

RÉPUBLIQUE DU SÉNÉGAL



ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE THIÈS

PROJET DE FIN D'ÉTUDES

Titre ETUDE D'UN REFLECTEUR
SOLAIRE HEMICYLINDRIQUE

Auteur Amadou SYLLA

Génie mécanique

Date JUIN 1980

Ecole Polytechnique de Thiès

Département Génie
Mécanique

PROJET DE FIN D'ETUDES

Titre: Etude d'un réflecteur solaire hémicylindrique

Directeurs de Projet:

Vinh Nguyen-Duy

Dinh Vo-Ngoc

Auteur:

Amadou Sylla

4^e année Génie Mécanique

REMERCIEMENTS

Je remercie mes directeurs de projet Messieurs VINH NGUYEN-DUY et DINH VO-NGOC de leur soutien constant, tout comme Monsieur DORIEN MARDIS qui m'a fait bénéficier de son expérience et auprès duquel j'ai trouvé entière disponibilité. Leur franche collaboration tout pendant la réalisation que lors de l'expérimentation du montage, les multiples entretiens qu'ils m'ont accordés et les discussions que nous avons eues, ont été d'un grand apport à l'étude du projet.

Je remercie également Monsieur Michel PETITEAU pour ses nombreuses et appréciables suggestions.

SOMMAIRE

Le présent projet étudie la conception et l'expérimentation d'un collecteur solaire à concentration pouvant avoir une application à température modérée de fonctionnement notamment dans le chauffage de l'eau. Les principaux avantages de cette conception résident dans l'utilisation exclusive de matériaux communément disponibles et de technologie courante. Le collecteur consiste en un tube cylindrique en PVC dont la surface intérieure est recouverte de papier aluminium, avec une ouverture parallèle à son axe, et un capteur constitué d'un tube cylindrique en cuivre dans lequel circule l'eau à chauffer. Le tube en PVC est irradié directement au soleil par son ouverture, l'énergie rayonnante tombant ainsi sur le papier aluminium est réfléchi sur le capteur et est transmise au fluide caloporteur sous forme de chaleur.

Nous avons fait deux genres d'expérience dans le chauffage de l'eau par thermosiphon pour étudier expérimentalement le rendement du réflecteur. Ainsi, dans le premier cas, sans utilisation de l'effet serre, nous avons obtenu un rendement moyen de 26% et avec effet de serre un rendement moyen sur trois expériences de 40%.

Table des matières

Remerciements	i
Sommaire	ii
Introduction	1
Chapitre I: Étude théorique	
I.1 Rappel de quelques notions de transfert de chaleur	3
I.2 Thermosiphon et Effet de Serre	7
I.3 Calcul de quelques grandeurs caractéristiques du capteur	10
I.3.1 Positionnement du tube de cuivre dans le réflecteur	10
I.3.2 Calcul de l'épaisseur d'isolant	12
I.3.3 Chaleur échangée	13
I.3.4 Courbe théorique de la température de l'eau en fonction du temps	16
I.3.5 Calcul du rendement	17
Chapitre II: Montage expérimental	
II.1 Matériel utilisé	18
II.2 Dessin du montage	19
II.3 Dimensionnements des éléments	19
II.4 Procédure suivie avant d'effectuer les mesures	21

II. 5	Tableaux des mesures	22 a
	Chapitre III : Résultats et discussions	27
III. 1	Essai préliminaire	27
III. 2	Cas sans effet de serre	28
III. 3	Cas avec effet de serre	30
	Conclusion	33
	Annexes	
-	Illustrations graphiques des résultats	35
-	Dessin du collecteur	41
-	Dessin du montage expérimental	42
-	Étude de reproductibilité	43
-	Bibliographie et références	46

Notations et unités

Q:	débit de chaleur	Kcal/h
q:	flux de chaleur	Kcal/h.m ²
k:	conductivité thermique	Kcal/h.m.°C
h:	coefficient de transfert de chaleur	Kcal/h.m ² .°C
U:	coefficient global de transfert de chaleur	Kcal/h.m ² .°C
T:	température	°C
t:	temps	s
E _s :	ensoleillement	mV (1 mV = 105 W/cm ²)
C _p :	chaleur spécifique	Kcal/kg.°C
m:	débit massique	kg/s
V:	volume	litres
A:	surface	m ²
ΔT:	Variation de température	°C
η:	Rendement	%
T _e :	température extérieure	
T _i :	température intérieure	
D:	diamètre du réflecteur	mm
d:	diamètre du capteur	mm
c:	facteur de concentration	(D/d)
L:	longueur	m

- r_e : rayon extérieur mm
 r_i : rayon intérieur mm
 ΔT_{ln} : moyenne logarithmique des différences de température °C
 σ : Constante de Stefan-Boltzmann $4.878 \times 10^8 \text{ kcal/h.m}^2 \cdot \text{K}^4$
 ϵ_1 : facteur d'émission
 G_0 : constante solaire 1394 W/m^2
 ρ : masse volumique kg/m^3

Identification des figures

fig. I.a : principe de thermosiphon

fig. I.b : phénomène de l'effet terre

fig. I.c : méthode de captage

fig. I.d : positionnement du tube de cuivre dans le réflecteur

fig. I.e : isolation d'un anneau cylindrique

INTRODUCTION

L'évolution énergétique à travers le monde, et particulièrement dans les pays africains très vulnérables dans ce domaine, rend indispensable le développement rapide des sources d'énergie de substitution. Si l'alternative nucléaire, pour de nombreuses raisons, n'est pas envisageable chez nous, il faudra alors développer l'utilisation de certaines autres énergies de type renouvelable. Il est incontestable que, pour celles-ci, l'énergie solaire est la plus immédiatement accessible et peut prendre une place privilégiée au niveau des basses températures et des petites puissances. C'est ainsi qu'elle est utilisée dans des domaines aussi divers que le chauffage des habitations, la production d'eau chaude sanitaire, la distillation de l'eau, les fours solaires, le pompage de l'eau et même la production de l'électricité.

Mais son exploitation n'est pas sans poser un certain nombre de problèmes d'ordre technique dont celui du captage. En effet, l'énergie solaire est assez diluée, ce qui nécessite en général de grandes surfaces de captage. Pour palier à cette lacune, c'est à dire réduire les surfaces tout en améliorant le rendement, il a été procédé à l'expérimentation de plusieurs modes de captage à concentration

Optique. C'est d'ailleurs l'objet du projet que nous vous présentons dans les pages suivantes. Il consiste à fabriquer un réflecteur solaire simple de forme hémicylindrique et à étudier expérimentalement son rendement.

CHAPITRE I

Etude théorique

I.1 Rappel de quelques notions de transfert de chaleur

I.1.1 La conduction

La conduction est le passage de la chaleur à travers un milieu solide, liquide ou gazeux sans mouvement appréciable des molécules de ce milieu. Fourier a trouvé une relation expérimentale qui établit une proportionnalité entre le flux de chaleur dans un solide et le gradient $\frac{\Delta T}{\Delta x}$:

$$q = \frac{Q}{A} = -k \frac{\Delta T}{\Delta x}, \quad k \text{ est la conductivité thermique du solide.}$$

Remarque: On peut montrer, que le débit de chaleur à travers un anneau cylindrique de longueur L , dont les faces extérieures et intérieures sont respectivement aux températures T_e et T_i et correspondant à des rayons r_e et r_i , a pour expression:

$$Q = \frac{2\pi k L (T_i - T_e)}{\ln \frac{r_e}{r_i} + \frac{k}{h r_e}}$$

I.1.2 La convection naturelle

D'une façon générale, on appelle convection thermique, la transmission de chaleur entre une paroi et un fluide, abstraction faite de l'échange par rayonnement, qui existe simultanément. On appelle indifféremment convection naturelle ou convection libre, celle qui prend naissance quand le mouvement est dû, uniquement, à l'action de la pesanteur sur un fluide dont la température et par conséquent la masse volumique, sont variables d'un point à un autre.

Le débit de chaleur entre la paroi et le fluide est donné par la loi de Newton:

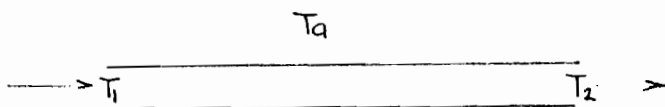
$$Q = h A \Delta T$$

h : coefficient de transfert de chaleur

A : surface de la paroi

ΔT : écart de température entre la paroi et le fluide.

Considérons le cas où le fluide s'écoule dans une conduite circulaire horizontale, de diamètre intérieur D , chauffée sur toute sa longueur L



La conduite échange de la chaleur avec l'air et le fluide qu'elle contient.

En posant: $\Delta T_{lm} = \frac{(T_2 - T_a) - (T_1 - T_a)}{\ln \frac{T_2 - T_a}{T_1 - T_a}}$ et: $\frac{1}{UeAc} = \frac{1}{Ache} + \frac{1}{A_i h_i}$

(on néglige la résistance thermique de la paroi); on obtient:

$$Q = U_e A_e \Delta T_{ln}$$

U_e : coefficient global de transfert de chaleur.

I.1.3 Rayonnement thermique.

Comme la lumière, le rayonnement thermique est de nature électromagnétique et il se propage dans le vide. Tout corps émet un rayonnement thermique dont l'intensité est fonction de sa température. Pour un corps noir, la chaleur rayonnée est proportionnelle à la puissance 4 de sa température absolue:

$$q = \frac{Q}{A} = \sigma T^4 \quad \text{Loi de Stefan-Boltzmann.}$$

Pour un corps gris, cette équation devient:

$$q = \sigma \epsilon_1 T^4 \quad \epsilon_1: \text{facteur d'émission du corps.}$$

I.1.4 Rayonnement solaire

Le flux de chaleur qui atteindrait la terre si cette dernière était dépourvue d'atmosphère est appelée constante solaire et est égale à:

$$G_0 = 1394 \text{ W/m}^2 = 1200 \text{ Kcal/h m}^2$$

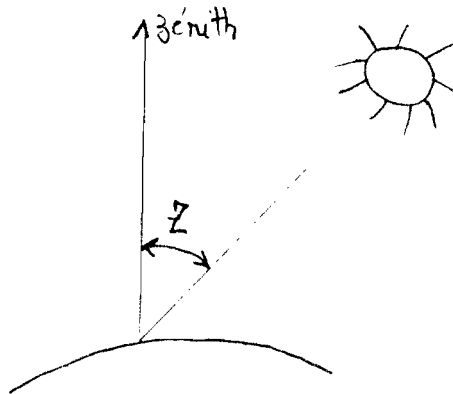
Mais une partie du rayonnement solaire est réfléchi ou absorbé par la couche atmosphérique qui contient du gaz carbonique, de la vapeur d'eau, de l'azote, des poussières... etc. C'est ainsi que le flux de chaleur qui atteint la surface de la terre est fonction du lieu (latitude et longitude), de l'heure et des conditions atmosphériques.

Soit G_n l'irradiation d'une surface orientée perpendiculairement aux rayons du soleil:

$$G_n = G_0 \tau_a^m$$

τ_a : facteur de transmission de l'air (de 0.8 à 0.6)

m représente la distance effectivement parcourue par les rayons solaires, divisée par la distance parcourue quand le soleil est au zénith.



$$m = (\cos Z)^{-1}$$

Si la surface n'est pas normale aux rayons solaires et que l'angle entre la normale et la surface et la direction des rayons solaires est égale à i , alors

$$G_i = G_n \cos i = G_0 \tau_a^{(\cos Z)^{-1}} \cos i \quad [1]$$

Remarque

Dans notre cas, nous disposons d'un solarimètre qui nous permet de mesurer directement l'ensoleillement.

I.2 Thermosiphon et Effet de Serre

I.2.1: Principe de Thermosiphon

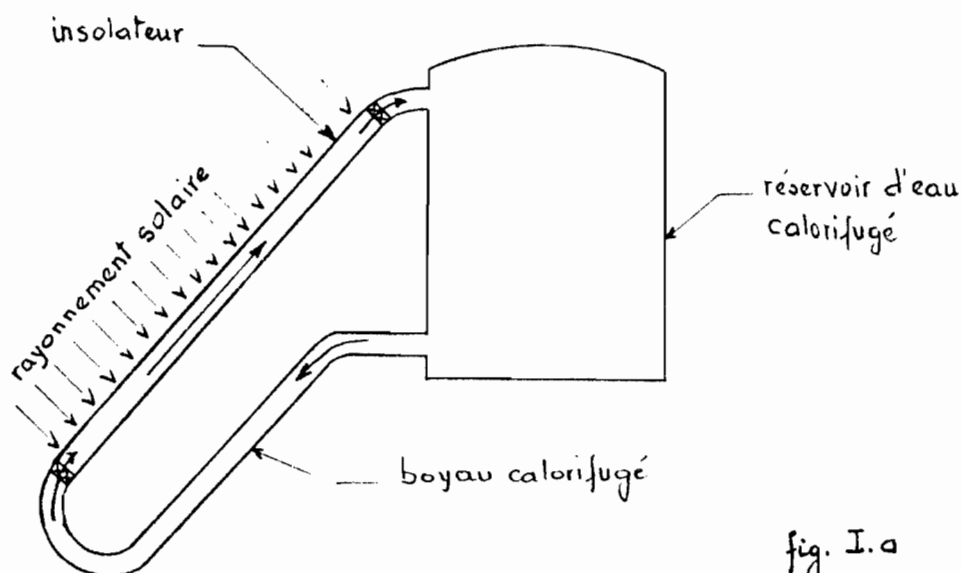


fig. I.1

Le principe de thermosiphon est fréquemment utilisé dans les applications thermiques de l'énergie solaire, en particulier pour le chauffage de l'eau. Il a fait l'objet de plusieurs études théoriques. Il provient du déséquilibre des températures le long du circuit qui engendre une variation de la densité et de la viscosité du liquide et crée ainsi la circulation de ce dernier. En effet, la température du liquide dans l'isolateur étant supérieure à celle du liquide contenu dans le boyau du bas, il y a une différence de densité; l'eau chaude étant plus légère monte et l'eau froide du bas du réservoir vient remplir l'isolateur qui la chauffe de nouveau; il se crée ainsi une circulation d'eau dans le circuit. Plusieurs formules ont été établies pour déterminer la vitesse de

l'écoulement; on retiendra la suivante.

Soient E_s la puissance offerte par le rayonnement solaire à l'insolateur en W

η le rendement du réflecteur (que nous déterminerons lors d'une expérience)

ΔT la différence de température entre l'entrée et la sortie de l'eau du réflecteur.

Le premier principe de la thermodynamique nous permet d'écrire:

$$\dot{m} c_p \Delta T = \eta E_s \times 0.24 \times 10^{-3}$$

c_p : chaleur spécifique $\frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$

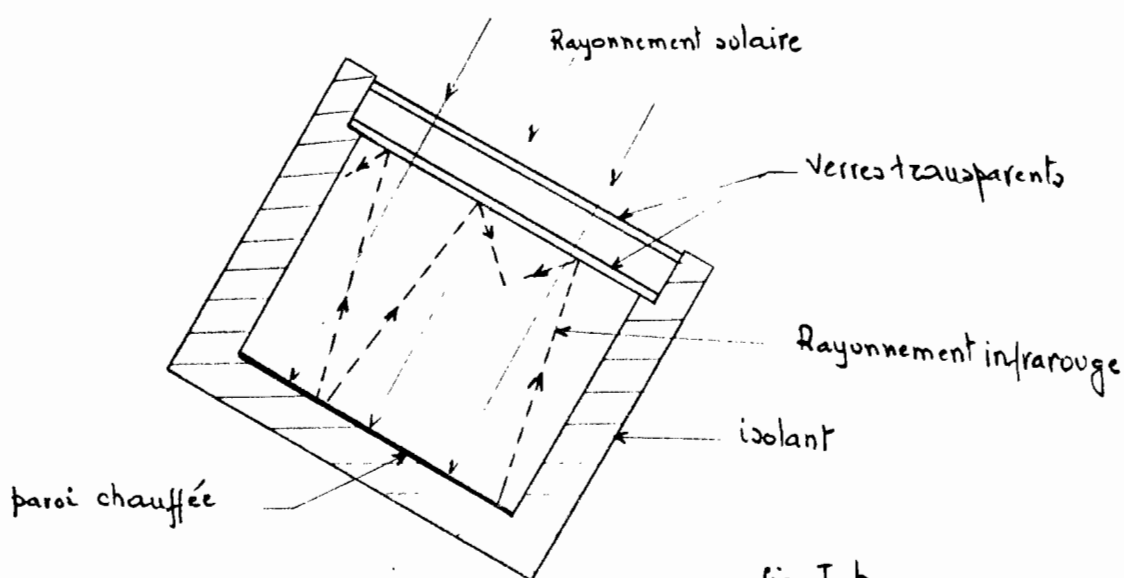
\dot{m} : débit massique kg/s

0.24×10^{-3} : facteur de

conversion de W en kcal/s

$$\Rightarrow \dot{m} = \frac{0.24 \times 10^{-3} \eta E_s}{c_p \Delta T}$$

I. 2. 2' - Effet de Serre



L'effet de Serre est la méthode la plus anciennement employée pour obtenir une élévation de température. Tout le monde a remarqué qu'une voiture exposée au soleil avait son intérieur très chaud: on a relevé des températures proches de 100°C sur la planche de bord.

Principe:

Les rayons solaires traversent les verres parfaitement perméables à ces rayonnements pour apporter leur énergie à la paroi à chauffer. La paroi chauffée réémet des rayons infrarouges qui seront stoppés par les verres imperméables aux longueurs d'onde à partir de 3μ . Ces rayons ne peuvent alors plus ressortir: l'effet de serre est un piège à soleil.

Nota: Il a été montré qu'avec un vitrage on obtient une énergie E double de celle sans vitrage et que théoriquement avec n vitrages on aura $(n+1)E$. Mais dans la réalité, les échanges de chaleur par convection avec l'air limitent beaucoup les températures obtenues. Ainsi, pratiquement, pour des appareils fixes, il faut s'arrêter à 1 ou 2 vitrages séparés de quelques centimètres.

I.3 Calcul de quelques grandeurs caractéristiques du capteur

I.3.1' Positionnement du tube de cuivre dans le réflecteur

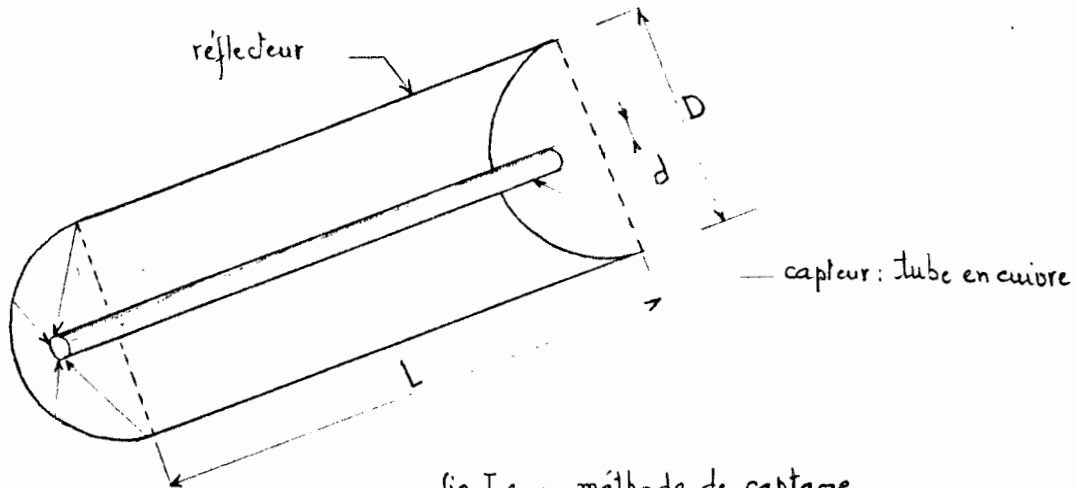


fig.I.c : méthode de captage

L'idée principale étant de réaliser un appareil simple et peu coûteux, nous avons utilisé comme méthode de réception de l'énergie le captage avec concentration optique faible. Le capteur a une forme hémicylindrique et est constitué d'un demi-tube en P.V.C. dont la surface intérieure est recouverte d'un papier aluminium servant de réflecteur et d'un tube en cuivre qui reçoit les rayons réfléchis et transfère cette énergie à l'eau qu'il contient.

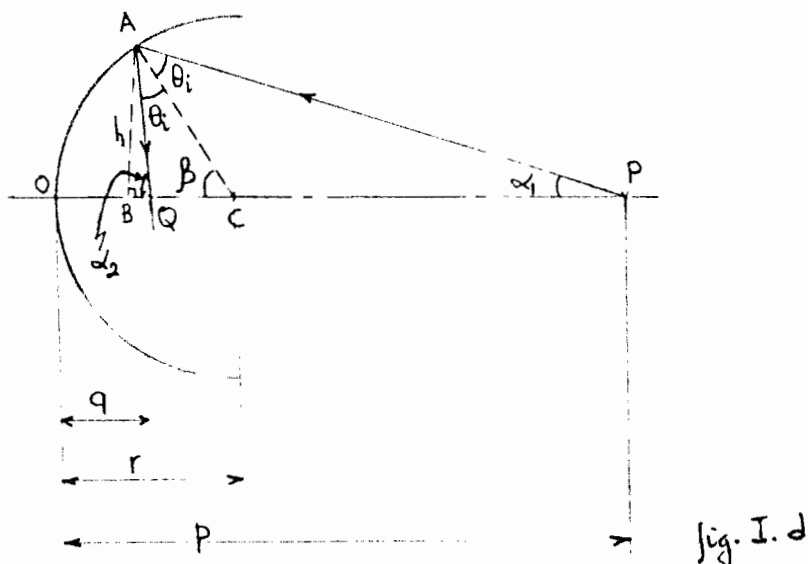
Nous n'avons pas étudié la relation qui existe entre D et d , on a seulement été guidé dans leur dimensionnement par le facteur de concentration du rayonnement C :

$$\text{surface réceptrice apparente : } S = D \times L$$

$$\text{tâche focale : } s = d \times L$$

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

Nous nous proposons de déterminer la position optimale du tube de cuivre dans le réflecteur.



Supposons que le point P soit une source d'onde (le soleil); le rayon PA donne par réflexion sur la surface le rayon AQ et, comme que les angles d'incidence et de réflexion sont égaux, nous voyons sur la figure que:

$$\beta = \theta_i + \alpha_1 \quad \text{et} \quad \alpha_2 = \beta + \theta_i$$

$$\text{d'où: } \alpha_1 + \alpha_2 = 2\beta \quad (1)$$

En supposant que les angles α_1 , α_2 et β sont très petits, nous pouvons écrire:

$$\alpha_1 = \text{tg} \alpha_1 = \frac{AB}{BP} = \frac{h}{p} \quad ; \quad \alpha_2 = \text{tg} \alpha_2 = \frac{AB}{BQ} = \frac{h}{q}$$

$$\beta = \text{tg} \beta = \frac{AB}{BC} = \frac{h}{r}$$

en substituant dans (1) et en simplifiant par h, on obtient:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{r} \quad (2)$$

Dans notre cas où le rayon incident est parallèle à l'axe optique (le soleil étant à une très grande distance du réflecteur) on a $p = \infty$, l'équation (2) devient alors :

$$\frac{1}{q} = \frac{2}{r} \Rightarrow \boxed{q = \frac{r}{2}}$$

I.3.2 Calcul de l'épaisseur d'isolation

Dans le cadre du projet, on a essentiellement à isoler des parois latérales de cylindre (boyaux, réservoir); ainsi, dans cette partie, on va déterminer l'épaisseur d'isolant nécessaire pour diminuer les pertes par convection.

Il faut isoler la paroi latérale du cylindre de la figure suivante. On néglige l'épaisseur du cylindre et l'on suppose que la température de l'eau contenue dans le cylindre est égale à la température de la paroi intérieure T_i .

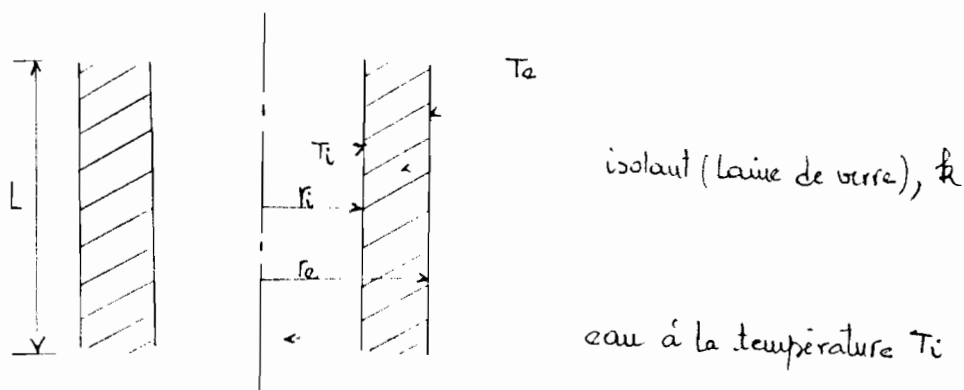


fig. I.e

$$T_i > T_e \Rightarrow Q$$

$$(1) \quad Q = \frac{T_i - T_e}{\frac{1}{2\pi k L} \ln \frac{r_e}{r_i}} : \text{quantité de chaleur transmise par l'eau à l'extérieur.}$$

Cette quantité de chaleur est égale à la chaleur perdue par l'eau pendant l'intervalle de temps considéré, soit :

$$(2) \quad Q = \frac{\rho V c_p \Delta T}{\Delta t} \quad \left\{ \begin{array}{l} \Delta T: \text{variation de température} \\ \text{pendant l'intervalle } \Delta t \\ \rho: \text{masse volumique} \\ c_p: \text{chaleur spécifique de l'eau} \end{array} \right.$$

$$(1) = (2) \Rightarrow \frac{T_i - T_e}{\frac{1}{2\pi k L} \ln \frac{r_e}{r_i}} = \frac{\rho V c_p \Delta T}{\Delta t}$$

$$\Rightarrow \ln \frac{r_e}{r_i} = \frac{2\pi k L \times \Delta t (T_i - T_e)}{\rho V c_p \Delta T}$$

$$\text{et: } r_e = r_i e^{\frac{2\pi k L \times \Delta t (T_i - T_e)}{\rho V c_p \Delta T}}$$

I.3.3 Chaleur échangée

Avant de passer à l'expérimentation, il est nécessaire de connaître la nature des énergies qui sont en jeu pour, d'une part, prévoir le comportement du capteur et d'autre part évaluer les pertes et si possible établir la courbe théorique de la température de l'eau en fonction du temps. Mais la complexité des phénomènes qui entrent en ligne de compte (corps dans une enceinte, rayonnement et convection combinés...) dans l'analyse du bilan thermique, nous amène à poser un certain nombre d'hypothèses

suivant chaque cas.

a. - Cas sous effet de serre

Chaleur reçue:

On divise le capteur en deux parties et l'on suppose que l'une reçoit directement le rayonnement solaire et l'autre l'énergie réfléchie par le réflecteur. Donc l'énergie totale reçue est:

$$Q_{in} = Q_{in1} + Q_{in2}$$

$$Q_{in1} = E_s \times A_1 \times \text{coefficient d'absorption du cuivre}$$

$$Q_{in2} = E_s \times A_2 \times \text{coefficient d'absorption du cuivre} \times \text{coefficient de réflexion du papier aluminium}$$

$$A_1 = \frac{1}{2} dL$$

$$A_2 = D \times L - A_1$$

$$\text{coefficient d'absorption du cuivre} = 0.98$$

$$\text{coefficient de réflexion du papier aluminium} = 0.80$$

$$Q_{in} = 0.98 E_s L (0.8D + 0.1d)$$

Chaleur perdue:

Le capteur échange de la chaleur par convection avec l'air

$$Q_{out1} = hA \Delta T_{ln}$$

$$h = 6.16 \left(\frac{\Delta T}{d} \right)^{0.25} \quad [2]$$

$$A = \pi dL$$

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_2 - T_a) - (T_1 - T_a)}{\ln \frac{T_2 - T_a}{T_1 - T_a}}$$

$$Q_{out1} = 6.16 \left(\frac{\Delta T}{d} \right)^{0.25} \times \pi d L \times \frac{T_2 - T_1}{\ln \frac{T_2 - T_a}{T_1 - T_a}}$$

et rayonne de l'énergie dont la valeur donnée par l'équation de Stéphan-Boltzmann est :

$$Q_{out2} = \frac{1}{2} A \sigma \epsilon_1 T_s^4$$

b. - Cas avec effet de serre

En plus de la quantité de chaleur reçue sous effet de serre, le capteur reçoit de l'énergie de l'air de l'espace confiné qui est à une température supérieure à la sienne. Cet échange se fait par convection et a pour valeur :

$$Q_{ins} = 6.16 \left(\frac{\Delta T}{d} \right)^{0.25} \times \pi d L \times \frac{T_2 - T_1}{\ln \frac{T_a - T_1}{T_a - T_2}}$$

On néglige les pertes par convection qui sont d'ailleurs très faibles et l'on suppose que les échanges thermiques se font uniquement sur la surface extérieure de la plaque de verre. Dans ce cas :

$$Q_{out} = 2.44 (\Delta T)^{0.25} \times DL \times \Delta T \quad [3]$$

I.3.4 Courbe théorique de la température de l'eau en fonction du temps

Soient :

T_0 : température initiale de l'eau

T_s : température d'équilibre de la surface du capteur

T : température de l'eau

h_e : coefficient de transfert de chaleur côté eau

A_i : surface intérieure du capteur

L'eau contenue dans le capteur reçoit une quantité de chaleur égale à $h_e A_i (T_s - T)$. Cette quantité de chaleur doit être égale à la variation d'enthalpie de l'eau, soit :

$$h_e A_i (T_s - T) = m c_p \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

En intégrant (1), on obtient :

$$\frac{T - T_s}{T_0 - T_s} = e^{-\frac{h_e A_i t}{m c_p}}$$

I.3.5 Calcul du rendement

On va définir le rendement de l'installation comme étant le rapport de la quantité de chaleur transmise à l'eau pendant un intervalle de temps Δt (Q_1) à la quantité de chaleur reçue par la surface du capteur (Q_2).

$$Q_1 = m c_p \Delta T \quad \left\{ \begin{array}{l} m: \text{masse de l'eau (kg)} \\ c_p: \text{capacité calorifique de l'eau: } 1 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C} \\ \Delta T: \text{variation de la température de l'eau (}^\circ\text{C)} \end{array} \right.$$

$$Q_2 = E_s A \Delta t \times 0.24 \times 10^{-3} \quad \left\{ \begin{array}{l} E_s: \text{ensoleillement moyen (W/m}^2\text{)} \\ A: \text{surface réceptrice du capteur (m}^2\text{)} \\ \Delta t: \text{intervalle de temps (s)} \\ 0.24 \times 10^{-3}: \text{facteur de conversion de W en kcal/s} \end{array} \right.$$

$$\eta = \frac{m c_p \Delta T}{A E_s \Delta t \times 0.24 \times 10^{-3}}$$

CHAPITRE II

MONTAGE EXPERIMENTAL

II.1 Matériel utilisé

- 1 solarimètre PANA-VISE Metermater R.H. NICHOLS CO. LTD
- 1 multimètre FLUKE 64377.800A Digital Multimeter
- 1 potentiomètre CROPICO Type P.6 avec un sélecteur pour 4 thermocouples
- 1 chronomètre
- 4 thermomètres
- 1 demi tube en PVC
- du papier aluminium
- des planches de bois
- 1 réservoir
- de la laine de verre
- des ficelles
- des colliers de serrage
- 1 tube de cuivre
- du verre

II.2 Dessin du montage et détails de construction

Voir annexe.

II.3 Dimensionnement des éléments

II.3.1 Nous avons d'abord fixé les dimensions du réflecteur pour pouvoir estimer le diamètre du capteur et calculer le volume d'eau à chauffer. Nous avons utilisé un demi tube en PVC de diamètre intérieur $D = 104 \text{ mm}$ et de longueur effective 1675 mm . Et nous avons estimé qu'un facteur de concentration de 6 ($C = \frac{D}{d}$) était suffisant. Ainsi, le diamètre du tube de cuivre, utilisé comme capteur, sera de 17.33 mm , mais les tubes disponibles ont des diamètres de 16.10 mm ; sa longueur est de 1775 mm . Les boyaux ont une longueur de 3.55 m et un diamètre intérieur de 20 mm .

II.3.2 Volume du réservoir

La surface de captage est de: $104 \times 1675 = 0.1742 \text{ m}^2$

Si nous prévoyons un ensoleillement moyen de 1000 W/m^2 et un rendement de l'installation de 40% , la puissance que nous pourrions récupérer sera de : $1000 \times 0.1742 \times 0.4 = 69.68 \text{ W}$. (1)

La puissance nécessaire pour élever la température d'un volume V d'eau

de 35°C pendant 2 heures est de: $m c_p \frac{\Delta T}{\Delta t} = \rho V c_p \frac{\Delta T}{\Delta t}$ (2)

$$(1) = (2) \Rightarrow V = \frac{69.68 \times 0.24 \times 10^3 \times \Delta T}{\rho c_p \Delta T}$$

$$V = 3.44 \text{ litres}$$

On dispose d'un réservoir déjà calorifugé de 3.22 litres, en y ajoutant le volume d'eau contenue dans les boyaux et le capteur, on aura un volume totale $V = 3.66$ litres.

II.3.3 Volume d'isolant

L'isolant utilisé est de la laine de verre avec $k = 0.05 \text{ kcal/m.h.}^\circ\text{C}$.
 En admettant une variation de température de 5°C pendant 4 heures et en supposant que la température maximale atteinte par l'eau $T_i = 60^\circ\text{C}$ et que la température extérieure $T_e = 30^\circ\text{C}$, l'équation de la page 13 devient:

$$r_e = r_i e^{\frac{2\pi \times 0.05 \times L \times 4(60-30)}{1000 \times V \times 1 \times 5}} = r_i e^{0.0075 \frac{L}{V}}$$

pour le réservoir $V = 3.22 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, $L = 14 \times 10^{-2} \text{ m}$, $r_i = 7.8 \text{ cm}$

$\Rightarrow r_e = 10.8 \text{ cm}$

$$V_1 = \pi (r_e^2 - r_i^2) \times 14 \times 10^{-2} = 0.25 \times 10^{-2} \text{ m}^3$$

En faisant les mêmes calculs, nous avons trouvé pour l'isolation des boyaux et du bas du réflecteur un volume $V_2 = 0.55 \text{ m}^3$; soit un volume totale de 0.80 m³ en majorant.

II.3.4 Fabrication de la surface réfléchissante

Il s'agit de coller du papier aluminium sur la surface intérieure du tube en PVC pour que cette dernière réfléchisse sur le capteur les rayons de soleil qu'elle reçoit. Pour avoir une surface aussi lisse que possible, nous

avons

pris quelques précautions notamment ne pas trop mouiller de colle le

papier aluminium et l'étaler uniformément avec les moindres replis sur la surface du tube.

La surface extérieure du tube de cuivre est recouverte d'une peinture noire mate pour qu'elle puisse absorber le maximum d'énergie.

II.4. Procédure suivie avant d'effectuer les mesures.

Le réflecteur a été incliné à un angle de 25° (latitude de Thiès $+10^\circ$) par rapport à l'horizontal afin que les rayons du soleil soient perpendiculaires à la surface réceptrice. Et il a fallu aussi, qu'à chaque intervalle de 40 minutes orienter le réflecteur pour suivre le soleil et récupérer ainsi le maximum d'énergie. Des deux bouts des boyaux sortant du réservoir sont fixés aux extrémités du tube de cuivre, là aussi certaines précautions ont à prendre pour assurer l'étanchéité, et l'ensemble est exposé au soleil pendant environ 45 minutes, ce qui permettra d'atteindre la température d'équilibre à vide (77°C sans effet de serre et 105°C avec effet de serre). Ensuite, après avoir pris la température initiale de l'eau, on remplit le réservoir et pendant les 20 premières minutes, par intervalle de 5 minutes, on relève la température de l'eau dans le réservoir puis par intervalle de 15 minutes on relève les différentes températures (température de la surface du capteur, température d'entrée et de sortie du capteur, température du bas et du haut du réservoir...).

On a obtenu les valeurs suivantes, que l'on a regroupées dans des tableaux.

Expérience du 1^{er} Mars 1980

Température initiale de l'eau : 26°C

Début de l'expérience : 12^h 25'

Conditions atmosphériques: - Ciel couvert - beaucoup de vent.

Temps	Es (mV)	T. air (°C)	T. surface (°C)	T. entrée (°C)	T. sortie (°C)	T. haut (°C)	T. bas (°C)
12 ^h 40'	11.6	30	31	28.5	32.8	34	32
12 ^h 55'	11.7	29.5	35	32	36	36	33.5
13 ^h 10'	11.4	29.6	37	34	38.5	37.5	36
13 ^h 25'	11.1	30	38.5	34.2	39.5	39	37.5
13 ^h 40'	11.0	30	39	38.4	41	41	39
13 ^h 55'	11.0	30	43	39	44	43	41
14 ^h 10'	11.0	30	42.8	40	43.5	43	41.5
14 ^h 25'	10.8	29.5	41.5	40.5	43.5	43	42
14 ^h 40'	10.6	29.5	41	41	43	42.5	42
14 ^h 55'	10.3	28	41	42	43	42	42

T. haut, T. bas : températures du haut et du bas du réservoir.

II.5 TABLEAUX DES MESURES

Les mesures des 5 expériences sont regroupées dans des tableaux avec les spécifications suivantes:

- température initiale de l'eau
- début de l'expérience
- conditions atmosphériques

On a relevé par intervalle de 15 minutes les valeurs des grandeurs:

E_s : ensoleillement mV ($1 \text{ mV} = 105 \text{ W/cm}^2$)

T_{air} : température de l'air près du capteur

$T_{\text{air ombiant}}$ = température de l'air ombiant à l'ombre

$T_{\text{air confiné}}$ = température de l'air se trouvant dans le réflecteur

T_{surface} = température de la surface du capteur

$T_{\text{entrée}}$ = température de l'eau à l'entrée du capteur

T_{sortie} = température de l'eau à la sortie du capteur

T_{haut} = température du haut du réservoir d'eau

T_{bas} = température du bas du réservoir d'eau.

Expérience du 12 Mars 1980

Température initiale de l'eau : 22°C

Début de l'expérience : 11^h 55'

Conditions atmosphériques : - ciel couvert - beaucoup de vent.

Temps	Es mV	T. air °C	T. surface °C	T. entrée °C	T. sortie °C	T. haut °C	T. bas °C
12 ^h 10'	11.0	28.4	32.5	26	32.8	32	29
12 ^h 25'	10.8	29.5	36	30.2	34.5	34	31.5
12 ^h 40'	10.9	31	37	32	36.5	35.5	34.5
12 ^h 55'	11.2	31.5	38	35	38	37	35
13 ^h 10'	11.3	31.5	40	36	41	38	37.5
13 ^h 25'	10.9	32	42	38	42	39.5	39
13 ^h 40'	10.7	31	42	38	42	39.5	39
13 ^h 55'	10.7	31	42	39	42	39.5	39

Expérience du 19 Mars 1980

Température initiale de l'eau : 24°C

Début de l'expérience : 11^h 20'

Conditions atmosphériques : - Ciel couvert - Quelques rafales de vent.

Temps	\dot{E}_s mV	T. air °C	T. surface °C	T. entrée °C	T. sortie °C	T. réservoir °C
11 ^h 35'	11	52	36	29	36	36
11 ^h 50'	10.1	53	40	35	42	39
12 ^h 5'	10.7	53	42	36	43	40
12 ^h 20'	10.8	53	43	37	46	43
12 ^h 35'	10.9	57	48	42	48	46
12 ^h 50'	11.1	58	49	44	49	48
13 ^h 05'	10.8	60	52	47	52	50
13 ^h 20'	11.1	62	52	49	54	52
13 ^h 35'	11.1	64	54	50	56	53
13 ^h 50'	11.0	64	55	50	56	54
14 ^h 05'	10.9	64	55	51	56	55

Expérience du 5 Avril 1980

Température initiale de l'eau: 27°C

Début de l'expérience: 10^h 55'

Conditions atmosphériques: - Ciel peu couvert - peu de vent.

Temps	Es mV	T. air °C	T. air confiné °C	T. surface °C	T. entrée °C	T. sortie °C	T. réservoir °C
11 ^h 15'	11.5	28	52	40	34	41	38
11 ^h 30'	11.7	29	57	45	39	47	43
11 ^h 45'	11.8	29.5	60	47	41	51	49
12 ^h 00'	11.8	29.5	63	51	44	55	50
12 ^h 20'	11.9	31	65	55	49	57	52
12 ^h 35'	12.0	31.5	68	55	51	61	56
12 ^h 50'	11.9	31.5	70	58	53	63	59
13 ^h 05'	12.1	32	69	61	58	64	60
13 ^h 20'	12.0	32	70	61	59	64	62

CHAPITRE III

RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.1 Essai préliminaire

Cet essai consistait à relever la température de l'eau à l'entrée et à la sortie du capteur pour plusieurs débits différents afin de connaître le débit pour lequel le rendement est maximum. On sait qu'à part le principe de thermosiphon, on pourrait utiliser une pompe pour la circulation de l'eau dans le circuit et c'est cet essai qui devrait permettre d'établir le débit de fonctionnement. Mais les résultats de l'expérience sont tels qu'il n'est pas possible de tirer des conclusions significatives. En effet pour plusieurs débits, on a relevé des températures d'entrée et de sortie du capteur égales; ce qui signifie qu'il n'y a eu aucun échange thermique entre l'eau et le capteur. D'ailleurs voici deux mesures prises lors de l'expérience du 16 février 1980 avec un ciel couvert et sans effet de serre.

Débit (l/h)	T _{surface} (°C)	T _{entrée} (°C)	T _{sortie} (°C)
150	26	24.5	24.5
225	26	24.5	24.5

Ceci est dû premièrement au fait que notre surface de captage est très petite (0.1742 m^2) et que l'on a pas pu obtenir des débits faibles avec le robinet; et deuxièmement on était à circuit ouvert ce qui signifie que l'on ne chauffait pas la même eau. Cependant on pense que l'utilisation d'une pompe, même si le rendement n'est pas optimal, aiderait beaucoup à diminuer le temps de chauffage.

III.2 Cas sans effet de serre

Pour ce cas nous avons fait deux expériences les 1^{er} et 12 Mars 1980 avec des conditions atmosphériques difficiles (ciel couvert, beaucoup de vent).

III.2.1 Rendement

Expérience du	E _s moyen $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	ΔT °C	Δt s	η %
1 ^{er} Mars	1053.38	16	5400	25
12 Mars	1041.67	17.25	5400	27

III.2.2 Illustration graphique des résultats

Voir annexe

- Graphique III.2.a : Ensoleillement en fonction du temps
- Graphiques III.2.b et III.2.c : Température de l'eau du réservoir en fonction du temps.

III.2.3 Discussion

On voit que le rendement de la deuxième expérience, bien qu'avec un ensoleillement plus faible est supérieur ^{à celui} de la première expérience; ceci est dû au fait qu'il y avait moins de vent lors de cette expérience. Le rendement moyen obtenu, 26%, devrait alors être plus grand si il y avait moins de vent et un bon ensoleillement; les pertes par convection sont d'ailleurs très importantes (30 watts). Le graphique III.2.a qui représente l'ensoleillement en fonction du temps montre que l'énergie reçue est très variable d'un moment à un autre (passage de nuage), ainsi le débit obtenu par thermosiphon varie de $3.82 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$ à 4.34 kg/s . Les graphiques III.2.b et III.2.c représentant la température de l'eau du réservoir en fonction du temps s'approchent de leur courbe théorique $\frac{T - T_s}{T_0 - T_s} = e^{-\frac{hcAit}{mcp}}$ leur allure étant presque exponentielle. La température de l'eau s'élève très vite au début, ce qui rend difficiles les relevés de mesure, pour croître par degré par intervalle

de 15 minutes; on notera que la température d'équilibre de l'eau est atteinte en 1 heure 30 minutes et ne dépasse pas 42°C .

L'imprécision des mesures et les facteurs qui ne sont pas pris en compte (vitesse du vent, variation du débit, pertes singulières dans le circuit...) expliquent la dispersion des résultats, donc l'irrégularité des courbes.

III.3 Cas avec effet de serre

Les résultats des 3 expériences, avec l'utilisation de l'effet de serre, effectuées dans de meilleures conditions atmosphériques, pourraient mieux traduire le comportement réel de l'installation. Cependant, ces résultats ont été quelque peu faussés par le manque d'étanchéité entre le verre et les plaques de bois, manque dû essentiellement aux difficultés pratiques de fabrication (coupage du verre, non uniformité des surfaces des plaques...)

III.3.1 Revue

Expérience du	E_s moyen W/m^2	ΔT $^{\circ}\text{C}$	Δt s	η %
19 Mars	1034.28	24	5400	38
26 Mars	1069.52	27	5400	41
5 Avril	1128.57	29	5400	42

III.3.2 Illustration graphique des résultats

Voir annexe

- Graphiques III.3.a, III.3.b et III.3.c : Variation de la température de l'eau du réservoir en fonction du temps pour les expériences respectives du 19 Mars, 26 Mars et 5 Avril.
- Graphique III.3.d : Énergie incidente en fonction du temps pour un jour ensoleillé.

III.3.3 Discussion

La théorie prévoyait qu'avec un vitrage, on devrait obtenir une énergie double de celle sans effet de serre. Si ce résultat n'est pas atteint c'est précisément à cause du manque d'étanchéité que nous avons souligné. Mais le rendement moyen obtenu avec effet de serre, qui est de 40%, est à plusieurs égards satisfaisant, vu les conditions de fabrication de l'appareil et les matériaux dont nous disposons. Tous et déjà, on peut prévoir, pour une meilleure fabrication de l'installation, des rendements supérieurs à ceux obtenus. On peut remarquer que l'énergie récupérée au niveau du réservoir est fonction de l'ensoleillement et varie linéairement suivant celui-ci. C'est ainsi que pour les énergies incidentes indiquées dans le tableau ci-dessus, on récupère respectivement 87.84, 98.82 et 106.14 Kcal. Les courbes représentant la température de l'eau du réservoir en fonction du temps (Graphiques

III.3.a, III.3.b et III.3.c) montre que la variation de la température suit une allure exponentielle, ici aussi la dispersion des points s'expliquent par la variation constante du débit.

Si dans le premier cas la différence entre la température d'entrée et de sortie de l'eau du capteur est de 4°C c'est à dire que l'on récupère une énergie $Q = m c_p \Delta T = 14.688 \times 4 = 58.75 \text{ Kcal/h}$, dans le cas avec effet de serre elle est de 7°C soit $Q = 100.8 \text{ Kcal/h}$, donc une amélioration de 71.6%. De même on note une amélioration sensible quant à la température d'équilibre de l'eau qui est de 65°C au lieu de 42°C .

CONCLUSION

Le paramètre le plus important, et sur lequel a porté essentiellement notre étude, a été le rendement expérimental de l'installation. La ressemblance des résultats obtenus lors des différentes expériences nous permet de dire que le rendement global de l'installation, qui est le rapport de l'énergie utile transmise à l'eau et de l'énergie incidente, est de 26% pour le cas sans effet de Serre et de 40% avec effet de Serre. Ces chiffres peuvent paraître faibles mais on doit savoir que les expériences du premier cas ont été effectuées pendant des jours non ensoleillés avec beaucoup de vent, ce qui a favorisé les pertes de chaleur par convection au niveau du capteur, et que pour le deuxième cas, les fuites d'air dues au manque d'étanchéité ont beaucoup contribué à réduire le rendement. D'autres facteurs ont influencé le rendement telle que la nature du matériel utilisé pour le montage que l'on a voulu trop simple et surtout la difficulté de suivre le soleil pour avoir la surface réceptrice perpendiculaire aux rayons incidents.

Malgré ces considérations, nous pensons que l'étude a été concluante, et que l'on pourrait amener une amélioration substantielle au rendement ^{et} en faisant une analyse plus fine de certaines

caractéristiques particulières telles que l'obtention d'une surface parfaitement réfléchissante (notons que le papier aluminium donne de bons résultats mais n'est pas adapté pour l'hivernage et demande à être changé constamment), l'étude de la relation qui existe entre les diamètres du réflecteur et du capteur et un système pouvant permettre l'orientation du capteur.

Outre la production d'eau chaude sanitaire ou industrielle, le montage peut être utilisé pour faire fonctionner des moteurs solaires dans le cas du pompage de l'eau.

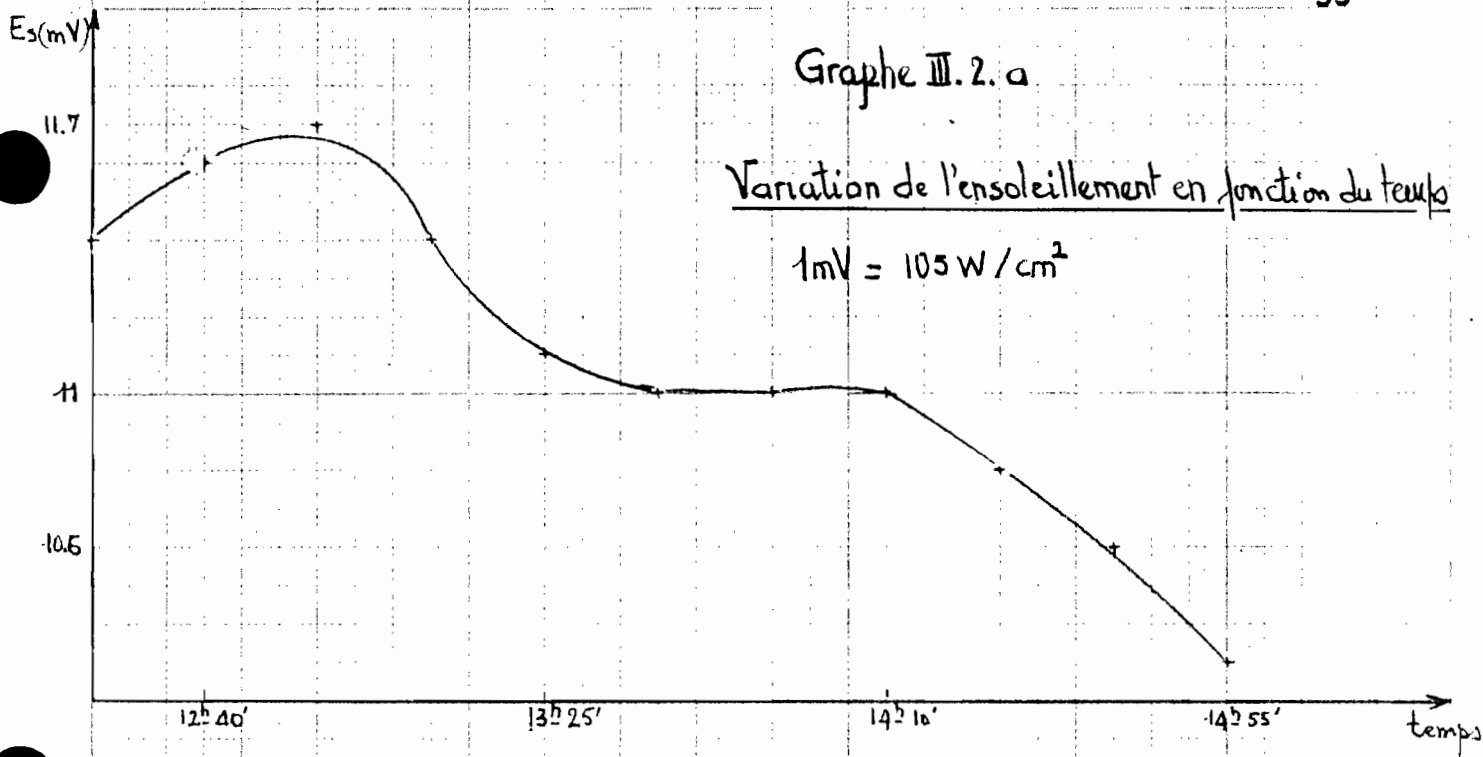
Si le solaire, riche de promesses, ne s'est pas développé rapidement jusqu'ici, cela tient à un ensemble de raisons dont l'une des plus importantes est certainement le prix élevé des matériels et des coûts d'installation. Mais l'étude de rentabilité que nous avons faite en annexe montre qu'en utilisant du matériel de technologie courante, l'énergie solaire a des avantages réels sur les autres énergies existantes: pour le chauffage d'un même volume d'eau, l'énergie solaire nécessite un coût annuel de 6453^F, alors qu'il faut payer annuellement 9655^F pour l'énergie électrique.

Aussi, l'excellent ensoleillement du Sénégal (1065 Watts/m² pour le mois de mars), donc les grandes quantités d'énergie disponibles, confirme l'importance que l'on devrait accorder à l'exploitation de l'énergie solaire.

Graphe III.2. a.

Variation de l'ensoleillement en fonction du temps

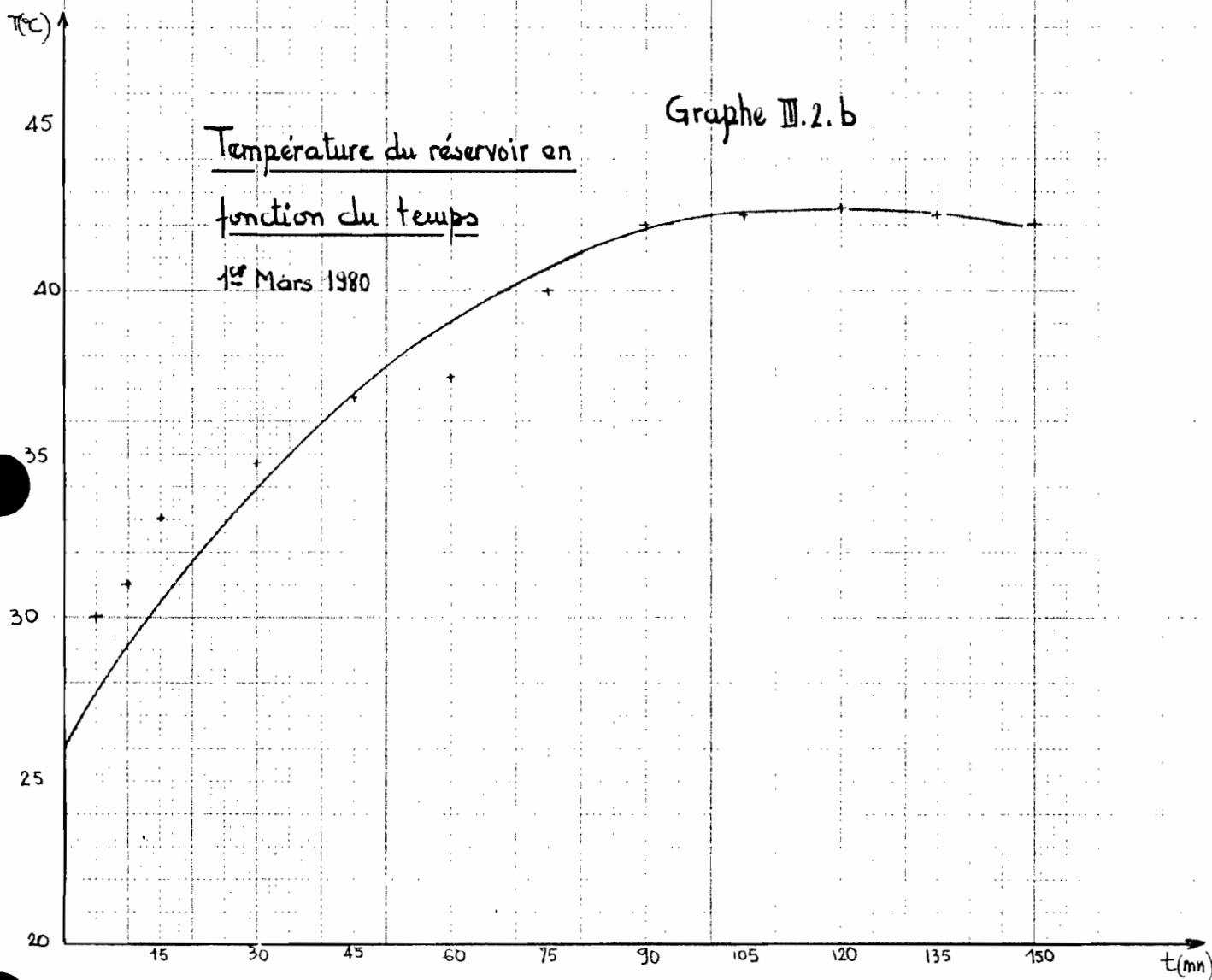
$$1\text{mV} = 105\text{W/cm}^2$$



Graphe III.2. b.

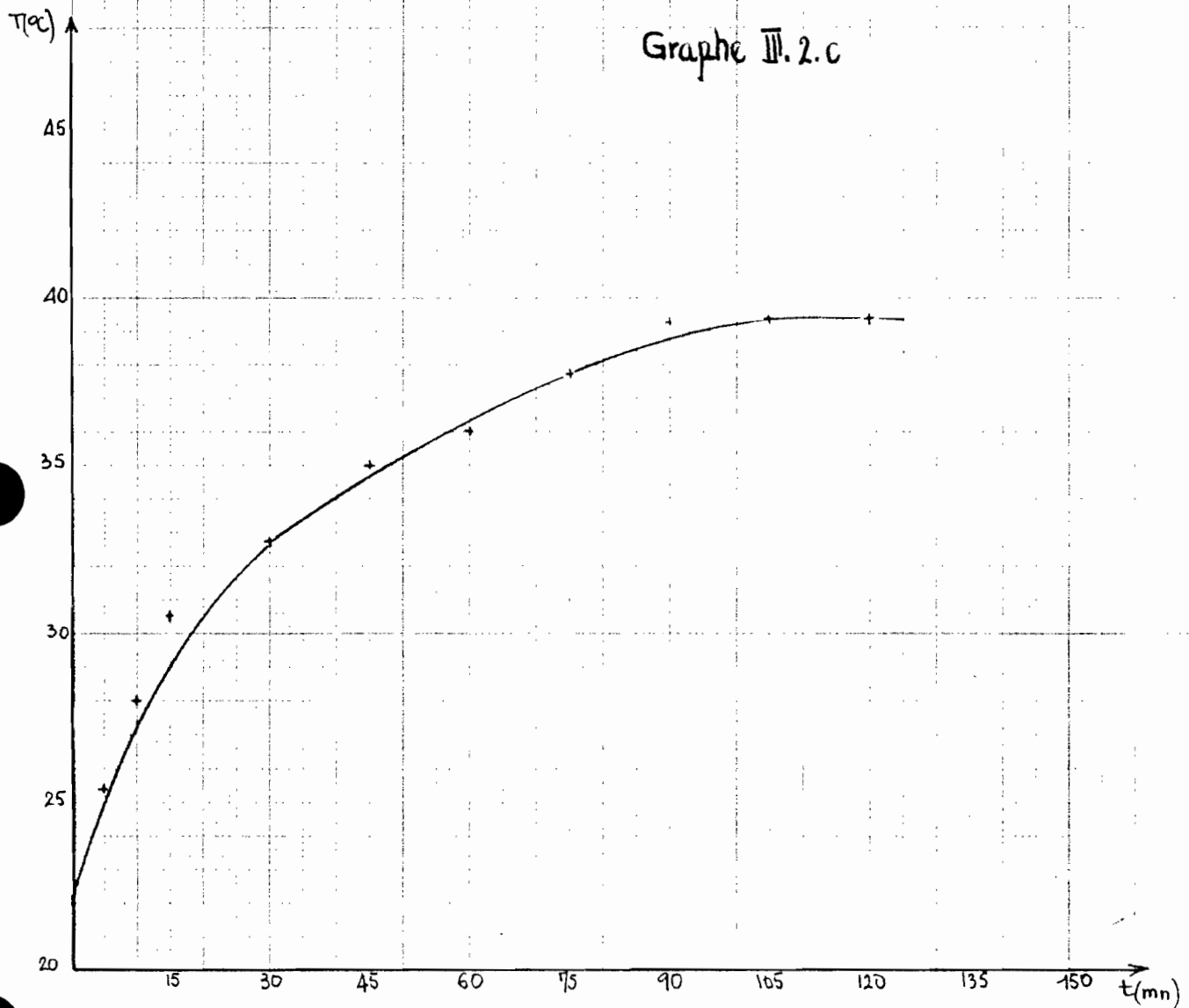
Température du réservoir en
fonction du temps

1^{er} Mars 1980



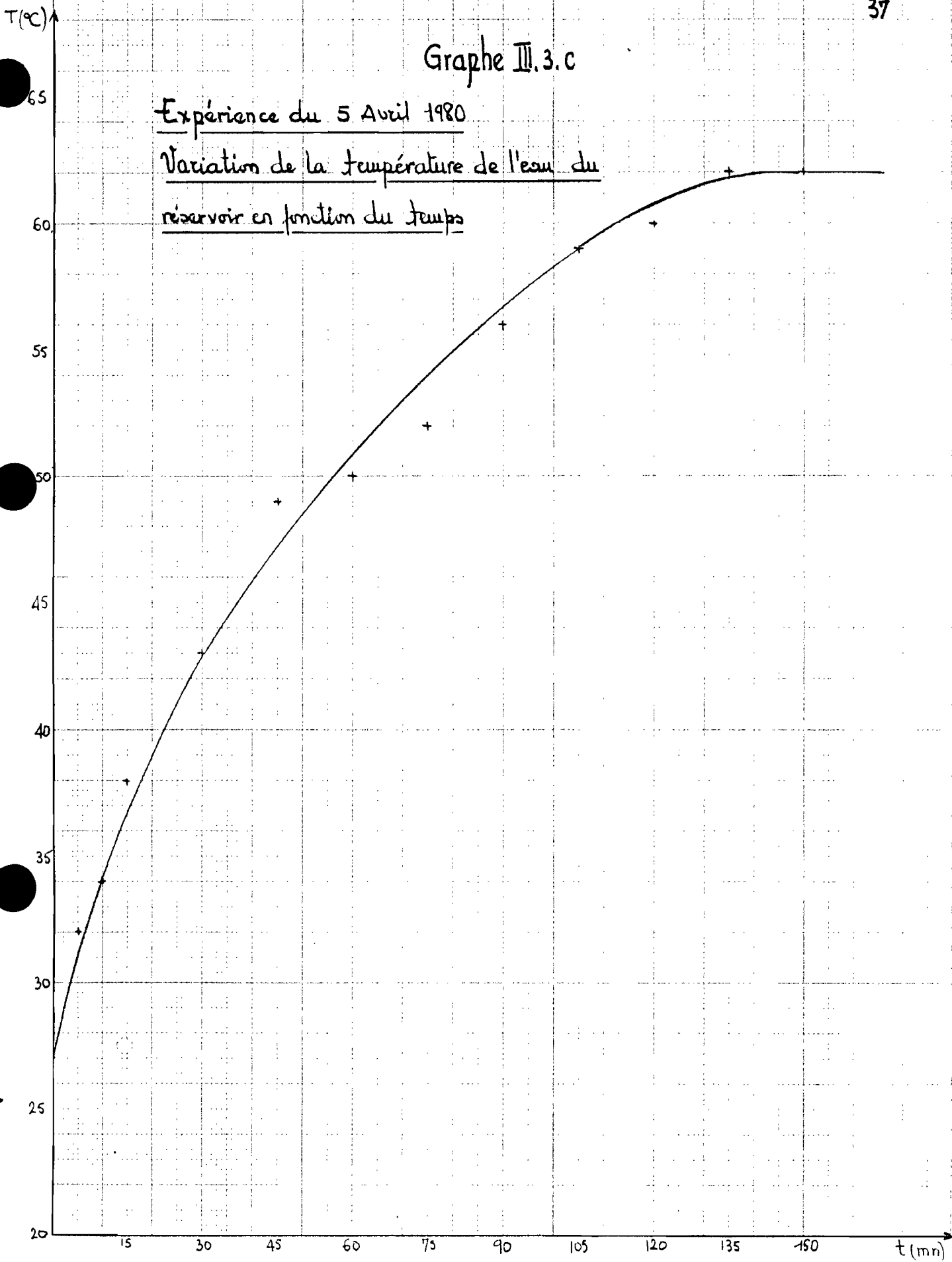
Température de l'eau du réservoir en fonction du temps

Expérience du 12 Mars 1980 sous effet de Jere



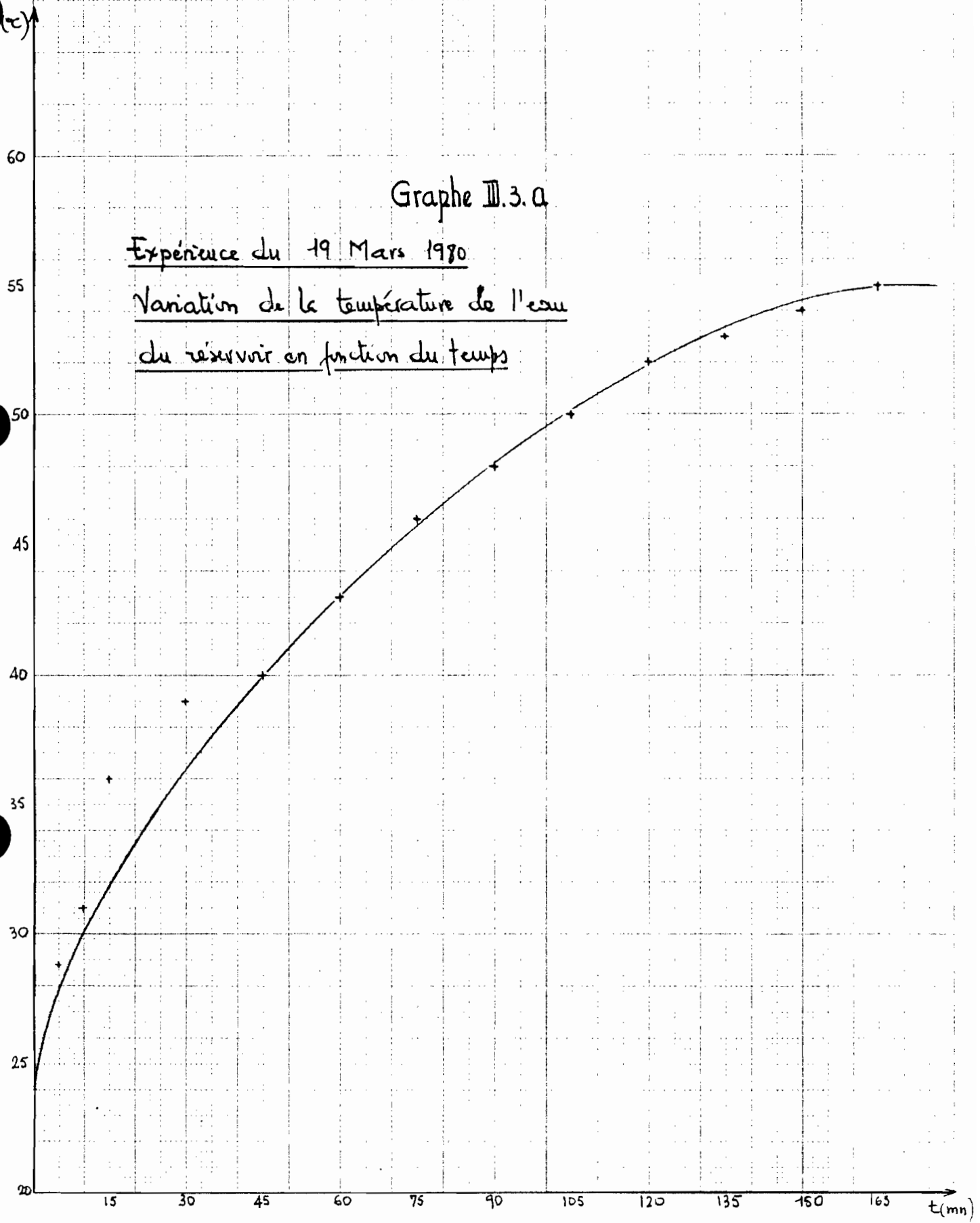
Graphes III.3.c

Expérience du 5 Avril 1980
Variation de la température de l'eau du
réservoir en fonction du temps

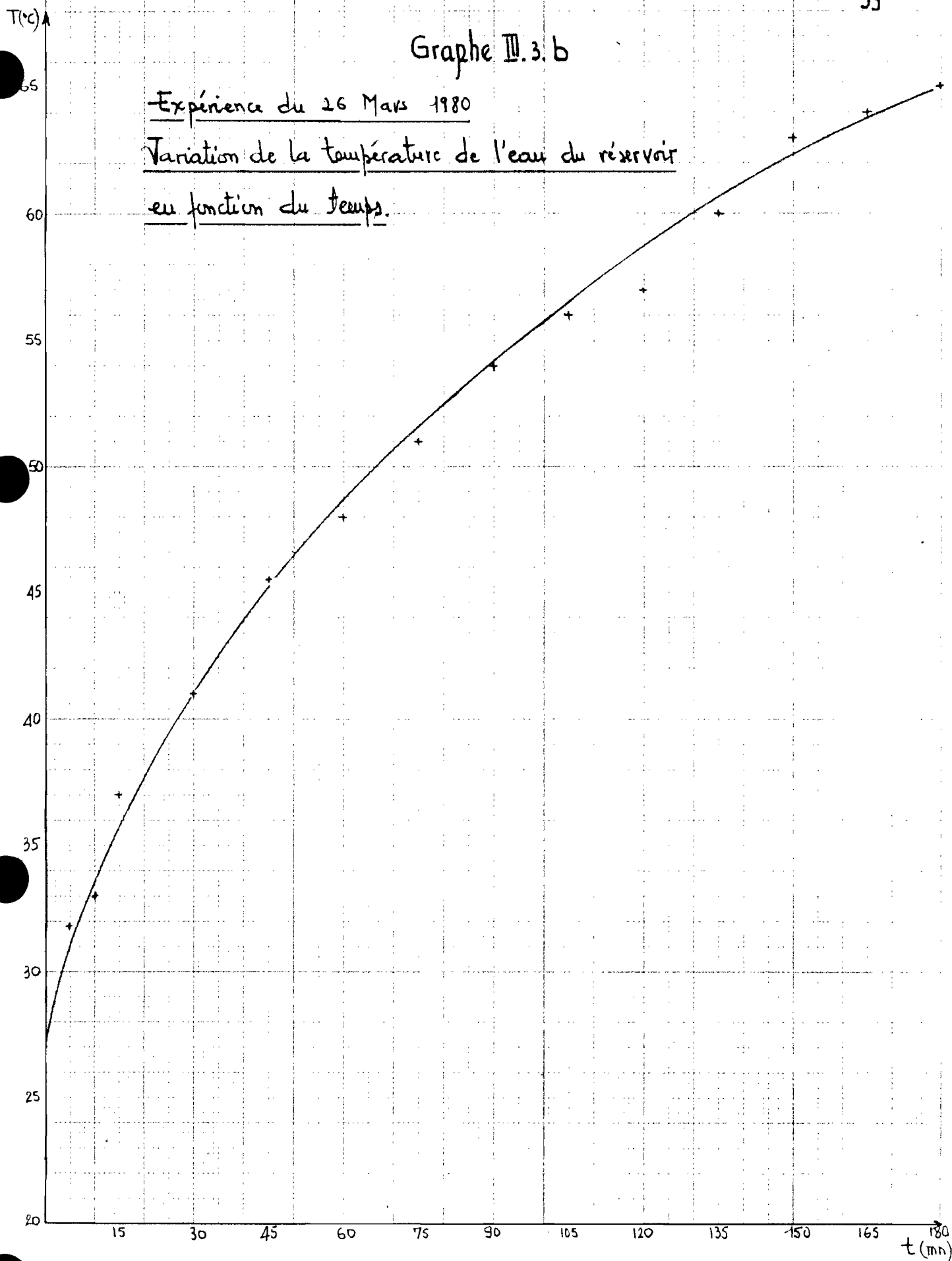


Graphe III.3.a

Expérience du 19 Mars 1970
Variation de la température de l'eau
du réservoir en fonction du temps

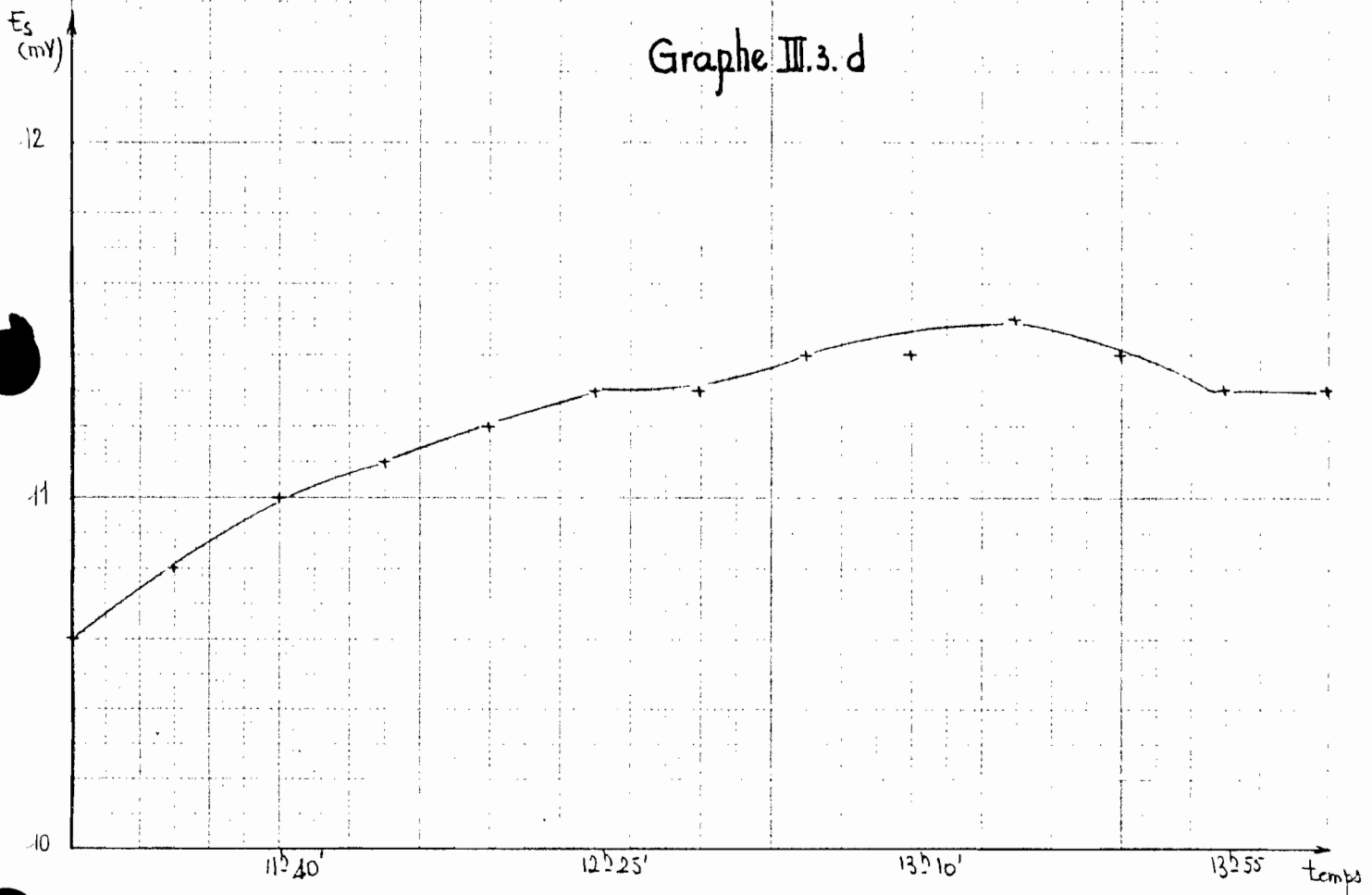


Graphe III.3. b

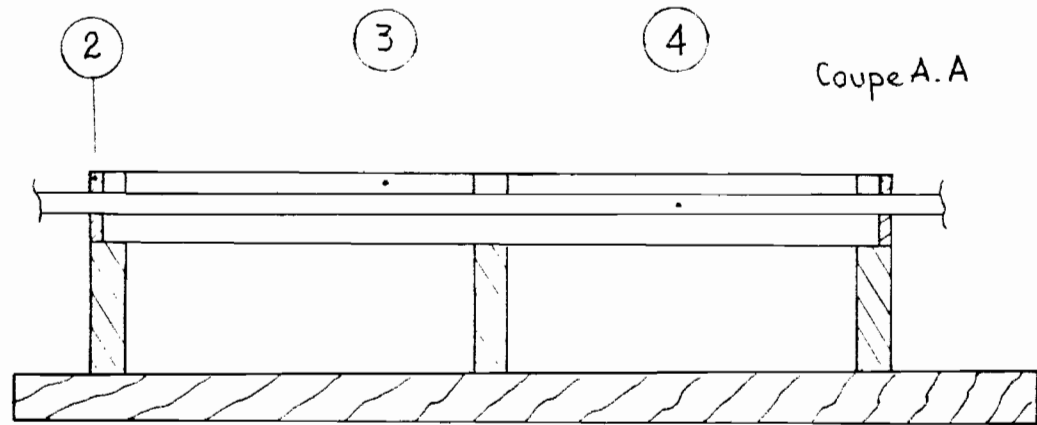
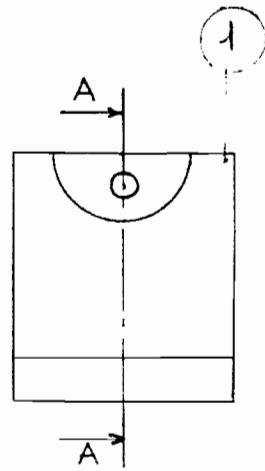
Expérience du 26 Mars 1980Variation de la température de l'eau du réservoir
en fonction du temps.

Variation de l'énergie incidente E_s en fonction du temps
pour un jour ensoleillé

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



Dessin du collecteur



- 1: Support du réflecteur
- 2: support du capteur
- 3: réflecteur
- 4: capteur

AnnexeEtude de rentabilité

Nous allons comparer le coût du chauffage à l'énergie solaire à celui du chauffage par électricité. Cette comparaison, même si elle est à petite échelle, nous permettra d'apprécier l'opportunité des investissements que nécessitent les installations d'exploitation de l'énergie solaire. On partira sur la base des résultats obtenus pendant les expériences, à savoir que notre montage peut élever la température de 3.66 litres d'eau de 33°C en 2 heures. Nous avons pour les hypothèses suivantes:

- il y a au minimum 9 mois ensoleillés dans l'année et pour chaque jour, le fonctionnement de l'installation peut aller de 9 heures à 17 heures, soit 8 heures.
- la durée de vie minimum de l'installation est de 3 ans
- le prix du kWh d'électricité en cours pour les petites puissances est de 63.75 F CFA
- le taux d'actualisation est de 8%.

Coût de l'installation.

Tube en P.V.C	5000 ^F
Tube en cuivre	3850
Verre	1475
Taillage du verre	500
Papier aluminium	430
Boyaux	240
Laine de verre	2500
Peinture noire mate	985
Colliers de serrage	520
Colle Saxite	260
Colle Ponal	570
Ficelles	300
	<u>16630^F</u>

Coût annuel équivalent

Si P est la valeur actuelle d'une somme d'argent, i le taux d'actualisation et n le nombre de périodes, on sait que l'annuité R est donnée par:

$$R = \frac{Pi(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad [4]$$

Pour notre cas $P = 16630$, $i = 0.08$ et $n = 3$

$$R = \frac{16630 \times 0.08 (1 + 0.08)^3}{(1 + 0.08)^3 - 1} = 6453 \text{ F}$$

Donc le coût annuel équivalent est de 6453 F

Coût du chauffage à l'électricité.

Compte tenu des hypothèses posées, le volume d'eau à chauffer par jour est de : $\frac{3.66 \times 8}{4} = 14.64$ litres

L'énergie mécanique est : $Q = m C_p \Delta T = 14.64 \times 33 = 483.12$ Kcal.

soit $483.12 \times 270 = 130.442 \times 10^3$ Kcal / an

En utilisant l'énergie électrique, on paye annuellement :

$$63.75 \text{ F} \times \frac{130.442 \times 10^3 \times 4.18}{3600} = \underline{9655 \text{ F}}$$

On voit que même avec une petite surface receptrice (0.1742 m^2) le coût de l'installation est beaucoup plus faible que le coût de l'électricité (une réduction du coût de 33%); mais pour des surfaces de captage plus importantes, le coût de l'énergie solaire est presque négligeable: le Groupe Solaire Lyonnais (Université de Lyon, 1^{er} cycle, 69621 Villeurbanne) a construit un réflecteur solaire du même type avec une surface de captage de 1.5 m^2 qui est revenu à 10000 F, en utilisant de l'énergie électrique pour produire la même quantité de chaleur, on devrait payer 100000 F !

Bibliographie

- 1.- F. KREITH, Transmission de la chaleur et thermodynamique. G. Masson et Cie.
- 2.- LOUIS WEIL, Éléments des échanges thermiques
Gauthiers-Villars Paris
- 3.- BIRD, STEWART, LIGHTFOOT, Transport Phenomena
- 4.- ALONSO-FINN, Physique Générale Tome II
Champs et Ondes
- 5.- ROHSENOW-HARTNETT, Handbook of heat transfer
Mc Graw. Hill
- 6.- FELIX TROMBE (CNRS), L'énergie solaire
Collection que sais-je!

Références

Notes de cours de Michel PETITEAU, professeur à l'E.P.T.
1^{er} Semestre année 78-79

Solar Energy, Volumes : - 18 N° 5 1976
- 20 N° 4 1978
- 17 N° 6 1975

Annales de la faculté des Sciences, Université de DAKAR
Année 1975 - Tome 28

[1]: Transmission de la chaleur et thermodynamique
G. Masson et Cie.

[2] } Technique de l'ingénieur Page 894.4
[3] } 2^o Convection naturelle
équations (7) et (5)

[4] La préparation des décisions financières dans
l'entreprise - Harold Bierman et Seymour Smidt
Collection JUNOD