

RÉPUBLIQUE DU SÉNÉGAL



ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE THIÈS

PROJET
DE
FIN D'ÉTUDES

Gm. 0383

Titre EXPÉRIMENTATION DE NOUVEAUX TYPES
DE COMBINAISONS DE CAPTEUR SOLAIRE
ET CHAUFFE - EAU ELECTRIQUE

Auteur Mame Balla GUEYE

Génie mécanique

Date JUIN 1983

ECOLE POLYTECHNIQUE DE THIES
ANNEE SCOLAIRE 1982-83

PROJET DE FIN D'ETUDES

EXPERIMENTATION DE NOUVEAUX
TYPES DE COMBINAISONS DE CAPTEUR
SOLAIRE ET DE CHAUFFE-EAU ELECTRIQUE

AUTEUR
MAME BALLA
GUEYE

DIRECTEUR
A. WOLSKI

REMERCIEMENTS

ii

Nous nous faisons un devoir de remercier tous ceux qui ont contribué, à une façon ou d'une autre, à l'élaboration de ce projet. Il s'agit de :

M^r A. WOLSKI professeur à l'École Polytechnique et directeur du projet.

M^r VIGNEAU technicien aux ateliers de l'E. P. T.

M^{ms} BLAIS et TREMBLEY techniciens à l'E. P. T.

M^{rs} MARTIN et IMBEAULT professeurs à l'E. P. T.

M^{rs} Abdoulaye M'BAYE et Jean COULIBALY

respectivement militaire et plombier à l'E. P. T.

Nous remercions enfin nos camarades de classe pour leur esprit de collaboration.

SOMMAIRE

iii

Nous présentons ici une expérimentation d'un nouveau type de combinaison d'un chauffe-eau électrique et d'un capteur solaire dans un réseau de distribution d'eau.

Après avoir présenté le principe général d'un capteur solaire, nous décrivons celui que nous avons utilisé pour nos expériences, parce qu'il possède quelques particularités. Une conception de réservoir est faite afin de permettre un choix au cas où un réservoir satisfaisant n'est pas disponible.

Pour deux réglages différents du thermostat du chauffe-eau électrique ($43,3^{\circ}\text{C}$ et $46,1^{\circ}\text{C}$), nous avons relevé des mesures d'énergie électrique active consommée pendant une journée pour les deux cas suivants: le capteur est hors circuit; le capteur est dans le circuit. Nous n'avons pas eu le temps d'effectuer toutes les mesures escomptées mais l'analyse de celles que nous avons obtenues, et une étude économique nous ont permis d'espérer avoir un système pouvant être très rentable.

9

TABLE DES MATIERES ^{iv}

	Pages
I INTRODUCTION	1
II GENERALITES SUR LE RAYONNEMENT SOLAIRE	3
III PRINCIPE D'UN CAPTEUR	6
IV LE CAPTEUR UTILISÉ	9
IV-1 Schémas	9
IV-1-1 Vue en perspective	9
IV-1-2 Vues en coupe	10
IV-2 Description	11
IV-3 Substitution	13
IV-4 Conception du réservoir	14
V EXPERIMENTATION	21
V-1 Evolution du projet	21
V-2 Schéma de l'installation	23
V-3 Orientation et Inclinaison	24
V-4 Mesures	27
- matériels utilisés	27
- procédé	27
- tableaux	28
VI ANALYSE ET DISCUSSIONS	35

VII	ETUDE ECONOMIQUE	37
VII-1	Investissement	38
VII-2	Calculs	39
VIII	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	42
IX	ANNEXES	43
IX-1	Annexe A : propriétés de quelques matériaux	43
IX-2	Annexe B : propriétés du plexiglas	44
IX-3	ANNEXE C : rayonnement global	45
X	REFERENCES ET BIBLIOGRAPHIES	46

I INTRODUCTION

Nous assistons actuellement à une prise de conscience générale de l'importance de l'énergie dans le développement socio-économique.

En effet dans presque tous les pays, y compris ceux dits nantis, des politiques sont menées afin de trouver les voies et moyens d'économiser l'énergie.

C'est ainsi qu'au Brésil par exemple un grand progrès est réalisé sur l'utilisation du mélange essence - alcool comme carburant; au Danemark l'énergie éolienne est exploitée sur une grande échelle, tandis qu'aux États-Unis des moyens gigantesques sont mis sur pied afin de maîtriser l'énergie polaire. Nous pensons donc que le Sénégal, pays sahélien non encore producteur de pétrole, mais très ensoleillé, a un grand intérêt à faire des recherches sur l'énergie polaire en vue de l'exploiter de façon optimale. Aussi à l'École Polytechnique de THIES des sujets portant sur cette "nouvelle" forme d'énergie sont-ils proposés chaque année aux étudiants de cinquième année pour leurs projets de fin d'études.

2

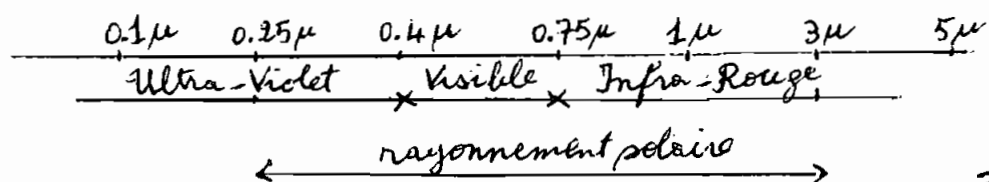
Nous en avons choisi un, qui porte sur une recherche expérimentale consistant à réaliser un circuit hydraulique capteur-chauffe-eau électrique et à examiner les résultats de cette combinaison. Contrairement au circuit classique de thermosiphon, le nôtre consiste à mettre en série un capteur solaire et un chauffe-eau électrique dans le réseau de distribution d'eau. Le chauffe-eau est muni d'un thermostat qui coupe l'alimentation électrique de la résistance chauffante dès que la température de l'eau qu'il contient atteint celle à laquelle le thermostat était réglé. Quand la température baisse, en particulier quand de l'eau chaude est soutirée par un utilisateur et remplacée par l'eau froide du réseau d'alimentation, la résistance se remet en marche jusqu'à ce que la température de réglage soit de nouveau atteinte. Nous voyons donc que si l'eau du réseau passe d'abord au capteur solaire où elle reçoit de la chaleur, l'énergie électrique nécessaire pour la porter à la température de réglage est réduite et peut même être nulle si sa température est supérieure ou égale à celle de réglage. Il s'agira donc de comparer le gain tiré de cette économie d'énergie au coût du capteur.

II GENERALITES SUR LE RAYONNEMENT SOLAIRE

Le soleil est l'astre central, lumineux, du monde que nous habitons, et autour duquel gravitent les planètes. Il est considéré comme une sphère de 1 400 000 km de diamètre et de 5750°C de température superficielle. La distance moyenne de la terre au soleil est de l'ordre de 150 millions de km.

Le soleil est une étoile dont l'énergie réside dans les phénomènes thermonucléaires de transformation de l'hydrogène en hélium. Une partie de cette énergie sert à maintenir la température du soleil, et le reste est émis dans l'espace. La terre en reçoit une faible quantité qui se répand à raison de 1,4 kW/m² en deçà de l'atmosphère; mais cette dernière étant absorbante, le flux énergétique qui arrive à la surface du sol n'est plus que de 1 kW/m².

Cette énergie est sous forme d'ondes électromagnétiques (superposition d'ondes visibles, d'Infra-Rouge et d'Ultra-violet) dont les longueurs vont de 0.25 μ à 3 μ.



Effet de l'atmosphère sur le rayonnement solaire:

4

L'atmosphère, composée essentiellement d'oxygène, d'azote, d'ozone, de vapeur d'eau et de gaz carbonique, dissipe une partie de l'énergie qui vient du soleil par:

- diffusion moléculaire
- réflexion diffuse par les aérosols (poussières...)
- absorption gazeuse

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

L'action de l'atmosphère s'effectuant dans toutes les directions, une partie du rayonnement revient au sol en provenance de l'ensemble de la voûte céleste.

Ce rayonnement, dit diffus, s'ajoute à celui dit direct (énergie irradiée directement par le disque solaire durant les périodes d'ensoleillement) pour donner le rayonnement global.

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

D'autres phénomènes interviennent encore pour déterminer la somme des rayonnements au sol, car (le) ce dernier réfléchit une partie du rayonnement vers l'atmosphère qui le rediffuse. Par ailleurs, le sol et l'atmosphère

étant chauffés, émettent leur rayonnement propre. 5

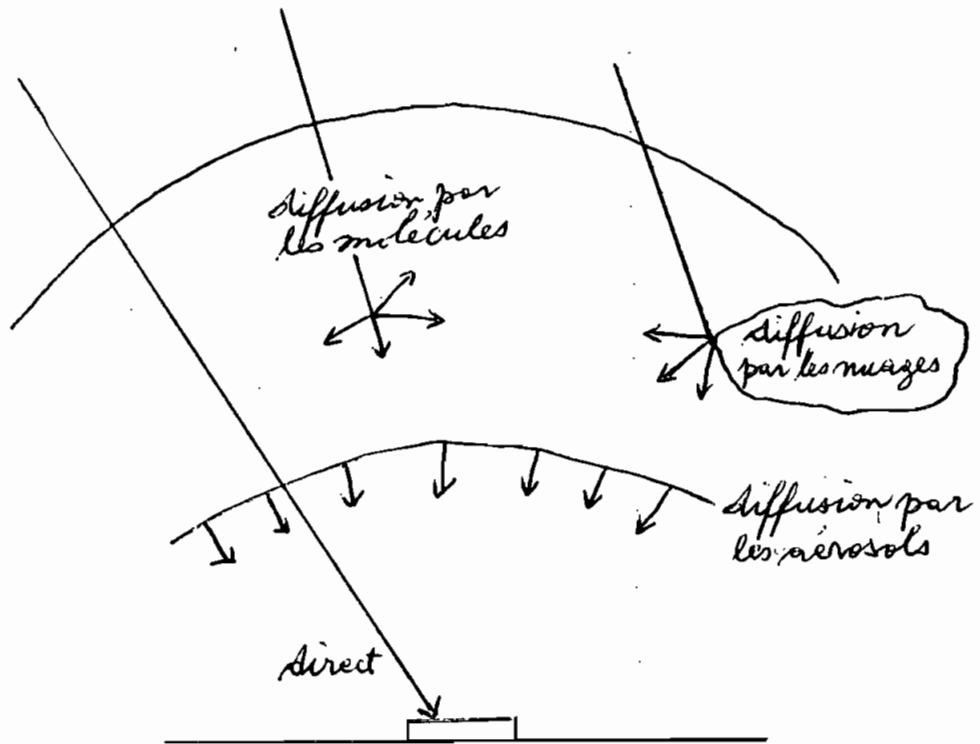


fig 1

III PRINCIPE D'UN CAPTEUR

Le capteur (ou insolateur) solaire, basé sur l'effet de serre, est un dispositif qui, comme son nom l'indique, permet de capter l'énergie solaire arrivant sur la terre. L'effet de serre repose sur les grands principes suivants :

- 1 Tout corps rayonne de l'énergie
- 2 L'énergie émise par un corps est de quantité d'autant plus grande, que la température du corps est plus élevée.
- 3 La température définit le domaine de longueurs d'ondes dans lequel le corps a la possibilité d'émettre.
- 4 Certains matériaux ont une transmission sélective, c'est à dire qu'ils sont transparents à certaines longueurs d'ondes et opaques à d'autres; c'est le cas notamment du verre et de certains matériaux plastiques, comme le plexiglas.

Effet de serre :

Exposons un corps au soleil. Il rayonne de l'énergie (d'après le principe 1), mais la

7

quantité de cette énergie émise est inférieure à celle de l'énergie qu'il reçoit du soleil. Le corps s'échauffe donc de plus en plus et d'après le principe 2, l'énergie qu'il émet augmente. Il arrive très vite un moment où le corps émet autant d'énergie qu'il en reçoit; alors sa température se stabilise. Notons quand même que le corps perdait aussi de l'énergie par convection de l'air ambiant. Pour augmenter cette température d'équilibre, plaçons un verre au-dessus (à quelques centimètres) de corps. Le verre laisse passer les rayons solaires (de longueurs d'ondes comprises entre 0.25μ et 3μ), mais est opaque aux rayons émis par le corps qui sont de longueurs d'ondes supérieures à 4μ (voir principes 3 et 4). Désormais de l'énergie arrive donc sur le corps mais ne peut plus partir; elle est piégée: c'est l'effet de serre.

Schéma de base d'un capteur

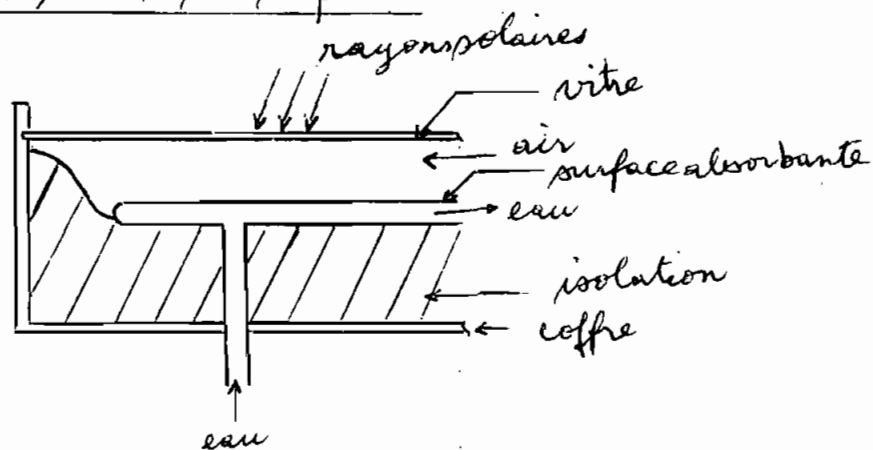


fig 2

Ce capteur est tout simplement le corps et le verre dont nous venons de parler et auxquels nous avons ajouté les composantes suivantes :

- une isolation thermique latérale et arrière qui permet de réduire les pertes.
- un circuit de fluide qui s'échauffe en refroidissant le corps ; l'énergie est ainsi évacuée.
- un coffre qui maintient la rigidité de l'ensemble.

IV LE CAPTEUR UTILISÉ

IV.1 SCHEMAS

IV.1.1 VUE EN PERSPECTIVE

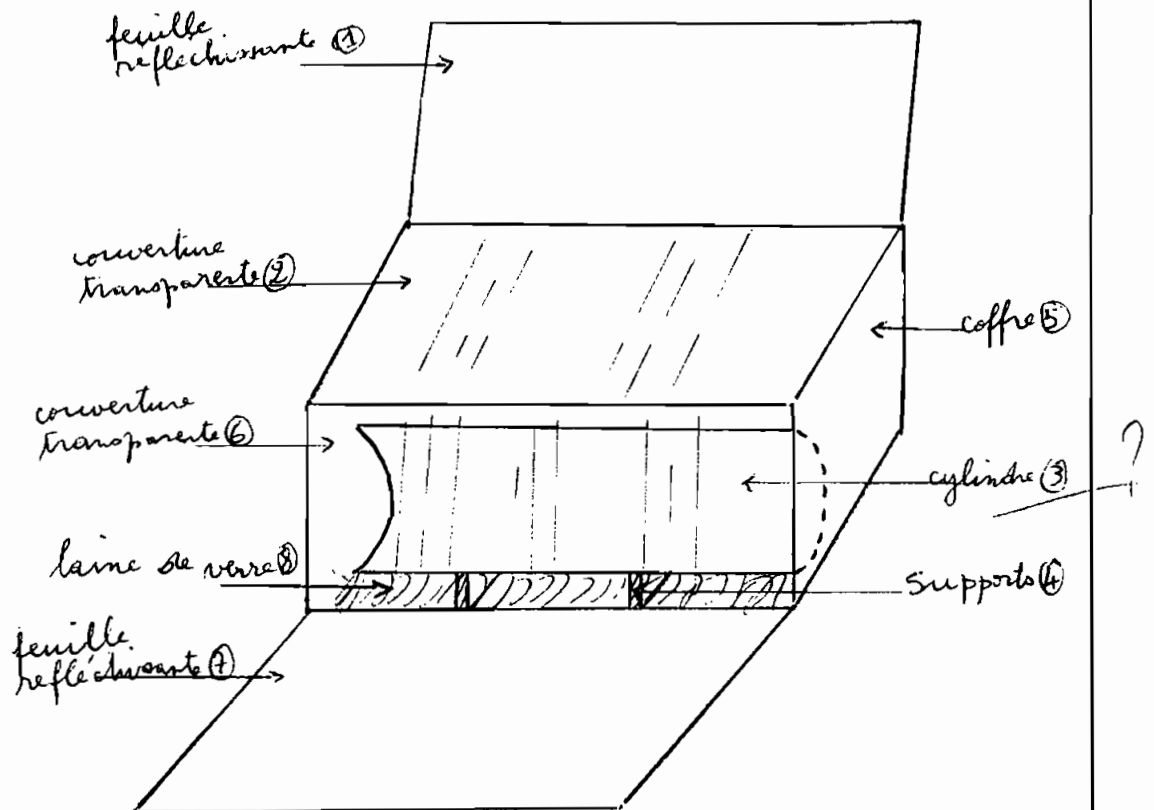


fig 3

IV-1-2 VUES EN COUPE

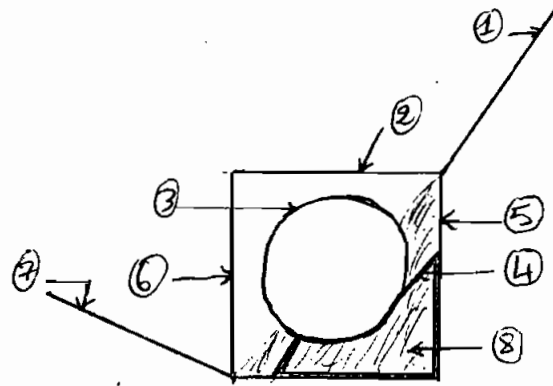


fig 4

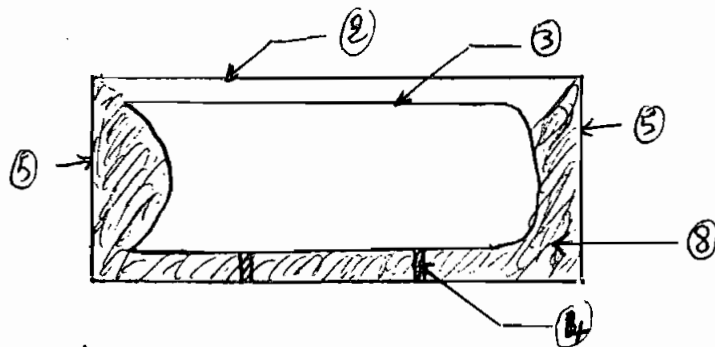


fig 5

- ① et ⑦ : parois réfléchissantes
- ② et ⑥ : plexiglas
- ③ : réservoir-absorbant
- ④ : support
- ⑤ : coffre
- ⑧ : laine de verre

Attention!

Le capteur polaire que nous avons utilisé dans nos expériences est composé de :

- deux surfaces transparentes ② et ⑥, perpendiculaires, en plexiglas, de dimension $1290 \times 530 \times 2$. Ces surfaces laissent passer les rayons polaires mais sont opaques aux rayons émis par l'absorbeur ③.

Elles réduisent aussi de beaucoup les pertes par convection. Vous pouvez voir certaines propriétés de ce matériau en annexe B

- un cylindre ③ peint à l'oxyde d'acétylène.

Ce cylindre est à la fois l'absorbeur et le réservoir d'eau. Il transfère à l'eau qu'il contient, la chaleur produite par sa surface par absorption de l'énergie polaire. N'ayant pas eu le temps de construire un réservoir, nous avons été l'isolation d'un vieux chauffe-eau électrique, et nous nous sommes servi de son réservoir comme absorbeur. Cela n'a pas manqué de poser certains problèmes qui sont analysés ultérieurement. Vous pouvez voir aussi, dans les chapitres suivants, un calcul de réservoir qui pourrait remplacer celui-ci.

dimension du cylindre ③ :

diamètre = 413 mm

volume 136 litres

surface totale = $1,3 \text{ m}^2$

forme : voir figure ci-dessous.

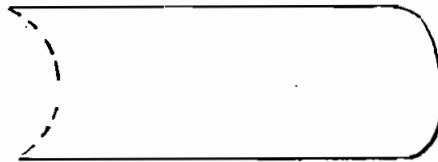


fig 6

- deux supports ④ en contre-plaqué sur lesquels repose le cylindre. Leur rôle est de l'empêcher de tasser l'isolation.
 - une isolation thermique latérale et arrière en laine de verre et dont vous pourrez voir certaines propriétés en annexe A.
 - un coffre en contre-plaqué qui sert de protection à l'ensemble et le maintient rigide.
 - deux surfaces ① et ⑦ qui réfléchissent de l'énergie solaire sur les surfaces en plexiglas et ainsi augmentent la quantité d'énergie reçues par ces dernières.
- Ces parois réfléchissantes ont été apportées des États-Unis par mon directeur de projet. Elles n'existent pas au Sénégal.

Le capteur que nous venons de décrire a été construit en hâte avec des matériaux disponibles à l'École Polytechnique, car, faute de temps, nous ne pouvions prendre le risque de commander d'autres matériaux dont le délai de livraison pouvait être long. Néanmoins, pour une construction future nous proposons les remplacements suivants:

- A la place du plexiglas, prendre un verre à vitre ordinaire qui a l'avantage d'avoir un meilleur coefficient de transmission (environ 0,87) et une durée de vie supérieure à celle du plexiglas qui, lui, se détériore sous l'effet des rayons Ultra-Violet.
- Les surfaces réfléchissantes n'étant pas disponibles au Sénégal, elles peuvent être remplacées par des feuilles d'aluminium de 0,8 mm d'épaisseur.
- Quant au réservoir, nous en proposons une conception détaillée ci-après.

IV-4 CONCEPTION DU RESERVOIR 14

Le capteur solaire étant en série avec le chauffe-eau électrique, le réservoir subit des contraintes dues à la pression du réseau de distribution d'eau. Des calculs s'avèrent donc nécessaires pour avoir un réservoir qui pourra supporter l'effet de ces efforts. Pour un réservoir de révolution, soumis à une pression intérieure symétrique par rapport à l'axe et de parois minces, nous pouvons appliquer la théorie de membrane.

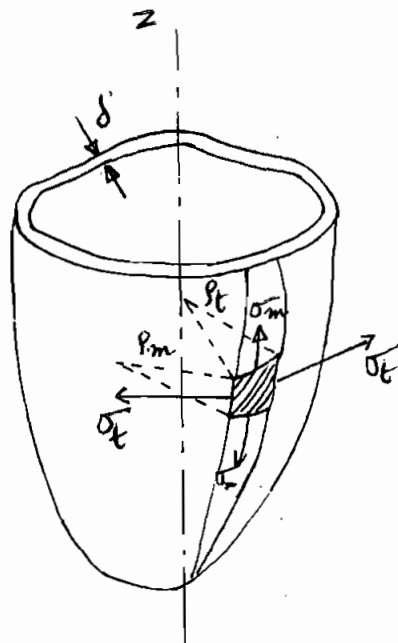


fig 7

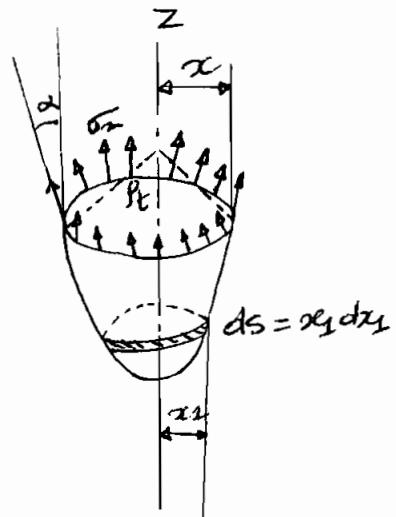


fig 8

Selon cette théorie la condition d'équilibre d'un élément de paroi en un point considéré, séparé par

des sections méridiennes et des sections perpendiculaires à celles-ci infiniment voisines (fig 7) donne une équation dite de LAPLACE qui permet de déterminer les contraintes normales, circonférentielles σ_t et méridiennes σ_m :

$$\frac{\sigma_t}{r_t} + \frac{\sigma_m}{r_m} = \frac{p}{\delta} \quad (1)$$

où r_t et r_m sont respectivement les rayons de courbure des sections circonférentielles et méridienne de la paroi du réservoir au point considéré;

p = intensité de la pression intérieure et est fonction seulement de z .

δ = l'épaisseur de la paroi du réservoir.

(cf référence 1)

De la condition d'équilibre de la partie du réservoir dégagée par des sections perpendiculaires aux méridiens au niveau du point considéré (fig 8) on obtient la seconde équation :

$$\sigma_m \delta x \cos \alpha = Z \quad (2)$$

où x est le rayon de la circonférence de la section au niveau considéré.

α = angle formé par l'axe des z et la tangente au méridien au même niveau. 16

Z = la somme des projections sur l'axe des z des forces agissant sur la partie tranchée du réservoir.

Z est rapporté à l'arc de longueur égale au rayon

on a aussi
$$Z = \int_0^x p x_1 dx_1 \quad (3)$$

Si $p = \text{constante}$
$$Z = p \int_0^x x_1 dx_1 = p \frac{x^2}{2}$$

$x = \rho_t \cos \alpha \Rightarrow Z = \frac{1}{2} p \rho_t^2 \cos^2 \alpha \quad (4)$

equations (2) et (4) $\Rightarrow \sigma_m = \frac{p \rho_t}{2\delta}$

et (4) $\Rightarrow \sigma_t = \frac{p \rho_t}{2\delta} \left(2 - \frac{\rho_t}{\rho_m} \right)$

} (5)

Si la paroi du réservoir a un changement brusque d'inclinaison, des efforts locaux apparaissent dans la section de transition et provoquent une importante surtension. Pour diminuer l'influence de ces efforts, on fortifie souvent la section de jonction par un anneau d'épau.

Cela ne fait que rendre la fabrication plus compliquée

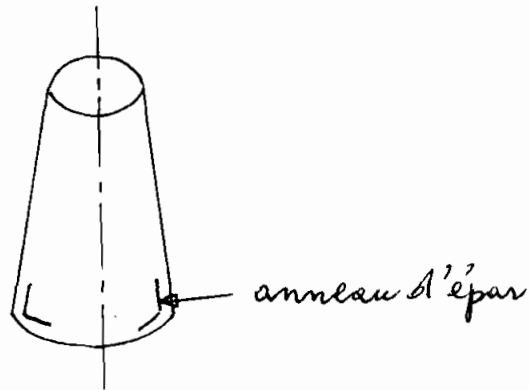


fig 9

C'est pourquoi nous choisissons un réservoir composé d'un cylindre accolés à deux semi-sphères :



fig 10

Avec cette forme, nous faisons les calculs suivants :

- pour la partie au milieu (partie cylindrique)

$$l_m = \infty \text{ et } l_t = r$$

où r est le rayon, commun au cylindre et aux semi-sphères.

$$\text{on a : } \sigma_t = \frac{pr}{\delta} \text{ et } \sigma_m = \frac{pr}{2\delta} = \frac{\sigma_t}{2} \quad (6)$$

- pour les semi-sphères on a :

$$l_t = l_m = r \text{ et } \sigma_t = \sigma_m = \frac{pr}{2\delta} \quad (7)$$

Ainsi en connaissant la pression p du réseau de distribution d'eau, le rayon r du réservoir et le matériau du réservoir, nous pouvons trouver l'épaisseur δ qui convient.

Choisissons comme matériau l'acier inoxydable martensitique : 12 à 15% de Chrome et 0.1 à 0.4% de carbone. On peut aussi y ajouter 2% de nickel.

La grande passivité du chrome en milieu oxydant (formation, en surface, de couche d'oxyde protectrice) confère à cet acier une grande résistance à la corrosion et aux attaques chimiques. Sa résistance à la traction est également élevée (1300-1390 MPa). Voir les autres propriétés en annexe A.

D'après les formules (6) et (7) nous voyons que la contrainte la plus élevée qui existe au niveau du réservoir est la contrainte circonférentielle agissant sur la partie cylindrique: $\sigma_t = \frac{pr}{\delta}$

nous allons donc calculer l'épaisseur par cette formule. Pour la pression p , nous pouvons prendre $p = 3 \text{ bars}$; en effet le chef du "service exploitation" de la SONEES (société nationale d'exploitation des eaux du Sénégal) nous a fait savoir que la pression

ne dépasse jamais 2,5 bars au départ de l'usine; ¹⁹
en outre les mesures effectuées à l'École Polytechnique
(qui n'est pas branchée sur le réseau de THIES) nous
ont donné une pression de 2,8 bars environ.

Choix du rayon :

le volume du réservoir est égal à 136 l soit $0,136 \text{ m}^3$
comme nous l'avons mentionné plus haut.

$$\text{on a donc } V = 0,136 = \pi R^2 L + \frac{4}{3} \pi R^3 \quad (8)$$

où $R = r$ = rayon commun au cylindre et aux
demi-sphères, et L la longueur de la partie cylindrique.

Nous pouvons choisir $L = 1 \text{ m}$ d'autant plus que
la largeur la plus courante des aciers inoxydables
disponibles au Sénégal est 1 m.

$$\text{eq 8 devient } \pi r^2 + \frac{4}{3} \pi r^3 = 0,136$$

$$\Rightarrow r \approx 0,187 \text{ m} = 187 \text{ mm}$$

Nous pouvons prendre $\sigma_t = 500 \text{ MPa}$ (limite
d'élasticité inférieure des aciers inoxydables)

$$\text{on a donc : } s = \frac{p r}{\sigma_t} = \frac{3 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 0,187 \text{ m}}{500 \cdot 10^6} = 1,122 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

$$= 0,1122 \text{ mm}$$

nous avons pris $p = 3 \text{ bars}$.

les plus petites épaisseurs qui existent dans le

marché étant de 0,6 mm nous pouvons prendre cette épaisseur. Ceci nous donne un coefficient de sécurité de 13,96, ce qui est acceptable.

donc finalement nous avons le réservoir suivant :

$$\text{volume} = 136 \text{ l}$$

$$\text{rayon} = 187 \text{ mm}$$

$$\text{épaisseur} = 0,6 \text{ mm}$$

$$\text{longueur de la partie cylindrique} = 1 \text{ m}$$

Pour la fabrication nous recommandons un soudage à l'arc à caractère autogène, c'est à dire que le métal d'apport est de même composition que le métal de base. Pour améliorer l'interpénétration, on peut ajouter de l'hydrogène à la composition de l'électrode. Une soudure en V d'un peu côté serait excellente.

V EXPERIMENTATION

V-1 EVOLUTION DU PROJET

Il s'agissait au début de réaliser des circuits en parallèle ou en série avec deux capteurs, conçus et réalisés l'année dernière. L'un de ces capteurs (a) est à perpendiculaire, l'autre (b) dit intégré est du même type que celui du présent projet, à la différence qu'il n'est pas muni de surfaces réfléchissantes et que son réservoir est de forme parallélépipédique.

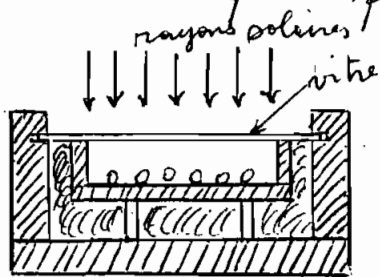


fig 11 a

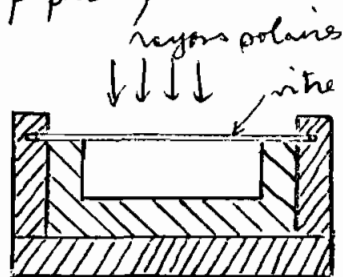


fig 11 b

En premier lieu nous avons envisagé de construire un circuit en parallèle et avons même commencé à effectuer certains travaux. Après une réflexion plus poussée et des discussions avec le directeur du projet, nous avons conclu que cette installation ne pouvait pas donner des résultats intéressants; ainsi l'avons-nous abandonnée à la faveur d'un circuit où le capteur polaire et le chauffe-eau électrique devaient être mis en série avec le réseau de distribution d'eau,

dont la pression est d'environ 2,8 bars à l'École Polytechnique. Mais aucun des deux capteurs ne convenait : le type (a) est de volume faible ($\approx 3\text{ l}$) et le type (b) ne pouvait supporter la pression du réseau. En effet des mesures ont révélé qu'à 0,14 bars déjà le réservoir se gonflait (la flèche était de 18 mm) et l'eau commençait à couler à travers les joints de soudure.

Il nous a fallu donc construire un nouveau type de capteur qui satisfait à la fois les conditions de volume et de pression : c'est celui à réservoir cylindrique que nous avons utilisé pour nos expériences.

V.2 SCHEMA DE L'INSTALLATION

23

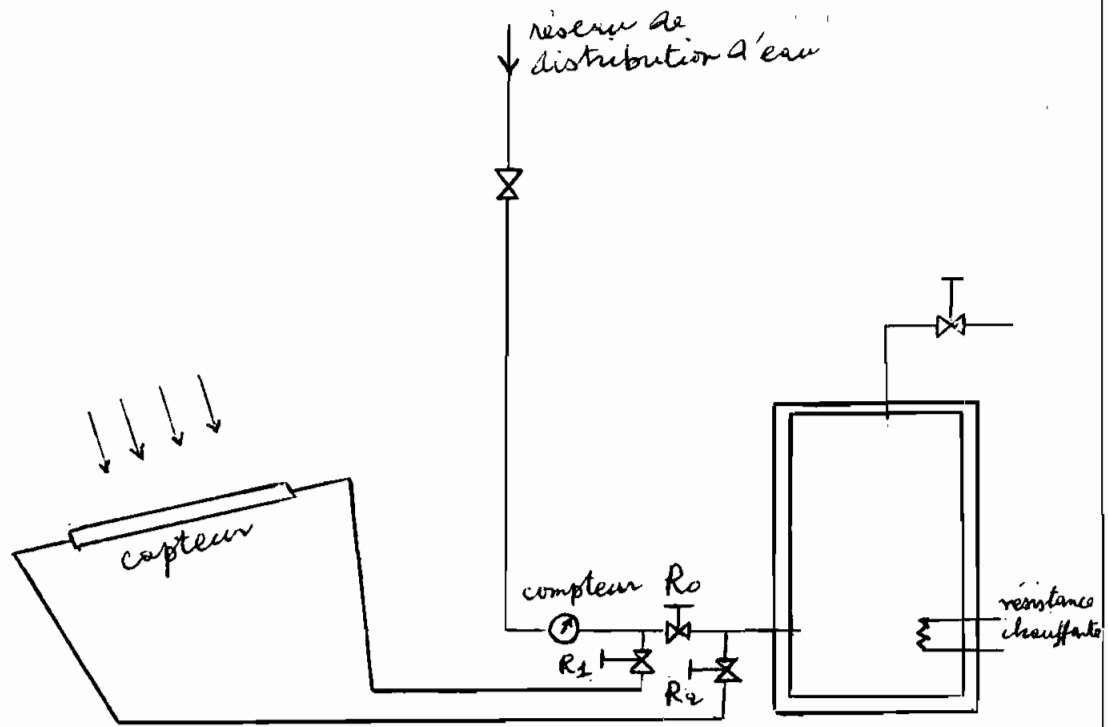


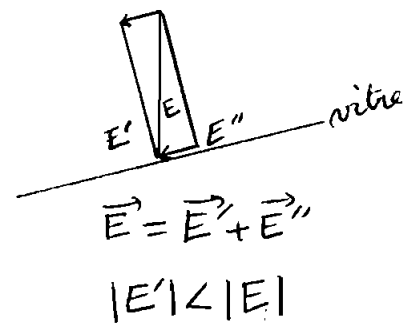
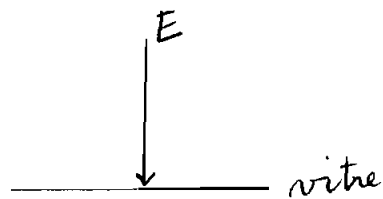
fig 12

L'installation peut être sans ou avec capteur

- Sans intervention du capteur: les robinets R_1 et R_2 sont fermés et R_0 est ouvert; l'eau du réseau de distribution passe directement dans le chauffe-eau électrique
- Fonctionnement avec le capteur: R_0 est fermé, R_1 et R_2 sont ouverts; l'eau du réseau de distribution passe par le capteur où elle gagne de l'énergie avant d'arriver dans le chauffe-eau électrique.

- Orientation

L'orientation, comme l'inclinaison, vise un objectif : gagner le maximum d'énergie solaire. Pour cela le capteur doit être perpendiculaire aux rayons solaires. En effet si tel n'est pas le cas, ces derniers se décomposent en composantes tangentielle et normale à la face vitrée du capteur, et en ce moment seules les composantes normales traversent la vitre. Des illustrations sont effectuées ci-dessous :



L'idéal est donc d'avoir un capteur qui tourne, de façon à être toujours perpendiculaire aux rayons solaires. Mais les mécanismes de cette orientation reviennent actuellement, cher pour être montés sur des installations domestiques. On se contente donc de donner au capteur, une orientation moyenne fixe optimale, généralement perpendiculaire à l'axe Nord-Sud.

Pour ce qui est de notre cas, nous avons mesuré l'énergie reçue par une surface horizontale durant toute une journée ensoleillée et nous avons trouvé qu'elle était maximum à 13 heures, comme le laissaient prévoir d'ailleurs les mesures effectuées par le C.E.R.E.R (Centre d'Etudes et de Recherches pour les énergies renouvelables) à DAKAR (voir annexe C)

A cette heure, l'orientation du capteur face au soleil nous a donné un décalage de 10° environ par rapport à l'axe Nord-Sud.

|||
0°
Saison!

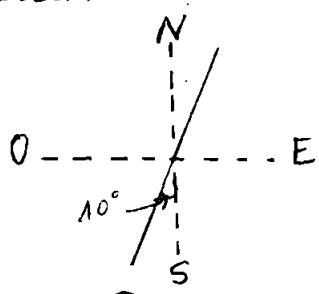
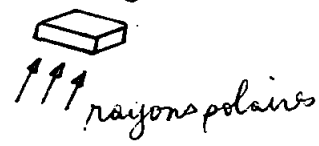


fig 13



Inclinaison

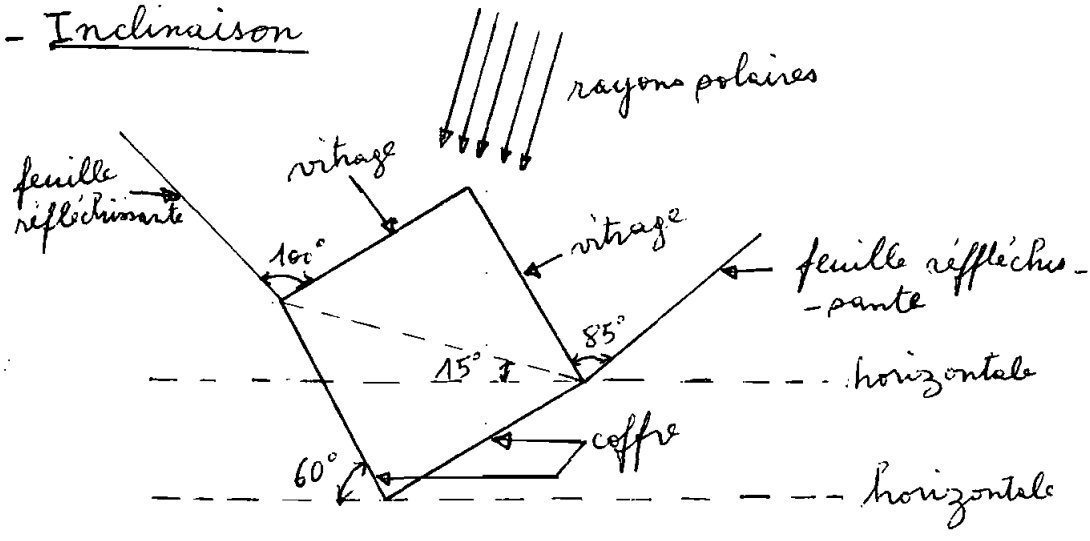


fig 14

!

Nous avons procédé d'une manière quelque peu empirique, en choisissant des inclinaisons (aussi bien du capteur que des surfaces réfléchissantes) qui semblaient donner une quantité maximale d'énergie à 13h aux mois où étaient effectuées les mesures (Mars, Avril, Mai). Bien sûr, il faudrait des études théoriques approfondies sur l'apport en énergie des surfaces réfléchissantes, pour trouver les inclinaisons qui donnent le maximum d'énergie, non pas à une heure précise mais sur toute une journée ; cela portait au cadre de ce projet.

Le manque de temps, et certaines difficultés que nous rencontrions durant l'expérimentation, nous ont empêchés d'effectuer toutes les mesures que nous escomptions. Nous présentons ci-dessous celles que nous avons pu faire

Matériels utilisés

- 1 polarimètre - Pana - vise Metermater R. H.
- 1 multimètre
- 1 chronomètre
- 2 thermomètres
- 1 potentiomètre Crovicotype P. 6
- 1 compteur d'eau
- 1 kilowattheuremètre

Procédés

Nous avons choisi un débit de 20 litres/heure; le chauffe-eau électrique fonctionnait de 8 heures à 19 heures; ce qui faisait une consommation journalière de 200 litres, c'est à dire celle d'une famille de 4 personnes utilisant chacune 50 litres d'eau chaude par jour.

(a) le thermostat du chauffe-eau électrique est

débit
continu
?!!
!!!

30

28

réglé à 110°F ($43,3^{\circ}\text{C}$) et ce dernier fonctionne
seul c'est à dire R_1 et R_2 fermés et R_0 ouvert
(cf fig 12)

⑤ le thermostat est réglé à 110°F ($43,3^{\circ}\text{C}$) et aussi
le capteur est mis dans le circuit c'est à dire R_1 et
 R_2 ouverts et R_0 fermé.

③ comme en ② mais thermostat réglé à 115°F ($46,1^{\circ}\text{C}$)

④ comme en ⑤ mais thermostat réglé à 115°F ($46,1^{\circ}\text{C}$)

Les différentes mesures obtenus par ces procédés
sont indiquées respectivement dans les tableaux

②, ③, ④ et ⑤

Dans ces tableaux,

I_h est l'intensité du rayonnement solaire reçu
sur une surface horizontale à l'endroit où était
placé le capteur solaire. La valeur de I_h est lue
en millivolts (mV) sur un multimètre branché
au polarimètre ($1 \text{ mV} = 105 \text{ Watt/cm}^2$)

T_{abs} est la température de la surface du réservoir

T_e est la température d'entrée de l'eau dans le
réservoir du capteur

T_p est la température de sortie de l'eau du réservoir

T_{amb} est la température de l'air ambiant

W est la lecture effectuée sur le compteur d'énergie électrique

Tableau (a) (1)

heure	T_{amb} ($^{\circ}C$)	W (Kwh)
8h	24,5	62
9h	24,5	64
10h	25	64
11h	25,2	65
12h	25,6	65
13h	26	66
14h	26,5	66
15h	27	67
16h	27,5	67
17h	28	68
18h	28	68
19h	27,2	68

heures	W (kWh)	t_{amb} ($^{\circ}$ C)
8h	126	26,5
9h	128	26,7
10h	129	27
11h	130	28
12h	130	28,5
13h	131	29
14h	131	29,5
15h	131	30
16h	132	30,2
17h	132	30,2
18h	132	30
19h	133	29,6

Tableau (B) (1)

31

heure	I_h (mV)	t_{abs} (°C)	t_e (°C)	t_s (°C)	t_{amb} (°C)	W (kWh)
8h	0	26	26	26	19,5	92
9h	3,8	29	27	28	22,5	95
10h	2	28	25	25	23	95
11h	7,6	28	26	28	28,5	96
12h	8,5	38	27	32	30	97
13h	3,9	35	27	32	30,5	97
14h	6,2	40	28	34	32	97
15h	7	40	32	38	33	97
16h	5	40	30	36	31	97
17h	4,5	37	30	35	28,5	97
18h	1,2	32	29	34	24,5	97
19h	0	32	27	32	22	97

Tableau (b) (2)

heure	I_h (mA)	t_{abs} (°C)	t_e (°C)	t_s (°C)	t_{amb} (°C)	W (kWh)
8h	0	26	26	26	21	99
9h	4,4	29	26	27,5	25	108
10h	6,7	32	27	28	27,4	103
11h	8,5	40,5	28	34,5	30,2	103
12h	8	44	30	37	30	104
13h	10	47,5	32	40	31,5	104
14h	9,3	48	33	43	33	104
15h	9	48	34	44,5	32,5	104
16h	6,8	45	32	41	30,2	104
17h	4,4	42	30	40	28	104
18h	1,9	36	28	36	26	104
19h	0	33	27	33	23	104

Tableau (C)

heure	t° amb	W (kl/h)
8h	29,5	74
9h	29	77
10h	29,4	78
11h	29,5	78
12h	29,8	79
13h	30,5	79
14h	31	80
15h	33	80
16h	32,2	81
17h	31,5	81
18h	31	82
19h	30,5	83

Tableau (d)

$$1 \text{ mV} = 105 \text{ W/cm}^2$$

34

heure	I_h (mV)	t_{ab} (°C)	t_e (°C)	t_s (°C)	t_{amb} (°C)	W (kWh)
8h	0	15	15	15	21	83
9h	2	19	20	20	24	87
10h	6	26	22	24	28	88
11h	8	37	23	30	28	89
12h	9	40	25	31	29	90
13h	8,2	44	28	38	30,2	90
14h	8,5	52	31	42	32	90
15h	7,5	50	31	39	32	90
16h	6,2	40	30	35	31	90
17h	4,2	44	29	40	28	90
18h	1	40	28	34	26,5	90
19h	0	26	26	27	21,3	90

VI ANALYSES ET DISCUSSIONS

A partir des tableaux de mesures (a), (b), (c) et (d) nous pouvons faire les constatations suivantes :

1^{er} cas : réglage à 110°F

quand le capteur n'est pas dans le circuit, la consommation d'énergie est de 7 kWh durant toute la journée ; cette consommation devient 5 kWh durant la même période quand nous mettons le capteur en série avec le chauffe-eau électrique

2^e cas : réglage à 115°F

la consommation d'énergie passe de 9 kWh à 7 kWh.

Dans les deux cas donc nous faisons une économie de 2 kWh. Un compteur plus précis pourrait donner une valeur supérieure pour le premier cas.

Les tableaux (b) et (d) montrent tous deux qu'à partir de 12 heures, le chauffe-eau ne consomme plus d'énergie, mais révèlent que la consommation d'énergie entre 8 heures et 12 heures est supérieure dans le cas où le capteur est mis dans le circuit.

Cela nous conduit à penser à l'isolation du

du capteur pendant la nuit; dans ce cas, l'alimentation du chauffe-eau électrique, dès le matin, en eau chaude, pourrait réduire la consommation d'énergie.

D'autre part, la faible différence de température entre l'entrée et la sortie du réservoir du capteur peut être interprétée comme étant une mauvaise stratification (séparation de l'eau chaude et de l'eau froide) au niveau du réservoir; en effet la différence de niveau entre l'entrée et la sortie étant faible, il existe un certain mélange entre l'eau chaude et l'eau froide au moment de la circulation. La sortie soit être relevée au plus haut niveau si l'on veut éliminer ce phénomène. Cela aura aussi l'avantage d'éliminer le volume d'air qui se trouverait entre une partie du volume d'eau et la surface chaude du réservoir

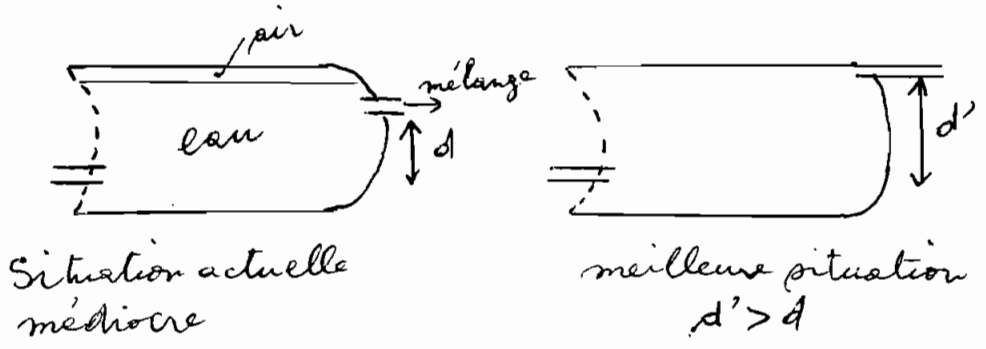


fig 15

VII ETUDE ECONOMIQUE

Nos mesures ayant été faites de façon discontinue, il ne paraît pas réaliste d'en déduire des conclusions économiques définitives. En effet nous pensons que des mesures continues sur des périodes de quelques semaines paraissent plus révélatrices, parce qu'un chauffe-eau électrique ne consomme pas, sur une longue période donnée, la même quantité d'énergie qu'il est muni d'un thermostat que s'il n'en est pas muni. Néanmoins nous essaierons de donner quelques indications

VII-1 INVESTISSEMENT

38

Nature	dimension(mm)	nombre	prix (FCFA)
plexigles	1290x530x2	2	27300
feuille réfléchissante	429x1260	2	464
contre-plaque	520x520x7	2	940
	1300x520x7	2	2350
réservoir	136l	1	20000
laine de verre	0,108m ³		2500
tuyau PVC	φ25 L=5,5m	2	1265
robinet (15,21)		2	6160
main à couleurs	45h		8500
Total			<u>69479</u>

VII-2 CALCULS

39

Nous savons que la valeur dans n années d'une somme d'argent P_0 placée à un taux d'intérêt i est de $P_n = P_0(1+i)^n$

De même une somme d'argent P_0 empruntée présentement à un taux d'intérêt de i devient $P_n = P_0(1+i)^n$ et si elle doit être payée partiellement chaque année, elle revient à

$$R = \frac{P_n \cdot i}{(1+i)^n - 1} = \frac{P_0 i (1+i)^n}{[1+i]^n - 1}$$

où R est l'annuité.

(cf référence 6) pour les formules que nous utilisons ici) on a aussi $P_0' = R_0' \frac{(1+i_{\text{eff}})^n - 1}{i_{\text{eff}} (1+i_{\text{eff}})^n}$

$$\text{ou } i_{\text{eff}} = \frac{1+i}{1+j} - 1$$

et P_0' est la somme qu'un propriétaire peut ou plus investir sur un système solaire pour en tirer profit si i est le taux d'intérêt, j le taux d'inflation et R_0' le versement annuel initial, n étant la durée de vie du système.

En ce qui nous concerne, nous prenons:

40

$$i = 12\% \quad (\text{taux courant au Sénégal})$$

$$j = 6,4\% = \text{taux d'augmentation du coût de l'électricité avec prix du kWh actuel} = 75,35 \text{ FCFA}$$

Exemple: $n = 5$

$$P_5 = 69479 \times (1,12)^5 = 122446 \text{ FCFA}$$

$$R = \frac{122446 \times 0,12}{1,12^5 - 1} = 19274 \text{ FCFA}$$

$$\text{nous avons } P'_0 = P_0 = 69479$$

$$i_{\text{eff}} = \frac{1,12}{1,064} - 1 = 0,053$$

$$R'_0 = \frac{69479 \times (1,053)^5 \times 0,053}{(1,053)^5 - 1} = 16181 \text{ FCFA}$$

$R'_0 < R$ veut dire que si la durée de vie du capteur est de 5 ans, ce dernier n'est pas rentable

Des calculs analogues nous permettent de dresser le tableau suivant:

n	5 année	6	7	8	9
R	19274 FCFA	15088	12136	9955	8287
R'_0	16181 FCFA	13820	12138	10881	9906

$$\frac{12138F}{75,35F/kWh} = 161 kWh$$

Si nous parvenons donc à gagner 161 kWh par année avec notre capteur, il devient rentable dès que sa durée de vie est au moins égale à 7 ans.

Nos expériences ayant donné un gain de 2 kWh par journée de façon discontinue, nous osons espérer que même en régime continu nous pourrions produire 161 kWh/an avec notre système ; nous espérons aussi que sa durée de vie peut atteindre 7 ans.

VIII CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Ce nouveau type de combinaison chauffe-eau électrique - capteur, réalisé pour la première fois à l'École Polytechnique, laisse augurer d'un système intéressant.

Il vaut bien la peine de poursuivre les expériences notamment sur des périodes variables d'une à plusieurs semaines. Mais auparavant il faudrait apporter des améliorations aussi bien au niveau du capteur qu'au niveau de l'installation : déplacer le niveau de la partie du réservoir le plus haut possible de façon à favoriser la stratification et à éviter d'avoir de l'air dans le réservoir, chercher un compteur d'énergie électrique active plus précis.

Une étude théorique du capteur, en particulier sur l'apport des feuilles réfléchissantes, et une étude de la possibilité d'isoler le capteur voire automatiquement, pendant la nuit, méritent d'être faites. Nous souhaitons enfin bonne chance à celui ou ceux qui aimeraient poursuivre nos travaux.

IX

ANNEXES

IX-1 ANNEXE A

Materiaux	Contre-plaque (hêtre)	Laine de verre	Acier inoxy- dable.
Masse spécifique (kg/m ³)	700	140-280	7930
Module d'élasticité (MPa)	8700-10000		193000
Résistance à la traction (MPa)	40 (13,5)*	0,46 (0,15)	1300-1390
Résistance à la compression (MPa)	34 (7,5)	0,68 (0,23)	(147)
RÉSISTANCE à la flexion (MPa)	(13-16)	0,58 (0,17)	(230)
Conductibilité thermique W/m°C	0,14	0,055	(24)
Capacité thermique kJ/kg °C		0,67	0,48
Dilatation thermique linéaire x 10 ⁻⁶ °C	12	8,3	16,5
Température de fusion °C		(450)	1450 (700)

* Les chiffres sont placés entre parenthèses s'il s'agit de valeurs maximales de service

La dilatation thermique est mesurée perpendiculairement au grain

Source : référence 2

PROPRIETES DU PLEXIGLAS

Masse volumique kg/m^3	1180
Module d'élasticité longitudinal kN/cm^2	300
Coefficient de contraction latéral	0,36
Contrainte de rupture en traction kg/cm^2	6
Contrainte de rupture en compression kN/cm^2	
Coefficient de dilata- tion thermique linéaire $10^{-6}/^\circ\text{C}$	90

Source : référence 3

IX-3 ANNEXE C

RAYONNEMENT GLOBAL à DAKAR

1975 à 1979 (en cal/cm²)

Mois \ Heure	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
Jan	1.47	12.85	29.68	44.07	55.75	61.15	62.12	56.05	46.42	31.39	15.3	2.33	0
Fev	3.36	20.28	40.45	56.53	68.33	75	74.38	69.25	57.66	41.44	22.25	4.54	0
Mars	4.96	21.45	41.32	57.57	69.37	75.78	76.67	70.22	58.90	42.03	27.12	5.86	0
Avril	7.20	25.50	41.90	61.90	73.25	79.64	80.09	74.40	63.24	46.85	27.33	8.60	0.22
Mai	8.74	26.31	45.18	60.31	71.56	77.25	77.25	70.82	59.95	44.72	26.43	9.79	0.5
Juin	7.66	22.59	40.35	54.83	65.23	70.08	70.20	62.58	52.61	40.77	24.18	9.61	0.78
Juil	6.85	20.36	35.35	47.79	54.20	58.02	59.77	55.17	45.80	34.07	18.21	8.44	0.76
Août	6.45	20.56	35.37	47.07	56.13	62.16	62.90	58.92	48.79	36.03	20.60	7.40	0.44
Sept	4.7	18.31	33.88	47.51	55.02	58.92	58.62	55.47	48.05	34.16	20.74	6.09	0.12
Oct	3.32	18.57	36.05	51.87	60.66	67.81	68.89	63.51	52.35	36.34	19.78	4.16	0.02
Nov	1.97	15.35	32.48	47.51	58.42	63.57	63.09	58.54	48.33	33.32	15.78	2.57	0
Dec	1.7	11.23	26.47	41.14	51.54	57.61	56.92	51.67	41.90	28.32	13.77	1.97	0

X REFERENCES ET BIBLIOGRAPHIES

- 1 I. MIROLIOUBOV et COLL, "Problèmes de résistance des matériaux", Editions MIR, page 54
- 2 MICHEL RIGAUD et COLL, "DES MATERIAUX", pages 472, 473
- 3 CH. MASSONNET et S. CESCOTTO, "Mécanique des matériaux", Sciences et Lettres-Liège, page 367
- 4 DONALD R. PITTS et LEIGHTON E. SISSOM, "Heat transfer", Schaum's outline Series, Mc Graw-Hill Book Company
- 5 F. KREITH, "Transmission de la chaleur et Thermodynamique", MASSON E Cie Editeurs
- 6 JAN F. KREIDER et FRANK KREITH, "Solar Heating and Cooling", Hemisphere Publishing Corporation
- 7 T. CABIROL, A. PELISSOU et D. ROUX, "Le chauffe-eau solaire", Collection "technologies d'aujourd'hui", EDISUD.
- 8 Sciences et Vie n° 779, Août 1982, R. GEORGEOT
- 9 Notes de cours TRANSFERT DE CHALEUR, 1981-82
Professeur : M^{re} PETITEAU.
- 10 J. KREIDER, F. Kreith
Solar Energy Handbook
McGraw-Hill