

وزارة التعليم و البحث العلمي  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

*Alex*  
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT *MECANIQUE*

## PROJET DE FIN D'ETUDES

### SUJET

*Etude théorique et expérimentale de  
l'amélioration des performances d'un  
isolateur plan pour chauffe-eau*

Proposé par :

*M. A. ZERGUERRAS*

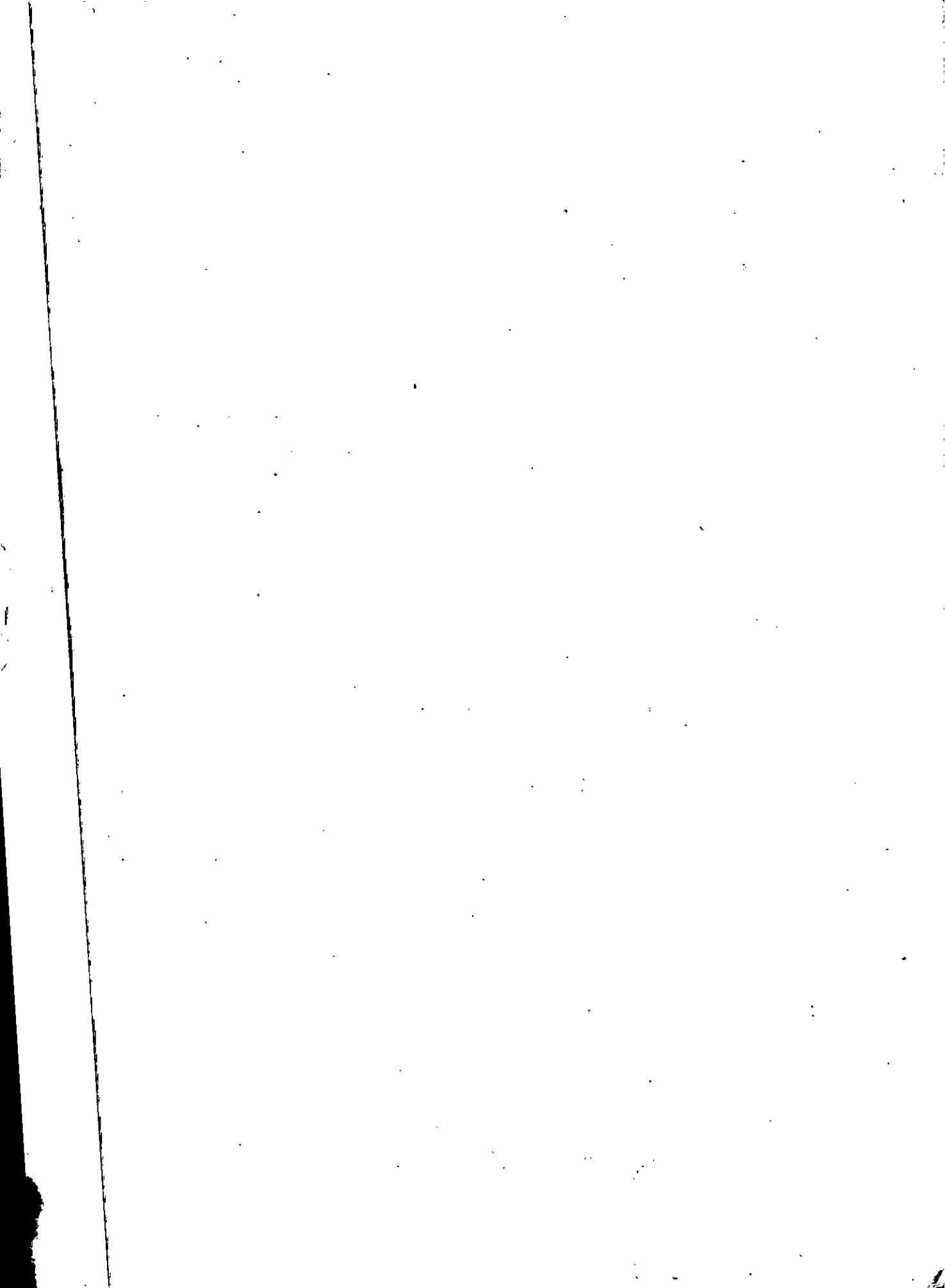
Etudié par :

*M. BOUKOUNACHA*

Dirigé par :

*M. A. ZERGUERRAS*

PROMOTION : *Janvier 85*



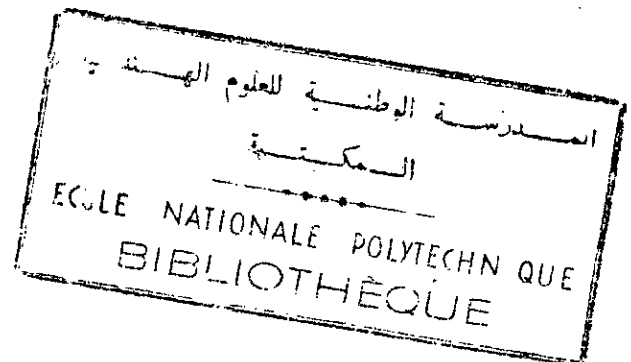
## DEDICACES

je dédie ce modeste travail

- A mes chers parents, qui se sont sacrifiés pour me voir atteindre ce but
- A mes frères et sœurs
- A tous ceux qui me sont chers
- A tous ceux qui m'ont aidé, de près ou de loin, durant mes études

## REMERCIEMENTS

Je remercie vivement Monsieur le professeur AHMED ZERGUERRAS, chef du département de génie mécanique à l'E.N.P.A pour tous les conseils qu'il m'a prodigués et les orientations vers un sujet pratique et utile, à ma future carrière professionnelle, en l'occurrence l'énergie solaire.



## ملخص

إن الدراسة المطروحة في هذا البحث تهدف إلى تعيين سميات قابض  
متنوي، وخاصة في المجال الضوئي (اختيار كمين مناسب للأشعة تحت  
الحمراء. كما درست النتائج التجريبية لتشخيص مناسب  
أخيراً دراسة نظرية قد درست لكي نحسن من فعالية هذا القابض

## RESUME

L'étude projetée dans ce document a pour but l'amélioration  
des performances d'un capteur plan, plus particulièrement  
dans le domaine optique [optimisation piègeage infrarouge].  
Les résultats expérimentaux sur la caractérisation d'un piège  
optimal ont été discutés.  
Enfin une étude théorique a été reprise pour augmenter  
le rendement du capteur.

## SUMMARY

the purpose of present paper is to improve the performances  
of the insulator and particularly in the optical range  
the experimental results has been discussed.  
At last, a theoretical study has been undertake, to increase  
the out put [efficiency] of the insulator.

# — TABLE DES MATIERES —

## CHAPITRE I TRANSFERT DE CHALEUR PAR RAYONNEMENT

1 Généralités	3-4
2 Définitions relatives au rayonnement :	
21 Flux - d'énergie	5
22 Intensité énergétique dans une direction	5
23 L'éclairement énergétique	5
24 Luminance énergétique d'une source	6-7
25 L'émittance énergétique	7
26 Formule de BOUGUER	8
3 Grandeurs relatives à un rayonnement monochromatique	
4 Le corps noir :	8-9
41 Définition	
42 Loi de Planck	
43 Loi de Wien	
44 Loi de STEFFAN-BOLTZMAN	
5 Le rayonnement thermique des corps non noirs	10-12
51 Remarques générales	
52 L'émissivité	
6 Echange de chaleur par rayonnement entre plans parallèles	

## CHAPITRE II LIMITATION DES PERTES DE CHALEUR

1 Mécanisme des pertes	13-14
2 Caractérisation d'un piège optimal :	
21 captage et effet de serre :	14

22	Etude spectrale de quelques matières	
	a) but	
	b) Essais et résultats expérimentaux	16-20
23	Notion de la fonction partielle	28-32
24	Exploitation des résultats	33-41
25	Effet de serre renforcé	42-43
26	Effet de l'addition de multiples vitrages	44-47
3	Les structures cellulaires antirayonnantes	
	31 Introduction	47-48
	32 Etude expérimentale	48-50
4	Pertes par convection sous un vitrage	50-52
5	Pertes arrières	53

## CHAPITRE III APPLICATION POUR LA PRODUCTION D'EAU CHAUDE SANITAIRE

1	chauffe-eau avec ou sans échangeur de chaleur	54-
2	Petites installations d'eau sanitaire	56-
	Conclusion	59

## INTRODUCTION:

Durant ces dernières années, les recherches sur les énergies de remplacement sont orientées vers des solutions économiques, possédant de meilleurs rendements.

A cet effet les installations de chauffage solaires ont elles aussi contribué à cette évolution. Dans la plupart des pays,

les installations de chauffage considérées se révèlent une forme avantageuse pour le chauffage de l'eau chaude sanitaire.

Notre étude porte sur l'élément essentiel de l'installation à savoir le capteur, l'énergie disponible à partir d'un capteur est liée aux différentes pertes auxquelles on s'attache à réduire en vue d'augmenter le rendement du capteur.

Le but recherché est donc d'améliorer les performances du capteur, surtout dans le domaine optique par utilisation des pièges infra-rouge.

Un premier chapitre est consacré aux rappels théoriques sur le transfert de chaleur.

Un deuxième chapitre traitera un travail expérimental sur des matériaux standards, tels le verre et le plexiglass fixant le choix d'un piège optimal, un étude comparative réalisée sur une structure cellulaire composée, de la physique des pertes par convection et par



2

conduction et les moyens mis en oeuvre pour les réduire.  
Enfin, quelques applications récentes : production de l'eau  
chaude sanitaire feront l'objet d'un troisième chapitre

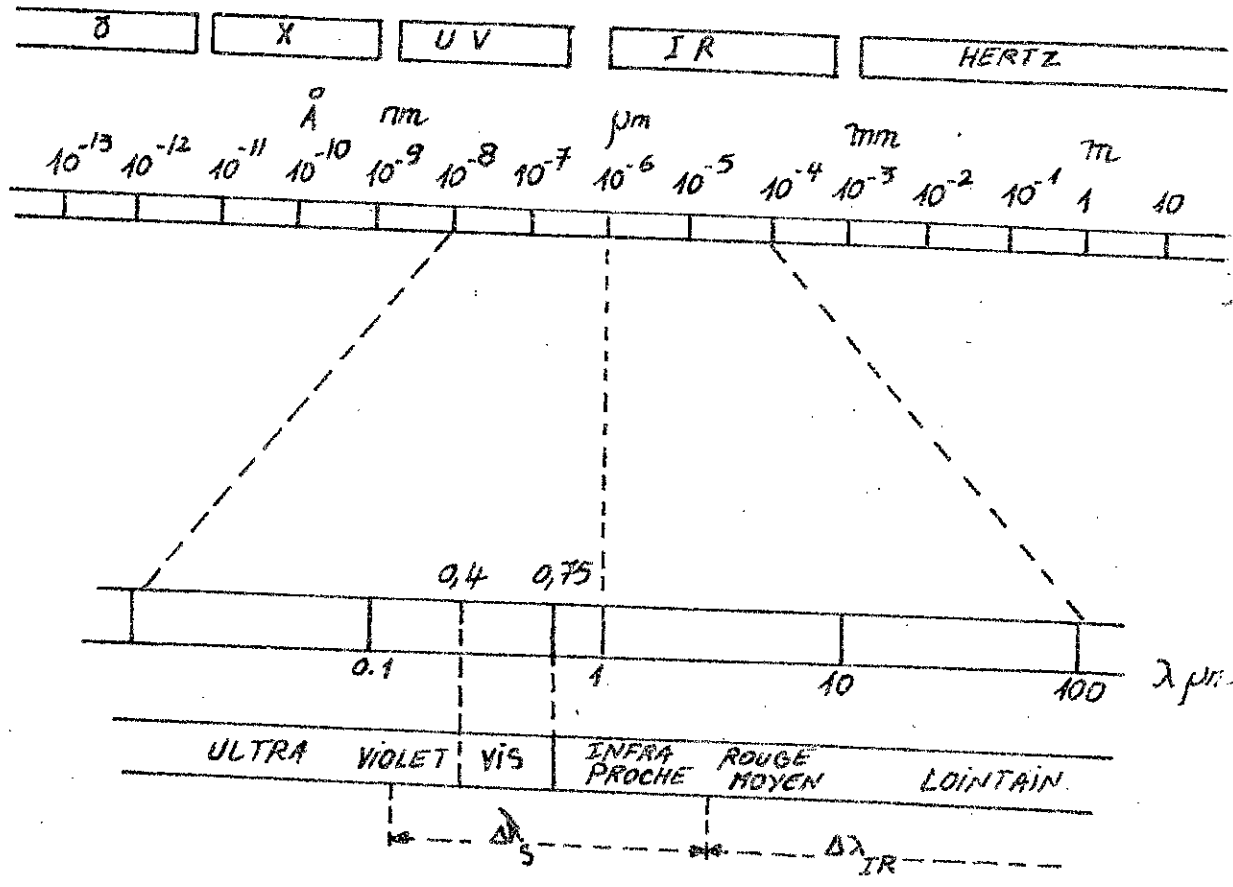
## I. TRANSFERT DE CHALEUR PAR RAYONNEMENT

### I.1 Généralités :

La transmission de la chaleur par rayonnement est l'un des phénomènes électromagnétiques. On appelle rayonnement ou plus généralement une radiation, une propagation d'énergie ne nécessitant pas l'intervention d'un milieu matériel intermédiaire.

Les premières recherches en physique ont démontrées l'existence d'un rayonnement thermique dans la lumière solaire au-delà de l'infrarouge du spectre visible, ce rayonnement thermique est également considéré comme une émission désordonnée de photons entre les longueurs  $10^{-8}$  à  $10^{-4}$  mètres, sont donc exclus de cette catégorie de rayonnement, les rayons cosmiques, les rayons gamma, les rayons X, le début du spectre ultraviolet et les ondes hertziennes. dans le cas général le mécanisme du transfert de chaleur par rayonnement fait intervenir :

- Une source S qui émet un rayonnement électromagnétique
- Un milieu M qui transmet tout ou partie de ce rayonnement
- Un récepteur R qui absorbe tout ou partie du rayonnement qui l'atteint.



Differents domaines de longueurs d'onde du rayonnement électromagnétique.

### I.2 DEFINITIONS RELATIVES AU RAYONNEMENT:

#### I.2.1 Flux d'énergie $\phi_0$ :

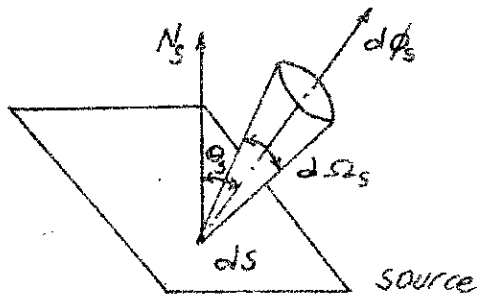
Le flux d'énergie émis par une source représente la puissance rayonnée par la source dans tout l'espace qui l'entoure; il se conserve lors de la propagation dans les milieux homogènes, non absorbants.

On l'exprime en [Watts]

#### I.2.2 Intensité énergétique dans une direction donnée: [fig I.1]

C'est la limite du rapport entre le flux émis  $d\phi$  par une source, dans une direction définie par  $(\theta, \eta)$  et l'angle solide  $d\Omega_s$  dans lequel est évaluée l'intensité

$$I_{(\theta, \eta)} = \frac{d\phi_s}{d\Omega_s} \quad (I.1) \quad [\text{Watts/steradians}]$$



$N_s$ : la normale à la surface ds

fig I.1

#### I.2.3 L'éclairement énergétique $E$ [fig I.2]:

Il s'agit de la valeur locale du rapport entre le flux  $d\phi_R$  reçu par le récepteur et l'aire  $dR$ , c'est à dire une puissance reçue par unité de surface

$x, y$  coordonnées d'espace relatifs à la position des problèmes pour lesquels est évalué l'éclairement

$$E_{x,y} = \frac{d\phi_R}{dR} \quad [I.2] \quad [\text{Watts/m}^2]$$

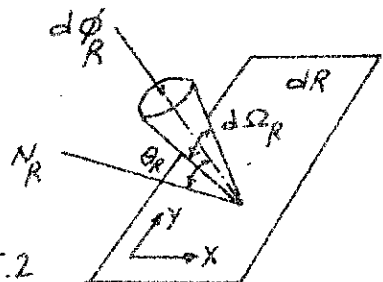


fig I.2

### I.2.4 Luminance énergétique d'une source $L$ (fig I.3):

Le plus souvent la source n'est pas considérée comme ponctuelle. Soit une source de dimensions finies,

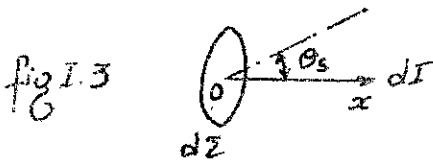
considérons un point  $O$  de la surface et centrée sur  $O$ , une petite surface  $dZ$  de la source

considérons une direction d'émission  $Ox$  faisant  $\theta_3$  avec la normale à  $dZ$ .

Soit  $dI$  l'intensité énergétique de cette portion de source suivant la direction  $Ox$ . On appelle luminance énergétique de la source dans la direction  $x$ , la limite pour  $dZ$  tendant vers zéro:

$$L = \frac{dI}{dZ \cos \theta_3} \quad (\text{I.3}) \quad [\text{W/sd cm}^2]$$

$dZ \cos \theta_3$ : représente la surface utile de la source pour la direction  $x$



Remarques:

a) l'intensité énergétique d'une source dans une direction définie par les paramètres  $(\xi, \eta)$  et l'angle solide  $d\Omega_3$  s'exprime:

$$I_{(\xi, \eta)} = \int_S L_{(x, y)} \cos \theta_3 dS \quad [\text{W/sd}] \quad (\text{I.4})$$

b) L'éclairement énergétique s'exprime

$$E_{xy} = \int_{\text{demi-sphère}} L(\xi, \eta) \cos \theta_R d\Omega_R \quad (I.5)$$

I.2.5 L'émittance énergétique  $H$ :

Il s'agit de la valeur locale du rayonnement, entre le flux émis par une source  $d\phi_s$  et la surface de cette source.

$$H_{xy} = \frac{d\phi_s}{ds} = \int_{\text{demi-espace}} L(\xi, \eta) \cos \theta_s d\Omega_s \quad [W/cm^2] \quad (I.6)$$

Si  $L(\xi, \eta)$  est constante on a  $H_{xy} = \pi L$  (I.7)

I.2.6 Formule de BOUGUER:

Elle permet de définir à partir des données précédentes le flux envoyé par un élément de surface  $dZ$  de luminance  $L$  dans la direction  $OP$  sur l'élément de surface  $ds$  centré en  $P$ .

$$d\phi = L \frac{ds \cos \theta_s \cos \theta_R}{r^2} \quad [I.8]$$

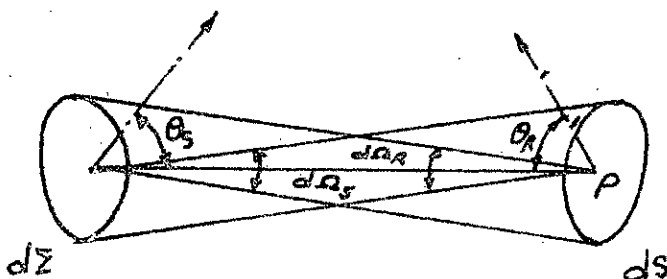


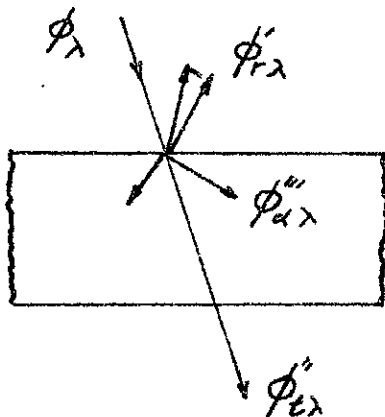
fig I.4

### I.3 Grandeurs relatives au récepteur:

#### I.3.1 Grandeurs relatives à un rayonnement monochromatique:

Lorsqu'un flux d'énergie monochromatique incident tombe sur un corps, une partie est réfléchie et diffusée dans le milieu d'où provient le rayonnement, une autre est éventuellement transmise et traverse le corps, une troisième partie est absorbée [fig I.5]

fig I.5



On définit ainsi les facteurs monochromatiques suivants, sans dimension:

$$\text{Facteur de réflexion } \rho_{\lambda} = \frac{\Phi'_{r\lambda}}{\Phi_{\lambda}}$$

$$\text{Facteur de transmission } \tau_{\lambda} = \frac{\Phi''_{t\lambda}}{\Phi_{\lambda}}$$

$$\text{Facteur d'absorption : } \alpha_{\lambda} = \frac{\Phi'''_{a\lambda}}{\Phi_{\lambda}}$$

note : la radiation ne change pas de  $\lambda$  au cours des interactions avec la matière si bien on a :

$$\rho_{\lambda} + \tau_{\lambda} + \alpha_{\lambda} = 1 \quad (\text{I.9})$$

## I.4 Le corps noir

I.4.1 Définition: On appelle un corps noir un récepteur absorbant totalement les rayonnements qu'il reçoit et pour lequel  $\alpha_\lambda = 1$  dans toute la gamme des longueurs d'onde.

### I.4.2 La loi de PLANCK:

L'émission spectrale du corps noir est décrite par la loi de Planck bâtie sur des considérations thermodynamiques statistiques:

$$\frac{dH_{CN}(\lambda, T)}{d\lambda} = \frac{2\pi hc^2 \lambda^{-5}}{\exp\left[\frac{hc}{\lambda kT}\right] - 1} \quad [\text{W.m}^{-3}] \quad (\text{I.10})$$

avec:  $\frac{dH_{CN}(\lambda, T)}{d\lambda}$ : émittance spectrale, c'est à dire la puissance rayonnée par unité de surface de corps noir et par unité de longueur d'onde

$h = 6.6256 \cdot 10^{-34} \text{ J.s} [\text{W.s}^2]$  Constante de Planck.

$k = 1.38054 \cdot 10^{-23} \text{ J [°K]}^{-1}$  Constante de BOLTZMANN

$c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$  Célérité de la lumière

$T$ : Température absolue en degrés Kelvin

### I.4.3 La loi de WIEN:

La courbe de distribution spectrale  $\frac{dH_{CN}(\lambda, T)}{d\lambda}$  obtenue par une valeur de température  $T$ , passe par un maximum. Le déplacement de ce maximum en fonction de la Température, décrit par la loi de Wien est-



obtenue par dérivation de la loi de Planck.

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \text{ [microns]} \quad (I.11)$$

avec  $T$ : exprimée en degrés KELVIN

I.4.4 La loi de STEFFAN-BOLTZMANN:

- Cette loi, obtenue par intégration de la loi de PLANCK depuis  $\lambda = 0$  jusqu'à  $\lambda$  infini, donne l'émittance Totale du corps noir pour une température  $T$ .

$$H_f = \sigma T^4 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (I.12)$$

$$\sigma = \frac{2\pi^5 K^4}{15 C^2 h^3} = 5.67 \cdot 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ [}^\circ\text{K]}^{-4}$$

Constante de STEFFAN

I.5 Le rayonnement thermique des corps non noirs :

I.5.1 Remarques générales:

Les corps utilisés dans la pratique courante ne sont pas des corps noirs. Ils s'en distinguent par les faits suivants:

les corps non noirs, n'absorbent qu'une fraction  $\alpha$  du rayonnement incident, réfléchissent la partie  $\rho$  et transmettent la partie  $\tau$

Ces diverses valeurs sont sélectifs, c'est à dire  $\alpha_\lambda$ ,  $\rho_\lambda$  et  $\tau_\lambda$  dépendent de la longueur d'onde. Il est nécessaire d'introduire un terme d'émission  $\epsilon(\lambda)$  dont le rôle est de compenser le terme d'absorption  $\alpha_\lambda$ ; avec  $\alpha_\lambda = \epsilon_\lambda$

$\epsilon_\lambda$  : appelé émissivité spectrale

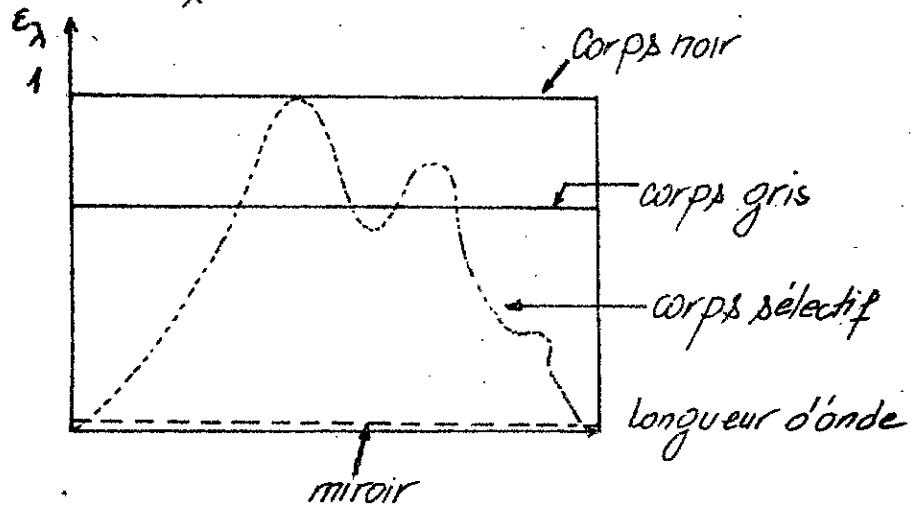
Certains matériaux présentent des valeurs particulières de ces coefficients, il s'agit alors

corps opaques  $\tau_\lambda = 0$  et  $\epsilon_\lambda + \rho_\lambda = 1$

corps brillants  $\rho_\lambda$  grand et  $\epsilon(\lambda)$  presque nul

corps gris  $\epsilon(\lambda)$  : constante

$\rho_\lambda$  : constante



### I.5.2 L'émissivité

L'émissivité spectrale d'une surface est définie comme le rapport entre l'émittance spectrale  $\frac{dH(\lambda, T)}{d\lambda}$  de cette surface et l'émittance du corps noir  $\frac{dH_{CN}(\lambda, T)}{d\lambda}$  à la même température

$$\epsilon(\lambda) = \frac{dH(\lambda, T)}{d\lambda} / \frac{dH_{CN}(\lambda, T)}{d\lambda} \quad (I.13)$$

Cette valeur dépend de la longueur d'onde, de la direction d'observation par rapport à la surface et de la température

L'émissivité est souvent évaluée pour une incidence normale, dans une bande spectrale comprenant toutes les longueurs d'onde

L'émissivité totale: 
$$\epsilon = \frac{\int_0^{\infty} E(\lambda) \frac{dH_{CN}(\lambda, T)}{d\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} \frac{dH_{CN}(\lambda, T)}{d\lambda} d\lambda} \quad (I.14)$$

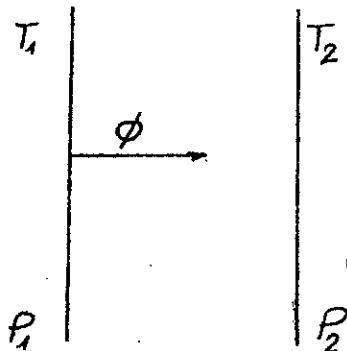
I.6 Echange de chaleur par rayonnement entre plans parallèles infinis:

- Soit deux plans parallèles infinis, ayant respectivement les températures  $T_1$  et  $T_2$  et les facteurs d'émission  $\epsilon_1$  et  $\epsilon_2$  en supposant  $T_1 > T_2$

Le plan  $P_1$  a effectivement rayonné un flux par unité de surface  $\phi$ :

$$\phi = \sigma (T_1^4 - T_2^4) \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad [W/m^2] \quad (I.15)$$

$\sigma = 5.6697 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$  Constante de STEFAN



## II. LIMITATION DES PERTES DE CHALEUR

### I.1 Mécanisme des pertes: [fig II.1]

L'énergie thermique disponible à partir d'un capteur solaire est équivalente à l'énergie incidente diminuée des pertes. Il faut donc orienter le capteur de façon à maximiser l'énergie incidente et prendre des mesures pour minimiser les pertes de chaleur. Les pertes d'énergie thermique sont dues à la réflexion, la réémission de rayonnement, la convection et la conduction.

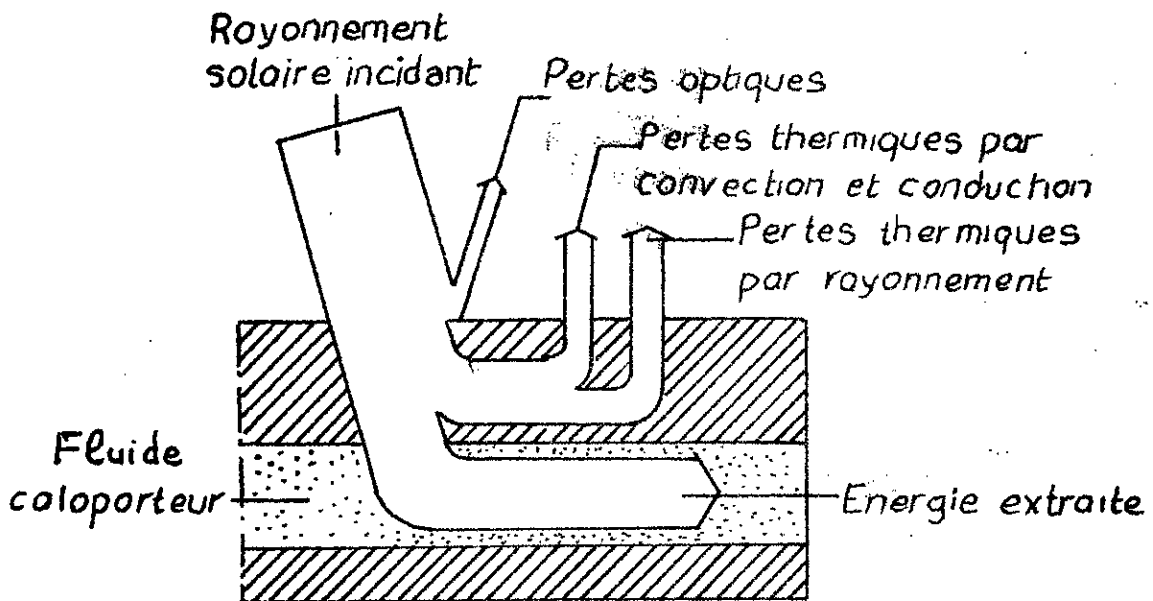


fig II.1: Pertes sur un capteur

Les réflexions se produisent sur le vitrage, s'il existe et sur l'absorbeur lui-même, s'il ne produit pas de réflexion, le capteur paraîtrait parfaitement noir.

La réémission de rayonnement se produit à partir des éléments chauds du capteur solaire. C'est, surtout l'absorbeur qui réémet un rayonnement thermique vers l'espace ou le vitrage.

La convection est le transfert de chaleur occasionné par un fluide en mouvement; ici l'air de l'atmosphère.

La conduction est le transfert de chaleur à l'intérieur d'un matériau soumis à un gradient de température, elle est produite par les mouvements des molécules, des atomes ou des électrons, ici est le dos du capteur.

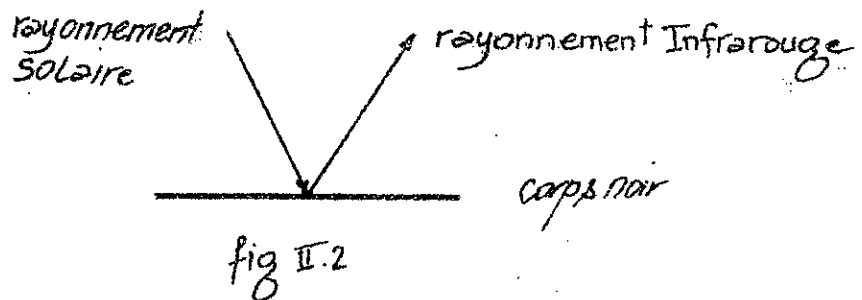
## II.2 Caractérisation d'un piège optimal:

### II.2.1 Captage du rayonnement et effet de serre: [fig II.2]

Une surface peinte en noir et bien absorbante, exposée perpendiculairement aux rayons solaires,

toutefois en s'échauffant, elle émet vers l'atmosphère un rayonnement Infrarouge de grandes longueurs d'ondes et perd ainsi la majeure partie de l'énergie captée. Par conséquent s'il on veut que cette plaque puisse conserver l'énergie solaire absorbée, il faut interposer entre elle et le soleil un obstacle transparent qui laisse passer le rayonnement solaire à courtes longueurs d'ondes,

mais empêche l'infrarouge de grandes longueurs d'ondes émis par le corps noir de répartir à l'espace.



### II.2.2 Etude spectrale de quelques matières :

a) but :

Le but de cette étude est de choisir un piège optimal qui permet de créer l'effet de serre.

La matière qui sera choisie doit répondre à ces exigences :

1°) Elle possède un excellent taux de transmission du rayonnement de <sup>courtes</sup> grandes longueurs d'ondes.

a) Elle a la possibilité, d'être opaque au rayonnement de <sup>grandes</sup> courtes longueurs d'ondes, donc de l'empêcher de passer.

b) Essai et résultats expérimentaux :

Les expériences que nous allons commenter dans ce chapitre, ont été effectuées en utilisant les équipements suivants :

• Un appareil Infrarouge : Serie Berkman [transmission]  
type Aculab9

Un appareil : Ultra violet - visible - IR Proche et moyen  
type DMR21 pour transmission

Un spectrophotomètre : Visible SP8 400 pour l'absorption  
Sensibilité : 0.5  
vitesse : 10 nm/cm

- durant les essais, on a pris comme référence l'air  
réglage à vide 0 - 100%.

Ces dispositifs expérimentaux permettent d'enregistrer  
les spectres de transmission, d'absorption pour  
une bande de longueurs d'ondes bien déterminée.

L'étude a été faite sur deux matériaux :

le verre ordinaire : épaisseurs : 3mm, 4mm, 6mm, 8mm

Le plexiglass : épaisseurs : 3mm, 4mm

les remarques faites au cours de cette étude montre qu'il  
convient de porter une grande attention au positionnement  
de l'échantillon, aux conditions expérimentales.

En prenant ces précautions indiquées, espérons  
qu'on obtient des enregistrements très satisfaisants  
qui nous permettent d'aboutir à un bon résultat.  
les résultats expérimentaux sont classés par  
ordre, le verre et puis le plexiglass.

Tableau II.1

La transmittance spectrale du verre en [%]

$\lambda$ [ $\mu$ ]	$e_1 = 3\text{mm}$	$e_2 = 4\text{mm}$	$e_3 = 6\text{mm}$	$e_4 = 8\text{mm}$
ULTRAVIOLET [à partir de $0.28\mu$ ]				
0.28	70	70	70	65
0.29	70	70	69	65
0.30	55	55	55	55
0.31	23	13	12	12
0.315	26	14	8	8
0.32	32	24	12.5	12.5
0.33	38	28	14	14
0.34	58	50	32	30
0.35	75	68	58	55
VISIBLE				
0.35	75	68	58	55
0.40	92	90	88	85
0.45	93	91	90	87
0.50	93	92	91	88
0.55	92	91	88	86
0.60	91	89	85	83
0.65	90	87	83	81
0.70	89	86	82	80
0.75	84	81	78	<del>74</del>



I.R PROCHE ET MOYEN ET LOINTAIN				
0.75	84	81	78	74
0.85	77	73	64.5	62.5
0.95	77	73	64	62
1.05	77	73	64	62
1.15	77.5	73	64	62
1.25	78	74	65	63
1.35	80	76	68	66
1.45	81	78	70	69
1.5	83	80	74	72
1.52	85	82	77	74
1.65	84.5	83	78	76
1.75	84.5	83	78	76
1.85	84.5	83	78	76
1.95	84.5	83	78	76
2.00	84.5	83	78	76
2.10	84.5	83	78	76
2.20	81	81	78	73
2.30	82	82	76	74
2.40	83	82	77	75
3.00	32	26	19	16
3.50	32	26	19	16
4.00	32	26	19	16

4.50	32	26	19	19
5.00	32	26	19	16
5.40	19	17	15	14
↓	↓	↓	↓	↓
50.	19	17	15	14

Tableau II.2  
L'absorptance spectrale du verre

VISIBLE				
$\lambda [\mu]$	$e_1 = 3\text{mm}$	$e_2 = 4\text{mm}$	$e_3 = 6\text{mm}$	$e = 8\text{mm}$
0.40	0.067	0.072	0.075	0.080
0.45	0.065	0.066	0.071	0.072
0.50	0.054	0.056	0.059	0.06
0.55	0.053	0.056	0.059	0.06
0.60	0.057	0.062	0.07	0.071
0.65	0.064	0.072	0.086	0.087
0.70	0.070	0.081	0.106	0.107
0.75	0.08	0.096	0.130	0.131

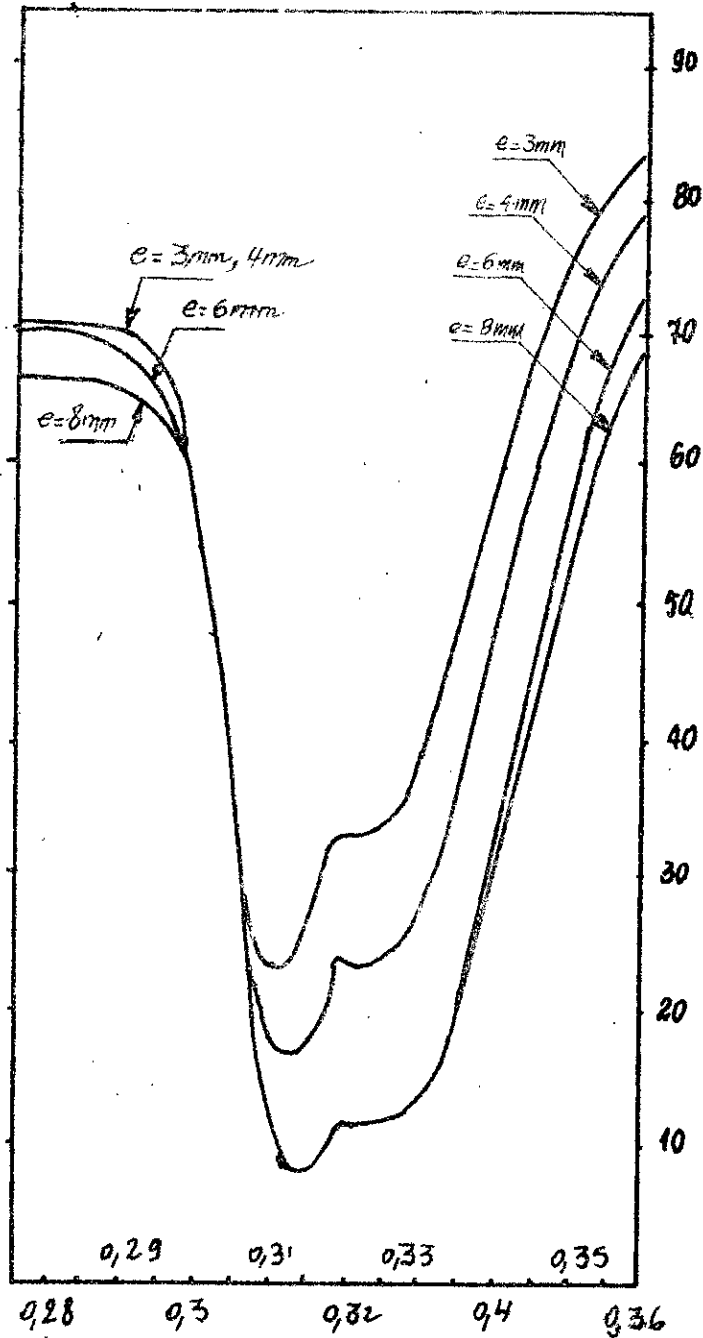
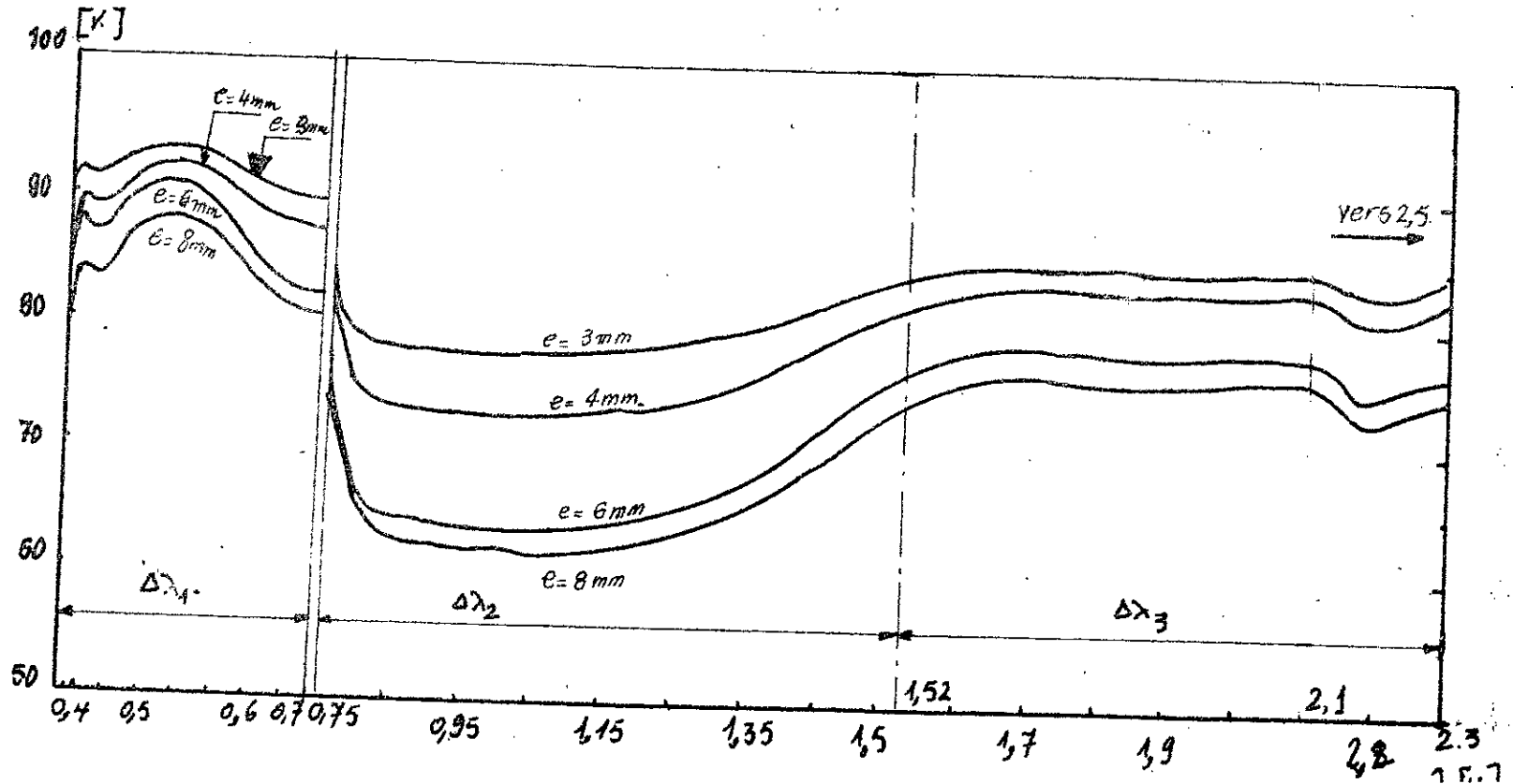


Fig. 3: La transmittance spectrale du verre dans l'ultra-violet.

fig 1.4 La transmittance spectrale du verre  
dans le Visible, IR [Proche-moyen]



21

fig I.5: La transmittance spectrale  
 du verre dans l'Infrarouge proche-moyen-lointain

22

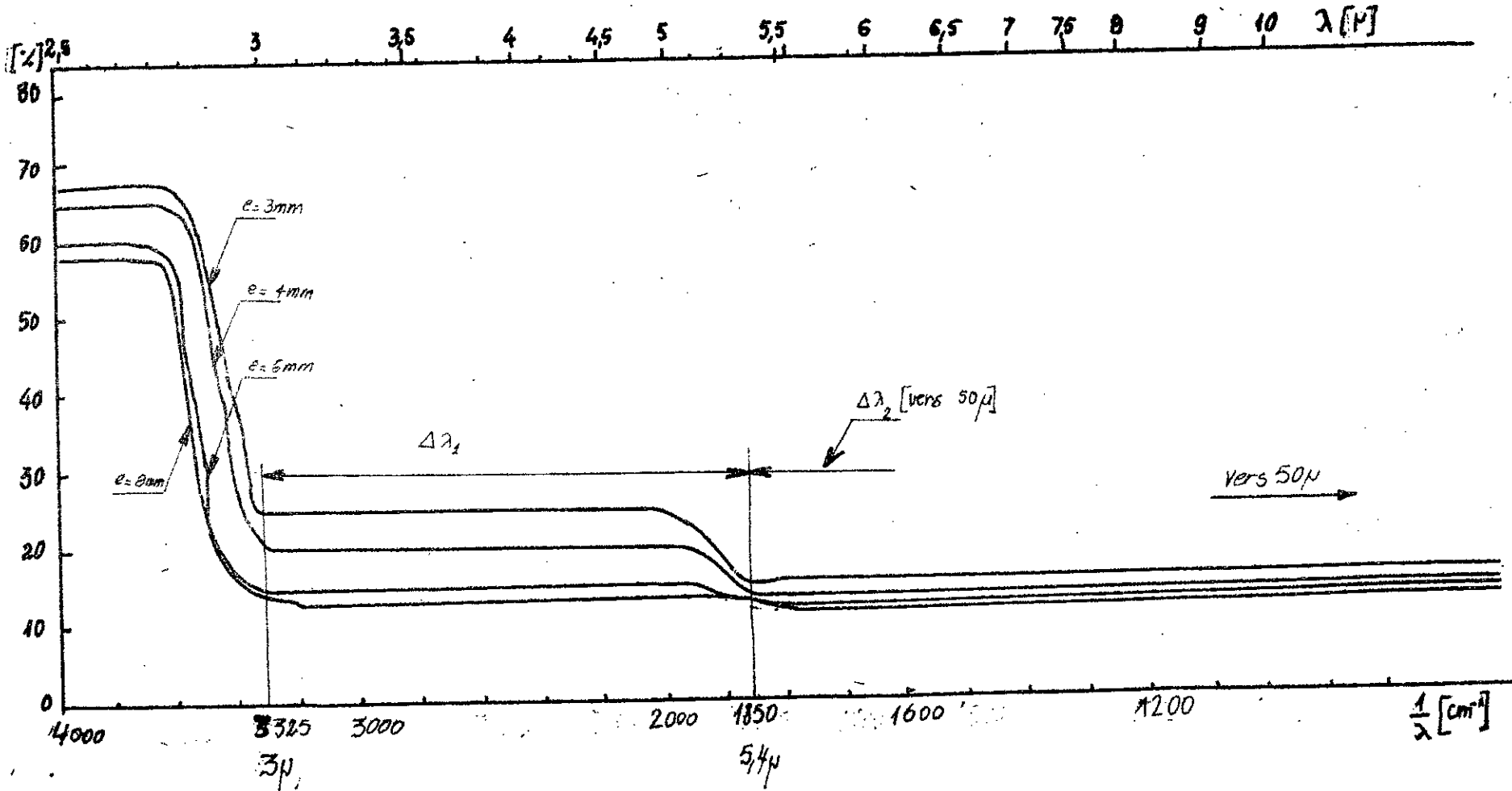


Tableau II.3  
La transmittance spectrale du plexiglass en [%]

ULTRA VIOLET		
$\lambda$ [ $\mu$ ]	$e_1 = 3\text{mm}$	$e_2 = 4\text{mm}$
0.20	72	54
0.21	72	54
0.22	72	54
0.23	72	54
0.25	72	46
0.27	72	46
0.29	55	36
0.30	23	18
0.32	23	17
0.33	23	26
0.34	23	41
0.35	47	62
VISIBLE		
0.35	47	62
0.40	95	87
0.45	95	88
0.50	96	89
0.55	96	89
0.60	96	90
0.65	96	90

0.70	96	89
0.75	89	92
I.R. Proche, moyen, lointain		
0.75	89	92
0.85	89	92
0.95	90	94
1.15	90	80
1.25	81	93
1.35	90	85
1.45	65	64
1.55	86	82
1.65	82	70
1.75	21	20
1.85	55	53
1.95	12.5	28
2.05	59	50
2.15	30	14
2.35	15	14
↓	↓	↓
50.	15	14

Tableau II.4  
L'absorbance spectrale du plexiglass

VISIBLE		
$\lambda [\mu]$	$e_1 = 3mm$	$e_2 = 4mm$
0.4	0.04	0.048
0.45	0.04	0.048
0.50	0.04	0.048
0.55	0.04	0.048
0.60	0.04	0.048
0.654	0.037	0.053
0.70	0.037	0.053
0.75	0.037	0.053

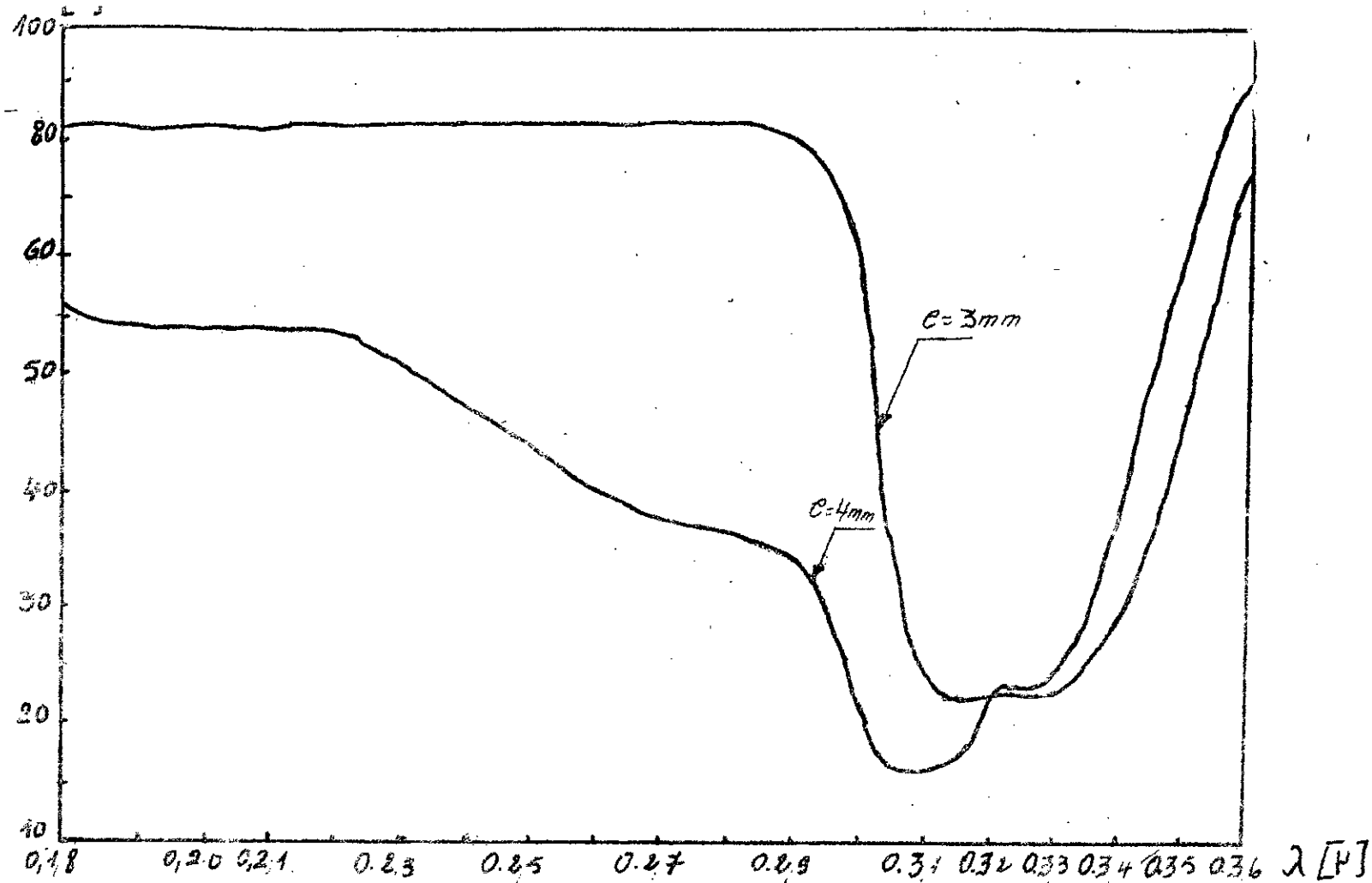
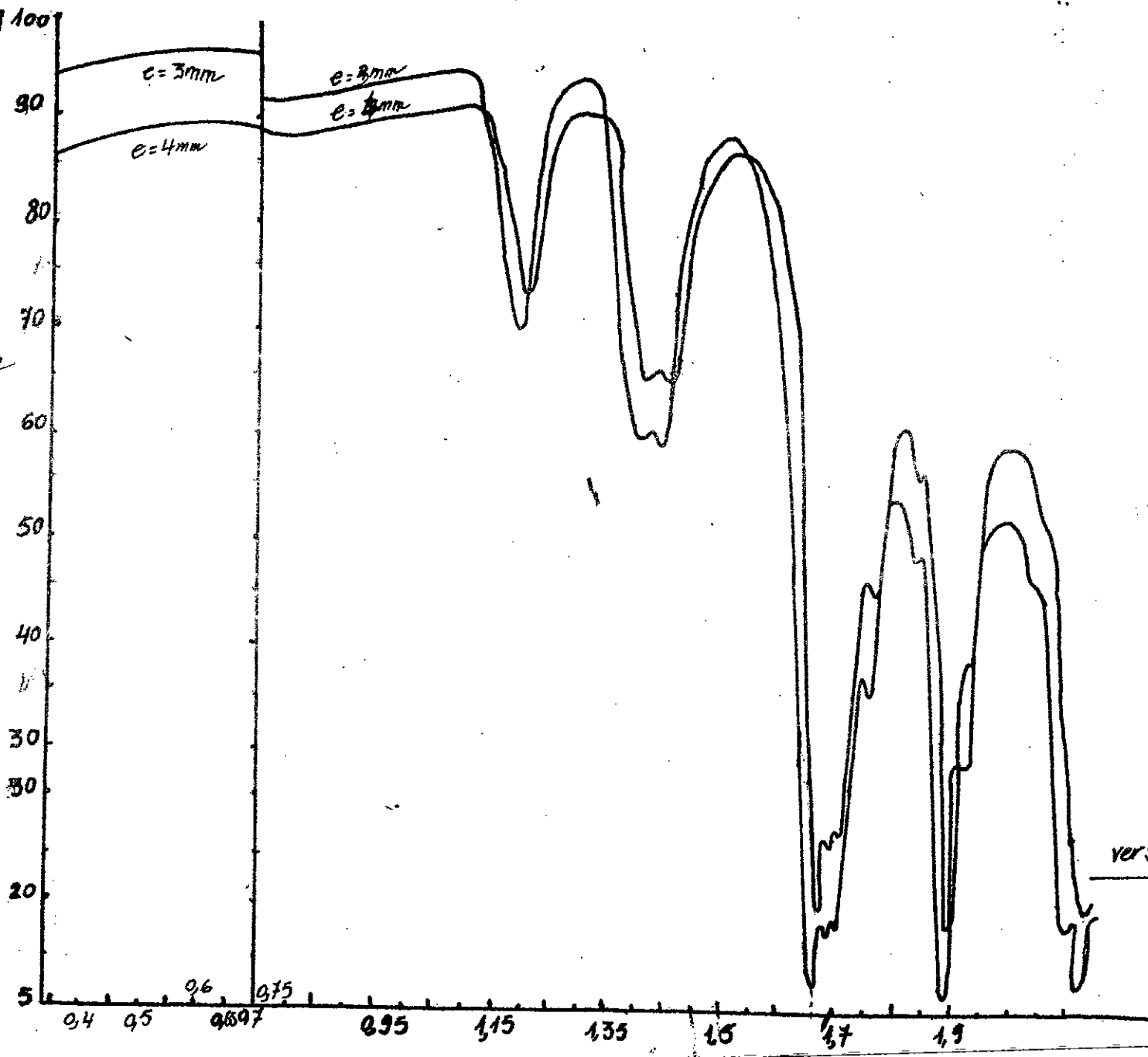


fig II.6 La. Transmittance spectrale du plexiglass  
dans l'ultra violet



fig II.7  
La transmittance  
spectrale du  
plexiglass  
dans le visible  
et l'Infrarouge  
proche et moyen



vers

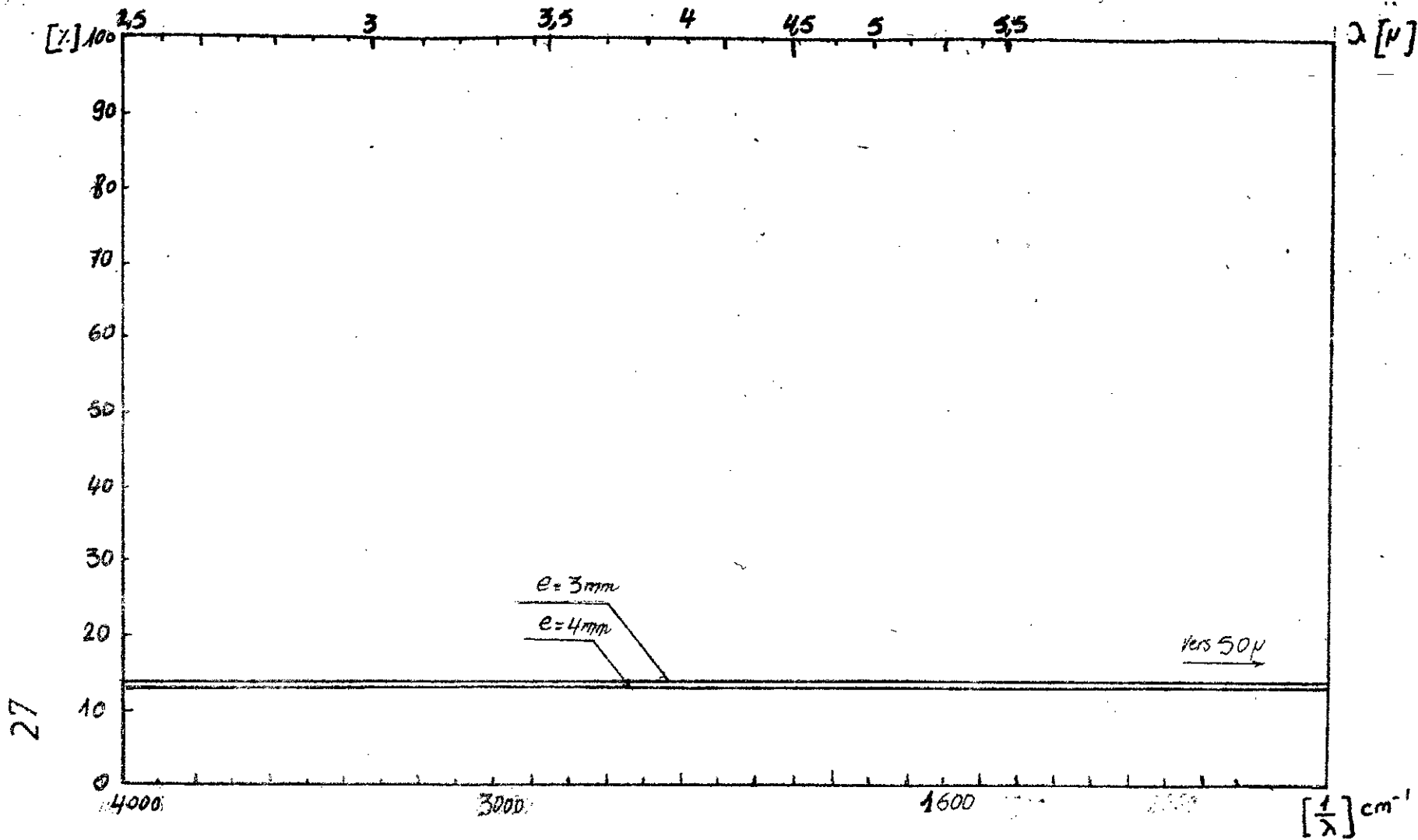


fig II.8 La transmittance spectrale du plexiglass dans  
l'Infrarouge moyen et lointain

### II.2.3 Notion de la fonction partielle:

Cette fonction représente une fraction de l'irradiation totale - entre les longueurs d'onde zéro et  $\lambda$ , elle peut nous servir à connaître les bandes intéressantes du soleil et du corps noir

Soit  $q(\lambda)$  le flux incident par unité de longueur de spectre. La localisation et la longueur de bande peuvent être spécifiées de façon équivalente par référence à la longueur d'onde  $\lambda$ .

La fonction partielle est définie par:

$$f_e(\lambda) = \frac{\int_0^{\lambda} q(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} q(\lambda) d\lambda} \quad (II.1)$$

La représentation graphique [fig II.9] de la fonction  $f_e(\lambda)$  pour l'énergie solaire filtrée par un modèle de l'atmosphère terrestre montre que 96% de l'énergie solaire se situent entre les longueurs d'ondes  $0,35\mu$  et  $2,33\mu$ .

d'où la bande intéressante du spectre d'émission du soleil

$$\Delta\lambda_s : 0,35 \text{ à } 2,33\mu$$

Pour le corps noir, la fonction partielle dépend de la Température. On a supposé qu'il est à la Température  $T = 80^\circ\text{C}$ .

La fonction partielle dans ce cas prend la forme suivante:

$$f_e(\lambda, T) = \frac{\int_0^\lambda \left[ \frac{dH_{CN}(\lambda, T)}{d\lambda} \right] d\lambda}{\int_0^\infty \left[ \frac{dH_{CN}(\lambda, T)}{d\lambda} \right] d\lambda} \quad (\text{II.2})$$

La valeur de  $f_e(\lambda, T)$  est donnée par la Table de Fraunhofer

$$f_e(\lambda, T) = Z(x)$$

$$\text{avec } x = \frac{\lambda}{\lambda_m}$$

$\lambda_m$ : La longueur d'onde correspondante au maximum d'émission.

Pour  $T = 80^\circ\text{C} = 353.15^\circ\text{K}$

$$\lambda_m = \frac{2898}{T} = \frac{2898}{353,15}$$

$$\lambda_m = 8.2 \mu$$

Les valeurs de  $Z(x)$  représentent l'aire de la courbe spectrale de rayonnement du corps noir

Tableau II.5.

Les valeurs de  $f_e(\lambda, 80^\circ\text{C})$  pour  $\lambda$  variant de  $2.5\mu$  à  $50\mu$

$\lambda [\mu]$	$X$	$f_e(\lambda, 80^\circ\text{C})$
2.5	0.30	$54.7 \cdot 10^{-6}$
2.6	0.32	$1.28 \cdot 10^{-4}$
2.73	0.33	$1.98 \cdot 10^{-4}$
2.85	0.34	$2.69 \cdot 10^{-4}$
2.94	0.35	$3.93 \cdot 10^{-4}$
3.00	0.36	$5.17 \cdot 10^{-4}$
3.22	0.39	$12.9 \cdot 10^{-4}$
3.33	0.40	$15.4 \cdot 10^{-4}$
3.45	0.42	$24.3 \cdot 10^{-4}$
3.57	0.43	$30.45 \cdot 10^{-4}$
3.70	0.45	$44.8 \cdot 10^{-4}$
3.84	0.46	$53 \cdot 10^{-4}$
4.17	0.52	$1.33 \cdot 10^{-2}$
4.34	0.53	$1.52 \cdot 10^{-2}$
4.50	0.54	$1.71 \cdot 10^{-2}$
5.00	0.61	$3.57 \cdot 10^{-2}$
5.26	0.64	$4.61 \cdot 10^{-2}$
5.40	0.65	$5.00 \cdot 10^{-2}$
5.50	0.67	$5.80 \cdot 10^{-2}$
6.25	0.76	$10.14 \cdot 10^{-2}$

7.14	0.87	$11.07 \cdot 10^{-2}$
10	1.22	$39.02 \cdot 10^{-2}$
12.5	1.52	$54.95 \cdot 10^{-2}$
16.7	2.00	$71.96 \cdot 10^{-2}$
20	2.43	$81.3 \cdot 10^{-2}$
25	3.05	$93.41 \cdot 10^{-2}$
33.34	4.00	$94.01 \cdot 10^{-2}$
50	6.10	$97.25 \cdot 10^{-2}$

d'après ce tableau, les longu  
d'ondes comprenant 97.2% du  
spectre intéressant se trouve  
entre  $3\mu$  et  $50\mu$ .

La bande intéressante :

$$\Delta\lambda_{CN} : 3\mu \text{ à } 50\mu$$

fig II.9 Fonction partielle pour le rayonnement solaire

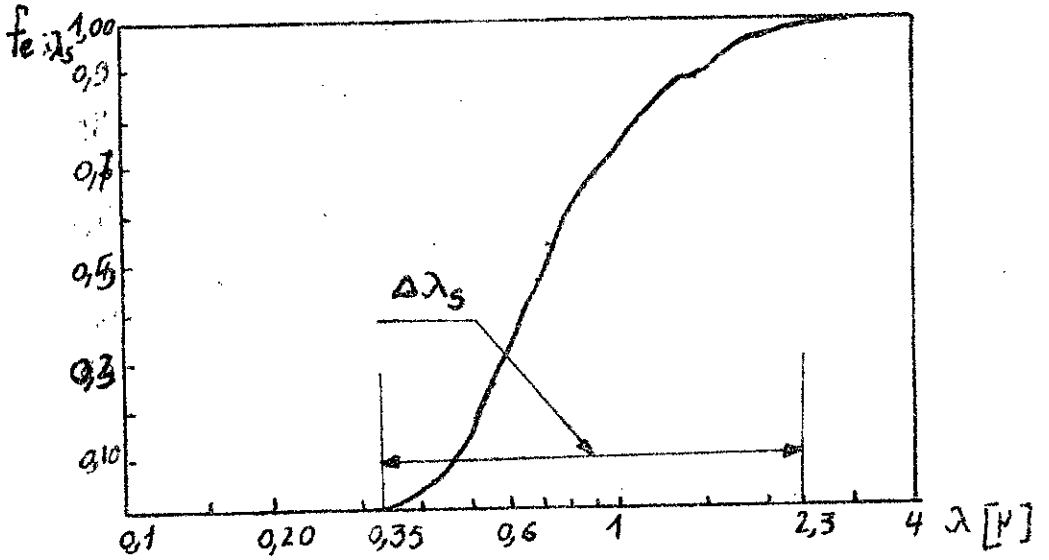
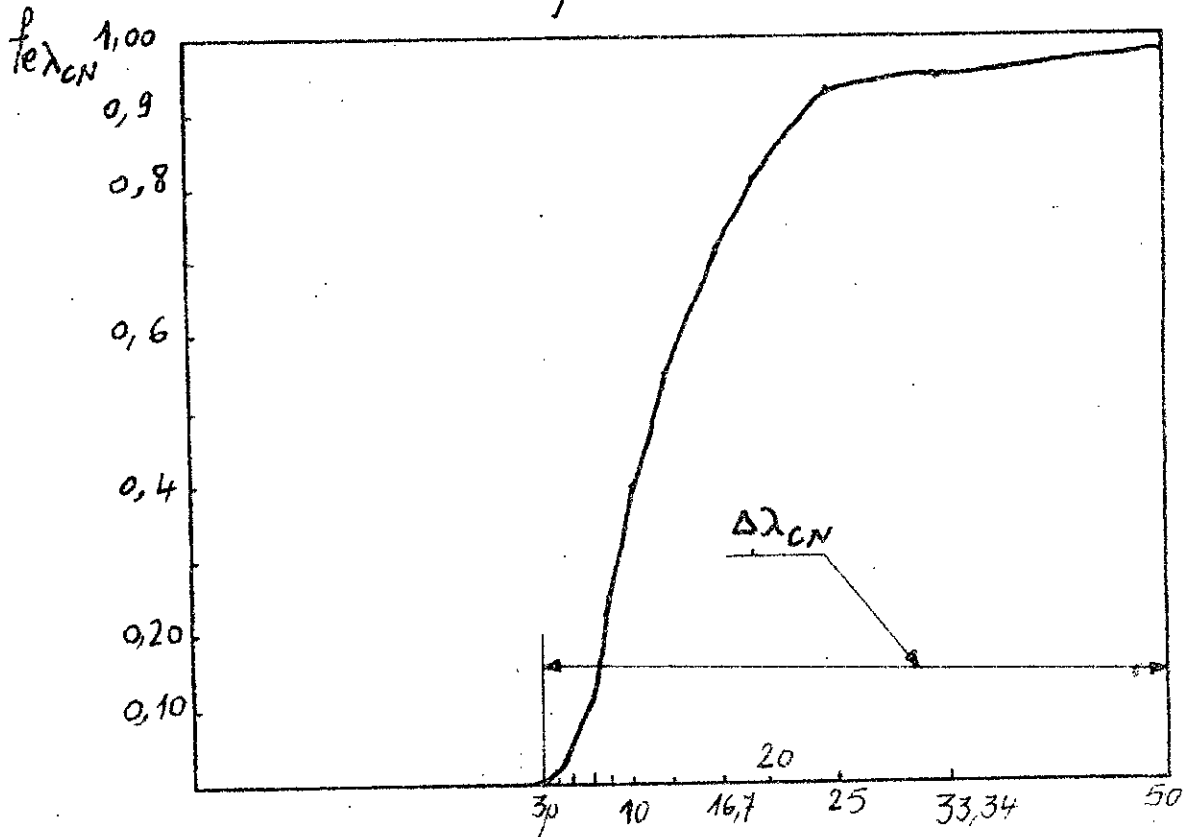


fig II.10 Fonction partielle pour le rayonnement du corps noir  $T=80^\circ\text{C}$



Mais vu, qu'on va utiliser dans notre étude des bandes de longueurs d'onde, je veux bien montrer que représentent les fractions  $f_{e\Delta\lambda_S}$  et  $f_{e\Delta\lambda_{CN}}$

avec  $\Delta\lambda_S$ : une bande prise du spectre du soleil

$\Delta\lambda_{CN}$ : une bande prise du spectre du corps

$$f_{e\Delta\lambda_S} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} q(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} q(\lambda) d\lambda} \quad \text{avec } \Delta\lambda_S: \lambda_1 \tilde{\lambda} \lambda_2$$

et

$$f_{e\Delta\lambda_{CN}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left[ \frac{dH_{CN}(\lambda, T)}{d\lambda} \right] d\lambda}{\int_0^{\infty} \frac{dH_{CN}(\lambda, T)}{d\lambda} d\lambda} \quad \text{avec } \Delta\lambda_{CN}: \lambda_1 \tilde{\lambda} \lambda_2$$

## II.2.4 Exploitation des résultats:

Comme on l'a déjà indiqué les bandes intéressantes du soleil et du corps noir, donc il est possible d'évaluer les facteurs de transmission de différents échantillons dans ces deux bandes.

Nous commençons notre étude par le verre; On remarque d'après la figure (II.4) que la transmittance spectrale varie lentement, c'est pour cela qu'on a divisé cet intervalle aux trois bandes:  $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2, \Delta\lambda_3$  [voir fig II.4]

dans le Tableau ci-dessus figurent les facteurs de transmission moyens correspondant aux bandes:

$$\Delta\lambda_1 : 0.35\mu \text{ à } 0.7\mu$$

$$\Delta\lambda_2 : 0.75\mu \text{ à } 1.52\mu$$

$$\Delta\lambda_3 : 1.52\mu \text{ à } 2.3\mu$$

tableau II.6

Les valeurs moyennes des facteurs de transmission dans la bande  $\Delta\lambda_3$ .

échantillons	$e_1 = 3\text{mm}$	$e_2 = 4\text{mm}$	$e_3 = 6\text{mm}$	$e_4 = 8\text{mm}$
valeurs moyennes	$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_4$
$\Delta\lambda_1$	0.89	0.86	0.83	0.80
$\Delta\lambda_2$	0.80	0.76	0.69	0.67
$\Delta\lambda_3$	0.83	0.82	0.77	0.75



Les facteurs de transmission  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$  sont calculés à partir des valeurs expérimentales du tableau II.1.

Donc pour calculer la fraction transmise par les différentes épaisseurs, on doit apparaitre les fractions solaires correspondantes aux bandes  $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2, \Delta\lambda_3$  [on les désigne par  $f_e(\Delta\lambda_1), f_e(\Delta\lambda_2)$  et  $f_e(\Delta\lambda_3)$

d'où la fraction transmise par une épaisseur est :

$$\tau_{m_i s} = \tau_{i, \Delta\lambda_1} f_e(\Delta\lambda_1) + \tau_{i, \Delta\lambda_2} f_e(\Delta\lambda_2) + \tau_{i, \Delta\lambda_3} f_e(\Delta\lambda_3) \quad (II.3)$$

$$i = 1, 2, 3$$

D'après la fig(II.9) on a :

$$f_e(\Delta\lambda_1) = 0.45$$

$$f_e(\Delta\lambda_2) = 0.49$$

$$f_e(\Delta\lambda_3) = 0.02$$

appliquons l'expressions (II.3), pour chaque épaisseur, le tableau suivant montre les valeurs des  $\tau_{m_i s}$  : [Tableau II.7]  
l'indice "s" [pour le spectre solaire]

Tableau II.7

La fraction transmise par les différentes épaisseurs dans la bande  $\Delta\lambda_s$

échantillon	$e_1 = 3\text{mm}$	$e_2 = 4\text{mm}$	$e_3 = 6\text{mm}$	$e_4 = 8\text{mm}$
$\tau_{\Delta\lambda_s}$	0.81	0.776	0.727	0.703

On fait le même pour le corps, mais dans ce cas la figure II.5 montre l'existence de deux bandes où les facteurs de transmission spectraux restent constants. [voir figure II.5]

Pour cela, on a divisé la bande intéressante  $\Delta\lambda_{CN}$  en deux bandes  $\Delta\lambda_{1CN}$  et  $\Delta\lambda_{2CN}$ :

$$\Delta\lambda_{1CN} : 3\mu \text{ à } 5.4\mu$$

$$\Delta\lambda_{2CN} : 5.4\mu \text{ à } 50\mu$$

Les valeurs moyennes des facteurs de transmission correspondantes aux bandes  $\Delta\lambda_{1CN}$  et  $\Delta\lambda_{2CN}$  sont calculées à partir du tableau II.1

échantillon	$e_1 = 3\text{mm}$	$e_2 = 4\text{mm}$	$e_3 = 6\text{mm}$	$e_4 = 8\text{mm}$
valeur moyenne	$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_4$
$\Delta\lambda_{1CN}$	0.32	0.26	0.19	0.16
$\Delta\lambda_{2CN}$	0.19	0.17	0.15	0.14

Tableau II.8

Les facteurs de transmission moyens

La fraction transmise par une épaisseur dans ce cas est

$$\bar{\tau}_{m_{iCN}} = \bar{\tau}_{i, \Delta\lambda_{1CN}} f_e(\Delta\lambda_{1CN}, 80^\circ\text{C}) + \bar{\tau}_{i, \Delta\lambda_{2CN}} f_e(\Delta\lambda_{2CN}, 80^\circ\text{C}) \quad (\text{II.4})$$

$i = 1, 2, 3, 4$

Les  $\bar{\tau}_{i, \Delta\lambda_{1,2,3}}$  sont les facteurs de transmission moyens figurés sur le Tableau (II.8).

Les fractions  $f_e(\Delta\lambda_{jCN}, 80^\circ\text{C})$  ;  $j = 1, 2, 3$  sont données par le Tableau II.5 :

$$f_e(\Delta\lambda_{1CN}, 80^\circ\text{C}) = 0.0495 = 0.05$$

$$f_e(\Delta\lambda_{2CN}, 80^\circ\text{C}) = 92.25 = 0.922$$

D'après (II.4), on peut calculer les  $\bar{\tau}_{m_{iCN}}$ .  
Le tableau ci-dessous montre ces valeurs :

Tableau II.9

La fraction transmise par les différentes épaisseurs dans la bande  $\Delta\lambda_{CN}$

échantillon	$e_1 = 3\text{mm}$	$e_2 = 4\text{mm}$	$e_3 = 6\text{mm}$	$e_4 = 8\text{mm}$
$\bar{\tau}_{m_{iCN}}$	0.191	0.169	0.148	0.137

Passons maintenant au bilan énergétique au niveau de chaque épaisseur, mais uniquement on s'intéresse qu'aux échanges radiatifs.

D'après la figure (II.11), la fraction piégée par chaque épaisseur est donnée par :

$$\tau_{m,ls} (1 - \tau_{m,lcN}) \quad \text{II.5}$$

Les valeurs de ce produit sont représentées dans le tableau ci-dessous :

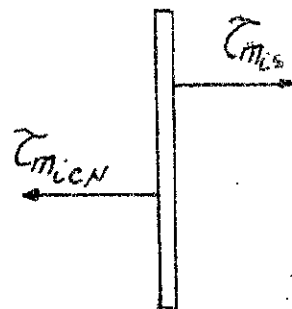


Tableau II.10

La fraction piégée par les différents échantillons

fig(II.11)

échantillon	$e_1 = 3\text{mm}$	$e_2 = 4\text{mm}$	$e_3 = 6\text{mm}$	$e_4 = 8\text{mm}$
fraction Piégée	0.655	0.644	0.619	0.606

Le tableau montre bien la variation de l'énergie piégée en fonction de l'épaisseur, mais cette variation ne nous permet pas de faire un choix définitif. Le choix d'une épaisseur optimale se fait après une représentation graphique.

de l'expression (II.5) en fonction de l'épaisseur, dans le but de voir où se situe son maximum.

Mais on peut faire apparaître les deux courbes de  $\tau_{mic}$  et  $(1 - \tau_{mic})$  indépendamment, et notre optimum [épaisseur] sera le point correspondant à leur intersection.

Tableau II.11

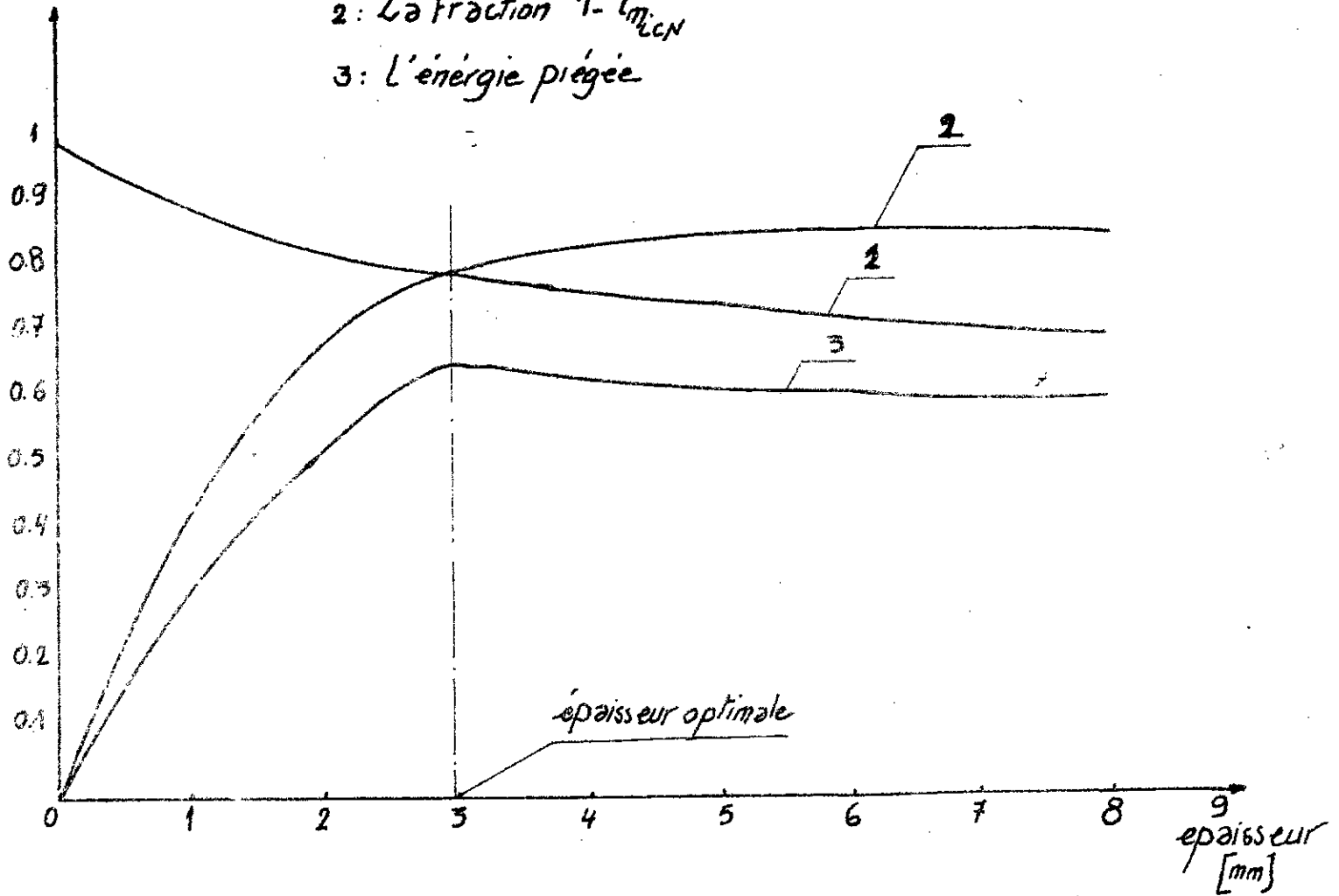
Les valeurs de  $\tau_{mic}$  et  $1 - \tau_{mic}$

échantillon	$e_1 = 3mm$	$e_2 = 4mm$	$e_3 = 6mm$	$e_4 = 8mm$
$\tau_{mic}$	0.81	0.776	0.727	0.703
$1 - \tau_{mic}$	0.809	0.831	0.852	0.863

Pour la représentation de  $\tau_{mic}$  et  $(1 - \tau_{mic})$  en fonction de l'épaisseur, on a fait intervenir mêmes des valeurs qui sont inférieures à 3 mm.

fig I.12

- 1: La fraction transmise  $\tau_{mis}$
- 2: La fraction  $1 - \tau_{micN}$
- 3: L'énergie piégée



Conclusion :

Comme le montre la figure II.12, l'optimum est proche de 3mm, par conséquent notre piège optimal sera une épaisseur de 3mm.

La fraction piégée par ce piège optimal est de 0.655 de la fraction transmise  $\tau_{m,s}$  de l'irradiation totale du soleil qui atteint le sol.

Ce qui concerne le plexiglass les deux épaisseurs ont des facteurs de transmission moyens dans le visible :

pour l'épaisseur : 3mm  $\tau = 0.895$

pour l'épaisseur : 4mm  $\tau = 0.866$

Mais il convient de noter un point très important, c'est l'existence d'un certain nombre d'intervalles, c'est à dire des bandes spectrales à l'intérieur desquelles la transmission est faible.

Ces intervalles sont situées aux longueurs d'ondes

$1.35\mu$  à  $1.55\mu$ ,  $1.65\mu$  à  $1.85\mu$ ,  $1.85\mu$  à  $2.05\mu$  [fig 4.7]

Ces différentes bandes sont situées dans le domaine spectral du soleil [ $\Delta\lambda_s$ ], c'est pour cela la fraction transmise sera affaiblie par l'existence de ces derniers.

Nota: Ce choix a été fait sans rendre compte des caractéristiques physiques, thermiques, généralement lorsqu'il s'agit de définir un système optique, la détermination des paramètres optiques des milieux est un critère de choix.

Un critère important dans le choix du matériau est son coût et sa facilité d'approvisionnement.

Les propriétés thermiques prennent une grande importance dans notre cas parce que le matériau qu'on a choisi entre dans la constitution d'éléments soumis à des variations importantes de températures.

Les paramètres concernés sont généralement:

- . la conductivité thermique
- . la dilatation
- . la température de fusion

cette dernière est d'une grande importance pour définir les domaines de températures d'utilisation des matériaux.



### II.2.5 Effet de serre renforcé:

Dans ce dispositif, c'est la face interne de la couverture à quel ques centimetre de l'absorbteur qui a été réfléchissante au rayonnement infra-rouge.

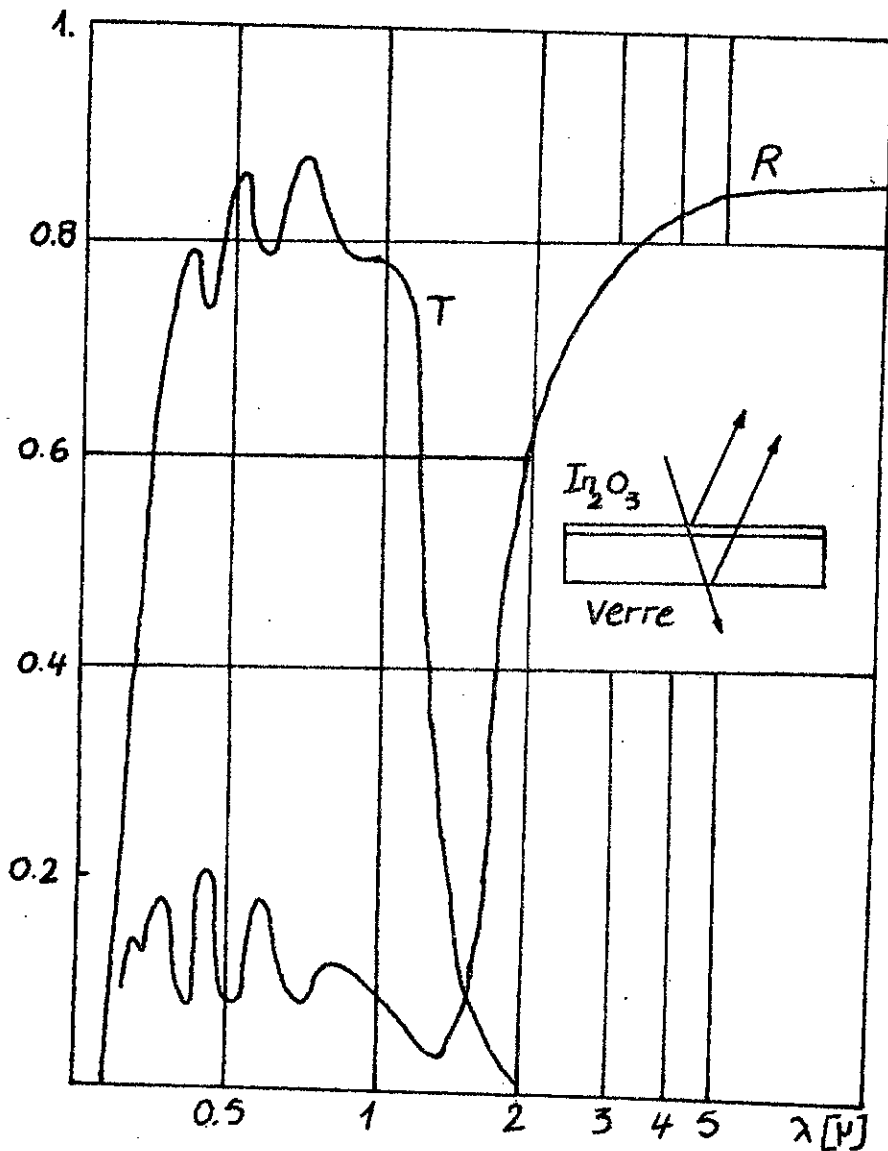
Certains oxydes métalliques déposés en film mince remplissent ces conditions; l'oxyde d'indium ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) comme montre la figure (II.13), est à retenir plus spécialement.

On peut réduire la réflexion vitreuse par des antireflets. Sur ces parois en verre, ce sont généralement des solutions à base d'acide fluorhydrique qui sont utilisées. Ce revêtement antireflet, dans sa forme la plus simple est une couche d'épaisseur  $\delta = \frac{\lambda}{4n}$  d'un matériau dont l'indice<sup>m</sup> de réfraction est faible. Le rayonnement réfléchi par la surface de séparation verre-revêtement est en opposition de phase avec le rayonnement de l'interface revêtement-air et les ondes s'annulent. Mais deux problèmes rendent le revêtement à couche unique assez inefficace.

D'abord un revêtement possédant la faible valeur de  $n$  nécessaire n'existe pas et d'autre part, un rayonnement de longueur d'onde légèrement plus courte sera renforcé plutôt qu'atténué.

En conséquence, on utilise une autre paire de couches pour obtenir l'annulation des longueurs d'onde renforcées et d'autre couche permettent l'annulation des réflexions sur une bonne largeur du spectre. Les revêtements antireflexions efficaces sur une largeur suffisante du spectre comportent environ huit couches.

Nota: Tous ces réducteurs de pertes par rayonnement perdent leur efficacité lorsque la température de l'absorbteur dépasse  $500^{\circ}\text{C}$



reflectivité  
et  
transmittivité  
d'une  
couche de  
 $\text{In}_2\text{O}_3$   
déposée sur  
verre

fig II.13

### II.2.6 L'Effet de l'addition de multiples vitrages:

Si l'on envisage l'utilisation d'un simple vitrage on introduit une perte par réflexion  $r$  et la perte va augmenter sur le vitrage est multiple.

A l'aide de ce dispositif, on peut piéger de l'infrarouge comme montre la fig II.4

Comme le verre ordinaire très répandu et bon marché, est caractérisé

par un indice de réfraction

$$n = 1.5$$

Le pouvoir réflecteur d'une surface de séparation plane lisse entre et un matériau est, pour l'incidence normale

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

$n$ : indice de réfraction

$k$ : indice d'absorption

La transmittance  $t$  pour une longueur d'onde est donnée par

$$t = e^{-\frac{4\pi k s}{\lambda}}$$

$s$ : l'épaisseur

souvent la valeur globale de  $\frac{k}{\lambda}$  pour le spectre

solaire pour une vitre de commerce  $\frac{k}{\lambda} = 1.3 \cdot 10^{-6} \mu\text{m}^{-1}$

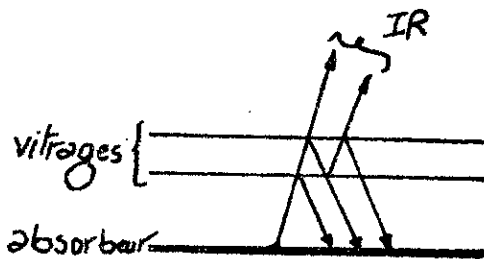


fig II.14

donc pour une épaisseur de 3mm, on obtient  $t = 0,952$ .  
La réflectance et la transmittance du vitrage s'expriment

$$\rho = r + \frac{r(1-r^2)t^2}{1-r^2t^2}$$

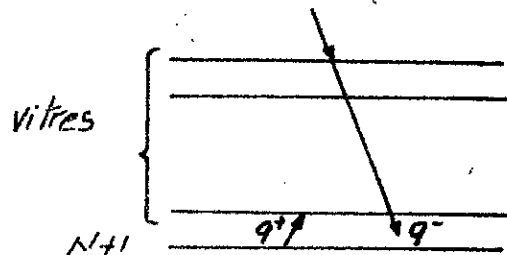
$$\tau = \frac{(1-r)^2t}{1-r^2t^2}$$

d'où  $\tau = 0.879$  et  $\rho = 0.735$

donc on peut calculer facilement la réflectance et la transmittance d'un système de vitrage multiple

Soit un système de  $N$  vitres auquel on ajoute une vitre supplémentaire [fig II.15]

L'ensemble de  $N$  vitres a une réflectance totale  $\rho_N$  et une transmittance  $\tau_N$ .



Soit un flux solaire unité

incident sur l'ensemble des vitres

alors le flux émergent  $q^-$  à la sortie est:

$$q^- = \tau_N + q^+ \rho_N$$

où le flux réfléchi  $q^+$  est simplement  $q^+ = \rho q^-$

ce qui donne  $q^- = \frac{\tau_N}{1 - \rho_N}$  et  $q^+ = \frac{\rho \tau_N}{1 - \rho_N}$

Le flux transmis à travers la vitre additionnelle est  $\tau q^-$  et ce flux incident est égal à l'unité, est la nouvelle

Transmittance du système

$$\tau_{N+1} = \frac{\tau \tau_N}{1 - \rho \rho_N}$$

La nouvelle réflectance du système  $\rho_{N+1}$  est égale à l'ancienne plus le flux réfléchi vers le haut  $\tau_N \rho^*$

$$\rho_{N+1} = \rho + \frac{\rho \tau_N^2}{1 - \rho \rho_N}$$

On commence par établir les valeurs de  $\rho_1 = \rho$  et  $\tau_1 = \tau$  pour un simple vitrage et l'on obtient  $\rho_2$  et  $\tau_2$  puis  $\rho_3$  et  $\tau_3$

Tableau II.12

La réflectance et transmittance du système

Nombre de vitrages	Verre ordinaire épaisseur 3mm	
	Réflectance du système	Transmittance du système
0	0.0000	1.000
1	0.0735	0.879
2	0.1306	0.777
3	0.1754	0.689
4	0.2101	0.614
5	0.2389	0.490

Ce tableau montre clairement l'avantage d'utiliser des verres faiblement réfléchissants et absorbants quand un vitrage multiple est désirable.

Car si on dépasse deux vitrages, la transmittance dans le spectre solaire diminue et la réflectance augmente.

### II.3 Les structures cellulaires antirayonnantes:

#### II.3.1: Introduction: [fig II.16]

Ce système découvert par G. Francia en 1960 comporte une structure en nids d'abeilles à parois disposées perpendiculairement à l'absorbteur. Elles sont opaques aux rayonnements infrarouge et transparentes ou réfléchissantes aux rayons solaires.

Les radiations infrarouges sont bloquées par les parois qui émettent en direction de l'absorbteur, vers les parois en regard et en fin vers l'ouverture des cellules.

On démontre ainsi que l'émission infrarouge au lieu de s'effectuer dans un angle solide important ( $2\pi$ ), se fait uniquement dans un petit cône dont les dimensions sont définies par la hauteur relative d'un tube constituant la structure. Le nid d'abeille peut être réalisé à l'aide de film plastique ou de parois en verre miroir à fin d'éviter des déperditions thermiques par conduction trop importante.

Le matériau de choix pour la réalisation de structures cellulaires doit répondre à un certain

nombre de critères :

- Résister à la température maximum de fonctionnement

- Être absorbant pour les radiations Infrarouge rayonnées par la base

- Être transparent pour le domaine  $\Delta\lambda_s$  du spectre solaire.

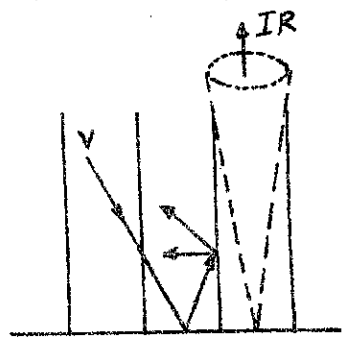


fig II.16

IV.3.2 Étude expérimentale :

Cette étude a été faite sur une structure composée de 9 tubes de verre, dont chacun a comme dimensions

18 cm de hauteur

8 mm de diamètre

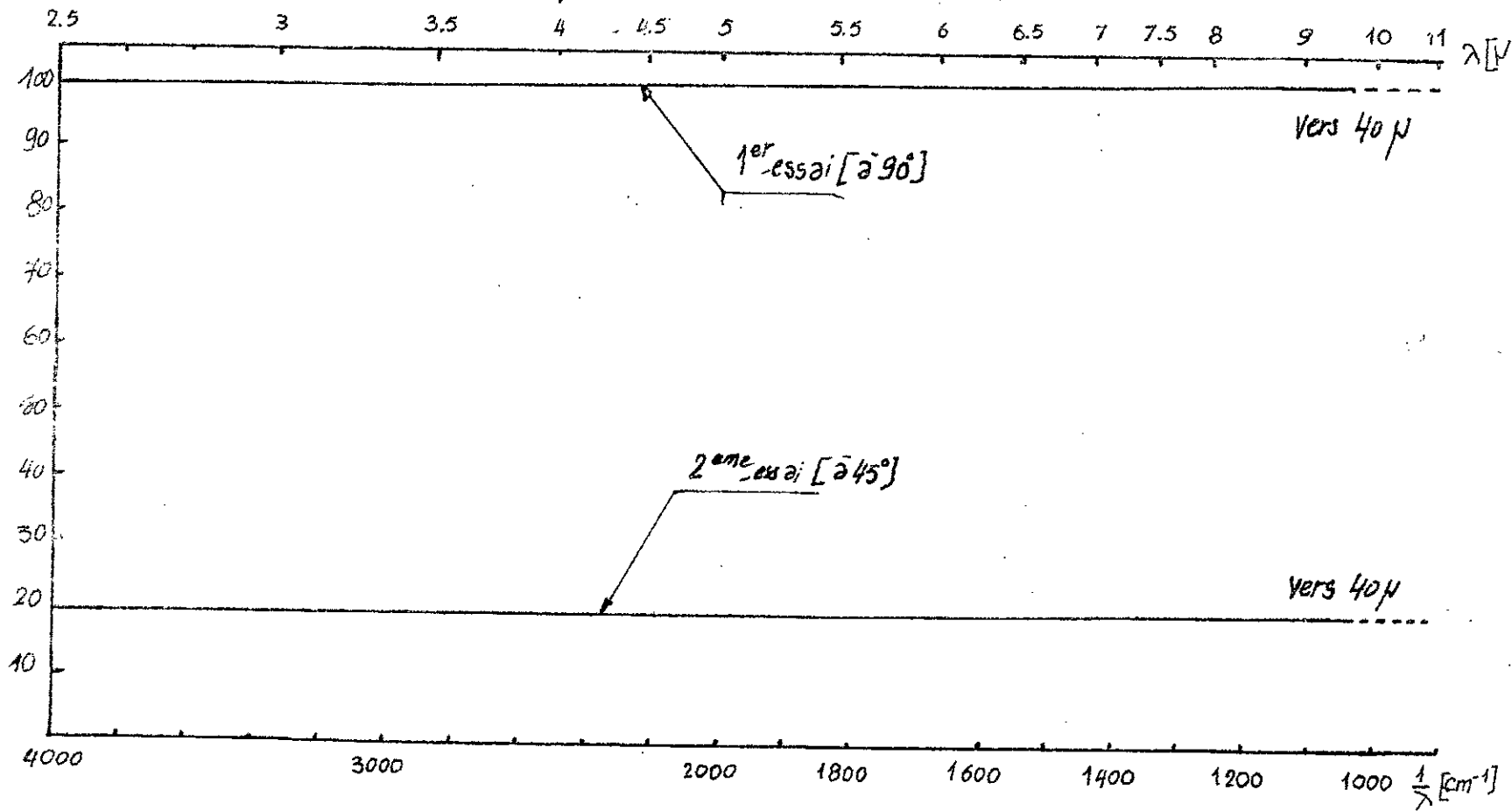
1 mm d'épaisseur

Cette structure a été attaquée par un monochromatique dans l'ultraviolet, le visible et l'infrarouge,

en utilisant les mêmes équipements indiqués auparavant.

1<sup>er</sup> essai : Le rayon lumineux traverse la cellule sous une incidence normale, on constate qu'il n'y a pas de changement, c'est à dire 100% de transmission [dans le UV-visible-IR]

fig. II.17 La Transmittance spectrale d'une structure cellulaire  
composée de tubes. [Dans l'infrarouge]





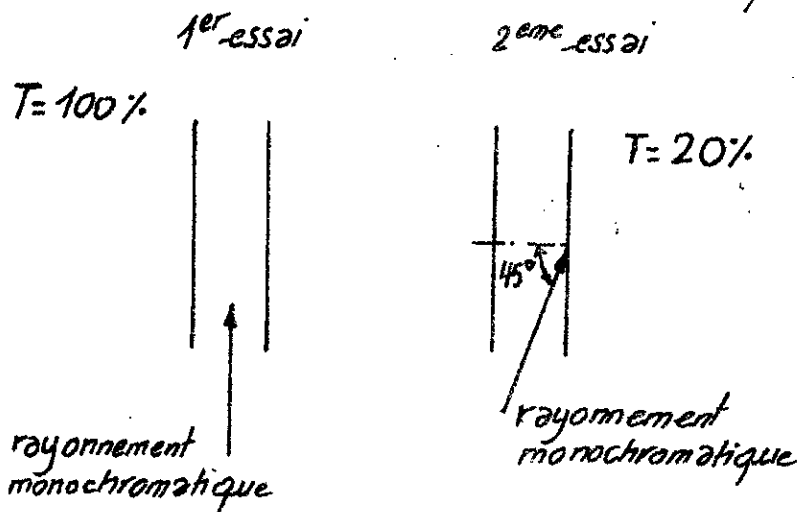
2<sup>ème</sup> essai : Le rayon lumineux frappe la paroi de la cellule sous un angle de  $45^\circ$ , on constate que la transmission est de 20% en moyenne sur toute la bande de l'I.R.

Conclusion :

avec une telle structure on peut piéger :

$$0.96 (1 - 0.2) 0.972 = 0.746$$

Cette fraction montre bien l'intérêt de ces dispositifs.



## II. 4 Pertes par convection

### III. 4.1 Convection sous un vitrage :

Le transfert de chaleur par conduction dans l'air entre un absorbeur et un vitrage distants de  $L$  est

$$q = \frac{k}{L} (T_1 - T_2) \quad (\text{II.6})$$

$k$  : la conductivité thermique

$T_1$  : Température de l'air

$T_2$  : Température de l'air

L'examen de cette équation suggère deux solutions possibles pour réduire la conduction :

1) réduire  $k$

2) ou augmenter  $L$

Pour réduire  $k$ , il faut remplacer l'air par un autre gaz par exemple le dioxyde de carbone, ou utiliser un vide poussé. Il s'embles simple par comparaison d'augmenter  $L$  mais des essais et une théorie plus avancée montre que l'augmentation n'apporte pas la réduction donnée par la forme simple de l'équation (II.6). La raison en est le mouvement de convection entre la couche d'air tiède à proximité de l'absorbteur et la couche d'air frais sous le vitrage froid, ce mouvement de l'air augmente la pente de gradient de température au-dessus de la valeur  $\frac{T_1 - T_2}{L}$  qui apparaît dans l'équation (II.6). La présence de la convection naturelle oblige donc à modifier cette équation en la multipliant par un facteur supérieur ou égal à un.

$$q = Nu \left[ \frac{k}{L} (T_1 - T_2) \right] \quad (\text{II.7})$$

Ce facteur est le nombre de Nusselt, fonction du nombre de Grashof ( $Gr$ ) et du nombre de Prandtl.

Le produit de  $(Pr)$  et  $(Gr)$  est le nombre de Raleigh  
 Le nombre de Raleigh est donné par

$$Ra = \frac{g \left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right) L^3}{\alpha \nu}$$

avec  $g$ : l'accélération de pesanteur  
 $\frac{\Delta \rho}{\rho}$ : est le rapport de la différence  
 de densité [densités de l'air chaud  
 et froid]  
 à la densité moyenne.  
 $\alpha$ : la diffusivité thermique  
 $\nu$ : la viscosité cinématique

L'expérience montre que le nombre de Nusselt  
 croît rapidement comme  $Ra^{1/4}$ . Cette dernière variation  
 reportée dans l'équation (II.7) montre que la valeur  
 de  $q$  diminue comme  $L^{-1/4}$  quand  $L$  augmente.

On peut donc tirer davantage de l'accroissement  
 de  $L$ , mais pas autant que ne le permettrait l'équation  
 (II.6)

Il existe des réducteurs utilisés pour abaisser ces  
 pertes par convection naturelle:

- Paroi réductrice de mouvement:
- Structure alvéolaire anti-convective

#### 4.5 Pertes arrière:

L'isolation joue un rôle capital dans la réalisation de la cellule du capteur. Elle est généralement constituée par 5 à 10 cm de laine de verre placée derrière l'absorbeur.

On peut constituer une barrière de chaleur de faible poids et peu coûteuse avec une ou plusieurs lames d'air entre des feuilles de métal sous l'absorbeur.

### III. APPLICATIONS POUR LA PRODUCTION D'EAU CHAUDE SANITAIRE

#### III.1 Chauffe-eau avec ou sans échangeur de chaleur:

Le chauffe-eau solaire le plus simple [fig IV.1] se compose d'un capteur plan et d'un ballon de stockage dans lequel circule la même eau. C'est la solution la plus économique, mais c'est aussi celle qui présente le plus d'inconvénients.

Pour éliminer les risques de détérioration de l'isolateur, il est préférable de recourir au chauffe-eau comportant un circuit primaire avec échangeur de chaleur [fig IV.2]

Dans ce cas le liquide caloporteur du circuit primaire, qui n'est pas renouvelé et qui n'entre pas en contact avec l'eau sanitaire est généralement composé d'eau et d'antigel.

Dans les chauffe-eau, avec ou sans échangeur de chaleur la circulation du liquide caloporteur est assurée par le phénomène du thermosiphon [fig IV.3]

La circulation ne se fera bien que si le réservoir accumulateur est situé au-dessus du capteur. La hauteur  $h$  séparant la partie supérieure du capteur de la base de l'échangeur ou du niveau de sortie du réservoir doit être d'au moins de 60cm pour que le rendement obtenu soit le meilleur possible. Les pertes de charge ou les résistances qui freinent le passage de l'eau dans le circuit et la puissance hydromotrice de fonctionnement du thermosiphon sont des caractéristiques

intrinsèques de l'installation. La charge dépend de deux facteurs : 1° de la différence de température entre la sortie de l'isolateur ( $T_1$ ) et la sortie du réservoir ( $T_2$ ) 2° de la hauteur  $h$ . plus la différence de température est grande entre  $T_1$  et  $T_2$ , plus la circulation se fera aisément.

Dans la pratique, on estime qu'il faut une surface d'échange thermique de  $\frac{1}{3} m^2$  pour  $1 m^2$  de capteur [pour les échangeurs de forme spirale].

Un autre type d'échangeur est composé d'un cylindre de 40 cm de diamètre où le liquide caloporteur circule entre des parois espacées de 5 mm.

Principe du chauffe-eau solaire fonctionnant par thermosiphon.

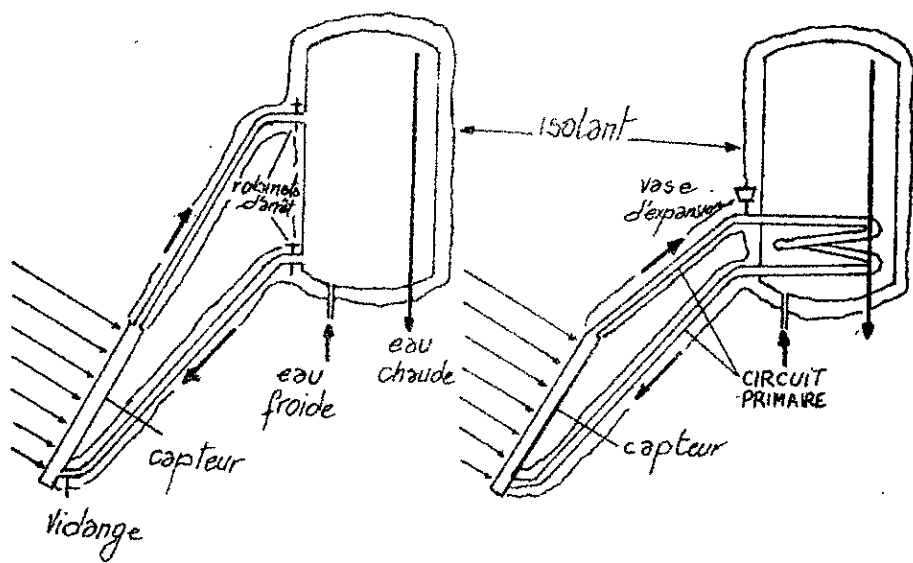


Fig. 1.1 chauffage direct de l'eau sanitaire

Fig. 1.2 chauffage par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur

Rendement moyen du chauffage par thermosiphon  
ou circulation naturelle en fonction de la hauteur  
de la cuve de stockage

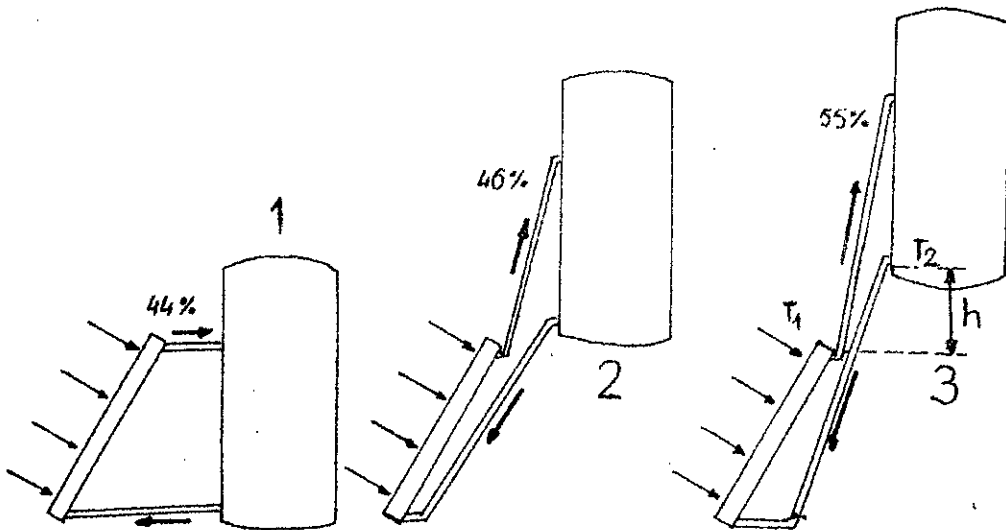


fig II.3

## II.2 Petites installations d'eau chaude sanitaire:

La figure (II.4) montre une installation d'eau chaude sanitaire de taille réduite, comportant un réservoir d'accumulation pour le capteur solaire et un ballon d'eau chaude avec résistance électrique.

Ce type d'installation permet une consommation d'eau chaude de 150 à 200 litres/jour. En rayonnement solaire idéal, l'installation pourra produire suffisamment d'eau chaude sanitaire. En période de rayonnement réduit, le rendement du capteur

solaire ne suffira pas de maintenir la Température de consigne [La Température de L'eau chaude sanitaire désirée] et celle-ci sera donc réchauffée dans La partie supérieure du ballon par La résistance électrique incorporée.

Cette résistance est commandée par un thermostat du type KP lequel peut être commandé par un abaissement périodique de La température.

La figure (III.5) représente une installation de production de L'eau chaude sanitaire par L'énergie couplée couplée au système traditionnel de chauffage central.

En période de rayonnement solaire insuffisant au maintien de température de consigne dans le réservoir d'accumulation, l'eau sanitaire du ballon d'eau chaude est réchauffée par la chaudière.

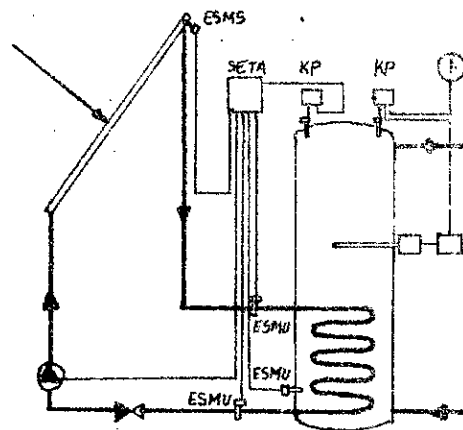


fig III. 4 Installation d'eau chaude sanitaire de taille réduite avec réservoir d'accumulation pour le circuit solaire équipée d'une résistance électrique.



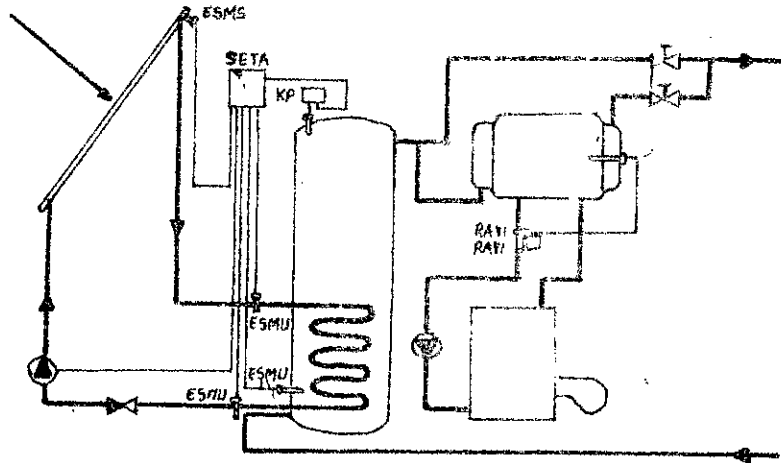


fig III.5 Installation de taille réduite pour la préparation d'eau chaude sanitaire par l'énergie solaire raccordée au système de chauffage central

## CONCLUSION

Ce travail nous a permis :

- de faire un choix d'un piège optimal pour le rayonnement infrarouge : l'énergie piégée est de 65.5%.

- réduire les pertes optiques par utilisation de cellules composées. Ainsi une structure cellulaire composée de 9 tubes cylindriques, peut piéger : 74.6% de l'énergie incidente  
[c'est pour une incidence de  $45^\circ$ ]

Il serait intéressant de continuer cette étude, en faisant varier la hauteur relative de la cellule et l'angle d'incidence du rayonnement monochromatique, afin de pouvoir arriver à une structure susceptible de piéger l'énergie maximale

A titre indicatif : la demande en eau chaude d'une famille Algérienne est de 200 l/jour. Un capteur plan de  $5\text{m}^2$  de surface de captage, couvre en moyenne 85% des besoins énergétiques

Ainsi notre capteur de  $1\text{m}^2$ , n'assure pratiquement que 17% de l'énergie sollicitée.

## BIBLIOGRAPHIE

- A. KASTLER : - OPTIQUE : sixième édition
- M. BORY : - transfert de chaleur par rayonnement
- P. GALLET : - structure cellulaire antirayonnante
- J. DESAUTEL : - les capteurs héliothermiques
- RAYMOND BRUCKERT : - Le soleil pour tous
- G. CHASSAGNE  
C. DUPUY : - Energie Solaire, Edition CNRS  
M. LEVY
- G. GAUSSORGUES : - la thermographie infrarouge  
La revue de DANFOSS 3/1984
- D.K Edwards / traduit par L. Marlot : Capteurs solaires

