

58/87

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

“UNITE

HELIOTECHNIQUE”

Proposé par :

M^r AIT ALI

Etudié par :

M^r KECHABIA (K)

Dirigé par :

M^r AIT ALI

PROMOTION JUIN 1987

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT de GENIE MECANIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

UNITE

HELIOTECHNIQUE.

Proposé par :

M^r AIT ALI

Etudié par :

M^r KECHABIA

Dirigé par :

M^r AIT ALI

PROMOTION JUIN 1987

Je dédie ce travail,

A mon pays, pour le financement de mes études et
de mon éducation.

A mes très chers parents.

Mes remerciements s'adressent à ,

M^r AIT ALI pour son aide en tant que mon promoteur.

Ainsi que messieurs KHEMIS, YOUNSI et AIDOUN.

Kechabia Rachid.

Ministère de l'enseignement supérieur

Ecole National. Polytechnique d'Alger.

Département : Génie Mécanique.

Promoteur : M^r Aït. ALI.

Élève ingénieur : M^r KECHABIA Rachid

وزارة التعليم العالي

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات

دائرة : الميكانيك

موجه : السيد آيت علي .

تلميذ مهندس : السيد كسابيه رشيد .

ملخص :

إن هذا المشروع يهدف إلى اجاز دراسات تجريبية علمية عن هندسة تجارب الإشعاع الشمسي وذلك قصد التحقق من المزايا وإعداد موجر كامل للأعمال التطبيقية .
إن التجارب التي قمنا بها تهدف إلى دراسة مردود الترابي المسمتوي المستعمل للماء أحادي وثنائي الواجهة والتابهي ذو تركيز على شكل قطع زائد وذلك بدلالة حرارتهما وكذلك لتابهي التهرولوني .

Résumé :

Le projet consiste à réaliser des études expérimentales sur un banc d'essai du rayonnement solaire afin d'en confirmer les caractéristiques et d'établir un manuel complet de travaux pratiques .

Les manipulations réalisées visent l'étude des rendements des capteurs plan à eau à simple et double vitrage et d'un capteur parabolique à concentration, en fonction de leur température, et d'un panneau photovoltaïque .

Abstract :

This project is aimed at conducting experimental studies on a solar radiation heat transfer bench in order to confirm the manufacturer's established performances and to write up an operating manual for laboratory sessions . The tests are specifically aimed at efficiency curves of flat collectors with simple and double glazing, concentrating collectors and photo voltaic direct collector, in terms of temperatures and solar radiation intensities .

TABLE DES MATIERES :



I - INTRODUCTION. 7

II - GENERALITES. 8
Le rayonnement solaire

III - RAPPELS THEORIQUES. 11
Le gisement solaire
Repérage du soleil
Relation entre le temps légal et le temps solaire
Flux et irradiation solaires en dehors de l'atmosphère
Atténuation du rayonnement solaire par l'atmosphère terrestre
Irradiation solaire sur un plan horizontal par ciel variable
Flux et irradiation directs
Flux et irradiation diffus
Flux et irradiation réfléchis

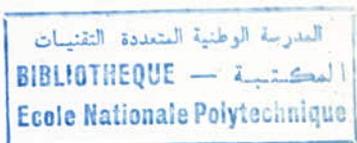
IV - ETUDE THEORIQUE DES CAPTEURS PLANS. 2
Principe de fonctionnement
Bilan thermique
Pertes thermiques
Calculs des pertes
Etude thermique de l'absorbeur
Rendement instantané du capteur

V - CALCUL THEORIQUE D'UN CAPTEUR A SIMPLE ET DOUBLE VITRAGE 39
Sans circulation d'eau :
- calcul de la température des vitres
- calcul de la température du capteur
Avec circulation d'eau :
- calcul de l'énergie utilisable
- calcul du rendement du capteur
Tableaux de valeurs de l'étude théorique
Courbes de rendements théoriques

VI - LES CAPTEURS PARABOLIQUES A CONCENTRATION. 45
Définitions et généralités sur les capteurs à concentration
Etude théorique du capteur parabolique à concentration
- facteur de concentration
- bilan des flux

VII - GROUPE PHOTOVOLTAIQUE. 48
Introduction
L'énergie photovoltaïque
Principe de fonctionnement
Les cellules photovoltaïques
Influence de l'éclairement
Influence de la température
Modules photovoltaïques
Protection des modules
- diode anti-retour
- diode by-pass

VIII - ETUDE EXPERIMENTALE - CAPTEUR PLAN A SIMPLE ET DOUBLE VITRAGE EN SOURCE NATURELLE ET ARTIFICIELLE.	56.
Tableaux de valeurs (Annexe 2)	
Calcul d'incertitude	
Courbes de rendements	
Interprétation graphique	
Conclusion	
Amélioration des courbes de rendement	
- par le rendement optique	
- par le coefficient des pertes	
- par le facteur de conductance de l'absorbeur	
Méthode de calcul pour la détermination du rendement	
Evaluation réelle des pertes du capteur	
- calcul des pertes	
- bilan des pertes	
IX - ETUDE EXPERIMENTALE - CAPTEUR PARABOLIQUE A CONCENTRATION EN SOURCE NATURELLE ET ARTIFICIELLE.	76
Tableaux de valeurs (Annexe 3)	
Calcul d'erreurs	
Tracé des courbes	
Tracé des enregistrements	
Interprétation graphique	
Conclusion	
X - ETUDE EXPERIMENTALE - GROUPE PHOTOVOLTAIQUE EN SOURCE NATURELLE ET ARTIFICIELLE.	86
Schéma de l'ensemble du groupe photovoltaïque	
Influence de la température	
- tableaux de valeurs	
- tracé des courbes	
- interprétation	
Influence de l'éclairement	
- tableaux de valeurs	
- tracé des courbes	
- interprétation	
Conclusion	
ANNEXE I DESCRIPTION ET SCHEMA DE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU BANC D'ESSAI.	94.
Description du matériel	
Branchement électrique	
Branchement d'eau	
Remplissage du circuit et mise en marche de la machine	
Schéma de la machine	
Schéma fonctionnel de la machine	
ANNEXE 2 TABLEAUX DE VALEURS POUR LES CAPTEURS PLANS.	99.
ANNEXE 3 TABLEAUX DE VALEURS POUR LES CAPTEURS PARABOLIQUE A CONCENTRATION.	103.
ANNEXE A MANIPULATION SUR CAPTEUR PLAN.	105.
ANNEXE B MANIPULATION SUR CAPTEUR PARABOLIQUE A CONCENTRATION.	106.
ANNEXE C MANIPULATION SUR GROUPE PHOTOVOLTAIQUE.	107.
** REFERENCES ET BIBLIOGRAPHIE.	109.
** CONCLUSION.	110.



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

I - INTRODUCTION :

Presque toutes les sources d'énergies utilisées par l'Homme pour le chauffage et pour la production de travail ont été empruntées du soleil. Toutefois celles qui sont le plus couramment utilisées, les énergies fossiles telles que le charbon, le pétrole et l'huile, ont subi des variations telles que leur concentration a augmenté sensiblement. Etant donné que sa concentration est assez faible, le rayonnement solaire n'est que très peu utilisé dans les applications industrielles. Par contre, depuis quelques années (en particulier dans notre pays), l'intérêt porté à l'utilisation du rayonnement solaire pour l'application domestique a considérablement augmenté. Et on peut s'attendre à ce que les énergies fossiles disponibles deviennent dans un proche avenir, rares et chères du fait de l'accroissement rapide des nécessités mondiales en énergie.

L'importance relative de divers mécanismes de transmission de la chaleur d'un corps à un autre diffère beaucoup selon la température. Les phénomènes de conduction et de convection dépendent principalement des différences de températures et très peu de leur niveau, alors que les échanges de chaleur par rayonnement augmentent rapidement avec ce niveau. Par conséquent, la plus grande partie de la chaleur est transmise par convection et conduction aux basses températures alors qu'aux températures élevées le rayonnement est le facteur déterminant de cette transmission. La température à laquelle le rayonnement ne contribue que pour environ la moitié de la totalité de la chaleur transmise dépend de plusieurs paramètres tels que le facteur d'émission de la surface ou la grandeur du coefficient de convection...

II - GENERALITES / LE RAYONNEMENT SOLAIRE

L'énergie du rayonnement solaire est essentiellement variable :

- dans sa répartition spectrale.
- suivant la composition gazeuse de l'atmosphère terrestre.
- en latitude et en altitude.
- suivant les différentes périodes de l'année et de la journée.

La transmission de la chaleur par rayonnement est seulement l'un des nombreux phénomènes électromagnétiques. Le transfert de chaleur par rayonnement a lieu lorsque de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques est émise par une surface et absorbée par une autre. Cette énergie est appelée énergie thermique lorsque les longueurs d'ondes λ mises en jeu sont comprises entre 10^{-4} et 10^{-7} mètre, c'est à dire une partie du spectre ultra violet et infra rouge et tout le domaine du visible.

La gamme complète de ses ondes se divise en plusieurs classes suivant la longueur d'onde, la fréquence et aussi suivant l'application. La figure 1 montre le spectre électromagnétique depuis les ondes électriques à basses fréquences et longueurs d'ondes importantes jusqu'aux rayons cosmiques à hautes fréquences et longueurs d'ondes extrêmement courtes.

Tous les corps émettent continûment des rayonnements auxquels nous sommes exposés en tous temps. Cependant, nos sens ne sont capables de détecter le rayonnement que si sa longueur d'onde s'étend de 0,1 à 100 μ sur le spectre. Dans cette gamme, le rayonnement chauffe de façon appréciable le corps qui le reçoit et excite également le nerf optique sous forme de lumière dans une bande étroite de 0,38 à 0,76 micron. A chaque température considérée, la quantité de rayonnement émise par micron est différente suivant les longueurs d'ondes.

La figure 2, pour le cas d'un radiateur idéal c.a.d: un radiateur qui émet le rayonnement maximal possible à une température donnée, montre la variation du pouvoir émissif en fonction de la longueur d'onde pour différentes températures : ces courbes sont appelées, courbes Spectroradiométriques, dont l'ordonnée détermine la quantité de rayonnement émise par unité de temps et de surface pour une longueur d'onde donnée, et l'aire située à l'intérieur de la courbe donne la quantité totale de rayonnement émise à toutes les longueurs d'ondes. Ces courbes permettent de voir que la plus grande partie du rayonnement est émise dans une bande relativement étroite des deux cotés de la longueur d'onde à laquelle le pouvoir émissif atteint son maximum.

Par conséquent, la qualité du rayonnement peut être définie au moyen de la longueur d'onde qui correspond à l'émission maximale. Ainsi, le soleil, dont la température à sa surface est d'environ 5540°C, émet 90 % de son rayonnement entre 0,1 et 3 microns, tandis qu'un corps à 1093°C émet la plus grande partie de son rayonnement entre 1 et 20 microns.

Figure 1: Spectre des ondes électromagnétiques.

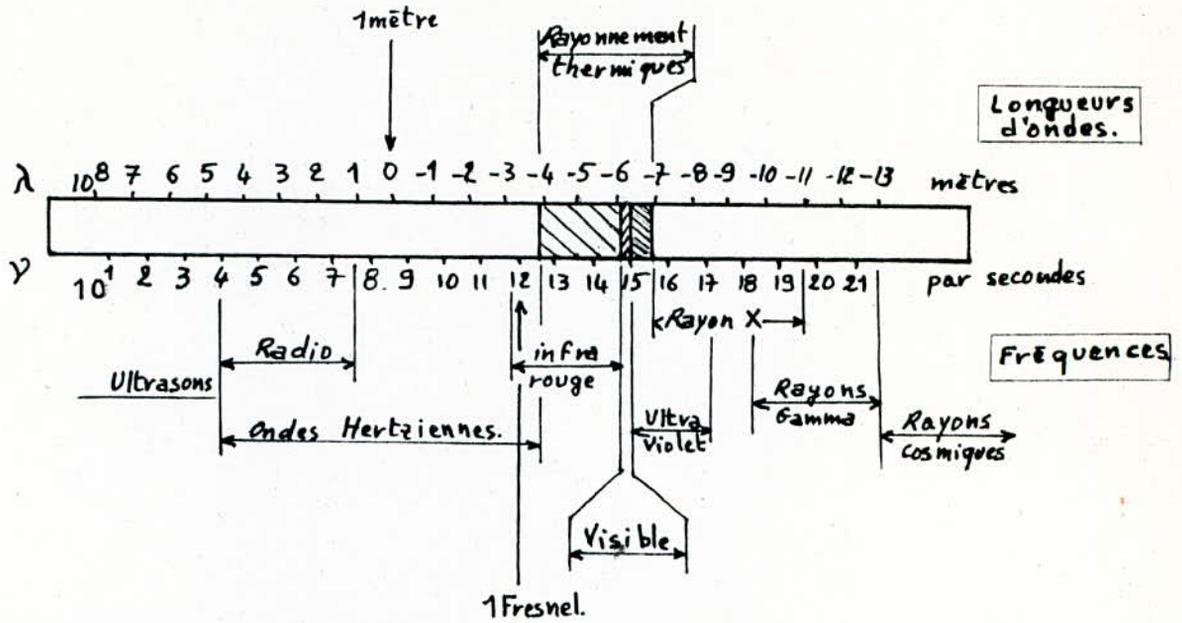
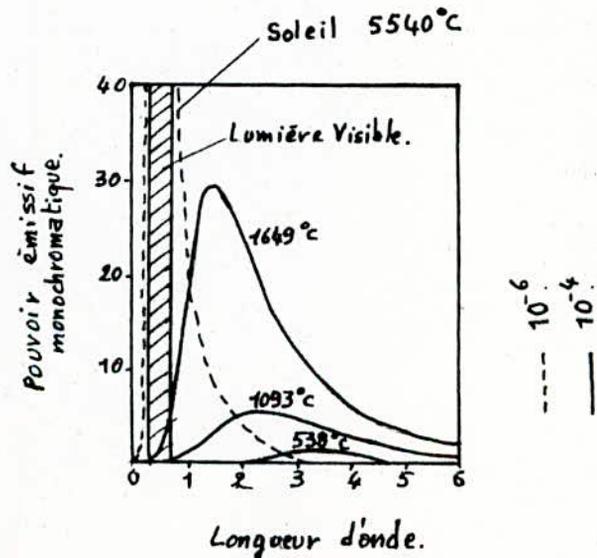


Figure 2: Répartition spectrale du pouvoir émissif monochromatique pour un corps noir aux différentes températures.



III - RAPPEL THEORIQUE :

- .. Un corps noir est un corps ou une surface qui, à une température donnée et pour une longueur d'onde donnée, émet le maximum de flux par rayonnement.
- .. La loi de PLANK donne, l'émittance monochromatique d'un corps noir à la longueur d'onde λ et la température T :

$$M_{\lambda, T}^{\circ} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp(C_2/\lambda T) - 1} \quad \text{en } [W/m^2 \mu m] \quad \text{si } \lambda [\mu m].$$

où $M_{\lambda, T}^{\circ}$ est le flux énergétique émis par la surface dans tout l'hémisphère et ramené à l'unité de surface et à l'unité de longueur d'onde λ . (la surface étant à la température T).

Les constantes C_1 et C_2 sont égales à :

$$C = 3,74 \cdot 10^8 \text{ W } \mu m^4 / m^2$$

$$C = 1,44 \cdot 10^4 \mu m \cdot K$$

La figure 2 représente l'émittance d'un corps noir $M_{\lambda, T}^{\circ}$ en fonction de la longueur d'onde λ pour différentes températures.

- .. Les lois de WIEN donnent le lieu des maxima des courbes pour chaque température :

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} \quad \text{et} \quad M_{\lambda_{\max}}^{\circ} = 12,865 \cdot 10^{12} \cdot T^5$$

- .. La loi de STEPHAN-BOLTZMANN, nous donne l'émittance totale :

$$M_T^{\circ} = \int_0^{\infty} M_{\lambda, T}^{\circ} d\lambda \quad \text{soit} \quad M_T^{\circ} = \sigma \cdot T^4 \quad \text{où: } \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$$

l'émittance d'un corps noir pour les longueurs d'ondes de 0 à λ , est donnée par l'intégral de la loi de Plank :

$$M_{0, \lambda, T}^{\circ} = \int_0^{\lambda} M_{\lambda, T}^{\circ} d\lambda$$

Cette intégrale ne peut pas s'exprimer sous forme analytique, mais on peut utiliser une des formules rapprochées, qui est :

$$M_{0, \lambda, T}^{\circ} = C_1 \sum_{k=1}^{\infty} x \exp(-1/\lambda x) \left[\left(\frac{1}{\lambda} \right)^3 + \left(\frac{3x}{\lambda^4} \right) + \left(\frac{6x^2}{\lambda^5} \right) + 6x^3 \right]$$

$$\text{où} \quad x = \frac{T}{k C_2}$$

et l'on voit qu'une sommation des dix premiers termes aboutit à une précision supérieur à 0,5 %, ce qui est suffisant pour les applications solaires.

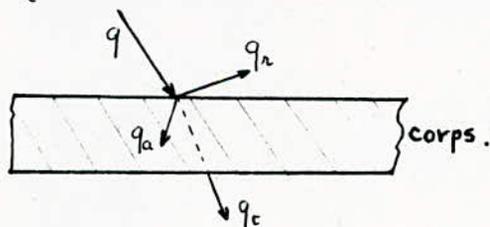
- .. Les émittances totales M et monochromatiques M_λ des corps réels sont toujours différentes de celles d'un corps noir. On définit le facteur d'émission hémisphérique ε et monochromatique ε_λ comme étant les rapports :

$$\varepsilon = \frac{\int_0^\infty M_\lambda d\lambda}{M^0} = \frac{\int_0^\infty \varepsilon_\lambda M_\lambda^0 d\lambda}{M^0} \quad \text{et} \quad \varepsilon_\lambda = \frac{M_\lambda}{M_\lambda^0}$$

- .. Par définition du corps noir, $\varepsilon_\lambda < 1$ et $\varepsilon < 1$.

Contrairement au corps noir, le rayonnement de certains corps réels dépend aussi de l'angle i entre la normale à un élément dS et la direction du rayonnement émis; on est donc amené à définir les facteurs d'émission dirigée $\varepsilon_{i,\lambda}$ et ε_i . Et lorsque ε_i est indépendant de i , on a $\varepsilon_i = \varepsilon$ et on dit que la surface a une émission diffuse ou que la surface obéit à la loi de LAMBERT. Donc un corps noir à une émission diffuse.

- .. Lorsqu'un rayonnement q est incident sur un corps :
- une partie q_r sera réfléchi.
 - une partie q_a sera absorbée.
 - une partie q_t sera transmise, si le corps n'est pas opaque.



- .. A partir de ceci on introduit trois coefficients :

- $\rho = \frac{q_r}{q}$: facteur de réflexion.
- $\alpha = \frac{q_a}{q}$: facteur d'absorption.
- $\tau = \frac{q_t}{q}$: facteur de transmission.

- .. Il est évident que $\rho + \alpha + \tau = 1$. et dans le cas des corps opaques, τ étant nul alors $\rho + \alpha = 1$.

- .. Ces trois coefficients sont fonction d'un grand nombre de facteurs qui dépendent :
 - du rayonnement incident (longueur d'onde et direction).
 - du corps récepteur.

On voit donc que contrairement au facteur d'émission, α , τ et ρ ne dépendent pas uniquement du corps, mais aussi du rayonnement incident. On est donc souvent amené à introduire les valeurs monochromatiques et dirigées de α , τ et ρ .

- .. Lorsque le rayonnement réfléchi par une surface se produit suivant un angle i égal à l'angle d'incidence du rayonnement incidence, on dit que la réflexion est spéculaire (réflexion d'un miroir). Lorsque le rayonnement réfléchi se répartit uniformément suivant toutes les directions, on dit qu'il s'agit d'une réflexion diffuse.

En pratique, la plupart des surfaces ont une réflexion mixte, s'approchant plus ou moins de ces deux cas extrêmes suivant leur état de surface, poli ou non.

LE GISEMENT SOLAIRE :

Toute étude ou application de l'énergie solaire en un site donné nécessite une connaissance complète et la plus détaillée possible de l'ensoleillement du site. Le soleil rayonne a peu de chose près comme s'il s'agissait d'un corps noir ayant un diamètre de 1,39 million de kilomètres et porté à une température de 5 762°K.

La puissance rayonnée à la surface du soleil est donc à peu près égale à $\pi D^2 \sigma T^4$ soit $3,79 \cdot 10^{26}$ W. Seule une puissance de l'ordre de $1,7 \cdot 10^{17}$ W est interceptée par la terre : 30 % de ce flux est réfléchi vers l'espace, 47 % est absorbé et réémis vers l'espace sous forme de rayonnement dans l'infrarouge, 23 % sert de source d'énergie au cycle d'évaporation - précipitation de l'atmosphère et 0,5 % se retrouve sous forme de photosynthèse dans les plantes.

Le flux solaire moyen sur un plan perpendiculaire à la direction des rayons et placé en dehors de l'atmosphère terrestre est appelé constante solaire I_0 , et actuellement elle est de $I_0 = 1\ 353$ W/m². C'est une valeur moyenne sur l'année du flux extra terrestre, car il y a une variation qui est due à la trajectoire elliptique de la terre par rapport au soleil.

La figure 3, nous donne la distribution spectrale du flux solaire en dehors de l'atmosphère ainsi que la distribution spectrale d'un corps noir porté à 5 762°K. (d'après la NASA). On peut voir que l'écart entre ces deux courbes est généralement inférieur à 3 %, ce qui nous permet de dire que notre approximation (soleil /corps noir à 5 762°K) est acceptable du rayonnement solaire en ce qui concerne les applications thermiques à basse température.

Figure 3: Distribution du flux solaire en dehors de l'atmosphère, et d'un corps noir à $T=5762^{\circ}\text{K}$.

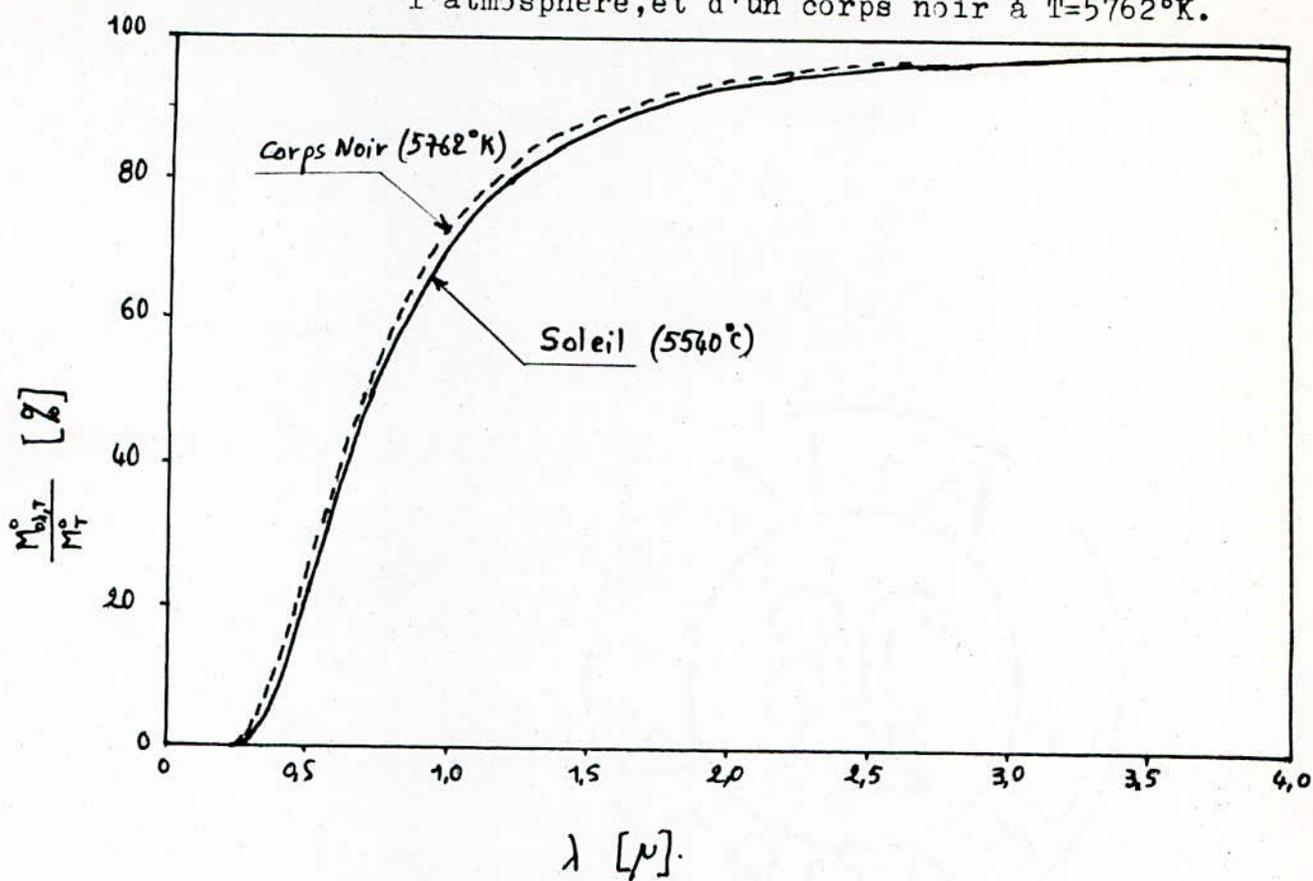
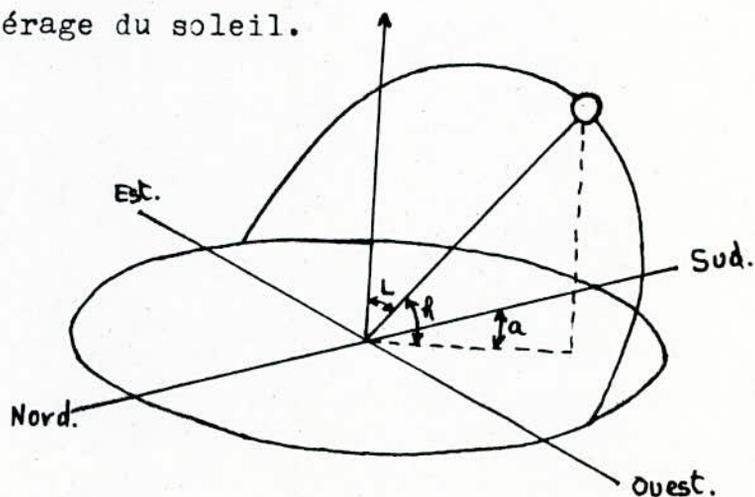


Figure 4: Repérage du soleil.



REPERAGE DU SOLEIL : (figure 4)

Le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles :

- Azimuth : ou angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. L'angle est mesuré positivement vers l'ouest.
- Hauteur : ou angle que fait la direction du soleil avec la projection.

Le complément de h ou l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale est appelé angle Zénithal.

Ces deux angles sont fonction de :

- . la latitude du lieu. L .
- . la date (jour de l'année). j .
- . l'heure dans la journée

La date sert à déterminer la déclinaison δ qui est donné par :

$$\delta = 23,45 \sin [0,980 (j + 284)] \quad (1)$$

En introduisant l'angle horaire ω , défini comme étant 15° fois le nombre d'heures de différence avec le midi solaire et affecté du signe positif pour les heures de l'après midi, on exprime a et h en fonction de L , δ et ω par les relations :

$$\sin h = \sin L \cdot \sin \delta + \cos L \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \quad (2) \quad \sin a = \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\cos h} \quad (3)$$

Pour un lieu, une date et une heure donnée :

- . (1) nous donne δ .
- . (2) nous donne h .
- . (3) nous donne a .

ω_s : angle solaire au levé et au couché, s'obtient en écrivant

$\sin h = 0$ dans (2), d'où :

$$\cos \omega_s = - \operatorname{tg} L \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (4)$$

Et l'heure solaire au lever sera donc :

$$TS_{\text{Lever}} = 12 - \frac{\omega_s}{15} \quad (5)$$

Ceci est valable dans le cas où l'horizon a une hauteur nulle ; sinon on écrira que h est égal à l'angle sous lequel on voit l'horizon.

RELATION ENTRE LE TEMPS LEGAL ET LE TEMPS SOLAIRE :

Il faut se rappeler que toutes les relations ayant rapport au mouvement du soleil utilisent le temps soleil TS qui diffère généralement du temps légal TL du lieu considéré. Cette différence est liée à trois facteurs qui font que :

$$TS = TL + ET + (L_{\text{réf}} - L_{\text{lieu}}) / 15 + C. \quad (6)$$

où ET : équation du temps qui est une correction qui tient compte des perturbations du mouvement de la terre.

$(L_{\text{réf}} - L_{\text{lieu}})$: différence de longitude entre le lieu considéré et celle servant de référence au temps légal.

C : correcteur dû au changement d'heure légale entre l'été et l'hiver.

Généralement : . en été : $TS \simeq TL - 2$.

. en hiver : $TS \simeq TL - 1$.

VARIATION DE LA DISTANCE TERRE - SOLEIL :

Pendant l'année cette variation influe sur la valeur de la constante solaire I_0 .

La valeur corrigée est donnée par :

$$I_0 = 1353 (1 + 0,033 \cos J) \quad (7)$$

où : $J = 0,984 \cdot j$.

et j étant le jour de l'année.

FLUX ET IRRADIATION SOLAIRE EN DEHORS DE L'ATMOSPHERE :
SURFACE HORIZONTALE :

Pour un site donné, à date et heure données, l'équation (2) donne la hauteur h du soleil.

Le flux sur un plan horizontal $I_{oh} = I_0 \cdot \sin h$ (8)

En intégrant (8); on obtient l'irradiation journalière H_0 .

ou énergie reçue par jour sur une surface horizontale, de sorte que :

$$H_0 = \int_{TS_{Lever}}^{TS_{Coucher}} I_0 \cdot \sin h \cdot d(TS) = I_0 \int_{-\omega_s}^{\omega_s} \sin h \cdot \frac{d(TS)}{d\omega} d\omega.$$

Puisque I_0 ne varie pas (ou presque pas) sur une journée, substituant $\sin h$ par sa valeur (2), et intégrons; on obtient en utilisant (4) :

$$H_0 = 2 I_0 \cos L \cdot \cos \delta \cdot (\sin \omega_s - \omega_s \cos \omega_s) \cdot \frac{d(TS)}{d\omega}$$

I_0 étant exprimé en W/m et sachant qu'une heure (soit 3600 s) correspond à un angle ω de 15° ou $\pi/2$ radians, alors :

$$\frac{d(TS)}{d\omega} = \frac{3600}{\pi/12} \text{ secondes/radians.}$$

d'où :

$$H_0 = \left(\frac{24 \cdot 3600}{\pi} \right) I_0 \cos L \cos \delta \left(\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s \right) \quad (9)$$

Avec

$$H_0 \text{ [J/m}^2\text{]} ; \quad I_0 \text{ [W/m}^2\text{]} , \quad \omega_s \text{ [degrés]}$$

SURFACE D'ORIENTATION QUELCONQUE : (figure 5)

Soit une surface plane inclinée d'un angle i par rapport à l'horizontale et orientée vers une direction faisant un angle c par rapport au sud (c est + vers l'ouest).

Pour trouver la latitude de la surface équivalente L_e et le décalage ou différence de longitude d , on projette ces deux surfaces sur le plan de l'équateur et le plan du méridien m .

La projection de la surface inclinée sur le plan horizontal en A donne $\cos i$, sa projection sur le plan du méridien m est $(\sin i - \cos c)$ et sa projection sur le plan vertical perpendiculaire au méridien $(\sin i - \sin c)$. En écrivant l'égalité de la projection des deux surfaces sur le plan du méridien m , on obtient :

$$\sin i \cdot \sin c = \cos L_e \cdot \sin d \quad (10)$$

Et l'égalité des projections sur le plan de l'équateur donne :

$$\cos i \cdot \sin L - \sin i \cdot \sin c \cdot \cos L = \sin L_e \quad (11)$$

Connaissant les coordonnées de la surface équivalente, on écrit que le flux sur la surface inclinée I_{oi} est égal au flux sur la surface équivalente. Ce flux est donné par $I_o \cdot \sin h_e$, h_e étant la hauteur du soleil par rapport à la surface équivalente qui est évidemment horizontale. On a, d'après (2) :

$$\sin h_e = \sin L_e \cdot \sin \delta + \cos L_e \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega_e$$

Et, en remplaçant l'angle horaire ω_e par sa valeur $\omega_e = \omega - d$ on obtient :

$$I_{oi} = I_o \sin h_e = I_o [\sin L_e \sin \delta + \cos L_e \cos \delta \cos(\omega - d)] \quad (12)$$

L'irradiation journalière du plan incliné H_{oi} est obtenue par l'intégrale :

$$H_{oi} = \int_{\omega_i}^{\omega_e} I_o \sin h_e \frac{d(\tau s)}{d\omega} d\omega$$

Où : ω_i et ω_e sont respectivement l'angle horaire du lever et du coucher du soleil sur le plan incliné. Après intégration, on obtient :

$$H_{oi} = \left(\frac{12 \cdot 3600}{\pi} \right) I_o \cos L_e \cos \delta \left[\sin(\omega_e - d) - \sin(\omega_i - d) \frac{\pi(\omega_e - \omega_i)}{180} \cos \omega_{se} \right] \quad (13)$$

ω_{se} étant l'angle horaire du coucher du soleil sur la surface équivalente.

$$\text{et } \omega_{se} = -\tan L_e \cdot \tan \delta \quad (13')$$

ω_i et ω_e sont définis comme suit :

$$\omega_i = \max \left\{ -\omega_s, d - \omega_{se} \right\} \quad (14)$$

$$\omega_e = \inf \left\{ \omega_s, d + \omega_{se} \right\} \quad (15)$$

Figure 5:
Surfaces équivalentes.

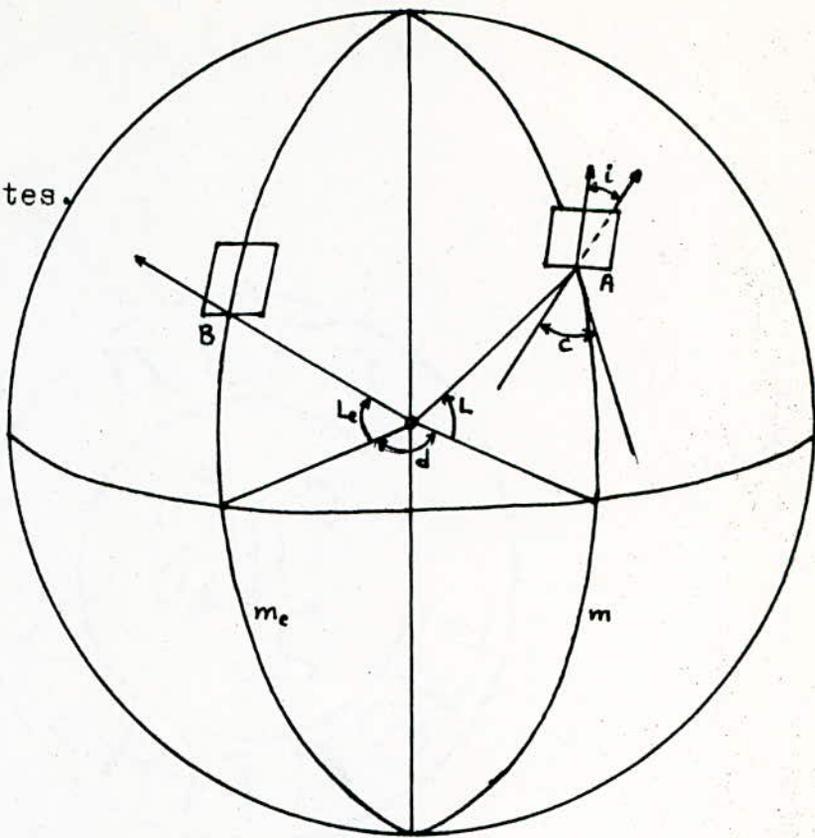
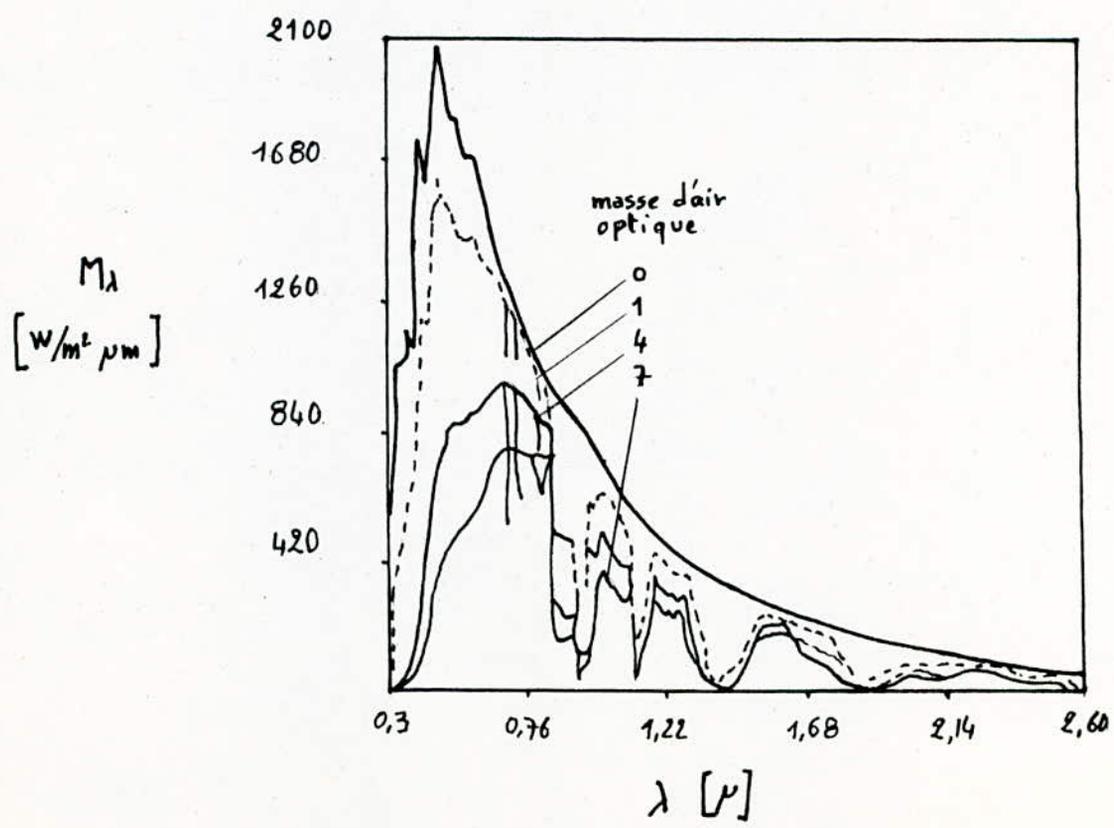


Figure 6: Spectre solaire en dehors de l'atmosphère et au niveau du sol.



ATTENUATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE PAR L'ATMOSPHERE TERRESTRE :

L'extinction atmosphérique dépend essentiellement de deux phénomènes distincts :

- Diffusion du rayonnement par les différentes molécules gazeuses, par la vapeur d'eau et par les particules en suspension.
- Absorption par O_2 , O_3 , H_2 et CO_2 .

Ces deux phénomènes qui se produisent simultanément sont assez complexes et sont fonction de la longueur d'onde et de l'épaisseur atmosphérique traversé par les rayons.

La loi d'extinction optique nous donne :

$$I_{b\lambda} = I_{o\lambda} [\exp(-m B_\lambda)] \quad (16)$$

où : m est un paramètre qui désigne la "masse d'air optique" qui représente le rapport de la longueur du trajet optique des rayons sur ce trajet lorsque le soleil est à la verticale du site.

$I_{o\lambda}$ et $I_{b\lambda}$ sont respectivement la puissance interceptée par une surface perpendiculaire au rayon à la longueur d'onde λ en dehors de l'atmosphère et au niveau du sol.

B_λ est le coefficient d'extinction atmosphérique à la longueur d'onde λ .

La figure 6 illustre $I_{o\lambda}$ ainsi que les variations $I_{b\lambda}$ pour trois valeurs de m , pour un site où la pression barométrique est de 1000 mbar, soit une altitude du site d'environ 100 m

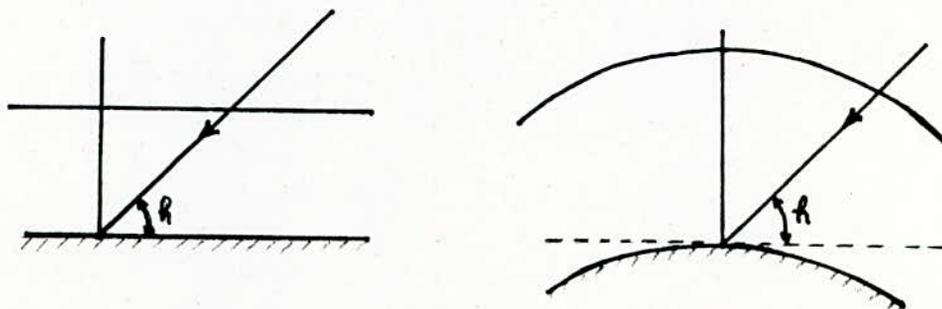


Figure 7: Masse d'air optique.

La masse d'air optique m dépend de la hauteur h du soleil (figure 7) et de la pression barométrique ou bien altitude du lieu. Lorsque $h > 20$, on peut négliger la courbure de l'atmosphère et on a :

$m = P/100 \cdot \sin h$. (17) P : pression barométrique. (mbar) et plus généralement, en particulier pour les faibles hauteurs h , on a :

$$m = P/1000 \left[\sin h + 0,15 (h + 3,885)^{-1,253} \right] \quad (18)$$

ou en fonction de l'altitude (en km), on a :

$$m = (1 + 0,1.Z) / \left[\sin h + 0,15 (h + 3,885)^{-1,253} \right] \quad (19)$$

la loi de variation du coefficient d'extinction atmosphérique B_λ est beaucoup plus complexe, comme le montre la figure 6. C'est pour cela qu'il existe un grand nombre de modèles mathématiques permettant de calculer l'extinction atmosphérique. Parmi elles :

- Méthode PERRIN DE BRICHAMBAULT et DOGNIAUX.
- Méthode COLE, BARBARO et AL.
- Méthode HOTTEL.

De précisions et complexités variables, ces modèles vont des lois empiriques extrêmement simplifiées jusqu'au calcul de B_λ à partir des propriétés optiques des différents gaz de l'atmosphère suivi d'une intégration numérique de $I_{b\lambda}$.

IRRADIATION SOLAIRE SUR UN PLAN HORIZONTAL PAR CIEL VARIABLE :

Pour calculer l'irradiation partiellement ou totalement couvert, il faut évidemment tenir compte de l'effet des nuages, ce qui ajoute une nouvelle variable plus ou moins aléatoire au problème. Quantitativement, l'ensoleillement d'un site est exprimé par la fraction d'insolation défini par :

$$V = m / N \quad (20)$$

où n est le nombre d'heures ensoleillées ou durée d'insolation, et N la durée du jour donné par :

$$N = \frac{2 \omega_s}{15} \quad (21)$$

Figure 8 : Coefficients de régression linéaire de \bar{H}_R / \bar{H}_0
en fonction de \bar{V} .

Ville - Pays	Latitude	\bar{V}_{max} (%)	\bar{V}_{moy} (%)	A	B
ALBUQUERQUE Nouv.Mex.USA	35°N	68-85	78	0,37	0,41
ATLANTA-Georgie-USA	34°N	45-71	59	0,26	0,38
ATHENES-Grèce	38°N	42-75	38	0,51	0,20
CASABIANCA-Maroc	34°N	47-80	68	0,55	0,22
BEYROUTH-Liban	34°N	46-84	70	0,49	0,23
BLUE HILL Massachusetts USA	43°N	42-60	52	0,50	0,22
BROWNSVILLE-Texas-USA	26°N	47-80	62	0,31	0,35
BUENOS AIRES Argentine	35°S	47-68	59	0,50	0,26
CHARLESTON Caroline Sud USA	33°N	60-75	67	0,09	0,48
EL PASO Texas	32°N	78-88	84	0,20	0,54
HAMBOURG Allemagne Féd.	54°N	11-49	36	0,57	0,22
HONOLULU Hawaï	19°S	57-77	65	0,73	0,14
LISBONNE Portugal	38°N	44-77	60	0,52	0,24
MADISON Wisconsin USA	43°N	40-72	58	0,34	0,30
MALANGE Angola	10°S	41-84	58	0,34	0,34
MIAMI Floride USA	26°N	56-71	65	0,22	0,42
NICE France	43°N	49-76	61	0,63	0,17
POUNA	19°S	25-49	37	0,51	0,30
INDE Mousson d'hiver		65-89	81	0,34	0,41
STANLEYVILLE OU KISANGANI Zaire	1°N	34-56	48	0,39	0,28
TA-LIEN-Anc.Dairen Chine	47°N	55-81	67	0,23	0,36
TAMANRASSET Algérie	23°N	76-88	83	0,43	0,30

En ce qui concerne la variable ∇ , c'est un des paramètres climatiques solaires le mieux connu expérimentalement.

$\nabla = 1$: veut dire que l'irradiation est à ciel clair.

Les relations proposées pour lier l'irradiation globale sur un plan horizontal H_k et la fraction d'insolation ∇ sont de deux types :

- Relation du type ANGSTROM : $H_k/H_{k_c} = f(\nabla)$ (22)

- Relation du type ANGSTROM-BLACK : $H_k/H_0 = g(\nabla)$ (23)

où f et g sont des fonctions linéaires de la forme : $a + b\nabla$.

Les corrélations du type ANGSTROM-BLACK sont généralement préférées puisque H_0 ne dépend que de variables astronomiques et les influences climatiques locales sont intégrés dans les coefficients a et b que l'on détermine expérimentalement. Parmi le nombre important de lois de régression linéaire du type (23) proposé par différents auteurs, il est important de distinguer le type de moyenne choisi dans ces relations qui sont :

- les régressions basées sur des valeurs quotidiennes de H_k et ∇ , qu'on écrit :

$$H_k/H_0 = a + b\nabla \quad (24)$$

- les régressions basées sur les moyennes mensuelles \bar{H}_k de H_k et $\bar{\nabla}$ de ∇ :

$$\bar{H}_k/\bar{H}_0 = A + B\bar{\nabla} \quad (25)$$

Où : \bar{H}_0 est la moyenne mensuelle de H_0 calculée à partir de (9) et des jours type de chaque mois.

Voir tableau de la figure 8 pour quelques valeurs de $A, B, \bar{\nabla}_{min}, \bar{\nabla}_{max}$.

FLUX ET IRRADIATIONS DIRECTS ET DIFFUS PAR CIEL VARIABLE :

Le calcul des flux et irradiations sur un plan incliné par temps variable requiert la connaissance des deux composantes du rayonnement solaire flux direct et flux diffus.

On sera souvent obligé de les déduire à partir de relations empiriques en fonction de H_k ou ∇ .

Dans la majorité des cas d'application, il est nécessaire de calculer le flux solaire sur des plans d'orientation quelconque.

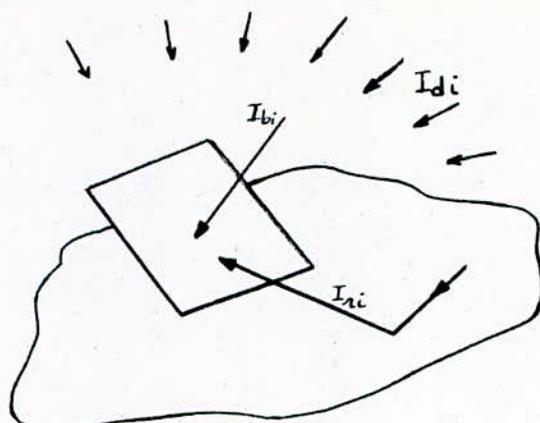


Figure 9: Flux sur plan incliné.

Un tel plan reçoit :

- Un flux direct I_{bi}
- Un flux diffus I_{di} provenant de la voûte céleste.
- Un flux diffus réfléchi I_{ri} ayant pour origine la réflexion du flux global sur le sol avoisinant.

FLUX ET IRRADIATION DIRECTS:

Connaissant le flux direct sur un plan horizontal I_b , le flux intercepté par un plan perpendiculaire au rayon du soleil sera :

$$I_{bn} = I_b / \sin h \quad (26)$$

et le flux direct sur le plan incliné I_{bi} sera calculé de la même façon que I_{oi} , en substituant I_o par I_{bn} , soit :

$$I_{bi} = I_{bn} \cdot \sin h_e = I_b \cdot \sin h_e / \sin h$$

ce qui donne, après substitution de $\sin h_e$ et $\sin h$ par leur valeur :

$$I_{bi} = I_b \cdot R_b \quad (27)$$

Où :

$$R_b = \frac{\sin h_e}{\sin h} = \frac{\sin L_e \cdot \sin \delta + \cos L_e \cdot \cos \delta \cdot \cos (\omega - d)}{\sin L \cdot \sin \delta + \cos L \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega} \quad (28)$$

R_b est appelé facteur d'inclinaison du rayonnement direct. Pour le calcul de l'irradiation direct d'un plan incliné, on utilise les résultats de LIU et JORDAN qui ont montré que leur rapport de l'irradiation direct d'un plan incliné sur l'irradiation direct d'un plan horizontal est pratiquement le même au niveau du sol et en dehors de l'atmosphère. Donc :

$$\frac{H_{bi}}{H_b} \approx \frac{H_{oi}}{H_o} \quad (29)$$

Ce rapport est appelé facteur moyen d'inclinaison :

$$\bar{R}_b = \frac{H_{bi}}{H_b} = \frac{\sin h_e}{\sin h} \quad (30)$$

Et à partir de (9) et (13) on a :

$$\bar{R}_b = \frac{\cos L_e [\sin (\omega_e - d) - \sin (\omega_1 - d) - \frac{\pi (\omega_1 - \omega_c)}{180} \cdot \cos \omega_{se}]}{2 \cdot \cos L [\sin \omega_3 - \frac{\pi \omega_3}{180} \cos \omega_3]} \quad (31)$$

Où : ω_3 , ω_{se} , ω_1 et ω_c sont donnés respectivement par : (4), (13'), (14), (15).

R_b et \bar{R}_b sont des fonctions géométriques dépendants uniquement de la position du plan et des variables astronomiques.

Connaissant \bar{R}_b , on écrit :

$$H_{bi} = \bar{R}_b \cdot H_b \quad (32)$$

Pour des plans orientés vers le sud à $\pm 15^\circ$, l'erreur induite par l'approximation (29) est assez faible. Par contre dans d'autres cas cette erreur peut devenir importante ; pour cela, on peut utiliser la forme exacte de \bar{R}_b , soit :

$$\bar{R}_b = \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_c} I_{bn} \sin h_e \, d\omega}{\int_{-\omega_3}^{\omega_3} I_{bn} \sin h \, d\omega} \quad (33)$$

qui peut être évaluée numériquement ou analytiquement par l'approximation de I_{bn} .

FLUX ET IRRADIATION DIFFUS :

En faisant l'hypothèse que le flux diffus est uniformément réparti sur la voûte céleste donc que le flux diffus est isotrope, la valeur de I_{di} peut s'écrire :

$$I_{di} = I_d \cdot F_{pc} \quad (34)$$

Où F_{pc} est le facteur d'angle plan incliné -ciel.

$$F_{pc} = \frac{1}{2} (1 + \cos i) \quad (35)$$

$$\text{donc } I_{di} = I_d (1 + \cos i) / 2 \quad (36)$$

où i est l'inclinaison du plan par rapport à l'horizontal.

Pour une inclinaison donnée i , F_{pc} est constant, et le calcul de l'arradiation diffuse se fait par intégration, et qui donne :

$$H_{di} = \frac{H_d}{2} (1 + \cos i) \quad (37)$$

Et le facteur d'inclinaison pour le rayon diffus est :

$$R_d = \bar{R}_d = \frac{1}{2} (1 + \cos i)$$

$$\text{d'où : } I_{di} = I_d \cdot R_d \quad (38)$$

$$\text{et : } H_{di} = H_d \cdot R_d \quad (39)$$

FLUX ET IRRADIATIONS REFLECHIS :

En prenant encore comme hypothèse que le flux réfléchi par le sol est isotrope, on a :

$$I_{ri} = (I_d + I_b) \rho F_{ps} = I_h \cdot \rho \cdot F_{ps} \quad (40)$$

où ρ est l'albédo (réflectivité du sol) moyen du sol environnant et F_{ps} le facteur d'angle plan incliné-sol.

La relation (40) exprime le fait que I_{ri} provient de la réflexion du flux global I_h sur le sol. Et en sachant que : $F_{ps} = \frac{1}{2} (1 - \cos i)$. (41)

$$\text{on a : } I_{ri} = \frac{I_h}{2} \rho (1 - \cos i) \quad (42) \quad \text{et} \quad H_{ri} = \frac{H_h}{2} \rho (1 - \cos i) \quad (43)$$

et les facteurs d'inclinaison du rayonnement réfléchi sont :

$$R_r = \bar{R}_r = \frac{1}{2} \rho (1 - \cos i)$$

Connaissant les trois composantes des flux et irradiation, on a :

$$I_{hi} = I_{bi} + I_{di} + I_{ri} \quad \text{et} \quad H_{hi} = H_{bi} + H_{di} + H_{ri}$$

IV - LES CAPTEURS :

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES CAPTEURS : (figure 11)

Le fonctionnement de tout capteur à basse température par effet de serre, s'explique par le fait que le verre est un matériau quasiment transparent au rayonnement solaire alors qu'il est presque opaque au rayonnement infrarouge.

Un flux solaire traversant une vitre et allant chauffer un corps derrière cette vitre se trouve donc piégé, puisque le rayonnement émis par ce corps ne peut traverser la vitre.

BILAN THERMIQUE DU CAPTEUR :

Le bilan énergétique par unité de surface du capteur s'écrit :

$$I_a = Q_u + Q_p + Q_s \quad (1)$$

Où : I_a : flux solaire absorbé à la surface de l'absorbeur.

Q_u : la puissance utile (récupéré par le fluide caloporteur)

Q_p : la puissance perdue sous deux formes :

- par convection et conduction vers l'arrière capteur.
- par convection et conduction et rayonnement vers l'avant du capteur.

Q_s : la puissance stockée sous forme de chaleur dans les différents éléments du capteur lorsque le régime thermique est variable.

Le rendement instantané d'un absorbeur s'exprime par :

$$\eta = \frac{Q_u}{I_a} \quad (2)$$

Pour un capteur dans le cas de régime thermique permanent (c.a.d.: $Q_s = 0$), le rendement devient :

$$\eta = 1 - \frac{Q_p}{I_a} \quad (3)$$

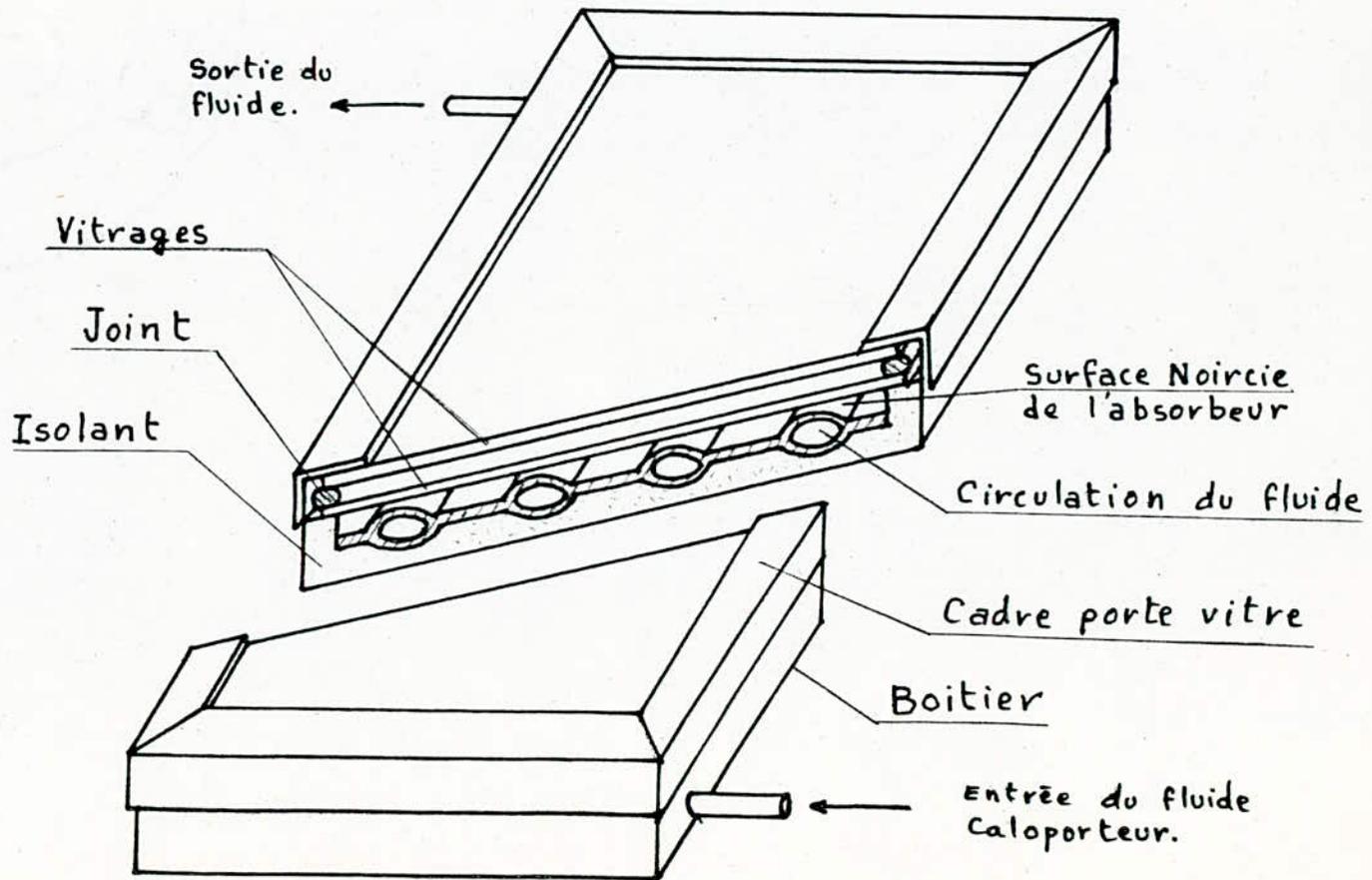
Le rendement optique du capteur est défini par :

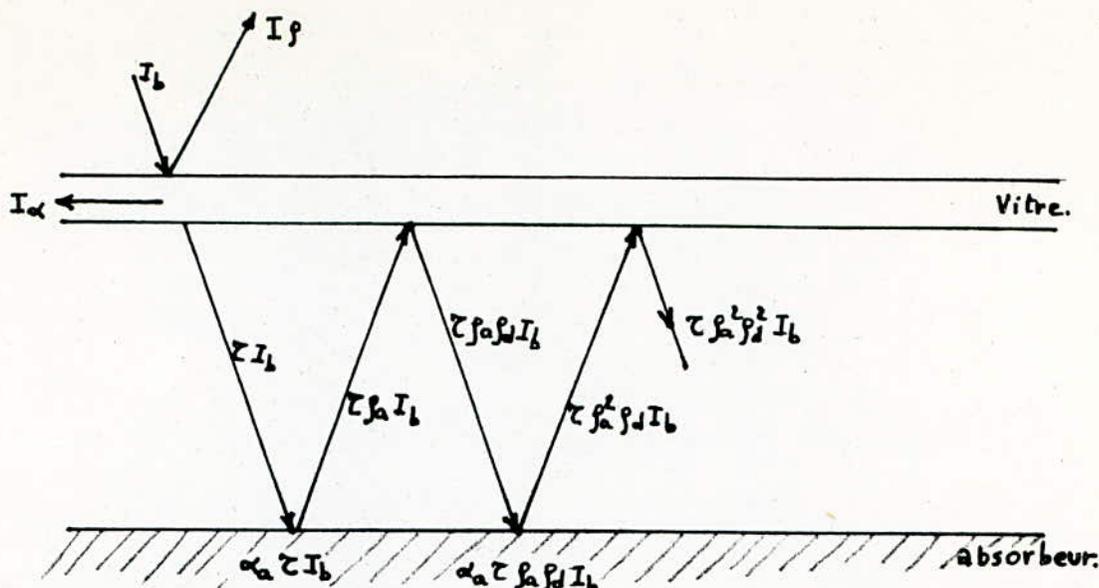
$$\eta_o = \frac{I_a}{I_c}$$

Où : I_a : flux absorbé à la surface de l'absorbeur

et : I_c : flux sur le plan du capteur ($I_c \equiv I_{hi}$)

Figure 11: Capteur plan classique à double vitrage.





Pour un flux direct I_{b_i} incident sur la surface du capteur, τI_{b_i} sera transmis et arrivera à la surface de l'absorbeur, où $\rho_a \tau I_{b_i}$ sera réfléchi et $\alpha_a \tau I_{b_i}$ sera absorbé. Le flux réfléchi sera à son tour partiellement réfléchi par le vitrage, mais il faut noter à ce point que le flux $\rho_a \tau I_{b_i}$ étant un flux diffus, la portion qui sera réfléchi par le vitrage sera $\tau \rho_a \rho_d \tau I_{b_i}$ où ρ_d est la réflectivité hémisphérique moyenne du vitrage, c.a.d:

$$\rho_d = \frac{\rho}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \rho(i) di$$

donc on a : $I_a = I_{b_i} \left[\tau \alpha_a + \tau \alpha_a \rho_a \rho_d + \tau \alpha_a \rho_a^2 \rho_d^2 + \dots \right]$

$$\text{soit : } \frac{I_a}{I_{b_i}} = \tau \alpha_a \sum_{n=0}^{\infty} (\rho_a \rho_d)^n = \frac{\tau \alpha_a}{1 - \rho_a \rho_d}$$

mais comme l'absorbeur est opaque, alors

$$\frac{I_a}{I_{b_i}} = \frac{\tau \alpha_a}{1 - \rho_d (1 - \alpha_a)}$$

où : τ : est le facteur de transmission du vitrage au rayonnement solaire.

ρ_d : est le coefficient de réflexion hémisphérique du vitrage.

α_a : est le coefficient d'absorption de l'absorbeur pour les longueurs d'ondes correspondant au rayonnement solaire.

Lorsqu' le flux incident est diffus, la formule précédente devient évidemment :

$$\frac{I_a}{I_{di}} = \frac{\tau_d \alpha_a}{1 - \beta_d (1 - \alpha_a)}$$

où : τ_d : est le facteur de transmission hémisphérique du vitrage simple ou multiple.

Le flux solaire a un instant donné, est donc :

$$I_a = I_{bi} \frac{\tau \alpha_a}{1 - \beta_d (1 - \alpha_a)} + I_{di} \frac{\tau_d \alpha_a}{1 - \beta_d (1 - \alpha_a)}$$

où bien encore :

$$\eta_o = \frac{I_a}{I_c} = \frac{\alpha_a}{1 - \beta_d (1 - \alpha_a)} \left(\frac{I_{bi} \tau}{I_c} + \frac{I_{di} \tau_d}{I_c} \right)$$

où : I_{bi} , I_{di} et I_c sont respectivement les flux directs, diffus et global sur le plan du capteur.

PERTES THERMIQUES DU CAPTEUR :

Connaissant la température moyenne de l'absorbeur T_c , on peut écrire en première approximation :

$$Q_p = U (T_c - T_a) \quad (4)$$

où U est la conductance thermique entre l'absorbeur et le milieu extérieur.

Mais le problème est le calcul de U qui est un calcul assez complexe et relativement peu fiable.

Des flux thermiques dans un capteur à double vitrage peuvent être illustrés par une analogie électrique. (figure 12)

Dans cette analogie, on supposera que la température est homogène pour chaque élément. La deuxième hypothèse que l'on fait, concerne les flux par rayonnement qui sont supposés dépendre linéairement des résistances R_{λ} . Et enfin, on supposera que le régime est permanent.

R_{f1} : résistance au flux par convection entre la face extérieure du premier vitrage et de l'air ambiant.

$R_{\lambda 1}$: résistance équivalente pour le flux par rayonnement entre la face externe du premier vitrage et le milieu extérieur ayant une température équivalente $T_{\lambda e}$.

R_{f2} et $R_{\lambda 2}$: résistances aux flux par convection et rayonnement entre les deux vitres.

Figure 12: Analogie des flux thermiques dans un capteur plan à double vitrage.

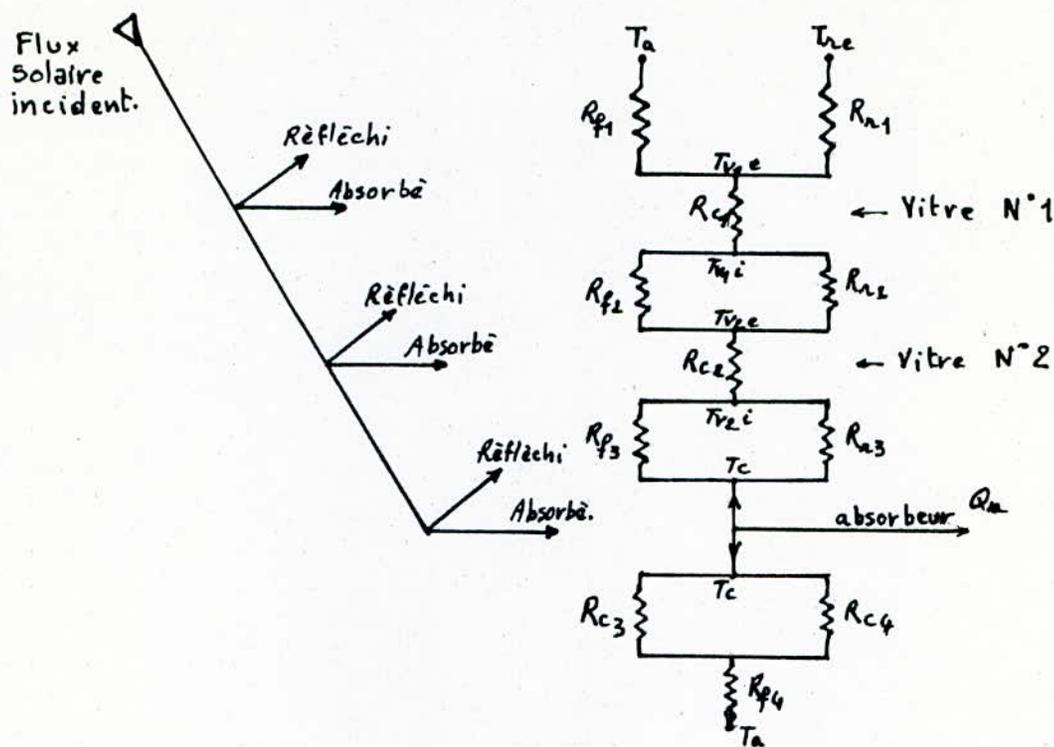
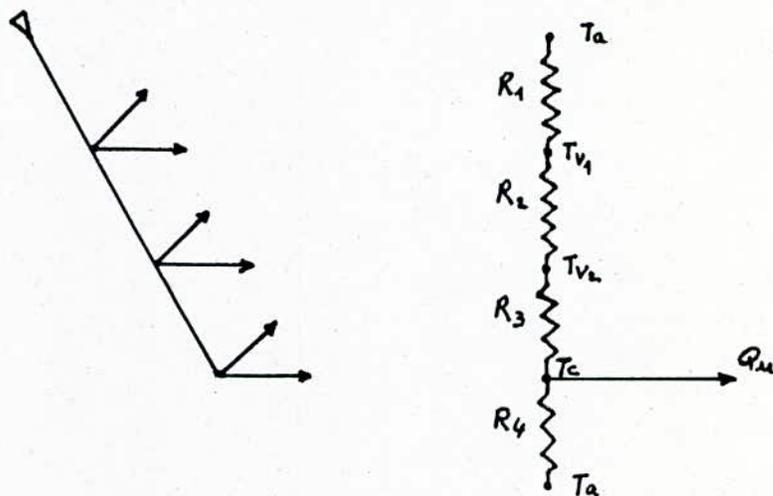


Figure 13: Circuit simplifié du capteur à double vitrage.



R_{f_3} et R_{r_3} : résistances aux flux par convection et rayonnement entre l'absorbeur et la deuxième vitre.

R_{c_1} et R_{c_2} : résistances aux flux par conduction à travers les deux vitres.

R_{c_3} et R_{c_4} : résistances aux flux par conduction à travers la face arrière du capteur et les faces latérales.

R_{f_4} : résistance au flux par convection vers l'arrière et les faces latérales.

L'expérience montre que les résistances R_{c_1} et R_{c_2} sont très faibles en comparaison des résistances R_f et R_r . Bien que le verre ne soit pas un bon conducteur thermique, les épaisseurs sont telles que les températures des deux faces sont pratiquement identiques. On s'aperçoit aussi que R_{f_4} est très faible devant R_{c_3} et R_{c_4} , car en effet les capteurs sont assez bien isolés sur leur face arrière et latérale.

Donc la figure 12, après simplification, pourrait être représentée par la figure 13; où :

$$R_i = \frac{1}{R_{f_i}} + \frac{1}{R_{r_i}} \quad \text{avec } i = 1 \text{ à } 3$$

$$\text{et } R_4 = \frac{1}{R_{c_3}} + \frac{1}{R_{c_4}}$$

Et T_{v_1} et T_{v_2} étant les températures des deux vitres. (que l'on déterminera plus loin)

CALCUL DES PERTES :

Divisons les pertes en deux parties telles que :

$$Q_p = Q_{p_1} + Q_{p_2}$$

où Q_{p_1} et Q_{p_2} sont respectivement les pertes vers l'avant et vers l'arrière du capteur.

Q_{p_1} traverse successivement R_1 , R_2 et R_3 ; alors que Q_{p_2} traverse uniquement R_4 .

On a donc :

$$Q_{p_1} = \frac{T_{v_1} - T_a}{R_1} = (h_{c_1} - h_{r_1})(T_{v_1} - T_a)$$

où :

$$h_{r_1} = \epsilon_1 \sigma (T_{v_1} + T_{a_e})(T_{v_1}^2 + T_{a_e}^2) \frac{T_{v_1} - T_{a_e}}{T_{v_1} - T_a} \quad (5)$$

On peut aussi écrire :

$$Q_{p1} = \frac{T_{V2} - T_{V1}}{R_2} = (h_{c2} + h_{r2})(T_{V2} - T_{V1})$$

et $Q_{p1} = \frac{T_c - T_{V2}}{R_3} = (h_{c3} + h_{r3})(T_c - T_{V2})$

où :

$$h_{r2} = \frac{\sigma (T_{V1} + T_{V2})(T_{V1}^2 + T_{V2}^2)}{1/\epsilon_{1i} + 1/\epsilon_{2i} - 1} \quad (6)$$

et $h_{r3} = \frac{\sigma (T_c + T_{V2})(T_c^2 + T_{V2}^2)}{1/\epsilon_{ai} + 1/\epsilon_{2i} - 1}$

avec : h_r : coefficient d'échange par rayonnement
 h_c : coefficient d'échange par convection

Et les valeurs des facteurs d'émission ϵ_{1i} , ϵ_{2i} et ϵ_{ai} correspondent au rayonnement infrarouge, $\lambda > 10 \mu m$

Et le flux Q_{p2} est donné par :

$$Q_{p2} = \frac{T_c - T_a}{R_4}$$

où $R_4 = \frac{e_1}{K_1} + \frac{e_2}{K_2} \frac{A}{A_2}$ (8)

e_1 , e_2 étant l'épaisseur sur la face arrière et sur les faces latérales du capteur. K_1 , K_2 étant la conductivité de ces isolants et A_2 la surface latérale du capteur.

Comme R_1 , R_2 , R_3 dépendent de T_{V1} et T_{V2} , le calcul de R_1 , R_2 , R_3 se fera donc par itérations successives. Une fois ce calcul fait, on peut donc calculer U :

$$U = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} + \frac{1}{R_4}$$

Pour résoudre ce système à quatre équations à quatre inconnues (T_{V1} , T_{V2} , Q_{p1} , Q_{p2}) définis par les équations (5), (6), (7), (8); on utilisera l'approche donnée par KLEIN, qui nous donne la forme empirique de Q_{p1} et donc après découler tous les autres paramètres.

La forme empirique de Q_{p1} est :

$$Q_{p1} = \frac{T_c - T_a}{N(c/T_c) \left[(T_c - T_a) / (N + f) \right]^{0,31} + 1/h_{c1}} + \frac{\Delta(T_c^4 - T_a^4)}{1/[\epsilon_{a_i} + 0,05N(1 + \epsilon_{a_i})] + (2N + f - 1)/\epsilon_{r_i} - N}$$

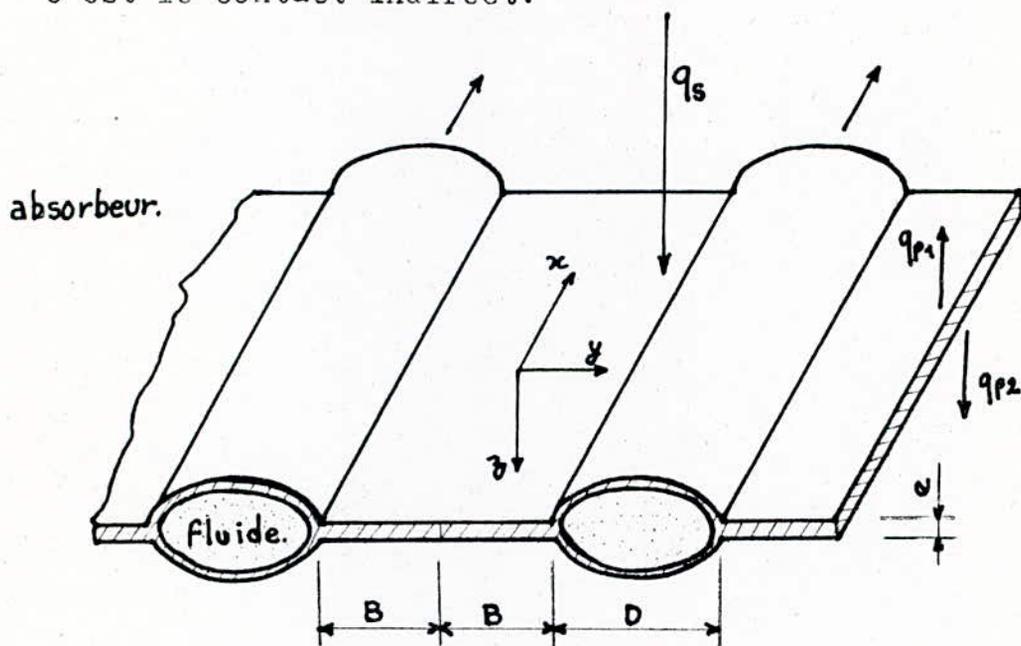
où : N : nombre de vitres du capteur.

(9)

f : facteur tenant compte de l'effet du vent.

ETUDE THERMIQUE DE L'ABSORBEUR :

On étudiera seulement, le type d'absorbeur où le fluide est chauffé par contact direct avec la surface de l'absorbeur recevant le flux solaire, et communiqué au fluide par effet d'ailette à partir d'une surface non baignée d'un fluide : c'est le contact indirect.



soit l'élément représenté sur la figure ci-contre, cet élément absorbe un flux solaire q_s (qui est le même que I_a) par unité de surface, et perd vers l'avant q_{p1} et vers l'arrière q_{p2} .

Le gain net de puissance par unite de surface est donc :

$$q = q_s - q_{p1} - q_{p2}$$

on appliquera l'équation générale de la chaleur ($K \nabla^2 T = 0$) (10)

pour régime permanent, en prenant trois hypothèses :

- $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ est négligeable, car déjà $\frac{\partial T}{\partial x}$ est faible dans l'absorbeur.
- L'ordre de grandeur de $\frac{\partial T}{\partial x}$ est tel que T est pratiquement constante dans l'épaisseur de l'absorbeur.
- Le flux q_s sera supposé constant et indépendant de x et y, les pertes ($q_{p1} + q_{p2}$) seront supposées être de la forme :

$$q_p = q_{p1} + q_{p2} = U (T_m - T_a) \quad (11)$$

Où : T_a : température ambiante.

T_m : température de l'absorbeur au point (x,y).

Après résolution de (10) en tenant compte des trois hypothèses, on arrive à :

$$T_m = T_b \frac{ch \ cy}{ch \ cB} + \left(T_a + \frac{q_s}{U} \right) \left(1 - \frac{ch \ cy}{ch \ B} \right) \quad (12)$$

où : T_b : température à la base de l'ailette

$$c = \sqrt{\frac{U}{eK}} : \text{pour un absorbeur en acier, } K \approx 50 \text{ W/m}^2\text{c}$$

L'expression (12) nous permet de calculer le flux de chaleur à la base de l'ailette par unité de longueur dans le sens des x :

$$\text{soit : } q_a = -ke \left(\frac{dT_m}{dy} \right)_{y=B} = \frac{q_s - U(T_b - T_a)}{(U/ke)^{1/2}} \text{th} \left(\sqrt{\frac{U}{ke}} B \right) \quad (13)$$

Faisant intervenir le rendement F de l'ailette :

$$F = \frac{\text{Flux réel à la base de l'ailette}}{\text{Flux à la base d'une ailette "idéale" ayant une température uniforme } T \text{ en tout point}}$$

$$\text{soit donc : } F = \frac{\text{th} \sqrt{\frac{U}{eK}} B}{\sqrt{\frac{U}{eK}} B} \quad (14)$$

Exprimons maintenant q_a en fonction de F :

$$q_a = [q_s - U (T_a - T_s)] BF \quad (15)$$

Le gain d'énergie par unité de longueur du tube sera :

$$q_t = [q_s - U(T_b - T_a)]D \quad (16)$$

En divisant l'absorbeur en parties égales, chacune se composant d'un tube de largeur D et de deux ailettes de largeur B placées de part et d'autre du tube.

Donc le gain thermique pour chacun (tube + deux ailettes), et par unité de longueur est :

$$q_u = q_t + 2q_a = [q_s - U(T_b - T_a)](D + 2BF) \quad (17)$$

Cette énergie q_u sera transférée au fluide caloporteur. Donc :

$$q_u(x) = \frac{T_b - T_f(x)}{R_{af}}$$

où, R_{af} est la résistance thermique entre l'absorbeur et le fluide par unité de longueur selon x.

Et généralement : $R_{af} \simeq R_f = \frac{1}{\pi D h_c}$ pour un tube cylindrique de diamètre D.

Où, R_f est la résistance due au contact fluide-solide. Et h_c est le coefficient d'échange par convection.

Les relations (17) et (18) permettent d'éliminer T_b et d'écrire q_u en fonction de T_f , T_a et q_s :

$$q_u(x) = [q_s - U(T_f(x) - T_a)](D + 2B)F' \quad (19)$$

$$\text{où : } F' = \frac{1/U}{(D + 2B)[(D + 2BF)/U + 1/R_{af}]} \quad (20)$$

Le numérateur de (20) représente la résistance thermique entre l'absorbeur et l'ambiance. Le dénominateur de (20) représente la résistance thermique entre le fluide caloporteur et l'ambiance.

La loi de conservation de l'énergie donne :

$$q_u(x) dx = \dot{m} c_p [T_f(x+dx) - T_f(x)] = \dot{m} c_p \frac{dT_f}{dx}$$

avec : \dot{m} : débit massique du fluide.

c_p : chaleur spécifique.

En faisant l'égalité (19), et en intégrant le long de l'absorbeur de $x = 0$ à $x = L$.

On obtient ;

$$\text{On obtient : } \frac{T_e - T_a - q_s/U}{T_s - T_a - q_s/U} = \exp \left[- \frac{U(D+2B)L F'}{\dot{m} C_p} \right] \quad (21)$$

où : T_e : température du fluide à l'entrée de l'absorbeur.
 T_s : température du fluide à la sortie de l'absorbeur.
 L étant la longueur parcourue par le fluide dans l'absorbeur.

Désignons par G le débit massique par unité de surface du capteur, alors :

$$G = \frac{\dot{m}}{(D+2B)L} \quad (22)$$

La puissance reçue par unité de surface du capteur sera donc :

$$Q_u = G \cdot C_p (T_s - T_e)$$

$$\text{soit : } Q_u = \frac{G \cdot C_p}{U} \left[1 - e^{-\frac{U F'}{G C_p}} \right] \left[q_s - U(T_e - T_a) \right] \quad (23)$$

Et, si on introduit le facteur de conductance de l'absorbeur défini par :

$$F_R = \frac{G C_p}{U} \left[1 - e^{-\frac{U F'}{G C_p}} \right] \quad (24)$$

On peut écrire finalement que :

$$Q_u = F_R \left[q_s - U(T_e - T_a) \right] \quad (25)$$

RENDEMENT INSTANTANE DU CAPTEUR :

L'analyse des travaux effectuée précédemment par HOTTEL, WOERTZ, WHILLIER et BLISS, permet d'aboutir à une équation unique du rendement instantané du capteur, défini par :

$$\eta = \frac{\text{puissance thermique utile par m du capteur.}}{\text{flux solaire incident sur le plan du capteur.}}$$

$$\text{soit : } \eta = \frac{Q_u}{I_c} \quad (26)$$

En remplaçant Q_u par sa valeur, et en introduisant le rendement optique : $\eta_o = \frac{q_s}{I_c} = \frac{I_a}{I_c}$

$$\text{On obtient : } \eta = F_R \left[\eta_o - U \left(\frac{T_e - T_a}{I_c} \right) \right] \quad (27)$$

en prenant comme température de référence T

Y- CALCULS THEORIQUES D'UN CAPTEUR A SIMPLE ET DOUBLE VITRAGE:
(Du point de vue rayonnement seulement.)

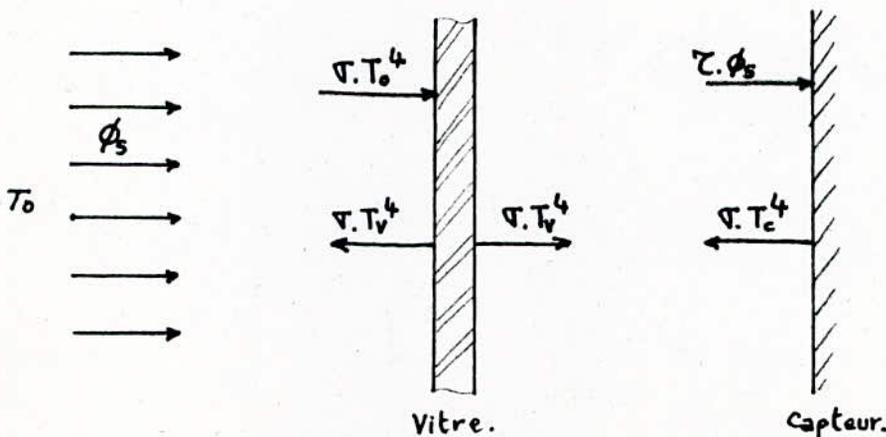
On fera les hypothèses suivantes:

- ..L'air sera considéré comme corps noir à $T_0 = 300^\circ\text{K}$.
- .. β_s n'est pas absorbé par le(s) vitrage, ou que l'absorption par celui-ci est négligeable.
- ..Pour la face avant de l'absorbeur : $\varepsilon = \alpha = 1$.
Pour la face arrière de l'absorbeur : $\varepsilon = 0$.
- ..Les caractéristiques de la vitre, pour le rayonnement visible sont : $\tau = 0,8$, $\rho = 0,2$.
- ..Dans le rayonnement infrarouge, la vitre sera considérée comme corps noir.

Ces calculs théoriques consisteront à déterminer :

- Un bilan thermique,
- Les températures des vitres, T_{v1} , T_{v2} .
- La température à la surface de l'absorbeur, T_c .
- L'énergie utilisable, Q .
- Le rendement théorique du capteur, $\eta = Q/\beta_s$.
- Des courbes de rendement en fonction de la température de l'absorbeur, pour comparer les capteurs à simple et double vitrage.

a). Capteur à simple vitrage, sans circulation d'eau :



La vitre reçoit : $\nabla T_o^4 + \nabla T_c^4$. où T_o : température ambiante.
 et émet : $2\nabla T_v^4$.

Le capteur reçoit : $\tau \phi_s + \nabla T_v^4$.
 et émet : ∇T_c^4 .

Donc, à l'équilibre thermique, on aura :

$$\begin{cases} \nabla T_o^4 + \nabla T_c^4 - 2\nabla T_v^4 = 0 . & (1) \\ \tau \phi_s + \nabla T_v^4 - \nabla T_c^4 = 0 . & (2) \end{cases}$$

(1) + (2) , nous donne :

$$T_v = \left[T_o^4 + \frac{\tau \phi_s}{\nabla} \right]^{1/4} \quad (3)$$

(2) + (3) , nous donne :

$$T_c = \left[2 \frac{\tau \phi_s}{\nabla} + T_o^4 \right]^{1/4} \quad (4)$$

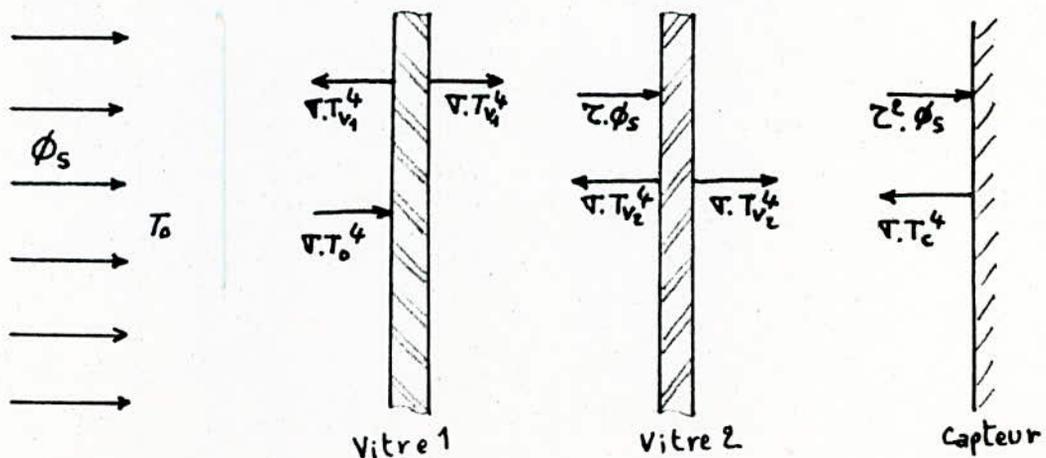
Application numérique :

Pour un flux de rayonnement solaire, $\phi_s = 1000 \text{ W/m}^2$, et à une température ambiante $T_o = 300^\circ\text{K}$, nous pouvons connaître la température de la vitre et celle du capteur, dans le cas où il n'y a pas de circulation de fluide ;

Donc : à partir de (3) et (4) on obtient :

$$T_v = 386^\circ\text{K} \quad \text{et} \quad T_c = 436^\circ\text{K} .$$

b) Capteur à double vitrage, sans circulation d'eau :



La vitre 1 reçoit : $\nabla T_o^4 + \nabla T_{V_2}^4$
 et émet : $2 \nabla T_{V_1}^4$

La vitre 2 reçoit : $\nabla T_c^4 + \nabla T_{V_1}^4$
 et émet : $2 \nabla T_{V_2}^4$

Le capteur reçoit : $\nabla T_{V_2}^4 + \tau^2 \phi_s$
 et émet : ∇T_c^4

Où : T_c : Température à la surface du capteur.
 T_{V_1} : Température de la vitre 1.
 T_{V_2} : Température de la vitre 2.
 T_o : Température ambiante.

Donc, à l'équilibre thermique, on a :

$$\begin{cases} \nabla T_o^4 + \nabla T_{V_2}^4 - 2 \nabla T_{V_1}^4 = 0. & (3) \\ \nabla T_c^4 + \nabla T_{V_1}^4 - 2 \nabla T_{V_2}^4 = 0. & (2) \\ \nabla T_{V_2}^4 + \tau^2 \phi_s - \nabla T_c^4 = 0. & (1) \end{cases}$$

(1) + (2), nous donne :

$$\nabla T_{V_1}^4 + \tau^2 \phi_s - \nabla T_{V_2}^4 = 0 \quad (4)$$

(1) + (2) + (3), nous donne :

$$T_{V_1} = \left[T_o^4 + \frac{\tau^2 \phi_s}{\nabla} \right]^{1/4} \quad (5)$$

(4) et (5), nous donne :

$$T_{V_2} = \left[T_o^4 + \frac{2 \tau^2 \phi_s}{\nabla} \right]^{1/4} \quad (6)$$

(1) et (6), nous donne :

$$T_c = \left[T_o^4 + \frac{3 \tau^2 \phi_s}{\nabla} \right]^{1/4} \quad (7)$$

Application numérique :

Pour un flux $\phi_s = 1000 \text{ W/m}$, et une température $T_o = 300^\circ\text{K}$.

On obtient, à partir de (5), (6) et (7) :

$T_{V_1} = 373^\circ\text{K}$, $T_{V_2} = 418^\circ\text{K}$ et $T_c = 452^\circ\text{K}$.

DETERMINATION ET CALCUL DE L'ENERGIE UTILISABLE ET DU RENDEMENT η DU CAPTEUR, A DES TEMPERATURES T_c' DONNEES DU CAPTEUR PAR CIRCULATION DU FLUIDE CALOPORTEUR : ($T_c' < T_c$)
(Du point de vue rayonnement seulement).

a)- Capteur à simple vitrage :

On fera les mêmes hypothèses que précédemment.

A l'équilibre thermique, on aura donc :

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla T_c'^4 + \nabla T_o^4 - 2 \tau T_v^4 = 0 \\ \tau \phi_s + \nabla T_v^4 - \nabla T_c'^4 - Q = 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\quad \quad \quad (2)$$

1/2(1) + (2) nous donne :

$$Q = \left[\tau \phi_s + \frac{\nabla}{2} (T_o^4 - T_c'^4) \right] S$$

où : S est la surface du capteur (S = 0,36 m²)
et Q sera exprimé en Watts.

le rendement est égal à :

$$\eta = \frac{Q}{\phi_s} = \frac{S \left[\tau \phi_s + \frac{\nabla}{2} (T_o^4 - T_c'^4) \right]}{\phi_s}$$

b)- Capteur à double vitrage :

à l'équilibre thermique, on aura donc :

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla T_{v_2}^4 + \tau^2 \phi_s - \nabla T_c'^4 - Q = 0 \\ \nabla T_c'^4 + \nabla T_{v_1}^4 - 2 \nabla T_{v_2}^4 = 0 \\ \nabla T_o^4 + \nabla T_{v_2}^4 - 2 \nabla T_{v_1}^4 = 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\quad \quad \quad (2)$$

$$\quad \quad \quad (3)$$

(2(2) + (3)) et (1), nous donne :

$$Q = S \left[\tau^2 \phi_s + \frac{\nabla}{3} (T_o^4 - T_c'^4) \right]$$

Le rendement s'exprime donc :

$$\eta = \frac{Q}{\phi_s} = \frac{S \left[\tau^2 \phi_s + \frac{\nabla}{3} (T_o^4 - T_c'^4) \right]}{\phi_s}$$

TABLEAUX DE VALEURS DE L'ETUDE THEORIQUE :
(Du point de vue rayonnement seulement.)

Nous prendrons : $\phi_s = 1000 \text{ W/m}^2$
 $S = 0,36 \text{ m}^2$
 $T_0 = 300^\circ\text{K}$
 $\nabla = 5,67 \cdot 10 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$

Capteur plan à eau, à simple vitrage :

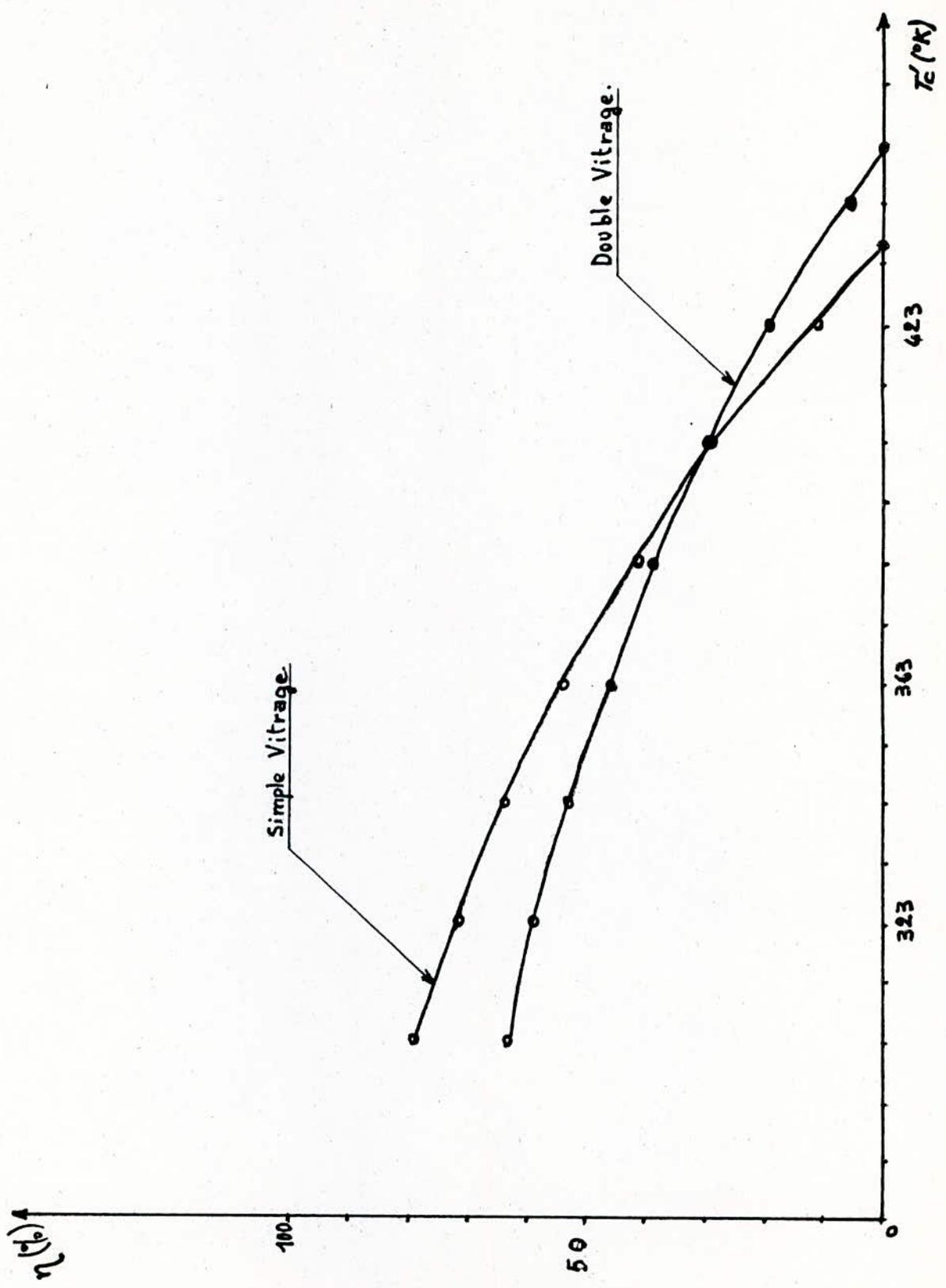
T' ($^\circ\text{K}$)	303	323	343	363	383	403	423	436
Q (W)	790	720	640	536	418	279	118	0
η	0,79	0,72	0,64	0,54	0,42	0,28	0,12	0

Capteur plan à eau, à double vitrage :

T' ($^\circ\text{K}$)	303	323	343	363	383	403	423	443	452
Q (W)	634	587	531	464	385	293	186	62	0
η	0,63	0,59	0,53	0,46	0,38	0,29	0,19	0,06	0

N.B. Les températures T_2 sont facilement déterminées en réglant la température d'entrée dans le capteur grâce à l'échangeur du Thermomix, et en connaissant la différence de température entre l'entrée et la sortie du capteur.

Courbes de rendements théoriques $\eta = f(T_c)$:



VI- CAPTEURS A CONCENTRATION :

Les moyens de collecte solaire qui augmentent l'intensité du flux à la surface du récepteur sont appelés concentrateurs. La concentration s'obtient par réflexion du rayonnement incident solaire sur des formes géométriques planes ou courbes qu'on appelle miroirs solaires.

Les rayons déviés se concentrent dans la zone focale, ainsi l'énergie reçue par unité de surface dans cette zone sera beaucoup plus importante. Le facteur de concentration dépend du diamètre apparent du soleil qui varie avec les saisons, de la position de réglage du système sur le soleil, de la nature et de la fabrication des surfaces. Le facteur de concentration a une valeur maximale de 46 400 aux équinoxes.

La concentration a certains avantages, qui sont :

- Réduction des surfaces réceptrices d'énergie solaire ; d'où une diminution des pertes thermiques (qui sont proportionnelles à la surface de captage).
- Pour des pertes identiques le système à concentration permet d'obtenir une température beaucoup plus élevée.
- Pour un flux incident identique, l'utilisation de réflecteurs permet d'obtenir des augmentations importantes de températures à la surface de l'absorbeur.
- Réduction du coût.

L'aluminium pur, utilisé pour son pouvoir réflecteur presque aussi élevé que celui de l'argent, est excellent dans l'ultra-violet et dans le spectre infrarouge. Alors on utilise généralement des tôles d'aluminium polies (par laminage) à partir d'aluminium anodisé, car son prix est très économique.

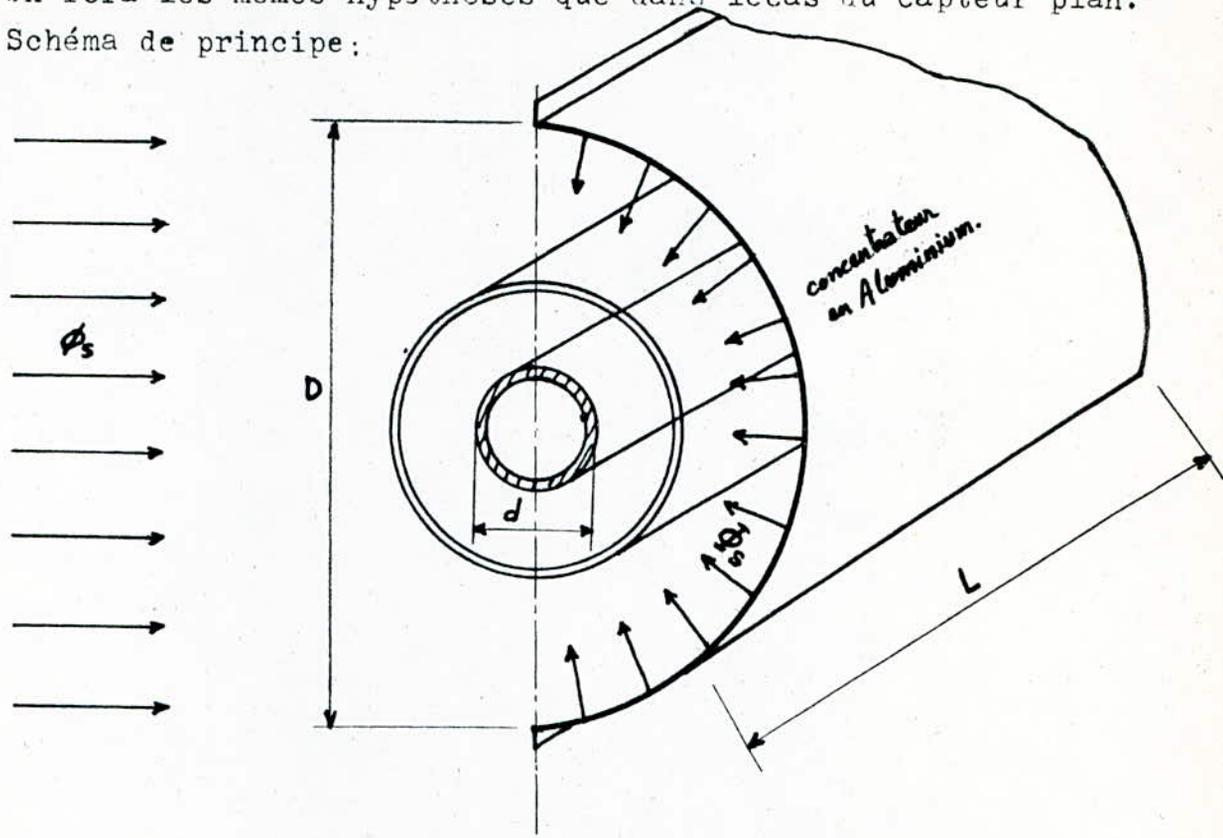
La température beaucoup plus élevée permet de stocker une quantité de chaleur plus grande pour le même volume. Et le stockage coûte donc moins cher à quantités égales que dans un système à captation plan.

Pour la réfrigération solaire et les systèmes de climatisation, il faut travailler au moins avec des températures de 90° pour obtenir des rendements intéressants, alors qu'avec un capteur plan, il faudrait un double vitrage et un absorbeur avec couches sélectives.

La concentration admet aussi quelques inconvénients comme :
Les systèmes à concentration dirigent essentiellement le rayonnement direct vers l'absorbeur. Ils récupèrent moins le diffus que les capteurs plans. Leurs utilisations ne peuvent donc pas être envisagées dans les régions à forte nébulosité. Le facteur de réflexion du miroir décroît avec le temps (salissure, piquage de l'aluminium).

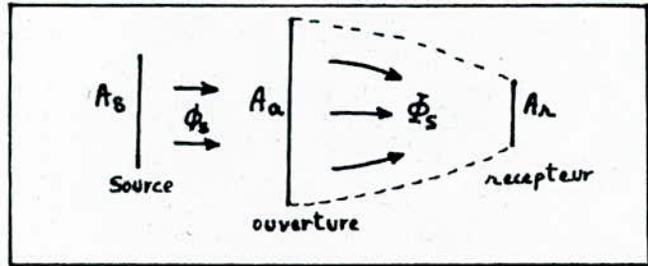
ETUDE THEORIQUE D'UN CAPTEUR PARABOLIQUE A CONCENTRATION ;
DU POINT DE VUE RAYONNEMENT SEUL.

On fera les mêmes hypothèses que dans le cas du capteur plan.
Schéma de principe :



On a : $D = 490 \text{ mm}$
 $d = 16 \text{ mm}$

On pourrait généraliser ceci par un diagramme schématique généralisé de dispositif concentrant bidimensionnel montrant la source de radiation A_s , l'ouverture A_a et le récepteur A_r . A_s , A_a , A_r sont des surfaces.



On appellera : Φ_s : le flux de rayonnement incident.
et Φ_r : la valeur de Φ_s après concentration et reçu par l'absorbeur.

On fera aussi les hypothèses suivantes :

- Le flux de rayonnement incident arrive dans un faisceau de rayons parallèles.
- La réflexion du concentrateur est pratiquement idéale et que les pertes d'énergie sont nulles :

Donc le facteur de concentration est défini par :

$$CR \equiv \frac{A_a}{A_r}$$

où A_a est la surface projetée du concentrateur, et $A_a = D \cdot L$ et A_r est la surface réceptrice (ou absorbante) et $A_r = \frac{\pi d}{2} L$ car une moitié de la surface de l'absorbeur

est soumise au flux ϕ_s et une autre moitié à $\bar{\phi}_s$.

Finalement, on peut calculer le facteur de concentration :

$$CR = \frac{A_a}{A_r} = \frac{D \cdot L}{\frac{\pi d}{2} L} = \frac{2D}{\pi d} \quad (\text{sans dimension})$$

A.N :

$$CR = \frac{2 \cdot 490}{\pi \cdot 16} = 19,49 \quad \text{soit} \quad CR \approx 19,5$$

Calcul du flux réellement reçu sur toute la surface de l'absorbeur : ϕ_r

Le bilan des flux nous donne :

$$(\pi d L) \phi_r = (d L) \phi_s + \left(\frac{\pi d}{2} L \right) \bar{\phi}_s$$

$$\text{Or} \quad \bar{\phi}_s = CR \phi_s = \frac{2D}{\pi d} \phi_s$$

Donc

$$\phi_r = \frac{1}{\pi d L} \left[d L + \frac{\pi d}{2} L \cdot \frac{2D}{\pi d} \right] \phi_s$$

soit

$$\phi_r = \frac{1}{\pi} \left(1 + \frac{D}{d} \right) \phi_s$$

A.N

$$\phi_r = 22549 \text{ w/m}^2 \quad \text{pour un flux } \phi_s = 2240 \text{ w/m}^2$$

VII GROUPE PHOTOVOLTAÏQUE :

Aujourd'hui, la conversion photovoltaïque, transformation directe de l'énergie solaire en électricité, permet d'offrir une énergie autonome pour une multitude d'applications.

Fiable, simple, de plus en plus compétitive pour des utilisations de plus en plus nombreuses, la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire s'affirme industriellement et va connaître un développement important dans les années à venir.

A partir de dispositifs appelés cellules solaires ou photopiles, on convertit le rayonnement solaire en électricité. Pour situer l'échelle, rappelons que la terre reçoit annuellement du soleil 1,6 milliards de milliards de kWh (environ), dont 40 % uniquement parviennent jusqu'à nous, le reste étant réfléchi par les hautes couches de l'atmosphère.

L'infime partie que nous pourrions capter et transformer en énergie utilisable pour l'Homme représente plusieurs centaines de fois la consommation énergétique mondiale.

Ces photopiles ont pris leur essor dans les années 50, et sont fabriquées à partir du SILICIUM.

L'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE :

La conversion photovoltaïque est le seul moyen de transformer directement l'énergie fournie par le soleil sous forme de lumière en électricité.

Cette transformation est réalisée au moyen de cellules photovoltaïques ou encore appelées photopiles, faisant appel aux propriétés des matériaux semi-conducteurs largement utilisés dans l'industrie électronique, transistors, diodes, La cellule photovoltaïque la plus courante utilise le silicium (Si), élément très répandu dans la nature sous forme de sable mais qui doit être hautement purifié.

Le fonctionnement de la cellule repose entièrement sur les propriétés électroniques différentes acquises par le silicium quand des atomes sont placés dans un réseau cristallin (dopage). Si ces atomes contiennent plus d'électrons que le silicium de base, l'ensemble ainsi formé contiendra des électrons libres en excès et sera dit de type N.

A l'inverse, un dopage à l'aide d'atomes contenant moins d'électrons que le silicium de base, l'ensemble ainsi formé contiendra des "trous" en excès et sera dit de type P.

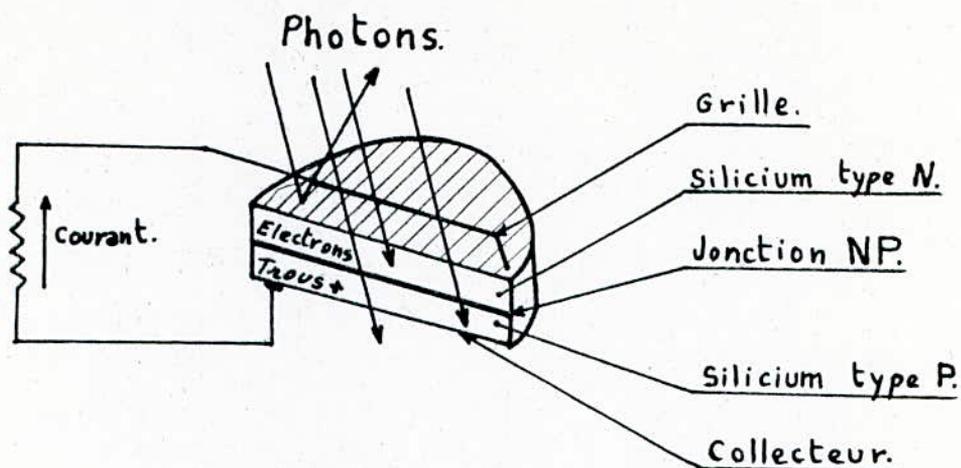
Une cellule photovoltaïque est constituée par une plaquette de silicium dopée différemment sur chacune des faces, la frontière entre ces deux zones étant appelée jonction au voisinage de laquelle les charges positives et négatives créent un champ électrique, et sont séparées.

Un photon (particule de lumière) dont l'énergie est suffisante heurtant un atome peut arracher un électron, laissant à sa place un trou.

Près de la jonction, l'électron sera accéléré par le champ électrique et pourra parvenir dans la zone de type N de même que la charge positive (trou) acquise par l'atome se propagera vers la zone de type P.

Une tension électrique apparaît donc des deux côtés de la jonction. La collecte du courant se fait en face avant par une grille conductrice (partie non masquée laissant passer de la lumière) et en face arrière sur toute la surface de la cellule. Si ces collecteurs sont reliés à un circuit extérieur un courant circulera.

L'énergie des photons est ainsi convertie en énergie électrique. Actuellement encore la fabrication des cellules photovoltaïques est toujours à base de silicium. Le diamètre des plaquettes de silicium monocristallin n'a cessé d'augmenter pour atteindre la cote de 100 mm. Ce type de matériaux, bien qu'offrant l'avantage de procurer les meilleurs rendements, il est le plus onéreux.



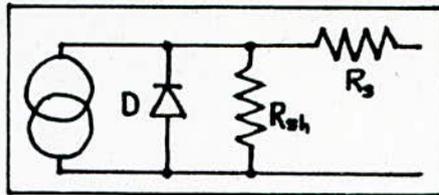
A partir de 1981, ont commencé à apparaître les premières cellules utilisant le matériau polycristallin à gros grain, pouvant être obtenu sous la forme de plaquettes carrées de 100 mm de côté.

Ainsi la différence de surface entre des deux types de plaquettes (environ 28 %) permet d'offrir des performances identiques tout en éliminant une étape de fabrication coûteuse.

CELLULES PHOTOVOLTAIQUES :

Exposée à un flux de photons (présence de lumière), une cellule photovoltaïque peut être considérée comme une source de courant variable et de tension fixe.

Au plan électrique, une cellule se comporte comme un générateur de courant monté en parallèle avec une diode D et une résistance shunt R_{sh} et en série avec une autre résistance R_s . (voir figure suivante)



Les valeurs respectives de ces éléments déterminent les performances de la cellule, en particulier la courbe tension-courant ($I = f(V)$).

Dans des conditions d'éclairement et de température spécifique, trois points de cette courbe définissent les caractéristiques normalisées des cellules :

- .. le point de fonctionnement optimal, pour lequel une cellule délivre sa puissance maximale (P_{max}). A ce point correspondent des valeurs de tension (tension nominale V_1) et de courant (courant nominal I_1).
- .. le point où la tension est nulle et la valeur de courant maximale (courant de court-circuit I_{cc}).
- .. le point où le courant est nul et la valeur de tension maximale (tension en circuit ouvert V_{co}).

Dans le cadre d'une utilisation, les valeurs de tension et de courant débités par les cellules seront dépendantes des conditions d'ensoleillement et de température du lieu considéré.

INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT : (figure a)

La valeur du courant délivré par le module est pratiquement proportionnelle à la quantité de photons reçues par la cellule, alors que la tension est relativement constante. De ce fait, la valeur de la puissance débitée par la cellule sera elle-même proportionnelle à la valeur de l'éclairement. Cette caractéristique essentielle montre que même pour des valeurs d'ensoleillement modestes (matin, soir, passage de nuages), une cellule est capable de débiter une puissance.

INFLUENCE DE LA TEMPERATURE : (figure b)

Une augmentation de la température modifie les performances des cellules. Pendant que le courant de court-circuit I_{cc} augmente, la tension de circuit ouvert diminue. Il en résulte une légère diminution de la puissance maximale qui devra être prise en compte lors d'un calcul de dimensionnement.

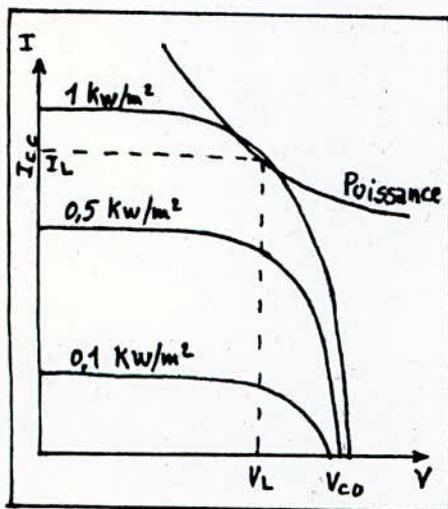


Figure a:

Influence de l'éclairement

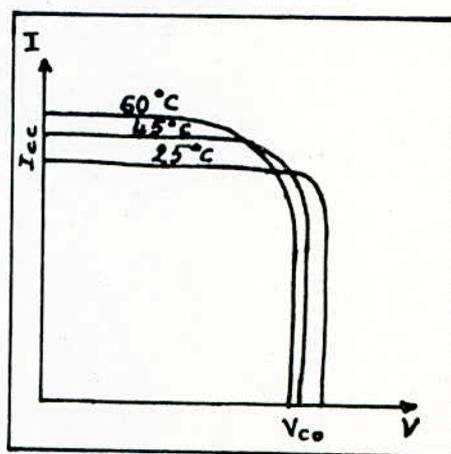


Figure b:

Influence de la température

MODULES PHOTOVOLTAIQUES :

La cellule est évidemment le composant essentiel d'un système photovoltaïque mais rare sont les applications directes sous cette forme.

En effet, les caractéristiques mécaniques d'une cellule (fragilité) est de résistance à l'humidité, ne pourraient lui garantir la longévité de ses performances.

D'autre part, les caractéristiques d'une seule cellule (tension unitaire voisine de 0,5 volt, puissance ...) ne permettent généralement pas d'alimenter directement un équipement électrique dont les tensions de fonctionnement sont normalisées (12,24,48 volts). C'est pourquoi les cellules sont connectées électriquement (montage en série) et assemblées en module pour constituer des systèmes résistants, hermétiques, et de tensions conventionnelles.

PROTECTION DES MODULES :

Le raccordement électrique des modules entre eux et aux autres constituants d'un générateur photovoltaïque (régulateur de charge, batterie...) nécessite une protection contre certaines détériorations éventuelles.

a) DIODE ANTI-RETOUR : (figure c)

Ce type de diode protège les cellules contre la décharge de la batterie au travers des modules en période de nuit et contre la circulation de courant inverse dans la branche de module de plus faible puissance en cas de déséquilibre de tension.

b). DIODE BY-PASS : (figure d)

Ce type de diode protège les cellules contre les phénomènes d'échauffement destructifs pouvant résulter d'un masquage accidentel d'une partie de x module (ombre, feuille d'arbre, salissure...).

En fonction du type de module, la protection s'effectuera sur des groupes de cellules à l'intérieur de chaque module dont la connectique permet d'assurer cette protection.

Figure c: Diode anti-retour

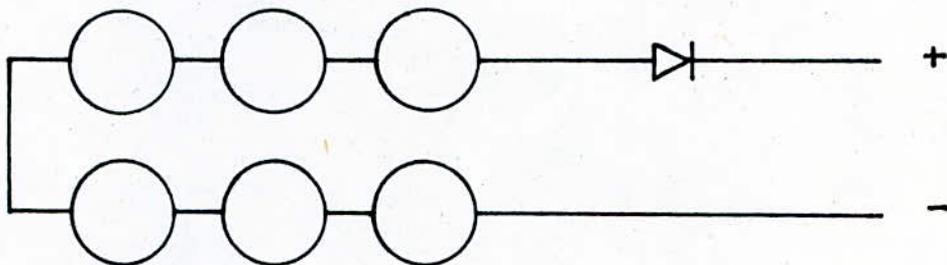
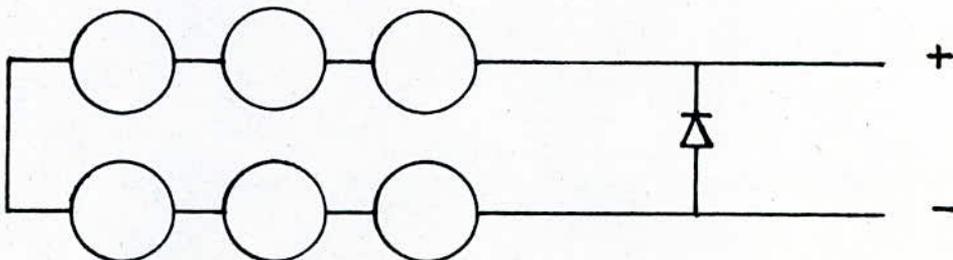


Figure d: Diode by-pass



VIII - ETUDE EXPERIMENTAL DU CAPTEUR A SIMPLE ET DOUBLE VITRAGE :

Pour des températures d'entrées (T_e) dans le capteur, on fait varier le débit q_v et on prélève la différence de température (ΔT) entre la sortie et l'entrée du capteur.

A partir de ceci, on détermine la température moyenne T_c du capteur par :

$$T_c = T_e + \frac{\Delta T}{2}$$

Pour chacune des températures d'entrée T_e dans le capteur, on prélève à partir d'abaques, les valeurs de ρ (kg/m^3) et C_p ($\text{J/kg } ^\circ\text{C}$), car ρ et C_p varient légèrement en fonction de la température de l'eau.

La puissance reçue par le fluide caloporteur s'exprime par :

$$P(w) = q_v \cdot \Delta T \cdot \rho \cdot C_p$$

Après avoir relevé au fur et à mesure des manipulations, la valeur du flux du rayonnement solaire (ϕ_s) reçu sur l'absorbeur, on peut écrire l'expression du rendement du capteur par :

$$\eta = \frac{P}{S \phi_s} \quad \text{où } S : \text{ surface de l'absorbeur (m}^2\text{)}$$

soit :

$$\eta = \frac{q_v \cdot \Delta T \cdot \rho \cdot C_p}{S \phi_s}$$

Les résultats sont résumés sur les tableaux qui suivent, sur l'annexe 2.

. Calcul d'incertitude :

En passant par les logarithmes, on a :

$$\ln \eta = \ln \left(\frac{q_v \cdot \Delta T \cdot \rho \cdot C_p}{S \phi_s} \right)$$

soit $\ln \eta = \ln q_v + \ln \Delta T + \ln \rho + \ln C_p - \ln S - \ln \phi_s$.

En dérivant membre à membre, on obtient :

$$\frac{d\eta}{\eta} = \frac{dq_v}{q_v} + \frac{d\Delta T}{\Delta T} + \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dC_p}{C_p} - \frac{dS}{S} - \frac{d\phi_s}{\phi_s}$$

soit :

$$\frac{\Delta \eta}{\eta} = \frac{\Delta q_v}{q_v} + \frac{\Delta (\Delta T)}{(\Delta T)} + \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta C_p}{C_p} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \phi_s}{\phi_s}$$

soit, donc :

$$\Delta \eta = \eta \left[\frac{\Delta q_v}{q_v} + \frac{\Delta(\Delta T)}{(\Delta T)} + \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta c_p}{c_p} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \phi_s}{\phi_s} \right]$$

les erreurs que nous avons probablement commises sont :

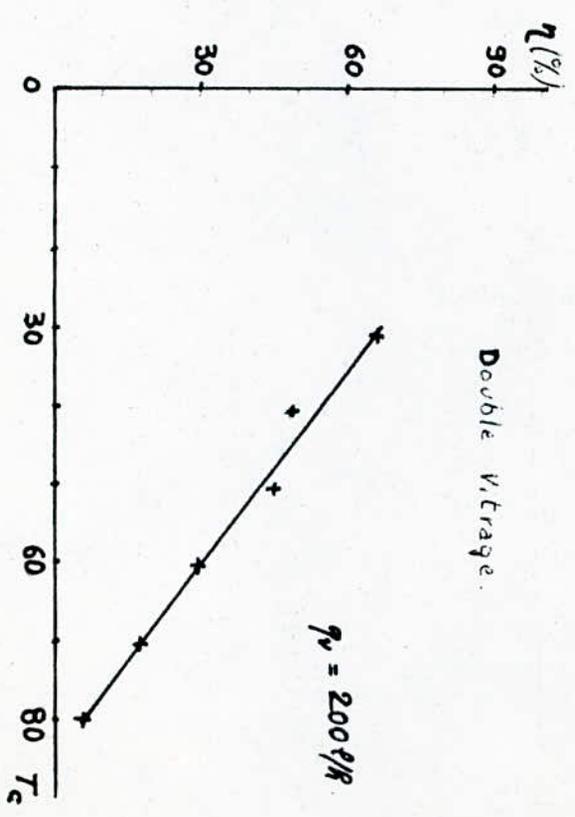
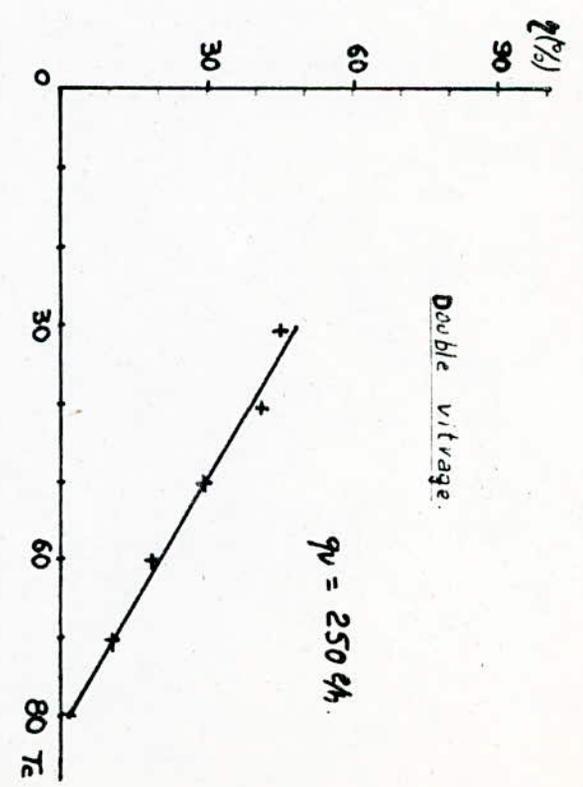
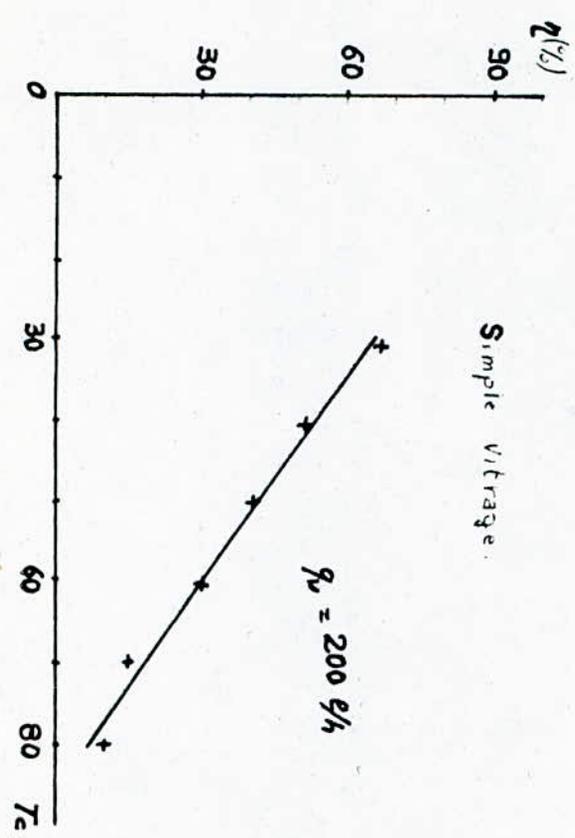
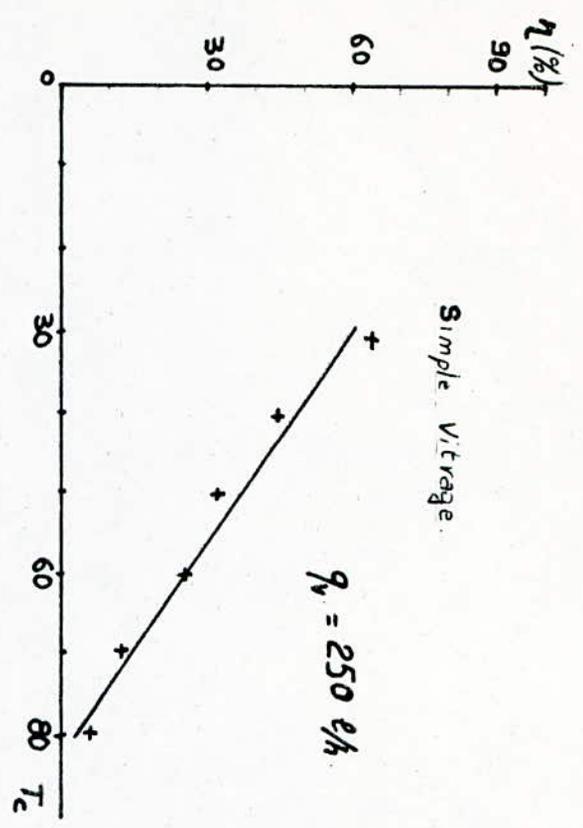
- $\Delta q_v = 5 \text{ l/h.}$: due à l'imprécision du débitmètre et aux impuretés dans l'eau de ville d'alimentation.
- $\Delta(\Delta T) = 0,02 \text{ }^\circ\text{C.}$: erreur due à la stabilisation trop longue de la valeur et aux courants d'air circulant sur la surface du capteur.
- $\Delta \rho = 0,1 \text{ kg/m}^3$: erreur de lecture sur le graphe
- $\Delta c_p = 0,1 \text{ J/kg }^\circ\text{C.}$: erreur de lecture sur le graphe
- $\Delta S = 0,0025 \text{ m}^2$: erreur de lecture sur l'instrument de mesure (la règle).
- $\Delta \phi_s = 20 \text{ w/m}^2$: due au fait que le flux n'est pas du tout réparti de façon uniforme sur la surface du capteur et que la plus grande valeur se trouve au centre. La cause est que la distance projecteur-capteur est trop faible (environ 2m)
- (en artificielle).
- $\Delta \phi_s = 10 \text{ w/m}^2$: due au passage brusque d'un nuage ou d'une ombre au dessus du capteur lors d'une manipulation.
- (en naturelle).

Finalement l'ordre de grandeur de l'erreur sur la valeur du rendement est :

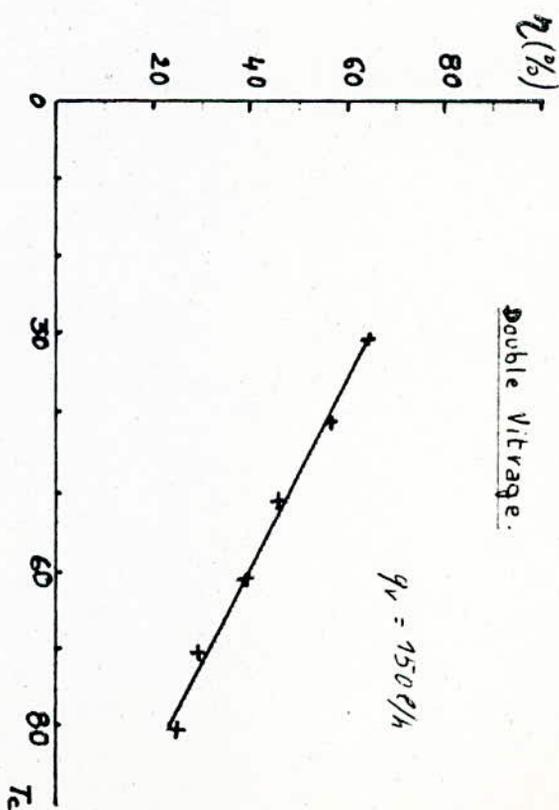
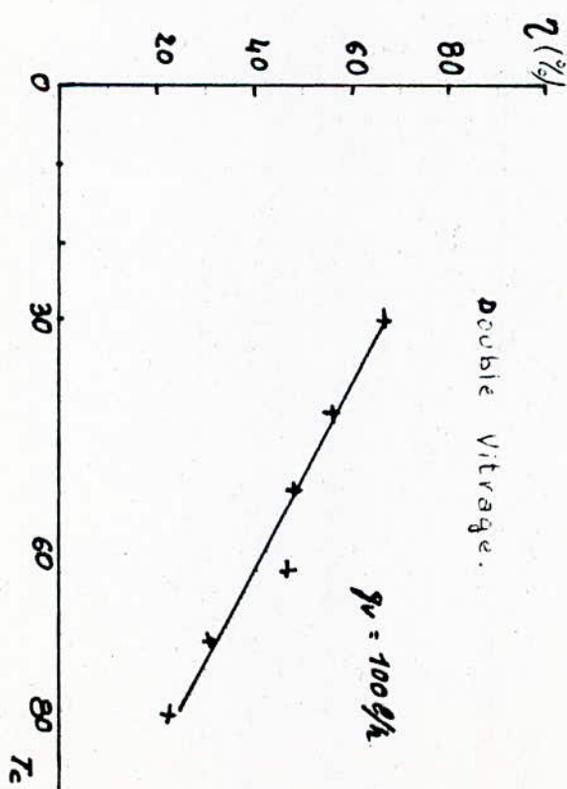
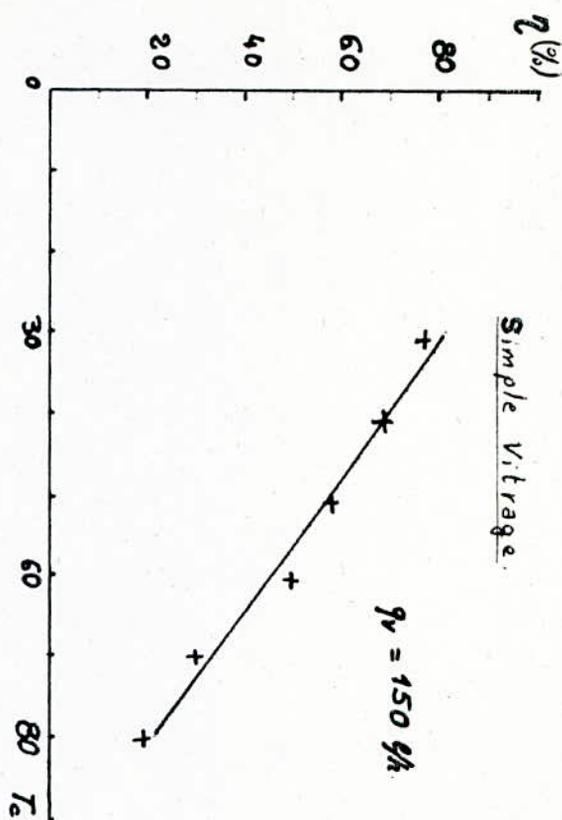
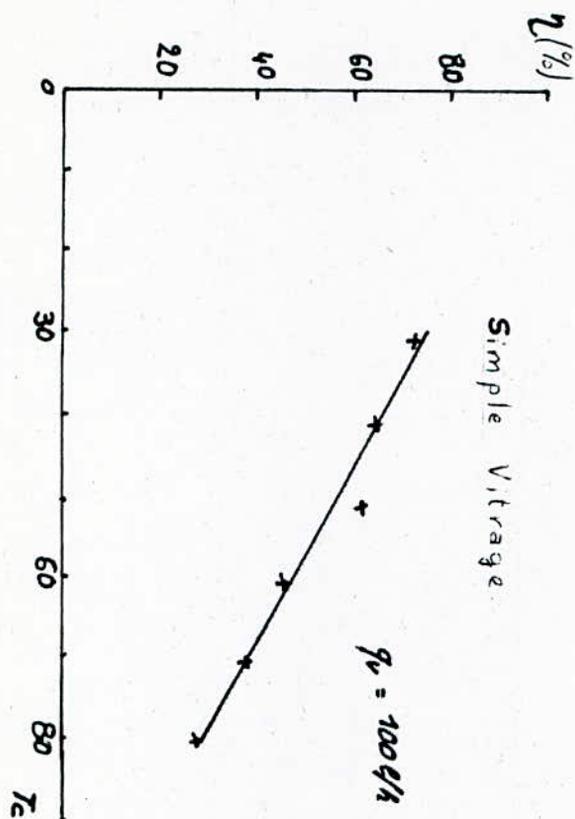
$$\Delta \eta = 6 \%$$

N.B.: Ceci n'est valable que dans le cas d'un régime parfaitement permanent. Car sinon, le problème d'inertie thermique se posera !

Courbes de rendement, $\eta = f(T_c)$: Source Artificielle.

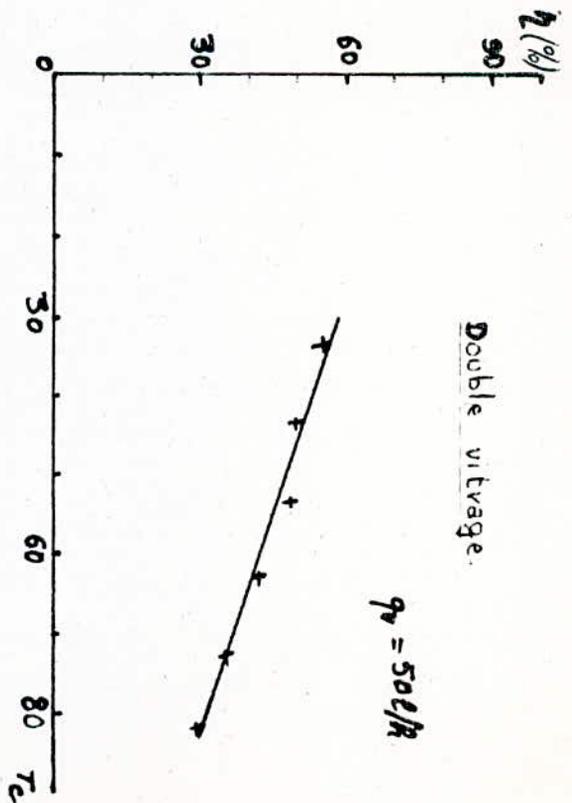
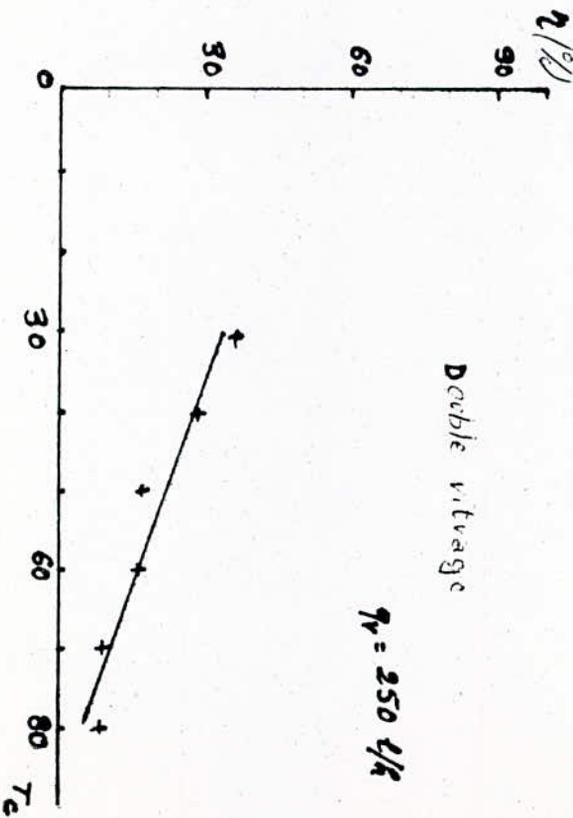
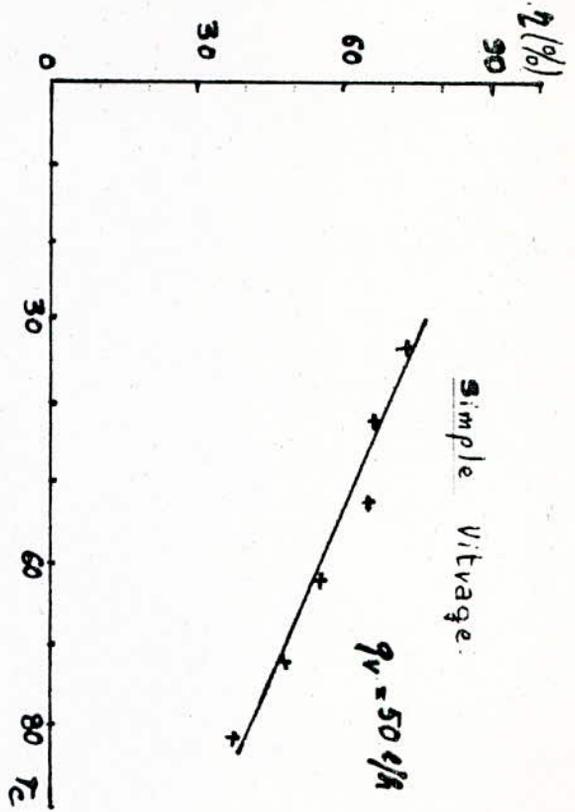
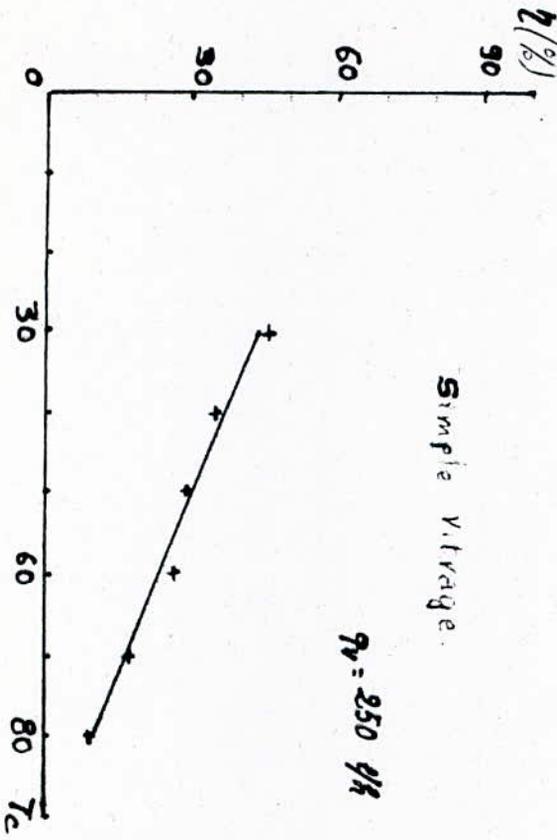


Courbes de rendement, $\eta = f(T_c)$: Source Artificielle.

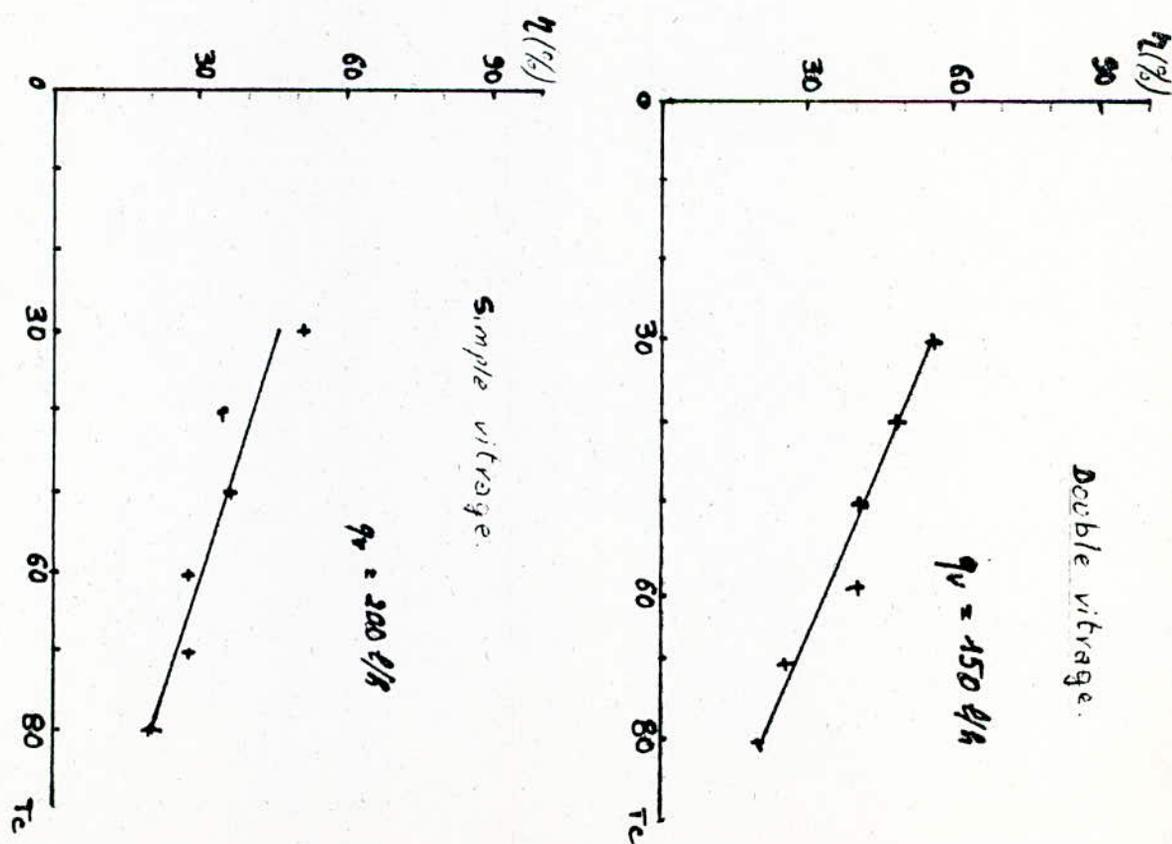
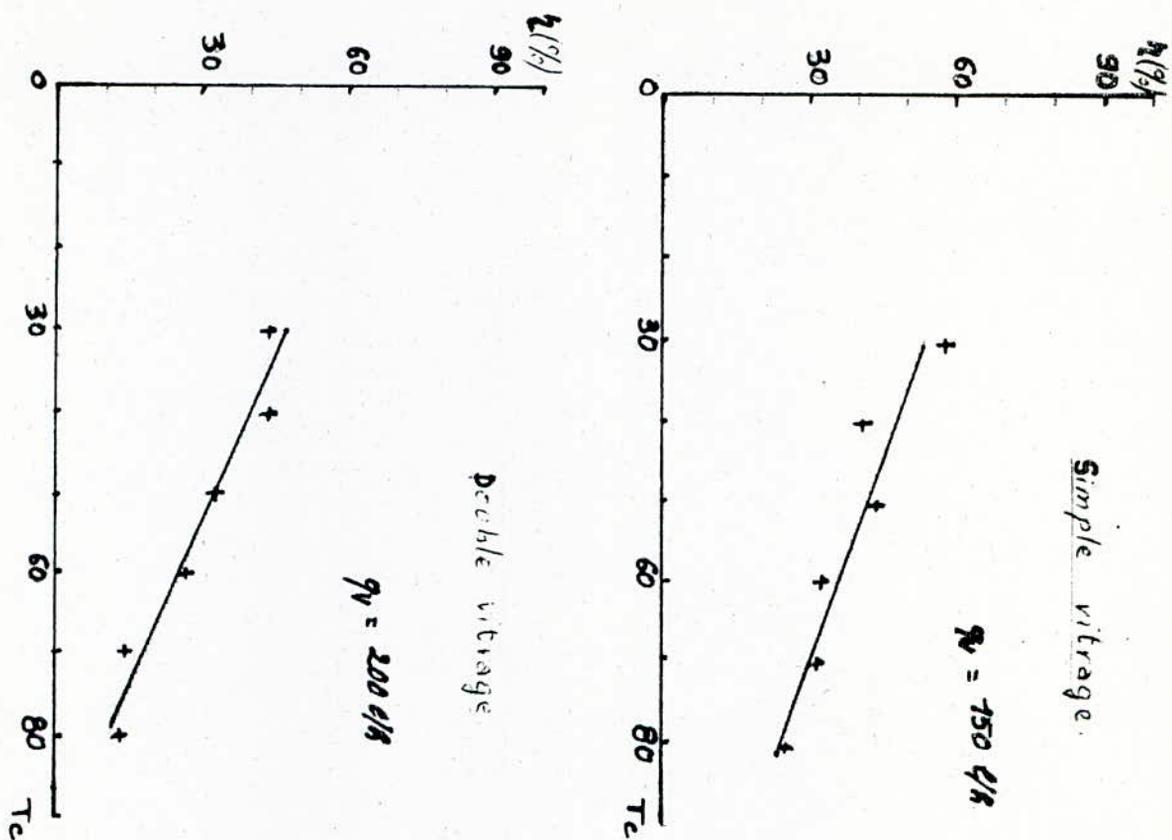


Source Naturelle:

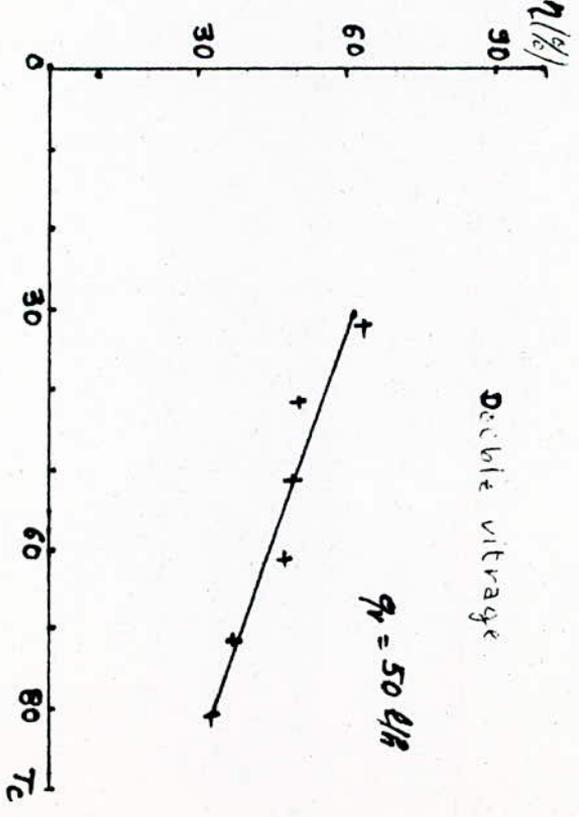
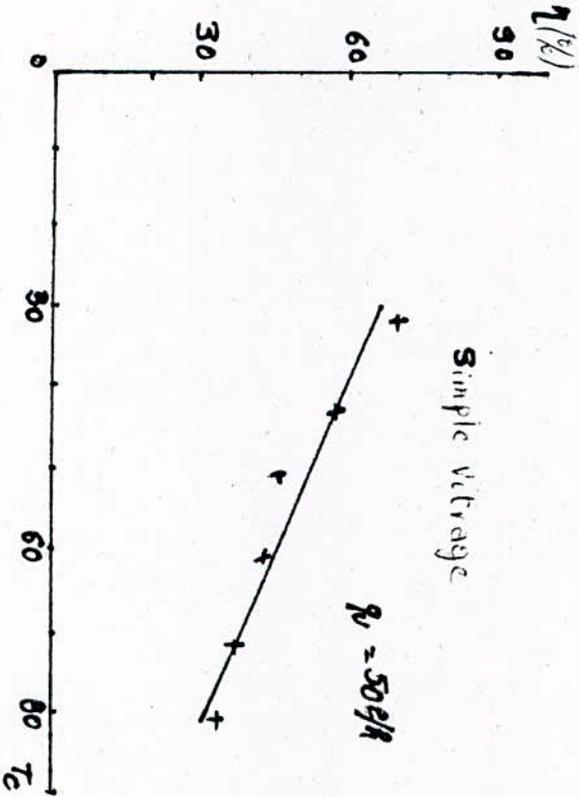
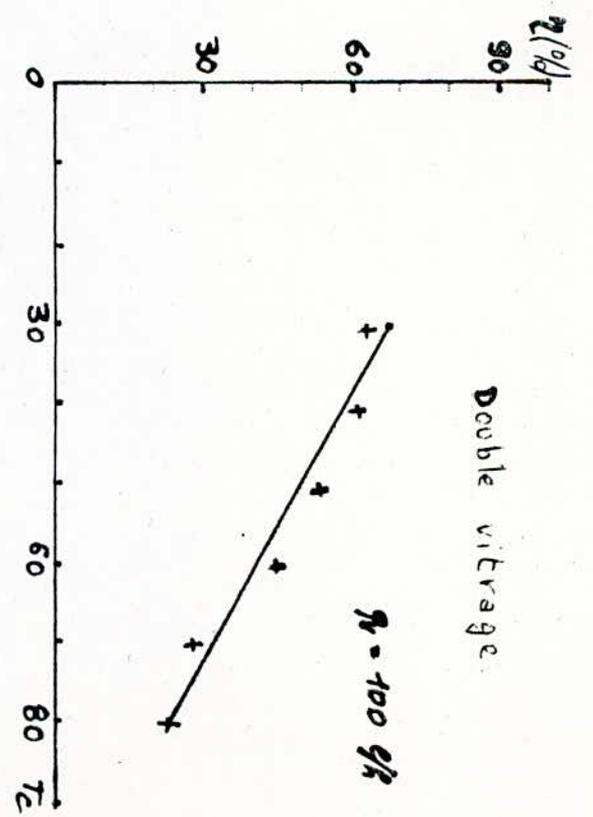
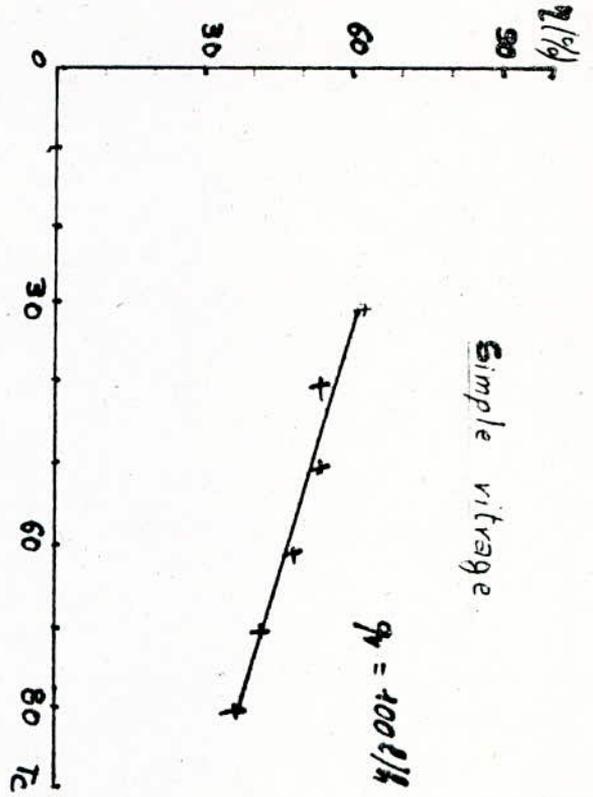
Source Artificielle:



Courbes de rendement, $\eta = f(T_c)$: Source naturelle.



Courbes de rendement, $\eta = f(T_c)$: Source naturelle.



TRACE ET INTERPRETATION GRAPHIQUE DE $\eta = f(T_c)$ pour UN DEBIT DONNÉ.

L'expression du rendement est :

$$\eta = \frac{q_v \Delta T \cdot \rho \cdot C_p}{S \phi_s} \quad (1)$$

et l'expression de T_c est :

$$T_c = T_e + \frac{\Delta T}{2} \quad (2)$$

A partir de (2) on a :

$$\Delta T = 2(T_c - T_e) \quad (3)$$

en remplaçant (3) dans (1) on obtient :

$$\eta = \frac{2 \cdot q_v \cdot \rho \cdot C_p}{S \phi_s} \cdot (T_c - T_e)$$

soit :

$$\eta = \left[\frac{2 \cdot q_v \cdot \rho \cdot C_p}{S \phi_s} \right] T_c - \left[\frac{2 \cdot q_v \cdot \rho \cdot C_p \cdot T_e}{S \phi_s} \right] \quad (4)$$

Etant donnée que l'on trace chacune des courbes $\eta = f(T_c)$ pour un débit donné, donc q_v est constant dans (4).

On travaille aussi qu'avec un seul et même capteur donc la surface S est constante. Le flux de rayonnement ϕ_s également est constant.

En réalité la masse volume ρ et la chaleur spécifique C_p varient en fonction de la température de l'eau, mais ce sont deux paramètres qui varient très légèrement. C'est pour cela qu'on pourra faire l'approximation très raisonnable en disant que le produit $\rho \cdot C_p$ est constant et ne varie pas en fonction de la température, c'est-à-dire, ρ et C_p pratiquement constant en particulier entre 20° et 80°C. Aussi l'erreur commise en faisant cette approximation est inférieur à 3 %.

Donc finalement la forme de l'expression du $\eta = f(T_c)$ peut être :

$$\eta = A \cdot T_c + B \quad \text{où } A \text{ et } B \text{ sont des constantes.}$$

Donc l'allure des courbes seront des droites que l'on tracera par lissage à l'aide de la méthode des moindres carrés.

CONCLUSION :

A partir de ces courbes obtenues, on remarque les points essentiels suivants :

- 1°)- Pour une même valeur du débit q_v , le rendement η diminue avec la température d'entrée T_e .
- 2°)- Pour une même valeur de la température d'entrée T_e , le rendement augmente lorsque le débit q_v diminue.
- 3°)- Les rendements du capteur à simple vitrage sont généralement (presque toujours) supérieurs aux rendements du capteur à double vitrage pour des températures d'entrées T_e comprise entre 30° et 85°C. Ce qui correspond bien avec le tracé des courbes de rendements théoriques étudiées précédemment.
- 4°)- Aussi, quand on diminue le débit q_v , la pente de la droite des rendements diminue.

AMELIORATION DES COURBES DE RENDEMENTS :

Au niveau de l'utilisation, on est généralement concerné que par le choix d'un capteur, sa mise en oeuvre et ses performances globales.

En partant de l'expression de BLISS-WILLIER, nous pouvons présenter un sommaire pratique du rendement des capteurs et l'influence de différents paramètres sur ce rendement.

L'expression de BLISS-WILLIER est :

$$\eta = F_R \left[\eta_o - \frac{(T_e - T_o)}{I_c} \right] \quad \text{N.B: } I_c \equiv \phi_s$$

Il y a trois facteurs principaux permettant l'amélioration des courbes de rendements :

- . le rendement optique η_o
- . le coefficient des pertes U
- . Le facteur de conductance de l'absorbeur F_R

a) Le rendement optique : η_o

Il dépend essentiellement du coefficient d'absorption α_a de l'absorbeur pour le rayonnement solaire, du facteur de transmission τ et τ_d ainsi que du coefficient de réflexion f_d du vitrage, comme le montre l'expression suivante, (vu précédemment):

$$\eta_o = \frac{\alpha_a}{1 - f_d(1 - \alpha_a)} \left[\frac{I_{b_i} \tau}{I_c} + \frac{I_{d_i} \tau_d}{I_c} \right]$$

Donc améliorer η_o veut dire :

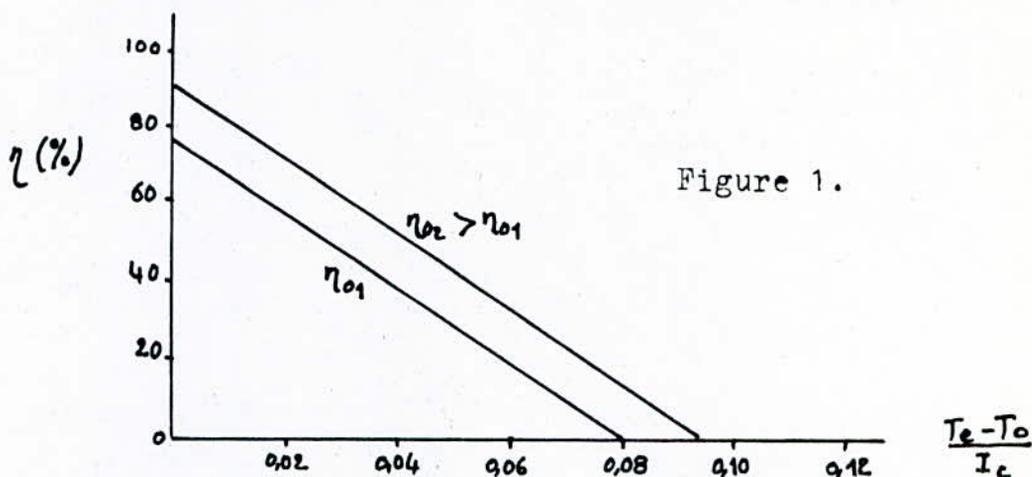
- augmenter α_a .
- augmenter τ et τ_d .
- diminuer f_d .

On augmente α_a en utilisant des peintures noires mates et on arrive à des valeurs proches de 0,95. L'augmentation de τ et la diminution de f ne peuvent s'obtenir que par l'utilisation de couvertures transparentes adéquates

Généralement ce sont les capteurs à simple vitrage qui ont un meilleur rendement optique.

Les valeurs du rendement optique des capteurs actuellement sont de l'ordre de 0,7 à 0,9 lorsque le soleil se trouve à la normale du capteur.

Ces valeurs diminuent lorsque i augmente au delà de 40° , car i influe sur α_a , β et τ . (déjà vu précédemment).



Cette figure montre l'incidence de l'augmentation de η_0 sur la droite de rendement. On notera qu'une telle augmentation se traduit physiquement par une même amélioration du rendement η pour toutes les valeurs de $\frac{T_e - T_0}{I_c}$, ainsi que par une amélioration du point seuil de fonctionnement $\frac{T_e - T_0}{I_c} /_{max}$ max qui correspond à $\eta = 0$.

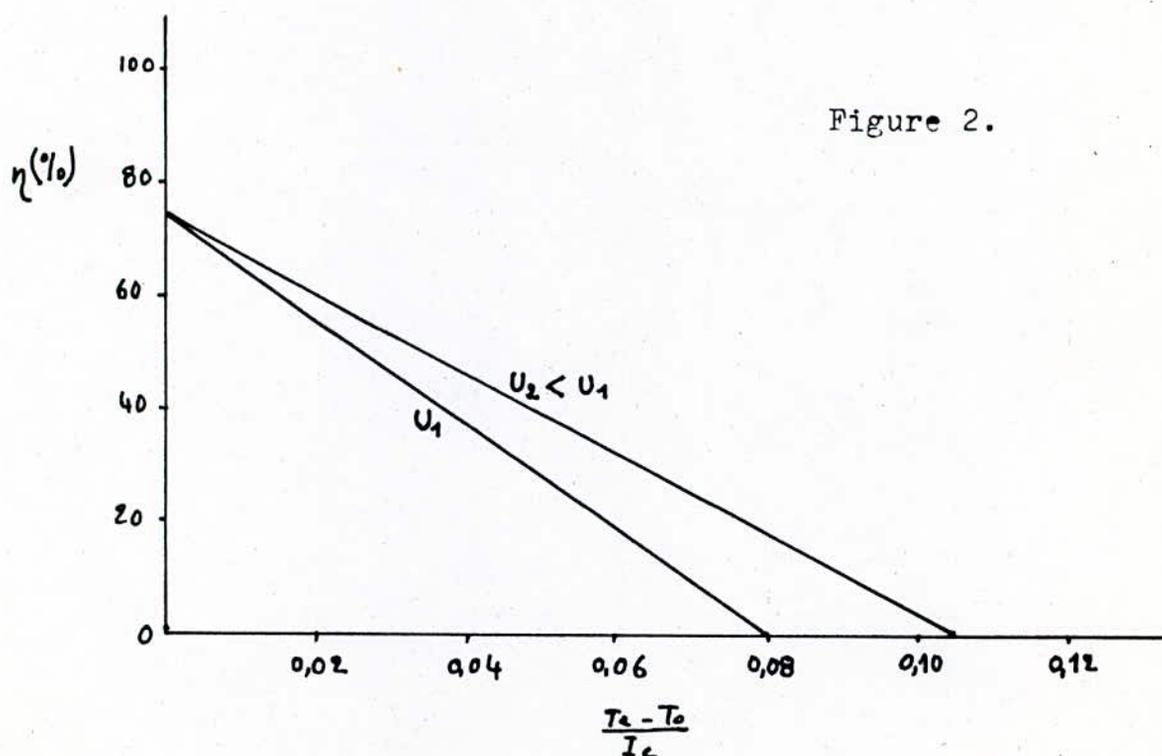
b) Coefficient des pertes : U

Les pertes des capteurs qui s'écrit $U(T_e - T_0)$ dépendent surtout des phénomènes de convection, rayonnement et conduction entre l'absorbeur et les parois vitrées. Les pertes vers l'arrière sont généralement négligeables grâce à la couche d'isolation. Afin de diminuer les pertes vers l'avant, plusieurs possibilités sont disponibles :

- La première est d'augmenter le nombre de vitrage (N), qui aura effectivement pour effet de diminuer U .

Mais comme on l'a vu précédemment, l'augmentation de N a pour effet d'augmenter β et de diminuer τ d'où un effet négatif sur η_0 . En passant de $N = 1$ à $N = 2$ (double vitrage), η_0 diminue de l'ordre de 7 %, et U est généralement diminué de 30 % c'est pour cela qu'en pratique, il est rare d'utiliser plus de deux vitrages.

- La deuxième possibilité pour diminuer U est de recouvrir l'absorbeur d'une couche sélective : qui veut dire que l'on obtient des surfaces avec α très élevées dans la spectre solaire et un coefficient d'émission très faible dans l'infrarouge. L'avantage des surfaces sélectives sur le double vitrage est dû au fait que ces surfaces diminuent U sans pour autant diminuer η_0 de façon appréciable.
- Il y a encore beaucoup d'autres solutions qui seraient assez longues à expliquer.



Cette figure 2 montre l'incidence de la diminution de U sur la droite de rendement. On notera une amélioration de η proportionnelle à la valeur de l'abscisse $(T_2 - T_0)/I_c$ et une nette augmentation du point seuil de fonctionnement.

Physiquement ceci veut dire de meilleures performances quand la température de stockage est élevée, la température ambiante faible et le niveau d'ensoleillement I_c faible, qui est une caractéristique importante lorsqu'on veut faire fonctionner les capteurs à des températures élevées (exemple : climatisation solaire), ou lorsque l'on veut utiliser des capteurs dans des sites où les conditions climatiques sont défavorables.

c) Facteur de conductance de l'absorbeur : F_R .

F_R est le troisième facteur à affecter les performances d'un capteur, qui traduit la capacité d'un absorbeur à communiquer l'énergie qu'il absorbe au fluide caloporteur.

A partir de la définition de F_R (vu précédemment), on peut écrire :

$$F_R = \frac{G C_p}{U} \left[I_c - e^{-\frac{U F'}{G C_p}} \right]$$

où F' représente le rapport entre la résistance thermique absorbeur-ambiance et fluide-ambiance.

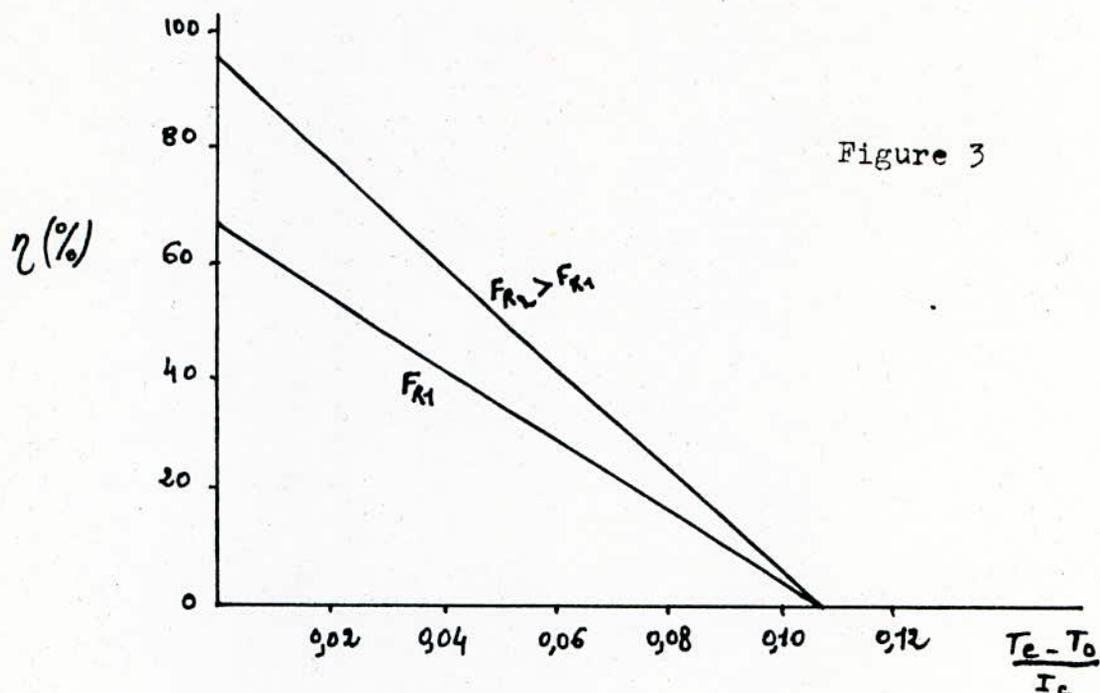
On voit que pour améliorer F_R on doit :

- diminuer les pertes U
- augmenter F'
- augmenter $G C_p$.

La valeur du paramètre F' dépend essentiellement de la configuration géométrique de l'absorbeur et de U .

L'incidence de $G C_p$ sur F_R est assez importante. La chaleur spécifique C_p est généralement imposée par d'autres considérations telles que : fluide bon marché, non corrosif,

Le choix de la valeur convenable du débit massique G du fluide par unité de surface est fait en tenant compte de l'amélioration du rendement.



Cette figure montre l'incidence d'une augmentation de F_R sur η le rendement du capteur. Contrairement au cas précédent, le point seuil de fonctionnement correspondant à $\eta = 0$ n'est pas affecté et η augmente surtout aux faibles valeurs de l'abscisse. Physiquement ceci correspond à une amélioration du rendement lorsque l'ensoleillement et la température ambiante sont élevés et que la température de stockage est faible.

METHODE DE CALCUL POUR LA DETERMINATION DU RENDEMENT :

Pour une température T_e du fluide caloporteur à l'entrée du capteur, un flux de rayonnement solaire \mathcal{Q}_s , un débit volumique q_v traversant le capteur, donnés, nous n'aurons qu'à suivre les onze étapes suivantes de calcul :

a) - Vitesse moyenne du fluide :

$$v = \frac{q_v}{\pi \frac{d^2}{4}} = \frac{4 q_v}{\pi d^2}$$

b) - Nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu}$$

où : ρ : densité volumique (kg/m³)

v : vitesse du fluide dans le capteur (m/s)

d : diamètre intérieur de la conduite (m)

μ : viscosité dynamique (kg/m.s)

C_p : chaleur spécifique (J/g°C)

k : conductivité (W/m.K)

c) - Nombre de Prandtl :

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k}$$

d) - Nombre de Nusselt : Nu : Cas de convection forcée.

Les expressions de Nusselt varient suivant que le régime soit laminaire, turbulent ou de type mixte, donc le nombre de Nusselt dépendra du nombre de Reynolds.

.. Cas d'écoulement laminaire dans la conduite :

soit donc : $Re < 2300$

* Lorsque : $Re \cdot Pr \cdot \frac{d}{l} > 10$, alors;

$$Nu = 1,86 \left(\frac{\mu_m}{\mu_f} \right)^{0,14} (Re \cdot Pr \cdot \frac{d}{l})^{0,33} \quad (\text{d'après Photowatt}).$$

où : l : longueur de la conduite

μ_m : viscosité dynamique moyenne qui est fonction de la température.

μ_f : viscosité dynamique à la paroi de la conduite qui est aussi fonction de la température.

Comme les températures à l'axe de l'écoulement et sur la paroi sont sensiblement égales, donc on pourra faire l'approximation raisonnable en prenant : $\frac{\mu_m}{\mu_f} \approx 1$ (dûe au fait que l'écoulement est laminaire).

* Lorsque : $Re \cdot P_n \cdot \frac{d}{\ell} > 100$, Alors :

$$Nu = \left(Re \cdot P_n \cdot \frac{d}{\ell} \right) \log \left\{ \frac{1}{1 - 2,654 / Re^{0,167} \left(Re \cdot P_n \cdot \frac{d}{\ell} \right)^{0,5}} \right\} \quad (\text{d'après "Photowatt"})$$

où : d : désigne le diamètre hydraulique $d = \frac{4S}{P}$
avec S la surface de la section et P le périmètre.

.. Cas d'écoulement turbulent dans la conduite :

soit donc : $Re > 4000$.

Lorsque $0,7 < P_n < 700$ et $l/d > 60$, on a :

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot P_n^{0,33}$$

et pour $l/d < 60$, on a :

$$Nu = 0,023 \left(1 + \frac{d}{\ell} \right)^{0,7} Re^{0,8} \cdot P_n^{0,33} \quad (\text{d'après "Photowatt"})$$

e) - Coefficient de transfert de chaleur du fluide :

$$h = \frac{Nu \cdot k}{d}$$

f) - Coefficient de perte de chaleur du capteur :

$$U = \frac{Q_p}{S(T_c - T_o)}$$

où :

- Q_p : énergie perdue par le capteur.
- S : surface du capteur ($S = 0,36 \text{ m}^2$).
- T_c : température moyen du capteur.
- T_o : température ambiante ($T_o = 25^\circ\text{C}$)
- T_e : température d'entrée du fluide au capteur.
- T_s : température de sortie.

Le calcul de Q_p se fait par :

$$Q_p = \frac{S(T_c - T_o)}{N/\left(\frac{c}{T}\right) \left[\frac{T_c - T_o}{N+F} \right]^{0,33} + 1/h_{c,\infty}} + \frac{\nabla(T_c^4 - T_o^4) S}{1/\left[\varepsilon_a + 0,05 N(1 + \varepsilon_a) \right] + (2N+F-1)/(E_v - N)}$$

avec :

- N : nombre de vitrage.
- $h_{c,\infty}$: coefficient de transfert de chaleur entre le capteur et l'environnement.

$$h_{c,\infty} = 5,7 + 3,8 V \quad \text{avec} \quad 3 \leq V \leq 10 \quad V : \text{vitesse du vent.}$$

soit β : angle d'inclinaison du capteur ($\beta = 30^\circ = 0,5236 \text{ rad}$)

$$c = 365,9 (1 - 0,00883 \beta + 0,0013 \beta^2)$$

$$f = (1 - 0,04 \cdot h_{c,\infty} + 0,0005 \cdot h_{c,\infty}^2) (1 + 0,091 \cdot N)$$

ϵ_a : coefficient d'émission en IR de l'absorbeur : $\epsilon_a = 0,1$.

ϵ_v : coefficient d'émission en IR du vitrage : $\epsilon_v = 0,01$.

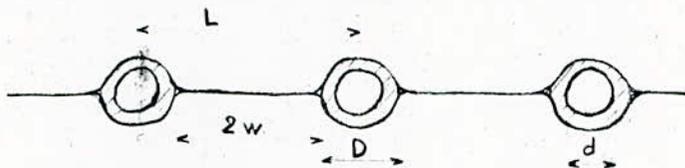
g) - Efficacité des ailettes :

La plaque de cuivre fait office d'ailettes pour les tubes où circule le fluide caloporteur. L'efficacité s'exprime :

$$\eta_e = \frac{th \, m \, w}{m \, w} \quad \text{avec,} \quad m = \left(\frac{U}{K t} \right)^{\frac{1}{2}}$$

où K : conductivité du cuivre ($K = 390 \text{ W/m}^\circ\text{C}$)

t : épaisseur de la plaque de cuivre ($t = 0,4 \text{ mm}$)



$$d = 10 \text{ mm}$$

$$L = 25 \text{ mm}$$

$$w = 7,1 \text{ mm}$$

h) - Facteur d'efficacité du capteur :

$$F_e = \frac{1/U}{L \left[1/U (d + 2w \eta_e) + 1/h \pi d \right]}$$

i) - Facteur de transfert de chaleur :

$$F_t = \frac{f \, q_v \, c_p}{U} \left[1 - \exp\left(-\frac{U F_e}{f \, q_v \, c_p}\right) \right]$$

j) - Energie utile :

$$q_u = S F_t \cdot (\alpha \cdot \tau \cdot \phi_s - U (T_e - T_c))$$

où ϕ_s : flux de rayonnement incident (W/m^2)

α : coefficient d'absorption de l'absorbeur ($\alpha = 0,90$)

τ : transmittivité du vitrage ($\tau = 0,80$)

k) - Rendement du capteur :

$$\eta = \frac{q_u}{S \phi_s}$$

EVALUATION DES PERTES DU CAPTEUR :

- Réflexion du rayonnement par la vitre :

Le facteur de réflexion R réduit l'énergie incidente dans la proportion de :

$$R = \frac{n - 1}{n + 1} \quad \text{sous l'incidence normale.}$$

(Formule de Fresnel)

En prenant $n = 1,5$ pour un vitrage ordinaire, on trouve 4% .
Et comme il y a réflexion sur chaque face, alors :

$$R = 8 \% .$$

- Absorption du rayonnement par la vitre :

Sa valeur est fournie par la loi de Lambert-Bouguer ;

$$\phi_s = \phi_s^* \exp(-Kx)$$

où,

x : épaisseur de la vitre.

K : facteur d'absorption du verre.

ϕ_s^* : rayonnement direct reçu au sol par ciel clair, par ciel moyen .

ϕ_s : rayonnement incident totale .

Les valeurs retenues sont généralement de l'ordre de 7 % pour les vitrages sur le marché .

- Pertes par convection dans la lame d'air entre l'absorbeur et le vitrage : (convection naturelle)

Elles s'exprime par :

$$Q_c = \alpha_c \cdot S \cdot (t_a - t_v)$$

où,

t_a : température absorbeur.

t_v : température vitrage.

α_c : coefficient d'échange par convection.

Pour trouver α_c , on fait appel au nombre de Nusselt et au nombre de Grashof qui sont introduits par la théorie de la similitude en mécanique des fluides. Soit,

$$Nu \equiv \frac{\alpha_c}{\lambda/e}$$

$$Gr \equiv \frac{g \beta \Delta T}{\nu^2}$$

où,

λ : conductivité thermique de l'air.

e : épaisseur de la lame d'air.

g : accélération de la pesanteur.

μ : viscosité dynamique.

ρ : densité volumique.

et $\beta = 1/T$ (degrés absolue).

La relation existant entre les nombres Nu et Gr est:

$$Nu = 0,093. (Gr)^{0,31} \quad 10^4 < Gr^2 < 10^7$$

pour un capteur incliné à 45° sur l'horizontale.

Ceci amène à une valeur de $\alpha_c = 3,5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$.

Et en prenant $t_a - t_v = 50^\circ\text{C}$, on obtient:

$$Q_c = 175 \text{ W/m}^2.$$

- Pertes par rayonnement: (Absorbeur-Vitrage)

Comme il s'agit de deux parois parallèles face à face, la quantité de chaleur échangée s'écrit :

$$Q_r = \sigma \cdot S_a \cdot (t_a^4 - t_v^4) \frac{F(S_a, S_v)}{\frac{1}{\epsilon_a} - \frac{1}{\epsilon_v} - 1}$$

où,

σ : Constante de Boltzmann.

$F(S_a, S_v)$: Facteur de forme géométrique (absorbeur-vitre) fourni par des abaques . Soit $F = 0,8$.

ϵ_a : Emissivité de la surface de l'absorbeur. Soit $\epsilon_a = 0,95$.

ϵ_v : Emissivité de la surface de la vitre. Soit $\epsilon_v = 0,93$.

t_a : Température de l'absorbeur. Soit $t_a = 70^\circ\text{C}$.

t_v : Température de la vitre. Soit $t_v = 50^\circ\text{C}$.

On abouti à, $Q_r = 130 \text{ W/m}^2$.

- Pertes par conduction :

les pertes par conduction vers la face arrière du capteur, en supposant qu'il y ait de la laine de verre de conductivité thermique $\lambda = 0,041 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, s'exprime par :

$$Q_\lambda = \frac{0,041 \cdot S}{0,075} (t_a - t_o)$$

en prenant $t_a = 70^\circ\text{C}$ et $t_o = 20^\circ\text{C}$ (t_o température ambiante)

On obtient = $Q_v = 27,33 \text{ W/m}^2$

Il faut ajouter aussi les pertes par les parois latérales du capteur.

Enfin, une partie du rayonnement réémise par l'absorbeur est absorbée par le vitrage qui s'échauffe et ensuite échange de la chaleur avec le milieu extérieur.

BILAN DES PERTES :

Soit un flux de rayonnement incident de 1000 W/m^2

Pertes par réflexion = $1000 \cdot 8 \% = 80 \text{ W}$: flux réfléchi

Pertes par absorption = $1000 \cdot 7 \% = 70 \text{ W}$: flux absorbé

TOTAL = 150 W

Flux transmis = flux incident - (flux réfléchi + flux absorbé)
par l'ouverture.

85 %	100 %	8 %	7 %
850 W =	1000 W	-	150 W

Et comme le coefficient d'absorption (différent de l'unité) est égal à 0,95, on a : $850 \times 0,95 = 807,5 \text{ W}$ soit 81 % du flux absorbé.

Et la différence de 4 % est réfléchie ; une partie repasse à travers le vitrage, le reste est absorbé par les parois.

Les flux de convection et rayonnement entre l'absorbeur et le vitrage, représente :

- rayonnement : 12 %
- convection : 17 %
- conduction : 3 à 5 %

Soit, un total d'environ 475 W/m^2 de pertes pour un flux incident de 1000 W/m^2 .

L'énergie utilisable représente donc :

$$\frac{1000 - 475}{1000} = 52 \% \text{ du flux de rayonnement incident.}$$

Ce serait donc dans cet ordre de grandeur que l'on devrait obtenir le rendement théorique. Ceci bien évidemment en tenant compte des valeurs que nous avons prises qui correspondent au cas les plus défavorables.

IX- ETUDE EXPERIMENTALE DU CAPTEUR PARABOLIQUE A CONCENTRATION :

Le but de cette partie expérimentale est de déterminer l'influence du régime d'écoulement sur la différence de température (ΔT) et donc sur la puissance (P). Et le paramètre influant est le nombre de Reynolds (Re).

Pour mettre en évidence ceci, on fait varier le débit volumique q passant dans le capteur, donc Re varie et on prélève la différence (ΔT) de température entre l'entrée et la sortie. Et on répète cette expérience pour plusieurs valeurs fixées de la température d'entrée T_e dans le capteur.

Détermination du nombre de Reynolds :

Connaissant le débit volumique q_v , le diamètre intérieur de la conduite d , la densité volumique ρ et la viscosité μ : qui dépendent de la température d'entrée de l'eau ;

on a : $Re = \frac{\rho v d}{\mu}$ où v : vitesse du fluide
et $v = \frac{q_v}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{4 q_v}{\pi d^2}$

donc : $Re = \frac{4 \rho q_v}{\pi \mu d}$

Détermination de la puissance P transmise au fluide :

L'expression de la puissance est :

$P = \rho \cdot C_p \cdot q_v \cdot \Delta T$ où C_p : chaleur spécifique.

Les résultats expérimentaux sont résumés dans des tableaux qui suivent sur l'annexe 3.

Calcul d'erreur :

.. Erreur sur le nombre de Reynolds :

$Re = \frac{4 \cdot f \cdot q_v}{\pi \cdot \mu \cdot d}$; en passant par les Logarithmes, on obtient :

$$\ln Re = \ln 4 + \ln f + \ln q_v - \ln \pi - \ln \mu - \ln d.$$

en dérivant membre à membre, on obtient :

$$\frac{d Re}{Re} = \frac{df}{f} + \frac{dq_v}{q_v} - \frac{d\mu}{\mu} - \frac{dd}{d}$$

soit :
$$\Delta Re = Re \left[\frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta q_v}{q_v} + \frac{\Delta \mu}{\mu} + \frac{\Delta d}{d} \right]$$

.. Erreur sur la puissance :

$$P = f \cdot C_p \cdot q_v \cdot \Delta T.$$

en passant par les Logarithmes et en dérivant membre à membre, on obtient :

$$\Delta P = P \left[\frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta C_p}{C_p} + \frac{\Delta q_v}{q_v} + \frac{\Delta (\Delta T)}{\Delta T} \right]$$

.. Ordre de grandeur des erreurs commises sur Re et P : en prenant :

- $\Delta q_v = 5 \text{ t/h}$
- $\Delta (\Delta T) = 0,02 \text{ } ^\circ\text{C}$
- $\Delta f = 0,1 \text{ kg/m}^3$
- $\Delta C_p = 0,1 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$
- $\Delta \mu = 10^{-4} \text{ g/cm.s.}$
- $\Delta d = 0,5 \text{ mm}$

Ces valeurs sont déjà expliquées précédemment.

On trouve l'ordre de grandeur de la précision apportée dans les travaux, sur le nombre de Reynolds est de 6,8 %, et sur la puissance est de 7,8 %.

TRACE ET INTERPRETATION GRAPHIQUE DES COURBES DE PUISSANCE P ET DE DIFFERENCE DE TEMPERATURE T EN FONCTION DU NOMBRE DE REYNOLDS Re :

A partir des résultats obtenus, on voit très bien que la différence de température ΔT et la puissance P et donc le rendement du capteur varient avec le régime d'écoulement. A chacune des courbes on remarque qu'aux alentours de Re = 2000, il y a une zone critique, du fait que le régime n'est pas établi.

CONCLUSION :

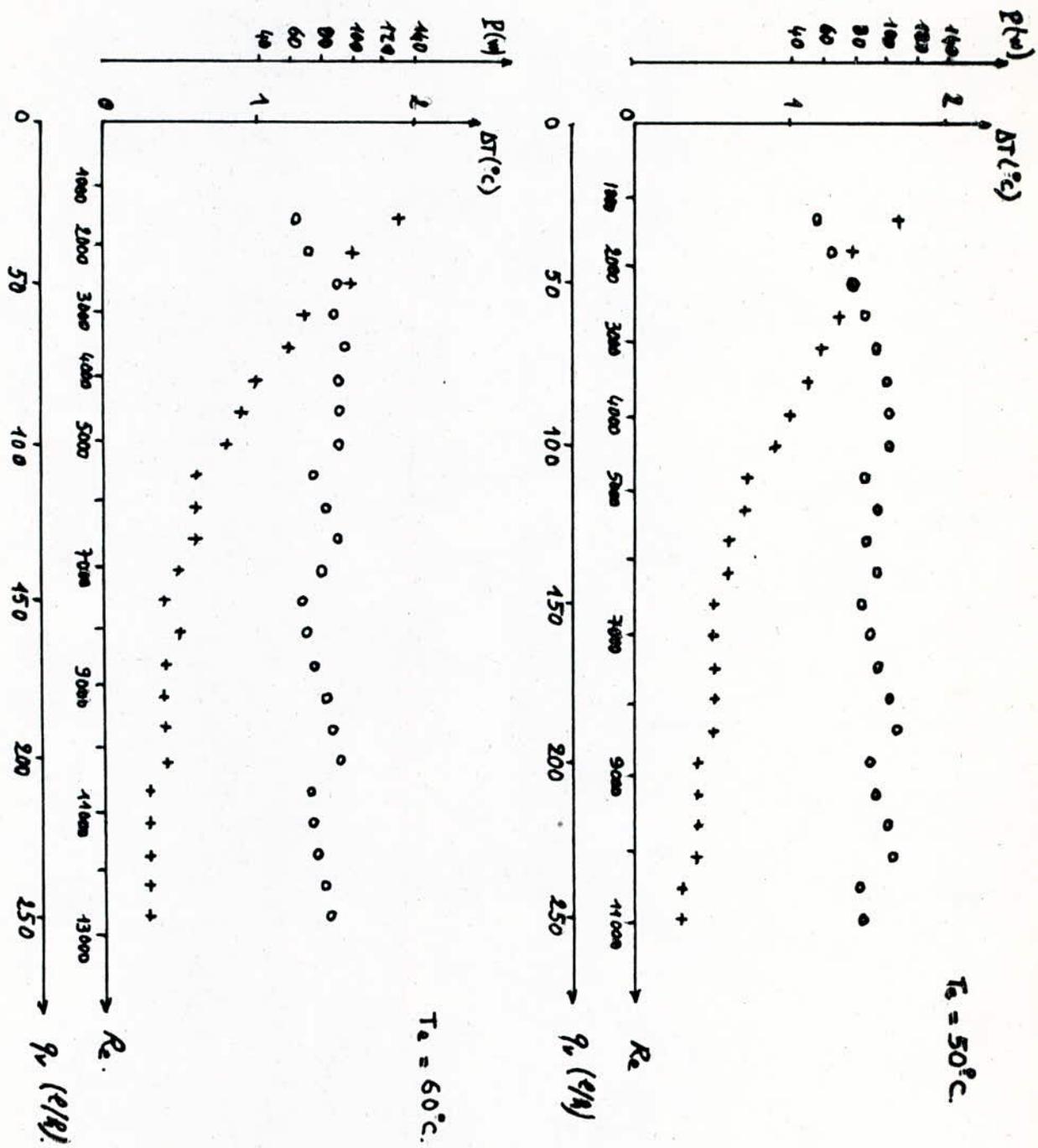
* Les puissances mesurées en fonction du nombre de Reynolds montrent trois zones :

- 1 - Une zone critique, située aux environs de Re = 2000, où les mesures de ΔT sont très instables.
- 2 - Une zone I , pour Re < 2000, de faibles rendements.
- 3 - Une zone II, pour Re > 2000, de rendements généralement supérieurs.

* On voit bien aussi que :

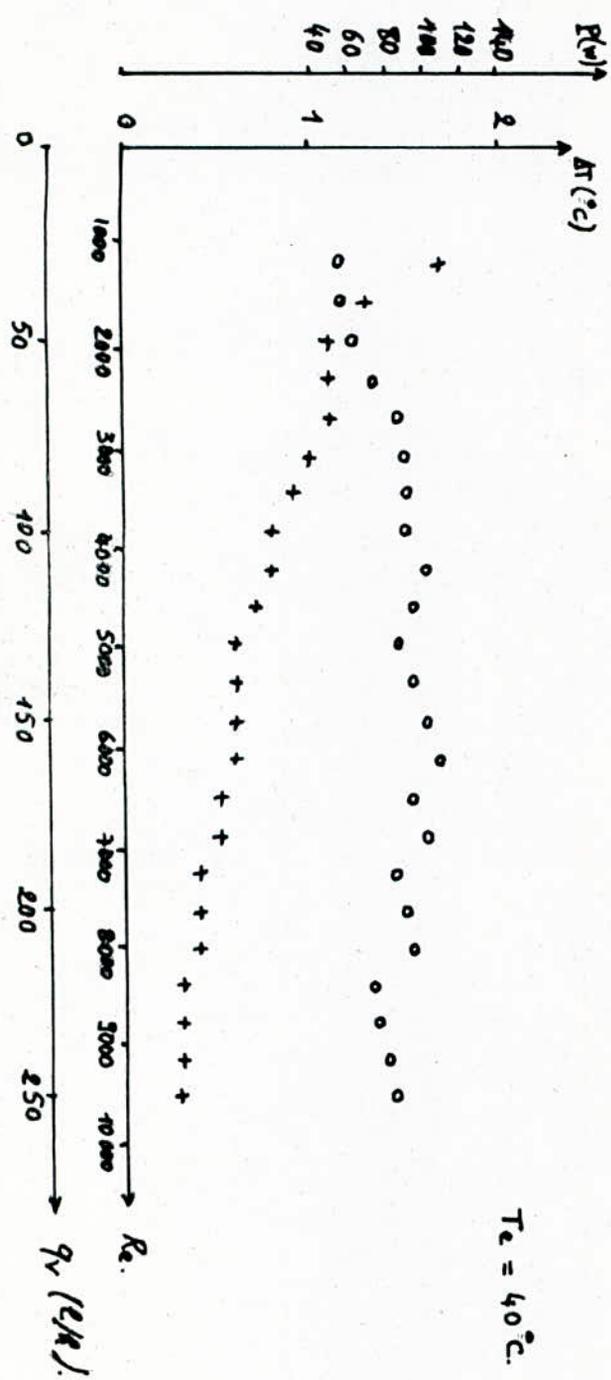
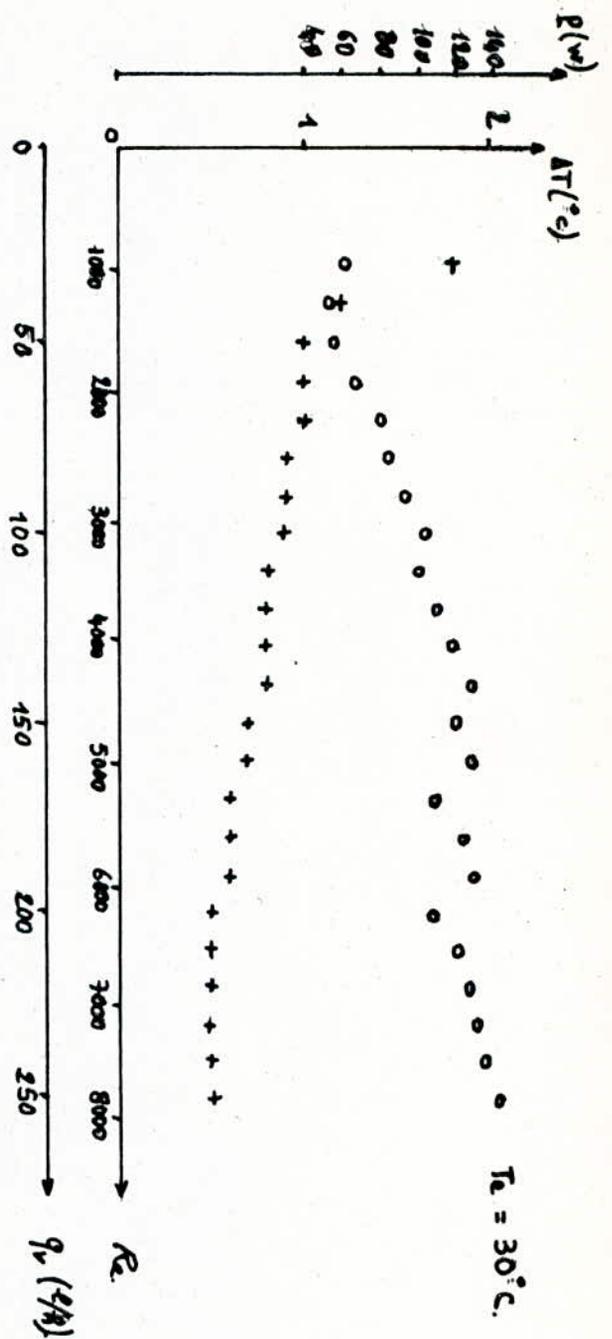
- La différence de température ΔT augmente avec la diminution du débit volumique qv pour une température Te d'entrée fixée.
- La puissance P augmente avec l'augmentation du débit volumique qv pour une température d'entrée fixée.
- La puissance P et la différence de température ΔT ont des valeurs nettement plus élevées pour des températures d'entrées Te élevées, ce qui donc donnera des rendements plus élevés.

Courbes de P et de ΔT en fonction du régime d'écoulement :
 (Source Artificielle)



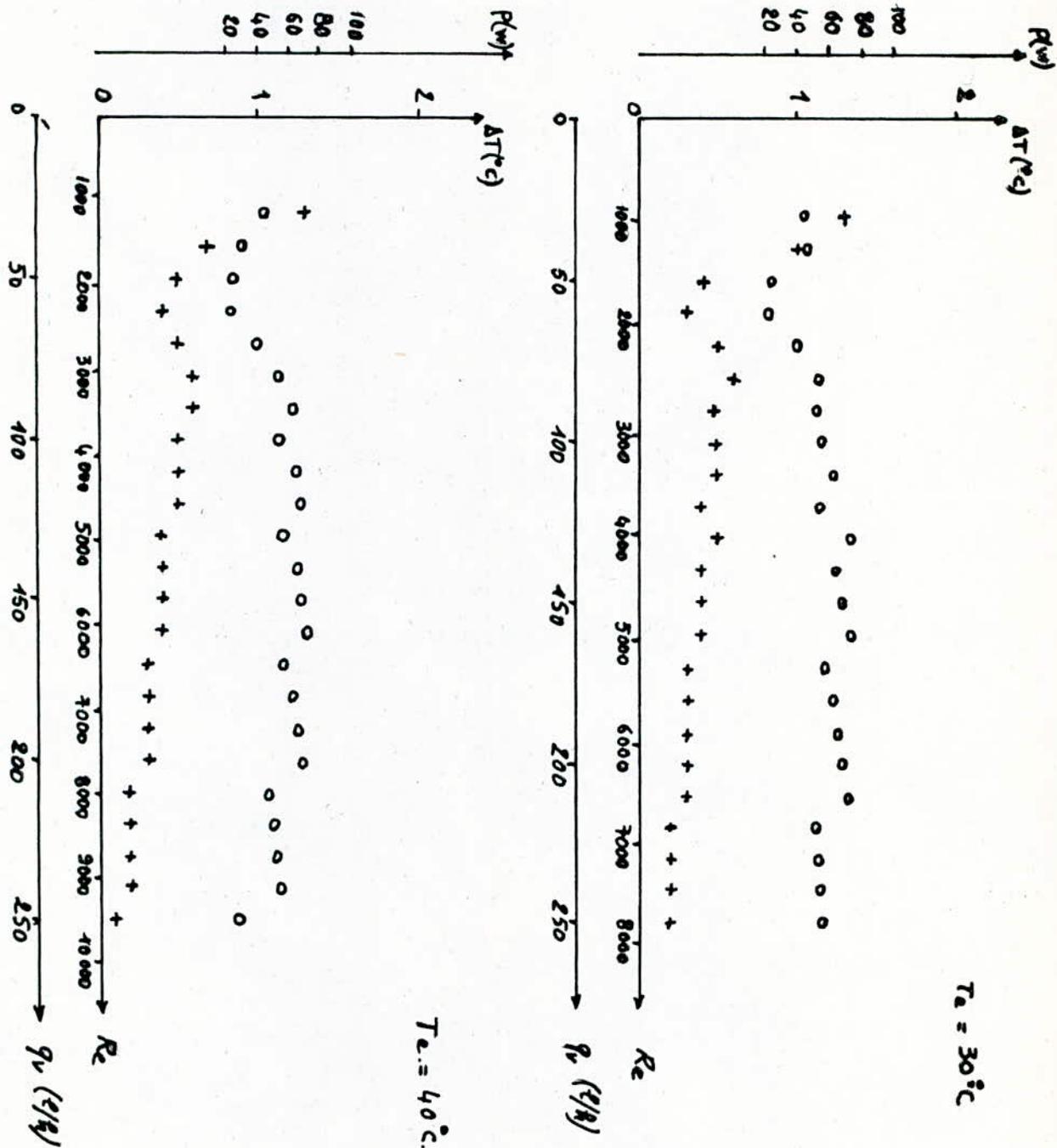
Légende : Puissance : o : P
 Température : + : ΔT

Courbes de P et de ΔT en fonction du régime d'écoulement :
 (Source Artificielle)



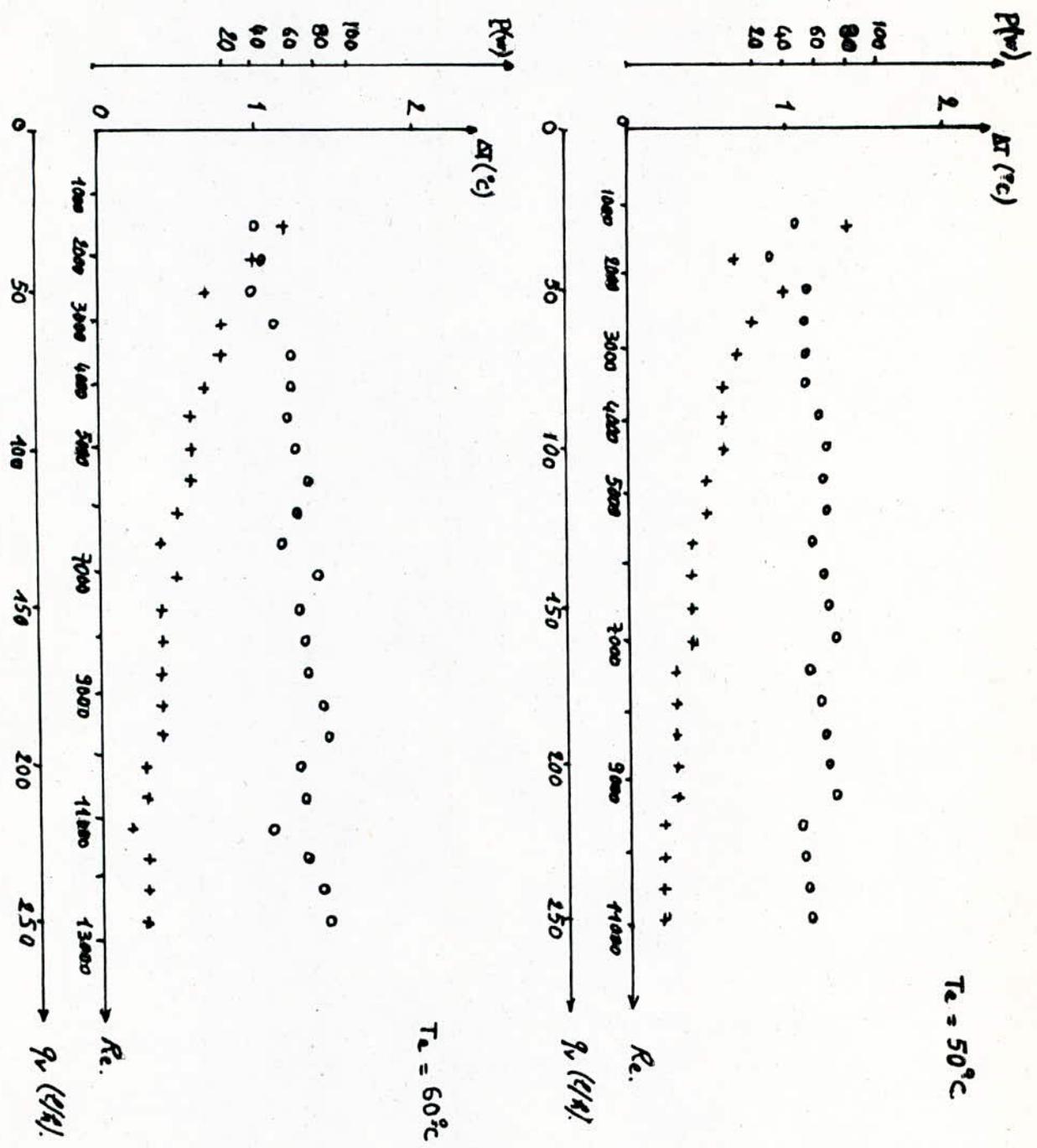
Légende: P : ○
 ΔT : +

Courbes de P et de ΔT en fonction du régime d'écoulement :
 (Source Naturelle)



Légende: P : o
 ΔT : +

Courbes de P et de ΔT en fonction du régime d'écoulement :
 (Source Naturelle)



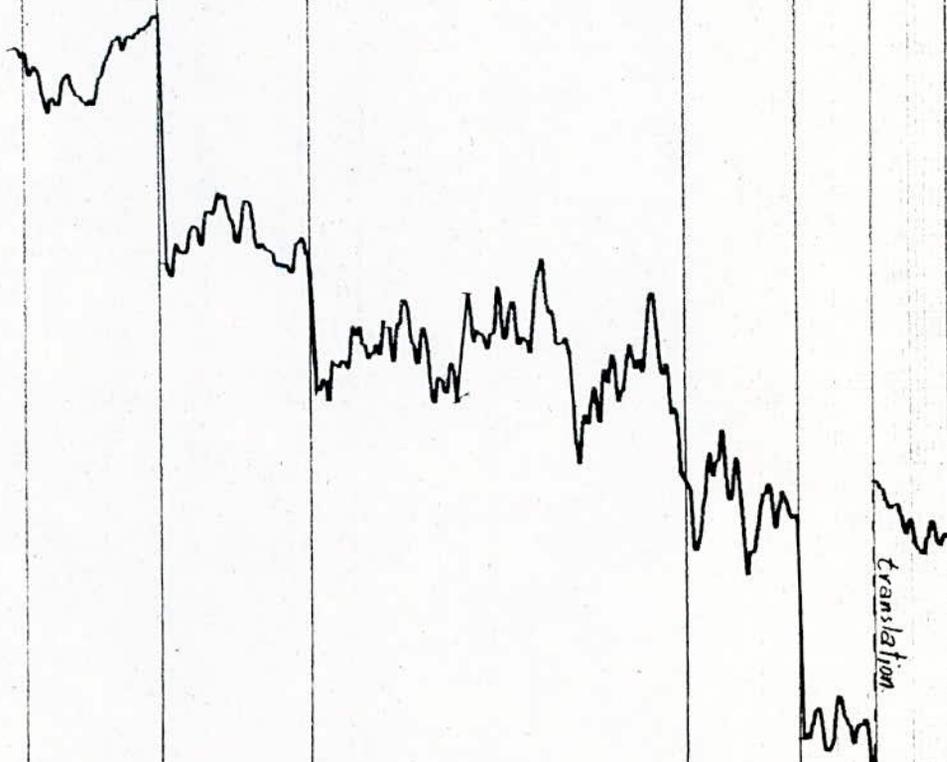
Légende: P: o
 ΔT : +

COURBES D'ENREGISTREMENTS, DE ΔT .

- .. En source artificielle;
- .. Température d'entrée $T_e = 40^\circ\text{C}$.

$T_e = 40^\circ\text{C}$ Source Artificielle

q_v	100	90	80	70	60	50	40	30
R_e	3801	3421	3041	2661	2280	1900	1520	1140
ΔT	0,8	0,9	zone critique			1,1	1,3	1,7

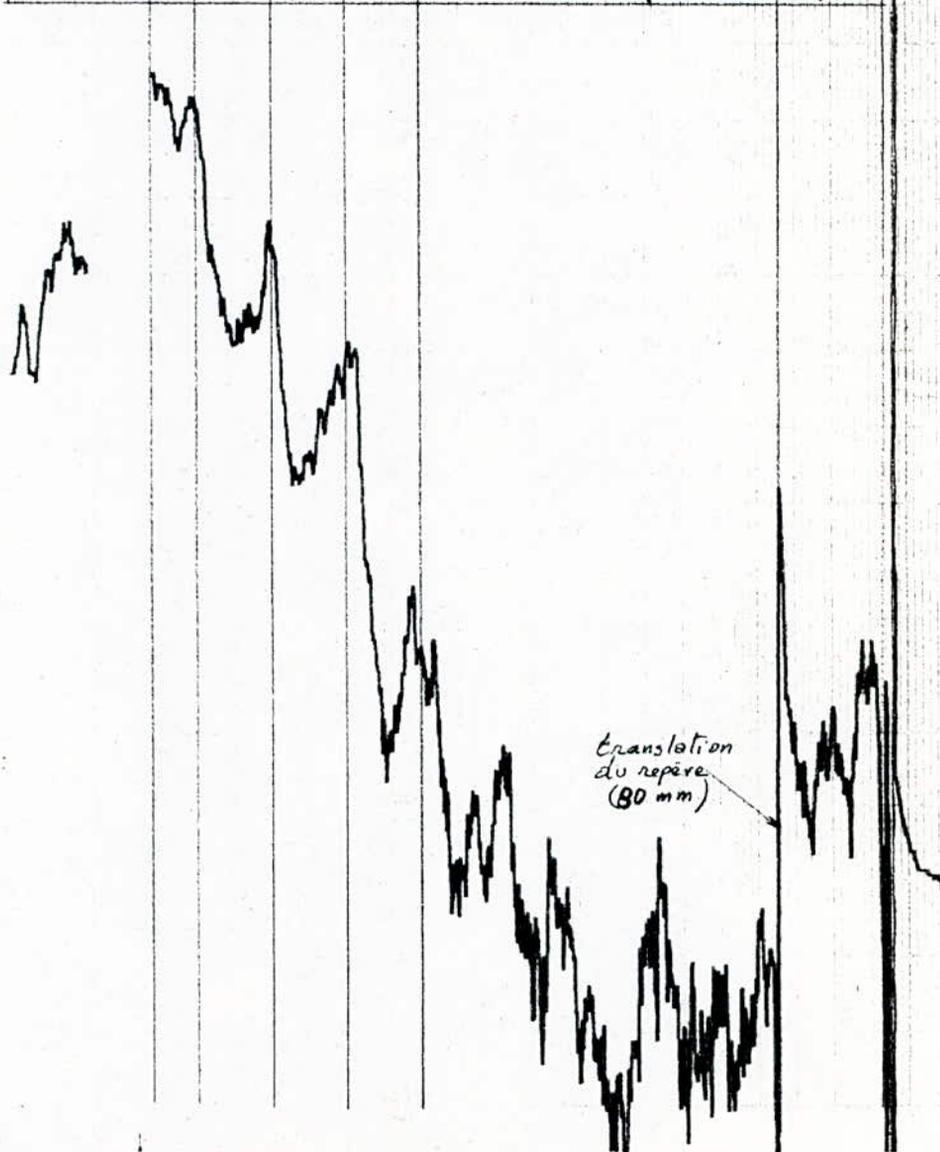


COURBES D'ENREGISTREMENT, DE ΔT .

- .. En source artificielle;
- .. Température d'entrée $T_e = 50^\circ\text{C}$.

$T_e = 50^\circ\text{C}$ source artificielle.

q_v (g/R)	100	90	80	70	60	50	40	30
R_e		4565	4058	3550	3043	2536	2029	1522
ΔT ($^\circ\text{C}$)	0,9	1,0	1,1	1,2	zone Critique			1,7

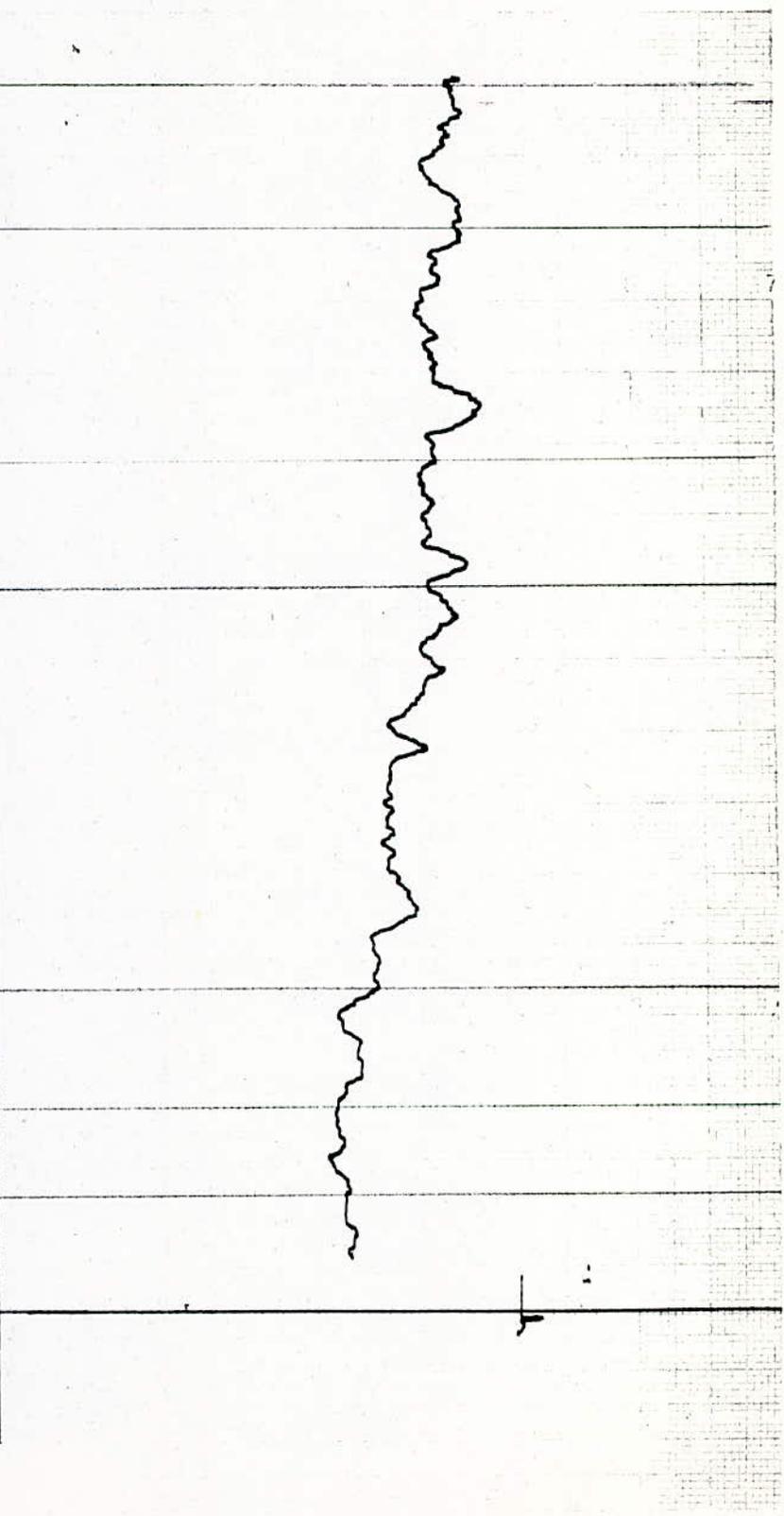


COURBES D'ENREGISTREMENT, DE ΔT .

- .. En source naturelle;
- .. Température d'entrée $T_e = 40^\circ\text{C}$.

$T_e = 40^\circ\text{C}$ source naturelle.

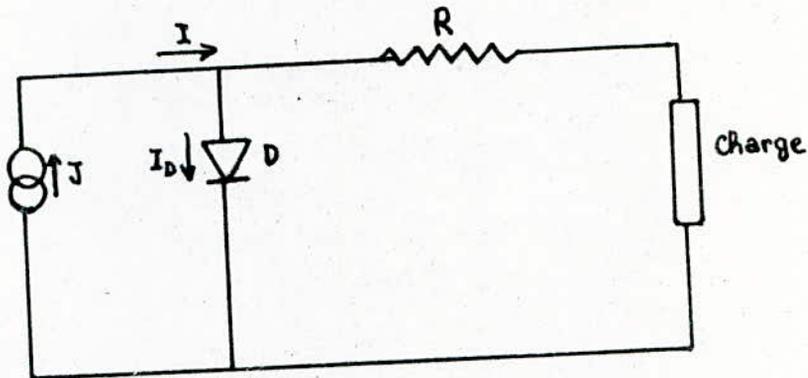
q_v (W)	100	90	80	70	60	50	40	30
R_e	3801	3421	3040	2661	2280	1900	1520	1140
ΔT ($^\circ\text{C}$)	0,5	0,6	0,6	Zone critique	0,5	0,7	1,3	



X - ETUDE EXPERIMENTALE DU GROUPE PHOTOVOLTAIQUE :

Le panneau de cellules photovoltaïques utilisé dans notre banc d'essai encapsule ses cellules entre des plaques de protection transparente. Ces plaques doivent avoir la propriété de réfléchir les infra-rouges, pour éviter l'échauffement des cellules ; laisser passer la lumière et amener une protection contre les agents atmosphériques.

La courbe $I = f(V)$ pour un éclairement constant nous permet de représenter (par approximation) la photopile par une source de courant J en parallèle avec une diode D , l'ensemble étant en série avec une résistance R .



TRACE ET INTERPRETATION GRAPHIQUE :

L'équation de la caractéristique d'une jonction non éclairée est de la forme suivante :

$$I = I_0 (\exp qv/kT - 1)$$

où T est la température absolue, et I_0 est le courant de saturation.

La différence de potentiel V aux bornes d'une photopile éclairée est liée à la densité du courant I débité dans le circuit extérieur par la formule :

$$I = I_s \left(\exp qV/kT - 1 \right) - I_{cc}$$

où I : densité de courant photoélectrique.

I_s : courant de saturation (densité de courant d'obscurité)

q : charge de l'électron.

K : constante de Boltzmann.

T : température absolue.

On remarque certaines valeurs de courant et tension particulières :

- courant de court-circuit I_{cc} valeur pour laquelle $V = 0$.

- la tension à vide V_0 pour laquelle $I = 0$.

Et le point où la puissance débitée est optimale, soit :

$$P_m = U_m I_m$$

Le maximum de puissance débitée est obtenue en raccordant la courbe $I = f(V)$ à son hyperbole de dissipation.

I_m : courant débité par la photopile au point de fonctionnement optimal.

V_m : tension au point de fonctionnement optimal.

Le rendement est le rapport entre l'énergie électrique fournie et l'énergie lumineuse reçue.

La tension de circuit ouvert sera :

$$V_{cc} = (KT/q) \ln \left(1 + I_{cc}/I_s \right)$$

La tension de circuit ouvert est donc contrôlée par la valeur du courant de saturation I_s , qui dépend des propriétés du silicium du type n employé pour la photopile :

$$I_s \sim 1/n (D_p/\tau_p)^{1/2}$$

Ici, n est le nombre d'électrons libres, D_p la vitesse de diffusion et τ_p la durée de vie des trous dans le silicium de type n. D_p est une constante égale à $13 \text{ cm}^2/\text{s}$. Et l'on voit que I_s sera d'autant plus faible que n et τ_p seront grands. On peut admettre que I_{cc} est de l'ordre de 10^{-7} A/cm^2 , et par conséquent V_{cc} est de l'ordre de 0,5 V pour une illumination de 1000 W/m^2 .

Les résistances en séries ont pour effet de diminuer le courant du court-circuit et d'aplatir la courbe caractéristique ; le rendement s'en trouve réduit. L'origine de ces résistances en séries est double d'une part la couche superficielle de type P a une résistance importante, d'autant plus grande que son épaisseur est faible, d'autre part nous constaterons que les zones N et P ne sont jamais parfaites.

Les photopiles au silicium ont un rendement qui croît quand on abaisse la température et qui décroît quand on l'augmente.

C'est la tension du circuit ouvert qui varie avec la température selon une loi exponentielle.

Quand l'intensité de lumière incident croît, I_{co} croît linéairement et V_{co} croît logarithmiquement.

CONCLUSION :

* Influence de la température.

Comme le montrent les courbes obtenues, une augmentation de la température modifie les performances des cellules.

Pendant que le courant de court-circuit augmente, la tension de circuit ouvert diminue. D'où une légère diminution de la puissance maximum.

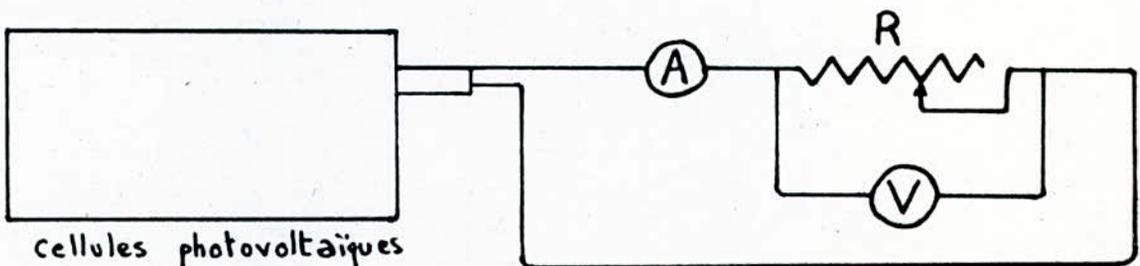
* Influence de l'éclairement.

Comme le montrent les résultats obtenus, la valeur de la tension est relativement constante, de ce fait la valeur de la puissance débitée est proportionnel à la valeur de l'éclairement car la valeur du courant délivré par le module est pratiquement à la quantité de photons reçus par la cellule. L'influence de l'éclairement est donc une caractéristique essentielle qui montre que même pour des valeurs d'ensoleillement faibles ou modestes, une cellule est capable de débiter une puissance.

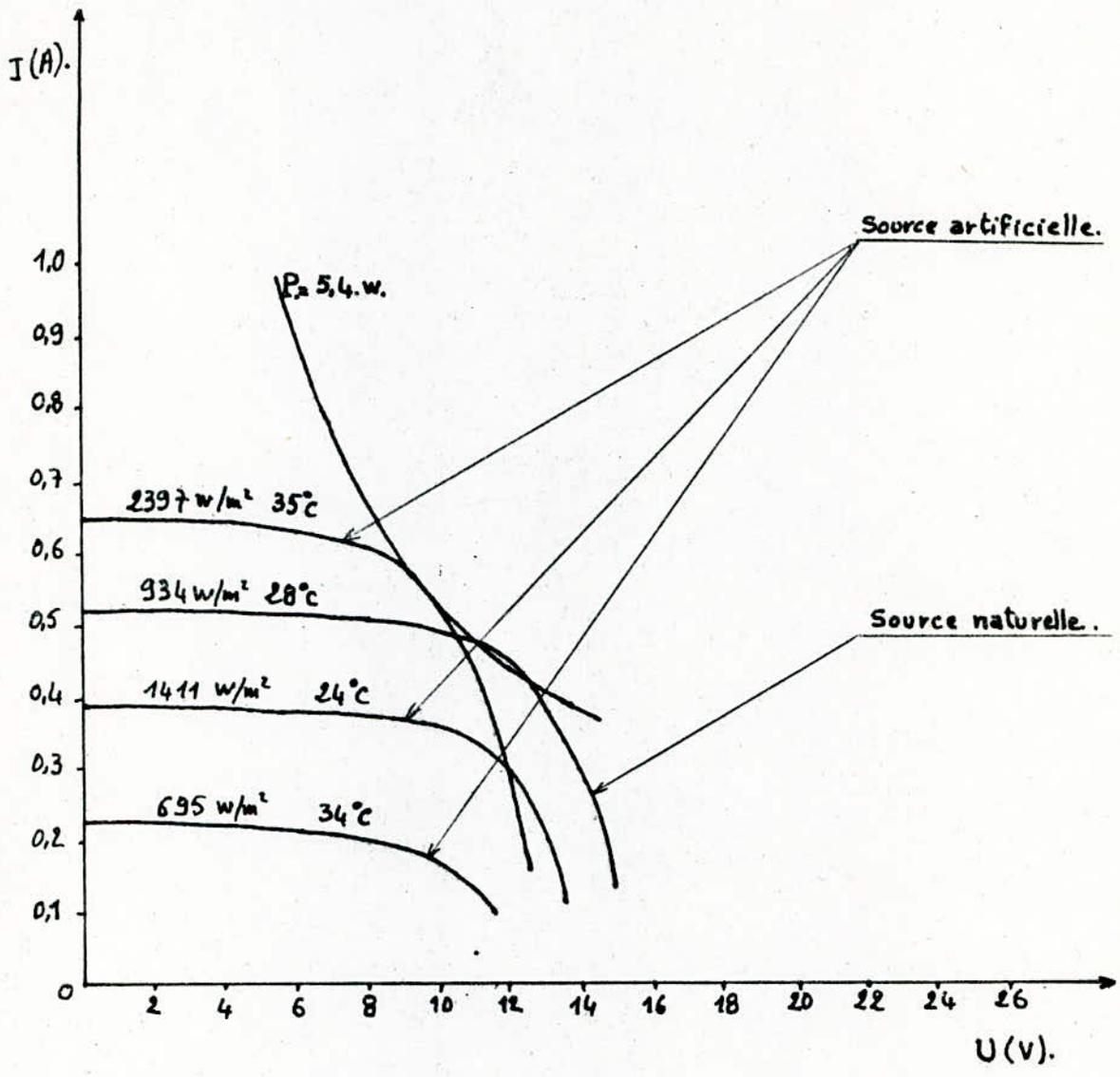
Tableaux des valeurs :

S. Naturelle		S. Artificielle		S. Artificielle		S. Artificielle	
$\phi_s = 934 \text{ W/m}^2$		$\phi_s = 1411 \text{ W/m}^2$		$\phi_s = 2397 \text{ W/m}^2$		$\phi_s = 695 \text{ W/m}^2$	
$T_o = 28^\circ\text{C}$		$T_o = 24^\circ\text{C}$		$T_o = 35^\circ\text{C}$		$T_o = 34^\circ\text{C}$	
U(V)	I(A)	U(V)	I(A)	U(V)	I(A)	U(V)	I(A)
0	0,52	-	0,390	1,0	0,640	-	0,220
1	0,52	1,0	0,390	2,0	0,640	1,0	0,220
2	0,52	2,0	0,390	3,0	0,640	2,0	0,220
3	0,52	3,0	0,390	4,0	0,640	3,0	0,220
4	0,52	4,0	0,390	5,0	0,635	4,0	0,220
5	0,52	5,0	0,390	6,0	0,630	5,0	0,215
6	0,52	6,0	0,385	7,0	0,620	6,0	0,210
7	0,51	7,0	0,382	8,0	0,610	7,0	0,210
8	0,51	8,0	0,380	9,0	0,585	8,0	0,200
9	0,50	9,0	0,375	9,5	0,560	9,0	0,190
10	0,49	9,5	0,370	10,0	0,520	9,5	0,180
11	0,48	10,0	0,365	10,5	0,480	10,0	0,165
11,5	0,47	10,5	0,360	11,0	0,420	10,5	0,150
12	0,46	11,0	0,350	11,5	0,350	11,0	0,130
12,5	0,43	11,5	0,325	12,0	0,260	11,5	0,100
13	0,39	12,0	0,295	12,5	0,160		
13,5	0,36	12,5	0,255				
14	0,30	13,0	0,200				
14,5	0,23	13,5	0,120				
15	0,14						

Schéma de l'ensemble du groupe photovoltaïque :



Caractéristiques du panneau de cellules photovoltaïques :



Tableaux des valeurs : (source artificielle).

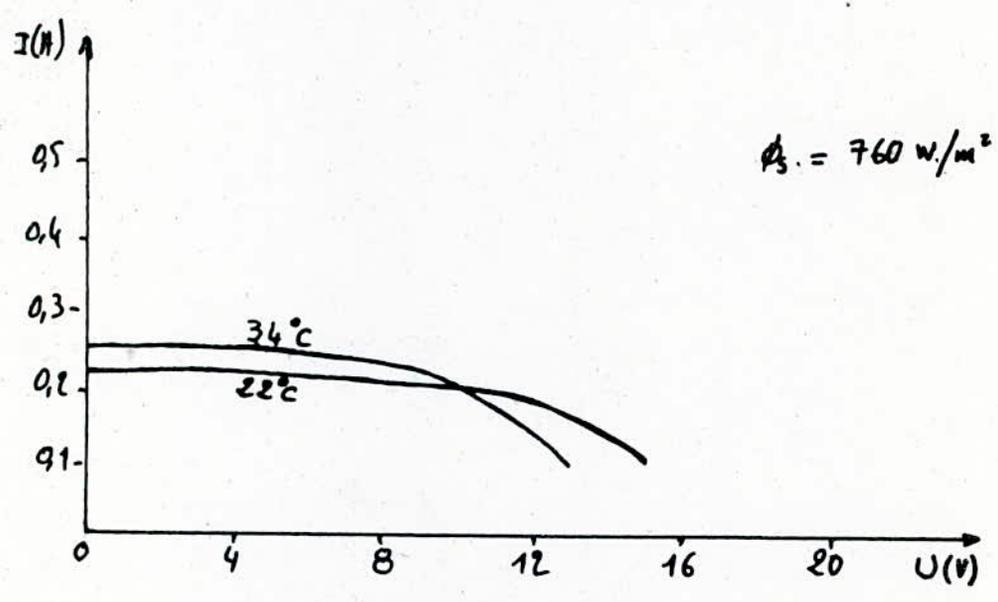
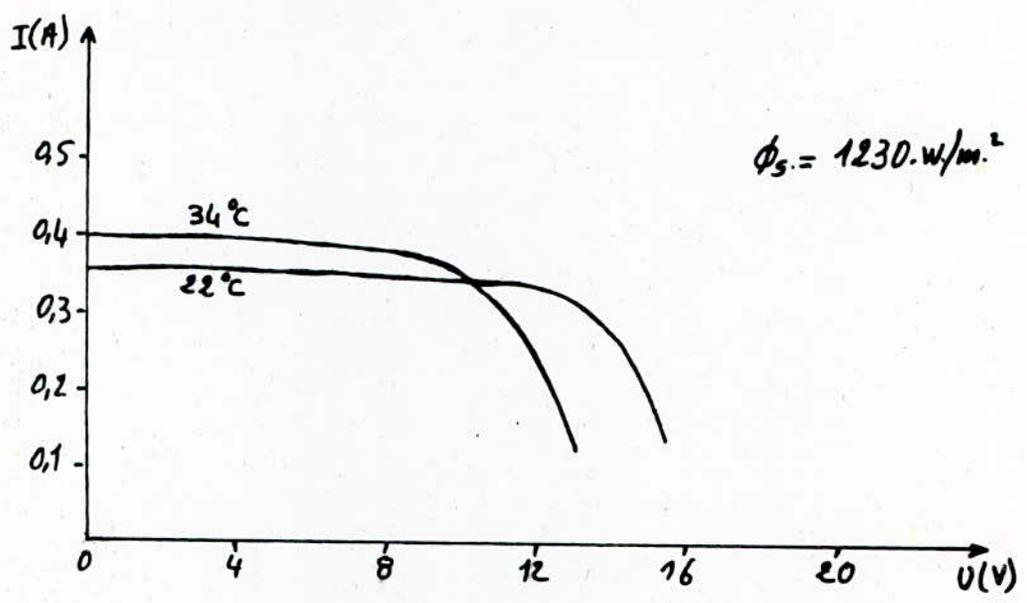
To = 22°C

To = 34°C

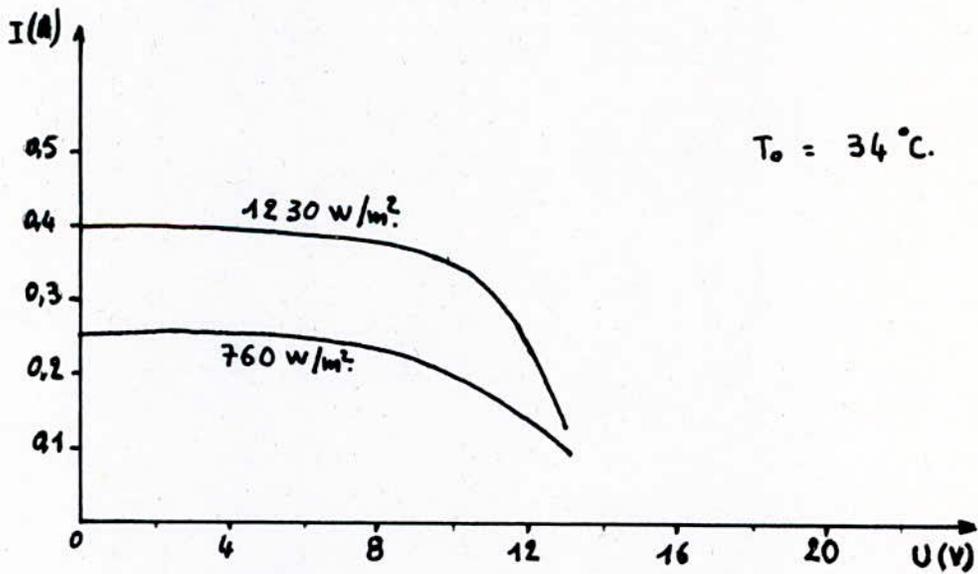
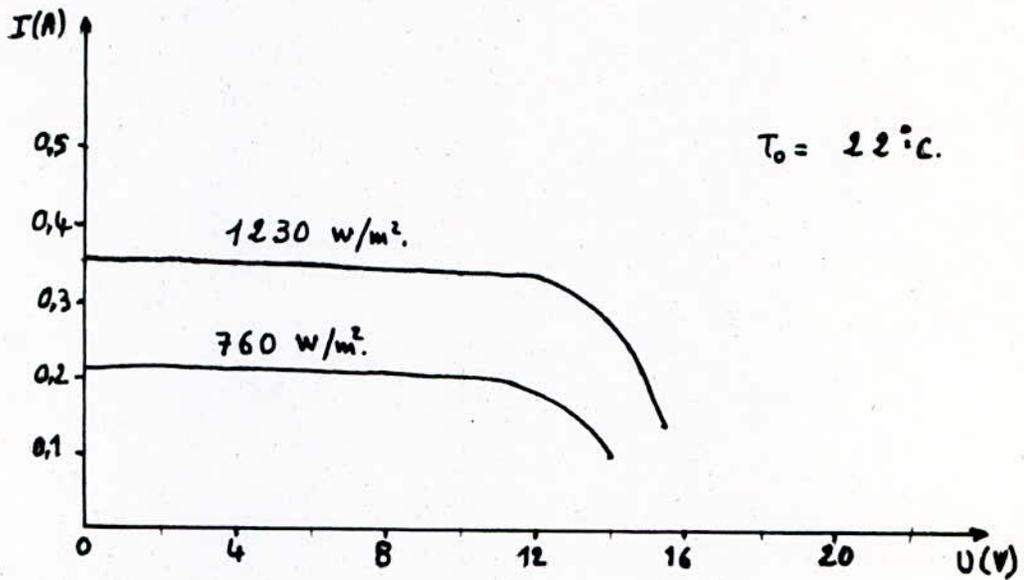
 $\phi_s = 760 \text{ W/m}^2$ $\phi_s = 1230 \text{ W/m}^2$ $\phi_s = 760 \text{ W/m}^2$ $\phi_s = 1230 \text{ W/m}^2$

U(V)	I(A)	U(V)	I(A)	U(V)	I(A)	U(V)	I(A)
0	0,22	0	0,36	0	0,25	0	0,4
1	0,22	1	0,36	1	0,25	1	0,4
2	0,22	2	0,36	2	0,25	2	0,4
3	0,22	3	0,36	3	0,25	3	0,4
4	0,22	4	0,36	4	0,25	4	0,39
5	0,22	5	0,36	5	0,25	5	0,39
6	0,22	6	0,36	6	0,25	6	0,38
7	0,21	7	0,35	7	0,24	7	0,38
8	0,21	8	0,35	8	0,23	8	0,38
9	0,20	9	0,35	9	0,22	9	0,37
10	0,20	10	0,34	10	0,20	9,5	0,36
11	0,20	11	0,34	11	0,17	10	0,35
12	0,18	12	0,34	12	0,15	10,5	0,34
13	0,16	13	0,32	12,5	0,13	11	0,31
13,5	0,13	13,5	0,3	13	0,10	11,5	0,28
14	0,10	14	0,28			12	0,24
		14,5	0,24			12,5	0,19
		15	0,18			13	0,13
		15,5	0,14				

INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LES CELLULES PHOTOVOLTAIQUES
POUR UN FLUX DE RAYONNEMENT DONNE.



INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT SUR LES CELLULES PHOTOVOLTAIQUES
POUR UNE TEMPERATURE DONNEE.



ANNEXE 1

DESCRIPTION ET SCHEMA DE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT du BANC D'ESSAI :

L'unité pédagogique héliotechnique est équipée de :

.. Un bain thermostaté "Thermomix 1460"; c'est un appareil qui a une régularisation automatique de la température et la garde constante. Il a une puissance de chauffe de 1200 W, et il peut atteindre une température comprise de $- 50^{\circ}\text{C}$ à 200°C grâce à son échangeur. Il a un thermomètre à résistance (Pt 100). Il est doté d'une pompe pour mélanger et faire circuler le fluide caloporteur dans le bain (et dans le circuit du capteur), et ainsi garantir une constante température.

Pour l'utilisation et la maintenance, voir son carnet d'entretien.

.. Deux thermomètres différentiels (1/10^{ème} de degré) à affichage digital ; l'un pour lire la température à l'entrée du capteur, l'autre pour lire la différence de température entre l'entrée et la sortie du capteur, et ceci grâce à trois sondes de température à résistance de platine de $100\ \Omega$ qui se branche sur le capteur.

.. Un capteur plan à circulation d'eau, orientable.

.. Un simple vitrage.

.. Un double vitrage.

.. Un capteur parabolique (à concentration) à circulation d'eau, orientable.

.. Un groupe photovoltaïque, composé d'un panneau de cellules photovoltaïques, d'un ampèremètre, d'un voltmètre et d'un potentiomètre qui permet de faire varier la tension et donc l'intensité.

.. Un débitmètre à flotteur (en litre par heure), donnant le débit circulant dans le capteur, avec la possibilité de le faire varier grâce à un robinet situé juste en dessous.

- .. Un autre débitmètre à flotteur (en litre par heure), donnant le débit circulant dans l'échangeur du "Thermomix 1460", avec la possibilité de le faire varier grâce à un robinet situé sur le débitmètre.
- .. Une cellule de mesure du rayonnement solaire "ASOLAR 118", qui nous affiche directement la valeur du flux reçue sur la cellule pour le rayonnement solaire naturel ; Par contre pour la mesure d'un flux de rayonnement artificiel (par projecteur), il faut multiplier la valeur affichée par 2,24.
- .. Un enregistreur de laboratoire "CR 452", qui permettra d'enregistrer l'évolution de la différence de température (entrée-sortie capteur) suivant plusieurs valeurs du débit passant dans le capteur, pour différentes valeurs fixées de la température d'entrée du capteur.
- .. Un projecteur de six lampes d'une puissance de 1000 Watts chacune .

BRANCHEMENT ELECTRIQUE :

L'appareil doit recevoir une tension de 220 V et une fréquence de 50 Hz. La protection est assurée à l'aide d'un fusible de 5 ampères situé à côté de la prise d'arrivée du courant.

NB : l'alimentation électrique doit comporter une phase, un neutre et une terre par sécurité.

BRANCHEMENT D'EAU :

En bas, à droite de la machine se trouvent :

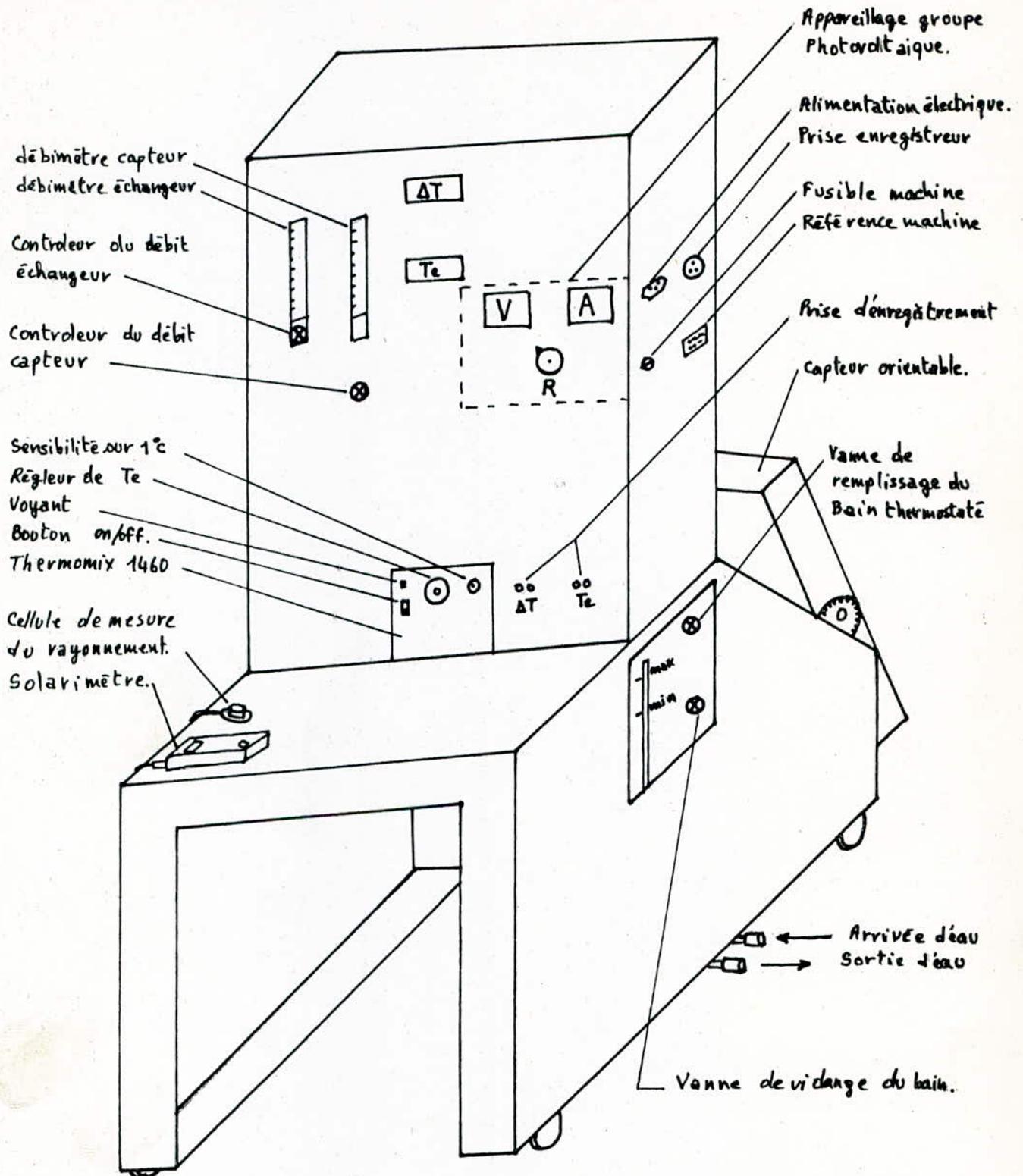
- un raccord rapide pour l'arrivée de l'eau. (3<P<7 bars)
- un raccord rapide pour l'évacuation de l'eau.

REMPLISSAGE DU CIRCUIT ET MISE EN MARCHE DE LA MACHINE :

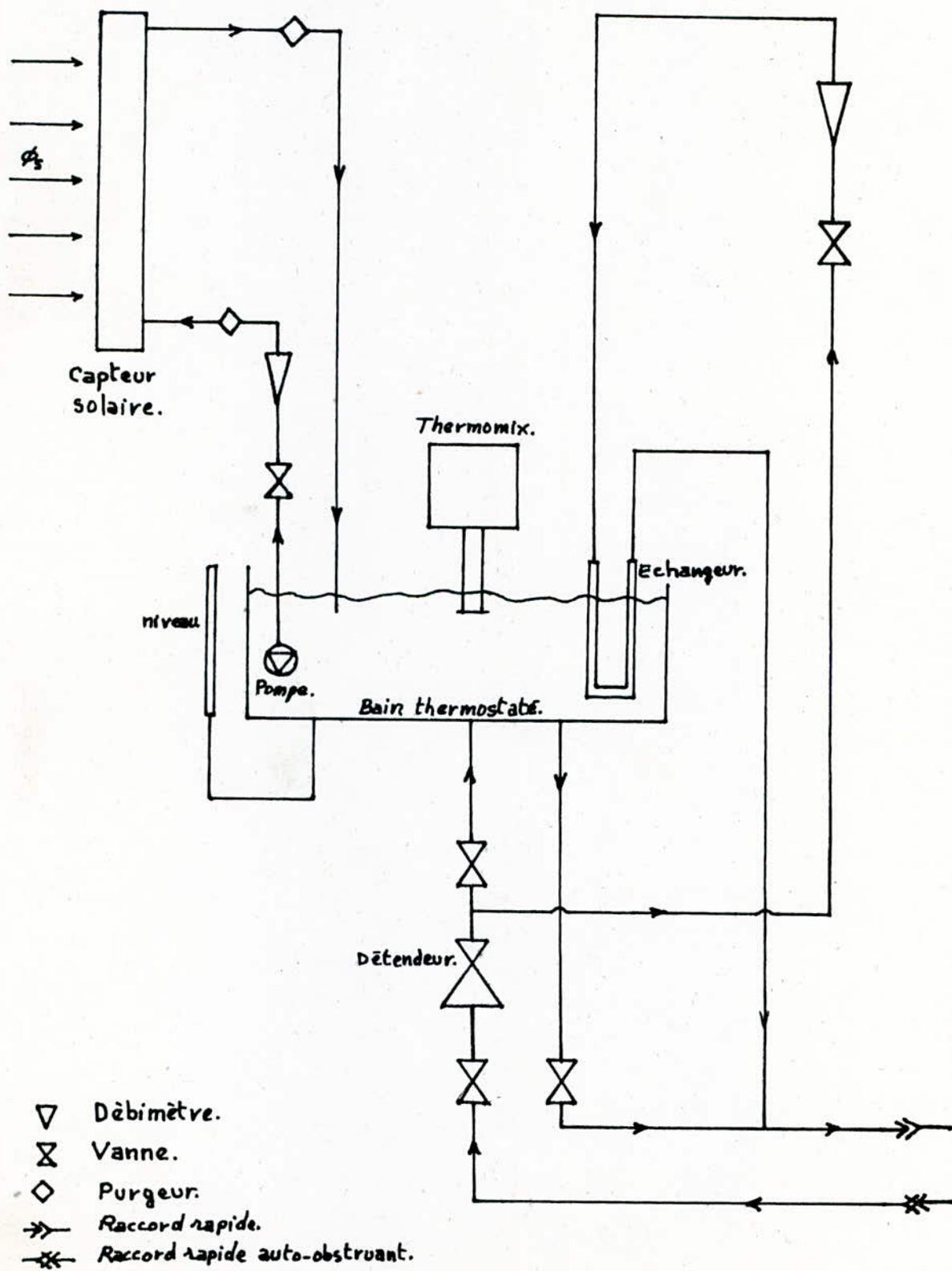
- .. Vérifier que tous les robinets et vannes sont fermés (il y en a 5)
- .. Brancher l'arrivée et l'évacuation de l'eau sur les raccords rapide.
- .. Ouvrir à fond la vanne située avant le détendeur.
- .. Ouvrir à fond le robinet de contrôle du débitmètre de l'échangeur.
- .. Ajuster le détendeur (à l'aide d'un outil) si le débit maximum n'est pas atteint.
- .. Ouvrir le robinet "remplissage" situé sur le côté droit de l'appareil afin de remplir la cuve du bain thermostaté, et le refermer dès qu'il atteint le niveau "max".
- .. Vérifier que les deux purgeurs sont fermés. (ils se trouvent sur le capteur et en haut à gauche de l'appareil).
- .. Mettre sous tension la machine à l'aide du câble fourni, et en mettant le bouton "rouge" sur "on".
- .. Mettre en place dans le capteur les trois sondes de température.
- .. Afficher sur le thermomix une température inférieure à la température de l'eau d'arrivée. (environ 20°C).
- .. Ouvrir le robinet contrôlant le débit du capteur.
- .. Mettre sous tension le thermomix à l'aide de l'interrupteur (0/1), et le voyant orange s'allumera.
- .. Purger l'air de la partie supérieure du circuit en pinçant le tube de liaison châssis-capteur ("sortie") et en ouvrant le purgeur situé en haut et à gauche de l'appareil.
- .. Purger l'air du capteur (le capteur étant vertical) en pinçant le tube de sortie du capteur.
- .. Renouveler plusieurs fois (les purges) en réajustant le niveau du bain dans la cuve si nécessaire.

NB: Les deux robinets débouchant à l'air libre situés sur le plan le plus bas de la machine, servent à vidanger le capteur.

SCHEMA DE LA MACHINE :



SCHEMA FONCTIONNEL DE LA MACHINE :



- ▽ Dèbimètre.
- ⊗ Vanne.
- ◇ Purgeur.
- Raccord rapide.
- ⊗ Raccord rapide auto-obstruant.

ANNEXE 2

Capteur plan à eau, à simple vitrage: (Source naturelle)

$T_e (°C)$	$\Delta T (°C)$	$T_c (°C)$	$q_v (l/h)$	$\rho (kg/m^3)$	$C_p (J/kg °C)$	$P (w)$	$\phi_s (w/m^2)$	$\eta (\%)$
30,00	0,5	30,25	250	996,2	4178,8	144,54	882	45,52
	0,7	30,35	200			161,89	878	51,22
	1,1	30,55	150			190,80	910	58,24
	1,8	30,90	100			208,14	922	62,71
	4,0	32,00	50			231,27	920	69,83
40,00	0,4	40,20	250	993,0	4178,9	115,26	930	34,43
	0,5	40,25	200			115,26	939	34,10
	0,8	40,40	150			138,32	940	40,87
	1,6	40,80	100			184,43	950	53,92
	3,5	41,75	50			201,72	960	58,36
50,00	0,3	50,15	250	988,8	4181,0	86,13	832	28,75
	0,5	50,25	200			114,84	880	36,25
	0,8	50,40	150			137,80	880	43,50
	1,4	50,70	100			160,77	835	53,48
	2,4	51,20	50			137,22	830	45,92
60,00	0,3	60,15	250	983,8	4184,5	85,76	900	26,47
	0,4	60,20	200			91,48	920	27,62
	0,6	60,30	150			102,91	878	32,56
	1,3	60,65	100			148,66	850	48,58
	2,3	61,15	50			131,50	856	42,67
70,00	0,2	70,10	250	978,5	4189,7	56,92	916	17,26
	0,4	70,20	200			91,10	916	27,63
	0,6	70,30	150			102,49	916	31,08
	1,2	70,60	100			136,65	924	41,08
	2,2	71,10	50			125,26	929	37,45
80,00	0,1	80,05	250	972,7	4196,3	28,34	930	8,46
	0,3	80,15	200			68,03	930	20,32
	0,5	80,25	150			85,03	934	25,29
	1,1	80,55	100			124,72	932	37,17
	2,0	81,00	50			113,38	937	33,61

Capteur plan à eau à double vitrage (source naturelle)

T_e (°C)	ΔT (°C)	T_c (°C)	q_v (l/h)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg °C)	P (W)	ϕ (W/m ²)	η (%)
30,00	0,4	30,20	250	996,2	4178,8	115,63	882	36,42
	0,6	30,30	200			138,76	877	43,95
	1,0	30,50	150			173,45	878	54,93
	1,7	30,85	100			196,58	877	62,26
	3,4	31,70	50			196,58	866	63,05
40,00	0,3	40,15	250	993,0	4178,9	86,44	841	28,55
	0,6	40,30	200			138,31	880	43,66
	0,9	40,45	150			155,61	910	47,50
	1,7	40,85	100			195,94	902	60,34
	3,1	41,55	50			178,66	915	54,24
50,00	0,3	50,15	250	988,8	4181,0	86,13	950	16,78
	0,5	50,25	200			114,83	960	33,29
	0,8	50,40	150			137,80	962	39,79
	1,6	50,80	100			183,74	958	53,27
	3,0	51,50	50			172,25	958	49,94
60,00	0,2	60,10	250	983,8	4184,5	57,17	925	17,17
	0,4	60,20	200			91,48	935	27,18
	0,8	60,40	150			137,22	935	40,77
	1,3	60,65	100			148,66	925	44,64
	2,7	61,35	50			154,37	906	47,33
70,00	0,1	70,05	250	978,5	4189,7	28,47	924	8,56
	0,2	70,10	200			45,55	926	13,66
	0,5	70,25	150			85,41	940	25,24
	0,8	70,40	100			91,10	940	26,92
	2,7	71,35	50			125,26	950	36,62
80,00	0,1	80,05	250	972,7	4196,3	28,34	944	8,34
	0,2	80,10	200			45,35	960	13,12
	0,4	80,20	150			68,02	967	19,54
	0,7	80,35	100			79,36	975	22,61
	2,0	81,00	50			113,38	977	32,23

Capteur plan à eau, à simple vitrage (source artificielle)

T_e (°C)	ΔT (°C)	T_c (°C)	q_v (l/h)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg °C)	P (w)	ϕ (w/m ²)	η (%)
30,00	1,0	30,50	250	996,2	4178,8	289,09	560	64,02
	1,3	30,65	200			300,65		66,57
	2,0	31,00	150			346,91		76,82
	2,8	31,40	100			323,78		71,69
	5,7	32,85	50			329,56		72,98
40,00	0,7	40,35	250	993,0	4178,9	201,72	560	44,67
	1,0	40,50	200			230,53		51,05
	1,8	40,90	150			311,22		68,92
	2,5	41,25	100			288,17		63,81
	5,2	42,60	50			299,69		66,36
50,00	0,5	50,25	250	988,8	4181,0	143,54	560	31,78
	0,8	50,40	200			183,74		40,68
	1,5	50,75	150			258,38		57,22
	2,4	51,20	100			275,61		61,03
	5,1	52,55	50			292,83		64,84
60,00	0,4	60,20	250	983,8	4184,5	114,35	560	25,32
	0,6	60,30	200			137,22		30,38
	1,3	60,65	150			222,98		49,38
	1,8	60,90	100			205,83		45,58
	4,4	62,20	50			251,57		55,71
70,00	0,2	70,10	250	978,5	4189,7	56,94	560	12,61
	0,3	70,15	200			68,33		15,13
	0,8	70,40	150			136,65		30,26
	1,5	70,75	100			170,82		37,82
	3,8	71,9	50			216,37		47,91
80,00	0,1	80,05	250	972,7	4196,3	28,34	560	6,27
	0,2	80,10	200			45,35		10,04
	0,5	80,25	150			85,03		18,83
	1,1	80,55	100			124,72		27,62
	3,0	81,5	50			170,07		37,66

Capteur plan à eau, à double vitrage (source artificielle)

T_a (°C)	ΔT (°C)	T_c (°C)	q_v (l/h)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg°C)	P (w)	ϕ_s (w/m ²)	η (%)
30,00	1,2	30,60	250	996,2	4178,8	346,91	950	45,28
	2,2	31,10	200			508,80		66,42
	2,8	31,40	150			484,90		63,30
	4,3	32,15	100			497,23		64,90
	7,3	33,65	50			422,07		55,09
40,00	1,1	40,55	250	993,0	4178,9	316,98	950	41,37
	1,6	40,80	200			368,85		48,15
	2,5	41,25	150			432,25		56,42
	3,7	41,85	100			426,49		55,67
	6,6	43,30	50			380,38		49,65
50,00	0,8	50,40	250	988,8	4181,0	229,67	950	29,98
	1,5	50,75	200			344,51		44,97
	2,0	51,00	150			344,51		44,97
	3,2	51,60	100			367,48		47,97
	6,4	53,20	50			367,48		47,97
60,00	0,5	60,25	250	983,8	4184,5	142,94	950	18,66
	1,0	60,50	200			228,70		29,85
	1,7	60,85	150			291,60		38,06
	3,1	61,55	100			345,49		46,27
	5,6	62,80	50			320,19		41,79
70,00	0,3	70,15	250	978,5	4189,7	85,41	950	11,15
	0,6	70,30	200			136,65		17,84
	1,3	70,65	150			222,06		28,98
	2,1	71,05	100			239,14		31,22
	4,8	72,40	50			273,31		35,67
80,00	0,0	80,00	250	972,7	4196,3	-	950	-
	0,2	80,10	200			45,35		5,92
	1,1	80,55	150			187,08		24,42
	1,5	80,75	100			170,07		22,20
	3,9	81,95	50			221,09		28,86

TABLEAUX DE VALEURS : SOURCE ARTIFICIELLE. $\phi_s = 1000 \text{ W/m}^2$.

T_e	ΔT	$q_v(\text{g/h})$	$P(\text{w})$	T_e	ΔT	$q_v(\text{g/h})$	$P(\text{w})$
30	0,5	250	144,54	50	0,3	250	86,12
	0,5	240	138,76		0,3	240	82,68
	0,5	230	132,98		0,4	230	105,65
	0,5	220	127,20		0,4	220	101,05
	0,5	210	121,42		0,4	210	96,46
	0,5	200	115,63		0,4	200	91,87
	0,6	190	131,82		0,5	190	109,10
	0,6	180	124,88		0,5	180	103,35
	0,6	170	117,95		0,5	170	97,61
	0,7	160	129,51		0,5	160	91,87
	0,7	150	121,42		0,5	150	86,12
	0,8	140	129,51		0,6	140	96,46
	0,8	130	120,26		0,6	130	89,57
	0,8	120	111,01		0,7	120	96,46
	0,8	110	101,76		0,7	110	88,42
	0,9	100	104,07		0,9	100	103,35
	0,9	90	93,66		1,0	90	103,35
	0,9	80	83,26		1,1	80	101,06
1,0	70	80,94	1,2	70	96,46		
1,0	60	69,38	1,3	60	89,57		
1,0	50	57,82	1,4	50	80,38		
1,2	40	55,50	1,4	40	64,31		
1,8	30	62,44	1,7	30	58,57		
40	0,3	250	86,45	60	0,3	250	85,76
	0,3	240	82,99		0,3	240	82,33
	0,3	230	79,53		0,3	230	78,90
	0,3	220	76,07		0,3	220	75,47
	0,4	210	96,82		0,3	210	72,04
	0,4	200	92,21		0,4	200	91,48
	0,4	190	87,60		0,4	190	86,91
	0,5	180	103,74		0,4	180	82,33
	0,5	170	97,97		0,4	170	77,76
	0,6	160	110,65		0,5	160	91,48
	0,6	150	103,74		0,4	150	68,61
	0,6	140	96,82		0,5	140	80,05
	0,6	130	89,91		0,6	130	89,19
	0,7	120	96,82		0,6	120	82,33
	0,8	110	101,43		0,6	110	75,47
	0,8	100	92,21		0,8	100	91,48
	0,9	90	93,37		0,9	90	92,62
	1,0	80	92,21		1,0	80	91,48
1,1	70	88,75	1,2	70	96,05		
1,1	60	76,07	1,3	60	89,19		
1,1	50	63,39	1,6	50	91,48		
1,3	40	59,94	1,6	40	73,18		
1,7	30	58,78	1,9	30	65,18		

TABLEAUX DE VALEURS : SOURCE NATURELLE. $\phi_s = 830 \text{ W/m}^2$.

T_e	ΔT	$q_v(t/h)$	$P(w)$	T_e	ΔT	$q_v(t/h)$	$P(w)$
30	0,2	250	57,82	50	0,2	250	57,42
	0,2	240	55,50		0,2	240	55,12
	0,2	230	53,19		0,2	230	52,82
	0,2	220	50,88		0,2	220	50,58
	0,3	210	72,85		0,3	210	72,35
	0,3	200	69,38		0,3	200	68,90
	0,3	190	65,91		0,3	190	65,45
	0,3	180	62,44		0,3	180	62,01
	0,3	170	58,97		0,3	170	58,56
	0,4	160	74,00		0,4	160	73,49
	0,4	150	69,38		0,4	150	68,90
	0,4	140	64,75		0,4	140	64,30
	0,5	130	75,16		0,4	130	59,71
	0,4	120	55,50		0,5	120	68,90
	0,5	110	63,60		0,5	110	63,16
	0,5	100	57,82		0,6	100	68,90
	0,5	90	52,03		0,6	90	62,01
	0,6	80	55,50		0,6	80	55,12
	0,5	70	40,47		0,7	70	56,27
	0,3	60	20,81		0,8	60	55,12
0,4	50	23,12	1,0	50	57,42		
1,0	40	46,25	0,7	40	32,15		
1,3	30	45,09	1,4	30	48,23		
40	0,1	250	28,82	60	0,3	250	85,76
	0,2	240	55,33		0,3	240	82,33
	0,2	230	53,02		0,3	230	78,90
	0,2	220	50,72		0,2	220	50,31
	0,2	210	48,41		0,3	210	72,04
	0,3	200	69,16		0,3	200	68,61
	0,3	190	65,70		0,4	190	86,90
	0,3	180	62,24		0,4	180	82,33
	0,3	170	58,78		0,4	170	77,76
	0,4	160	73,77		0,4	160	73,18
	0,4	150	69,16		0,4	150	68,61
	0,4	140	64,55		0,5	140	80,05
	0,4	130	59,94		0,4	130	59,46
	0,5	120	69,16		0,5	120	68,61
	0,5	110	63,39		0,6	110	75,47
	0,5	100	57,63		0,6	100	68,61
	0,6	90	62,24		0,6	90	61,75
	0,6	80	55,32		0,7	80	64,03
	0,5	70	40,34		0,8	70	64,03
	0,4	60	27,66		0,8	60	54,88
0,5	50	28,81	0,7	50	40,02		
0,7	40	32,27	1,0	40	45,74		
1,3	30	44,95	1,2	30	41,16		

ANNEXE A : MANIPULATION SUR CAPTEURS PLANS.

1 - Capteur plan à eau à simple vitrage :

- Mettre en place le capteur plan.
- Mettre en marche le banc d'essai en suivant les conseils de l'annexe 1.
- Fixer un premier vitrage sur le capteur plan.
- Relever la valeur du flux solaire ϕ_s reçu sur le capteur à l'aide du solarimètre.
- Relever les valeurs de ΔT en faisant varier le débit volumique q_v de 50 en 50 l/h passant dans le capteur. Et ceci en fixant à chaque fois une température d'entrée T_e à l'aide du Thermomix. Et tenir compte de la variation du flux ϕ_s .
- Calculer ensuite la puissance reçue par le fluide, qui s'exprime par :
$$P = \int \cdot c_p \cdot \Delta T \cdot q_v$$

où \int et c_p varient suivant la température d'entrée T_e comme le montre les courbes qui suivent.

- Calculer le rendement du capteur $\eta = P / S \phi_s$ où S est la surface du capteur et $S = 0,36 \text{ m}^2$.
- Faire tout ce travail en source artificielle et ensuite en source naturelle.

2 - Capteur plan à eau à double vitrage :

Exactement la même démarche. Sauf qu'au lieu d'un seul vitrage, on mettra deux vitrages.

ANNEXE B : MANIPULATION SUR CAPTEUR PARABOLIQUE A
CONCENTRATION.

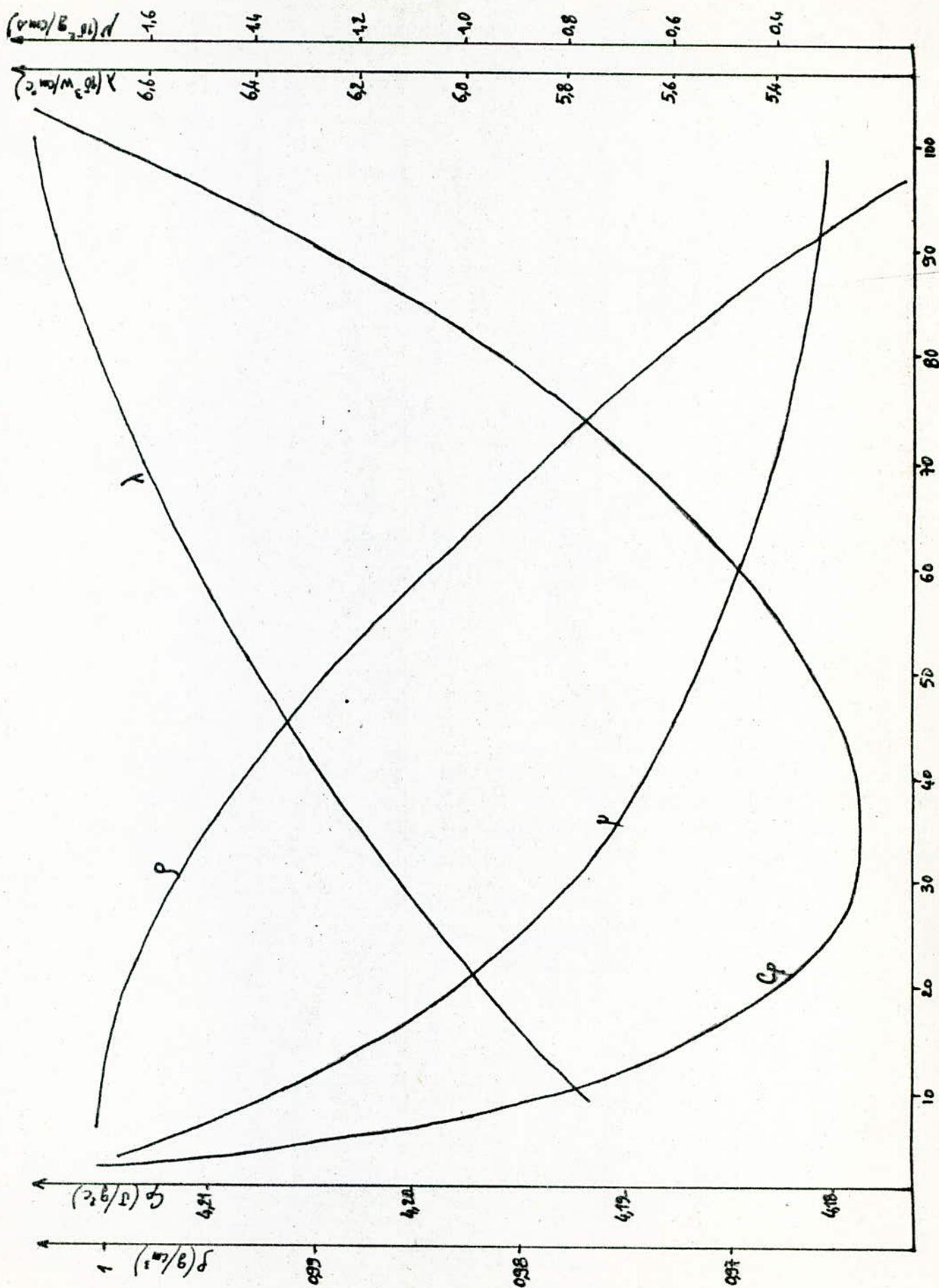
Voici les différentes étapes pour ce travail expérimental :

- Installer le capteur à concentration à l'arrière du banc d'essai à la place du capteur plan.
- Nettoyer s'il le faut la partie du concentrateur
- Mettre en marche le banc d'essai en suivant les conseils de l'annexe 1.
- Relever les valeurs de ΔT en faisant varier le débit volumique q_v de 10 en 10 l/h, ceci en fixant à chaque fois une température d'entrée T_e .
- Faire des enregistrements de ΔT en faisant varier q_v de 100 à 30 l/h
- Relever sur les courbes données, c_p, f, ρ , qui varient avec T_e .
- Calculer la puissance reçue par le fluide, avec l'expression :
$$P = f \cdot c_p \cdot \Delta T \cdot q_v$$
- Faire correspondre à chaque valeur du débit q_v le nombre de Reynolds, pour le traçage des courbes, et ceci par :
$$Re = \frac{4 \cdot f \cdot q_v}{\pi \cdot \rho \cdot d}$$
- Faire tout ce travail en source naturelle puis en source artificielle.

ANNEXE C : MANIPULATION SUR LE GROUPE PHOTOVOLTAIQUE.

Les étapes de manipulation sont les suivantes :

- Ne pas mettre en marche le banc d'essai
- Mettre en place le panneau de cellules photovoltaïques sur le côté droit du banc d'essai
- Brancher les fils du panneau de cellules sur l'arrière du banc d'essai en respectant la polarité des fils.
(rouge \equiv +)
- Exposer le panneau de cellules au flux solaire ϕ_s
- Faire varier la tension U en fonction de l'intensité I à l'aide du rhéostat R.
- Pour tracer la caractéristique de la cellule nous suivrons deux étapes :
 - 1)-Pour une température ambiante T_0 fixée aux alentours de la cellule, on trace $U = f(I)$ pour différentes valeurs du flux solaire ϕ_s .
 - Et on répète ceci pour d'autres températures ambiantes T_0 .
 - 2)-Pour un flux solaire ϕ_s fixé arrivant sur la cellule, on trace $U = f(I)$ pour différentes valeurs de la température ambiante T_0 .
 - Et on répète ceci pour d'autres valeurs du flux solaire ϕ_s .



REFERENCES ET BIBLIOGRAPHIE :

- Divers revues techniques de l'Entreprise internationale S.A. PHOTOWATT.
- Transmission de la chaleur et thermodynamique KREITH. F.
- Transmission de la chaleur Mc ADAMS.
- Emploi et installation des cellules, modules et stations solaires F. JUSTER.
- Revues sur les applications solaires, Commissariat aux énergies nouvelles.
- Les cellules solaires F. JUSTER
- L'énergie solaire dans le bâtiment Ch. CHAULIAGUET.
- Ingénierie des systèmes solaires A. SFEIR et G. GUARRACINO.

CONCLUSION :

Employer l'énergie solaire pour le chauffage, la production d'eau chaude et la production de courant est désormais possible et d'actualité. D'ores et déjà, les conditions économiques font que l'investissement supplémentaire nécessaire s'amortit assez vite ; pour certaines applications elles assurent aux utilisateurs économie et sécurité pour des fonctions essentielles telles que l'habitat.

C'est dans le domaine de l'énergie basse température que l'utilisation de l'énergie solaire peut remplacer avantageusement les ressources traditionnelles.

Les applications de cette énergie devenant courantes dans les bureaux d'études, la connaissance opérationnelle est donc indispensable.

Ce modeste volume propose de donner au lecteur ces bases nécessaires en faisant la synthèse des données disponibles dans les publications de recherches solaires et thermiques. Le but de cet ouvrage est d'amener le lecteur à un niveau de compétence à la fois opérationnel mais légèrement approfondi des systèmes solaires à basse température.

Il s'adresse aux lecteurs, ayant de bonnes connaissances en thermiques et qui désirent acquérir les moyens d'utiliser dans la pratique l'énergie solaire.

K.R.

