

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

13/80

U. S. T. A.

*Les*

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT MECANIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

المكتبة  
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHEQUE

ETUDE ET REALISATION  
D'UN CAPTEUR A RUISSELLEMENT

Proposé par Mr Mustapha BOUHADEF  
Directeur de la S.E.S. de Bouzaréah - Alger

Suivi par Mrs :

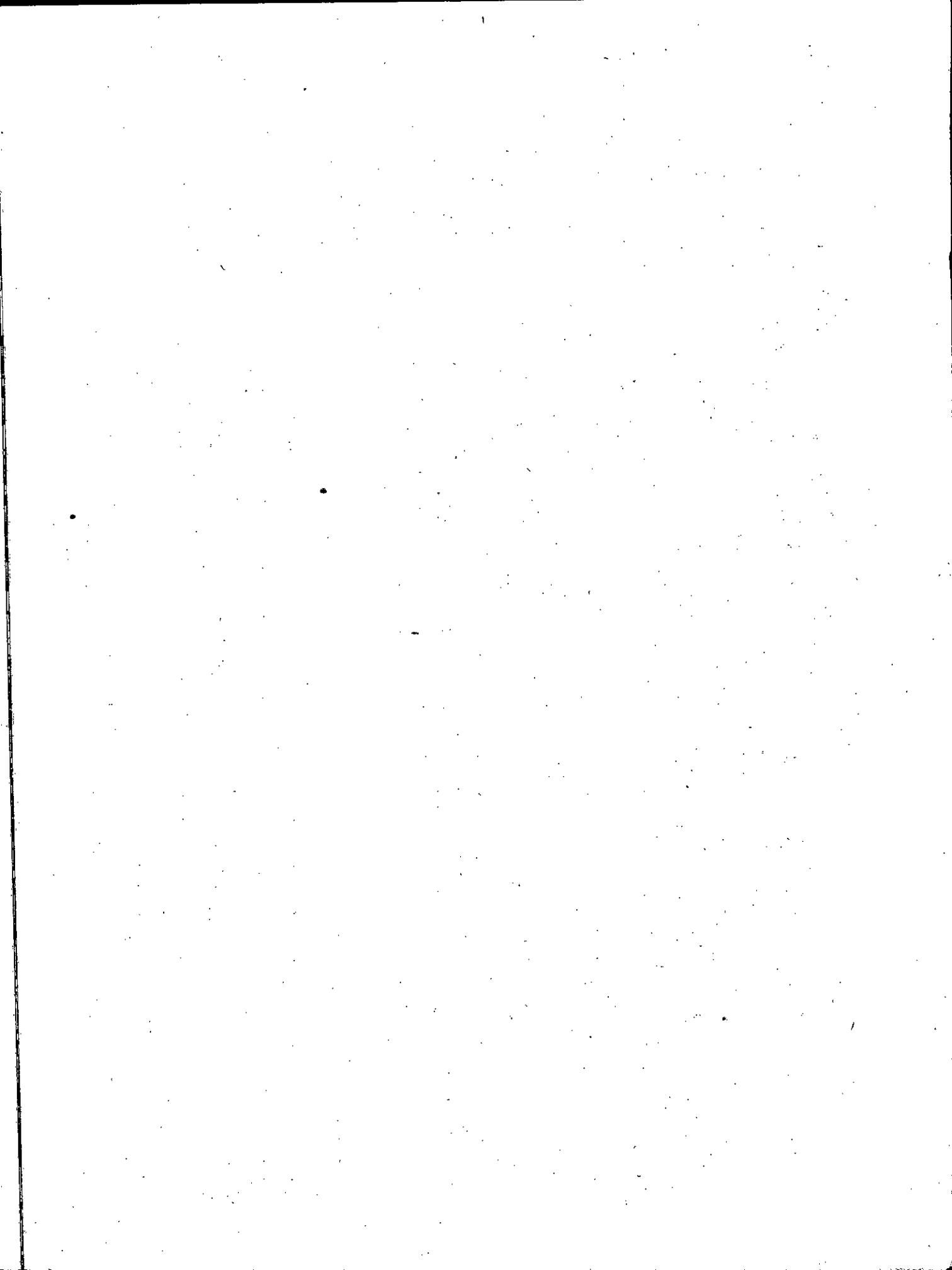
M. BOUHADEF

J.P. MILLET

Etudié par :

AMOR NAIT MEZIANE

JANVIER 1980



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

U. S. T. A.

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT MECANIQUE

# PROJET DE FIN D'ETUDES

## ETUDE ET REALISATION D'UN CAPTEUR A RUISSELLEMENT

Proposé par Mr Mustapha BOUHADEF  
Directeur de la S.E.S. de Bouzaréah - Alger

Suivi par Mrs :

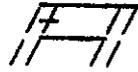
M. BOUHADEF

J.P. MILLET

Etudié par :

AMOR NAIT MEZIANE

JANVIER 1980



\*\* T O U T E M A F A M I L L E

\*\* M O N A M I F A R I D L E B B A D

\*\*\*\*\*  
\*  
\*  
\* Ce travail a été effectué sous le Patronnage \*  
\*  
\* de l' O . N . R . S . à la Station de \*  
\*  
\* l' Energie Solaire de Bouzareah . \*  
\*  
\*  
\*  
\*  
\*\*\*\*\*

-R E M E R C I E M E N T S -

-----

Que Monsieur Mustapha BOUHAFEF ,Directeur de la Station de l'Energie Solaire de Bouzareah trouve ici mes remerciements les plus vifs et ma gratitude la plus profonde pour l'aide qu'il n'a cessée de m'apporter et les conseils qu'il m'a prodigués tout au long de mon travail

Je remercie également Monsieur MILLET qui, malgré son emploi du temps surchargé a assuré un controle constant et efficace de tout le travail.

Je remercie mes amis OUAIL Farouk , BENKEDDACHE ET HADJI pour avoir été quotidiennement à mes cotés et pour m'avoir aidé à résoudre tous les problèmes cruciaux que j'ai rencontrés.

Je remercie Messieurs NOUI Abdelouahab, TOUILLEB Ahmed et SENHADJI pour leur aide précieuse durant la réalisation et l'expérimentation.

Je ne saurais finir sans remercier Melle BOUSLAMA Messieurs ARABI et ALLOUCHE pour n'avoir épargné aucun effort lors de la frappe et du tirage de cette étude.

SOMMAIRE

-A- Introduction:

-B- But de l'étude.

Chapitre I: Généralités:1.1 . Le Rayonnement.

## 1.1.1 Définition

## 1.1.2 Rayonnement Solaire

## 1.1.2.1 Constante Solaire

## 1.1.2.2 Influence de l'atmosphère

## 1.1.2.3 Rayonnement direct

## 1.1.2.4 Rayonnement diffus

## 1.1.2.5 Rayonnement global

## 1.1.2.6 Rayonnement réfléchi (diffusé)

## 1.1.2.7 Fraction d'ensoleillement

## 1.1.3 Comportement des corps vis-à-vis du rayonnement

## 1.1.3.1 Le corps noir

## 1.1.3.2 Le Soleil

## 1.1.4. Mesures Solarimétriques

1.2. CAPTATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE.

## 1.2.1 Les insolateurs plans

## 1.2.1.1. Description

## 1.2.1.2 Différents types d'insolateurs.

## 1.2.2. Les concentrateurs

## 1.2.2.1 Définition

## 1.2.2.2 Différents types de concentrateurs.

1.3 Conversion de L'ENERGIE SOLAIRE

## 1.3.1 Conversion Photothermique

## 1.3.2 Conversion Thermique

- 1.3.3 Conversion Photoelectrique
- 1.3.4 Conversion Photobiologique
- 1.3.5 Conversion Chimique
- 1.3.6 Transformations thermodynamiques.

#### 1.4 STOCKAGE:

- 1.4.1 Stockage thermique
- 1.4.2 Stockage au moyen de batteries d'accumulateurs electriques
- 1.4.3 Stockage hydraulique.

### CHapitre II: Hydrodynamique des films minces et étude thermique théorique.

#### 2.1. Introduction et Généralités

#### 2.2 Régime Laminaire lisse

##### 2.2.1. étude du cas idéal

- 2.2.1.1 Profil des vitesses et frottement pariétal
- 2.2.1.2 Caractéristique adimensionnelle de l'écoulement

##### 2.2.2 Ordre de grandeur des approximations effectuées.

- 2.2.2.1 établissement du régime-effet d'inertie
- 2.2.2.2. effet de freinage contre les parois latérales dû à la viscosité.
- 2.2.2.3 effet de capillarité.
- 2.2.2.4 freinage de l'air à la surface libre

#### 2.3 Régime laminaire d'ondes.

#### 2.4. Régime turbulent

#### 2.5 étude thermique théorique

- 2.5.1 équation caractéristique du fonctionnement.
- 2.5.2 estimation des pertes thermiques du convertisseur
- 2.5.3 estimation de la conductance des pertes (K).
  - 2.5.3.1 Capteur sans vitrage
  - 2.5.3.2 Capteur à simple vitrage
  - 2.5.3.3 Capteur à double vitrage

## Chapitre III:

### Realisation et experimentation:

#### 3.1. Généralités.

##### 3.1.1. Introduction.

##### 3.1.2. Orientation du capteur

#### 3.2. Construction du Capteur à ruissellement:

##### 3.2.1. L'absorbeur

##### 3.2.2. Le boîtier

#### 3.3. Expérimentation

##### 3.3.1 Instruments de mesure

##### 3.3.2. Mesures concernant le système

##### 3.3.3. Méthode de calcul.

##### 3.3.4 étalonnages des thermocouples

##### 3.3.5 Montage expérimental

##### 3.3.6 Tableaux de mesures.

##### 3.3.7 Méthode utilisée pour le trace des courbes expérimentales:

##### 3.3.7.2) Explication de la méthode

##### 3.3.7.1 Choix des courbes à tracer

##### 3.3.7.3 Courbes expérimentales

##### 3.3.8. Analyse des résultats:

##### 3.3.8.1 Analyse des tableaux de mesure

##### 3.3.8.2 Analyse des courbes expérimentales.

##### 3.3.9 Etude critique et conclusion

##### 3.3.9.1. Suggestions d'améliorations du Capteur à ruissellement

##### 3.3.9.2. Applications du Capteur à Ruissellement.

##### 3.3.9.3. Conclusion.

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

Note: Les références de (1) à (15) sont extraites de la thèse de  
DANIEL CAMPERGUE.

- (1) Nusselt W : Ver.Dent. Ingr. Z 60 p.549-569 (1916)
- (2) Kasimov B.S. et Zigmund F.F: Inzh. Fiz. Zh; Akad. Nank Belorussk  
Vol: 5 (4) P. 71 ( 1962 ).
- (3) Hopf. L  $\times$  Ann Physik Vol. 32 P.777 ( 1910 )
- (4) Horton R; Leach; Van Viliet R : Trans. Am. Geophys. Union  
Vol: 15 P. 393 ( 1934 ).
- (5) Binnie A; M : J .Fluid Mech. Vol:5 P.561 ( 1959 ).
- (6) Fulford G.D : Ph. D . Thesis Univ.Birmingham England (1962).
- (7) Grimley S.S : Trans. Inst. Chem. Energrs. (London) .  
Vol: 23 P. 228 ( 1945 ) .
- (8) Clayton C.G : Ph. D Thesis Gonville and Cais College.  
Cambridge England ( 1958 ) .
- (9) Wilks J.O, Nedderman R.M: Chem.Eng. Sci. Vol 17 P. 177 (1962)
- (10)Kapitsa. P: Zh . Eksperim. Teor Fiz . Vol 18 P. 3 ( 1948 )
- (11)Ishihara . T : Trans. Am. Soc. Civil Engrs. Vol 126 P.548 (1961).

- (12) Levich. V : Physico-Chemical Hydrodynamics.  
Prentice - Hall . New Jersey ( 1962 ).
- (13) Hinze : Turbulance , Mac Graw Hill.
- (14) Dukler A. Bergelin. O : Chem. Eng. Progr. Vol 48 P.557 (1952).
- (15) Portalski S : Chem. Eng. Sci. Vol. 18 P.787 et Vol 19 P.575 (1964).
- (16) Sacadura J: "Equations caractéristiques des Capteurs Solaires Plans sans concentration " Rev. Gen. Therm. N° 176 (Mars 1976).
- (17) Desautel J. Les Capteurs Héliothermiques.

Les besoins énergétiques de l'humanité, sans cesse croissants ouvrirent de larges perspectives à l'énergie d'origine solaire, et donnèrent lieu à un champ d'études très vaste et varié ayant trait au captage de cette énergie et à son utilisation à des fins domestiques et industrielles. Elle offre d'ailleurs une large gamme de possibilités d'utilisation notamment dans les domaines suivants.

- Chauffage.
- Climatisation.
- Réfrigération.
- Alimentation des moteurs thermiques et électriques.
- cuisson des aliments.

Cependant, la variation de l'énergie incidente au sol en fonction des paramètres météorologiques, climatiques géométriques, pose toujours des problèmes dans l'optimisation des qualités réceptrices des capteurs solaires (éléments permettant la transformation de l'énergie rayonnante du soleil en énergie calorifique ou électrique). C'est généralement dans cet axe que se situent les études entreprises dans ce domaine.

Dans le domaine industriel, la tendance actuelle dans les pays techniquement évolués est à la concentration des grandes unités énergétiques très puissantes, surtout depuis l'avènement de l'énergie nucléaire; tandis que les machines solaires conduiraient probablement au résultat inverse se traduisant par une multitude d'éléments de petite puissance entraînant une dispersion de la population vers les zones à faible densité ainsi, en Algérie, pays fortement ensoleillé et prônant depuis l'indépendance la politique de décentralisation l'énergie solaire apparaît comme fort intéressante; d'autant plus qu'elle possède une souplesse indéniable d'adaptation aux besoins, qui permettra, quelque soit l'emploi auquel on la destine de pouvoir dimensionner les installations, qu'il s'agisse des besoins d'un individu isolé ou même d'une collectivité réduite.

Il convient aussi de rappeler que l'énergie solaire pose peu de problèmes de sécurité et pratiquement aucun problèmes de pollution, à l'inverse de l'énergie atomique et des autres sources plus conventionnelles qui restent par plusieurs côtés fort hasardeuses.

B]

 ut de l'étude.  
-----

Ce travail consiste en une étude systématique d'un Capteur à ruissellement destiné à chauffer de l'eau. Les caractéristiques de cet insolateur dépendent essentiellement des trois paramètres suivants: débit, inclinaison, type de Serre (à simple ou à double vitrage).

Une série de tests sera réalisée en faisant varier chaque fois l'un ou l'autre des paramètres déjà cités. Au début de cette étude, le travail consistera à réunir les éléments essentiels concernant le rayonnement, la captation et les applications de l'énergie solaire.

Ensuite sera développée l'hydrodynamique des films minces, suivie de la description de la réalisation, de l'expérimentation effectuée et de l'analyse des résultats obtenus.

17 H A P I T R E 1.

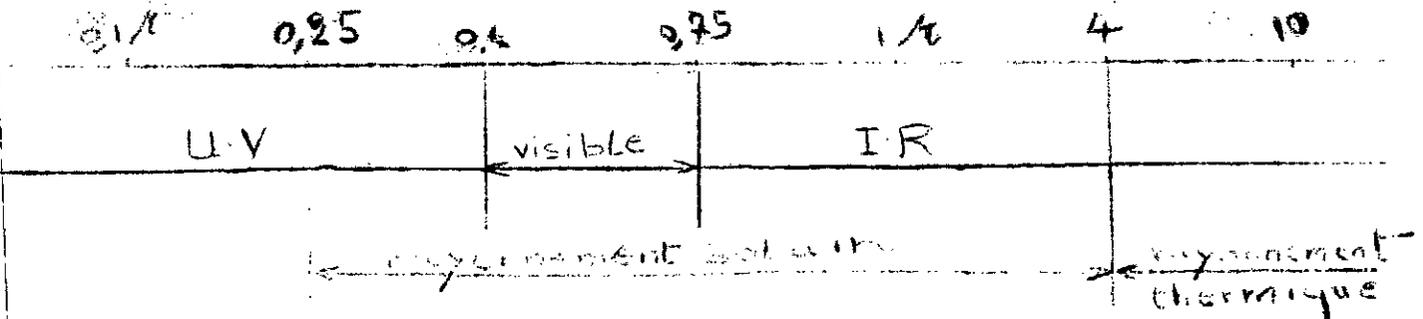
---

GENERALITES.

## 1.1.) Aperçu sur le rayonnement.

### 1.1.1) Définition:

Le rayonnement est un mode de transfert de chaleur, à la vitesse de la lumière, d'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques de différentes longueurs couvrant tout le spectre.



Le rayonnement électromagnétique apparaît lors du réarrangement de la structure électronique d'un corps (celle-ci ayant été préalablement modifiée). En résumé, on peut dire que le rayonnement, qui est le transfert d'une énergie de nature particulière, non calorifique fournit finalement une transmission de chaleur.

### 1.1.2.) Le rayonnement solaire.

Le rayonnement solaire est une superposition d'ondes dont les longueurs vont de 0,25 à 4 microns. Le rayonnement solaire global est la somme des distributions spectrales du rayonnement direct, du rayonnement réfléchi par le sol et l'environnement.

#### 1.1.2.1.) La constante solaire.

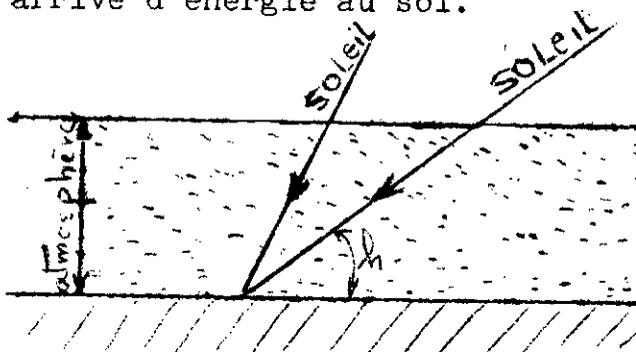
C'est la quantité d'énergie rayonnante, supposée intégralement transformée en chaleur que le soleil envoie par minute à travers une surface de  $1 \text{ cm}^2$ , normale aux rayons solaires, située en dehors de l'atmosphère terrestre à une distance du soleil égale à la distance moyenne de la terre au soleil. Selon les mesures récentes effectuées par satellite, elle serait de  $1400 \text{ w/m}^2$  ou  $1200 \text{ Kcal/m}^2/\text{h}$ . Cette valeur correspond donc au maximum de ce que peut capter l'appareil le plus sophistiqué placé dans les meilleures conditions et hors atmosphère.

### 1.1.2.2) Influence de l'atmosphère:

L'atmosphère dissipe une partie de l'énergie qui vient du soleil:

- Par diffusion moléculaire (surtout pour l'ultra-violet).
- Par réflexion diffuse sur les aérosols (poussières, gouttelettes...).
- Par absorption gazeuse.

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



Lorsque l'angle  $h$  est  $< 15^\circ$ , il est inutile de chercher à capter ces rayons car l'épaisseur d'air traversée aura absorbé presque toute leur énergie. Ceci nous permet de juger si un obstacle au rayonnement est un masque pour le capteur.

### 1.1.2.3.) Le rayonnement direct.

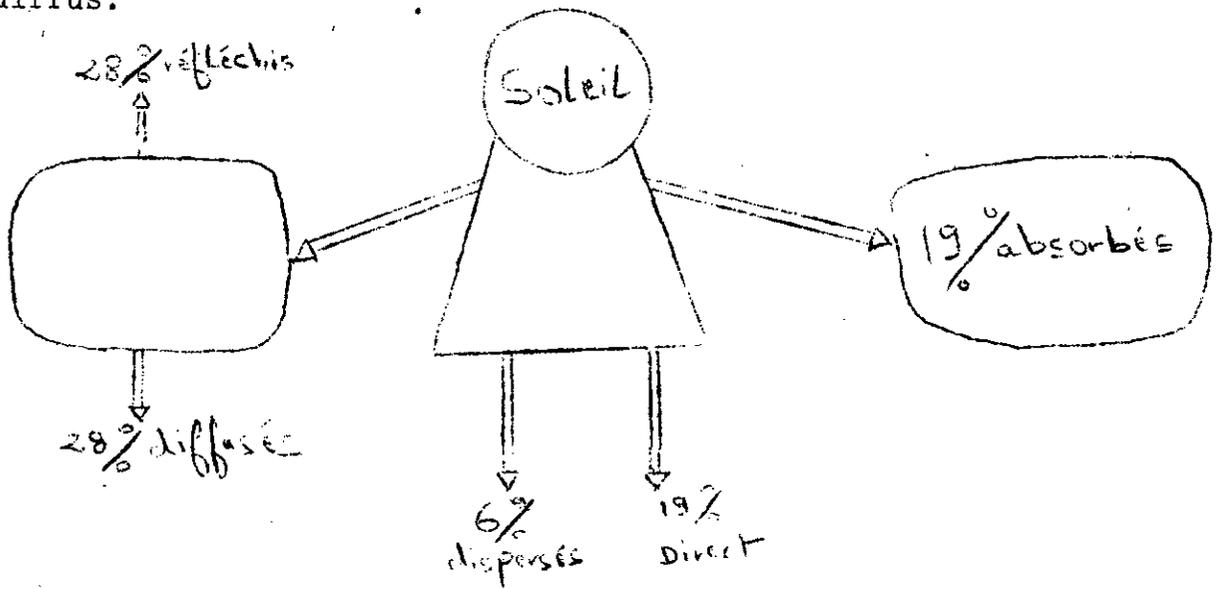
c'est l'énergie apportée par des rayonnements issus directement du soleil sans aucun intermédiaire.

### 1.1.2.4) le Rayonnement diffus/

C'est l'énergie apportée par des rayonnements qui, issus du soleil ont été réfléchis, diffractés ou diffusés par un ou plusieurs obstacles (nuages, neiges, brumes, murs...) avant de parvenir au capteur.

### 1.1.2.5) le rayonnement global.

C'est la somme des rayonnements direct et diffus.



Des mesures ont montré que la proportion du rayonnement direct par rapport au rayonnement global varie au cours de l'année.

En été le rayonnement direct représenté 50% du rayonnement global alors qu'en hivers, il ne représente plus que 20%.

#### 1.1.2.6.) Le rayonnement réfléchi (diffusé).

Ce rayonnement provient de la réflexion diffuse du sol et qui intéresse l'ensemble des rayonnements direct et diffus que ce dernier reçoit.

#### 1.1.2.7) Fraction d'ensoleillement.

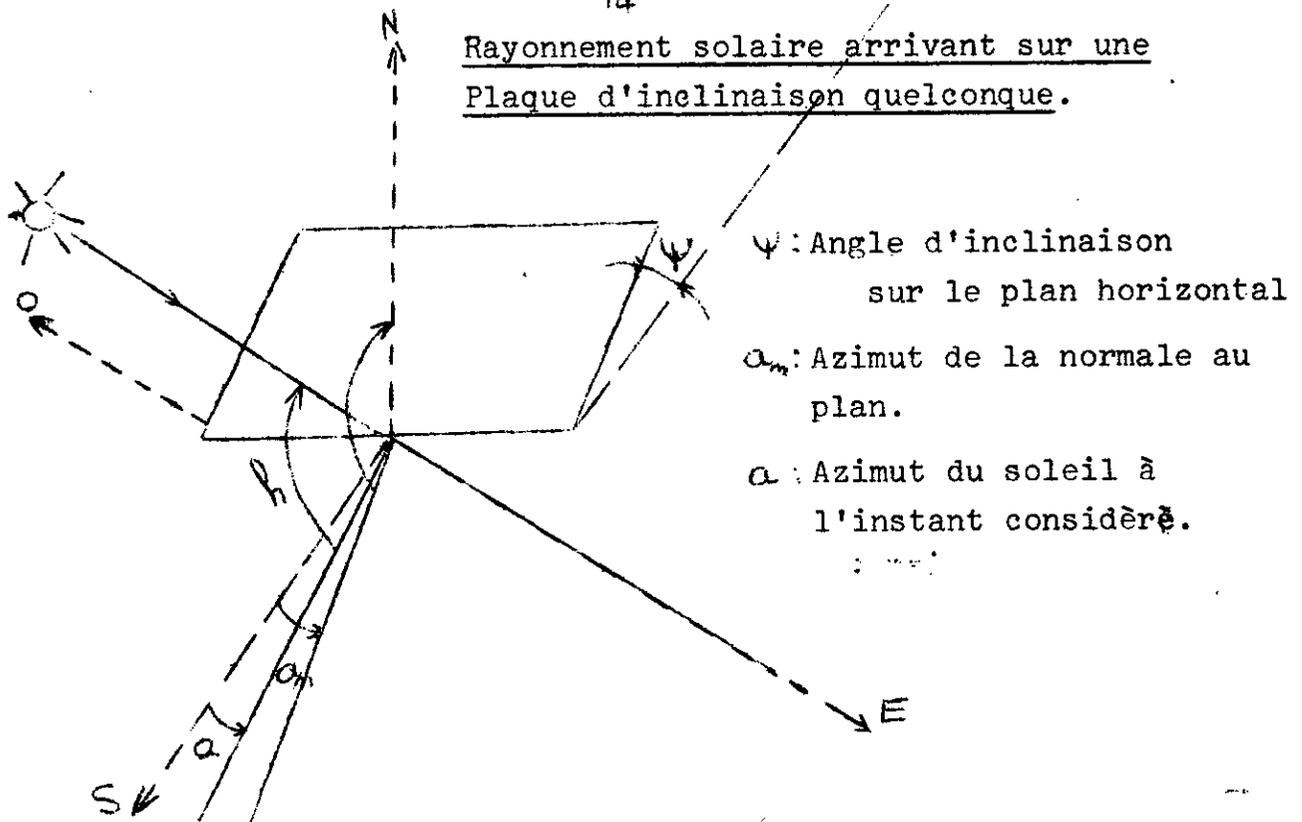
Une fois, le plan d'orientation du capteur choisi, on tient compte du facteur d'ensoleillement.

-Si  $SS_0$  est la durée maximum d'ensoleillement en un lieu donné (défini par sa latitude...) et à une époque de l'année (déterminée par la déclinaison du soleil).

-Si  $SS$  est la durée effective ce jour là (qui peut être plus petite du fait de la nébulosité), on définit alors le rapport.

$$\sigma = \frac{SS}{SS_0}$$

Rayonnement solaire arrivant sur une  
Plaque d'inclinaison quelconque.



$\psi$ : Angle d'inclinaison  
sur le plan horizontal

$\alpha_m$ : Azimut de la normale au  
plan.

$\alpha$ : Azimut du soleil à  
l'instant considéré.

1.1.3.) Comportement des corps vi-à-vis du rayonnement:

Un corps soumis à un rayonnement peut l'absorber le réfléchir ou le laisser traverser. on peut caractériser le comportement de chaque corps vi-à-vis du rayonnement par 3 coefficients:

-Un coefficient de reflexion égal à la quantité d'énergie réfléchie divisée par la quantité d'énergie incidente: on l'appelle R.

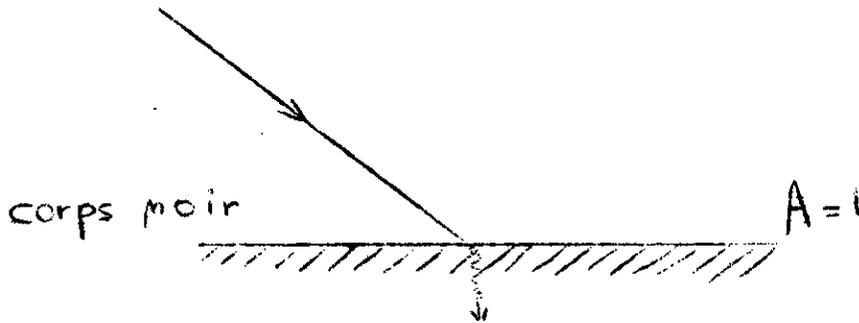
-Un coefficient d'absorption égal à la quantité absorbée divisée par la quantité incidente: on l'appelle A.

-Un coefficient de transmission égal à la quantité transmise divisée par la quantité incidente.

1.1.3.1) Le corps noir:

On appelle corps noir, tout corps absorbant complètement tout rayonnement incident. C'est donc un corps complètement opaque ayant un facteur de reflexion nul.

Un corps recouvert d'un pigment noir (noir de fumée, noir de platine), réalise approximativement un corps noir à condition que ce pigment ne soit pas un barrage thermique.



La puissance du rayonnement d'un corps noir idéal à la température  $T$  dans un milieu au zero absolu est donnée par la loi de Stefan-Boltzman.

$$M_{CN} = \sigma T^4$$

$\sigma$  = coefficient de Stefan-Boltzman ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ )  
 un corps quelconque placé dans les mêmes conditions que le corps noir a une emittance telle:  $M = \epsilon \sigma T^4$

$\epsilon$  = Facteur d'emission ou émissivité du corps

Il est à noter que tout corps peut être considéré comme source de rayonnement. L'énergie rayonnée atteint cependant sa valeur maximum pour la longueur d'onde  $\lambda_M$  déduite

de la loi de Wien

$$\lambda_M = \frac{2898}{T}$$

$M$ : étant exprimée en microns.

$T$ : en  $^{\circ}\text{K}$

### I.I.3.3) Le soleil:

L'analyse du rayonnement solaire a conduit à considérer le soleil comme un corps noir placé à une température comprise entre 5800 et 6000 $^{\circ}\text{K}$ . La puissance de ce rayonnement est donnée par la loi de Stefan-Boltzman:

$$M = \sigma T^4 = 5,67 \cdot 10^{-8} (5800)^4$$

$$M = 64 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2.$$

Le rayonnement émis est maximum pour les radiations voisines de:  $M = \frac{2898}{5800} = 0,5$

## 1.4/4) Les mesures solarimétriques et les appareils utilisés:

Pour l'utilisation de l'énergie solaire, on a besoin de connaître la valeur de l'énergie solaire reçue au sol. A cette fin, un certain nombre d'appareils sont utilisés.

### a.)-Le pyronomètre:

Il mesure le rayonnement global reçu par une surface plan. Cet appareil peut être accompagné d'un enregistreur ou d'un dispositif intégrateur (appareil utilisé à la S.E.S. de Bouzareah).

### b.)-Le pyréliomètre:

il permet de mesurer l'énergie reçue par une surface exposée perpendiculairement aux rayons solaires (rayonnement direct).

### c.)-Le pyranomètre à thermopile:

Il mesure le rayonnement diffus par l'atmosphère et éventuellement le rayonnement direct.

### d.)-Mesure de la durée d'ensoleillement:

Il existe de divers dispositifs dont on peut citer:- Un dispositif photoélectrique: composé de 3 cellules. l'une est exposée au soleil, l'autre est cachée par un écran qui masque le soleil direct. Ces 2 cellules sont branchées en opposition sur un enregistreur. Un courant apparaît seulement en présence de soleil.

)-Héliographe: C'est un appareil composé d'une sphère de verre qui agissant comme une lentille, concentre le rayonnement en un point sur un papier spécial qui brûle. Quand le soleil se déplace, le point brûlé trace une courbe dont la longueur est proportionnelle à la durée d'insolation. On peut aussi apprécier l'intensité d'un rayonnement d'après l'aspect de la partie brûlée.

## Indications sur la région de Bouzareah

Altitude: 345 m

Latitude: 36° 48' 4" 8 Nord.

17

Latitude: oh 12' 08" 58 Est.

Durée moyenne d'insolation : 28 200 s (Mai -juin-juillet-Août).

Puissance moyenne annuelle: 2244,6 /cm<sup>2</sup>

### 1.2.) La captation du rayonnement solaire:

On peut capter dire ~~travaux~~ le rayonnement solaire au moyen de panneaux plans dénommés "insolateurs". Selon le cas, les insolateurs permettent de produire de l'air chaud ou d'échauffer un liquide, la circulation se faisant par thermosiphon, pompe, ventilateur ou seulement par écoulement libre par gravité comme dans le cas qu'on se propose d'étudier dans ce projet.

On peut aussi capter indirectement au moyen de miroirs ou de lentilles qui modifient la direction des rayons solaire et généralement les concentrent avant la conversion en énergie utilisable.

Les capteurs plans sont généralement fixes.

#### 1.2.1.) Les Insolateurs Plans:

##### 1.2.11) Description:

Quand on peint en noir mat une surface à exposer au soleil, on augmente son pouvoir absorbant. Les pertes thermiques par réflexion et diffusion sont très réduites et la température de cette surface atteint facilement 60 à 70 °C.

Toutefois, une surface noircie rayonne beaucoup plus que si elle n'était pas noire. Et quand l'équilibre thermique est atteint, elle perd par rayonnement I.R. de grande longueur d'onde, en même temps que par conduction et convection. Cette déperdition peut-être éliminée en utilisant une couverture en verre ce qui permet de réaliser l'effet de serre.

#### L'effet de Serre.

Si on place au dessus d'un corps noir rayonnant une couverture transparente au rayonnement solaire mais opaque aux rayons de grande longueur d'onde, on aura

constitué un véritable piège au rayonnement:

c'est ce que l'on appelle l'effet de Serre.

Il permet de limiter les pertes par convection forcée dues au courant d'air.

L'intensité de l'effet de serre augmente en plaçant sur le châssis 2 ou 3 lames de verre séparées par des couches d'air.

D'une façon générale, un insolateur comporte essentiellement une surface absorbant l'énergie solaire, une couverture transparente et une isolation thermique

a) - La surface absorbante:

Appelée aussi "absorbeur":

C'est une surface noircie et mate. C'est le siège de la conversion thermique et sert au transfert de chaleur au fluide à chauffer. Ce transfert de chaleur se fait par conduction et convection quand le fluide circule à l'arrière de la surface absorbante. ou bien, il se fait par convection si le fluide à chauffer se trouve du côté où arrive le rayonnement.

b) - La couverture transparente.

Elle est souvent formée de verre traité "anti-reflets", généralement de 4 mm d'épaisseur. Le joint entre le corps et l'insolateur peut être, un mastic spécial aux silicones ou un profilé en caoutchouc résistant au vieillissement.

c) - L'isolation thermique.

En plus de la couverture transparente réduisant les pertes thermiques par effet de serre, il y a une isolation à l'arrière et sur les côtes. Celle-ci est souvent assurée par un habillage en polyuréthane (solution trop chère d'ou utilisation du liège).

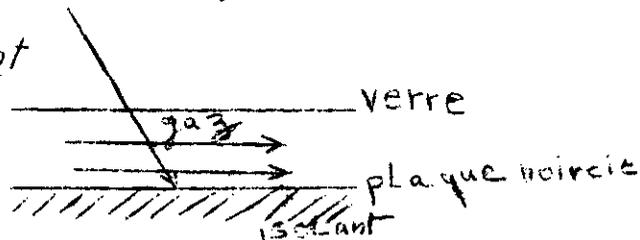
1.2.1.2) Les différents types d'insolateurs:

On envisage principalement les techniques se rapportant à l'insolateur plan. Ces capteurs se caractérisent essentiellement par la nature de leur fluide caloporteur (eau, air, huile, etc...).

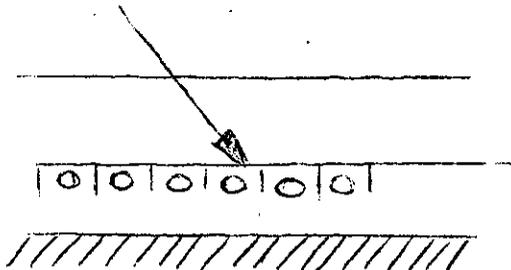
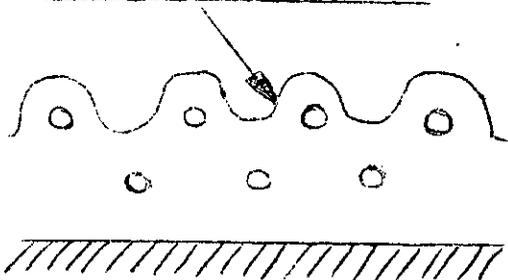
a) Les insolateurs à gaz (généralement l'air)

On les classe suivant le type de circulation. le fluide caloporteur peut s'écouler soit au dessus de l'absorbeur soit au dessous, soit au dessus et au dessous.

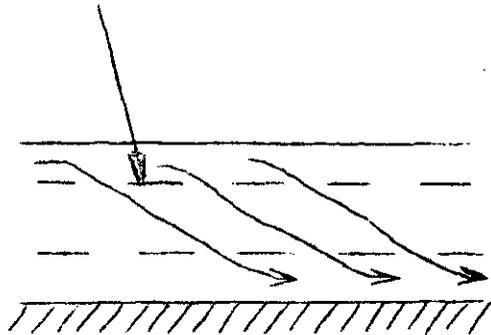
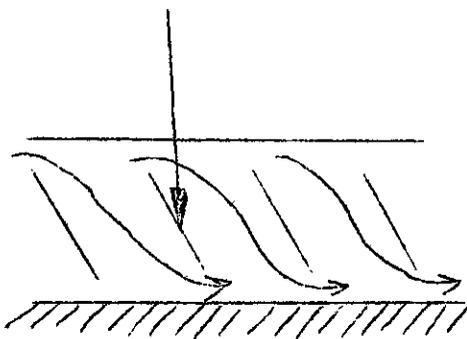
circulation avant



circulation arriere



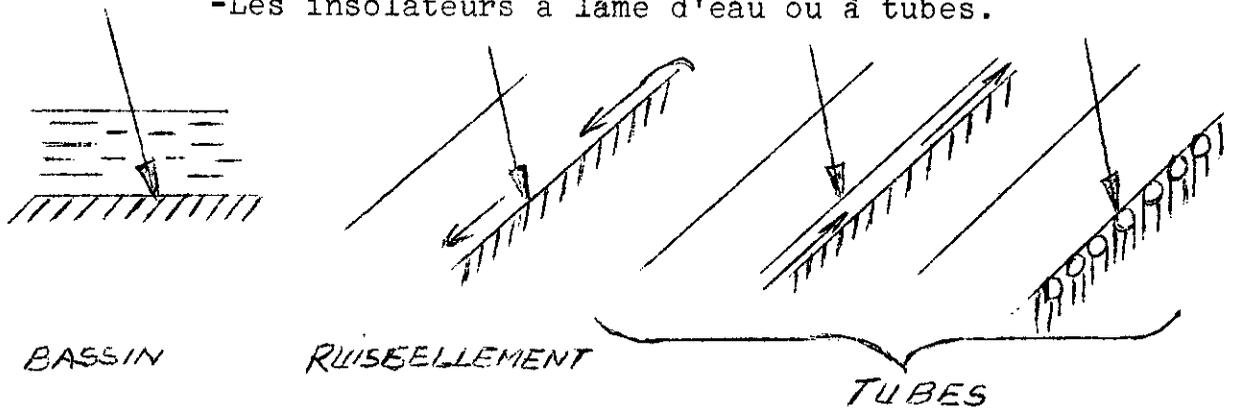
circulation mixte



b) Les insolateurs à liquide.

Ce sont jusqu'à présent les plus répandus. On en distingue principalement 3 familles:

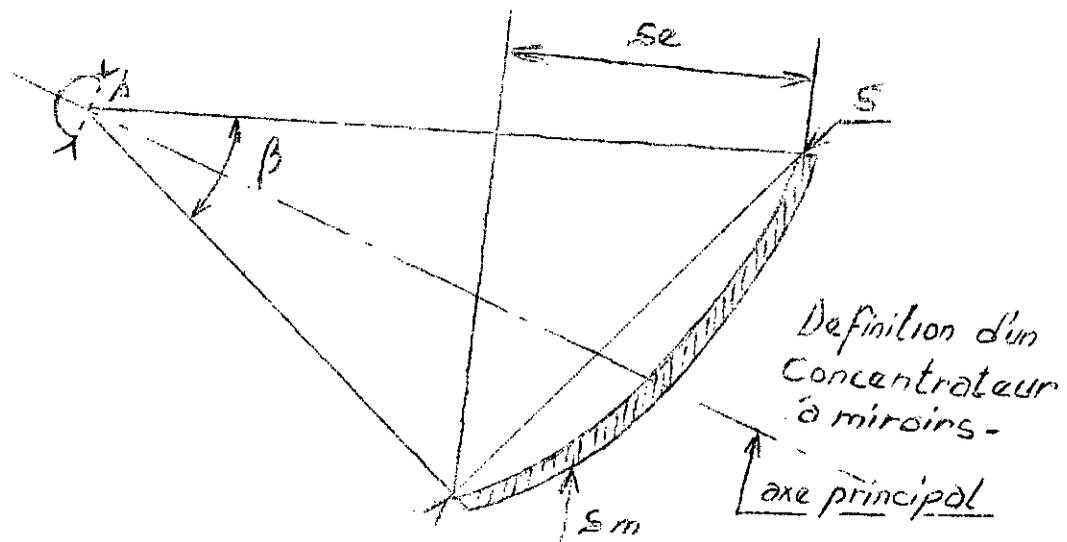
- Les insolateurs à bassin
- Les insolateurs à ruissellement.
- Les insolateurs à lame d'eau ou à tubes.



Chacune de ces solutions présente avantages et inconvénients liés au transfert thermique et aux problèmes de construction, que seule une étude comparative peut déceler.

1.2.2) les concentrateurs:1.2.2.1.) Définition:

Ce sont des appareils qui entrent généralement dans les gammes moyennes, hautes et très hautes températures dans la classification générale des capteurs héliométriques. Ils comportent une ou plusieurs surfaces réfléchissantes destinées à concentrer l'énergie solaire captée en énergie calorifique utilisable, par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur à un niveau de température adapté aux besoins.



21

$\beta$ : angle d'ouverture.  
 $A$ : surface apparente de l'absorbeur.  
 $S_e$ : surface efficace.  
 $S$ : surface de captation.  
 $S_m$ : surface de miroirs.

1.3.2.2.) Différents types de concentrateurs:

L'étude des concentrateurs n'étant pas le but de ce projet, on se bornera de mentionner brièvement les divers types existant actuellement.

a) les capteurs pointés:

Ce sont des dispositifs qui sont en permanence pointés vers le soleil à l'aide de capteurs de positions, afin que les rayons réfléchis par les miroirs puissent parvenir constamment sur les surfaces absorbantes fonctionnelles

b) Les héliostats:

Ce sont des systèmes destinés à renvoyer les rayons réfléchis dans une direction fixe. Les montures utilisées dans de tels dispositifs sont, soit dérivées des montures de Foucault, soit dérivées des systèmes équatoriaux ou altazimutaux. Il existe deux familles d'héliostats. Les uns sont à miroirs plans, les autres sont à miroirs focalisants.

c) Les champs de capteurs pointés.

Les différents types de capteurs pointés peuvent être utilisés par groupe afin de constituer un système solaire de puissance importante (plusieurs centaines de kW thermique ou même plusieurs dizaines de mégawatt thermique).

d) Les champs d'héliostats:

Un ensemble d'héliostats focalisants ou non, disposés sur un terrain généralement horizontal, constitue un champ d'héliostats.

Le convertisseur peut être le plus souvent du type linéaire ou ponctuel, il reçoit l'ensemble des rayons réfléchis par les miroirs mobiles, asservis aux mouvements apparents du soleil, de telle sorte que les faisceaux réfléchis restent fixes.

### 1.3.) La conversion de l'énergie solaire.

L'énergie solaire peut être convertie en chaleur, en électricité, en énergie chimique et en énergie mécanique. On distingue les conversions directes et indirectes. Les conversions directes comprennent les conversions photothermique, photoélectriques, photobiologique et photochimiques.

Les conversions indirectes utilisent la voie thermique et comprennent d'une part les opérations purement thermiques qui ne font intervenir que des échanges de chaleur et d'autre part, les opérations thermodynamiques pour lesquelles on fait intervenir une source chaude et une source froide.

#### 1.3.1) Conversion photothermique:

La conversion photothermique consiste en une transformation directe du rayonnement solaire en chaleur. Elle comporte des applications variées. Ce type de conversion est réalisé dans les fours solaires (2500 °C pour les fours à très haute température); les chaudières solaires (500 °C environ) ou pour la distillation solaire ainsi que le chauffage de l'eau ou de l'air pour des usages domestiques.

#### 1.3.2.) Conversion thermique:

Tout gaz porté à une température supérieure à 200 °C s'ionise spontanément en formant un plasma. Cette ionisation peut être obtenue grâce au rayonnement solaire qui permet d'atteindre de hautes températures.

#### 1.3.3.) La conversion photoélectrique:

Cette méthode consiste à exciter des charges électriques, les séparer en charges positives et négatives, et les amener à fournir un travail dans un circuit extérieur.

avant de se recombinaient. Ceci se passe dans le cas des photopiles solaires constituées de couples semi-conducteurs qui permettent la conversion du rayonnement intégralement en énergie électrique avec un rendement déjà de l'ordre de 10%

#### 1.3.4.) La conversion photobiologique

La photosynthèse chlorophyllienne se réalise dans les plantes vertes en utilisant le gaz carbonique de l'atmosphère, et il se dégage de l'oxygène. Cette photosynthèse n'utilise dans le spectre solaire que le rayonnement visible et le rayonnement du proche-ultraviolet. La zone d'absorption par les pigments actifs des plantes s'étendent sur les longueurs d'onde de 0,35 à environ 0,7 micron. Dans les molécules d'hydrates de carbone des plantes vertes, de l'énergie ex. solaire se trouve stockée sous forme d'énergie de liaison entre atomes de carbone et atomes d'hydrogène. Pour obtenir par ce moyen des produits énergétiques, la culture d'algues monocellulaires du type "algues énergétiques" est préconisée. Il est facile de procéder à une production accélérée d'algues, dans des "Insolateurs biologiques" en milieu contrôlé, avec mesure de la température, de la teneur en  $CO_2$  dont le séchage par voie solaire permettra de stocker l'énergie ex-solaire sous forme chimique. On pourra alors utiliser les algues séchées comme combustibles ou bien les soumettre à la fermentation par digestion anaérobie pour produire du méthane.

#### 1.3.5.) La conversion chimique:

Ce type de conversion est essentiellement représenté par la production d'une matière énergétique appelée à un grand avenir "l'hydrogène". L'hydrogène peut être obtenu soit par décomposition de la vapeur d'eau à une température de l'ordre de 1000°C et avec l'aide d'un catalyseur, soit par électrolyse de l'eau. En effet, l'hydrogène intéresse de plus en plus en raison de son pouvoir calorifique très élevé, de ses propriétés réductrices et de sa qualité de combustible non polluant. En plus, il est facile à transporter et à stocker.

### 1.3.6.) Les transformations thermodynamiques:

- / - a Basse température: à partir de collecteurs solaires plan, le fluide caloporteur conduit la chaleur vers l'unité de conversion qui peut être une machine thermique à bas rendement: monteuse, pompe, générateur...).
- a Température moyenne:

La mise en oeuvre de miroirs convergents fixes ou mobiles permet de produire de la vapeur à 120 ou 150°C pour les micro-centrales.

- a haute température:

C'est une solution pour produire de l'électricité à grande échelle. Elle consiste à alimenter une turbine par de la vapeur produite en concentrant le rayonnement solaire sur une chaudière. Les températures de fonctionnement sont de l'ordre de 300 à 600°C.

### 1.4.) Stockage:

Il serait inexact de dire qu'il y a toujours un problème de stockage. L'énergie solaire étant périodique, ses utilisations les plus simples sont celles qui satisfont des besoins périodiques sans problème de stockage. C'est le cas du pompage de l'eau d'un puits, de la production de froid, etc...

#### 1.4.1.) le stockage thermique:

Le mode de stockage actuellement le plus pratique est le stockage sous forme thermique. La chaleur peut être transportée par un fluide accumulé dans des empilements de matériaux réfractaires, aux quels on demandera de restituer la chaleur emmagasinée durant les périodes sans ensoleillement. On peut aussi utiliser des tubes enterrés dans lesquels circule le fluide, la chaleur étant ainsi transmise au sol où elle est emmagasinée, pour être ensuite récupérée par circulation du fluide arrivant à basse température.

1.4.2.) Stockage au moyen de batteries d'accumulateurs  
Electriques.

Ce mode de stockage est actuellement coûteux et a un faible rendement. L'apparition de batteries quatre ou Cinq fois plus légères que les batteries classiques au plomb ouvrirait la voie à un stockage pratique de l'énergie obtenue avec des générateurs solaires, à condition que le prix de ces batteries soit abordable.

1.3.4.)-Stockage Hydraulique:

Dans le cas d'une centrale hydroelectrique, pour faire face aux pointes de consommation d'électricité, on peut stocker de l'énergie en pompant de l'eau vers un reservoir supérieur aux heures creuses, de façon à utiliser l'energie dont on dispose alors en excédent.

II H A P I T R E    I I

---

HYDRODYNAMIQUE    DES    FILMS    MINCES    ET  
ETUDE    THERMIQUE    THEORIQUE    DU  
CAPTEUR    A    RUISSELEMENT/

---

## 2.1.) Introduction et Généralités.

L'écoulement en film mince est un cas particulier d'écoulement dans lequel la tension superficielle et la viscosité jouent des rôles très importants.

L'écoulement en film mince est d'un intérêt spécial dans l'étude de la dissolution des gaz dans les liquides et dans beaucoup d'autres problèmes techniques. Il peut s'accompagner de phénomènes complexes (capillarité ou tension superficielle, ondes de gravité, paquets de turbulence, freinage de l'air à la surface libre etc...) qui réclament certaines approximations dans l'étude théorique du problème.

La majorité des études expérimentales d'un tel écoulement ont été faites avec des liquides s'écoulant par gravité le long d'un plan incliné ou vertical. Trois différents régimes d'écoulement ont été observés expérimentalement.

a) Pour les nombres de Reynolds  $Re = \frac{v h}{\nu}$  qui ne dépassent pas 20 à 30 (où  $v$  est la vitesse moyenne à travers la section du film et  $h$  son épaisseur) le régime d'écoulement est dit laminaire lisse.

b) Pour les nombres de Reynolds  $30 < Re < 50$ , apparaît un régime d'ondes dans lequel un mouvement ondulatoire vient se superposer à l'avance du film.

c) Pour  $Re \approx 1500$ , le régime laminaire est remplacé par le régime turbulent.

L'analyse dimensionnelle des différentes forces déterminant le mouvement conduisent à définir les nombres adimensionnels suivants:

$$\text{Reynolds: } P_r = \frac{U_m h_m}{\nu} = \frac{Q}{\nu}$$

$$\text{Weber: } We = \frac{U_m}{\sqrt{\frac{\sigma}{\rho h_m}}}$$

$$\text{Froude: } Fr = \frac{U_m}{\sqrt{g h_m}}$$

avec:

$U_m$  = vitesse débitante.

$h_m$  = épaisseur moyenne du film

$Q = U_m h_m$  = débit par unité de largeur du plan.

$\nu$  = viscosité cinématique du liquide.

$\sigma$  = Coefficient de tension superficielle du liquide.

$\rho$  = masse volumique du liquide.

.Considérons le liquide animé d'une vitesse  $V$  de composantes  $u, v, w$  rapportées à un système d'axes rectangulaires ( $Ox$  dans le sens de l'écoulement moyen,  $Oy$  normal au plan,  $Oz$  horizontale du plan).

Nous prendrons comme base de calcul les équations générales de Navier-STOKES, qui s'écrivent en coordonnées rectangulaires:

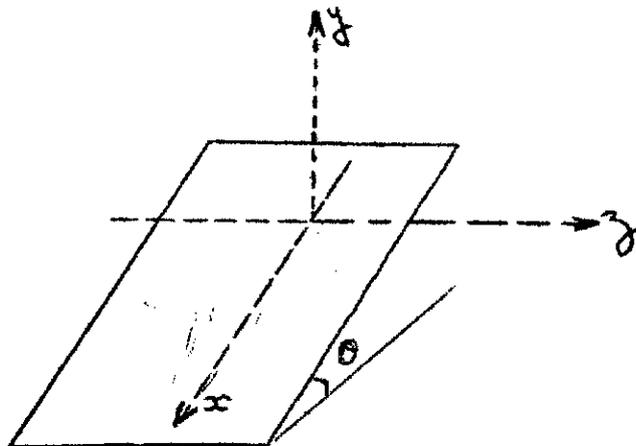
$$-1- \quad \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = g \sin \theta - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \Delta u$$

$$-2- \quad \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = g \cos \theta - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \Delta v$$

$$-3- \quad \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \Delta w$$

ainsi que l'équation de continuité.

$$-4- \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$



Il est à noter que si l'on considère le régime comme établi (hors de la zone d'entrée), et si l'on élimine les effets de bord, ce système d'équations se simplifie grâce au caractère bidimensionnel de l'écoulement moyen.

## 2.2) Régime laminaire lisse:

### 2.2.1) étude du cas idéal:

#### 2.2.I.I. Profil des vitesses et frottement pariétal:

Si l'écoulement est étudié après la zone d'entrée (régime permanent) à de faibles vitesses (faibles nombres de Reynolds en négligeant le freinage de l'air sur la surface libre, les équations (1), (2) et (3) se réduisent à:

$$-5- \quad \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + g \frac{\sin \theta}{\nu} = 0$$

$$-6- \quad \frac{\partial P}{\partial y} = \rho g \cos \theta$$

$$\vec{V} \left| \begin{array}{l} u=u(y) \\ v=0 \\ w=0 \end{array} \right.$$

$$-7- \quad \frac{\partial P}{\partial z} = 0$$

L'équation de continuité est automatiquement satisfaite avec les conditions aux limites suivantes:

$u=0$  pour  $y=0$  (pas de glissement sur la paroi solide).

$\frac{du}{dy} = 0$  pour  $y=h$  (pas de freinage à la surface libre)

Le champ des vitesses est donné par le profil semi-parabolique de Nusselt (I)

$$-8- \quad u = \frac{g \sin \theta}{\nu} \left( hy - \frac{y^2}{2} \right)$$

La vitesse à la surface ( $y=h$ ) est alors  $u_s = \frac{g h^2 \sin \theta}{2 \nu}$

En intégrant sur l'épaisseur du film, on obtient la vitesse moyenne (vitesse débitante)

$$-10- \quad U_m = \frac{gh^2 \sin \theta}{3\nu}$$

on en déduit le débit volumique par unité de largeur du plan

$$-11- \quad Q = \frac{gh^3 \sin \theta}{3\nu}$$

avec l'épaisseur du film:

$$-12- \quad h = \left( \frac{3Q\nu}{g \sin \theta} \right)^{1/3}$$

Le frottement sur le plan sera donné par:

$$-13- \quad \tau = \mu S = \rho gh \sin \theta = (3 \rho^2 g^2 \sin^2 \theta / Q)^{1/3}$$

en posant:

$$(14) \quad S = \left( -\frac{du}{dy} \right)_{y=0} \quad \text{gradient de la composante longitudinale de la vitesse sur le plan.}$$

#### 2.2.1.2) Caractéristique adimensionnelle de l'écoulement:

Nous venons de voir que l'équation différentielle du mouvement se réduisait dans ce cas à:

$$-15- \quad \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{g \sin \theta}{\nu} = 0$$

on pose:  $u^\circ = \frac{u}{u_m}$  vitesse adimensionnelle

$y^\circ = \frac{y}{h}$  distance adimensionnelle à la paroi solide

l'équation(5) devient:

$$-15- \quad \frac{u_m}{h^2} \frac{\partial^2 u^\circ}{\partial y^{\circ 2}} + g \frac{\sin \theta}{\nu} = 0$$

soit

(16)  $\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + N=0$  avec

-17-  $N = \frac{Re \sin \theta}{Fr}$  nombre adimensionnel caractérisant l'écoulement.

Or d'après les équations (10) et (12) on constate qu'il existe une relation liant les nombres de froude et de Reynolds.

-18-  $Fr = \frac{Re \sin \theta}{3}$  ce qui entraîne

-19-  $N=3$

2.2.2.) ordre de grandeur des approximations effectuées:

2.2.2.1.) établissement du régime, effet d'inertie:

Le fluide après la source est soumis à l'action de la pesanteur qui va déterminer son écoulement sur le plan; mais à cause des forces d'inertie et en fonction du profil des vitesses à l'entrée, le mouvement nécessite une certaine distance pour s'établir. Ce phénomène a été <sup>étudié</sup> notamment en régime laminaire par KASIMOV et ZIGMUND (2) sur un plan vertical illimité latéralement. En appliquant les approximations classiques de couches limite, les équations (I) est (4) peuvent s'écrire:

-20-  $u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g \sin \theta + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$

-21-  $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$

Une solution approchée <sup>peut</sup> être obtenue sans connaître la forme particulière du profil des vitesses. À quelques Cm de la source, ces auteurs ont trouvé la composante longitudinale de la vitesse de la forme /

-22-  $u = \frac{g}{\nu} \left( h_x y - \frac{y^2}{2} \right) + \frac{\nu}{6} \left( \frac{g}{4\nu^2} \right)^2 \frac{h_x^2}{x} \left( y^4 - \frac{13}{210} \cdot \frac{g}{4\nu^2} \cdot \frac{h_x y^7}{x} \right)$

$h_x$  étant l'épaisseur du film à x cm après la source.

En comparant les équations (8) et (22) on voit donc que pour un liquide tel que l'eau, les effets d'inertie ont une influence négligeable.

2.2.2.2.) effet de freinage contre les parois latérales dû à la viscosité:

Le phénomène a été étudié par HOPF(3) l'équation(I) se réduit à .

$$-23- \quad \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = - \frac{g \sin \theta}{\nu}$$

et les équations aux limites deviennent, sur un plan de largeur

$$2a \quad u = 0 \text{ pour } y = 0 \text{ et } -a < z < a$$

$$u = 0 \text{ pour } z = \pm a \text{ et } 0 < y < h$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0 \text{ pour } y = h \text{ et } -a < z < a$$

HOPF en déduit une distribution des vitesses du type

$$-24- \quad u = \sum_{m=0}^{\infty} (-1)^m \frac{16 a^2 g \sin \theta}{(2m+1)^3 \pi^3 \nu} \left( \frac{\cos(2m+1)\frac{\pi}{2} \frac{(y-h)}{a}}{\cos(2m+1)\frac{\pi}{2} \frac{h}{a}} - 1 \right) \cos(2m+1)\frac{\pi}{2} z$$

avec un débit Q donné par:

$$-25- \quad 2a Q = \frac{4 a^3 g \sin \theta}{\nu} \left[ \sum_{m=0}^{\infty} \left( \frac{2}{(2m+1)\pi} \right)^5 \operatorname{tg}(2m+1)\frac{\pi}{2} \frac{h}{a} - \frac{h}{a} - \frac{h}{a} \frac{Mg}{\rho} \left( \frac{2}{(2m+1)\pi} \right)^4 \right]$$

Si l'épaisseur h du film est relativement faible devant la largeur 2a du plan, le débit est approximativement:

$$(26) \quad Q = g \frac{h^3 \sin \theta}{3\nu} \left( 1 - 0,63 \frac{h}{a} \right)$$

2.2.2.3 ) effet de capillarité:

HORTON (4) BINNIE (5), FULFORD(6) montrèrent son influence en mesurant et en calculant l'accroissement d'épaisseur du film au voisinage des parois latérales, et ainsi, le passage d'une majeure partie du débit dans les angles.



Les deux effets précédents se compensent en partie

#### 2.2.2.4). Freinage de l'air à la surface libre:

En négligeant le frottement à la surface libre dans l'intégration de l'équation(5), nous obtenons un profil semi-parabolique du champ des vitesses, avec maximum à la surface libre. La très faible épaisseur du film, (de l'ordre de 1 mm) entraîne une grande difficulté de vérification expérimentale rigoureuse de cette loi. Cependant GRIMLEY(7) a utilisé une technique ultrascopique pour déterminer la vitesse de particules colloïdales en solution. En supposant que ces particules se meuvent avec la vitesse locale de l'écoulement les mesures à différentes distances du plan donnent la répartition complète des vitesses dans toute l'épaisseur.

Le maximum de la vitesse apparaîtrait au sein du liquide à une faible distance au dessous de la surface, tandis que près du plan, les valeurs expérimentales de la vitesse seraient inférieures à celles calculées par (8).

A l'aide d'une méthode chronophotographique, CLAYTON(8) puis WILKES NEDDERWAN(9) ont déterminé le profil des vitesses dans un plan vertical. Les valeurs trouvées en régime laminaire lisse et régime d'ondes sont en très bon accord avec les prévisions de l'équation (8)

#### 2.3.) Régime laminaire d'ondes.

A partir du régime laminaire lisse, en augmentant progressivement le débit, on constate l'apparition d'ondulations à la surface libre, l'écoulement conservant son caractère laminaire. Ce phénomène de transition est particulier aux écoulements en canaux ouverts, contrairement aux écoulements en charge.

Pour des films très minces, tels que ceux que nous étudions (épaisseur de l'ordre du millimètre), les ondes ont pour origine soit la capillarité, soit la gravité. Ces deux effets qui se superposent varient avec l'inclinaison du plan.

Différentes valeurs critiques des nombres de Reynolds, de FROUDE et de WEBER ont été proposées théoriquement.

Notons par exemple:

-KAPITSA (10).

$$-27- R_{ec} = 0,61(K \sin \theta)^{-1/11} \text{ avec } K = \frac{\lambda^4 g}{\rho \sigma^3}$$

Valable de grandes longueurs d'onde ( $\lambda \geq 13,7 h_m$ )

Dans le cas de l'eau sur un plan vertical  $R_{ec} = 5,8$

-BINNITE (5).

$$-28- R_{ec} = \frac{5}{6} \cot \theta \text{ dans le cas de l'eau}$$

-Les ondes de gravité ont été étudiées par ISHIHARA(11) en régime laminaire. Il propose pour de faibles inclinaisons et de petites amplitudes de vagues, une vitesse d'ondes de la forme

$$-29- c = \frac{6}{5} u_m + (gh_m + \frac{6}{25} u_m^2)^{1/2}$$

Levich (12) a donné une analyse très intéressante du problème en tenant compte de la capillarité. En supposant l'écoulement bidimensionnel, les équations (1) et (2) se réduisent à:

$$-30- \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = + g \sin \theta - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

$$-31- \frac{\partial P}{\partial y} = 0$$

avec les conditions aux limites suivantes:

-à la surface libre ( $y = h$ )

$h(x,t)$

$$\left| \begin{array}{l} P = -\sigma \frac{d^2 h}{dx^2} \\ \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \end{array} \right.$$

-sur la paroi solide ( $y=0$ )

$$\left| \begin{array}{l} u=0 \\ v=0 \end{array} \right.$$

si l'amplitude des vagues est petite devant la longueur d'ondes, l'équation de continuité peut s'écrire

$$-32- \frac{\partial h}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left( \int u du \right)$$

On considère que la distribution des vitesses a toujours le profil semiparabolique donné par l'équation;

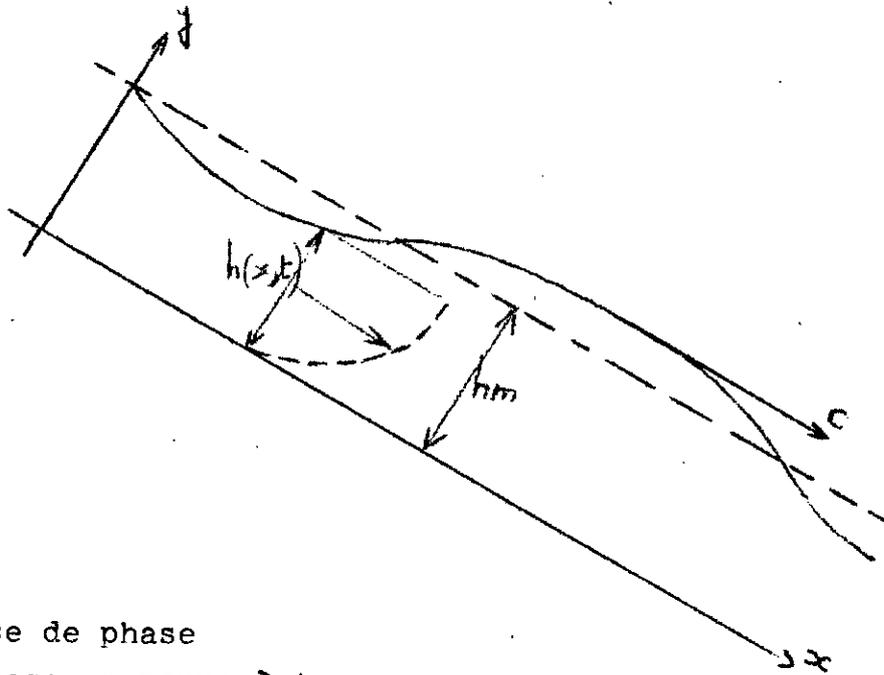
$$-33- u = \frac{3 u_m}{h(x,t)} \left( y - \frac{y^2}{2h(x,t)} \right)$$

En portant cette valeur dans l'équation(30) et en intégrant sur l'épaisseur du film, on obtient:

$$-34- \frac{\partial u_m}{\partial t} + \frac{9}{10} u_m \frac{\partial u_m}{\partial x} = g \sin \theta + \frac{\sigma}{\rho} \frac{d^3 h}{dx^2} - \frac{3 \nu u_m}{h^2}$$

l'équation de continuité devenant:

$$-35- \frac{\partial h}{\partial t} = - \frac{\partial (u_m h)}{\partial x}$$



$c$  = vitesse de phase

$u_m$  = vitesse moyenne à travers  $h_m$

après résolution numérique, LEvich montre que

$$-36- c = 2,4 u_m$$

$$-35- h_m = 1,34 \left( \frac{\sigma \nu}{g \sin \theta} \right)^{1/3}$$

Cette dernière valeur est très légèrement inférieure à celle obtenue par l'équation ( 12).

Les solutions des équations différentielles sont alors:

$$-38- u = 3 U_m \left[ 1 + 0,6 \sin(kx - \omega t) - 0,3 \sin^2(kx - \omega t) \right] \left( \frac{y}{h} - \frac{y^2}{2h^2} \right)$$

$$-39- v = - 1,8 u_m k \cos(kx - \omega t) \left[ 1 - \sin(kx - \omega t) \right] \left( \frac{y^2}{2h} - \frac{y^3}{6h^2} \right)$$

avec  $K =$  nombre d'ondes

$\omega = c k =$  fréquence

A partir des valeurs de ces deux composantes de la vitesse nous voyons qu'au voisinage du plan :

$$-40- u = S y$$

$$\text{avec } S = \frac{3 u_m}{h} \left[ 1 + 0,6 \sin(kx - \omega t) - 0,3 \sin^2(kx - \omega t) \right]$$

$$-41- v = \beta y^2$$

$$\text{avec } \beta = - \frac{1,8 u_m}{2h} \cdot k \cos(kx - \omega t) \left[ 1 - \sin(kx - \omega t) \right]$$

Il faut noter que  $S$  et  $\beta$  sont fonction de la position  $x$  et du temps.

#### 2.4. Régime turbulent:

A cause de la grande complexité du processus de turbulence dans l'écoulement en film mince, le problème n'a pas encore reçu à notre connaissance de traitement analytique. La plupart des études reposent sur des considérations semi-empirique de couches limites.

Considérons la vitesse  $\vec{V}$  comme somme d'une valeur moyenne  $\vec{\bar{V}}$  constante dans le temps, et d'une partie fluctuante  $\vec{V}'$

$$-42- \vec{V} = \vec{\bar{V}} + \vec{V}'$$

$$\begin{cases} u = \bar{u} + u' \\ v = v' \\ w = w' \end{cases}$$

et  $p = \bar{p} + p'$

En prenant la moyenne dans un temps beaucoup plus long que la durée moyenne des fluctuations turbulentes, on a :

$$\overline{u'} = \overline{v'} = \overline{w'} = \overline{p'} = 0 \text{ et } \frac{\partial \overline{u}}{\partial t} = 0$$

En utilisant les propriétés du théorème de la moyenne sur l'opération de dérivation, l'équation de continuité donne :

$$-43- \quad \frac{\partial \overline{u}}{\partial x} = 0$$

et l'équation générale du mouvement moyen devient :

$$-44- \quad u' \frac{\partial u'}{\partial x} + v' \frac{\partial u'}{\partial y} + w' \frac{\partial u'}{\partial z} = g \sin \theta - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial y^2}$$

si on considère la pression  $\overline{p}$  constante sur une ligne de courant :

$$-45- \quad \frac{\partial \overline{p}}{\partial x} = 0$$

Regroupant les termes fluctuant du premier membre de façon à faire apparaître les tensions de REYNOLDS :

$$-46- \quad \frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} - \underbrace{\overline{u' \frac{\partial u'}{\partial x}} - \overline{v' \frac{\partial u'}{\partial y}} - \overline{w' \frac{\partial u'}{\partial z}}}_{u' \operatorname{div} V'} = g \sin \theta + \nu \frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial y^2}$$

$u' \operatorname{div} V' = 0$  d'après l'équation de continuité

En outre, on peut supposer que les gradients des tensions de REYNOLDS suivant Ox et Oz <sup>ont</sup> une moyenne nulle dans le temps, en raison de la symétrie des effets de turbulence suivant ces deux directions.

$$-47- \quad \frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} = \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} = 0$$

d'où:

-48-

$$\frac{\partial u'v'}{\partial y} = g \sin \theta + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2}$$

et en posant:

$$y^{\circ} = \frac{y}{h'} \text{ distance adimensionnelle à la paroi}$$

$$u^{\circ} = \frac{u}{u_m} \text{ vitesse adimensionnelle longitudinale}$$

$$(u'v')^{\circ} = \frac{u'v'}{\tau/\rho} \text{ tension adimensionnelle.}$$

on obtient finalement:

$$-49- \quad \frac{\partial^2 \bar{u}^{\circ}}{\partial y^{\circ 2}} + N \left( 1 - \frac{\partial (u'v')^{\circ}}{\partial y} \right) = 0$$

La connaissance expérimentale des variations des tensions de REYNOLDS nous permettrait d'intégrer cette équation différentielle et donc de déterminer le profil des vitesses. Mais on connaît la difficulté de telles mesures dans un film liquide de 1 mm d'épaisseur. Les différentes courbes données par HINZE (13) obtenue dans divers types d'écoulement (conduites, plaque plane) paraissent difficilement applicables dans notre cas.

Toutefois, on doit mentionner les résultats de DUKLER et BERGELIN (14) qui utilisent "le profil universel des vitesses" de NIKURADSE:

$$-50- \quad u^+ = y^+ \quad \text{pour} \quad 0 \leq y^+ \leq 5$$

$$-51- \quad u^+ = 2,05 + 5,0 \log y^+ \quad 5 < y^+ \leq 30$$

$$-52- \quad u^+ = 5,5 + 2,5 \log y^+ \quad 30 < y^+ \leq h^+$$

où:

$$u^+ = \frac{u}{u^*} \text{ vitesse adimensionnelle}$$

$$y^+ = y \frac{u^*}{\nu} \text{ Distance adimensionnelle à la paroi.}$$

$$h^+ = h \frac{u^*}{\nu} \text{ épaisseur adimensionnelle}$$

$$u^* = \left( \frac{\tau}{\rho} \right)^{1/2} \text{ vitesse de frottement.}$$

En intégrant ces vitesses adimensionnelles sur l'épaisseur du film, ces auteurs trouvent si  $h^+ > 30$ . (vérifié expérimentalement dans le cas de l'écoulement).

$$-53- R_e = u_m^+ \cdot h^+ = h^+ (3,0 + 2,5 \log h^+) - 64$$

$$-54- h^+ = \frac{(g \sin \theta)^{1/2} h^{3/2}}{\nu}$$

Ces deux dernières relations permettent de déterminer  $h$  connaissant le débit  $Q$  et l'inclinaison du Plan. Les travaux expérimentaux de PORTALSKY (15) concernant la mesure de  $h$  sur le plan vertical diffèrent peu de ces valeurs théoriques.

En considérant le régime parfaitement établi, la connaissance de  $h$  nous permet d'en déduire le frottement

$$-55- \tau = \rho g h \sin \theta .$$

2.5.) Etude thermique théorique du Capteur:(17).2.5.1) équation caractéristique du fonctionnement:

Le fonctionnement thermique d'un capteur solaire est le suivant:

La surface absorbe l'énergie incidente, qu'elle transmet par l'intermédiaire de la surface d'échange au fluide caloporteur. Cette transformation s'effectue plus ou moins efficacement selon, d'une part le type du capteur, et d'autre part, suivant le niveau de température du fluide caloporteur. Le capteur est le siège de déperdition thermique. La surface chaude échange de la chaleur avec l'environnement par rayonnement et convection naturelle et/ou forcée.

L'équation qui caractérise un tel fonctionnement, en régime permanent, est par unité de surface de l'absorbeur:

$$-56- P_a = P_u + P' \quad (\text{en } W/m^2)$$

avec:  $P_a$ : puissance incidente du rayonnement absorbé par unité de surface de l'absorbeur.

$P_u$ : Puissance utile (en  $W/m^2$ ).

$P'$ : Pertes thermiques ( $W/m^2$ ).

Le rayonnement incident, avant de parvenir sur l'absorbeur, peut subir différents affaiblissements ou des modifications de direction.

En désignant par:

$E$ : L'éclairement énergétique au niveau du capteur ( $W/m^2$ ).

$\alpha$ : L'absorptivité des surfaces absorbantes (%).

( $\alpha = 0,95$ : pour une peinture noire mate et de bonne qualité).

$\tau$ : La transmissivité des parois protectrices (%)

(pour le verre ordinaire: = 0,85)

$\rho$ : La réflectivité (ou la réfractivité) des surfaces réfléchissantes (ou réfractante) (%).

L'expression de la puissance du rayonnement absorbé (Pa) s'écrit alors:

$$-57- Pa = E \rho c \tau \alpha$$

"C" étant la concentration géométrique du capteur.

Remarque: Dans le cas des capteurs non-concentrateurs, on a

$$C = 1$$

$$\rho = 1$$

Le fluide caloporteur assure la distribution de la puissance utilisable. L'expression de la puissance utile est donc de la forme:

-58-

$$Pu = q Cp (\theta_s - \theta_e)$$

avec  $q$ : le débit massique du fluide caloporteur (kg/s m<sup>2</sup>)  
 $Cp$ : la chaleur spécifique du fluide caloporteur (J/kg°C)  
 $\theta_s, \theta_e$ : Les températures du fluide à la sortie et à l'entrée du capteur (°C).

### 2.5.2) Estimation des pertes thermiques du convertisseur:

L'expression généralement admise qui caractérise les pertes est la suivante.

$$-59- P' = K (\theta_{moy} - \theta_a)$$

avec  $K$ : La conductance apparente des pertes à la température  $\theta_{moy}$  (W/m<sup>2</sup>°C).

$\theta_{moy}$ : La température moyenne de la surface absorbante (°C).

$\theta_a$ : La température ambiante (°C).

Il est généralement assez commode d'exprimer la température moyenne de l'absorbeur en fonction des températures du fluide à l'entrée et à la sortie. De nombreux auteurs, dans le cas de non-concentrateurs, proposent pour la température moyenne deux expressions:

$$-60- \theta_{moy} = \frac{\theta_s + \theta_e}{2}$$

$$\theta_{moy} = \frac{\theta_s + \frac{\theta_s + \theta_e}{2}}{2} + \Delta \theta$$

$\Delta\theta$ : Gradient de Temperature correspondant au transfert de chaleur entre la surface absorbante et la fluide caloporteur. pour nos calculs, l'expression -60- a été retenue. La deuxième expression exige la connaissance du  $\Delta\theta$  qui est inaccessible par mesure expérimentale.

L'équation -56-, en remplaçant  $P_a$ ,  $P_u$  et  $P'$  par leurs expressions respectives, devient alors:

$$-61- \quad E_i \tau \alpha = q \varphi (\theta_s - \theta_e) + K \left( \frac{\theta_s + \theta_e}{2} - \theta_a \right)$$

$$P_a = P_u + P'$$

Calcul des Coefficients  $\tau$  et  $\alpha$

	$\tau$	$\alpha$	$\tau \cdot \alpha$
Sans vitrage	1	0,95	0,95
Simple vitrage	0,85	0,95	0,87
Double vitrage	0,72	0,95	0,68

Le rendement instantané du capteur est donné par l'expression:

$$\eta_{i \text{ exp}} = \frac{P_u}{E_i} \quad \text{avec } P_u = P_a - P'$$

-Sans vitrage:

$$\eta_i = 0,95 - \frac{K}{E_i} (\theta_m - \theta_a) \quad -62-$$

-Simple vitrage:

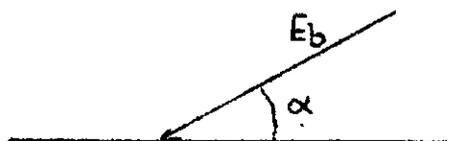
$$\eta_i = 0,81 - \frac{K2}{E_i} (\theta_m - \theta_a) \quad -63-$$

-Double vitrage:

$$\eta_i = 0,68 - \frac{K3}{E_i} (\theta_m - \theta_a) \quad -64-$$

-Evaluation du flux reçu sur une surface inclinée d'un angle  $i$ :

A la SES, nous disposons d'un pyranomètre donnant le flux sur un plan horizontal. Il est nécessaire d'évaluer la flux reçu sur un plan incliné d'un angle  $i$ . Différentes formules permettent de calculer le flux.



Soient:  $E_{dh}$ : flux diffus;  $E_b$ : flux direct et  $E_h$ : flux global sur une surface horizontale. On a donc:

$$E_h = E_{dh} + E_b \sin \alpha$$

Soient:  $E_{o,h}$  = flux reçu sur une surface horizontale hors atmosphère

$$E_{o,h} = E_{s,c} \left[ 1 + 0,034 \cos \frac{360}{365} N \right] \left[ \cos L \cos h + \sin L \sin \delta \right]$$

$E_{s,c}$ : Constante solaire = 1353 w/m<sup>2</sup>

définie  
On a  $K_T = \frac{E_h}{E_{o,h}}$

Alors  $E_b = E_o (a_k + b)$  avec  $E_o = E_{s,c} \left[ 0,034 \cos \frac{360}{365} N + 1 \right]$

$K_T$	a	b
0,00 - 0,05	0,04	0,00
0,00 - 0,15	0,01	0,002
0,15 - 0,25	0,06	0,006
0,25 - 0,35	0,32	-0,071
0,35 - 0,45	0,82	-0,246
0,45 - 0,55	1,56	-0,579
0,55 - 0,65	1,69	-0,651
0,65 - 0,75	1,49	-0,521
0,75 - 0,85	0,27	-0,359
-		

L: Latitude du lieu = (36,8°)

$\delta$ : Declinaison du soleil (Soleil) ( $\sin \delta = 0,4 \sin 0,986 (J - 82)$ )

h: Angle horaire du soleil.

$$E_i = E_b \cos \theta + \frac{E_{dh}}{2} \cos^2 \left( \frac{i}{2} \right)$$

$$\cos \theta = \sin (L - i) \sin \delta + \cos(L-i) \cos \delta \cos h$$

2.5.3- Estimation de la conductance des Pertes (K)2.5.3.1) Capteur sans vitrage:

On distingue deux conductances de pertes: l'une avant, pour la convection et le rayonnement thermique, l'autre arrière, pour la conduction thermique à travers l'isolant. On aura la relation:

$$K = h_r + h_{cv} + h_{ar}$$

$h_r$ : Coefficient d'échange apparent par rayonnement.

$h_{cv}$ : Coefficient d'échange par convection.

$h_{ar}$ : Coefficient d'échange apparent par conduction.

Évaluation de  $h_r$ ,  $h_{cv}$  et  $h_{ar}$ :

L'expression du coefficient d'échange apparent par conduction est:

$$h_{ar} = \frac{\lambda_{ar}}{e} \left( \frac{\theta_{moy} - \theta_{ar}}{\theta_{moy} - \theta_a} \right)$$

$\lambda_{ar}$ : Conductivité thermique du liège / = 0,05 W/m°C

$e$ : épaisseur de l'isolant ( 5 cm )

$\theta_{ar}$ : Température superficielle de la paroi arrière de l'isolant.

pour les calculs,  $\theta_{ar}$  est prise égale à  $\theta_a$  (domaine des très basses températures). On obtient:

$$-65- \quad h_{ar} = \frac{\lambda_{ar}}{e}$$

Le coefficient d'échange apparent par rayonnement est donné par:

$$h_r = \frac{\epsilon \sigma (\theta_m^4 - \theta_v^4)}{(\theta_m - \theta_a)}$$

Dans notre cas, le fluide caloporteur s'écoule sur la plaque.

l'eau ne possède pas (aux basses températures) de pouvoir rayonnant. On aura donc:

$$-66- \quad h_r = 0$$

Le coefficient d'échange par convection est donné par:

$$-67- \quad h_{cv} = 2,2(\theta_{moy} - \theta_a)^{0,25} + 4V \quad (V < 4 \text{ m/s})$$

$V$  étant la vitesse du vent en m/s

la conductance donc:  $K = h_r + h_{cv} + h_{ar}$

2.5.3.2) Capteur à simple vitrage:

On désigne par  $h'_r$  et  $h'_c$  les conductances internes et par  $h''_r$  et  $h''_{cv}$ , les conductances <sup>externes</sup>. Les expressions des différentes conductances sont les suivantes.

$$h'_r = \frac{\epsilon_a \sigma (T_m^4 - T_c^4)}{(T_m - T_c)}$$

$$h'_c = 1,1 (T_{moy} - T_c)^{0,25}$$

$$h''_r = \frac{\epsilon_c \sigma (T_{c1}^4 - T_v^4)}{(T_{c1} - T_a)}$$

$$h''_{cv} = 2,2 (T_{c1} - T_a)^{0,25} + 4 \text{ V}$$

$\epsilon_a$  = l'émissivité apparente du système interne.

$$\epsilon_a = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_c} + \frac{1}{\epsilon} - 1}$$

$\epsilon_c$ : émissivité de la couverture = 0,93

$\epsilon$ : émissivité de l'absorbeur = 0,98

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  w/m constante de Stephan-BOLTZMAN).

$T_c$ : Température de la couverture

$T_v$ : Température de la voûte céleste ( $T_v = T_a - 7$ ) °C

Pour le calcul de  $h'_r$ , la température moyenne utilisée a été prise au milieu de la vitre. La température moyenne a été assimilée à  $T_c$ ; ce qui nous donne:

$$-68- h'_r = 4 \epsilon_a \sigma T_{c1}^3$$

Une fois les différents coefficients de conductance déterminés on aura:

$$-69- h_c + h_r = \frac{1}{\frac{1}{h'_r + h'_c} + \frac{1}{h''_r + h''_c}}$$

La conductance K s'écrit donc:

$$-70- K = \frac{\lambda_{ar}}{e} + h_r + h_c$$

2.5.33) Capteur à double vitrage:

$$-71- h''_{cv} = 2,2 (\theta_{c \text{ moy}_2} - \theta_a)^{0,25} + 4 \text{ V}$$

$$-72- h''_r = \frac{\epsilon_c \sigma (\theta_{cm_2}^4 - \theta_v^4)}{(\theta_{cm_2} - \theta_a)}$$

$$-73- h'_r = \frac{\epsilon'_a \theta_{cm_1}^4 - \theta_{c_1}^4}{(\theta_{cm_1} - \theta_{c_1})} = 4 \epsilon'_a \sigma \theta_{c_1}^3$$

$$-74- \epsilon'_a = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_c} + \frac{1}{\epsilon_c} + \frac{1}{\epsilon} - 1} = \frac{1}{\frac{2}{\epsilon_c} + \frac{1}{\epsilon} - 1}$$

$$-h'_c = 1,1 (\theta_{\text{moyen}} - \theta_{c_I})^{0,25}$$

onna donc:

$$-76- h_c + h_r = \frac{1}{\frac{1}{h'_r + h'_c} + \frac{1}{h''_r + h''_c}}$$

et:

$$-77- K = h_c + h_r + \frac{\lambda ar}{e}$$

II H A P I T R E III



REALISATION ET EXPERIMENTATION.



REALISATION ET EXPERIMENTATION3.1.) Généralités:3.1.1.) Introduction:

La présente réalisation est essentiellement un modèle expérimental d'un capteur à ruissellement. Le choix des différents matériaux a été effectué en fonction des disponibilités sur le marché et des possibilités techniques de fabrication. Il est par exemple hors de question d'utiliser des surfaces sélectives et autres techniques avancées qui permettent un meilleur rendement

3.1.2.) Orientation du Capteur:

Une fois le lieu d'implantation choisi, il demeure à fixer l'orientation du capteur. L'angle d'inclinaison optimum fera l'objet d'une étude expérimentale. Les capteurs devront être orientés de façon à recevoir le plus de rayonnement possible.

L'insolateur capte un maximum d'énergie lorsqu'il est perpendiculaire aux rayons du soleil. Or l'inclinaison des rayons varie au cours de la journée et au cours des saisons (le soleil est plus bas en hivers). L'idéal serait qu'il suive le soleil dans sa course. Seulement un tel système supposerait un investissement important.

L'orientation optimale en plan (azimut), pour les capteurs plans fixes dans l'hémisphère nord, est normalement SUD; car la durée d'ensoleillement est alors maximum.

3.2.) Construction du capteur à ruissellement:

Ce capteur plan est composé essentiellement des parties suivantes:

- La surface absorbante (plaque plane).
- Le boîtier.

- L'isolation thermique latérale et arrière.
- La couverture transparente en avant de l'absorbeur (effet de Serre).

### 3.2.1.) L'absorbeur:

Son rôle essentiel est d'intercepter et d'absorber le maximum de rayonnement (direct et diffus), et de transmettre la chaleur produite par cette absorption vers le fluide caloporteur (eau s'écoulant sur la plaque inclinée) suivant le processus de la convection forcée.

Le capteur à ruissellement se caractérise par:

- Un écoulement en film mince sur une plaque.
- Une répartition uniforme du film d'eau (épaisseur constante).
- Une alimentation en eau sans perturbation.
- Sa construction ne demandant pas une technologie avancée.

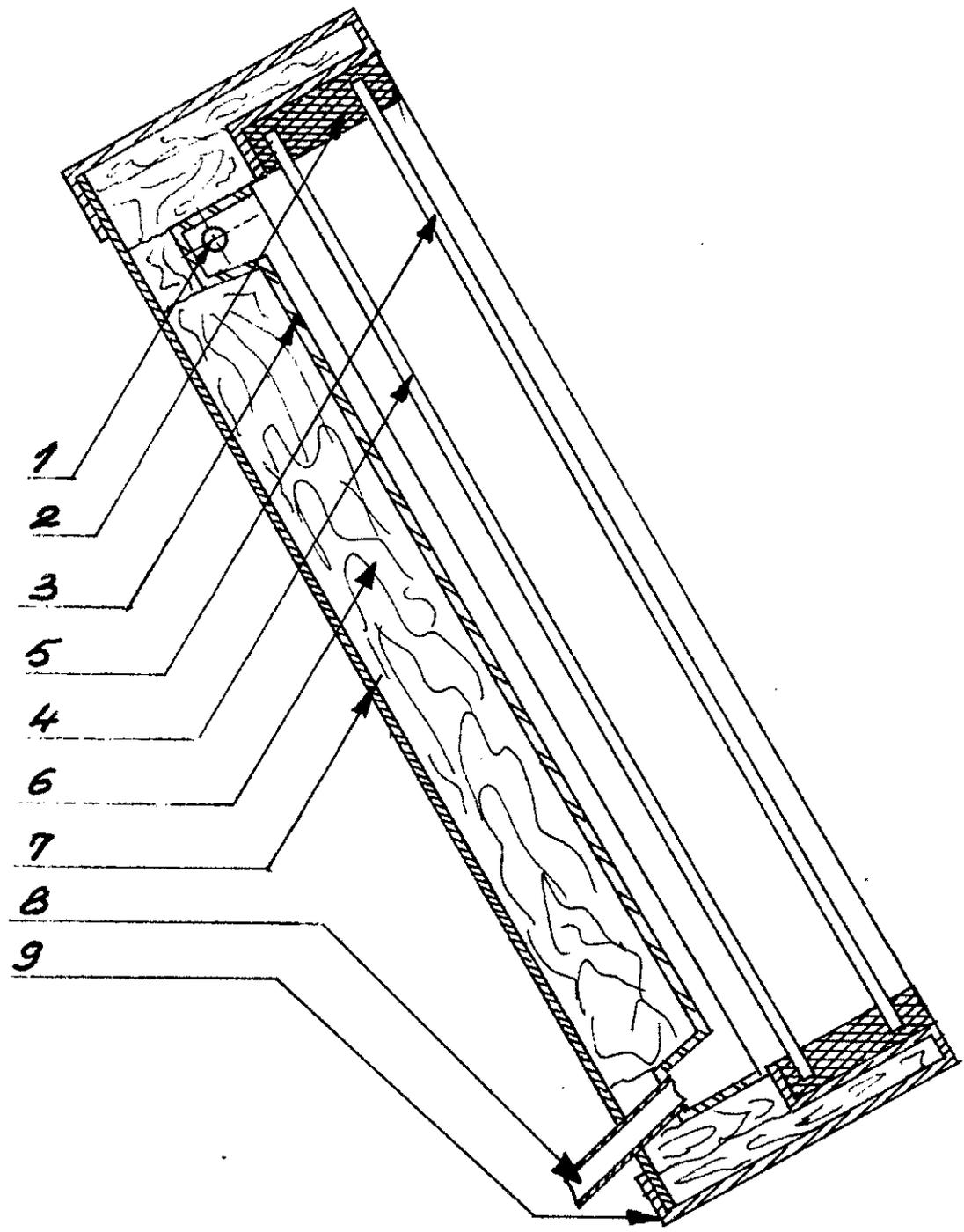
Les critères énoncés ont déterminés la forme et l'état de surface de l'absorbeur. Il a été réalisé à partir d'une plaque plane (respect de la planéité). La surface de l'absorbeur est peinte en noir mat et est polie pour éliminer les rugosités (épaisseur constante du film d'eau). Ceci permet d'éviter la déformation de la surface libre de l'écoulement.

L'aluminium a été choisi pour sa mise en forme facile, et pour sa grande résistance à la corrosion

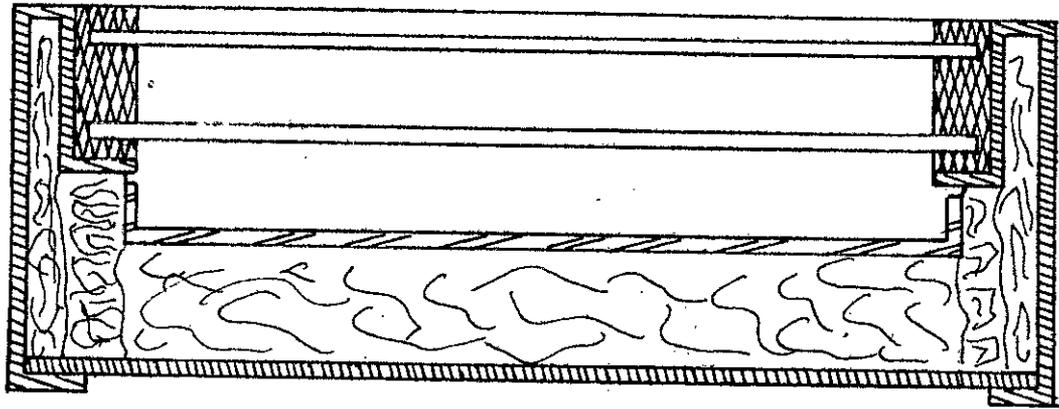
- Dimensions de l'insolateur: 910 x 1300.
- épaisseur : 2 mm
- Conductivité thermique : 202 w/m<sup>o</sup>K

### Description:

On réalise en une seule pièce, sur plieuse manuelle, une surface plane de dimensions (910 x 1200) délimitée en longueur par des bords de 30 mm de hauteur, et en largeur



Coupe Longitudinale



## Coupe Transversale

- 1 - Tube 15/21 d'Alimentation
- 2 - Caoutchouc
- 3 - Absorbant
- 4 - 1<sup>er</sup> Vitrage
- 5 - 2<sup>em</sup> Vitrage
- 6 - Isolation (Liège)
- 7 - Fond du Caisson
- 8 - Tuyau d'évacuation
- 9 - Coque du Caisson (Support des vitres)

par des gouttières en forme de U .L'une servira à l'alimentation, l'autre à la récupération. Les gouttières ainsi obtenues, seront transformées en réservoirs supérieur et inférieur, en collant à l'ARALDITE, à leurs extrémités, des parois en Aluminium découpées suivant leur section. Il aurait été préférable que ces parois soient carrément soudées. Mais la soudure de feuilles minces d'aluminium nécessiterait un matériel de soudure et une main d'oeuvre qualifiée dont on ne dispose pas sur le lieu de travail.

Le réservoir supérieur sera traversé d'une extrémité à l'autre par un tube galvanisé de diamètre (15x2) qui servira par la suite à l'alimentation. Ce tube est percé le long de sa génératrice de trous de 3 mm de diamètre, espacés de 10 mm. Le tube est collé à l'araldite au niveau des parois qu'il traverse, devenant ainsi solidaire du réservoir supérieur. Une extrémité de ce tube est bouchée à l'aide d'une soudure; l'autre extrémité servira donc à l'alimentation. Ainsi, le remplissage, par les trous faisant face au fond de la gouttière, est progressif et sans perturbation. Ce qui assure un débordement uniforme du film. L'écoulement obtenu sur la plaque inclinée est dû aux forces de gravité.

Un trou de 50 mm de diamètre est pratiqué dans la zone centrale du réservoir inférieur pour servir à l'évacuation à travers un tube en Zinc du même diamètre.

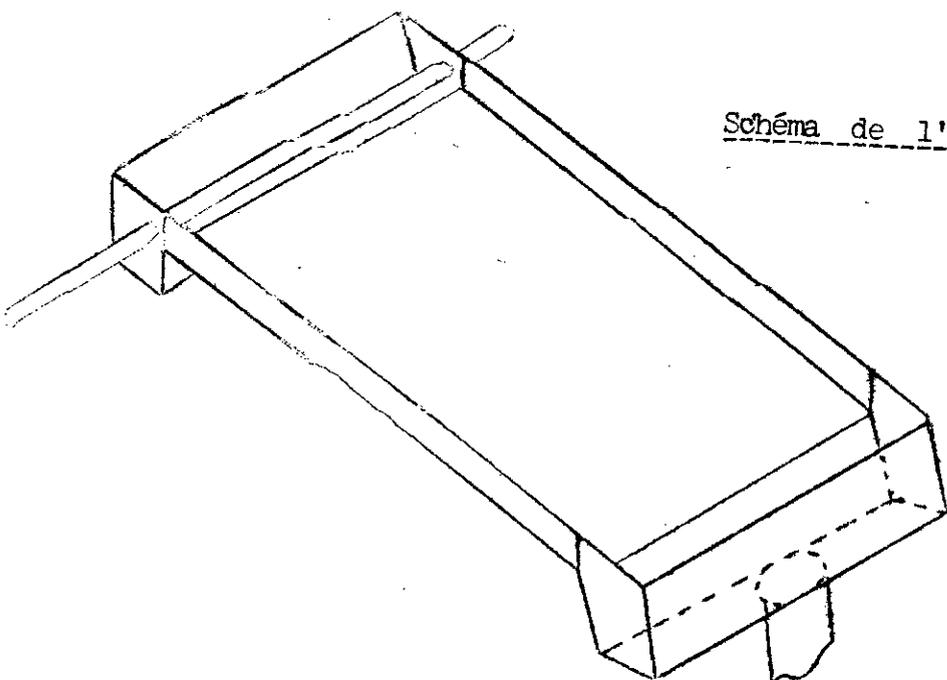


Schéma de l'Absorbeur

### 3.2.2.) Le Boitier:

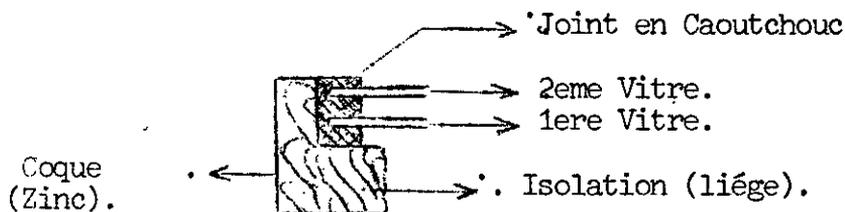
Sa fonction est de maintenir l'ensemble de façon rigide et d'assurer l'étanchéité. Les contraintes mécaniques étant faibles, il ne nécessite pas une grande résistance. Le boitier est posé sur un support en cornières, d'inclinaison variable.

Ce support absorbe les efforts dus au vent. Si l'isolation intérieure est bonne, la coque peut être métallique.

#### Caractéristiques du boitier:

- Matériau : Zinc
- Epaisseur : 10/10
- Dimension : 1035 x 1480
- Fâce avant : vitre de 4 mm d'épaisseur.
- Fâce arrière: isolation en liège d'épaisseur 50 mm.
- Boite assemblée:
- Montage facile

#### Montage des vitres:



Les vitres sont uniquement posées sur la face avant du boitier, et sont maintenues fixes sous l'effet de leur propre poids. Le joint en caoutchouc assure l'étanchéité.

### 3.3.) expérimentation:

Ce travail consiste en premier lieu à tester les performances de ce papeur en fonction du débit, de l'inclinaison et du type de serre (simple ou double vitrage).

Le fluide caloporteur utilisé pour cette installation est l'eau du réseau qui provient d'un réservoir situé à 5 m en amont du lieu d'implantation du dispositif expérimental. Le niveau d'eau dans le réservoir est maintenu constant à l'aide d'une alimentation continue.

### 3.3.1.) Instruments de Mesure

-Les différents instruments de mesure utilisés pour les essais sont les suivants:

- Un pyranomètre muni d'un dispositif intégrateur solarimètre.  
( Kipp - ZONEN C.C.2).
- Un galvanomètre.
- Un thermomètre.
- Des thermocouples "Cuivre-Constantan".
- Un anémomètre (Mesure de la vitesse du vent).
- Un chronomètre (mesure de débit).

Il aurait été souhaitable, pour la bonne conduite des essais, de disposer d'un débitmètre (mesure de débit).

### 3.3.2.) Mesures concernant le système:

Pour les calculs, on a besoin de deux types de mesure:

a) Mesures concernant les paramètres météorologiques:

- Vitesse du vent.
- Température de l'air ambiant ou niveau du capteur.
- Eclairement énergétique dans le plan horizontal.

b) Mesures propres au circuit hydraulique du capteur:

- Température de l'eau à l'entrée du capteur prise au niveau du réservoir d'alimentation.

-Temperature de l'eau à la sortie du capteur.

c) Mesures pour l'évaluation des pertes thermiques

-Température extérieure de la première vitre  
et températures intérieures et extérieures de la  
2ème vitre (thermocouple).

-Temperature de la plaque chauffante en 3 Points  
différents:

Les relevés sont effectués toutes les demi-heures. La durée des relevés est d'environ 3 minutes. En supposant que pendant cet intervalle de temps, les variations des paramètres météorologiques ne sont pas importantes (température ambiante, éclairement énergétique...).

### 3.3.3) Méthode de calcul:

-Le flux utile est évalué à partir du débit et de l'écart de température expérimental entre l'entrée et la sortie du capteur.

-Les pertes thermiques et rendement instantané sont déterminés à l'aide des expressions citées au 2.5.2.

### 3.3.4.) étalonnage des thermocouples:

appareillage utilisé; -Thermocouple.

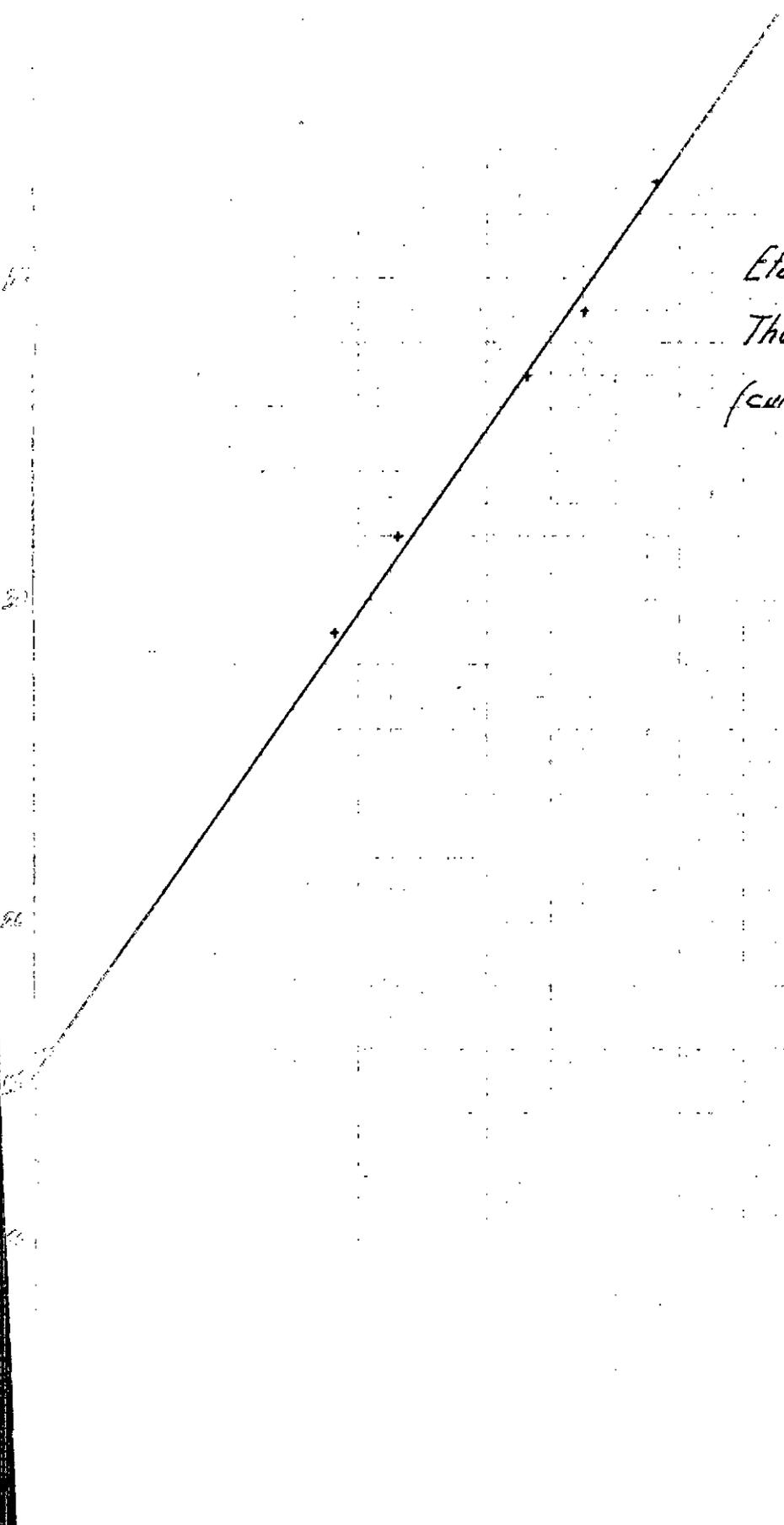
-Galvanomètre.

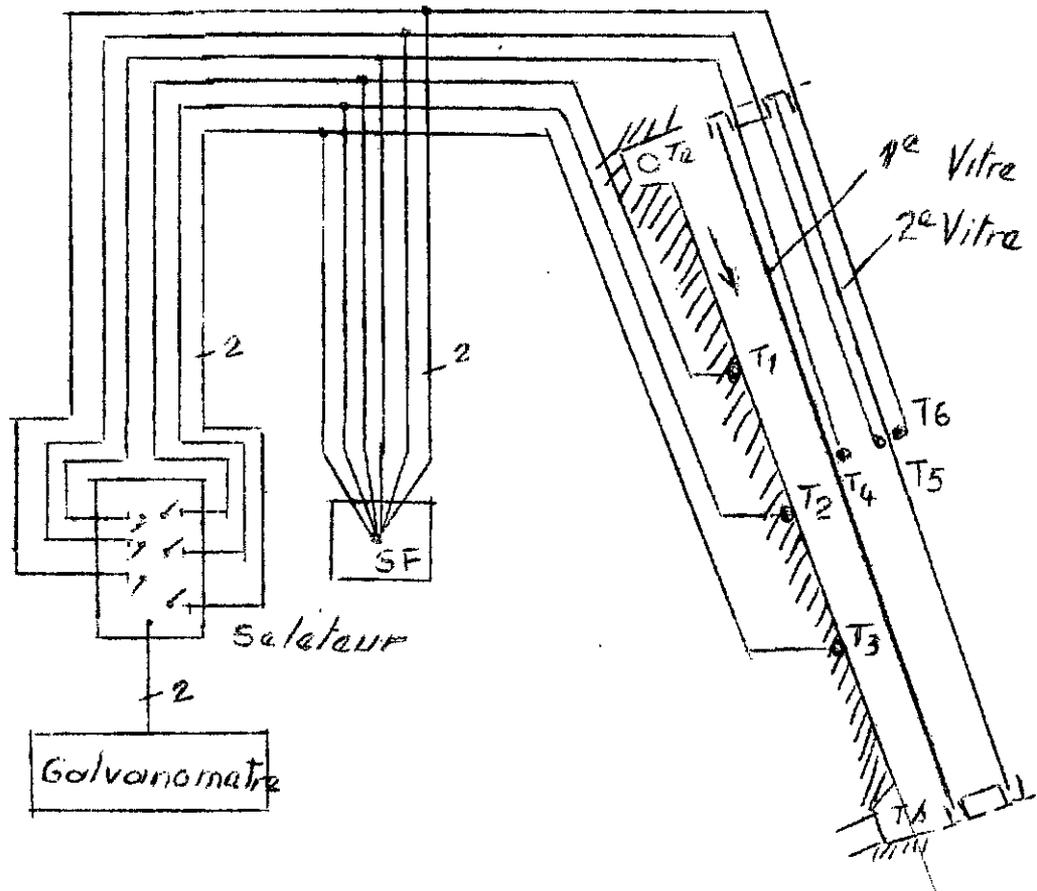
-Thermomètre.

-Récipient d'eau chaude.

Les thermocouples ont été étalonnés dans l'eau chauffée. Deux lectures sont faites. L'une, au thermocouple, donnant une tension en mv détectée par le galvanomètre; l'autre, au thermomètre (en °C). Nous obtenons ainsi la correspondance tension/Température. L'étalonnage est fait pour une température de source froide:  $T_{s_f} = 15^\circ\text{C}$ . Pour toute autre valeur de  $T_{s_f}$ , il suffit de faire un décalage de courbe parallèlement à la première.

*Étalonnage des  
Thermocouples:  
(CUIVRE - CONSTANTAN)*



3.3.5) Montage expérimental.Manipulation.

Notre but est de tester systématiquement le capteur à ruissellement A cet effet, il a été procédé à une série d'expériences.

- Test du capteur à ruissellement sans vitrage.
- ..Test du capteur à ruissellement avec simple vitrage
- Test du capteur à ruissellement avec double vitrage.

Les séries de relevés ont été faits en jouant sur le débit et l'inclinaison.

A chaque inclinaison, le débit utilisé est le plus petit assurant un ruissellement uniforme couvrant au maximum la plaque. avant de procéder aux expériences citées, une série

de mesures hydrodynamiques a été effectuée pour l'évaluation de la vitesse de l'écoulement, du nombre de Reynolds et de l'épaisseur moyenne du film en fonction des différents débits et inclinaisons.

-évaluation de la vitesse de l'écoulement:  
La descente d'un flotteur (limaille d'aluminium) le long de la plaque inclinée est chronométrée, on négligeant les frottements et le glissement.

3/3.6.) 77 A B L E A U X D E M E S U R E S

-----

# Mesures hydrodynamiques

Inclinaison	Debit moyen [L/s] $Q_m$	Vitesse moyenne $= e_m = \frac{L}{E}$ [m/s]	Epaisseur moyenne $= \frac{Q_m}{L V_m}$ [mm]	$Re = \frac{V_m e_m}{\nu}$	Regime d'écoulement
$i = 15^\circ$	$\frac{1}{35}$	0,153	0,200	30	Laminaire
	$\frac{1}{24}$	0,204	0,220	45	Transitoire
	$\frac{1}{20}$	0,245	0,220	54	Turbulent
	$\frac{1}{15}$	0,35	0,200	70	Turbulent
	$\frac{1}{9}$	0,408	0,300	122	Turbulent
$i = 25^\circ$	$\frac{1}{35}$	0,204	0,153	30	Laminaire
	$\frac{1}{26}$	0,272	0,155	42	Transitoire
	$\frac{1}{20}$	0,306	0,179	54	Turbulent
	$\frac{1}{15}$	0,408	0,179	73	Turbulent
	$\frac{1}{10}$	0,408	0,269	109	Turbulent
$i = 35^\circ$	$\frac{1}{36}$	0,306	0,09	27	Laminaire
	$\frac{1}{27}$	0,350	0,116	40	Transitoire
	$\frac{1}{20}$	0,408	0,134	54	Turbulent
	$\frac{1}{16}$	0,408	0,168	68	Turbulent
	$\frac{1}{10}$	0,490	0,224	109	Turbulent
$i = 45^\circ$	$\frac{1}{38}$	0,408	0,071	29	Laminaire
	$\frac{1}{26}$	0,408	0,103	42	Transitoire
	$\frac{1}{20}$	0,490	0,112	55	Turbulent
	$\frac{1}{15}$	0,490	0,149	73	Turbulent
	$\frac{1}{10}$	0,612	0,179	109	Turbulent

Remarque : pour  $Q_m < \frac{1}{35}$ , le regime d'écoulement est Laminaire

Notation Utilisée

<u>Symboles</u>	<u>Signification</u>	<u>Unité</u>
$\theta_a$ :	Température ambiante	( ° C )
$\theta_e$ :	Température d'entrée	( ° C )
$\theta_s$ :	Température de Sortie	( ° C )
$\left. \begin{array}{l} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{array} \right\}$	Température de la plaque en amont, au milieu et en aval.	( ° C )
$\theta_m$ :	Température moyenne de la plaque	( ° C )
$\theta_{c1}$ :	Température extérieure de la première couverture.	( ° C )
$\theta_{c2i}$ :	Température intérieure de la deuxième couverture	( ° C )
$\theta_{c2e}$ :	Température extérieure de la deuxième vitre	( ° C )
$h'_r$ :	Coefficient d'échange de chaleur par rayonnement à l'intérieur du Système.	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
$h'_c$ :	Coefficient d'échange de chaleur par convection à l'intérieur du Système .	$W/m^2 \cdot ^\circ C$

$h''_{re}$ :	Coefficient d'échange de Chaleur par rayonnement à l'extérieur du système.	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
$h''_{cv}$ :	Coefficient d'échange de Chaleur par convection à l'extérieur du système .	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
$h_{ar}$ :	Coefficient d'échange de Chaleur par convection à l'arrière du capteur .	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
$K$ :	La conductance globale des pertes.	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
$P'$ :	Pertes thermiques globales.	$W/m^2$
$P_u$ :	Puissance utile	$W/m^2$
$E$ :	Flux solaire sur la surface horizontale.	$W/m^2$
$E_i$ :	Flux incident sur la plaque inclinée	$W/m^2$
:	Rendement expérimental.	sans

## Relevé du 3 Decembre 1979

- Capteur sans vitrage
- Inclinaison :  $45^\circ$
- Debit Volumique :  $\frac{1}{62}$  [l/s]

Horaire	10 <sup>H</sup>	10 <sup>H</sup> 30	11 <sup>H</sup>	11 <sup>H</sup> 30	12 <sup>H</sup>	12 <sup>H</sup> 30	13 <sup>H</sup>	13 <sup>H</sup> 30	14 <sup>H</sup>	14 <sup>H</sup> 30
$\theta_a$	14,8	16,3	17,5	17,4	17,4	16,5	16,4	15,9	14,2	14
$\theta_e$	15,8	17	17,2	17,4	17,4	16,8	16,2	15,8	15,3	14
$\theta_s$	19,1	20,9	21,3	22,8	23,2	22,8	22,6	22,4	19,7	19,2
$\theta_1$	16,5	17,9	18,3	18,4	18,5	17,5	16,6	15,9	15,7	14,2
$\theta_2$	17,8	18,6	19,4	19,5	19,7	18,5	17,3	16,5	16,3	14,7
$\theta_3$	18,2	19,2	19,5	19,9	20	19,3	18,2	17,7	17,3	16,3
$\theta_m$	17,5	18,9	19,3	20,1	20,3	19,8	19,4	19,1	17,5	16,6
hor	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
hcv	8,38	8,35	8,11	8,38	8,43	8,52	8,45	8,5	8,52	8,35
K	9,38	9,35	9,11	9,38	9,43	9,52	9,45	9,5	9,52	9,35
P'	25,3	24,31	16,40	25,33	27,35	31,42	28,35	30,4	31,42	24,31
$P_u$	223	263	276,7	364,4	391	404,9	431,9	445,4	296,9	350,9
E	444	491	530	546	553	536	516	474	421	352
$P_a$	422	466	503	519	525	509	490	450	400	334
$E_i$	757,36	842,7	875,75	907,1	913,8	895,6	841,9	778,54	691,5	578,16
$\eta_{exp}^i$	0,29	0,31	0,31	0,40	0,42	0,59	0,51	0,57	0,43	0,60

Debut de l'experience : 9<sup>H</sup>30

Etat du ciel : degagé

vitesse du vent : 5 km/h = 1,39 m/s

arrêt de l'experience : 14<sup>H</sup>30 (le capteur se trouvant dans la zone d'ombre)

## Relevé du 4 Decembre 1979

Capteur sans vitrage

Inclinaison :  $35^\circ$ Debit volumique :  $\frac{1}{55}$  [ $\frac{e}{s}$ ]

Horaire	10 <sup>h</sup>	10 <sup>h</sup> 30	11 <sup>h</sup>	11 <sup>h</sup> 30	12 <sup>h</sup>	12 <sup>h</sup> 30	13 <sup>h</sup>	13 <sup>h</sup> 30	14 <sup>h</sup>	14 <sup>h</sup> 30
$\theta_a$	13,4	13	13,2	13,9	13,8	13,7	14,5	13	12,5	13,4
$\theta_e$	15	15,5	16,2	16	16,3	15,8	15,5	15	14,6	14,5
$\theta_s$	19,5	20	19,5	21,8	22	21,5	21,8	20,8	19,5	18,1
$\theta_1$	15,4	16,1	16,3	16,2	16,5	16,3	16	15,7	15,2	14,9
$\theta_2$	15,7	16,5	17	17,2	17,4	17,4	16,5	16,3	16	15,4
$\theta_3$	16,4	17,2	18	18,2	18,6	18,7	17,5	17,2	17,2	16
$\theta_m$	17,3	17,8	17,9	18,9	19,2	18,7	18,6	17,9	17	16,3
hor	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
hcv	7,53	7,66	7,68	7,3	7,8	7,3	7,57	7,71	7,64	7,27
K	8,53	8,66	8,68	8,3	8,8	8,3	8,57	8,71	8,64	8,27
P'	33,3	41,6	40,8	41,5	47,5	41,5	35,13	42,7	38,9	24
$P_u$	342,4	342,4	251,1	440,8	433,2	592,8	478,8	440,8	372,8	273,5
E	429,4	475,6	514,4	531,1	542,2	527,2	505	461,1	408,3	341,1
$P_a$	407,9	451,8	488,7	504,5	515	500,8	479,8	438	387,9	324
$E_i$	647	766,3	771,6	796,7	813,6	790,8	782,8	714,7	632,9	528,7
$\eta_{exp}$	0,53	0,45	0,33	0,55	0,53	0,74	0,61	0,61	0,58	0,51

Debut de l'experience : 9<sup>h</sup>30

Etat du ciel : degagé

vitesse du vent : 4 km/h = 1,11 m/s

Arrêt de l'experience : 14<sup>h</sup>30

Relevé du 5 Decembre 1979

capteur sans vitrage

inclinaison:  $25^\circ$

débit volumique:  $\frac{1}{53} \left[ \frac{\text{Q}}{\Delta} \right]$

MORNIÈRE	10 <sup>H</sup>	10 <sup>H</sup> 30	11 <sup>H</sup>	11 <sup>H</sup> 30	12 <sup>H</sup>	12 <sup>H</sup> 30	13 <sup>H</sup>	13 <sup>H</sup> 30	14 <sup>H</sup>	14 <sup>H</sup> 30
$\theta_a$	12,8	12,5	13,3	13,5	13,3	12,6	13,1	12,3	11,8	11,6
$\theta_e$	14,4	14,7	14,7	15,5	15,7	14,6	14,4	14,3	13,5	13
$\theta_s$	18	18,4	18,9	20,5	21	20,4	20,4	19	17,2	15,1
$\theta_1$	14,6	15	15,8	16,2	15,8	15	15,5	14,6	14	13,2
$\theta_2$	15,3	15,7	16,3	17,6	16,6	16	16,4	15,3	14,8	13,5
$\theta_3$	16	16,5	16,7	18,7	17,6	17,5	17,8	16,2	15,8	13,8
$\theta_{\text{m}}$	16,2	16,55	16,7	18	18,35	17,5	17,4	16,65	15,35	14,05
har	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
hcv	8,55	8,66	8,55	8,76	8,86	8,83	8,73	8,74	8,58	8,31
K	9,55	9,68	9,55	9,76	9,86	9,83	9,73	9,74	9,58	9,31
P'	32,47	39,2	32,47	43,92	49,79	48,16	41,84	42,37	34	22,8
$P_{\mu}$	284	292	331,2	395	418	457,4	473,2	370,6	291,8	166
E	400	456,1	492,2	516,7	523,9	505,6	487,8	426,1	317,2	238,9
$P_a$	380	433	467	490	497	480	465	405	301	227
$E_i$	611,05	583,5	689,1	723,4	733,5	707,8	682,9	596,5	444,1	334,5
$\tau_i$ exp.	0,46	0,50	0,48	0,54	0,57	0,64	0,69	0,62	0,65	0,50

début de l'expérience: 9<sup>H</sup>30

état du ciel: dégagé

vitesse du vent: 5 km/h = 1,39 m/s

arrêt de l'expérience: 14<sup>H</sup>30.

64

reLevé du 6 Décembre 1979

capteur sans vitrage.

inclinaison:  $15^\circ$ Débit volumique:  $\frac{1}{55} \left[ \frac{\rho}{s} \right]$ 

HORAIRE	10 <sup>H</sup>	10 <sup>H</sup> <sub>30</sub>	11 <sup>H</sup>	11 <sup>H</sup> <sub>30</sub>	12 <sup>H</sup>	12 <sup>H</sup> <sub>30</sub>	13 <sup>H</sup>	13 <sup>H</sup> <sub>30</sub>	14 <sup>H</sup>	14 <sup>H</sup> <sub>30</sub>
O <sub>a</sub>	13	13,5	13,8	14,1	15,3	14,7	15,9	14,2	13,1	12,9
O <sub>e</sub>	14,5	14,8	15,5	16	16,5	16,2	16,8	14,8	14	13,8
O <sub>s</sub>	17	18,5	18,9	21	22	22,2	23,5	20,5	18,1	17,2
O <sub>1</sub>	15	16,2	16,5	16,5	17	16,8	17	15,7	14,5	14,2
O <sub>2</sub>	16	17	17,6	18	18,5	17,5	17,8	16,2	15,7	15
O <sub>3</sub>	16,5	17,8	18,5	19,5	19,5	20	20,9	17,3	17	15,5
O <sub>mm</sub>	15,75	16,65	17,20	18,50	19,25	19,20	19,65	17,65	16,05	15,50
har	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
hcv	10,59	10,69	10,75	10,95	10,86	10,96	10,82	9,12	10,64	10,55
K	11,59	11,69	11,75	11,95	11,86	11,96	11,82	10,12	11,64	11,55
P'	31,87	36,80	39,95	52,58	46,85	53,82	44,32	34,92	34,34	39,04
P <sub>u</sub>	199,0	281,5	259,0	384,0	418,0	410,4	433,2	433,2	311,6	258,4
E	437,8	480,6	518,3	533,3	541,1	513,9	480,0	434,0	356,7	272,2
P <sub>a</sub>	415,9	456,6	492,4	506,6	514,0	488,2	456,0	392,2	388,4	258,6
E <sub>i</sub>	594,7	642,9	694,5	714,6	725,1	688,6	643,2	581,6	477,9	364,7
$\eta_{i \text{ exp}}$	0,32	0,44	0,37	0,53	0,57	0,59	0,67	0,74	0,65	0,70

Début de l'expérience: 9<sup>H</sup><sub>30</sub>

état du ciel: dégagé

vitesse du vent: 7 km/h = 1,94 m/s

arrêt de l'expérience: 14<sup>H</sup><sub>30</sub>

Relevé du 8 Décembre 1979

Capteur à simple vitrage

Inclinaison à  $15^\circ$ Débit volumique:  $\frac{1}{75} \left[ \frac{l}{s} \right]$ 

Horaire	11 <sup>h</sup> 30	12 <sup>h</sup>	12 <sup>h</sup> 30	13 <sup>h</sup>	13 <sup>h</sup> 30	14 <sup>h</sup>	14 <sup>h</sup> 30
$\theta_a$	14,2	14,2	14,2	14,8	14,5	14	13,8
$\theta_e$	15,2	15,2	15,2	15,2	14,5	14	13,8
$\theta_s$	23	23,8	22	20,2	19,6	19,5	16
$\theta_1$	16,9	17,4	17,6	17,5	17,1	16,4	14,6
$\theta_2$	18,2	18,8	18,3	18,3	17,9	17,2	15
$\theta_3$	18,7	19,3	18,9	18,6	18,5	17,4	15,5
$\theta_m$	19,1	19,5	18,6	17,7	17,1	16,8	14,9
$\theta_{c2}$	20	20,6	20,4	20,2	19,1	18,7	17,5
$h'_a$	5,19	5,22	5,21	5,20	5,14	5,12	5,06
$h'_c$	1,13	1,13	1,28	1,27	1,3	1,29	1,4
$h''_r$	10,96	10,27	10,6	11,46	12,49	12,27	11,14
$h''_{cv}$	12,3	12,38	12,35	12,24	12,10	12,12	11,93
hor	1	1	1	1	1	1	1
K	5,97	5,80	6,06	6,08	6,12	6,08	5,05
P'	29,3	31,6	26,7	17,7	17,02	15,9	5,56
$P_L$	434,7	479,2	378,9	278,7	284,5	306,5	122,6
E	473,9	492,8	417,8	433,3	430	379,4	316,7
$E_L$	471,4	483,4	414,4	428,9	425,7	375,4	313,5
$\eta'_{exp}$	0,92	0,99	0,91	0,67	0,66	0,81	0,39

Début de l'expérience: 11<sup>h</sup>

État du ciel: dégagé

Vitesse du vent:  $4 \text{ km/h} = 1,11 \text{ m/s}$ Arrêt de l'expérience: 14<sup>h</sup>30

RELEVÉ DU 9 Décembre 1979

capteur à simple vitrage

inclinaison :  $25^\circ$ Débit volumique :  $\frac{L}{85} \left[ \frac{1}{s} \right]$ 

Horaires	10 <sup>H</sup>	10 <sup>H</sup> 30	11 <sup>H</sup>	11 <sup>H</sup> 30	12 <sup>H</sup>	12 <sup>H</sup> 30	13 <sup>H</sup>	13 <sup>H</sup> 30	14 <sup>H</sup>	14 <sup>H</sup> 30
$\theta_a$	15,2	15,2	14,2	15,6	16	16,1	16,6	16,4	15,5	15
$\theta_e$	13,6	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	14,3	14,3	14,3
$\theta_s$	18,7	19,8	20,1	22,8	23,2	23,5	21,9	20,8	19,7	17,3
$\theta_1$	15,6	16,7	16,8	16,8	17,6	17,3	16,8	16,3	16,1	15,5
$\theta_2$	16,4	17,6	17,7	18,4	18,6	18,7	18,2	17,5	16,6	16,1
$\theta_3$	16,8	18	17,7	19,2	19,3	19,5	19,4	18,7	17,1	16,5
$\theta_{mm}$	16,2	16,8	16,9	18,3	18,5	18,2	17,9	17,6	17	15,8
$\theta_{c1}$	17,4	18,6	16,2	20	20,6	20,6	20,2	19,1	18,7	17,5
$h'_{rz}$	5,05	5,12	4,99	5,19	5,23	5,22	5,2	5,14	5,12	5,06
$h'_{rc}$	1,15	1,27	1,1	1,26	1,33	1,37	1,36	1,32	1,26	1,26
$h''_{rz}$	20,6	15,2	21,9	13	13	12,9	14,8	18	15,9	18,7
$h''_{cv}$	11,5	11,9	11,5	12,1	12,1	12,08	11,9	11,7	11,8	11,65
$h_{av}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$K$	6,2	6,17	6,15	6,13	6,19	6,21	6,27	6,24	6,18	6,23
$P'$	6,2	9,87	16,6	16,6	15,5	13,1	8,15	4,5	9,27	4,98
$P_u$	2598	295	303,8	442,6	462,3	427,8	393,3	319,6	265,6	1,47,5
$E$	412,8	443,4	454,8	465,6	525	500	481,1	434,4	365,6	339,4
$E_i$	642,1	674,1	682,2	698,4	787,5	750	721,6	651,6	548,4	509,1
$\tau_{exp}$	9,39	9,43	9,45	9,63	9,58	9,57	9,55	9,43	9,45	9,28

début de l'expérience : 9<sup>H</sup>30

état du ciel : dégagé.

vitesse du vent : 8 km/h = 2,22 m/s.

arrêt de l'expérience : 14<sup>H</sup>30

67

relevé du 10 décembre 1979

capteur à simple vitrage.

inclinaison :  $35^\circ$ Débit volumique :  $\frac{1}{87} [l/s]$ 

Horaires	10 <sup>H</sup>	10 <sup>H</sup> <sub>30</sub>	11 <sup>H</sup>	11 <sup>H</sup> <sub>30</sub>	12 <sup>H</sup>	12 <sup>H</sup> <sub>30</sub>	13 <sup>H</sup>	13 <sup>H</sup> <sub>30</sub>	14 <sup>H</sup>	14 <sup>H</sup> <sub>30</sub>
$\theta_a$	14,2	15,2	16,2	17	17,5	18,5	17,2	18	17,9	16,2
$\theta_e$	13,8	13,8	13,8	14	14	14	14	14	14	14
$\theta_s$	22	22,5	21	24,4	25,8	24,8	24,6	23,2	22	19,7
$\theta_1$	16,1	17,2	18	18,6	17,7	18,1	17,8	17,8	16,8	16,1
$\theta_2$	17,5	18,4	19,2	19,6	19,5	19,9	19,2	18,9	18,1	16,9
$\theta_3$	18,5	19,6	20,2	21,2	21,3	21,7	20,6	20	19,4	17,7
$\theta_{im}$	17,9	18,2	17,4	19,2	20	19,9	19,3	19,6	18	16,9
$\theta_{c1}$	18,9	19,9	18,7	20,8	23,1	22	21,7	20,6	20,2	19
$h'_{ra}$	5,13	5,19	5,12	5,23	5,3	5,29	5,28	5,22	5,2	5,25
$h'_{rc}$	1,1	1,26	1,18	1,24	1,32	1,32	1,37	1,3	1,34	1,32
$h''_{ra}$	13,4	12,5	18,94	34,16	12,88	15,33	13	18,76	20,49	21,7
$h''_{cv}$	16,6	16,6	16,1	16,4	16,54	16,33	16,52	16,11	16,02	15,96
$h_{ar}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
K	6,16	6,3	6,4	6,7	6,4	6,47	6,43	6,49	6,54	6,59
P'	22,8	18,9	7,68	14,8	16	9,1	13,5	4,5	3,4	4,6
$P_u$	394	416,5	346	499,6	566,9	518,8	509,2	442	384,4	273,8
E	416,7	462,8	501,1	540,6	610,6	583,9	543,9	497,8	457,2	332,2
$E_c$	714,7	786,8	851,8	919	1038	992,6	924,6	846,3	777,3	564,7
$\eta_{exp}$	0,55	0,53	0,40	0,54	0,54	0,52	0,55	0,52	0,49	0,48

début de l'expérience : 9<sup>H</sup><sub>30</sub>

état du ciel : dégagé.

vitesse du vent : 12 Km/h = 3,33 m/s

arrêt de l'expérience : 14<sup>H</sup><sub>30</sub>

relevé au 11 décembre 1979

capteur à simple vitrage  
 inclinaison:  $45^\circ$   
 débit volumique:  $\frac{1}{85} [P/\Delta]$

Horaires	10 <sup>H</sup> <sub>30</sub>	11 <sup>H</sup>	11 <sup>H</sup> <sub>30</sub>	12 <sup>H</sup>	12 <sup>H</sup> <sub>30</sub>	13 <sup>H</sup>	13 <sup>H</sup> <sub>30</sub>	14 <sup>H</sup>	14 <sup>H</sup> <sub>30</sub>
$\theta_a$	15,3	14,9	16,2	16,9	15,6	15,9	16	15,8	15,1
$\theta_e$	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2	14	14
$\theta_b$	16,8	20,5	23	23,2	21,8	20,7	20,2	20	16,2
$\theta_1$	15,4	16,1	16,8	17,9	16,8	16,8	17	16,2	14,9
$\theta_2$	15,7	16,3	17,4	18,1	17,5	17,6	17,2	17	15,3
$\theta_3$	16,1	17,1	18,6	19,3	19,3	18,1	17,8	17,5	15,9
$\theta_m$	15,5	17,4	18,6	18,7	17,2	18,6	17,2	17	15,2
$\theta_{c_1}$	16,1	17,2	18,3	19,2	18,4	18,3	17,6	17,4	14,7
$h'_a$	4,99	5,05	5,05	5,15	5,11	5,10	5,06	5,05	4,92
$h'_c$	0,97	0,75	1,17	1,92	1,15	0,82	0,87	0,88	0,87
$h''_a$	47,7	19,86	36,43	20,28	17,36	19,45	26,6	26,5	80,6
$h''_{cv}$	18,76	19,35	18,93	19,39	19,52	19,42	19,15	19,15	18,43
$h''_{ar}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1
K	6,47	6,05	6,59	6,26	6,35	6,14	6,25	6,25	6,47
P'	2,29	15,13	15,8	11,27	10,16	16,58	7,5	7,5	1,2
P <sub>m</sub>	12,79	30,98	43,98	44,2,6	37,3,8	31,9,7	2,95	2,95	10,8,2
E	410,8	429,6	465,3	481,7	475,6	417,8	361,2	356,7	308,4
E <sub>i</sub>	657,3	687,3	744,5	770,9	761	668,5	578	571	493,5
$\eta_{i \text{ exp.}}$	0,19	0,45	0,58	0,57	0,49	0,48	0,51	0,52	0,21

début de l'expérience: 10<sup>H</sup>

état du ciel: ensoleillé, avec passage intermittent de nuages.

arrêt de l'expérience: 14<sup>H</sup><sub>30</sub>.

releve du 13 décembre 1979

Horaires	10 <sup>H</sup>	10 <sup>H</sup> <sub>30</sub>	11 <sup>H</sup>	11 <sup>H</sup> <sub>30</sub>	12 <sup>H</sup>	12 <sup>H</sup> <sub>30</sub>	13 <sup>H</sup>	13 <sup>H</sup> <sub>30</sub>	14 <sup>H</sup>
$\theta_a$	15,4	17	17	16,7	15,2	16,2	15,8	15,4	15,2
$\theta_e$	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14	13,8
$\theta_s$	23,8	25	25,2	25,4	24	23,5	22	21,5	17
$\theta_1$	15,6	17,3	19,3	19,4	18,7	16,7	16,2	15,8	14,9
$\theta_2$	16,2	19,5	20,6	21,2	20,3	18,9	18,7	17,2	15,8
$\theta_3$	18,7	22,6	23,5	23,7	22,6	21,7	19,9	18,8	16,3
$\theta_{mn}$	18,7	19,8	19,9	20	19,3	19	18,3	17,8	15,4
$\theta_{c_1}$	22,1	29,2	31,1	31,6	31,5	30,8	30,2	29,4	22
$\theta_{c_2i}$	21,9	28,4	30,2	30,2	28,9	28,6	27,9	28,3	21,4
$\theta_{c_2e}$	29,4	25,2	27,3	26,6	26,6	25,7	25,4	25,6	18
$h''_n$	2,68	2,88	2,93	2,95	2,94	2,92	2,91	2,86	2,68
$h''_c$	1,49	1,92	2,1	2,01	2,05	2,04	2,04	2,03	1,76
$h''_n$	23,8	57,2	75,08	11,98	7,89	11,19	5,68	11,62	15,6
$h''_{cv}$	10,38	11,2	11,44	11,18	11,40	11,27	11,23	11,21	10,79
$h''_{ar}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$K$	4,72	4,74	4,86	5,09	4,96	5,06	4,83	5,03	4,8
$P'$	9,74	1,89	9,49	5,09	9,49	2,53	5,79	19,06	12,48
$P_m$	365,2	462,0	479,8	479,6	418,0	396,0	339,0	339,0	149,8
$E$	421,1	468,9	516,7	525,5	502,3	483,9	463,9	415	369,5
$E_i$	631,6	703,4	709,2	788,3	753,5	725,9	695,9	622,5	554,3
$\eta_{exp.}$	0,58	0,65	0,67	0,61	0,55	0,54	0,5	0,53	0,25

capteur à double vitrage  
inclinaison : 35°

$$\dot{V} = \frac{1}{35} [l/s]$$

début de l'expérience : 9<sup>H</sup><sub>30</sub>  
état du ciel : dégagé  
vitesse du vent : 7 km/h = 1,95 m/s  
arrêt de l'expérience : 14<sup>H</sup>.

Movaire	10 <sup>H</sup> <sub>30</sub>	11 <sup>H</sup>	11 <sup>H</sup> <sub>30</sub>	12 <sup>H</sup>	12 <sup>H</sup> <sub>30</sub>	13 <sup>H</sup>	13 <sup>H</sup> <sub>30</sub>	14 <sup>H</sup>
O <sub>a</sub>	15,3	16,9	16,9	16,6	15,1	16,1	15,7	15,3
O <sub>e</sub>	13,8	13,8	14	14	14	14	14	14
O <sub>s</sub>	19	22,5	23	23,6	22,5	21,8	21	19,5
O <sub>1</sub>	15,6	16,6	16,9	17,8	17,3	16,9	15,9	15,3
O <sub>2</sub>	15,2	16,8	17,8	18,5	18,5	18,3	17,3	16,9
O <sub>3</sub>	16,7	18,3	19,2	21,1	20,8	20,1	18,6	17,5
O <sub>m</sub>	16,4	18,2	18,5	18,8	18,3	17,9	17,5	16,8
O <sub>c1</sub>	16,9	26,3	29,8	23,9	22,7	27,7	24,5	24,7
O <sub>c2i</sub>	17,3	24,9	20,1	22,7	21,5	23,5	22,9	21,3
O <sub>c2e</sub>	16,6	22,3	19,7	21,3	20,4	22	21,1	19,9
h' <sub>π</sub>	2,54	2,79	2,65	2,73	2,71	2,84	2,95	2,95
h' <sub>c</sub>	0,93	0,62	1,35	1,65	1,59	1,95	1,73	1,85
h'' <sub>π</sub>	27,4	11,71	17,61	12,61	11,61	11,09	11,56	12,59
h'' <sub>cv</sub>	16,79	17,79	17,29	17,68	22,76	17,87	17,79	17,66
h'' <sub>ar</sub>	1	1	1	1	1	1	1	1
K	4,22	4,06	4,59	4,83	4,81	5,11	4,93	4,99
P'	4,64	5,28	8,45	10,63	15,39	9,19	8,87	7,49
P <sub>m</sub>	2557	427,8	442,6	472,1	418,0	383,6	344,3	270,5
E	448,8	491,1	513,3	529,4	519,4	494,4	449,4	405
E <sub>i</sub>	628,3	687,5	718,6	741,2	727,2	692,2	629,2	567
η <sub>i</sub> exp.	0,41	0,62	0,61	0,64	0,57	0,55	0,55	0,47

capteur à double vitrage

inclinaison : 25°

$$\dot{V} = \frac{1}{85} \left[ \frac{Q}{A} \right]$$

début de l'expérience : 10<sup>H</sup>

état du ciel : dégagé.

vitesse du vent : 13 km/h = 3,61 m/s

arrêt de l'expérience : 14<sup>H</sup>.

### 3.3.7- Méthode utilisée pour le trace des courbes expérimentales:

#### 3.3.7.1 Choix des courbes à tracer:

L'étude des résultats expérimentaux donne la possibilité de tracer plusieurs courbes, mais celles choisies doivent fournir le maximum de renseignements concernant le fonctionnement du capteur. Elles doivent aussi nous décrire le comportement du capteur pour des conditions d'utilisation données, permettre l'évaluation des pertes thermiques et donner l'écart de température par rapport à l'ambiance. Ensuite, ce qui caractérise le plus une installation, c'est son rendement. Donc, nous essayerons dans ce qui va suivre de rechercher une représentation graphique qui puisse regrouper les paramètres influant sur le fonctionnement du capteur.

#### 3.3.7.2. Explication de la méthode utilisée:

Le nombre des paramètres variant avec le temps est assez élevé. Pour chaque relevé, les conditions d'expérience ne sont pas identiques pour plusieurs raisons:

Variation de la température ambiante.

Variation du flux incident.

Variation de la température d'entrée du fluide caloporteur.

Ainsi, pour pouvoir tracer les courbes expérimentales, il faudrait tenir compte de toutes les fluctuations des paramètres cités. Le calcul théorique du rendement global instantané du capteur donne:

$$\eta_{th} = \frac{Pu}{E_i} \quad \text{En développant cette expression, on obtient:}$$

$$\eta_{th} = \frac{\tau \alpha E_i - K (\theta_m - \theta_a)}{E_i} = \tau \alpha - \frac{k (\theta_m - \theta_a)}{E_i}$$

Cette expression du rendement tient compte au maximum de tous les paramètres influant sur le fonctionnement du capteur.

Le rendement expérimental défini comme:  $\eta_{exp} = \frac{Pu}{E_i}$  est

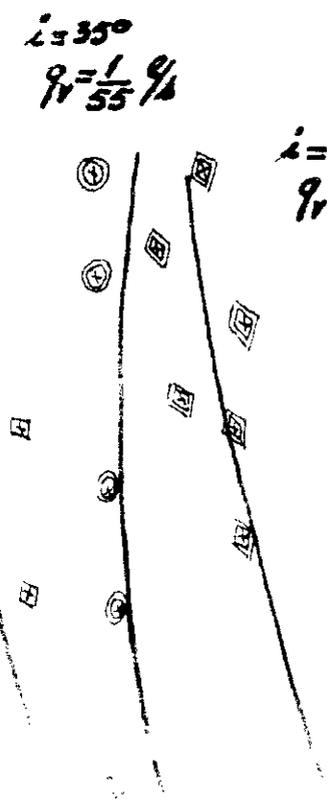
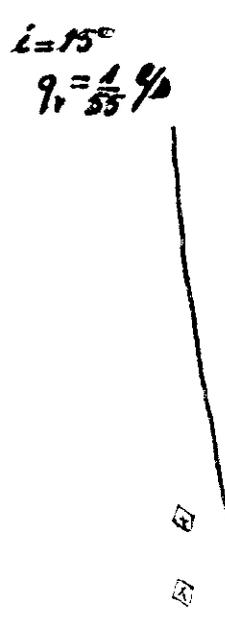
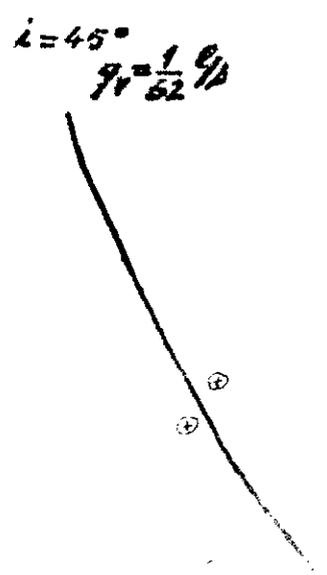
accessible, car  $Pu$  et  $E_i$  sont connus. Alors, nous avons jugé utile de tracer le rendement expérimental en fonction de  $(\frac{\theta_m - \theta_a}{E_i})$ .

$$\text{on pose : } \begin{cases} \Delta T_a = \theta_m - \theta_a \\ \xi = \frac{\Delta T_a}{E_i} \text{ (} ^\circ\text{C/W/m}^2 \text{)} \end{cases}$$

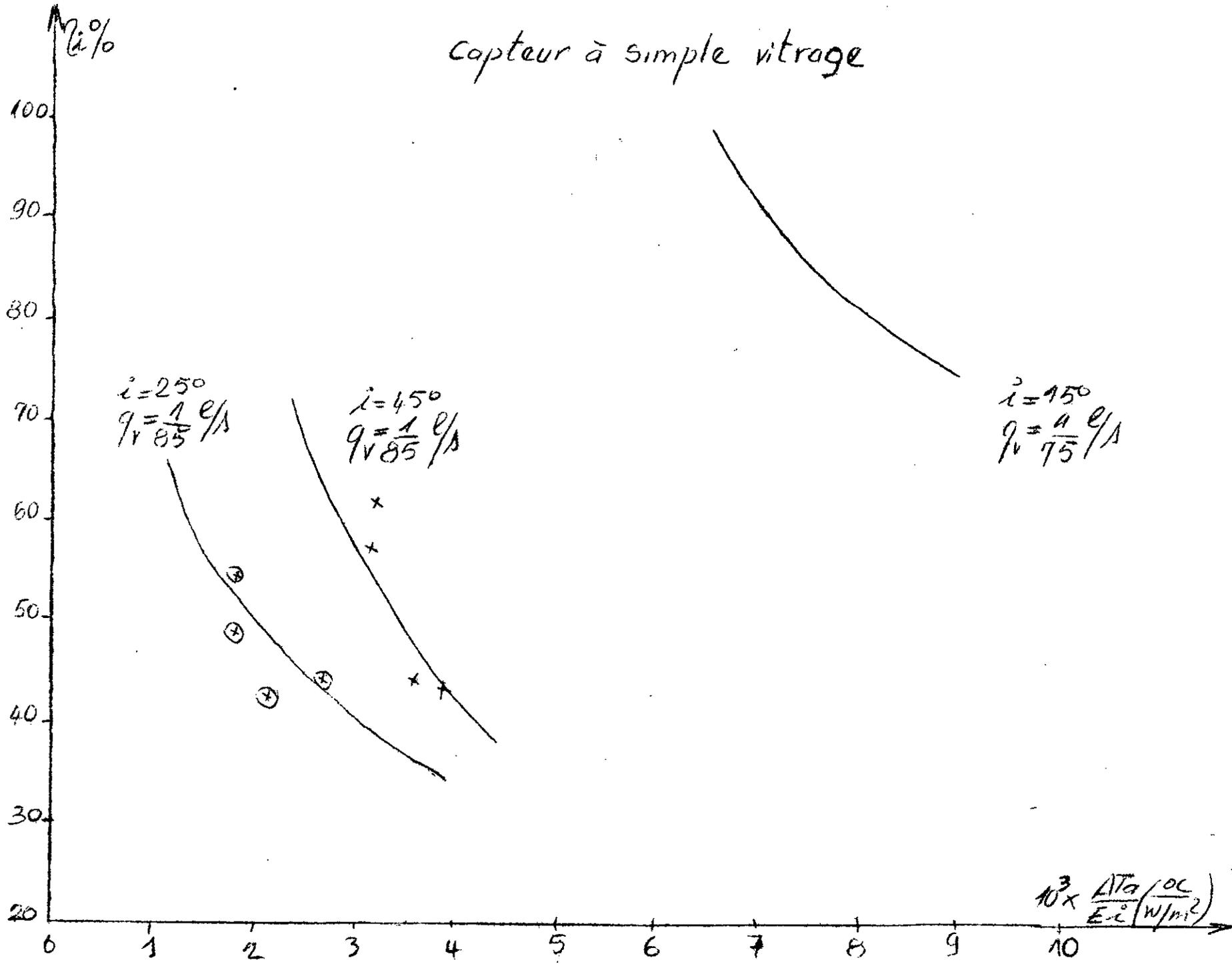
Le tracé des courbes  $\eta_{exp} = \eta_{exp}(\xi)$  permet, en comparant les tangentes à chaque courbe, pour des valeurs identiques de  $\xi$  de prévoir l'influence du type de vitrage (sans vitrage, à simple, ou à double) sur la conductance globale des pertes thermiques

### 3.3.7.3. Courbes expérimentales ;

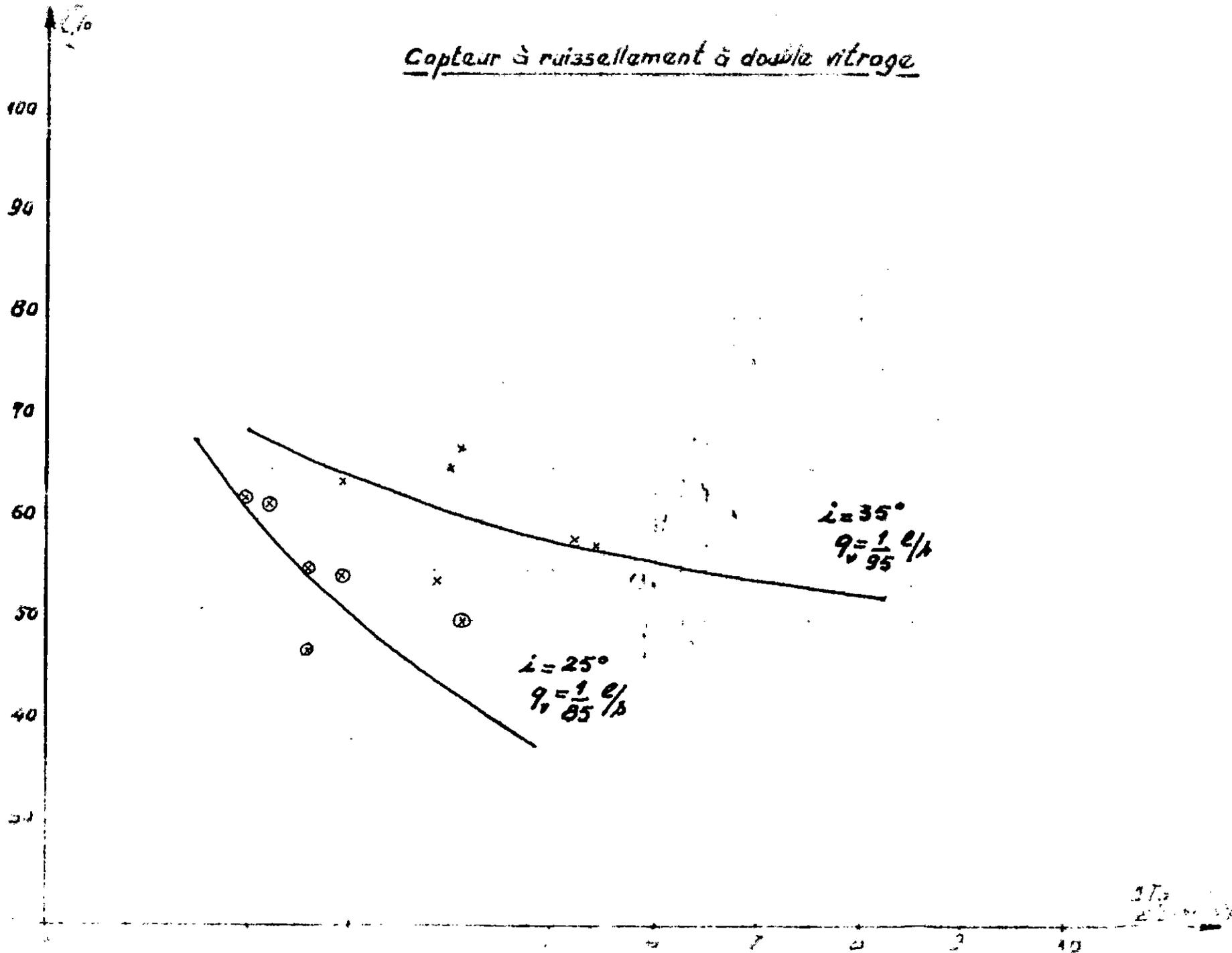
0  
1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10



# Capteur à simple vitrage

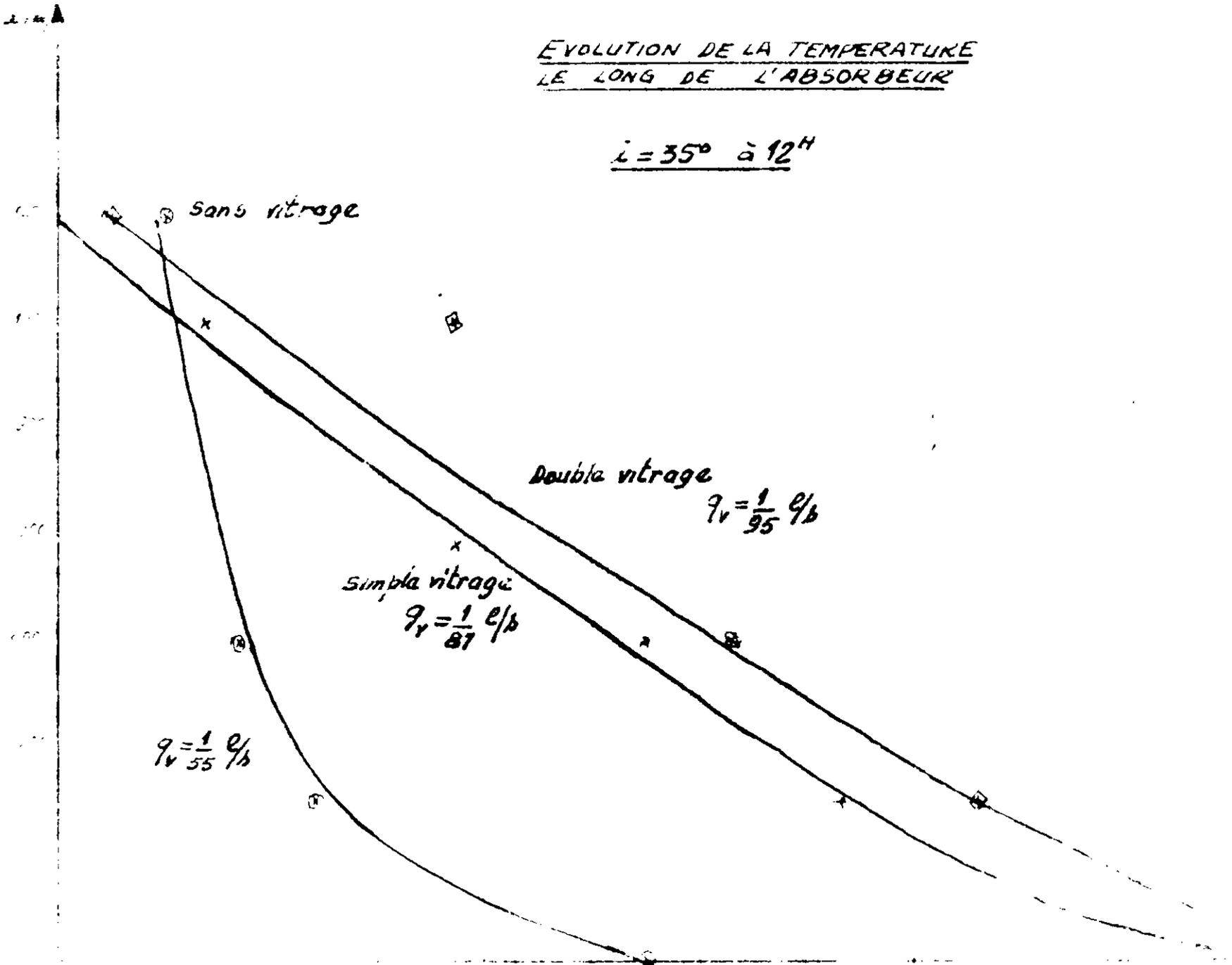


Captur à ruissellement à double nitroge



EVOLUTION DE LA TEMPERATURE  
LE LONG DE L'ABSORBEUR

$i = 35^\circ$  à  $12^h$



### 3.3.8 - Analyse des résultats:

#### 3.3.8.1. - Analyse des tableaux de mesures:

L'analyse des résultats montrent plusieurs anomalies dans le bilan thermique de fonctionnement du capteur. L'équation de fonctionnement ( $E_i = P_u + P'$ ) n'est pas satisfaite.

A notre avis, les pertes thermiques ont été sous-estimées. Nous évoquerons dans ce qui suit les différentes sources d'erreurs.

#### -Capteur à Ruissellement sans vitrage.

-L'écoulement en film mince se fait sur la plaque. La surface libre du film est en contact avec l'air ambiant. La convection forcée due au vent est importante. La relation utilisée pour l'évaluation des pertes thermiques par convection forcée est:

$$(1) \quad h_{cv} = 2,2 (\theta_{moy} - \theta_a)^{0,25} + 4V \quad (V < 4 \text{ m/s})$$

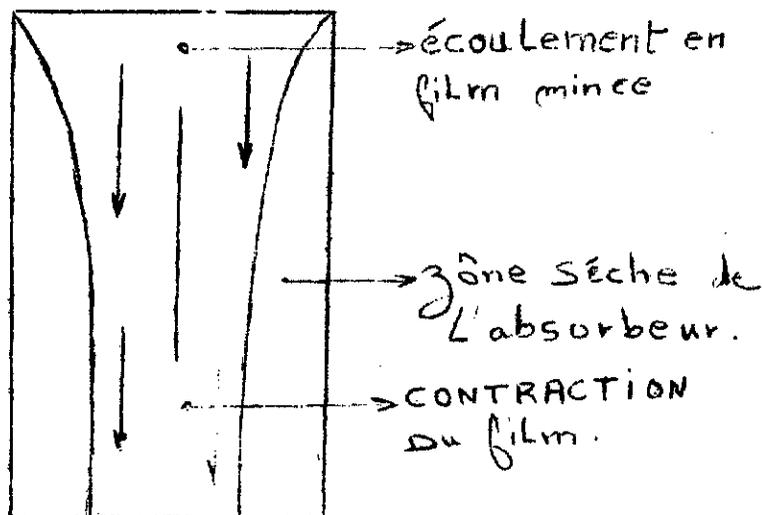
Cette relation est valable pour un écoulement se faisant sous la plaque. Son utilisation sous-estime les pertes thermiques par convection, car pour notre cas, l'écoulement est en contact direct avec l'air. Il faudrait augmenter l'influence de la vitesse du vent dans la relation (1).

#### -Capteur à Ruissellement: Simple ou double vitrage:

La conductance globale (K) des pertes thermiques, est calculée à partir des relevés expérimentaux des températures prises à différents niveaux. L'évaluation des différents coefficients d'échange par convection et par rayonnement ont été sous-estimés parce que les températures relevées présentent plusieurs anomalies. Le calcul du coefficient d'échange par rayonnement est effectué à partir des relevés de la température de la couverture. Il s'avère que cette température est supérieure à la température moyenne de fonctionnement. De ce fait, les valeurs calculées des différents coefficients d'échange par convection et par rayonnement sont faibles.

De plus, sur une plaque inclinée, il est difficile d'obtenir un film uniforme couvrant toute la surface d'échange. En effet, durant l'expérimentation, après environ 1 heure de fonctionnement,

Le film se contracte Sous l'effet des tensions superficielles; ce qui se traduit par une diminution de la puissance utile extraite, et une augmentation des pertes par rayonnement (de la zone sèche de la plaque, vers la couverture). Ces pertes n'ont pas été évaluées.



En outre, au cours du fonctionnement, une condensation de gouttelettes d'eau apparaît sur la face interne de la vitre. Donc, il y a une certaine quantité d'énergie qui est utilisée par l'évaporation de l'eau. Dans les calculs effectués, il n'a pas été tenu compte de cette autre source de pertes. Avec l'utilisation de la 2<sup>ème</sup> couverture, la condensation a diminué considérablement. Aussi, les pertes thermiques latérales, et les fuites par les joints d'étanchéité ont été négligées.

### 3.3.8.2 - Analyse des courbes expérimentales:

Dans le § 3.3.7.2, il a été retenu de tracer les courbes du rendement expérimental en fonction de  $\eta = \frac{\Delta T_a}{E_a}$ . La pente de la tangente à la courbe est proportionnelle à la conductance globale des pertes thermiques. Le calcul de  $K_1$  montre que:

$$K_1 \quad > \quad K_2 \quad > \quad K_3$$

(sans vitrage)                      (Simple vitrage)                      (double vitrage).

Les courbes tracées expérimentalement vérifient ce résultat.

En effet, les pertes  $P_f$  des tangentes aux courbes de rendement sont telles que:

$$P_1 \quad > \quad P_2 \quad > \quad P_3$$

(sans vitrage)                      (Simple vitrage)                      (double vitrage)

Remarque:

Le rendement dans le cas du double vitrage, ne varie pas considérablement au cours du fonctionnement par rapport au capteur sans vitrage et avec simple vitrage.

Inclinaison optimale:

Le flux  $E_1$  reçue sur la plaque inclinée d'un angle  $i$  a été évalué à partir des équations du 2.2.5 qui tiennent compte des différents angles:

declinaison et angle horaire. Experimentalement, le flux est maximum pour un angle d'inclinaison de  $45^\circ$ .

3.3.9 - Etude critique et Conclusion:

3.3.9.I - Suggestions d'amélioration du Capteur à ruissellement:

Les éléments de construction du capteur ont été en grande partie métallique. L'inconvénient majeur de cette solution réside dans l'augmentation du poids de l'installation.

La réalisation du boîtier en zinc a l'avantage d'être réalisable, de maintenir au mieux le capteur (rigidité), et d'être à bon prix. Cependant les pertes thermiques sont importantes. Pour y remédier, il est souhaitable d'utiliser d'autres matériaux disponibles répondant aux critères suivants:

- Rigidité.
- Facilité de réalisation et de montage.
- Coefficient de conductibilité bas.

Les matériaux pouvant être utilisés:

- Le bois: durée de vie limitée.
- Coque isolante en fibre de verre: prix assez élevé.
- Plastique: Solution de plus en plus utilisée.

-L'absorbeur:

Cette plaque devra absorber le maximum de radiations transmises au travers du vitrage, en réémettre le minimum, et transférer le maximum de l'énergie retenue au fluide caloporteur. Les matériaux

utilisés pour la réalisation sont surtout : acier, cuivre, aluminium

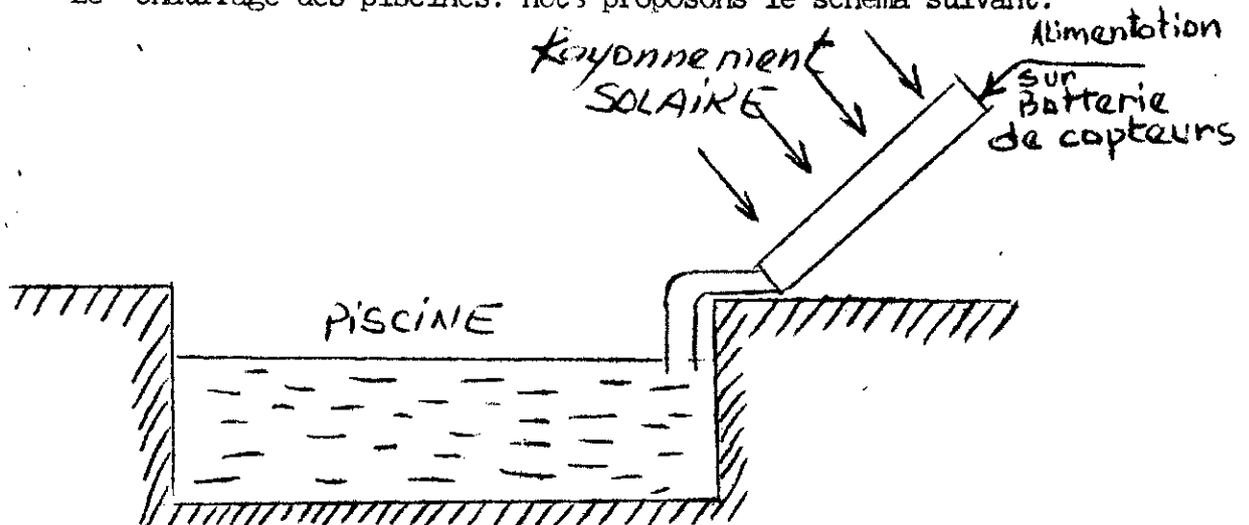
-Utilisation des surfaces sélectives:

De nombreuses études ont été faites pour améliorer les propriétés de la plaque absorbante, particulièrement pour diminuer les pertes par rayonnement qui deviennent importantes lorsque la température de la plaque augmente au delà de  $6^{\circ}\text{C}$ . Pour notre cas, le capteur fonctionne à très basse température ( $30^{\circ}$ ), les surfaces sélectives ne sont pas envisageables.

4.3)- Applications du Capteur à Ruissellement:

Les températures atteintes permettent d'envisager quelques applications du capteur à ruissellement.

-Le chauffage des piscines: nous proposons le schéma suivant:



Cependant, il n'est pas exclu qu'avec des modules plus longs, l'élévation de température soit plus importante. Les résultats obtenus sont pour une longueur de 1200 mm. L'évolution du gradient de température le long de la plaque permet de confirmer notre hypothèse. Il se pourrait que d'autres applications soient possibles, mais pour cette étude, la partie intéressante était d'évaluer l'écart de température.

### 3.3.9.3 Conclusion :

Mon ambition a été tout le long de ce travail de tester les performances du capteur à ruissellement, en agissant sur plusieurs facteurs, notamment l'inclinaison, le débit, et le nombre de couvertures (effet de serre), avec des prises de température à différents niveaux. Ce travail aurait pu nous fournir tous les éléments nécessaires pour une étude approfondie à caractère comparatif surtout. Cependant, en période hivernale, le nombre de journées ensoleillées étant réduit nous étions dans l'obligation de limiter notre travail à quatre inclinaisons dans chaque cas.

L'installation que nous avons conçue, nous permit d'effectuer nos essais et d'entrevoir par là les moyens d'amélioration et les modifications nécessaires à apporter à la conception de la méthode expérimentale, aux matériaux possibles pour la réalisation du boîtier...

Aussi, l'indisponibilité de résultats expérimentaux concernant les capteurs à ruissellement a diminué considérablement notre travail. Une étude comparative aurait été souhaitable. Ainsi, nous étions amenés à discuter nos résultats sans pouvoir déceler les sources d'erreurs possibles.

J'aimerais ajouter que ce travail a été intéressant, et m'a permis d'entrevoir de nouveaux horizons où le coucher du soleil fait vibrer le cœur des poètes.

