

UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

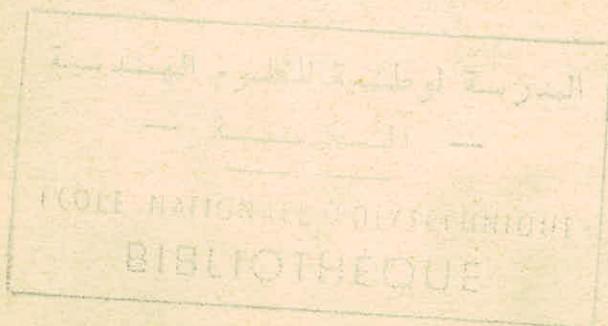
Département de Génie Chimique

4/76

104

THESE DE FIN D'ETUDES

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE  
EXPÉRIMENTALE DU  
CHAUFFAGE PAR ÉNERGIE  
SOLAIRE



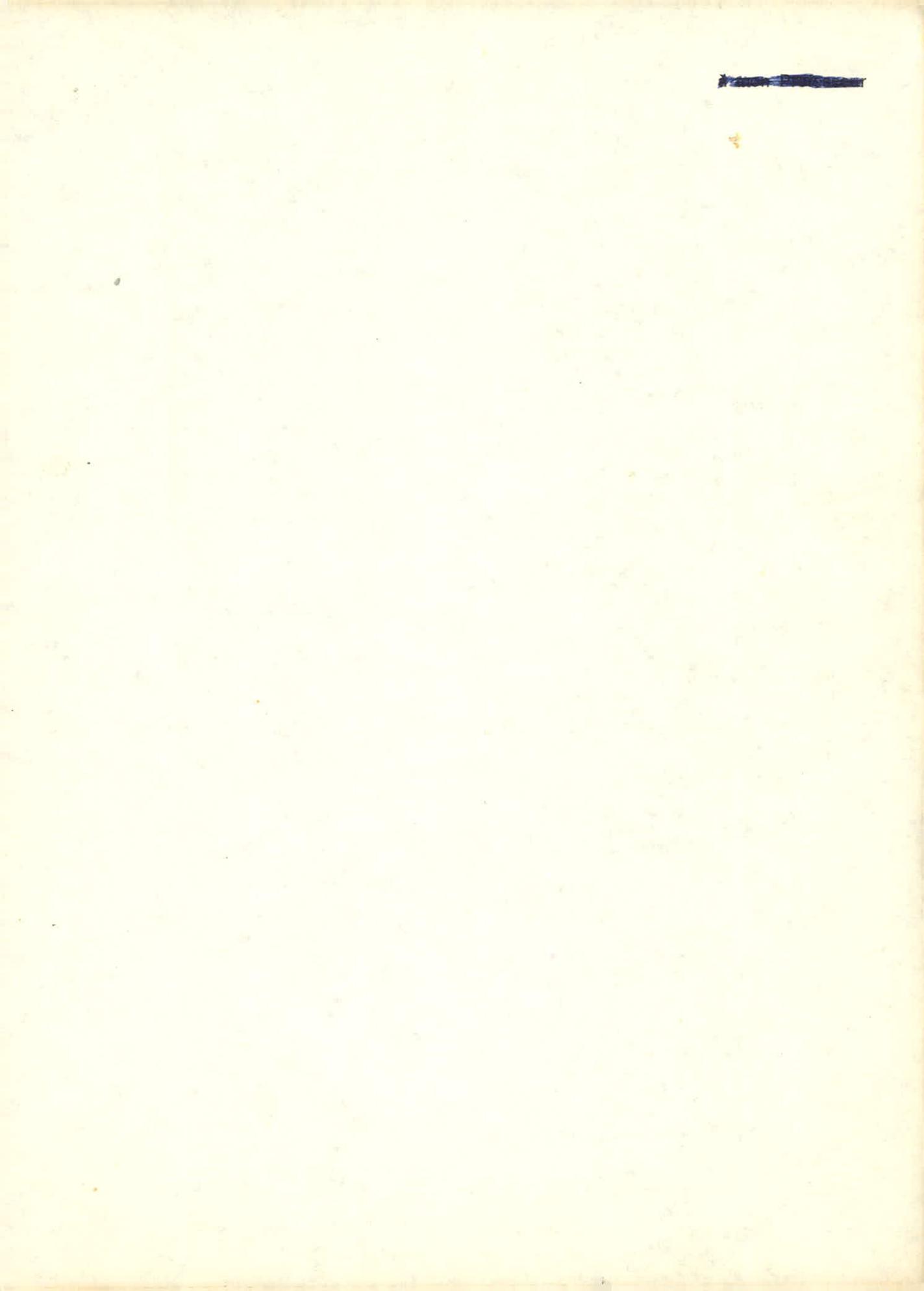
Proposé par :

R. DELBOUYS D<sup>r</sup> Sc.

Etudié par :

F. SOUABI

ANNEE 1975-76



# THESE

présentée

A L'ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



pour obtenir le titre  
d'INGENIEUR  
(GENIE CHIMIQUE)

par

Fatiha SOUABI



CONTRIBUTION A L'ETUDE EXPERIMENTALE  
DU CHAUFFAGE PAR ENERGIE SOLAIRE



soutenue le 21 Juin 1976, devant la commission du Jury :

M. R. DELBOUYS	}	Président
M <sup>me</sup> G. NEZZAL		
M. Y. YOUSFI	}	Examineurs
M. P. CAILLAUD		
M. A. COEVOET		

*C'est avec un grand plaisir que je présente ici le fruit d'une participation collective. Aussi je tiens à remercier ceux qui ont apporté leur concours par des critiques, en particulier Monsieur DELBOUYS qui a su diriger avec enthousiasme ce travail par de précieux conseils.*

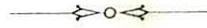
*Je remercie aussi Monsieur COEVOET pour son aide et ses qualités de travail.*

*J'exprime ma profonde reconnaissance à Monsieur MULLER pour toute l'aide désintéressée qu'il n'a cessé de m'apporter.*

*Madame NEZZAL, chef du département de Genie Chimique, Monsieur YOUSFI, directeur de l'Institut de Chimie à l'Université d'Alger et Monsieur CAILLAUD, m'ont fait l'honneur de participer au Jury. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.*

*Il serait vain de citer les noms de tous ceux qui ont contribué à ma formation qui a aboutit à la réalisation de cette étude. Aussi je remercie tous mes anciens enseignants et tous mes collègues étudiants.*

# SOMMAIRE



PROLOGUE	1
INTRODUCTION	2
CHAPITRE I : LE RAYONNEMENT	
CHALEUR RAYONNANTE	4
LE RAYONNEMENT SOLAIRE	6
CHAPITRE II : L'EFFET SERRE	
GENERALITES ET DEFINITIONS	11
LE VERRE	14
LES FILMS PLASTIQUES	16
CHAPITRE III : CLIMATISATION PAR AIR CHAUD	
PARTIE THEORIQUE	23
PARTIE EXPERIMENTALE	32
— Mise en place des moyens de mesure	35
— Résultats expérimentaux	42
CHAPITRE IV : CHAUFFE EAU SOLAIRE	
PARTIE THEORIQUE	51
PARTIE EXPERIMENTALE	58
A - Expériences préliminaires	61
B - Expérimentation sur les capteurs	67
CONCLUSION	92

## PROLOGUE

On a tenu très modestement à préparer cette étude sur l'énergie solaire pour différentes raisons.

Notre premier souci est l'acquisition d'une certaine expérience dans la résolution des problèmes technologiques, problèmes auxquels nous ne sommes pas rompus malgré plusieurs années d'enseignement.

Le manque d'expérience dans une recherche pratique si déterminante dans notre future vie d'ingénieur, nous a poussé à choisir cette branche d'avant-garde. Enfin une spécialisation assez longue nous limite et peut nous rendre inefficace dans notre domaine.

Le but essentiel donc de ces travaux (travaux qui présentent une idée nouvelle) est la familiarisation avec des problèmes d'un nouveau genre, l'apprentissage d'un matériel inconnu, l'acquisition de nouvelles connaissances.

Au cours de nos expériences, on a eu à approfondir nos connaissances dans plusieurs branches, qui ne concernent pas directement notre étude. On n'a pas essayé d'éviter tous les écueils auxquels on se heurtait ; mais on a cherché à trouver les solutions pour que ceux qui viendront après nous aient moins de difficultés. Ainsi, les différentes installations nouvellement réalisées, améliorent le bon fonctionnement du département de génie chimique.

En quatre mois, il serait vain de vouloir tout connaître sur l'énergie solaire, domaine beaucoup trop vaste. Aussi, j'aimerais tant que ce projet serve de rampe pour lancer les recherches sur l'énergie solaire.

## INTRODUCTION

Le soleil est depuis toujours considéré comme une source d'énergie indispensable à la vie terrestre. Il est, non seulement le régulateur physique et biologique de la biosphère, mais également un facteur déterminant pour l'équilibre psychophysiologique et les capacités d'expansion de l'espèce.

L'homme a toujours essayé d'exploité cette énergie "gratuite" pour sécher les grains, le linge, etc...

L'énergie que reçoit la terre en provenance du soleil est considérable. Elle représente une puissance de 180 000 Milliards de kilowatts, soit environ un kilowatt par mètre carré. Considérable donc et non polluante, telle est l'énergie reçue du soleil, puisque sa conversion n'engendre aucun sous produit, pas même une "pollution thermique" inévitable dans les autres méthodes de production à partir des combustibles fossiles.

L'objet de notre programme de travail est l'étude d'une climatisation par air chaud, ainsi que celle d'un chauffe-eau solaire. C'est dans ce domaine qu'existe le plus grand nombre d'applications actuelles. La consommation d'énergie pour les besoins domestiques est considérable, et très souvent dispersée. En conséquence, et du fait de la concentration des centrales, les énergies sont grévées de frais de transport et de distribution. Il n'en serait pas de même pour l'énergie solaire si elle est utilisée au voisinage immédiat de son lieu de captation.

CHAPITRE I. :

LE RAYONNEMENT

## LA CHALEUR RAYONNANTE

Tout corps émet un rayonnement, et l'énergie nette rayonnée transite toujours du plus chaud vers le plus froid.

Le rayonnement émis est constitué de radiations dont les longueurs d'onde sont situées dans l'infra rouge. L'énergie totale rayonnée augmente très vite avec la température. Elle s'exprime suivant la loi de STEFAN :

$$C_{ot} = C_{te} \times T^4$$

Nous vivons entourés d'infra-rouges. Nous en recevons des objets qui nous entourent, nous en produisons nous-mêmes. Le soleil est un puissant radiateur d'infra-rouges.

Quand ce rayonnement frappe un corps, l'énergie transportée est en partie :

- renvoyée (réflexion, diffusion)
- transmise (réfraction)
- absorbée

L'énergie rayonnante absorbée est transformée, et à ce moment seulement en chaleur par le corps récepteur, elle est appelée "chaleur rayonnante".

Faisons le bilan thermique d'un corps quelconque, soumis à un rayonnement. Il s'écrit :

$$R + C = E + M$$

Il est fonction de l'humidité relative, la vitesse et la température de l'air, et température de rayonnement.

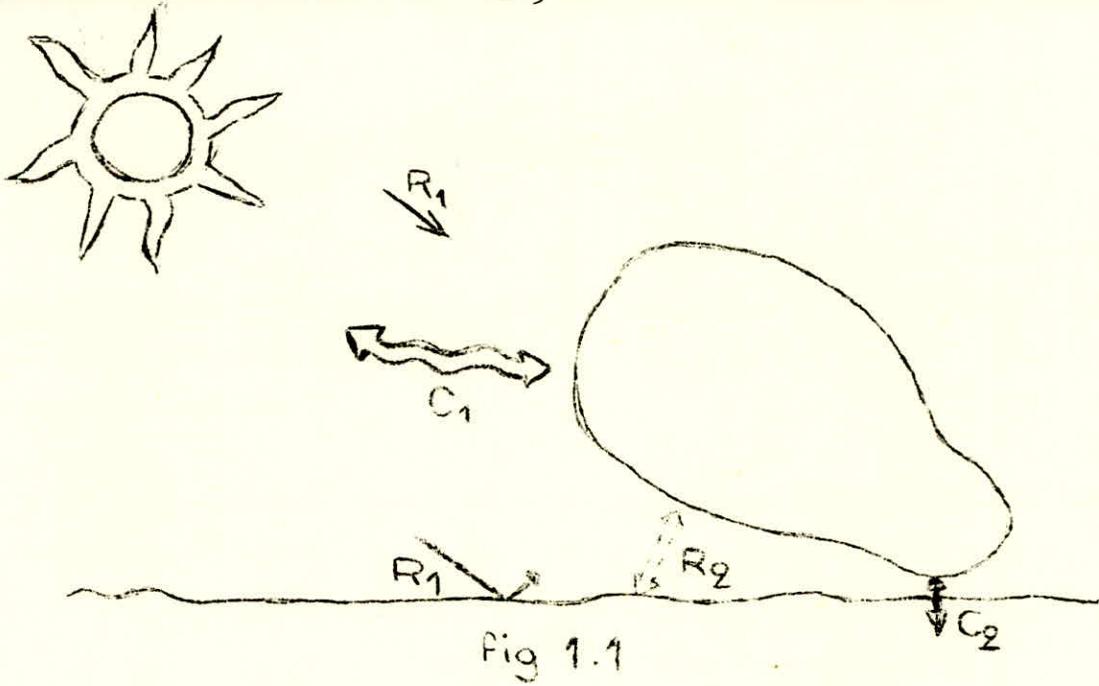


Fig 1.1

- R : quantité d'énergie rayonnante et est égale à  $R = R_1 + R_2$   
 $R_1$  = énergie solaire directe ou diffuse  
 $R_2$  = énergie des radiateurs divers incandescents ou non  $\leftarrow \rightarrow$
- C : chaleur de convection  $\leftarrow \rightarrow$   $C_1$  et de conduction  $\leftrightarrow$   $C_2$   
 $C_1$  = de l'air à température supérieure à celle du matériau  
 $C_2$  = par contact avec les corps plus chauds.
- M : c'est l'énergie rayonnante absorbée qui est transformée en chaleur
- E : perte de chaleur qui peut se faire par conduction et ceci par contact avec les corps plus froids.

Par exemple, chez l'homme, il existe d'autres pertes : évaporation par transpiration et évaporation par respiration.

Il est donc de la plus grande utilité théorique et pratique de mesurer couramment l'énergie rayonnée par le soleil et parvenant au sol, soit directement, soit après diffusion.

## LE RAYONNEMENT SOLAIRE

Le soleil est un corps chaud (5540 °C) (1) qui émet de la chaleur par rayonnement sous forme d'ondes électro-magnétiques qui transportent de l'énergie. Le mécanisme de transport se fait à l'aide de photons.

Le rayonnement solaire peut être décomposé de la façon suivante :

- infra-rouges : radiations qui transportent la plus grande partie de l'énergie rayonnée (chaleur rayonnante)
- lumière visible : bande éclairant la terre, donnant la couleur aux objets.
- ultra-violet : qui ne transportent qu'une faible partie de l'énergie rayonnée.

Décomposition de la lumière :

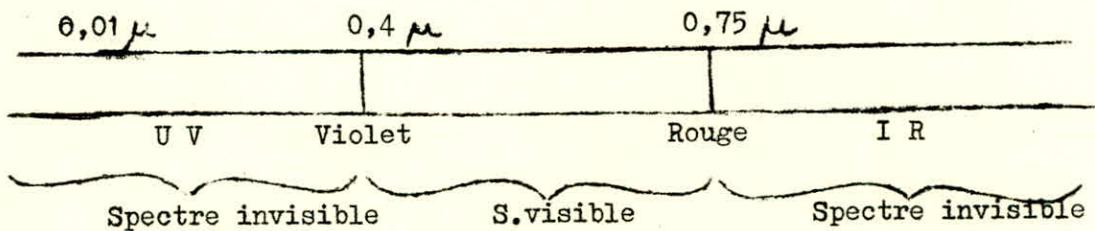


Fig. 1.2

Les courbes spectroradiométriques (2) (l'ordonnée détermine la quantité d'énergie rayonnée émise par unité de temps et de surface pour une longueur d'onde donnée et l'aire située à l'intérieur de la courbe, donne la quantité totale d'énergie rayonnée émise à toutes les longueurs d'onde) nous permettent de déterminer la plus grande partie de l'énergie émise. (voir figure 1.3.).

On voit donc sur ces courbes que le Soleil émet 90 % de son rayonnement entre 0,1 et 3

Malheureusement, l'énergie lumineuse, si généreusement distribuée, possède deux gros inconvénients : elle est intermittente et elle est "diluée". Le soleil ne brille en effet nulle part en permanence. L'alternance des jours et des nuits, le balancement saisonnier, la nébulosité, sont autant des handicaps pour son utilisation concentrée. D'autre part, à raison de un kW au m<sup>2</sup>, il faudrait théoriquement pouvoir récupérer l'énergie reçue par une surface ensoleillée de un km<sup>2</sup> pour disposer d'une puissance de un million de kW.

En fait, à cause des nuits, des nuages, de l'éclairage oblique, seulement une faible partie de cette énergie est récupérée. On arrivera donc à utiliser des surfaces très étendues.

Ils se posent donc de nombreux problèmes technologiques pour concevoir des installations très étendues, capables de collecter la lumière du soleil, pour stocker l'énergie reçue, pour la convertir.

Mais l'on peut faire plusieurs remarques. Tout d'abord, il n'y a pas de problème technique rigoureusement insoluble. Le seul problème est d'accorder à la recherche et au développement les moyens humains et financiers suffisants pour qu'ils puissent effectivement déboucher, mais jusqu'à présent, peu de moyens ont été consacrés.

Une seconde remarque s'impose : de la dispersion de l'énergie solaire peut découler, en fait, un gros avantage, c'est-à-dire, qu'une petite centrale ne sera pas moins efficace qu'une grosse. La vocation de l'énergie solaire, déjà dispersée, n'est-elle pas plutôt une utilisation sur place (du moins dans un premier stade).

Schématiquement, le soleil fournit toute l'énergie qui provient de la terre. (mise à part l'énergie nucléaire, qui est contenue au sein même de la matière). Les énergies hydrauliques (évaporation et pluie), éoliennes (mouvements de masses d'air provoqués par les différences de températures entre les régions), maréthermiques, des photosynthèses, présentes et passées, qui ont fourni la matière première des pétroles et charbons, ne sont en dernière analyse que des sous produits de l'énergie solaire.

#### REFERENCES

- (1) et (2) F.KREITH : "Transmission de la chaleur et thermodynamique"  
MASSON et Cie. Editeurs p : 203.

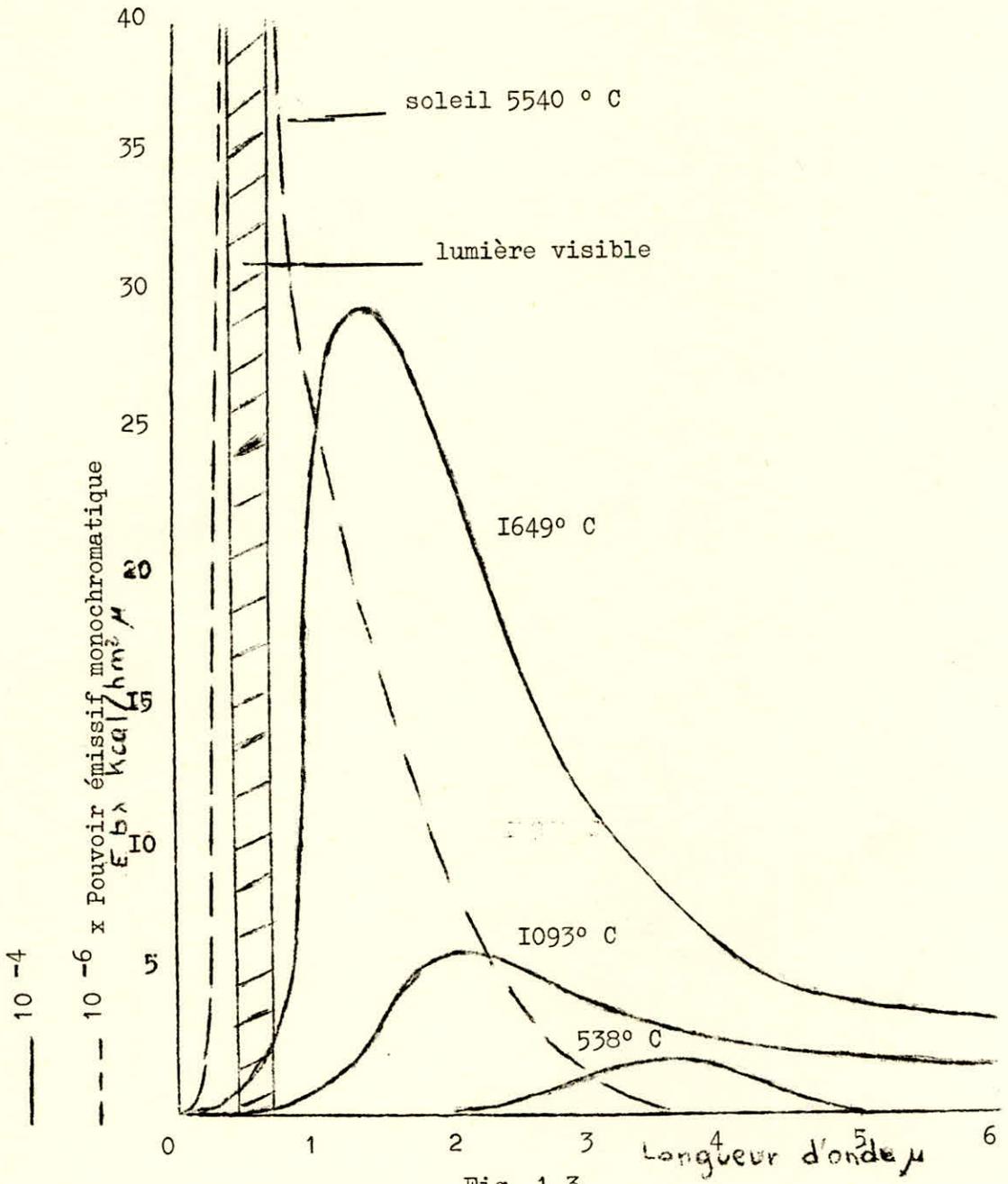


Fig. 1.3

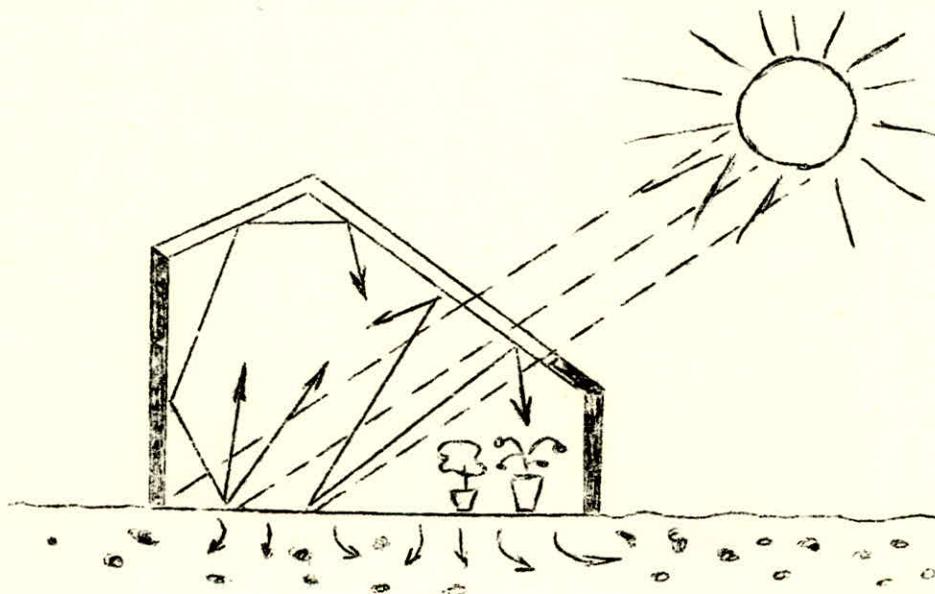
- Répartition spectrale du pouvoir monochromatique pour un radiateur idéal ou corps noir aux différentes températures.-

CHAPITRE II. :

L'EFFET SERRE

## GENERALITES ET DEFINITIONS

Dans le "capteur solaire", la production de chaleur repose sur un principe fort simple, celui des serres. Il consiste à emprisonner l'énergie apportée par le rayonnement solaire. Pour cela, on place au-dessus du corps chauffé, un matériau qui est transparent à la plus grande partie des radiations solaires et opaque à la plus grande partie des radiations thermiques émises par le corps en s'échauffant (radiations infra-rouges).



Les radiations se situent dans des longueurs d'onde visible et du proche infra-rouge (entre 0,3 et 3 microns), sont arrêtées par une surface absorbante (l'idéal est le corps noir) qui à son tour rayonne. Mais les radiations réémises, sont situées sur une autre plage de longueurs d'onde: celle de l'infra-rouge lointain (entre 4 et 30 microns). Ce rayonnement est arrêté si l'on place au-dessus de la plage absorbante, une surface transparente en verre. La chaleur s'accumule donc entre le récepteur et le verre. C'est ce qu'on observe tout simplement quand on se trouve derrière une vitre au soleil. L'effet serre est le principe de tous les collecteurs plans. Il fait intervenir un certain nombre des propriétés des matériaux dont l'absorptivité, l'émissivité, la conductibilité et la réflexivité.

L'absorptivité :

L'absorptivité d'une surface est le rapport entre l'énergie qu'elle absorbe (e) et l'énergie qu'elle reçoit (énergie incidente E). Ce rapport, mesuré pour un rayonnement perpendiculaire, dépend de la longueur d'onde  $\lambda$  de la radiation reçue. Pour une radiation de longueur d'onde  $\lambda$ , on a :

$$a_{\lambda} = \frac{e}{E}$$

L'émissivité :

L'émissivité d'un corps noir à une température donnée se caractérise par l'énergie rayonnée à cette température, par unité de temps et de surface. L'émissivité  $\epsilon$  s'exprime dans la pratique en kcal/hxm<sup>2</sup>.

La conductibilité :

La conductibilité thermique d'un matériau est sa capacité à se faire traverser par la chaleur. Elle s'exprime en Kcal/h.m.C. Sa connaissance permet de calculer la quantité de chaleur transportée par conduction à travers un corps.

La réflexivité :

La réflexivité d'un matériau est sa capacité à réfléchir les radiations qu'il reçoit. On la mesure en faisant le rapport de l'énergie réfléchie à l'énergie incidente. Donnée en %, la réflexivité est maximum, pour un rayonnement perpendiculaire à la surface de réception ; ce pourcentage diminue avec l'angle d'incidence.

Comme l'absorptivité et l'émissivité, la réflexivité dépend de la longueur d'onde.

En résumé, nous pouvons dire qu'un corps est d'autant plus :

- isolant qu'il a une faible conductivité, une faible absorptivité, une faible émissivité et une grande réflexivité.
- accumulateur qu'il a une grande absorptivité, une grande capacité thermique, une faible émissivité et une faible réflexivité.
- rayonnant qu'il a une grande émissivité et une grande absorptivité.

Notion de corps noir :

La couleur d'un objet est donnée par le caractère sélectif de l'absorptivité. Un objet de couleur jaune par exemple, nous apparaît comme tel, parce qu'il est constitué d'une matière qui absorbe toutes les radiations visibles, sauf le jaune qui est réfléchi et atteint notre rétine.

La couleur d'un objet est donc le mélange de toutes les couleurs non absorbées, l'absorption est la réflexion se produisant par bandes et non de manière continue. Un corps qui absorberait toutes les radiations lumineuses, nous apparaîtrait comme noir. C'est pourquoi un tel corps hypothétique est appelé "corps noir".

## LE VERRE

Le verre est transparent aux radiations du spectre visible ainsi qu'aux I.R. de faibles longueurs d'onde (proche I.R.) et ceci, on le voit bien sur les spectrographes I.R. et U.V. (figure 2.1. et figure 2.2.) d'une plaque de verre de 4 mm d'épaisseur.

Mais le verre est aussi opaque aux I.R. de grandes longueurs d'onde émises par le rayonnement thermique. La chaleur s'accumule donc entre le récepteur (radiateur) et le verre.

Passons à la réflexion vitreuse :

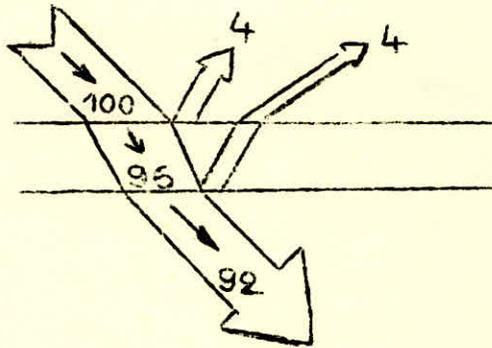
On sait que tout changement brutal d'indice entraîne une certaine réflexion du rayonnement incident, et cette variation brutale d'indice de réfraction s'écrit :

$$r = \left( \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2$$

$n_1$  et  $n_2$  étant les indices de réfraction du premier et deuxième milieu. Dans le cas d'un rayonnement passant de l'air dans un autre milieu, on a alors toujours en évidence normale :

$$r = \left( \frac{n - 1}{n + 1} \right)^2$$

Pour le verre  $n = 1,5$ , on trouve alors  $r = 0,04$ , une telle plaque de verre ne laisse donc passer, indépendamment de toute absorption, que 92 % du rayonnement incident (tout au moins en ce qui concerne les radiations telles que l'indice de réfraction reste voisin de 1,5).



Réflexion vitreuse - figure 2.3.

Le verre offre de bonnes caractéristiques et en plus il a l'avantage d'être permanent, mais il est lourd et fragile, donc difficilement transportable. Il serait bon de le remplacer par un matériau moins fragile dont les caractéristiques seront les plus proches possibles de celles du verre, ce matériau peut être le film plastique.

## LES FILMS PLASTIQUES

Les collecteurs solaires peuvent être recouverts de film plastique, moins cher que le verre, transportable plus facilement (incassable, très léger), mais a une durée de vie assez courte ; il risque de battre au vent, de se déchirer.

Il convient de comparer les caractéristiques physiques des deux matériaux. Ci-dessous, nous présenterons les différents aspects du polyéthylène par rapport à ceux du verre.

### Légèreté :

Le polyéthylène a une densité de 0,92, donc 1 m<sup>2</sup> de 1/10 mm d'épaisseur pèse 92 g ; alors que le verre : 1 m<sup>2</sup> de 4 mm d'épaisseur pèse 10 kg.

### Imperméabilité :

Tous les deux sont imperméables à l'eau et à la vapeur.

### Réflexivité :

On a vu plus haut que le verre a un indice de réfraction égal à 1,5 d'où une réflexivité de 0,04. L'indice de réfraction du polyéthylène est supérieur à 1,71, donc il aura une réflexivité supérieure à :

$$r > \left( \frac{1,71 - 1}{1,71 + 1} \right)^2 \Rightarrow r > 0,068$$

Cela nous montre que la fraction de l'énergie réfléchie pour un collecteur solaire utilisant un film plastique est supérieure à celle d'un collecteur recouvert de verre.

Transparence :

La figure 2.1. (spectrographe I.R. du verre) nous donne une transparence continue qui va de 2,5 microns à 8 microns (elle aurait pu commencer plus bas que 2,5 microns mais malheureusement on ne peut pas le savoir, car notre appareil ne donne pas des valeurs au-dessous de 2,5 microns). Alors que la figure 2.3. (spectrographe I.R. du plastique) nous donne une absorbance à 3,5 microns et une autre à 7 microns. Après avoir fait la comparaison des spectrographes des deux matériaux, on remarque que la transparence du polyéthylène est légèrement inférieure à celle du verre.

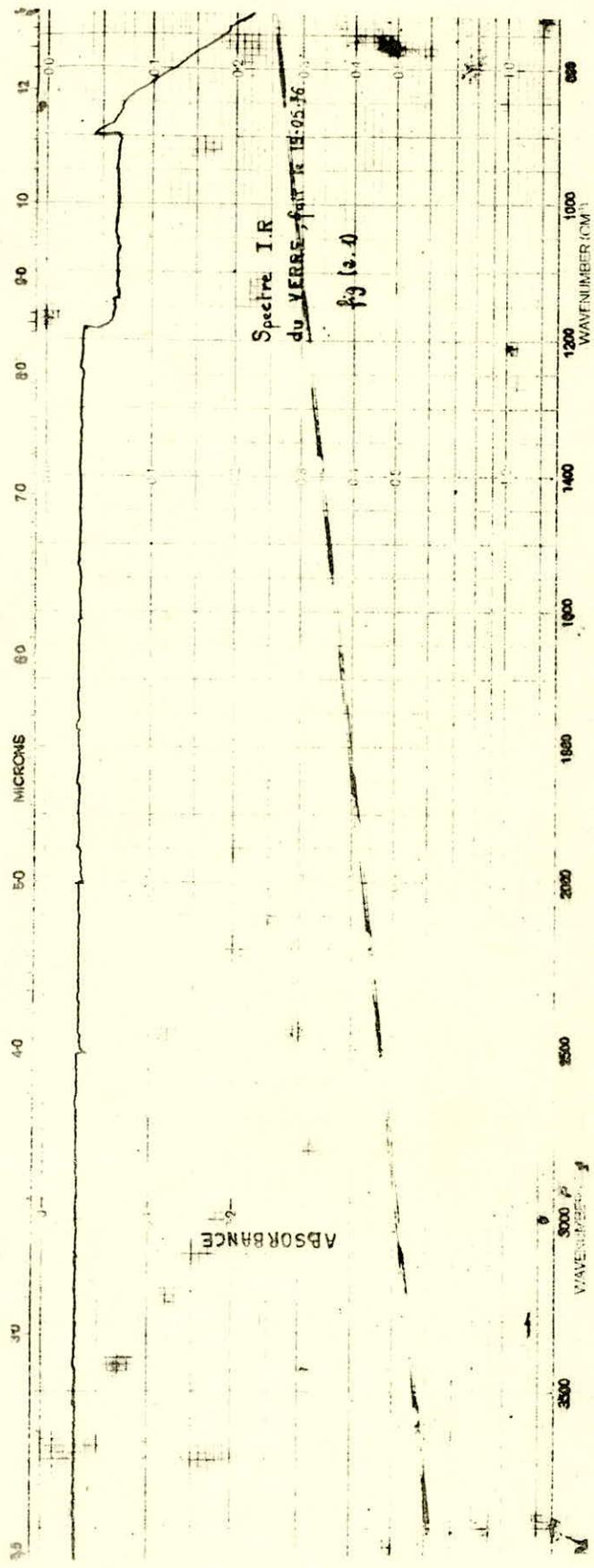
Il faut signaler d'autre part que le polyéthylène est plus perméable à certaines radiations que le verre, notamment en ultra-violet, et ceci on le voit bien sur les spectrographes U.V. (figures 2.2. et 2.4.). Ils sont perméables aussi à certaines radiations émises par le rayonnement thermique.

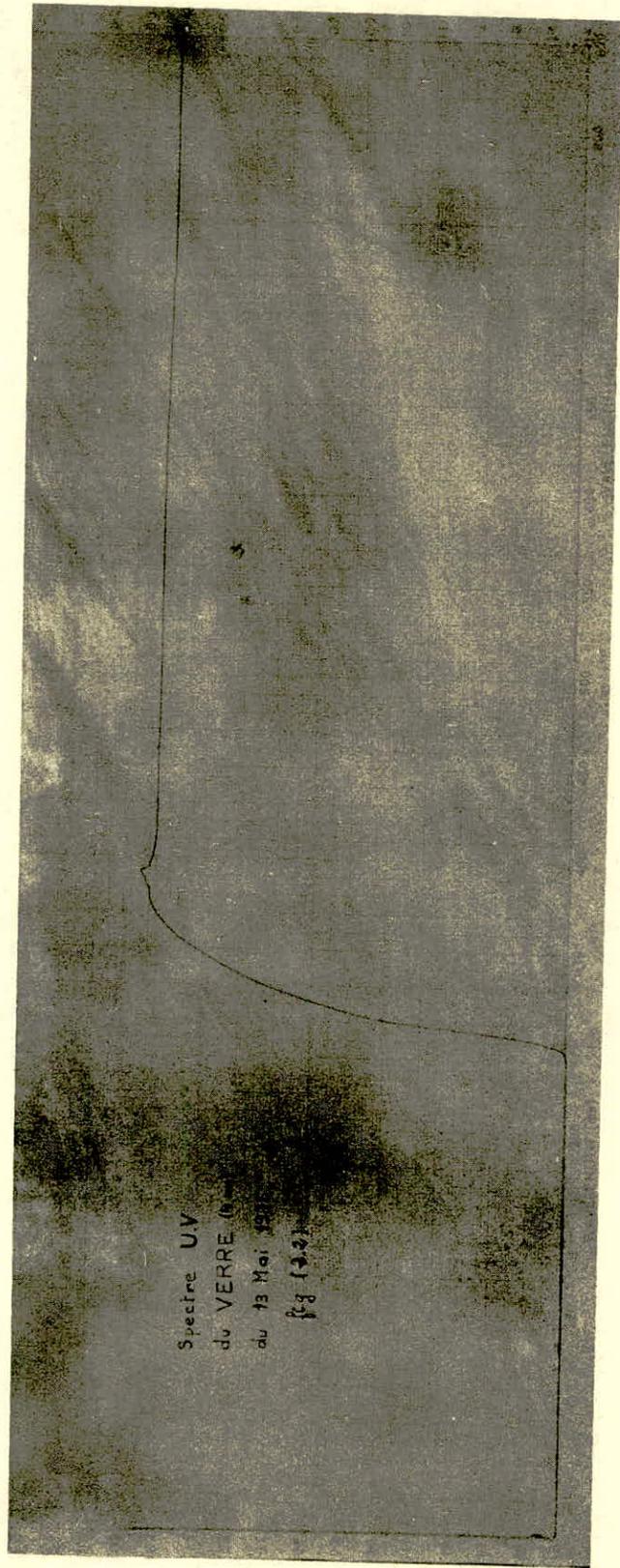
Vieillissement :

Exposé à l'air, à la lumière et à la chaleur, le polyéthylène s'altère assez rapidement (2 ou 3 ans), alors que le verre résiste indéfiniment.

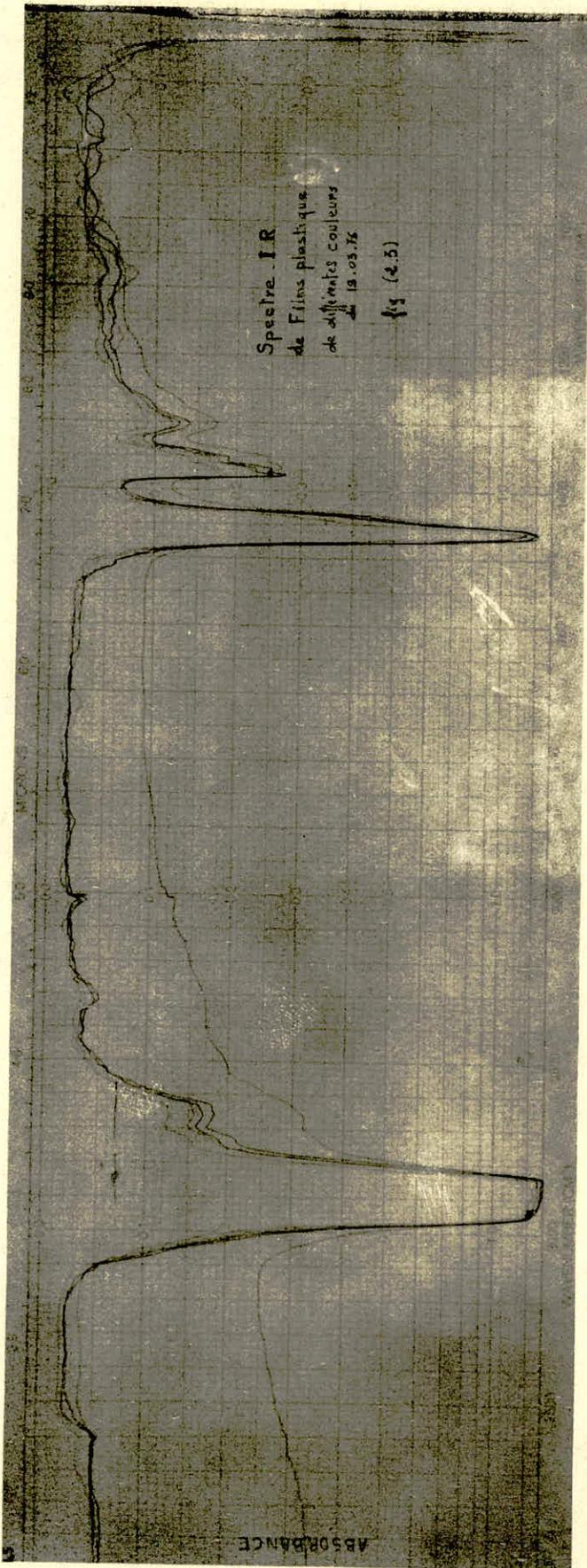
Conclusion :

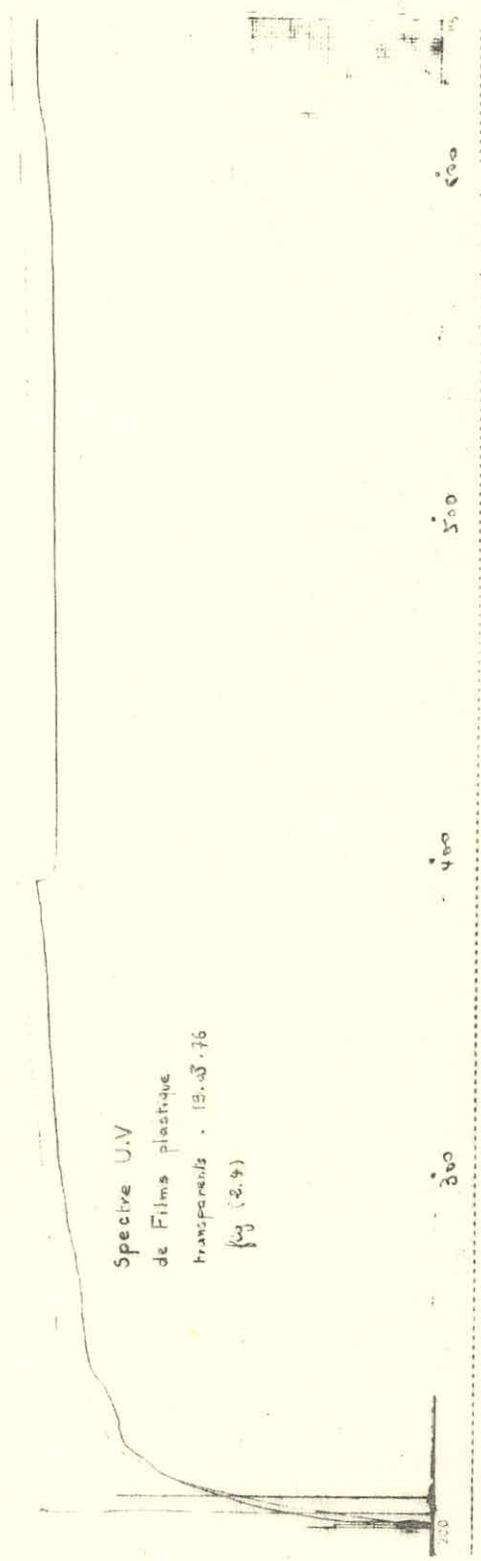
Vu les écarts peu sensibles des caractéristiques relatives aux deux matériaux, nous pouvons remplacer le verre par les films plastiques, sans pour autant oublier qu'ils ont une durée assez courte, car ils résistent mal au temps et aux intempéries (action chimique des U.V., vibration due au vent, infiltration;...).





Spectre UV  
du VERRE (n°  
du 13 Mai 1918)  
pg 132





CHAPITRE III. :

CLIMATISATION PAR AIR CHAUD

PARTIE THEORIQUE

Les recherches du Centre National de la Recherche Scientifique sur le chauffage des habitations par le rayonnement solaire ont été entreprises à partir de 1956, date du premier brevet du professeur TROMBE.

De nouveaux brevets ont été déposés en 1971 et 1972. Les solutions proposées sont toujours très simples, afin que le prix de la calorie fournie dans l'habitation soit notablement inférieur à celui de la calorie fournie par l'emploi d'énergie classique.

Le principe du dispositif peut être représenté schématiquement ainsi (d'après J. MICHEL).

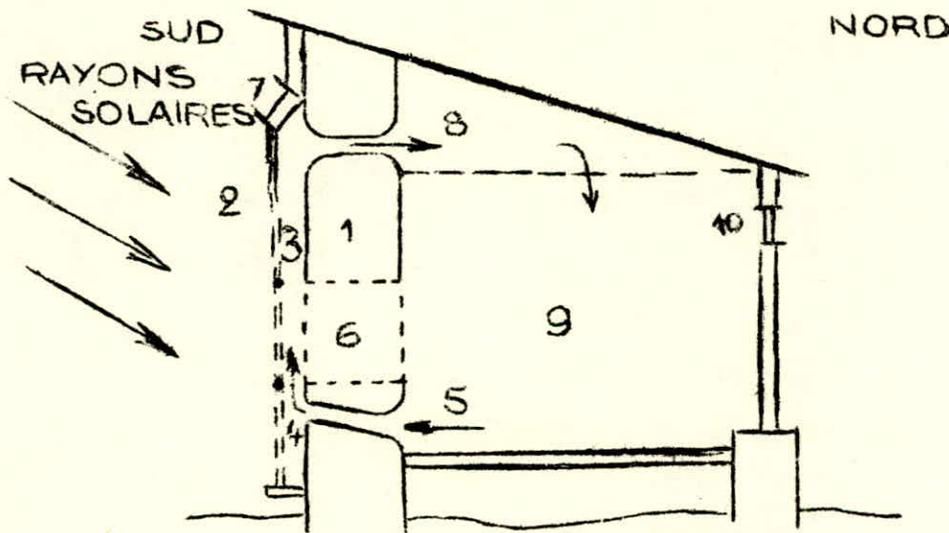


Figure 3.1

- (1) mur accumulateur
- (2) vitrage
- (3) surface réceptrice de l'air
- (4) circulation de l'air
- (5) passage de l'air aspiré
- (6) fenêtre
- (7) passage de ventilation (fermé)
- (8) entrée de l'air chaud dans la pièce
- (9) pièce à chauffer
- (10) passage de ventilation (fermé)

Le système de captage a pour base l'effet de serre vu précédemment.

Les calories apportées par le soleil sont donc enfermées entre la surface réceptrice et les parois de verre; il est bien évident que si l'on place un tel système sur un toit, l'air chaud enfermé dans la serre, plus léger que l'air de l'habitation, devra être extrait mécaniquement et envoyé vers les pièces à chauffer.

Dans certains cas, cette solution n'est pas à écarter, mais elle présente le défaut de cesser de fonctionner dès que l'air chaud n'est plus disponible (par exemple, lorsque le courant électrique est coupé).

Le dispositif adopté pour pallier cet inconvénient comporte l'implantation des serres sur les façades verticales. Nous avons ainsi une possibilité de circulation permanente de l'air chaud derrière le vitrage, le figure (3,1.) illustre ce qui précède.

Les rayons solaires traversent le vitrage (2) et sont absorbés par la surface réceptrice (3) que constitue la face antérieure d'un mur de béton (1), l'air chauffé derrière la serre constitue une colonne de densité plus faible que celle de l'air de la pièce à chauffer et tend à monter et à s'échapper par l'ouverture (8) tandis que l'air de la pièce tend à le remplacer. Il en résulte une circulation d'air permanente suivant le sens des flèches et ce tant que l'air de la serre est plus chaud que l'air de la pièce. Un tel système fonctionne sans aucune intervention mécanique et peut d'ailleurs continuer à fonctionner relativement longtemps après le coucher du soleil grâce à un stockage partiel des calories reçues.

Stockage : La surface chauffée est un mur de béton de 30 à 40 cm d'épaisseur. Les calories reçues sur la surface de ce mur sont transmises d'une part à l'air qui circule et d'autre part au mur qui s'échauffe dans son épaisseur. Ces calories stockées vont servir à entretenir la thermocirculation bien après le coucher du soleil.

.../...

L'idée d'utiliser le mur de béton comme système accumulateur de calories ne coûte pratiquement rien car il est amorti dans la construction par son rôle de mur porteur.

#### Choix des surfaces verticales :

Des études théoriques effectuées notamment au laboratoire d'énergie solaire de C.N.R.S. en FRANCE ont montré que l'exploitation des façades verticales sud était plus rentable que celle des façades Est et Ouest, et ceci dans l'hémisphère Nord car dans l'hémisphère Nord car dans l'hémisphère Sud il faudrait choisir la façade Nord (1).

La serre verticale permet de s'affranchir presque totalement des problèmes d'étanchéité aux intempéries ( plus particulièrement à la pluie) et des problèmes de résistance mécanique dans le cas d'installations devant fonctionner dans des régions où des chutes de grêle ou de neige sont possibles.

#### Avantages :

En été, la serre peut fonctionner comme dispositif d'aspiration de l'air chaud et appel d'air frais par un système de volets. Il suffit pour cela d'ouvrir les deux passages de ventilation (7) et (10) qui restent fermés en hiver. La façade exposée au soleil sert alors d'aspirateur et l'air est expulsé en haut de la serre par le passage (7). Il se crée ainsi dans la pièce une dépression qui permet l'admission d'air en provenance de la face Nord par la voie (10).

#### Surfaces captantes par rapport au volume :

Les calculs se réfèrent aux façades Sud et donnent les rapports entre le volume V d'une habitation de conception traditionnelle et la surface S des capteurs situés au Sud. Les premières réalisations expérimentales ont montré que nous devons respecter la norme  $\frac{S}{V} = 0,1$  ( S exprimé en m<sup>2</sup> et V en m<sup>3</sup>) pour une maison où le système d'isolation thermique est très moyen. Pour une habitation mal isolée, le rapport augmente tandis qu'il diminue lorsque l'isolation thermique s'accroît.

Les essais d'ODEILLO ont montré que l'on pouvait, avec ce coefficient, demander au chauffage solaire entre les 2/3 et le 3/4 de la fourniture totale des calories.

Un nouveau système (présenté par L. BERNARD) emploie des "cheminées" pour le stockage de la chaleur. Le principe de la "cheminée" solaire est très simple. Une caisse plate de quelques centimètres d'épaisseur, de hauteur et de largeur quelconque. Elle est ouverte à ses extrémités supérieure et inférieure.

La face exposée au rayonnement est vitrée. La face opposée, qui constitue le fond de la caisse est garnie d'une feuille métallique mince noircie au noir de fumée. Le choix du métal employé, tôle de fer, tôle de laiton, de zinc ou d'aluminium est théoriquement indifférent. On assure l'isolation de la caisse avec de la laine de verre.

A l'intérieur de la caisse, sont disposées obliquement des toiles métalliques, ou mailles fines, également noircies au noir de fumée.

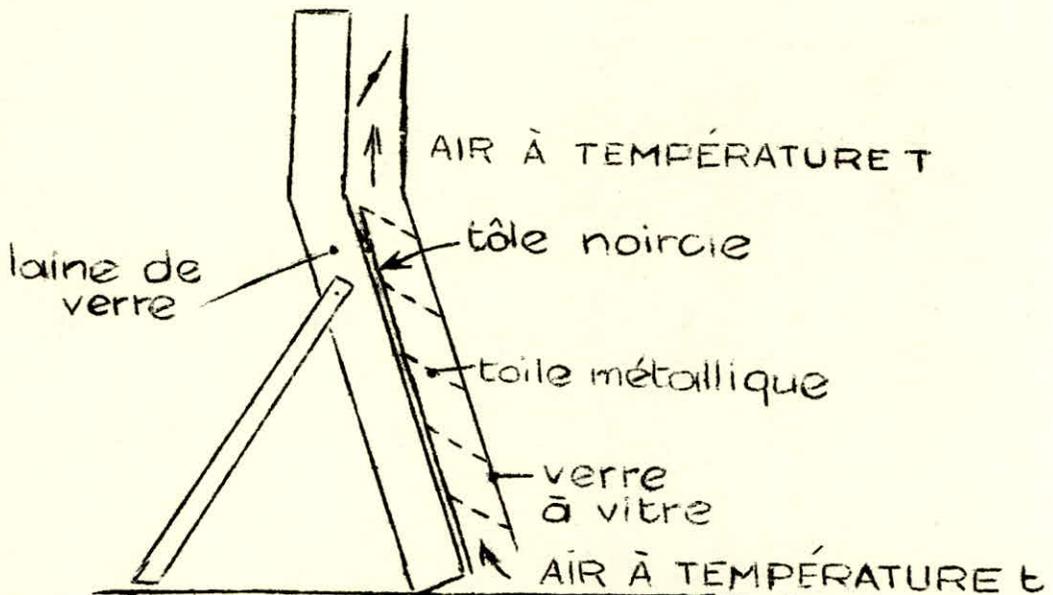


Figure 3.2

Le pouvoir absorbant d'un tel dispositif se montre très énergétique dès que l'appareil est exposé au rayonnement solaire, les surfaces noircies, toiles métalliques et tôles, s'échauffent rapidement.

Une théorie du fonctionnement de la cheminée solaire a été indiquée par L. BERNARD. Il établit d'une part la loi de l'élévation progressive de température du courant d'air pendant son ascension dans la cheminée, d'autre part, la valeur de la quantité emmagasinée dans la masse d'air en mouvement, et qui est susceptible d'être utilisé.

1°) - Loi de l'élévation progressive de la température

Du fait que l'absorption de l'énergie rayonnante solaire se produit sur toute la hauteur de la cheminée, la température de l'air, qui à l'orifice inférieur d'entrée, a la valeur même de la température de l'air ambiant, s'élève régulièrement, pour prendre sa valeur maximum à la sortie de la cheminée. Cette valeur maximum est elle-même d'autant plus élevée que le débit de l'air est plus faible.

La discussion mathématique montre que les échauffements (c'est-à-dire les valeurs de la différence de température de l'air et de l'air ambiant) croissent suivant une loi logarithmique. Cette loi est absolument générale, elle est toujours applicable, quelles que soient la hauteur de la cheminée et la vitesse du courant d'air qui y circule.

L'équation générale est :  $y = 1 - \frac{1}{e^x}$

Les ordonnées, dont l'échelle est graduée de zéro à l'unité, mesurent les valeurs de l'échauffement relatif de l'air  $\Theta$ , rapportées à la valeur  $(H)$  de l'échauffement maximum à la sortie de la cheminée.

$$y = \frac{\Theta}{(H)}$$

Les abscisses mesurent les valeurs d'une grandeur  $x$  qui est fonction de plusieurs facteurs.

$$x = \frac{h \cdot S}{m}$$

$h$  est une constante de l'appareil, c'est son coefficient de conductibilité extérieure ainsi défini : c'est la quantité de chaleur, exprimée en calories grammes, que perd chaque seconde, par rayonnement et conductibilité, l'unité de surface absorbante, pour un échauffement d'un degré. La valeur de  $h$  est égale à 4,2 pour les appareils expérimentés.

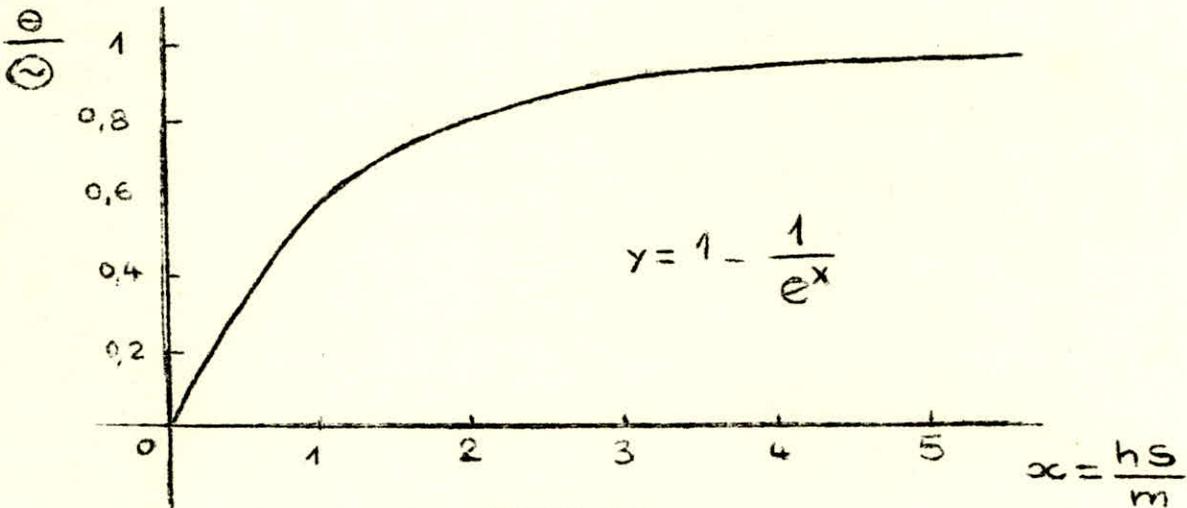
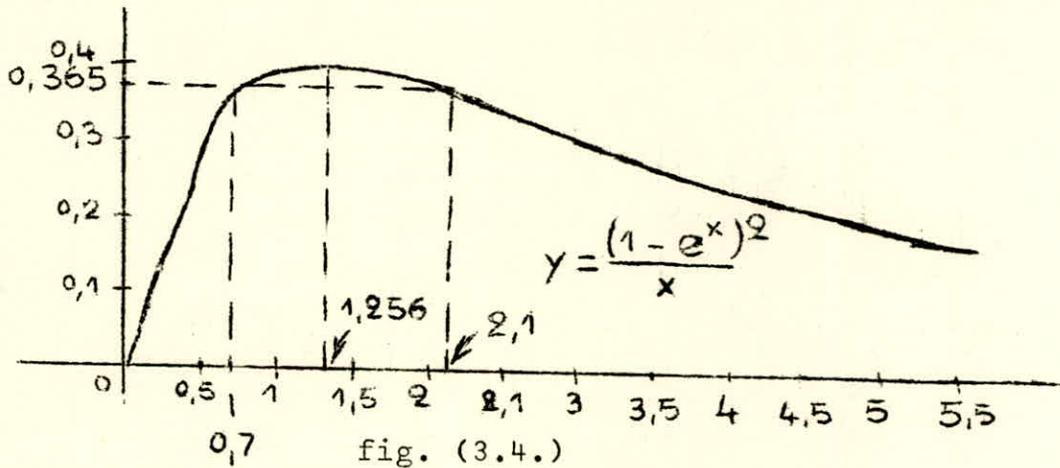


Figure 3.3

$S$  est la surface exposée au rayonnement solaire, la hauteur lui est proportionnelle.

$m$  est la valeur de la capacité calorifique de la masse  $M$  d'air qui circule dans la cheminée, par seconde et par mètre carré de surface absorbante, le débit lui est proportionnel.

Nous pouvons porter en abscisses, non plus les valeurs de  $x$ , mais celles de  $l$ , grandeur qui exprime numériquement la distance à l'entrée de la cheminée, d'un point déterminé de celle-ci.



Dans le cas, où l'orifice supérieur étant presque hermétiquement fermé, le débit de l'air est réduit à une valeur très faible, l'échauffement relatif à la sortie, présente sa valeur maximum, qui est l'unité. L'examen de la courbe (fig. 3.3.) montre que cette valeur est pratiquement atteinte par l'abscisse  $x = 5$ .

Il suffit de diviser l'axe des abscisses en fractions de l'unité (fig. 3.4.), le point I occupant la position numérotée 5 dans le cas général, pour lire directement sur la courbe, la progression de valeurs de l'échauffement, de bas en haut, de la cheminée.

Nous pouvons ainsi constater que pour un débit infiniment lent, cas où le registre est fermé, on obtient déjà 80 % de l'échauffement maximum au tiers de la cheminée mesuré à partir de la base, et 93 % de cet échauffement maximum au milieu de la cheminée.

## 2°) - Quantité de chaleur absorbée : énergie utilisable

La théorie montre que, dans la mesure où l'énergie susceptible d'être utilisée dans l'appareil de transformation, est fonction à la fois de la quantité de chaleur absorbée et de la température de l'agent de transport, il faut pour obtenir le meilleur rendement, régler la vitesse du courant d'air à une valeur bien déterminée.

La théorie donne pour la valeur de la puissance susceptible d'être produite par le courant d'air chaud, une loi qui se traduit par l'équation :

$$W = h \left( \frac{H}{x} \right)^2 (1 - e^{-x})^2$$

Nous avons montré précédemment ce que représente  $h$  et  $H$ . Ce sont deux constantes, pour un appareil donné, et dans des conditions d'isolation bien déterminées.

Par contre, le rapport  $\left( \frac{1 - e^{-x}}{x} \right)^2$  est variable.

On le représentera par  $y$ , et on pourra lui donner le nom de facteur de puissance de l'appareil.

Les variations de la puissance se traduiront par les variations de la fonction :

$$y = \left( \frac{1 - e^{-x}}{x} \right)^2$$

et les valeurs du facteur de puissance se liront en ordonnées sur la courbe représentative de la fonction.

Les valeurs de  $x$ , portées en abscisses, sont celles qui ont été définies précédemment. Nous avons vu que :

$$x = \frac{h \cdot S}{m}$$

où  $m = MC$  . (  $c$  étant la chaleur spécifique de l'air )

d'où 
$$x = \frac{h \cdot S}{MC}$$

Il est intéressant de noter que les valeurs de  $x$  sont inversement proportionnelles à celles du débit de l'air  $M$ . L'origine de l'axe des abscisses correspond dans ces conditions au cas où la chaleur de  $M$ , débit de l'air, serait égale à l'infini, pratiquement le cas d'une cheminée dont on pousserait au maximum, par tirage forcé, le débit de l'air qui y circule.

Si au contraire, le débit s'annule, c'est le cas de la cheminée fermée,  $x$  prend une valeur asymptote à l'axe des abscisses. Pour des cas extrêmes, la fonction s'annule, l'appareil ne donne aucune puissance utilisable.

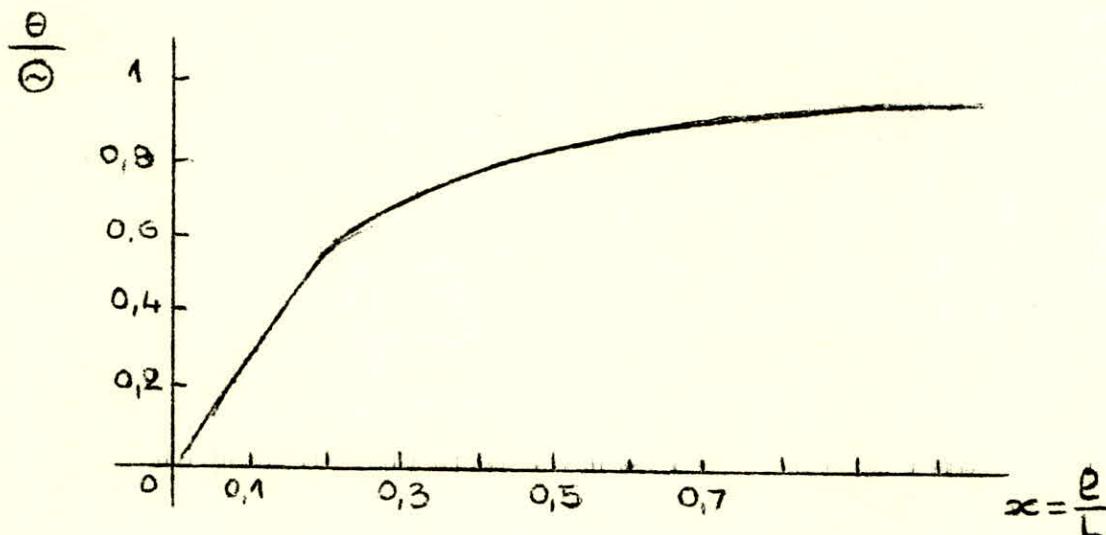


Figure 3.5

Une "cheminée" solaire, réalisée d'après les principes qui viennent d'être succinctement exposés, est donc productrice d'un courant d'air chaud, d'un débit extrêmement régulier, et qui est susceptible de nombreuses applications.

La cheminée se prêtera et cela sans qu'il soit nécessaire de lui faire subir aucune modification, au chauffage des locaux, ainsi qu'à l'alimentation de tous les appareils de séchage.

PARTIE EXPERIMENTALE

INTRODUCTION

Le projet de chauffage de la chambre des machines, existant dans le hall du Département du Génie Chimique, reste très proche du schéma classique.

Le système de captage se présente comme suit : un mur accumulateur en briques de 20 cm d'épaisseur, peint en gris, se développe sur la façade Ouest. Cette façade a été choisie parce qu'elle présente deux ouvertures, mais il faut signaler que ces orifices n'ont pas les mêmes dimensions (voir fig. 3.6.) et pour cette raison, on a placé un volet qui nous permettra de réduire l'ouverture de l'orifice supérieur (fig. 3.7.). Ce mur est doublé extérieurement par un film plastique en polyéthylène. La surface de la serre verticale est de 4,4 m<sup>2</sup>. La chambre présente une surface et un volume respectivement égaux à :  $S=48\text{m}^2$  et  $V=143\text{m}^3$

Comme nous l'avons mentionné plus haut, la surface captante se situe à l'Ouest, ce qui ne donne pas des conditions particulièrement favorables pour capter un maximum de l'énergie.

Par exemple, le 20 Mai (époque du début des mesures), le soleil s'est présenté rasant à 13 h 30 et a cessé d'éclairer cette face à 16 h 50.

Nous étions conscients de ce manque relatif d'ensoleillement, mais nous avons choisi cette façade du hall afin de profiter au maximum de son architecture comme dit plus haut.

Avant de procéder aux mesures de température proprement dites, nous avons consacré beaucoup de temps à la mise en route et à l'étalonnage de l'enregistreur Philips à 12 voies existant dans la section génie chimique.

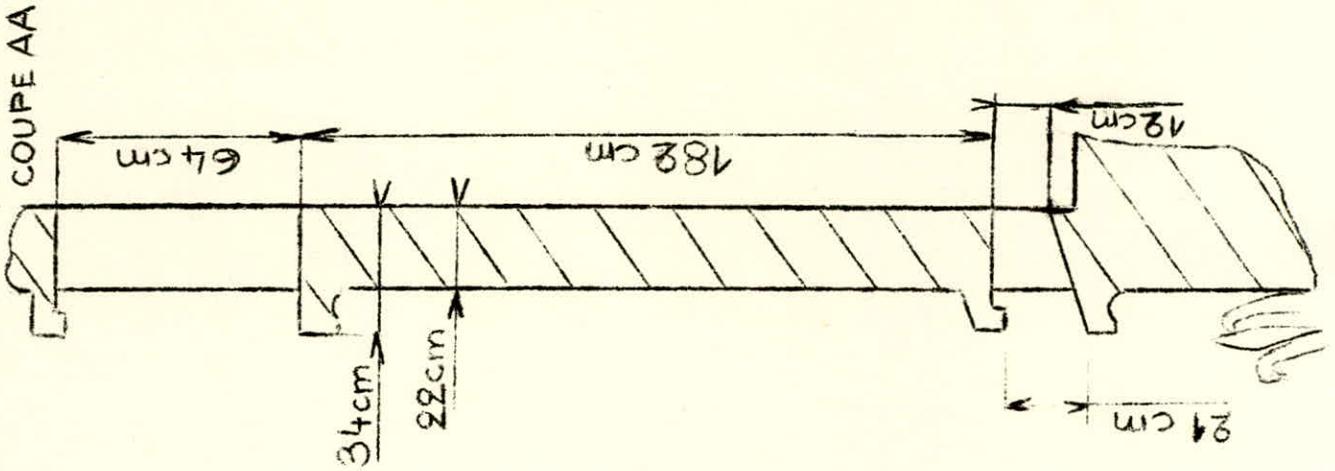
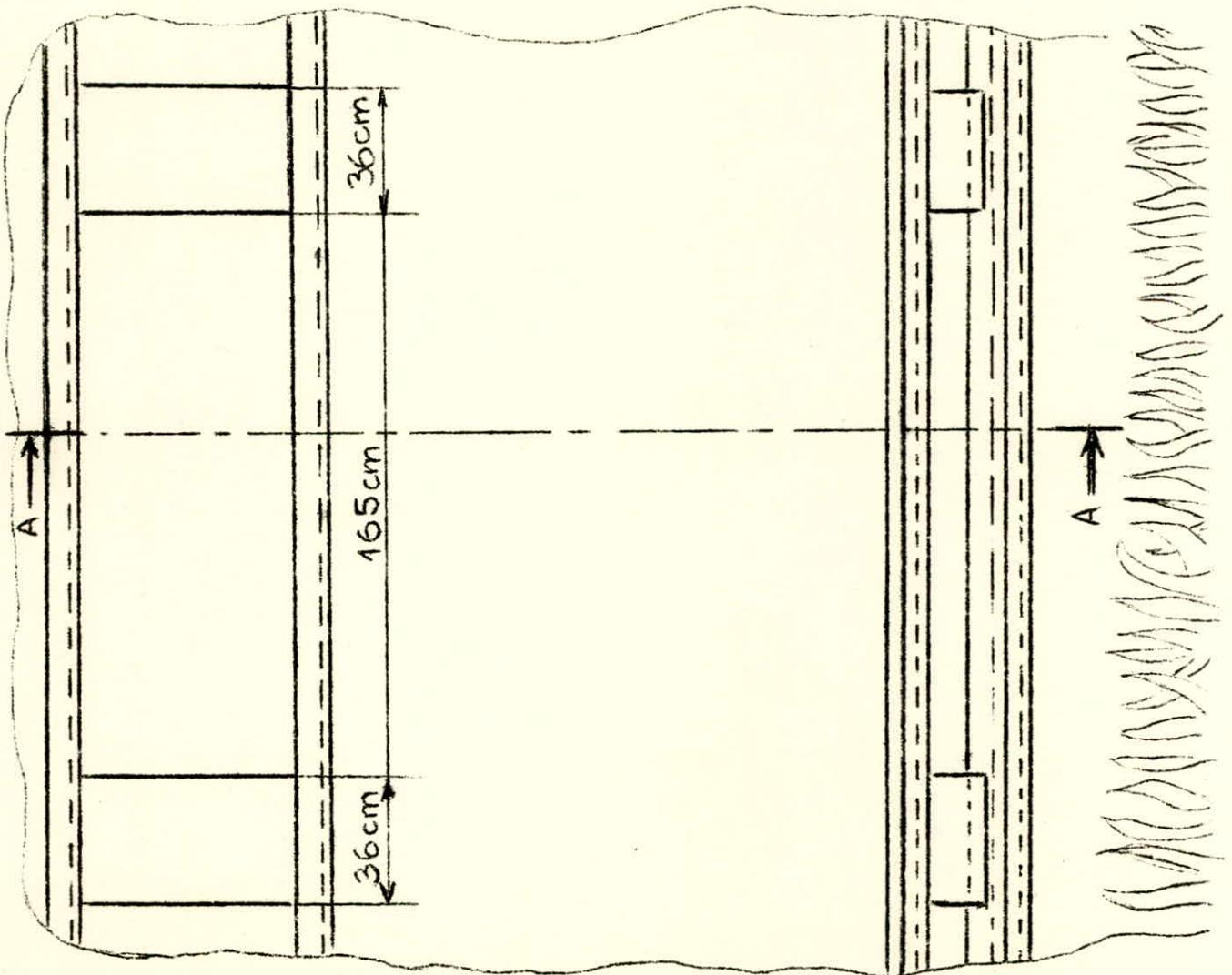
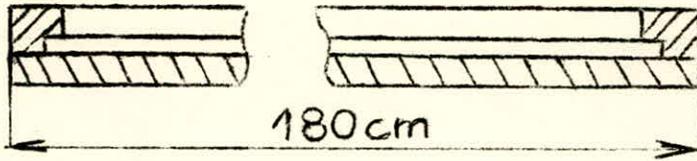


Figure 3.6



COUPE AA



COUPE CC

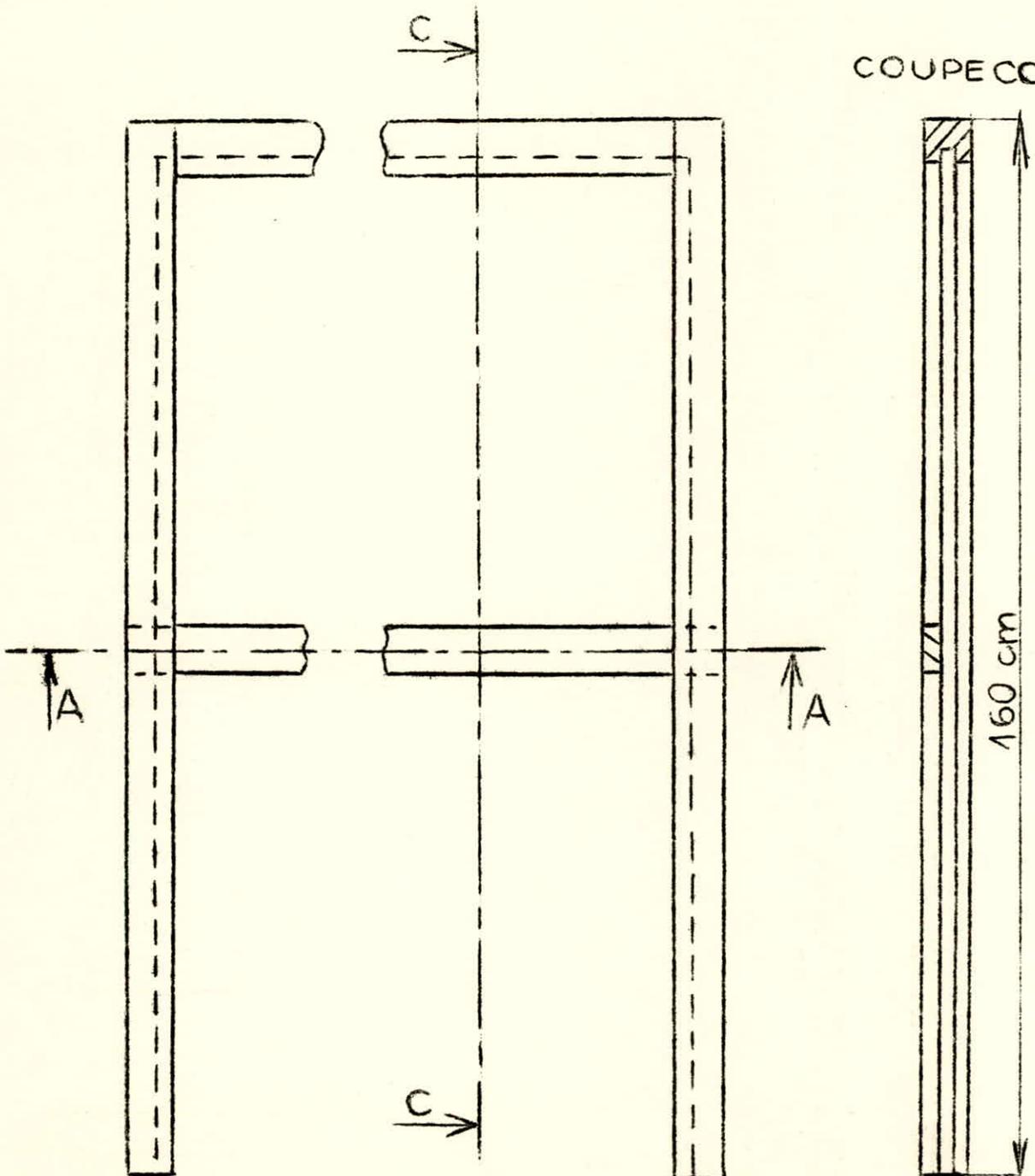


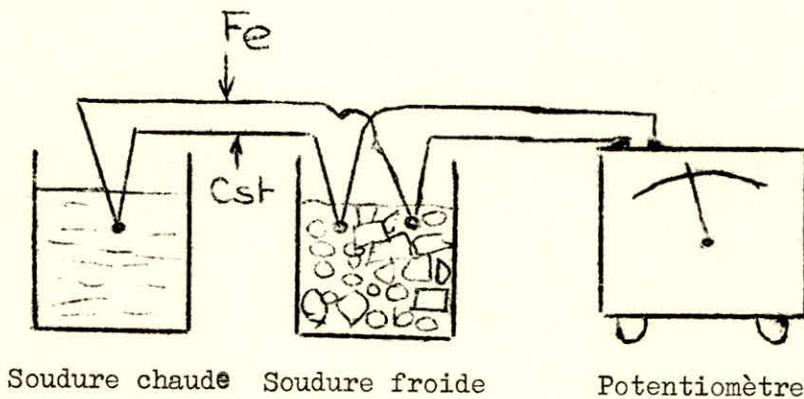
Figure 3.7

Mise en place des moyens de mesure

1°) - Etalonnage des thermocouples

Dans un premier temps, nous disposions du couple Fer-Constantan et nous avons voulu vérifier la courbe d'étalonnage proposée pour ce couple de métaux.

Pour cela, nous avons réalisé un montage schématisé ainsi :



Les soudures ont été faite à l'étain.

La soudure chaude était plongée dans un récipient contenant de l'eau rechauffée : on relevait la température de cette eau à l'aide d'un thermomètre à mercure.

Pour économiser du fil de thermocouple, nous avons soudé à ceux-ci des câbles de compensation en cuivre, les soudures ainsi constituées forment la source froide du couple ; celle-ci est plongée dans un vase Dewar, contenant de la glace fondante, afin d'avoir une température de référence bien égale à 0°C.

La différence de potentiel provoquée par l'écart de température entre la soudure froide et la soudure chaude est mesurée à l'aide d'un potentiomètre.

En faisant varier la température de l'eau chaude, nous avons obtenu les résultats consignés sur le tableau ci-dessous :

températures en °C	41	39,4	37,15	35,5	33,8	31,8	30,6	29,4	28,25
différences de potentiel en mV	2,23	1,94	1,84	1,80	1,69	1,55	1,54	1,48	1,43
températures en °C	27,2	24,7	23,5	21,5	19,85	18,1	16,4	15,8	13,8
différences de potentiel en mV	1,39	1,27	1,21	1,11	1,01	0,96	0,84	0,80	0,71

Tableau 1.

Sur la figure 3.8., nous avons tracé la courbe représentative qui est une droite passant par l'origine dans la gamme de température étudiée.

Sur le même graphique, nous avons représenté la courbe d'étalonnage utilisée au Département de Mécanique.

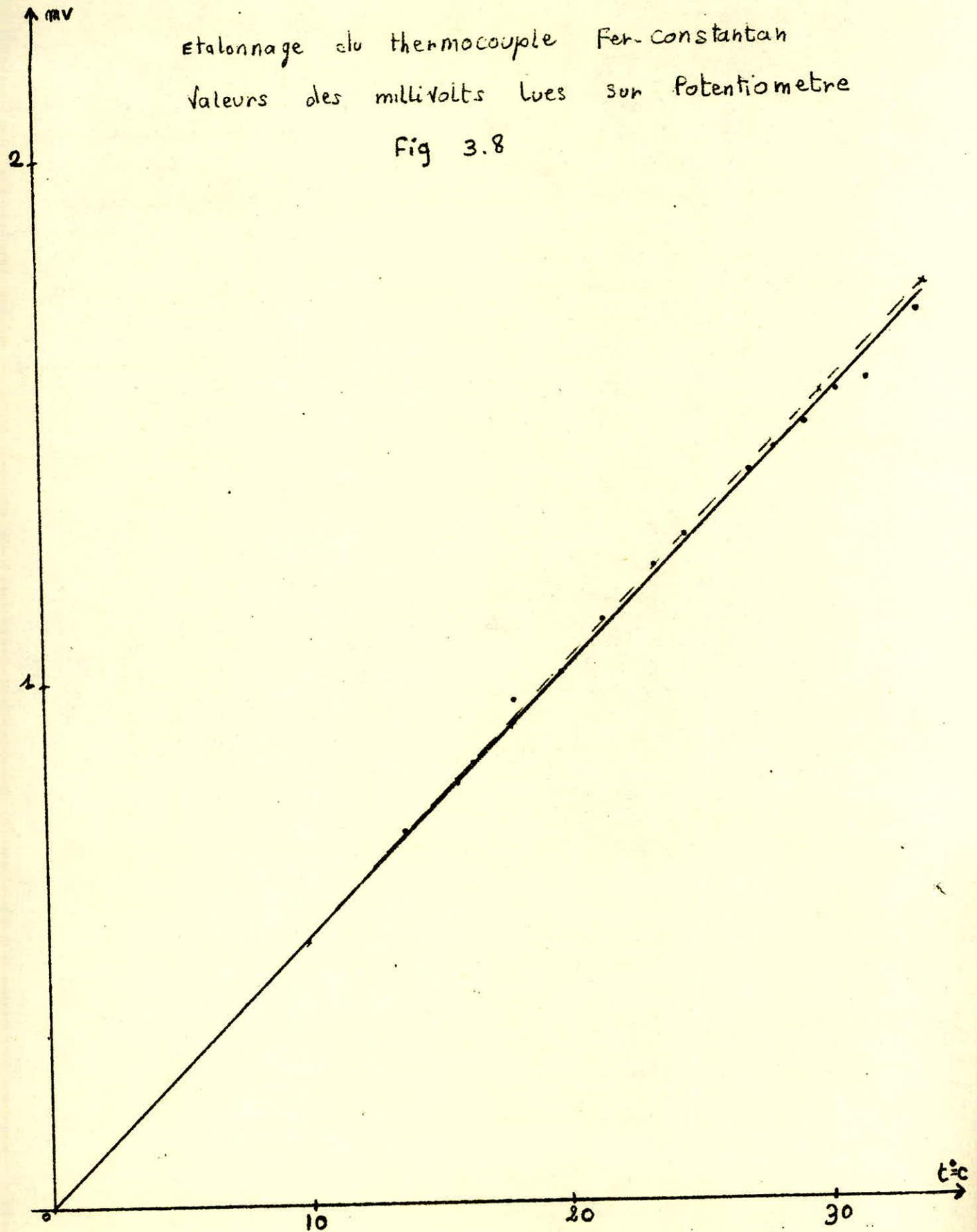
Les deux courbes sont très voisines par exemple pour 30°C l'écart entre les deux courbes est de 0,02 mV, soit 1,2 %.

Nous avons pu évaluer l'erreur absolue commise dans la mesure, égale à  $\pm 1^\circ\text{C}$ .

Cependant, nous tenions à obtenir un enregistrement des températures pour pouvoir suivre de près les phénomènes d'échauffement de l'air, c'est pourquoi nous avons étalonné les déplacements de l'index de l'enregistreur Philips avec le potentiomètre manuel.

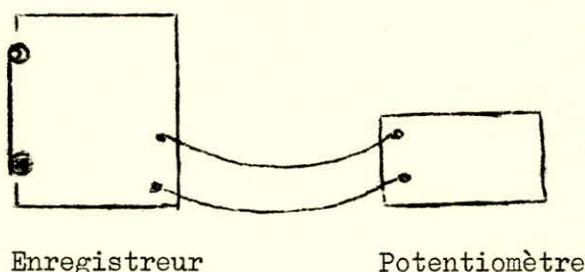
etalonnage du thermocouple Fer-Constantan  
valeurs des millivolts lues sur potentiometre

Fig 3.8



2°) - Etalonnage de l'enregistreur Philips

Nous avons réalisé le montage suivant :



Le potentiomètre manuel était placé dans la position débit et pouvait délivrer une tension comme comprise entre zéro et dix mV.

Cette tension a été injectée aux bornes de l'enregistreur, ce qui nous a permis de repérer la déviation de l'aiguille de l'enregistreur pour les différentes valeurs affichées au potentiomètre.

Nous avons obtenu le tableau des valeurs ci-joint :

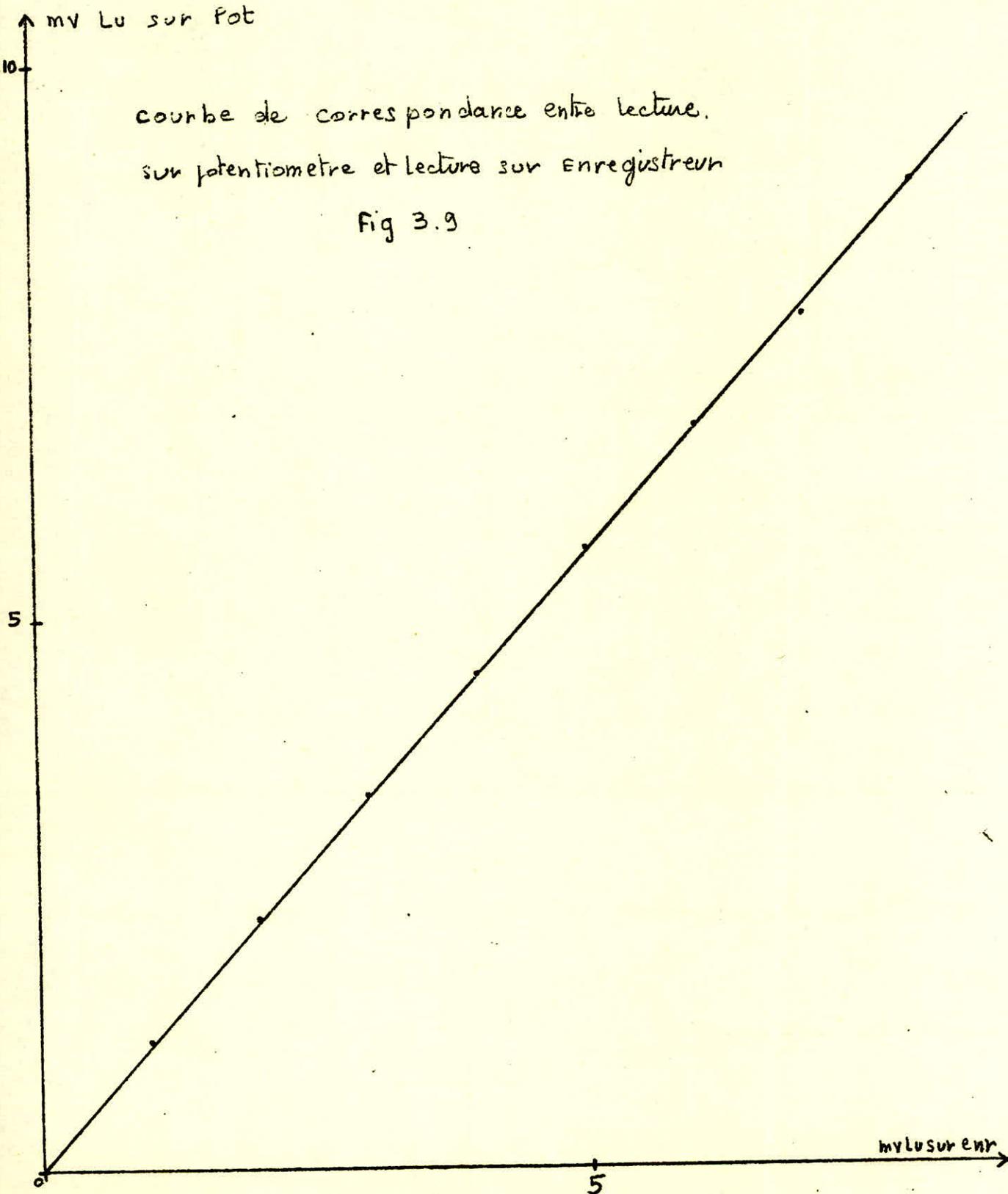
mV	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
u sur l'en-	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
registreur	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	!	!	!	!
mV	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
u sur le	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
Potentiomètre	1,17	2,27	3,39	4,49	5,62	6,71	7,72	8,92	10,00	11,15	!	!	!	!

Tableau n° 2.

La courbe représentative est une droite passant par l'origine (fig. 3.9.).

courbe de correspondance entre lecture,  
sur potentiometre et lecture sur Enregistreur

Fig 3.9



3°) - Etalonnage de l'ensemble formé par le thermocouple et l'enregistreur

Il se déduit immédiatement des deux courbes précédentes, il consiste à éliminer la variable potentiel du potentiomètre dans le système formé par les deux relations :

- température donnée par le thermocouple - d.d.p. au potentiomètre
- d.d.p. au potentiomètre - d.d.p. à l'enregistreur.

Températures	40	38	35	30	28	25	20	18	15	10
mV sur potenti	2,02	1,91	1,76	1,51	1,41	1,26	1,01	0,91	0,76	0,51
mV sur enregistreur	1,8	1,7	1,6	1,35	1,25	1,15	0,9	0,8	0,7	0,45

Tableau n°3

La courbe (fig. 3.10.) représentative de la relation liant la d.d.p. aux bornes de l'enregistreur et la température donnée par le thermocouple est aussi une droite passant par l'origine.

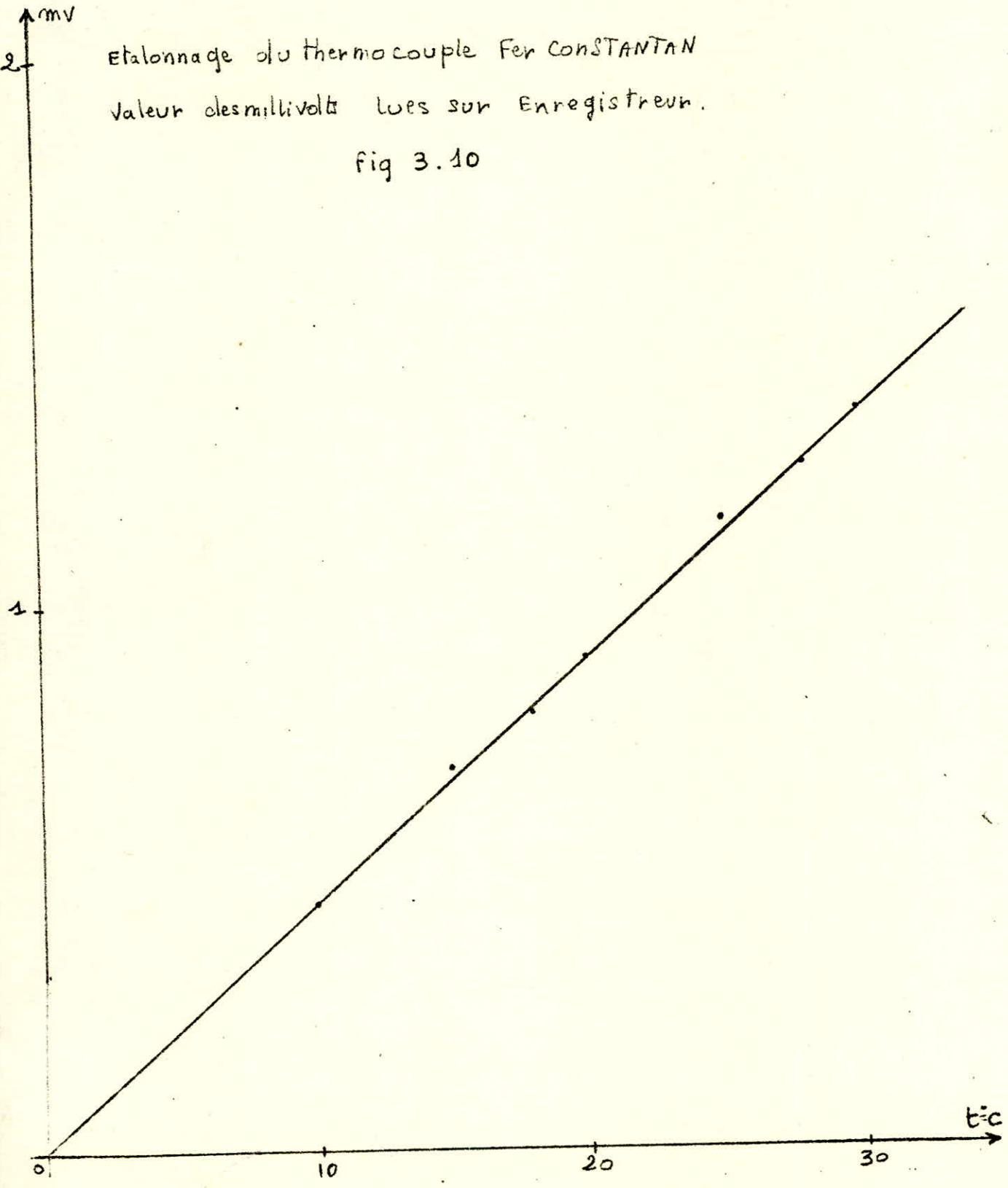
Notons que la mesure des potentiels de l'enregistreur se fait l'intermédiaire de l'index qui se déplace le long de la règle graduée du cadran.

4°) - Construction d'une prise de terre

Pour éliminer toutes les erreurs fixes liées à la mesure des potentiels à l'aide de l'enregistreur, Monsieur MULLER du Département Mécanique, nous a conseillé de mettre en place une prise de terre suivant les normes en vigueur dans ce domaine.

Etalonnage du thermocouple Fer CONSTANTAN  
Valeur des millivolt lus sur Enregistreur.

fig 3.10



Ces normes recueillies au Département Electronique sont les suivantes : une bonne prise de terre pour mesurer des potentiels de l'ordre du m.V doit être constituée comme suit :

- un trou de 1 m<sup>3</sup> dans la terre proche du bâtiment
- un tube de cuivre vertical de diamètre 3 cm et d'épaisseur 2 mm ; ce tube est percé de trous de 2 mm.
- trois plaques de cuivre horizontales de 1 m<sup>2</sup> de surface soudées au tube vertical et régulièrement espacées.
- le tube de cuivre doit plonger dans un mélange de sable, de sel et de charbon de bois réparti sur 20 cm d'épaisseur.

Nous avons réalisé la prise de terre suivant ces normes : avant chaque utilisation de l'enregistreur, nous avons arrosé abondamment la prise de terre jusqu'à débordement de l'eau par-dessus le tube de cuivre.

Nous suggérons simplement d'installer une tresse en cuivre courant sur tous les murs du hall, et reliée au tube de cuivre, pour que cette installation soit utilisable pour d'autres mesures électriques.

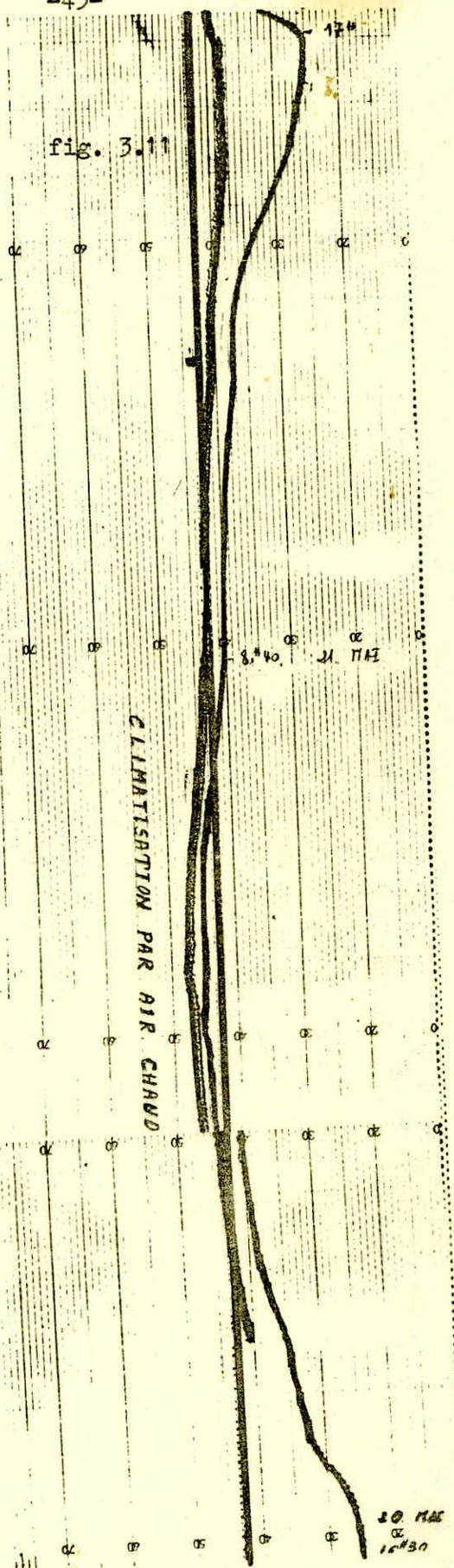
### Résultats expérimentaux

Notre premier but était de constater l'échauffement que subissait l'air froid pris dans la pièce lorsqu'il passait dans le capteur. Pour cela, nous avons fixé un thermocouple sur la grille inférieure d'entrée de l'air à la base du mur et un autre sur la grille supérieure à la sortie de l'air.

Nous avons fait un enregistrement de la température suivant les deux positions déjà précisées, pendant 24 heures d'affilées et nous avons obtenu la courbe ci-jointe - figure 3.11.

fig. 3.11

CLIMATISATION PAR AIR CHAUD



10 MAE  
DE  
1230

Nous constatons sur celle-ci que la température croît à partir de 7 heures du matin pour atteindre un maximum entre 16 h 30 et 17 h, elle décroît rapidement après la disparition du soleil et ceci jusqu'à 18 heures, pour ensuite décroître plus lentement (cette décroissance lente est sans doute due à l'effet d'accumulation de la chaleur dans le mur).

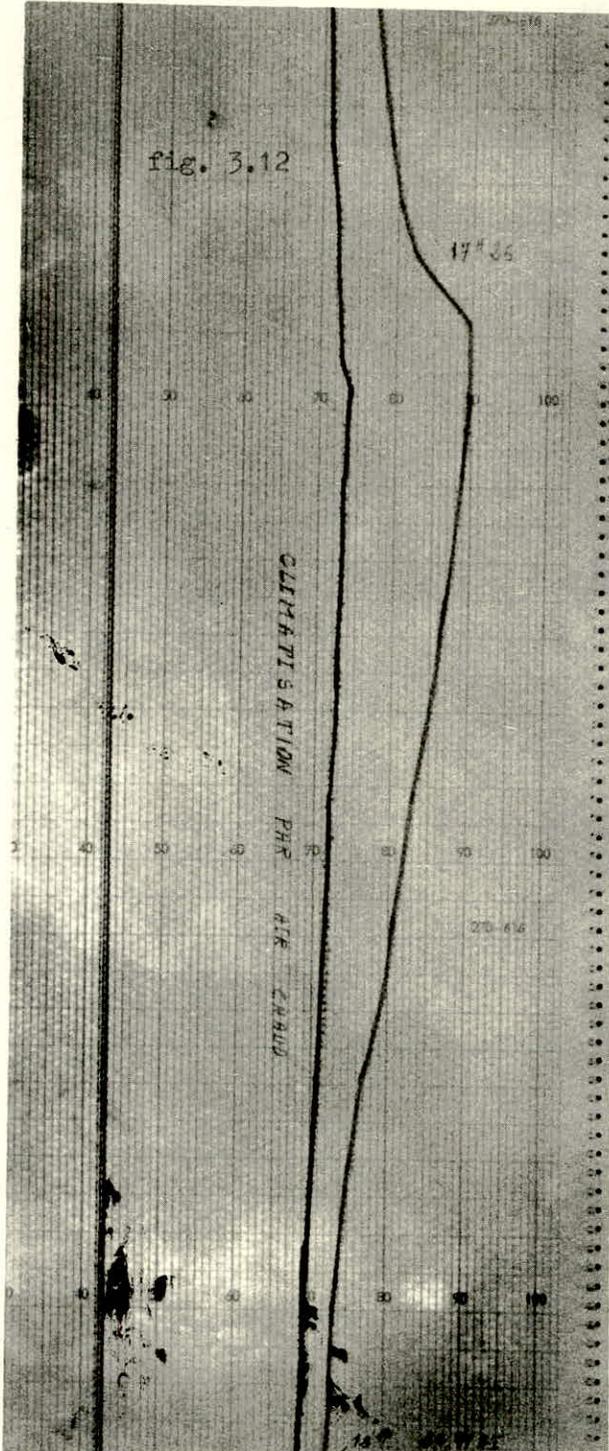
Il est à noter qu'il n'y a pas eu inversion des températures durant la nuit et que le capteur a continué à jouer le rôle de chauffe-air pendant cette période nocturne.

Durant cette première expérience, l'ouverture du panneau limitateur du débit d'air est tel que la section du passage de l'air est identique à celle de l'entrée. L'écart maximum de température noté durant cette expérience est de 14,6°C., ce qui est important vu les conditions d'exposition très défavorables.

La deuxième but de nos expériences de chauffe-air solaire était de voir l'influence du facteur débit d'air sur l'accroissement de température de l'air. Le panneau en bois limitateur de débit était placé à cet effet; dans une deuxième expérience, nous avons réduit l'orifice de sortie à une largeur de 2 cm ; mais le temps était gris et l'accroissement maximum obtenu n'a été que de 11°C. Nous ne pouvons tirer aucune conclusion de ces résultats, vu la modification des conditions atmosphériques. ( voir figure 3;12 )

#### Evaluation de la puissance calorifique du capteur vertical

Nous avions l'intention, au départ, de mesurer la vitesse de l'air circulant dans le capteur, afin d'obtenir la puissance calorifique de celle-ci ; le manque d'appareillage disponible sur place, nous a conduit à faire une évaluation théorique à partir des résultats de Louis Bernard cités plus haut (voir cheminée solaire).



Rappelons un premier point important, le flux de chaleur emporté par l'air circulant dans la cheminée est maximum pour un débit d'air donné par :

$$x = 1,25$$

$$\text{selon l'expression : } x = \frac{h.S}{m} \quad (1)$$

$h = 4,2 \text{ cal/m}^2\text{s}^\circ\text{C}$  pour les appareils expérimentaux soit

$$h = 15,1 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

par Monsieur Bernard, nous prendrons une valeur identique pour le notre.

$$S = \text{surface de notre capteur} = 2,67 \times 1,65 = 4,4 \text{ m}^2$$

$m = GC_p$  : produit du débit massique d'air par sa chaleur massique à pression constante.

De la relation (1), on peut déduire  $G$  :

$$G = \frac{h.S}{C_p.x} = \frac{15,1 \times 4,4}{0,24 \times 1,25} = 222 \text{ kg/h}$$

et ensuite la vitesse de l'air à l'intérieur du panneau solaire.

La section de passage de l'air entre le mur et le film plastique est  $= 0,22 \times 1,65 = 0,36 \text{ m}^2$ .

Si la température de l'air est de  $27^\circ\text{C}$  en moyenne, la masse volumique est  $= 1,293 \times \frac{273}{300} = 1,176 \text{ kg/m}^3$

$$\text{et donc la vitesse} = \frac{222}{1,176 \times 0,36 \times 3600} = 0,15 \text{ m/s.}$$

La grille du bas a une section de  $0,08 \times 1,65 = 0,132 \text{ m}^2$

La vitesse de l'air à ce niveau est donc de :

$$0,15 \times \frac{0,36}{0,132} = 0,41 \text{ m/s.}$$

Cette valeur est tout à fait vraisemblable et pourrait être vérifiée par des mesures ultérieures.

Considérons un échauffement moyen de 10°C pour l'air circulant.

Il s'ensuit que la puissance calorifique est égale à :

$$222 \times 0,24 \times 10 = 533 \text{ kcal/heure.}$$

Ce résultat appelle deux remarques :

1°) - On peut considérer que pendant les heures d'ensoleillement, le panneau est équivalent à un radiateur électrique, d'une puissance de 620 Watts.

La salle des machines équipée de huit panneaux identiques pourrait donc capter 5 kW au total pendant les heures d'ensoleillement.

Une même salle exposée au Sud pourrait donc très largement subvenir à ses besoins en calories par un montage de ce type.

2°) - Calculons le rendement en faisant l'hypothèse d'une puissance énergétique d'origine solaire au sol de 1 kW/m<sup>2</sup>, ce qui est manifestement trop fort, le rendement du capteur est donc de

$$\frac{0,620}{4,4 \times 1} = 14 \%$$

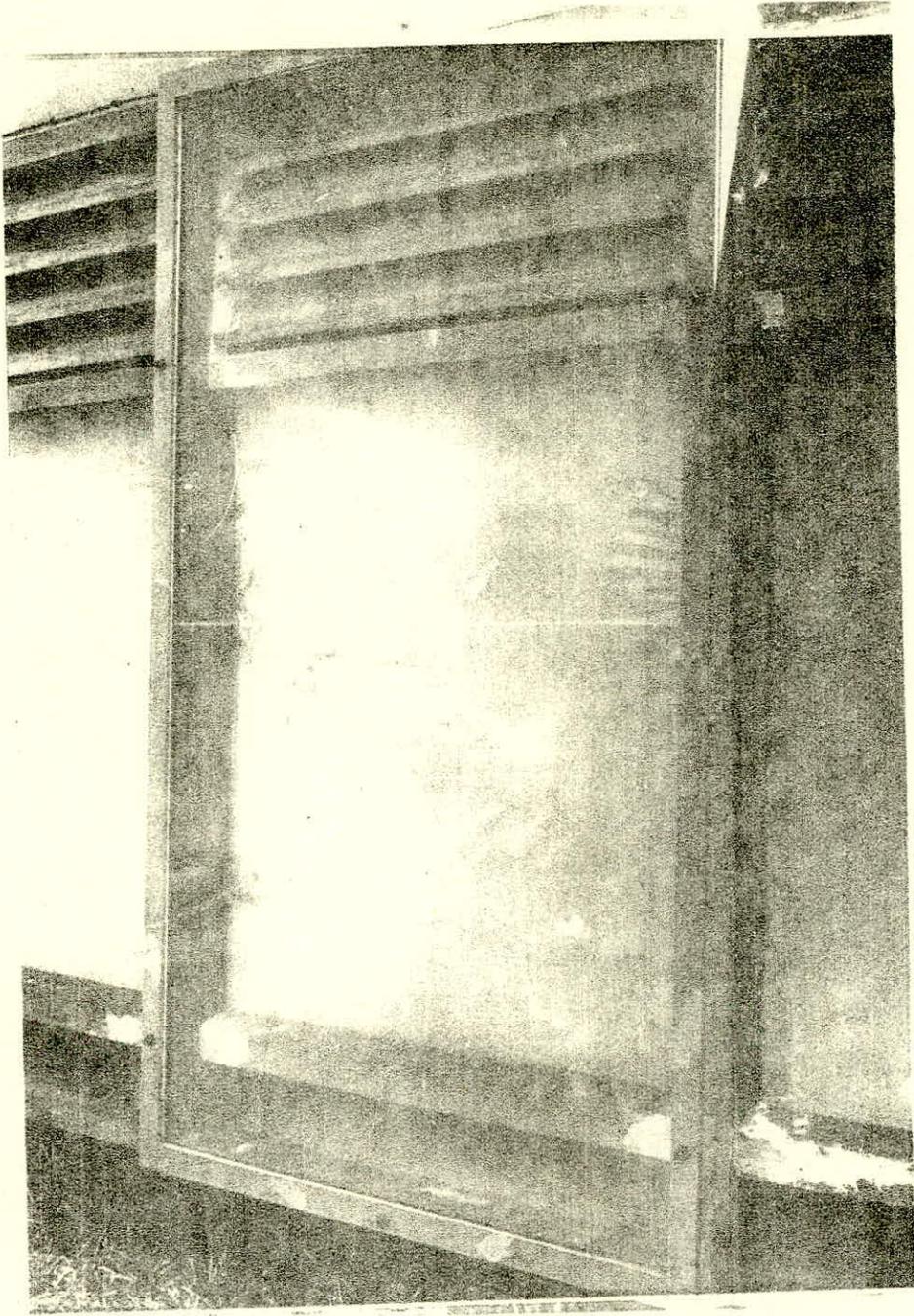
Cette valeur est faible dans l'absolu, mais loin d'être négligeable puisque le système de chauffage semble satisfaire aux besoins de la salle.

### Conclusion

Il peut être invraisemblable, qu'avec des conditions de travail aussi défavorables, on est arrivé à noter une différence de température, entre le haut et le bas du panneau égale à 15°C. Le rayonnement solaire est donc capté et une partie de la chaleur est accumulée.

Ce résultat peut être amélioré en utilisant au mieux la chaleur existante.

En premier lieu, il faudrait limiter les pertes par les trous d'aération en plaçant des volets maniables. On pourrait par la suite peindre le mur en noir pour augmenter le pouvoir absorbant, et remplacer le film plastique par du verre.



Panneau vertical ayant servi à  
la climatisation par air-chaud

CHAPITRE IV. :

CHAUFFE EAU SOLAIRE

PARTIE THEORIQUE

La facilité relative avec laquelle l'énergie solaire peut réchauffer un fluide a poussé de nombreux chercheurs à réaliser des chauffe-eau solaires.

Dans les pays où ils se sont répandus, il existe une grande variété de chauffe-eau solaires, du plus simple au plus complexe, car de nombreuses améliorations techniques sont possibles. Un second vitrage interposé à un ou deux cm en avant du premier, permet par exemple de réduire toutes les pertes par rayonnement. Des revêtements sélectifs ont été mis au point pour absorber un maximum de radiations solaires tout en n'émettant qu'un très faible rayonnement. On peut également concentrer la lumière en disposant des miroirs réfléchissant les rayons. Mais ces miroirs doivent être orientés face au soleil.

Principe de fonctionnement

Sous sa forme la plus simple, le chauffe-eau consiste en un bac noir horizontal de faible hauteur et contenant de l'eau. Dès que l'eau du bac s'échauffe, elle perd de la chaleur :

- par évaporation de l'eau
- par rayonnement sous forme d'infra-rouge lointains
- par convection avec l'air ambiant
- par conduction à travers les matériaux qui composent le collecteur.

Les chauffe-eau sont donc recouverts de vitrages en verre ou en plastique pour réduire le rayonnement et l'effet des courants d'air qui emportent la chaleur.

Le vitrage est transparent à la lumière du soleil mais opaque aux radiations infra-rouges émises par l'eau chaude, retenant ainsi la chaleur.

On réduit les pertes par conduction et convection en plaçant l'élément absorbant dans une caisse calorifugée. L'intensité du rayonnement solaire absorbée étant maximum quand la surface exposée est perpendiculaire aux rayons du soleil l'absorbant est habituellement tourné vers l'équateur et incliné par rapport à l'horizontale. L'angle varie avec les changements journaliers et saisonniers du soleil. Mais si la surface exposée est inclinée de l'angle correspondant à la latitude de l'emplacement géographique, les absorbants sont à leur position optimum en plein midi, aux équinoxes de Mars et Septembre. Mais il faut plus de chaleur en hiver qu'en été, le soleil y est plus bas dans le ciel, alors la position la plus favorable sera en ajoutant dix degrés à l'angle de latitude (1). Exemple : latitude  $30^{\circ}$  N, la surface tournée vers le sud, sera inclinée de  $40^{\circ}$  par rapport à l'horizontale.

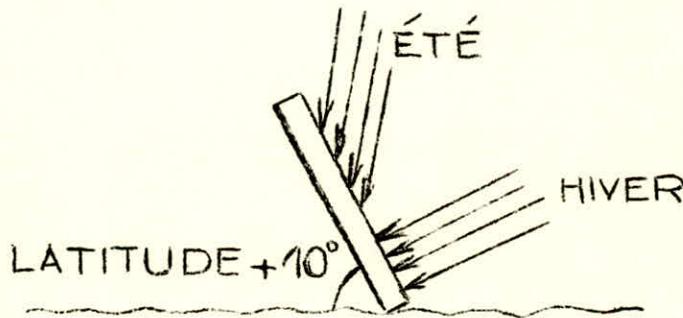


fig. (4.1.)

La surface exposée transmet de la chaleur à ce qui l'entoure et en particulier à l'eau qui circule dans ce collecteur. L'eau chauffée ainsi est stockée dans un réservoir calorifugé, ce qui permet son utilisation pendant la nuit et le matin. La réservoir aura un rapport surface/volume beaucoup plus petit que celui du collecteur. La circulation entre le collecteur et le réservoir se fait par thermo-siphonnage. L'eau chaude étant moins dense, elle s'élève dans le réservoir au niveau haut.

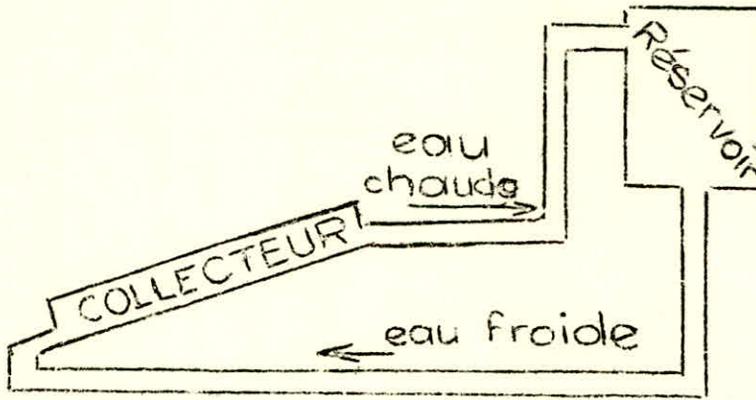


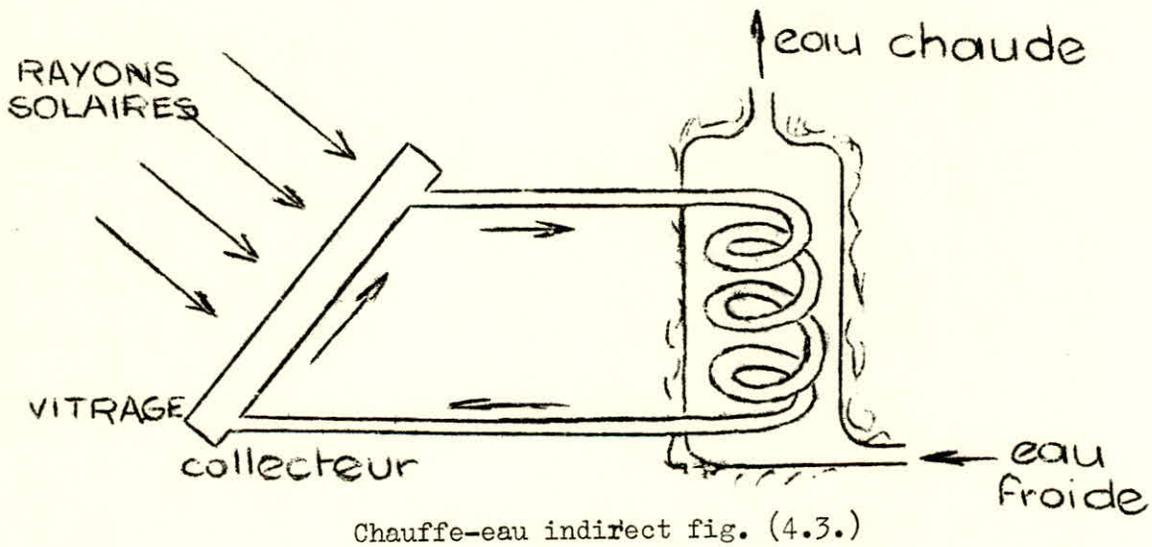
fig (4.2.)

Une méthode plus ingénieuse, destinée en particulier à éviter le risque de gel, consiste à réaliser un "chauffe eau indirect" c'est à dire un dispositif dans lequel le liquide chauffé n'est pas l'eau employée mais un liquide à bas point de congélation (eau et antigel par exemple). Ce liquide, chauffé dans un collecteur d'énergie solaire, circule dans un serpentin traversant le réservoir d'eau à chauffer. Le système comporte donc quatre éléments principaux (2) qu'il est possible de représenter schématiquement :

- un collecteur d'énergie solaire constitué par des panneaux captants (principe de capteurs-plans) composés, par exemple, de feuilles d'aluminium de 1,5 mm d'épaisseur dont la surface est noircie avec une peinture mate ordinaire, feuilles recouvertes elles-mêmes d'une plaque de verre ordinaire de 3 mm d'épaisseur placée à une distance de l'ordre de 8 à 15 mm des feuilles. Les panneaux captants sont autolavants sous l'effet de la pluie en raison de la déclivité qui est donnée au système afin de capter de façon optimale les rayons solaires (le collecteur doit naturellement être orienté Est-Ouest ou au Sud et incliné de  $10^\circ$  de plus que la latitude géographique où il est installé).
- un circuit hermétique caloporteur constitué d'eau et d'antigel ou d'un mélange d'eau distillée et d'éthylglycol dégazéifié fonctionnant en thermo-siphon ; la quantité de liquide exigée est très réduite ce qui lui permet, du fait de sa très faible inertie, de réagir rapidement à des brèves <sup>à</sup> isolations pendant les journées/enseillement variable.

- un ou plusieurs réservoirs d'accumulation d'une capacité de 30 à 50 litres par  $m^2$  de surface captante (3). Le réservoir (qui est en fait un ballon calorifugé) doit être placé au-dessus du collecteur afin d'éviter l'inversion du cycle thermique pendant la nuit.
- une isolation thermique, faite avec des matériaux tels que la laine de verre et du polystyrène expansé.

Le rendement global d'un tel système varie avec l'insolation et peut atteindre 70 % par beau temps contre 30 % par temps couvert. Un tel dispositif est au demeurant facile à installer sur un toit en terrasse et peut être adapté pour les toits en pente : on place le collecteur directement sur le toit et le ballon plus haut que le collecteur dans une fausse cheminée.



### Etude théorique du fonctionnement des collecteurs plans

#### A. - Propriétés des collecteurs plans.

Si on expose le bac noir sans vitrage au rayonnement solaire, il se comporte sensiblement comme un corps noir et rayonne dans toutes les directions et la puissance rayonnée par unité de surface égale, d'après la loi de STEFAN à  $T^4$  avec :

- $\sigma$  : constante de BOLTZMANN
- et - T : température absolue en °K.

D'autre part les pertes par convection entre la plaque et l'extérieur sont fonction de l'écart de températures et s'exprime par une fonction de la température, pertes =  $f(\theta)$ . Comme puissance reçue par la plaque noire ou tiendra compte du rayonnement global  $G$  composé du rayonnement direct et **diffus**, ainsi que le rayonnement du milieu ambiant à la température  $T_0$  :  $\sigma T_0^4$

L'équation d'équilibre thermique de la plaque en résulte directement, elle s'établit lorsque les pertes sont égales aux gains :

$$\sigma T^4 + f(\theta) = G + \sigma T_0^4$$

La quantité  $f(\theta)$  dépend des conditions atmosphériques et de l'orientation de la surface soumise à la convection.

L'étude théorique d'un collecteur plan est en fait très complexe car le rayonnement **réemis** par le corps noir, atteint la face interne du verre sous différentes incidences pour lesquelles le facteur de réflexion de ce dernier varie dans une large gamme. Aussi la quantité d'énergie solaire  $G$ , reçue par unité de surface et par unité de temps, est connue par un endroit déterminé, est donné pour un rayonnement **perpendiculaire**. Il faut donc multiplier ce chiffre par le cosinus de l'angle que fait le collecteur avec le rayonnement pour avoir la bonne valeur.

#### B, - Etude de l'effet de vitrage.

Pour **diminuer** les pertes par convection, il est nécessaire d'atténuer la différence de température entre la plaque et le milieu ambiant, La présence d'un vitrage qui emprisonne une couche d'air stable répond à ce but.

Dans une première étude nous négligerons les pertes par réflexion dues aux vitres du collecteur et nous présenterons ci-dessous un bilan thermique qui ne fait intervenir que le phénomène de rayonnement.

##### 1°) - Le collecteur a un seul vitrage

La plaque noire reçoit le rayonnement solaire globale  $G$  et le rayonnement dû au verre s'écrit :  $\sigma T_v^4$

Le rayonnement perdu par la plaque s'écrit :  $\sigma T_p^4$

L'équation d'équilibre thermique de la plaque s'écrit donc :

$$\sigma T_p^4 = G + \sigma T_v^4 \quad (1)$$

De même le verre reçoit et absorbe le rayonnement du milieu ambiant à la température  $T_0$  :  $\sigma T_0^4$  et celui de la plaque  $\sigma T_p^4$ , et il rayonne par ses deux faces la puissance  $2\sigma T_v$ .

$$\text{D'où : } 2\sigma T_v^4 = \sigma T_p^4 + \sigma T_0^4 \quad (2)$$

des deux équations (1) et (2) nous obtenons la relation qui nous intéresse :

$$\sigma T_p^4 = 2G + \sigma T_0^4 \quad (3)$$

Cette équation montre qu'un vitrage placé au-dessus de la plaque réceptrice permet de doubler le rayonnement solaire.

## 2°) - Collecteur à double vitrage

### a) - Equilibre thermique de la plaque noire

La puissance reçue se compose du flux solaire  $G$  et du rayonnement de la lame de verre immédiatement au-dessus (le rayonnement de la deuxième lame de verre étant absorbé par la première), la puissance perdue vient du rayonnement de la plaque ; elle s'écrit  $\sigma T_p^4$ . L'équation d'équilibre thermique s'écrit donc :

$$\sigma T_p^4 = G + \sigma T_{v1}^4 \quad (4)$$

### b) - Equilibre thermique de la première lame de verre

Cette lame de verre reçoit et absorbe le rayonnement de la plaque au-dessous :  $\sigma T_p^4$ , et celui de la lame de verre au-dessus  $\sigma T_{v2}^4$ , elle émet par ses deux faces la puissance  $2\sigma T_{v1}^4$ , d'où l'équation d'équilibre thermique :

$$2\sigma T_{v1}^4 = \sigma T_{v2}^4 + \sigma T_p^4 \quad (5)$$

### c) - Equilibre thermique de la deuxième lame de verre

La puissance reçue se compose du rayonnement du milieu ambiant  $\sigma T_0^4$  et celui de la lame de verre au-dessous :  $\sigma T_{v1}^4$ .

La puissance perdue, vient du rayonnement par les deux faces du verre ;  
elle s'exprime ainsi :  $2\sigma T_{v2}^4$

$$\text{d'où : } 2\sigma T_{v2}^4 = \sigma T_{v1}^4 + \sigma T_o^4 \quad (6)$$

des équations 1, 5 et 6, nous obtenons :

$$\sigma T_p^4 = 3G + \sigma T_o^4 \quad (7)$$

Cette relation montre qu'un double vitrage permet de tripler le rayonnement solaire absorbé. Pour un collecteur à triple vitrage, on démontrera que le rayonnement solaire sera multiplié par quatre.

Des études théoriques ont démontré qu'il n'était pas intéressant d'utiliser plus de trois vitrages car les pertes par réflexion et absorption deviennent considérables et le rendement du collecteur baisse énormément.

PARTIE EXPERIMENTALE

INTRODUCTION

De conception simple, le collecteur plan est constitué par un bac en cuivre (1/3 m<sup>2</sup> de surface et 3,5 cm de hauteur) placé à l'intérieur d'un caisson en bois qui sert à la fois de support de vitrages et d'isolant thermique (fig. 4.4.).

Le bac est rempli d'huile de vidange sur une hauteur de 2 cm.

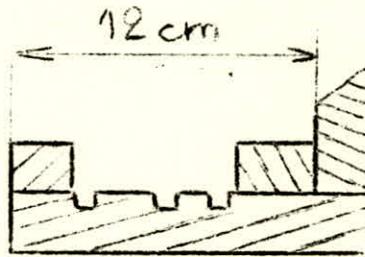
Pourquoi avoir choisi un tel système ?

Les collecteurs du type classique sont entièrement métalliques ; la chaleur est recueillie sur une des surfaces peinte en noir, bien souvent de tels capteurs posent des problèmes au niveau des soudures, donc d'étanchéité.

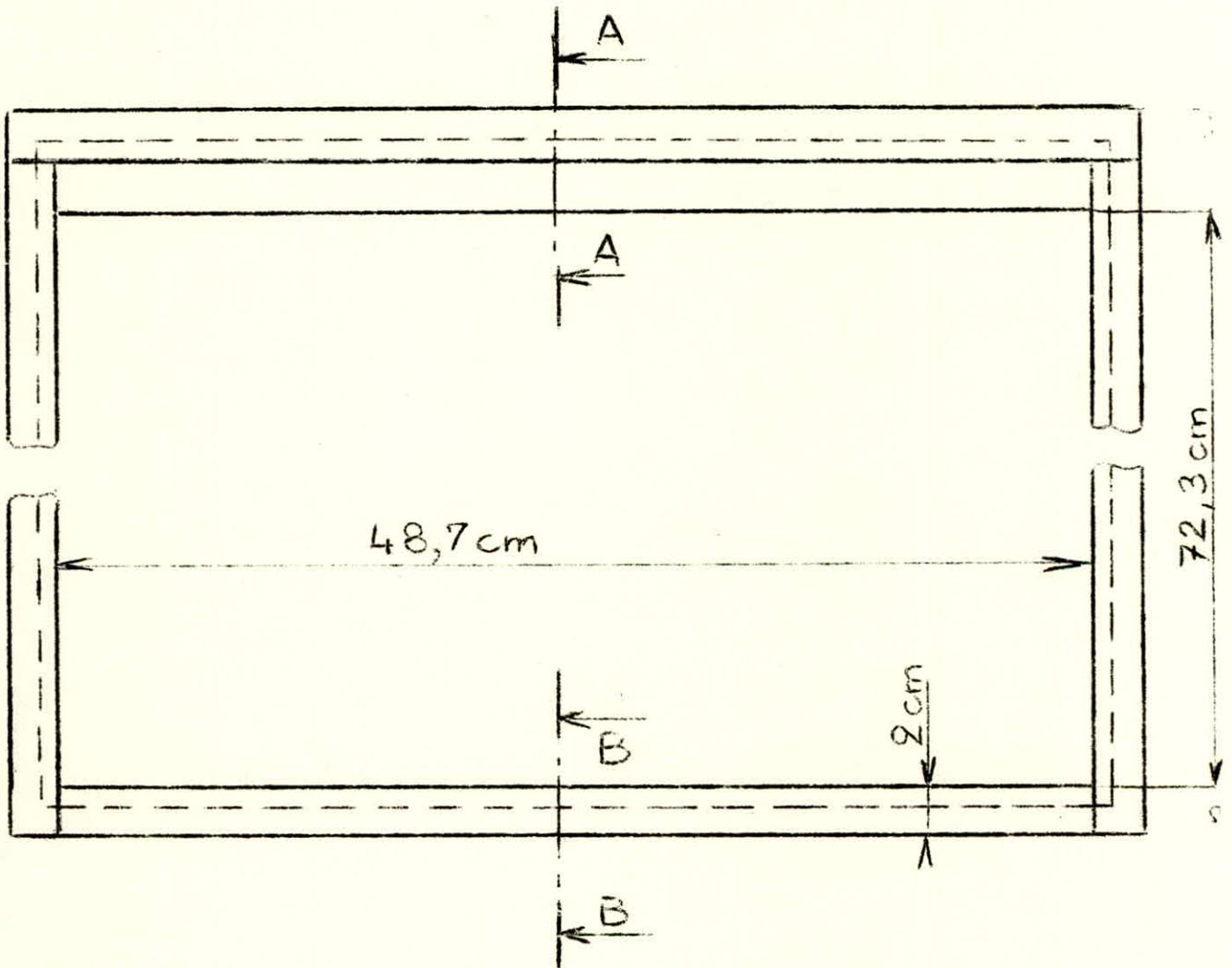
Dans notre système, nous avons voulu éviter ces difficultés et en même temps tester l'efficacité d'un fluide particulièrement disponible et gratuit : l'huile de vidange ; ce fluide est d'apparence noire et a un pouvoir absorbant voisin de celui du corps noir (fig. 4.5.). De plus, ce fluide n'étant pas volatil aux températures d'utilisation dans le capteur, il garde toute la chaleur qu'il reçoit. A notre connaissance, aucune étude n'a été faite avec un tel fluide.

Des considérations économiques sont aussi intervenues dans notre choix ; un capteur plan de conception classique revient environ à 200 DA le m<sup>2</sup> (3), alors que le prix de revient du collecteur plan de notre conception réalisé en acier est de 40 DA environ.

.../...



SECTION AA



SECTION BB

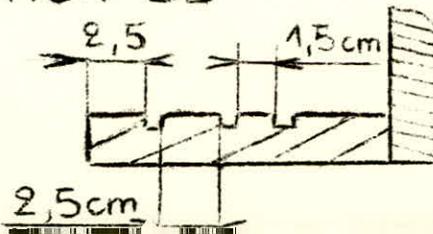
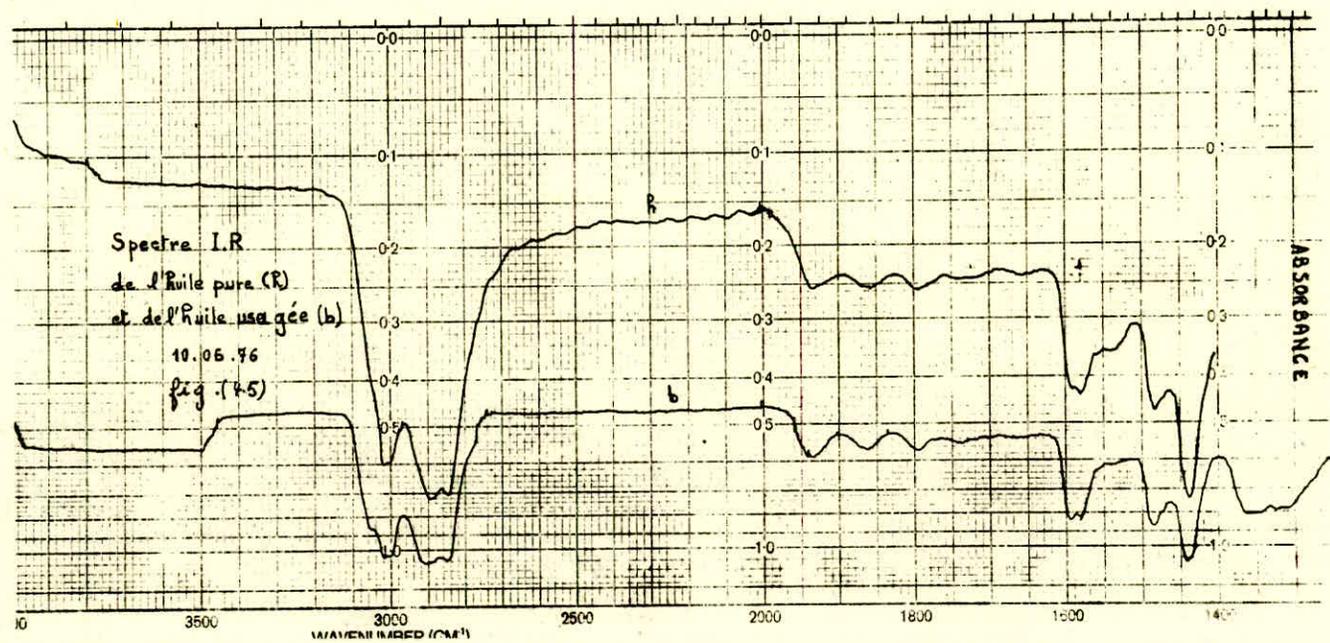


Figure 4.4



A. - Expériences préliminaires

Nous avons besoin de trois données importantes : la masse volumique de l'huile, sa chaleur massique et son indice de réfraction.

1°) - Détermination de la masse volumique de l'huile

Cette donnée nous était nécessaire pour avoir le rapport masse-volume ou débit-masse-débit volumique. Nous avons déterminé la masse volumique à différentes températures . Pour cela, nous avons opéré de la manière suivante :

- nous avons pris une éprouvette que nous avons rempli aux 2/3 de sa hauteur
- nous avons placé cette éprouvette dans un bain thermostaté, stabilisé à une température donnée
- nous avons agité l'huile et avons attendu la stabilisation de sa température (3 mm environ)
- nous avons plongé un aréomètre dans l'huile, par lecture directe, sur la colonne en verre émergente, nous avons obtenu la masse volumique de l'huile ainsi que sa température.

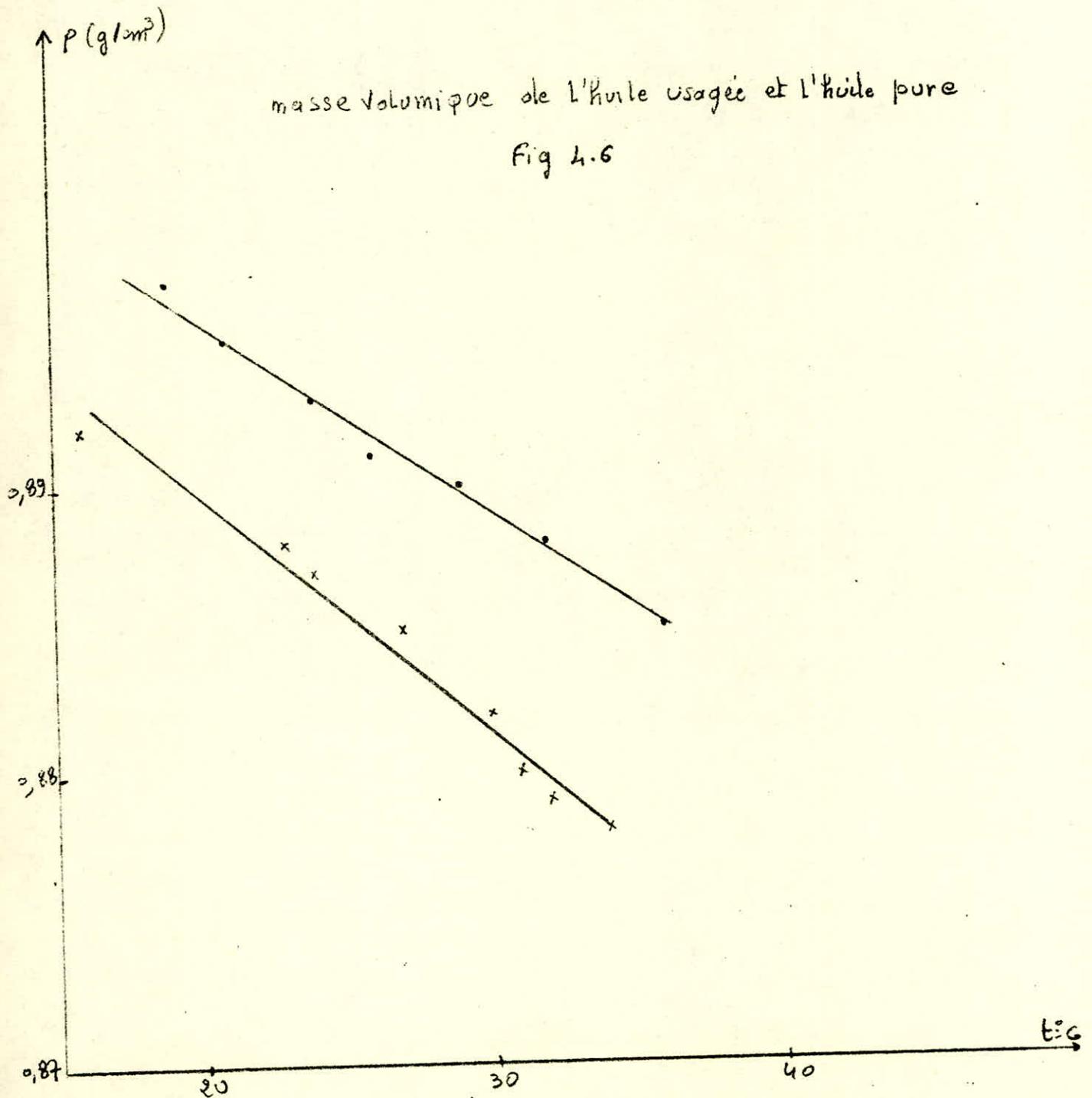
Nous avons fait cette opération avec deux huiles différentes et à différentes températures (voir tableau ci-dessous et courbes fig. 4.6.).

Températures en °C.	19	21	24	26	29	32	36
	0,897	0,895	0,893	0,891	0,890	0,888	0,885

Tableau n° 1. : huile de vidange automobile SAE. 20 W/50  
SONATRACH

masse volumique de l'huile usagée et l'huile pure

Fig 4.6



Températures en °C.	16	23	24	27	30	31	32	34
	0,892	0,888	0,887	0,885	0,882	0,880	0,879	0,878

Tableau 2. : Huile pure - SAE - 20 W/50 - SONATRACH

L'huile de vidange a une masse volumique légèrement plus forte que celle de l'huile pure.

2°) - Détermination de la chaleur massique de l'huile

Cette mesure a été réalisée au Département Génie Chimique selon la méthode suivante ; son principe en est le suivant :

On porte à une même température deux bechers remplis d'un même volume d'eau et d'huile, et on suit le refroidissement des deux fluides agités en fonction du temps.

Nous avons pris 373 grs d'eau et 328 grs d'huile pour éviter les fuites thermiques vers le haut, les deux béciers étaient recouverts d'un bouchon de polystyrène expansé. L'agitation se faisait manuellement, les résultats obtenus sont les suivants :

Températures en °C.	80	78	76	74	72	70	68	66	64	62	60
Temps de refroidissement de l'eau	0	2'15"	4'30"	6'50"	9'40"	12'30"	15'30"	18'45"	22'15"	22'50"	29'40"
Temps de refroidissement de l'huile	0	1'5"	2'20"	3'45"	5'15"	6'45"	8'30"	10'5"	12'5"	14'10"	16'20"

Tableau n° 3.

Interprétation des résultats

Nous écrivons que la chaleur perdue  $dQ$  par le système bécher-fluide pendant le temps  $dt$  où la température varie de  $dT$  est fournie au milieu ambiant par convection entre la paroi de verre et l'air :

$$dQ = h.S (T - T_{\infty})dt = - M.Cp.dT \quad (8)$$

Dans cette relation,  $T$  représente la température unique du système.

$T_{\infty}$  représente la température de l'air ambiant, très sensiblement constante pendant la durée de l'expérience

$S$  est la surface du becher qui se refroidit par convection.  $S$  est la même dans le cas de l'huile et de l'eau (car les volumes d'eau et d'huile sont identiques).

$h$  est le coefficient de convection supposé constant.

$M Cp$  : capacité calorifique du système, prend deux expressions différentes :

$$\text{dans le cas de l'eau } M Cp = M_{\text{eau}} C_{p\text{eau}} + M_{\text{verre}} C_{p\text{verre}}$$

dans le cas de l'huile :

$$M Cp = M_{\text{huile}} C_{p\text{huile}} + M_{\text{verre}} C_{p\text{verre}}$$

Séparons les variables, il vient :

$$\frac{dT}{T - T_{\infty}} = \frac{- h.S}{M Cp} dt$$

.../...

Intégrons, nous aurons :

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = e^{-\frac{h.S}{M C_p} t} \quad (9)$$

$T_0$  est la température initiale.

Dans l'expression (9), nous faisons apparaître la constante de temps :

$$\tau = \frac{M C_p}{h.S}$$

qui a pour expression :

- cas de l'huile : 
$$= \frac{M_H C_{pH} + M_V C_{pV}}{h.S}$$

- cas de l'eau : 
$$= \frac{M_e C_{pe} + M_V C_{pV}}{h.S}$$

Nous avons déterminé le temps  $t_{1/4}$ , nécessaire pour que les températures de l'huile et de l'eau chutent d'un quart de la valeur totale  $T_0 - T_{\infty}$

$$T - T = \frac{3}{4} (T_0 - T_{\infty}) \Rightarrow \frac{3}{4} = e^{-t/4/\tau}$$

d'où 
$$\text{Log } \frac{4}{3} = t_{1/4}$$

Nous obtenons alors :

$$\tau_{\text{eau}} = 1\,173 \text{ s} \quad \text{et} \quad \tau_H = 635 \text{ s}$$

.../...

$$\text{du rapport : } \frac{\mathcal{E}_H}{\mathcal{E}_e} = \frac{M_H C_{pH} + M_V C_{pV}}{M_e C_{pe} + M_V C_{pV}}$$

On tire

$$C_{pH} = \frac{\mathcal{E}_H}{\mathcal{E}_e M_H} (M_e C_{pe} + M_V C_{pV}) - \frac{M_V C_{pV}}{M_H}$$

$$\text{donc } C_{pH} = \frac{635}{1173 \times 328} (373 \times 1 + 162 \times 0,2) - \frac{162 \times 0,2}{328} = 0,57$$

La chaleur massique de l'huile est égale à :

$$\boxed{\begin{array}{l} + \\ ! C_{pH} = 0,57 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C} \\ ! \end{array}}$$

### 3°) - Détermination de l'indice de réfraction de l'huile

Cette valeur nous est nécessaire pour connaître la fraction d'énergie réfléchie à la surface de l'huile.

Nous avons utilisé le réfractomètre universel que nous possédons au Département.

A 20°C., les indices de réfraction  $n$  de l'huile pure et de l'huile usagée sont respectivement

$$n_p = 1,4885 \text{ et } n_u = 1,4910$$

(écart inférieur à deux pour mille).

A partir de ces valeurs, nous pouvons déterminer le coefficient de réflexion  $r$  par la formule.

$$r = \left( \frac{n - 1}{n + 1} \right)^2$$

.../...

soit  $r_u = 0,0338$

et  $r_p = 0,0389$

Nous majorons à 4 %.

Comme le coefficient de transmission de l'huile noire est pratiquement nul pour une épaisseur de la couche d'huile supérieure à 2 cm, nous pouvons considérer que la fraction d'énergie absorbée par cette huile est de 96 %.

#### B. - Expérimentation sur les capteurs

Nous avons procédé à deux types d'expérimentation :

- un premier type d'expérimentation "statique" (pour lequel l'huile était au repos), nous avons déterminé dans ce cas le rendement du capteur dans différentes conditions (un seul vitrage, deux vitrages et position des vitrages).
- un deuxième type d'expérimentation "dynamique" pour lequel l'huile chauffée circulait dans un échangeur contenant de l'eau.

##### 1°) - Détermination de la température moyenne de l'huile dans le bac

Le but de cette expérience est de déterminer la position du thermocouple dans l'huile qui nous donnera la température moyenne de celle-ci.

.../...

On étudiera la variation de température tout le long de la couche d'huile égale à deux centimètres et ceci en utilisant cinq thermocouples (cuivre-constantan) positionnés sur un petit socle en bois et distants l'un de l'autre de cinq millimètres.

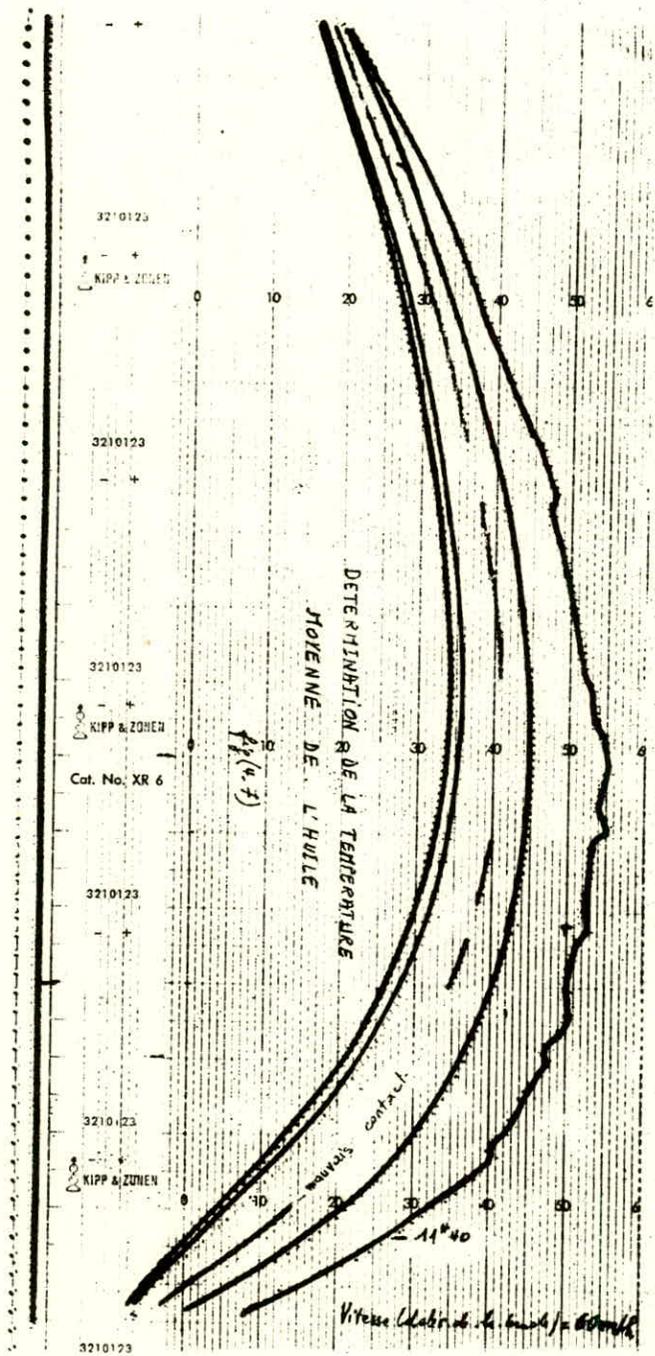
Les valeurs enregistrées sont représentées sur la figure 4.7., on constate que la température de l'huile est maximum à la surface. Ceci s'explique par deux considérations:

- premièrement, l'absorption de l'énergie lumineuse est forte à la surface et faible au fond du bac,
- deuxièmement, les courants de convection dans l'huile sont certainement faibles, ils sont provoqués en général par des différences de densité, où l'huile chaude se trouve à la surface et de ce fait ne redescend pas dans la masse de fluide.

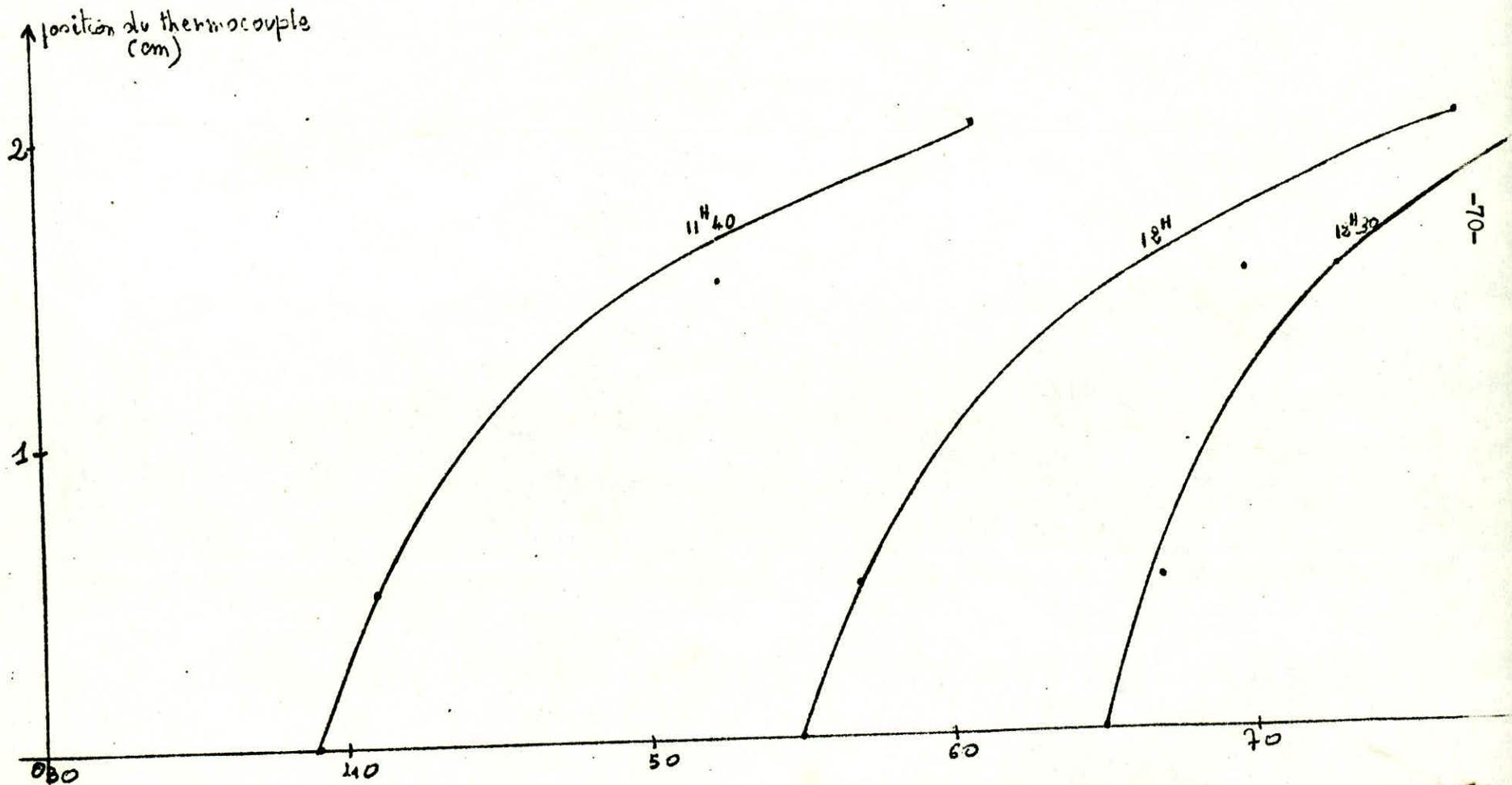
De plus, le système de vitrage réduit considérablement les transferts thermiques par convection entre la surface de l'huile et l'air ambiant, ce qui autorise une température maximum à la surface de celle-ci. L'enregistrement des cinq températures a été fait pendant six heures (voir fig. 4.7.).

A partir des valeurs obtenues, nous traçons les courbes représentant la variation de la température en fonction de la hauteur du thermocouple à différentes heures, et pour chaque courbe (fig. 4.8.), on détermine la position du thermocouple qui donne la température moyenne.

.../...



Determination de la temperature moyenne  
fig 4.8



Tableaux

Position du thermo- couple en cm	0	0,5	1,5	2	Température moyenne = 48,3 °C.
Températures en °C.	39	41	52,5	61	

Tableau n° 4. : Valeurs lues à 11 h 40'

Position du thermo- couple en cm	0	0,5	1,5	2	Température moyenne = 65 °C.
Températures en °C.	55	57	70	77	

Tableau n° 5. : Valeurs lues à 12 h 00

Position du thermo- couple en cm	0	0,5	1,5	2	Température moyenne = 71,5 °C.
Températures en °C.	65	67	73	80,5	

Tableau n° 6. : Valeurs lues à 12 h 30'

Remarque :

Nous n'avons pas tenu compte des valeurs données par le thermocouple placé à 1 cm du fond du bac, car nous avons eu un mauvais contact au niveau de l'enregistreur.

Graphiquement, c'est à 1,5 cm du fond du bac que nous obtenons la température moyenne de l'huile.

.../...

2°) - Effet du nombre de vitrage

Pour vérifier la théorie, deux bacs ont été utilisés, l'un avec un vitrage placé à 1,5 cm de la surface de l'huile ; l'autre était muni de deux vitrages, l'un à 1,5 cm et l'autre à 6 cm de la surface de l'huile du bac.

Dans chaque bac, nous avons placé deux thermocouples (cuivre constantan), l'un à la surface de l'huile, l'autre à 1,5 cm du fond.

Durant toute une journée d'expérimentation, nous avons enregistré les températures correspondantes aux quatre thermocouples ainsi que la température ambiante à l'aide d'un cinquième thermocouple placé à l'ombre, sous le support du boîtier des soudures froides.

Le ciel est resté sans nuage et le vent s'est maintenu à une faible vitesse.

L'enregistrement obtenu (voir fig. 4.9.) demande quelques commentaires d'ordre qualitatif :

- les quatre températures de l'huile croissent jusqu'à 13 h 30 et ont des maxima légèrement décalés.
- au début du chauffage, la température de surface de l'huile dans le bac à un vitrage est supérieure à celle de l'huile dans le bac à deux vitrages, ce fait s'explique simplement par une plus grande inertie thermique de ce dernier.
- en fin d'après-midi, nous pouvons noter un changement de pente pour les deux courbes donnant les températures maximums et pour la courbe donnant la température moyenne dans le bac à un vitrage.

.../...



Dans ce cas, ce changement correspond à la disparition de l'éclairage du soleil sur les bacs.

- après disparition du soleil, les températures moyenne et superficielle s'inversent, cela s'explique par le fait que la surface de l'huile se refroidit plus vite que l'intérieur.

#### Conclusion quantitative

- Sur les tableaux (7 et 8), nous constatons que les températures maximum sont respectivement de 107°C et 100°C pour deux vitrages et un vitrage, et que les températures moyennes sont de 102°C et 94°C. Ces chiffres sont significatifs de la réalité de l'énergie solaire et de sa possibilité d'utilisation à des usages scientifiques.
- Notre objectif était de calculer le rendement des deux capteurs en fonction de la température de l'huile.

Pour faire ce calcul rigoureusement, il aurait fallu disposer d'un appareil (solarimètre) donnant à chaque instant de la journée la puissance énergétique au m<sup>2</sup> de surface horizontale, du rayonnement solaire.

A partir des documents que nous avons en notre possession (4), nous avons tracé deux courbes (fig. 4.10), d'ensoleillement en fonction de l'heure pour deux journées types du mois de juin, une belle journée claire, sans nuage et une journée ensoleillée, mais légèrement brumeuse. Pour chacune, nous avons le tableau correspondant :

.../...

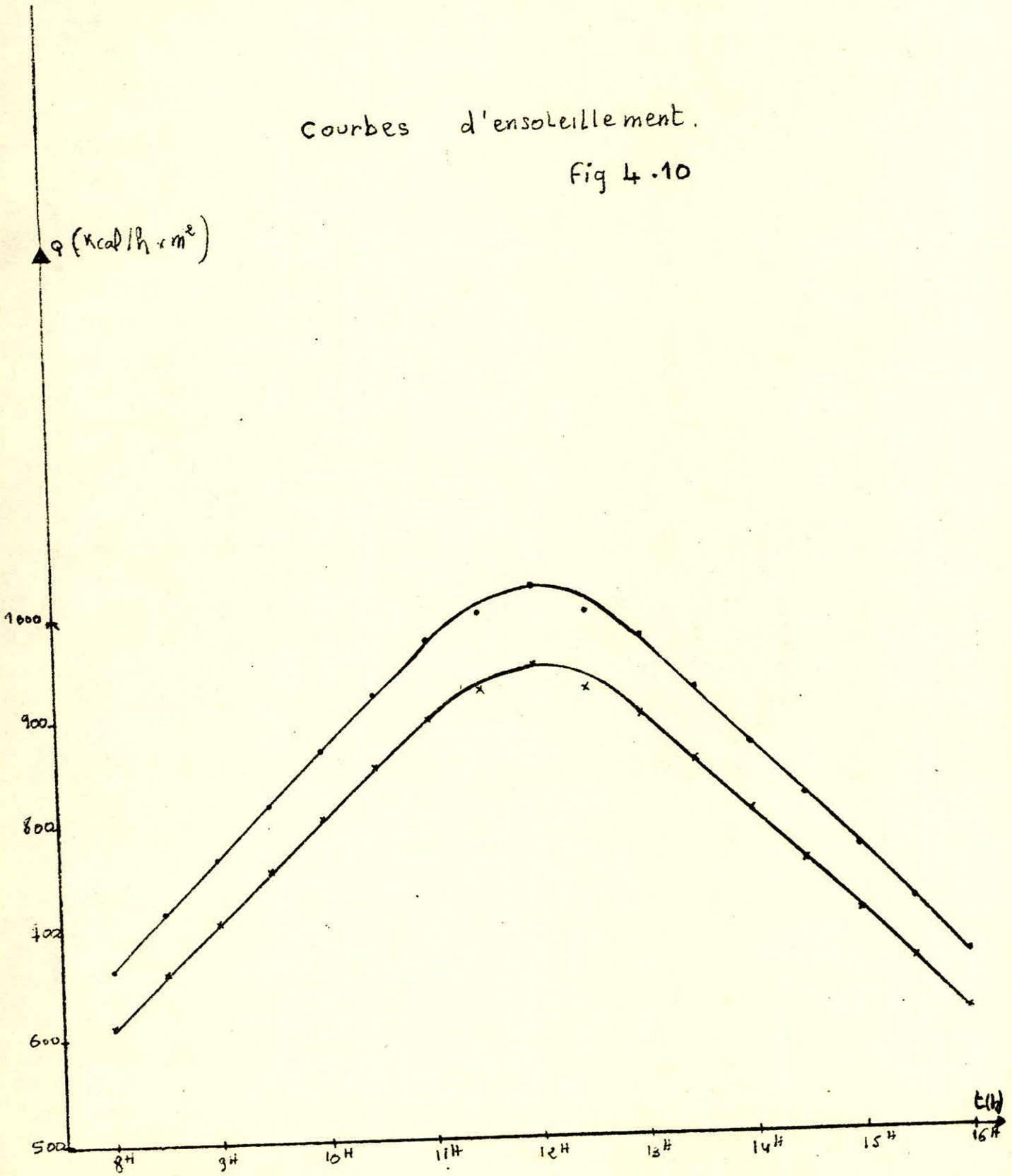
TABLÉAU 7 - UN SEUL VITRAGE

HEURE DU JOUR	10h	10h30	11h	11h30	12h	12h30	13h	13h30	14h	14h30	15 h	15h30	16h	16h30
TEMPÉRATURE MOYENNE DE L'HUILE	47	61	71,5	80	91	94	94	93	91	89	82	77	70,5	67
TEMPÉRATURE MAXIM. DE L'HUILE	57	69,5	81	89	96	100	100	98	96	93	86,5	80,5	74	68,5

HEURE DU JOUR	10h	10h30	11h	11h30	12h	12h30	13h	13h30	14h	14h30	15h	15h30	16h	16h30
TEMPÉRATURE MOYENNE DE L'HUILE	50	65	72	86	94	99	102	102	101	99	96	91	84	78
TEMPÉRATURE MAXIM. DE L'HUILE	57	71,5	84	93	101	105	107	107	105	102	99	92	87	78

TABLÉAU 8 - DEUX VITRAGES

Courbes d'ensoleillement.  
Fig 4.10



Heures	8 <sup>H</sup> 00	8 <sup>H</sup> 30	9 <sup>H</sup> 30	10 <sup>H</sup> 00	10 <sup>H</sup> 30	11 <sup>H</sup> 00
kcal/h.m2	665	719	818	869	921	972

Heures	11 <sup>H</sup> 30	12 <sup>H</sup> 00	12 <sup>H</sup> 30	13 <sup>H</sup> 00	13 <sup>H</sup> 30	14 <sup>H</sup> 00
kcal/h.m2	999	1 020	999	972	921	869

Heures	14 <sup>H</sup> 30	15 <sup>H</sup> 00	15 <sup>H</sup> 30	16 <sup>H</sup> 00
kcal/h.m2	818	767	719	665

Tableau n° 9.

Heures	8 <sup>H</sup> 00	8 <sup>H</sup> 30	9 <sup>H</sup> 00	9 <sup>H</sup> 30	10 <sup>H</sup> 00	10 <sup>H</sup> 30
kcal/h.m2	614	662	709	756	804	851

Heures	11 <sup>H</sup> 00	11 <sup>H</sup> 30	12 <sup>H</sup> 00	12 <sup>H</sup> 30	13 <sup>H</sup> 00	13 <sup>H</sup> 30
kcal/h.m2	898	924	946	924	898	851

Heures	14 <sup>H</sup> 00	14 <sup>H</sup> 30	15 <sup>H</sup> 00	15 <sup>H</sup> 30	16 <sup>H</sup> 00
kcal/h.m2	804	756	709	662	614

Tableau n° 10.

.../...

Le rendement est le rapport de la quantité absorbée par l'huile par unité de temps au flux solaire reçu.

Ce rendement est une fonction décroissante de la température ; en effet, les pertes calorifiques du capteur croissent avec la température de ce dernier et se soustraient par conséquent aux calories reçues.

Donnons à titre d'exemple, un calcul de ce rendement. Prenons la période 9 h 30 - 9 h 45 pour le double vitrage. Sur la courbe (4.10.), nous avons pour flux solaire reçu de 830 kcal/h.m<sup>2</sup>. La quantité de chaleur reçue est  $Q = M C_p \Delta T$  avec M, masse de l'huile qui est égale à :

$$M = 0,89 \times 6,6 = 5,87 \text{ kg.}$$

La chaleur massique de l'huile est :

$$C_p = 0,57 \text{ kcal/kg.}^\circ\text{C.}$$

$$T = 42 - 29 = 13^\circ\text{C}$$

$$\text{d'où : } Q = 5,87 \times 0,57 \times 13 = 43,5 \text{ kcal}$$

pour un capteur pendant 1/4 d'heure.

Par mètre carré de capteur et par heure, la quantité de chaleur recueillie est douze fois plus grande, soit

$$43,5 \times 12 = 522 \text{ kcal/m}^2\text{.h}$$

d'où le rendement :

$$\frac{522}{830} = 63 \text{ \%}$$

Ceci pour une température moyenne de :

$$T_m = \frac{42 + 29}{2} = 35,5 \text{ }^\circ\text{C.}$$

.../...

De cette façon là, nous avons pu établir les tableaux suivants, et tracer les courbes (fig. 4.11.) correspondant à un vitrage et à deux vitrages.

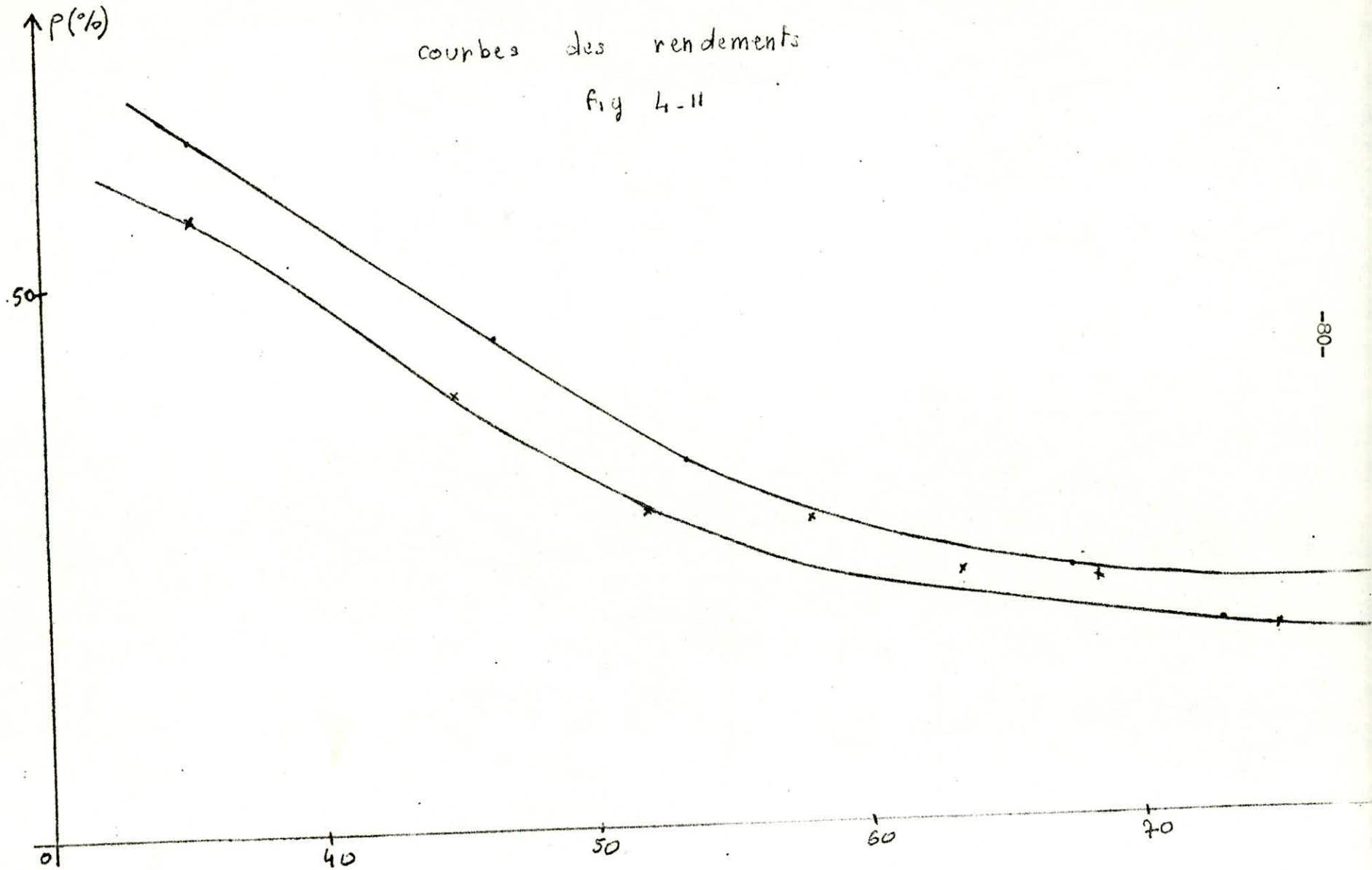
Périodes	9 <sup>H</sup> 30- 9h45	9h45 - 10h00	10h00- 10h15	10h15 - 10h30	10h30- 10h45	10h45 - 11h00	11h00 - 11h30
Températures en moyennes en °C	35,5	45	52	58	63,5	68,5	75
Flux solaire en Kcal/h.m2	830	855	885	910	935	965	985
Quantité de chaleur recueillie en Kcal/h.m2	465,04	338,23	253,64	253,61	211,31	211,33	169,12
Rendement en %	56,03	39,56	28,66	27,87	22,60	21,9	17,17

Tableau n° 11. : Pour un vitrage

Périodes	9h30 - 9h45	9h45 - 10h00	10h00- 10h15	10h15 - 10h30	10h30 - 10h45	10h45 - 11h00	11h00 - 11h30
Températures moyennes en °C	35,5	46,5	53,5	61	67,5	73	80
Flux solaire en Kcal/h.m2	830	855	885	910	935	965	985
Quantité de chaleur recueillie en Kcal/H.m2	522,9	380,47	295,94	338,15	211,31	169,06	211,38
Rendement en %	63	44,5	33,44	37,16	22,60	17,52	21,46

Tableau n° 12. : Pour deux vitrages

courbes des rendements  
fig 4-11



Conclusion Générale

On constate que le capteur à un seul vitrage est sensiblement équivalent au capteur à deux vitrages pour des basses températures (inférieures à 50°C).

Par contre, pour des températures supérieures à 50°C, les résultats enregistrés vérifient bien la théorie.

3°) - Effet de la position du vitrage

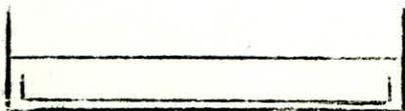
Deux bacs munis d'un vitrage chacun, ont permis de faire cette expérience le 4 Juin, journée un peu nuageuse avec présence de vent. L'épaisseur de la couche d'huile était de 2 cm. Un vitrage a été placé à 1,5 cm et l'autre à 6 cm de la surface d'huile. Deux thermocouples dans chaque bac (un à 1,5 cm et l'autre à 2 cm du fond) nous ont permis de suivre l'évolution de la température pendant toute une journée.

Nous constatons sur la courbe 4.12. que le capteur au vitrage placé à 6 cm, présente des températures plus élevées. Il faut noter que nos deux bacs ont la même hauteur.

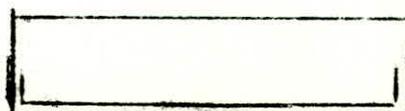
Sur le bac n° 1., l'effet d'ombre est plus important en ce qui concerne la couche d'air et ceci au début et à la fin de la journée. Par contre, le vent crée dans celui-ci des pertes par convection sans doute moins importantes que dans le deuxième bac.

L'écart de température entre les deux bacs est relativement faible. Une expérience plus rigoureuse faite avec deux bacs de hauteurs respectives 7 cm et 12 cm nous aurait permis d'avoir des résultats plus déterminants.

.../...



bac n°1



bac n° 2



4°) - Chauffage de l'eau

Nous en arrivons enfin à l'objectif de notre étude : utilisation de l'énergie solaire pour chauffer de l'eau. Pour faire cette expérimentation, nous avons réalisé un montage sommaire (fig. 4.13.), avec les moyens dont nous disposons à l'Ecole Polytechnique.

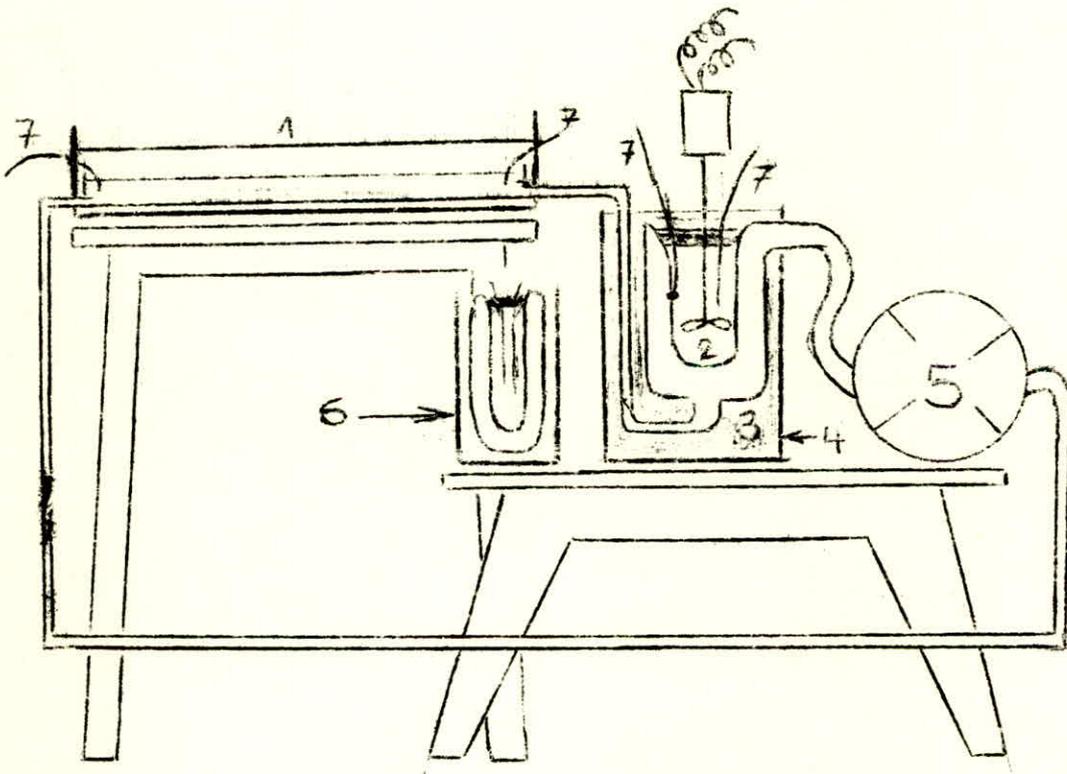


Figure 4.13

1. - Capteur solaire (voir fig. 4.4.)
2. - Cloche de récupération ayant servi comme réfrigérant dans un appareil de distillation. Utilisée ici comme échangeur.
3. - Laine de verre
4. - Caisse en carton
5. - Pompe péristaltique
6. - Boîtier de soudures froides
7. - Thermocouples.

Nous avons réalisé trois essais :

Pour le premier essai, nous avons enregistré :

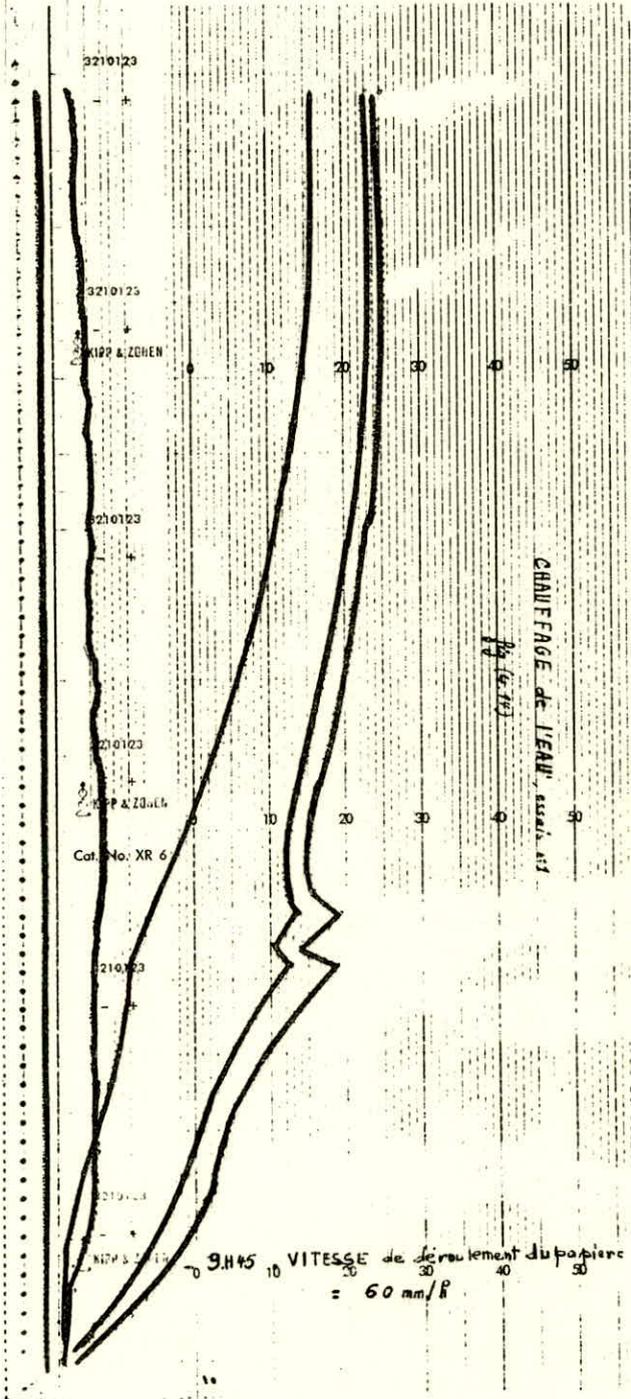
- la température de l'huile dans le bac à 1,5 cm et à 2 cm du fond
- la température de l'eau dans l'échangeur
- la température de la paroi interne de cet échangeur
- la température ambiante.

Les résultats sont représentés sur la figure (4.14.).

On constate que la température de la paroi interne de l'échangeur est égale à la température de l'eau, ce qui signifie que l'agitation est efficace.

L'écart de température dans l'huile entre le thermocouple de surface et celui placé en position moyenne est de  $3^{\circ}\text{C}$ , alors qu'il était de  $10^{\circ}\text{C}$  pour le cas de l'huile stagnante. Cette chute est due très certainement à l'agitation de la couche d'huile provoquée par la circulation du fluide (pompage en circuit fermé).

.../...



Dans ce premier essai, nous avons modifié le débit de la pompe au cours de l'expérience, car la température de l'huile augmentait trop vite et s'approchait de la zone à rendement faible, ce changement s'est manifesté sur les courbes enregistrées par un changement de pente ; ensuite, nous avons travaillé avec un écart moyen entre l'huile et l'eau de l'ordre de 10°C. Les résultats lus sur l'enregistrement (fig. 4.14.) sont données dans le tableau 13.

Deuxième essai :

Nous avons fait une mesure du débit d'huile circulant dans l'échangeur et nous avons modifié la position des thermocouples dans le bac. Nous avons placé un thermocouple près de la sortie d'huile et un autre à l'entrée de celle-ci, qui circule en circuit fermé, de manière à évaluer la quantité de chaleur  $Q_e$  cédée au circuit extérieur.

La différence entre  $Q_e$  et la quantité  $Q_r$  recueillie par l'eau doit permettre une première évaluation des pertes thermiques au circuit extérieur.

La quantité de chaleur échangée  $Q_e$  s'écrit :

$$Q_e = \frac{D \times \rho \times C_{p_H} \times \Delta T \times t}{S}$$

Avec :

$D$  = débit d'huile = 55 l/h

$\rho$  = masse volumique de l'huile = 0,85 kg/l

$C_{p_H}$  = chaleur massique de l'huile = 0,57 kcal/kg°C

$\Delta T$  = différence de température pendant un temps donné  $t$

$S$  = surface du capteur.

.../...

TABLEAU I3 - PREMIER ESSAI DE CHAUFFAGE DE L'EAU

HEURE DU JOUR	10h	10h30	11h	11h30	12h	12h30	13h	13h30	14h	14h30
TEMPERATURE MOYENNE DE L'HUILE EN ° C	39	41	43	55	57	60	64	66	66	66
TEMPERATURE MAXIMUM DE L'HUILE EN ° C	41	48	51	58	61	64	67	69	69	69
TEMPERATURE MAXIMUM DE L'EAU EN ° C	24	26	28	33	45	50	56	58	61	61

Si on veut avoir la quantité de chaleur échangée pendant une heure et par m<sup>2</sup>, on aura :

$$Q_e = \frac{55 \times 0,85 \times 0,57 \times 10 \times 1}{173} = 799,425 \text{ Kcal/h.m}^2$$

La quantité de chaleur reçue par l'eau (3 litres) pendant une heure et par m<sup>2</sup> de capteur sera :

$$Q_r = 3 \times 1 \times 3 \times 18 = 162 \text{ Kcal/h.m}^2.$$

En pratique, les résultats obtenus montrent que la chaleur perdue  $Q_p$  est plus forte que la chaleur recueillie  $Q_r$ . Ces pertes nous semblent excessives, elles s'expliquent par une trop forte évaluation de  $Q_e$  due à deux paramètres : une variation notable du débit de la pompe au cours de la journée, et la chaleur massique de l'huile semble être assez élevée.

La quantité de chaleur cédée par l'huile conduit à un rendement de capteur bien supérieur à celui que nous avons obtenu dans les expériences précédentes ; en effet, 799 Kcal/h correspondent à une puissance recueillie sur le capteur d'au moins 916 W, ce qui est manifestement excessif.

D'autre part, il y a disproportion entre la chaleur cédée par l'huile et celle recueillie par l'eau : la différence est de 799 diminuée de 162, soit 637 Kcal/h.m<sup>2</sup> ; ce qui signifierait que 80 % de la chaleur cédée par l'huile est perdue ; ce qui aussi semble excessif car les longueurs de tuyaux sont très courtes (égales à peu près à 1 m) et l'échangeur contenant l'eau est bien calorifugé sur les côtés ; il reste cependant une possibilité de fuite thermique par évaporation de l'eau à travers le couvercle en polystyrène ; nous avons peser la masse d'eau restante à la fin de l'expérience, et nous avons constaté que l'eau a diminué de 25 g, soit une chaleur sensible de 14,6 Kcal/h.

Une telle quantité est insuffisante pour expliquer les écarts importants.

Nous pourrions conclure que ce point reste obscur et que des expériences ultérieures sont nécessaires pour lever cette incertitude.

Les résultats enregistrés sur la fig. 4.15 ont été représentés dans le tableau 14.

Ce deuxième essai a été arrêté à 13h34, heure à laquelle la température de l'eau est de 60°C.

Le troisième essai consistait à remplacer cette eau chaude par une eau froide, et de suivre l'évolution de la température sur le reste de la journée. L'enregistrement (fig.4.15) a commencé à 13h36 avec une eau à 20°C. Sur ce dernier, on constate que la température de l'eau augmente très rapidement, tandis que celle de l'huile diminue. Le tableau 15. nous donne les résultats lus sur la fig. 4.15..

### éférences

- 1) La Face Cachée du Soleil - Publication revue ZZZ
- 2) L'exemple chiffré correspond au système présenté par P.GAUDENZI dans "l'utilisation de l'énergie solaire en montagne pour des usages domestiques dans les localités alpines".
- 3) Annuaire héliotechnique 1975
- 4) Etude faite par A. COEVOET 1975.

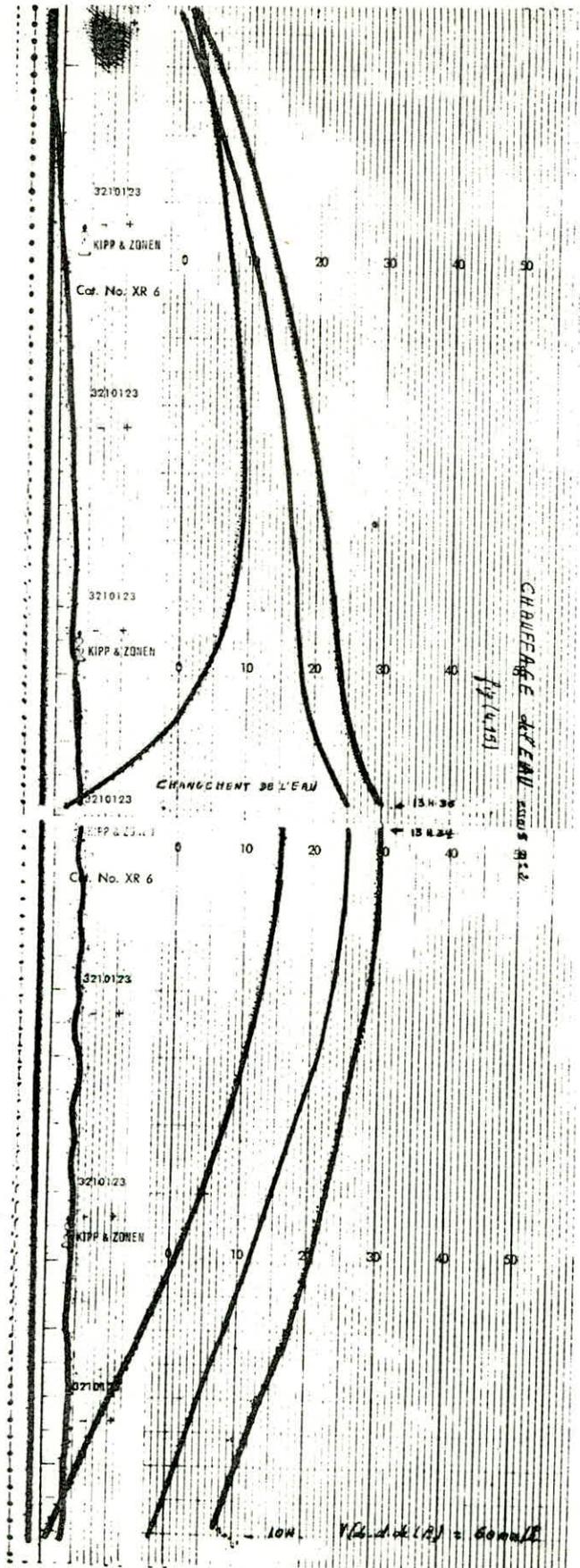


TABLEAU I3 - PREMIER ESSAI DE CHAUFFAGE DE L'EAU

HEURE DU JOUR	10h	10h30	11h	11h30	12h	12h30	13h	13h34
TEMPERA. MOYENNE DE L'HUILE	40	46	51	56	61	65	68	69
TEMPERA. MAXIMUM DE L'HUILE	49	54	60	64	67	71	73	73
TEMPERA. DE L' EAU	20	31	41	47	51	56	58	60

TABLEAU I4 - DEUXIEME ESSAI DE CHAUFFAGE DE L'EAU

HEURE DU JOUR	13h36	14h	14h30	15h	15h30	16h	16h30	17h	17h30
TEMPERA. MOYENNE DE L'HUILE	69	63	61	59	56	54	49	46	42
TEMPERA. MAXIMUM DE L'HUILE	73	69	67	64	62	57	54	49	44
TEMPERA. DE L' EAU	20	45	52	54	54	51	49	46	44

CONCLUSION

Dans ce projet, nous avons fait premièrement l'étude spectrale de deux matériaux (verre et film plastique de polyéthylène) qui ont servi de vitrages dans nos expériences. Cette études a confirmé que l'on pouvait remplacer le verre par un film en polyéthylène moyennant cependant une perte énergétique notable.

Deuxièmement, nous avons réalisé la construction d'un chauffe-air solaire en nous appuyant sur l'architecture existante de la salle des machines du hall du génie chimique.

Les résultats obtenus dans des conditions pourtant défavorables sont encourageants et peuvent permettre d'envisager la climatisation complète de la salle des machines. Nos expériences ont mis en évidence la cause essentielle du froid qui règne dans le hall pendant l'hiver.

Enfin, nous avons construit un capteur de modèle très simple qui nous a permis de chauffer de l'eau jusqu'à 60°C. L'utilisation des moyens sommaires n'a pas permis des rendements bien élevés, mais l'utilisation d'un bon échangeur de chaleur, le calorifugeage plus soigné de l'appareil peut augmenter facilement le rendement.

Il nous a manqué aussi un appareil pour mesurer l'intensité du rayonnement solaire et un autre pour mesurer les faibles débits d'air en circulation dans le chauffe-air.

.../...

Cependant les montages effectués peuvent être utilisés comme matériel de travaux pratiques en énergie solaire et permettant aussi à d'autres générations d'étudiants de se familiariser avec des techniques d'avenir.

Notre recherche concernait les besoins domestiques de l'homme. Mais l'énergie solaire n'est pas seulement envisagée pour ces applications. Son potentiel commence à être reconnu au plus haut niveau dans différentes applications industrielles (pompes solaires, l'eau douce solaire, les cellules photovoltaïques, filière thermus-électrique...).

Dans un pays comme le notre, pays en voie de développement, l'énergie solaire présente un intérêt particulier, elle est susceptible d'améliorer très rapidement et moyennant un coût relativement faible, les conditions de vie et de productivité de populations géographiquement dispersées (régions chaudes et sèches). De véritables réalisations industrielles ont toutes les chances d'être édifiées dans notre pays.

Quel sera l'avenir de l'énergie solaire ? Il est peut être trop tôt pour le dire, mais encore faudrait-il favoriser et inciter les recherches et les applications en leur consacrant des moyens financiers suffisants.

BIBLIOGRAPHIE

- (1)- COLLOQUES INTERNATIONAUX DU C.N.R.S. ,Applications thermiques de l'énergie solaire dans le domaine de la recherche et de l'industrie .( 1958 ).
- (2)- J.PERCEBOIS, L'énergie solaire,perspectives économiques C.N.R.S. ( 1975 ).
- (3)-F.KREITH, Transmission de la chaleur et thermodynamique. Masson et Cie-étideurs.( 1967 ).
- (4)- La face cachée du soleil, Publication revu ZZZ.( 1974 ).
- (5)- F.ELRIMHEN et J.KHALID, Possibilités d'utilisation de l'énergie solaire pour la climatisation d'une serre.( Etude faite en 1975 ).

