

PROJET  
de  
FIN D'ETUDES

sujet Gm. 0425

SYSTEME SOLAIRE  
ECONOMIE

Ecole polytechnique de  
THIES 1980-81

Directeur projet Auteur

André Wolski A.A. Seydi

école polytechnique  
de Thies

# REMERCIEMENTS

A la présentation de ce projet, je tiens à adresser mes sincères remerciements à Monsieur André Wolski, mon directeur de projet pour ses conseils et spécialement :

M<sup>r</sup> Vigneault, technicien à l'E.P.T pour sa disponibilité et son expérience.

M<sup>r</sup> François Houmaire, technicien à l'E.P.T pour son concours.

M<sup>r</sup> Marcel Blais, technicien à l'E.P.T pour son aide.

Ainsi que M<sup>r</sup> Claude Bertrand, technicien à l'E.P.T.

- Aux vacataires canadiens :

M<sup>r</sup> Pierre Carreau, Professeur de transmission de chaleur.

M<sup>r</sup> Kfoury, Professeur air climatisé et réfrigération.

- Aux membres de l'I.P.M :

M<sup>r</sup> Gerard Madon, ingénieur de recherches

à I.P.M et ses collaborateurs Lamine Niop, Bocar Sy, et 7 Brahim Lô diplômés de l'E.P.T pour leurs informations et documents.

- Aux militaires de l'E.P.T :

M<sup>r</sup> Abdoulaye Baye.

Ainsi qu'à toutes les autres personnes qui ont participé de loin ou de près à l'étude de ce projet.

# SOMMAIRE

Le présent projet a pour but la réalisation ou l'étude d'un système solaire économique intégré à un chauffe-eau électrique. Ce système doit pouvoir optimiser la consommation d'énergie électrique d'une famille de cinq membres minimum vivant au campus de l'E.P.T. Pour ce faire, nous utilisons un collecteur plan pour capter le rayonnement solaire par le principe de l'effet de serre.

Les résultats obtenus expérimentalement sur un modèle réduit sont inadmissibles. (mauvais choix du vitrage). Mais l'étude théorique basée sur la conception des collecteurs solaires de M<sup>r</sup> Michel Chateauminois nous a permis d'obtenir un dimensionnement optimum de la surface de captation et de réaliser une économie électrique de 278071F par année soit 92% du coût d'investissement.

# TABLE des MATIERES

	pages
<u>Introduction:</u>	1
<u>Chapitre 1</u> Généralités	3
1-1 collecteurs solaires	3
1-1-1 Captage	4
1-1-2 stockage	5
1-1-3 Regulation capteur-stockage	6
1-2 Couplage capteur-stock	6
1-2-1 échangeur	6
1-2-2 circulateur	6
<u>Chapitre 2</u> Bilan Thermique	7
2-1 ensoleillement du site	8
2-1-1 ensoleillement de l'azar (37 Hies)	8
2-1-2 l'inclinaison convenable du capteur	14
2-2 Capacité du système : (Besoin)	15
2-2-1 Consommation volumique en eau chaude	16
2-2-2 température de distribution	17
2-2-3 Capacité prévisionnelle du système	18

<u>Chapitre 3</u> Etude Théorique :	21
3-1 Coefficient optique moyen ( $\Gamma_{\alpha}$ )	21
3-2 La conductance globale des pertes	23
3-2-1 Schema	23
3-2-2 Calculs	23
3-3 Rendement Théorique $\eta$	24
3-4 Debit (g)	25
<u>Chapitre 4</u> Etude expérimentale d'un capteur	28
4-1 description technique du capteur plan	28
4-1-1 Schema	28
4-1-2 Principe de fonctionnement	30
4-1-3 Les matériaux	31
4-2 Expérience proprement dite	32
4-2-1 Matériel utilisé	32
4-2-2 Tableaux de mesures	33
4-2-3 Résultats	34
<u>Chapitre 5</u> Dimensionnement du capteur	38
5-1 Caractéristiques souhaitées du collecteur	38
5-1-1 conductance globale des pertes	38
5-1-2 débit efficace à circuler	38
5-2 Dimensionnement proprement dit	39

5-2-1	Surface de captation	39
5-2-2	Dimensions tuyauterie (serpentin)	43
5-2-2-1	Longueur du serpentin	44
5-2-2-2	Diamètre Serpentin	44
5-3	Puissance circulateur	44
<u>Chapitre 6</u>	Bilan économique :	47
6-1	Plan de l'installation	47
6-2	Coût d'investissement	48
6-3	Comparaison entre kWh « solaire » et kWh électrique	50 50
6-4	Coût spécifique de l'installation	51
6-5	Seuil critique d'investissement spécifique	51
6-6	Loyer d'argent correspondant à l'investisse- -ment	52
<u>Conclusions</u> :		54
<u>Annexes</u> :		56
Annexe 1	Ensoleillement E et Résultats EN	57
Annexe 2	Courbes de $E_p$ versus EN	72
<u>Bibliographie et références</u>		76

# INTRODUCTION

Il y a des pays en développement pétroliers et des pays en développement non pétroliers. Le Sénégal fait partie de ce dernier groupe de pays. Il consomme annuellement plus de cinquante milliards de francs C.F.A pour son importation de pétrole (40% de ses ressources d'exportation). Il consomme trois à cinq fois plus d'énergie que certains pays développés pour la cuisson des aliments. Ces chiffres suffisamment éloquents ont poussé les sénégalais à l'utilisation de l'énergie solaire qui rapporte une révolution par le fait qu'elle n'est pas la propriété exclusive d'un groupe de pays, mais aussi par l'autonomie qu'elle peut donner, comme les autres énergies renouvelables.

C'est ainsi que l'E.P.T par le biais d'un professeur a proposé l'étude d'un système solaire à conception économique pour le chauffage de l'eau d'une famille vivant au Campus. Le système sera muni d'une énergie d'appoint (électrique). C'est l'objet du projet que



nous vous présentons dans les pages suivantes.

# CHAPITRE 1

## Generalites

Avant d'entrer dans le vif du sujet, il serait intéressant de faire une description sommaire des différents composants des installations solaires à eau chaude sanitaire en vertu desquels, un choix judicieux est souhaité

### 1-1 Collecteurs solaires:

Un système de chauffage solaire (ou conversion thermique de l'énergie solaire) est constitué d'un ensemble d'éléments remplissant les fonctions de:

- Captage:
- Stockage:
- Distribution et régulation:

Comme la figure # 1 ci dessous.

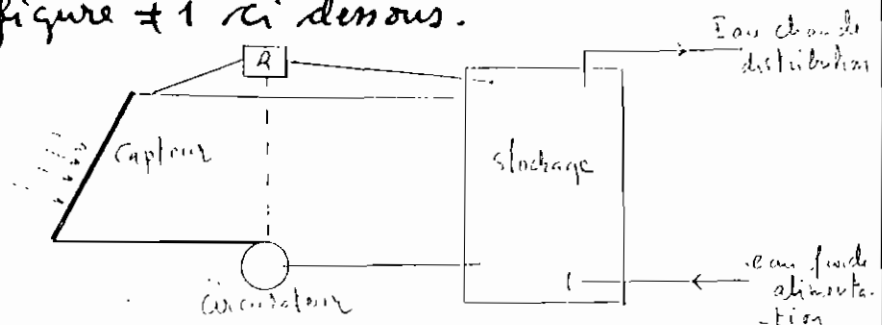


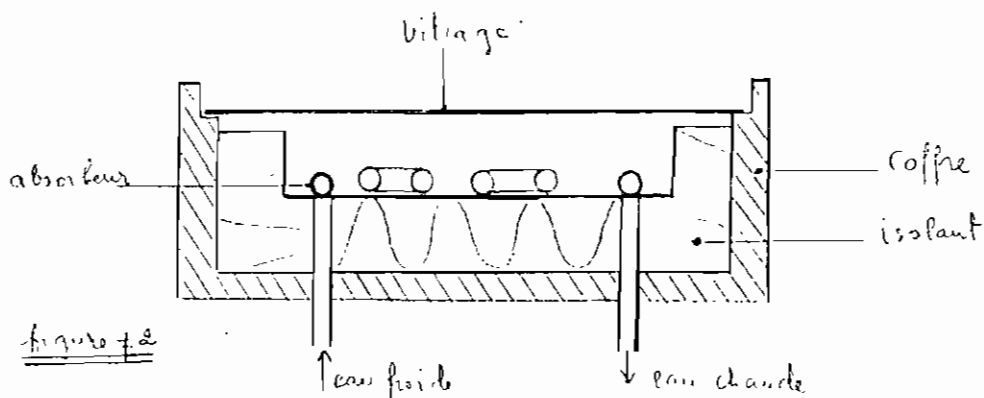
figure # 1

### 1.1.1 Captage :

L'élément spécifique des installations solaires est le capteur solaire à conversion thermique à concentration ou sans concentration. Exposé au soleil, il s'échauffe par transformation de l'énergie rayonnante reçue en énergie calorifique. L'énergie ainsi créée est transférée à un fluide caloporteur (général l'eau). Les principaux éléments d'un capteur plan (sans concentration) sont :

- le vitrage.
- l'absorbeur.
- le circuit du fluide caloporteur.
- le coffre et l'isolant.

Ces éléments sont représentés dans la figure # 2 ci-dessous.



Le vitrage doit réaliser un double rôle :

- recevoir le rayonnement sans réflexion, ni diffusion importante et sans absorption inutile.
- s'opposer aux déperditions thermiques par convection et rayonnement (puisque  $T^{\circ}$  absorbeur est supérieure à celle de l'ambiante : journée).

En résumé : le vitrage laisse passer le rayonnement solaire incident avec un facteur de transmission très élevé, mais opaque au rayonnement infrarouge émis par l'absorbeur porté à la température de 50 à 100°C.

L'isolation arrière et latérale a pour but de diminuer les pertes thermiques vers l'arrière et sur les côtés du capteur. Elle doit être un bon isolant et résistante aux hautes températures qui peuvent être atteintes, en cas de non circulation du fluide caloporteur.

Le coffre, quant à lui, enveloppe l'ensemble des composants précédents et doit résister aux chocs, aux agents atmosphériques et à la corrosion.

### 1.1.2 Stockage :

Le stockage regle au cours d'une période de

fonctionnement, le bilan entre trois quantités de chaleur:

- la chaleur fournie par le capteur en cas d'ensoleillement suffisant.
  - les calories utilisées par le système en cas de besoin: puisage d'eau chaude sanitaire.
  - les pertes thermiques propres du stockage.
- Le stockage est en général défini par son inertie (sa valeur en eau).

1-1-3 Régulation capteur-stockage et distribution:

La régulation à l'ensemble capteurs-stockage et la régulation différentielle qui permet au capteur de chauffer l'eau de la cuve dès que la température du fluide caloporteur est supérieure à celle-ci.

1-2 Couplage capteur-stock:

1-2-1 échangeur:

(Utile mais pas nécessaire).

1-2-2 circulateur:

Utile mais pas toujours nécessaire: Thermo siphon.

# CHAPITRE 2

## Bilan thermique

L'utilisation des ressources solaires à des fins énergétiques nécessite la connaissance de certains paramètres physiques et statistiques du rayonnement que l'on cherche à capter. Une telle démarche soulève des problèmes astronomiques, météorologiques, climatiques et géographiques, dont certains n'ont toujours pas reçu de réponse précise, principalement à cause de la nature presque imprévisible des phénomènes climatiques liés à la propagation du rayonnement dans l'atmosphère.

Pourtant, on ne peut concevoir un développement économique, efficace et harmonieux de l'énergie solaire sans une évaluation précise des ressources du site et des besoins énergétiques de l'habitat. Pour atteindre ce but, il nous est nécessaire pour l'instant d'analyser l'ensoleillement de THIES pour estimer l'énergie incidente (l'apport solaire) durant toute l'année et la capa-

-ité que doit avoir le futur système solaire : consommation journalière, mensuelle ou annuelle en eau chaude de membres de l'habitat.

### 2-1 Ensoleillement du site :

Le rayonnement solaire qui nous parvient, se situe dans une bande spectrale grossièrement comprise entre 0,3 et 2,5  $\mu$  de longueur d'onde. Ce rayonnement est direct, diffus et réfléchi sur un plan en position quelconque à la surface du sol. La puissance ainsi reçue par ce plan dépend de l'heure, du jour, du lieu (site), de l'inclinaison et de l'orientation du plan. Il faut donc l'estimer ou le mesurer pour faire la conception d'un collecteur solaire à un lieu donné. Nous nous contentons à toute fin pratique à celui de Dakar mesuré par I.P.H. Cet ensoleillement est à la base de certains de nos calculs dont voici l'extrait.

#### 2-1-1 ensoleillement de Dakar (2 I.H.I.es) :

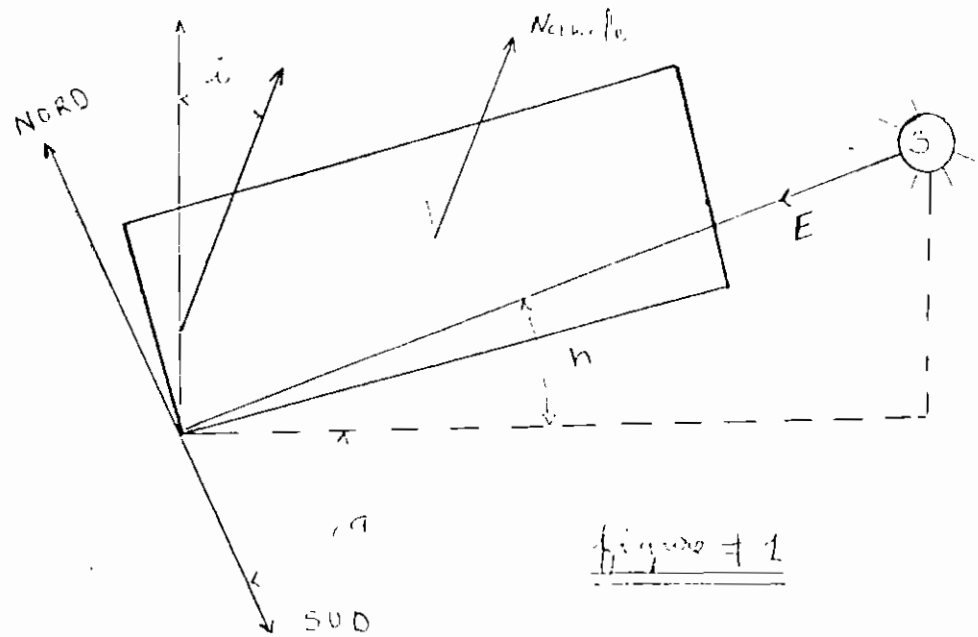
<u>latitude</u> :	15° Nord
<u>plan</u> :	Horizontal
<u>Années</u> :	1967 à 69
<u>mois</u> :	Janvier

Heures	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Energie	1,63	12,31	28,35	44,29	54,91	67,04	69,77	53,52	48,57	34,53	12,53	1,63	0

Nota: unite' : calories par heure et par  $\text{cm}^2$ .  
 L'ensoleillement des autres mois se trouve en annexe 1  
 page 58



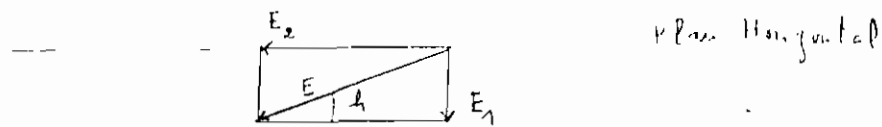
Ces valeurs sont valables que sur un plan horizontal.  
 Il serait donc nécessaire de voir les inclinaisons  
 suivantes :  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  du plan  
 par rapport à l'horizontal et orienté vers le Sud  
 pour mieux apprécier l'inclinaison convenable.  
 Nous avons alors la figure # 1 ci-dessous.



- $i$  : angle d'inclinaison de la normale du plan  
 avec la verticale du lieu. ( $^\circ$ )  
 $a$  : angle d'azimut du soleil. ( $^\circ$ )  
 $h$  : hauteur angulaire du soleil ( $^\circ$ )  
 $E$  : rapports solaires réels moyens

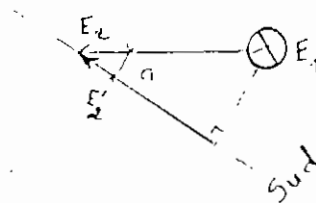
Pour déterminer la composante normale de  $E$  au plan incliné sur l'Horizontale et orienté vers le sud, nous procédons de la manière suivante :

- Projection de  $E$  sur le plan horizontal sans tenir compte de la direction Sud. On a :



$$E_1 = E \sin h \quad , \quad E_2 = E \cos h$$

- Projection de  $E$  sur le plan horizontal en tenant compte de la direction Sud. on a :



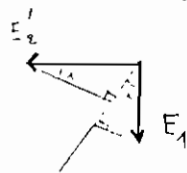
$$E_1 = E_1$$

$$E_2' = E_2 \cos a$$

- Projection de  $E$  suivant la normale du plan incliné

on a :

normale au plan incliné



Horizontale vers le Sud



École Polytechnique  
1905

La projection de  $E_1$  et de  $E_2'$  suivant la normale du plan incliné et orienté vers le sud sont respectivement  $E_{N1}$ ,  $E_{N2}'$ .

$$E_{N1} = E_1 \cos i$$

$$E_{N2}' = E_2' \sin i$$

$$\text{et } E_N = E_{N1} + E_{N2}' = E_1 \cos i + E_2' \sin i$$

$$\text{ou encore } E_N = E \sinh \cos i + E \cosh \cos a \sin i$$

$$\Rightarrow \boxed{E_N = E (\sinh \cos i + \cosh \cos a \sin i)} \quad (1)$$

où  $E_N$  est la résultante normale de  $E$  au plan incliné et orienté vers le sud.

Les valeurs de  $h$  et  $a$  sont déterminées par les formules suivantes :

$$\sin h = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cdot \cos AH$$

$$\sin a = \frac{\cos \delta \sin AH}{\cos h}$$

où  $\phi$  : latitude de THIES =  $14,6^\circ$

$\delta$  : déclinaison solaire (Tableau ci-dessus)

AH : angle horaire (Tableau ci-dessus)

Tableau "déclinaison moyenne mensuelle du soleil"

MOIS	Janv	Fevr	Mars	Avril	Mai	juin	Juillet	Août	sept	oct	Nov	Déc.
$\delta$	-20,8	-19,3	-1,9	19,9	+18,9	+23,1	+27,3	+19,7	+5,0	-8,8	-19,4	-23,0

"Angle horaire AH"

heures	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
A.H°	-75	-60	-45	-30°	-15	0	+15	+30	+45	+60	+75	+90	+105

Les valeurs de  $h$ , et  $a$  nous permettent de déterminer  $E_N$  (équation 1) où  $E$  représente l'apport solaire réel des années 1967 - 1969 que nous considérons, à toute fin pratique, comme l'apport solaire réel moyen des années futures.

Les valeurs de  $E$  sont dans l'annexe 1, page 58

Les valeurs de  $E_N$  du capteur incliné et orienté vers le sud sont programmées et calculées. (voir annexe 1)

NOTA: Nous avons négligé le rayonnement réfléchi du sol (ou albédo du sol). Sa valeur dépend de la nature du sol. En la négligeant, l'énergie d'appoint (électrique) sera inférieure donc à la valeur prévue par

le système polaire conçu.

### 2-1-2 L'inclinaison convenable du capteur:

Pour faire un choix convenable de l'inclinaison du capteur, il est nécessaire de tracer des courbes, pour une inclinaison donnée, la variation de  $E_N$  en fonction des douze mois de l'année.

Ces courbes sont illustrées dans la figure 12 de l'annexe 1 page 70

La figure # 2 montre l'allure de la variation annuelle de  $E_N$  pour différentes inclinaisons ( $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ ). L'examen de la figure nous permet de constater que certaines inclinaisons privilégient certaines époques de l'année et serait donc plus favorables à des utilisations à ces périodes. Les familles Sémigalaises consomment en général plus d'eau chaude à des périodes de froid, i.e la période de Novembre à Mars. Cette période serait donc convenable pour inclinaison de  $30^\circ$ . En plus, on choisira cette inclinaison ( $30^\circ$ ), si la surface du capteur est relativement faible devant le besoin en eau chaude. Mais si la surface s'avère trop forte pendant cette période froide, l'inclinaison de  $45^\circ$  serait la plus appropriée car nous aurons une bonne protection naturelle contre les surchauffes.

## 2-2 Capacité du système: (Besoin)

L'étude que nous entreprenons dans cette sous section est l'optimisation de couverture la plus que possible d'un besoin de chaleur (eau chaude sanitaire) par le rayonnement solaire. Ce besoin se

-rait la capacité prévisionnelle du système solaire à installer. Il est donc bon d'évaluer ce besoin de chaleur. Cette évaluation nécessite la connaissance de la température de distribution et la consommation volumique en eau chaude de votre famille (famille à l'étude = cinq membres).

2-2-1 Consommation volumique en eau chaude

L'enquête que nous avons menée pour une estimation de la consommation des familles du Campus n'a pas abouti pour des raisons suivantes:

- la presque totalité des familles du campus ne consomment plus de l'eau chaude sanitaire (électricité chère).
- les familles qui en consomment, utilisent au maximum une heure le chauffe-eau électrique.

Pour des fins pratiques, la consommation volumique en eau chaude dépend du confort des individus en général, comme indique le tableau ci-dessous.

Confort	minimum	moyen	maximum
consommation journalière par personne (litres/personne-jour)	30	50	75

En se référant au tableau ci dessus, nous considérons que notre famille est de confort moyen. i.e qu'elle consomme 50 litres/jour-personne mais une consommation moyenne annuelle car il y a des variations saisonnières suivant des périodes chaudes et froides (soit  $\pm 10\%$ ).

Notre famille (5 personnes) consomment donc en moyenne par jour 250 litres.

### 2-2-2 Température de distribution :

La température d'utilisation de l'eau chaude dépend en général de l'usage qui en est faite. Nous prenons pour les différents usages, des températures suivantes récapitulées dans le tableau ci-dessous.

usages	T° C
douche	40°
Lavabo	35°
evier	50°

A des fins techniques, nous prenons 50°C comme température de distribution.



### 2-2-3 Capacité prévisionnelle du système solaire.

Considérons comme système, la cuve de stockage.

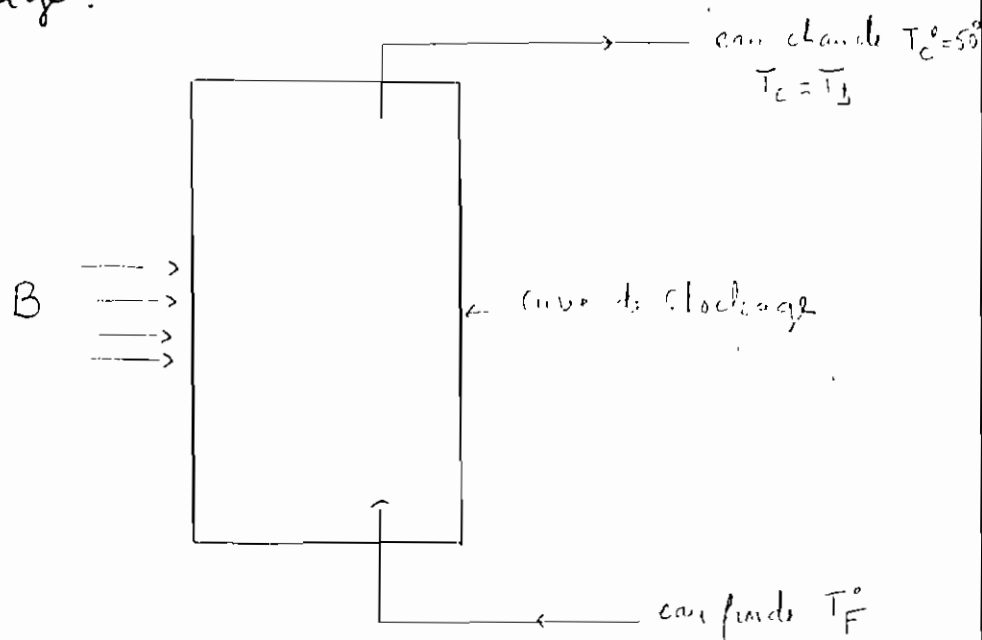


figure # 2

Soit  $B$  la capacité du capteur solaire ( $\text{JWh/jour}$ )

Le bilan thermique s'écrit :

$$dB = dH \quad \text{ou} \quad B = H$$

où  $H$  est l'enthalpie de l'eau de la cuve.

$$dH = M c_p dt$$

Considérant  $c_p$  constante sur l'intervalle de variation de la température de l'eau i. e de  $T_f^0$  à  $T_c^0$ , nous

pourrions écrire :  $H = M c_p \Delta T$

où  $M$  : masse de l'eau

$C_p$  : chaleur spécifique de l'eau à pression constante.

$$\Delta T : T_C^\circ - T_F^\circ$$

on sait que  $M = \rho \times \text{Volume} = \rho \cdot C$

$\rho$  : masse volumique de l'eau

$C$  : consommation journalière

Les valeurs de  $C_p$  et  $\rho$  d'eau correspondent à la température de  $(T_C^\circ + T_F^\circ)/2$ . soit environ  $40^\circ\text{C}$ .

$$C_p \approx 998 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$$

$$\rho \approx 992 \text{ kg/m}^3$$

Par suite  $H = 1,15 \times 10^{-3} C \Delta T$   
 ( $\text{kwh/jour}$ ) ( $\text{l/jour}$ ) ( $^\circ\text{C}$ )

Par conséquent :  $B = 1,15 \times 10^{-3} C \Delta T$  (1)  
 $\text{kwh/jour}$  ( $\text{l/jour}$ ) ( $^\circ\text{C}$ )

Pour :  $C = 250 \text{ l/jour}$  (consommation journalière la famille)  
 $T_C^\circ = T_D$  : température de distribution

(1)  $\Rightarrow B_m = 0,2875 (50^\circ - T_F)$  (2)  
 $\text{kwh/jour}$  ( $^\circ\text{C}$ )

La température d'alimentation en eau froide  $T_f$  par le réseau n'est pas une constante durant l'année. Il serait donc nécessaire d'évaluer ses valeurs mensuelles.

Résultats des mesures menées sur le Campus:

Mois	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai
$T_f$ °C	27	26	26,3	27,5	27,3	27

Les valeurs des mois de juin à novembre sont supposées égales aux températures moyennes de l'ambiante.

Mois	Jun	Juil	Août	Sept	Oct	Nov
$T_f$ °C	28	28,5	30	29,5	29	28

Ces tableaux nous permettent de calculer les capacités prévisionnelles énergétiques pour habières de capteurs (besoin) qui sont récapitulées dans le tableau ci-dessous (par mois).

Mois	Dec	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Jun	Juil	Août	Sept	Oct	Nov
$B_m$	6,6	6,9	6,8	6,5	6,53	6,6	6,3	6,2	5,8	5,9	6,1	6,3

note:  $B_m$  en kWh/jour

# CHAPITRE 3

## Etude Theorique

L'étude théorique qui suit, n'a pour but qu'uniquement pour des fins pratiques sur un collecteur solaire plan à bas potentiel en vue d'établir :

- le coefficient optique moyen d'un capteur-plan
- la conductance globale des pertes du capteur

Et en déduire son rendement moyen et son débit. Les résultats seront sous forme de formules dont les valeurs seront évaluées dans l'étude expérimentale.

### 3-1 Coefficient optique moyen ( $\tau\alpha$ ) :

Le produit transmission-absorption  $\tau\alpha$  est un facteur qui dépend de la nature du vitrage et de la surface réceptrice du capteur. Le rayonnement solaire qui est transmis par le vitrage, est partiellement absorbé par la surface réceptrice. Le reste du rayonnement est réfléchi par cette même surface comme il

apparaît à la figure ci-dessous :

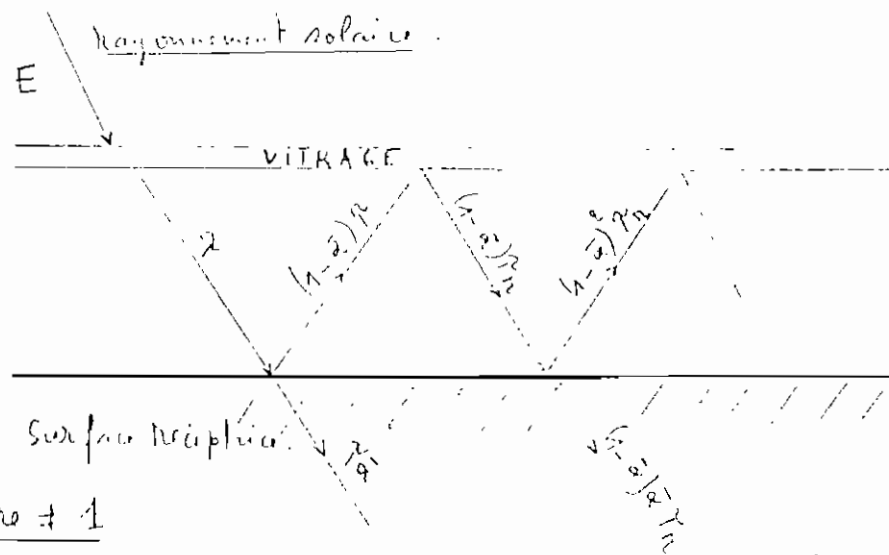


Figure # 1

Soit  $E_a$  l'énergie absorbée par mètre carré de la surface réceptrice. On peut écrire alors :

$$E_a = (\tau \bar{\alpha} + (1-\bar{\alpha}) \bar{\alpha} \tau n + (1-\bar{\alpha}) \bar{\alpha} \tau n^2 \dots) E$$

$$E_a = \tau \bar{\alpha} (1 + (1-\bar{\alpha}) n + (1-\bar{\alpha})^2 n^2 \dots) E$$

on sait que :  $E_a = (\tau \alpha) E$

$$\Rightarrow (\tau \alpha) = \tau \bar{\alpha} (1 + (1-\bar{\alpha}) n + (1-\bar{\alpha})^2 n^2 \dots)$$

$$\Rightarrow \boxed{(\tau \alpha) = \frac{\tau \bar{\alpha}}{1 - (1-\bar{\alpha}) n}} \quad (1)$$

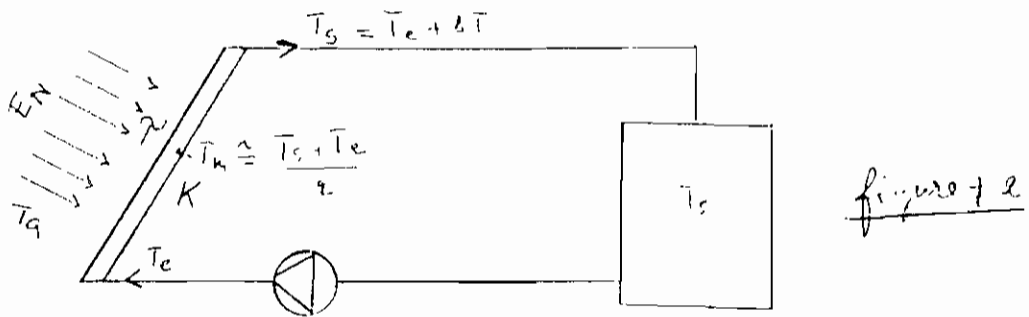
où  $\tau$  : coefficient de transmission  $\tau$  du vitrage.

$\bar{\alpha}$  : coefficient d'absorption de la surface.

$\bar{\tau}$  : Coefficient de reflexion du vitrage.

### 3-2. La conductance globale des pertes du capteur

#### 3-2-1 schema:



#### 3-2-1 Calculs:

L'équation de la conservation de l'énergie pour le collecteur (capteur) donne:

$$(\bar{\tau}\alpha) E_n = \bar{E}_U + K (T_m - T_a) \quad (2)$$

où  $E_n$  : apports solaires normaux au capteur

$\bar{E}_U$  : apports solaires utilisables.

$K$  : conductance globale des pertes du capteur

$T_m$  : Température moyenne du capteur et du fluide.

$T_a$  : Température de l'air atmosphérique

$(\bar{\tau}\alpha)$  : Coefficient optique moyen :

On sait que l'efficacité de l'absorbeur en serpentin du capteur est défini comme suite :

$$F = \frac{E_p}{E_u}$$

où  $F$  : efficacité

$E_p$  : Energie produite dans le serpentin.

$$\text{or } E_p = D \rho C_p (T_s - T_a) \quad (3)$$

où  $D$  : debit du fluide caloporteur,

le rendement instantané  $\eta$  du capteur s'écrit :

$$\eta = \frac{E_p}{E_N}$$

L'équation (2) nous donne :

$$K(T_m - T_a) = (\overline{\alpha}) E_N - E_u$$

$$\Rightarrow K(T_m - T_a) = (\overline{\alpha}) E_N - \frac{E_p}{F} = E_N \left( \overline{\alpha} - \frac{\eta}{F} \right)$$

$$\text{i.e. } \boxed{K = \frac{E_N \left( \overline{\alpha} - \frac{\eta}{F} \right)}{T_m - T_a}} \quad (4)$$

### 3-3 Rendement Thermique :

Par référence aux machines thermiques, le rendement  $\eta$  d'un capteur est défini comme étant :

$$\eta = \frac{\text{apports solaires produits } (E_p)}{\text{apports solaires réels normaux } (E_N)}$$

Il est intéressant de noter que le soleil est une variable aléatoire et nous oblige à définir un rendement sur un intervalle de temps.

$$\eta = \frac{\int_{dt} E_p dt}{\int_{dt} E_N dt} \quad (5)$$

Pour un rendement instantané, nous pouvons écrire:

$$\eta = \frac{\bar{E}_p}{E_N}$$

En utilisant l'équation (4),  $\eta$  devient:

$$\eta = F \left( \rho_\alpha - \frac{k(T_m - T_a)}{E_N} \right) \quad (6)$$

### 3-4 Débit (D)

Pour connaître le débit convenable qu'il faut faire circuler dans le capteur, il serait nécessaire de faire la comparaison de rendement  $\eta_0$  à débit infini et  $\eta$  à débit fini d'abord et ensuite fixer l'erreur relative admissible et en fin calculer le débit.

$\eta_0$  du débit infini:



En se référant à la figure (2), nous pouvons écrire: avec un débit infini.

$$T_s = T_e + \varepsilon \approx T_m.$$

$$\Rightarrow T_m - T_a \approx T_e - T_a$$

l'équation (6) entraîne:

$$M_0 = F \left( P_a - \frac{k(T_e - T_a)}{EN} \right) \quad (7)$$

M du débit fini

l'équation (6) donne:

$$M = F \left( P_a - \frac{k(T_m - T_a)}{EN} \right)$$

$$\text{avec } T_m = \frac{T_s + T_e}{2} = T_e + \frac{T_s - T_e}{2}$$

$$\Rightarrow T_m - T_a = T_e + \frac{T_s - T_e}{2} - T_a = \frac{T_s - T_e}{2} + (T_e - T_a)$$

posons  $\Delta T = T_s - T_e$  ;  $\Delta T_0 = T_e - T_a$

on sait que  $M = \frac{EP}{EN}$  et  $EP = \Delta p C_p \Delta T$

$$\Rightarrow M = \frac{\Delta p C_p \Delta T}{EN} \Rightarrow \frac{\Delta T}{2} = \frac{M EN}{2 \Delta p C_p}$$

$$\Rightarrow M_0 - M = \frac{k \Delta T / e}{EN} = \frac{k h EN}{2 \Delta p C_p EN} = \frac{M k}{2 \Delta p C_p}$$

$$\Rightarrow M = \frac{M_0 \left( \frac{1}{1 + k / (2 \Delta p C_p)} \right)}{\quad} \quad (8)$$

$$(7) - (8) = M_0 \left( 1 - \frac{1}{1 + \frac{K}{2Df_{CP}}} \right)$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{M_0 - h}{M_0} = \frac{K}{K + 2Df_{CP}}} \quad (9)$$

Nous admettons une erreur relative admissible du débit (ou pertes dues au débit par rapport au débit infini) de 5%. L'équation (9) nous permet donc de tirer le débit fini (D) convenable.

$$D = \frac{K(1 - 5\%)}{5\% \cdot 2f_{CP}} \quad (10)$$

# CHAPITRE 4

## Etude expérimentale d'un capteur plan

Ce présent chapitre a pour but uniquement la détermination expérimentale des caractéristiques d'un capteur modèle, définies théoriquement au chapitre précédent, qui sont les suivantes :

- la conductance globale des pertes du capteur ( $G$ ).
- le rendement  $\eta$ .
- le débit efficace.

Une étude comparative de l'apport solaire produit et l'apport électrique y sera développée et la courbe de  $E_p$  versus  $E_N$ .

### 4-1 Description technique du capteur plan :

#### 4-1-1 Schema :

caricatures  
des dimensions

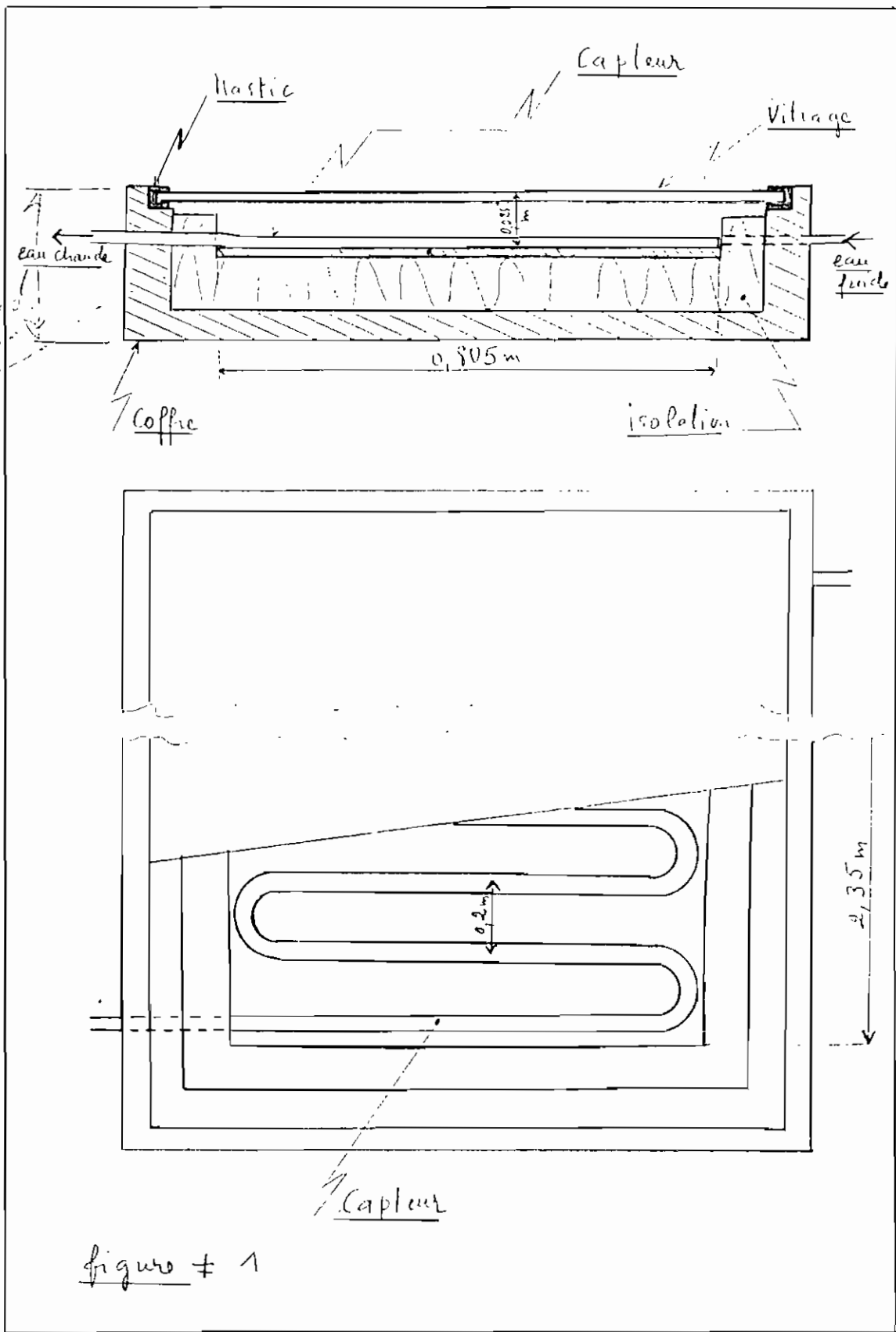


figure # 1

#### 4-1-2 Principe de fonctionnement :

L'énergie rayonnée par le soleil est une <sup>énergie</sup> électromagnétique. Au niveau du sol, la réception de cette énergie qui se situe dans le domaine des longueurs d'ondes allant de 0,25 à 2,5  $\mu\text{m}$ , est faite par un capteur plan peint au noir mate (. plaque d'acier galvanisé + serpentini en cuivre : tous peints au noir mate). Le capteur, soumis au rayonnement solaire n'échauffe et va donc émettre à son tour un rayonnement dont les caractéristiques sont différentes de celles du rayonnement solaire. Il s'agit en effet le domaine des longueurs d'ondes infrarouges lointaines de 2,5 à 15  $\mu\text{m}$ .

La comparaison des deux domaines montre la non superposition des longueurs d'ondes. On limite ainsi les pertes thermiques par la surface avant du capteur en interposant entre elle et la source solaire un écran transparent (vitrage) au rayonnement solaire et opaque au rayonnement infrarouge. C'est l'effet de serre. Les pertes thermiques par la face arrière et les

Côtés du capteur sont limités par une isolation Thermique (le polystyrène rigide).

La température obtenue au capteur est alors utilisée pour chauffer le fluide caloporteur (eau) qui le serpente.

#### 4-1-3 Les matériaux:

##### a) Capteur:

Le choix s'est porté sur un capteur de feuille d'acier galvanisé munie d'un serpent en cuivre, tous peints en noir mate, pour des raisons suivantes:

- le serpent en cuivre a des qualités physiques remarquables: conductivité thermique élevée, durée de vie illimitée.

La peinture noire mate augmente son facteur d'absorption thermique. Il est rendu à une feuille d'acier galvanisé en noir mate pour éviter tout problème de corrosion et augmenter la surface de captation.

- les matériaux sont disponibles partout
- le temps de fabrication est court.

### b) effet de serre :

L'effet de serre est obtenu par le vitrage ordinaire (épaisseur = 6 mm). C'est le meilleur matériau à l'heure actuelle pour les collecteurs solaires car il a une transmissivité du rayonnement solaire élevée (82%) et est abondant sur le marché local.

Une erreur s'est glissée dans le choix de ce matériau, car dans le montage expérimental, nous avons utilisé un vitrage ordinaire mais teinté, i.e. il a été trempé dans matière colorante qui réduit de 75% son coefficient de transmission : renseignement reçu de mon professeur de climatisation et réfrigération.

### c) Isolation :

L'isolation est réalisée par le polystyrène rigide qui est disponible sur le campus et placé sous le capteur et ses bords.

## 4-2 Expérience proprement dite :

### 4-2-1 Matériel utilisé

1 solarimètre Pana-Use Metermater R. H

1 multimètre Avometer Model EM 272

1 potentiomètre Crocodile P.6

1 chronomètre

3 thermomètres

1 Bidon

1 pompe

#### 4.2.2 Tableaux de mesures :

Surface capteur :  $1,33 \text{ m}^2$

Heures	Volumé stockage	$T_5^{\circ}$ stock début	bilbit log/m <sup>2</sup>	$T_a^{\circ}$ °C	$T_r^{\circ}$ °C	$T_b^{\circ}$ °C	$E_N^{\circ}$ (h <sub>v</sub> )	$T_5^{\circ}$ stock fin
9	2,50L	29,5	5,8	26	31	34,5	5	—
10		—		28,5	34	35,5	7	—
11		—		30	35	36,5	8,8	—
12		—		30	37,5	39	10	—
1		—		33	38,5	40	10	—
2		—		33	40	41,3	9,2	—
3		—		39,5	40	41,2	8,4	—
4		—		39	40	40,6	6,5	40

Journée : dimanche 10-05-81

orientation : Sud

inclinaison :  $15^{\circ}$

Temps : nuageux et vent faible



Journée Lundi 11-05-81

orientation : Sud

inclinaison : 15°

Temps : nuageux et vent faible.

Heure	Volume stockage	T° stockage début	Nuit kg/m <sup>3</sup>	T <sub>a</sub> °C	T <sub>e</sub> °C	T <sub>s</sub> °C	E <sub>N</sub> (kWh)	T° stockage fin
9	2,50l	32	4,5	26,5	32	32,5	3,8	-
10	"	-	"	32	36,5	39	6	-
11	"	-	"	32,5	39,5	41	7,8	-
12	"	-	"	33	42	43,5	9	-
1	"	-	"	36	43	45	9,2	-
2	"	-	"	36	43,5	45	8,9	-
3	"	-	"	34	43,5	44,6	7,5	-
4	"	-	"	32,5	43	44	6	42
5	"	-	"	31	41,5	42	3,5	41

Surface capteur = 1,89 m<sup>2</sup>

#### 4-23 Résultats :

Nous utilisons les formules développées au chapitre 3 et adaptées aux unités de mesures des tableaux ci-dessous. On a alors après transformation :

$$a) \quad E_p = b p c_p (T_s - T_e)$$

où  $\rho = 992 \text{ kg/m}^3$  ;  $C_p = 0,998 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$

$$E_p = 59,4 (T_s - \bar{T}_e) D \quad (1)$$

$(\text{kcal/h}) \quad (\text{°C}) \quad \text{kg/mh}$

b) Appnt solaire Normal  $E_N$  (ou énergie reçue)

$$E_N = 154,8 E'_N \quad (2)$$

$(\text{kcal/h}) \quad (\text{mV})$

où  $E'_N$  mesurée par un solarimètre ( $1 \text{ mV} = 105 \text{ W/m}^2$ )

c) Coefficient optique moyen du capteur solaire  $(\tau_\alpha)$

$$(\tau_\alpha) = \frac{\tau \bar{\alpha}}{1 - (1 - \bar{\alpha}) \bar{r}}$$

où

$\tau = 0,82$  vitrage ordinaire. Comme le vitrage est teinté (erreur de choix), il est réduit de 75% i.e

$$\tau_{\text{red}} = 0,82 \times 0,75 = 0,615$$

$\bar{r}$  : facteur de réflexion du vitrage  $\approx 8\%$

$\bar{\alpha}$  : coefficient d'absorption  $\approx 0,95$

$$\Rightarrow (\tau_\alpha) = 0,62 \quad (3)$$

d) Conductance globale  $K$  :

$$K = E_N \frac{(\tau_\alpha - 4/F)}{(T_m - T_a)} \quad (4)$$

où  $F = \text{efficacité} = 0,8$  pour ce type de capteur.

e) Tableau des résultats :

Jour	Heure	$T_m = \frac{T_e + T_s}{2} \text{ } ^\circ\text{C}$	$f_{14} \text{ kcal/h}$	$E_p \text{ kcal/h}$	$\eta \%$	$K \frac{\text{kcal}}{\text{h}^\circ\text{C}}$
10-05-81	9	31,25	774	172,4	22,3	50,31
	10	34,75	1083,6	516,78	47,7	4,12
	11	35,75	1362,24	516,78	37,9	34,65
	12	38,25	1548	516,78	33,4	38
	1	38,75	1548	516,78	33,4	50,2
	2	40,65	1424,16	447,9	31,45	42,2
	3	40,6	1300,32	413,1	31,8	35,72
	4	40,3	1006,2	206,7	20,5	44,1
11-05-81	9	32,95	588,94	133,65	22,7	54,3
	10	37,75	928,8	668,25	72	0,00000
	11	40,25	1207,44	400,75	33,2	31,9
	12	42,75	1393,2	400,95	28,8	37,15
	1	44	1424,16	534,6	37,5	26,3
	2	44,25	1377,72	400,95	29,1	42,8
	3	44,05	1161	294,05	25,3	35,7
	4	43,5	928,8	267,3	28,8	24,95
	5	41,75	541,8	133,65	24,7	15,69
Ab moyenne			30,6			
K moyenne			35,3 kcal/h <sup>°C</sup> ou 18,7 kcal/h <sup>°C m<sup>2</sup></sup>			

Le tableau ci-après montre nettement que le capteur est en mauvais état de fonctionnement : le rendement instantané moyen est égal à 30,6%. Il confirme ainsi donc clairement la réduction du facteur de transmission du vitrage et simultanément favorise l'augmentation de la valeur de la conductance globale des pertes du capteur (4).

f) Debit efficace à circuler :

En utilisant l'équation (10) du chapitre 3 et les données du capteur actuel, le débit efficace à circuler serait égal à  $179,4 \text{ l/h m}^2$ .

g) Apport solaire produit et l'appoint électrique :

Un l'état actuel du capteur, et, de certaines conditions techniques de marche de l'appoint électrique (Thermostat non différentiel), on se voit donc obligé de faire une étude théorique de cette sous-section

h)  $E_p$  versus  $E_N$ .

Il en est de même que cette sous-section

# CHAPITRE 5

## Dimensionnement du capteur

L'étude expérimentale n'ayant pas abouti efficacement (voir chapitre 4), on se voit donc obligé de faire un dimensionnement du collecteur de la famille Théoriquement sur la base de la méthode de conception de Michel Chateauminois. Mais auparavant, nous définirons les caractéristiques que doit avoir le collecteur solaire.

### 5-1 Caractéristiques souhaitées du collecteur:

#### 5-1-1 Conductance globale des pertes du capteur:

L'équation (4) que nous avons développée dans le chapitre (3), conservant la valeur de la conductance  $U$  doit être égale à  $9 \text{ watt/m}^2\text{°C}$  ou  $7,74 \text{ kcal/h}^{\circ}\text{C m}^2$ .

#### 5-1-2 Debit efficace à circuler:

L'équation (10) du chapitre (3), nous

donne :

$$D = 74 \text{ l/h m}^2 \quad \text{on prend } D = 70 \text{ l/h m}^2$$

### 5-2 Dimensionnement proprement dit du collecteur.

La conductance globale des pertes ( $k$ ) et le débit à circuler sont à la base de la méthode de "design" de notre collecteur. Nous utilisons également les courbes de  $E_p$  versus  $E_m$  qui sont obtenues à partir de ces considérations.

#### 5-2-1 Surface de captation :

##### a) Paramètres d'entrée :

Les paramètres d'entrée sont les suivants :

Le ratio de stockage (R) : Le volume de stockage associé à un mètre carré de capteur :

$$\text{i.e. } R = \frac{V}{S} = \frac{273 \text{ l}}{\text{m}^2}$$

où  $V$  : volume de stockage (l) = 273 l.

$S$  : surface de captation ( $\text{m}^2$ )

Le temps de réserve ( $T_R$ ) :

$$T_R = \frac{V}{C} \quad (\text{en jour})$$

où  $C$  : consommation journalière d'eau chaude (l/jour).

$$T_R = \frac{273}{C} \quad (\text{jour})$$

b) Les courbes de  $E_p$  versus  $E_N$  :

On obtient le bilan d'exploitation par utilisation des courbes se trouvant dans l'annexe 2 page

72

c) Résultats et bilan d'exploitation:

En partant du dimensionnement  $S = 3,64 \text{ m}^2$ , nous avons fait plusieurs itérations en changeant seulement le ratio de stockage (R) (volume de stockage fixe 273 litres) l'une après l'autre jusqu'à l'obtention du bilan d'exploitation optimum correspondant à une surface de captation de  $5,5 \text{ m}^2$

En voici le bilan :



Dimensionnement						Résultats annuels									
Consommation moyenne journalière l/jour	$C_m$	250	Volumé stockage (l)	$V$	273	Capacité prévue ou besoin $\frac{kwh}{j}$ B	2336,64	Rendement journalier de moy %	22%						
Surface capteur ( $m^2$ )	$S$	5,5	Ratio de stockage $\frac{l}{m^2}$	$R$	~50	Appnt solaire $\frac{kwh}{j}$ E	2050,37	Appnt $\frac{kwh}{j}$	286,32						
Latitude	$14,6$	Orientation	Sud	Inclinaison	$30^\circ$	Taux de couverture $\rho$	88%	Appnts. par $m^2$ de capteur $\frac{kwh}{j}$	372,8						
$C = (1+\alpha)C_m$		$B = (1+\alpha)B_m$		$E_T = S E_N$		$T_R = \frac{V}{C}$		$E_U = S E_p$		$T_s = T_f + \frac{10^3 E_U}{1,15 C}$		$\rho = E_U / B$		$E = N B_j \times E_U$ (unité de B)	
MOIS		Dec	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Année	
Modulation consommation	$\alpha$	+2%	+8%	+10%	+9%	+4%	+2%	0%	-5%	-8%	-10%	-7%	-3%		
Consommation moy journalière l/j	$C$	255	270	275	272,5	260	255	250	237,5	230	225	232,5	242,5		
Température du réseau °C	$T_f$	27	26	24,3	27,5	27,3	27	28	28,5	30	29,5	29	28		
Besoin moyen journalier $\frac{kwh}{j}$	$B_m$	6,6	6,9	6,8	6,5	6,53	6,6	6,3	6,2	5,8	5,9	6,1	6,3		
Capacité prévue $\frac{kwh}{j}$	$B$	6,73	7,45	7,48	7,09	6,79	6,73	6,3	5,89	5,34	5,31	5,67	6,11	2336,64	
Appnt solaire $\frac{kwh}{j}$	$E_N$	4,14	4,1	4,86	5,74	5,29	5,41	5,35	4,56	3,91	3,93	4,44	4,41		
Appnt total $\frac{kwh}{j}$	$E_T$	22,77	22,55	26,73	31,57	29,1	29,8	29,4	25,1	21,5	21,6	24,4	24,3	9388,83	
Temps de réserve (jour)	$T_R$	1,07	1,01	0,99	1,00	1,05	1,07	1,09	1,15	1,19	1,21	1,17	1,13		
Appnt produit $\frac{kwh}{j}$	$E_p$	0,938	0,950	0,94	1,188	1,125	1,167	1,175	1,063	0,833	0,825	1,000	1,025		
Appnt utile $\frac{kwh}{j}$	$E_U$	5,159	5,225	5,17	6,134	6,188	6,499	6,463	5,547	4,552	4,513	5,5	5,638	2055,066	
Température moy stockage °C	$T_s$	44,6	42,83	42,6	45,4	48	49,04	50,48	49,9	47,3	48,1	49,6	48,2		
Taux de couverture $\rho$		76,7	70,1	69,1	92,2	91,1	95,4	100,3	99,3	85,8	90,6	97,0	92,3	88%	
Appnt solaire du mois $\frac{kwh}{j}$	$E$	159,93	162	144,8	202,6	185,64	199	189	181,3	142	144,4	170,5	169,2	2050,37	
Appnt Appnt $\frac{kwh}{j}$	$A$	48,7	68,95	64,64	17,2	18,1	9,63	0	1,29	23,54	14,9	5,77	14,1	286,32	

## BILAN D'EXPLOITATION

En examinant ce bilan d'exploitation, nous constatons que le taux de couverture de la période froide est faible par rapport à celui de la période chaude. Si nous voulons augmenter ce taux, nous avons alors deux alternatives possibles.

- soit augmenter la surface de captation et diminuer ainsi la productivité du mètre carré: forte augmentation de la surface, faible augmentation du taux de couverture.

- soit jouer sur l'inclinaison du capteur; Comme aussi:

décembre à mi-février :  $37^\circ$

mi-février à mai :  $20^\circ$

(voir figure # 2 du chapitre 2)

Nous avons aussi mentionné tout au début du rapport, que nous ne tenons pas compte du rayonnement réfléchi par le sol. Il peut nous être utile durant cette période froide (10% EN).

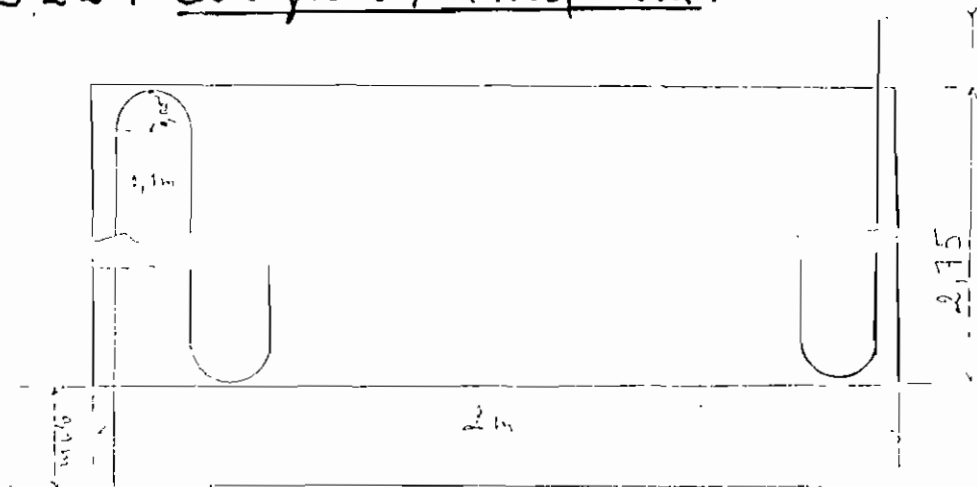
5-2-2 Dimensions tuyauterie: Serpentin:

Nous préconisons:

Forme capteur:  $2,75 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ .

Intervalle d'une demi-sinusoïde : 0,1 m

5-2-2-1 Longueur du serpentín :



$$\text{longueur serpentín} = 59,3 \text{ m}$$

5-2-2-2 Diamètre serpentín :

on sait que :  $Q = AV$

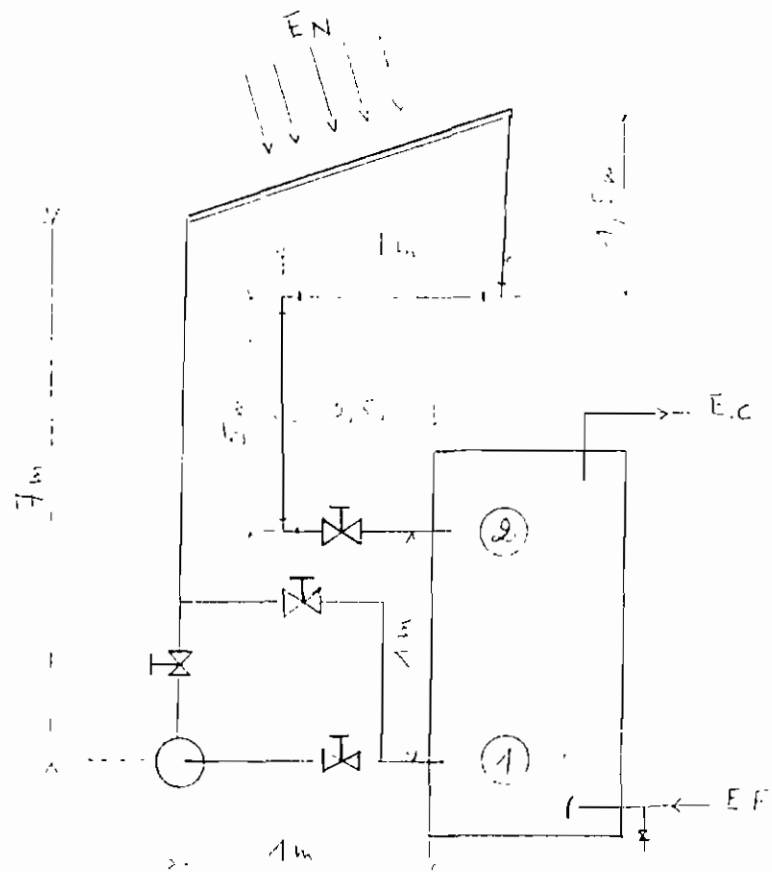
où  $A = \frac{\pi d^2}{4}$   $d$  : diamètre.

$V$  : vitesse  $\approx 1 \text{ m/s}$

$$\text{or } Q = \frac{70 \text{ l}}{\text{h m}^2} = \frac{385 \text{ l}}{\text{h}} \quad (\text{Surface} = 5,5 \text{ m}^2)$$

$$\Rightarrow d = 12 \text{ mm}$$

5-3 Puissance circulateur :



Le By-pass n'est pas nécessaire : débit  
l'équation de Bernoulli nous permet d'écrire :

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2g} + H_p - H_L = z_2 + \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2g}$$

on a :  $V_1 = V_2 = 1 \text{ m/s}$

$$\frac{P_2 - P_1}{\rho} = -1 \text{ m}$$

$$z_2 - z_1 = 1 \text{ m}$$

$\Rightarrow H_p = H_L$  :  $H_p$  : Hauteur manométrique Pompe  
 $H_L$  : perte de charge.

$$\text{or } H_L = f \frac{L}{d} \frac{V^2}{2g}$$

$$\text{or } L = L_{\text{needle}} + L_{\text{eqA}}$$

$$d = 0,012 \text{ m}$$

$$V = 1 \text{ m/s}$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$\left( R_e = \frac{Vd}{\nu} \approx 1,82 \times 10^4 \text{ et } \epsilon/d \approx 0,002 \right) \Rightarrow f = 0,030$$

$$L_{\text{needle}} = 72,7 \text{ m}$$

$$L_{\text{eqA}} = \begin{cases} \text{3 valves : } 15' \times 3 = 13,7 \text{ m} \\ \text{20 conduits } 180^\circ : 3' \times 20 = 18,3 \text{ m} \\ \text{5 conduits } 90^\circ : 0,8' \times 5 = \underline{1,2 \text{ m}} \end{cases}$$

$$\Rightarrow L_{\text{eqA}} = 33,2 \text{ m}$$

$$\Rightarrow L = 72,7 + 33,2 = 105,9 \text{ m}$$

$$\Rightarrow H_L = 27 \text{ m}$$

Par suite :

$$H_p = 27 \text{ m}$$

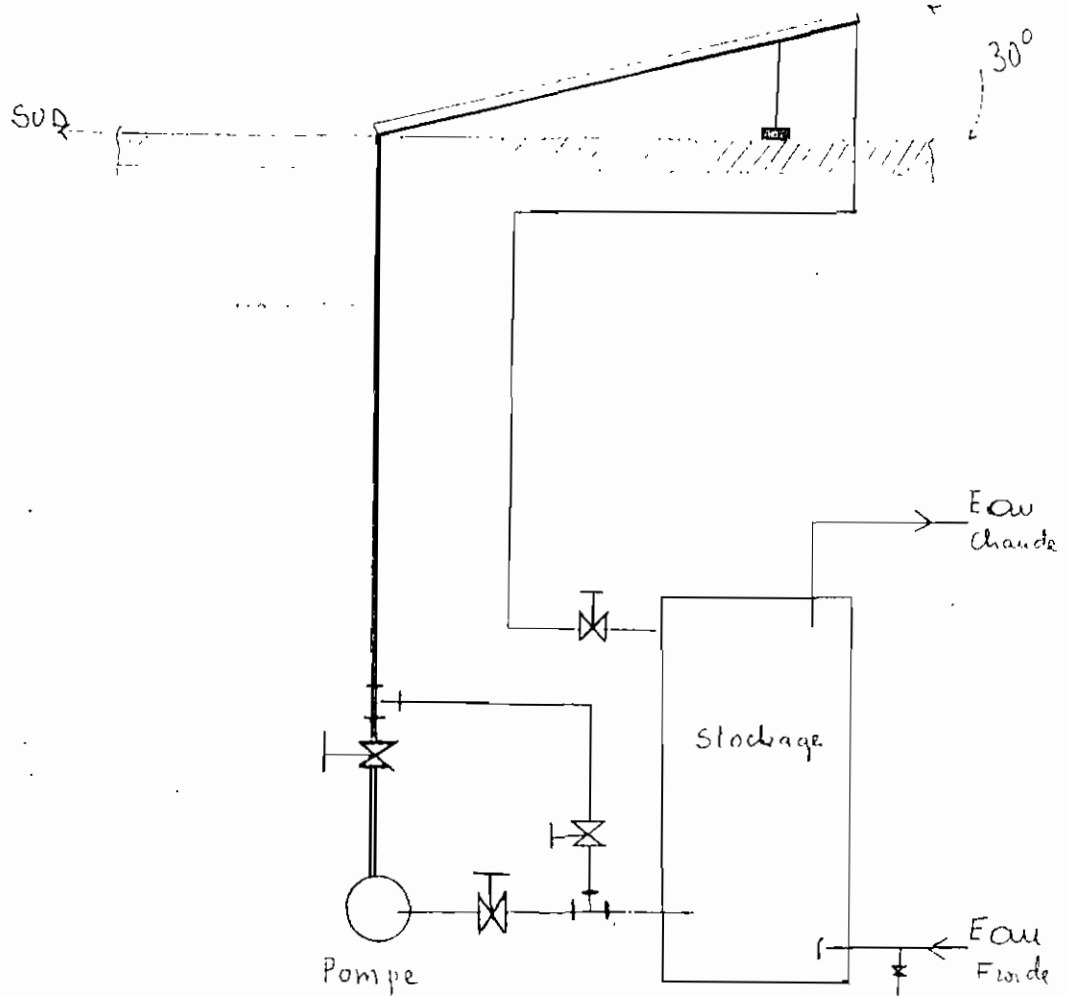
Par conséquent :  $P_{\text{absorbée}} = \rho Q H_p = 28 \text{ Watts}$

$$\text{or } \delta = 9,730 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

# CHAPITRE 6

## Bilan Economique

### 6-1 Plan de l'installation:



## 6-2 COÛT d'investissement :

Ces prix ont été tirés du bulletin de la Commission d'officialisation des prix.

N°	Désignation	quantité	Prix/unité	Total
1	plaque d'Acier galvanisé	5,5 m <sup>2</sup>	2450 <sup>F</sup>	13475 <sup>F</sup>
2	Tubes, cuivre 12x14	59,3 m	995 <sup>F</sup>	59004 <sup>F</sup>
4	Tubes, fer galvanisé 12x14	15 m	312	4680 <sup>F</sup>
3	Vanne 14x21	4	1750 <sup>F</sup>	7000 <sup>F</sup>
5	Té 14x21	2	225 <sup>F</sup>	450 <sup>F</sup>
6	Coude P.V.C 90	5	575 <sup>F</sup>	2875 <sup>F</sup>
7	Soudure à l'étain: Saquette	20	150 <sup>F</sup>	3000 <sup>F</sup>
8	Isolation Thermique :			
	- polystyrène	7 m <sup>2</sup>	3250 <sup>F</sup>	22750 <sup>F</sup>
	- laine de verre	6 m <sup>2</sup>	1850 <sup>F</sup>	11100 <sup>F</sup>
9	Vitrage clair: épaisseur 3mm	6 m <sup>2</sup>	4164 <sup>F</sup>	24984
10	Bois :			
	- Contre-plaque de 8mm	6 m <sup>2</sup>	928 <sup>F</sup>	5568
	- planche Samba	5 m	575 <sup>F</sup>	2875
11	Peinture noire mate	1 kg	985 <sup>F</sup>	985 <sup>F</sup>
12	Mastic en bouteille	6	500 <sup>F</sup>	3000 <sup>F</sup>
13	Main d'œuvre	40 heures	172,02 <sup>F</sup>	6880,8 <sup>F</sup>
14	Pompe 0,030 kw	1	60.000 <sup>F</sup>	60000 <sup>F</sup>

Coût fixe total :

Coût fixe total =  $\Sigma$  total prix = 228626,8<sup>F</sup>

Coût variable :

Le prix du kWh électrique est une variable dont le taux d'accroissement annuel ou mensuel dépend de la conjoncture économique du pays. Il faut donc en tenir compte pour évaluer la consommation électrique en Franc de la pompe (circulateur) en fin de la période d'amortissement. On a alors :

Puissance Pompe	Durée de fonctionnement par jour	Consommation par jour	Consommation annuelle
30 Watts	10	300 Wh	109,5 kWh

Coût variable =  $R \left[ \frac{(1+e)^n - 1}{e} \right]$

où e : taux d'accroissement annuel du kWh électrique : = 0,064

M : durée d'amortissement = 8 ans

kWh électrique : 67,81 F

R : Valeur actuelle annuelle de 109,5 kWh.

$k = 67,81 \times 109,5 = 7425,2 F$

Par suite :

Coût variable = 74554<sup>F</sup>



$$\text{Coûts totaux} = 303180,8 \text{ F}$$

### 6-3 Comparaison entre kWh « solaires » et kWh électrique

On ne peut, en effet, comparer directement ces kWh solaires à la consommation d'énergie électrique.

Il est absolument nécessaire de faire entrer en ligne de compte le rendement des installations électriques: rendement de la résistance électrique et rendement de stockage. Nous admettons qu'un chauffe-eau électrique présente un rendement de 50% entre l'énergie distribuée sous forme d'eau chaude et l'énergie consommée et facturée.

Nous aurons donc écrire:

$$\text{kWh électrique} = \frac{\text{kWh solaire}}{50\%}$$

$$\text{ou } \text{kWh solaire} = 2050,37 \text{ kWh/an}$$

$$\Rightarrow \text{kWh électrique} = 4100,74 \text{ kWh/an}$$

$$\text{ou } \text{kWh électrique} = 67,81 \text{ F}$$

Par suite:

$$\text{économie électrique: } 278071,2 \text{ F/an}$$

Mon

#### 6-4 Coût spécifique de l'installation:

Nous définissons ce coût comme étant le rapport du coût d'investissement (coûts totaux) et la productivité de l'installation solaire. Nous avons alors :

Designation	valeurs
Coût d'investissement	303 180,8 F
Productivité	2050,37 kWh/an
Coût spécifique	147,87 F/kwh/an

#### 6-5 Seuil critique d'investissement spécifique:

C'est le seuil, au-delà duquel l'installation solaire ne serait être rentable. Il fixe la limite d'investissement spécifique au-delà duquel le kWh solaire est plus cher que le kWh électrique.

On démontre que :

$$\frac{\text{le seuil critique d'investissement spécifique}}{\text{Coût du kWh électrique}} = \frac{(1+i)^{12n}}{(1+a)^{12n}}$$

$$\times \frac{i}{a} \times \frac{(1+a)^{12n} - 1}{(1+i)^{12n} - 1} \times \frac{\left(\frac{1+e}{1+i}\right)^{12n} - 1}{12(e-i)}$$

où  $n$  : durée d'amortissement de l'installation = 8 ans

$r$  : taux d'intérêt mensuel =  $8\%/12$

$i$  : moyenne du taux d'inflation mensuel sur la durée d'amortissement  $10\%/12$

$e$  : moyenne du taux d'accroissement mensuel du kWh électrique =  $\frac{-63,75^F + 67,81^F}{63,75^F} = \frac{6,4\%}{12}$

On trouve :

Seuil critique d'investissement spécifique =  $7,4$   
Coût du kWh électrique

Or kWh électrique =  $67,81^F$

Donc Seuil critique d'invest. spécifique  $\approx 502^F/\text{kWh}$

Comme le coût spécifique =  $147,87^F/\text{kWh}$  est inférieur au seuil critique d'invest. spécifique, nous pouvons dire d'emblée que l'installation solaire est rentable.

6-6 Loyer d'argent correspondant à l'investissement :

Le coût d'investissement, étant élevé par un péniqalais moyen, il serait donc bon, comme actuellement au Sénégal, demander des subventions à

l'état ou faire un prêt bancaire pour la totalité du coût d'investissement. Recherchons alors le loyer d'argent correspondant à l'investissement.

On sait que le coût d'investissement ( $C$ ) est égal :

$$C = \frac{R [(1+i)^n - 1]}{i}$$

taux mensuel 16%

où  $i$  : taux d'intérêt mensuel = 8%/12

$n$  : période de remboursement = 18 mois

$R$  : le loyer d'argent par mois.

$C$  : coût d'investissement = 303180,8 F

On trouve :

$$R = 15909 \text{ F}$$

# CONCLUSIONS

La surface de captation du collecteur solaire étant sensiblement faible pour couvrir la totalité des besoins, pour un angle d'inclinaison de  $30^\circ$  (orientation Sud), il serait donc recommandé de rendre flexible son inclinaison pour bénéficier d'un regain d'énergie selon des périodes de l'année comme indiqué ci-dessous :

<u>Mois</u>	<u>inclinaison</u>
decembre à mi-février	$37^\circ$
mi-février à septembre	$20^\circ$
septembre à decembre	$30^\circ$

Ces inclinaisons nous permettront d'augmenter la productivité du mètre carré de collecteur solaire et réduire ainsi le kWh électrique restant.

En se référant au bilan économique (chapitre 6), nous pouvons dire que le délai de recouvrement de l'installation solaire ne peut dépasser deux ans. Le seuil critique d'investissement spécifique, 3,4 fois

le coût spécifique de l'installation solaire, prouve nettement que le projet est rentable.

Il est aussi important de remarquer comment la production d'eau chaude sanitaire, du fait de son étalement sur toute l'année, est adaptée à une fourniture d'origine solaire. C'est d'ailleurs l'une des raisons, avec les niveaux de température adaptés, qui font que l'eau chaude sanitaire est l'une des utilisations les plus intéressantes des collecteurs solaires.

Le soleil vivra, semble-t-il, encore quelques cinq milliards d'années. Apprenons enfin à vivre avec lui. L'énergie, c'est notre argent.

# ANNEXES

# ANNEXE 1



ENSOlleillement de Dakar  $\approx$  Thies  
E

Dakar - Calories par heure et par cm<sup>2</sup> -

Plan Horizontal E

55

	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	Heures
	1,65	12,31	26,05	44,07	54,91	62,04	62,77	57,49	48,67	34,53	18,55	4,65	0	Janvier
	2,04	16,94	34,20	51,42	65,46	75,19	71,70	68,22	59,07	43,87	25,08	7,69	0,22	Fevrier
	5,80	24,15	45,97	65,10	79,20	87,84	88,89	82,16	69,83	51,63	30,04	9,75	0,31	Mars
	10,18	29,21	50,22	65,75	77,54	84,86	85,72	79,55	66,90	48,55	27,98	9,99	0,50	Avril
	12,42	50,13	49,55	64,50	76,04	61,52	61,23	75,86	61,29	46,79	28,26	10,40	1,46	Mai
	11,16	27,84	44,74	60,29	72,03	76,69	77,35	71,64	60,35	44,11	28,48	12,09	2,15	juin
	8,51	22,95	36,61	52,27	60,29	64,07	63,65	62,69	57,20	44,73	28,04	13,09	2,49	juillet
	7,31	20,49	35,06	47,96	60,47	61,82	64,71	59,12	50,04	33,49	22,04	8,99	1,64	Aout
	7,40	20,38	36,33	49,46	54,36	59,35	59,05	56,63	49,43	36,47	20,98	6,94	0,54	Sept
	6,68	21,55	36,91	49,82	61,41	68,99	65,99	60,13	47,54	34,24	16,20	2,83	0,08	oct
	5,56	21,30	39,01	53,23	61,69	66,08	62,54	57,58	44,92	29,41	13,02	1,84	0	Nov
	3,25	15,71	32,72	47,51	57,82	63,85	62,49	55,9	44,92	29,29	13,42	2,13	0	Decembre

Apports solaires reels moyens EN  
Programme

```

0010 DIM M$(12),D(12),A(13),H(13),B(13),E(12,13),I(5),C(5,13)
0020 DIM X(5)
0030 M$(12)=M$
0040 D(12)=D
0050 A(13)=A
0060 H(13)=H
0070 B(13)=B
0080 I(5)=I
0090 E(12,13)=E
0100 C(5,13)=C
0110 X(5)=X
0120 MAT READ M$
0130 DATA 'JANVIER','FEVRIER','MARS','AVRIL','MAI','JUN'
0140 DATA 'JUILLET','AOUT','SEPTEMBRE','OCTOBRE'
0150 DATA 'NOVEMBRE','DECEMBRE'
0160 OPEN FLO,'E90'.003.IN
0170 MAT GET FLO,D,A,I,E
0180 CLOSE FLO
0190 REM CALCUL
0200 FOR I=1 TO 12
0210 FOR J=1 TO 13
0220 H0=SIN(14.6*&PI/180)*SIN(D(I)*&PI/180)
0230 H1=COS(14.6*&PI/180)*COS(D(I)*&PI/180)*COS(A(J)*&PI/180)
0240 H(J)=ASN(H0+H1)
0250 B(J)=ASN(COS(D(I)*&PI/180)*SIN(A(J)*&PI/180)/COS(H(J)))
0260 H(J)=H(J)*180/&PI
0270 B(J)=B(J)*180/&PI+180
0280 NEXT J
0290 FOR K=1 TO 5
0300 FOR J=1 TO 13
0310 E1=SIN(H(J)*&PI/180)*COS(I(K)*&PI/180)
0320 E2=COS(H(J)*&PI/180)*SIN(I(K)*&PI/180)
0330 E3=COS((B(J)-180)*&PI/180)
0340 C(K,J)=E(I,J)*(E1+E2*E3)
0350 NEXT J
0360 NEXT K
0370 REM RESULTATS
0380 PRINT USING FLP,0390,M$(I),D(I)
0390 :MOIS DE ##### DECL #####.## DEG
0400 PRINT FLP,
0410 FOR J=1 TO 13
0420 PRINT USING FLP,0490,J+6,;
0430 NEXT J
0440 PRINT FLP,
0450 FOR J=1 TO 13
0460 PRINT USING FLP,0500,;
0470 NEXT J
0480 PRINT FLP,
0490 : #####.##
0500 : -----
0510 FOR J=1 TO 13
0520 PRINT USING FLP,0490,H(J),;
0530 NEXT J
0540 PRINT FLP,
0550 FOR J=1 TO 13
0560 PRINT USING FLP,0490,B(J),;
0570 NEXT J
0580 PRINT FLP,
0590 FOR K=1 TO 5
0600 FOR J=1 TO 13

```

```
0610 PRINT USING FLP,0490,C(K),J,;
0620 NEXT J
0630 PRINT FLP,
0640 NEXT K
0650 FOR J=1 TO 13
0660 PRINT USING FLP,0500,;
0670 NEXT J
0680 PRINT FLP,
0690 FOR K=1 TO 5
0700 S=0
0710 FOR J=1 TO 13
0720 S=S+C(K,J)
0730 NEXT J
0740 X(K)=S
0750 PRINT USING FLP,0490,X(K),;
0760 NEXT K
0770 PRINT FLP,
0780 NEXT I
0790 END
```

0001 DATA -20.8,-12.7,-1.9,9.9,18.9,23.1,21.3,13.7,3.0,-8.8  
0002 DATA -18.4,-23.0  
0003 DATA -75,-60,-45,-30, 15,0,15,30,45,60,75,90,105  
0004 DATA 15,30,45,60,75  
0005 DATA 1.63,12.31,28.05,44.07,54.91,62.04,62.77,57.49,48.67  
0006 DATA 34.53,18.53,4.65,0.00  
0007 DATA 2.04,16.94,34.20,51.42,65.46,73.19,71.70,68.22,59.07  
0008 DATA 43.87,25.08,7.69,0.22  
0009 DATA 5.80,24.15,45.97,65.10,79.20,87.84,88.89,82.16,69.83  
0010 DATA 51.63,30.04,9.75,0.31  
0011 DATA 10.18,29.21,50.22,66.75,77.54,84.86,85.72,79.55,66.90  
0012 DATA 48.55,27.98,9.99,0.50  
0013 DATA 12.42,30.13,49.55,64.50,76.04,81.52,81.23,75.86,61.29  
0014 DATA 46.79,28.26,10.00,1.46  
0015 DATA 11.16,27.84,44.74,60.29,72.03,76.69,77.35,71.64,60.35  
0016 DATA 44.11,28.48,12.09,2.15  
0017 DATA 8.51,22.95,36.61,52.27,60.29,64.07,63.65,62.69,57.20  
0018 DATA 44.73,28.04,13.09,2.49  
0019 DATA 7.31,20.49,35.06,47.96,60.47,61.82,64.71,59.12,50.04  
0020 DATA 33.49,22.04,8.99,1.64  
0021 DATA 7.40,20.38,36.33,49.46,54.36,59.35,59.05,56.63,49.43  
0022 DATA 36.47,20.98,6.94,0.54  
0023 DATA 6.68,21.55,36.91,49.82,61.41,68.99,65.99,60.13,47.54  
0024 DATA 34.24,16.20,2.83,.08  
0025 DATA 5.56,21.30,39.01,53.23,61.69,66.08,62.54,57.58,44.92  
0026 DATA 29.41,13.02,1.84,0.00  
0027 DATA 3.25,15.71,32.72,47.51,57.82,63.85,62.49,55.94,44.92  
0028 DATA 29.29,13.42,2.13,0.00

Appats solaires reels moyens EN  
Resultats

## Présentation des tables des résultats $E_N$

Mois de \_\_\_\_\_ déclinaison moyenne mensuelle du soleil  $\delta$  \_\_\_\_\_

7.00	8.00	9.00	Heures
8,32	21,27	33,38	$h(^{\circ})$
114,14	119,68	127,67	$\alpha(^{\circ})$
0,40	5,78	18,61	$E_N$ inclin. $15^{\circ}$
0,53	6,71	20,52	" " $30^{\circ}$
0,63	7,17	21,03	" " $45^{\circ}$
0,61	7,15	20,11	" " $60^{\circ}$
0,70	6,64	17,82	" " $75^{\circ}$
325,02	352,85	356,63	
			$E_N$ inclin. $45^{\circ}$ journée
			$E_N$ inclin. $30^{\circ}$ journée
			$E_N$ inclin. $15^{\circ}$ journée (Cal/jour. $cm^2$ )

$h$ : hauteur angulaire du soleil ( $^{\circ}$ )

$\alpha$ : angle d'azimut du soleil ( $^{\circ}$ )

$E_N$ : apports solaires réels moyens (normaux)  
(Cal/heure.  $cm^2$ )









MOIS DE OCTOBRE. DECL - 8.80 DEG

7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00
12.06	26.08	39.62	52.15	62.27	66.60	62.27	52.15	39.62	26.08	12.06	- 2.21	- 16.62
102.55	107.67	114.89	126.36	146.65	180.00	213.35	233.64	245.11	252.33	257.45	261.48	265.00
1.72	10.67	25.83	42.69	58.66	68.25	63.06	51.52	33.27	16.95	4.16	.00	.02
1.92	11.14	26.37	43.13	59.01	68.53	63.41	52.06	33.96	17.70	4.65	.11	.02
1.99	10.85	25.10	40.63	55.31	64.15	59.44	49.04	32.33	17.24	4.83	.22	.01
1.93	9.82	22.13	35.36	47.65	55.39	51.42	42.68	28.50	15.61	4.67	.31	.01
1.73	8.13	17.65	27.69	37.12	42.85	39.89	33.42	22.73	12.91	4.20	.38	.00
376.79	381.98	381.13	315.67	248.70								

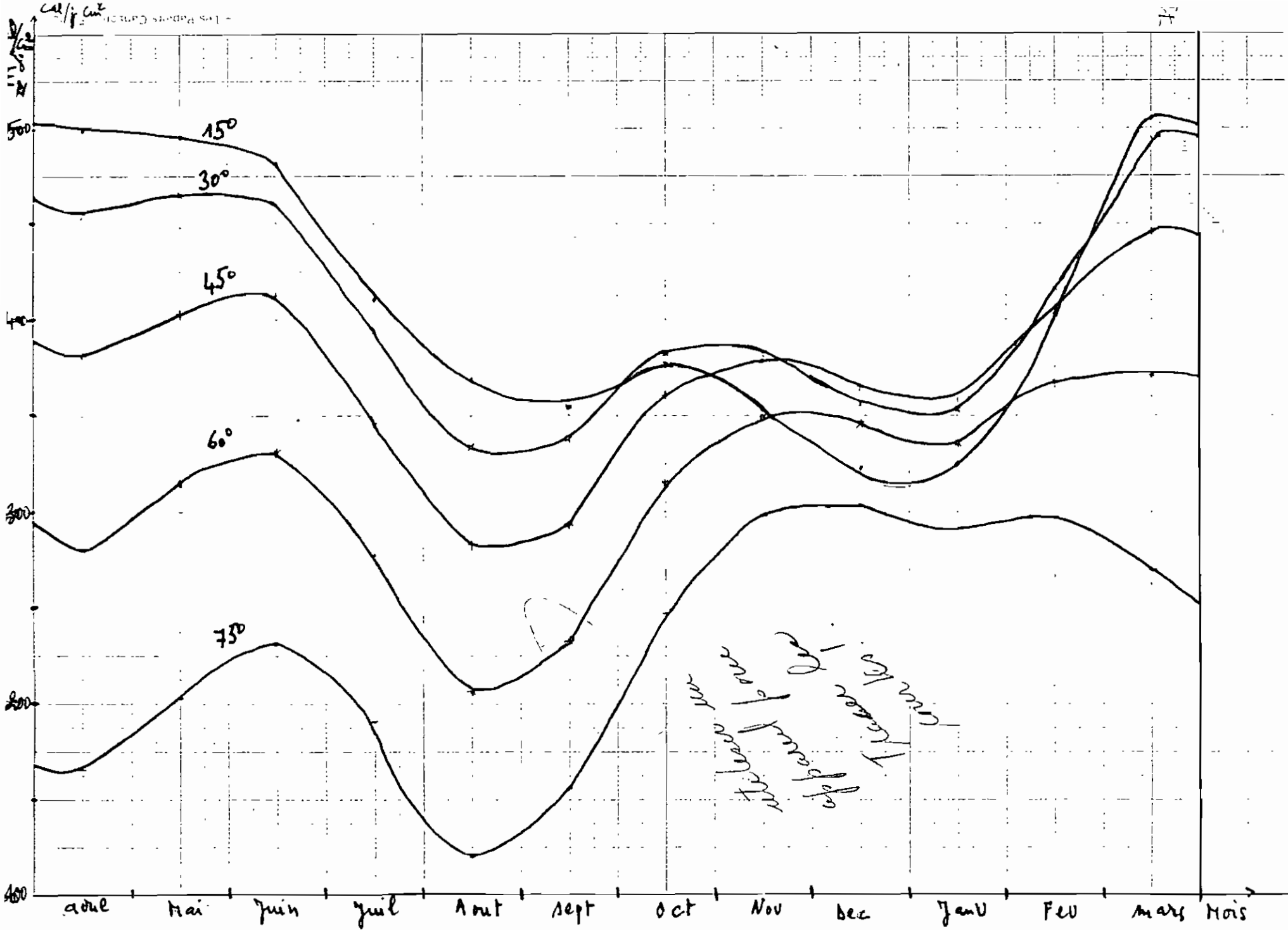
MOIS DE NOVEMBRE. DECL - 10.40 DEG

7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00
9.10	22.31	34.73	45.78	53.84	57.00	53.64	45.78	34.73	22.31	9.10	- 4.56	- 18.50
111.84	117.35	125.27	137.21	155.40	180.00	204.60	222.79	234.73	242.65	248.16	252.16	255.12
1.38	10.15	26.26	43.86	56.66	62.85	57.46	47.44	30.24	14.02	3.23	.00	0.00
1.76	11.53	28.56	46.23	59.68	65.99	60.59	50.44	32.82	15.92	4.17	.15	0.00
2.07	12.12	29.81	46.23	58.62	64.64	59.45	50.01	33.17	16.73	4.84	.29	0.00
2.21	11.88	27.15	42.68	53.57	58.88	54.30	46.16	31.26	16.41	5.17	.41	0.00
2.29	10.84	23.63	36.22	44.86	49.11	45.48	39.17	27.22	14.96	5.15	.50	0.00
353.55	378.14	376.95	350.68	299.34								

MOIS DE DECEMBRE. DECL - 23.00 DEG

7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00
7.59	20.30	32.10	42.29	49.64	52.40	49.64	42.29	32.10	20.30	7.59	- 5.65	- 19.21
116.23	121.79	129.79	141.52	158.42	180.00	201.58	218.48	230.21	238.21	243.77	247.67	250.32
.78	7.27	21.39	38.00	51.57	58.95	55.73	44.75	29.36	13.56	3.23	.01	0.00
1.08	8.60	23.93	41.44	55.56	63.29	60.05	48.80	32.85	16.04	4.47	.22	0.00
1.31	9.34	24.84	42.06	55.77	63.32	60.28	49.52	34.10	17.42	5.41	.42	0.00
1.45	9.45	24.06	39.81	52.18	59.03	56.40	46.88	33.03	17.61	5.98	.59	0.00
1.49	8.91	21.64	34.85	45.04	50.72	48.67	41.03	29.70	16.61	6.14	.72	0.00
324.60	356.34	363.80	346.47	305.52								

Figure # 2 :  $E_N = f(\text{Mois})$



ANNEXE 2

Courbes de  $E_p$  versus  $E_N$



Energie produite (Wh/m<sup>2</sup>,jour)

$E_p$

4 500

4 000

3 500

3 000

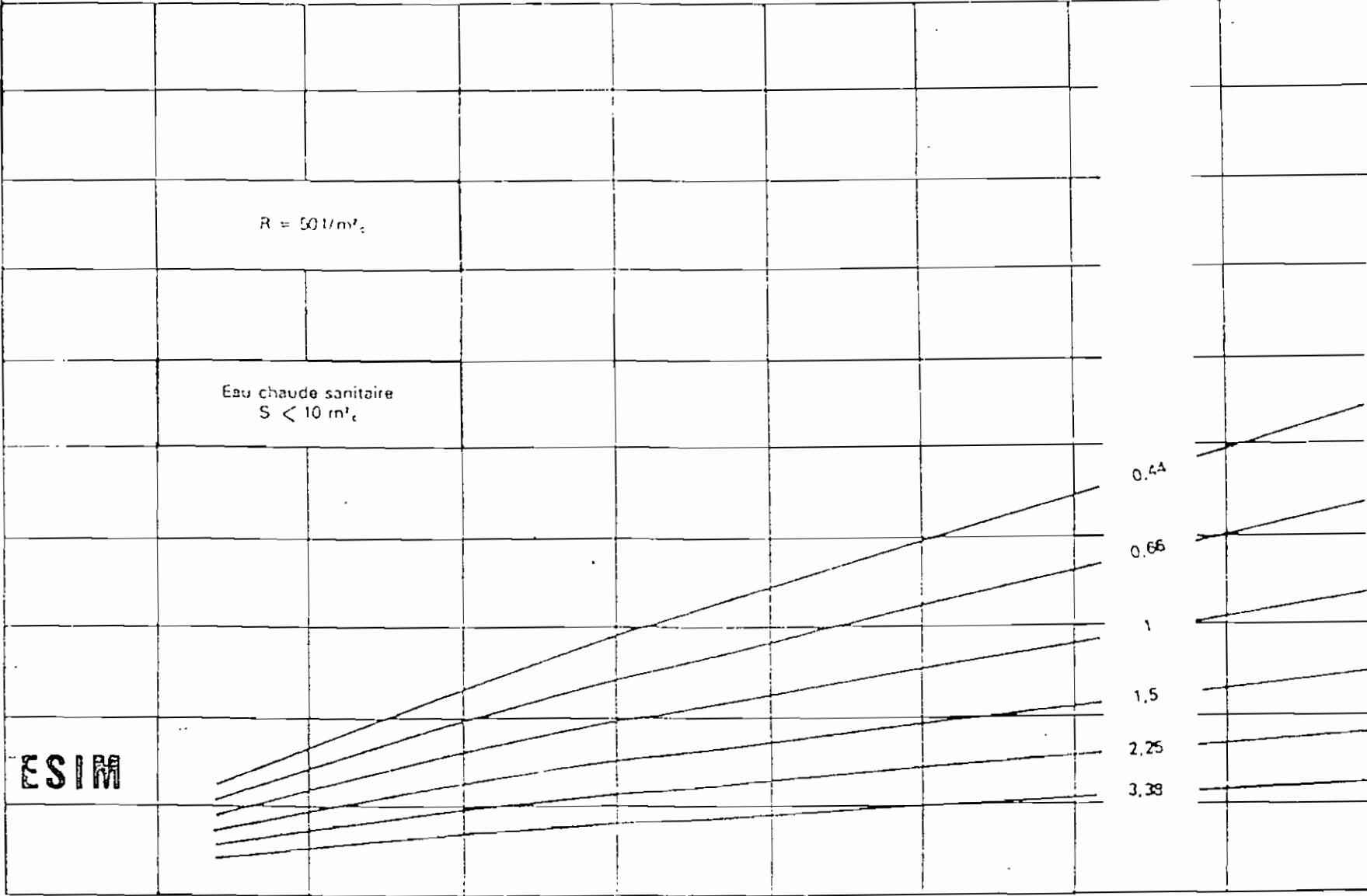
2 500

2 000

1 500

1 000

500



$R = 50 \text{ l/m}^2$

Eau chaude sanitaire  
 $S < 10 \text{ m}^2$

ESIM

Temps de réserve  $T_r$   
(jours)

0.44

0.66

1

1.5

2.25

3.38

1 000

2 000

3 000

4 000

5 000

6 000

7 000

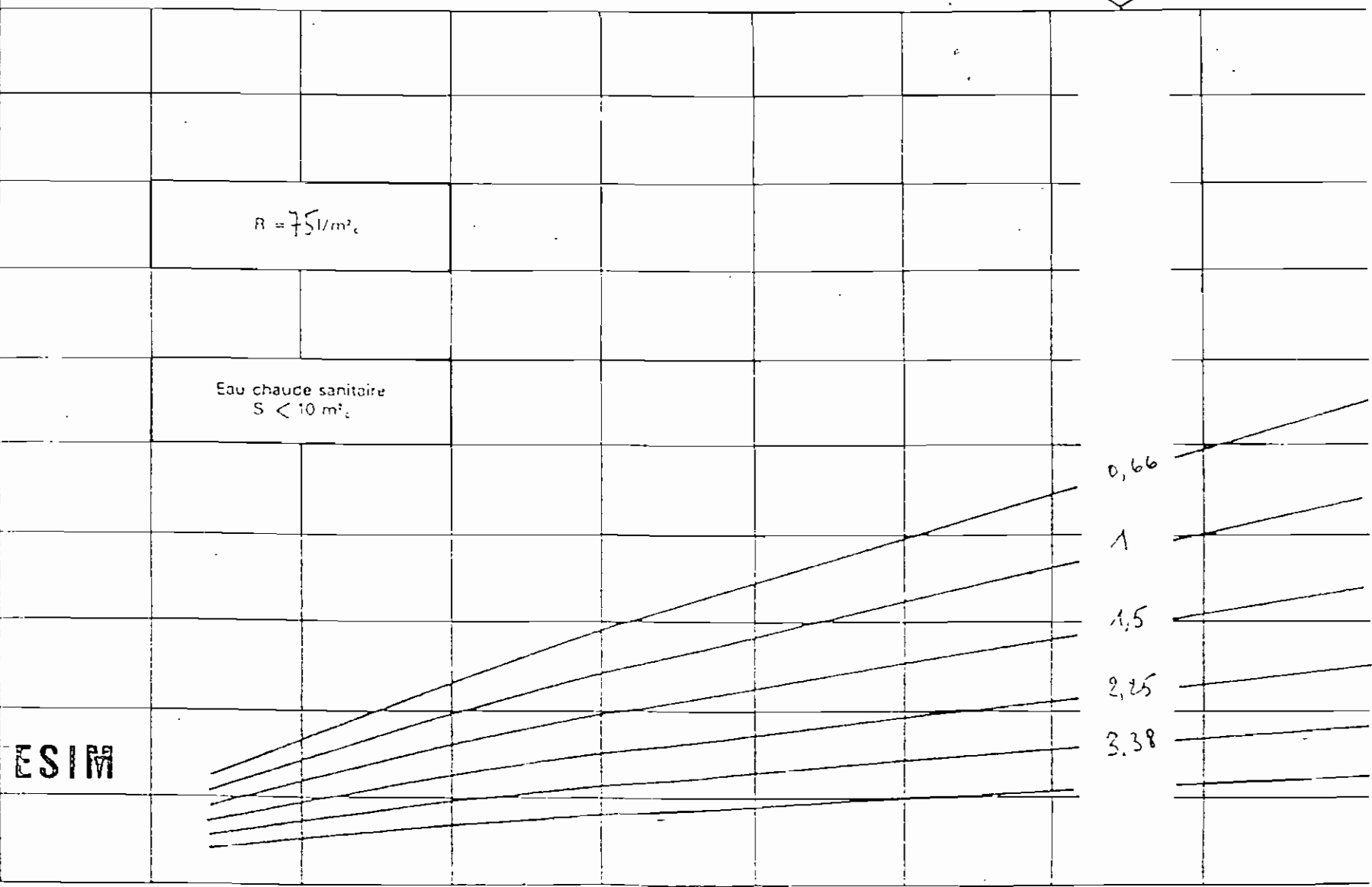
$E_d$  (Wh/m<sup>2</sup>,jour)

54

Energie produite (kWh/m<sup>2</sup>·jour)  
E<sub>p</sub>

Temps de réserve T<sub>r</sub> (jours)

4 500  
4 000  
3 500  
3 000  
2 500  
2 000  
1 500  
1 000  
500



0,66  
1  
1,5  
2,25  
3,38

1 000 2 000 3 000 4 000 5 000 6 000 7 000 E<sub>d</sub> (kWh/m<sup>2</sup>·jour)

# Bibliographie - References

Notes de cours : transmission de chaleur 79-80

Michel CHATEAUMINOIS : Calcul d'installations solaires  
à eau.

Etude : Ministère de l'industrie, Thermique et  
industrie.

F. KREITH , Transmission de la chaleur et Thermo-  
dynamique : G. Masson et cie

LIVRE I.P.M : N° 863

THIERRY CABIROL : Le chauffe-eau solaire

Collection « Technologies douces »

JAN. F. KREIDER : Solar Heating and Cooling.