



école polytechnique de thiès

PROJET DE FIN D'ETUDES

SM.0447

TITRE: EXPLOITATION DE
L'ENERGIE SOLAIRE AU
SENEGAL

Auteur GONAR N DIOR

Génie MECANIQUE

Date JUIN 1978

SUJET: EXPLOITATION
 DE
 L'ENERGIE
 SOLAIRE
 AU
 SENEGAL.

SOMMAIRE:

Le projet consiste surtout à effectuer une recherche bibliographique sur l'énergie solaire.

Le travail est divisé en deux parties:

La première partie traite de la recherche générale sur l'énergie solaire, et ses applications. C'est ainsi qu'après un bref historique, un aperçu général sur le soleil a été fait. On a ensuite fait état des recherches sur l'énergie globale, la constante solaire, le captage et la concentration, pour en venir aux diverses applications qui sont les applications en hautes températures, la production et débite et la conversion en énergie mécanique. On a également mentionné quelques aspects économiques des appareils solaires. On termine cette partie par une bibliographie sommaire des ouvrages traitant de l'énergie solaire.

La deuxième partie concerne la recherche et l'expérimentation de l'énergie solaire au Sénégal, c'est à dire les centres de recherche, les recherches et les expérimentations sur les pompes solaires, les chauffe-eau solaires et la conversion photovoltaïque.



TABLE DES MATIERES

Introduction - - - - - 1

Première partie : Recherche et développement
en énergie solaire :

CHAPITRE I. Le rayonnement solaire (I.1). 4

I.1: Histoire - - - - - 4

I.2: Le soleil - - - - - 5

I.3: Le captage du rayonnement
solaire - - - - - 12

I.4: La concentration du rayonnement
solaire - - - - - 18

I.5: La caractéristique I_b. 23

CHAPITRE II. Diverses applications de l'énergie solaire. 26

II.1. Applications en haute température. 26

II.2. Applications en basses températures. 31

II.3. Production d'électricité. - - - - 44

II.4. Conversion de l'énergie solaire
en énergie mécanique - - - - 57

II.5: Aspects économiques. - - - 60

CHAPITRE III. Bibliographie des travaux en E.S.L. 64

III-1. Les ouvrages généraux. -- 64

III-2. Communications et comptes rendus
de congrès et séminaires. -- 66

III-3. Les revues. -- 67

III-4. Documents spécifiques à
une technologie de un type
d'élémentari. -- 68

DEUXIÈME PARTIE. Recherche et expérimentation
de l'énergie solaire au Sénégal.

CHAPITRE IV: Recherche scientifique solaire au Sénégal: 74

IV-1. Les centres de recherche. -- 74

IV-2. Graphes des caractéristiques
du rayonnement solaire. -- 76

IV-3. Recherche sur les pompes solaires. 78

IV-4. Recherche sur les chauffe-eau solaires. -- 83

CHAPITRE V: Expérimentation en énergie solaire au
Sénégal: -- 87

V-1. L'extenseur de l'eau. -- 87

V-2. Les chauffe-eau solaires. -- 89

V-3: Conversion photovoltaïque: . . . : 97

CONCLUSION - - - - - : 105

BIBLIOGRAPHIE : - - - - - : 109



INTRODUCTION

Le choix du sujet est justifié par plusieurs raisons. En effet au moment où le monde entier traverse une crise de l'énergie, toute source capable et sa future, tant soit peu, devient très intéressante, et ouvre des recherches et expérimentations.

Bien que l'on rencontre plusieurs opinions différentes, voire contradictoires en ce qui concerne l'énergie solaire, il n'en demeure pas moins que elle présente de grands avantages incontestables sur les autres formes d'énergie. Elle est par exemple renouvelable, non polluante, et de dépenses très étendue.

Si en plus on se trouve dans un pays aux moyennes latitudes comme le Sénégal, qui a la chance d'avoir du soleil au cours de toute l'année, l'énergie solaire peut, en l'associant à d'autres sources d'énergie, être considérée comme une des meilleures solutions qui permettent de sortir de cette crise.

Le projet qui consiste surtout en une recherche bibliographique, se compose de deux parties.

La recherche et le développement de l'énergie solaire en général : dans cette partie la théorie sur l'énergie solaire et les diverses applications possibles sont résumées.

- La lezione parte con la richiesta di l'esperienza
tion de l'ingie solari au Sirey.

PREMIERE PARTIE :

RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT

EN ENERGIE SOLAIRE

CHAPITRE I : LE RAYONNEMENT SOLAIRE - CARACTERISTIQUES (H)

I-1 : HISTORIQUE

Les premiers essais pour capter et exploiter l'énergie solaire datent de l'antiquité.

Comme exemple, nous pouvons citer "l'effet de verre", découvert en Egypte, le dispositif pour pomper l'eau avec l'aide des radiations solaires construit par Héron d'Alexandrie, 100 ans après J. C.

Jusqu'au $XVII^e$ siècle, l'énergie solaire fut délaissée. C'est en 1615 que Salomon de Jans construisit une pompe solaire.

Au $XVIII^e$ siècle Buffon employa des miroirs concaves à facettes.

À la fin du $XVIII^e$ H. B. de Saussure construisit diverses machines solaires.

Au XIX^e siècle, et au début du XX^e plusieurs installations furent construites, avec essentiellement comme but produire de l'énergie mécanique à partir de l'énergie solaire, par l'intermédiaire de l'air chaud ou de la vapeur d'eau.

Plusieurs difficultés furent surmontées grâce aux semi-conducteurs pour suivre le soleil, à fin d'améliorer le rendement des machines.

Jusqu'à la dernière guerre mondiale, les réalisations avaient une portée fort limitée, car pour que il n'apparaissait pas nécessaire, à la société d'après, de penser l'énergie à de nouvelles sources, et également parce que le rendement des installations était faible.

Depuis la dernière guerre, des recherches ont été entreprises dans les domaines les plus variés.

C'est seulement qu'après 1950 que les recherches ont été poussées dans divers pays. Ce qui a permis de faire apparaître de nouvelles possibilités d'utilisation.

C'est depuis l'apparition de la crise mondiale de l'énergie que l'utilisation de l'énergie solaire est devenue d'actualité.

Cependant, bien que la recherche "primaire" ait déjà été très poussée, la technologie solaire est encore en voie d'élaboration.

I.2: LE SOLEIL

Le soleil est une sphère gazeuse de 1 391 000 km de diamètre. La terre tourne autour du soleil suivant un orbite elliptique.

ayant le soleil comme un des foyers. La distance moyenne Terre soleil est de 149 450 000 km. Cette distance est minimum vers le 15 janvier, le périhélie, et maximum vers fin juin, l'apogée.

Les distances s'écartent de $\pm 1\%$ de part et d'autre de la valeur moyenne.

Le soleil est composé de trois régions principales

1. L'intérieur, où se crée l'énergie par réaction thermonucléaire. La température y atteint plusieurs millions de degrés Celsius, et la pression est de l'ordre de un milliard d'atmosphères.

2. La photosphère, de l'ordre de 300 km d'épaisseur, est responsable de la presque totalité des rayonnements que nous recevons. La température de surface y est de l'ordre de 4 500 K, et la pression de l'ordre de cent atmosphères.

3. La chromosphère et la couronne. Ils interviennent peu dans le rayonnement solaire.

Le rayonnement solaire rapporte l'énergie totale reçue du soleil par la terre, en dehors de l'atmosphère, que l'on appelle "la constante solaire"; il se caractérise également par la répartition spectrale en fonction de la longueur d'onde.

I.2-1: L'énergie globale reçue au sol.

Le soleil est une bombe thermonucléaire, transformant à chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium, en son noyau, à une température de 25 millions de degrés centigrades.

À chaque seconde, le soleil libère 4 millions de tonnes sous forme de rayonnement.

On a évalué à environ 100 milliards de milliards de kilowatts-heure, l'énergie rayonnée à chaque seconde, dans toutes les directions par le soleil; la terre en reçoit environ 30 milliards par seconde.

Le rayonnement solaire s'étend de la longueur d'onde de $0,3 \mu$ à 3μ .

Pour l'exploitation de l'énergie solaire et aussi pour l'application météorologique, il importe de connaître l'énergie reçue par le sol. Ainsi, on peut mesurer l'énergie reçue par une surface exposée perpendiculairement au rayonnement solaire, et celle reçue par une surface horizontale, et la durée d'ensoleillement. Ainsi on connaît l'intensité du rayonnement et sa durée.

Les mesures solimétriques ont donc pour but d'établir des cartes d'intensité et de fréquence du rayonnement

solaire.

La mesure de l'énergie se fait sur une surface exposée perpendiculairement au rayonnement solaire. Son stockage s'avère jusqu'à présent difficile.

Le rayonnement global reçu au sol se fait sur une surface plane horizontale.

Pour mesurer la durée d'insolation, on peut employer un appareil qui, agissant comme une lentille, concentre le rayonnement en un point sur un papier spécial qui brûle en ce point, et quand le soleil se déplace, le point brûlé trace une courbe dont la longueur est proportionnelle à la durée d'insolation. Cet appareil s'appelle héliographe Campbell-Stokes.

I.2.2: La constante solaire:

La constante solaire se mesure en Watts/m^2 . C'est la quantité d'énergie rayonnante, supposée intégralement transformée en chaleur, que le soleil envoie par seconde, à travers une surface de 1m^2 , normale aux rayons solaires, située en dehors de l'atmosphère terrestre à une distance du soleil égale à la distance moyenne de la terre au soleil.

Après plusieurs mesures, on a fixé à 1395 W/m^2 cette constante. On adopte en pratique 1400 W/m^2 .

Pour déterminer la constante solaire, il faut connaître le facteur de transmission global de l'atmosphère pour l'ensemble des longueurs d'ondes.

Dans la détermination de la constante solaire, plusieurs méthodes sont employées, dont la mesure par pyrhéliomètre. Cette méthode consiste à mesurer une lampe dont on connaît la courbe d'énergie en fonction de la longueur d'onde. Le rapport des longueurs d'ondes entre la valeur obtenue à la sortie du récepteur et la valeur connue donne la variation du facteur de transmission avec la longueur d'onde.

$$\text{on a } z = \frac{\int_0^{\infty} a_2 I_2 d\lambda_2}{\int_0^{\infty} a_1 I_1 d\lambda_1}$$

$d\lambda$ = longueur d'onde.

I_λ = l'intensité reçue au sol.

a_λ = coefficient dépendant de la longueur d'onde.

L'indice 2 est employé pour la valeur à la sortie du récepteur et l'indice 1 pour la valeur d'énergie connue de la lampe.

Si w est l'énergie mesurée au pyrhéliomètre, nous avons

$$\boxed{\text{Constante solaire} = \frac{w}{z}} \quad \text{actuellement } \frac{w}{z} = 2 \text{ cal/cm}^2/\text{ms}$$

En général, les intégrales pour l'écoulement τ s'étendent seulement dans le domaine des longueurs d'ondes visibles.

Une autre méthode employée pour la détermination de la constante solaire est celle de Bouguer-Lambert:

On décompose le rayonnement extra-terrestre en radiations monochromatiques de longueurs d'ondes λ ($\pm d\lambda$). Pour ces longueurs d'ondes, on applique les lois exponentielles de transmission. Soit, "m", la masse d'air traversée par les rayons incidents.

$\phi_{\lambda, m}$ = le flux de la radiation de longueur d'onde λ et de masse, m.

On a:
$$\phi_{\lambda, m} = \phi_{\lambda, 0} e^{-k_{\lambda} \cdot m} = \phi_{\lambda, 0} p_{\lambda}^m$$

k_{λ} = coefficient d'extinction

$p_{\lambda} = e^{-k_{\lambda}} =$ facteur de transmission pour la longueur d'onde λ et pour la masse d'air unité.

$\phi_{\lambda, 0}$ = le flux d'origine, initial, de la radiation de longueur d'onde λ et pour la masse m.

On a donc:
$$\log \phi_{\lambda, m} = \log \phi_{\lambda, 0} - m k_{\lambda} \log e$$

$$= \log \phi_{\lambda, 0} + m \log(p_{\lambda}).$$

On suppose que k_{λ} reste constant, en supposant que

l' état de l'atmosphère reste inchangé plusieurs heures après le lever ou avant le coucher du soleil.

m : elle varie en la hauteur du soleil, c'est-à-dire.

$$\phi_0 = \int_{0,2u}^{5u} \phi_{sc} dt$$

car toutes les radiations du soleil sont comprises entre $0,2u$ et $5u$.

Si on considère ϕ_0 , on doit le corriger par la distance de la terre au soleil pour avoir la constante solaire. En effet cette distance étant variable avec l'époque de l'année, il faut cette correction pour que les mesures soient compatibles.

Si D = distance terre-soleil.

D_m = distance moyenne terre-soleil

$\left(\frac{D}{D_m}\right)^2$ varie entre $0,967$ et $1,034$.

Si on appelle I_0 la constante solaire, on a trouvé que I_0 est affecté par $\left(\frac{D}{D_m}\right)^2$.

Actuellement, les mesures en haute altitude donne :

$I_0 = 2,05 \text{ ly/min} (= 2,05 \text{ cal/cm}^2/\text{min})$, avec une précision de $\pm 4\%$ à cause de la variabilité du flux de rayonnement à très courtes longueurs d'ondes encore mal connu. Pour les mesures dans la troposphère, ou au sol, c'est à dire

après absorption de l'UV, par la couche d'ozone, il semble préférable de prendre $I_0 = 1,98 \text{ ly/min} (= 0,138 \text{ w/cm}^2)$

$$1 \text{ ly} = 1 \text{ langley} = 1 \text{ cal/cm}^2$$

I. 3 : LE CAPTAGE DU RAYONNEMENT SOLAIRE

La surface rayonnante du soleil est variable dans le ciel terrestre, et elle est atténuée de façon aléatoire par les absorptions atmosphériques

L'éclairement, e , peut être multiplié par des moyens optiques, en des valeurs considérables telles que 100000 fois.

Les concentrations du rayonnement primaire peuvent porter les corps terrestres à des températures très élevées.

Cependant certains facteurs sont défavorables au rendement énergétique de l'énergie solaire; par exemples, les absorptions atmosphériques dont l'absorbant principal est la vapeur d'eau les nuages de poussière, qui peuvent atténuer de beaucoup le rayonnement solaire en le rendant diffus, donc polydirectionnel.

Les ensoleillements varient également d'une zone à l'autre et peuvent être affectés par le relief terrestre.

On peut capter l'énergie solaire selon trois méthodes.

I. 3. 1: Captage sous concentration optique.

On l'obtient par un échange par rayonnement ou par convection.

Il s'agit de réduire le rayonnement du corps chauffé pour que sa température s'élève, avec le minimum de perte d'énergie, jusqu'au niveau nécessaire pour l'utilisation envisagée. C'est le cas par exemple dans les cas de l'utilisation de l'"effet de serre": le rayonnement incident traverse une surface en verre transparent et tombe sur une autre surface qui a la propriété d'émettre des rayons infra-rouges qui sont alors retenus par le verre qui lui est totalement opaque à partir de 3μ . Ainsi la surface s'chauffe.

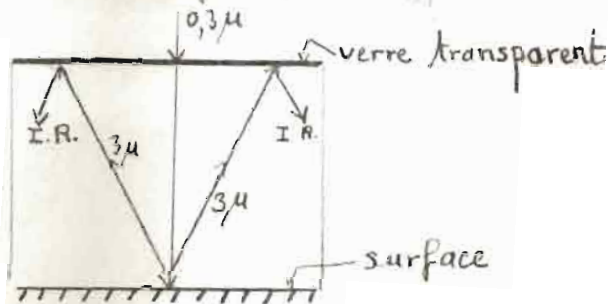


FIGURE 1: Effet de serre.

I. 3. 2: Captage avec concentration optique faible ou moyenne.

Si on augmente l'angle solide d'échauffement, alors la température que l'on peut atteindre augmente ce qui revient à superposer sur une même surface un certain nombre

d'images du objet.

Pour les concentrations directes, le nombre d'images est très élevé, tandis que pour les concentrations faibles ou moyennes, le nombre d'images varie de six à quelques centaines.

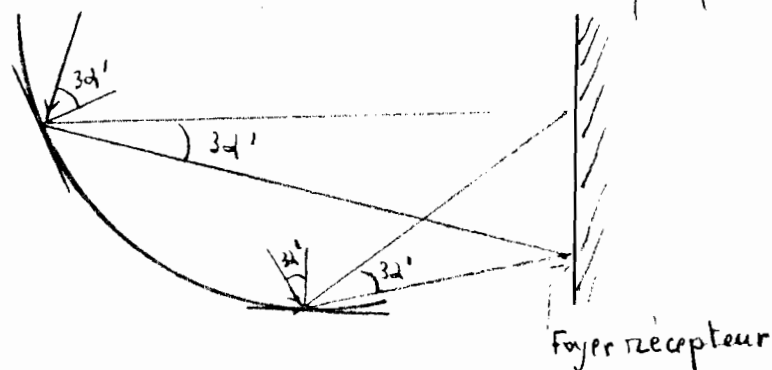


FIGURE 2: branche parabolique osculatoire

Si on déplace la parabole perpendiculairement au plan de récepteur on obtient une surface réfléchissante parabolique. C'est la zone focale à un profil rectangulaire ayant la largeur de l'anneau focal et la longueur de l'anneau.

Si on fait tourner la parabole autour de son axe, on obtient une paraboléide de révolution donnant sur le plan focal une image circulaire, et on se représente sur le précédent des points de vue concentriques géométriques.

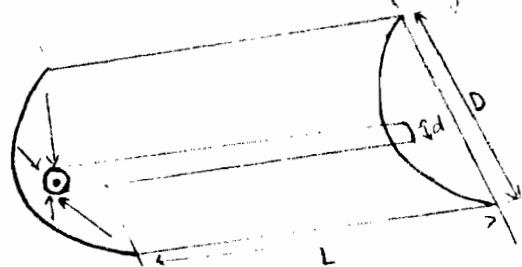


FIGURE 3: Cylindro-parabolique

$S =$ surface apparente $S = D \cdot L$

$A =$ tache focale $\rho = d \cdot L$

$C =$ facteur de concentration de rayonnement

$$C = \frac{S}{A} = \frac{D}{d}$$

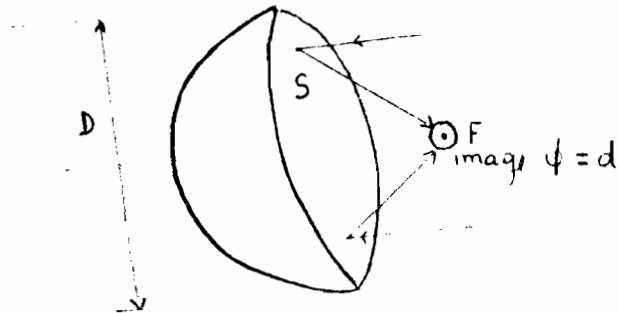


FIGURE 4: Paraboloïde de révolution

Surface apparente $S = \frac{\pi D^2}{4}$

Tache focale circulaire $A = \frac{\pi d^2}{4}$

$C =$ facteur de concentration de rayonnement

$$C = \frac{S}{A} = \frac{D^2}{d^2}$$

En général, on conjugue les miroirs avec les deux despoints.

En employant aussi le développement de cercle qui relie tous les rayons qui elle reçoit sur un point:

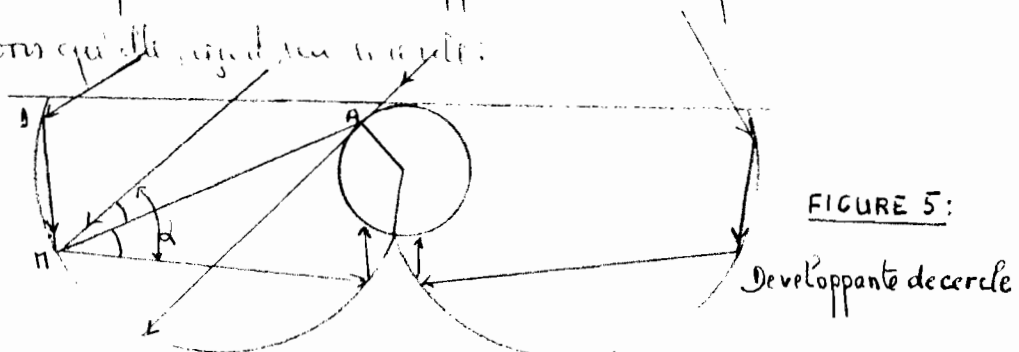


FIGURE 5:

Développement de cercle

$MA = \text{tangente au centre} = \text{l'apex du cône}$

Les conceptions faibles en magnitudes peuvent être utilisées pour calculer la puissance de refroidisseurs, ou de petits moteurs.

I. 3.3 : Capteurs avec concentration optique maximum

À fin d'obtenir de hautes températures, il est nécessaire d'accumuler sur la tache finale au moins un tant d'énergie que la surface chauffée se dilate par son rayonnement. En réalité il faut un peu plus pour tenir compte des pertes par convection.

Les appareils à grandes concentrations sont toujours des paraboloïdes.

L'utilisation d'un foyer mobile posant beaucoup de problèmes, on préfère orienter le rayonnement dans une direction fixe, avant de réaliser la convergence.

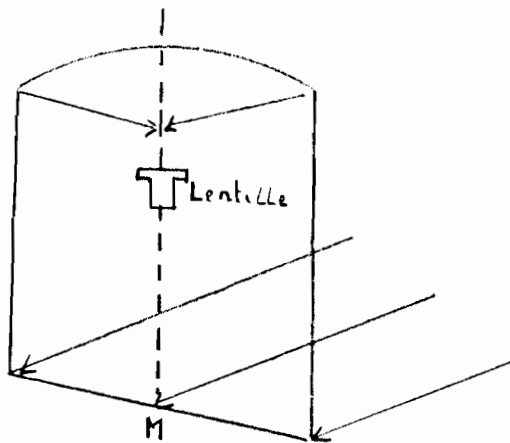


FIGURE 6: Ecran

La lunette de visée est schématisiquement composée d'une lentille divergente, d'un verre E situé dans son axe optique et à son foyer conjugué de l'objet ou de plus, l'ensemble est disposé autour de l'oculaire.

La direction, centre de la lunette, centre de l'oculaire E est la direction imposée par la réflexion plane. Elle doit être parallèle à l'axe de révolution du paraboloïde de récepteur de l'énergie.

Pour la réalisation de la réflexion plane à longue distance, toutes les surfaces en verre ou métal, ou leur face avant, ou arrière, de réflecteurs métalliques peuvent être utilisées en pratique.

La répartition de l'énergie dans le plan focal est telle que $\frac{l}{f} = 2 \int \sin^2 \epsilon = 2 \int \sin^2 \epsilon d\epsilon / \int =$ distance focale
 $l =$ diamètre moyen de l'image.

ϵ est défini dans fig 7.

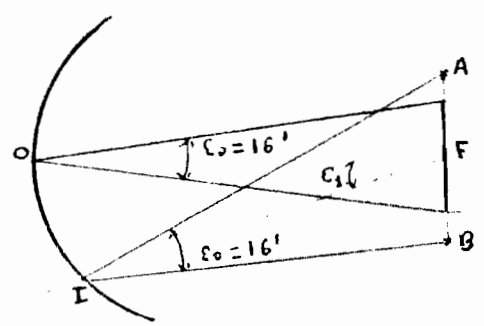


FIGURE 7: Réflexion au voisinage du centre de l'image.

$$\text{on a } \lambda = \frac{c \cdot 93 \lambda}{100}$$

lorsque le rayon réfléchi fait un angle α , non négligeable avec l'axe focal, l'image donnée n'est plus un cercle, mais une ellipse, dont la relation liant une image circulaire à un objet circulaire.

$$\lambda' = (1 - \cos^2 \alpha) \left[\frac{1}{\cos(\alpha - \alpha')} - \frac{1}{\cos(\alpha + \alpha')} \right] \lambda$$

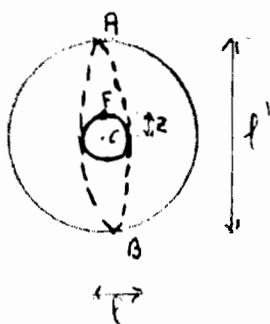


FIGURE 8 : image elliptique

z = distance entre le foyer F de parabole et le centre C de l'ellipse

$$z = \frac{\sin \alpha}{1 + \cos \alpha} \left[\frac{1}{\cos(\alpha - \alpha')} - \frac{1}{\cos(\alpha + \alpha')} \right] \lambda$$

I. 4: LA CONCENTRATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE:

On peut concentrer le rayonnement solaire de façon directe avec des lentilles, mais on utilise surtout des miroirs concaves - les lentilles en verre sont peu employées à cause de leur coût et on préfère les lentilles en matière plastique.

En début, les miroirs étaient généralement en cuivre, ce

métal assez facilement altérable. On peut en a utiliser des alliages. Au la suite, divers matériaux tels que le verre argenté ou aluminé, l'aluminium poli, ont été utilisés, ainsi que des matières plastiques.

Les miroirs constructifs fondamentaux aux rayonnements seau de et

Les miroirs de concentration linéaire peuvent être cylindriques, sphériques paraboliques ou coniques, tandis que les miroirs à concentration ponctuelle sont généralement en paraboloïde de révolution.

On distingue la concentration théorique de la concentration effective.

I-4-1: - la concentration théorique:

Il s'agit d'énergie disponible au niveau du sol et d'environ 1000 $\frac{W}{m^2}$. Il faut donc une surface de plusieurs mètres carrés pour capter une énergie suffisante. On peut employer des surfaces réfléchissantes à grandes dimensions, et pour accroître la concentration plus parfaite, on emploie un miroir parabolique.

Soient le miroir et l'image du soleil et un disque de diamètre d , si on suppose que le diamètre du miroir, D , est assez faible par rapport à la distance focale f , ($\frac{D}{f} \leq 0,1$ ou $0,2$);

$d = 2f$ où d = diamètre apparent du soleil

$d = 0,0043$ rad, f constant

Cependant, dans les fours, cette approximation n'est pas faite, car d/f n'est pas faible ($d/f > 4$) ainsi on obtient au foyer une tâche circulaire dont la partie centrale bien éclairée correspond à l'approximation précédente. Cette tâche est entourée d'une couronne de température décroissante.

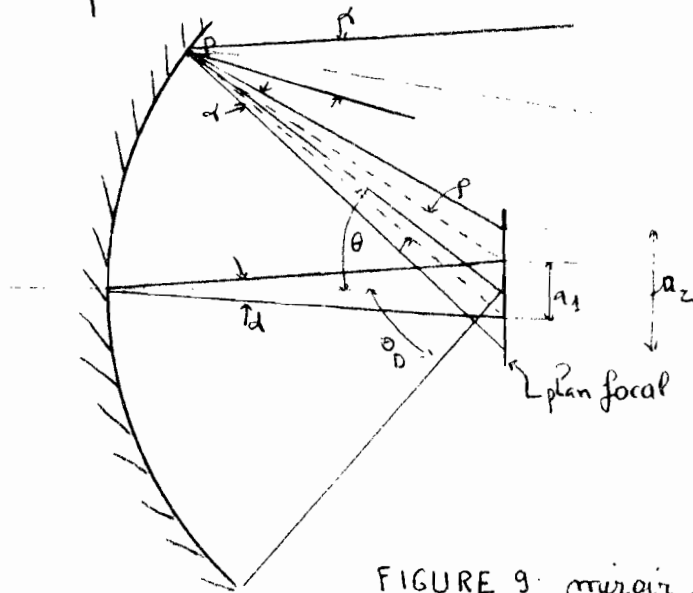


FIGURE 9: miroir parabolique.

En un point P du miroir, on agit un faisceau conique d'angle α . Il se réfléchit dans la direction du foyer suivant un faisceau conique de même angle ce qui donne une ellipse dans le plan focal, de petit axe $a_1 = Pf$, et de grand axe $a_2 = \frac{Pd}{\cos \theta}$.
 La surface du disque thermique est $S_1 = \pi f^2 d^2$, et celle de l'ellipse correspondant au point P est $S_2 = \frac{\pi f^2 d^2}{4 \cos \theta}$

pendant au point P, et $dE_0 = \omega \int \sin^2 \theta \, d\Omega$

$E_0 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_0} \omega \int \sin^2 \theta \, d\Omega = \pi \omega \int_0^{\theta_0} \sin^2 \theta \, d\theta$ pour le dia-
mètre du miroir D , correspondant à l'angle θ_0

Cette énergie est agée dans un disque de surface S_1 .

$$S_1 = \frac{\pi \int_0^{\theta_0} \sin^2 \theta \, d\theta}{4}$$

l'énergie par m^2 est $E_1 = \frac{4 E \sin^2 \theta_0}{\lambda^2}$

On définit un facteur ϵ :

$$\epsilon = \frac{E_1}{E} = \frac{4 \sin^2 \theta_0}{\lambda^2} \quad / \text{ : la normalisation}$$

I-4-2: — La concentration effective

La théorie suppose que le miroir soit parfaitement parabolique, parfaitement réfléchissant et qu'il n'y ait pas d'obstacles entre le soleil et le miroir.

En réalité, les pertes sont nombreuses, dues essentiellement à :

- l'énergie perdue par réflexion, absorption, et écart à la parabolité.
- la rugosité, les ombres du matériel, imperfections de réglage.

Etant donné que presque tous les fours comportent un miroir parabolique fini, on peut penser travailler comme

Nous avons $h = \frac{w_1}{w_2}$

$w =$ l'énergie mesurée au pyrhéliomètre

τ est défini à la page 9.

Si on multiplie les valeurs de Γ_{rel} précédentes par h , on obtient des valeurs absolues de Γ_{rel} .

REFERENCES:

- I. 1 Historique :
- L'énergie solaire, par Roger Pignatour, pages 5 à 7.
 - Utilisations et promesses de l'énergie solaire, par J. A. Vaillant: page 13 à 25.

I. 2: Le soleil:

- L'énergie solaire, par Roger Pignatour, page 8 à 23.
- Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels, par Ch. Perrin et Arichambert, pages 114 à 116.

I. 3 Le captage du rayonnement solaire:

- Notes du Laboratoire de l'énergie solaire de Montlouis (France).

I. 4: La concentration du rayonnement solaire

- L'Énergie solaire par Roger Puytussaux. Pages 25 à 33.

I. 5: La caractéristique $I(t)$

- L'énergie solaire, par Roger Puytussaux: pages 12 à 13 et 15 à 17.
-

CHAPITRE II : LES DIVERSES APPLICATIONS DE L'ENERGIE SOLAIRE.

Qu'il soit en haute ou basse température, qu'il soit dans la production de l'électricité ou pour la conversion de l'énergie solaire en énergie mécanique, plusieurs essais ont été réalisés. Malgré les moyens techniques encore limités, des résultats concluants ont pu être obtenus.

II-1: APPLICATIONS EN HAUTES TEMPERATURES:

La haute température est surtout utilisée dans les fours-solaires. Dans ces fours, on réalise une concentration importante du rayonnement.

On distingue les moyennes températures de 100°C à 600°C , les hautes températures entre 500°C et 1500°C , et les très hautes températures allant jusqu'à 3500°C .

Dans les fours à très hautes températures, on distingue généralement la fonction de captation, de celle de concentration, ce qui permet d'obtenir un foyer fixe. En effet on dispose d'un dispositif orientateur mobile comportant une ou plusieurs surfaces planes réfléchissant les rayons solaires dans une direction fixe sur un miroir parabolique fixe qui concentre le rayonnement vers

une zone d'utilisation située autour du point focal du paraboloïde.

Évidemment, pour certaines applications, on peut utiliser une seule surface réfléchissante pour capter et concentrer le rayonnement solaire. Dans ce cas, il faut constamment diriger l'appareil vers le soleil.

II.1.1. Réalisation des fours solaires.

- Le but consiste à déterminer les méthodes et les systèmes employés pour mieux concentrer l'énergie solaire en une région de l'espace, en général fixe, tel que le paraboloïde. Deux problèmes principaux se posent.

Puisque le miroir parabolique est fixe, on doit renvoyer le faisceau solaire sur ce miroir à l'aide d'un miroir ou d'un système de miroirs plans, ce sont les réflecteurs. Ils doivent suivre le soleil avec une excellente précision pour obtenir une température stable au foyer. Il faut que leur introduction dans le faisceau entre le soleil et le miroir parabolique ne diminue pas les qualités de concentration de ce dernier.

- L'autre problème est qu'il faut construire des montures, permettant un mouvement précis et commandés par un système d'asservissement soigné.

Il faut également bien choisir le site où la transparence

atmosphérique et bonne et où la durée d'ensablement est grande.

II-1-1-1: Réalisation des murs concaves.

Jusqu'à un diamètre de quelques mètres, on peut fabriquer des murs d'une seule pièce.

Au delà, on doit assembler des éléments sur une structure rigide. C'est ainsi qu'on distingue les murs de petites et moyennes dimensions qui vont jusqu'à deux mètres, et des murs de grandes dimensions qui sont composés d'éléments indépendants, montés sur un bâti rigide, et rigles individuellement. Principalement, deux techniques ont été utilisées:

- on taille des éléments qui constituent des parties de mur et dont la forme diffère selon leur position par rapport au centre de l'ensemble.

- on emploie des glaces qui sont déformées élastiquement par un principe mécanique.

II-1-1-2: Réalisation des dispositifs orienteurs.

Ces dispositifs dépendent de la dimension du mur concave et du bat perenneur.

Sans le cas d'un petit mur d'une seule pièce, on peut faire tourner le mur lui-même pour suivre le soleil.

Deux types de montures sont essentiellement employés:

la monture azimutale et la monture équatoriale.

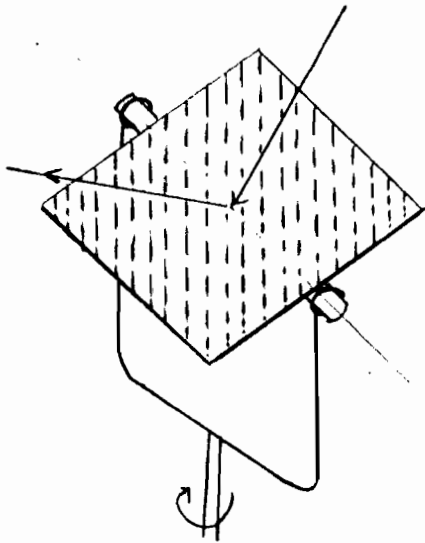


FIGURE 11. Monture azimutale

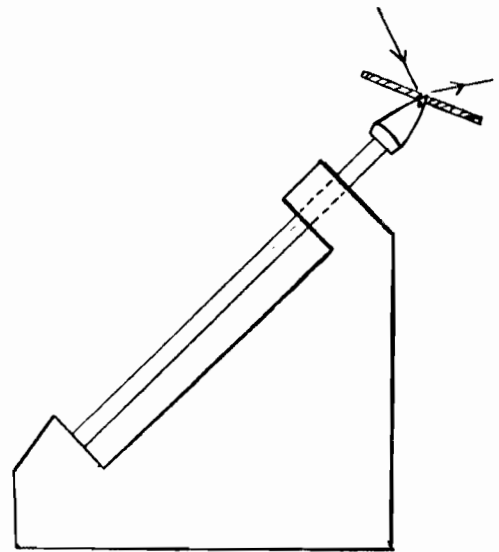


FIGURE 12. Monture équatoriale

Monture équatoriale: le miroir tourne autour d'un axe parallèle à l'axe de la terre et peut tourner autour d'un axe perpendiculaire, pour tenir compte de la variation quotidienne de la déclinaison du soleil.

Monture azimutale: elle est employée pour les plus grandes dimensions. Dans ce cas, il faut assurer le mouvement du miroir à celui du soleil.

II.1.2: Applications des fours solaires

La réception de l'énergie solaire au foyer du miroir concave permet de chauffer tout corps placé en ce foyer. Ce qui permet

par exemple des traitements directs ou des traitements par vacu-
te'. On peut également effectuer son traitement en atmosphère
conditionnée, à l'abri de l'air à pression atmosphérique ou dans
le vide.

Faire des mesures physiques au four solaire consiste
surtout à déterminer les conditions physiques qui régnent dans
le four, énergie et température, et les propriétés physiques des corps
portés à haute température.

Pour mesurer l'énergie au foyer du four solaire, on calcule théori-
quement l'énergie qui l'on peut espérer recevoir à l'intérieur
du four. Ensuite on mesure l'énergie effectivement reçue à l'aide
d'un calorimètre.

Pour mesurer les températures au four solaire, on utilise des
thermomètres classiques pour des températures inférieures à 2000°C ,
et des pyromètres optiques photo-électriques pour des températures
comprises entre 2000°C et 3000°C .

— Les fours solaires ne sont vraiment intéressants
qu'à très hautes températures, telle que la fusion de l'alumine
à 2050°C , pour obtenir du corindon, ou la fusion du quartz
pour obtenir le silice.

— Les fours solaires sont employés pour la purification

de certaines substances réfractaires. On les porte à une très haute température, ce qui fait capter les impuretés.

II. 2 : APPLICATIONS EN BASSES TEMPERATURES.

Les récepteurs à basse température peuvent être construits avec un câblage sommaire. Cependant certaines précautions sont nécessaires pour le choix du matériel et les meilleures formes à donner aux récepteurs d'énergie.

L'énergie est captée en général par l'échauffement d'un gaz ou d'un liquide qu'il faut employer par la suite.

II-2-1: Climatisation des habitations

Les maisons offrent de très larges surfaces exposées au soleil. On peut donc en récupérer une énergie considérable.

La recherche pour l'exploitation de l'énergie solaire en vue de chauffer des habitations est relativement récente. Ceci tient essentiellement au fait que le bois et le charbon ont été longtemps les moyens de chauffage traditionnels.

Aujourd'hui que ces combustibles se raréfient, et le pétrole consommé en quantité croissante, les recherches en vue d'employer l'énergie solaire ont été développées. Cependant le problème le plus délicat est de maintenir la température raisonnablement

stable, malgré l'interception de la nuit et des jours sans soleil. Les recherches portent sur la récupération la plus efficace, la distribution la plus confortable et l'accumulation de l'énergie.

II-2-1-1: Chauffage solaire des habitations.

On peut réaliser ce chauffage de deux façons.

Sit on fait des travaux nécessaires pour l'ajouter aux travaux de bâtiment, soit le réaliser en même temps que l'étude architecturale. C'est surtout dans ce dernier cas que cela peut être économique.

Pour réaliser ce chauffage, on utilise des insolateurs plans disposés, selon le cas, sur la toiture ou sur la façade.

- Le chauffage est à eau chaude, ou à air chaud.

- Le chauffage des habitations est particulièrement important dans les pays où le froid est accablant.

II-2-1-2: Climatisation solaire des habitations.

- Les fluides généralement utilisés sont l'air, les saumures, et des fluides spéciaux.

- Les appareils classiques utilisés sont de deux familles: les humidificateurs et les conditionneurs à compresseurs.

- L'humidificateur rafraîchit et humidifie l'air en même temps, par évaporation d'eau. Cet air rafraîchi et humidifié

sert, à ventiler les énergiquement l'habitation et climatiser et à retirer la chaleur apportée par les parois.

- Les ventilateurs d'air et compresseur fonctionnent suivant le cycle classique : compresseur, condenseur, détenteur, évaporateur.

- Le climatiseur des locaux est réalisé en utilisant l'air qui se trouve pour produire du froid.

On peut employer les mêmes systèmes de réfrigération pour absorption, que ceux qui sont utilisés pour produire de la glace.

On peut aussi utiliser une "poutre" verticale, l'air chaud se déplaçant vers l'extérieur.

D'autres méthodes sont utilisées, comme par exemple :

- L'évaporation en terrasse on crée une couche d'eau sur la terrasse par une sorte de réservoir d'eau, ou par assemblage des surfaces des balcons horizontales ou inclinées.

- Circulation de l'eau dans les murs à partir d'un bassin installé sur la terrasse d'une maison avec système de puits mobiles.

- refroidissement des habitations grâce au rayonnement par les surfaces extérieures

II.2.2: Chauffage de l'eau.

- Le chauffage de l'eau par le soleil est certainement, à l'heure

actuelle, l'application la plus répandue de l'énergie solaire. Il est particulièrement intéressant dans les pays à basses latitudes.

Pour produire de l'eau chaude, on peut capter la chaleur solaire à l'aide d'isolateurs plans. Ainsi, dans une installation de chauffe-eau solaire, un liquide est chauffé sous très faible épaisseur dans une surface métallique très plate, peinte extérieurement en noir. Cette surface est placée dans un châssis fermé par une vitre et isolé jusqu'à l'arrière et sur les côtés. De l'eau ou un autre liquide peut circuler par thermosiphon dans un circuit avec serpentins échangeurs, placés au sein d'un réservoir d'accumulation dont on veut chauffer l'eau qui y est contenue.

Les températures peuvent atteindre 60 à 70°C.

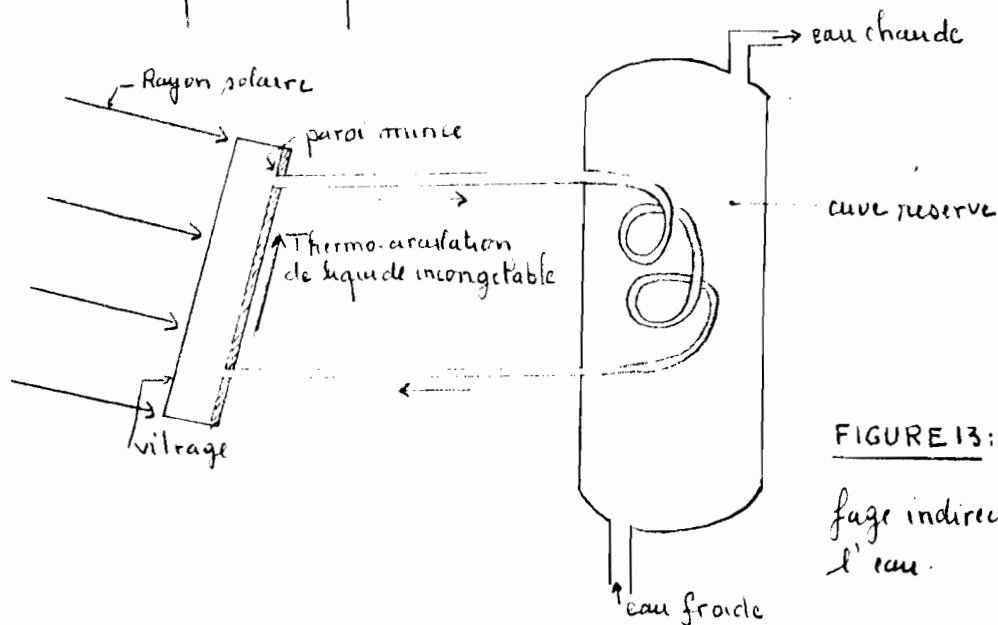


FIGURE 13: chauffage indirect de l'eau.

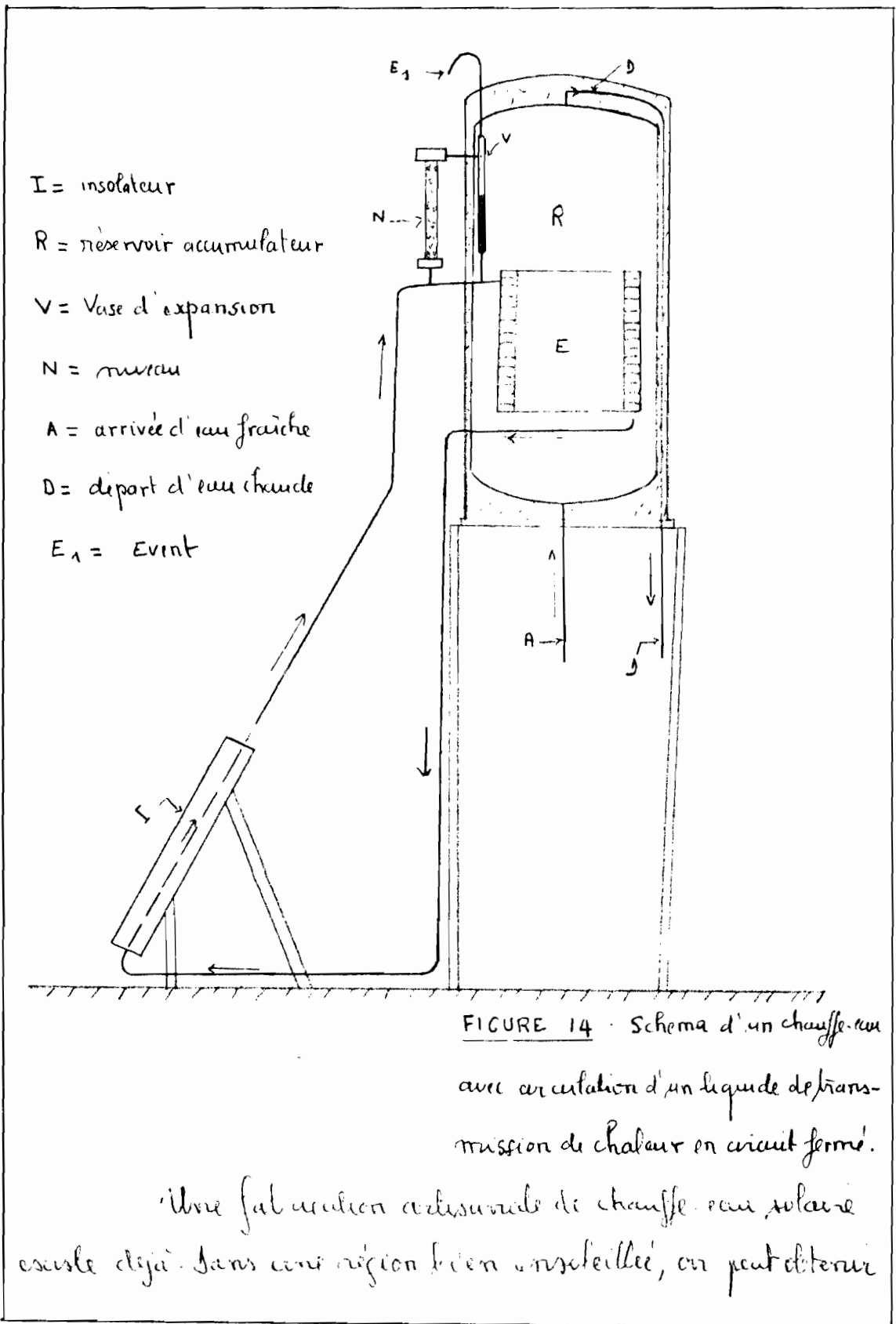


FIGURE 14 - Schema d'un chauffe-eau avec circulation d'un liquide de transmission de chaleur en circuit fermé.

Une fabrication artisanale de chauffe-eau solaire existe déjà. Dans une région bien ensoleillée, on peut obtenir

de l'eau chaude nécessaire à une famille, au moyen d'un isolateur artisanal de 1 à 5 m², installé sur le toit ou la terrasse d'une maison.

Dans le commerce, plusieurs isolateurs sont proposés, qui sont diverses variantes de l'isolateur plat.

Généralement, les appareillages proposés comprennent des réservoirs calorifugés, de 250 à 500 litres.

— Les premiers types d'isolateur plat destinés au chauffage de l'eau figuraient à l'exposition de San-Francisco en 1900.

À partir de 1937, une société française a développé des chauffe-eau solaires en France et en Afrique du Nord.

En cours des dernières années, diverses marques ont fait leur apparition en de nombreux pays, tels qu'aux Etats-Unis, en Australie, au Japon et en U.R.S.S.

Des progrès sont encore possibles dans l'intégration des isolateurs aux bâtiments, tant au point de vue esthétique qu'à celui de l'équipement rationnel des surfaces extérieures des bâtiments, des tentures.

II. 2. 3: Production d'eau douce à partir d'eau saumâtre

— La distillation solaire permet d'obtenir de l'eau douce à partir d'eau de mer ou d'une eau saumâtre.

L'obtention de l'eau potable, pour l'utilisation humaine, animale et végétale n'est pas chose toujours facile. Cela deviendra un problème vital dans bien des pays dans peu de temps.

Le degré de salinité admissible dépend de l'utilisation à laquelle l'eau est destinée.

Il y a deux types de procédés, pour savoir la distillation solaire par effet de serre, et celle par application d'un des procédés industriels de distillation thermique, la vapeur étant produite par une chaudière solaire.

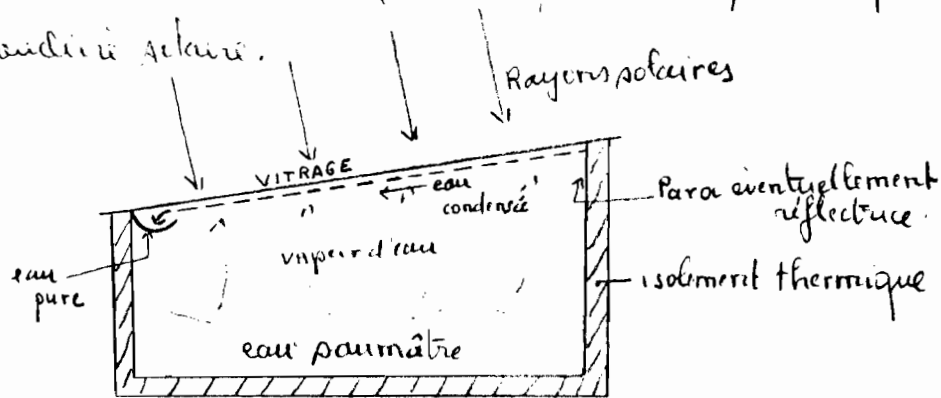


FIGURE 15 : Principe du distillateur solaire par "effet de serre"

Le principe du distillateur solaire par "effet de serre" consiste à avoir un bac peu profond, et bien isolé, au fond duquel on dispose de l'eau saumâtre; le soleil chauffe cette eau à travers un vitrage, et l'eau s'évapore. La vapeur se condense sur le vitre et s'écoule dans une rigole. Cependant, il faut que le vitre soit plus froide que l'eau, c'est pourquoi le bac doit être absorbant

aux rayons solaires et bien calorifugé. Les bords du box doivent être très bas pour réduire l'ombre à l'intérieur.

Pour éviter les pertes d'énergie dues au refroidissement de la vapeur d'eau, on l'empêche pour chauffer une autre masse d'eau accumulée par exemple.

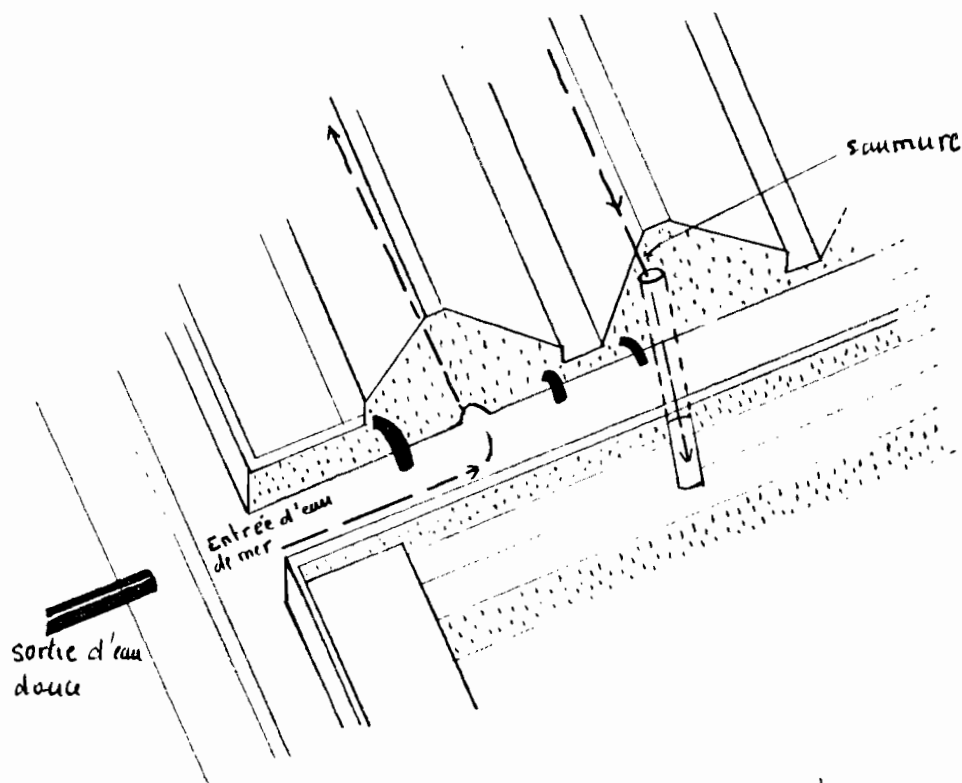


FIGURE 16: Traitement de l'eau de mer

en eau douce, un étage d'exemple de distillation solaire par "effet de serre".

Le nombre d'étages dépend du degré de salinité voulu.

II. 2. 4 : Les réfrigérateurs solaires

Les pays où on a besoin de froid sont généralement les pays les plus chauds, donc les plus ensoleillés en principe.

La transformation de l'énergie solaire en énergie électrique ou mécanique pour employer une réfrigération normale a un rendement très faible, et le matériel est coûteux. Il est préférable d'utiliser un appareil à absorption spécialement conçu. Pour les petites concentrations, un appareil à cycle intermittent convient, tandis que pour les installations industrielles, on peut construire un système continu à partir de chaleur auxiliaire.

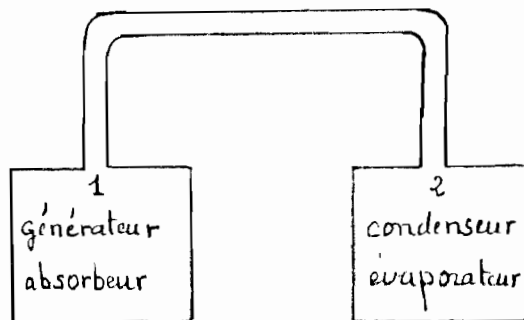


FIGURE 17 : Principe de réfrigérateur à absorption

Un appareil à cycle intermittent est basé sur la propriété que possède l'eau, et d'absorber de grands volumes de gaz ammoniaque à basse température et de restituer cet ammoniaque sous l'action de la chaleur.

considérons la figure 17. Le récipient 1 est appelé générateur pendant la chauffe, et absorbeur pendant la réfrigération. Le récipient 2 est condenseur puis évaporateur.

Le générateur contient de l'eau ayant dessus une grande quantité d'ammoniac et la solution restante. En le chauffant, l'ammoniac liquide se dégage et va se condenser dans le condenseur qui est maintenu froid. Quand tout l'ammoniac est évaporé, la chauffe est arrêtée. L'ammoniac est maintenant à l'état liquide dans le récipient 2. Si le récipient 1 est refroidi alors qu'il ne contient qu'une solution pauvre, celle-ci demandera à absorber l'ammoniac contenu dans le récipient 2, qui devient évaporateur. Cette évaporation absorbe de la chaleur: c'est en ce moment que l'on obtient la réfrigération autour du récipient 2, et la reconstitution de la solution dans le récipient 1 qui est devenu absorbeur.

En pratique, on emploie quatre éléments distincts: générateur, condenseur, évaporateur et absorbeur.

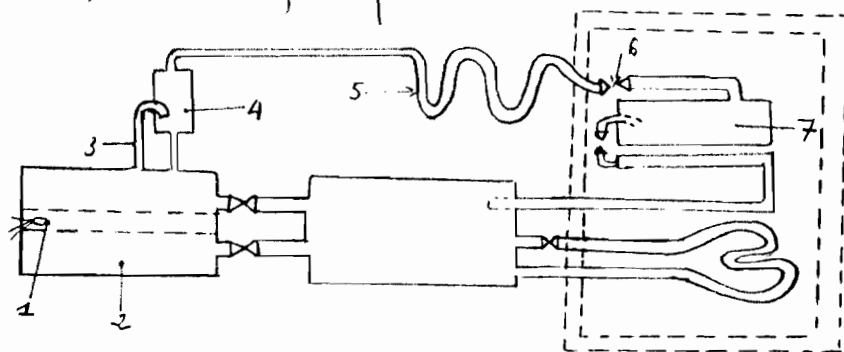


FIGURE 18. Appareil réfrigérant à absorption.

En considérant la figure 18, nous avons :

1: le générateur, qui a une forme appropriée selon la façon dont l'énergie solaire lui est appliquée.

2: le séparateur qui condense le fluide à une extrémité par l'air pur d'atmosphère et la renvoie en 1.

En 3 et 4, nous avons un condenseur qui peut être refroidi par l'air ou l'eau.

6: l'évaporateur qui est relié au condenseur par un détendeur 5, une partie qui à cause de l'étranglement, une pression rigide dans 4, et l'ammoniac se détend en passant dans 6, où il s'évapore, attiré par la solution pauvre contenue dans l'absorbant 7.

Quand la solution est enrichie, elle retourne au générateur, par un fonctionnement manuel ou automatique, en équilibrant continuellement la pression.

II. 2. 4. 1. Réfrigérateurs simples à absorption intermittente.

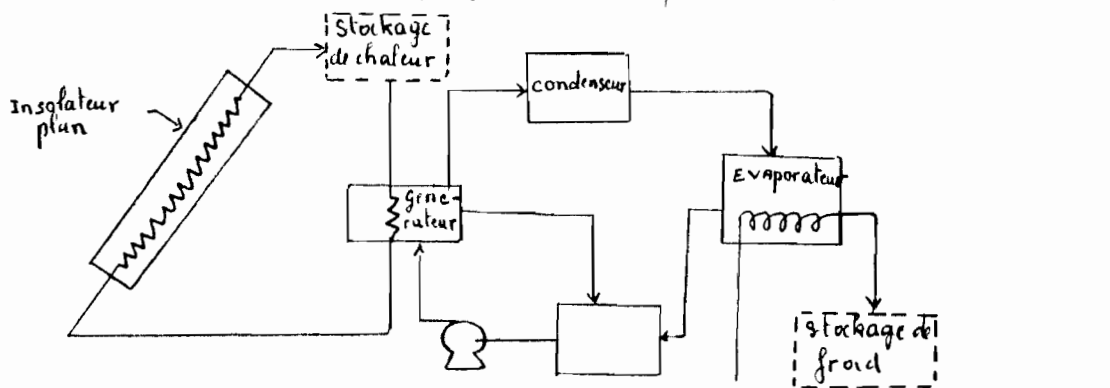


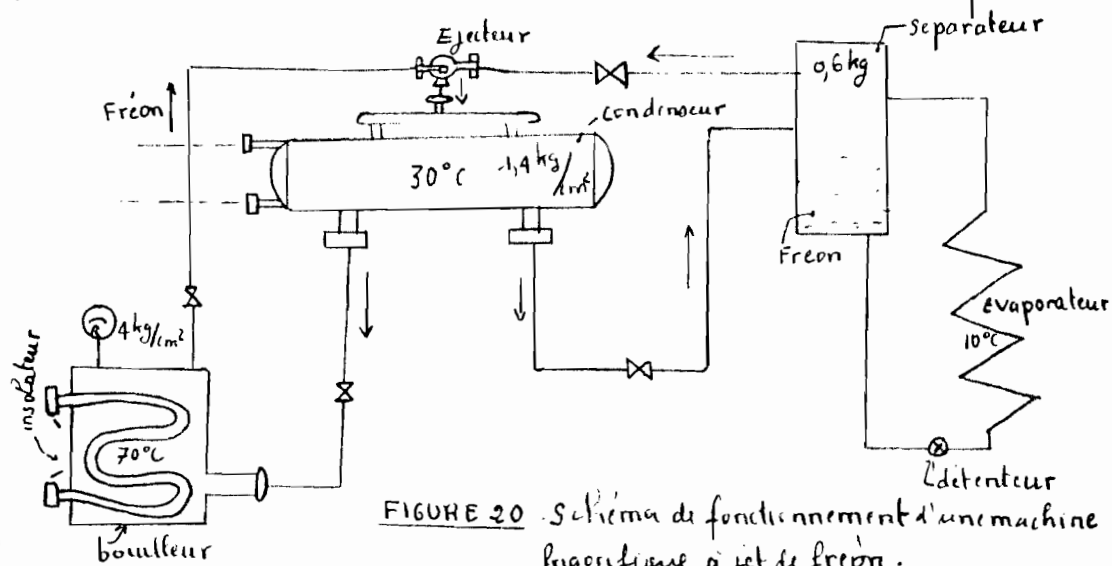
FIGURE 19: Schéma du climatiseur d'air polaire continu avec collecteur plat.

vers le milieu refroidi

L'appareil de ce schéma était conçu pour produire environ 1000 BTU de frigories par cycle avec régénération une fois par jour. Le premier problème consistait à bien choisir le système absorbant-refrigérant. Il faut surtout considérer la stabilité de l'absorbant, le prix et la possibilité de se le procurer, ainsi que la pression de vapeur du réfrigérant, sa chaleur de vaporisation, et la chaleur calorifique de l'absorbant.

II. 2. 4. 2. Production de froid à la glace.

Pour garder des légumes frais ou conserver des aliments, on a conçu des réfrigérateurs utilisant le soleil comme unique source d'énergie et important des isolateurs plans. Le bouilleur, dans le système de réfrigérateur solaire à jet de fréon, peut être chauffé soit directement par le rayonnement solaire, soit par l'intermédiaire d'eau chaude venant d'un isolateur plan.



Pour des usages avec le type de réfrigérant de la figure 20, le bœufleur est porté à 70°C grâce à un résistateur. Le gaz entre dans un injecteur sous une pression d'environ 4 bars, après émission du gaz venant de l'évaporateur, le mélange va à un condenseur où règne une pression d'environ 1,4 bars; une partie du liquide retourne au bœufleur et l'autre partie va vers l'évaporateur, puis revient au condenseur en passant par l'injecteur.

Pour produire de la glace, on peut utiliser un moteur solaire avec cycle thermique à température peu élevée. On peut détendre une partie du fluide utilisé à basse pression et utiliser un compresseur couplé avec le moteur.

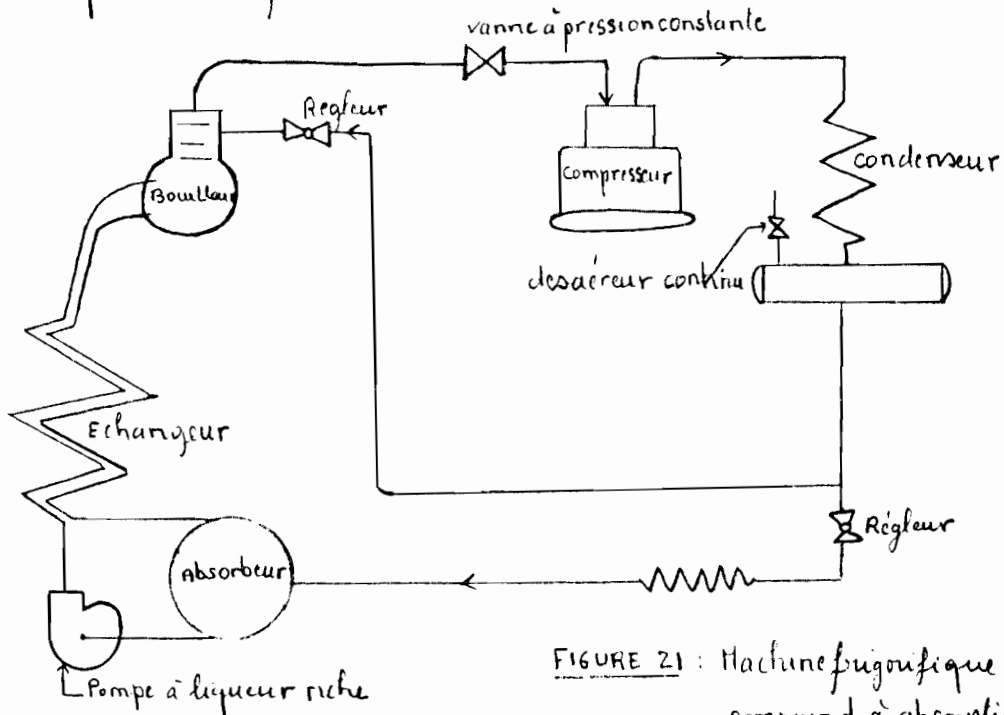


FIGURE 21 : Machine frigorifique compound à absorption-compression.

II.2.5: -- Les cuisinières solaires

L'emploi du bois ou de la bouse de vache dans les pays en voie de développement, qui est responsable de la destruction des forêts pour le premier, et empêche son utilisation comme engrais pour le second, peut être évité par la réalisation des cuisinières solaires.

Pour cela, il faut tenir compte du fait que la température acquise varie entre 100° et 300° selon la cuisine que l'on veut faire.

La cuisinière solaire doit être en principe bien calorifugée.

II.2.6: Séchage par le soleil.

Dans l'utilisation de l'énergie solaire comme séchage, les produits obtenus sont très purs et sans dépense de combustibles.

Le principe consiste à chauffer l'air par le soleil et à employer des ventilateurs électriques pour souffler l'air chaud.

L'air est chauffé sous le toit du bâtiment, entre une plaque métallique noire et une plaque qui est choisie de préférence isolante.

II.3: PRODUCTION D'ELECTRICITE

Dans des points sort à même de transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique. Cependant les tensions, ou courants, sont très faibles.

Pour utiliser l'énergie solaire, à fin d'obtenir "une batterie so-

laine", il faut que la surface cellulaire soit aussi grande que possible.

Les batteries solaires ne sauraient donner une grande puissance, cependant elles peuvent servir à faire fonctionner des appareils électroniques dans des applications spéciales.

On distingue la conversion directe, de la conversion indirecte.

La conversion directe transforme directement, en énergie électrique, l'énergie des photons émis par le soleil. C'est le cas par exemple de la conversion par effet photovoltaïque.

Pour la conversion indirecte, il faut faire une conversion intermédiaire, qui peut être thermique, thermique ou photobiologique.

II.3.1: Les photopiles solaires.

- L'effet photovoltaïque est une conversion directe.

Les cellules photovoltaïques sont essentiellement constituées de couples de semi-conducteurs. Sous l'action de la lumière, elles deviennent le siège d'une force électromotrice qui croît avec l'intensité de la lumière.

- Les photopiles solaires constituent une application de l'effet photovoltaïque.

Dans la conversion photovoltaïque, on utilise surtout le silicium. Cependant des expérimentations ont été faites avec d'autres

matériaux tels que le sélénure de cadmium, l'antimoniure d'aluminium, le tellure de cadmium.

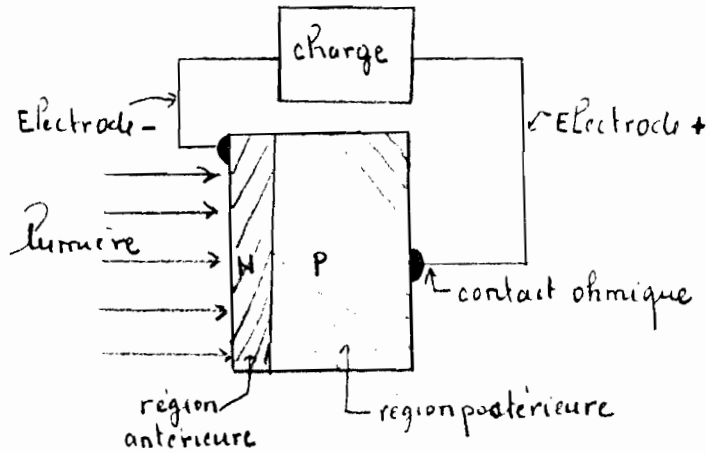


FIGURE 22 : Photopile polaire au silicium

Les caractéristiques de telles jonctions (P-N), diffèrent beaucoup de celles des jonctions classiques. La surface de la pile est limitée par la difficulté de préparation de monocristaux de silicium de très grande dimension. Elle peut cependant atteindre plusieurs centimètres carrés.

En admettant la formule de Shockley, nous avons.

$$I = I_0 \left[e^{+qV/kT} - 1 \right]$$

T = température absolue

I_0 = courant de saturation

k et q sont des constantes: q est la charge de l'électron, k, tel que k est la constante de Boltzmann.

I = courant qui traverse la charge.

V = tension aux bornes de la photopile.

On peut faire un calcul approché:

$$I = I_0 [e^{qV/kT} - 1] - I_{cc}$$

I_{cc} = le courant de court-circuit.

Si $V_{cc} =$ la tension de circuit ouvert, nous avons

$$V_{cc} = \frac{kT}{q} \ln \left(1 + \frac{I_{cc}}{I_0} \right)$$

$$I_0 = \frac{1}{n} \left(\frac{J_p}{\gamma_p} \right)^{1/2}$$

n = nombre d'électrons libérés

D_p = vitesse de diffusion

$$D_p = 13 \text{ cm}^2/\text{s}$$

γ = la durée de vie des paires dans le silicium de type n.

Pour une illumination de 100 mW/cm^2 , on peut admettre que I_0 est de l'ordre de 10^{-7} A/cm^2 et V_{cc} de l'ordre de 0,5 volt.

Si on éclaire cette cellule avec une lumière contenant des photons dont l'énergie, u , est supérieure à la largeur de la bande interdite de la jonction P-N, des électrons de la bande de valence reçoivent une énergie suffisante pour passer dans la bande de conduction et laissent des trous vacants. Ainsi se crée des "paires électron-trou". Par diffusion, et sous l'action d'un champ électrique, les électrons et les trous se propagent dans la

crystal.

Si les électrons atteignent la frontière de la couche de transition, ils sont happés par le champ électrique qui y régit, et pénètrent dans la région où leurs énergies sont moyennes.

Inversement, le même champ électrique retient les trous dans la région où ils ont été libérés. Il en résulte un courant circulant de n vers p , dans le sens inverse à celui conventionnel.

Si F est le flux de photons absorbés et si tous les porteurs libérés étaient collectés par la jonction, le courant serait :

$$i_F = -qF$$

Mais en réalité, tous les photons ne sont pas absorbés, certains sont perdus par réflexion, absorption, etc.

$$\text{Nous avons alors } i_F = -q\theta KF$$

θ = facteur de transmission de la surface de la cellule.

K = coefficient dépendant de plusieurs facteurs, on l'appelle aussi efficacité de collection.

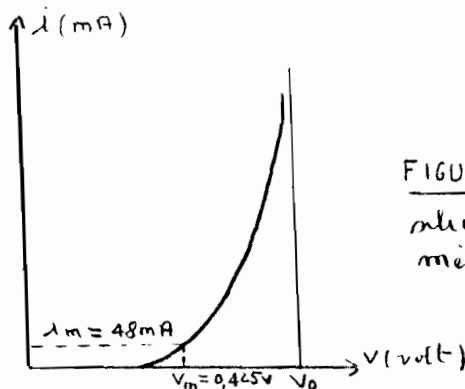


FIGURE 23 : cellule au maximum de 15 mm de diamètre à 35 °C

V_0 = tension de circuit ouvert

$i_m V_m$ = puissance maximum définissant le fonctionnement optimum de la cellule, si on doit se placer dans la réalisation pratique.

Etant donné la répartition de l'énergie solaire reçue en un endroit donné, il faut concevoir cette répartition en nombre, N , de photons par cm^2 , en fonction de l'énergie de ces photons.

Supposons que les pertes par réflexion sont négligeables, que tous les photons d'énergie, u , supérieures à ΔE donnent des paires électron-trou et que tous les porteurs obtenus contribuent au courant photovoltaïque.

La densité de courant est $J_E = q \int_{\Delta E}^{\infty} \left(\frac{dN}{du} \right) du$
 E se rapporte à l'unité de surface.

J_E : intensité de courant par unité de surface de cellule éclairée.

En réalité, J_E est corrigé par un facteur k , tel que :

$$J_E \cdot k = j_E$$

Quand l'énergie comprise entre 0 et ΔE est perdue, et si u est légèrement supérieure à ΔE , $u - \Delta E$ est cédée à l'électron sous forme d'énergie cinétique, qu'il perd par choc. Ce qui contribue à augmenter la température du cristal.

$$\text{Puissance totale reçue} = \int_{\Delta E}^{\infty} u \left(\frac{dN}{du} \right) du.$$

Puissance reçue sous forme de photons $= A\bar{E} \int_0^{\infty} \left(\frac{dE}{du} \right) du$

Rendement de transfert: η .

$$\eta = \frac{\Delta E \int_0^{\infty} \left(\frac{dE}{du} \right) du}{\int_0^{\infty} u \left(\frac{dE}{du} \right) du}$$

η est maximum pour $1 < \Delta E < 1,2$ eV

Pour le silicium $\Delta E = 1,09$ eV.

$\frac{\Delta E}{q}$ = tension de court-circuit,

i_F = courant de court-circuit

d'où la puissance correspondante au court-circuit est $\frac{\Delta E}{q} i_F$

η = rendement de jonction.

$$\eta = \frac{U_m i_m}{\frac{\Delta E}{q} i_F}$$

$i_m U_m$ = puissance effectivement recueillie aux bornes de la cellule.

Pour réaliser une photopile solaire, on dope un bancan cylindrique de Si, on le découpe en plaquettes minces. Ensuite ces plaquettes sont portées à haute température dans un four parcourent par un courant d'anhydride phosphorique, (P_2O_5), qui cède son phosphore, ce qui permet d'obtenir une couche n. Ensuite les cellules sont connectées en batterie par

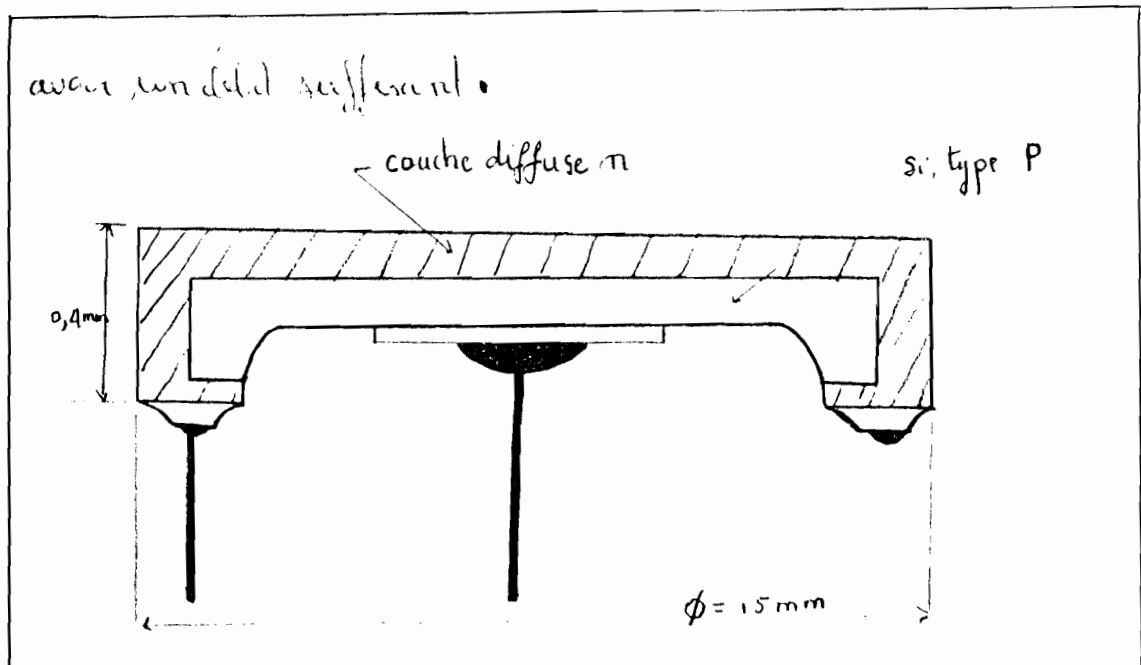


FIGURE 24. Réalisation d'une photopile solaire au silicium.

Dans la réalisation d'une photopile, le but est toujours d'établir un compromis entre la résistance série et l'efficacité de collection.

II.3.3 : -- Les thermopiles silices.

-- La production d'électricité est due à l'augmentation de température du récepteur.

Deux métaux soudés en deux points et portés à des températures différentes, donnent une différence de potentiel entre les soudures, ce qui constitue un thermocouple. Si t_0 est la température de la soudure froide et t celle de la soudure chaude, la

d.d.p. $\mathcal{E}(t)$, est à peu près parabolique.

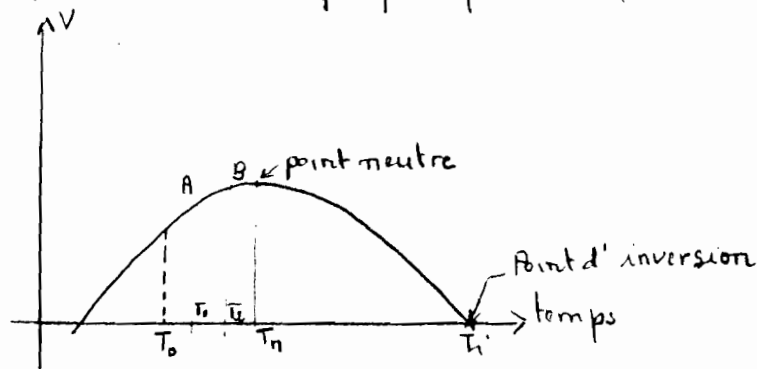


FIGURE 25: la d. d. p. aux bornes d'une thermopile

Si on sépare les deux éléments du thermocouple par les axes par un pont métallique, l'expérience montre que si les points A et B sont à la même température, on a la même différence de potentiel, (d.d.p.), que s'ils étaient réunis: c'est la loi des milieux intermédiaires. Les points A et B sont les points de soudure.

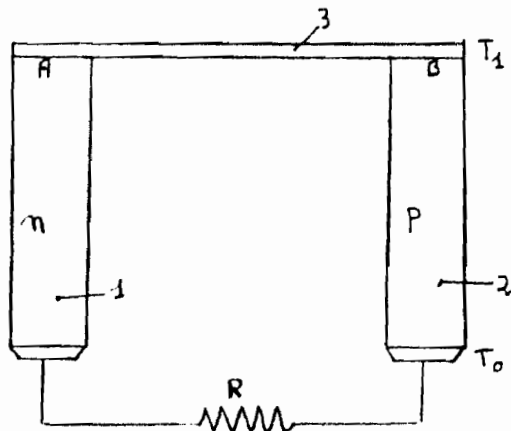


FIGURE 26: Schéma d'une thermopile solaire

Cette thermopile est constituée par deux barreaux: un de type

n (indice 1) et l'autre de type P (2) ils sont joints par un pont métallique (3) qui constitue la soudeuse chaude.

T_1 et T_0 sont les températures des sections chaude et froide, l est la longueur des barreaux, R la résistance de charge, S_1 et S_2 les sections des barreaux

Pour chaque barreau α = le pouvoir thermoélectrique

α et $1/\rho$ les conductivités thermique et électrique.

$1/k$ et r les résistances thermique et électrique

α_1, ρ_1 et α_2 sont supposés, dans une première approximation, indépendants de la température, $\alpha_1 < 0$ et $\alpha_2 > 0$; on

$$\rho = |\alpha_1| + |\alpha_2|$$

$$r = r_1 + r_2$$

$$k = k_1 + k_2$$

— La tension thermoélectrique aux bornes du thermocouple est: $V = \alpha (T_1 - T_0)$

— Le courant qui parcourt le circuit est: $I = \frac{\alpha (T_1 - T_0)}{R + r}$

R = résistance de charge

r = résistance du thermocouple.

— La puissance électrique recueillie est $w = \frac{R \alpha^2 (T_1 - T_0)^2}{(R + r)^2}$

En négligeant l'énergie Joule, l'énergie consommée par unité de temps à la lecture est la somme de q_1 et q_2 :

$$q_1 = d I T_1 \quad \text{énergie de Peltier}$$

$$q_2 = K (T_1 - T_0) \quad \text{énergie transférée par conduction thermique.}$$

Le rendement $\eta = \frac{W}{q_1 + q_2}$, si on pose $\frac{R}{\pi} = M = \sqrt{1 + TZ}$.

$$Z = \frac{d^2}{(\sqrt{\alpha_1 \rho_1} + \sqrt{\alpha_2 \rho_2})^2} \quad (\text{degre})^{-1}$$

$$\eta = \frac{T_1 - T_0}{T_1} \left[\frac{M - 1}{M + 1} \right]$$

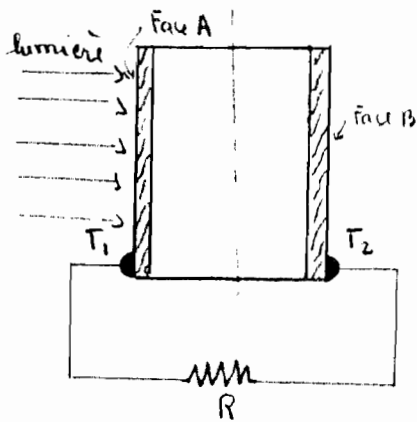
Le rendement est faiblement modifié en tenant compte de l'énergie Joule.

On voit que pour augmenter le rendement, il suffit d'augmenter Z , ou T_1 . Or l'augmentation de T_1 n'est qu'un problème de concentration de l'énergie solaire.

Z , appelé facteur de mérite, ne dépend que du matériau semi-conducteur choisi.

D.3.3 : Les récepteurs thermioniques :

Ils sont basés sur le phénomène "effet Edison" selon lequel tout métal porté à haute température émet des électrons.



T_1 = Température élevée

T_2 = Température basse

R = la charge

FIGURE 27: Schéma d'un récepteur thermoelectrique

Si ϕ est le potentiel d'extraction de l'électron,

$q\phi$ = énergie nécessaire pour extraire un électron.

J = densité de courant $J = nT^2 e^{-\phi/kT}$

n et k sont des constantes.

T = température de la face.

Un récepteur thermoelectrique est donc un dispositif qui reçoit la chaleur à haute température sur une face, la restitue à plus basse température et crée une e.d.p. entre les deux faces.

$$v = \phi_A - \phi_{AB} - \phi_B$$

II-3. 4) Conversion de l'énergie solaire en électricité, avec conversion thermique préalable.

Pour la conversion thermique, on peut employer des isolateurs plans ou des miroirs concentriques.

On peut procéder par conversion thermoelectrique ou redisolant.

Dans la conversion thermodynamique, on utilise des machines thermiques solaires couplées avec des générateurs électriques.

Le principe de la conversion eolienne consiste à provoquer par chauffage d'air au moyen d'évaporateurs plans, un courant d'air ascendant, capable d'actionner un aéro-moteur.

Dans les générateurs thermodynamiques solaires, un circuit fermé, constitué de deux conducteurs faits de métaux différents et raccordés par des soudures, devient le siège d'un courant électrique continu, s'il existe entre les deux soudures une différence de température.

Un générateur thermodynamique est formé d'un certain nombre de couples, chacun d'eux étant formé de deux thermocouples, l'un de type P, l'autre de type N, reliés par un pont métallique en contact avec la source chaude. Les autres extrémités sont reliées à une résistance et maintenues à la température de la source froide.

e = pouvoir thermodynamique.

$$P = \frac{E}{T_2 - T_1}$$

E = force électromotrice du thermocouple ouvert.

T_2 et T_1 sont les températures absolues des sources chaude et froide.

Pour améliorer le rendement d'un thermocouple,

il faut utiliser un matériau de faible conductivité calorifique κ , et de faible résistivité ρ . Il faut aussi tenir compte de la relation de Wiedemann-Franz-Lorenz.

$$\boxed{K \cdot \rho = 2,45 \cdot 10^{-8} \text{ T}} \quad \text{relation de Wiedemann-Franz-Lorenz}$$

$T =$ moyenne arithmétique entre T_2 et T_1 .

II. 4 : CONVERSION DE L'ENERGIE SOLAIRE EN ENERGIE MECANIQUE.

Un moteur thermique solaire est une machine fonctionnant entre une source chaude et une source froide. La source chaude reçoit sa chaleur du soleil. Les fluides employés peuvent être la vapeur d'eau, le gaz ammoniac, le gaz sulfuré etc...

Le rendement théorique est $1 - \frac{T_2}{T_1}$. Il est d'autant meilleur que T_2 est grand, cette dernière étant limitée par les pertes thermiques. On arrive à obtenir des rendements de 26% à 62%.

Pour les petites machines à vapeur solaire, on peut employer les miroirs cylindro-paraboliques suivant le développement apparent du soleil.

Le système de moteurs solaires est applicable pour action-

par des pompes de puits, des pompes d'irrigation, pour produire de l'électricité de l'industrie.

II. 4. 1: Pompe solaire, actionnée par un moteur thermique solaire.

Une telle pompe est actionnée par un moteur selon le cycle de Carnot, entre une source chaude constituée par une batterie d'insolateurs et une source froide, constituée par de l'eau souterraine pompée.

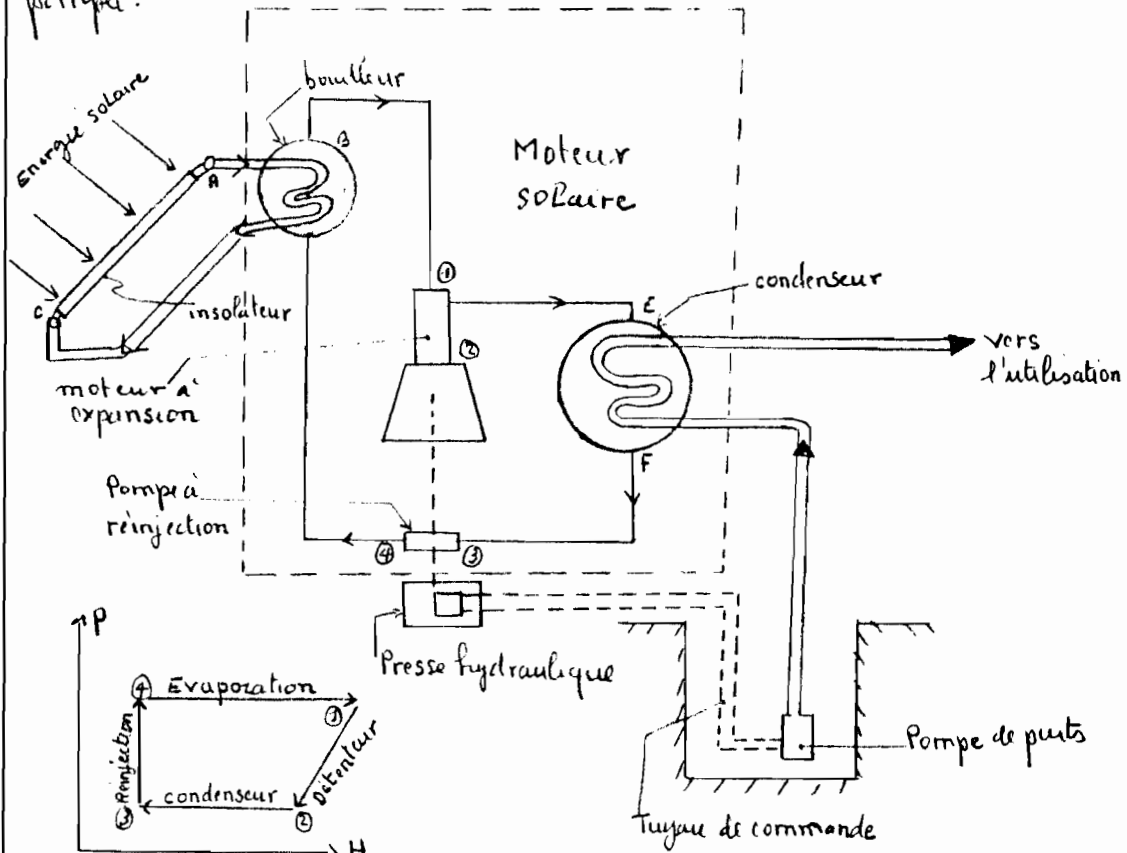


FIGURE 28 : Schéma d'un ensemble de moteur et pompe solaires.

Une pompe solaire comprend :

- une batterie d'accumulateurs, destinés à chauffer de l'eau circulant par thermosiphon,

- un moteur solaire transformant l'énergie thermique en énergie mécanique par un cycle thermique à température peu élevée.

- une hydropompe destinée à l'aspiration, comprenant une prise hydraulique près du moteur solaire, et une pompe à piston à commande hydraulique au fond du puits.

- Le moteur comprend :

- un évaporateur, ou bouilleur, dans lequel le fluide moteur se vaporise à haute pression,

- un moteur à expansion dans lequel se dilate le gaz sortant de l'évaporateur. Ce qui sert à entraîner l'hydropompe et la pompe à injection,

- un condenseur où le gaz dilaté se liquéfie, sous l'action de l'eau froide venant du puits,

- une pompe de réinjection destinée à renvoyer le gaz liquéfié du condenseur vers l'évaporateur, sous haute pression.

II. 4.2: - Les moteurs solaires à air chaud.

Ces moteurs ont un défaut important entre le rendement

théorique et le rendement effectif. Il doit donc avoir possibilité d'améliorer le dernier.

On distingue les moteurs à cycle fermé de ceux à cycle ouvert.

Dans le premier cas, l'air venant de l'atmosphère est comprimé dans un espace froid, puis mis en contact avec une source de chaleur. Il se dilate ensuite en fournissant du travail et est finalement mis en contact avec une source froide.

Dans le système à "cycle ouvert", l'air de l'atmosphère est introduit dans un milieu chaud. Il s'échauffe, et se dilate dans le temps moteur pour retourner finalement à l'atmosphère.

II. 5: ASPECTS ECONOMIQUES:

Les facteurs caractérisant la valeur économique d'un appareillage solaire sont:

- La durée d'utilisation pour un "ensoleillement type" et pour une implantation donnée.

- La puissance nominale, P_n ,

- l'énergie annuelle extraite, W

$$W = P_n \cdot U \quad , \quad U = \text{durée d'utilisation,}$$

- la surface totale occupée au sol, ramenée à l'unité de puissance nominale.

- les dépenses unitaires d'exploitation,
- la durée de vie de l'appareillage

On appelle rendement annuel moyen $\frac{w}{w_i}$.

w = l'énergie extraite annuelle

w_i = l'énergie solaire incidente annuelle.

- Les divers aspects économiques sont :

- plus les combustibles fossiles coûtent cher, plus les utilisations de l'énergie solaire sont économiquement intéressantes.

- bien que l'énergie solaire incidente soit gratuite, il faut que l'investissement et les frais d'entretien ne dépassent pas un certain niveau. Pour faire une comparaison entre deux appareillages analogues, un à énergie solaire, l'autre à source classique, il faut tenir compte du lieu de l'installation, du prix du combustible, du coût de la main-d'œuvre nécessaire pour construire ou installer les appareils.

On appelle indice d'utilité de l'énergie solaire, en un lieu donné, le rapport du prix du combustible le meilleur marché au coût de l'ensemble des matériaux et de la main-d'œuvre.

- les coûts des isolateurs plans sont variables selon les constructeurs, selon qu'il s'agit d'isolateurs simples,

ou composés, ou des séries verticales incorporées dans les murs des façades.

- les jours solaires à très hautes températures peuvent être économiques à condition que le problème de transport pour les matières premières et les produits finis, soient résolus d'une façon économique.

REFERENCES:

II.1 Applications en hautes températures

- L'énergie solaire, par Roger Puytman: pages 33 à 59
- Utilisations & promesses de l'énergie solaire, par J. R. Vaillant: pages 113 à 117.

II.2 Applications en basses températures.

- L'énergie solaire par Roger Puytman
pages 95 à 101, 101 à 116.
- Utilisations & promesses de l'énergie solaire, par J. R. Vaillant: pages 230 à 236, 215 à 219, 201 à 214, 237 à 242, 243 à 250.
- L'énergie solaire applications thermiques dans le domaine de la recherche et de l'industrie:

pages 451 à 464

- Oceanography, with contributions by J. Robert Thomas

page 341.

II.3 Production d'électricité

- L'énergie solaire, par Roger Feytaud : Pages 66 à 77,

81 à 114,

- Utilisations et promesses de l'énergie solaire, par J. B. Vaillant

pages 158 à 159, 170 à 175

- L'énergie solaire applications thermiques dans le domaine de la Recherche et de l'industrie : pages 698 à 707.

II.4. Conversion de l'énergie solaire en énergie mécanique :

- utilisations et promesses de l'énergie solaire pages

133 à 156.

II.5: aspects économiques

- utilisations et promesses de l'énergie solaire pages 253

à 265.

CHAPITRE III : BIBLIOGRAPHIE DES TRAVAUX EN ENERGIE SOLAIRE :

Il n'y a qu'à quelques années, seulement que l'énergie solaire peut apparaître comme une solution viable pour l'utilisation dans la satisfaction de certains de nos besoins énergétiques, de systèmes solaires économiquement rentables ce qui explique peut être la multiplication des recherches et de la littérature concernant l'énergie solaire, depuis quelques temps.

III - 1 : LES OUVRAGES GENERAUX :

Certains de ces ouvrages étudient les phénomènes physiques de base mis en jeu dans l'utilisation de l'énergie solaire, d'autres, donnent une vision rapide des technologies et de leurs applications possibles.

On peut citer les ouvrages suivants :

• DUFFIE J.A. et BECKMANN W.A. . Solar Energy Thermal Power New York, Chichester, John Wiley and Son, 1974, 386 pages

Ce livre est consacré à l'utilisation des propriétés thermiques du rayonnement solaire. Il étudie les phénomènes physiques mis en jeu, leurs applications et optimisation de système de chauffage et de conditionnement d'air solaire.

• PEYTURON R. . L'Énergie solaire Paris P.U.F., 1975, 2^e édition, 126 pages, collection "Que sais-je", n° 1294 :

Ce livre donne un petit précis des caractéristiques du rayonnement solaire et de ses différentes utilisations. Il décrit de manière brève, des différentes technologies de captation.

- Ecologie n° 3, octobre-novembre 1975, numéro spécial, "L'Énergie solaire", 165 pages

C'est une présentation claire des caractéristiques du rayonnement solaire, et les principales utilisations possibles, telles les applications domestiques et la production d'électricité. Il présente aussi les programmes de recherche de quatre pays (États-Unis, Japon, France, R.F.A.) et des adresses utiles.

- Thèse complémentaire de sciences économiques de Jacques Percebois. L'énergie solaire, perspectives économiques

Paris, C.N.R.S. 1975, 135 pages, collection « Énergie et Société ».

Il donne des aperçus technologiques sur les usages de l'énergie solaire, met en relief les problèmes sociologiques, politiques et économiques liés à la pénétration de l'énergie solaire.

- Un rapport préparé par 35 personnalités de l'industrie, de l'université et de l'administration, sous la conduite scientifique de l'I.S.E.S. et de l'université de Sheffield.

United Kingdom Section of the International Solar Energy Society: Solar Energy a UK Assessment, Londres, mai 1976, 375 pages, publié par U.K. I.S.E.S.

on y mentionne les programmes de Recherche et Développement dans le monde, on y donne les grandeurs physiques et économiques caractéristiques des applications possibles de l'énergie solaire au Royaume-Uni.

III-2: COMMUNICATIONS ET COMPTES RENDUS DE CONGRES ET SEMINAIRES:

On distingue les congrès qui abordent différents thèmes et ceux qui sont consacrés à un thème et un domaine de recherche précis:

- Le congrès de l'I.S.E.S. 75, à Los Angeles a donné naissance au document suivant:

ISES-75: Extended Abstracts Solar Use Now, a Resource for People.
Colloque de Los Angeles, University of California, 23 juillet - 1er octobre 1975. Solar use now a resource for people (extended abstracts)

ERDA ed., 500 pages.

Dans ce document, chaque résumé permet de donner l'essentiel des informations. Il regroupe les communications selon cinq thèmes principaux: - aspects économiques et sociaux,

- rayonnement solaire,
- matériaux,
- chauffage et conditionnement d'air des bâtiments,
- collecteurs à concentration.

Le rapport des séminaires NSF-NASA, sur la conversion photovoltaïque, et celui de la conférence de l'OTAN sur le stockage sont d'un intérêt considérable.

III 3: LES REVUES:

Les revues, sur l'énergie solaire exclusivement, ne sont pas nombreuses. On distingue:

- Solar Energy : un journal bimensuel de l'ISES: The Journal of Solar Energy Science and Technology, publié par Pergamon Press, Headington Hill, Hill, Oxford, OX3 0BW, England. Cette revue regroupe surtout des articles techniques, des projets ou études de réalisations concrètes.

- Les Cahiers de l'AFÉDES (Association Française pour l'Étude et le Développement des applications de l'Énergie Solaire):

Paris, Éditions Européennes "Thermique et Industrielle", 2 rue des Tanneurs, 75013.

Chaque cahier est consacré à un thème traité de manière exhaustive au point de vue scientifique et technique.

III 4 DOCUMENTS SPECIFIQUES A UNE TECHNOLOGIE OU UN TYPE D'UTILISATION:

III 4.1: Utilisation de l'énergie solaire dans l'habitation.

Dans ce domaine, la littérature est assez riche en ouvrages complets, présentant les différentes technologies, les réalisations, les projets, et des méthodologies pour la conception des systèmes de chauffage.

- PATTON P R Solar Energy for heating and cooling of buildings. Patch Ridge, N J., Noyes Data Corp., 1975, 327 pages (Energy Technology Review, n° 7).

Cet ouvrage met l'accent sur les phénomènes physiques de base de façon moindre que celui de Beckman & Giffie cité précédemment. Cependant il donne une idée très précise de l'état de la recherche et des réalisations aux Etats-Unis.

- SZOKOLNY S V Solar energy and buildings. Londres, The Architectural Press, New York, John Wiley and Sons, 1975, 146 pages.

Le livre constitue une excellente introduction au problème de l'utilisation de l'énergie solaire dans l'habitat.

- On peut noter également les intéressantes communications faites à l'Institut National des Sciences Appliquées (I.N.S.A.); Société Française des Thermiciens; Association Française pour

l'Etude et le Développement des Applications de l'Énergie Solaire, colloque de Lyon 6-8 Avril 1976, les échanges thermiques entre un bâtiment et son environnement.

III 4.2: Conversion photovoltaïque de l'énergie solaire:

Il est vrai que la faisabilité technique des photopiles est démontrée, il n'en demeure pas moins que les conditions économiques de leur application restent discutables.

Il n'existe pas beaucoup d'ouvrages synthétiques. On peut seulement trouver des livres purement techniques des photopiles et leur utilisation.

On peut citer

- PALZ, W. : Les applications locales des générateurs solaires photovoltaïques. Annales des Mines, octobre novembre 1974 pp. 65-74.

Dans ce livre, il est envisagé les différents problèmes posés par la fabrication et l'utilisation des générateurs solaires photovoltaïques.

- DURAND H. : L'avenir des cellules solaires au silicium à usage domestique. Onde électrique, 1975, vol 15, n° 3, pp. 161-166.

Dans cet ouvrage, l'auteur précise les perspectives d'évolution des coûts pour les différents postes, dans la fabrication avec des technologies classiques ou nouvelles, avec ou sans concentration.

III 4-3: Quelques réalisations des propriétés thermiques de l'énergie solaire.

Dans l'utilisation par des procédés thermo-dynamiques, il s'agit souvent de documents de recherche très spécifiques. On peut se référer par exemple à :

- Génération de puissance avec l'énergie solaire - Société suisse pour l'énergie solaire. Symposium n° 3, 1^{er} décembre 1975, 194 pages.

Les actes de ce colloque regroupent des communications sur les centrales héliothermiques, les capteurs haute température et le stockage à long terme de l'énergie solaire.

- MARSHALL B W - Analysis of a solar total energy system - Albuquerque N.M., Sandia Laboratories, 1975, 13 pages.

C'est un projet qui permettrait d'alimenter en électricité et en chaleur un groupe de 1000 maisons grâce à une centrale thermo-dynamique solaire et un système de récupération de chaleur au condenseur de la turbine.

Dans le domaine des technologies appliquées au développement, on peut citer les publications de l'ONU sur la distillation solaire :

- " La distillation solaire, un moyen de répondre à la demande en eau à petite échelle " - O.N.U., New York 1970, 85 p.

Le rapport présente les résultats partiels d'une étude sur

les technologies et méthodes de développement, appliquées aux pays du Tiers monde. Il définit les conditions dans lesquelles, la distillation solaire peut apporter une solution économique aux problèmes d'approvisionnement en eau douce dans de petites communautés. Il donne une méthode d'estimation des performances et coûts.

III 4.4 Aspects institutionnels et légaux:

— La documentation concernant ce sujet est encore insuffisante.

On peut cependant noter:

- SCHOEN R., HIRSLBERG H.S., WEINCART J.M.

New energy technology for buildings. Cambridge, Mass., Ballinger Publishing Company, 1975, 217 pages.

Cet ouvrage aborde le problème sous l'angle de l'attitude des bâtiments aux Etats-Unis; et sa structure institutionnelle.

- BRAUN G.W. et al - Assessment of solar heating and cooling for an electric utility company. Pasadena, California Institute of Technology, Southern California Edison Company, Jet Propulsion Laboratory, 1975, 18 pages:

Dans cette note G.W. Braun met l'accent sur les conséquences que pourrait avoir le développement massif du chauffage et conditionnement d'air solaire sur une compagnie d'électricité.

ité aux États-Unis. On a notamment recherché les solutions qui permettraient de diminuer les phénomènes de pointe pour la compagnie d'électricité.

REFERENCE : article de Denise Courard et Patrick Crupin les aspects économiques de l'énergie solaire, bibliographie sélective & critique.

DEUXIEME PARTIE :
RECHERCHE ET EXPERIMENTATION
DE L'ENERGIE SOLAIRE
AU
SENEGAL

CHAPITRE IV : RECHERCHE EN ENERGIE SOLAIRE AU

SENEGAL :

Le début de la recherche et de l'application de l'énergie solaire au Sénégal datent d'assez longtemps. C'est ainsi que des recherches sur les possibilités d'utilisation de l'énergie solaire pour l'extraction de l'eau, effectuées à l'Institut de Physique Météorologique (I.P.M.) de l'université de Dakar, avait conduit en 1963 à l'installation d'un prototype de moto-pompe-solaire.

IV.1: LES CENTRES DE RECHERCHE:

IV.1.1: I.P.M. - l'Institut de Physique Météorologique est l'organisme principal de la coordination. En liaison avec l'Organisation Mondiale de la Météorologie, l'I.P.M. est depuis vingt ans le centre national de mesure et d'étalonnage des instruments de mesure de la radiation globale.

Les thèmes qui y sont traités sont les suivants:

- la transformation de l'énergie solaire en énergie mécanique,
- la production d'air chaud et le séchage des denrées alimentaires,
- la distillation solaire

- le chauffage de l'eau

V.1.2: Le Laboratoire des Semi-conducteurs de la Faculté des Sciences de l'Université de Joliot

Il travaille sur la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire. Les recherches portent sur:

- l'expérimentation et la mise au point d'une station de pompage utilisant des photopiles au silicium.
- la fabrication de photopiles solaires par procédé de pulvérisation chimique et par bombardement électronique.

V.1.3: L'Institut Universitaire de Technologie:

- Les recherches portent sur:

- l'application de l'énergie solaire à l'habitat,
- l'étude des oscillateurs plans
- la conversion par cycle thermodynamique haute température: le but est d'obtenir un cycle fonctionnant à plus de 2000° par un système de conversion par concentration du rayonnement solaire.

- la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire.

V.1.4: L'Enseignement Supérieur Pratique:

Il s'agit d'essais de petites réalisations telles que les petits chauffe-eau solaires, les cuisinières solaires.

Les expériences faites dans ces centres de recherche ont permis d'établir des graphes caractéristiques du rayonnement solaire.

Les graphes ont été établis à l'I.P.M. et les expériences avaient lieu, en majorité, dans la région de Sibérie.

IV.2: GRAPHES DES CARACTERISTIQUES DU RAYONNEMENT SOLAIRE:

Ces graphes ont été établis à l'I.P.M.

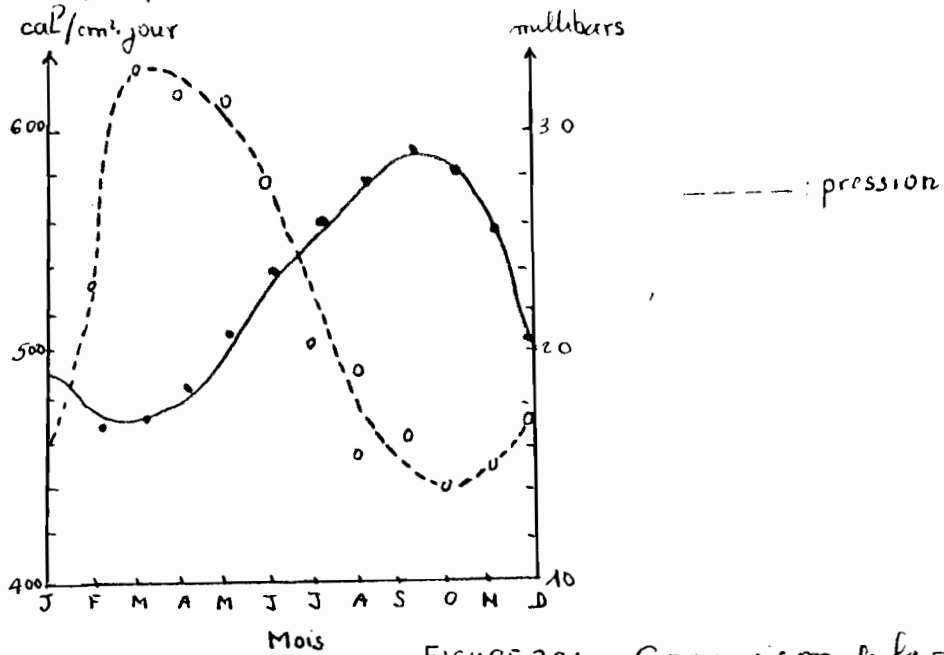


FIGURE 29: Comparaison de la radiation globale à Dakar, en cal/cm²j (trait discontinu) et de la pression de vapeur d'eau en millibars (trait plein), pour l'année 1953

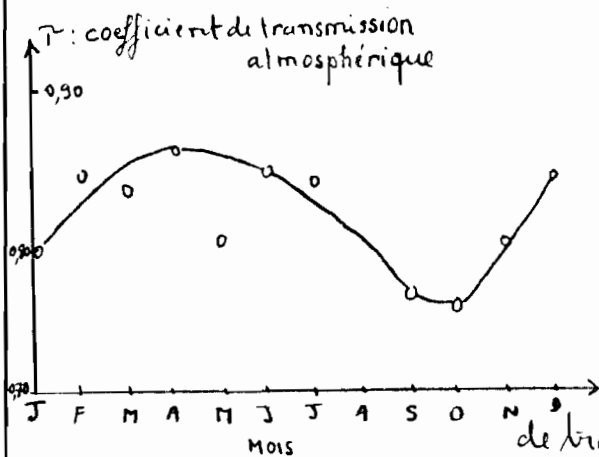
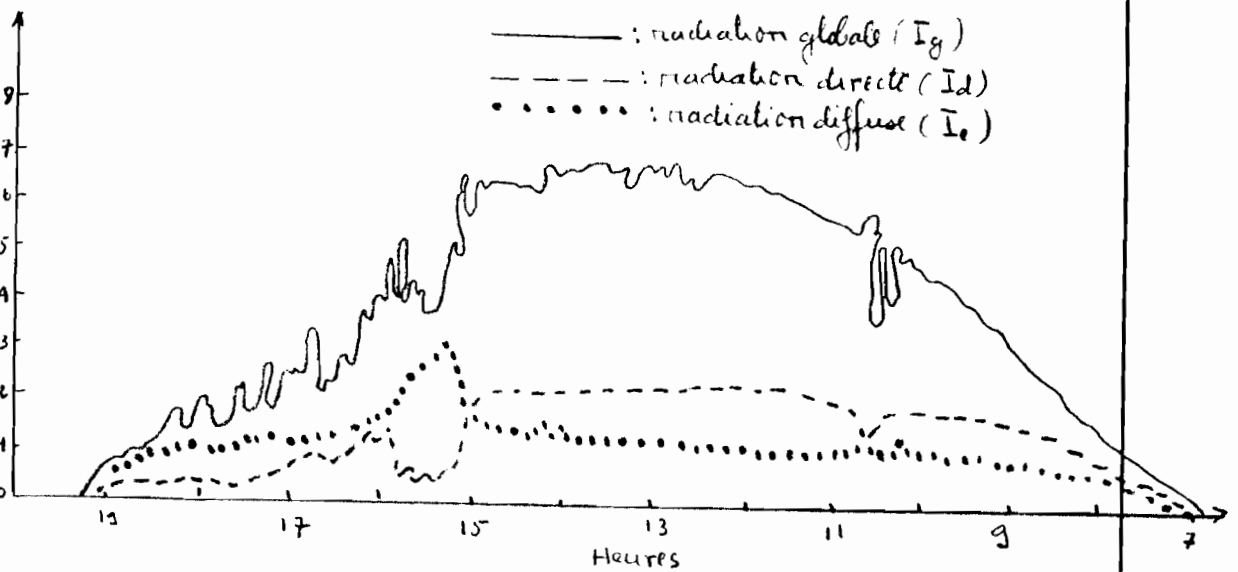
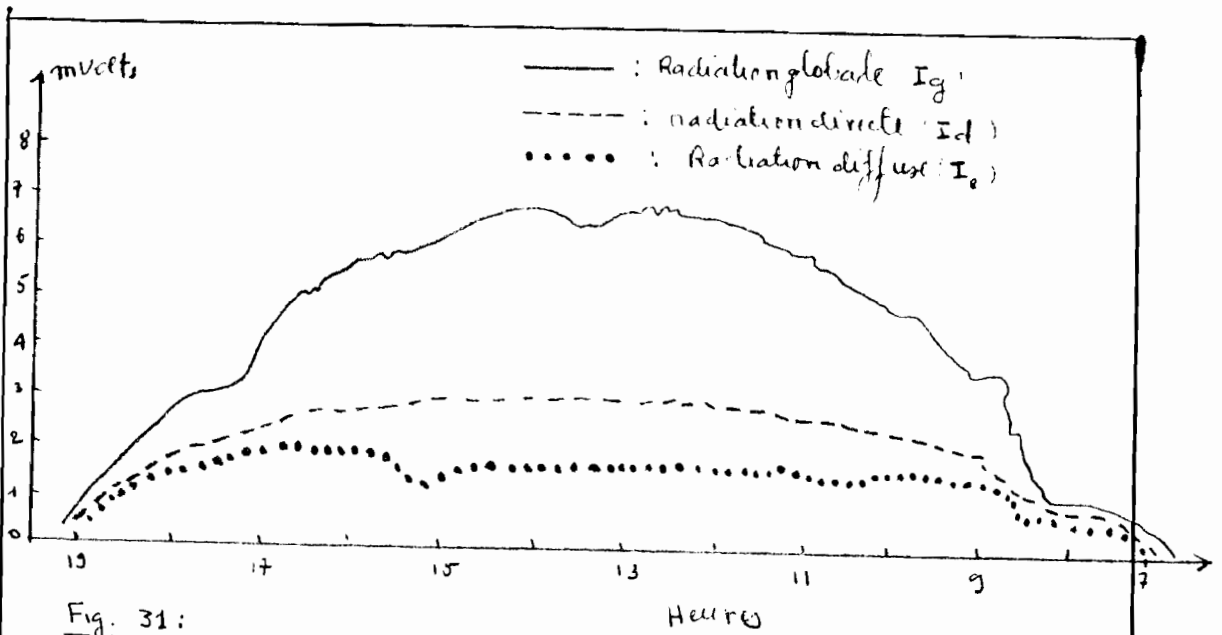


FIG. 30: Valeurs du coefficient de transmission atmosphérique à Dakar durant l'année 1953 (moyennes mensuelles).



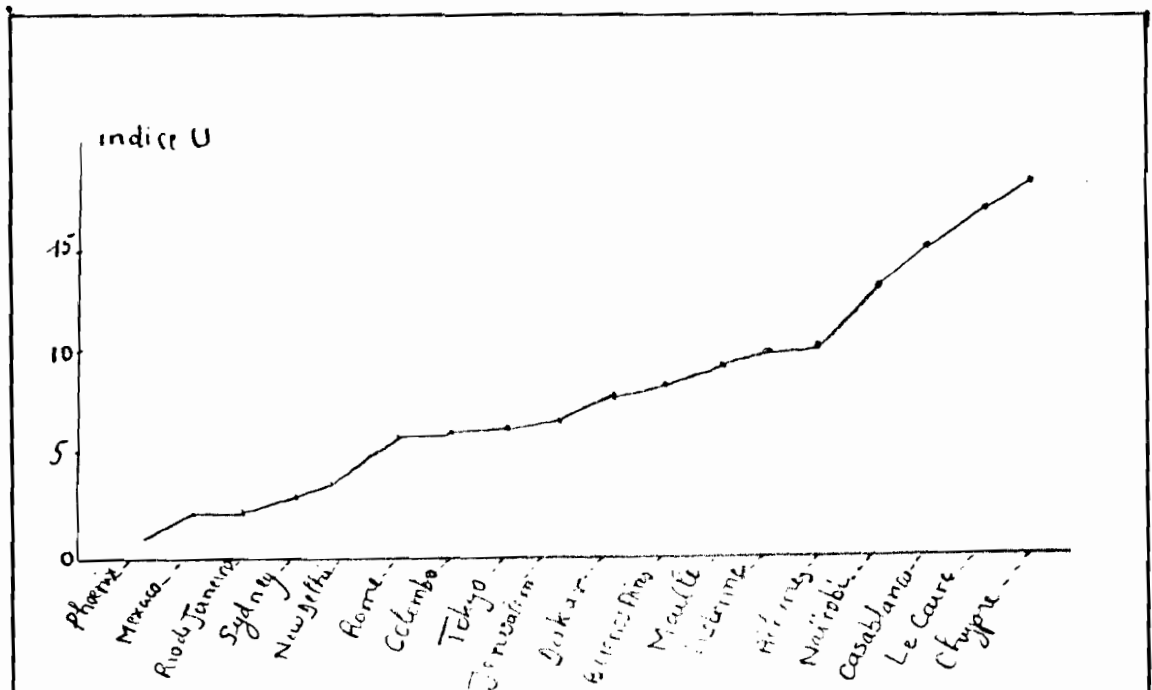


Fig 33: l'indice d'utilité de l'énergie solaire : U

$U =$ rapport du prix du combustible le meilleur marché au prix de l'ensemble main-d'œuvre et matières premières.

IV-3: RECHERCHE SUR LES POMPES SOLAIRES:

Il s'agit d'utiliser l'énergie solaire pour apporter une solution au problème de l'alimentation en eau des petites collectivités de la zone tropicale.

Le principe de fonctionnement d'une pompe solaire est le suivant.

On prend comme exemple, une pompe solaire expérimentée à la Faculté des Sciences de Jathar. C'est, en réalité, une moto-pompe.

La partie moteur fonctionne sur le principe de la machine à vapeur, la chaudière étant remplie par l'isolateur.

La pompe est une pompe à piston entraînée directement par le moteur.

- L'eau du puits sert à refroidir le fluide moteur.

- L'isolateur plan utilisé est constitué de grandes plaques planes exposées au soleil, soudées à des tubes dans lesquels circule le fluide.

Partie moteur - L'énergie solaire est captée par l'isolateur plan, dans lequel se trouvent des tubes où circule le fluide moteur qui est amené à se vaporiser. Cette vapeur est dirigée vers un moteur à expansion où elle fournit de l'énergie en passant d'une pression P_1 à une pression plus basse P_2 .

- Le fluide au condenseur où il se refroidit est contact de l'eau du puits. La pompe de compression, actionnée directement par le moteur amène le fluide vers l'isolateur.

Partie pompe - C'est une pompe à piston placée au fond du puits. Elle aspire l'eau du forage vers le condenseur, laquelle eau est envoyée vers un réservoir où elle peut être utilisée par les usagers.

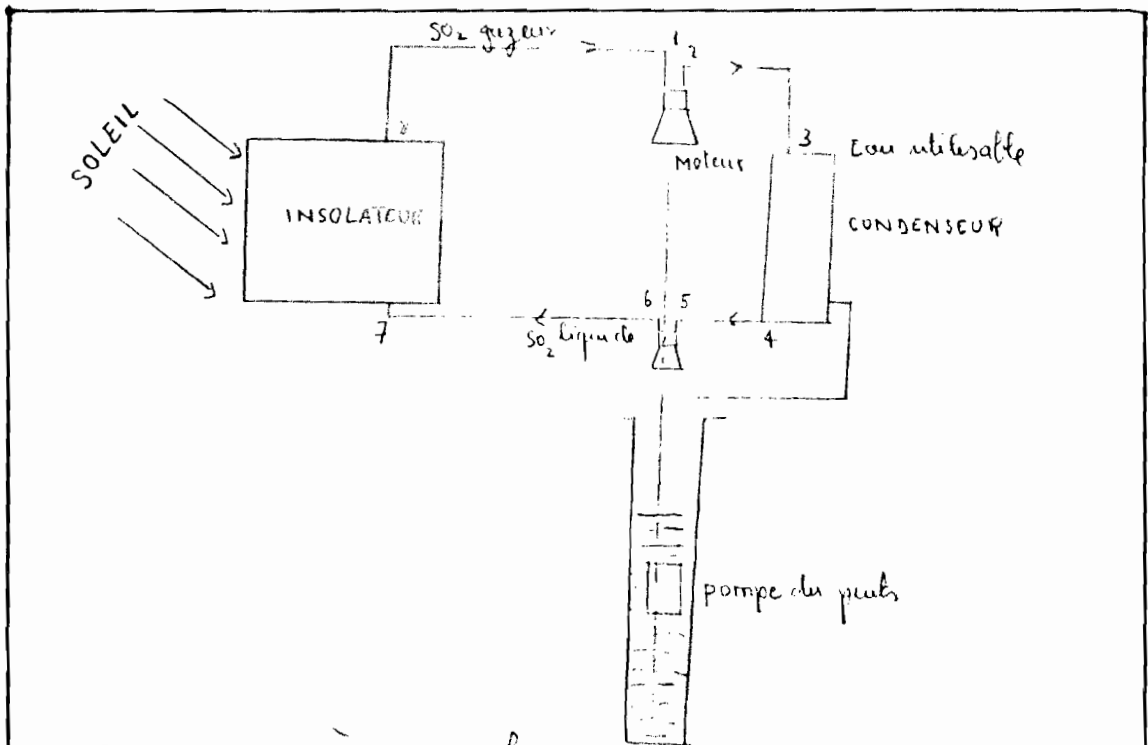


Fig 34: première pompe solaire
expérimentale de l'Université de Gakur

Principe de fonctionnement: Considérons le diagramme de
Müller α -Log p., comme diagramme de travail. On sup-
pose que l'expansion se fait à enthalpie constante.

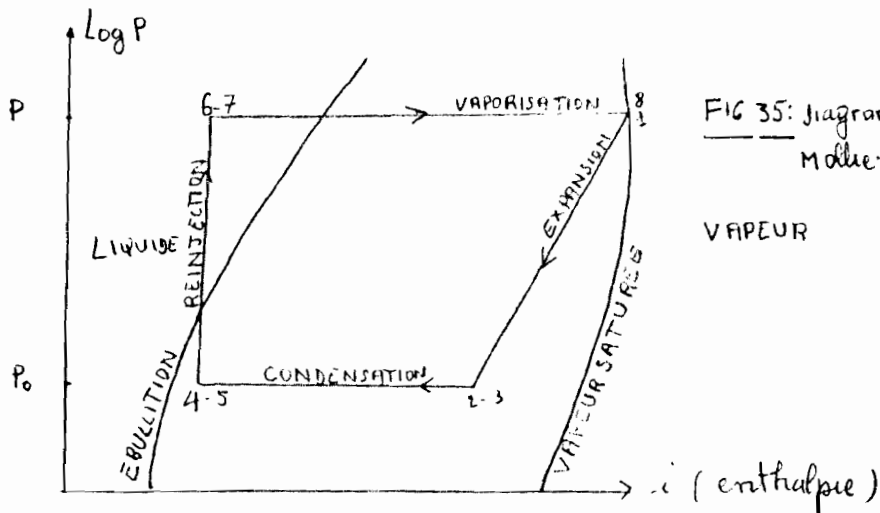


FIG 35: diagramme de
Müller

VAPEUR

La puissance fournie pendant l'expansion est de

$$P = (i_1 - i_3) G$$

i = enthalpie par kg de charge comme $i = \text{Log } P$

G = débit du fluide

L'expansion telle qu'indiquée sur la figure 35 est vraie pour le système continu. Pour un système non continu, tel que le moteur à piston, nous avons si le clapet d'admission s'ouvre le gaz pénètre dans la chambre et pousse le piston, la pression varie peu car le volume de la chambre est très petit relativement au volume contenant le gaz à la pression P . C'est le temps de travail du gaz.

Si le clapet d'admission se ferme et que celui d'échappement s'ouvre, le gaz prend immédiatement la pression du condenseur, ce sans fournir de travail, donc à enthalpie constante.

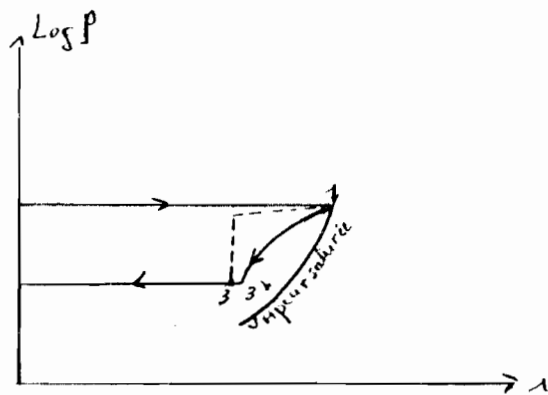


Fig. 36 : Trait continu : moteur à piston réel
 ----- : moteur à piston idéal.

Les différentes phases de fonctionnement

- la vaporisation: le fluide circule dans l'évaporateur, dans des tubes exposés au soleil. La pression y est constante.

On suppose que la vapeur sort de l'évaporateur à la pression de la vapeur saturée. Nous avons donc: $H_1 - H_2 = (v_1 - v_2) =$ le nombre de kilocalories que le soleil a effectivement transmises au fluide. Dans l'évaporateur, on néglige les pertes de chaleur dans les tubulures, les points 1 et 2 sont confondus.

- l'expansion: le fluide arrive dans le moteur à la pression P_1 et à la température T_1 . Il en sort à la température T_2 et à la pression P_2 . En réalité, T_1 et T_2 sont différentes, mais assez voisines pour permettre de faire l'approximation suivante: une détente de P_1 à P_2 isothermique.

$$\left[P = CRT \text{Log}_e(P_1/P_2) \right]$$

P = puissance fournie

T = température moyenne entre T_1 et T_2

R = constante des gaz parfaits

v = débit du fluide

Il faut noter qu'à cause de la légère condensation dès le début de l'expansion, la formule précédente n'est pas exacte. Cette formule sera plus tard utilisée pour les

essais à moteur alimenté par l'air comprimé.

La seconde approximation, plus conforme à la réalité est de considérer la détente comme étant isentropique

- la condensation du gaz va se liquéfier au contact de l'eau du forage. Le fluide passe de i_3 à i_4 . Il faut donc enlever au fluide $i_3 - i_4$ kcal/kg.

- la compression elle se fait dans la petite pompe de contre pression. Elle peut aspirer le fluide qui n'est pas entièrement à l'état liquide. La liquéfaction ^{est} incomplète pendant la période de compression, précéderait le refroidissement vers l'évaporateur. Comme l'énergie fournie à la pompe est faible, on peut considérer que le passage de P_0 à P_0 est isenthalpique.

Le rendement thermique est défini comme étant le rapport entre la quantité de chaleur $i_5 - i_7$ reçue par le fluide dans l'évaporateur à la pression du moteur en supposant l'expansion isentropique

$$\eta_{Th} = \frac{i_5 - i_3}{i_8 - i_7}$$

IV.4: RECHERCHE SUR LES CHAUFF-EAU SOLAIRES:

Le principe schématisé est celui de la thermosiphon.

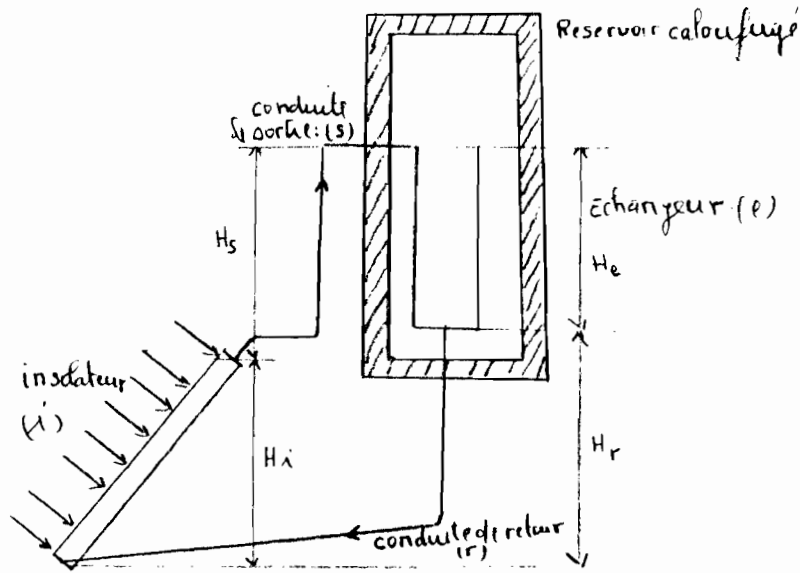


Fig. 37. Schéma du circuit du thermosyphon.

Le circuit comprend :

- un isolateur dont les caractéristiques sont affectées de l'indice (i) ;
- un échangeur dont les caractéristiques sont affectées de l'indice (e) ;
- une conduite de sortie de l'isolateur dont les caractéristiques sont affectées de l'indice (s) ;
- une conduite de retour à l'isolateur, dont les caractéristiques sont affectées de l'indice (r) .

Le thermosyphon provient alors de l'équilibre des températures le long du circuit qui engendre une variation de la densité et de la viscosité du liquide. Ce qui crée aussi la circulation de ce dernier.

La performance du thermopile est la suivante

$$\frac{q_w \Delta \theta c_p}{w} = \mu_i H_i$$

$\Delta \theta = \theta_s - \theta_r$, θ_s = température de sortie de l'isolateur

θ_r = température de retour à l'isolateur

q_w = débit volumétrique du fluide caloporteur (fluide chargé d'évacuer la chaleur).

w = masse volumique du fluide caloporteur.

H_i = puissance effective par unité de surface, reçue à l'isolateur.

μ_i = le rendement de l'isolateur.

Pour l'eau, nous avons.

$$\frac{q_w}{w} = 1,452 \times 10^{-2} \frac{\mu_i H_i}{\Delta \theta} \quad (\text{l/min})$$

REFERENCES:

IV.1. Les centres de recherche:

- Note sur l'énergie solaire au Sénégal, par Gerard Madon, ingénieur-chercheur à L' I. P. M

IV.2. Graphes des caractéristiques des R.S.

- L'Énergie solaire et ses applications, par

H. Nasson

IV-3. Recherche sur les pompes solaires.

- Les Pompes solaires par Jean Pierre Girardier

IV-4. Recherche sur les chauffe-eau solaires

- Chauffe-eau solaire à échangeurs de chaleur. Etude
de Thermophon, par J. Tall, E. Guenier, J. Jaume et E. Hurlon.

CHAPITRE V : EXPERIMENTATION EN ENERGIE SOLAIRE AU

SENEGAL

Les essais d'expérimentation se font essentiellement dans les centres de recherche très récemment.

V-1 : L'EXHAURE DE L'EAU :

Il s'agit des essais de propulse de l'eau de pluie.

Moteur SEMOR : c'est le premier moteur mis à l'essai et utilisait comme fluide le gaz sulfureux, exposé directement aux rayons solaires. Il présentait deux inconvénients.

- il fallait une grande quantité de fluide, car la surface d'insolation était grande.

- le gaz sulfureux est très toxique et une fuite dans le circuit pouvait être catastrophique.

Le procédé a été abandonné.

Moteur SECRA : c'est le moteur mis au point à la suite de la préparation d'une thèse à l'I.P.H. d'un jeune ingénieur électrotechnicien de Zurich, Mr Girardier.

Dans ce moteur, l'eau est utilisée comme véhicule pour transporter la chaleur depuis l'isolateur jusqu'au fluide proprement dit ; ce fluide moteur était du chlorure de méthyle.

SECRA a fonctionné jusqu'en 1965.

Pour la station à moteur SECRA, la surface réchauffée de l'insulateur est de 1 m^2 , et le débit de 100 l/h .

Tous prototypes ont été fabriqués fonctionnant sur le principe de SECRA.

- Le moteur ITTEC. La surface d'insulation était de 300 m^2 . Le chlorure de méthyle a été remplacé par du fréon 12, le moteur à expansion par un turbo-alternateur, et la pompe de puisage a été actionnée par le courant produit.

ITTEC fut un échec car l'extrapolation était trop importante. Le fréon se voit une température critique trop voisine de celle obtenue à l'insulateur, les sécurités étaient insuffisantes, les pertes dues à la production d'hydrogène étaient trop importantes.

- Le moteur NADSE. C'était un modèle plus proche du moteur SECRA. La surface d'insolation était de 10 m^2 et une surface comme celle permettait une hauteur de relèvement de 15 m , et un débit de 1000 litres/h .

Le moteur était à piston à échappement latéral. De ce modèle on a tiré un prototype industriel: SEGAL.

- Le moteur SEGAL Il est en service au laboratoire de Babou depuis mars 1969. Il comprend une batterie d'isolateurs qui chauffent l'eau qui circule par thermosiphon

à une température de sortie de 65 à 70°C.

- Les isolateurs de SECAL ont une surface de 83 m² et comptent 44 éléments.

L'échangeur est tubulaire, vertical, de hauteur de 3,5 m environ et de diamètre 50 cm, avec une pression à l'épaisseur de 30 bars.

- Le moteur est à gaz à piston et compte deux cylindres en ligne, d'un volume de 1000 cm³.

- La pompe de réinjection est directement couplée sur l'arbre-moteur.

- Le condenseur est du type tubulaire en U de longueur 2,50 m et de diamètre 40 cm.

- La pompe des puits est à piston, à commande hydraulique, placée au fond du puits.

Quatre unités de pompage solaire de petites puissances pour l'hydraulique villageoise ont été installées en milieu rural depuis 1977: à Méroua Sakhar, Nukheine et Héouane dans la région de Thies, Diagbé dans la région du fleuve.

Il faut noter également le projet de la station de pompage de Sakha.

V. 2 : LES CHAUFFE-EAU SOLAIRES :

C'est dans le domaine des chauffe-eau solaires que l'application de l'énergie solaire est le plus facilement réalisable.

Description des appareils. Les chauffe-eau solaires sont du type thermosiphon, et utilisent des modules plans à effet de serre, mais au point et réalisés au Singul.

Les chauffe-eau comprennent:

- un réservoir de stockage en amonali-urium calorifugé par de la mousse de polyuréthane avec, au sens, échangeur. Il est monté sur un piedement métallique.

- des modules isolateurs d'une surface utile de 2 m^2 composés d'un bac support en amonali-urium, d'une couche isolante de mousse de polyuréthane, sur laquelle repose le capteur en tôles d'acier parallèles. La face inférieure du capteur est de couleur noire mat.

L'effet de serre est assuré par un verrouillage simple ou double selon l'option. L'anchorage est assuré par un mastic au silice.

- Le capteur est protégé de la corrosion par un système anti-rugine.
- Les modules isolateurs sont inclinés de 15° et reposent sur des supports métalliques.

- Les liaisons de liaison des isolateurs au réservoir calorifugé sont en tubes d'acier isolés par des aiguilles moulées en mousse de polyuréthane.

- Les gammes des ches (chauffe-salaires), sont:

- Le ches 200 1. capacité 200 litres/h, un module isolateur

- Le ches 300 2. capacité 300 litres/h, deux modules isolateurs

- Le ches 500 3. capacité 500 litres/h, 3 modules isolateurs.

Les ches assurent quotidiennement un chauffage jusqu'à 60°C pour les appareils à simple vitrage, 80°C pour ceux équipés d'un double vitrage.

Etude expérimentale d'un prototype de chauffe-salaires: cette étude a été réalisée dans le but de vérifier le modèle mathématique du thermoplane et afin d'analyser les performances en fonction des caractéristiques géométriques:

Montage:

- L'isolateur est formé de deux modules qui sont montés en parallèle, placés dans un bac en bois et recouverts d'un simple vitrage

- L'échangeur est formé de deux cylindres coaxiaux en tôle mince

- Les conduites sont en tubes ronds d'acier pur

soudure et partiellement en ductile pour permettre la souplesse et les modifications du montage.

- le réservoir d'eau chaude et son fût en acier galvanisé d'une contenance de 225 litres.

- une vanne d'expansion et branchée sur le circuit fermé isolateur-échangeur.

- l'isolation de l'isolateur, des conduites et du réservoir est assurée par de la laine de verre.

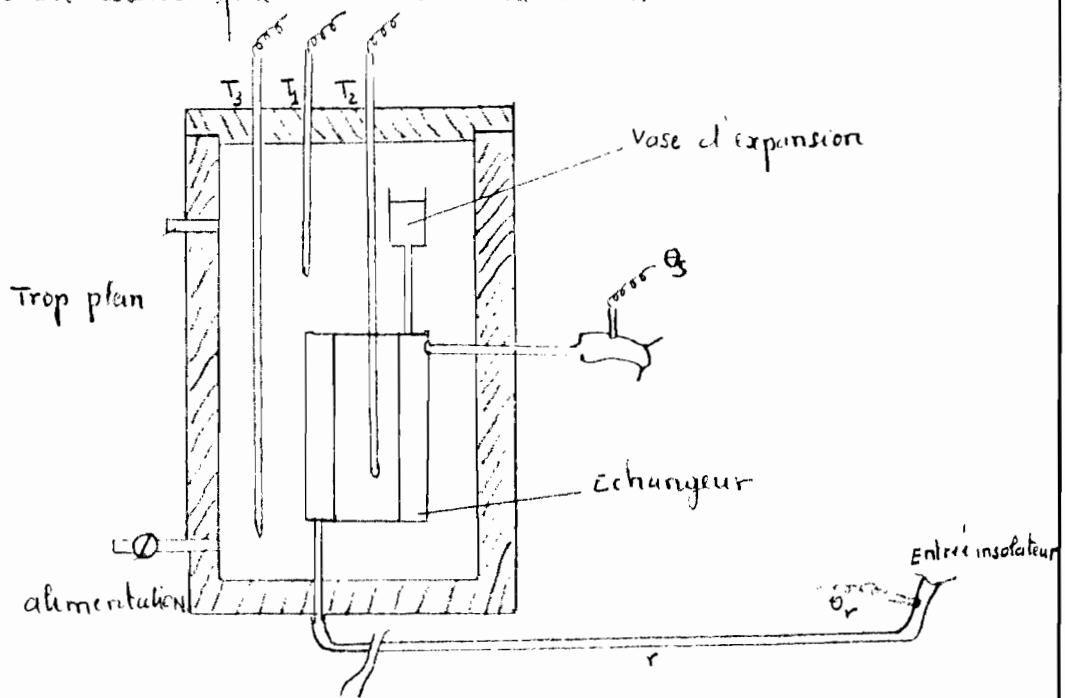


Fig. 38 : Montage expérimental du réservoir

- les positions relatives de l'isolateur et de l'échangeur par rapport à l'horizontal, sont mesurées par un niveau à bulle et une règle graduée.

- La vitesse de circulation du fluide est simulée à travers une portion de la conduite (1) en verre par injection ponctuelle d'un colorant.

- Les mesures de température sont obtenues par thermocouple et enregistreurs.

Résultats expérimentaux:

Les essais consistent à déterminer l'évolution du thermosiphon par l'intermédiaire de son débit et de l'écart de température, ainsi que les températures de l'eau en différents points à l'intérieur du réservoir, au cours de la journée, et sous qu'il ne soit affecté de sautoys, ou pour plusieurs jours. On fait ensuite la moyenne.

Les expériences ont été faites pour H_s et H_r (voir Fig. 37) fixes, $\Delta O_{T_{H_r}}$ du thermosiphon sont pris à différentes heures de la journée.

En temps relatif vrai (T.S.U.), le rendement de l'échangeur est supposé égal à 100%.

Pour les courbes de la figure 39, qui sont, les enregistrements ont été faits, jour et nuit.

$\Delta O_{T_{H_r}}$ = écart de température obtenu par l'application du modèle mathématique du thermosiphon.

$\alpha =$ angle d'inclinaison du rayonnement de la cellule
 recevoir solaire pendant la période des calculs (ici $\alpha = 20^\circ$).
 $S =$ surface des modules (ici en m^2 , $S = 2,72 m^2$).

pour les performances.
 $H =$ (en W/m^2) puissance du rayonnement, mesure
 $\mu_r =$ rendement de l'amplificateur

$$P_r = \mu_r \cdot H \cdot S \cdot \cos \alpha$$

du rendement de l'amplificateur
 Afin, mesure pour une pile photovoltaïque, temps, jours
 $P_r =$ puissance thermique déduite du rayonnement

On peut avoir l'écoulement de θ_2 , θ_3 et $\Delta\theta$ à la Fig. 39

l'amplificateur et de l'échangeur. (voir Fig. 37)

$H_3 =$ différence de hauteur entre les parties supérieures de

$H_1 =$ hauteur de la partie inférieure de l'échangeur

$\theta_0 =$ état du fluide circulant

$\theta_r =$ température à l'entrée de l'amplificateur

$\Delta\theta_k = \theta_3 - \theta_r$, $\theta_3 =$ température à la sortie de l'amplificateur

$$\Delta\theta_k = \frac{17,9 q_v + 1,65 q_s}{25 (H_3 + H_1)}$$

[Page 15 de la référence]

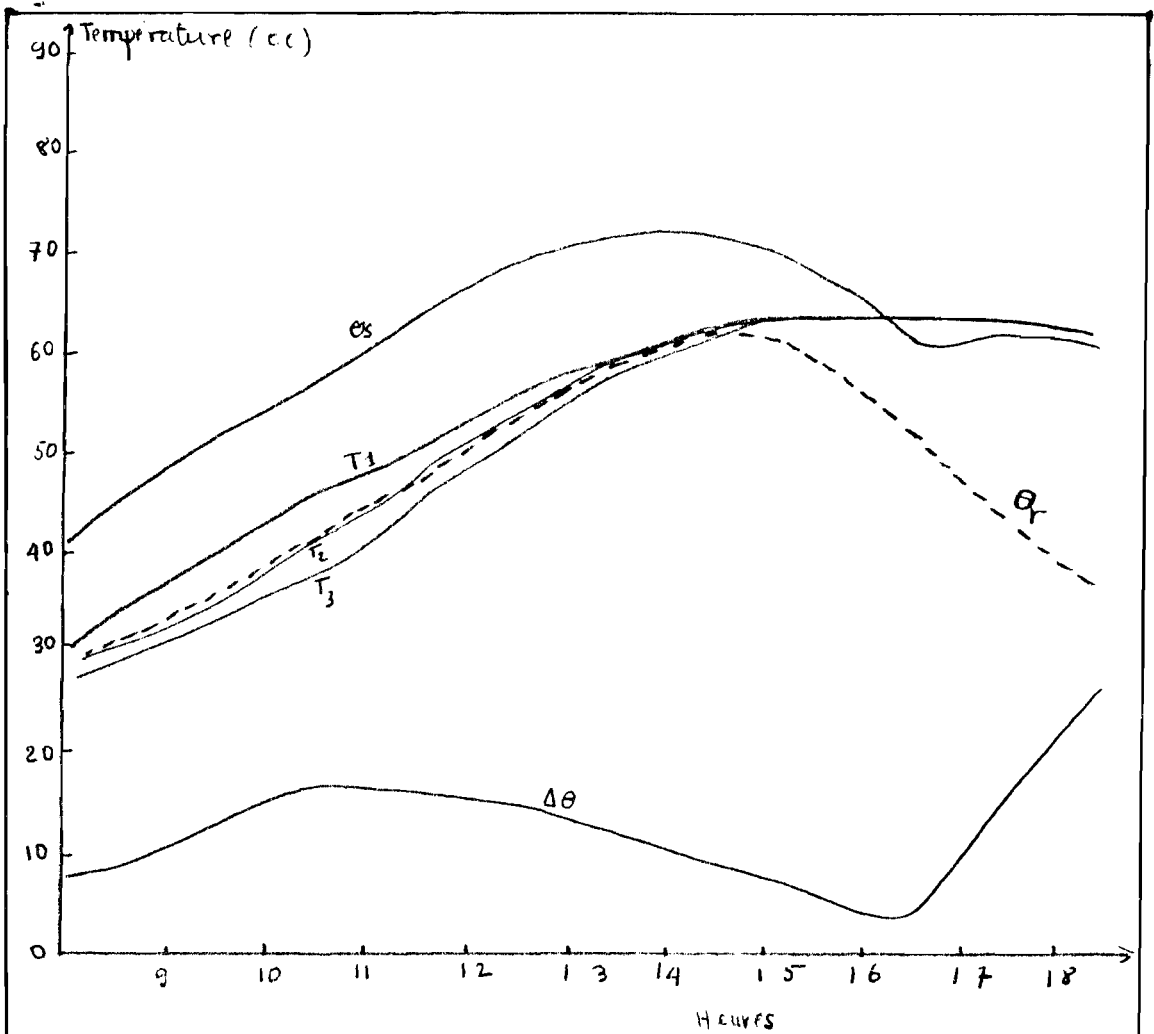


Fig. 39: Enregistrement de l'évolution des températures du réservoir (T_1 , T_2 , T_3) et du circuit du thermomètre (θ_s , θ_r et $\Delta\theta$) au cours d'une journée ($H_s = 38\text{ cm}$, $H_r = 94\text{ cm}$).

unités. $q_v = 1/\text{mm}$

ΔT et ΔT_{ph} en $^{\circ}\text{C}$

P_g et P_{th} en watt

T_{moy} = température moyenne de l'eau du réservoir en $^{\circ}\text{C}$.

P_g = puissance thermique de l'absorption, qui est la puissance fournie à l'eau du réservoir en supposant le rendement, η_e , de l'échangeur égal à 100%.

$$P_g = 67,01 \eta_e \cdot q_v \Delta T \quad \text{[page 13 de la référence]}$$

V.3: CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE:

On se propose d'analyser le comportement d'un générateur photovoltaïque dans les conditions réelles de fonctionnement.

Le schéma de la station est analogue à la figure 40, qui suit.

Cette station se compose

- d'un générateur photovoltaïque formé d'un ensemble de modules solaires, soit 28 modules en série, parallèles, assurant une tension de fonctionnement de 44 volts. Chaque module est caractérisé au point de fonctionnement optimal, par $U_m = 15,5$ volts, $I_m = 690$ mA, pour un éclairement de 40 mW/cm^2 .

et avec l'opération des cellules de 25°C,

- d'un moteur à courant continu couplé à une pompe à piston pour petits puits,

- d'une console de commande automatique et de contrôle.

L'ensemble fonctionne en circuit fermé d'une hauteur maximale de 16,5 mètres.

Une petite station météorologique permettant d'avoir les données sur les conditions d'expérience complètes l'installation.

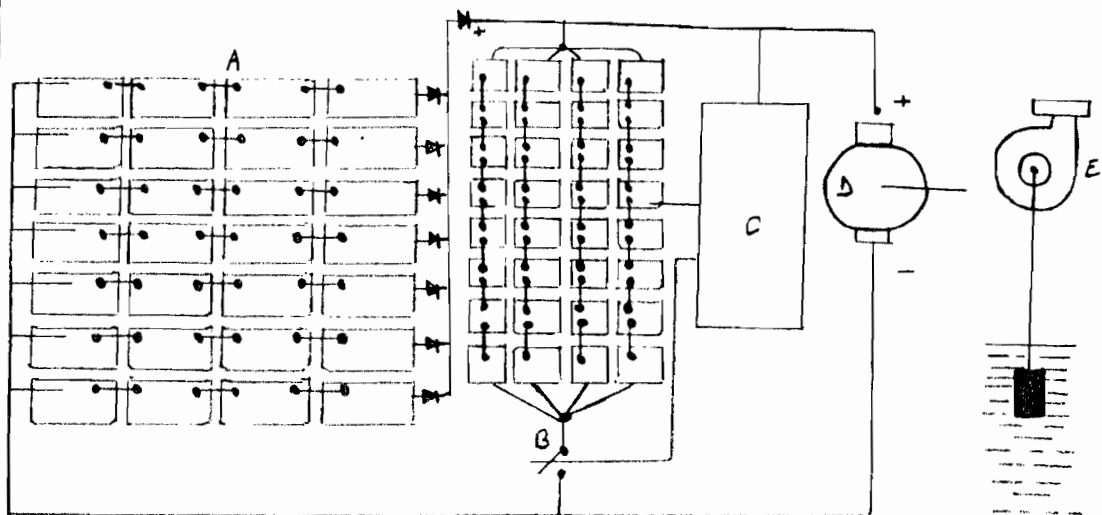


Fig. 40: schéma de la station:

A : générateur photovoltaïque

B : système de batteries

C : boîte de commande

D : Moteur

E : Pompe

Orientation des panneaux. dans cette expérimentation, le panneau est maintenu fixe sans ce cas, l'énergie reçue par un panneau incliné de δ par rapport à l'horizontal est:

$$H_d = H_0 [\cos(\delta - \lambda) \cos \theta \cos h + \sin(\delta - \lambda) \sin \theta]$$

[page 172 de la référence]

H_0 = énergie solaire reçue au sol

λ = la latitude

θ = la déclinaison solaire

δ = angle d'inclinaison du panneau par rapport à l'horizontal.

Les résultats d'un calcul complet permettent de voir que la valeur de δ pour laquelle on a l'énergie maximale sur l'année est $\delta_{opt} = 13^\circ$. Cependant l'utilisation d'un panneau fixe à inclinaison de 13° entraîne une perte annuelle moyenne de 4% par rapport à une orientation des panneaux optimisée tous les dix jours.

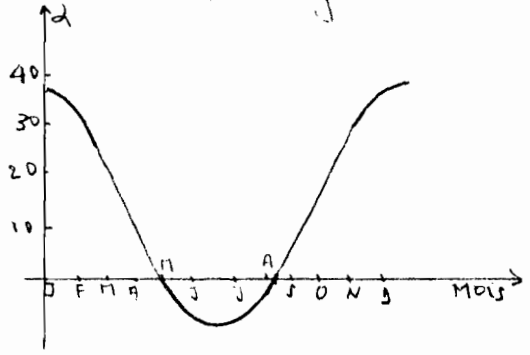


Fig. 41: L'angle d'inclinaison du panneau par rapport à l'horizontal

La figure 41 montre qu'il existe deux longues périodes pendant lesquelles α varie assez lentement et peu. Chacune de ces périodes dure environ 3,5 mois.

Entre ces deux périodes, se situent deux domaines où α varie rapidement et de façon notable.

En prenant comme meilleure orientation la moyenne de α correspondant à chacune de ces quatre périodes, on peut envisager quatre changements d'orientation au cours de l'année:

$33^\circ S$, $13^\circ S$, $3^\circ N$ et $13^\circ S$

Influence de la poussière. Pour une inclinaison de 13° et pendant une période de vent de quatre jours, l'effet de la poussière déposée sur les panneaux s'est traduit par une perte d'énergie de 13%, correspondant à une diminution mensuelle de 3% environ:

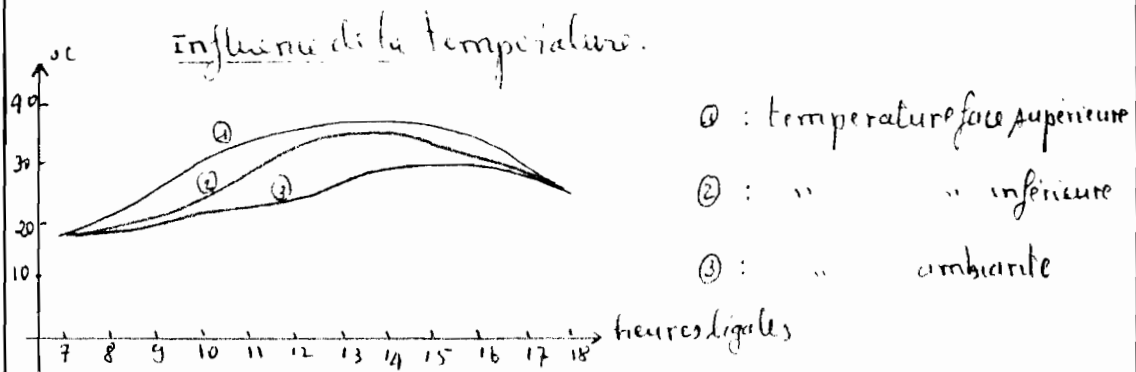


Fig. 42: Mesure de température

Les mesures de température sont effectuées journellement, sur les parties antérieures et postérieures des modules, simultanément à celles de la température ambiante sous abri.

À Dakar, on a enregistré une température maximum de la face supérieure des modules de $41,5^{\circ}\text{C}$ par temps clair.

Caractéristiques des panneaux.

heures de mesure	H_0 (W/m^2)	V_m (V)	I_m (A)	P_m (W)
9 h	355	60,3	0,8	49
10 h	628	56,3	2,1	117
10 h 30	770	56,3	2,7	154
12 h	846	56,3	3,34	190
17 h	423	56,6	1,5	84

V_m , I_m et P_m sont les caractéristiques du module au point de fonctionnement optimal.

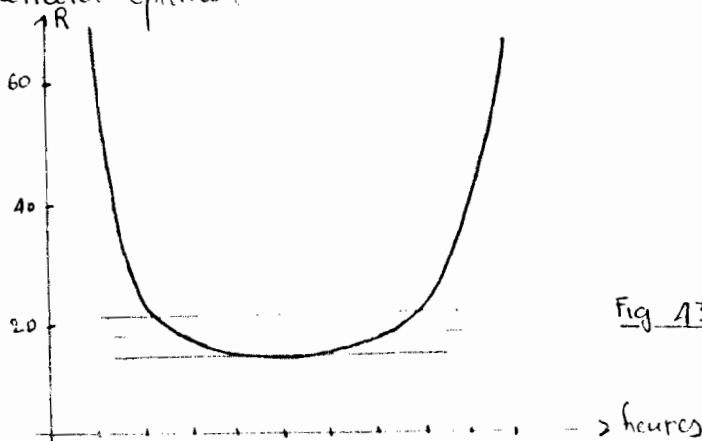


Fig. 43 : Variation de l'impédance en fonction de l'heure.

À partir des mesures de caractéristiques paramétriques et de la mesure de l'énergie reçue au sol par le panneau fixe, on parvient à un rendement moyen sur l'année de $\eta = 7\%$.

Caractéristiques de la station:

- Le moteur a une puissance nominale de 450 watts,
- L'ensemble moteur-pompe a un rendement de 43%, rendement qui peut être porté à 65% dans le cas d'une hauteur manométrique de l'ordre de 40 mètres,
- L'ensemble de commande assure l'automatisme complet de la station, et le déclenchement des sécurités liées au débit du générateur, au niveau et au dans le puits et dans le réservoir de stockage, au niveau de charge et de décharge des batteries.
- Le rendement global de la station est d'environ 2,5%.

Comme projet, on peut noter l'installation d'une moto-pompe solaire à Kand dans la région du fleuve et la pompe photovoltaïque de centre national de la Recherche Agronomique de Bamako. Les équipements fonctionnent déjà à titre expérimental au laboratoire des semi-conducteurs de la Faculté des Sciences et à l'ICIT. Il faut noter aussi la centrale solaire de Bafoulabé.

Pour la fabrication industrielle et la com-

mercualisation des appareils fonctionnant à énergie solaire, une société d'économie mixte, la SINAES (Société Industrielle des Applications de l'Énergie Solaire) a été créée à Dakar en 1976. Dans une proche avenir, elle sera amenée à lancer les fabrications locales.

REFERENCES:

V. 1 : L'extraction de l'eau.

- L'utilisation de l'énergie solaire pour l'extraction de l'eau, par H. Masson.
- Note sur l'énergie solaire au Sénégal par Gerard Heaton

V. 2 : Les chauffe-eau solaires.

- Chauffe-eau solaire expérimental à l'I.P.M.I.
- Chauffe-eau solaire à échangeur de chaleur, étude de thermographie, par J. Fall, E. Guenneq, J. Jaume et G. Heaton.

V. 3 : Conversion photovoltaïque.

- Une station de pompage alimentée par générateur photovoltaïque au Sahel par B. Katta, H. Ladere, G. W. Cohen-Silos, P. Charrier.

- Note sur l'histoire de la ville de Senigal par Gerard Maden.

CONCLUSION

Les recherches portées sur l'énergie solaire ne datent pas de très longtemps. Elles étaient très limitées, parce que l'équipement était la cause énergétique qui a donné aux recherches sur l'énergie solaire un regain d'intérêt. Comme on l'a vu, les applications sont très variées. Que cela soit l'application de l'énergie solaire aux fours, à la climatisation, à la réfrigération, à la production d'électricité, à la conversion en énergie mécanique, la preuve est déjà faite sur les nombreuses possibilités qui sont offertes. Sans aucun doute, des réalisations très intéressantes ont déjà été effectuées. Il faut seulement remarquer qu'en général, les recherches théoriques sont en avance sur les réalisations pratiques. Ce retard est dû à l'absence de structures technologiques nécessaires à ces réalisations. On peut donc raisonnablement espérer que, parallèlement au développement des moyens techniques, l'énergie solaire occupera une place importante à côté des autres sources d'énergie. Il est d'ailleurs heureux de constater que de toutes les sources d'énergie, l'énergie solaire est la plus répandue sur tous les continents.

C'est pourquoi, au Sénégal, qui en dispose pas encore

d'autres, mines et énergie suffisamment importantes, s'est très vite orientée vers l'énergie solaire. C'est ainsi que divers centres de recherche sont déjà fonctionnels. Les recherches sont surtout orientées vers quelques directions. L'extraction de l'eau, le chauffage de l'eau, la distillation solaire, la conversion photovoltaïque. On s'intéresse aussi au séchage solaire, et aux cuisines solaires.

À ces recherches et expérimentations, on peut apporter quelques suggestions.

Si la distillation solaire peut être, dans certains cas, d'un grand intérêt; on peut constater que pour ce qui est de ces pays du Sénégal, là où l'eau saline est disponible, l'eau douce y est également facilement accessible. Étant à l'intérieur du pays, les nappes phréatiques ne sont pas très profondes. Il est plus rentable de creuser un forage qui va distiller l'eau de mer et la véhiculer jusqu'au lieu d'utilisation.

Avec l'exploitation du lac de Guiers et, à l'avenir, l'installation des barrages le long du fleuve Sénégal, la distillation en eau potable sera, en grands quantités, rendue.

L'utilisation des cuisines solaires devrait être encouragée et étendue surtout dans les populations rurales.

En effet dans ce milieu, la cuisine se fait totalement à l'aide

des bris, vent, ce qui représente une force non négligeable de destruction de la végétation, et accoutumés avec la désertification.

L'utilisation des sources solaires demande cependant une certaine information, un changement de mentalité.

L'obstacle majeur est le fait que le usueur est nécessairement placé au soleil. Cela est cependant facilement surmontable.

En effet, s'il est vrai que le usueur est placé au soleil, le cuisinier lui ne sera obligé de travailler sous le soleil que pour quelques opérations. Le reste se fait à l'ombre, bon du usueur. Il faut d'ailleurs noter que même dans la cuisine traditionnelle, la cuisinière doit supporter la chaleur des flammes et des bris, ce qui n'est pas plus confortable.

Pour ce qui est de la conversion photovoltaïque et la conversion mécanique, nous constatons une indifférence dans les applications envisagées.

En fait et est envisagé et utilisé les photopiles aussi bien que les motopompes solaires pour l'entretien de l'eau. Il pourrait être plus avantageux de spécialiser chaque centre de recherche pour une application spécifique.

C'est ainsi que l'on pourrait proposer l'utilisation des photopiles dans la production d'électricité pour les groupements

moyens d'habitations, et les moto-pompes serviront à l'exhaussement de l'eau. Une telle répartition s'explique par plusieurs raisons. D'abord l'exhaussement de l'eau se fait le jour, donc au moment où la moto-pompe peut fonctionner. Ensuite la photopile, pour qu'elle peut emmagasiner l'énergie dans des batteries, est utilisable la nuit, donc peut être utilisée pour l'éclairage domestique.

Il est souhaitable d'encourager la fabrication locale des appareils fonctionnant à l'énergie solaire. Cela permettra de réduire de beaucoup leurs coûts et de les rendre accessibles à la population rurale, dont le pouvoir d'achat est souvent parfois faible. Cela est d'autant plus important que c'est surtout cette population qui sera amenée à utiliser les appareils solaires en quantité importante.

Quelques soient les découvertes futures de sources d'énergie, l'énergie solaire sera d'application importante, en tous cas complémentaire, parce qu'elle est de captation et de déplacement et d'entretien faciles.

BIBLIOGRAPHIE :

- ROGER PEYTURAUX: L'Énergie Solaire
Collection "Que sais-je ?" : Le point des connaissances
actuelles, N° 1294,
Publié dans Presses Universitaires de France,
103, Boulevard Saint-Germain, Paris, 1968.
- Notes du Laboratoire de l'Énergie Solaire de Montpellier, France.
- J. R. VAILLANT. Utilisations & Promesses de l'Énergie Solaire
Editions Eyrolles, 61 Boulevard Saint-Germain - 75005,
Paris, 1976.
- Colloques internationaux du Centre National de la Recherche
Scientifiques Applications Thermiques de l'Énergie Solaire
dans le domaine de la Recherche et de l'Industrie :
Montpellier 23-28 Juin 1958,
Edition du C. N. R. S., 15 quai Anatole-France 75700,
Paris, 1976.
- CH. PERRIN DE BRICHAMBAUT: Rajonnement Solaire

A Échanges radicaux naturels,

Collection Monographies de Métiologie,
Gauthier-Villars, Editeur, 55, quai des Grands-Augustins
Paris VI, 1963

- Oceanography, with introductions by J. ROBERT MOORE,
Printed in the United States of America,
Library of Congress Catalog Card Number 70 172644
Standard Book Number: 0-7167-0981-3 (cloth)
0-7167-0982-5 (paper)

957654321

Edité par W. H. Freeman and Company
San Francisco.

- Article de DENISE CAVARO et PATRICK CRIVOI les aspects
énergétiques de l'énergie solaire, Bibliographie sélective et
critique.

R.7266, X-209

- JEAN PIERRE CIRARDIER Les premiers Solaire
Annales de la Faculté des Sciences de l'Université de

Dakar, Journal mathématique de Senegal, physique, tome 12,
Année 1964, n° 2

- GERARD THOM note sur l'énergie solaire au Sénégal:
(16 au 21 janvier 1973 à New-Delhi)
 - H. MASSON L'énergie solaire & ses applications, extrait des
numéros de mars à avril 1960 des Annales des
mines.
 - D. FOLT, E. CUENNEC, J. JOUVE & C. LABON Champs-son
solaires à échangeur de chaleur, étude de thermographie;
publié dans les Annales de la faculté des sciences de l'Université de
Dakar Année 1974, tome 25.
 - H. MASSON l'actualisation de l'énergie solaire pour
l'exhaure de l'eau.
 - B. KATA, H. COBENE, O.W. LICHN-SOLAR, P. CHARTIER:
une station de pompage alimentée par générateur photovoltaïque.
-