

ecole polytechnique de thies

projet de fin d'etudes

Gm. 0400

CAPTEUR INTÉGRÉ

auteur =
Waly N'dour

directeur du
projet =
A. Wolski

A mon père,
A ma mère,
J'exprime ma filiale
reconnaissance .

remerciements

iii

Nous ne pouvons ne pas remercier certains pour leur grande contribution à l'élaboration de ce rapport.

Nous retiendrons tout particulièrement:

Mr. A. Wolski professeur à l'école polytechnique
et directeur de ce projet

Mr. Vigneault, technicien aux ateliers de l'É.R.T.

Mr. F. Houmaire, technicien aux ateliers de
l'école polytechnique

de Centre Henri Masson pour leur disponibilité

Nos remerciements s'adressent aussi à tous ceux qui ont contribué à ma formation et qui par ce fait ont une incidence certaine sur ce présent rapport.

A mes camarades d'école, j'adresse mes remerciements pour leur franche collaboration qui a su en des moments difficiles ditendre l'atmosphère de l'École.

Enfin, mes remerciements à tous ceux qui ont de près ou de loin influés par leurs idées à l'élaboration de ce présent rapport.

Sommaire

iv

Le projet concerne l'étude théorique et expérimentale d'un capteur solaire pour le chauffage de l'eau. L'eau est stockée dans ce capteur d'où le nom de Capteur intégré.

Nous considérons deux cas dans notre étude :

- 1) le cas où l'eau n'est pas soutirée durant toute la journée
- 2) le cas où l'eau est soutirée avec un débit constant continu de 20 l/hr.

La construction doit être simple, avec utilisation de matériaux locaux mais performants.

Les résultats obtenus montrent une bonne performance du capteur pendant la journée.

Pour les méthodes d'étude théorique, il s'agit d'évaluer les besoins, choisir les matériaux, faire une étude de l'ensoleillement, et enfin les calculs de conception.

Pour l'étude expérimentale, nous faisons des relevés horaires de température.

TABLE DES MATIERES

	Page
0 - Introduction	1
I. Etude des besoins	3
. consommations d'eau chaude sanitaire	4
. variations de température en fonction utilisation	
. Toilette	
. Notion de Confort	
. Besoins énergétiques	5
. consommations journalières	
. débits	
II. Choix des matériaux	6
. isolants	7
. Vitrage	8
. autres constituants	9
III. Etude de l'ensoleillement	10
. rayonnement solaire	11
. Orientation - Inclinaison	14
. Mesure du rayonnement solaire	19
. rayonnement incident sur la surface captante	22
IV. Conception	31
I. Mécanismes de transfert de chaleur	32
A. rayonnement	32
B. Convection	35
C. Conduction	37
II. Conception - Théorie	38

	A. Equation de base	38
	B. equivalence électrique	38
	C. coefficient de déperdition latéral	39
	D. coefficient de déperdition vitrage	39
	E. Coefficient global	42
	F. Temperature absorbeur	43
	G. Transmittance - Absorptance	43
	H. Energie absorbé par absorbeur	47
	I. Stockage Energie	47
	III. Calculs et résultats	49
<u>V</u>	schéma capteur	58
	- schémas	59
	- considérations pratiques	61
	- chariot expérimental	62
<u>VI</u>	experimentation et analyse	63
	A. Experimentation	64
	B. Analyse	71
<u>VII</u>	Etude économique	72
<u>VIII</u>	Conclusion	73
<u>IX</u>	Annexes	
<u>X</u>	References	

INTRODUCTION

Depuis la nuit des temps, l'homme a toujours utilisé une forme ou une autre d'énergie pour la satisfaction de ses besoins. De découverte en découverte ou d'évolution en évolution, la tendance penche pour telle forme plutôt que pour telle autre. La disponibilité et le prix étant les moteurs de cette orientation.

Ainsi depuis l'avènement de l'Opep et la crise du pétrole en 1973, l'effervescence s'est développée autour de la question de nouvelles formes d'énergie c'est à dire les énergies renouvelables - que sont le solaire, la biomasse, l'énergie éolienne. Pour les pays en développement, le solaire est une solution viable à long terme. Pour eux, le nucléaire est injustifié à cause surtout des incidences géopolitiques et écologiques qui sont pour le moins préoccupantes.

L'énergie solaire, comme les autres formes d'énergie renouvelable peut être un élément de rapprochement économique entre nations.

Ainsi la conférence des Nations-Unies sur les énergies nouvelles et renouvelables a-t-elle adopté un programme dit de Nairobi visant à :

- renforcer la coopération internationale pour promouvoir la recherche.
- Encourager la mobilisation de ressources financières pour aider les pays en développement dans ces recherches.

- 2
- favoriser l'échange d'informations
 - promouvoir l'établissement de programmes et projets sur les énergies nouvelles et renouvelables.

Dans cette présente étude, l'aspect qui nous intéresse est plutôt l'étude d'un Capteur solaire avec stockage de l'énergie.

Il s'agit d'un capteur plan qui chauffe et la contient, en même temps, contrairement à la conception courante où l'eau circule à travers un serpentin dans le Capteur pour être ensuite stocké dans un réservoir à part. L'étude portera uniquement sur l'efficacité d'un tel système.

des études visant à conserver l'énergie pendant la nuit, de même que l'installation réelle du Capteur ne font pas partie de notre étude.

Nous faisons donc :

- une étude des besoins
- Un choix des matériaux
- Une étude de l'ensoleillement
- Une étude théorique du Capteur
- Un schéma du Capteur
- L'expérimentation du Capteur et l'analyse des résultats obtenus

chapitre = 1

ETUDE DES
BESOINS

étude des besoins

4

Les consommations d'eau chaude sanitaire varient en fonction:

- . de la nature d'utilisation
- . du genre de vie des utilisateurs (pays, région, milieu et niveau de vie)
- . de l'équipement sanitaire et thermique (appareils ...)
- . de la saison (voir annexe A1)
- . du jour de la semaine (annexe A-2)
- . du moment de la journée (annex. A2 et A3)
- . de l'année (annexe A4)

Variations de la température en fonction de l'utilisation:

- . toilette : 20 à 50°C
- . vaisselle, lavage, ménage effectués manuellement : 60°C
- . vaisselle ou lavage effectués à la machine : 85 à 90°C
65 min
- . utilisation industrielle : à indiquer par l'utilisateur

Toilette:

- . lavabo : 35°C
- . douche : 42°C
- . évier : 50°C

Pratiquement nous considérons une température moyenne de 50°C.

Notion de Confort

Pour qu'il y ait sensation de confort dans des conditions thermiques et métaboliques stationnaires, il faut qu'à l'homéothermie de la région centrale de l'organisme, soit

associée l'homéothermie des régions superficielles de l'organisme. ⁵

Des études récentes ont montré que pour ce faire la température moyenne de la peau doit être proche de 34°C.

Compte tenu de l'évaporation de l'eau sur la peau, du refroidissement au contact de l'air (douche) ou des appareils (lavabo, baignoire...) nous adoptons pour ces utilisations une température de 40 à 50°C.

Besoins énergétiques :

$$B_j \text{ (kWh/jour)} = 1.16 \cdot 10^{-3} \cdot C \cdot (T_d - T_F)$$

T_d = température de distribution (°C)

T_F = température du réseau d'eau froide que nous prenons égale à 10°C

C = consommation journalière (l/jour)

Table 1 : Consommations Journalières :

consommation journalière moyenne par personne C_m (l/j, personne)		confort minimum	confort moyen	confort max.
à 50°C	décennie 70-80	30	50	75
	décennie 80-90	35	55	80

Nous prendrons 80 l/j personne vu que les besoins augmentent.

débits :

L'analyse des courbes de l'annexe A.2 nous pousse à prendre un débit de 20 l/h/personne.

chapitre = 2

CHOIX DES
MATERIAUX

choix des matériaux

7.

Comme nous l'avons vu, les parties constituantes du capteur sont : le vitrage, la plaque absorbante, le cadre constitué d'une tôle mince, de l'isolation et d'une plaque de bois.

isolants

Propriétés :

. Les isolants doivent conserver dans le temps les qualités qui ont déterminé leur choix. Ils doivent résister sans altération de leur structure, aux variations importantes de température extérieure.

. Les isolants doivent avoir une faible perméabilité à la vapeur d'eau.

. Les isolants doivent être résistants à l'humidité. Ils doivent être insensibles à l'action de l'eau, imputrescibles et avoir une faible absorption et rétention d'eau.

. Les isolants doivent être difficilement inflammables, résister à la propagation de la flamme.

. La résistance mécanique doit être telle que l'isolant conserve dans le temps son emplacement de pose. Il ne doit pas se tasser sous l'effet de son propre poids ni sous l'effet de vibrations. Il (ne) doit résister à la compression, lorsqu'il est soumis à des charges.

facteurs de choix

1. masse volumique

- 8
2. conductivité thermique
 3. coefficient de dilatation
 4. résistance à la compression
 5. Températures limites d'utilisation
 6. Perméabilité à la vapeur d'eau
 7. Pouvoir calorifique
 8. résistance aux agents chimiques
 9. résistance aux agents biologiques

Choix de l'isolant

Nous choisirons comme isolant le polyuréthane.

Toutefois pour des questions de disponibilité, nous prenons dans notre étude le polystyrène extrudé.

vitrage

a) Propriétés des vitres

- Un bon coefficient de transmission énergétique du rayonnement solaire
- Opacité aux rayonnements de grande longueur d'onde.
- Insensibilité aux rayons ultra-violet
- dureté
- rigidité.

b) choix

On choisira un verre trempé pour augmenter la résistance, la résistance à la flexion et la résistance aux contraintes

d'origine thermique.

9.

Le verre doit avoir une faible teneur en oxyde de fer ($\leq 0.09\% \text{Fe}_2\text{O}_3$)

Ici aussi pour des raisons de disponibilité, nous utilisons dans notre étude, le plexiglass à la place du verre.

autres constituants

L'absorbeur sera une tôle de zinc (acier galvanisé) peinte en noir mat.

Outre l'isolant, le cadre sera constitué d'une mince tôle de zinc et d'une plaque bois contreplaqué.

Nous donnons en annexe, les propriétés du verre, de la mousse de polyuréthane et du polystyrène extrudé.

2011-2012
2011-2012
2011-2012

chapitre = 3

ETUDE DE
L'ENSOLEILLEMENT.

Le rayonnement solaire

11

Le soleil est une sphère constituée de matières gazeuses intensément chaudes. Il se situe à une distance de $1.5 \cdot 10^8$ km de la terre, avec un diamètre 50 fois celui de la terre, soit $1,39 \cdot 10^6$ km. Vu de la terre, il tourne autour de son axe toutes les quatre semaines mais non d'une manière uniforme, car l'équateur fait 27 jours et les pôles 30 jours pour chaque rotation.

La température au centre est de l'ordre de $8 \cdot 10^6$ à $40 \cdot 10^6$ K, avec une densité 80 à 100 fois celle de l'eau.

Le soleil est donc un réacteur à fusion continue avec ses constituants gazeux retenus par les forces gravitationnelles.

La réaction la plus importante est celle où l'hydrogène (4 protons) se combine pour former l'hélium (un noyau d'hélium) - La masse du noyau d'hélium étant inférieure à celle des quatre protons, une partie a été donc perdue et convertie en énergie.

En réalité le soleil ne fonctionne pas comme un corps noir émettant des radiations à une température fixe, mais pour les applications thermiques on peut le considérer comme tel avec une température à sa surface de 5762 K.

L'énergie du soleil est reçue sous forme d'une onde électromagnétique qui est composée de radiations ultraviolettes, visibles et infrarouges.

Le tableau ci-après donne la fraction du rayonnement dans ces domaines :

	ultraviolet	Visible	Infrarouge ¹²
longueur d'onde	0 - .38	.38 - .78	.78 - ∞
fraction du rayonnement	.07	.4729	.4571
energie (W/m ²)	95	640	810

Nous considérons le rayonnement de longueur d'onde entre .29 et 2.5 μm . La lumière solaire à la vitesse de 300 000 km/sec met un peu plus de 8mn pour nous parvenir. La terre reçoit ainsi 30 milliards de kWh_{Ter}.

On définit la constante solaire comme la quantité d'énergie rayonnante supposée intégralement transformée en chaleur, que le soleil envoie par minute à travers une surface de 1 cm², normale aux rayons solaires, située en dehors de l'atmosphère terrestre à une distance du soleil égale à la distance moyenne de la terre au soleil. La constante solaire $I_{sc} = 1353 \text{ W/m}^2 = 4871 \text{ kJ/m}^2 \text{ hr}$.

À la traversée de l'atmosphère, une partie du rayonnement solaire est absorbé. Une autre partie est diffusé par les molécules de l'atmosphère, ainsi que par les particules en suspension et engendre le rayonnement solaire diffus qui provient de la voûte céleste et des nuages.

Le reste du rayonnement parvient directement à la surface de la terre : c'est le rayonnement solaire direct.

Ainsi le rayonnement global ou total est la somme des rayonnements diffus et direct.

Ces rayonnements sont principalement de courtes longueurs d'onde. Pour des longueurs d'onde supérieures à 4 ou 5 μm , l'intensité du rayonnement est minimale. En effet 99% du rayonnement se situe entre .1 et 4 μm de longueur d'onde.

13
A la surface de la terre, une fraction de l'énergie du rayonnement solaire incident est renvoyée par réflexion et diffusion : c'est l'albedo. "Le rayonnement terrestre effectif" est la résultante du rayonnement qu'une surface reçoit et du rayonnement qu'elle émet.

L'insolation est la vitesse avec laquelle l'énergie solaire est reçue sur une surface horizontale.

Les causes d'affaiblissement du rayonnement à la traversée de l'atmosphère sont :

- l'absorption par les gaz de l'atmosphère et la vapeur d'eau.
- la diffusion par les gaz de l'atmosphère et la vapeur d'eau.
- les particules en suspension dans l'atmosphère qui affaiblissent le rayonnement par diffusion et absorption
- l'influence de l'épaisseur d'atmosphère traversée sur l'absorption et la diffusion.
- l'influence des activités humaines sur l'atmosphère principalement par la pollution industrielle.

D'autres facteurs comme la variation de la distance terre-soleil ($\pm 3\%$ au cours de l'année à cause de l'orbite elliptique de la terre autour du soleil), la période de l'année, l'heure de la journée, la latitude du lieu, affectent l'intensité du rayonnement.

Ainsi pour maximiser l'énergie incidente sur notre capteur tout au long de l'année, il faudra déterminer une orientation et une inclinaison optimales suivant le lieu géographique.

orientation-inclinaison du capteur ¹⁴

orientation

Dans le cas de chauffage d'eau à usage domestique, le capteur est fixe, et a une orientation plein sud dans l'hémisphère nord. En s'écartant de cette direction, on réduit le rayonnement reçu par les capteurs.

inclinaison

Les relations géométriques entre un plan ayant n'importe quelle orientation par rapport à la surface de la terre à n'importe quelle heure et le rayonnement solaire qu'il reçoit c'est à dire la position du soleil par rapport à ce plan peuvent être décrites en termes de plusieurs angles.

Ces angles et les relations entre elles sont :

ϕ = latitude (le nord positif)

δ = déclinaison (position angulaire du soleil à midi par rapport au plan de l'équateur) - (le nord positif).

ϵ = inclinaison de la surface captante.

γ = angle d'azimut de la surface qui est la déviation de la normale à la surface par rapport au méridien local. Le point zéro est face au sud, l'Est positif et l'Ouest négatif.

ω = angle horaire, qui est égal à zéro à midi et chaque heure égalant 15° de longitude avec les heures de la matinée positives et celles de l'après-midi négatives.

θ = angle d'incidence du rayonnement, c'est à dire l'angle

entre le rayonnement et la normale au plan.

La relation entre θ et les autres angles est :

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos S - \sin \delta \cos \phi \sin S \cos \gamma \\ & + \cos \delta \cos \phi \cos S \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin S \cos \gamma \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin S \sin \gamma \sin \omega \end{aligned}$$

D'autres angles peuvent être définies. Les plus fréquents sont :

θ_z = angle de zénith c'est à dire l'angle entre le rayonnement solaire et la verticale

$\alpha = 90^\circ - \theta_z$ = altitude solaire ; l'angle entre le rayonnement solaire et l'horizontale.

Dans la plupart des cas, l'équation reliant ces angles est simplifiée.

Pour des surfaces planes (l'inclinaison $S=0$), seuls le premier et troisième termes restent et l'angle d'incidence (l'angle de zénith du soleil) est :

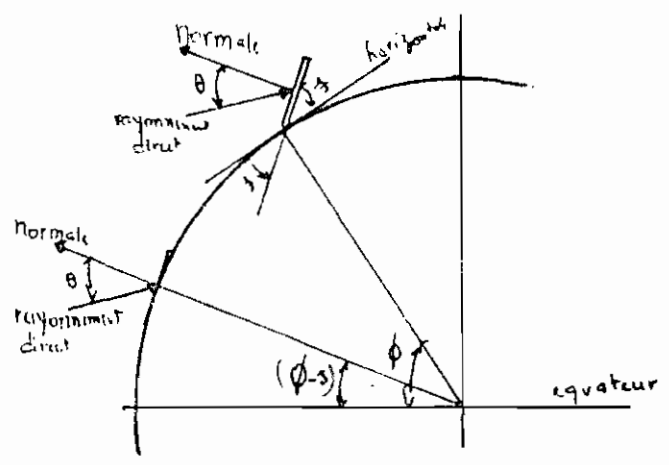
$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega$$

Pour les surfaces inclinées face au sud ou au nord, l'angle d'incidence peut être estimé par le fait qu'elles ont la même relation angulaire avec le rayonnement solaire qu'une surface horizontale à une latitude artificielle de $(\phi - S)$.

Ainsi :

$$\cos \theta_z = \cos(\phi - S) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - S) \sin \delta$$

fig. - Section de la terre montrant δ, θ, ϕ 16
 $2(\phi - \delta)$



valeurs de l'angle horaire ω Tablez

heure (h)	7 ^h	8 ^h	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$\omega (^{\circ})$	+75	+60	+45	+30	+15	0	-15	-30	-45	-60	-75	-90	-105

Calcul de la déclinaison δ

δ est calculé par la formule de Cooper (1969) :

$$\delta = 23.45 \sin \left[360 \times \frac{284 + n}{365} \right]$$

où n est le jour de l'année

En annexe nous donnons un tableau avec la valeur de δ pour chaque jour de l'année. Ci-dessous nous donnons

les moyennes mensuelles et annuelle de δ

17

Table 3 :

Mois	Janv.	Fev.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Moyenne
δ	-20.85	-13.32	-2.39	9.29	18.80	23.08	21.10	13.30	1.91	-9.85	-19.05	-23.08	-1.07

Calcul de l'inclinaison s

Nous allons calculer l'inclinaison pour qu'à midi lorsque le soleil est au plus haut dans le ciel, le rayonnement soit perpendiculaire à la surface captante.

Pour une surface d'inclinaison s on a :

$$\cos \theta_i = \cos \delta \cos(\phi - s) \cos \omega + \sin \delta \sin(\phi - s)$$

$$\text{A midi } \begin{cases} \theta = 0 \\ \omega = 0 \end{cases}$$

$$\text{Ainsi } \cos \theta_i = \cos \delta \cos(\phi - s) + \sin \delta \sin(\phi - s)$$

$$\cos \theta_i = \cos(\phi - s - \delta)$$

$$0 = \theta_i = \phi - s - \delta$$

$$\Rightarrow s = \phi - \delta$$

$$\text{A Dakar : latitude } \phi = 14^{\circ}42' \text{ N} = 14.7^{\circ} \text{ N}$$

$$\text{longitude } 17^{\circ}29' \text{ W}$$

$$s = \phi - \delta = 14.7 - 1.07 = 14.77 \approx 14.8^{\circ}$$

$$\text{L'inclinaison } s = \phi - \delta = 14.8^{\circ} \approx 15^{\circ}$$

Les auteurs recommandent d'ailleurs une inclinaison égale ¹⁸ à la latitude du lieu ($S = \phi$) pour optimiser la collecte moyenne de rayonnement sur l'année.

Pour une utilisation optimale en été, on prend $S = \phi - 10^\circ$, et pour l'hiver $S = \phi + 10^\circ$.

Dans notre étude ces deux derniers cas ne nous intéressent pas.

mesure du rayonnement solaire

Les instruments de mesure du rayonnement sont :

- le pyréliomètre (rayonnement diffus)
- Le pyranomètre (rayonnement total) ; solarimètre; actinomètre.
- Le International pyrheliometric scale

Les données sur le rayonnement sont obtenues par un des moyens suivants :

- Mesures directes du rayonnement
- Utilisation de relations empiriques pour déterminer l'intensité du rayonnement à partir des heures d'ensoleillement, le pourcentage d'ensoleillement possible ou les données sur l'état nuageux
- Estimation du rayonnement à partir du rayonnement sur une station avec une latitude, une topographie et un climat identiques.

Les données sur le rayonnement peuvent se présenter sous diverses formes, mais doivent contenir les informations suivantes :

- Soit ce sont des mesures instantanées ou des valeurs intégrées pour une certaine période de temps (heure ou jour).
- Le temps ou période de mesure
- Soit les mesures sont pour le rayonnement direct, diffus ou total
- Les instruments utilisés.

- L'orientation du capteur
- Si ce sont des moyennes, la période pendant laquelle la moyenne a été établie (moyenne mensuelle ou journalière).

Approches pour utiliser les données sur le rayonnement solaire :

- Utiliser la moyenne sur le rayonnement (par exemple pour un mois) pour estimer la performance moyenne d'un système. Cette approche n'est pas précise.
- Utiliser les données horaires ou journalières pour la localité en question, estimer la performance du système sous ces conditions, et sur cette base prévoir la performance. C'est l'approche générale.
- Il y a aussi des méthodes statistiques

rayonnement incident sur la surface captante

Les stations météorologiques mesurent en général le rayonnement global sur une surface horizontale.

Il faudra donc convertir ce rayonnement pour un plan incliné. Pour le rayonnement direct, le facteur de conversion R_b est obtenu à partir de la figure suivante :

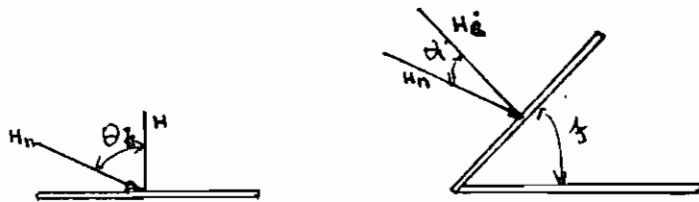


figure 2

Nous voyons que :

$$H = H_n \cos \theta_z$$

$$H_z' = H_n \cos \theta_z'$$

Le rapport du rayonnement sur surface inclinée au rayonnement sur surface horizontale H est donné par :

$$R_b = \frac{H_z'}{H} = \frac{H_n \cos \theta_z'}{H_n \cos \theta_z} = \frac{\cos \theta_z'}{\cos \theta_z}$$

θ_z = angle de zénith (angle entre le rayonnement direct et la

verticale) pour une surface horizontale.

22

θ_z = angle de zénith pour une surface inclinée.

$$\cos \theta_z = \cos(\phi - \delta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \delta) \sin \delta$$

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta$$

La correction pour le rayonnement diffus dépend de sa distribution dans l'atmosphère, ce qui n'est pas connue en général.

Cette distribution dépend particulièrement des nuages, et des particules en suspension dans l'atmosphère.

Aussi une partie du rayonnement est réfléchi par le sol.

Deux cas limites sont considérés comme base de calcul pour la correction pour le rayonnement diffus:

- Premièrement on peut assumer que la plupart du rayonnement diffus provient d'une origine proche du soleil. Cette approximation est meilleure les jours clairs.

Le facteur de correction pour le rayonnement (R_d) est alors le même que pour le rayonnement direct (R_b). ($R_d = R_b$)

- deuxièmement, on peut assumer que le rayonnement diffus est uniformément réparti dans l'atmosphère. C'est une bonne approximation quand par exemple le ciel est uniformément nuageux ou quand l'atmosphère est brumeuse.

Ainsi le rayonnement diffus sur une surface inclinée dépend seulement de la portion de ciel vue par la surface.

Si on assume que les propriétés du sol ou d'autres surfaces

23
Quels par une surface inclinée réfléchissent le rayonnement solaire de telle sorte d'être une source de rayonnement diffus équivalent à celui provenant du ciel, alors la surface reçoit le même rayonnement diffus quelle que ce soit son orientation. Ainsi le facteur de correction ou de conversion pour le rayonnement diffus est égal à 1. ($R_d = 1$). C'est ce dernier cas que nous allons considérer.

Le rayonnement incident (H_i) sur la surface inclinée sera donné alors par

$$H_i = R_b H_b + H_d$$

où H_b : rayonnement direct

H_d : rayonnement diffus

R_b : facteur de conversion pour le rayonnement direct

Le rayonnement global est la somme des rayonnements direct et diffus.

$$H_g = H_b + H_d$$

Pour une localité donnée, on peut obtenir les proportions de rayonnements diffus et direct du rayonnement global.

$$\text{si } H_b = x\% H_g$$

$$H_d = y\% H_g$$

alors
$$H_i = \left(R_b \cdot \frac{x\%}{100} + \frac{y\%}{100} \right) \cdot H_g$$

24

Proportion du rayonnement diffus et direct

Table 1

	Janv.	Fev.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept	Oct.	Nov.	Dec.	Moy.
Dakar	5.2	5.9	7	7	6.2	6.5	5.8	5.1	5.4	5.5	5	4.9	5.9
%H _b = x%	78	76	71	70	73	60	53	46	60	66	67	71	66
%H _d = y%	22	24	29	30	27	40	47	54	40	34	33	29	34

Un perfectionnement de cette méthode est apportée par Liu et Jordan (1963) en considérant que le rayonnement sur une surface inclinée est constitué de trois composantes :

- le rayonnement direct, diffus et le rayonnement réfléchi par le sol que la surface inclinée voit.

Une surface d'inclinaison S voit une portion du ciel donnée par :

$$\frac{1 + \cos S}{2}$$

Ceci est aussi le facteur de conversion pour le rayonnement diffus s'il est uniformément distribué dans l'atmosphère.

La surface inclinée voit aussi le sol ou d'autres surfaces.

Si ces surfaces ont une réflectance ρ pour le rayonnement diffus, le rayonnement réfléchi des surfaces avoisinantes sur la surface à partir du rayonnement total est :

$$(H_b + H_d) (1 - \cos S) \cdot \rho/2$$

En combinant les trois rayonnements, le rayonnement incident sur la surface inclinée est :

$$H_i = H_b R_b + H_d \frac{1 + \cos \theta}{2} + (H_b + H_d) \frac{(1 - \cos \theta) \rho}{2}$$

Liou et Jordan suggèrent pour la réflectance du sol

$\rho = .2$ quand il n'y a pas de neige

$\rho = .7$ quand il y a neige

En prenant

$$H_b = x\% H_g$$

$$H_d = y\% H_g$$

$$\rho = .2$$

$$\theta = 14.8^\circ \approx 15^\circ$$

on a :

$$H_i = \left[\frac{x\%}{100\%} R_b + .983 \frac{y\%}{100\%} + .0033 \right] \cdot H_g$$

Heure		7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
angle horaire (ω)		75°	60°	45°	30°	15°	0	-15°	-30°	-45°	-60°	-75°	-90°	-105°
Mois	déclinaison δ	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Janvier	-20.85	.242	.468	.661	.810	.903	.935	.903	.810	.661	.468	.242	.0004	-.241
Fevrier	-13.32	.252	.487	.668	.843	.940	.973	.940	.843	.668	.487	.252	.0003	-.251
Mars	-2.39	.259	.500	.706	.865	.965	.999	.965	.865	.706	.500	.259	.00005	-.258
Avril	9.49	.255	.493	.697	.854	.952	.986	.952	.854	.697	.493	.255	-.0002	-.255
Mai	18.80	.245	.473	.669	.819	.914	.946	.914	.819	.669	.473	.245	-.0004	-.245
Juin	23.08	.238	.459	.650	.796	.888	.919	.888	.796	.650	.459	.238	-.0004	-.239
Juillet	21.10	.241	.466	.659	.807	.901	.932	.901	.807	.659	.466	.241	-.0004	-.242
Août	13.50	.252	.486	.688	.842	.939	.973	.939	.842	.688	.486	.252	-.0003	-.252
Septembre	1.99	.259	.500	.707	.865	.965	.999	.965	.865	.707	.500	.259	-.00004	-.259
Octobre	-9.85	.255	.493	.697	.853	.952	.985	.952	.853	.697	.493	.255	.0003	-.255
Novembre	-19.05	.245	.473	.669	.819	.913	.946	.913	.819	.669	.473	.245	.0004	-.244
Décembre	-23.09	.238	.460	.651	.797	.889	.920	.889	.797	.651	.461	.238	.0004	-.238

Table 5
COS θ

Heure		7 ^h	8 ^h	9 ^h	10 ^h	11 ^h	12 ^h	13 ^h	14 ^h	15 ^h	16 ^h	17 ^h	18 ^h	19 ^h
angle horaire ω		75°	60°	45°	30°	15°	0	-15°	-30°	-45°	-60°	-75°	-90°	-105°
Mois	déclinaison δ	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Janvier	-20.85	.144	.362	.549	.692	.783	.814	.783	.692	.549	.362	.144	-.090	-.324
Février	-13.32	.185	.412	.607	.757	.851	.883	.851	.757	.607	.412	.185	-.058	-.302
Mars	-2.39	.239	.473	.673	.826	.923	.956	.923	.826	.673	.473	.239	-.021	-.261
Avril	9.49	.289	.519	.716	.868	.963	.996	.963	.868	.716	.519	.289	.042	-.205
Mai	18.80	.319	.540	.729	.875	.966	.997	.966	.875	.729	.540	.319	.082	-.155
Juin	23.08	.330	.544	.729	.870	.959	.989	.959	.870	.729	.544	.330	.099	-.131
Juillet	21.10	.325	.542	.729	.873	.963	.994	.963	.873	.729	.542	.325	.091	-.142
Août	13.30	.302	.529	.724	.873	.968	1	.968	.873	.724	.529	.302	.058	-.185
Septembre	1.99	.259	.492	.692	.846	.943	.975	.943	.846	.692	.492	.259	.009	-.241
Octobre	-9.85	.203	.433	.630	.782	.877	.910	.877	.782	.630	.433	.203	-.023	-.290
Novembre	-19.05	.154	.374	.564	.709	.800	.831	.800	.709	.564	.374	.154	-.083	-.319
Décembre	-23.09	.131	.345	.530	.671	.760	.790	.760	.671	.530	.345	.131	-.099	-.330

Table: 6 $\cos \theta$

Heure	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	
angle horaire ω	75°	60°	45°	30°	15°	0	-15°	-30°	-45°	-60°	-75°	-90°	-105°	
Mois	déclinai- son	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
Janvier	-20.85	1.68	1.29	1.20	1.17	1.15	1.15	1.15	1.17	1.20	1.29	1.68	-.004	.74
Février	-13.32	1.36	1.18	1.13	1.11	1.10	1.10	1.10	1.11	1.13	1.18	1.36	-.005	.83
Mars	-2.39	1.08	1.06	1.05	1.05	1.04	1.04	1.04	1.05	1.05	1.06	1.08	-.004	.99
Avril	9.39	.88	.95	.97	.98	.99	.99	.99	.98	.97	.95	.88	-.005	1.24
Mai	18.80	.77	.88	.92	.94	.95	.95	.95	.94	.92	.88	.77	-.005	1.58
Juin	23.08	.72	.84	.89	.91	.92	.93	.92	.91	.89	.84	.72	-.004	1.82
Juillet	21.10	.74	.86	.90	.92	.94	.94	.94	.92	.90	.86	.74	-.004	1.70
Août	13.30	.83	.92	.95	.96	.97	.97	.97	.96	.95	.92	.83	-.005	1.36
Septembre	1.99	1.00	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.00	-.004	1.07
Octobre	-9.85	1.26	1.14	1.11	1.09	1.08	1.08	1.08	1.09	1.11	1.14	1.26	-.007	.88
Novembre	-19.05	1.59	1.26	1.19	1.15	1.14	1.14	1.14	1.15	1.19	1.26	1.59	-.005	.76
Décembre	-23.09	1.82	1.33	1.23	1.19	1.17	1.16	1.17	1.19	1.23	1.33	1.82	-.004	.73

TABLE 1 VALEURS DE R_D

Heure Mois	7 ^h	8 ^h	9 ^h	10 ^h	11 ^h	12 ^h	13 ^h	14 ^h	15 ^h	16 ^h	17 ^h	18 ^h	19 ^h
Janvier	17.18	150.01	346.24	514.14	650.45	713.38	724.76	653.93	541.54	366.21	176.49	27.17	0
Février	39.25	236.63	471.87	659.53	797.23	875.01	867.81	807.89	672.74	480	259.62	52.95	0
Mars	57.94	250.31	482.09	671.67	809.33	884.18	894.44	819.30	687.14	490.40	269.70	68.34	0
Avril	84.06	297.47	523.89	722.20	854.57	929.11	934.45	868.04	737.76	546.65	318.84	100.32	2.55
Mai	101.95	307.00	527.14	703.63	834.83	901.25	901.25	826.24	699.45	521.80	308.39	114.25	5.81
Juin	89.40	263.57	470.71	639.77	760.99	817.65	819.04	730.10	613.76	468.62	282.15	112.16	9.06
Juillet	79.88	237.56	412.42	557.56	632.34	676.92	697.36	643.71	534.34	406.85	212.48	98.46	8.82
Août	75.24	239.88	412.66	549.20	654.86	725.22	733.82	687.37	569.17	420.32	240.35	86.39	5.11
Septembre	55.04	213.64	395.24	554.31	641.86	687.37	683.89	647.20	560.58	398.49	241.97	71.06	1.39
Octobre	38.78	216.66	420.55	605.17	731.03	791.17	803.71	741.01	610.74	431	230.83	48.53	0.23
Novembre	22.99	179.04	378.98	554.31	681.57	741.71	735.91	682.96	563.83	388.74	184.15	29.96	0
Décembre	13.03	131.04	308.83	479.95	601.26	671.00	664.03	602.84	488.83	330.45	160.70	22.99	0

Table: 8 rayonnement global

W/m² 1975 @ 1979

table 9
rayonnement incident
 (W/m² 1975 à 1979)

Mois \ heure	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
Janvier	26.28	183.88	400.10	582.08	726.27	796.53	809.24	740.35	625.78	448.88	270.02	5.88	0
Fevrier	49.96	268.82	518.16	714.15	857.19	940.82	933.09	874.80	758.68	545.29	330.45	12.46	0
Mars	61.14	260.56	498.42	694.42	831.0	907.85	918.38	847.05	710.41	510.49	284.58	19.51	0
Avril	76.85	286.52	511.9	710.79	847.05	920.93	926.23	854.32	720.94	526.53	291.48	29.56	2.97
Mai	84.30	279.71	495.67	671.90	803.28	867.19	867.19	788.98	657.70	475.42	256.21	30.38	8.26
Juin	74.06	237.34	440	602.98	721.80	780.45	776.86	688.12	571.10	421.99	233.76	44.20	13.49
Juillet	68.50	218.82	388.63	531.30	609.27	652.22	671.91	613.40	503.51	374.75	182.20	45.61	12.05
Août	68.91	229.64	400.74	535.86	641.97	710.95	719.38	670.68	552.73	402.38	220.14	45.94	5.93
Septembre	54.85	215.45	398.60	559.02	647.31	693.21	689.70	652.70	565.34	401.88	241.12	28.00	1.71
Octobre	45.34	236.14	450.04	639.62	767.81	830.98	844.15	783.19	653.56	469.75	269.87	16.16	0.21
Novembre	32.02	209.81	426.35	608.74	743.93	809.57	803.24	750.02	634.30	455.56	256.52	9.72	0
Décembre	20.59	161.53	358.76	543.91	672.85	746.13	743.10	683.18	567.85	407.33	254.0	6.56	0

chapitre = 4

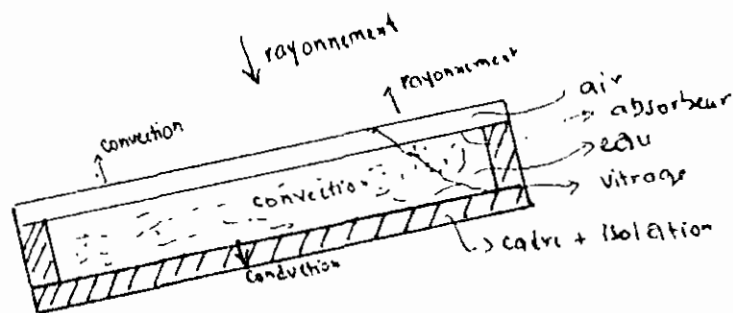
CONCEPTION

1) mécanismes de transfert de chaleur

32

Le capteur reçoit le rayonnement solaire. Une partie est perdue par convection, et rayonnement à partir de la surface vitrée. A l'intérieur, le transfert d'énergie se fait par convection au fluide. A travers le cadre on a de la conduction et à l'extérieur de la convection.

figure 3: Schema du Capteur



A. rayonnement

1. le rayonnement thermique

Un solide chauffé émet un rayonnement de longueurs d'onde entre 1 et $100 \mu\text{m}$. Le rayonnement thermique n'occupe qu'une faible place dans le rayonnement des ondes électromagnétiques.

On peut associer à une onde électromagnétique de fréquence ν un photon qui est une "particule" de masse et de charge zéro, mais dont l'énergie E est donné par $E = h\nu$. $h =$ constante de Planck

$$h = 6.624 \cdot 10^{-34} \text{ J.s.}$$

On voit que l'énergie augmente avec la fréquence de l'onde, c'est à dire

augmente quand la longueur d'onde diminue.

Lorsqu'un rayonnement frappe une surface, il est absorbé ou réfléchi, ou encore transmis. Si le corps est opaque, la transmission est nulle.

L'absorptivité est $a = \frac{q^{(a)}}{q^{(i)}} = \frac{q_p^{(a)}}{q_p^{(i)}} = \frac{\text{énergie absorbée}}{\text{énergie incidente}}$

L'absorptivité d'un corps gris :

$$a = \text{constante} < 1 \text{ quel que soit } \lambda.$$

Pour un corps noir $a = 1$ quel que soit λ .

L'émissivité = $\epsilon = \frac{q^{(\epsilon)}}{q_b^{(\epsilon)}} = \frac{\text{énergie émise, qui dépend de } \lambda}{\text{énergie émise par un corps noir.}}$

L'émissivité d'un corps noir est donc égale à 1.

Selon la loi de Kirchoff $\epsilon = a$

L'énergie émise par un corps noir est :

$$\frac{Q}{A} = q_b^{(\epsilon)} = \sigma T^4 \quad : \text{loi de Stefan - Boltzmann}$$

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

$$\sigma = 5.669 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

La loi de distribution de Planck donne :

$$q_{b\lambda}^{(\epsilon)} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{ch/\lambda kT} - 1}$$

c : vitesse lumière

h : constante de Planck

k : constante de Boltzmann

En intégrant $q_{b\lambda}^{(\epsilon)}$ on a :

$$q_b^{(\epsilon)} = \int_0^{\infty} q_{b\lambda}^{(\epsilon)} d\lambda = \left(\frac{2}{15} \frac{\pi^5 K^4}{c^2 h^3} \right) \cdot T^4$$

d'où $\sigma = \frac{2}{15} \frac{\pi^5 K^4}{c^2 h^3} = 5.669 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

$q_{b\lambda}^{(e)}$ passe par un maximum si $\lambda_{\max} T = \frac{c_2}{K(4.9651)} = 2898 \text{ cm}^{\circ}\text{K}$
 c'est la loi de déplacement de Wien.

2) rayonnement entre deux surfaces grises

Il est donné par: $Q_1 = -Q_2 = \frac{\sigma(T_2^4 - T_1^4)}{(1-\epsilon_1)/\epsilon_1 A_1 + 1/F_{12} + (1-\epsilon_2)/\epsilon_2 A_2}$

3) rayonnement entre deux plaques parallèles infinies

Dans ce cas, $A_1 = A_2$, et le facteur de forme $F_{12} = 1$.

Ainsi :

$$\frac{Q}{A} = \frac{\sigma(T_2^4 - T_1^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$$

On définit un coefficient de transfert de chaleur (hr) par rayonnement entre deux surfaces quelconques.

$$Q = A_1 \cdot hr \cdot (T_2 - T_1)$$

$$hr = \frac{\sigma(T_2^2 + T_1^2)(T_2 + T_1)}{(1-\epsilon_1)/\epsilon_1 + 1/F_{12} + (1-\epsilon_2)A_2/\epsilon_2 A_1}$$

4) rayonnement du ciel

Le ciel peut être considéré comme un corps noir à une température T_{ciel} . Le rayonnement entre une surface faisant face au ciel et le ciel est :

$$Q = \epsilon A \sigma (T_{\text{ciel}}^4 - T^4)$$

ϵ = émissivité surface

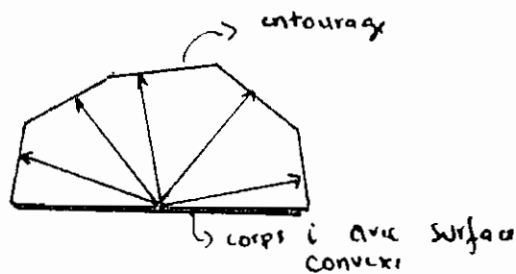
T = température surface

Swinbank (1963) donne $T_{\text{ciel}} (\text{en } ^{\circ}\text{K}) = 0.552 \cdot T_{\text{air}}^{1.5} (\text{en } ^{\circ}\text{K})$

Whillier (1967) donne $T_{\text{ciel}} = T_{\text{air}} - 6$

e). rayonnement d'un corps noir dans une enceinte close 35

figure 4



Si l'enceinte est formée de n surfaces, alors le transfert d'énergie de la surface i aux autres est :

$$Q_{is} = \sigma A_i \sum_{j=1}^n F_{ij} (T_i^4 - T_j^4)$$

$$\sum_{j=1}^n \bar{F}_{ij} = 1$$

$$\text{d'où } Q_{is} = \sigma A_i T_i^4 - \sum_{j=1}^n F_{ij} T_j^4$$

Si les surfaces $3, 4, \dots, n$, n'échangent pas d'énergie avec l'enceinte, elles sont dites "adiabatiques" -

$$\text{A l'équilibre } Q_{35} = Q_{45} = Q_{n5} = 0$$

Le transfert d'énergie entre les surfaces 1 et 2 est :

$$Q_{12} = \sigma A_1 \bar{F}_{12} (T_1^4 - T_2^4) = \sigma A_2 \bar{F}_{21} (T_1^4 - T_2^4)$$

B. convection

Lorsque le mouvement du fluide est dû à des variations locales dans la densité du fluide, on a une convection naturelle. Quand le mouvement est provoqué par une source

extérieure, la convection est dite forcée.

36

Convection pour surfaces exposées au vent

Mc Adams donne le coefficient de transfert de chaleur pour des surfaces exposées au vent extérieur :

Surfaces planes :

$$h_{\text{vent}} = 5.7 + 3.8.V$$

V : vitesse du vent en m/s

h_{vent} en $W/m^2 \cdot ^\circ C$

Convection naturelle entre plaques parallèles

$Nu = \frac{hL}{k}$: nombre de Nusselt

$Gr = \frac{g\beta \Delta T L^3}{\nu^2}$: nombre de Grashof

h : coefficient de transfert de chaleur par convection

L : espace entre plaques

k : conductivité thermique

g : constante gravitationnelle

β : coefficient d'expansion volumétrique du fluide ($= \frac{1}{T}$ pour un gaz idéal)

ΔT : différence de température entre les plaques

ν : viscosité cinématique.

Les propriétés sont évaluées à la température moyenne des deux plaques.

a). Sur un liquide entre plaques parallèles, Dropkin et Somerscales (1965) donnent pour des inclinaisons de 0 à 90° et pour

$Gr > 2 \cdot 10^5$:

$$Nu = \left[.069 - .020 \left(\frac{\beta}{90} \right) \right] (Gr Pr)^{1/4} \cdot (Pr)^{.074}$$

où β : inclinaison du capteur en degrés

Pr = nombre de Prandtl

b) pour l'air :

$$Pr = 0.7$$

$$Nu = \left[0.060 + 0.017 \left(\frac{Gr}{90} \right) \right] \cdot (Gr)^{1/3}$$

La loi de Newton donne l'énergie transférée par convection

$$Q = q \cdot A = h A (T_1 - T_2)$$

C - conduction

C'est un transfert d'énergie au niveau moléculaire.

a) En régime permanent :

$$\{ \text{débit de chaleur qui entre} \} - \{ \text{débit de chaleur qui sort} \} = 0$$

avec une source de production de chaleur :

$$Q_{in} - Q_{out} + \{ \text{Taux de production d'énergie} \} = 0$$

b) En régime variable :

$$\{ \text{Taux d'accumulation d'énergie thermique} \} = Q_{in} - Q_{out}$$

avec source on a :

$$\{ \text{Taux d'accumulation} \} = Q_{in} - Q_{out} + \{ \text{Taux de production} \}$$

c) La loi de Fourier donne :

$$Q = -k A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$$q_x = \frac{Q}{A} = -k \frac{dT}{dx}$$

k = conductivité thermique

ΔT = différence de température

Δx = épaisseur de la paroi.

II. conception = theorie

38

A. equation de base

La performance d'un capteur est décrite par un bilan d'énergie qui indique la répartition de l'énergie incidente entre énergie utile et pertes.

Bilan d'énergie:

$$A_c H_i (\tau\alpha)_e = Q_u + Q_L$$

A_c = surface du capteur

H_i = rayonnement incident

$(\tau\alpha)_e$ = produit transmittance-absorptance du vitrage

Q_u = énergie utile.

Q_L = pertes par rayonnement, convection et conduction.

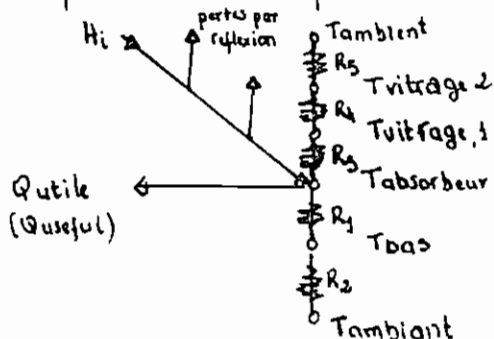
Les pertes par réflexion à partir du vitrage sont comprises dans le terme $(\tau\alpha)_e$

La mesure de la performance du capteur est le rendement η :

$$\eta = \frac{\int \frac{Q_u}{A_c} d\tau}{\int H_i d\tau} = \frac{\text{énergie fournie par le capteur}}{\text{énergie reçue par le capteur pendant le même temps.}}$$

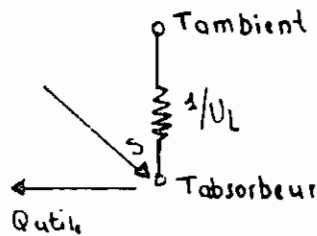
B. equivalence électrique

L'équivalent électrique de la structure du capteur est :



On peut transformer ce schéma comme suit

39



avec U_L = coefficient de déperdition global

C. coefficient de déperdition lateral

La perte d'énergie par le bas et les côtés est représentée par R_1 et R_2 . R_1 concerne la résistance du cadre et de l'isolation, alors que R_2 représente la résistance à la convection et au rayonnement à l'extérieur. Les valeurs de R_1 et R_2 sont telles qu'on puisse admettre $R_2 = 0$.

$$\text{Ainsi } U_b = \frac{1}{R_1}$$

D. coefficient de déperdition pour vitrage

Le coefficient de déperdition pour la surface vitrée est le résultat de convection et rayonnement entre plaques parallèles.

Le transfert d'énergie entre l'absorbeur et le premier vitrage est exactement le même qu'entre deux vitrages adjacents et est aussi égal à l'énergie perdue à l'environnement au dessus du vitrage externe.

La perte par unité de surface vers le haut est:

$$q_{\text{Loss, top}} = h_{p-c1} \cdot (T_{\text{absorbeur}} - T_{\text{vitrage 1}}) + \frac{\sigma (T_{\text{absorbeur}}^4 - T_{\text{vitrage 2}}^4)}{\frac{1}{\epsilon_{\text{absorbeur}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{vitrage}}} - 1}$$

h_{p-c1} = coefficient de transfert de chaleur entre deux surfaces⁴⁰ parallèles inclinées contenant de l'air.

$$Q_{\text{loss, top}} = (h_{p-c1} + h_{r1}) \cdot (T_{\text{absorbeur}} - T_{\text{vitrage 1}})$$

$$h_{r1} = \frac{\sigma (T_{\text{absorbeur}} + T_{\text{vitrage 1}}) \cdot (T_{\text{absorbeur}}^2 + T_{\text{vitrage 1}}^2)}{\frac{1}{\epsilon_{\text{absorbeur}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{vitrage}}} - 1}$$

h_{r1} = coefficient de transfert de chaleur par rayonnement.

On prend : $R_3 = \frac{1}{h_{p-c1} + h_{r1}}$

Une equation pareille peut être écrite pour chaque résistance entre vitrages :

Si on avait 3 vitres, on pourrait avec une bonne approximation considérer que les 2 résistances entre vitres sont égales.

Cependant ces résistances ne sont pas égales à R_3 parce qu'elle contient l'émissivité de la plaque qui est différente de celle du vitrage.

En effet l'absorbeur peut être une surface sélective de telle sorte qu'elle a une forte absorption pour le rayonnement solaire et une faible émission pour le rayonnement de grande longueur d'onde.

La limite pratique pour les vitrages est de 3, mais en majorité on utilise 1 ou 2 vitres.

La résistance $R_5 = \frac{1}{h_w + h_{r5}}$

où $h_w = h_{vent} = 5.7 + 3.8 \cdot V$ = coefficient de transfert⁴¹
de chaleur par convection d'une surface exposée au vent.

V = vitesse du vent en m/sec.

h_{rs} : résistance au rayonnement

$$h_{rs} = \text{Emitre} \cdot \sigma \cdot (T_{\text{vitrage du dessus}} + T_{\text{ciel}}) \cdot (T_{\text{vitrage du dessus}}^2 + T_{\text{ciel}}^2) \times \\ \times \frac{(T_{\text{vitrage du dessus}} - T_{\text{ciel}})}{(T_{\text{vitrage du dessus}} - T_{\text{ambiant}})}$$

Le coefficient de déperdition pour le haut est :

$$U_t = \frac{1}{R_3 + R_4 + R_5}$$

L'influence de l'intervalle entre vitres est faible sur U_t ,
contrairement à l'inclinaison β du capteur.

Klein (1973) développe une relation pour U_t pour une inclinaison
 β de 45° et une température d'absorbeur entre 40° et 130°C

$$U_t(45^\circ) = \left(\frac{1}{\left(\frac{324}{T_p} \right) \left[\frac{(T_p - T_a)}{(N + f)} \right]^{0.31} + \frac{1}{h_w}} \right)^{-1} + \\ + \frac{\sigma (T_p + T_a) (T_p^2 + T_a^2)}{\left[\varepsilon_p + 0.0425 N (1 - \varepsilon_p) \right]^{-1} + \left[\frac{(2N + f - 1)}{\varepsilon_g} \right] - N}$$

Pour une inclinaison β , on calcule U_t par la formule suivante: 42

$$\frac{U_t(\beta)}{U_t(45^\circ)} = 1 - (\beta - 45) (.00259 - .00144 \epsilon_p)$$

β = inclinaison du capteur

N = nombre de vitres

$$f = (1 - .04 h_w + 5 \cdot 10^{-4} h_w^2) (1 + .058 N)$$

ϵ_g = émissivité du vitrage (.88)

ϵ_p = émissivité de l'absorbeur (.95)

T_a = température ambiante ($^\circ K$)

T_p = température d'absorbeur ($^\circ K$)

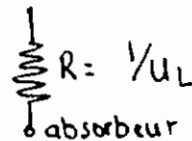
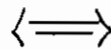
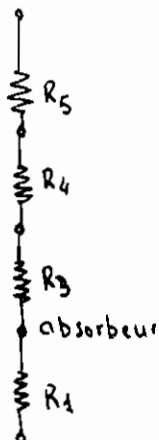
$$h_w = 5.7 + 3.8 \cdot v$$

v = vitesse du vent.

E - coefficient global

Le coefficient de déperdition global U_L est:

$$U_L = U_t + U_b$$



$$R_2 \parallel (R_3 + R_4 + R_5)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3 + R_4 + R_5}$$

$$U_L = U_b + U_t$$

F. température absorbeur

43

Sous considérons une distribution de température uniforme pour l'absorbeur.

$$T_p - T_f = Q_u \cdot R_{p-f}$$

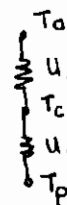
R_{p-f} = résistance entre l'absorbeur et le fluide.

G. transmittance-absorptance

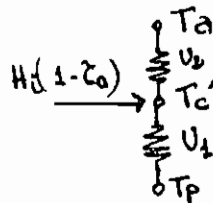
La part du rayonnement solaire absorbé par le vitrage n'est pas entièrement perdue car elle tend à augmenter la température du vitrage et réduire ainsi les pertes à partir de l'absorbeur.

Pour une seule vitre, considérons les cas où le vitrage n'absorbe pas le rayonnement et le cas où il y a absorption.

L'équivalent électrique entre l'absorbeur et l'air est :



pas d'absorption au vitrage



Absorption au vitrage.

L'énergie absorbée par la vitre est $H_i(1-z_a)$

où z_a = transmittance en considérant seulement l'absorption.

L'absorption dans un milieu partiellement est donné par la Loi de Bouguer qui dit que le rayonnement absorbé est proportionnel à l'intensité et à la distance que le rayonnement traverse dans le milieu considéré :

$$dI = -I K dx \quad K = \text{coefficient d'extinction.}$$

En intégrant entre 0 et L

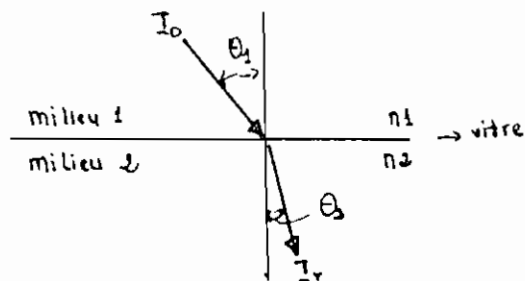
$$z_a = \frac{I_L}{I_0} = e^{-KL}$$

La transmittance en tenant compte de la réflexion et de l'absorption

est : $\tau = \tau_r \cdot \tau_o$

44

calcul de τ_r : transmittance en considérant la réflexion seule.
Le rayonnement transmis (I_r) par le vitrage est dévié par rapport au rayonnement incident (I_o)



θ_1 = angle d'incidence

θ_2 = angle de réfraction

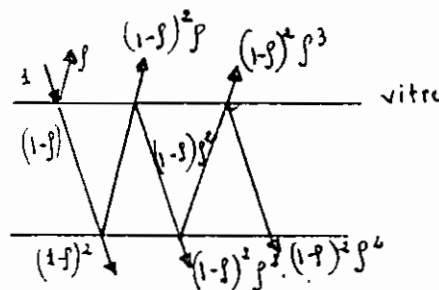
La réflectance $\rho = \frac{I_r}{I_o} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} + \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \right]$

$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{\text{indice de réfraction du milieu 1}}{\text{indice de réfraction du milieu 2}}$

L'indice de réfraction $N = \frac{n_2}{n_1} = 1.526$ pour le verre pour le spectre solaire.

La transmission du rayonnement à travers un vitre est donnée par :

$\tau_r = (1 - \rho)^2 \sum_{n=0}^{\infty} \rho^{2n} = \frac{(1 - \rho)^2}{1 - \rho^2} = \frac{1 - \rho}{1 + \rho}$



Pour n vitres

$\tau_{r,n} = \frac{1 - \rho}{1 + (2n - 1)\rho}$

réduction de perte

La perte vers le haut pour le schéma sans absorption est : $U_1(T_p - T_c)$

et pour le schéma avec absorption : $U_1(T_p - T_c')$

La différence entre ces deux termes est:

$$D = U_2 [(T_p - T_c) - (T_p - T_c')]]$$

$$T_p - T_c = \frac{(T_p - T_a) U_L}{U_2} \quad \text{avec } U_L = \frac{U_1 U_2}{U_1 + U_2}$$

$$T_p - T_c' = \frac{U_2 (T_p - T_a) - H_i (1 - \tau_a)}{U_1 + U_2}$$

$$\text{d'où } D = (T_p - T_a) \cdot U_L - \frac{U_1 + U_2 \cdot (T_p - T_a)}{U_1 + U_2} + \frac{H_i (1 - \tau_a) U_1}{U_1 + U_2}$$

$$D = H_i (1 - \tau_a) \frac{U_L}{U_2}$$

D est la réduction de perte dans le collecteur due à l'absorption au vitrage et peut être considérée comme un gain additionnel dans le collecteur.

Ainsi l'énergie S absorbée par l'absorbeur est:

$$S = H_i \left[(\tau \alpha) + (1 - \tau_a) \frac{U_L}{U_2} \right]$$

Ainsi le produit effectif de la transmittance et de l'absorptance est:

$$(\tau \alpha)_e = (\tau \alpha) + (1 - \tau_a) \frac{U_L}{U_2}$$

Pour un système avec n vitrages

$$(\tau \alpha)_e = (\tau \alpha) + (1 - \tau_a) \sum_{i=1}^n a_i \tau^{i-1}$$

$a_i = \frac{U_L}{U_i}$ pour le $i^{\text{ème}}$ vitrage.

Pour des matériaux différents, (exemple une combinaison de plastique et de verre en partant de l'absorbeur):

$$(\tau \alpha)_e = (\tau \alpha) + (1 - \tau_{a,1}) a_1 + (1 - \tau_{a,2}) a_2 \tau_1 + \dots$$

τ_i = transmittance du vitrage au dessous du vitrage $i+1$
 $\tau_{a,i}$ = transmittance du vitrage i , due à l'absorption.
 La valeur de a_i est fonction de température d'absorbeur, de
 température ambiante, de l'émissivité de l'absorbeur et de la vitesse du
 vent.

Table 10:

Valeurs de a_i pour $V = 5 \text{ m/s}$; $T_{\text{absorbeur}} = 100^\circ\text{C}$, $T_{\text{air}} = 10^\circ\text{C}$
 et pour $\epsilon_p = .95, .50, .10$.

nombre de vitrages	a_i	$\epsilon_p = .95$	$\epsilon_p = .50$	$\epsilon_p = .10$
1	a_1	.27	.21	.13
2	a_1	.15	.12	.09
	a_2	.62	.53	.40
3	a_1	.14	.08	.06
	a_2	.45	.40	.31
	a_3	.75	.67	.53

La dépendance de a_i de la température est négligeable, mais est
 importante pour le vent.

calcul de (τ_a)

Une partie du rayonnement arrivant à l'absorbeur est réfléchi vers le
 vitrage - A partir du vitrage une autre partie est réfléchi à nouveau
 vers l'absorbeur.

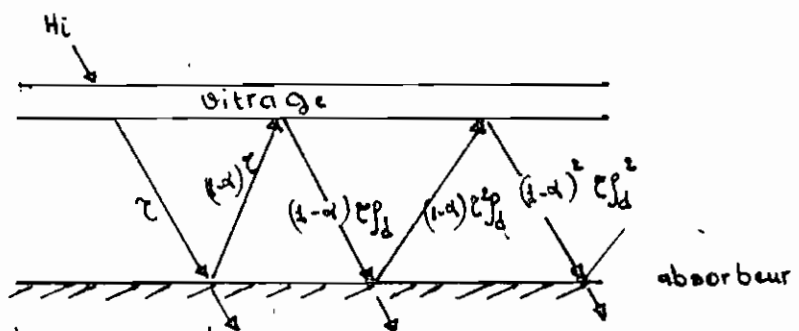


fig 5: absorption du rayonnement
 solaire par l'absorbeur.

Ainsi $(\tau\alpha) = \tau\alpha \cdot \sum_{n=0}^{\infty} [(1-\alpha)\rho_d]^n = \frac{\tau\alpha}{1-(1-\alpha)\rho_d}$ 47

Table 10' : Valeurs de ρ_d (diffuse reflectance)

nombre de vitres	1	2	3	4
ρ_d	.16	.24	.29	.32

1-1 energie absorbee par l'absorbeur

1) Influence de la saleté et des ombrages

Le rayonnement absorbé par l'absorbeur est réduit par le facteur $(1-d)$ où $d = .02$ pour tenir compte de la saleté.

Hottel et Woertz recommandent un facteur $(1-\beta)$ où $\beta = .03$ pour tenir compte de l'ombrage.

2) Energie absorbée par l'absorbeur

S est l'énergie absorbée par l'absorbeur.

$$S = H_i (\tau\alpha)_e (1-d)(1-\beta)$$

1- stockage energie

L'énergie stockée par l'eau est égale à l'énergie transmise par l'absorbeur moins les pertes latérales et par le bas.

L'énergie transmise de l'absorbeur est égale à l'énergie absorbée moins les pertes par le vitrage.

On calcule la température de l'eau à la fin d'une heure à partir de la température au début de cette heure.

On assume que la perte pendant cette période est constante.

$$m c_p \frac{dT}{dt} = S \cdot A_c - \sum U_b A_b (T_{f,old} - T_a) - U_t A_c (T_p - T_a)$$

$$T_{f,new} = T_{f,old} + \frac{\Delta t}{m c_p} \left[S A_c - \sum U_b A_b (T_{f,old} - T_a) - U_t A_c (T_p - T_a) \right]$$

$T_{f,old}$ = température de l'eau au début de l'heure

$T_{f,new}$ = température de l'eau à la fin de l'heure.

III. calculs et résultats

49

A. calcul de U_b et choix de l'épaisseur d'isolant

Pour chaque côté du cadre on a la structure suivante:

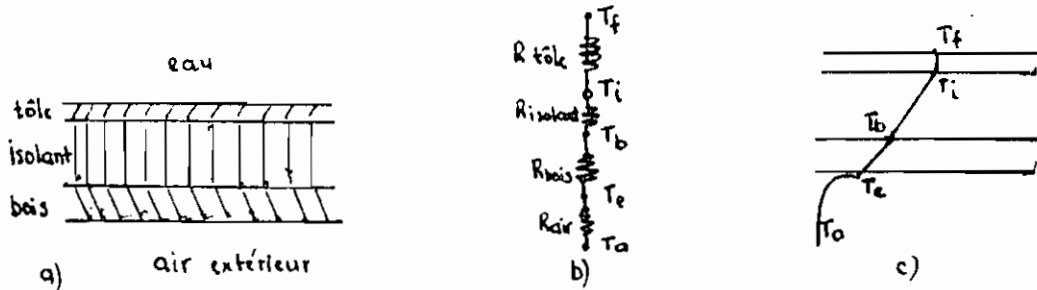


fig: 6 a) structure du cadre ; b) équivalent électrique ; c) profil de température

$$R = R_t + R_i + R_b + R_a$$

$$= \frac{l_t}{k_t} + \frac{l_i}{k_i} + \frac{l_b}{k_b} + \frac{1}{h_a}$$

k = conductivité thermique

L = épaisseur

$$U_b = \frac{1}{R}$$

On considère $\frac{1}{h_a} = R_a \rightarrow 0$

On prend :

$$* l_{tôle} = 2 \text{ mm}$$

$$k_{tôle} = 111.36 \text{ W/m} \cdot \text{C}$$

$$* l_{bois} = 2 \text{ cm}$$

$$k_{bois} = 0.23 \text{ W/m} \cdot \text{C}$$

On estime la perte avec isolation à différents pourcentages de la perte sans isolation, et on sélectionne une épaisseur d'isolant correspondant à une perte raisonnable.

$$Q = \frac{\Delta T}{\sum R_{th}} = \frac{\Delta T}{\sum R}$$

$$\frac{Q_{avec\ isolant}}{Q_{sans\ isolant}} = x\% = \frac{\sum R_{sans\ isolant}}{\sum R_{avec\ isolant}}$$

$$R_{\text{sans isolant}} = R_t + R_b = 1.796 \cdot 10^{-5} + .087 = .087 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{C}}{\text{W}}$$

x (%)	$R_{\text{sans isolant}}$ ($\frac{\text{m}^2 \cdot \text{C}}{\text{W}}$)	$R_{\text{avec isolant}}$ ($\frac{\text{m}^2 \cdot \text{C}}{\text{W}}$)	R_{isolant} ($\frac{\text{m}^2 \cdot \text{C}}{\text{W}}$)	L_{isolant} (cm)
0	.087	1.45	1.363	4.8
5.7	.087	1.517	1.43	5
50	.087	1.74	1.65	5.8
4	.087	2.175	2.088	7.3
3	.087	2.9	2.813	9.8
2	.087	4.35	4.26	16
1	.087	8.7	8.613	30

Table 1.1 :

épaisseur d'isolant (polystyrène extrudé)

En considérant les pourcentages x et l'épaisseur L , nous obtenons :

$$L_{\text{isolant}} = 5 \text{ cm}$$

Certains auteurs recommandent $\frac{k}{L} \text{ max} = .75 \text{ kcal/h m}^2 \cdot \text{C}$
 $\Rightarrow L = \frac{k}{.75} = \frac{.030}{.75} = .04 \text{ m} = 4 \text{ cm}$

Valeur de U_b

$$U_b = \frac{1}{R} = .66$$

$$U_b = .66 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$$

b). calcul de Q

nous faisons les calculs pour le mois d'avril

équations

50

$$S = H_i (\tau \alpha)_e (1-d) (1-f)$$

$$d = .02 \quad ; \quad f = .03$$

$$(\tau \alpha)_e = (\tau \alpha) + (1 - \tau \alpha) \frac{U_L}{U_e}$$

pour $\epsilon_p = .95$ on a $\frac{U_L}{U_e} = .27$

$$\tau \alpha = e^{-KL} = .988$$

$K = .04 / \text{cm}$ "water white" glass

$L = .3 \text{ cm}$ = épaisseur vitre

$$\tau = \tau_a \cdot \tau_{r,n}$$

$$\tau_{r,n} = \frac{1-f}{1+(n-1)f}$$

$n = 1$ = nombre de vitres

$$(\tau \alpha) = \frac{\tau \alpha}{1 - (1 - \tau \alpha) f_d}$$

f_d : voir table 10' page 47

$$\alpha = 1 - r$$

$$r = .04$$

$$f = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} + \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \right]$$

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{1}{N} = 1.526$$

θ_1 = angle d'incidence du rayonnement (voir table 5)

$$\theta_2 = \text{arc sin} \left(\frac{\sin \theta_1}{1.526} \right)$$

Table 12 : Tableau de résultats (Mois d'Avril)

Heure	7 ^h	8 ^h	9 ^h	10 ^h	11 ^h	12 ^h	13 ^h	14 ^h	15 ^h	16 ^h	17 ^h	18 ^h	19 ^h
$\cos \theta_i$	.255	.493	.697	.854	.952	.986	.952	.854	.697	.493	.255	-.0002	-.255
$\theta_i = \theta$	75.23°	60.46°	45.81°	31.35°	17.82°	9.60°	17.82°	31.35°	45.81°	60.46°	75.23°	90	104.77°
θ_2	39.32°	34.76°	28.03°	19.93°	11.57°	6.27°	11.57°	19.93°	28.03°	34.76°	39.32°	40.94°	39.32°
f	.262	.095	.055	.045	.043	.043	.043	.045	.055	.095	.262	1	5.77
$\tau_{r,n}$	.585	.826	.896	.914	.917	.917	.917	.914	.896	.826	.585	0	-.70
τ	.578	.816	.885	.903	.906	.906	.906	.903	.885	.816	.578	0	-.692
$(\tau \alpha)$	.558	.788	.855	.872	.875	.875	.875	.872	.855	.788	.558	0	-.688
$(\tau \alpha)_e$	.561	.791	.858	.875	.878	.878	.878	.875	.858	.791	.561	0	-.665
$S_{(W/m^2)}$	40.98	215.44	417.51	591.22	706.97	768.63	773.06	710.60	588.01	395.91	155.44	0	0

c. évolution de la température de l'eau ⁵²

Nous considérons dans notre étude deux cas limites :

- 1) le cas où l'eau n'est pas soutirée
 - 2) le cas où l'eau est soutirée de façon continue avec débit fixe.
- En pratique, l'utilisation alterne des périodes de soutirage et de non soutirage.

1. cas de non soutirage pendant la journée

a) equations de calcul

+ coefficient de déperdition U_t

$$U_t(45^\circ) = \left[\frac{1}{\frac{344}{T_p} \left[\frac{(T_p - T_a)}{(N+f)} \right]^{.31} + \frac{1}{h_w}} \right]^{-1} + \frac{\sigma(T_p + T_a)(T_p^2 + T_a^2)}{[\epsilon_p + .0425N(1 - \epsilon_p)]^{-1} + \left[\frac{2N+f-1}{c_g} \right]^{-N}}$$

$$U_t(3) = U_t(45^\circ) \times [1 - (3-45)(.00259 - .00144\epsilon_p)]$$

+ Coefficient de convection.

A l'intérieur nous avons de la convection naturelle entre plaques parallèles pour un liquide, en l'occurrence de l'eau.

$$\frac{h}{k} = \left(.069 - .020 \times \frac{z}{90} \right) \cdot \left(\frac{g\beta}{\nu^2} (T_p - T_f) \cdot Pr \right)^{1/3} \cdot (Pr)^{.074}$$

+ Température d'absorbeur

$$T_p - T_{f, \text{air}} = Q_u' \cdot R_{p-f} = [S \cdot A_c - U_t A_c (T_p - T_a)] \cdot R_{p-f}$$

$$T_p = \frac{(S \cdot A_c + U_t A_c T_a) R_{p-f} + T_{f, \text{air}}}{1 + U_t A_c R_{p-f}}$$

$$R_{p-f} = \frac{1}{h \cdot A_c}$$

$$T_{f,new} = T_{f,old} + \frac{\Delta Q}{(m c_p)_f} \left[S A_c - U_b A_b (T_{f,old} - T_a) - U_t A_c (T_p - T_a) \right]$$

* Note: Pour les définitions des variables, voir les paragraphes correspondant, aux sous-chapitres I et II de la conception.

b) Procédure de calcul

- 1° Estimer T_p
- 2° Calculer U_t
- 3° Calculer $T_{f,new}$
- 4° Calculer h . (h est calculé à une température moyenne entre T_p et $T_{f,new}$)
- 5° Calculer T_p . Si $T_p = T_p$ estimé, on a les bonnes valeurs. Sinon retourner à l'étape 2°.

2. soutirage de l'eau

54

+ le débit de soutirage: dans le chapitre "étude des besoins" nous avons retenu un débit continu de 20 l/heure

+ equations

On définit G = débit par unité de surface

- On définit le coefficient d'efficacité du premier ordre

F' (voir

- On définit F_R le coefficient d'efficacité du second ordre

$$F_R = \frac{G C_p (T_{f,o} - T_{f,i})}{S - U_L (T_{f,i} - T_a)} = \frac{G C_p [1 - e^{-U_L F' / G C_p}]}{U_L}$$

- l'énergie utile Q_U est:

$$Q_U = A_C F_R [S - U_L (T_{f,i} - T_a)]$$

- Température de sortie de l'eau moyenne

$$T_{f,mo} = T_{f,i} + \frac{Q_U / A}{U_L / F_R} \left[1 - \frac{F_R}{F'} \right] = T_{f,i} + \frac{Q_U}{\dot{m} C_p}$$

- coefficient de radiation entre les deux surfaces

$$h_r = \frac{4 \sigma \bar{T}^3}{(1/\epsilon_1) + (1/\epsilon_2) - 1}$$

\bar{T} = température moyenne

- nombre de Reynolds

$$Re_{DH} = \frac{\rho V_{DH}}{\mu} = \frac{\dot{m} D_H}{A_C \mu}$$

$D_H = L$ = espace entre plaques

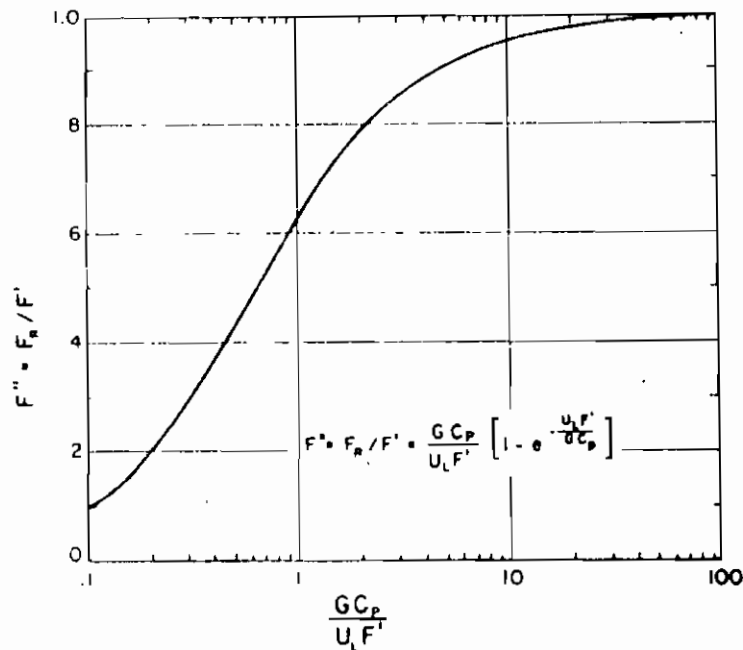
- coefficient de transfert de chaleur

$$h = \frac{Nu K}{L}$$

procédure de Calcul

- 1. Estimer T_p
- 2. Calculer U_L $U_L = U_E + U_b$
- 3. Calculer h_r
- 4. Calculer h
- 5. Calculer F'
- 6. Lire F'' (figure ci-dessous) $\Rightarrow F_R$
- 7. Calculer Q_u
- 8. Calculer T_p . Si $T_p = T_p$ estimé alors continuer
Sinon reprendre à l'étape 2
- 9. Calculer $T_{f,m}$

figure 7 : Value de F''



résultats

56

Table 13 : Tableau de résultats pour non soutirage

heure	Ta °C	S w/m²	Tp °C	Tf,old °C	Tf,new °C	Ut w/m²°C	fi w/m²	Qu W	Hi w/m²	η %
6					23					
7	23	40.98	23.5	23	23.4	4.63	443	38.54	7685	50.15
8	23	215.44	26.9	23.4	25.5	5.39	100.48	202.33	28652	70.62
9	25	417.51	33	25.5	29.3	6.01	216.29	366.13	511.9	71.52
10	28	591.22	37.5	29.3	34.8	6.20	186	529.25	710.78	74.46
11	30	706.97	44	34.8	41.2	6.57	207	615.90	847.05	72.71
12	32	768.63	51.4	41.2	47.7	6.98	276	625.52	920.93	67.92
13	33	733.06	57	47.7	54	7.13	1858	607.0	926.23	65.53
14	34	710.60	62	54	59.2	7.35	191	501.02	854.32	58.64
15	33	588.01	64	59.2	62	7.53	245	269.78	720.94	37.42
16	32	395.91	64.3	62	63.3	7.54	158.7	125.25	526.53	23.79
17	30	155.44	63	63.3	60.5	7.48	266.77	-269.78	291.48	-92.55
18	30	0	60	60.5	57.9	7.36	246.7	-250.51	29.56	-847.5
19	27	0	58	57.9	55.2	7.29	268.6	-260.16	2.97	-8739

Energie utile

$$Q_u = m C_p \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

rendement horain

$$\eta_h = \frac{Q_u}{A_c H_i} \times 100\%$$

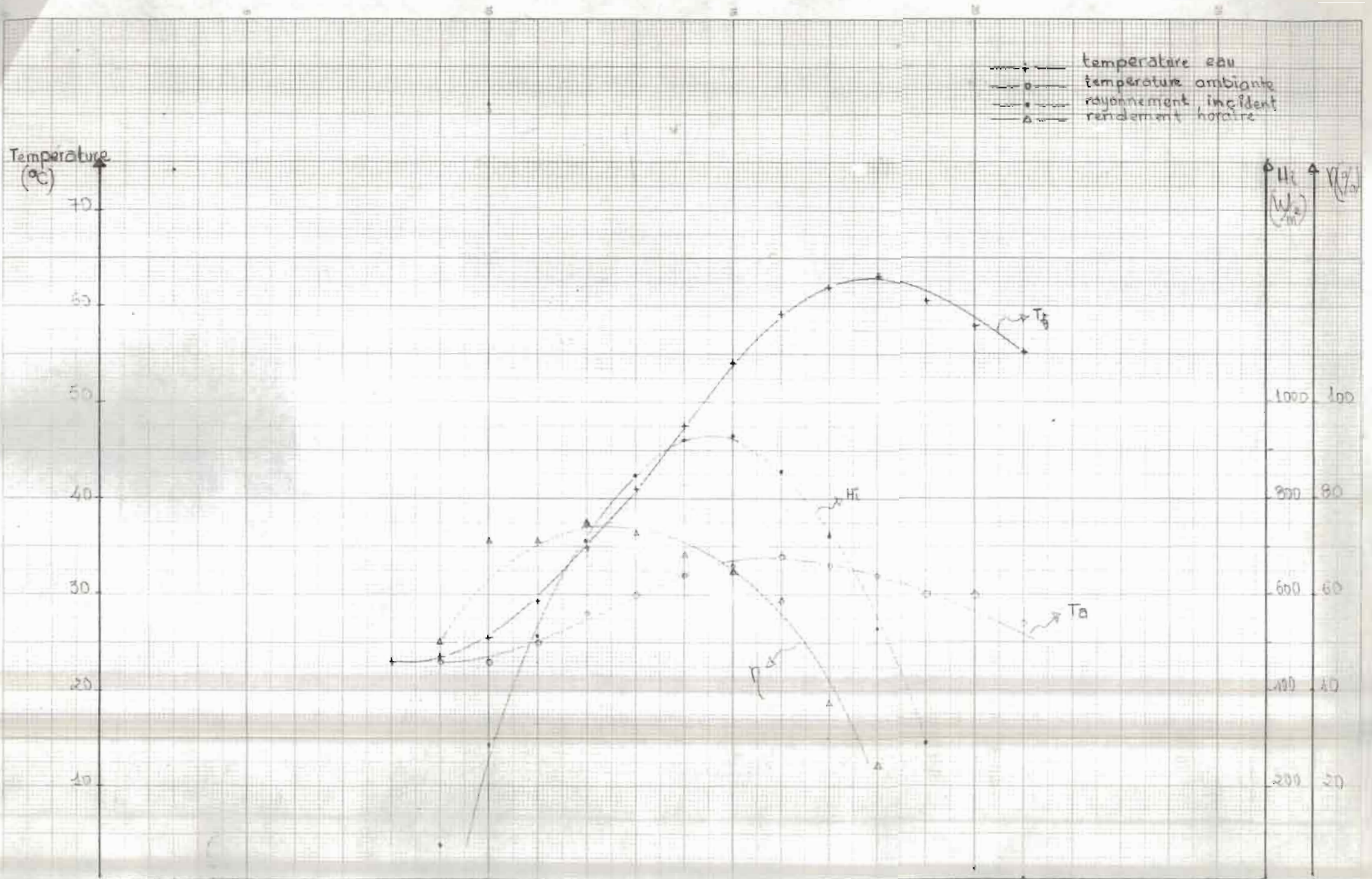
Δt en seconde (= 3600sec)

m en kg (= 83 kg)

$C_p = 7 / \text{kg} \cdot \text{°C}$

figure 13

courbes théoriques : non soutirage



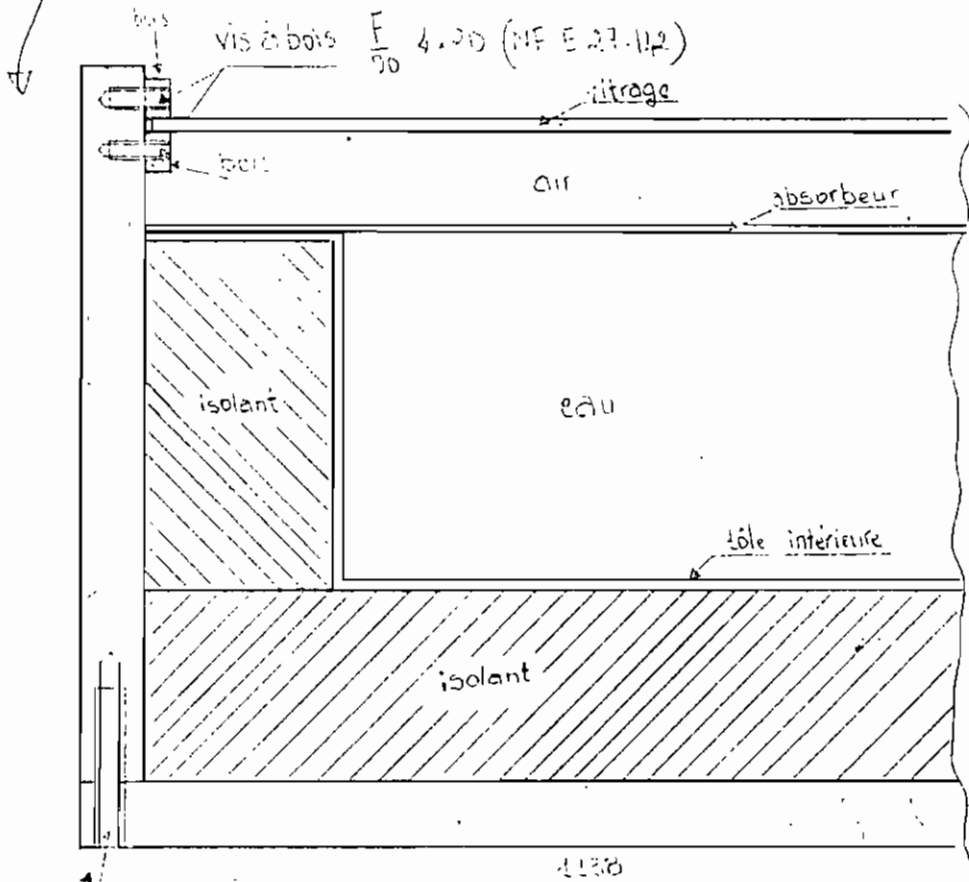
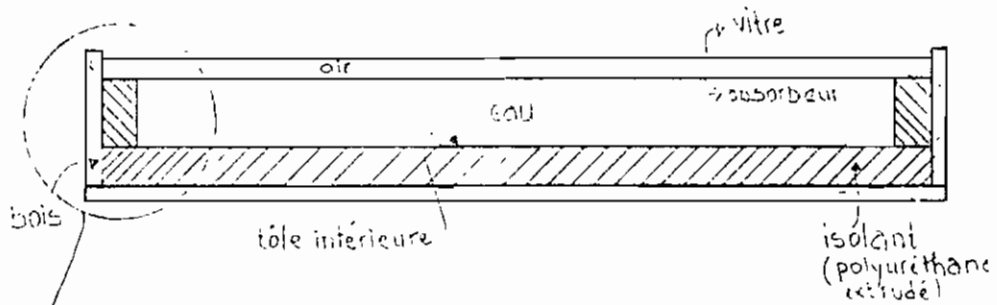
chapitre =

SCHÉMA DU
CAPTEUR

schema(s) du capteur

59

schéma 1 : vue en coupe du Capteur



vis à bois $\frac{F}{90}$ 6.50 (NF E 27.112)

schéma 2 : détail de coupe

échelle: $\frac{1}{2}$

schéma 3 : Capteur éclats

60

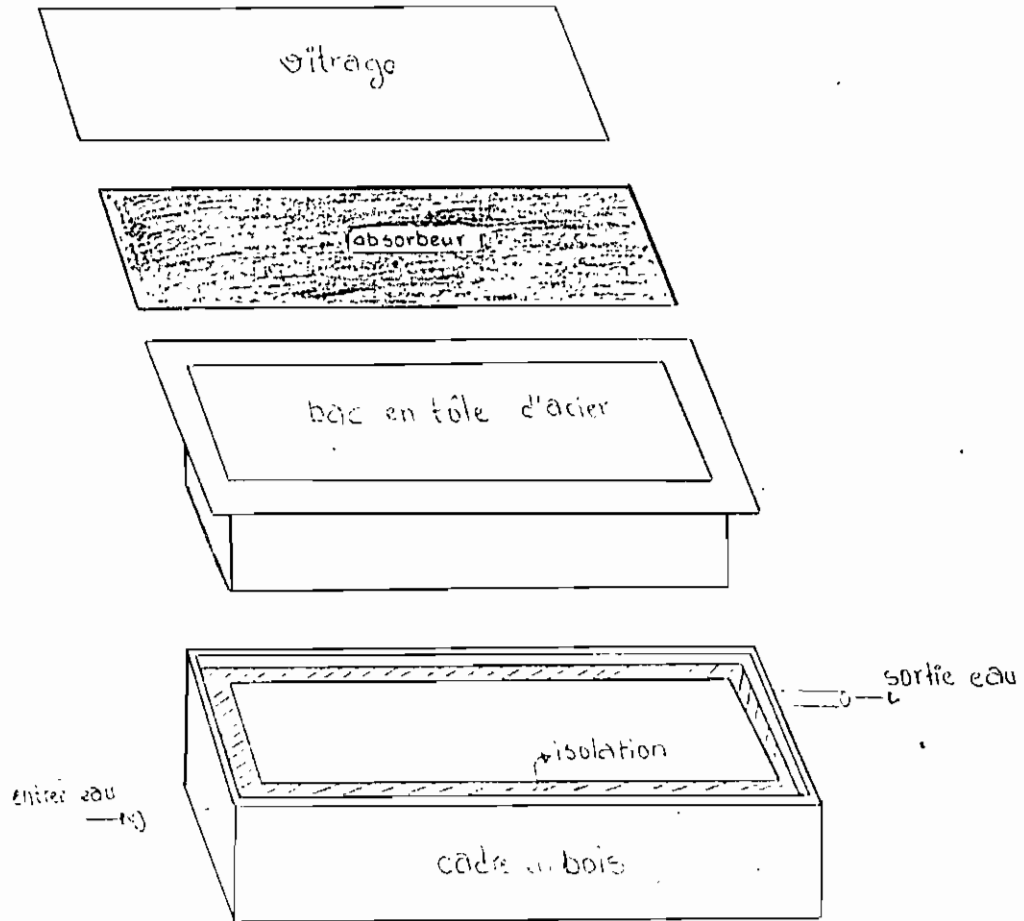
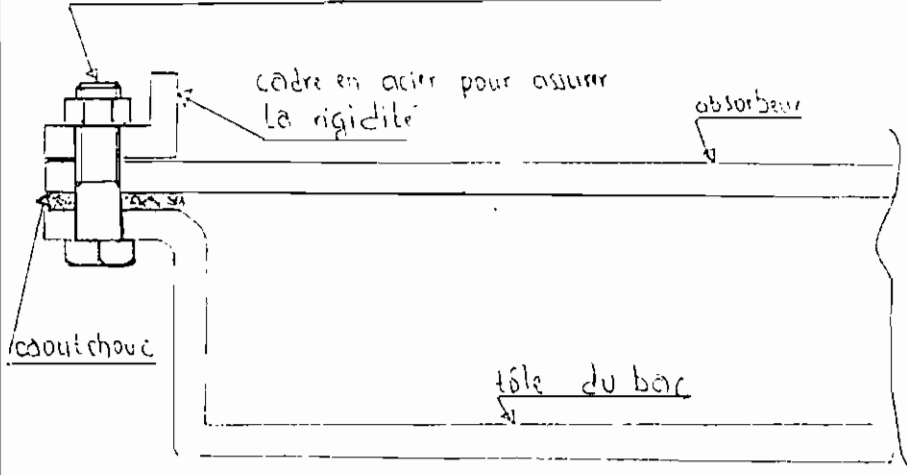


schéma 4 : Assemblage bac en tôle avec absorbeur

boulon H. M6-16T écrou HT (NF E 27-311)



considérations pratiques 61

Le bac en tôle d'acier contenant l'eau doit être revêtu d'un produit anticorrosif.

L'étanchéité entre le bac et l'absorbeur est assurée par du caoutchouc.

L'absorbeur sera peint à l'oxyde d'acétylène. Toutefois, nous prendrons pour solution durable, la peinture au noir mat.

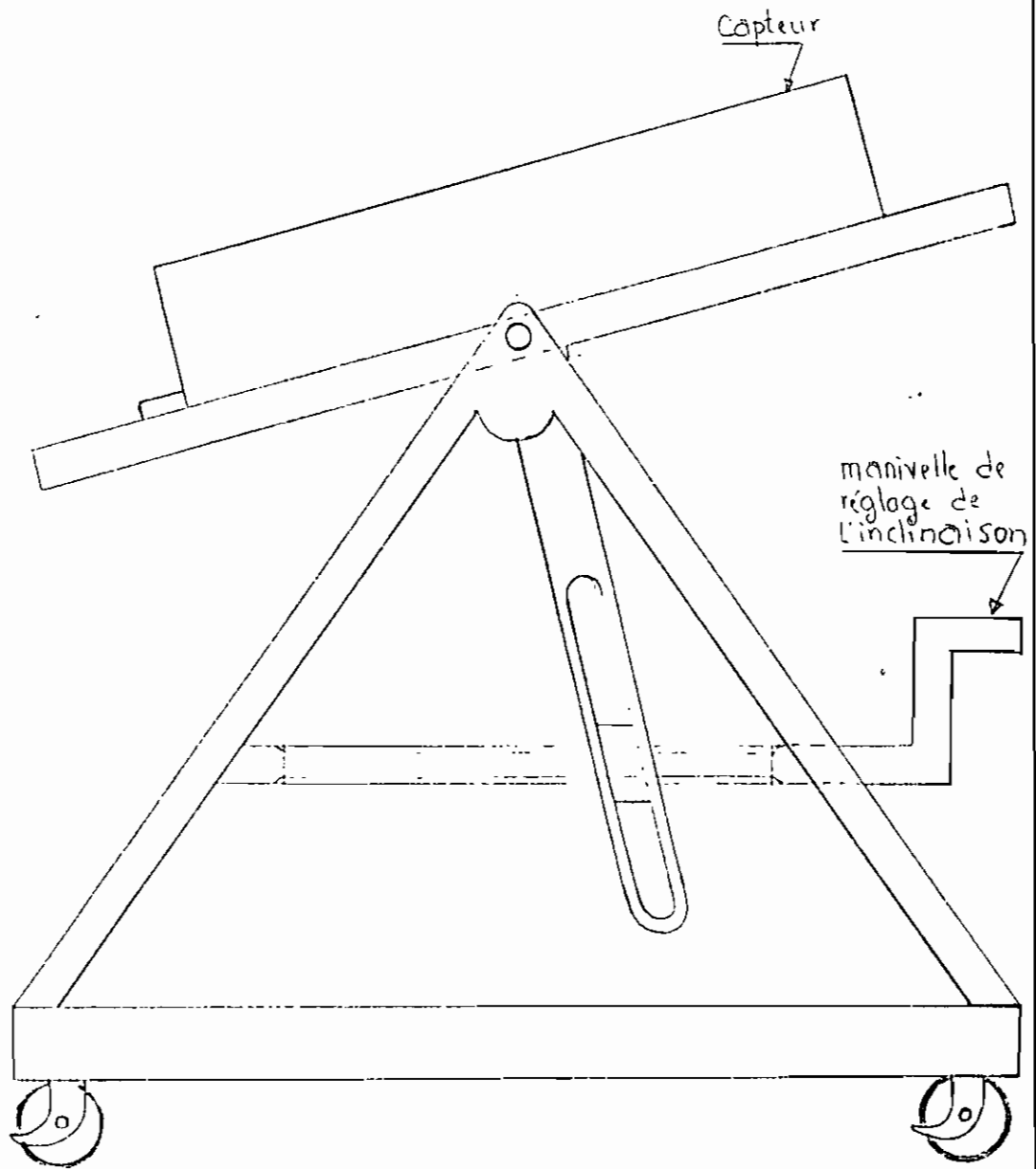
Le bac a été obtenu par soudage de tôles d'acier d'épaisseur 2mm. Ceci fait que le modèle présenté ne semble pas pouvoir résister à la pression du réseau. Toutefois, à la basse pression, ce modèle est satisfaisant pour l'objet de notre étude qui concerne uniquement l'aspect thermique du problème.

Enfin le vitrage ne doit épouser les limites du cadre en bois. Il faut un espace pour les cas de dilatation du verre ou plexiglass.

chariot experimental

62

schéma 5



chapitre = VI

EXPERIMENTATION
&
ANALYSE

A - experimentation

64

BUT

Relever la température de l'eau à chaque heure afin d'étudier l'efficacité du système.

Matériel utilisé

- Chariot d'orientation réglable (pour varier l'inclinaison du capteur)
- Capteur
- débitmètre
- chronomètre
- Thermomètre
- Solarimètre
- Voltmètre EM 272
- Thermocouple Potentiomètre type P. 6 , marque Copic

Tableaux de mesures

a) Table 14 : débit de soutirage nul

Table 14		débit de soutirage = 0											
		inclinaison : 15° face Sud											
Heure		8 ^h	9 ^h	10 ^h	11 ^h	12 ^h	13 ^h	14 ^h	15 ^h	16 ^h	17 ^h	18 ^h	19 ^h
T _{ambiant} T _{air} (°C)		23.5	28	31	32	35	37	40	39	39	35	32.5	28.5
Rayonnement global H _g (mW/m ²)		1	3.5	7.5	9	10	10.9	10.5	8.5	7.2	5	2.8	0
Température T _c (°C)		29	33	36.5	44.5	51	55	61	59	59	52.5	49	44
Température T _p (°C)		33	41	46	59	71	80	80	78	76	67	62	57
Température T _f (°C)		27	29	35	40	46	53	58	60	63	61	60	55

b) Table 15 : débit de soutirage : 20 l/h

65

heure	8 ^h	9 ^h	10 ^h	11 ^h	12 ^h	13 ^h	14 ^h	15 ^h	16 ^h	17 ^h	18 ^h	19 ^h
Tambiant $T_{a,w}$	26	26	28	32	34	34	34	33	31	31	30	26
Rayonnement global. H_g (mW)	2.5	5	7.5	9.2	10.2	11	10.5	8.8	6.5	4.5	2	0
Tvitre T_c (°C)	30	33	36	40	55	63	63	59	52	47	44	40
Tabsorbeur $T_{p,0}$	33	41	46	57	81	92	92	83	68	58	48	41
T° eau sortie $T_{f,0}$ (°C)	27	27	33	38	43	49	51	57	60	59	58	50
Teau entrée $T_{f,i}$ (°C)	27	27	29	32	38	38	38	40	37	34	30	27

Tableaux de résultats

Table 6		non soutirage			inclinaison 15° plein Sud		
heure(h)	T_a (°C)	H_g (W/m²)	H_i (W/m²)	$T_{f,old}$ (°C)	$T_{f,new}$ (°C)	Q_u (W)	η (%)
8	23.5	95.24	85.76	26.5	27	48.17	56.17
9	28	333.3	310.13	27	29	192.7	62.3
10	31	714.28	673.21	29	35	577.4	85.77
11	32	857.14	813.0	35	40	481.7	59.18
12	35	952.38	909.05	40	46	577.4	63.52
13	37	1038.09	984.63	46	53	674.44	68.50
14	40	1000	942.5	53	58	481.74	51.11
15	39	809.52	753.26	58	61	289.05	38.37
16	39	685.71	617.48	61	63	192.70	31.20
17	35	476.19	394.52	63	61	-192.7	-48.84
18	32.5	271.43	67.56	61	60	-96.35	-14.26
19	28.5	0	0	60	55	-481.7	"

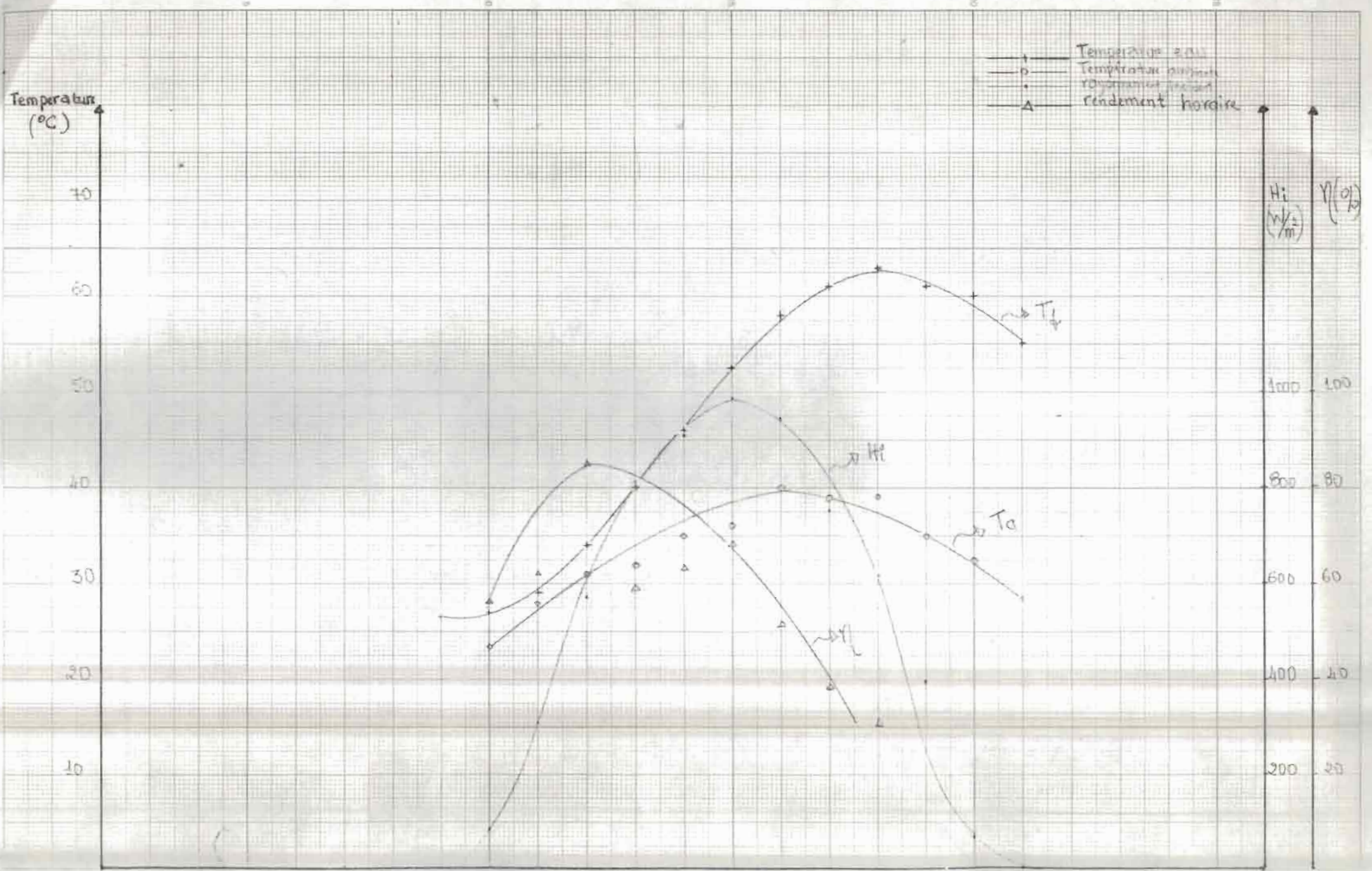
Table: 17 résultats pour soutirage

Débit : 20 l/h				inclinaison capteur : 15° plein Sud			
heure (h)	T _{air}	H _g (mm)	H _i (mm)	T _{froid c}	T _{humid c}	Q _u (W)	η
8	26	238.09	214.40	26.5	27	481.7	22.47
9	26	476.19	443.09	27	28	96.35	21.74
10	28	714.28	673.21	28	33	481.17	71.47
11	32	876.19	831.07	33	38	481.17	57.90
12	34	971.43	927.23	38	43	481.17	51.89
13	34	1047.62	993.67	43	49	577.40	58.11
14	34	1000	942.5	49	51	192.70	20.46
15	33	838.09	779.84	51	57	578.09	74.13
16	31	619.05	557.45	57	60	289.05	51.85
17	31	428.57	355.07	60	59	-96.35	-27.13
18	30	190.48	75.07	59	56	-289.05	-38.5
19	26	0	0	56	50	-577.40	

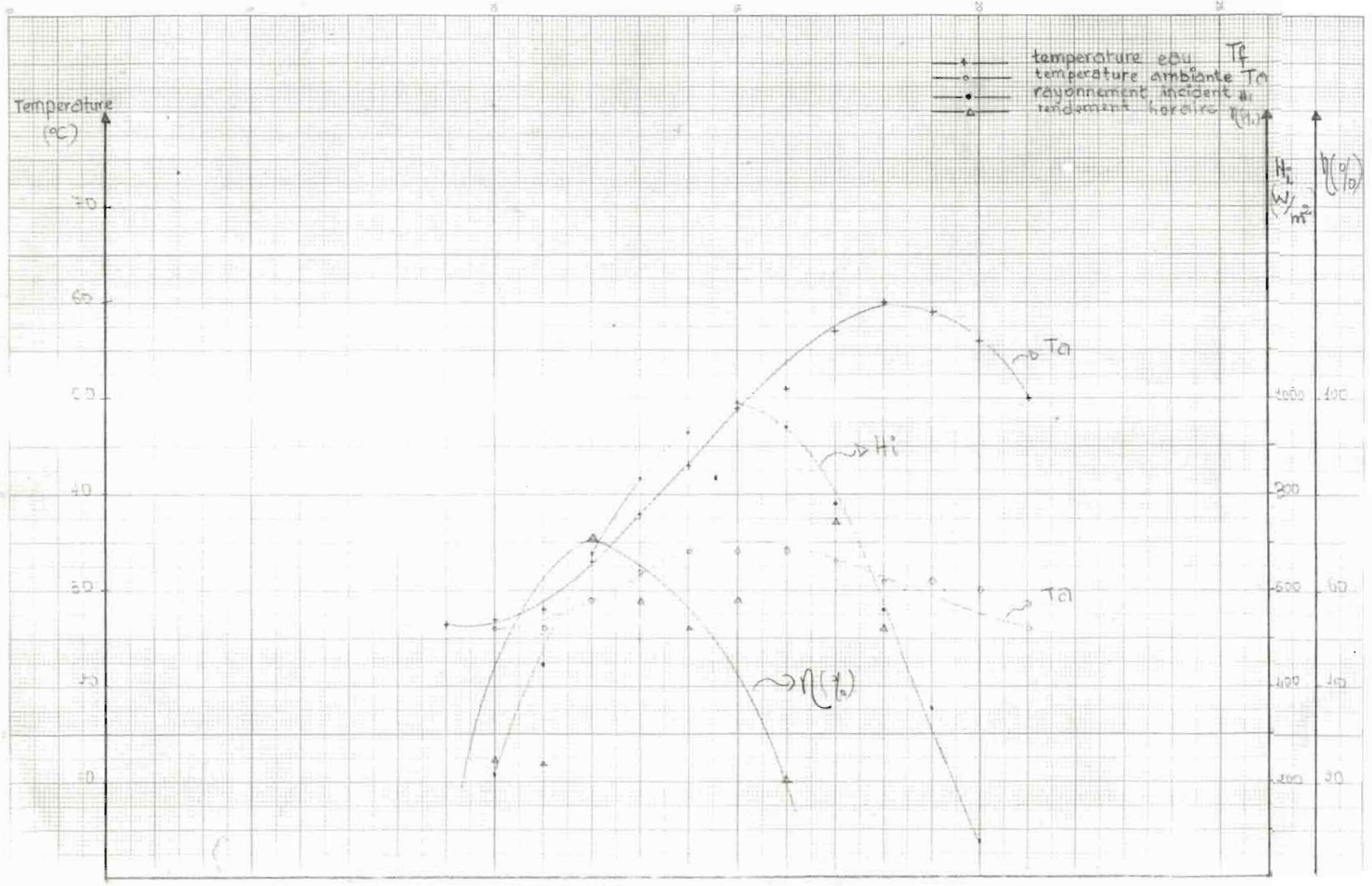
6

fig 8

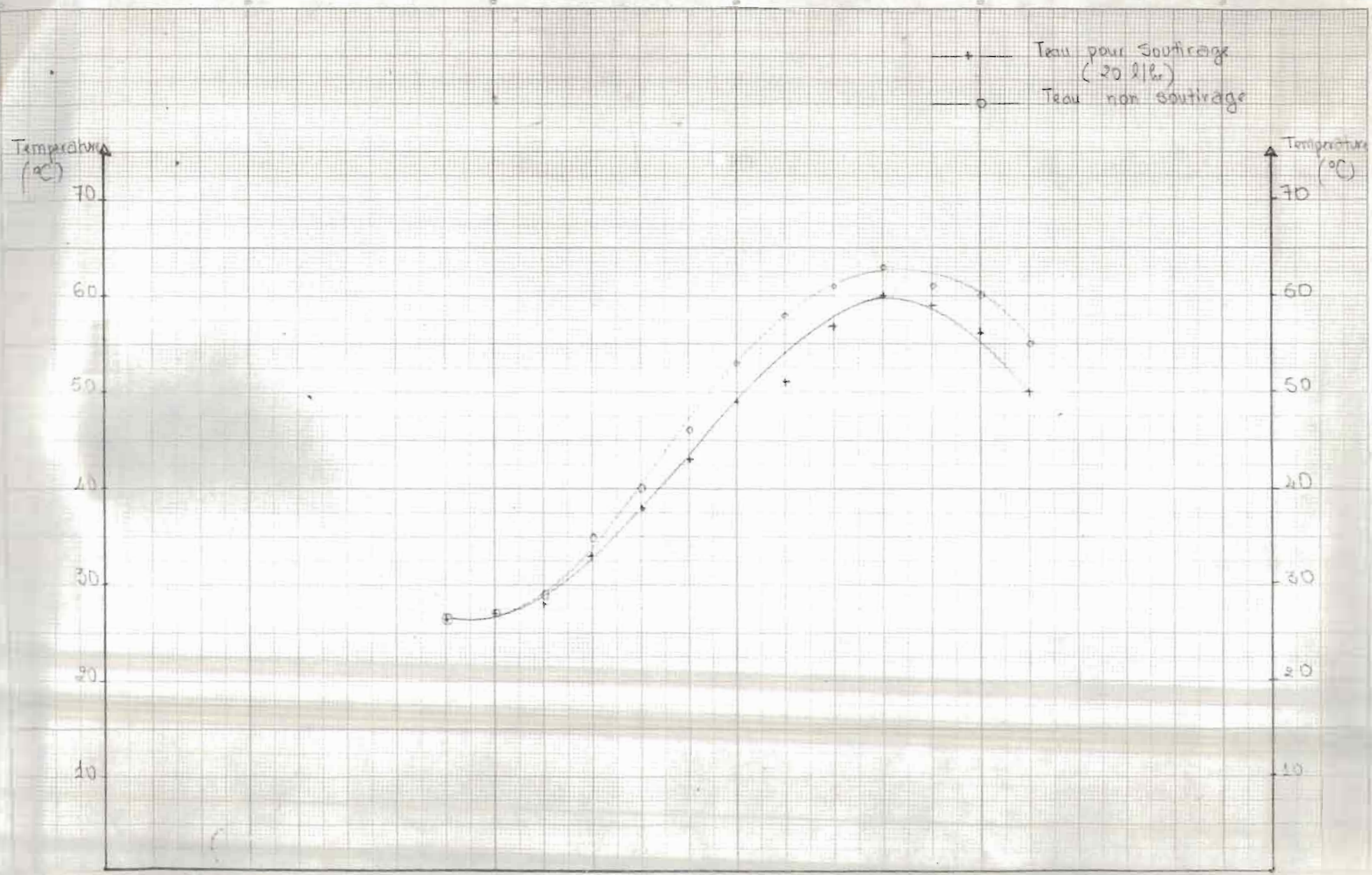
courbes de résultats : non soutirage



coubes da résultats : soutirage de 20 l/h



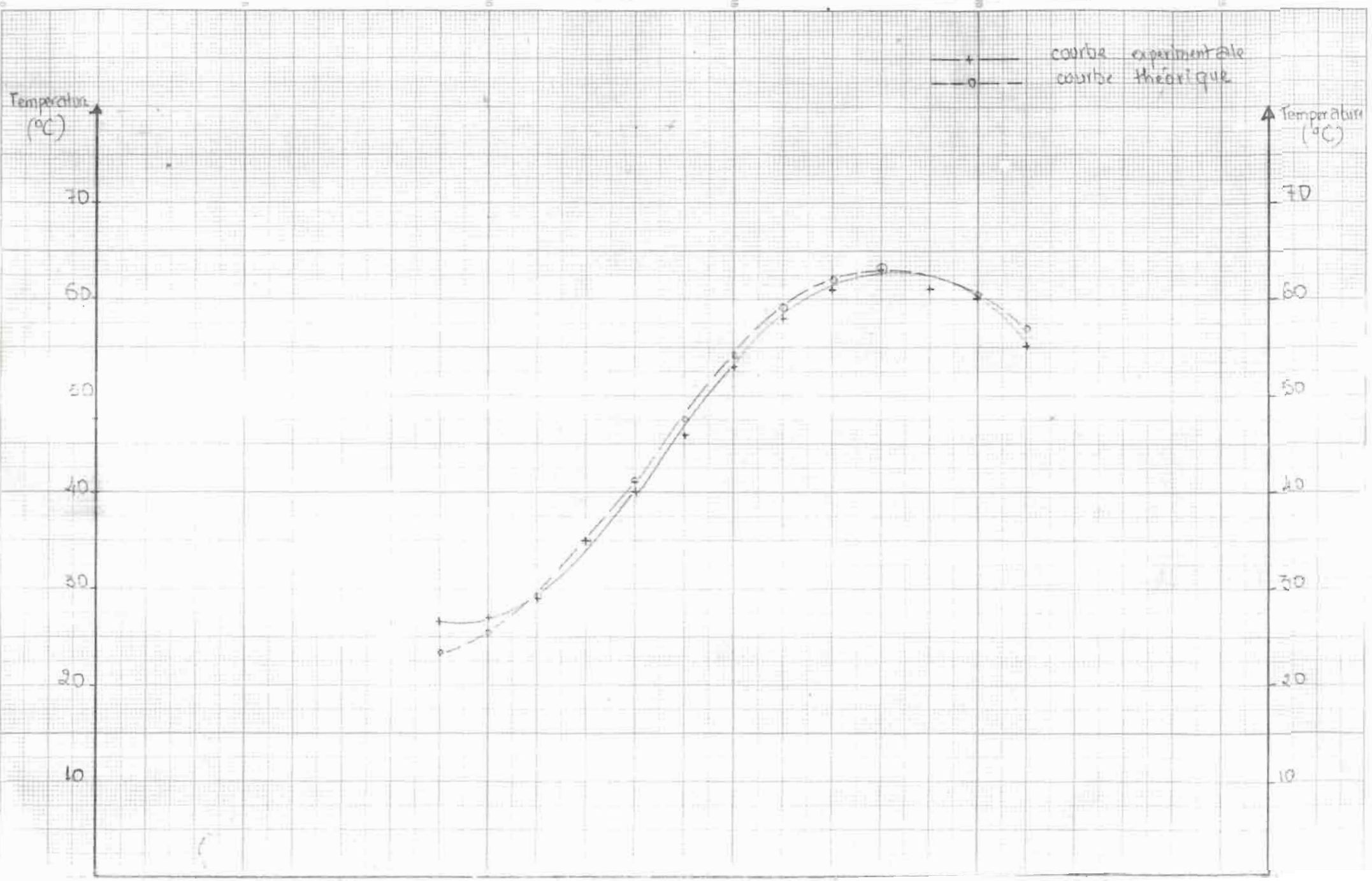
comparaison des courbes de temperature d'eau pour
soutirage de 20 l/h et pour non soutirage (résultats expérimentaux)



7

Fig 10

comparaison des courbes théorique et expérimentales
pour non soutirage : Courbes de Température d'eau



B. analyse

71

L'analyse des courbes théoriques et expérimentales montre que nous avons des similarités entre elles.

Nous constatons que la température de l'eau est maximale à 16h.

Avant elle augmente graduellement, pour diminuer après 16h. Ceci est dû au fait que le rayonnement solaire commence à diminuer à partir de cette période et que les pertes augmentent. Le rendement est maximal à 10h. C'est un rendement instantané c'est à dire horaire.

Ceci dit que le gain est maximal à 10h. La diminution de la température d'eau après 16h conduit inexorablement à avoir sur la courbe une température le lendemain très faible.

Enfin en comparant les courbes de soutirage et sans soutirage, on constate que l'allure est la même mais que la température sans soutirage est supérieure à la température de l'eau avec soutirage. Toutefois cette différence n'est que de quelques degrés.

VII. ETUDE ECONOMIQUE

72

Puisque ce projet n'en est qu'à ses débuts, il ne s'agira pas à proprement parler d'une étude économique en tant que tel, mais plutôt d'une évaluation des coûts des matériaux utilisés.

Table des coûts : Table 14

Nature	dimensions (lxlxh) (mm)	nombre	Prix (FCFA)
bois	1104 x 184 x 17	2	} 6000
	1138 x 1138 x 17	2	
	1138 x 184 x 17	2	
	1000 x 10 x 10	2	
	800 x 10 x 10	2	
isolant	1104 x 90 x 50	2	} 5700
	1004 x 90 x 50	2	
	1104 x 1104 x 50	1	
vitrage	1000 x 1000 x 3	1	4160
tôle	1000 x 1000 x 2	4	} 4000
	1104 x 1104 x 2	1	
vis		40	1000
boulons		12	800
main d'œuvre		40h	6800
peinture		1kg	900
TOTAL			29160 FCFA

VIII CONCLUSION

73

Il s'agira ici de dire que le "Capteur intégré" a un bon rendement dans la journée, mais que la nuit le problème est tout autre. Il s'agira donc de continuer l'étude de ce problème.

Ainsi parallèlement, on devrait résoudre la question de l'installation, en proposant un autre modèle qui puisse résister à la pression du réseau de distribution d'eau. Nous recommandons quant à nous pour la conservation de l'énergie pendant la nuit, de couvrir la surface vitrée. D'autre part un effort pour l'obtention de matériaux plus performants serait rentable.

Nous suggérerons aussi que des mesures comme le recrutement de techniciens supplémentaires aux ateliers soient faites pour aider à la réalisation rapide des projets expérimentaux.

Aussi un système de relevé de mesures automatique serait une bonne chose pour les projets comme celui-ci.

En dernière analyse, l'effort fait par l'école polytechnique de Thiès dans le domaine du solaire doit être maintenu et même accentué, afin de faire figure de proue dans la bataille du solaire et plus généralement dans la bataille pour les énergies renouvelables.

Que Dieu exauce nos vœux !

ANNEXES

Annexe A 1

	Confort minimum	Confort moyen	Confort maximum
Consommation journalière moyenne et par personne C_m (l/j. personne).....	30	50	75

On fera l'hypothèse d'une occupation de 1,5 personne par pièce, donc selon le type de logement :

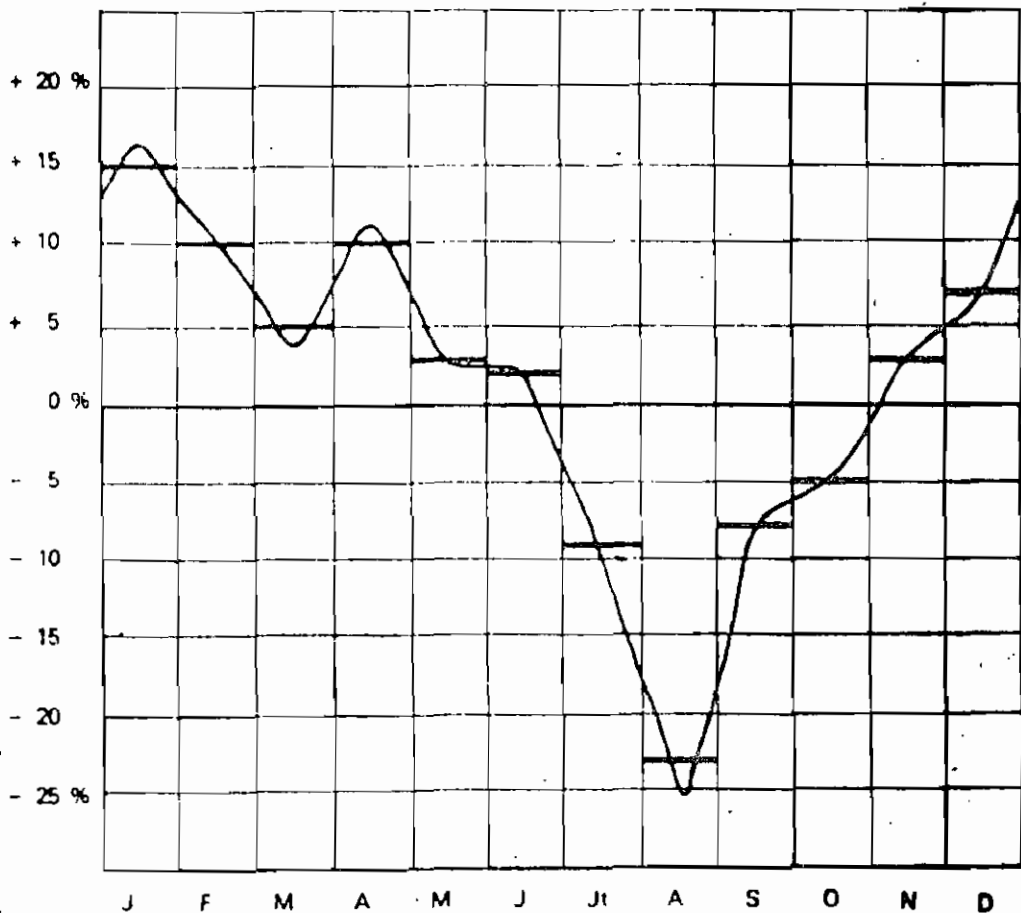
	Studio	F2	F3	F4	F5
Nombre d'occupants.....	1 à 2	2 à 3	3 à 5	4 à 7	5 à 9

Ces valeurs pourront être utilisées aussi bien dans l'habitat individuel que dans le collectif, où il faudra étudier chaque type d'appartement et considérer la somme des consommations

Les consommations que nous venons d'étudier sont valables en moyenne annuelle et on observera des variations saisonnières de ces consommations selon le schéma suivant :

Influence de la Saison sur les besoins

Annexe A1



D'après R. Delebecque

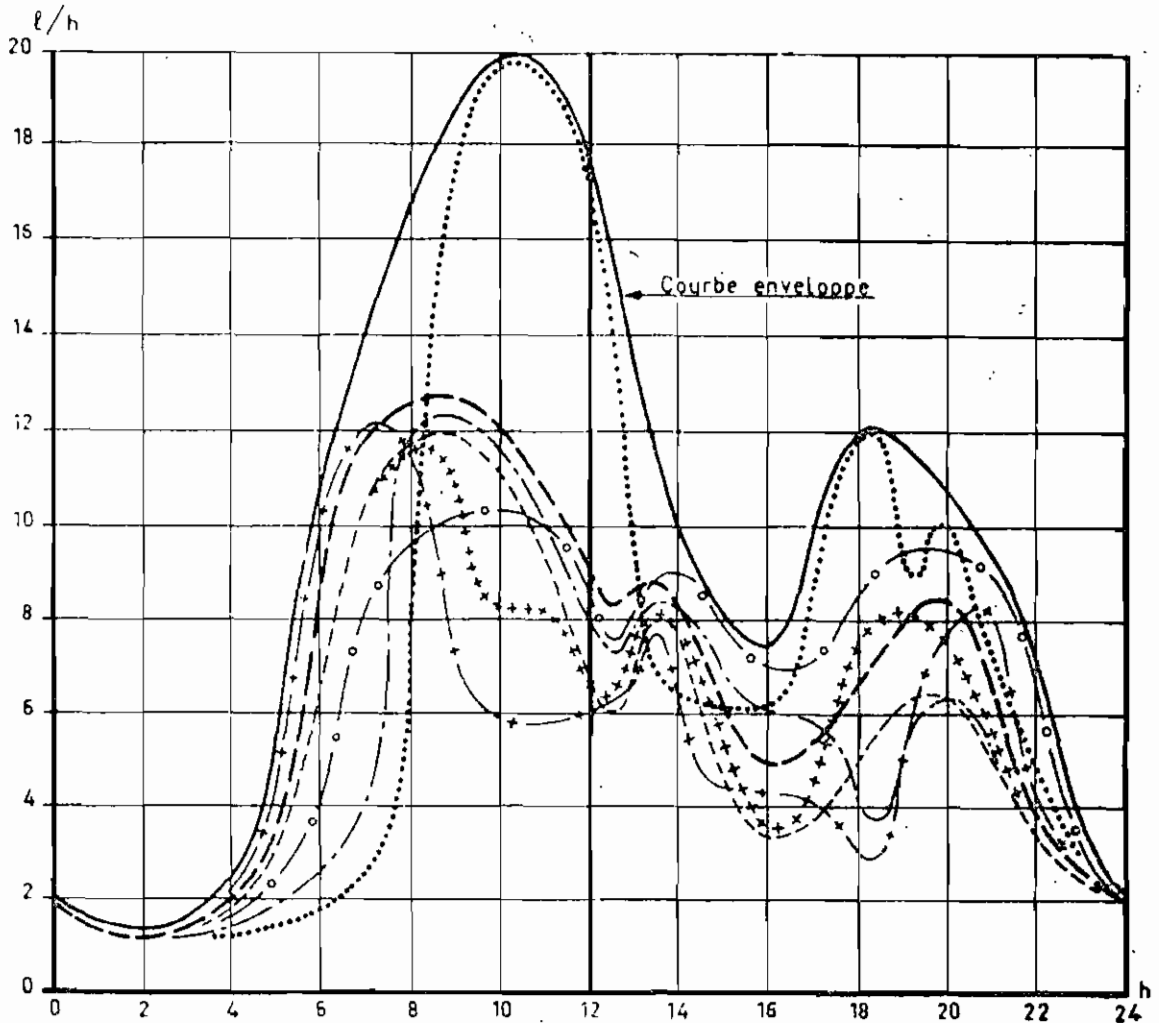
On pourra se reporter pour de plus complètes informations à l'excellent ouvrage de R. Delebecque mentionné en bibliographie.

4-1-3-6 - Influence du jour de la semaine.

Les renseignements que nous possédons dans le domaine des H.L.M. de la Région parisienne permettent de dresser le graphique (approximatif) ci-dessous (fig. 2).

Valeurs moyennes ramenées au logement.

Fig. 2.



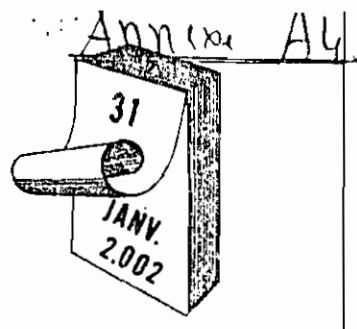
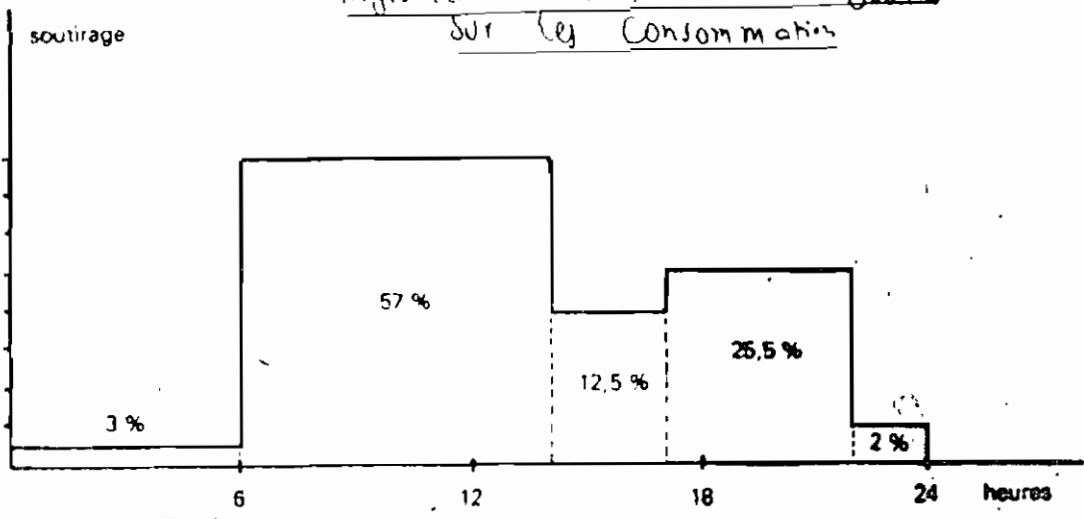
— — — —	Lundi
- - - - -	Mardi
+ + + + +	Mercredi
- - - - -	Jouidi
— + — —	Vendredi
— o — —	Samedi
.....	Dimanche

Ce graphique nous montre les variations existant entre les divers jours de la semaine.

Les valeurs à prendre en considération sont celles qui correspondent à la courbe enveloppe ci-dessus.

Les débits maximaux correspondent au dimanche.

Les puisages matinaux aux lundi et vendredi, les puisages nocturnes au samedi.



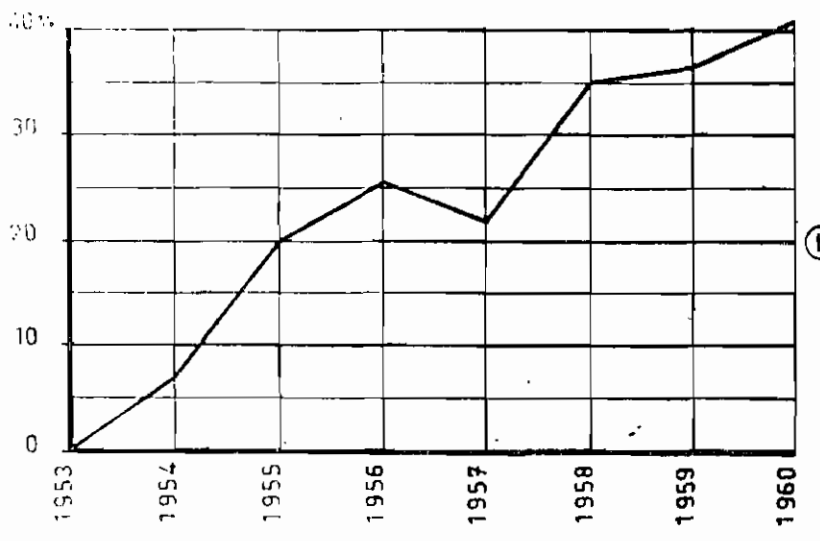
4-1-3-3 - Influence de l'année.

L'année en elle-même n'a pas d'influence sur les quantités d'assainissement sanitaire utilisées, sauf en cas de guerre ou de pénurie de combustibles.

Ce qui est important c'est la date, car il peut être intéressant de prévoir ce que seront les quantités nécessaires dans les années à venir, serait-ce que pour permettre les extensions futures.

Les valeurs connues permettent d'établir le graphe de progression des consommations ci-dessous (fig. 3).

Fig. 3.



(b) D'après J. Olivet 1962. De 1960 à 1968 on peut estimer la progression entre 10 et 15%.

Il est logique d'admettre que cette progression tendra dans l'avenir vers une limite, mais elle augmente encore actuellement.

On peut approximativement l'évaluer à 10% pour la décennie à venir (1970-1980).

propriétés d'isolants

Annexe B4

	Unités	Mousse rigide de polyuréthane (fabrication en plaques continues)	polystyrène extrudé
masse volumique	kg/m ³	35	28
Volume massique	m ³ /kg	0.028	0.036
conductivité thermique k	W/m°C	0.029	0.035
	kcal/mhr	0.025	0.030
coefficient de dilatation		60 · 10 ⁻⁶	70 · 10 ⁻⁶
contrainte de compression sous écrasement de 10% (5% polystyrène)	kpa	7200	195
Resistance à la compression	kpa	à 10% déformation	
Resistance au cisaillement	kpa	120 en 30mm	
resistance au poinçonnement	kpa	125	
resistance à la flexion	kpa	540	390
Températures limites d'utilisation	°C	-30 à +100	75°C
Température pour variation dimensionnelle ≤ 3%	°C	-35 +80	
perméabilité à la vapeur d'eau à 23°C et 85% HR	μg/m ² s	1300	180
pouvoir calorifique	kcal/kg	5500	9000
Tolérances dimensionnelles	mm		
+ longueur		-0 +10mm	
+ largeur		-0 +10mm	
+ épaisseur		± 1mm	
absorption d'eau à 48h d'immersion	pois	15%	
chaleur massique	Kcal/kg°C		0.27
resistance aux agents chimiques		bonne	
resistance aux agents biologiques		bonne	
comportement au feu		mauvais	non inflammable

Propriétés du verre à vitre

Annexe B-2

transmission énergétique solaire(%) pour l'épaisseur ci-dessous	85 - 92
Épaisseur (mm)	3
indice de réfraction	1.5
masse volumique (g/cm^3)	2.5
coefficient de dilatation linéaire $10^{-5}/^{\circ}C$	.8 - .95
absorption d'eau 24h épaisseur 3.2mm %	-
conductivité thermique ($W/m^{\circ}C$)	1.15
chaleur massique ($cal/g^{\circ}C$)	.2
Temp. résistance ($^{\circ}C$) chaleur continue	125
propagation de la flamme	incombustible

déclinaison δ

Annexe C - 1

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	δ	
Janv.	21	22	22.8	22.7	22.6	22.5	22.4	22.3	22.2	22	21.9	21.7	21.6	21.4	21.3	21.1	20.9	20.7	20.5	20.3	20.1	19.9	19.7	19.5	19.3	19	18.8	18.5	18.3	18.0	17.8	20.85	
Fev.	13.5	17.2	17	16.7	16.4	16.1	15.8	15.5	15.2	14.9	14.6	14.3	13.9	13.6	13.3	12.9	12.6	12.3	11.9	11.6	11.2	10.9	10.5	10.15	9.8	9.4	9.0	8.7				13.32	
Mars	8.3	7.9	7.5	7.1	6.8	6.4	6.0	5.6	5.2	4.8	4.4	4.0	3.6	3.2	2.8	2.4	2.0	1.6	1.2	0.8	0.4	0	0.4	0.81	1.21	1.61	2.02	2.42	2.82	3.22	3.62	2.39	
Avril	4.02	4.41	4.81	5.20	5.60	5.99	6.38	6.76	7.15	7.53	7.91	8.29	8.67	9.04	9.41	9.78	10.15	10.51	10.87	11.23	11.58	11.93	12.27	12.62	12.95	13.29	13.62	13.95	14.27	14.59		9.49	
Mai	14.90	15.28	15.51	15.81	16.11	16.40	16.69	16.97	17.24	17.52	17.78	18.04	18.30	18.55	18.79	19.03	19.26	19.49	19.71	19.93	20.14	20.34	20.54	20.73	20.92	21.10	21.27	21.44	21.60	21.75	21.9	18.8	
Juin	28.04	22.17	22.30	22.4	22.5	22.5	22.7	22.8	22.9	23	23.1	23.1	23.2	23.3	23.3	23.35	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4	23.3	23.3	23.2	23.2		23.08
Juil.	23.1	23.0	23	22.9	22.8	22.7	22.6	22.5	22.4	22.2	22.1	22	21.8	21.7	21.5	21.3	21.2	21.0	20.8	20.6	20.4	20.2	20	19.8	19.6	19.4	19.2	18.9	18.7	18.4	18.2	21.10	
Août	17.9	17.6	17.4	17.1	16.8	16.5	16.3	16	15.7	15.4	15.1	14.7	14.4	14.1	13.8	13.4	13.1	12.8	12.4	12.1	11.7	11.4	11.0	10.7	10.3	10	9.6	9.2	8.9	8.5	8.10	13.3	
Sept.	7.72	7.34	6.96	6.57	6.18	5.79	5.40	5.01	4.61	4.21	3.82	3.42	3.02	2.62	2.22	1.81	1.41	1.01	0.60	0.20	-0.20	-0.60	-1.01	-1.41	-1.81	-2.22	-2.62	-3.02	-3.42	-3.82		1.95	
Oct.	4.2	4.6	5.01	5.4	5.79	6.18	6.57	6.96	7.34	7.72	8.10	8.48	8.86	9.23	9.6	10	10.3	10.7	11	11.4	11.7	12.1	12.4	12.8	13.1	13.4	13.8	14.1	14.4	14.7	15.1	9.85	
Nov.	15.4	15.7	16	16.3	16.5	16.8	17.1	17.4	17.6	17.9	18.2	18.4	18.7	18.9	19.1	19.4	19.6	19.8	20	20.2	20.4	20.6	20.8	21	21.2	21.3	21.5	21.7	21.8	22		19.05	
Dec.	22.11	22.24	22.34	22.5	22.6	22.7	22.8	22.9	23	23	23.1	23.2	23.3	23.3	23.3	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4	23.3	23.3	23.3	23.3	23.3	23.1	23.1

durée d'insolation

1975 à 1979 (Dakar)

Annexe C2

MOIS Année	Janvier	Fevrier	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
1975	8.5	9.9	9.7	10.3	10.6	9	5.7	7.6	7	8.8	9.1	8.9
1976	7.8	8.8	9.1	9.6	10.1	9.6	8	8.3	7.1	8.9	8.1	7
1977	9.6	9.4	/	10.2	9.9	8.8	8.1	8.7	7.3	9.2	9.3	6.6
1978	8.3	9.6	9.4	10.3	10	8.7	7.4	8	8	8.7	7.7	7.5
1979	7.7	10.4	8.6	9.4	8.9	8.1	/	/	/	/	/	/
Moyenne	8.3	9.6	9.2	9.9	9.9	8.8	7.3	8.1	7.3	8.9	8.5	7.5

Annexe C-3

Rayonnement global Dakar
(cal/h cm^2) (1967 à 1969)

Heure Mois	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
Janvier	1.63	12.31	28.05	44.07	54.91	62.04	62.77	57.49	48.67	34.53	18.53	4.65	0
Fevrier	2.04	16.94	34.20	51.42	65.46	75.19	71.70	68.22	59.07	43.87	25.08	7.69	-22
Mars	5.80	24.15	45.97	65.10	79.20	87.84	88.89	82.16	69.83	51.63	30.04	9.75	-31
Avril	10.18	29.21	50.23	66.75	77.54	84.86	85.72	79.55	66.90	48.55	27.98	9.99	.50
Mai	12.42	30.23	49.55	64.50	76.04	81.52	81.23	75.86	61.29	46.79	28.26	10.40	1.46
Juin	11.16	27.84	44.74	60.29	72.03	76.69	77.35	71.64	69.35	44.11	28.28	12.09	2.15
Juillet	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
Août	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
Septembre	7.40	20.38	36.33	49.46	54.36	59.35	59.05	56.63	49.43	36.47	20.98	6.94	.54
Octobre	6.68	21.55	36.91	49.82	61.41	68.99	65.99	60.13	47.34	34.24	16.20	2.83	.08
Novembre	5.56	21.30	39.01	53.23	61.89	66.08	64.54	57.58	44.92	29.41	13.02	1.84	0
Decembre	3.25	15.71	34.72	47.51	57.82	63.85	62.49	55.94	44.92	29.29	13.42	2.13	0

Annexe C-4

rayonnement global

1975 à 1979 (cal/h cm²)

Mois \ Heures	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
Janvier	1.47	12.85	29.68	44.07	55.75	61.15	62.12	56.05	46.42	31.39	15.8	2.33	0
Février	3.36	20.28	40.45	56.53	68.33	75	74.38	69.25	57.66	41.14	22.25	4.54	0
Mars	4.96	21.45	41.32	57.57	69.37	75.78	76.67	70.22	58.90	42.03	23.12	5.86	0
Avril	7.20	25.50	44.90	61.90	73.25	79.64	80.09	74.40	63.24	46.85	27.33	8.60	-22
Mai	8.74	26.31	45.18	60.31	71.56	77.25	77.25	70.82	59.95	44.72	26.43	9.79	-50
Juin	7.66	22.59	40.35	54.83	65.23	70.08	70.20	62.58	52.61	40.17	24.18	9.61	-78
Juillet	6.85	20.36	35.35	47.79	54.20	58.02	59.77	55.17	45.80	34.87	18.21	8.44	-76
Août	6.45	20.56	35.37	47.07	56.23	62.16	62.90	58.92	48.79	36.03	20.60	7.40	-44
Septembre	4.7	18.31	33.88	47.51	55.02	58.92	58.62	55.47	48.05	34.16	20.74	6.09	-12
Octobre	3.32	18.57	36.05	51.87	62.66	67.81	68.89	63.51	52.35	36.94	19.78	4.16	-62
Novembre	1.97	15.35	32.48	47.51	58.42	63.57	63.08	58.54	48.33	33.32	15.78	2.57	0
Décembre	1.17	11.23	26.47	41.14	51.54	57.51	56.92	51.67	41.90	28.32	13.77	1.97	0

references

1. Soleil du 21-9-81 : "Programme d'action de Nairobi"
page 15. Abdoulaye Ndiaga Sylla.
2. Les installations Sanitaires Tome 3 dimensionnement des
installations d'eau chaude . R. DELEBECQUE - Eyrolles
1974
3. Guide Pratique de l'isolation thermique des bâtiments
CONITE FRANCAIS de l'isolation - Eyrolles
4. Solar energy Thermal process
John A. Duffie & William A. Beckman
John Wiley . 1974
5. Basic Heat transfer
Frank Kreith & William Z. Black
Harper & Row . publishers N.Y. 1980
6. Etude réalisée avec l'aide du Ministère Français de
l'Industrie , du Commerce et de l'artisanat.
Editions Européennes "thermique et Industrie" - Paris 1978
7. Cours de dessin Industriel Tome 3 . 6^e édition
R. Marcheret Dunod 1973
8. Notes de Cours "transfert de Chaleur" Ecole Polytechnique
de Elgiz . 1980. 1981 . Professeur Mr. Carreau