la production à grande échelle de l'électricité est sujette à critique, tant sur le plan du bilan énergétique d'un pays que sur celui de ses conséquences locales (particulièrement inquiétantes avec les centrales nucléaires).

Soulignons aussi que la tarification en vigueur, qui favorise les gros consommateurs, défavorisera *a fortiori* les utilisateurs d'énergie solaire puisqu'ils consommeront moins d'électricité. En effet le chauffage solaire va faire économiser des kWh compris presque exclusivement dans la tranche la moins chère (deuxième tranche). Ainsi l'économie financière qu'on fera sera nettement inférieure à l'économie d'énergie qu'on aura pu réaliser.

Le chauffe-eau au gaz

L'utilisation du gaz, généralement moins cher, présentera en outre tous les avantages d'un réchauffage instantané. Il suffit d'allumer le chauffe-eau pour avoir de l'eau chaude :

- pas de temps de mise en chauffe ;
- quantité d'eau chaude non limitée.

Un petit chauffe-eau au gaz, placé après la sortie du réservoir, ne réchauffera l'eau que si elle insuffisamment chaude. Mais les appareils de petite puissance actuellement sur le marché fonctionnent indépendamment de la température de l'eau en entrée et celle-ci sera donc réchauffée même lorsqu'elle est déjà chaude ! Cet inconvénient est en partie compensé par le fait que la plupart des chauffe-eau au gaz actuels sont munis d'un réglage du débit de l'eau qui permet de régler la température de l'eau à la sortie.

Aussi n'allume-t-on le gaz qu'à chaque fois que l'on constate que l'eau arrive froide. Si on doit l'allumer pendant la journée, on l'éteindra aussitôt après usage, pour pouvoir profiter d'un nouvel apport solaire éventuel lors du tirage suivant.

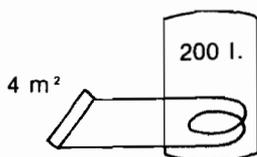
Autres

On peut aussi coupler le chauffe-eau solaire à une installation de chauffage central, à une cuisinière (charbon, bois, mazout)... On sera amené dans ce cas à utiliser un deuxième réservoir où l'eau ne sera réchauffée qu'en cas de besoin.

Cela peut être très pratique et d'usage économique. Par contre, le contrôle du fonctionnement est vite assez onéreux à installer, et si on ne fait pas ce contrôle on pourra, sans s'en rendre compte, privilégier le deuxième mode de chauffage, ou obtenir de l'eau trop chaude (l'eau à la sortie des chaudières de chauffage central est généralement à 90°C).

2. Que peut-on attendre d'un chauffe-eau solaire sans énergie d'appoint? Avec appoint électrique?

PAS D'ÉNERGIE D'APPOINT



a) Journées très ensoleillées

On recueillera un maximum d'énergie solaire par rapport à la plupart des systèmes utilisant une énergie d'appoint.

Avec un **insolateur de 4 m²**, on pourra obtenir environ, en supposant un rendement de l'installation de 45 % (voir chapitre 3) et la température de l'eau froide égale à 10°C :

| <i>Dans le sud-est de la France</i> | <i>eau chaude à :</i> | Volume chauffé par jour | |
|-------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|--------------------------|
| | | <i>maximum (journées sans nuages)</i> | <i>pendant environ :</i> |
| Juillet | 60°C | 240 l | 5 jours sur 7 |
| Décembre | 60°C | 140 l | 3 jours sur 7 |
| | ou 45°C | 200 l | 3 jours sur 7 |
| Moyenne annuelle | 60°C | 210 l | 4 jours sur 7 |

b) Journées très nuageuses

Pas d'eau chaude, peut-être de l'eau tiède.

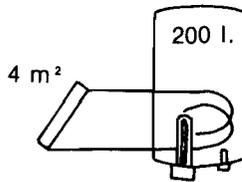
c) En moyenne, on dispose :

| | |
|------------------|-----------------------------|
| Juillet | 170 l par jour d'eau à 60°C |
| | 65 l par jour d'eau à 60°C |
| Décembre | ou |
| | 90 l par jour d'eau à 45°C |
| Moyenne annuelle | 120 l par jour d'eau à 60°C |

En réalité, il n'y a pas bien sûr que des journées très ensoleillées ou très nuageuses, et la production d'eau chaude sera variable. Ainsi, en janvier, on n'aura pas 200 litres d'eau à 45°C trois jours sur sept, ni 90 litres à 45°C chaque jour, mais peut-être 200 litres un premier jour, rien le lendemain, 45 l, 90 l et 65 l les trois jours suivants.

La production d'eau chaude sera aussi variable avec les années. Les chiffres donnés correspondent à des moyennes.

RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE DANS LE BAS DU RÉSERVOIR ÉLECTRICITÉ TARIF NUIT



a) Journées très ensoleillées

- **Si on consomme l'eau chaude surtout le matin**, l'apport solaire sera maximum et rechargera le chauffe-eau dans la journée. Il y aura un complément de chauffage par l'électricité pendant les nuits d'hiver (car l'ensoleillement est alors insuffisant pour chauffer tout le réservoir avec 4 m²), ou si l'on a tiré de l'eau chaude le soir.

- **Si on consomme surtout l'après-midi ou le soir**, l'apport solaire sera très faible car pendant la journée le réservoir sera déjà rempli d'eau chaude. Dès lors le chauffage de l'eau se fera presque exclusivement la nuit par l'électricité!

b) Journées très nuageuses

Réchauffage la nuit par l'électricité de toute l'eau froide contenue dans le réservoir; on aura quand même 200 litres d'eau chaude le lendemain matin.

c) Conclusion

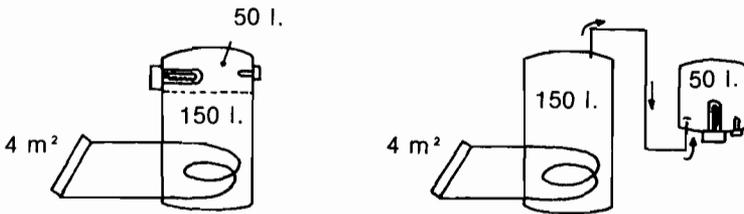
Forte sécurité, rentabilité très variable :

- On sera assuré de disposer de 200 litres d'eau chaude tous les matins.
- L'énergie d'appoint sera relativement peu chère, mais **l'apport solaire sera très faible si on consomme l'eau chaude surtout l'après-midi et le soir.**

d) Remarques

Si l'on utilisait, avec un tel système, **l'électricité au tarif normal**, on ne bénéficierait pratiquement plus de l'apport solaire; cela reviendrait presque à un **fonctionnement tout électrique.**

RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE DANS LE HAUT DU RÉSERVOIR ÉLECTRICITÉ TARIF DE NUIT



a) Journées très ensoleillées

- **Si on consomme l'eau chaude surtout le matin**, l'apport solaire sera maximum et rechargera le chauffe-eau dans la journée.

On pourra même, en plein été, avoir plus de 200 l d'eau chaude dans la journée.

La nuit, il y aura rarement réchauffage de 50 l par l'électricité.

- **Si on consomme surtout l'après-midi ou le soir**, on perdra un peu de l'apport solaire. La nuit il y aura très souvent réchauffage de 50 l par l'électricité.

b) Journées très nuageuses

Apport d'électricité la nuit pour 50 l seulement; on aura davantage d'eau chaude le lendemain seulement s'il y a de nouveau du soleil.

On aura en outre la possibilité d'enclencher l'interrupteur de jour mais le tarif «heures normales» est beaucoup plus fort.

c) Conclusion

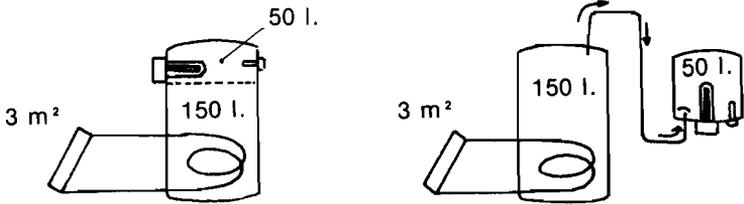
Sécurité limitée à 50 litres, forte rentabilité :

- On aura tous les matins au moins 50 l d'eau chaude, mais pas toujours plus : le reste sera fourni dans la journée en fonction de l'ensoleillement.
- On consommera peu d'électricité, tout en utilisant bien l'apport solaire.

d) **Remarque**

Si l'on place l'aquastat plus bas dans la cuve du premier schéma (ou si l'on augmente la taille du deuxième réservoir dans le deuxième schéma), on aura l'assurance d'avoir un volume plus important d'eau chaude tous les matins, mais l'apport électrique sera plus important.

**RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE DANS LE HAUT DU RÉSERVOIR
ÉLECTRICITÉ TARIF NORMAL**



a) **Journées très ensoleillées**

On aura généralement au moins 50 l d'avance tout en utilisant bien l'énergie solaire.

On pourra ainsi consommer plus de 200 l d'eau chaude par jour (le réchauffage supplémentaire étant toujours fait, bien sûr, par l'électricité).

Mais quand on videra le réservoir, la résistance se mettra toujours en marche pendant le réchauffage des 50 premiers litres.

De ce fait on pourra se contenter de 3 m² de capteurs, au lieu de 4 m² comme dans les exemples précédents, pour une production comparable.

b) **Journées très nuageuses**

On aura le même rendement qu'avec un chauffe-eau électrique de 50 litres.

c) **Conclusion**

Bonne sécurité si l'on n'a pas tous ses besoins d'eau chaude au même moment, rentabilité très variable :

- On aura généralement 50 litres d'avance.
- On consommera sur l'ensemble de l'année une partie importante d'une énergie d'appoint coûteuse.

d) **Remarque**

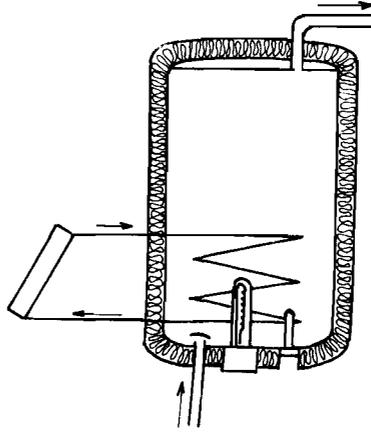
Si l'on place la résistance plus bas dans le réservoir du premier schéma (ou si l'on augmente la taille du deuxième réservoir dans le deuxième schéma), on se rapprochera d'autant du fonctionnement tout électrique.

Montages

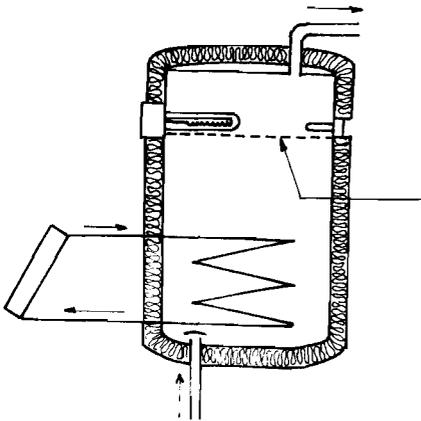
a) Résistance électrique dans le réservoir

L'aquastat est couplé à la résistance électrique ; la résistance n'est sous tension que si la température de l'eau dans le réservoir est inférieure à une température choisie à l'avance et affichée sur l'aquastat (60°C par exemple).

1) Résistance et aquastat dans le bas du réservoir



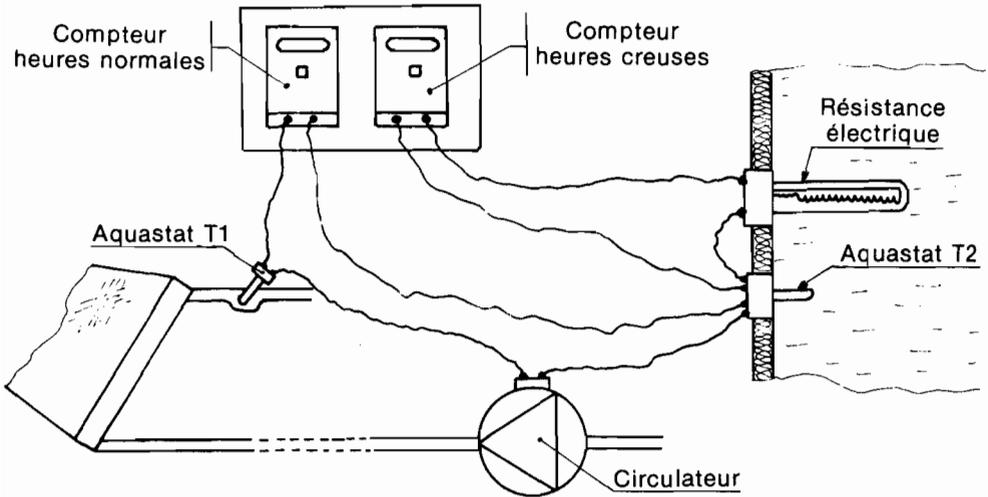
2) Résistance et aquastat dans le haut du réservoir



Si l'on place une grille, cela limitera les mouvements de convection : l'eau la plus chaude restera dans le haut du réservoir.

Exemple de montage

Installation avec circulateur et avec une résistance électrique branchée sur le compteur heures creuses :



Supposons qu'on veuille de l'eau dans le réservoir à la température $T_2 = 60^\circ\text{C}$ et que l'on veuille que le circulateur se mette en marche lorsque l'eau dans le capteur atteint la température $T_1 = 65^\circ\text{C}$.

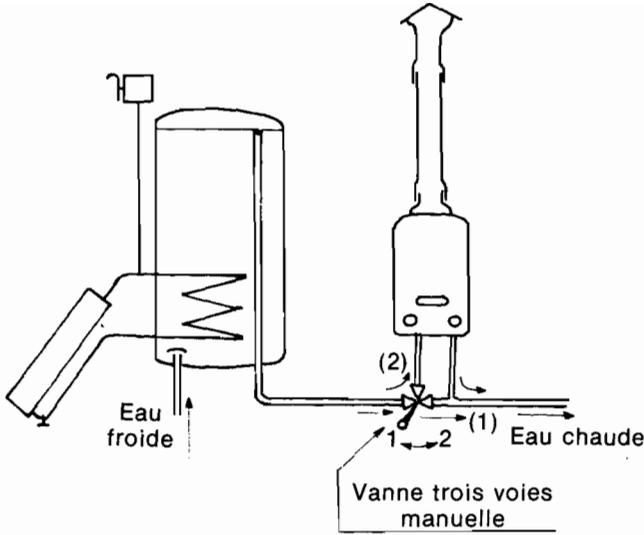
Dans la journée (compteur « heures normales ») :
si les aquastats T_1 et T_2 sont enclenchés, c'est-à-dire si :
- l'eau du capteur est à 65°C ou plus ;
- l'eau du réservoir est à moins de 60°C ,
le courant passe et fait tourner le circulateur.

Pendant la nuit (compteur « heures creuses ») :
si l'aquastat T_2 est enclenché (eau du réservoir à moins de 60°C), le courant passe dans la résistance, réchauffant ainsi l'eau dans le réservoir ; et comme la nuit il n'y a pas de soleil (!), la température de l'eau dans le capteur sera forcément inférieure à 65°C , l'aquastat T_1 ne sera pas enclenché, et le circulateur ne sera pas mis en marche.

b) Utilisation d'un chauffe-eau au gaz

Allumer le chauffe-eau gaz quand l'eau arrive insuffisamment chaude.

La vanne 3 voies manuelle (150 à 200 F TTC) est facultative. Elle est placée à l'entrée du chauffe-eau gaz pour éviter que l'eau ne le traverse lorsqu'elle n'a pas besoin d'être réchauffée : elle perdrait des calories pendant ce trajet inutile.

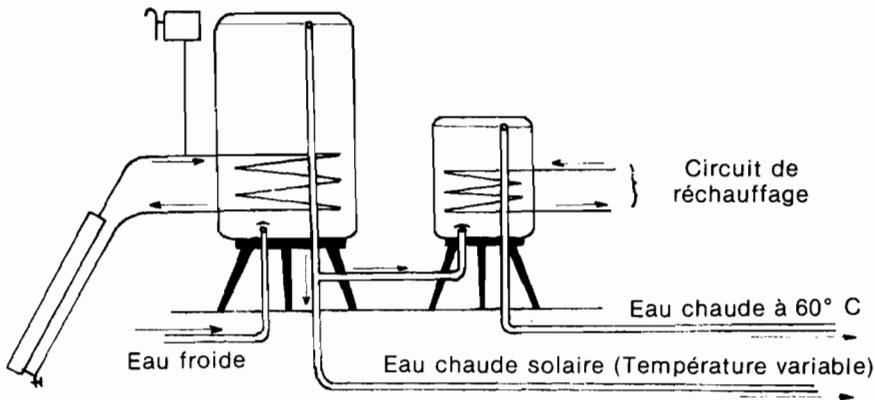


- vanne en position 1 : passage direct lorsque l'eau solaire est assez chaude ;
- vanne en position 2 : passage par le chauffe-eau gaz pour le réchauffage de l'eau.

Lorsqu'on se sert du chauffe-eau pendant le jour, remettre la vanne en position 1 après usage pour voir, lors du tirage suivant, si l'eau du réservoir est de nouveau chaude.

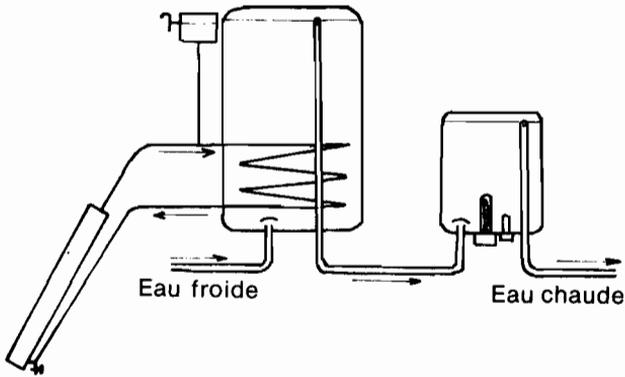
c) Montage de deux réservoirs en série

Les deux réservoirs seront très proches l'un de l'autre, sinon les pertes dans le tuyau de jonction augmenteront la consommation d'énergie d'appoint dans le deuxième réservoir.



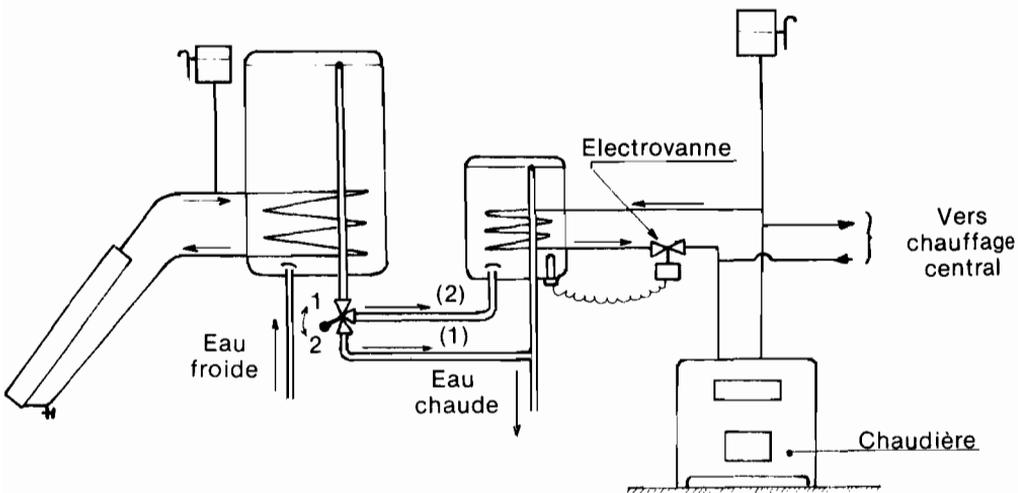
Par ailleurs, on pourra économiser l'énergie d'appoint en ne reliant le deuxième réservoir qu'aux postes où l'on veut avoir impérativement de l'eau très chaude.

Réchauffage par résistance électrique



Réchauffage à partir du circuit de chauffage central

Il y a un grand nombre de montages possibles selon que l'on emploie tel ou tel type d'appareil de réglage ou de contrôle. En voici un exemple :



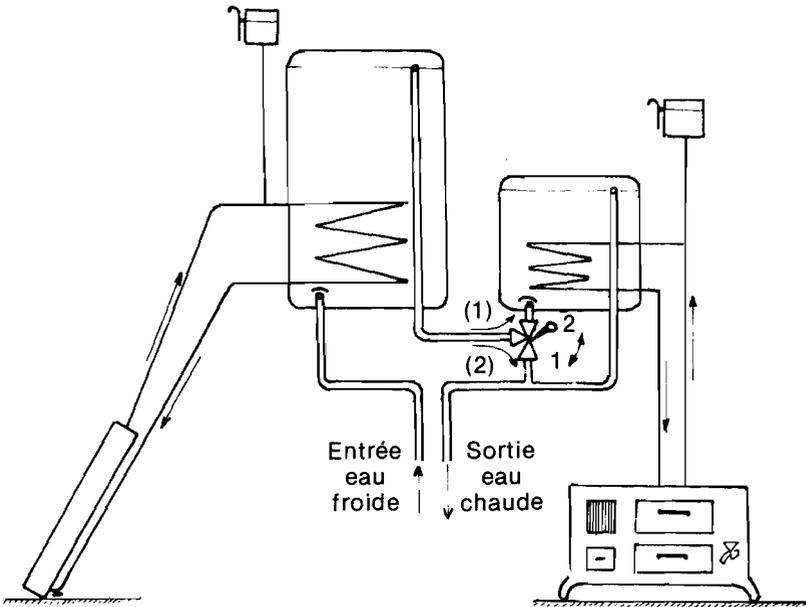
La vanne 2 voies est actionnée par un moteur commandé par un aquastat placé dans le deuxième réservoir.

La vanne 3 voies manuelle permet de court-circuiter le deuxième réservoir lorsque la chaudière ne marche pas.

Une telle installation assurera le complément d'eau chaude en hiver, époque où l'on en a le plus besoin et où l'on récupère le moins d'énergie solaire.

On peut encore relier l'échangeur du deuxième réservoir à une cuisinière.

L'exemple ci-dessous n'a pas d'organes de régulation qui, étant chers, sont moins dans l'esprit de ce genre d'installations.



11. Prix des matériaux - amortissement

Nous choisissons pour l'exemple un chauffe-eau de 200 litres couplé à un insolateur de 4 m². Les matériaux et les procédés utilisés sont ceux décrits dans les chapitres précédents. Les installations choisies seront un peu plus chères que certaines installations «de fortune» décrites dans la littérature courante ; par contre elles auront un bon rendement pour un minimum d'entretien et une bonne sécurité... à condition toutefois que les capteurs soient bien exposés.

Les prix sont donnés toutes taxes comprises, sans compter la main-d'œuvre et à titre indicatif. Ce sont généralement les plus bas que nous avons trouvés dans la région marseillaise au début de l'été 1975.

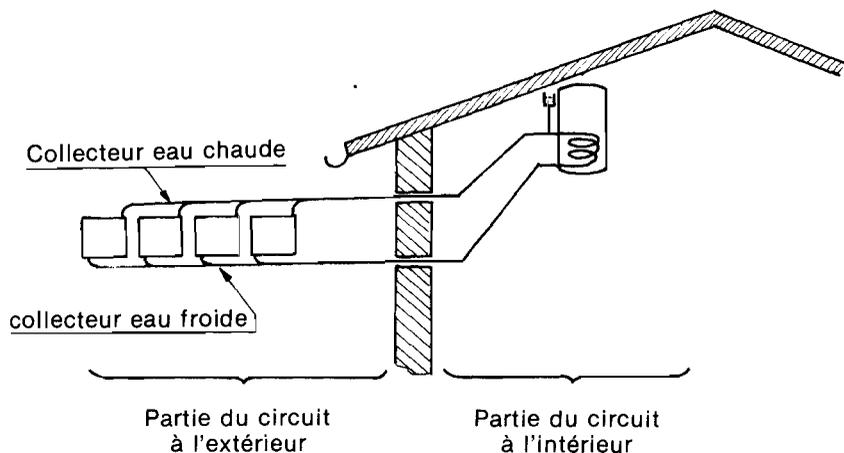
Certains d'entre eux sont délicats à apprécier, et le coût global pourra varier d'une installation à l'autre.

Ils sont aussi bien sûr variables selon les marques et les marchands de matériaux auxquels on s'adresse.

Ils ne tiennent pas compte des chutes de matériaux ni du gâchis inévitables pour le novice.

Remarquons enfin qu'en plomberie les fluctuations de prix sont parfois importantes.

Et puis, essayez toujours de grouper vos commandes, vous pourrez obtenir d'importantes réductions.



RÉDUCTION POSSIBLE DU COUT

| | Quantité | Prix T.T.C. | |
|--|------------------|----------------------|--------|
| | | Mini | Maxi |
| . Radiateurs fabriqués tôle plane de 6/10ème soudée, recouverts de peinture foncée et mate 1) Tôle noire (circuit avec échangeur) 2) Tôle galvanisée (circuit sans échangeur) | 8 m ² | 150,00 | 200,00 |
| . Isolation du fond et des côtés : idem | 6 m ² | 80,00 | |
| . Couverture : verre martelé blanc, épaisseur 5 mm (même remarque que ci-contre) + joint de caoutchouc de récupération (à changer périodiquement fixé) par cornières | 4 m ² | 140,00 (ou moins) | |
| | 16 m | 40,00 | |
| . Coque : tôle noire plane de 10/10ème, peinte | 6 m ² | 150,00 | |
| . Chassis métallique : idem | 10 m | 50,00 | |
| . Robinet de vidange : idem | 1 | 10,00 | |
| . Divers | | 50,00 | |
| Total arrondi : | | 700,00 | |

2. Le réservoir

| | Quantité | Prix T.T.C. | |
|--|---------------------------|----------------------|----------------------|
| | | Mini | Maxi |
| a) Réservoir de 200 l avec échangeur , plastifié intérieurement + isolation : matelas de laine de roche cousu sur grillage galvanisé, avec revêtement plâtre, peinture, raccords | 1 2 m ² | | 700,00 100,00 |
| b) Réservoir de 200 l sans échangeur , galvanisé intérieurement + isolation : idem | 1 | 300,00 100,00 | |
| Total arrondi : | | 400,00 | 800,00 |

Pour une alimentation du réservoir par le réseau (pression), ajouter un **groupe de sécurité**

1

100,00

RÉDUCTION POSSIBLE DU COUT

| Quantité | Prix T.T.C. | |
|--|-------------|--------------------|
| | Mini | Maxi |
| a) Fût métallique de 200 l récupéré + échangeur (serpentin de cuivre) + isolation : idem | 1 | 200,00 100,00 |
| b) Fût métallique de 200 l récupéré + isolation : idem | 1 | 100,00 |
| Total arrondi : | | 100,00 300,00 |

Pour une alimentation du réservoir par le réseau (pression),
ajouter un **groupe de sécurité** 1 100,00

3. Le circuit : tuyauterie, y compris collecteurs

1^{er} cas : Thermosiphon

On a intérêt à placer le réservoir le plus près possible de l'insolateur.

Supposons :

. longueur de collecteurs 8 m

. reste du circuit :

en extérieur 2 m

en intérieur 3 m

| | Quantité | Prix T.T.C. | |
|---|----------|------------------|--------|
| | | Mini | Maxi |
| <p>a) Tuyauterie Pour une installation dont le réservoir est au-dessus de l'insolateur, et avec des trajets simples de tuyaux :</p> <ul style="list-style-type: none"> . tube acier noir 20 × 27 + raccords, soudure . tube cuivre 20 × 22 + raccords, soudure (peu de raccords indispensables) <p>Pour les installations demandant de plus gros diamètres, le prix augmente très vite ; par exemple : le tube acier noir en 33 × 42, coûte plus de 30 F le mètre</p> | 13 m | 150,00 | |
| <p>b) Isolation des tuyaux en extérieur</p> <ul style="list-style-type: none"> . Laine de verre nue en coquille, épaisseur de la coquille 25 mm diamètre intérieur de la coquille 21 mm . Isolant flexible en mousse de polyuréthane, (prix variable selon les marques) épaisseur du manchon : 13 mm diamètre intérieur : 22 mm | 10 m | 50,00 | 100,00 |
| <p>c) Isolation des tuyaux en intérieur Laine de verre et « platralfa » (nu ou peint)</p> | 3 m | prix négligeable | |
| Total arrondi : | | 200,00 | 250,00 |

2^e cas : fonctionnement par circulateur

Supposons que le réservoir est
situé un étage au-dessous de
l'insolateur :

. longueur de collecteurs 8 m
. reste du circuit :
 en extérieur 2 m
 en intérieur 6 m

| | Quantité | Prix T.T.C. | |
|--|----------|------------------|--------|
| | | Mini | Maxi |
| a) Tuyauterie . tube acier noir 12 × 17 + raccords, soudure . tube cuivre 12 × 14 + raccords, soudure (peu de raccords indispensables) | 16 m | 100,00 | 150,00 |
| b) Isolation des tuyaux en exté- rieur . La laine de verre en coquille n'existe pas dans ces dimensions (diamètre intérieur minimum : 17 mm) . Isolant flexible en mousse de polyuréthane épaisseur du manchon : 13 mm diamètre intérieur : 14 mm | 10 m | 80,00 | |
| c) Isolation des tuyaux en inté- rieur Laine de verre et « platralfa » | 6 m | prix négligeable | |
| Total arrondi : | | 200,00 | 250,00 |

4. Le circuit : accessoires

| 1 ^{er} cas : Thermosiphon | Quantité | Prix T.T.C. |
|--|----------|-------------|
| a) Vase d'expansion sous pression d'azote 4 litres | 1 | 50,00 |
| + soupape automatique de sécurité diamètre 12 - 17 | 1 | 30,00 |
| b) Purgeur automatique diamètre 12 - 17 | 1 | 30,00 |
| c) Clapet non-retour à battant vertical diamètre 20 - 27 (seulement pour les installations défavorables) | 1 | 20,00 |
| Total arrondi : | | 150,00 |

| 2 ^{ème} cas : Fonctionnement par circulateur | Quantité | Prix T.T.C. | |
|--|----------|-------------|---------------------|
| | | Mini | Maxi |
| a) Vase d'expansion sous pression d'azote 4 litres | 1 | 50,00 | |
| + soupape automatique de sécurité diamètre 12 - 17 | 1 | 30,00 | |
| b) Purgeur automatique diamètre 12 - 17 | 1 | 30,00 | |
| c) Clapet non-retour à battant vertical diamètre 15 - 21 | 1 | 15,00 | |
| d) Circulateur métallique | 1 | 200,00 | 300,00 (ou plus) |
| e) Commande du circulateur : 2 aquastats avec doigts de gant + cablage | 2 | 150,00 | |
| Total arrondi : | | 500,00 | 600,00 |

RÉDUCTION POSSIBLE DU COUT

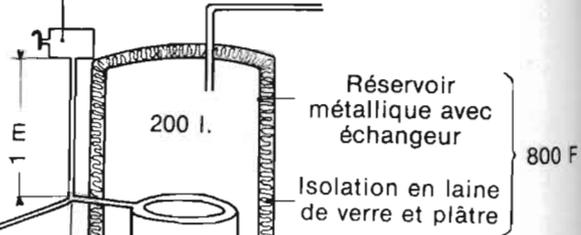
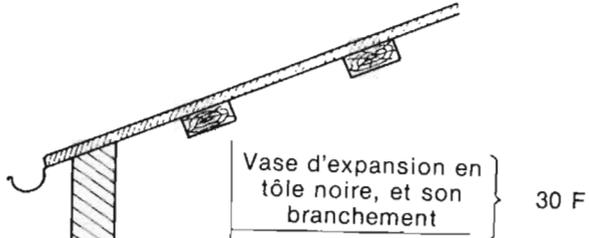
| 1^{er} cas : Thermosiphon | Quantité | Prix T.T.C. |
|---|----------|------------------|
| a) Vase d'expansion ouvert avec tuyauteries | 1 | 30,00 |
| b) Purgeur manuel | 1 | prix négligeable |
| c) Clapet non-retour : idem | 1 | 20,00 |
| Total arrondi : | | 50,00 |

| 2^{ème} cas : Fonctionnement par circulateur | Quantité | Prix T.T.C. | |
|--|----------|------------------|---------------------|
| | | Mini | Maxi |
| a) Vase d'expansion ouvert (seulement pour un circuit avec échangeur) avec tuyauteries | 1 | 30,00 | |
| b) Purgeur manuel | 1 | prix négligeable | |
| c) Clapet non-retour : idem | 1 | 15,00 | |
| d) Circulateur : idem | 1 | 200,00 | 300,00 (ou plus) |
| e) Commande du circulateur : idem | | 150,00 | |
| Total arrondi : | | 400,00 | 500,00 |

5. Exemples

Insolateur 4 m²

- . Radiateur extra plat du commerce
 - . Panneaux de laine de verre rigide 75 mm
 - . Verre blanc 4 mm
 - . Mastic siliconé
 - . Coque fibre de verre
 - . Chassis cornière
- } 1 400 F



Robinet de vidange

Tube cuivre 20 x 22 longueur 12 m, et isolation de type Armaflex. } 250 F

| | |
|--|----------------|
| Insolateurs | 1 400 F |
| Réservoir | 800 F |
| Tuyauterie, vase et robinet de vidange | 300 F |
| Divers | 100 F |
| TOTAL : | 2 600 F |

La même installation avec un circulateur et deux aquastats reviendrait environ à 3 100 F

Pour une alimentation par le réseau, ajout d'un groupe de sécurité + 100 F

UN BON CHAUFFE-EAU SIMPLE

THERMOSIPHON

Pour amateur peu outillé

Insolateur 4 m²

Radiateur fabriqué en tôle noire
 Panneaux rigides de laine de verre 75 mm
 Verre blanc 4 mm
 Mastic siliconé
 Coque tôle noire
 Chassis cornières

800 F

Vase d'expansion tôle noire et son branchement (sert de purgeur)

30 F

2 m environ

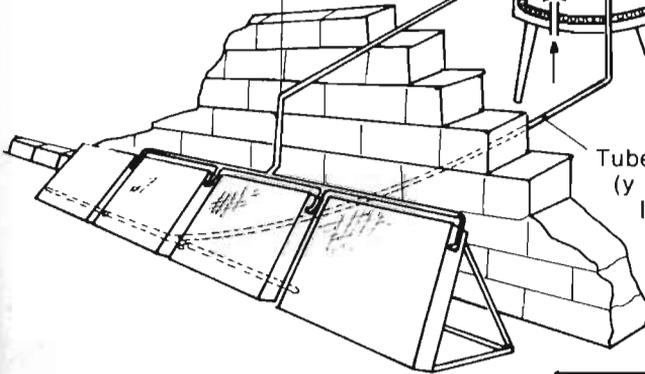
200 l.

Fût métallique récupéré
 Isolation en laine de verre et plâtre
 Echangeur tôle
 Trépied

200 F

Tube acier 20 x 27 : 12 m (y compris le collecteur Isolation extérieure Type Armaflex)

250 F



| | |
|--|----------------|
| Insolateur | 800 F |
| Réservoir | 200 F |
| Tuyauterie et vase d'expansion. Robinet de vidange | 300 F |
| Divers | 100 F |
| TOTAL : | 1 400 F |

pour la même installation avec circulateur et deux vannes à trois positions (avant, arrière, arrêt) revient à environ 1 900 F T.T.C. (Avec robinet non-retour)

pour une alimentation par le réseau ; ajouter le robinet de sécurité100 F

pour ajouter une petite résistance et un thermostat dans le haut du ballon revient

à plus à..... 100 F

UN BON CHAUFFE-EAU SIMPLE
THERMOSIPHON
Pour amateur averti et bien outillé

6. Conclusions sur les prix (valeurs été 1975)

Ainsi, selon les choix qu'on aura faits pour les différents éléments du circuit, le prix d'un chauffe-eau de 200 litres couplé à un insolateur de 4 m² pourra varier de 1 300 à 3 500 F TTC* sans compter la main-d'œuvre :

- pour 1 300 F, si l'on dispose de temps, d'un «savoir-faire» plus proche de celui du professionnel que de celui de l'amateur et d'outillage, on aura un chauffe-eau qui marchera bien, à condition que la mise au point ait été soigneusement faite;
- pour 2 500 à 3 000 F, on pourra faire un chauffe-eau satisfaisant;
- au-delà, ce ne sont plus que de légères améliorations sur la facilité de mise en œuvre.

Le coût supplémentaire dû à l'utilisation d'une énergie d'appoint sera d'un peu plus de 100 F pour l'ajout d'une résistance électrique et d'un aquastat dans le réservoir; il sera fonction de chaque installation dans les autres cas.

7. Amortissement d'un chauffe-eau solaire

(de 200 litres avec 4 m² d'insolateur)

Dans les installations simples, le surcoût d'installation dû à l'utilisation de l'énergie solaire revient au prix de l'insolateur et du circuit primaire.

C'est ce prix, qui varie en gros de 1 000 F à 2 000 F TTC, qu'il convient de considérer pour calculer l'amortissement de l'installation solaire.

Si l'on part d'un **besoin** journalier de 200 litres d'eau chaude à 60°C, en supposant l'eau froide à 10°C, cela revient à une consommation de :

4 200 kWh par an.

Or le captage **solaire** d'une installation ayant **4 m² d'insolateur** et un rendement de 45 % fournira en moyenne sur l'année 120 litres d'eau à 60°C par jour, soit :

2 500 kWh par an.

Cette énergie (2 500 kWh par an) est l'énergie disponible au robinet d'eau chaude. Pour la déterminer, nous avons tenu compte du «rendement» de l'installation de captage et de stockage solaires.

Pour connaître l'énergie correspondante qu'il aurait fallu dépenser avec une autre source d'énergie, il faut également faire intervenir le rendement moyen de chaque type d'appareil :

chauffe-eau gaz instantané 75 % toute l'année

*Le même chauffe-eau solaire de 200 litres couplé à un insolateur de 2 m², ainsi qu'il est souvent proposé dans le commerce, reviendrait dans ces conditions de 1 000 à 2 600 F TTC.

chauffage central (fuel, gaz) 70 % en hiver
 30 % en été
 cumulus électrique 70 % toute l'année.

C'est ainsi que pour produire 100 kWh utiles au robinet, un réservoir électrique consommera en moyenne :

$$\frac{100}{0,7} = 143 \text{ kWh.}$$

A ce sujet, notons que, contrairement à une idée couramment admise, le rendement d'un cumulus électrique n'est pas de 100 %. Il y a à cela 3 raisons principales :

a) L'isolation des chauffe-eau électriques est fixée par une norme qui limite les pertes thermiques à 5 % de la puissance des résistances électriques, soit 75 W pour un réservoir de 200 litres, avec une température d'eau de 60°C. Ces pertes sont permanentes et représentent en une année de fonctionnement 600 kWh environ que devront fournir les résistances électriques du réservoir aux frais de l'utilisateur.

b) Au rendement du réservoir s'ajoute le rendement de la distribution, qui correspond au refroidissement de l'eau chaude qui reste dans les tuyaux après usage.

c) On constate souvent que les thermostats des réservoirs électriques sont réglés pour des températures nettement supérieures à 60°C (vers 80°C). C'est une façon d'augmenter la capacité d'eau chaude disponible, mais aussi d'accroître les pertes thermiques du réservoir. Cette cause n'a toutefois pas été retenue dans les calculs ci-dessous.

Voyons donc ce que serait l'économie réalisée par rapport à un chauffage électrique (rendement de cumulus 70 %) :

1^{er} cas, tarif heures creuses

- Consommation tout électrique :

$\frac{4\ 200}{0,7}$ kWh à 0,1030 F 623 F TTC

- Consommation électrique d'un chauffe-eau «électrosolaire» :

$\frac{4\ 200 - 2\ 500}{0,7}$ kWh à 0,1039 F 252 F TTC

- Économie réalisée la première année :

623 - 252 = 371 F TTC

2^e cas, tarif heures pleines

- Consommation tout électrique :

1^{re} tranche (moyenne) : $\frac{500}{0,7}$ kWh à 0,63 F 450 F TTC

2^e tranche : $\frac{4\ 200 - 500}{0,7}$ kWh à 0,20 F 1 057 F TTC

Total 1 507 F TTC

- Consommation électrique d'un chauffe-eau «électrosolaire» :

$$\frac{500}{0,7} \text{ kWh à } 0,63 \text{ F} + \frac{4 \cdot 200 - 500}{0,7} \text{ kWh à } 0,20 \text{ F} = 793 \text{ F TTC}$$

- Économie réalisée la première année* : $1\,507 - 793 = 714 \text{ F TTC}$.

On voit donc qu'il faut plusieurs années pour amortir cet investissement; ensuite ce sera tout bénéfice, car l'installation demandera peu d'entretien.

En réalité, l'utilisation de l'énergie d'appoint sera généralement inférieure à celle décrite ci-avant, car :

- On ne consomme pas tous les jours la quantité maximum de 200 litres, et les journées sans aucun apport solaire sont relativement rares. En conséquence, c'est assez fréquemment qu'on ne consommera pas plus que l'apport solaire.

- Dans le cas d'un appoint à l'électricité ou au gaz, il faut tenir compte du prix des abonnements et le coût réel du kWh est toujours supérieur au chiffre utilisé pour les calculs ci-dessus; la différence est parfois importante.

Ce sont ces considérations qui nous ont fait escompter, au début de cette étude, une économie annuelle des trois quarts de l'énergie avec un insulateur de 4 m².

L'économie sera plus importante si l'on accepte le temps qu'il faut... par exemple, en se contentant en hiver d'eau à 45°C, ou en admettant d'avoir moins d'eau chaude les jours non ensoleillés d'été et de demi-saison, bref en vivant avec le soleil!

* Les années suivantes, les économies réalisées augmentent avec l'augmentation du coût de la vie, du prix de l'énergie.



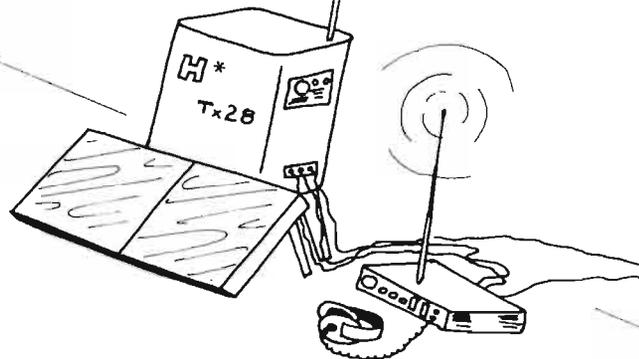
HELIOZINZIN

* Le premier
Chauffe-eau solaire
inventé par ORDINATEUR

* 103 % de Rendement !
(dans certaines conditions)

* La PRESSE unanime !

EAU CHAUDE
GRATUITE ET A
VOLONTE !



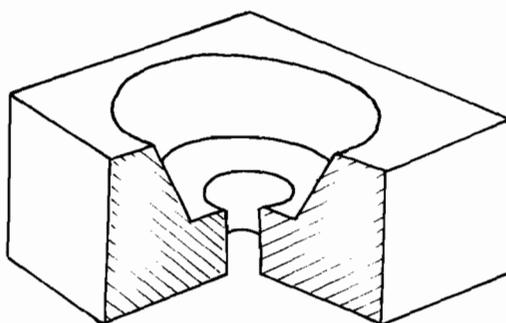
* LE CHAUFFE-EAU
de
I'AN 2000 !

(8249 F H.T.)

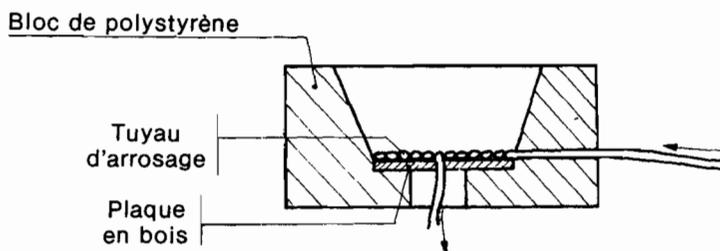
Annexe 1

Un insolateur simple

On trouve sur les chantiers des blocs de polystyrène expansé de cette forme :



On peut réaliser un insolateur simple en enroulant sur le fond du tuyau d'arrosage en spirale.



On place ensuite sur le dessus du bloc un film plastique que l'on agrafe ou que l'on colle sur les côtés.

Avantages

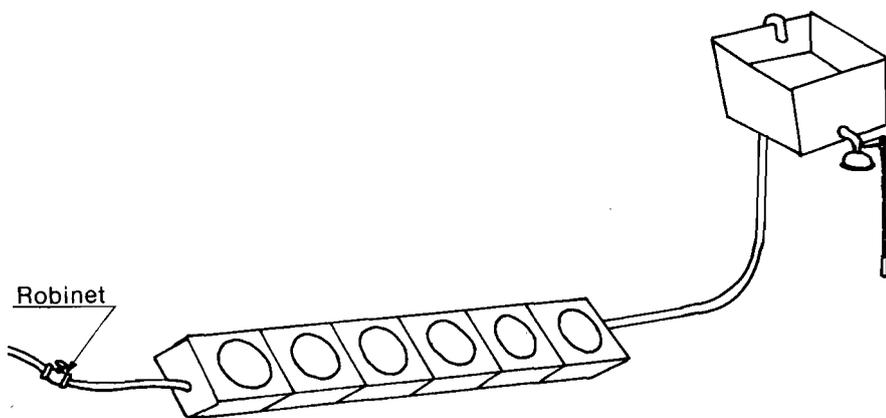
- Facilité et rapidité de fabrication.
- Coût extrêmement faible.

Inconvénients

- Faible surface de captation ($1/8$ de m^2).
- Le vent emporte ces blocs s'ils ne sont pas très bien amarrés et déchire le film plastique assez souvent.
- Durée de vie **très** courte (vieillessement des plastiques), 4 à 5 mois.

Utilisation

Les jours où il fait beau, on ouvre le robinet. L'eau chaude est stockée dans une caisse à eau.



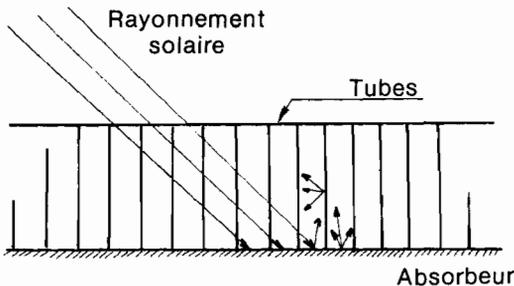
Annexe 2

Cellules anti-rayonnantes surfaces sélectives

Bien que ces dispositifs «anti-pertes» ne présentent d'intérêt que pour des températures de l'ordre de 100 à 200°C (tout comme une deuxième vitre n'est intéressante qu'à partir de 60°C), nombreux sont ceux qui cherchent à les utiliser. Ils méritent donc quelques explications.

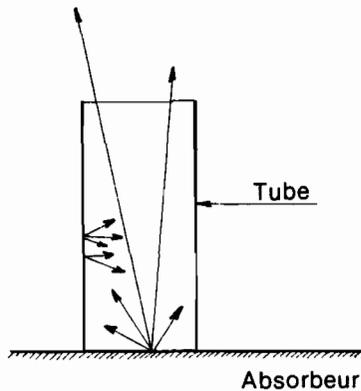
On a vu que la température des insolateurs est assez limitée. En effet, lorsqu'elle s'élève, les pertes augmentent et finissent par devenir égales à l'énergie incidente. C'est alors qu'on est à la température d'équilibre. Pour les insolateurs courants, elle se situe vers 100°C. A cet instant, le rendement est nul puisque le capteur ne produit rien.

Les **cellules anti-rayonnantes** ont pour but de diminuer les pertes thermiques de l'insolateur. On va recouvrir la surface absorbante à l'aide de tubes de verre placés perpendiculairement à cette surface (d'où l'expression «nid d'abeilles»).



Le rayonnement solaire traverse les tubes et va échauffer l'absorbeur. Celui-ci se met alors à émettre du rayonnement infra-rouge. Mais ce dernier est absorbé presque intégralement par les tubes en verre (sauf une petite partie vers le haut). Les tubes s'échauffent et rayonnent sur eux-mêmes. Le rayonnement ne peut donc plus s'échapper de l'ensemble «absorbeur-nid d'abeilles». Les cellules sont anti-rayonnantes.

Elles ne sont en fait qu'une amélioration de l'effet de serre.



De plus, elles immobilisent l'air au-dessus de la surface à chauffer. Or, l'**air immobile** est un des meilleurs isolants connus. Les cellules anti-rayonnantes sont donc aussi **anti-convectives** : on dit plus généralement cellules anti-pertes.

L'effet anti-pertes varie avec les dimensions des tubes. Ceux-ci doivent avoir un diamètre de 1 cm et une hauteur d'environ 7 cm. Ils doivent en outre avoir les parois les plus fines possibles, car la chaleur ne doit pas sortir par conduction dans la matière qui constitue les tubes.

Des essais avec des nids d'abeilles en plastique ont permis d'atteindre des températures de 200 à 300°C. Mais les cellules vieillissent très mal, jaunissent et deviennent inutilisables.

Si on veut en faire avec des tubes de 1 cm de diamètre et 7 cm de haut, il faut 700 mètres de tube pour un mètre carré...

Une autre façon de diminuer les pertes par rayonnement de l'absorbeur est d'utiliser les «**surfaces sélectives**».

Cela consiste à avoir le meilleur coefficient d'absorption pour le rayonnement solaire (de 0,25 à 2,5 microns) et le plus petit coefficient d'émission dans l'infrarouge (au-delà de 2,5 microns).

On obtient cet effet en déposant sur l'absorbeur des couches minces de produits chimiques (oxydes ou sulfures en général) de quelques microns d'épaisseur. Cette technique est du domaine de l'industrie ou du laboratoire et, de toute façon, inemployable par le bricoleur.

Annexe 3

Les vitrages plans

Quelques caractéristiques

On trouve deux grandes catégories de verre couramment utilisées :

- le verre recuit, c'est la qualité ordinaire;
- le verre trempé, ou verre de sécurité («Securit»); il est plus résistant, mais aussi plus cher.

Poids du verre : 2,5 kg par mètre carré et millimètre d'épaisseur.

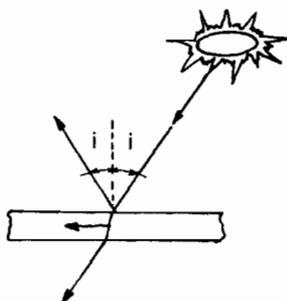
1 m² de verre de 4 mm pèsera donc 10 kg.

Coefficients énergétiques solaires du verre courant :

| | <i>Verre à vitre</i> | |
|---|-----------------------|-----------------------|
| | <i>épaisseur 3 mm</i> | <i>épaisseur 5 mm</i> |
| Coefficient de transmission T | 0,87 | 0,84 |
| Coefficient de réflexion (incidence inférieure à 40°) R | 0,07 | 0,07 |
| Coefficient d'absorption a | 0,06 | 0,09 |

Remarque

Le coefficient de réflexion varie avec l'angle d'incidence i :



$R = 0,07$ pour i variant de 0 à 40°

$R = 0,25$ pour $i = 70^\circ$

$R = 1$ pour $i = 90^\circ$ (incidence rasante).

Dilatation du verre sous l'action de la chaleur : pour des températures courantes (jusqu'à 220°C), un échauffement de 100°C fera dilater 1 mètre de verre de 1 millimètre environ.

Dimensions d'utilisation des vitrages plans

L'épaisseur à choisir pour le vitrage est déterminée en fonction :

1. de ses dimensions;
2. de la région d'utilisation (vents plus ou moins violents);



CARTE DES VENTS

- Région I : faible
- ▨ Région II : moyen
- Région III : fort

3. du site d'implantation (plus ou moins abrité des vents) :

- protégé : abrité de tous les côtés, fond de cuvette)
 - normal : plaine ou plateau de grande étendue avec dénivellations peu importantes
 - exposé : au voisinage de la mer (sur 6 km), au bord d'une falaise, ou dans des vallées étroites, cols, montagnes isolées;
4. de la hauteur du vitrage au-dessus du sol (plus il est haut, plus le vent souffle fort); on distingue les bâtiments :
- de 0 à 5 étages,
 - de 6 à 10 étages,
 - de 11 à 15 étages,
 - de plus de 15 étages.

Les normes actuellement retenues dans le bâtiment permettent de calculer pour chaque site d'implantation (protégé, normal ou exposé) et au sein de chaque région (voir la carte des vents) l'épaisseur à choisir pour un vitrage en fonction de ses dimensions.

Le tableau ci-dessous donne quelques valeurs pour du verre de 4 mm d'épaisseur dans le cas de bâtiments de moins de 6 étages. Pour ce verre la largeur théorique maximum est de 92 cm. Nous donnerons les valeurs maximum de la longueur d'un vitrage ayant cette valeur maximum pour sa largeur. Un vitrage qui serait moins large pourrait être plus long.

| <i>R é g i o n</i> | <i>Site</i> | <i>Épaisseur</i> (mm) | <i>Largeur l</i> <i>choisie</i> (m) | <i>Longueur L</i> <i>maximum</i> (m) |
|---|-----------------------------|--------------------------|---|--|
| B.-du-Rhône (région III) | - Bord de mer | 4 mm | 0,92 m | 0,97 m |
| | - Plateau éloigné de la mer | « | « | 1,20 m |
| | - Fond de cuvette | « | « | 1,50 m |
| Alpes-de-Haute-Provence (région III) | - Col | « | « | 1,19 m |
| | - Plaine étendue | « | « | 1,56 m |
| | Fond de cuvette | « | « | 1,95 m |

Si l'on voulait des dimensions supérieures pour la largeur et pour la longueur, il faudrait prendre du verre plus épais.

En réalité, ces chiffres sont calculés avec un fort coefficient de sécurité, car on ne peut prendre le risque, dans le bâtiment, de voir une vitre se casser sous l'action du vent. Pratiquement, si l'on prend des dimensions un peu supérieures, il y aura encore bien peu de risque de casse.

C'est pourquoi, pour un capteur dont la surface est de l'ordre de 1 m², le verre de 4 mm conviendra toujours.

Remarquons aussi que dans les Bouches-du-Rhône les vents dominants viennent du nord et de l'est; le capteur étant exposé au sud sera beaucoup moins sensible à leur action.

Signalons enfin que les insolateurs étant inclinés à plus de 40°C il n'y aura pas à craindre de surcharges excessives dues à la neige.

Annexe 4

Isolation thermique

Nous avons à réduire le mieux possible les pertes de chaleur de l'isolateur, des tuyauteries et du réservoir en les protégeant par des matériaux mauvais conducteurs de la chaleur.

La conductivité thermique d'un matériau est exprimée par son « coefficient de conductivité » λ ; il représente la facilité avec laquelle la chaleur traverse ce matériau.

Plus λ est petit, plus le matériau est isolant.

λ est exprimé en :

- W/m.°C : watt par mètre et par degré (système international);
- kcal/h.m.°C : kilocalorie par heure, par mètre et par degré (système des thermiciens).

A titre indicatif, voici quelques valeurs approximatives de λ mesurées à la température ambiante (20°C) :

| | | |
|------------------------|------|--------|
| Cuivre | 390 | W/m.°C |
| Fer | 60 | |
| Béton | 1,5 | |
| Verre | 1,15 | |
| Bois courant | 0,04 | |

λ augmente quand la température croît ; mais ses variations sont faibles dans le domaine de température qui nous intéresse.

Pour choisir un matériau isolant, nous aurons en outre à considérer :

- sa masse volumique (il est souvent intéressant d'avoir des matériaux légers);
- sa température maximum d'utilisation en régime permanent;
- son comportement en atmosphère humide;
- sa résistance au feu, aux rongeurs, à la putréfaction;
- sa stabilité chimique;
- son prix.

Comparaison de quelques pour des qualités

| | Masse Volumique (kg/m ³) | Conductivité thermique λ | | Température maximum d'utilisation | |
|--|--------------------------------------|----------------------------------|---------------|--|--|
| | | (W/m.°C) | (kcal/h.m.°C) | | |
| Laine de verre | 20 à 70 | 0,041 | 0,035 | Supérieur à 150°C | |
| Laine de roche | 80 à 150 | 0,041 | 0,035 | Supérieur à 150°C | |
| Polystyrène expansé obtenu par moulage | 15 à 25 | 0,042 à 0,039 | 0,036 à 0,034 | 85°C | |
| Polystyrène expansé thermocomprimé | 18 à 30 | 0,038 à 0,036 | 0,033 à 0,031 | 85°C | |
| Mousse de polyuréthane | 30 à 35 | 0,029 | 0,025 | généralement un peu supérieure à 100°C | |
| Mousse de polyuréthane en bombe | 25 | 0,027 | 0,023 | 100°C ou plus | |
| Liège expansé pur | 210 | 0,043 | 0,037 | Supérieure à 100°C | |

matériaux d'isolation

d'utilisation courante

| RESISTANCE | | | | PRESENTATIONS COURANTES |
|--|---|----------|---------------------------------|--|
| humidité | feu | rongeurs | chimique | |
| x néces- site pare- vapeur | xxx | xxx | xxx | <ul style="list-style-type: none"> - Feutre souple - Panneaux rigides plans (meilleure résistance à l'humidité) - Coquilles cylindriques pour tuyauteries - Matelas de feutre cousu sur carton ou grillage - bourrelets Remarque : les feutres, panneaux et coquilles peuvent être nus ou collés sur un pare-vapeur (kraft bitumé, aluminisé...). |
| | xxx Bon xx Moyen x Médiocre | | | |
| x néces- site pare- vapeur | xxx | xxx | xxx | Voir laine de verre (sauf bourrelets) Remarques : 1/ Résiste mieux à l'écrasement que la laine de verre 2/ La laine de roche est généralement utilisée pour des températures plus élevées |
| x néces- site pare- vapeur | x | x | x solvants agres- sifs | <ul style="list-style-type: none"> - Panneaux rigides - Coquilles pour canalisations - Segments pour réservoirs - Perles et copeaux |
| xxx | x | x | x solvants agres- sifs | Voir polystyrène obtenu par moulage Remarque : bonne résistance à l'écrasement. |
| xxx | x mais ne propage pas la flamme | xxx | xx | <ul style="list-style-type: none"> - Panneaux rigides - Plaques souples - Manchons souples pour tuyauteries Remarque : certaines qualités sont variables selon les marques. |
| xxx | x mais ne propage pas la flamme | xxx | xx | Une bombe de 1 kg donne un volume de 40 litres Remarque : n'adhère pas sur les silicones, le téflon, le polyéthylène. |
| xxx | x | xx | xx | |

Comparaison des prix de quelques isolants

| | Isolant | Epaisseur mm | Prix approximatif T.T.C. |
|---|--|-----------------|--------------------------------|
| INSOLATEUR | . Feutre en laine de verre avec pare-vapeur (1) | 70 | 9,00/m ² |
| | . Panneau rigide de laine de verre avec pare-vapeur (2) | 70 | 12,00 |
| | . Panneau rigide de mousse de polyuréthane | 50 | 40,00 à 45,00 |
| | . Mousse de polyuréthane en bombe | 45 | 110,00 |
| RESERVOIR | . Matelas de laine de verre collé sur kraft bitumé | 80 | 29,00/m ² |
| | . Matelas de laine de roche cousu sur grillage galvanisé | 80 | 32,00 |
| | . Mousse de polyuréthane en bombe | 50 | 120,00 |
| TUYAUTERIES de diamètres extérieur 20 ou 21 mm | . Coquille de laine de verre nue | 25 | 5,00/m |
| | . Bourrelet de laine de verre | 30 | 4,00 |
| | . Manchon souple de mousse de polyuréthane | 13 | 10,00 |

(1) Cette solution est médiocre : pour cette épaisseur la laine de verre étant inclinée se tassera.

(2) Inutile de prendre des panneaux à forte densité.

Annexe 5

Les tuyaux

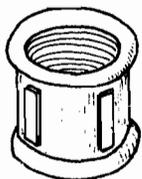
description, outillage et normes

1. Le tube acier soudé par rapprochement

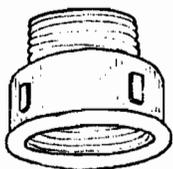
Il existe en deux présentations : à bout fileté ou à bout lisse.

La jonction de deux tubes se fait par :

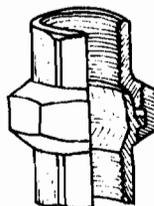
- soudure autogène (oxy-acétylénique ou électrique);
- soudo-brasure (principalement pour les pièces galvanisées);
- raccords à visser ou à souder. Par exemple :



Manchon



Réducteurs

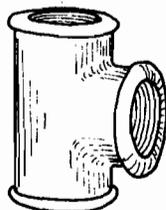
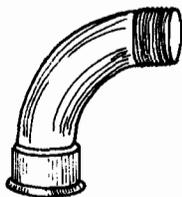


Raccord «Union»
(A n'utiliser qu'en cas
de nécessité)

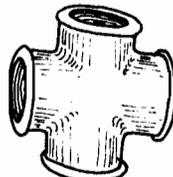
Les changements de direction et les jonctions de plus de deux tubes se font à l'aide de coudes, té, croix, distributeurs. Par exemple :



Coudes



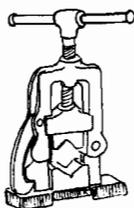
Té



Croix

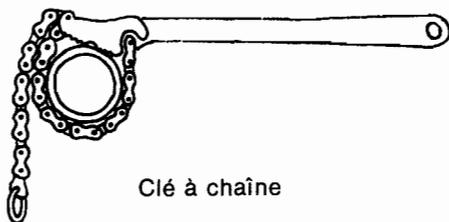
Outillage spécial minimum pour travailler le tube acier

- 1 étau presse tube;

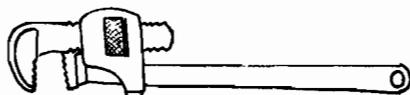


Etau presse-tube

- 2 grosses clés à chaîne ou à griffe;



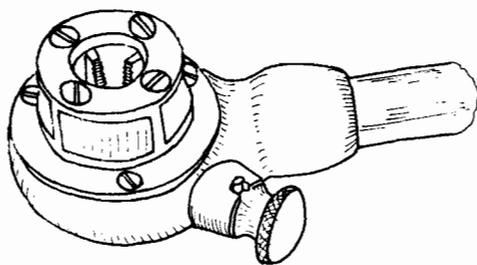
Clé à chaîne



Clé à griffe

- 1 scie à métaux et une lime demi-ronde batarde pour supprimer les bavures. Il n'est pas indispensable d'avoir un coupe-tube fer et un alé-soir.

- 1 filière avec deux têtes par diamètre de tube (pour filetage droite et gauche). Cela permet de faire tous les raccords si l'on n'utilise que des raccords à visser et non à souder.



Filière à têtes interchangeables

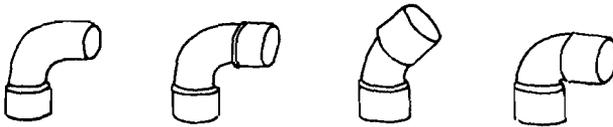
- 1 poste à soudure autogène; il n'est pas indispensable, mais permet d'économiser la plupart des raccords;
- de la filasse;
- du gébajoint ou du téflon.

2. Le tube acier sans soudure

Il est généralement utilisé pour des circuits ayant à supporter de fortes pressions. Bien qu'intéressant, car son intérieur lisse donne peu de prise à l'entartrage, nous ne les retiendrons pas : il est beaucoup plus cher.

3. Le tube cuivre

a) Le **cuivre écroui** est fourni en tube rigides, appelés «barres», de 2 à 6 m de longueur. Il permet des installations nettes, car bien rectilignes, mais il est difficile à couder et chaque changement de direction se fait à l'aide de coudes à souder. Par exemple :



b) Le **cuivre recuit** est fourni en tubes enroulés, appelés «couronnes», de longueurs variables (le plus souvent 20 m). Il est mieux à la portée du novice car facilement déformable. Il faut néanmoins faire attention à faire des coudes bien réguliers sans écraser le tube (utiliser une cintreuse, ce n'est pas très cher).

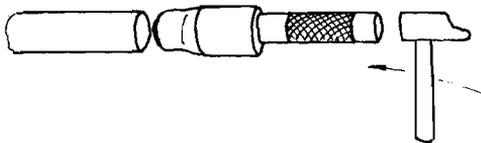
Les prix du cuivre écroui et du cuivre recuit sont en général très voisins.

Dans les deux cas, les raccordements de tubes de mêmes sections peuvent se faire :

- avec des raccords à souder :



- sans raccord, en utilisant un appareil à emboîture :

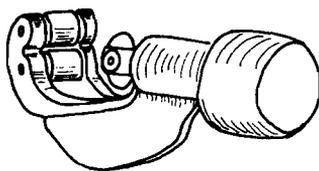


Les dérivations sont faites à l'aide de pièces à souder :

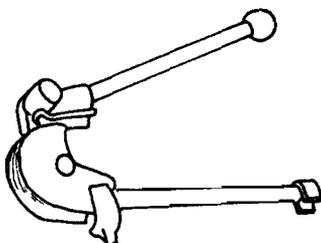


Outillage spécial minimum pour travailler le cuivre

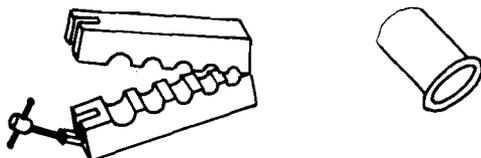
- 1 coupe-tube cuivre, non indispensable (une lame de scie à métaux suffit), mais bien pratique ;



- des pinces à cintrer : une par diamètre de tube ; non indispensable, mais s'amortit vite car économise l'achat des coudes :



- 1 matrice (ou «tombe-collets»), pour faire les «bords tombés» :



- des appareils à emboîtures : un par diamètre de tube ; non indispensable, mais économise l'achat des raccords droits :



Appareil à emboiture à frapper



Ailette à évaser
(à monter sur perceuse)

- **soudure** à l'étain, brasure :
 - a) camping-gaz : permet la soudure à l'étain ;
 - b) chalumeau à 1 800°C (pour camping-gaz ou bouteille butane, propane) : permet la soudure à l'étain et la brasure plus solide ;
- **toile émeri** ;
- **pâte décapante** pour soudure ;

Remarque

Si l'on achète tous les raccords, on peut se contenter d'une lame de scie et d'un appareil à souder.

4. Normes

Tube acier soudé par rapprochement (noir ou galvanisé)

Il correspond, dans les catalogues de tube acier, au tarif 1.

| Appellation | | Diamètres en mm | | Masse au m |
|-------------|-------|-----------------|-----------|------------|
| pouces | mm | extérieur | intérieur | en kg/m |
| 3/8 | 12/17 | 17,2 | 13,2 | 0,756 |
| 1/2 | 15/21 | 21,3 | 16,6 | 1,090 |
| 3/4 | 20/27 | 26,9 | 22,2 | 1,41 |
| 1 | 26/34 | 33,7 | 27,9 | 2,22 |
| 1 1/4 | 33/42 | 42,4 | 36,6 | 2,85 |
| 1 1/2 | 40/49 | 48,3 | 42,5 | 3,29 |
| 2 | 50/60 | 60,3 | 53,8 | 4,58 |

Tube cuivre (écroui ou recuit)

| <i>Appellation : diamètre extérieur en mm</i> | <i>Épaisseur en mm</i> | <i>Masse au mètre en kg/m</i> |
|---|----------------------------|-----------------------------------|
| 12* | 1 | 0,308 |
| 14 | 1 | 0,363 |
| 16* | 1 | 0,419 |
| 18 | 1 | 0,475 |
| 20* | 1 | 0,531 |
| 22 | 1 | 0,587 |
| 25* | 1 | 0,671 |
| 28 | 1 | 0,755 |
| 30 | 1 | 0,811 |
| 32* | 1 | 0,867 |
| 36 | 1 | 0,979 |
| 38 | 1 | 1,035 |
| 40* | 1 | 1,090 |

* Série principale.

Annexe 6

Calcul du volume d'un vase d'expansion

| <i>Température (degrés Celsius)</i> | <i>Volume de l'eau par unité de masse (litres par kg)</i> |
|---|---|
| 4 | 1,000 |
| 10 | 1,0002 |
| 20 | 1,0016 |
| 30 | 1,0042 |
| 40 | 1,0078 |
| 50 | 1,0121 |
| 60 | 1,0172 |
| 70 | 1,0229 |
| 80 | 1,0293 |
| 90 | 1,0362 |
| 100 | 1,0438 |

Exemple 1

Installation avec ballon de 200 litres sans échangeur.

Supposons que l'installation comprenne 40 litres d'eau (capteurs + tuyauteries).

On aura donc un volume total de 240 litres.

Or, volume massique de l'eau à 4°C = 1,0000;

volume massique de l'eau à 90°C = 1,0362.

La dilatation totale de l'eau sera :

$$(1,0362 - 1,0000) 240 = 8,7 \text{ litres.}$$

Exemple 2

Installation avec échangeur.

Supposons que l'ensemble du circuit primaire contienne 40 litres (capteurs + tuyauteries + échangeur).

Ce volume étant faible, l'eau pourra monter plus haut en température.

Or, volume massique de l'eau à 4°C = 1,0000;

volume massique de l'eau à 100°C = 1,0438.

La dilatation de 40 litres d'eau passant de 4 à 100°C est :
 $(1,0348 - 1,0000) 40 = 1,8$ litre.

Remarque importante

En pratique il convient de multiplier ce chiffre par trois pour tenir compte des facteurs suivants :

- a) Lorsque le circuit est rempli d'antigel, comme ce dernier a un coefficient de dilatation supérieur à celui de l'eau, la dilatation est plus importante (variable selon les marques et le pourcentage d'antigel incorporé).
- b) Pendant les nuits d'hiver, les capteurs se trouvent à des températures qui peuvent descendre jusqu'à $- 20^{\circ}\text{C}$ dans la plupart des régions françaises. Inversement, une panne en été peut laisser les capteurs monter à 120°C . L'écart maximum est donc de 140°C et non de 96°C .
- c) En règle générale, les chauffagistes retiennent des volumes nettement supérieurs au volume théorique calculé : pour ne pas avoir à rajouter d'eau trop souvent dans les installations avec vase ouvert, et pour limiter les variations de pression dans les installations avec vase fermé.

Annexe 7

Estimation des dimensions de l'échangeur

La dimension de l'échangeur sera déterminée par sa surface en contact avec l'eau à chauffer; elle dépend :

- du volume d'eau à chauffer, c'est-à-dire du volume du réservoir;
- du temps qu'on veut mettre pour chauffer cette eau, c'est-à-dire de la quantité de rayonnement solaire captée, et donc en particulier de la surface d'insolateur;
- de la différence entre la température moyenne de l'eau dans l'échangeur et celle de l'eau dans le réservoir au niveau de l'échangeur.

Les deux derniers paramètres sont bien sûr variables dans le temps.

Nous ne donnerons pas ici de calcul précis; remarquons simplement que :

- **si l'échangeur est trop petit**, l'eau chaude venant du capteur circulera peu de temps dans l'échangeur et cédera peu de calories dans le réservoir; elle reviendra encore chaude vers le capteur et celui-ci travaillera avec un mauvais rendement;
- lorsque l'eau venant du capteur traverse l'échangeur, elle cède beaucoup de calories au début de l'échangeur; puis, se refroidissant dans son parcours, elle en cède de moins en moins au fur et à mesure de sa descente.

Ainsi, **si l'échangeur est trop grand**, elle finira par n'en céder presque plus à la fin, et cette dernière partie de l'échangeur sera inutile : c'est l'échangeur qui travaillera avec un mauvais rendement.

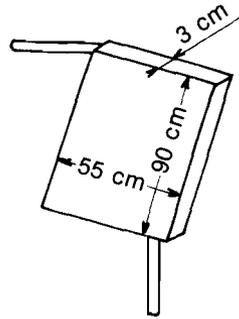
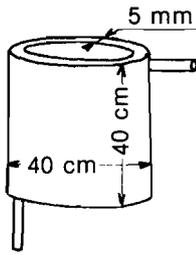
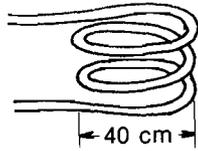
En pratique, on pourra prendre **0,2 à 0,3 m² de surface d'échange pour 1 m² d'insolateur** (0,2 m² s'il y a peu de risque d'entartrage à l'extérieur de l'échangeur).

Exemple

Pour un réservoir de 200 litres avec 4 m^2 d'insolateur, un échangeur de 1 m^2 aurait approximativement les dimensions suivantes :

- 23 m de tube de diamètre intérieur 14 mm (soit 18 spires de 40 cm de diamètre);
- ou 16 mm de tube de diamètre intérieur 20 mm (soit 13 spires de 40 cm de diamètre).

Remarquons que plus le tube est fin et meilleur sera l'échangeur.



La production de 1 000 kcal utiles revient donc actuellement à :

| | | Prix arrondis (F. TTC) |
|----------------------------------|---|---------------------------|
| Anthracite | $\left. \begin{array}{l} \frac{0,50 \times 1\,000}{7\,000 \times 0,65} \\ \frac{0,65 \times 1\,000}{9\,000 \times 0,65} \end{array} \right\}$ | 0,11 |
| Fuel | $\frac{0,55 \times 1\,000}{8\,800 \times 0,70}$ | 0,09 |
| Gaz naturel** | $\frac{0,0497}{0,75}$ | 0,07 |
| Gaz de ville* ** | $\frac{0,0857}{0,75}$ | 0,11 |
| Électricité** | | |
| - heures creuses | $\frac{0,1039 \times 1\,000}{860}$ | 0,12 |
| - heures pleines | | |
| 1 ^{re} tranche*** | $\frac{0,63 \times 1\,000}{860}$ | 0,73 |
| - heures pleines | | |
| 2 ^e tranche..... | $\frac{0,20 \times 1\,000}{860}$ | 0,23 |

* Tarif «binôme B1».

** Aux tarifs du gaz et de l'électricité, il convient d'ajouter le prix des abonnements.

*** La 1^{re} tranche varie de 360 à 600 kWh par an selon les différents types d'abonnements.

Liste sommaire d'ouvrages

Généralités sur l'énergie solaire

- Écologie* n° 3, octobre-novembre 1975, spécial «Énergie solaire», Éd. de la Surienne, 12 rue Neuve-du-Pâtis, 45200 Montargis (62 p.)
- Pierre Audibet, *Les Énergies du soleil*, coll. Points, série Sciences, Éd. du Seuil, 1978 (319 p.).
- Que choisir?*, numéro spécial Énergie (Michel Bosquet), Union fédérale des consommateurs (U.F.C.), 7 rue Léonce-Reynaud, 75781 Paris cédex 16 (66 p.).
- L'Énergie solaire : de la recherche appliquée aux utilisations pratiques - perspectives d'avenir*, coll. Actualités-Documents, diffusé par la Délégation aux énergies nouvelles, 13 rue de Bourgogne, 75700 Paris, oct. 1977 (62 p., gratuit).
- Énergies libres*, Centre de création industrielle, centre Georges-Pompidou, 1976 (contenu de l'exposition présentée à Paris au musée des Arts décoratifs de mai à septembre 1976 : photos, dessins, adresses, références; 46 p.).
- Jacques Percebois, *L'Énergie solaire : perspectives économiques*, Éd. du C.N.R.S., Paris, 1975 (205 p.).
- Charles Miligan et Ronald Nader, *Énergie pour la vie*, traduit de l'anglais, Éd. Chêne (128 p.).
- Amis de la Terre (commission Énergie), *Tout solaire*, Éd. J.-J. Pauvert, 1978 (100 p.).
- Marcel Barrabé, Jean-Luc Chevalier, Anne-Marie Péguin, Pierre Péguin, *Énergies nouvelles, énergies pour la vie*, Éd. Édisud, La Calade, 13090 Aix-en-Provence, 1980 (176 p.).

Énergie solaire et habitat

- Bricolo-Lézardeur, *La Face cachée du soleil*, diffusion Parallèle, 47 rue Saint-Honoré, 75001 Paris, 1974 (74 p.).
- Numéros spéciaux sur l'énergie solaire et l'architecture : suppléments au bulletin d'information inter-établissements de février 1976, mai 1976 (n° 15), mars 1977 (n° 22), juin 1977 (n° 25), respectivement 4 p., 8 p., 8 p., 8 p., Centre d'études et de recherches architecturales (ENSBA), 1 rue Jacques-Callot, 75006 Paris.
- Bruce Anderson et Michael Riordan, *The Solar Home Book : Heating, Cooling and Designing with the Sun*, Cheshire Books, Church Hill, Harrisville, NH 03450, USA, 1976 (298 p.).
- Bruno Russbach et Emile Svikovsky, *La Question solaire* (1^{re} partie), 1976 (8 rue Eynard, 1205 Genève).
- Patrick Bardou et Varoujan Arzoumanian, *Archi de terre*, Éd. Parenthèses, 13360 Roquevaire, 1978 (103 p.).
- Patrick Bardou et Varoujan Arzoumanian, *Archi de soleil*, Éd. Parenthèses, 13360 Roquevaire, 1978 (120 p.).
- David Wright, *Natural Solar Architecture*, Ed. VNR, New York, 1978 (256 p.). *Soleil, nature, architecture*, Éd. Parenthèses, 13360 Roquevaire, 1979, traduction française de Pierre Bazan.
- Jean-Louis Izard, *Archibio*, Éd. Parenthèses, 13360 Roquevaire, 1979 (135 p.).
- Michel Chateauminois, Daniel Mandineau, Daniel Roux, *Calcul d'installations solaires à eau*, Éd. Édisud, La Calade, 13090 Aix-en-Provence, 1980 (140 p.).

Énergie solaire « pratique »

- Dossiers de l'Institut de recherche Brace, P.O. Box 400, MacDonald Campus of MacGill University, Sainte-Anne-de-Bellevue, 800 Quebec, Canada.
- Thierry Cabirol, Daniel Roux, Albert Pelissou, *Le Chauffe-eau solaire*, Éd. Édisud, La Calade, 13090 Aix-en-Provence, 1976 (revu 1980, 159 p.).
- «Énergie solaire et alimentation», numéro hors-série de *Écologie*, Éd. de la Surienne, 12 rue Neuve-du-Pâtis, 45200 Montargis, 1976 (51 p.).
- Robert Chareyre, *La Maison autonome*, Éd. Librairies Alternative et Parallèle, 36 rue des Bourdonnais, 75001 Paris, 1978 (220 p.).
- Claude Micmacker, *Manuel de construction rurale et alternative 1*, Éd. de la Surienne, 12 rue Neuve-du-Pâtis, 45200 Montargis (107 p.).

Documentation scientifique - congrès

Cahiers de l'AFEDES. Association française pour l'étude et le développement des applications de l'énergie solaire, 28 rue de la Source, 75016 Paris. Dossiers scientifiques :

n° 1 : Le rayonnement solaire au sol et ses mesures.

n° 2 : Effets photovoltaïques et leurs applications.

n° 3 : Méthodes de concentration de l'énergie solaire.

n° 4 : Les capteurs sans concentration.

Revue internationale de la Solar Energy Society, revue périodique. On y trouve des études scientifiques et des comptes rendus d'expériences, surtout des États-Unis. En anglais. Pour les spécialistes. Pergamon Press, Maxwell House, Fairview Park, Elmsford, New York 10523 (U.S.A.).

Bulletins de la COMPLES, Coopération méditerranéenne pour l'énergie solaire, 32 cours Pierre-Puget, 13006 Marseille. — Recueil périodique de comptes rendus de colloques, de présentations d'études et d'expériences en provenance de laboratoires de tous pays (nombreuses communications en anglais).

Les Capteurs héliothermiques, par Jacques Desautel, Édisud, La Calade, 13090 Aix-en-Provence (160 p., 1979). — Présentation et analyse des appareils de production de chaleur solaire; de l'insolateur plan au concentrateur.

Table des matières

| | |
|--|----|
| Introduction | 5 |
| Préface à la sixième édition | 9 |
| Généralités | 11 |
| Unités utilisées | 14 |
| Première partie | 17 |
| Le rayonnement solaire. — Le capteur plan à effet de serre | |
| Généralités sur le rayonnement solaire | 18 |
| Le rayonnement solaire | |
| Rôle de l'atmosphère - masques | |
| Variations de l'énergie reçue | |
| Énergie effectivement reçue - Orientation des capteurs | |
| Courbes d'ensoleillement | |
| Comportement des corps vis-à-vis du rayonnement - Émission .. | 23 |
| L'isolateur plan à effet de serre | 27 |
| Généralités | |
| Surface absorbante et fluide caloporteur | |
| Surface absorbante - Absorbeur | |
| a) Tuyau de polyvinyle | |
| b) Réalisation d'un absorbeur métallique | |
| c) Utilisation de radiateurs de chauffage du commerce | |
| Isolation thermique | |
| La couverture transparente : l'effet de serre | |
| Matériaux à utiliser pour la couverture transparente | |
| Problème de l'étanchéité | |
| Montage des vitres | |
| La coque : matériaux possibles, conseils pour le montage | |
| Entrées et sorties du fluide caloporteur | |
| Montage des capteurs : série ou parallèle | |
| Installation du capteur | |

| | |
|--|----|
| Deuxième partie | 53 |
| Utilisation des capteurs plans pour le chauffage de l'eau domestique | |
| 1. Mode de fonctionnement du chauffe-eau solaire | 56 |
| 1 ^{er} cas : fonctionnement par thermosiphon (circulation naturelle) . | 56 |
| 1 Principe - Les pertes de charge - Charge d'une installation | |
| 2 Contraintes d'installation | |
| 3 Avantages et inconvénients | |
| 2 ^e cas : fonctionnement avec circulateur (circulation accélérée) ... | 59 |
| 1 Principe | |
| 2 Contraintes d'installation | |
| 3 Avantages | |
| 4 Inconvénients | |
| 2. Dimension de l'insolateur | 61 |
| Rendement d'un chauffe-eau solaire | |
| Énergie captée | |
| 3. Le problème du gel | 63 |
| 4. Entartrage et corrosion | 65 |
| 1 L'entartrage | |
| 2 La corrosion | |
| 3 Comment les prévenir | |
| 5. Tuyauteries et accessoires | 67 |
| 1 Les tuyauteries | |
| 2 Isolation des tuyauteries | |
| 3 Les purgeurs | |
| 4 Le vase d'expansion | |
| 5 Le clapet non-retour | |
| 6. Le réservoir | 75 |
| 1 Branchement de l'alimentation d'eau froide | |
| 2 Réservoir sans échangeur | |
| 3 Réservoir avec échangeur | |
| 4 Réservoirs du commerce | |
| 7. Chauffe-eau en thermosiphon | 83 |
| 1 Accessoires | |
| 2 Exemples de montages | |
| 3 Choix du diamètre des tuyaux | |
| 8. Chauffe-eau avec circulateur | 91 |
| 1 Choix du circulateur | |
| 2 Commandes du circulateur | |
| 3 Accessoires | |
| 4 Exemples de montages | |
| 5 Choix du diamètre des tuyaux | |

| | |
|--|-----|
| 9. Compléments pratiques | 102 |
| 1 Mise en service | |
| 2 Quelques conclusions | |
| 10. Utilisation - énergie complémentaire | 103 |
| 1 Comparaison des énergies d'appoint facilement disponibles | |
| 2 Que peut-on attendre d'un chauffe-eau solaire sans énergie d'appoint? Avec appoint électrique? | |
| 3 Montages | |
| a) Résistance électrique dans le réservoir | |
| b) Utilisation d'un chauffe-eau au gaz | |
| c) Montage de deux réservoirs en série | |
| 11. Prix des matériaux - amortissement | 115 |
| 1 L'insolateur | |
| 2 Le réservoir | |
| 3 Le circuit : tuyauteries, y compris collecteurs | |
| 4 Le circuit : accessoires | |
| 5 Exemples | |
| 6 Conclusion sur les prix | |
| 7 Amortissement d'un chauffe-eau solaire | |
| Annexes | 131 |
| 1 Un insolateur simple | |
| 2 Cellules antirayonnantes et surfaces sélectives | |
| 3 Les vitrages plans | |
| 4 Isolation thermique | |
| 5 Les tuyaux : description, outillage et normes | |
| 6 Calcul du volume d'un vase d'expansion | |
| 7 Estimation des dimensions de l'échangeur | |
| 8 Prix de revient des énergies les plus courantes | |
| Liste sommaire d'ouvrages | 155 |
| Généralités sur l'énergie solaire | |
| Énergie solaire et habitat | |
| Énergie solaire « pratique » | |
| Documentation scientifique - congrès | |

IMPRIMERIE LOUIS-JEAN

Publications scientifiques et littéraires
 TYPO OFFSET

05002 GAP - Téléphone 51 35 23

Dépôt légal 233-1979

Les «Technologies douces» se caractérisent par deux traits complémentaires :

elles se veulent dans leur conception comme dans leur emploi, respectueuses des équilibres écologiques des milieux où elles opèrent.

elles sont dans leurs dimensions comme dans leurs usages, à l'échelle de structures communautaires.

De ces deux points de vue, les technologies douces apparaissent, et c'est sans doute l'essentiel, comme pouvant faire l'objet d'un contrôle d'emploi par des individus ou des groupes désireux de s'affirmer comme pleinement responsables de leurs relations avec leur environnement naturel et social.

La collection se veut ouverte aussi bien aux recherches qu'aux applications très concrètes, aussi bien au manuel pédagogique qu'au livre de «savoir-faire».

Parmi toutes les utilisations possibles de l'énergie solaire, le chauffage de l'eau à usage domestique est l'une des plus immédiates et des plus simples.

Le chauffe-eau solaire est effectivement déjà utilisé un peu partout dans le monde. Mais il faut reconnaître que les réalisations restaient à ce jour le privilège de spécialistes ou de chercheurs.

Le présent ouvrage met enfin la conception et l'installation du chauffe-eau solaire à portée de tous.

Le fabricant de matériel et le professionnel du bâtiment ou du chauffage y trouveront une somme appréciable, et indispensable, d'informations scientifiques et techniques.

Mais le particulier, avant de se lancer dans l'achat de matériel ou dans la fabrication «bricolée», y trouvera aussi tous les conseils, indications, mises en garde, éléments de prix de revient et de production... sans lesquels les réalisations restaient jusqu'alors par trop approximatives.

C'est que les auteurs, deux ingénieurs et un plombier-chauffagiste, réunissent ici les fruits de plusieurs années de recherches universitaires et d'expériences pratiques très diverses dans le domaine de l'énergie solaire appliquée à l'habitat.

En 160 pages abondamment illustrées, «Le chauffe-eau solaire» est le seul ouvrage complet permettant aussi bien de se documenter avec précision sur un sujet d'actualité que de passer à la réalisation.

CHIRON
45F00