



HAL
open science

Transformation thermo-élastique de l'énergie solaire en vue de la production d'énergie électrique

Abdourahmane N'Dir

► **To cite this version:**

Abdourahmane N'Dir. Transformation thermo-élastique de l'énergie solaire en vue de la production d'énergie électrique. Modélisation et simulation. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 1971. tel-00282785

HAL Id: tel-00282785

<https://theses.hal.science/tel-00282785>

Submitted on 28 May 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE SCIENTIFIQUE
ET MEDICALE DE GRENOBLE

DEUXIEME THESE

TRANSFORMATION THERMO-ELASTIQUE DE L'ENERGIE SOLAIRE
EN VUE DE LA PRODUCTION D'ENERGIE ELECTRIQUE.

Abdourahmane N'DIR

J'adresse mes remerciements sincères à Monsieur le Professeur PILLET qui m'a proposé ce second sujet de thèse.

J'adresse également tous mes remerciements à Monsieur le Professeur PERROT, Directeur du Laboratoire d'Héliotechnique de Marseille - St Jérôme et à Monsieur Georges PERI du Laboratoire d'Héliotechnique de Marseille - St Jérôme pour l'aide précieuse qu'ils m'ont apportée.

I N T R O D U C T I O N

=====

Le besoin du monde en énergie croît à une allure exponentielle comme en témoigne la courbe de consommation énergétique.

L'énergie est tirée en majeure partie des combustibles fossiles (pétrole, charbon), dont on prévoit l'épuisement à échéance relativement brève.

Au tarissement inévitable de cette source d'énergie s'ajoute le danger d'une pollution extrême qu'accentue encore l'utilisation de l'énergie atomique. On citera à ce propos la phrase très significative d'un congressiste "Nous mourrons d'asphyxie avant de mourir de faim".

Il est intéressant de constater qu'il nous arrive sur le globe une puissance de $1,74 \times 10^{14}$ KW, soit $1,5 \times 10^{18}$ KW - h, provenant du soleil. Nous possédons là une source d'énergie inépuisable et non polluante qui mérite toute notre attention.

Les tentatives d'utilisation de l'énergie solaire remontent à l'Antiquité, et le monde moderne pourrait bientôt se trouver dans l'obligation de l'employer.

L'actualité du problème nous a amenés à envisager les moyens de produire l'énergie électrique à partir de l'énergie solaire.

Cette transformation peut s'effectuer de deux manières :

- de manière directe par l'effet photo-électrique ou l'effet photo-voltaïque. Les photopiles sont simples et fiables, leur durée de vie est de 7 à 8 ans et on envisage de porter leur puissance maximum à 1,5 kW en 1978. Mais les rendements restent faibles de 5 à 10 %.

- de manière indirecte, la transformation peut se faire par conversion thermo-ionique ou thermo-électrique qui s'avèrent également de puissances insuffisantes.

C'est pourquoi nous avons envisagé dans cette étude la conversion thermo-élastique de l'énergie solaire qui seule est capable de nous fournir des puissances chiffrées en MW à des rendements satisfaisants.

CHAPITRE I

=====

METHODES DE DETERMINATION DE L'ENERGIE DISPONIBLE AU SOL

-0-

L'Utilisation de l'énergie solaire nécessite la connaissance de la quantité d'énergie disponible. Celle-ci varie d'un lieu géographique à un autre et dépend beaucoup des conditions climatiques et atmosphériques. Un des problèmes essentiels posé à l'héliotechnicien est la détermination de la radiation solaire au sol afin de prévoir le fonctionnement de ses appareils.

I - 1 - LA RADIATION SOLAIRE

La répartition énergétique du rayonnement solaire est voisine de celle d'un corps noir porté à 6 000°K (figure 1). Elle peut être théoriquement représentée par la loi de Plank

$$b_{\lambda\theta}^o = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda\theta}} - 1} \quad (\theta = 6\ 000^\circ\text{K})$$

dans laquelle si λ est exprimé en centimètres, nous avons

$$C_1 = 11,8 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^2 \quad \text{et} \quad C_2 = 1,432 \text{ cm.}^\circ\text{K.}$$

L'examen de la figure 1 montre que l'essentiel de l'énergie qui nous arrive du soleil se situe entre les longueurs d'onde 0,3 μ et 3 μ , le maximum étant atteint pour 0,5 μ .

energie en $W/cm^2/\mu$

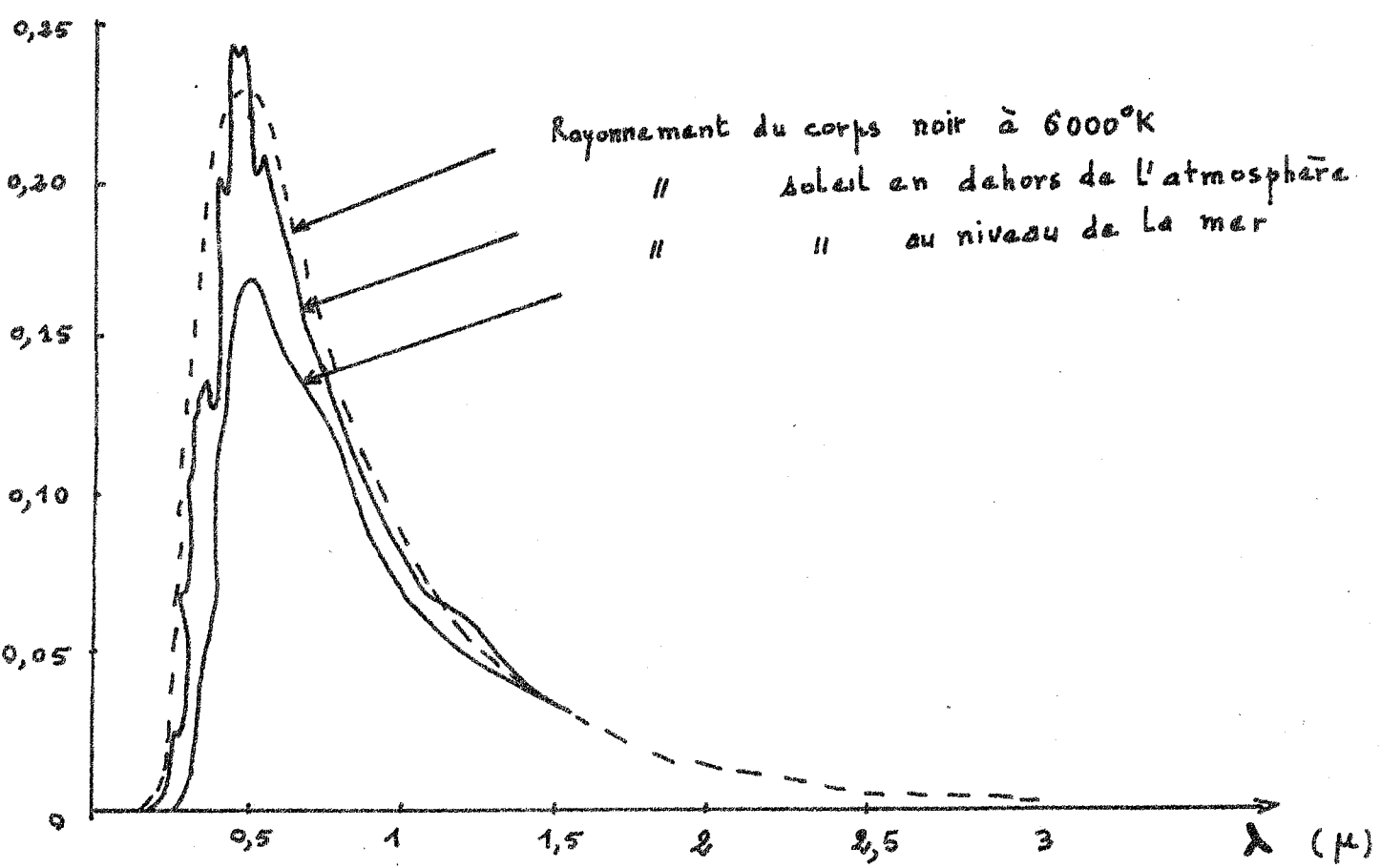


Figure 1

Repartition énergétique
du
Rayonnement Solaire

La densité du rayonnement à la périphérie du soleil est considérable $75\ 000\ \text{kW/m}^2$. Il nous en arrive, selon Johnson, $1\ 395\ \text{W/m}^2 \pm 2\ \%$ à la limite extérieure de l'atmosphère ; ceci dans un angle solide de $7 \cdot 10^{-5}$ stéradians (32' d'arc). On désigne sous le nom de constante solaire cette énergie reçue aux confins de l'atmosphère.

La radiation qui nous parvient au sol est encore plus faible et elle est sujette à de grandes fluctuations. En effet, dans l'atmosphère, le rayonnement est absorbé par l'ozone (vers les courtes longueurs d'onde), le gaz carbonique et principalement par la vapeur d'eau dont la teneur dans l'atmosphère est fortement variable. La figure 2 montre les courbes du spectre d'absorption de la vapeur d'eau et du gaz carbonique.

La diffusion moléculaire et la diffusion par les aérosols atténuent aussi le rayonnement.

L'influence de la nébulosité est plus complexe. Par temps nuageux la radiation directe peut devenir presque nulle. La nébulosité provoque surtout une diffusion du rayonnement, elle atténue la durée d'insolation journalière et affecte la régularité de l'énergie solaire. La figure 3 montre l'effet des nuages.

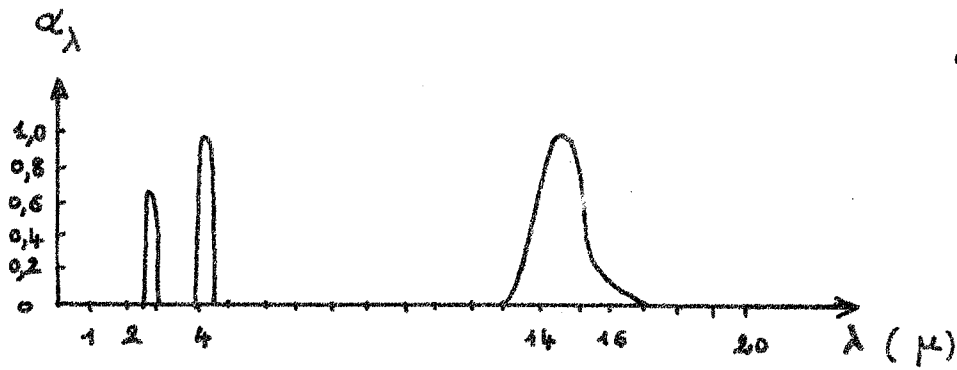
I - 2 - METHODE DE MESURE DE LA RADIATION SOLAIRE

L'héliotechnicien a besoin de connaître les puissances instantanées reçues du soleil et la forme du diagramme monotone équivalent.

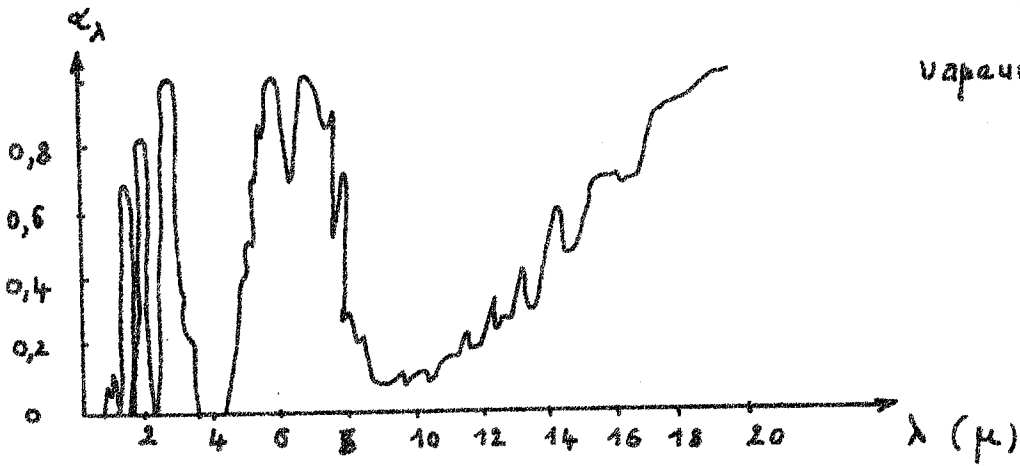
Il dispose dans ce but d'appareils de mesure, appelés actinomètres, dont le principe repose sur le calcul de la quantité de chaleur recueillie sur une surface donnée, exposée au soleil.

On distingue les appareils mesurant la radiation directe et ceux utilisés pour la radiation globale.

2'



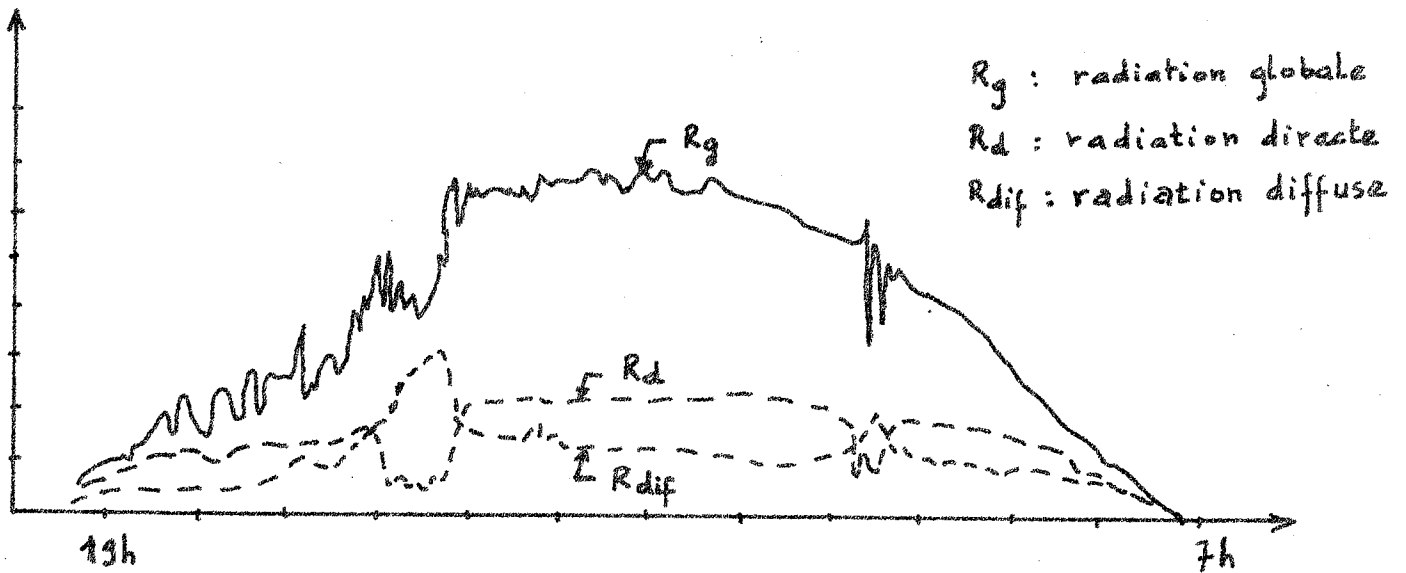
CO₂ $\begin{cases} e = 0,063 \text{ m} \\ p = 1 \text{ atm} \end{cases}$



vapeur d'eau $\begin{cases} e = 1 \text{ m} \\ p = 2,4 \text{ atm} \end{cases}$

Figure 2

Courbes spectrales d'absorption du CO₂ et de H₂O



R_g : radiation globale
R_d : radiation directe
R_{dif} : radiation diffuse

Figure 3

Influence d'un temps nuageux sur la radiation solaire

I - 21 - Mesure de la radiation directe

Le rayonnement direct est mesuré à l'aide de pyréliomètres. Les mesures sont soit absolues soit comparatives. Ces dernières consistent à calculer la vitesse d'échauffement d'un corps, de capacité calorifique connue, exposé au rayonnement. Les mesures absolues utilisent l'échauffement d'un débit d'eau bien connu, les calculs étant conduits en appliquant les méthodes de calorimétrie. Un exemple de pyréliomètre absolu est celui réalisé par Abbot (figure 4). Deux appareils identiques l'un chauffé par le soleil, l'autre électriquement permettent des mesures d'une précision de 1/1 000^e.

Parmi les pyréliomètres de référence, nous citerons celui de Knut Angström. Dans cet appareil, on utilise le courant électrique produit entre deux soudures d'un thermocouple, en contact avec deux lamelles de manganine noircies dont l'une est chauffée électriquement et l'autre exposée au rayonnement direct du soleil.

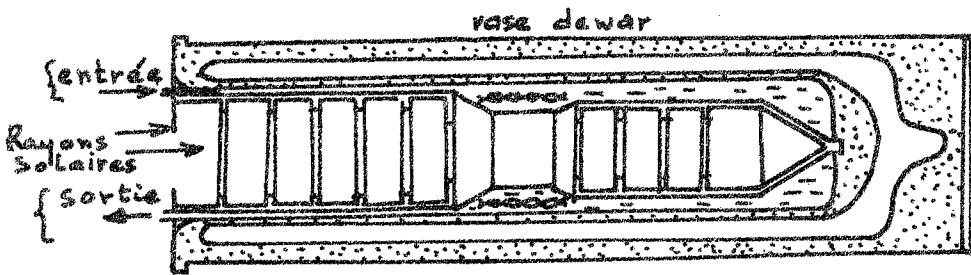
Des mesures moins précises mais plus commodes peuvent être faites avec des pyréliomètres à thermocouple. Ils sont basés sur la détermination de différences de températures (exemples : pyréliomètres de GORCZINSKY, LINKE).

I - 22 - Mesure de la radiation globale

La radiation globale est déterminée à l'aide de solarimètres qui sont généralement des piles thermoélectriques constituées de couples en série.

Les soudures chaudes sont exposées au soleil et les soudures froides reliées calorifiquement à une masse thermique à la température ambiante.

Les mesures se font par une méthode d'opposition et l'étalonnage est réalisé grâce à des pyréliomètres (exemples : solarimètres de KIPP, VOLOCHINE).



Pyrhéliometre Waterflow (ABBOT)

Figure 4

Les actinomètres sont des appareils délicats et chers ; d'autre part, il faudrait que l'héliotechnicien dispose d'un réseau de courbes relevées sur une assez longue période et à l'endroit voulu pour pouvoir prévoir le fonctionnement des dispositifs qu'il veut mettre en place. Malheureusement de telles informations sont très rares aussi a-t-on recours à des méthodes indirectes pour déterminer les diagrammes monotones utiles.

I - 3 - METHODES DE PREDETERMINATION DE LA RADIATION SOLAIRE

Les méthodes de prédétermination sont des procédés de calcul permettant de déterminer l'énergie disponible en un lieu à partir de relevés solaires et météorologiques passés faits en un autre endroit.

Il est illusoire de chercher à prédéterminer un diagramme réel journalier de la radiation solaire. Cependant on montre que les appareils utilisant l'énergie solaire fonctionnent de la même manière que les puissances se présentent en désordre ou ordonnées. Le diagramme monotone équivalent à l'ensemble annuel des diagrammes journaliers peut être utilisé directement dans tous les problèmes relatifs aux performances techniques des appareils utilisateurs. C'est donc lui qu'on essaiera de déterminer.

Les méthodes proposées pour évaluer la radiation directe, qui est la plus intéressante dans les applications à haute température, sont toutes basées sur l'acceptation de la formule de Bouguer.

On admet en effet que l'énergie rayonnante qui arrive sur une surface normale aux rayons solaires est donnée par la formule de Bouguer

$$W = r W_0 e^{-G.m} = r. W_0 t^m$$

- G coefficient d'extinction.

- $e^{-G} = t$ transparence de l'atmosphère.

t varie de 0,62 par temps couvert à 0,81 par ciel clair. La

valeur moyenne de t est 0,7.

Si d est la distance de la terre au soleil et d_m la distance moyenne ; $r = \left(\frac{d}{d_m}\right)^2$ d'où $0,967 < r < 1,034$
(début janvier) (début juillet)

$$W_0 = \text{constante solaire} = 1\,395 \text{ W/m}^2 \pm 2\%$$

m = masse atmosphérique : avec l'hypothèse de la planéité des couches atmosphériques $m = \frac{1}{\sin h} \frac{p}{100}$

(p = pression atmosphérique en mb)

(h = hauteur du soleil)

L'application de la formule de Bouguer donne des valeurs de l'énergie disponible au sol très optimistes. Elle ne tient pas compte de l'absorption sélective du rayonnement solaire par l'atmosphère et son utilisation très difficile amène à faire de multiples hypothèses.

Deux hypothèses communément faites sont :

1 - hypothèse des couches planes,

2 - $t = 0,8425 - 0,0125 \cdot e$

(e = tension de vapeur au sol en mb)

Ce qui revient à choisir une atmosphère type.

La première hypothèse est acceptable puisqu'elle ne fait apparaître sur m qu'une erreur de 1 % pour $h = 20^\circ$, 3 % pour $h = 10^\circ$ et 10 % pour $h = 5^\circ$.

La seconde hypothèse peut être remplacée par une autre moins restrictive tenant compte de l'absorption sélective. En effet si on décompose le rayonnement en radiations monochromatiques de longueur d'onde λ , la radiation directe sur une surface normale aux rayons est :

$$W = \int_{0,25 \mu}^{5 \mu} W_{0\lambda} e^{-K\lambda \cdot m} d\lambda$$

$K_{\lambda, m}$ coefficient d'extinction,

$W_{0\lambda}$ flux de la radiation de longueur d'onde λ aux confins de l'atmosphère,

avec
$$K_{\lambda, m} = m (M(\lambda) + D(\lambda)) + V(\lambda, mw) + A(\lambda, m)$$

$M(\lambda)$ est dû à la diffusion moléculaire pour $m = 1$,

$D(\lambda)$ est dû à la diffusion par les aérosols ($m = 1$),

$V(\lambda, mw)$ représente l'absorption sélective de la vapeur d'eau.

$A(\lambda, m)$ l'absorption sélective des constituants fixes de l'atmosphère.

La diffusion moléculaire représente 5 à 10 % du rayonnement direct. Elle est donnée par la formule de Rayleigh modifiée :

$$M(\lambda) = 0,00879 \cdot \lambda^{-4,09}$$

L'absorption sélective des constituants fixes est faible et varie peu avec la masse d'air.

L'absorption par la vapeur d'eau est caractérisée par l'épaisseur d'eau condensable w qui varie généralement entre 0,5 et 6 cm. w est liée à la tension de vapeur au sol e par la relation due à

$$\text{Haun } w = 0,23 e$$

\uparrow \uparrow
(cm) (mb)

$$\text{On a } V(\lambda, 1) = \alpha_{\lambda} \quad w = 0,23 \alpha_{\lambda} e$$

avec α_{λ} coefficient d'absorption de la vapeur d'eau.

La diffusion par les aérosols est caractérisée par le coefficient de trouble β qui varie de 0,010 par ciel clair à 0,250 par ciel laiteux. La diffusion par les aérosols peut représenter de 1 % à 5 % du rayonnement direct.

Dans l'hypothèse d'un ciel sans nuage ni brume, ni vent de sable :

$$D(\lambda) = \beta / \lambda^{1,3}$$

Donc par beau temps nous avons :

$$W = \int_{0,25 \mu}^{5 \mu} W_{0\lambda} e^{-m} (\beta/\lambda^{1,3} + 0,23 \alpha_{\lambda} e + 0,00879/\lambda^{4,09})$$

Cette formule a l'avantage de ne nécessiter que la connaissance des variables météorologiques β et e . W peut se calculer de la sorte par une méthode numérique.

Quoi qu'il en soit, W étant obtenue par une méthode théorique sous une certaine hypothèse d'atmosphère type, il faut ensuite tenir compte des nuages, brumes et précipitations qui sont des variables hautement aléatoires.

- La méthode de Rome de prédétermination préconise l'utilisation d'un facteur de réduction en ordonnée et l'introduction d'un facteur d'ensoleillement sous forme d'une réduction en abscisse. Bien entendu, ces différents facteurs seront déterminés à partir de relevés réels disponibles. Les auteurs de cette méthode ont montré qu'en adoptant la formule de Bouguer et $t = 0,8425 - 0,0125 e$, l'intensité de la radiation solaire possible peut être obtenue en multipliant par 0,8 la radiation théorique, la moyenne de l'intensité réelle étant proportionnelle au facteur d'ensoleillement σ .

On obtient à partir de là un diagramme type susceptible de remplacer dans les applications le diagramme réel.

- La méthode de Rosset est basée sur la détermination statistique du coefficient d'extinction à partir d'un nombre de relevés solaires suffisant.

Si on accepte la loi de Bouguer, on a :

$$G = \frac{1}{m} \text{Log} \frac{r W_0}{W}$$

Par conséquent, si on dispose de relevés solaires s'étalant sur plusieurs années, on peut construire la loi de probabilité de G pour chaque jour j et heure h d'une ou plusieurs années types. On applique ensuite à la station où on ne dispose pas de relevés solaires les résultats relatifs à G , à condition que cette station soit soumise aux mêmes influences climatologiques que celle où ont été faites les mesures.

Cette méthode est à notre avis la solution d'avenir ; en effet, seule une méthode statistique permet de tenir compte des variations aléatoires de la Radiation solaire dues aux nuages et précipitations.

L'Utilité des méthodes de prédétermination se fera sans doute sentir dans l'avenir quand les pays sous-développés riches en énergie solaire voudront en tirer partie ; il n'y existe en effet pratiquement pas de relevés solaires.

CHAPITRE II

=====

CONVERSION THERMO-ELASTIQUE

-0-

I - INTRODUCTION

=====

L'Utilisation de l'énergie solaire pour produire de l'électricité à des prix concurrentiels, est actuellement une des préoccupations des chercheurs. Les méthodes utilisées sont diverses, mais peuvent cependant se classer en deux grandes catégories :

- les procédés directs
- les procédés indirects.

Dans cette étude, nous ne parlerons pas des procédés directs (photo-électriques, photo-voltaïques) ; en effet, il s'agit pour nous de savoir si à l'heure actuelle il est possible d'envisager de produire des puissances de plusieurs mégawatts, c'est-à-dire de construire des centrales solaires susceptibles de concurrencer dans l'avenir les centrales thermiques actuelles.

La conversion indirecte, malgré les difficultés auxquelles elle se heurte, permet d'envisager dès maintenant cet avenir.

Les conversions thermo-électriques et thermo-ioniques, aussi intéressantes soient-elles, ne nous semblent pas encore répondre à la question ; c'est pourquoi dans l'étude des procédés indirects, nous parlerons surtout de la conversion thermo-élastique.

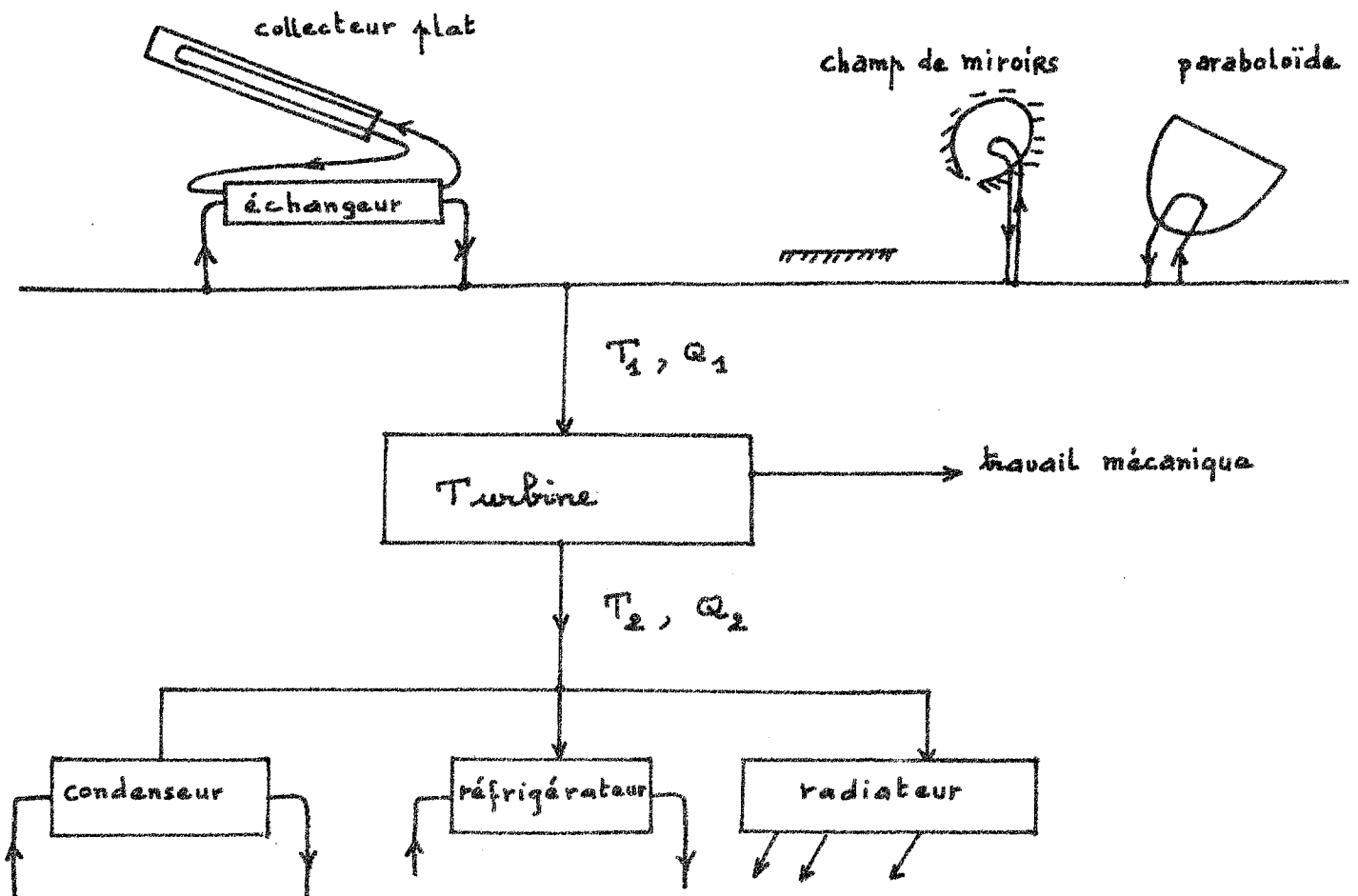


figure 5

Principe de la conversion thermoélastique

Le principe de la conversion thermo-élastique de l'énergie solaire est représenté figure (5) ; il consiste à chauffer un fluide par l'intermédiaire de la radiation solaire, et à convertir la chaleur obtenue par voie thermodynamique en un travail mécanique susceptible d'actionner une turbine.

On distingue deux techniques de conversion :

- les systèmes à faible concentration, qui utilisent une méthode directe de chauffage du fluide. Les températures obtenues sont basses $< 90^{\circ}$, et on obtient de faibles rendements thermodynamiques, d'où la nécessité de disposer de collecteurs de très grandes surfaces pour avoir des puissances élevées.

- les systèmes à forte concentration où le rayonnement est concentré à l'aide d'un système de miroirs orientables, dans un foyer thermique, à l'intérieur duquel s'effectue le chauffage du fluide.

Cette méthode permet d'atteindre des températures très élevées compatibles avec la bonne tenue des matériaux et donc d'obtenir des rendements théoriques importants.

Nous examinerons successivement les possibilités de chaque méthode. Nous parlerons ensuite des difficultés d'utilisation : en effet, le soleil est une source intermittente, d'où la nécessité de stocker l'énergie au cours de la nuit, ou au cours des journées sans soleil.

L'utilisation de l'énergie solaire à grande échelle ne peut donc se concevoir sans la résolution de ce délicat problème.

II - SYSTEME A BAS POTENTIEL

=====

Dans les systèmes à bas potentiel, le problème à résoudre est celui de la production de la vapeur à basse température et basse pression. La basse température peut être obtenue grâce à des collecteurs

plats ; il s'agit ensuite de trouver un fluide ayant un bas potentiel d'ébullition et susceptible d'améliorer les rendements des cycles thermodynamiques classiques.

II - 1 - CAPTATION DE LA RADIATION SOLAIRE

La radiation solaire est captée grâce à des insolateurs plats. De nombreuses études ont été faites concernant ce type de collecteurs.

Schématiquement, figure (6), on peut dire qu'il est constitué de deux plaques parallèles, entre lesquelles circule un liquide primaire dont le rôle est de recevoir les calories solaires et de céder ensuite sa chaleur, par l'intermédiaire d'un échangeur, au fluide à bas potentiel utilisé dans la transformation thermodynamique. Ce liquide primaire est généralement de l'eau. La plaque supérieure est noircie et exposée au rayonnement solaire. Au-dessous de la plaque inférieure, on dispose un isolant thermique pour éviter les pertes par conduction.

Une ou plusieurs plaques de verre couvrant à une certaine distance la plaque supérieure, permettent d'utiliser l'effet de serre.

En effet, le verre laisse passer le rayonnement provenant du soleil $0,3 < \lambda < 2,5 \mu$ et arrête le rayonnement infrarouge émis par la plaque supérieure chauffée. Il permet donc de limiter les pertes par réémission.

L'insolateur est incliné de façon à recevoir en moyenne la radiation solaire (directe et diffuse) dans les conditions les plus favorables.

Si a : désigne le coefficient d'absorption de la plaque chauffée,

b : le coefficient de transmission du système collecteur (vitres),

P : le coefficient de renforcement (généralement dû aux surfaces verticales voisines de l'isolateur)

$$P \neq 1,$$

Q : l'intensité de la radiation solaire,

l_e : les pertes dues à la réémission,

l_c : les pertes par convection,

le rendement instantané de l'isolateur est :

$$r = \frac{a b P Q - (l_e + l_c)}{P Q} = a b - \frac{l_e + l_c}{P Q}$$

$$\text{avec } l_e = e \sigma (T_b^4 - T_a^4)$$

où e = émissivité du corps chauffé et

T_b sa température.

T_a température extérieure.

Deux méthodes sont actuellement à l'étude pour améliorer le rendement. Elles consistent toutes deux à diminuer l'émissivité du collecteur tout en augmentant son absorption.

A - Surfaces sélectives

Les surfaces sélectives sont des surfaces qui ont un coefficient d'absorption élevé pour la radiation et un faible coefficient d'émission pour le rayonnement infrarouge. Elles permettent donc de conserver une grande partie du rayonnement solaire et de ne perdre que peu de chaleur par réémission quand la plaque absorbante s'échauffe.

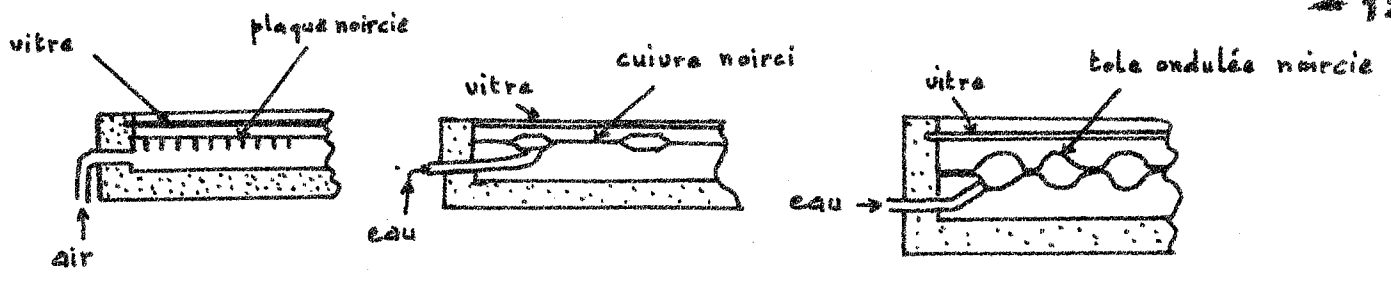


figure 6

Divers types de collecteurs

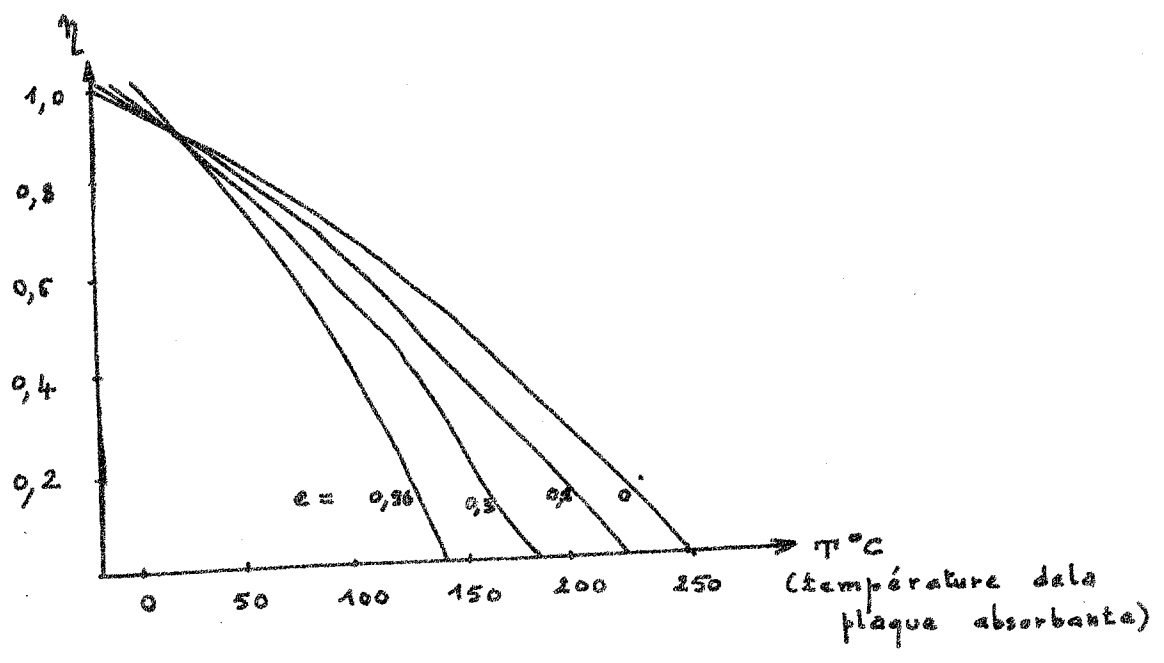


figure 7

Courbes de rendement en fonction de l'émissivité

On conçoit qu'avec de telles surfaces on réussisse à améliorer le rendement de l'isolateur. La figure (7) montre la variation du rendement en fonction de l'émissivité.

On réalise les surfaces sélectives en recouvrant des surfaces de métaux polis par un mince revêtement noir.

Des exemples de réalisation sont donnés dans le tableau 1.

	pour a	pour e	
Peinture noire	0,93	0,93	non sélective
Noir de Pt	0,95	0,91	non sélective
Noir de nickel sur fer (Tabor)	0,89	0,12	sélective
Oxyde de cuivre sur alu- minium	0,93	0,11	sélective
C. U. O. laiton poli	0,93	0,20	sélective
C. U. S. sur cuivre poli	0,72	0,18	sélective
Oxydes de fer sur acier poli	0,93	0,21	sélective

T A B L E A U 1

B - Structures cellulaires antirayonnantes

Les structures cellulaires de G. Francia permettent d'augmenter la température d'un corps exposé au soleil en réduisant l'énergie qu'il réirradie. Cet effet peut être obtenu en utilisant diverses valeurs géométriques disposées en nid d'abeilles.

Leur propriété essentielle est d'être à paroi transparente pour le rayonnement solaire et noire pour les longueurs d'onde de l'infrarouge correspondant à la température de base.

Pour une cellule de hauteur H et de forme quelconque, on obtient à l'équilibre :

$$R = \sigma (T_B^4 - T_O^4) \left(1 - \frac{1}{H} \int_0^H F_{By} dy \right)$$

R = radiation solaire.

T_O et T_B sont les températures de l'ouverture et du fond de la cellule.

σ = constante de

F_{By} = facteur d'angle entre la base et un élément dy de côté y .

Pour un prisme

$$F_{B, y} = \frac{1}{4} + \frac{1}{\pi} \left(\frac{y^2}{4} \text{Log} \left(\frac{y^2 (2 + y^2)}{(1 + y^2)^2} \right) + y \text{Arctg} \frac{1}{y} - \sqrt{1 + y^2} \text{Arctg} \frac{1}{\sqrt{1 + y^2}} \right)$$

Les températures de la base obtenues pour diverses formes de structures cellulaires sont données figure (8).

L'emploi de ces structures est très intéressant dans le domaine des insolateurs plats. Elles permettent d'envisager l'obtention de tempé-

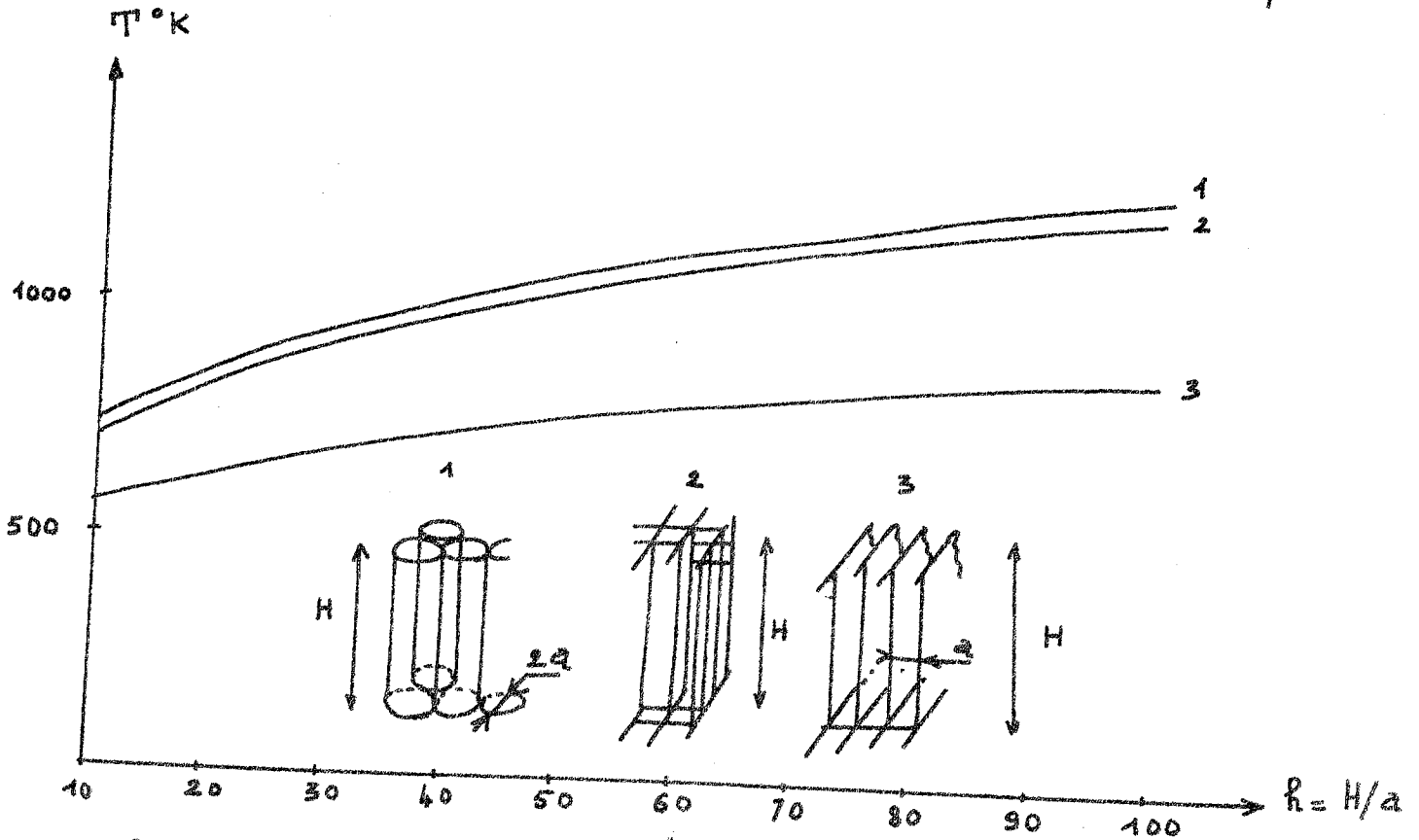


Figure 8 : Temperature de la base en fonction de h pour diverses formes de structures cellulaires

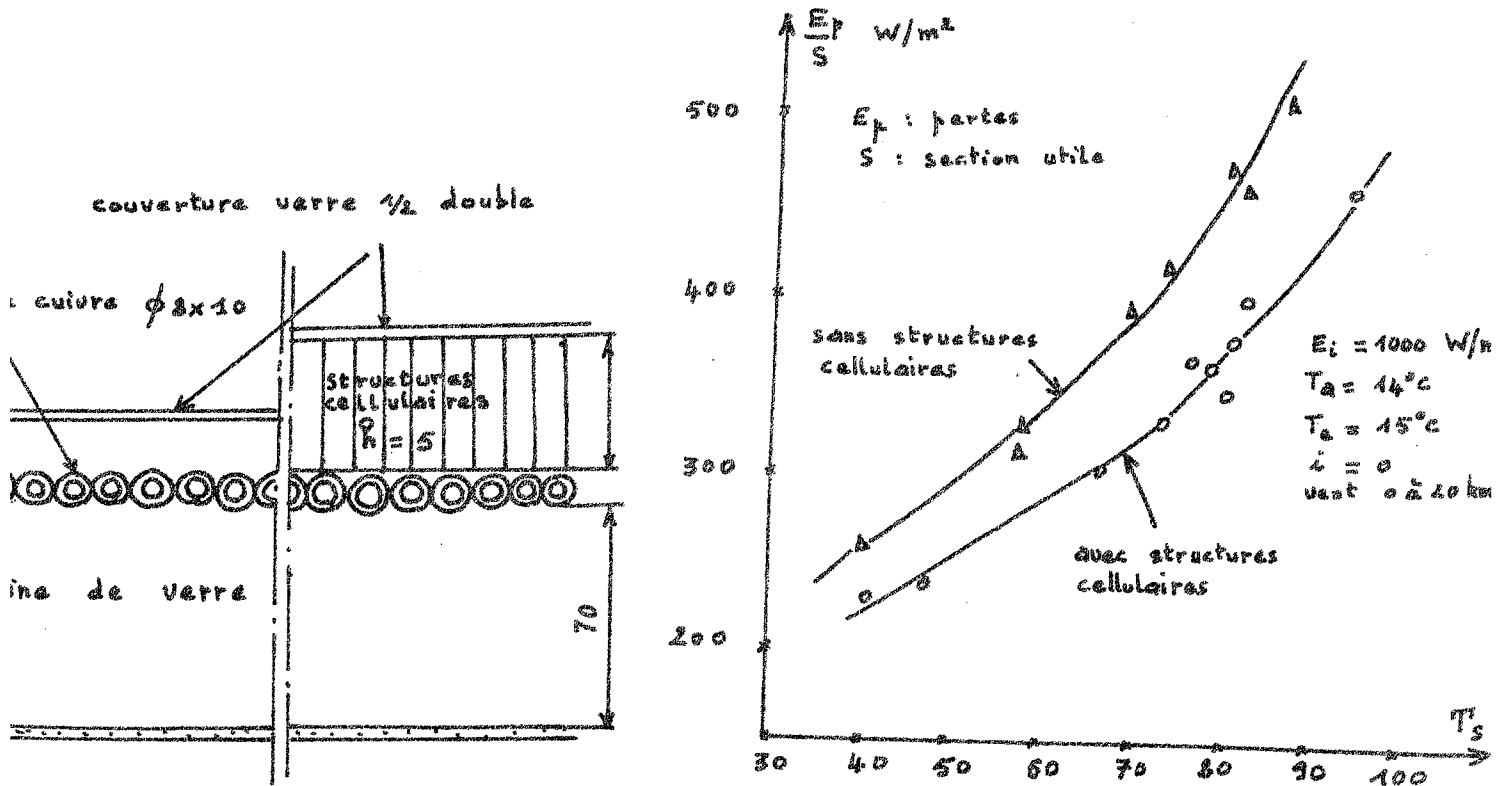


Figure 9 : Insulateur plat avec et sans structures cellulaires

ratures supérieures à 100°C avec des rendements acceptables.

La comparaison des performances d'un insolateur plat à spirales sans structures antirayonnantes et celles d'un même insolateur avec structures antirayonnantes figure (9) montre, qu'avec ces dernières, on peut obtenir des températures de l'ordre de 100°C avec un rendement supérieur à 50 %.

Ce rendement croît avec la hauteur relative des structures, mais le prix de revient croît aussi avec h . En effet pour obtenir des températures supérieures à 100°C en charge, il faut des températures à vide élevées, ce qui nécessite l'emploi de produits verriers pour la fabrication, par ailleurs fort délicate, des structures antirayonnantes.

G. Francia avec des tubes de 2/10 mm d'épaisseur, 20 mm de diamètre et 250 mm de hauteur, est arrivé à faire de la vapeur d'eau à 150 H p et à 150°C ce qui montre nettement l'intérêt que peuvent avoir ces cellules dans le cadre de la conversion thermo-élastique de l'énergie solaire.

II - 2 - NATURE DES FLUIDES UTILISES DANS LES CYCLES THERMODYNAMIQUES

Les températures atteintes à l'aide des insolateurs plats 60° et susceptibles d'être obtenues par utilisation des structures de G. Francia, ne permettent pas d'envisager l'utilisation de l'eau. C'est pourquoi les réalisateurs ont cherché des fluides plus adaptés à ces températures relativement basses.

Les qualités requises pour ces fluides sont :

- point d'ébullition facilement accessible, afin qu'on puisse utiliser des cycles à surchauffe et ressurchauffe pour améliorer le rendement des turbines.

- poids moléculaire élevé, pour augmenter le rendement de la turbine car la vitesse de sortie de la vapeur après expansion est inver-

sement proportionnelle à la racine carrée du poids moléculaire.

- stabilité chimique.

On dispose dans ce domaine d'une possibilité de choix assez vaste. Les fluides utilisés sont, en plus de l'eau : l'anhydride sulfureux, le chlorure de méthyle, l'ammoniac, l'éther, les fréons, les liquides thermophores.

II - 3 - REALISATIONS

Les réalisations sont encore du domaine des faibles puissances. En effet, l'absence de concentration entraîne la nécessité de disposer de très grandes surfaces pour produire des puissances acceptables, donc de très grosses sommes dont ne disposent pas les projeteurs actuels.

Nous citerons la réalisation de la pompe I. T. T. E. C. faite à Dakar par l'équipe du Professeur H. Masson. Elle donne une faible idée de ce que pourrait être une réalisation de grande puissance, et des difficultés qu'il faudra vaincre, figure (10).

- collecteur plat (tôles ondulées noircies) 300 m² de surface, rendement 50 % environ.
- liquide primaire : eau circulant par thermosiphon.
- température de l'eau à l'entrée de l'échangeur, 70 à 75°C.
- fluide du cycle thermodynamique fréon 12 (CF₂ Cl₂), liquide inerte coûtant environ 5 F le kg.
- débit 4 750 kg/h.
- pression au condensateur, 7,5 kg/cm² environ.
- température au condensateur, 30°C environ.
- pression d'admission à la turbine 14 à 15 kg/cm².
- rendement du cycle thermodynamique, 7 % environ.

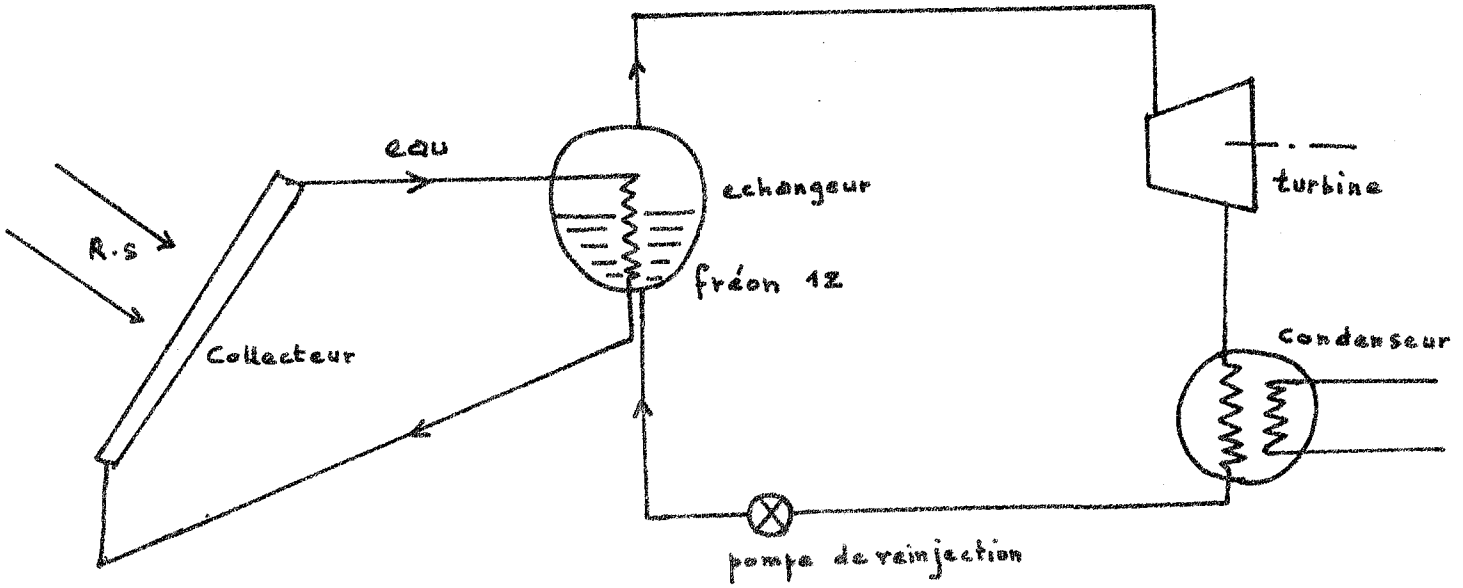


figure 10 Pompe ITTEC

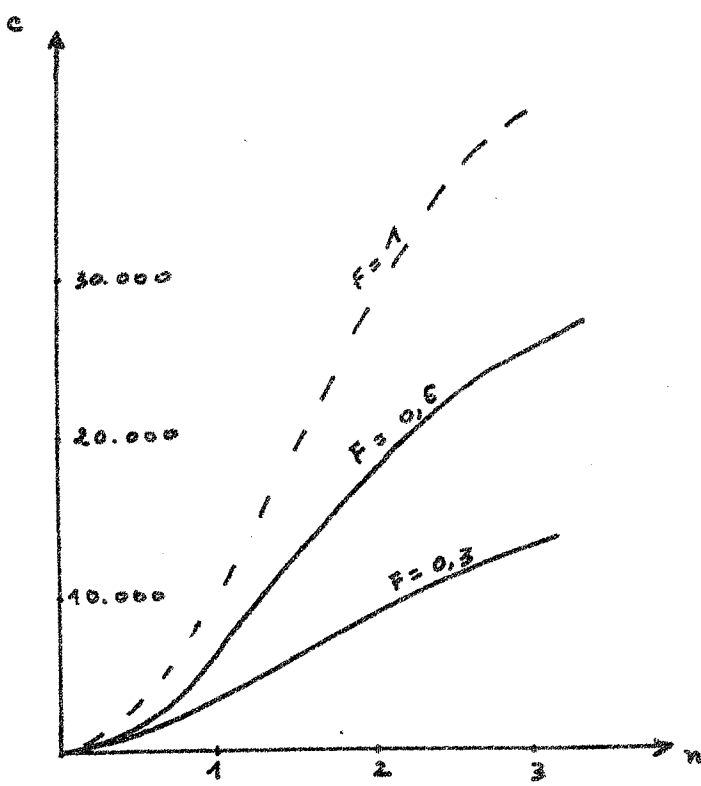


figure 11
facteur de concentration C
en fonction de l'ouverture n pour
différentes valeurs du facteur
perte F du miroir parabolique

- puissance du groupe turbo-alternateur, 2,75 kV A.
- vitesse de rotation, 3 000 t/mn.

Le rendement de l'ensemble est d'environ 1 %. Ce rendement pourrait être théoriquement amélioré en utilisant un insolateur muni de structures antirayonnantes qui a un double effet :

- 1 - Le rendement de l'insolateur est augmenté,
- 2 - La température de l'eau devient plus grande. On peut donc utiliser pour le fréon un cycle de surchauffe et même de ressurchauffe, ce qui améliore très sensiblement le rendement thermodynamique.

Nous n'évoquerons pas dans le cadre de cette réalisation le problème du stockage, mais il est évident qu'une telle installation, à cause du caractère intermittent du R. S. ne peut fonctionner continuellement sans stockage de l'énergie.

On peut envisager dans l'avenir la conversion thermo-élastique de l'énergie solaire par des systèmes sans concentration. Un des facteurs qui joue en faveur de cette méthode est la simplicité du système de captation. Les installations ne nécessitent pas de dispositifs de poursuite et sont, par conséquent, fixes et pas très coûteux. D'autre part, les progrès attendus dans l'utilisation d'insolateurs munis de structures antirayonnantes permettent d'espérer des rendements acceptables.

En attendant de pouvoir construire de tels insolateurs à très grande surface, diverses méthodes ont été proposées pour produire des puissances supérieures au MW.

H. Tabor propose d'utiliser comme capteur, une mare à fond noir de 20 m de diamètre et profonde de 1 à 2 m. Les pertes superficielles y seront réduites en annulant la convection par une méthode consistant à saler la mare par du chlorure de magnésium, de façon à ce que le gradient de densité de salinité varie en sens inverse du gradient de densité par élévation de température.

L'extraction de la chaleur se fait par passage dans une chaudière sous vide et réinjection de l'eau refroidie.

Pour un rayonnement incident de $0,6 \text{ kw/m}^2$, le projet prévoit l'obtention d'une température de 90°C , et une puissance de 6 MW avec un rendement de 1,5 %.

- Difficultés :

1 - Eviter le mélange des couches quand le débit est grand.

2 - Maintenir la propreté de l'étang.

- Utilisation de l'énergie thermique des mers.

Ces projets reprennent tous l'idée du procédé Claude Boucherot. Ils consistent à faire fonctionner une turbine à très basse pression en prenant pour source chaude les eaux superficielles des mers tropicales ($T = 29^\circ\text{C}$), et pour source froide les eaux des profondeurs (7°C).

La température de la source chaude peut être augmentée en recouvrant l'eau de tôle, d'huile, de mazout ou de matière plastique.

Une installation actionnant des turbines 7 MW à 600 t/mn avait été projetée au large d'Abidjan.

De telles installations comprennent comme organes principaux :

- des pompes pour prélever les eaux superficielles,
- un évaporateur sous vide,
- une turbine à très basse pression,
- un condensateur,
- une pompe de circulation de l'eau des profondeurs,
- une pompe d'extraction des gaz dissous dans l'eau d'alimentation.

Ces installations ont un très faible rendement et seront rentables dans la mesure où il y a des industries annexes, comme la production de très grandes quantités d'eau douce.

III - SYSTEMES A FORTE CONCENTRATION

=====

La seule méthode à l'heure actuelle susceptible de concurrencer les centrales thermiques est, sans nul doute, la conversion thermo-élastique de l'énergie solaire à haute température. Elle permet de bénéficier des techniques éprouvées de la thermodynamique classique.

Elle a, d'autre part, l'avantage de permettre de concevoir des chaudières plus concentrées et d'accéder à des températures plus élevées.

Les premières tentatives d'utilisation de l'énergie solaire ont recours à ce procédé.

En 1870, Mouchot expérimentait une chaudière solaire dont le capteur était un miroir tronconique.

En 1913, à Meadi en Egypte, Schuman et C. V. Boys réalisaient un moteur à vapeur de 50 à 60 chevaux ; le capteur était constitué par 7 miroirs cylindres -parabolique fixe- de 130 m² de surface totale ; le facteur de concentration était de 5.

En 1947, le Laboratoire de Tachkent (U. R. S. S.) expérimentait une chaudière tubulaire capable de produire 50 kg de vapeur/h à la pression de 7 H p z ; le capteur était un miroir parabolique de 10 m. de diamètre.

Dans toutes ces réalisations, le problème majeur a surtout été de produire de la température à bas prix. En fait, le problème est beaucoup plus complexe et peut se diviser en quatre grandes parties :

- le problème de captation et de concentration,

- l'organisation du foyer thermique,
 - son architecture,
 - structure particulière de la chaudière,
- le domaine de température dans lequel il faut travailler,
- les fluides utilisés pour transporter la chaleur et effectuer la transformation mécanique.

Ces problèmes qui sont dans l'ensemble liés, peuvent cependant recevoir des solutions indépendantes.

III - 1 - CAPTATION ET CONCENTRATION

Les températures très élevées qu'il faut atteindre, 550 à 600°C, nécessitent la concentration du R. S. Les sites à faible nébulosité devront être choisis car on utilise ici uniquement la Radiation directe, ce qui entraîne le besoin de doter le système d'un mécanisme d'orientation.

Nous ne parlerons pas des systèmes réfracteurs, car il est difficile d'envisager leur fabrication sur de très grandes surfaces.

Les systèmes réflecteurs utilisables peuvent se classer en deux grandes catégories :

- les systèmes entièrement orientables, capteur et foyer solitaires (type héliodyne). Les réalisations seront de petite dimension. La surface de captage est plus facile à réaliser et le problème de guidage est plus aisé à résoudre.
- les systèmes partiellement orientables, foyer fixe, réflecteur formé d'éléments indépendants séparément orientables (champs de miroirs).

La difficulté résidera dans la fabrication et le guidage des miroirs. Elle est largement compensée par la possibilité d'utiliser de

très grandes surfaces et la simplification de la construction de la chaudière.

En tout état de cause, la température obtenue devra être élevée et les ouvertures du foyer thermique réduites afin de limiter les pertes par convection.

De très grandes surfaces de captage seront en outre nécessaires afin de collecter et de concentrer le maximum d'énergie.

Le capteur qui semble répondre à ces exigences est évidemment le miroir parabolique. Le foyer est théoriquement ponctuel et les concentrations supérieures à 500 sont facilement réalisables.

Miroirs paraboliques.

Un miroir parabolique est caractérisé,

- géométriquement, par son ouverture

D = diamètre d'ouverture,

f = distance focale.

- optiquement, par son facteur de concentration C.

Sa valeur théorique est $C_{Th} = \frac{Wz}{Wi}$

Wi est la radiation incidente,

Wz la radiation concentrée sur le plan focal dans la zone chaude circulaire de diamètre $d = \frac{0,93 f}{100}$.

Si θ_1 est demi-angle d'ouverture, on a :

$$C_{Th} = 46\,200 \sin^2 \theta_1.$$

En pratique, il faut multiplier C_T par un facteur de transmission T qui tient compte,

- de l'absorption par le verre,

- de la réflexion,
- des imperfections géométriques,
- mauvaise orientation.

D'autre part, la densité du rayonnement dans la zone chaude n'est pas uniforme. La figure (11) donne la variation de C avec n. On obtient facilement des concentrations de 10 000 à 20 000.

Les miroirs paraboliques ont cependant un grand inconvénient.

- la surface efficace de captation est diminuée par la chaudière et ses dispositifs de soutien.

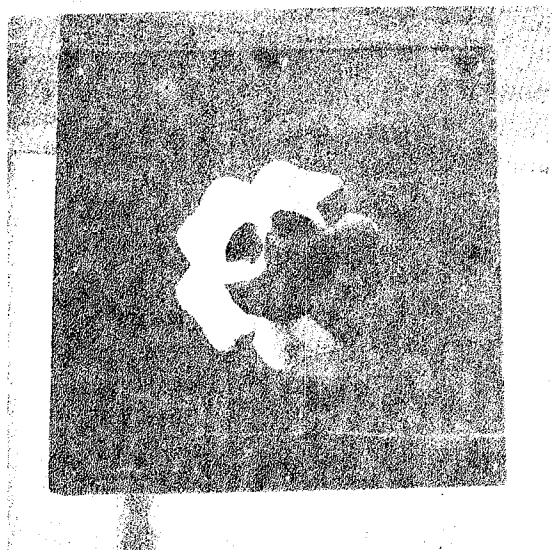
- le choix du foyer thermique est délicat. Il ne doit pas se trouver au foyer optique sous peine d'avoir des pertes par réémission élevées, d'autre part, il doit être compact pour réduire les pertes par convection. Le fait de devoir canaliser le rayonnement vers les surfaces d'échange avec le minimum de pertes et le maximum de concentration a conduit divers auteurs à imaginer d'autres systèmes de captations.

Il s'agit de créer, par un ensemble de miroirs, une forme géométrique adéquate de foyer optique. Le système sera à foyer ponctuel curviligne, surfacique ou volumique, si tous les miroirs ont respectivement leurs foyers qui coïncident ou qui forment une ligne focale, une surface focale ou un volume focal.

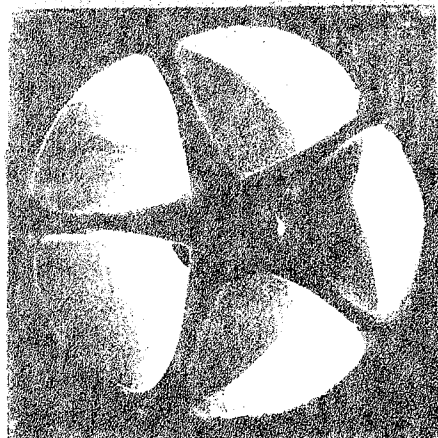
Foyers verticilles

On peut faire, à partir du miroir parabolique, un capteur, obtenu en le divisant en n portions et en faisant subir à chacune d'elles, indépendamment des autres, un déplacement par rapport à l'axe optique.

On obtient alors n foyers secondaires qu'on peut manipuler à sa guise.

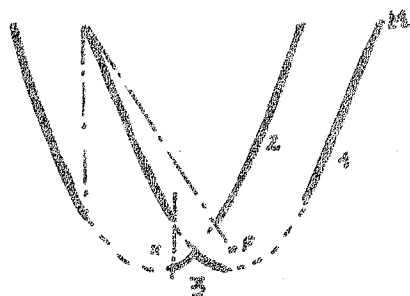


vue arrière

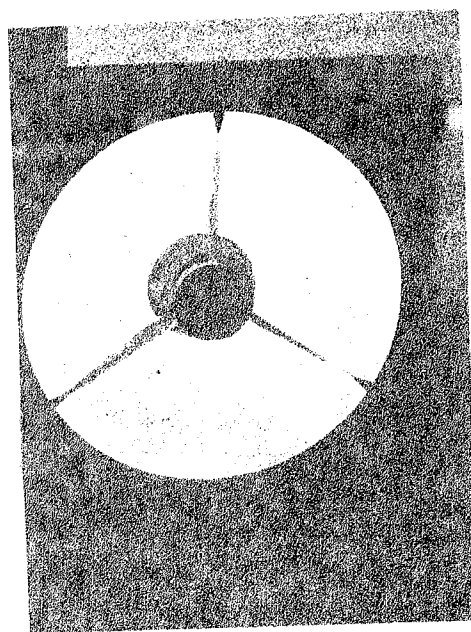


vue devant

figure 12
foyer radière



miroir tore parabolique



foyer du miroir tore-parabolique

figure 13

C'est sur ce principe que sont basés les foyers radiaires.

La figure (12) montre la trajectoire des rayons solaires à partir de ces n foyers. L'avantage de ce système est de permettre de disposer de plusieurs ouvertures (foyers optiques) pour le foyer thermique situé derrière ces ouvertures.

Tores paraboliques.

Une tore parabolique est une surface à deux nappes obtenue en faisant tourner une parabole autour d'un axe décentré.

Par un découpage astucieux de la surface parabolique, on obtient 3 miroirs, figure (13). On obtient une ligne focale circulaire. Ce dispositif permet de diminuer considérablement les pertes par réémission du foyer thermique. En effet, l'angle solide sous lequel, d'un point du foyer on voit l'espace est faible ; il devient nul quand $F M$ est tangent au miroir 2.

Cette méthode peut se généraliser.

On peut ainsi, créer à sa guise n miroirs engendrés par m paraboles $m \leq n \leq 2m$, avec autant d'anneaux focaux que de paraboles. On dispose ainsi d'un outil extrêmement riche pour la fabrication des foyers thermiques.

Foyers linéaires.

On utilise un champ horizontal de miroirs cylindro-paraboliques dont chacun concentre le rayonnement sur une ligne focale commune située à une hauteur H .

L'originalité de ce dispositif tient au fait que grâce au faible facteur de concentration obtenu, on peut utiliser les structures de G. Francia pour réduire les pertes du foyer thermique.

III - 2 - FOYER THERMIQUE

Le foyer thermique doit être compact pour réduire les pertes par convection. Les ouvertures doivent être petites pour diminuer les pertes par réémission des parois internes ; pertes qui par ailleurs croissent avec la température.

- Dans les systèmes à foyers radiaires comportant n secteurs, le foyer thermique comportera n ouvertures disposées au niveau des n foyers.

- Dans les systèmes paraboliques, les ouvertures du foyer thermique se situeront au niveau des cercles focaux.

- Dans les systèmes à foyer linéaire, l'entrée se situera sur la ligne focale à partir de laquelle on dispose des cellules de G. Francia.

L'enceinte du foyer thermique doit comporter, si nécessaire, après les ouvertures, des surfaces réfléchissantes capables d'empêcher le rayonnement solaire de se disperser ; ces surfaces devront aussi être absorbantes pour le rayonnement réémis. On y disposera également un adaptateur pour uniformiser les contraintes thermiques locales. Un système automatique de thermorégularisation permettra de maintenir la température de l'enceinte aussi constante que possible.

Les surfaces d'échange tapisseront le foyer thermique et devront être capables d'absorber le rayonnement solaire.

- L'inconvénient des foyers solaires est qu'ils soient ouverts ; il existe par conséquent de l'air qui s'échauffe au contact des parois d'où des pertes par convection. Pour les réduire, il faudra donc prévoir une circulation de cet air.

III - 3 - FLUIDE

On utilisera de l'eau surpressée en général mais il convient d'envisager l'utilisation de l'air dans les régions désertiques. L'architecture et le volume de la chaudière dépendront beaucoup de ce choix. Pour simplifier la construction de la chaudière, il est préférable d'utiliser dans celle-ci un fluide primaire sous une seule phase pour le transport de chaleur.

III - 4 - REALISATIONS

La Centrale solaire à foyer linéaire de Lacédémone -
Marseille.

- champ de miroirs,

7 miroirs cylindro-paraboliques de 8 m de long sur
1 m de large.

- foyer thermique,

c'est un parallélépipède de 8 m de long et de 25 à
30 cm de large et de haut. Il est recouvert d'une
double enveloppe cylindrique ; l'enveloppe intérieure
est métallique et l'enveloppe extérieure en plexiglas.
Entre les deux enveloppes l'eau subit un préchauffage.

Au niveau de l'ouverture du foyer, on obtient
une tache, image du soleil, de 18 à 20 cm de large.
Le foyer contient 12 tubes montés en hélice de
pas 0,75. Sous cette nappe sont disposées des cellules
antirayonnantes constituées par des tubes de pyrex
(diamètre 18 mm, épaisseur 0,8, hauteur 180) maintenus
dans des pots en pyrex par groupe de 40.

Cette chaudière est destinée à fournir de la vapeur
d'eau à 150 H p z et 500°C.

La Centrale solaire de St Ilario de Nervi.

- champ de miroirs,

121 miroirs plans de 74 cm de diamètre disposés en carré.
La superficie utile du champ est de 52 m².

- foyer thermique,

Le foyer optique est du type ponctuel. La chaudière a une ouverture circulaire de 70 cm de diamètre, elle contient 60 m de tubes noircis, enroulés, une partie en serpentin, une partie en hélice et munis de cellules antirayonnantes.

Cette chaudière fournit avec un rendement de 70 %
35 à 40 kg/h de vapeur d'eau surchauffée entre
500 et 600°C à une pression de 150 atm.

Ces différentes réalisations montrent que nous sommes dans les domaines de températures et pressions utilisées dans les centrales thermiques modernes.

Les champs de miroirs rendent possible l'utilisation de très grandes surfaces et permettent d'envisager des puissances de centaines de mégawatts ; cependant, la fabrication des chaudières posera sans doute des problèmes très ardues d'infrastructure de soutien quand il faudra produire des débits de 324 à 683 tonnes/heure. Pour ces raisons, nous pensons que les centrales solaires ne se construiront que par tranches de dizaines de MW.

III - STOCKAGE DE L'ENERGIE SOLAIRE

=====

Le soleil est une source d'énergie intermittente, il faudra donc le stocker pour assurer un fonctionnement continu des centrales solaires.

Les procédés utilisés pour stocker l'énergie solaire dépendent de la quantité de chaleur à emmagasiner et leur choix devra tenir compte de l'amortissement des installations de captage, de la chaudière et du groupe turbo-alternateur.

Diverses méthodes sont théoriquement applicables, dont les plus préconisées à l'heure actuelle sont :

- utilisation du changement d'état d'un corps,
- de la chaleur sensible d'un corps,
- de l'énergie hydraulique,
- des piles à combustible.

Stockage hydraulique

L'excédent d'énergie solaire produite dans la journée est utilisé pour emmagasiner l'eau dans un réservoir naturel. Cette eau sera ensuite utilisée pour actionner des turbines hydrauliques. C'est un procédé simple mais qui ne résout le problème de la régularisation.

Stockage de la chaleur

La figure (14) explique ce procédé. Le fluide primaire chauffé dans la chaudière par l'énergie solaire cède de la chaleur au stock et au fluide secondaire permettant d'actionner la turbine. Quand il y a défaut d'énergie solaire, le fluide secondaire reçoit sa chaleur du stock.

- Stockage dans le sol,

Dans les solutions envisagées, le stockage se fait dans un panneau de terrain vertical. On y fore des trous équidistants dans lesquels on met des tubes destinés à faire circuler le fluide primaire. Si le panneau est cylindrique, la circulation du fluide primaire se fera du centre vers la périphérie en cas de stockage et inversement quand on utilise le stock.

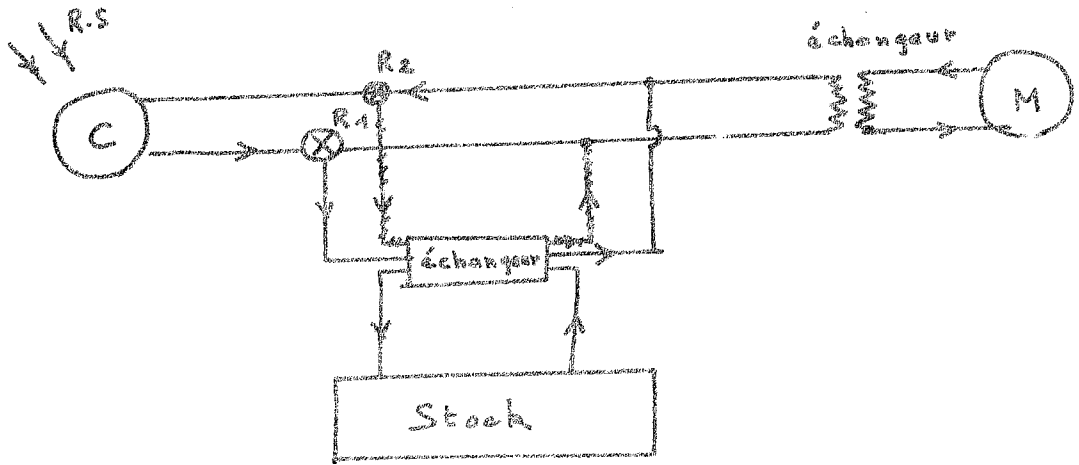


Figure 14

Stockage de la chaleur

Quand la quantité de vapeur produite par C \geq à celle nécessaire à la turbine M, R₁ est ouvert, sinon R₂ est ouvert.

Les inconvénients de cette solution sont de plusieurs ordres.

Le préchauffage du terrain dure en moyenne un an pour de grandes puissances et il faut le faire avant la mise en route.

Il y a beaucoup de pertes dues au mauvais contact entre tubes et parois du forage.

Des déperditions de chaleur aux limites du stock.

Les contraintes imposées par le sol aux tubes (dilatation, glissement de terrain) peuvent les rompre.

Le repérage et la réparation des dégâts causés aux tubes est très pénible.

- Chaleur de fusion.

La chaleur du fluide primaire fait fondre un corps dont on récupère ensuite la chaleur quand il se solidifie.

L'entectique fluorure de sodium et de potassium qui fond à 700°C, dont la densité est 1,9 et la chaleur de fusion 140 kcal/kg (162 Wh/kg) est un corps tout indiqué. (Point de fusion à la limite des températures atteintes et grande chaleur de fusion).

Les causes de pertes sont essentiellement les déperditions de chaleur qu'on peut limiter par une isolation appropriée.

Piles à combustible

Une partie de l'énergie électrique produite par la centrale est utilisée pour électrolyser de l'eau. L'hydrogène et l'oxygène obtenus seront ensuite réutilisés dans des piles à combustible pour fournir de l'électricité.

Nous pensons que cette dernière solution est celle de l'avenir.

C O N C L U S I O N

=====

Nous avons tenté de mettre en lumière la possibilité d'utilisation de l'énergie solaire par conversion thermo-élastique.

Un tel procédé est envisageable malgré les difficultés qu'il soulève.

Les courbes de relevés solaires dont on a besoin lors de l'installation d'une centrale en un lieu sont toujours des données inconnues. Mais des méthodes de prédétermination de la radiation solaire permettent de palier à cet inconvénient.

La production d'électricité à partir des méthodes à faible concentration a un rendement trop insuffisant pour que l'on s'y attache, malgré les avantages que peuvent offrir les insolateurs plats.

Seules, les méthodes à forte concentration permettent des rendements élevés et nous pensons que ce sont les solutions à choisir.

La construction du champ de miroirs est délicate et onéreuse car elle pose des problèmes complexes d'orientation.

La chaudière possède une architecture spéciale qu'il faut adapter au champ de miroirs, et sa fixation est compliquée. Mais le problème majeur demeure le stockage de l'énergie solaire en vue de la régularisation du fonctionnement des centrales. La solution d'avenir pour résoudre ce problème est la fabrication de l'hydrogène à partir de l'énergie solaire. Par ce procédé on pourrait créer un circuit de distribution de l'hydrogène qui permettrait de se ravitailler en énergie électrique à l'aide de piles à combustibles.

L'utilisation de l'énergie solaire permettrait de résoudre les problèmes de développement du tiers monde car cette énergie est largement répandue dans ces zones, et il faudrait dès à présent y expé-
rimer des centrales pilotes.

B I B L I O G R A P H I E

=====

- (1) - Ch. PERRIN De BRICHAMBAUT : Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels - Gauthier-Villars.
- (2) - G. PERI : Contribution à l'étude de la captation de l'énergie solaire en vue de sa conversion thermodynamique à haute température : Thèse de Docteur d'Université présentée à l'Université d'Aix - Marseille.
- (3) - M. TERRIER : Contribution à l'étude de la captation indirecte de l'énergie solaire : Thèse de Docteur de Spécialité présentée à l'Université d'Aix - Marseille.
- (4) - M. PERROT : La houille d'or - Fayard.
- (5) - M. TOUCHAIS : Deux erreurs classiques dans le calcul du prix des centrales thermiques solaires : COMPLES n° 6.
- (6) - G. FRANCIA : Etude d'un collecteur de l'énergie solaire à cellules tronconiques : COMPLES n° 6.
- (7) - PERROT - TOUCHAIS - GALLET : Structures antirayonnantes de G. Francia : COMPLES n° 6.
- (8) - M. PERROT et M. TOUCHAIS : La conversion de l'énergie solaire en chaleur à haute température : COMPLES n° 7.
- (9) - R. FLORIS : Une étude sur le facteur de concentration dans les chaudières solaires linéaires du type de celle de Lacédémone - Marseille : COMPLES n° 7.
- (10) - R. ROSSET et M. TOUCHAIS : Le point de vue statistique au sujet de la prédétermination de la radiation solaire : COMPLES n° 8.
- (11) - G. FRANCIA : Nouveau type de Centrale solaire : COMPLES n° 8.
- (12) - G. FRANCIA : Sur les courbures d'un miroir qui concentre la lumière solaire vers un point fixe : COMPLES n° 8.
- (13) - A. GUILLEMONAT - M. TOUCHAIS et AIACHE : Etude géométrique des champs de miroirs : COMPLES n° 8.

- (14) - H. BOTTA : La prédétermination du rayonnement solaire : COMPLES n° 10.
- (15) - M. PERROT - DESAUTEL - G. PERI - GALLET - BOUTHIER : Essais d'utilisation de cellules antirayonnantes au chauffage à basse et moyenne températures : COMPLES n° 10.
- (16) - H. MASSON et J. P. GIRARDIER : Etat actuel des recherches sur les pompes solaires à collecteur plan : COMPLES n° 10.
- (17) - M. TOUCHAIS : Les foyers miroirs : COMPLES n° 11.
- (18) - E. JUSTI et W. KALBERLAH : Storage of solar electrical energy by electrolysis of water : COMPLES n° 11.
- (19) - G. BRUN : Le stockage thermique dans le sol, en vue de la régularisation de l'énergie solaire : COMPLES n° 13.
- (20) - M. TOUCHAIS : La régularisation des centrales solaires par stockage thermique à haute température : COMPLES n° 14.
- (21) - H. BOTTA : Contribution à l'étude du stock dans le cas de stockage de l'énergie à haute température et en grande quantité : COMPLES n° 15.
- (22) - D. PAILHAREY : Prédétermination des performances d'un insolateur plan : COMPLES n° 16.
- (23) - M. TOUCHAIS : Un débouché possible pour l'énergie solaire : La fabrication de l'hydrogène : COMPLES n° 17.
- (24) - J. P. GIRARDIER et H. MASSON : L'utilisation de l'énergie solaire pour exhaure de l'eau : COMPLES n° 18.
- (25) - Publications du C. N. R. S. : Applications thermiques de l'énergie solaire dans le domaine de la recherche et de l'industrie.
- (26) - H. MASSON : L'énergie solaire et ses applications : Annales de la Faculté des Sciences de Dakar.

UNIVERSITE SCIENTIFIQUE
ET MEDICALE DE GRENOBLE

DEUXIEME THESE

TRANSFORMATION THERMO-ELASTIQUE DE L'ENERGIE SOLAIRE
EN VUE DE LA PRODUCTION D'ENERGIE ELECTRIQUE.

Abdourahmane N'DIR

