

RÉPUBLIQUE DU SÉNÉGAL



ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE THIÈS

PROJET DE FIN D'ÉTUDES

Titre Conception d'un laboratoire didactique
des énergies renouvelables
Première partie : Énergie solaire

Auteur Simon SÈNE

Génie Mécanique

Date JUIN 1984



7
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE THIES



PROJET DE FIN D'ÉTUDES

TITRE : CONCEPTION D'UN LABORATOIRE DIDACTIQUE
DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

PREMIÈRE PARTIE : ÉNERGIE SOLAIRE

Directeur : André
WOLSKI

Auteur : Simon SENE

Génie Mécanique

Date : JUIN 1984

DÉDIÉ

A ma mère
A mon père
A mes frères et sœurs qui,
De moi, ont fait ce que je suis ;

A tous ceux qui, de l'énergie souffrent
Puisse cette modeste étude,
Contribuer au bien-être des peuples .

REMERCIEMENTS

A monsieur André WOLSKI, mon directeur de projet,
pour les documents qu'il a eu l'amabilité de me fournir,
j'exprime ma vive gratitude.

A monsieur Dinh Vo NGOC, professeur à l'E.P.T.,
pour les conseils qu'il a bien voulu me prodiguer,

A monsieur Bocar SY, ingénieur au CERER,
pour les documents qu'il a bien voulu mettre à ma disposition,

A monsieur BOUCHARD, technicien à l'E.P.T.,
pour ses prestations lors de la réalisation des modèles,
enfin,

A tous ceux qui, de par leur aide, directe ou
indirecte, ont contribué à la réalisation de ce projet,

JE TIENS A EXPRIMER MES SINCERES REMERCIEMENTS .

SOMMAIRE

L'étude proposée vise la réalisation, à l'EPT, d'un laboratoire didactique des énergies renouvelables. Les modèles devront donc être réduits, fiables, facilement maniables (démontage et remontage), et suffisamment performants pour donner des résultats appréciables quant à l'étude des phénomènes.

Cette première partie traite de l'énergie solaire. L'étendue du sujet a imposé le choix des questions jugées plus significatives. C'est ainsi que l'on a retenu :

- le chauffage par capteur plan et par concentrateur,
- la production d'électricité par photopiles.

Une étude théorique des phénomènes a donc été menée au préalable, puis quelques modèles ont été conçus :

- capteur plan
- concentrateur cylindro-parabolique
- réservoir calorifugé
- simulateur du soleil

Ensuite la description d'un certain nombre d'expériences jugées significatives, et réalisables avec le matériel ainsi conçu a été faite.

TABLE DES MATIERES:

	PAGES
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1: Etudes théoriques	3
1.1 Le rayonnement solaire	3
1.2 Notions de transfert de chaleur	8
1.2.1 La conduction	8
1.2.2 Le rayonnement	9
1.2.3 La convection	10
1.2.4 Le rayon critique	11
1.3 Le chauffage solaire	12
1.3.1 Le chauffage direct	12
1.3.2 Le chauffage par concentration	13
1.4 L'électricité solaire : les photopiles	14
1.4.1 L'effet photovoltaïque	14
1.4.2 Technologie des photopiles	16
CHAPITRE 2: Matériel expérimental	18
2.1 capteur plan	19
2.1.1 construction	19

2.1.2	<i>Eléments constitutifs</i>	20
2.2	<i>Concentrateur cylindro-parabolique</i>	29
2.2.1	<i>Construction</i>	29
2.2.2	<i>Eléments constitutifs</i>	31
2.3	<i>Réservoir calorifugé</i>	35
2.4	<i>Module de photopiles</i>	37
2.5	<i>Simulateur du soleil</i>	38
2.6	<i>Appareils de mesures et contrôles</i>	42
	CHAPITRE 3: Manipulations	46
3.1	<i>Effet de serre</i>	46
3.2	<i>Absorption de chaleur: corps noir / corps blanc</i>	50
3.3	<i>Thermosiphon</i>	52
3.4	<i>Circulation forcée</i>	55
3.5	<i>Etude d'un concentrateur</i>	58
3.6	<i>Performances électriques d'un module de photopiles</i>	60
	CHAPITRE 4: Expérimentation du matériel	64
4.1	<i>Conditions expérimentales</i>	64
4.2	<i>Résultats expérimentaux</i>	65
4.3	<i>Analyse des résultats</i>	68
	CONCLUSION	69

APPENDICES	71
A1: variations de la constante solaire au Sénégal	71
A2: Différences spectrales entre lumière naturelle et lampe à incandescence	72
A3: Courbe de sensibilité spectrale d'une photopile comparée à celle de l'œil	73
A4: Variation du courant d'une photopile en fonction de l'angle d'incidence	73
BIBLIOGRAPHIE	74

NOTATIONS:

[n]: Renvoi à la référence n en fin de texte
- le renseignement mentionné provient de cette référence, ou
- pour plus de détails consulter cette référence

(A.n): Renvoi à l'appendice n en fin de texte

(P.n): Renvoi à la page n du texte

INTRODUCTION

Rien ne se fait sans elle; avec elle tout devient possible: l'énergie. Aux lendemains de la seconde Guerre Mondiale, l'industrie a connu des développements spectaculaires, et avec elle l'énergie. Le pétrole assurait l'essentiel des besoins, et l'on fondait beaucoup d'espoir sur lui, jusqu'au jour où ...

Cette année-là, les producteurs de pétrole, conscients de leur force, commencèrent à s'imposer dans toute l'industrie. Cette même année-là, la sécheresse sévissant, atteignait un de ses points les plus culminants dans beaucoup de pays d'Afrique: l'abondance était morte, la souffrance grandissait, le désespoir était né. Dans leur affolement, certains pensèrent à la construction de forages en grand nombre: il fallait donc de l'énergie. Le pétrole?

Et ce fut la crise: 1973. Et l'humanité se devait coûte que coûte de trouver un substitut au pétrole. Aujourd'hui encore, nous portons les séquelles de cette crise; et les énergies renouvelables, de par leur abondance, seraient une solution très valable. Le soleil brille pour tout le monde, et son énergie est gratuite. Chaque jour, il déverse une quantité de chaleur immense sur la terre, créant parfois des conditions d'existence insupportables: l'inconfort.

L'énergie, ce bien tant convoité, serait-elle sous sa forme thermique, un mal? un fléau! Non, il ne saurait y avoir de

paradoxe à ce niveau, car toutes les formes d'énergie s'équivalent. Le problème ? Trouver la bonne méthode d'utilisation, c'est-à-dire celle qui donne le meilleur rendement. C'est dans ce cadre que beaucoup de pays s'attèlent à la recherche de méthodes d'exploitation optimale des énergies renouvelables.

L'École Polytechnique de Thiès n'est pas en reste, et dans le stade actuel des choses, il est nécessaire de mener une action de plus grande envergure : une vulgarisation des techniques actuellement utilisées de par le monde, à l'aide d'un laboratoire didactique. Ce laboratoire permettra aux élèves-ingénieurs de se familiariser avec les techniques d'exploitation de ces énergies dites renouvelables. Il pourra également servir, à l'occasion, à initier les visiteurs ou stagiaires, aux différentes techniques et à l'entretien du matériel.

CHAPITRE 1:

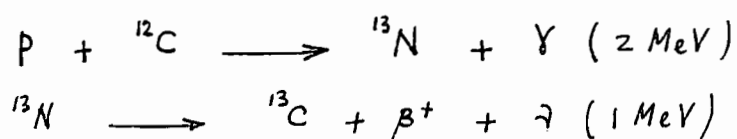
Etudes théoriques:

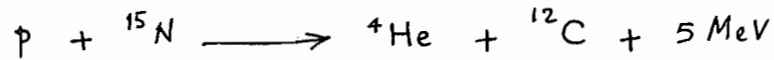
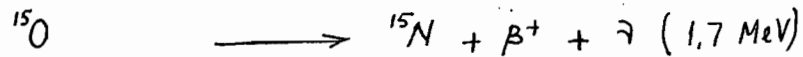
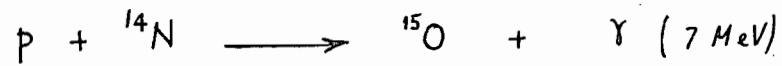
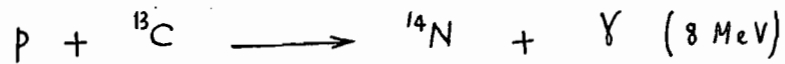
1.1 Le rayonnement solaire: [1],[2],[3]

Tout vient de lui.

Lui, cet astre, une sphère de 1390 000 km de diamètre: le soleil. Etoile normale de la série principale, situé à une distance de 150 millions de km de la terre, avec une masse de 2×10^{27} tonnes, soit une densité de 1,4 fois celle de l'eau, le soleil est essentiellement constitué d'hydrogène. Sa zone centrale se compose d'un gaz d'une densité de 75 g/cm^3 , à une température de 15 millions de degrés Kelvin et une pression de 10^9 atmosphères; ce qui constitue des conditions suffisantes pour des réactions thermonucléaires. L'énergie solaire est ainsi produite par 2 processus de réactions thermonucléaires: le cycle Carbone - Azote, et la réaction d'Hydrogène.

Le cycle Carbone - Azote:





La réaction d'Hydrogène:



Ainsi, chaque seconde, 500 millions de tonnes d'Hydrogène sont transformées en Hélium, soit 0,6% de cette masse en énergie. Ce qui permet au soleil de rayonner une puissance de 4×10^{20} MW, soit 65 MW/m² de surface solaire. De cette énergie, la terre intercepte $1,78 \times 10^{17}$ MW. Le rayonnement est essentiellement distribué dans la gamme des longueurs d'onde allant de 0,1 μm à environ 5 μm . Il arrive au sol après avoir subi 2 types d'extinctions: l'absorption et la diffusion.

Les molécules de l'air ont chacune un spectre d'absorption. Les rayons x, l'ultra-violet moyen ($< 0,3 \mu\text{m}$), de même que l'infra-rouge lointain ($> 2,5 \mu\text{m}$) sont totalement absorbés. L'ultra-violet proche et le visible ($0,3 \leq \lambda < 0,8$) le sont peu.

La diffusion atmosphérique est due aux molécules de l'air, dont la vapeur d'eau, et aux aérosols en suspension.

(sable, poussières, ...). Physiquement, cela correspond à la réflexion dans toutes les directions sur des irrégularités réparties au hasard, et dont les dimensions sont de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde.

La constante solaire est le flux à travers une surface placée perpendiculairement au rayonnement, au-delà de l'atmosphère. La valeur actuellement admise est de 1350 W/m^2 avec une variation de $\pm 3,4\%$ due à l'excentricité de l'orbite terrestre.

Le rayonnement solaire, au niveau du sol, est constitué de 2 composantes :

- le rayonnement diffus qui est la partie sans direction privilégiée,
- le rayonnement direct qui est dans la direction du soleil.

L'ensemble forme le rayonnement GLOBAL.

Les dispositifs à concentration sont sensibles au rayonnement direct tandis que le capteur plan est sensible au global.

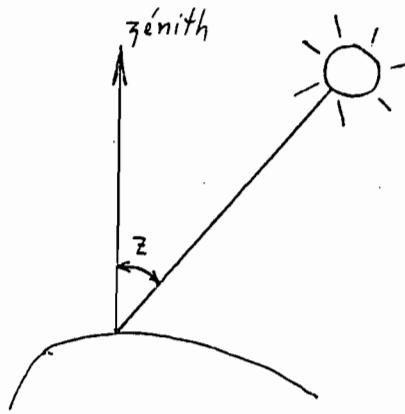
Le rayonnement qui atteint la surface de la terre est fonction du lieu (latitude, longitude), de l'heure et des conditions atmosphériques.

Soit G_0 , la constante solaire et soit G_n l'irradiation

d'une surface orientée perpendiculairement aux rayons du soleil. Alors,

$$G_n = G_0 \bar{\tau}_a^m \quad [4]$$

$\bar{\tau}_a$: facteur de transmission de l'air (de 0,8 à 0,6)
 m représente la distance effectivement couverte par les rayons solaires, divisée par la distance parcourue quand le soleil est au zénith.



$$m = \frac{1}{\cos z}$$

Pour une surface faisant un angle θ avec les rayons, soit i l'angle entre la normale à la surface et la direction des rayons; alors l'irradiation s'exprime par :

$$G_i = G_n \cos i$$

$$\text{donc } G_i = G_0 \bar{\tau}_a^{(\cos z)^{-1}} \cos i \quad [4]$$

L'intervalle de temps, au cours duquel le rayonnement direct a dépassé un certain seuil (généralement fixé à 100 W/m^2), est appelé la durée d'insolation.

Le rayonnement solaire se mesure à l'aide d'un appareil qui porte le nom de solarimètre. Il en existe plusieurs types: Héliographe Campbell Stokes, Pyranomètre de Kipp, Intégrateur de rayonnement CIMEL, ... [3]

L'énergie solaire sert à 3 utilisations: [2]

- maintien à la surface de la terre de la température nécessaire à la vie,
- emmagasinage de combustibles par processus organiques (bois, charbon, pétrole) [2]
- sous forme directe par processus:
 - sélectifs (piles photovoltaïques, synthèse chlorophyllienne)
 - non sélectifs (chauffage)

NOTA: sélectif: dont l'efficacité est fonction des longueurs d'onde du rayonnement incident; sensibilité spectrale.

1.2 Notions de transfert de chaleur:

Comme tout rayonnement thermique, le rayonnement solaire est régi par les lois du transfert de chaleur. La transmission de la chaleur se fait suivant divers mécanismes.

1.2.1 La conduction:

C'est le passage de la chaleur à travers un milieu solide, liquide ou gazeux sans mouvement macroscopique des molécules de ce milieu. Le flux de chaleur q par unité de surface se calcule par

$$q = -k \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{Q}{A} \quad [5]$$

ΔT : différence de températures entre les 2 points considérés

Δx : distance entre les 2 points considérés

k est appelé conductivité thermique du milieu. Sa valeur dépend de la nature du milieu et de la température et, pour les fluides compressibles, de la pression.

Cette relation empirique établie par FOURIER porte le nom de loi de Fourier ou loi de la conduction.

En coordonnées cylindriques cette loi devient

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{\ln(r_2/r_1) / 2\pi k L} \quad [5]$$

Q : flux de chaleur à travers la surface A

T_1, T_2 : Températures intérieure et extérieure

r_1, r_2 : rayons intérieur et extérieur

L : longueur du cylindre

1.2.2 Le rayonnement: [5]

Il est régi par la loi de STEFAN-BOLTZMANN selon laquelle tout corps émet un rayonnement dont l'intensité est fonction de sa température et de sa nature.

$$q = \frac{Q}{A} = \sigma \epsilon T^4$$

σ est appelé constante de Stefan-Boltzman = $5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

ϵ est appelé émissivité du corps.

Un corps noir, émet et absorbe à toute température la quantité maximum de rayonnement de n'importe quelle longueur d'onde; son émissivité ϵ est donc égale à 1. Un tel corps n'existe pas dans la réalité.

On appelle puissance émissive spectrale d'un corps noir l'énergie émise par unité de temps et par unité de surface dans l'intervalle de longueur d'onde λ et $\lambda + d\lambda$.

PLANCK a établi la loi qui porte son nom :

$$E_{n\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)}$$

E_{λ} : puissance émissive spectrale (W / m^3)

$$C_1 = 3,7418 \cdot 10^{-16} \text{ W m}^2$$

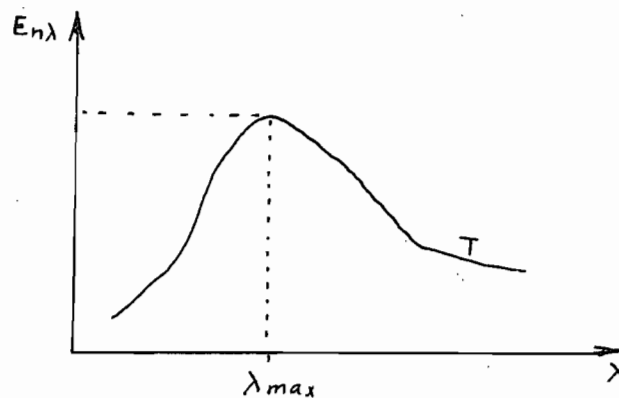
$$C_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ m.K}$$

λ : longueur d'onde en mètres

Pour une température donnée E_{λ} passe par un maximum pour une valeur λ_{max} telle que :

$$\lambda_{max} T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m.K}$$

C'est la loi de WIEN



1.2.3 La convection:

C'est la transmission de la chaleur par un fluide en mouvement. Le débit de chaleur échangé entre un fluide à la température T_{∞} et une surface à la température T_s se détermine à partir de la loi de NEWTON

$$Q = h A (T_s - T_{\infty}) \quad [5]$$

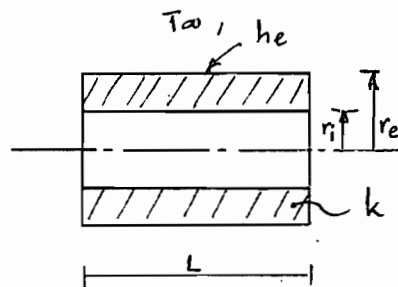
h est le coefficient de transfert de chaleur par convection. Il est fonction de la nature et du mouvement du fluide.

On distingue 2 types de convection :

- la convection naturelle dans laquelle le mouvement du fluide est dû à la différence de densités de nappes de fluide à des températures différentes,
- la convection forcée où les mouvements sont provoqués par un agent extérieur : pompe, ventilateur ...

1.2.4: Rayon critique:

Dans certaines circonstances, l'addition d'isolant a pour effet l'augmentation des pertes de chaleur; le rayon limite à partir duquel cet effet contraire se produit s'appelle rayon critique. Soit un cylindre à isoler.



On montre que :

$$r_{e \text{ critique}} = \frac{k}{h_e} \quad [5]$$

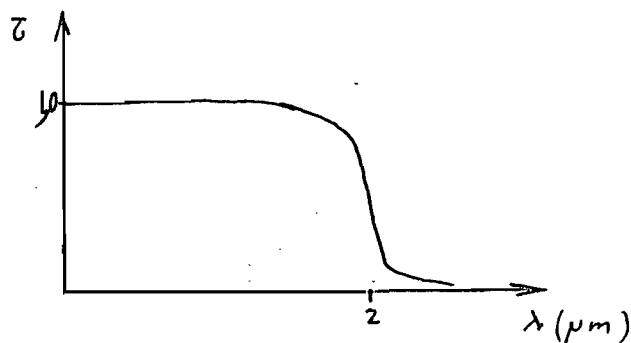
1.3 Le chauffage solaire:

Il est essentiellement basé sur les lois du transfert de chaleur (voir paragraphes précédents). Deux méthodes sont utilisées: le chauffage direct et le chauffage par concentration.

1.3.1 Le chauffage direct:

Il s'agit d'emprisonner le rayonnement dans une enceinte close dont la partie supérieure est en verre, et les parois sont isolées à l'aide d'un matériau à faible conductivité thermique (laine de verre, polystyrène extrudé, ...).

Le verre est transparent au rayonnement de longueur d'onde inférieure à $2 \mu\text{m}$ et opaque au reste. On définit le coefficient de transparence τ comme étant le rapport du rayonnement traversant la surface sur celui incident. On obtient pour le verre la courbe suivante.



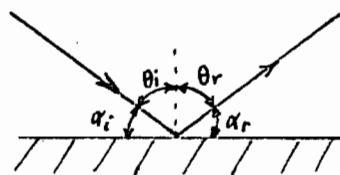
Cette propriété du verre est appelée effet de serre.

Le corps à chauffer étant introduit dans l'enceinte, il

s'en suit un échange de chaleur de l'ambiance interne au corps, conformément au premier principe de la thermodynamique.

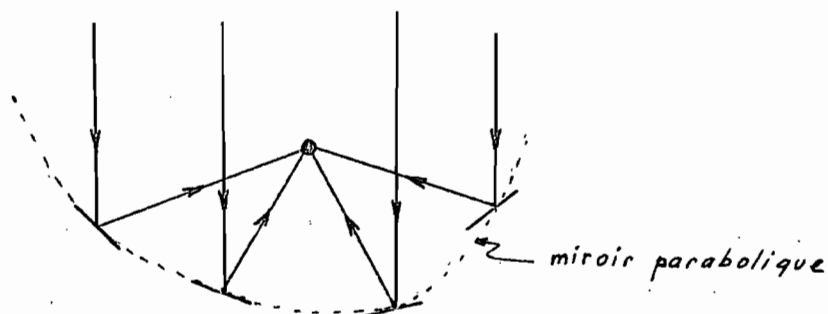
1.3.2 Le chauffage par concentration:

La concentration permet d'avoir des effets plus intenses. Elle consiste à restreindre dans un espace plus réduit, les effets ressentis à grande échelle. Elle est le résultat de l'application pratique des lois optiques de Descartes. [6]
Une onde incidente sur une surface plane, est réfléchiée suivant un angle égal à l'angle d'incidence.



angle d'incidence θ_i = angle de réflexion θ_r

Une généralisation pratique nous amène à utiliser plusieurs miroirs ou à la limite un miroir ayant une forme adéquate pour concentrer tout le rayonnement en un point.



1.4 L'électricité solaire : les photopiles

Les photopiles (ou piles solaires), sont des éléments qui convertissent directement le rayonnement solaire incident en courant électrique, sans aucune transformation intermédiaire. Leur principe repose sur la photoconductivité; mais rappelons d'abord que l'on regroupe dans ce mot l'ensemble des phénomènes se traduisant par le passage de courant électrique dans les matériaux soumis à un rayonnement. L'étude systématique de cette question relève purement de la mécanique quantique et de la physique des semi-conducteurs et ne peut donc être l'objet de ce paragraphe (cf [7],[8],[9],[10]).

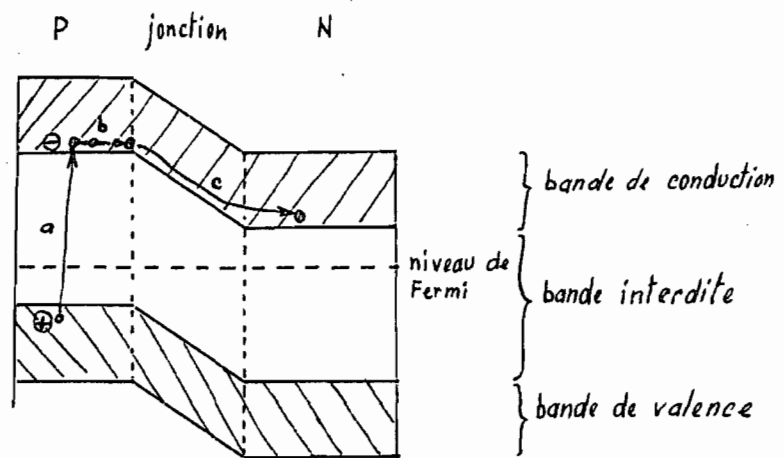
Néanmoins, il reste possible d'expliquer, de manière générale, la théorie des photopiles. Les phénomènes de photoconductivité sont au nombre de 3, parmi lesquels l'effet photovoltaïque qui régit le fonctionnement des piles solaires.

1.4.1 L'effet photovoltaïque: [2]

Il se produit lorsque l'on éclaire une jonction de conducteur ou semi-conducteurs sans qu'il soit nécessaire d'appliquer une différence de potentiel extérieure: les photons qui composent la lumière se convertissent directement en courant électrique sans la nécessité d'une transformation intermédiaire en chaleur.

Soit une jonction PN :

[7]



Dans l'obscurité, et à l'état d'équilibre, les niveaux de Fermi sont alignés et les bandes de valence et de conduction se raccordent. Par contre, l'irradiation de la jonction provoque trois phénomènes.

a. Création de porteurs: Dès que l'énergie lumineuse incidente dépasse la largeur de la bande interdite E_i , il y a excitation par chaque photon d'un électron de la bande de valence à celle de conduction.

b. Deux porteurs apparaissent: Un électron dans la région p et un trou dans la région n.

c. Diffusion: Les porteurs qui, sous l'action des forces de diffusion parviennent au voisinage de la jonction sont attirés par le champ magnétique qui y règne et la traversent: c'est le mécanisme de génération du courant électrique. Si l'on raccorde les extrémités N et P à un

circuit extérieur, il y a en effet passage de courant électrique : il s'est donc établie entre les extrémités P et N, une différence de potentiel qui dépend du nombre de photons incidents, c'est-à-dire de l'éclairement.

1.4.2 Technologie des photopiles: [2]

Elles sont surtout fabriquées avec des semi-conducteurs; les matériaux les plus usuels étant le silicium, l'Arséniure de Gallium GaAs, le sulfure de Cadmium CdS, et le sélénure de Cadmium CdSe. Ces choix trouvent leur justification dans le rendement de la transformation. En effet, la puissance disponible ne peut excéder NE_i (N = nombre de photons incidents, E_i largeur de la bande interdite exprimée en électrons-volts) puisque la différence de potentiel reste inférieure ou égale à E_i/e (avec e = charge de l'électron), et le courant généré par un flux de N photons par seconde ne peut excéder Ne ; en outre tous les photons ne sont pas absorbés. On a donc intérêt à grouper plusieurs jonctions en série et à utiliser des semi-conducteurs dont la largeur de la bande interdite est voisine de 2 eV puisque l'énergie portée par la lumière solaire présente un maximum vers cette valeur.

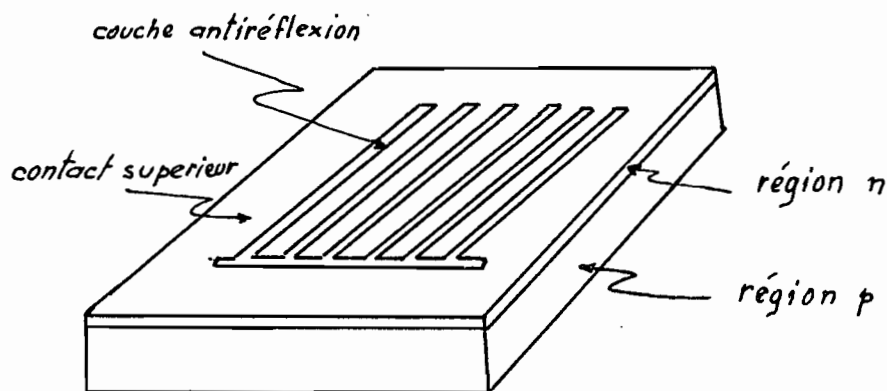
Le matériau de départ est donc un semi-conducteur de type p; et les étapes suivantes sont observées :

a. par un dopage adéquat, on obtient une population de

centres accepteurs dans la bande de valence (densité un millier de fois supérieure à celle du matériau pur)

b. Par diffusion d'autres atomes sur la surface, on obtient une couche superficielle où les électrons sont majoritaires

c. La pose des contacts vient compléter: une pellicule métallique sur la surface p et un contact en forme de peigne sur la surface n. La face n est ensuite munie d'une couche antiréflexion.



Les facteurs qui limitent la puissance disponible sont : l'étendue du spectre de la lumière incidente, l'absorption seulement partielle des photons incidents, et la recombinaison locale des électrons et des trous produits, avec perte d'énergie sous forme de chaleur et de lumière.

CHAPITRE 2:

Matériel expérimental:

Ce chapitre, qui se veut pratique, traite de la construction ou choix des divers éléments du laboratoire.

Il se subdivise en six parties principales:

1. capteur plan
2. concentrateur cylindro-parabolique
3. réservoir
4. module de photopiles
5. simulateur du soleil
6. appareils de mesures et contrôles

Chaque étude est suivie d'un certain nombre de dessins qui d'écrivent dans les détails les divers constituants et les différentes phases du montage. Dès lors il deviendrait superflu d'ajouter des instructions d'assemblage.

2.1. Capteur plan:

Un des capteurs parmi les plus utilisés, le capteur plan possède un avantage très significatif sur les autres: sa simplicité de construction. Au stade actuel de l'utilisation de l'énergie solaire, il sert généralement au chauffage de l'eau domestique, au séchage et à la distillation de l'eau.

2.1.1. Construction:

Le choix et le dimensionnement des divers constituants sont essentiellement dictés par les lois du transfert de chaleur. Le capteur proposé est un modèle réduit, avec une surface de captation de 320 mm x 500 mm. L'isolant utilisé est de la laine de verre, ayant donc comme conductivité thermique $k = 0,058 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. [4]

En supposant une perte de chaleur par conduction de 100 W/m^2 pour une différence de températures entre l'extérieur et l'intérieur de 50°C , on obtient une épaisseur d'isolant de $k \frac{\Delta T}{q}$. (P8)

$$e = 0,058 \frac{50}{100} = 0,029 \text{ m} = 29 \text{ mm}$$

La valeur de $0,025 \text{ m} = 25 \text{ mm}$ a été retenue pour les parois et celle de 30 mm pour le fond, le reste étant complété par le bois de la caisse. Deux vitrages ont été prévus, tous les 2 démontables.

2.1.2 CAPTEUR PLAN: Liste des éléments constitutifs

Planches de bois de 8 mm d'épaisseur

1	de	566 x 386	soit	2 184 76	mm ²
2	"	566 x 102	"	1 15 464	mm ²
2	"	402 x 102	"	82 008	mm ²
2	"	336 x 55	"	36 960	mm ²
2	"	500 x 55	"	55 000	mm ²
2	"	500 x 33	"	33 000	mm ²
2	"	386 x 33	"	25 476	mm ²
1	"	600 x 200	"	120 000	mm ²
2	"	225 x 200	"	90 000	mm ²
				<hr/>	
				776 384	mm ² → 1 m²

Tôle de 3 mm d'épaisseur

2	"	508 x 328	"	333 248	
2	"	500 x 10	"	10 000	
2	"	340 x 10	"	6800	
15	"	24 x 8	"	2880	
2	"	48 x 16	"	1536	
				<hr/>	
				354 464	mm ² → 0,4 m²

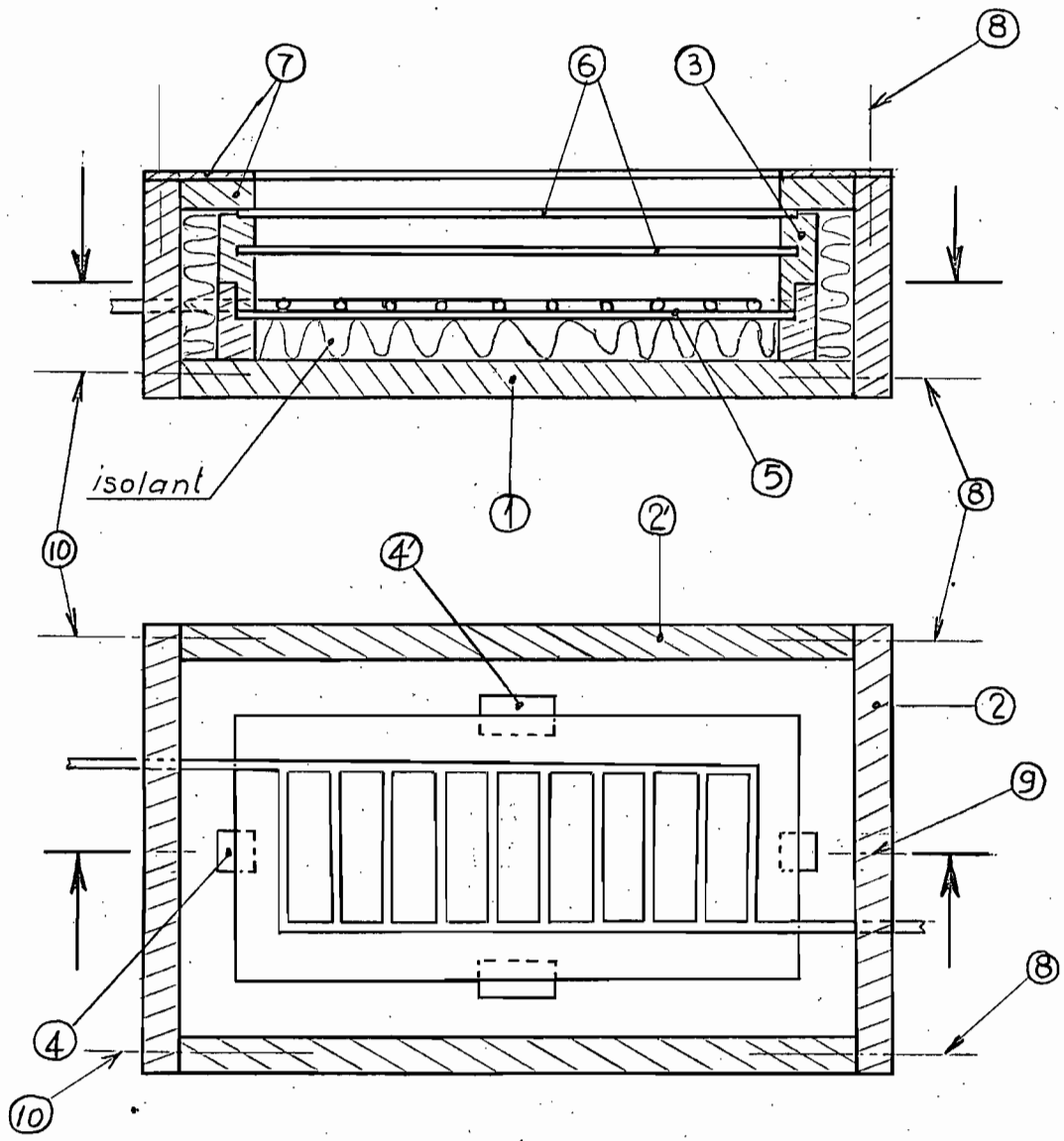
Verre ordinaire: 2 de 508 x 328 x 3 → 0,4 m²

1 Tube de cuivre: $\phi 10$, L = 8 m

Boulons: H, M4-16 NFE-27-311 nbre 17 → 20

Vis à bois: $\frac{F}{90}$ 2-16 NFE 27-142 nbre 38 → 40

clous de tapissier, Peinture noire, blanche, colle pour bois



<u>N^{os}</u>	<u>FIG.</u>
1	02
2/2'	02
3/3'	03
4/4'	04
5	05

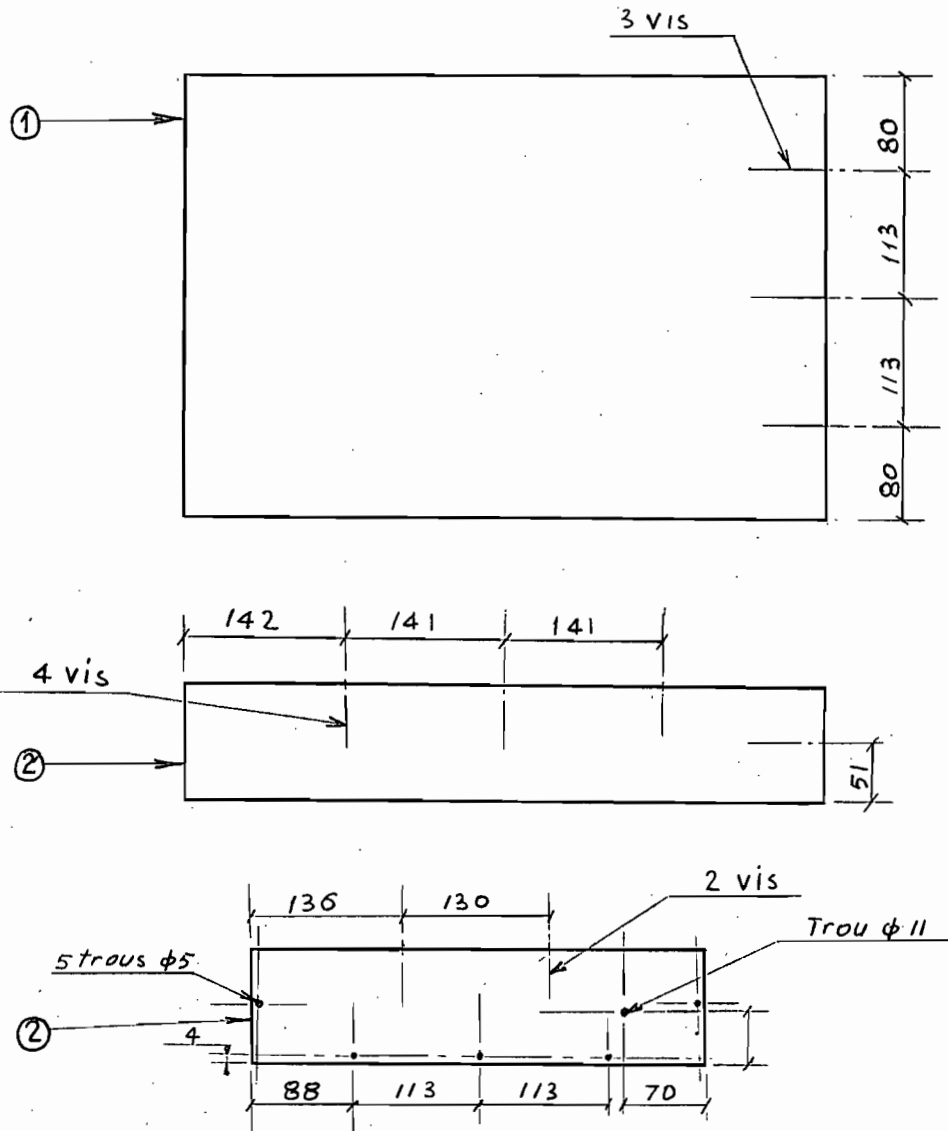
<u>N^{os}</u>	<u>FIG.</u>
6	05
7	07
8	06
9	08
10 → Fixation par clous	

FIGURE : 01

schéma pas à l'échelle

CAPTEUR PLAN

Dessin d'ensemble



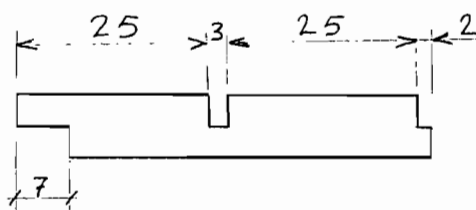
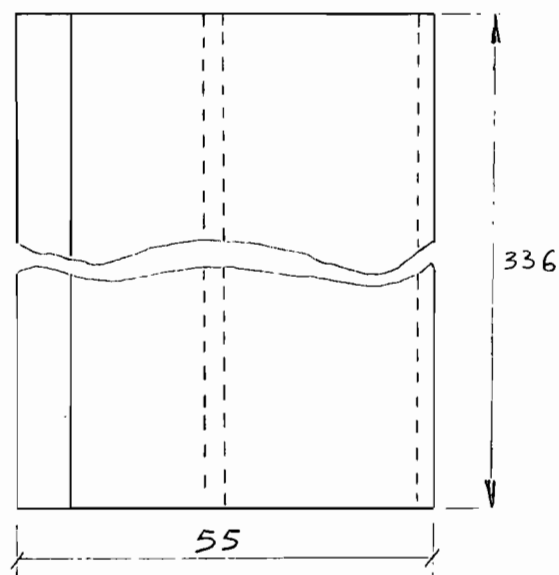
N ^{os}	Désignation	Dimensions	Matériaux	Nb
1	Fonds	566 x 386 x 8	Bois	1
2	Parois extérieure	402 x 102 x 8	Bois	2
2'	Parois extérieure	566 x 102 x 8	Bois	2

FIGURE : 02

Echelle : 1:7

CAPTEUR PLAN

Fonds et
parois extérieures



N°	Désignation	Dimensions	Matériaux	Nb
3	Parois internes	336 x 55 x 8	Bois	2
3'	Parois internes	500 x 55 x 8	Bois	2

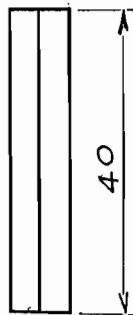
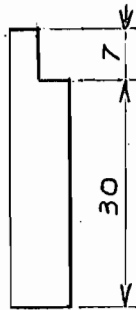
FIGURE: 03

Echelle: 1

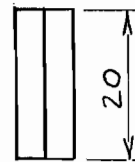
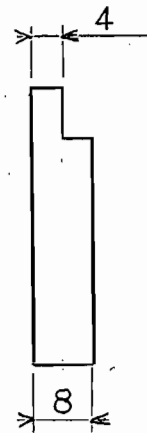
CAPTEUR PLAN

Parois
internes du capteur

N° 4'



N° 4



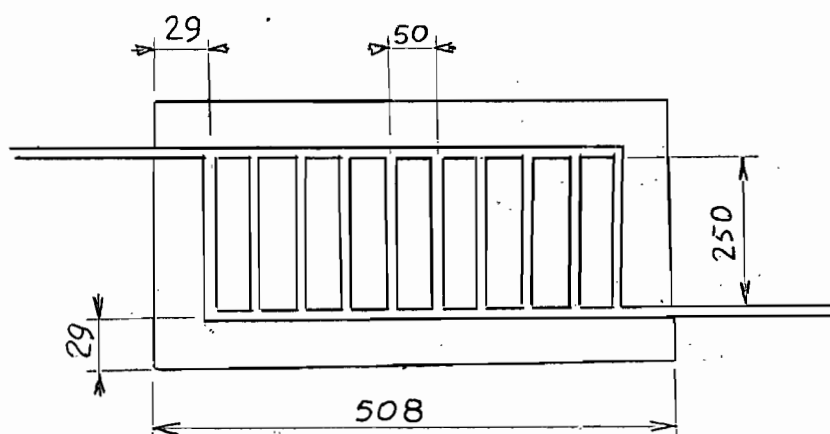
N°s	Désignations	Matériaux	NB
4	supports absorbeur	Bois	2
4'	supports absorbeur	Bois	2

FIGURE: 04

Echelle: 1

CAPTEUR PLAN

supports de l'absorbeur



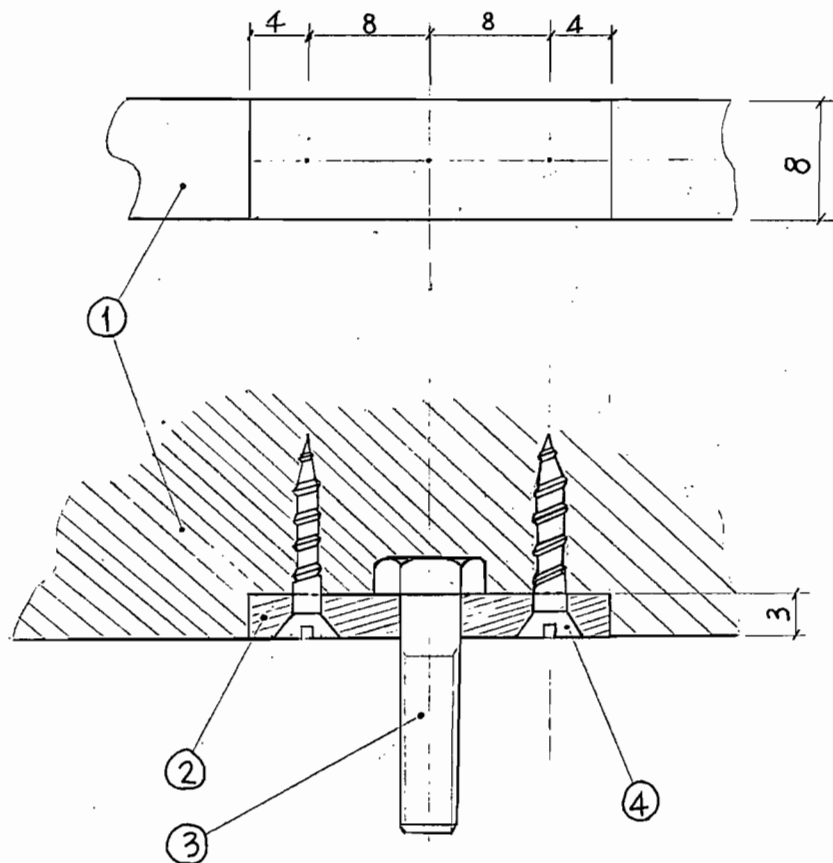
N ^{os}	DESIGNATIONS	DIMENSIONS	MATERIAUX	NB
5	Absorbeur (Plaque)	508x328x3	Acier étamé	2
5	Absorbeur (collecteur)	$\phi 10, L=5m$	Cuivre	2
6	Vitrages	508x328x3	Verre ordinaire	2

FIGURE: 05

Schéma pas à l'échelle

CAPTEUR PLAN

Absorbeur
(vitrage)



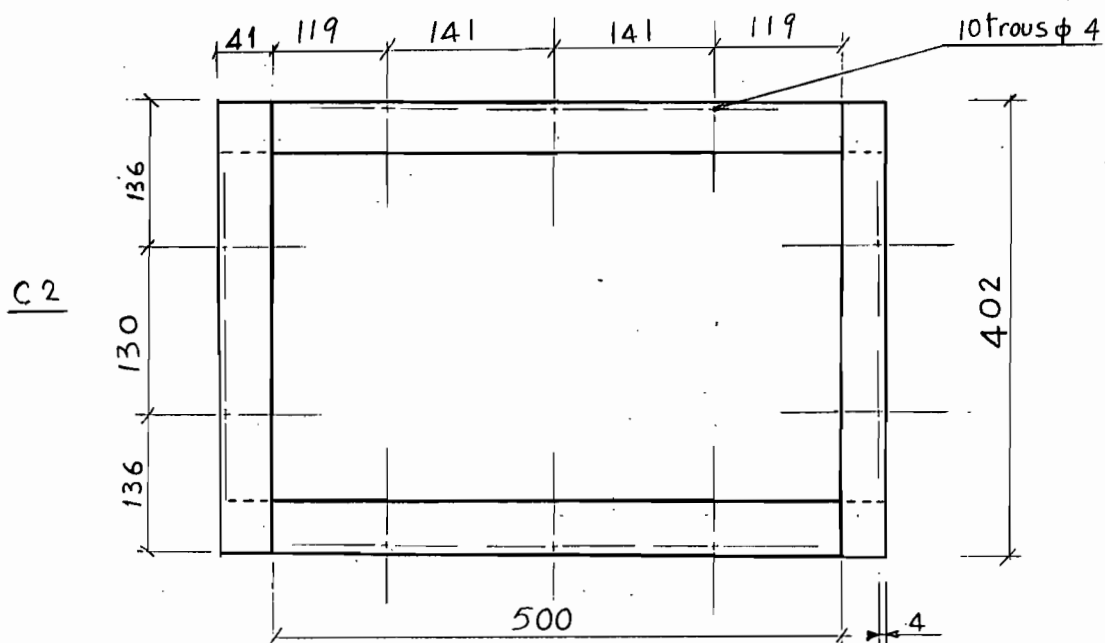
N ^{os}	Désignations	Matériaux	Nb
1	Parois extérieure	bois	-
2	Plaque de fixation	acier galvanisé	15
3	Vis H, M4-16 NFE27-311	-	15
4	Vis à bois $\frac{F}{90}$ 2-16 NFE 27-142	-	30

FIGURE : 06

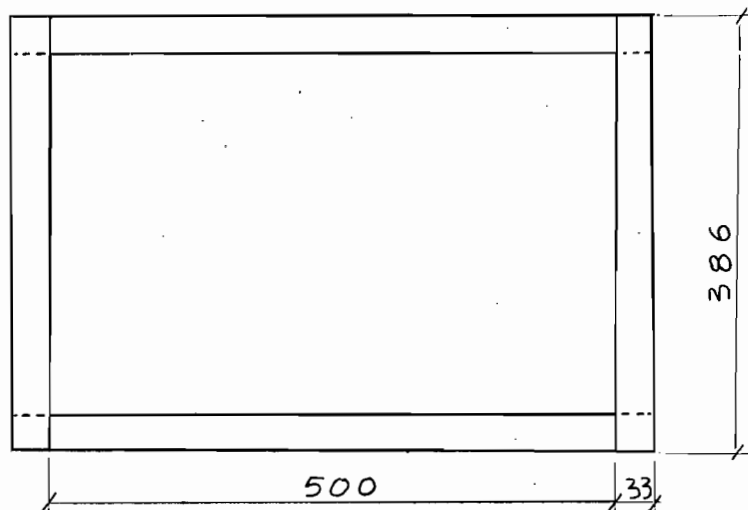
Echelle : 2

CAPTEUR PLAN

Méthode de fixation
par vis-écrou



C1



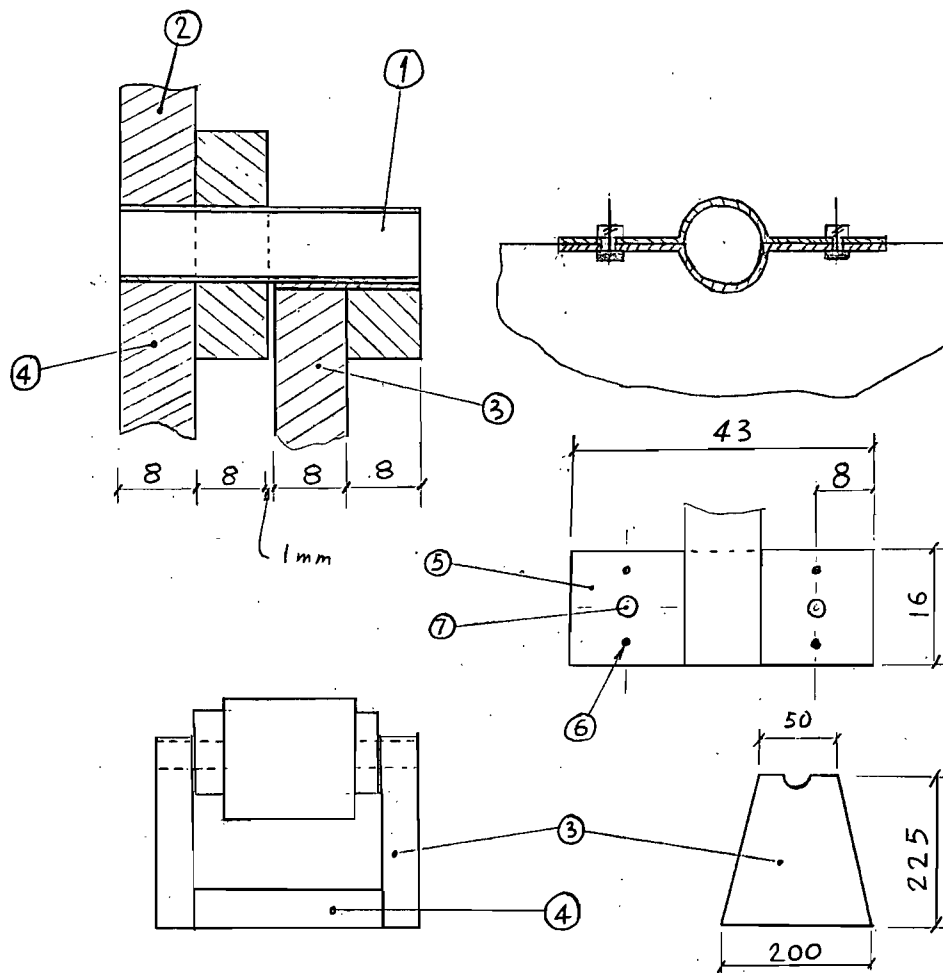
Nos	DESIGNATIONS	MATERIAUX	NB
C1	Couvercle (cadre en bois)	Bois : 8mm épaisseur	1
C2	Couvercle (cadre métallique)	Ac. galva. 3mm épaisseur	1

FIGURE : 07

Echelle: 1:7

CAPTEUR PLAN

Couvercle



N ^{os}	Désignations	Matériaux	Nb
1	Tube-axe ϕ int 10,5 mm	acier galva.	2
2	Parois extérieure	bois	2
3	Support	bois	2
4	Planche 600 x 200 x 8	bois	1
5	Plaque de fixation	acier galva.	2
6	Vis à bois $\frac{F}{90}$ 2-16 NFE 27-142	-	8
7	Vis H, MA-16, NFE 27-311	-	4

FIGURE : 08

schémas pas à l'échelle

CAPTEUR PLAN

support du capteur

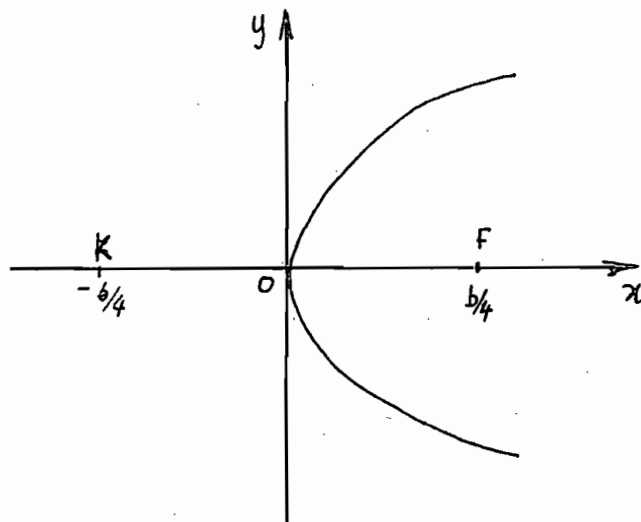
2.2. Concentrateur cylindro-parabolique:

L'énergie collectée par le capteur plan est répartie sur une surface relativement grande, causant ainsi une certaine dilution. Cet inconvénient est parfois très gênant si l'on désire travailler avec de hautes températures. Par la concentration, on accumule l'énergie captée sur une petite surface, permettant ainsi d'atteindre des températures beaucoup plus élevées. Le dispositif proposé est de la catégorie des concentrateurs linéaires.

2.2.1. Construction: [13]

Le rayonnement incident est dévié vers un collecteur linéaire à l'aide d'une surface réfléchissante cylindro-parabolique. Le collecteur est un tube de cuivre de 10 mm de diamètre et la surface réfléchissante est une feuille d'Aluminium. La construction appelle à la connaissance de quelques notions de géométrie.

On appelle parabole toute courbe d'équation $y^2 - bx = 0$. Une de ses propriétés intéressantes est celle qui consiste à concentrer le rayonnement incident suivant la direction de l'axe, à son foyer.



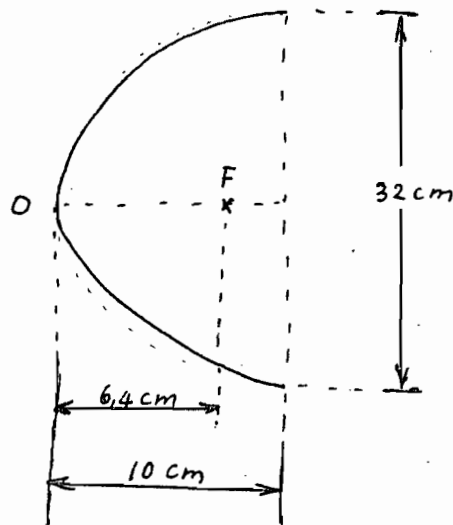
Le foyer se trouve à $b/4$ de l'origine O qui est le sommet de la parabole. si l'on pose $\overline{KF} = p$ l'équation devient $y^2 - 2px = 0$. p est appelé paramètre de la parabole.

Le capteur proposé a pour surface $32 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$.

Donc $y^2 = (32/2)^2 = (16)^2$ - soit $x = 10 \text{ cm}$ pour $y = 16 \text{ cm}$;

on a alors $16^2 - 10b = 0 \Rightarrow b = 25,6 \text{ cm/cm}$.

$\Rightarrow \overline{OF} = b/4 = 6,4 \text{ cm}$.



222 CONCENTRATEUR : Eléments constitutifs

N ^{os}	Désignations	Dimensions	Matériaux	Nb	Fig.
1	Fond	516 x 336 x 8	Bois	1	09
2	Parois	532 x 129 x 8	Bois	2	09
3	Parois	336 x 129 x 8	Bois	2	10
4	support réflecteur	336 x 118 x 8	Bois	3	10
8	couvercle	500 x 8 x 8	Bois	2	11
8	couvercle	336 x 8 x 8	Bois	2	11
	Support	210 x 200 x 8	Bois	2	08
	support	550 x 200 x 8	Bois	1	8

Total: planche de 1m² avec 8 mm épais

5	réflecteur			1	09
6	collecteur	φ10 mm, L=682	Tube de cuivre	1	09
7	vitrage	516 x 336 x 3	verre ordinaire	1	09
8	couvercle	532 x 16 x 3	acier galvanisé	2	11
8	couvercle	336 x 16 x 3	acier galvanisé	2	11
	plaque de fixation	24 x 8 x 3	acier galva.	10	06

Total: Tôle de 320 cm² - 3 mm d'épaisseur - acier galva

Vis H, M4-16 NF E 27-311	14	06-08
Vis à bois: $\frac{F}{90}$ 2 -16 NF E 27-142	28	06-08
clous de tapissier	50	

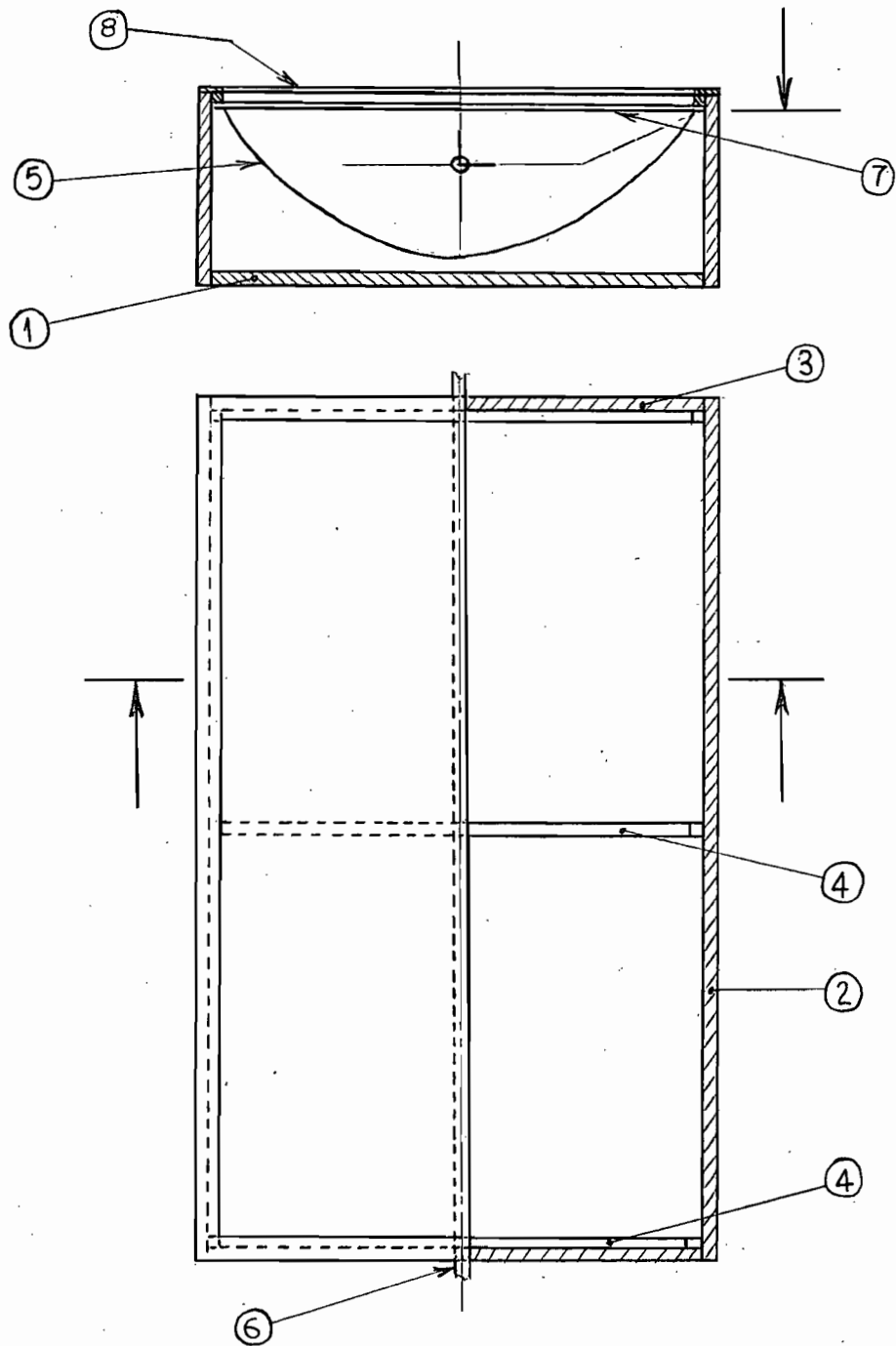
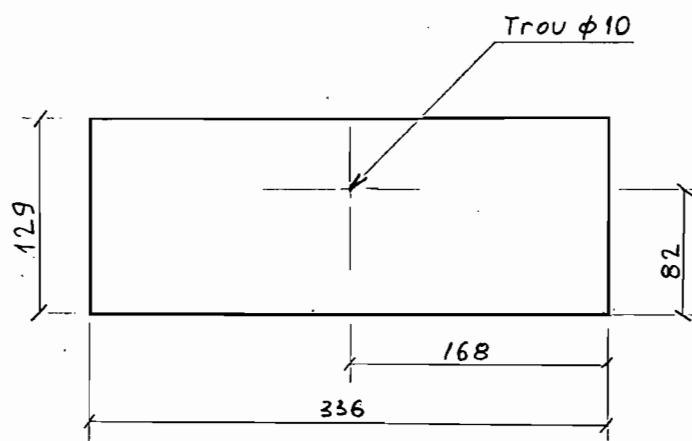
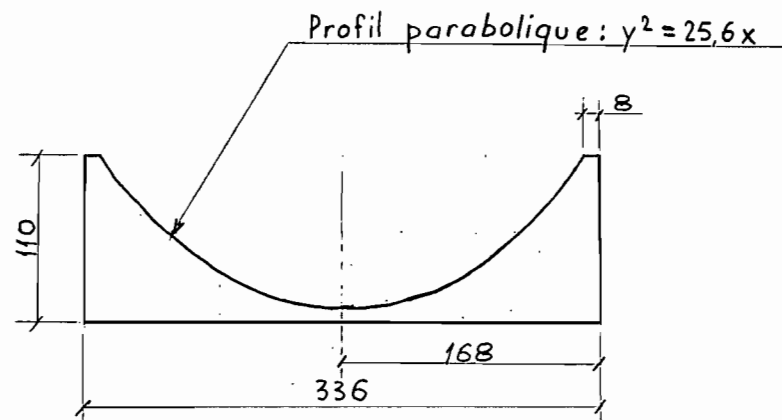


FIGURE : 09

Echelle: 1:5

CONCENTRATEUR

Dessin
d'ensemble



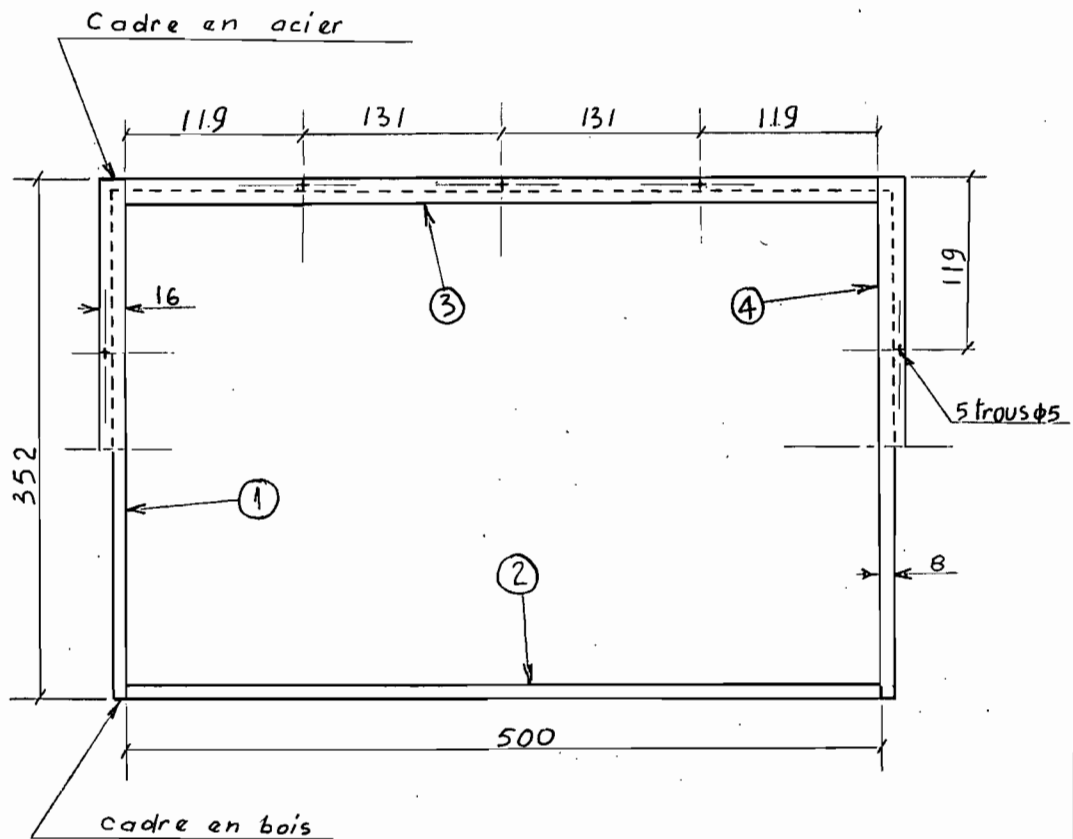
N ^o	Désignations	Matériaux	Nb
4	support du réflecteur	bois de 8mm d'épaisseur	3
3	parois	bois de 8mm d'épaisseur	2

FIGURE : 10

Echelle : 1:5

CONCENTRATEUR

Parois et
support du réflecteur



N ^{os}	Désignations	Matériaux	Nb
1	côté du cadre en bois	bois de 8mm d'épais.	2
2	côté du cadre en bois	bois de 8mm d'épaisseur	2
3	côté du cadre d'acier	Acier galvanisé: 3mm	2
4	côté du cadre d'acier	acier galvanisé: 3mm	2

FIGURE 11

Echelle 1:5

CONCENTRATEUR

couvercle

2.3 Réservoir calorifugé:

Estimation de la capacité

On suppose : un rayonnement $P = 600 \text{ W/m}^2$

une durée de chauffage $t = 30 \text{ mn} = 1800 \text{ s}$

pour un échauffement $\Delta T = 50^\circ \text{C}$

Pour une masse d'eau m , la quantité de chaleur nécessaire à une élévation de température ΔT est

$$Q = mc\Delta T \text{ (cal.)} = 4,18 mc\Delta T \text{ (J)} \text{ avec } c = 1$$

Mais $Q = Pst$ $s = \text{surface du capteur} = 0,16 \text{ m}^2$

$$\text{Donc } 4,18 m\Delta T = Pst \Rightarrow m = \frac{Pst}{4,18\Delta T}$$

$$m = \frac{600 \times 0,16 \times 1800}{4,18 \times 50} = 827 \text{ g} \rightarrow \sim 1 \text{ l}$$

1 litre \rightarrow cylindre de $\phi 100$ $L = 150 \text{ mm}$

Isolation thermique

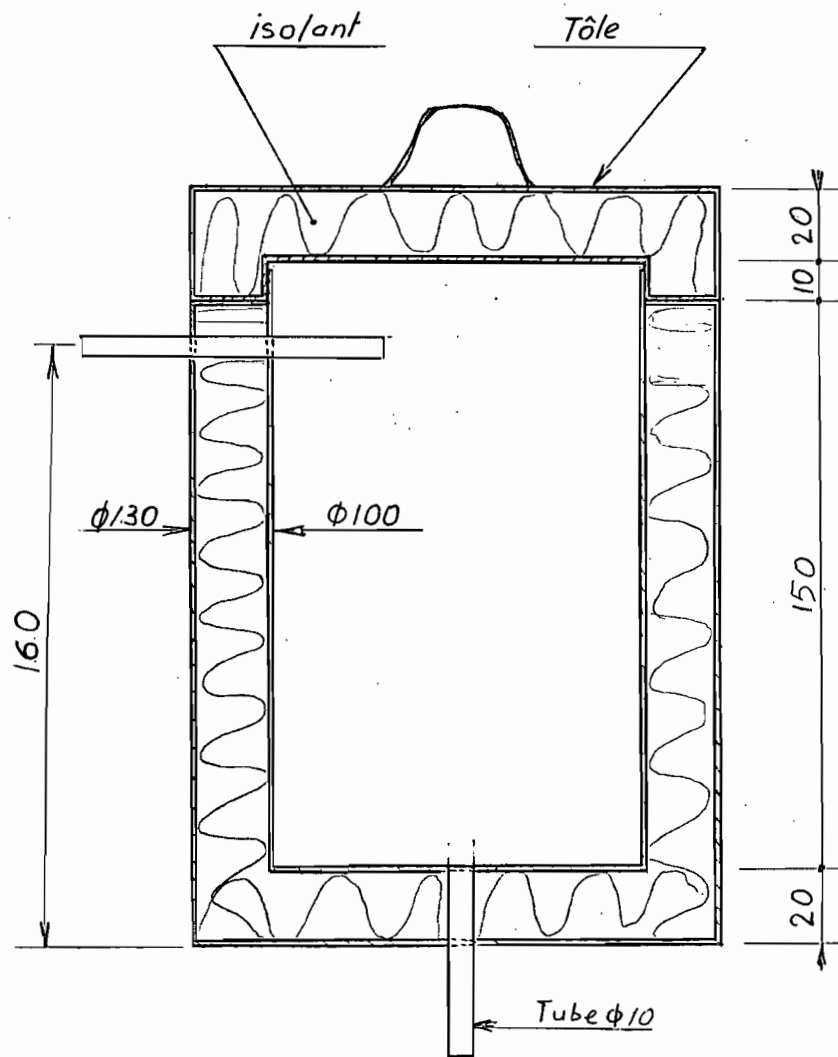
on suppose des pertes Q de 2% (12 W/m^2). L'isolant est de la laine de verre ($k = 0,058 \text{ W.m}^{-1}\text{.}^\circ\text{C}^{-1}$)

L'épaisseur d'isolant se calcule par $r_o/r_i = \exp(2\pi kL\Delta T/Q) \rightarrow (P8)$

$$r_o/r_i = \exp(2\pi \times 0,058 \times 0,150 \times 50 / 12) = 1,256$$

$$\Rightarrow r_o = 1,256 r_i \text{ avec } r_i = 100/2 = 50 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow r_o = 65 \text{ mm}$$



isolant : laine de verre , 2000 cm^3

Tôle ; acier étamé , $0,30 \text{ m}^2$

FIGURE 15

Echelle 1:2

RESERVOIR

Dessin d'ensemble

2.4. MODULE DE PHOTOPILES

CHOIX : .1 module FPGC 36

.avec cadre autoportant

SPECIFICATIONS:

.Dimensions : 642 x 642 x 42,5 mm

. Poids : 7,5 kg

Pour un rayonnement AM 1,5 de 1 kW/m^2

et une température des cellules de 25°C

. Puissance crête : 36 W

. Tension à la puissance crête : 17,2 V

. Tension de circuit ouvert : 21,5 V

. courant de court-circuit : 2,26 A

FOURNISSEUR:

France Photon

Usine des Agriers, 16015

ANGOULÊME CEDEX

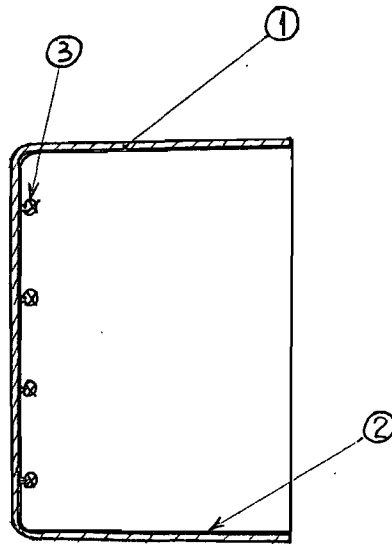
Télex 790 244 F

2.5 Simulateur du soleil :

Dans la latitude 15° du Sénégal, ce n'est pas l'ensoleillement qui fait défaut. Il pourrait donc sembler illogique de simuler le soleil : pourquoi ne pas faire des mesures réelles ? La réponse à cette question se trouve dans le désir d'avoir un laboratoire toujours fonctionnel. En effet, l'on ne peut accepter de toujours se soumettre aux caprices de la nature.

Le dispositif est composé de 20 ampoules de 150 W, soit au total 3000 W, et un flux lumineux de 39200 lm [11], donc 39200 lux sur une surface d'un m^2 , alors que la limite de l'éclairement solaire est d'environ 80000 lux, [12] et que la constante solaire est de 1350 W/m^2 .

Un variateur électronique permet d'ajuster le courant électrique donc le flux, à la valeur requise.



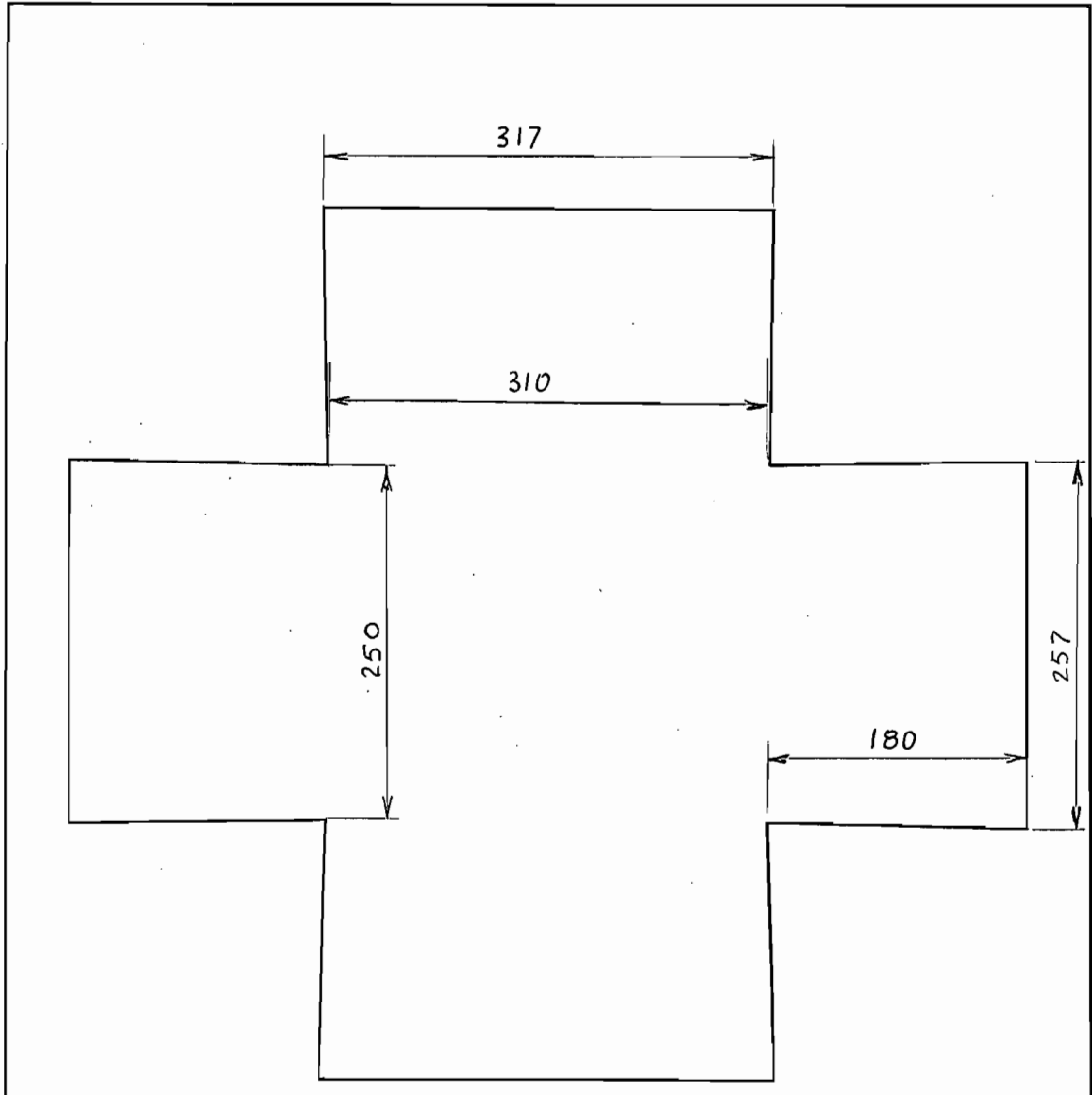
N ^{os}	Désignations	Matériaux	Nb
1	Tôle	acier galva	1
2	réflecteur	papier aluminium	1
3	ampoules de 150 W		20

FIGURE 12

Echelle 1:5

SIMULATEUR
DU SOLEIL

Dessin d'ensemble



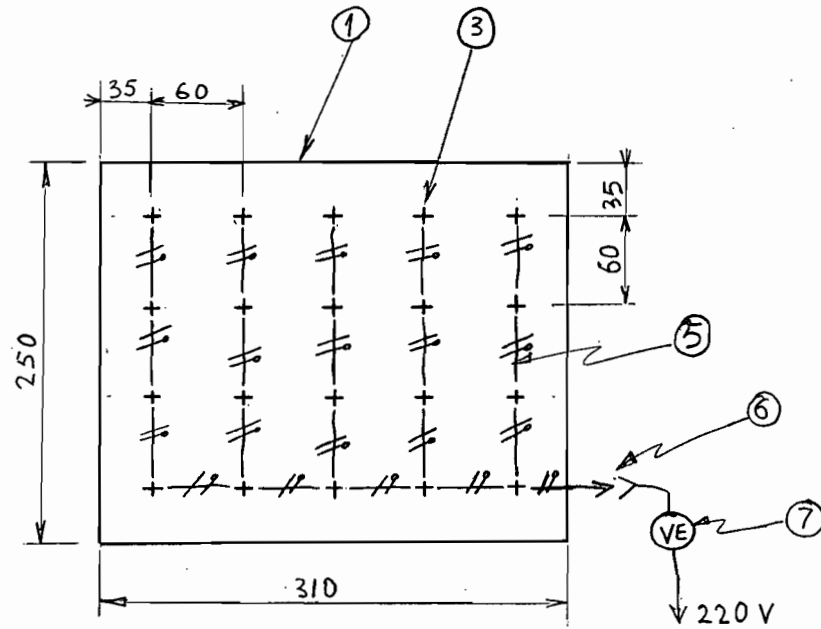
N ^{os}	Désignations	Matériaux	Nb
1	Ensemble - cadre	Acier galvanisé	1
2	Réflecteur	Papier Aluminium	1

FIGURE 13

Echelle 1:5

SIMULATEUR

Schéma développé
de l'ensemble - cadre



Nos	Désignations	Spécifications	Nb
3	Ampoules	220 V, 150 W	20
4	Douilles		20
5	câbles bipolaires	15 A	(15m)
6	Prise - fiche	220 V - 3000 VA	1
7	Variateur électronique	220 V, 15 A	1

FIGURE 14

Echelle 1:5

SIMULATEUR

câblage

2.6 Appareils de mesures et contrôles :

Ces appareils sont standards et ne peuvent donc faire l'objet d'une conception spéciale. Ils proviennent pour la plupart des fournisseurs de la place.

2.6.1 Solarimètre :

Il permet de mesurer la puissance du rayonnement incident sur les capteurs. Un type ordinaire pourrait convenir.

2.6.2 Luxmètre :

Il permet de mesurer la valeur de l'éclairement au niveau des photopiles. Un modèle ordinaire serait suffisant.

2.6.3 Thermocouple :

Détermine la température dans le réservoir. Un seul suffit par capteur.

2.6.4 Chronomètre :

Détermine la durée du chauffage. Un seul suffit par capteur.

2.6.5 Débitmètre :

Mesure le débit de l'eau dans la tuyauterie. Doit être sensible à des débits faibles (0,5 litre par minute).

ϕ des orifices = environ 10 mm .

2.6.6 Galvanomètre :

Mesure le courant induit du thermocouple et permet ainsi, après étalonnage de déterminer la température.

2.6.7 Multimètre :

Permet la mesure de la tension des photopiles en fonction de l'éclairement, et le courant débité.

2.6.8 Wattmètre :

Permet de déterminer la puissance maximale fournie par les cellules photovoltaïques. Un type ordinaire suffit.

2.6.9 Variateur électronique :

Permet de régler l'intensité du courant à travers les lampes du simulateur, et d'ajuster ainsi le rayonnement à la valeur voulue. Il doit pouvoir faire varier le courant de 0 à 14 A sous une tension de 220 V.

2.6.10 Boîte de résistances : (potentiomètre 0 - 10 Ω)

Elle permet de charger les photopiles à des degrés différents et de déterminer la charge optimale.

2.6.11 Pompe de circulation :

Permet la circulation de l'eau dans la tuyauterie. Une par capteur, de faible puissance. ϕ orifices \approx 10 mm.

2.6.12 Robinets:

Permettent de contrôler le débit d'écoulement au niveau de la tuyauterie. Deux suffisent.

2.6.13 Liste récapitulative:

N ^{os}	Désignations	Nb
1	solarimètre	1
2	luxmètre	1
3	thermocouple	1
4	chronomètre	1
5	débitmètre	1
6	galvanomètre	1
7	multimètres	2
8	wattmètre	1
9	variateur électronique	1
10	boîte de résistances	1
11	pompe de circulation	1
12	robinets	2
10'	potentiomètre : 0-10 Ω	1

CHAPITRE 3:

Manipulations:

3.1. Effet de serre:

3.1.1 But: Mettre en évidence l'effet de serre

3.1.2 Rappels théoriques:

L'effet de serre est la propriété du verre à laisser passer le rayonnement de longueur d'onde inférieure à $2 \mu\text{m}$, et à bloquer le reste du spectre. Il s'en suit que le rayonnement solaire étant dans la gamme des longueurs allant de $0,1$ à $2,5 \mu\text{m}$, le verre constitue pour lui un piège parfait. En effet, l'absorbeur, en s'échauffant, émet un rayonnement de longueur d'onde bien supérieure à $2,5 \mu\text{m}$, conformément à la loi de Wien (P.10)

$$\lambda_{\text{max}} T = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

si l'on suppose que l'absorbeur atteint la température de 150°C soit 423°K (ce qui est un cas limite), la longueur

$$\text{d'onde } \lambda_{\text{max}} = \frac{2,898 \times 10^{-3}}{423} = 6,8 \times 10^{-6} \text{ m} = 6,8 \mu\text{m}.$$

La majeure partie du rayonnement sera donc émise

au voisinage de $6,8 \mu\text{m}$ et sera donc bloqué dans l'enceinte. Il reste cependant que le verre s'échauffe au contact de l'air chaud et commence à rayonner à son tour, causant ainsi des pertes de chaleur par sa partie supérieure. C'est pourquoi on place d'habitude un second verre au-dessus du premier. Mais le même phénomène va se produire au niveau de ce deuxième verre. En multipliant le nombre de vitrages, on réduit les pertes davantage. Klein a donné une relation qui donne le nombre de vitrages qu'il faut pour réduire les pertes à une certaine valeur. [5]

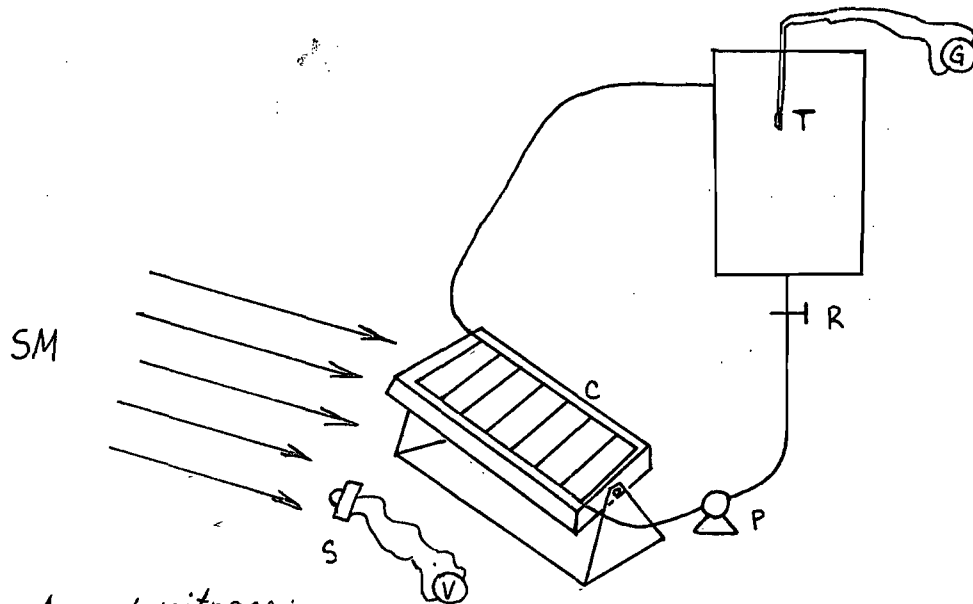
Dans la pratique, les gains ne justifient plus l'investissement si l'on multiplie trop le nombre de vitrages; on se limite donc généralement à un ou deux vitrages.

3.1.3 Liste du matériel:

- 1 capteur plan
- 1 réservoir calorifugé
- 1 pompe de circulation
- 1 robinet
- 1 thermocouple
- 1 galvanomètre
- 1 chronomètre
- 1 solarimètre (+ 1 voltmètre.)

3.1.4 Procédure :

Faire le montage ci-dessous :



• Avec 1 vitrage :

Remplir le réservoir d'eau.

Ouvrir le robinet et mettre

la pompe en marche

Allumer les lampes du simulateur et régler le flux

à environ 1000 W/m^2 à

l'aide du variateur électronique.

(Lire le voltage du solarimètre

pour ce réglage)

Prendre le courant à travers le galvanomètre afin de déterminer la température initiale, et démarrer le chronomètre. Lire ensuite la température toutes les cinq minutes. Cinquantes minutes devraient suffire pour que

P = pompe

R = robinet

G = galvanomètre

C = capteur plan

V = Voltmètre

S = solarimètre

SM = simulateur du soleil

T = thermocouple

l'eau soit assez réchauffée.

Eteindre alors le simulateur, fermer le robinet et arrêter la pompe. Vider l'eau du réservoir en prenant soin de mesurer son volume.

• Avec 2 vitrages :

Remplir à nouveau le réservoir d'eau froide. Attendre 10 minutes pour que l'équilibre thermique soit réalisé. Refaire alors les mêmes étapes que précédemment.

3.1.5 Analyse des résultats:

A partir des mesures effectuées, tracer la courbe de variation de la température de l'eau en fonction du temps, pour chaque cas.

Calculer le rendement de la transformation pour chaque cas selon la formule:

$$\eta = \frac{4,18 \text{ m } \Delta T}{P \cdot \Delta t}$$

où m = masse de l'eau réchauffée (kg)

ΔT = élévation de température de l'eau entre le début et la fin de l'expérience ($^{\circ}\text{C}$)

Δt = durée de l'expérience (sec.)

P = puissance du rayonnement au niveau du capteur (W)

Calculer le gain relatif en % et commenter.

$$G \% = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_1}$$

η_1 = rendement avec 1 vitrage

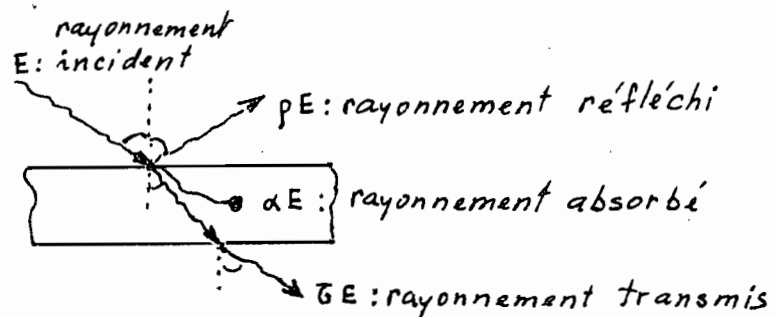
η_2 = rendement avec 2 vitrages.

3.2 Absorption de chaleur: corps noir / corps blanc

3.2.1 But: Justifier le choix du noir comme couleur des absorbeurs des capteurs

3.2.2 Rappels théoriques:

L'incidence d'un rayonnement sur une surface s'accompagne de 3 phénomènes: absorption, réflexion, transmission.



On appelle:

- rayonnement absorbé, celui qui traverse la surface mais reste dans le milieu;
- rayonnement réfléchi, celui qui, au contact de la surface, est retourné dans le milieu d'origine;
- rayonnement transmis, celui qui traverse le milieu considéré pour se retrouver dans un autre milieu.

Le corps noir est par définition, un corps ayant un coefficient d'absorption égal à 1. Un tel corps n'existant pas en pratique, on convient que tout corps ayant un coefficient d'absorption voisin de 1 ($\sim 0,96$), peut être considéré comme étant noir. Le corps blanc,

quant à lui, a un coefficient d'absorption voisin de 0 (0,12 - 0,16) pour le rayonnement solaire.

Tout corps s'échauffe en absorbant de l'énergie thermique. Un corps noir devrait donc s'échauffer davantage qu'un corps blanc. Les applications de ce phénomène sont nombreuses; citons entre autres, les absorbeurs des capteurs, les murs des maisons en pays chaud qui sont de préférence peints en blanc, ... etc.

3.2.3 Liste du matériel:

- 1 capteur plan avec absorbeurs blanc et noir
- 1 réservoir calorifugé
- 1 pompe de circulation
- 1 robinet
- 1 thermocouple
- 1 galvanomètre
- 1 chronomètre
- 1 solarimètre
- 1 voltmètre

3.2.4 Procédure :

Réaliser le montage de la figure précédente (P48)
 Faire les mêmes mesures mais cette fois-ci

- 1) avec un absorbeur blanc
- 2) avec un absorbeur noir

3.2.5 Analyse des résultats :

Pour chaque cas :

- . tracer la courbe de variation de la température de l'eau du réservoir en fonction du temps.
- . calculer le rendement selon la formule vue précédemment (P49)

Calculer le gain en % et commenter.

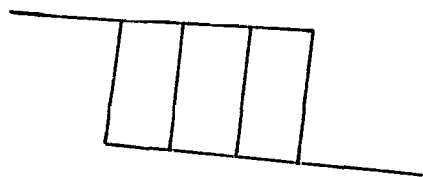
3.3 Le thermosiphon :

3.3.1 But : Mettre en évidence l'effet thermosiphon

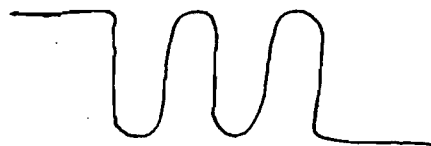
3.3.2 Rappels théoriques :

L'idée du thermosiphon est due à Bonnemain (1775). Elle repose sur le principe que deux liquides de densités différentes, en l'absence de toutes réactions chimiques, sont immiscibles. Mis dans un même contenant, ils se séparent, le liquide le plus léger occupant la partie supérieure. La densité de l'eau diminue avec la température. L'eau chaude et l'eau

froides se comportent donc comme 2 liquides de densités différentes. Ce phénomène peut être appliqué à un capteur solaire pour provoquer la circulation de l'eau. L'eau étant chauffée au niveau du capteur, sa densité diminue et devient inférieure à celle de l'eau au fond du réservoir. Il en résulte une circulation dite naturelle parce que sans l'intervention d'une pompe: c'est l'effet thermosiphon. Cependant, le thermosiphon n'est possible que si l'installation favorise l'écoulement. En effet une tuyauterie présentant des points hauts et des points bas provoque un blocage automatique du thermosiphon.



serpentin favorisant l'écoulement



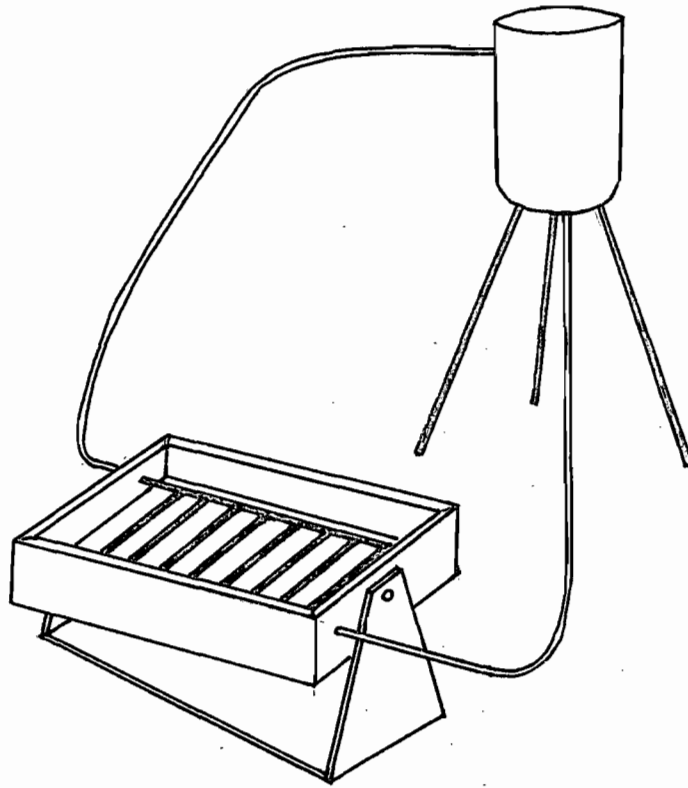
serpentin ne favorisant pas l'écoulement

3.3.3 Liste du matériel :

- 1 capteur plan
- 1 réservoir calorifugé
- 1 thermocouple
- 1 galvanomètre
- 1 chronomètre
- 1 solarimètre (+ 1 multimètre)

3.3.4 Procédure :

Faire le montage suivant :



Remplir le réservoir d'eau .

Allumer les lampes du simulateur et régler le flux thermique à environ 1000 W/m^2 .

Prendre la température initiale et démarrer le chrono .
Lire ensuite la température toutes les cinq minutes .

3.3.5 Analyse des résultats :

Tracer la courbe de la température en fonction du temps . Calculer le rendement et commenter .

3.4 La circulation forcée :

3.4.1 But : Montrer l'impact du débit d'écoulement sur le rendement du capteur

3.4.2 Rappels théoriques :

La circulation naturelle exige un certain nombre de restrictions, notamment la configuration du serpentin, et la situation du réservoir (au-dessus du capteur). Il n'est pas toujours aisé de respecter ces exigences, aussi, dans certaines installations, utilise-t-on une pompe de circulation. Ainsi, est-il possible de faire varier le débit d'écoulement. Mais quelle est l'influence du débit sur le rendement ? Il est important de pouvoir répondre à cette question car dans une transformation, on cherche toujours à obtenir le meilleur rendement. La réponse se trouve dans la formule suivante :

$$\eta = \eta_0 \left(\frac{1}{1 + k/2D\rho c_p} \right) \quad [14]$$

ou η = rendement au débit D

η_0 = rendement au débit infini

ρ = masse volumique de l'eau à la température moyenne $T_m = \frac{T_{\text{eau chaude}} + T_{\text{eau froide}}}{2}$

c_p = chaleur spécifique de l'eau à pression constante à T_m

k = conductance globale des pertes du capteur.

3.4.3 Liste du matériel:

- 1 capteur plan
- 1 réservoir calorifugé
- 1 pompe de circulation
- 1 robinet
- 1 débitmètre
- 1 thermocouple
- 1 galvanomètre
- 1 solarimètre
- 1 voltmètre
- 1 chronomètre

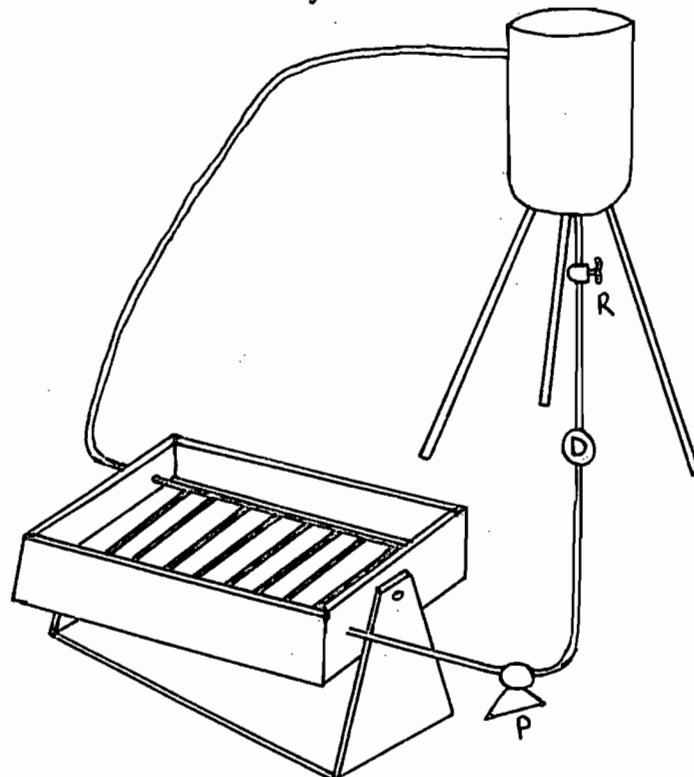
3.4.4 Procédure :

Réaliser le montage de la figure ci-dessous -

D = débitmètre

P = pompe

R = robinet



Remplir le réservoir d'eau et ouvrir le robinet.

Mettre la pompe en marche.

Ajuster le flux thermique à la valeur de 1000 W/m^2 .

Prendre la température de l'eau du réservoir et démarrer le chronomètre.

Au bout de 20 minutes, prendre la température et le débit. Arrêter le système et vider l'eau en prenant soin de mesurer son volume.

Reprendre ensuite la même procédure avec d'autres débits, en réglant le robinet.

3.4.5. Analyse des résultats :

Calculer le rendement pour chaque cas selon la formule :

$$\eta = \frac{4,18 \text{ m } \Delta T}{\Delta t P}$$

η = rendement

m = masse d'eau réchauffée

Δt = durée de l'expérience (dans ce cas 20 mn)

ΔT = élévation de température

P = puissance thermique reçue (dans ce cas 1000 W/m^2)

$$= 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \times 0,16 \text{ m}^2 = 160 \text{ W}$$

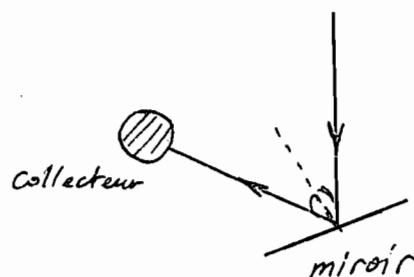
Tracer la courbe du rendement en fonction du débit et interpréter.

3.5 Etude d'un concentrateur:

3.5.1 But: Etudier la variation du rendement d'un concentrateur cylindro-parabolique en fonction de l'inclinaison par rapport aux rayons.

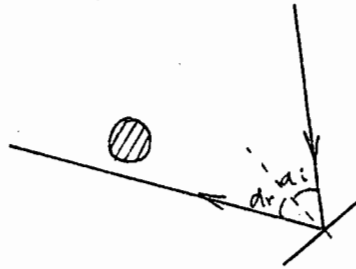
3.5.2 Rappels théoriques:

Si le capteur plan est utilisé, il n'en demeure pas moins qu'il existe d'autres formes de capteurs: les concentrateurs. Quand le capteur plan ne permet plus d'atteindre les températures requises, on fait appel à la concentration. L'idée n'est pas nouvelle. Archimède (287-212 av.Jc), l'a déjà utilisée pour enflammer les vaisseaux des romains assiégeants Syracuse, dont il assurer la défense à l'époque. Le principe de base est qu'une onde incidente sur une surface est réfléchiée avec un angle égal à celui d'incidence. Il est donc possible d'orienter des miroirs de telle sorte que le rayonnement réfléchi tombe sur le collecteur du capteur.



La parabole constitue un contour idéal pour la concentration du rayonnement. Cependant, la com-

centration n'est pas sans inconvénient. En effet, si le rayonnement incident change de direction, le rayonnement réfléchi ne tombe plus sur le collecteur, mais passe à côté.



Le concentrateur devra donc être muni d'un suiveur solaire.

3.5.3 Liste du matériel :

- 1 concentrateur cylindro-parabolique
- 1 réservoir calorifugé
- 1 pompe de circulation
- 1 thermocouple
- 1 galvanomètre
- 1 solérimètre
- 1 voltmètre
- 1 chronomètre

3.5.4 Procédure :

Faire le même montage que précédemment (P56) mais en remplaçant le capteur plan par un concentrateur cylindro-parabolique. Ajuster l'inclinaison

du concentrateur jusqu'à ce que le rayonnement incident soit sensiblement orthogonal à sa surface de captation. Faire les mesures de températures initiale et finale (après 20 minutes) comme vu précédemment.

Faire les mêmes mesures avec d'autres inclinaisons.

3.5.5 Analyse des résultats :

Calculer les rendements selon les formules déjà vues. Tracer la courbe du rendement en fonction de l'inclinaison et commenter les résultats.

3.6 Performances électriques d'un module de photopiles :

3.6.1 But : Déterminer les performances électriques d'un module de photopiles.

3.6.2 Rappels théoriques :

Le courant d'une photopile, mesuré avec un instrument électrique de très faible résistance, augmente proportionnellement à l'éclairement. Un micro-ampèremètre peut donc être étalonné en lux ; il suffit de multiplier les indications en ampères par une constante déterminée une fois pour toute ; et l'on connaît l'éclairement sur la photopile. Ainsi sont faits les luxmètres. Mais sur un circuit résistant, on constate un défaut de proportionnalité. Ce défaut est d'autant plus accentué que la résistance

est grande. On explique ce résultat par le fait que le courant a tendance à se refermer à l'intérieur de la photopile. Même pour une résistance très faible, le courant n'est jamais proportionnel à l'éclairement. Si la résistance était nulle, le serait-il davantage? Il est possible de mesurer le courant qui serait débité sur une résistance nulle: le courant de court-circuit.

La photopile permet de transformer directement le rayonnement lumineux en énergie électrique. Mais comment convient-il de l'utiliser pour que cette transformation s'effectue avec le meilleur rendement? La puissance débitée par une photopile peut s'exprimer par $P = RI^2$.

Il existe une valeur de R pour laquelle cette puissance est optimale. Cette manipulation comporte 3 étapes:

- a) Proportionnalité du courant à l'éclairement
- b) Mesure du courant de court circuit
- c) Détermination de la puissance maximale.

3.6.3 Liste du matériel:

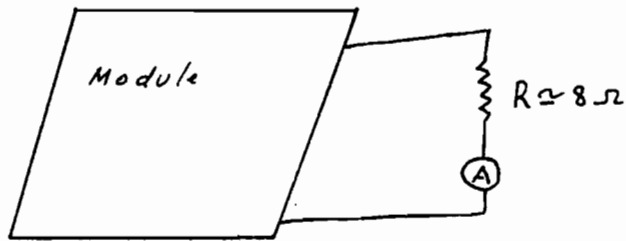
- 1 module de photopiles
- 1 boîte de résistances
- 1 luxmètre
- 1 ampèremètre
- 1 voltmètre

- 1 pile (1,5V)
- 1 wattmètre (CC)

3.6.4 Procédure :

a) Proportionnalité du courant à l'éclairement :

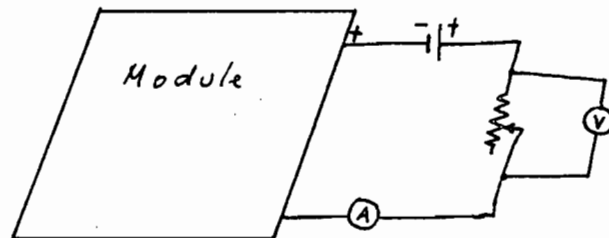
Faire le montage ci-dessous :



Placer le luxmètre à la hauteur du module de sorte que l'éclairement soit le même que sur le module. Prendre les valeurs du courant en fonction de l'éclairement en faisant tourner le bouton du variateur électronique.

b) Mesure du courant de court-circuit :

Faire le montage ci-dessous

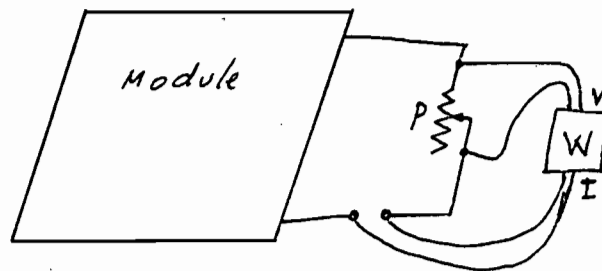


Régler l'éclairement à son maximum et prendre la valeur en lux. Au préalable, mesurer la ddp aux bornes de la pile avant de l'insérer dans le circuit. Tourner le bouton du potentiomètre jusqu'à ce que la chute

de tension à ses bornes soit égale à la ddp de la pile déjà mesurée. Noter alors le courant à travers l'ampèremètre: c'est le courant de court-circuit.

c) Détermination de la puissance maximum:

Faire le montage suivant:



Régler l'éclairement à son maximum. En tournant le bouton du potentiomètre, on arrive à une valeur maximum de la puissance lue sur le wattmètre: c'est la puissance maximum. Débrancher alors le potentiomètre et mesurer la valeur de la résistance à l'aide d'un ohm-mètre.

3.6.5 Analyse des résultats:

Tracer la courbe du courant en fonction de l'éclairement.

Commenter les résultats.

CHAPITRE 4:

Expérimentation du matériel :

4.1 Conditions expérimentales:

Parmi les modèles conçus, seul le capteur plan a fait l'objet d'une expérimentation parce que étant le seul prototype réalisé. Il convient cependant, de préciser les quelques erreurs constatées sur le modèle par rapport aux plans originaux. C'est ainsi que l'absorbeur, au lieu de reposer sur ses supports, est directement posé sur la laine de verre, réduisant ainsi l'épaisseur d'isolant.

D'autres parts, les paliers n'ont pas été réalisés comme prévu et l'assemblage par vis écrou prévu pour un des côtés de manière à permettre le démontage de l'absorbeur n'a pas été effectué.

Le réservoir utilisé n'est pas celui conçu et son isolation et celle des conduites a été faite avec de la laine de verre attaché tout autour. Les thermocouples disponibles ne convenaient pas et les mesures ont dû être prises avec un thermomètre introduit dans le réservoir. Pas de circulateur ni débitmètre. Pour simuler la circulation forcée il a fallu faire circuler de l'eau directement à travers le capteur, en la recueillant à la sortie à l'aide d'une éprouvette afin de déterminer le débit. L'atmosphère était poussiéreuse, avec un léger vent, et le rayonnement irrégulier.

4.2 Résultats expérimentaux:

Date: 22 Mai 1984

Fonctionnement Thermosiphon

2 vitrages

Heure GMT	Apport solaire W / m ²	Temp. eau réservoir °C
14H ⁰⁰	950	30
14H ⁰⁵	960	50
14H ¹⁰	965	56
14H ¹⁵	970	61
14H ²⁰	980	65
14H ²⁵	990	67
14H ³⁰	995	68
15H ⁰⁰	630	65
16H ⁰⁰	560	58

Date: 23 Mai 1984

Fonctionnement thermosiphon

1 vitrage

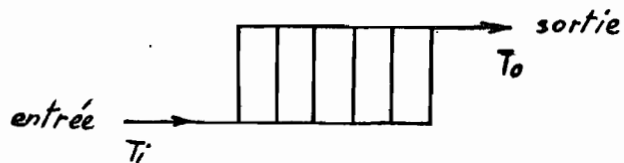
Heure GMT	Apport solaire W / m ²	T° eau réservoir °C
10 ^H 15	630	30
10 ^H 20	640	40
10 ^H 25	700	45
10 ^H 30	710	46

2 vitrages

10 ^H 45	720	30
10 ^H 50	720	45
10 ^H 55	780	47
11 ^H 00	800	48
11 ^H 20	800	55

Date: 23 Mai 1984

Circulation forcée



Apport solaire	Débit	T_i	T_o
W/m^2	ml / minute	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$

2 vitrages

820	400	30	34
840	955	30	33
840	340	30	35
840	185	30	40

1 vitrage

840	425	30	32
830	390	30	34
830	315	30	35
830	200	30	36
830	1000	30	30

7

4.3 Analyse des résultats:

Après ces tableaux, il serait tentant de tracer les courbes d'évolution de la température en fonction du temps ; cependant, à cause des variations du rayonnement solaire, ces graphiques n'auraient aucune valeur déductive. Mais il reste que ces résultats donnent une bonne indication sur les performances du modèle. A cet effet, on peut constater combien le temps de réponse est court (avec un rayonnement de 1000 W/m^2 on peut porter 1,5 litre d'eau de la température de 30°C à 50°C en 5 minutes, et 68°C en 30 minutes) ; ce qui permet des démonstrations rapides.

En outre, la simplicité du modèle permet à tout utilisateur de le démonter et remonter rapidement, et sans la moindre instruction.

Il ne reste donc qu'à rectifier les erreurs mentionnées au début du chapitre pour en faire, comme prévu, un modèle répondant entièrement aux exigences didactiques.

CONCLUSION:

Au terme de ce rapport, il convient de faire un bilan final. Mais rappelons d'abord, qu'à l'origine, cette étude visait trois formes d'énergie : solaire, éolienne, biomasse. Ces objectifs, incontestablement exagérés, ont dû être ramenés à une base plus réaliste. C'est ainsi que, dans cette première partie, seule l'énergie solaire est retenue. A cet effet, un matériel répondant aux exigences didactiques a été conçu. Cependant, son utilisation nécessite la connaissance de ses performances et limitations; car, si le capteur plan est assez satisfaisant, il n'en est pas de même de tous les autres appareils. En effet, le concentrateur serait plus satisfaisant s'il permettait la mesure du rendement en fonction de la position du collecteur par rapport au foyer de la parabole. De plus, l'étude de l'influence de la température sur les performances électriques des photopiles serait une expérience très significative. Le problème à ce niveau est le moyen de chauffage des cellules. Quant au simulateur, il n'a pas été entièrement satisfaisant faute de solution à deux problèmes : d'abord, les rayonnements solaire, et des lampes à incandescence présentent des différences spectrales (A2), ensuite, les rayons des lampes du simulateur, contrairement à ceux du soleil, ne sont pas parallèles.

Le problème à ce niveau, est que les photopiles présentent une sensibilité spectrale (A3) et que le courant débité est fonction de l'angle d'incidence (A4); de plus pour le concentrateur, les rayons doivent être orthogonaux à la surface de captation. Il est certes possible, pour remédier à cette situation, de tamiser la lumière par diffraction à l'aide de prismes, et de faire un dosage approprié pour obtenir l'équivalent de la lumière solaire. Mais un tel procédé est dispendieux et serait très coûteux. Le simulateur devrait donc faire l'objet d'une autre étude.

Ce bilan peut paraître négatif; il n'en est pas ainsi. En effet, il a été établie une base solide pour de nouvelles études dans les domaines inexplorés. C'est ainsi que dans le domaine de l'énergie éolienne, il faut préciser que des modèles réduits de savonius et filippini sont déjà disponibles. De plus, pour ce qui est de la biomasse, il en existe un dispositif au CERER. Il serait donc recommandé de partir de ces bases pour l'étude de ces questions.

Cette première étude, qui vient d'être présentée était donc nécessaire compte tenu de l'étendue du sujet. Il fallait cerner le problème de près et établir les axes d'une étude systématique dans les domaines inexplorés; dans ce cadre, cette première étape vient à point.

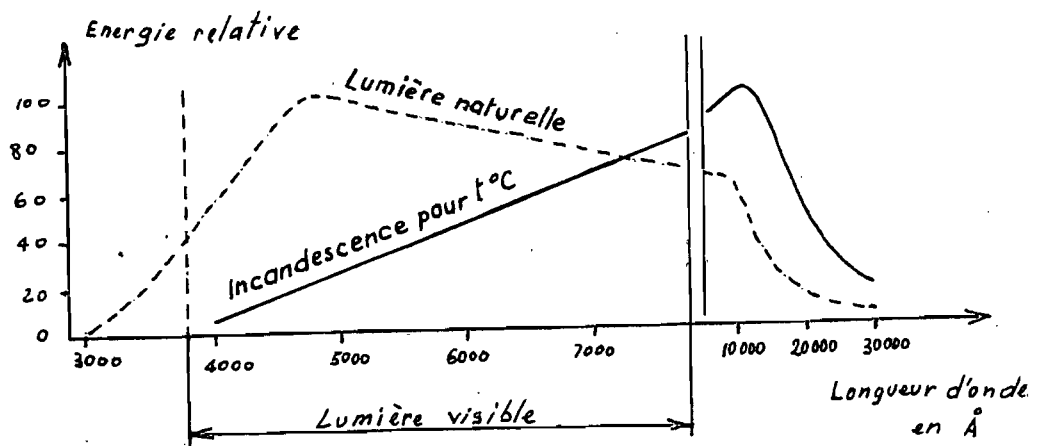
A. APPENDICES:

A1: *Energie quotidienne reçue par une surface horizontale de 1m² placée hors atmosphère (sénégal) [3]*

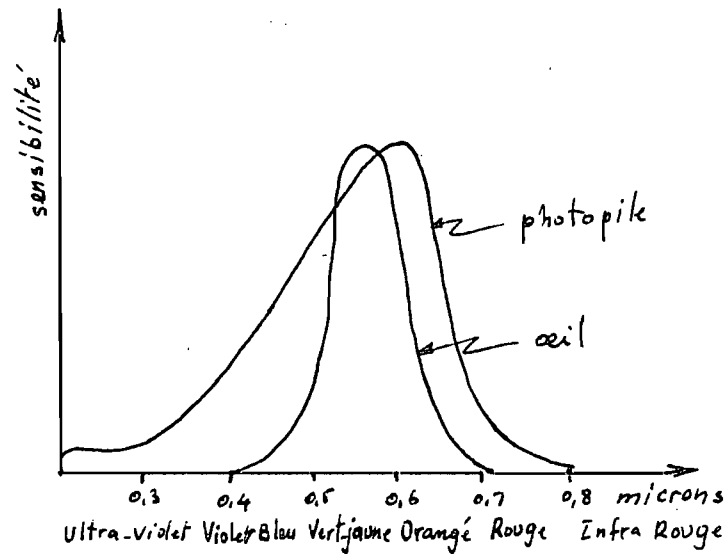
JANVIER	FEVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN
8,14	8,99	9,90	10,46	10,58	10,52
JUILLET	AOUT	SEPT.	OCT.	NOV.	DEC.
10,49	10,39	9,95	9,16	8,23	7,81

en kWh / m²

A2 : Différences spectrales entre lumière naturelle et lampe à incandescence [16]

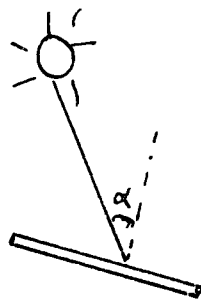


A3: Courbe de sensibilité spectrale d'une photopile au silicium comparée à celle de l'œil. [12]



A4: Variation du courant d'une photopile en fonction de l'angle d'incidence [15]

α°	-30	-20	-10	0	10	20	30
I (mA)	82	89	93	95	92	86	79



B. BIBLIOGRAPHIE :

- [1] ANDRÉ BOISCHOT : *Le soleil et la terre*
Collection *Que sais-je ?*
pages 11 à 20
- [2] *Encyclopédie internationale des sciences et des techniques*
p. 205 - 652 - 853 - 847 - 848 - 914 - 915
- [3] BOCAR SY - ANDRÉ GAUTHIER : *ingénieurs au CERER*
Evaluation des potentiels éolien et solaire du Sénégal - Données disponibles en 1983
- [4] AMADOU SYLLA : *Projet de fin d'études 1980*
Etude d'un réflecteur hémicylindrique
p. 20 , 6
- [5] MICHEL PETITEAU : *Notes de cours de*
Transfert de chaleur
p. 1.2 , 1-3 , 2-8 , 5-2
- [6] ALONSO & FINN : *Physique Générale Tome II*
Champs et Ondes

[7] ALBERT PAUL MALVINO :

Principes d'électronique

Mc Graw-Hill , Editeurs

p. 13 à 35

[8] A. VAPAILLÉ :

Physique des dispositifs à semi-conducteurs

Tome I

[9] A. S. GROVE :

Physique et technologie des dispositifs à
semi-conducteurs Dunod, Paris 1971

[10] PIERRE MOREL :

Physique quantique et thermique

Collection Méthodes

[11] ROGER MARTIN : Notes de cours ELEC 5.12 1984

Installations électriques

p. ix-17

[12] JEAN TERRIEN :

La cellule photoélectrique

Collection Que sais-je

p. 60, 61, 63, 65, 66, 68, 69

[13] M. CONDAMINE

Géométrie Terminales C.E

Collection P. Vissio

p. 727 à 737

[14] A.A. SEYDI

Projet de fin d'études 1981

Système solaire - Economie

p. 26

[15] OUSMANE CISSÉ

Projet de fin d'études 1978

Conception et réalisation d'un suiveur solaire

p. 6

[16] HEINY - NAUDY - DARÉES

Technologie d'électricité: Applications de

l'énergie électrique - Tome 4

Ed. Foucher 1978

p. 75