

Ecole Polytechnique de Thies

PROJET DE FIN D'ÉTUDES

SYSTEME

CHAUFFE - EAU - CAPTEUR

SOLAIRE

Gm. 0385

Directeur de Projet: MR ANDRE WOLSKI

Auteur : MAMADOU KANOUTÉ

ANNEE : 1981 - 1982

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier :

- MR André Wolski ; mon directeur de projet pour toute sa disponibilité et ses conseils
- MRS Vigneault, Houmaire et Tremblay pour leur concours
- MRS Petiteau et R. Martin professeurs à l'EPT
- MR Kfoury , professeur de Vent 5.11
- Les membres des CERER diplômés de l'EPT qui sont : Lamine Diop, Bocar Sy, Ibrahima Diop.
- Ainsi que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation de responsable de demain.

# SOMMAIRE

Le point de départ est le projet de fin d'études "Système Solaire, économie" de MR Abdou Aziz Saydi. L'auteur de ce travail a construit un capteur solaire et effectué certaines mesures nécessaires.

Le projet consistait à mettre en marche le système entier, comprenant capteur et chauffe-eau ensemble.

Le but de ce système est l'économie de l'énergie et donc il fallait le prouver par des mesures appropriées.

La conception du capteur comprend 4 étapes :

- ) Définition des objectifs : le premier pas consiste en l'établissement des besoins, on essaie de connaître la quantité d'eau chaude nécessaire et sa température en fonction de l'heure et du jour et de la saison. Normalement les objectifs sont définis comme la satisfaction des besoins au coût minimal.
- ) Variantes de conception : la conception doit se faire à partir de plusieurs solutions
- ) Variables de conception : Une variable de conception est un type de paramètre qui peut varier au choix du concepteur par exemple, l'espacement  $W$  entre les tubes du capteur.
- ) Optimisation : L'optimisation consiste à faire varier les paramètres de conception pour aboutir à un rapport coût-avantage minimal.

# Table Des Matieres

	Pages
Introduction I	1
Chapitre I Dimensionnement Du ballon de stockage	4
1 Le Problème	4
2 Débits-Quantités	5
2-1 Débit	5
2-1-2 Débit calorifique	6
2-1-1 Débit par poste	5
2-2 Quantités	6
3 Températures	7
3-1 Utilisation pour la toilette	7
3-2 Utilisation pour la vaisselle et le ménage effectués manuellement	8
3-3 Utilisation pour la vaisselle ou le lavage effectué à la machine	8
3-4 Utilisation industrielle	8
4 Quantités nécessaires	9
4-1-1 Méthode des bilans thermiques	9
4-1-2 Etude des besoins au Sénégal	10
4-1-2-1 Nature de l'utilisation	11
4-1-2-2 Genre de vie des utilisateurs	11
4-1-2-3 Equipement Sanitaire	11
4-1-2-4 Equipement thermique	12
4-1-2-5 Influence de la saison	12
4-1-2-6 Influence du jour de la semaine	12
4-1-2-7 Influence du moment de la journée	13
4-1-2-8 Influence de l'année	14
4-1-3 Les besoins dans les habitations	14
4-1-3-1 Définition de l'utilisation	14
4-1-3-2 Les besoins en fonction des habitants	15

4-1-3-3 Les besoins en fonction des logements et des équipements	16
5 Calcul des Quantités	17
5-1 Le caractère de l'installation	17
5-2 Le mode de production	17
5-3 Les types d'installation	18
5-4 Calcul des Quantités cas n°1	18
5-5 Cas n°s 3 et 4	18
6 Dimensionnement des appareils	21
6-1 Appareils à production instantanée	21
6-1-1 calcul des débits instantanés	21
6-1-2 Puissance des appareils «instantanés»	23
6-2 Appareils à accumulation	23
7 Choix des matériaux	25
Chapitre II Dimensionnement du capteur solaire	28
1 Généralités	28
1-1 Utilisation de la chaleur	29
1-2 Classification des capteurs	29
2 Limitation des pertes de chaleur	30
2-1 Mécanisme des pertes	30
2-2 REVÊTEMENTS antireflexion	31
2-2-1 Le revêtement antireflexion	36
2-2-2 L'antireflexion par micro-attaque chimique	36
2-3 Contrôle de la réémission du rayonnement	36
2-4 Contrôle de la convection	45
2-5 Isolation thermique	47

3 Collecte de la chaleur	48
3-1 Echange de chaleur	48

### CHAPITRE III

Etude expérimentale d'un capteur modèle	56
1 But	56
2 Description technique	56
3 Matériaux	57
4 Expérience proprement dite	57
5 Schéma de montage	59
6 Manipulations	60
6-1 Influence du débit	60
6-2 Influence de l'inclinaison	63

### CHAPITRE IV

Installation du système	66
1 Les différents types	66
1-1 Type de circulation	66
1-2 Stockage et place de l'appoint	69
1-2-1 Ballon commun	69
1-2-2 Ballons séparés	69
2 Etude expérimentale du système	73

### CHAPITRE V

Analyse économique	80
1 OPTIMISATION	80

2 Coûts d'investissement	83
3 Surcoût solaire	84
CHAPITRE VI Conclusions	86
Annexes	90
Annexe A <sub>1</sub> Energie Globale Maximum reçue par jour suivant le mois et l'inclinaison du capteur plan	91
Annexe A <sub>2</sub> Rendements d'un capteur solaire	92
Annexe A <sub>3</sub> Exemple de Production d'eau chaude sanitaire avec circulation forcée et régulation	93
Annexe A <sub>4</sub> Schéma d'une Greenhouse Soil heater	94
Annexes A <sub>5</sub> Données Statistiques sur le rayonnement Global pour le site CERER de 1975 à 1979 Valeurs horaires	95
References - Bibliographies	

# INTRODUCTION

Le projet donc entre dans le cadre de l'exploitation des énergies renouvelables particulièrement l'énergie solaire. Le soleil émet un rayonnement dont la longueur d'onde est comprise entre 0,3 et 3  $\mu\text{m}$ . Ce rayonnement peut être capté et converti en chaleur et en électricité. Ici il s'agit de la production d'eau chaude sanitaire à partir de l'énergie solaire.

Pour les usages domestiques, l'eau chaude est utilisée principalement pour se laver, laver les vêtements, le linge, la vaisselle et ustensiles de cuisine et cuire les aliments.

L'usage raisonnable de l'eau chaude sanitaire contribue directement au bien-être des personnes et au développement de la communauté en général parce qu'elle améliore l'hygiène, les conditions de travail.

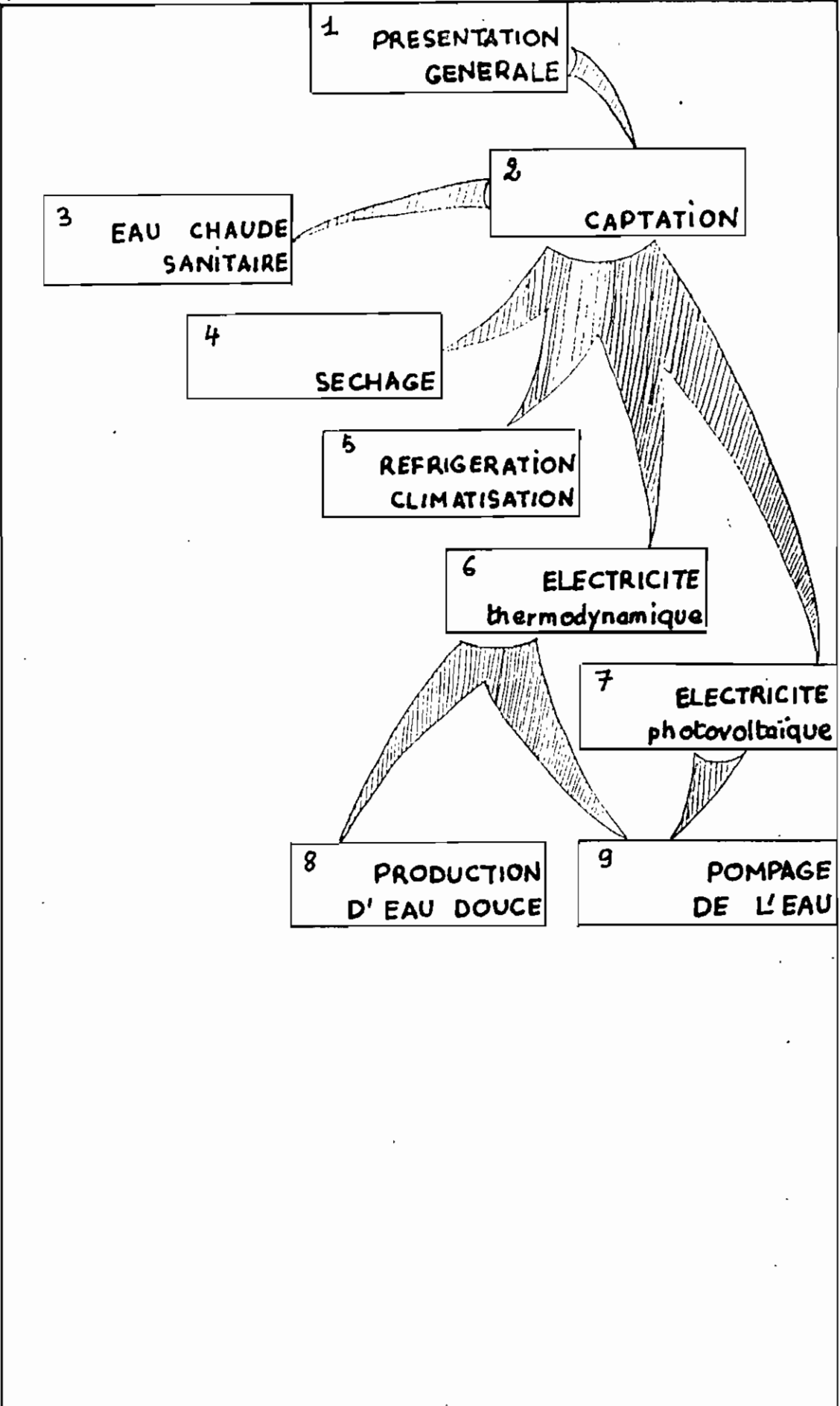
La production de l'eau chaude sanitaire par utilisation directe de l'énergie solaire est particulièrement justifiée pour des raisons techniques et économiques.

— les besoins d'eau chaude domestique sont relativement faibles et dispersés. Pour chaque personne, chaque famille ou maison, la consommation est sensiblement la même.



La température nécessaire est modérée.

- l'énergie solaire exploitable est, elle aussi dispersée, disponible partout et d'une puissance suffisante quoique peu concentrée.
- l'énergie solaire est aisément convertible en chaleur si l'on se contente de températures modérées.
- l'énergie solaire est inépuisable.
- son utilisation contribue directement à améliorer le bilan énergétique du pays.



# CHAPITRE I

## DIMENSIONNEMENT DU BALLON DE STOCKAGE

### 1 LE PROBLEME

Nous nous proposons dans ce chapitre d'utiliser certaines techniques de dimensionnement des installations d'eau chaude sanitaire. Les installations peuvent se diviser en deux parties :

a) L'ensemble des appareils et organes qui transforment l'eau froide en eau chaude ( dans notre cas il s'agit du ballon de stockage qui sert à emmagasiner en même temps l'énergie électrique et l'énergie solaire ).

b) L'ensemble des tuyauteries qui distribuent cette eau chaude sanitaire aux divers postes d'utilisation .

On remarquera qu'une installation de distribution d'eau chaude sanitaire doit répondre aux conditions suivantes. Le réseau doit permettre une alimentation normale des divers appareils :

- Sans pollution de l'eau
- sans interruption
- à une température convenable
- à une pression aussi constante que possible .

## 2 DEBITS - QUANTITES

Avant d'aborder l'étude quantitative de ces notions, nous allons bien définir la signification que nous leur donnons et étudier ce qui les différencie.

### 2-1 DEBIT $q$ (l/s)

Il s'agit d'une quantité d'eau chaude écoulée par unité de temps. Dans tous nos calculs, les débits sont supposés invariables dans le temps et correspondent aux besoins normaux de l'utilisateur. Pour dimensionner donc un réseau de distribution il nous faut calculer le débit de chaque tronçon de ce réseau.

Pour ce faire il nous faut connaître :

- 1) le débit nécessaire à chaque poste
- 2) la technique de calcul du débit de chaque tronçon

#### 2-1-1 Débits par poste (débits de base)

Evier	0,2 l/s
Lavabo - Bidet	0,1 l/s
Douche	0,15 l/s
Baignoire	0,25 l/s
Bac à laver domestique	0,2 l/s
Bac à laver - douche	0,2 l/s

## 2-1-2 Débit calorifique

Il est bien évident que lorsqu'il s'agit d'eau chaude, le débit a deux sens:

a) celui correspondant à l'hydraulique qui servira au calcul des tuyauteries.

b) celui correspondant à la thermique et qui s'exprime par l'équation suivante:

$$P = q \rho c \Delta T$$

$$\text{kcal/s} = \frac{\text{dm}^3}{\text{s}} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \cdot \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot ^\circ\text{C}$$

$P$  = débit calorifique kcal/s

$q$  = débit hydraulique  $\text{dm}^3/\text{s}$  ou  $\text{l/s}$

$\rho$  = masse volumique du fluide  $\text{kg}/\text{dm}^3$

$c_p$  = chaleur massique du fluide  $\text{kcal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$

$\Delta T$  = élévation de température  $^\circ\text{C}$

## 2-2 QUANTITES

Il s'agit ici de volumes d'eau à une température donnée, c'est-à-dire de quantités de chaleur.

$$Q = V \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T$$

$Q$  = quantité de chaleur kcal

$V$  = volume de liquide en  $\text{dm}^3$

$$\text{kcal} = \text{dm}^3 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \cdot \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot ^\circ\text{C}$$

Les quantités de chaleur n'ont pour les installations sanitaires qu'une signification limitée. En effet, l'utilisateur exige aux divers postes d'utilisation un débit et une température d'eau conformes à l'usage qu'il veut en faire. Les quantités ne l'intéressent donc pas si ce n'est lorsqu'elles lui permettent une utilisation de l'installation conforme à ses désirs.

### 3 TEMPERATURES

Elles dépendent de l'utilisation envisagée nous pouvons distinguer

- 1° Utilisation pour la toilette
- 2° Utilisation pour la vaisselle, le lavage et le ménage effectués manuellement.
- 3° Utilisation pour la vaisselle ou le lavage effectué à la machine.
- 4° Utilisation industrielle.

#### 3-1 UTILISATION POUR LA TOILETTE

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. Des études récentes ont montré que pour ce faire la température moyenne de la peau doit rester proche de  $34^{\circ}\text{C}$ .  
Compte tenu de l'évaporation de l'eau sur la peau, du refroidissement

divement (du refroidissement) au contact de l'air (douche) ou des appareils (lavabo, baignoire etc --), nous adoptons pour ces utilisations une température de  $40^{\circ}\text{C}$

### 3.2 UTILISATION POUR LA VAISSELLE ET LE MENAGE EFFECTUES MANUELLEMENT.

Il faut ici obtenir la dissolution des corps gras qui commencent à  $55^{\circ}\text{C}$  et permettre à l'utilisateur de supporter la température de l'eau; nous adopterons  $60^{\circ}\text{C}$

### 3.3 UTILISATION POUR LA VAISSELLE OU LE LAVAGE EFFECTUE A LA MACHINE

Dans le cas de lavage, le brossage ou frottage aux endroits sales n'est plus dirigé par l'œil de l'opérateur. Dans le cas des machines à laver la vaisselle, le frottage est supprimé et remplacé par les jets d'eau. Les actions intelligentes ou mécaniques supprimées sont alors compensées par une température d'eau plus élevée; nous adopterons  $80$  à  $85^{\circ}\text{C}$

### 3.4 UTILISATION INDUSTRIELLE

Les températures de l'eau correspondant à ces cas sont très variables et doivent être indiquées par l'utilisation.

## 4 QUANTITES NECESSAIRES

Il s'agit de valeurs établies pour une utilisation bien déterminée, par porte ou ensemble de portes et pour une durée précise. En effet si nous disons qu'une personne a besoin de  $V$  litres d'eau à  $t$  degrés pour utiliser journalièrement un lavabo, nous ne savons ni le régime, ni le temps de passage correspondant à cette utilisation. De plus il s'agit ici de précisions raisonnables qui tantôt ne seront pas atteintes, tantôt seront dépassées.

Nous verrons que les notions quantitatives concernant les installations nous permettent de même manière :

- d'évaluer les puissances des appareils
- de déterminer la surface de captage.
- de fixer les réserves à prévoir, etc...

Deux données sont nécessaires à ces évaluations :

- a) le volume
- b) la température

Or nous pouvons avoir dans une même installation des températures d'utilisation différentes.

Nous ne pouvons pas additionner les volumes, puisque thermiquement ils ne sont pas identiques.

Nous ne pouvons d'avantage additionner les températures (ce qui ne signifie rien)

Il nous faut donc recourir à la méthode des bilans thermiques pour évaluer les quantités nécessaires.

### 4.1.1 METHODE DES BILANS THERMIQUES

Exemple de calcul



Quel est le besoin journalier d'une installation équipée comme suit :

	Besoin (l/j)	Température (°C)
1 Lavabo	10	35
1 Bidet	6	40
1 Douche	25	42
1 Evier	30	65

Par rapport à la température de l'eau froide supposée à 20°C nous pouvons écrire :

$$1 \text{ lavabo} : 0,992 \times 10(35 - 20) = 148,8$$

$$1 \text{ bidet} : 0,992 \times 6(40 - 20) = 119,04$$

$$1 \text{ Douche} : 0,992 \times 25(42 - 20) = 545,6$$

$$1 \text{ évier} : 0,992 \times 30(65 - 20) = \underline{1339,2}$$

$$\rho_{\text{moy}} = 0,992 \text{ kg/dm}^3$$

$$2152,64 \text{ kcal/j}$$

Il est bien évident que ce résultat n'est pas à lui seul suffisant pour étudier le problème.

En effet il conviendra de savoir :

1° A quelle température l'eau sera fournie

2° Dans quel temps cette quantité de chaleur sera produite

3° De quelle manière l'eau sera échauffée.

#### 4-1-8 Etude des besoins au SENEGAL

Il faut tenir compte des influences sur les consommations

Celles-ci varient en effet en fonction :

- de la nature de l'utilisation
- du niveau de vie des utilisateurs (pays, région, milieu et niveau de vie)
- de l'équipement sanitaire et thermique.

- de la saison
- du jour de la semaine
- du moment de la journée
- de l'année.

#### 4-1-2-1 Nature de l'utilisation

Elle correspond à la nature du bâtiment, habitations, hôtels, bureaux, hôpitaux, etc... Afin de ne pas nous disperser nous allons étudier les besoins des habitations, qui représentent la part essentielle des constructions.

#### 4-1-2-2 Genre de vie des utilisateurs

L'utilisation de l'eau chaude sanitaire dépend du pays et de ses coutumes, des régions pour les mêmes raisons, du climat, enfin du niveau de vie. Nous étudierons le problème pour un niveau de vie moyen.

#### 4-1-2-3 Equipement Sanitaire.

Le nombre et la nature des appareils ont une grande importance.

- Le nombre d'appareils : Quand il augmente, la consommation totale tend à augmenter et de plus le débit s'accroît aux périodes de pointe, car il y a possibilité accrue d'utilisation simultanée des divers appareils.

- La nature des équipements. Il faut ici considérer deux éléments,

1° la nature des appareils sanitaires :

exemple : Pour une toilette générale une douche consommera 25 à 30 litres à 35°C, alors qu'un bain exigera 120 à 150 litres à 40°C

2° Le type de générateur d'eau chaude : Celui-ci peut en effet limiter la consommation en cause, soit de sa puissance ins-

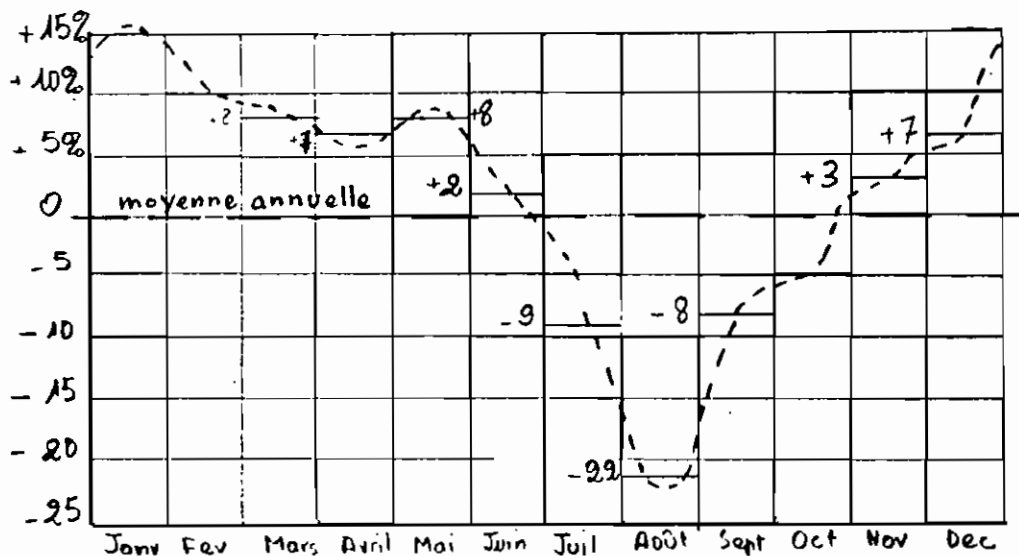
tantanée, soit de la réserve disponible (dans notre cas il s'agit du capteur solaire avec appoint électrique).

#### 4-1-2-4 Equipement thermique

Il s'agit ici du chauffage des locaux sanitaires, or plus celui-ci est satisfaisant, plus l'utilisation de l'eau chaude pour la toilette augmente (avec une limite évidemment)

#### 4-1-2-5 Influence de la saison

On peut imaginer que la variation des consommations suit une courbe. Les affaissements en Avril et Juillet-août-Septembre correspondent aux périodes des vacances. De toutes manières il faut considérer les valeurs maximales (ici les valeurs en Janvier)

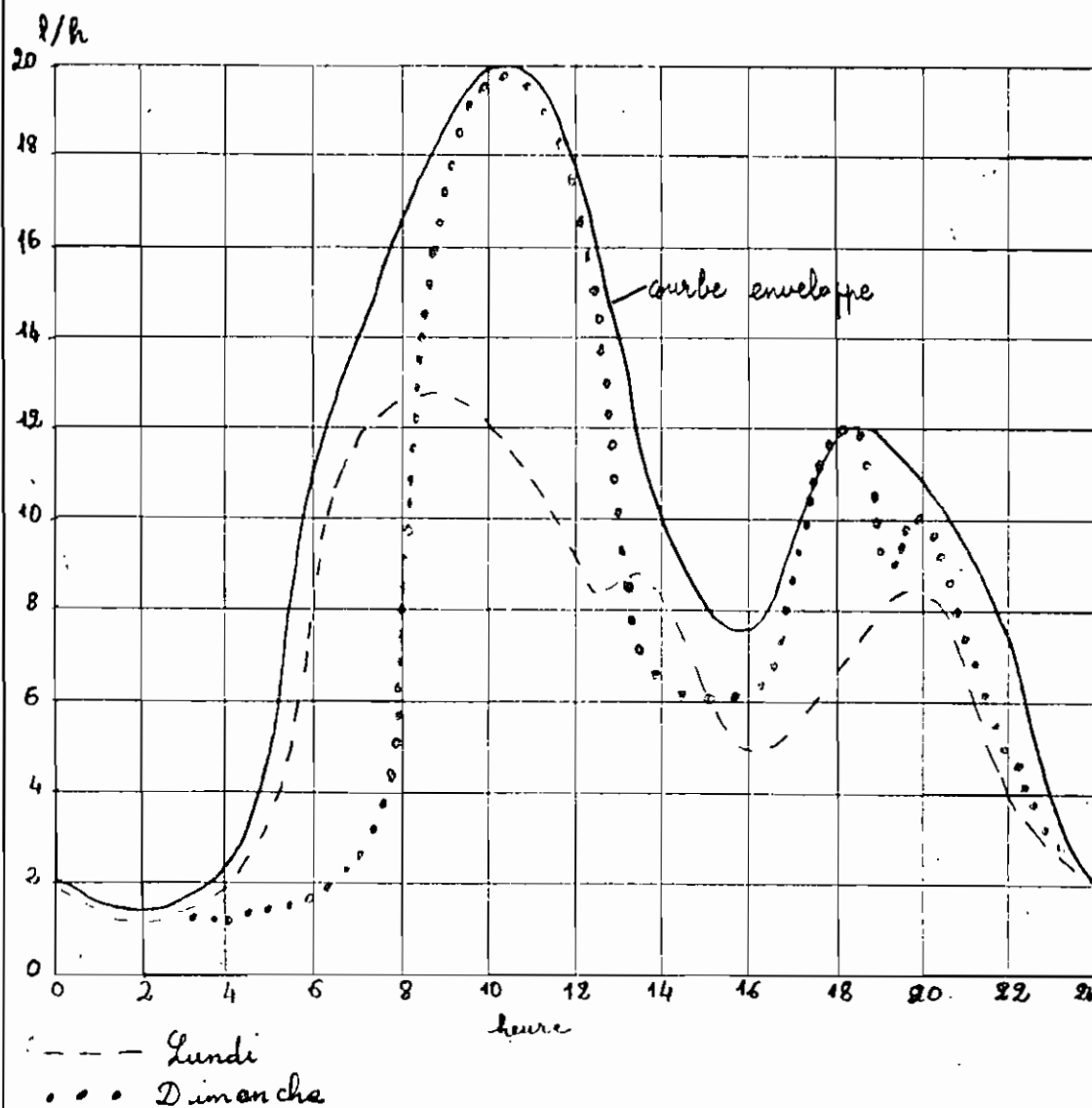


On notera moi que la consommation de pointe peut être obtenue à partir de la moyenne annuelle multipliée par 1,15 (valeur approximative)

#### 4-1-2-6 Influence du jour de la semaine

Dans ce cas aussi on peut dresser un graphique qui pour-

ce nous montrer les variations existant entre les divers jours de la semaine. A chaque jour correspond un graphique et les valeurs à prendre en considération sont celles correspondant à la courbe enveloppe. Les débits maximaux correspondent au Dimanche, les puisages matinaux aux Lundi et Vendredi, les puisages nocturnes au Samedi.

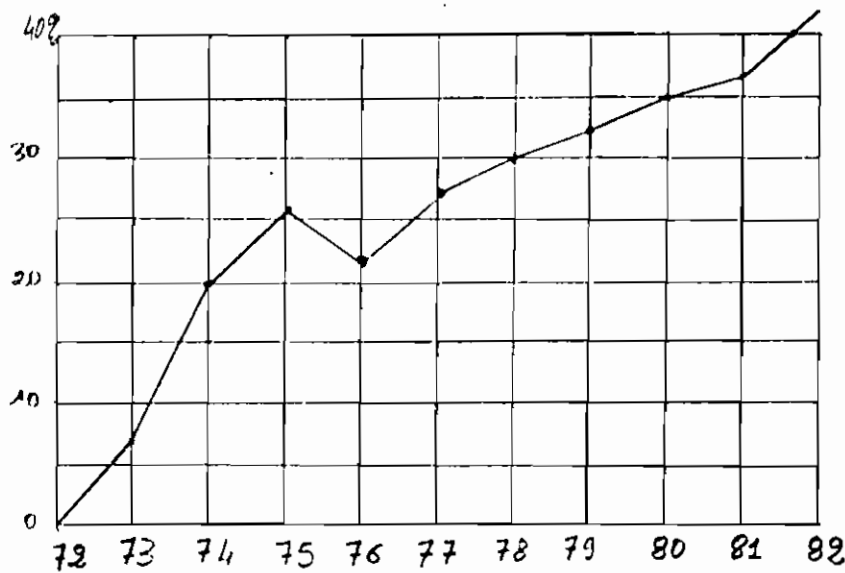


4-1-27 Influence du moment de la journée

Le graphique ci-dessus nous montre les variations nécessaires du débit et par conséquent des quantités en fonction de l'heure de la journée

#### 4-1-2-8 Influence de l'année

L'année en elle-même n'a pas d'influence sur les quantités d'eau sanitaire utilisée, sauf en cas de guerre (que Dieu nous en garde !). Ce qui est important, c'est la date, car il peut être intéressant de prévoir ce qui seront les quantités dans les années à venir, ne serait-ce que pour permettre les extensions futures.



Il est logique d'admettre que cette progression tendra dans l'avenir vers une limite, mais elle augmente encore actuellement. On peut l'approximer à 10% pour la décade 1980-1990.

#### 4-1-3 Les besoins dans les habitations

Nous comprenons que les valeurs données ci-après correspondent :

- d'une part à une utilisation et un confort bien définis,
- d'autre part, pour toutes les autres variables, aux valeurs maximales raisonnables qui peuvent se produire.

##### 4-1-3-1 Définition de l'utilisation.

Nous n'aborderons ici que le problème courant du logement et ceci pour trois niveaux de confort ; (minimal, normal, maximal)

#### 4-1-3-2 Les besoins en fonction des habitants.

Les consommations journalières peuvent être approximées à :

Confort minimal 35 litres/jour par personne

Confort normal 55 litres/jour par personne

Confort maximal 80 litres/jour par personne.

Mais nous ne connaissons pas toujours le mode d'occupation des locaux lors de la construction. La valeur moyenne pour une occupation normale des habitations se situe aux environs de 2 personnes par pièce. Cela n'est pas toujours vrai et il existe encore des locaux où la densité d'occupation est bien supérieure.

#### 4-1-3-3 Les besoins en fonction des logements et des équipements

Si nous voulons cerner le problème de plus près nous ne pouvons plus admettre le taux d'occupation de 2 personnes par pièce habitable. En effet le taux d'occupation d'une pièce varie et on peut admettre une occupation comme suit :

chambre des parents = 2 personnes + 1 enfant

chambre des garçons = 2 à 3 personnes

chambre des filles = 2 à 3 personnes.

Tenant compte de ces occupations possibles nous avons admis les valeurs suivantes :

Nombre de pièces principales	1	2	3	4	5
Nombre d'occupants	2 à 3	3 à 4	4 à 5	5 à 7	5 à 9

Ainsi nous pouvons dresser un tableau des besoins en fonction de ces critères.

**EAU CHAUDE**  
**QUANTITES NECESSAIRES**  
 En litres par jour - Temperature de Base 50°C

Nombre de pièces principales		1	2	3	4	5	
Nombre d'occupants		2 à 3	3 à 4	4 à 5	5 à 7	5 à 9	
HABITATIONS	Appareils	évier	20	30	40	50	60
		Lavabo	8	12	16	20	24
		Douche	20	20	40	40	60
		Bidet	5	5	5	10	10
		Baignoire (L=15)	70	70	70	140	140
		Baignoire (L=15)	110	110	110	240	240
		Bac à Laver	16	24	40	50	65
		Machine à Laver	50	50	70	90	120
	groupes d'appareils	Evier, Lavabo Douche Bac à Laver	64	86	136	160	209
		Evier, Lavabo Bidet, Baignoi- re, Machine à Laver	193	207	241	390	434
DIVERS	Hopitaux et Cliniques	Par lit et par jour			300 à 400 litres		
	Bureaux	Par personne par jour			8 litres		
	Hôtels	Par chambre et par jour			40 litres (sans baignoire) 200 litres (avec baignoire)		
	Ecoles et Casernes	Par pensionnaires et par jour			8 litres (sans douche) 25 litres (avec douche)		

## 5 CALCUL DES QUANTITES

### 5-1 LE CARACTERE DE L'INSTALLATION

Nous distinguerons les installations utilisées par une seule famille et possédant son propre capteur (ou générateur), des installations utilisées par plusieurs familles ou par des collectivités. En effet dans les premières il ne peut y avoir de compensation dans les utilisations alors que dans les secondes ce phénomène intervient.

Exemple dans un bâtiment de  $n$  logements si l'un d'entre eux prend plusieurs fois dans un temps donné, il peut y avoir compensation parce que d'autres logements n'utilisent pas la baignoire dans ce même temps.

D'autre part, d'une manière générale, nous pouvons discuter avec le propriétaire d'un pavillon afin de déterminer l'utilisation qu'il veut faire de son installation, ce qui n'est pas le cas pour les immeubles d'habitation.

### 5-2 LE MODE DE PRODUCTION

Nous distinguerons :

1° Les appareils à productions instantanée :

les chauffe-eau

les chauffe-bain

les chaudières mixtes à production instantanée

2° Les appareils à accumulation

a) à chauffe continue :

les chaudières

b) à chauffe de nuit :

les accumulateurs électriques

c) à chauffe de jour :

les accumulateurs à échangeurs solaires.



## 5-3 LES TYPES D'INSTALLATION

Mode de caractère Production de la construc- tion	Appareils à Production instantanée	Appareils à accumulation		
		à chauffe continue	à chauffe de nuit	à chauffe de jour
Pavillons et appart. à équip. autonome	①	②	③	④
Logements à équip. centralisé, collectivités		⑤		

Les cinq types d'installation possibles qui sont représentés dans le graphique ci-dessus permettent de distinguer trois techniques de calcul. Mais nous nous limitons aux techniques correspondant aux cas n°1, n°3 et n°4.

## 5-4 CALCUL DES QUANTITÉS CAS N°1

Pour ce genre d'installation le calcul des quantités est généralement inutile. Dans notre cas le volume de stockage est 273 l et sert à alimenter la phase de chauffe en eau chaude. Donc l'appareil est déjà choisi.

## 5-5 CAS NOS 3 et 4

Exemple de calcul

Immeuble de confort minimal

Composition

- 6 logements de 1 pièce.
- 8 logements de 2 pièces
- 8 logements de 3 pièces
- 12 logements de 4 pièces
- 6 logements de 5 pièces

Equipements : 1 évier, 1 lavabo, 1 douche, 1 bidet, 1 bac à laver. Logements de 5 pièces identiques mais 2 lavabos.

Nous pouvons calculer de deux manières:

- En fonction du nombre d'habitants puisque nous connaissons la composition des logements.

- Ou en fonction des équipements.

a) Calcul d'après le nombre d'occupants. (2 par pièce)

$$6 \times 1 = 6$$

$$8 \times 2 = 16$$

$$8 \times 2 = 16$$

$$12 \times 4 = 48$$

$$6 \times 5 = \underline{30}$$

$$116 \times 2 = 232 \text{ occupants}$$

$$\times \underline{35}$$

$$8120 \text{ l/j}$$

b) Calcul d'après les équipements

	1 pièce	2 pièces	3 pièces	4 pièces	5 pièces
Evier	20	30	40	50	60
Lavabos	8	12	16	20	24
Douche	20	20	40	40	60
Bidet	5	5	5	10	10
Bac	16	24	40	50	65
Par logement	69	91	141	170	219
Nombre de logements	6	8	8	12	6
Quantités par groupe	414	728	1128	2040	1314
TOTAL			5624	2124	

Nous constatons un écart d'environ 30,7% entre les deux résultats et il nous faut réfléchir avant d'adopter un chiffre.

Nous savons (de) que les occupants utiliseront environ 8120 l/j d'eau chaude si l'on fait confiance aux valeurs connues.

Afin d'établir les comparaisons souhaitables, nous reprendrons le thème de l'exemple mais avec un équipement comprenant une baignoire (3 pieds = 1,52 m.) en remplacement du bac à laver

	1 pièce	2 pièces	3 pièces	4 pièces	5 pièces
Evier	20	30	40	50	60
Lavabo	8	12	16	20	24
Baignoire	110	110	110	240	240
Bidet	5	5	5	10	10
Bac	16	24	40	50	65
Par logement	159	181	211	370	399
Nbre de logements	6	8	8	12	6
Qté par groupe	954	1448	1688	4440	2394
Total	10924 l/j				

Nous avons, cette fois un écart de 2806 l/j soit 34,5% dans le sens opposé au précédent. Nous adopterons 9500 l/j qui est supérieur à 8120 l/j

Nous savons maintenant calculer

- 1° les débits hydrauliques
- 2° les débits calorifiques
- 3° les quantités

approximativement, car dans chacun de ces domaines, les valeurs qui servent de base aux calculs sont elles-mêmes approximatives. Il conviendra donc dans la plupart des cas de prévoir une majoration permettant de couvrir les cas extrêmes. Dans les cas contraires il est évident qu'en cas de pointe inhabituelle les usagers constateront une baisse de température

## 6 DIMENSIONNEMENT DES APPAREILS

### 6-1 APPAREILS A PRODUCTION INSTANTANÉE

Comme nous l'avons déjà dit, le système solaire comporte un appoint électrique. La solution retenue est celle qui consiste à stocker l'énergie solaire et l'énergie d'appoint dans le même ballon. Le dimensionnement porte sur les appareils les plus typiques qui sont :

- le chauffe-eau qui alimente un ou deux appareils
- le chauffe-bain qui dessert une salle d'eau ou de bain
- une chaudière mixte qui alimente un pavillon, un appartement etc...

On considérera toujours que la température de l'eau froide est  $20^{\circ}\text{C}$

#### 6-1-1 Calcul des débits instantanés

Deux solutions peuvent être envisagées

1° On utilise 1 seul appareil à la fois et le débit à considérer est évidemment celui de l'appareil le plus important.

2° On utilise 2 appareils simultanément et le débit à considérer est la somme des débits des deux appareils.

6-1-2 Cas correspondant à des installations comprenant plus de 2 appareils.

Cette fois cinq solutions peuvent être envisagées :

1° On utilise un seul appareil à la fois, cette hypothèse nous ramène au cas précédent.

2° On utilise 2 appareils simultanément → cas précédent

3° On peut utiliser plus de deux appareils simultanément. Le débit

sera calculé en étudiant les diverses combinaisons de fonctionnement possible.

4° On peut utiliser plus de 2 appareils simultanément. Le débit sera calculé en admettant que les probabilités d'utilisation correspondent aux normes établies.

5° On utilise tous les appareils simultanément. Le débit à considérer est évidemment égal à la somme des débits de tous les appareils.

Exemple de calcul

Calcul du débit probable d'un appartement équipé par

1 évier E

1 lavabo L

1 bidet B

1 douche D

On admettra qu'une seule personne utilise un seul appareil à la fois dans la salle d'eau. L'évier pouvant être utilisé à tout moment. Une grille d'agencement logique va nous fournir toutes les solutions possibles de fonctionnement.

0 signifie « ne débite pas »

1 signifie « est utilisé »

Nous allons maintenant procéder par l'élimination des cas impossibles

Les solutions possibles sont :

D (0,15 l/s)      L (0,1 l/s)

B (0,1 l/s)      EL (0,1 + 0,2 = 0,3 l/s)

E (0,2 l/s)      EB (0,2 + 0,1 = 0,3 l/s)

ED (0,2 + 0,15 = 0,35 l/s) qui correspond à la valeur maximale

		BD			
		00	01	10	11
EL	00		D	B	<del>BD</del>
	01	L	<del>LD</del>	<del>LB</del>	<del>LEB</del>
	10	E	ED	EB	<del>EBD</del>
	11	EL	<del>ELD</del>	<del>ELB</del>	<del>ELBD</del>

6-1-2 Puissance des appareils « instantanés »  
 Celle-ci sera exprimée en kilocalories par heure

$$P = q p c \Delta t$$

## 6-2 APPAREILS A ACCUMULATION

Dans ce cas les éléments connus sont :

- l'équipement sanitaire
- le caractère des installations et leur programme d'utilisation
- les températures d'utilisation
- la température maximale admissible

Les éléments inconnus sont :

- le volume d'eau chaude à stocker
- la puissance de l'échangeur.

Le dimensionnement des appareils doit précisément déterminer ces valeurs

Exemple de calcul

Le catalogue d'un fournisseur (fabricant) nous propose la gamme d'appareils ci-dessous.

N°	Puissance totale. (Kcal/h)	Puissance d'échan- ge du réservoir (W)	Contenance du réservoir (l)
1	19800	1200	100
2	25000	1500	100
3	30000	1800	125
4	34000	2400	200
5	35000	2500	125
6	36000	2600	200
7	40000	2700	125
8	50000	3000	200

## Données

Appartement occupé par 5 personnes  
 Consommation journalière 35 l à 60°C

## Températures

- eau froide 20°C
- Maximale 80°C
- minimale 40°C

## Majorations à prévoir :

- pour le fonctionnement de jour 10% des besoins
- pour le fonctionnement de nuit 3% de la puissance d'échange.

## 1° Choix

Consommation d'eau  $5 \times 35 = 175$  l/j

Quantité de chaleur nécessaire par jour :

- théorique  $0,992 \times 0,998 \times 175 \times (60 - 20) = 6930$  kcal/j
- réelle  $= 1,1 \times 6930 = 7623$  kcal/j

## Volume à prévoir

$$V = \frac{Q_v}{0,992(T_{\max} - T_{\min})} = \frac{7623}{0,992(80 - 40)} = 192,11 \text{ litres}$$

Soit un appareil de 200 litres.

## Puissance de l'échangeur

- théorique  $P = \frac{Q_v}{\delta} = \frac{7623}{8} = 952,875$  Kcal/h

$\delta =$  durée de chauffe (h)

- réelle  $P_r = P \times 1,03 = 981,5$  Kcal/h soit  $P_r = \frac{981,5}{0,86} = 1142,3$  W

2° Vérification : On peut choisir l'appareil N° 4

a) En fin de journée la température  $= \frac{(200 \times 80 \times 0,992) - 7623}{200} = 41,8$

b) La durée de refroidissement sera

Puissance utile  $= \frac{2400 \times 100}{103} = 2330$  W Durée  $= \frac{7623}{2330} = 3$  h 16

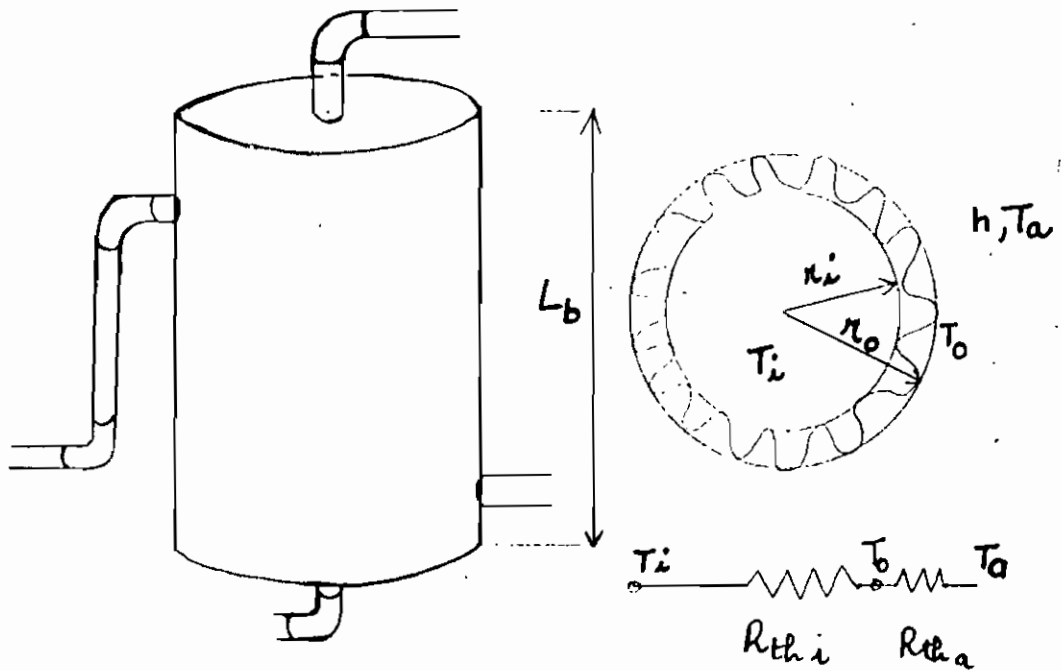
## 7 CHOIX DES MATERIAUX

Le ballon de stockage doit être bien calorifuge et répondre aux conditions énumérées au § 1. Pour ce, un choix judicieux des matériaux s'impose tout en tenant compte du facteur économique et de la disponibilité.

L'utilisation de l'acier galvanisé se justifie par sa résistance à la corrosion, sa faible conductivité thermique relativement ( $53,6 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ), sa capacité thermique est  $0,422 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$  sa dilatation linéaire est:  $14 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}$ ,

sa température de fusion =  $1450^\circ\text{C}$  avec une température maximale de service de  $370^\circ\text{C}$ .

Principe de transfert de chaleur



La résistance thermique  $R_{th,i} = \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi K L_b}$

$$R_{th,a} = \frac{1}{2\pi r_o L_b h}$$



La quantité de chaleur transmise à travers l'isolant est donnée par  $q = \frac{2\pi k L (T_i - T_o)}{\log(r_o/r_i)}$ . L'idéale est d'obtenir une très grande résistance c'est-à-dire une très faible valeur de  $k$  ou un grand rapport de  $r_o/r_i$

$$\text{posons } r_o = r_i + \Delta r \quad r_o/r_i = 1 + \frac{\Delta r}{r_i}$$

Nous cherchons d'autre part à maintenir  $T_o \simeq T_a$  pour négliger la convection naturelle de l'air. La température maximale d'utilisation est fixée à  $85^\circ\text{C}$

$$q = \frac{2\pi k L (85 - 25)}{\log(1 + \frac{\Delta r}{r_i})}$$

Dans ce cas la quantité de chaleur stockée dans le ballon de (300 l) est  $300 \times 0,9945 \times 4200 \times 85 = 106,5 \cdot 10^6 \text{ J}$

La durée de stockage 24 heures, la puissance de stockage est  $\frac{106,5 \cdot 10^6}{24 \times 3600} = 1232,64 \text{ W}$

Nous avons choisi du Polystyrène extrudé ( $k = 0,024 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C} = 0,028 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ) et un rayon interne de  $0,309 \text{ m}$

$$L = 1 \text{ m}$$

Si nous limitons les pertes à 10% c'est-à-dire  $123,264 \text{ W}$

$$\text{nous avons : } 123,264 = \frac{2\pi \times 0,028 \times 60 \times 1}{\ln(1 + \frac{\Delta r}{0,309})}$$

$$\Delta r = 2,76 \text{ cm} \quad r_o = 0,337 \text{ m.}$$

Le Polystyrène extrudé est fabriqué par extrusion d'une bande à partir du polystyrène en fusion. Les plaques peuvent être fournies dans toutes les épaisseurs usuelles de 20 à 200 mm.

## Propriétés Physiques du Polystyrène extrudé

Masse volumique :  $45 \text{ kg/m}^3$

Conductivité thermique :  $0,028 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Coefficient de dilatation :  $7 \cdot 10^{-6}$

Résistance à la compression :  $680 \text{ kPa}$

Résistance à la flexion :  $830 \text{ kPa}$

température limite d'utilisation :  $93^\circ\text{C}$

Indice conventionnel de perméabilité à la vapeur d'eau 23° et 85%

HR  $72 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}$

Absorption capillaire : nulle.

Chaleur massique :  $0,27 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$

Pouvoir calorifique :  $9000 \text{ kcal/kg}$ .

Réaction au feu : classement H.1

Absorption d'eau :  $0,02 \%$

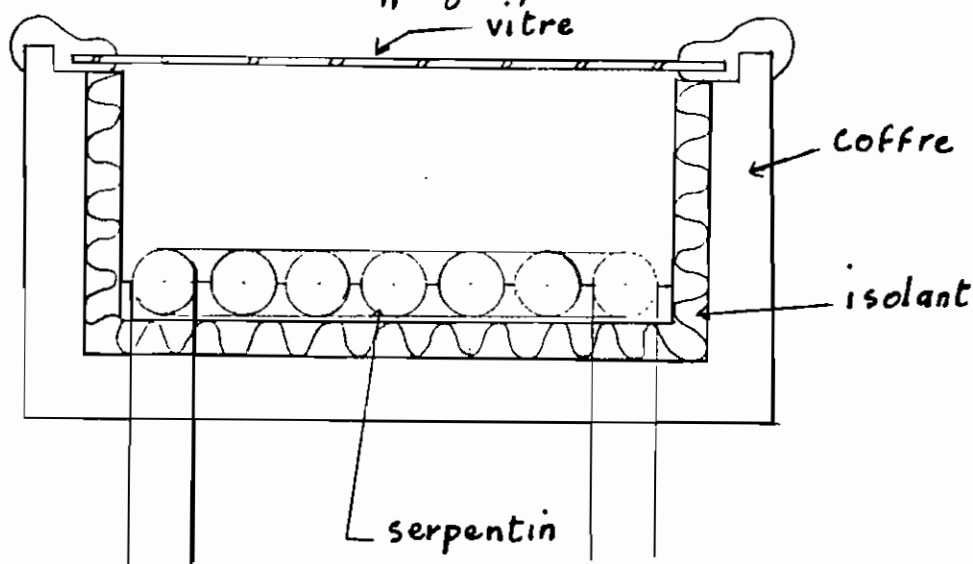
## CHAPITRE II

### DIMENSIONNEMENT DU CAPTEUR SOLAIRE

#### 1 GENERALITES

Les capteurs de chaleur solaire sont des appareils transformant l'énergie du rayonnement solaire en énergie thermique. On peut ensuite utiliser cette chaleur comme celle de toutes les sources usuelles de chaleur, c'est-à-dire pour chauffer les locaux ou les logements, fournir l'eau chaude sanitaire, activer la croissance des végétaux, sécher les grains et les fourrages, faire fonctionner des moteurs thermiques produisant de l'énergie mécanique ou de l'électricité, pour alimenter des machines de réfrigération destinées au conditionnement de l'air ou à conserver des aliments.

Ces capteurs sont d'un principe très simple et se composent en général d'un absorbeur sous lequel circule le fluide caloporteur, d'une isolation, d'une couverture transparente (vitrage) et d'un coffrage qui maintient le tout.



1-1 La chaleur produite par un capteur solaire peut être utilisée de façon conventionnelle. Il existe cependant plusieurs facteurs qui rendent difficiles les applications de la chaleur solaire. C'est d'abord la nature intermittente du rayonnement solaire qui est la principale raison. Non seulement le soleil disparaît la nuit et la longueur du jour varie avec la saison, mais il reste l'effet imprévisible des conditions météorologiques locales sur la disponibilité de l'énergie solaire. Il faut insister sur le fait que la demande énergétique pour l'eau chaude sanitaire est répartie sur toute l'année. Malheureusement, il existe des périodes où le soleil est caché par des nuages, brouillards etc... Si ces périodes se prolongent, la fourniture d'eau chaude peut ne plus être assurée. Dans la mesure où cette eau chaude est indispensable (hôpitaux, crèches, douches...) il faudra qu'un autre système de chauffage prenne le relais. C'est ce que l'on appelle le système d'appoint.

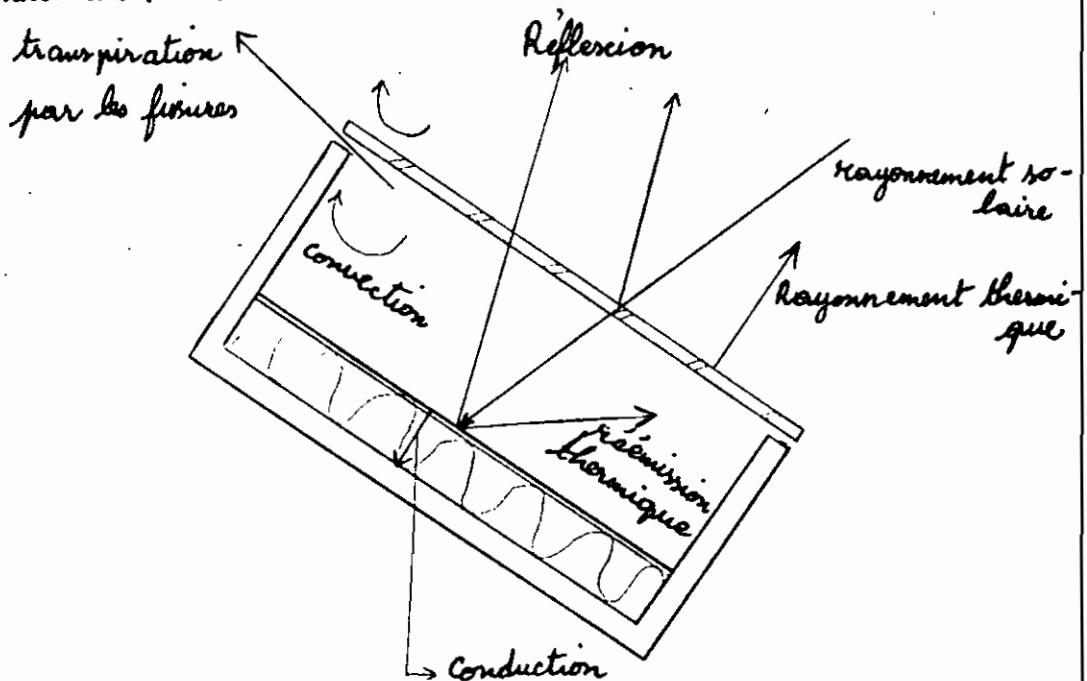
## 1-2 CLASSIFICATION DES CAPTEURS

On peut classer les capteurs solaires d'après le fluide de travail utilisé. L'air constitue une classe de ces fluides et l'eau une autre. Naturellement, il en existe d'autres. (ex: Hydrocarbures, hydrocarbures halogénés). Si l'on classe les fluides de transfert de chaleur par niveau de performance technique, on trouve en tête les fluides possédant une conductivité thermique élevée, une faible viscosité et un produit chaleur massique - masse volumique élevés. D'après ce classement, l'air est le moins efficace, l'eau est moyenne et les métaux liquides les mieux placés.

## 2 LIMITATION DES PERTES DE CHALEUR

### 2.1. MECANISME DES PERTES

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



Les réflexions se produisent sur le vitrage, et sur l'absorbeur. S'il ne se produisait pas de réflexion, le capteur paraîtrait parfaitement noir pour un observateur placé dans la direction du rayonnement solaire incident. Le verre ordinaire réfléchit de 7 à 8% du rayonnement incident.

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

La convection est le transfert de chaleur occasionné par un fluide en mouvement, ici l'air de l'atmosphère. Le couvercle de verre ralentit le mouvement de l'air au-dessus de l'absorbeur et réduit ainsi les pertes par convection. Cependant, dans l'espace compris entre l'absorbeur et le vitrage, l'air chaud tend à s'élever alors que l'air plus froid descend, créant un courant de convection naturelle. Si cet espace n'est pas hermétiquement fermé, des fuites d'air peuvent se produire. Ces fuites sont appelées transpiration et sont dues à un phénomène analogue à l'effet de cheminée. Une certaine convection naturelle se produit aussi au-dessus du vitrage, et si le vent souffle la convection devient forcée et refroidit sensiblement le vitrage ce qui accroît sensiblement les pertes de chaleur du système.

La conduction est le transfert de chaleur à l'intérieur d'un matériau soumis à un gradient de température, elle est produite par les mouvements des molécules, des atomes ou des électrons. Pour réduire les pertes par conduction, on utilise un matériau très faiblement conducteur de chaleur.

## 2-2 REVETEMENTS ANTIREFLEXION

Le pouvoir réflecteur  $r$  d'une surface de séparation plane lisse entre l'air ou le vide et un matériau est, pour l'incidence normale

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

où  $n$  est l'indice de réfraction et  $k$  est l'indice d'absorption. Cette équation montre que plus  $k$  est faible et plus  $n$  est proche de 1, et par suite plus faible est la réflexion. L'idéal serait d'utiliser comme vitrage un matériau présentant les caractéristiques suivantes  $k \approx 0$   $n \approx 1$  mais un tel matériau

n'existe pas. Le verre ordinaire, très répandu et bon marché est caractérisé par  $n \approx 1,5$ . On l'utilise tel quel, en acceptant des pertes par réflexion. La valeur de  $r$  est alors 0,04. Le verre utilisé pour les vitrages a une épaisseur  $\delta$  de quelques mm alors que la longueur d'onde  $\lambda$  du rayonnement solaire varie environ de 0,3 à  $3 \mu\text{m}$ . Le verre est donc de 1000 à 10000 fois plus épais que la longueur d'onde. Les effets d'interférence s'éliminent par les variations légères d'épaisseur du verre et en prenant la moyenne des longueurs d'ondes solaires de sorte que la réflectance et la transmittance du vitrage s'expriment respectivement par :

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

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

où  $t$  représente la transmittance dans le verre.

$$t = e^{-4\pi k \delta / \lambda} \approx 1 - 4\pi k \delta / \lambda$$

Ce que l'on veut obtenir, c'est d'abord une faible valeur du pouvoir réflecteur total du panneau  $\rho$  donc du pouvoir réflecteur de sa surface  $r$ , mais aussi une forte valeur de la transmittance totale  $\tau$  donc de la transmittance  $t$  du verre. Il est donc important d'avoir une faible valeur de l'indice d'absorption  $k$ . La valeur globale  $k$  du spectre solaire est approximativement  $1,3 \cdot 10^6 (\mu\text{m})^{-1}$ . Cette valeur nous permet de dresser un tableau comparatif des propriétés optiques du verre commercial ( $n \approx 1,5$ ) et du plexiglas (une étude au laboratoire de physique sur un échantillon de plexiglas donne  $n \approx 1,57$ ) L'absorptance de la vitre est égale à  $a = 1 - r$   
 $a(V.C) = 1 - r(V.C) = 1 - 0,04 = 0,96$

épaisseur $\delta$ (mm)	transmittance dans le verre $t$	réflectance $g$		transmittance $\tau$		coefficient optique moyen $\bar{\tau} \times d$	
		VC	P	VC	P	VC	P
2	0,96786	0,07603	0,09096	0,8933	0,87695	0,8576	0,8338
2,5	0,96	0,074034	0,09028	0,8860	0,8698	0,8505	0,827
3	0,952173	0,07348	0,08961	0,87875	0,86268	0,84456	0,8202
3,5	0,94443	0,0728	0,08896	0,87163	0,85563	0,83676	0,81353
4	0,936744	0,07223	0,08831	0,86452	0,84864	0,82994	0,806886
4,5	0,929124	0,07166	0,08768	0,8575	0,8417	0,8232	0,8003
4,75	0,92534	0,07161	0,08734	0,85396	0,83826	0,8198	0,7970
5	0,921566	0,07135	0,087052	0,85025	0,83483	0,8162	0,79376
5,5	0,91407	0,070535	0,08644	0,84353	0,82801	0,8098	0,78727
6	0,90663	0,06998	0,08583	0,83665	0,8212	0,803184	0,78084
6,5	0,89926	0,06943	0,0853	0,82983	0,8152	0,79664	0,7751
7	0,89194	0,06888	0,08465	0,82306	0,8079	0,79013	0,76814
7,5	0,884686	0,068337	0,084078	0,81635	0,801293	0,7837	0,76187
8	0,8775	0,067792	0,08351	0,81	0,79475	0,7776	0,75565
8,5	0,87035	0,06726	0,08295	0,8031	0,78826	0,770976	0,74948
9	0,86327	0,06673	0,0824	0,7965	0,78182	0,76464	0,74336
9,5	0,85625	0,0662	0,08187	0,79	0,77544	0,7584	0,73729
10	0,8493	0,0657	0,08134	0,7836	0,76913	0,75226	0,7313

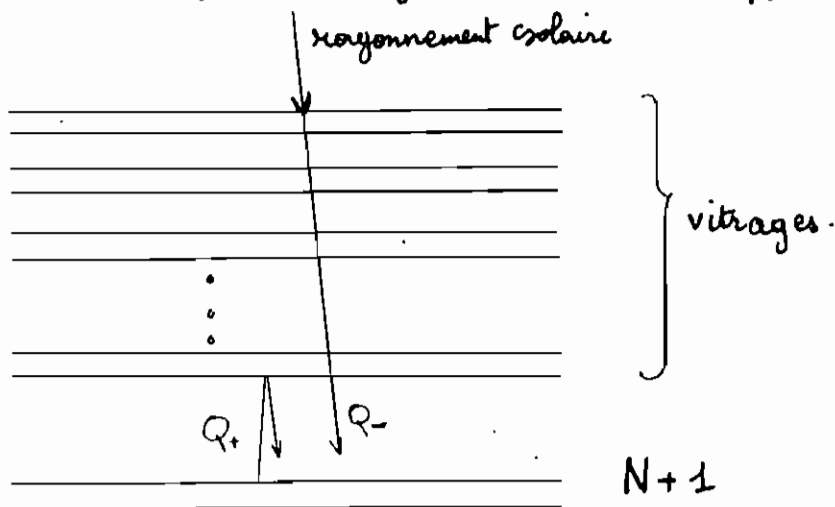
On remarque pour une même épaisseur, le plexiglas réfléchit plus et transmet moins que le verre commercial.

VC = verre commercial P = plexiglas.  $r(P) = 0,0492$   $d = 1 - r = 0,9508$



pour une épaisseur de verre de 3 mm, on obtient  $t = 0,959$   
 $\tau = 0,879$   $\rho = 0,0735$   $\alpha = 1 - 0,0735 = 0,9265$   
 $\tau\alpha = 0,81384$

Si l'on envisage l'utilisation d'un vitrage unique, on introduit une perte par réflexion  $\rho$  de 7,35% et la perte est augmentée si le vitrage est multiple. Soit un système de  $N$  vitres auquel on ajoute une vitre supplémentaire.



L'ensemble de  $N$  vitres a une réflectance totale  $\rho_N$  et une transmittance totale  $\tau_N$ . Soit un flux solaire unité incident sur l'ensemble des vitres, alors le flux émergent  $q^-$  à la sortie est

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

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

Ce qui donne

$$q^- = \frac{\tau_N}{1 - \rho_N} \quad \text{et} \quad q^+ = \frac{\rho_N \tau_N}{1 - \rho_N}$$

Le flux transmis à travers la vitre supplémentaire est  $\tau q^-$ , et ce flux, puisque le flux incident est égal à l'unité, est la nouvelle transmittance du système  $\tau_{N+1}$

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

La nouvelle réflectance du système  $\rho_{N+1}$  est égale à l'ancienne

$\rho_N$  plus le flux réfléchi vers le haut  $\tau_N q^+$

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

Notons que si  $N$  tend vers l'infini et  $\tau_N$  tend vers zéro, le fait d'ajouter un vitrage supplémentaire laisse  $\rho_{N+1} = \rho_N$ . On commence par établir les valeurs  $\rho_1 = \rho$  et  $\tau_1 = \tau$  pour un simple vitrage et l'on obtient  $\rho_2$  et  $\tau_2$  puis  $\rho_3$  et  $\tau_3$  etc... Le tableau ci-dessous montre les valeurs obtenues pour

$$\rho(VL) = 0,072229 \approx 0,07223 \quad \tau = 0,86452$$

$$\rho(P) = 0,08831 \quad \tau = 0,84864$$

L'épaisseur de la vitre étant 4 mm.

Nombre de vitres	Verre commercial		Plexiglas	
	Réflexion du syst.	Transmittance du syst.	Réflexion ce	Transmittance.
0	0,0000	1,000	0,0000	1,000
1	0,07223	0,86452	0,08831	0,8486
2	0,1265	0,7513	0,1524	0,7258
3	0,1676	0,6555	0,1996	0,6243
4	0,199	0,5736	0,2346	0,5393
5	0,2231	0,5031	0,2608	0,4673
6	0,2600	0,44206	0,2805	0,4059

Le tableau montre clairement l'avantage d'utiliser des verres faiblement réfléchissants et absorbants quand un vitrage multiple est désirable. Mais les pertes par réflexion sont importantes pour les vitrages multiples. On peut employer deux méthodes pour obtenir la basse valeur de  $\tau$ . La première, à cause des dépenses qu'elle implique est économique seulement si l'on utilise des concentrateurs. Elle consiste à appliquer des revêtements antireflexion sous forme de couches minces multiples sur la surface des vitres. La seconde

solution consiste en une micro-attaque chimique de la surface du verre.

### 2-2-1 Le revêtement antiréflexion

Dans sa forme la plus simple, c'est une couche d'épaisseur  $S = \lambda/4$  n d'un matériau dont l'indice de réfraction est faible. Le rayonnement réfléchi par la surface de séparation verre - revêtement est en opposition de phase avec le rayonnement de l'interface revêtement - air et les ondes s'annulent.

### 2-2-2 L'antiréflexion par micro-attaque chimique

En dissolvant chimiquement une plus grande partie du verre près de la surface qu'à quelque distance sous la surface, on crée le gradient d'indice de réfraction souhaité. Cet indice est minimal près de la surface et augmente avec la distance. On crée un film non homogène à la surface du verre. Quand l'épaisseur de ce film non homogène et la variation de son indice de réfraction sont correctes, il en résulte un véritable effet antiréflexion. Le but de la micro-attaque chimique est d'obtenir un effet anti-réflexion et non de rendre le verre mat ou dépoli. Elle réduit ainsi la réflexion, qu'elle soit spéculaire ou diffuse.

## 2-3 CONTROLE DE LA REEMISSIION DU RAYONNEMENT

La réémission de rayonnement peut être réduite en utilisant simplement un vitrage multiple. Pour illustrer ce fait, considérons une plaque absorbante chaude, peinte en noir, possédant une émittance infrarouge  $E_1$ . Imaginons l'absorbant à la température  $T_1 = 80^\circ\text{C} = 353,15\text{ K}$  et le couvercle externe (vitre) avec une émittance infrarouge  $E_2$ , à température  $T_2 = 25^\circ\text{C} = 298,15\text{ K}$

Le flux thermique de l'absorbeur vers le vitrage sera  $q$  ( $\frac{W}{m^2}$ )

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

où  $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$  est la constante de Stefan-Boltzmann. Les valeurs courantes de  $\epsilon_1$  et  $\epsilon_2$  sont respectivement 0,9 et 0,8

$$q = \frac{5,6697 \cdot 10^{-8} (353,15^4 - 298,15^4)}{\frac{1}{0,9} + \frac{1}{0,8} - 1} = 318,7 \text{ W/m}^2$$

pour un capteur plan, le rayonnement solaire peut atteindre  $700 \frac{W}{m^2}$ , de sorte que la valeur de  $q$  constituerait une perte de près de 45,5% de l'énergie solaire. Sur l'énergie qui atteint l'absorbeur (avec une vitre en VC d'épaisseur 4 mm  $\rho = 0,07223$   $\tau = 0,86452$ ):  $700 \times 0,86452 \times \alpha$

$\alpha = 1 - \tau = 1 - 0,06 = 0,96 =$  absorptance de la plaque.

donc  $700 \times 0,86452 \times 0,96 = 581 \text{ W/m}^2$  la perte par rayonnement thermique de  $318,7 \frac{W}{m^2}$  serait de près de 55% si l'on ajoute  $N-1$  vitrages additionnels entre l'absorbeur et le vitrage interne, la perte par rayonnement se réduit approximativement à

$$q = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1} + (2N-1) \frac{1-\epsilon_2}{\epsilon_2} + N}$$

Cette formule est approximative car on n'a pas tenu compte de la conduction et de la convection simultanées dans l'air entre les vitrages on a également négligé le rayonnement absorbé par les vitrages. En supposant un vitrage double et les valeurs  $T_1$  et  $T_2$  identiques

$$q = \frac{5,6697 \cdot 10^{-8} (353,15 \cdot 10^4 - 298,15^4)}{\frac{1-0,9}{0,9} + 3 \frac{1-0,8}{0,8} + 2} = 151,63 \text{ W/m}^2$$

On voit que la perte de chaleur est réduite de plus de la moitié. L'énergie solaire atteignant l'absorbeur devient (pour 2 vitres en VC épaisseur = 4 mm  $\rho = 0,1265$ ,  $\tau = 0,7513$ )  $700 \times 0,7513 \times 0,96 = 505 \text{ W/m}^2$  soit une réduction de 581 à 505. La réduction nette de  $(318,7 - 151,63) - (581 - 505) = 91 \text{ W/m}^2$  des pertes thermiques est obtenue au prix de l'installation d'un vitrage additionnel. Nous n'avons pas encore considéré un facteur mineur, qui est que si l'on considère l'addition de vitrages additionnels, la température du vitrage externe va légèrement diminuer de sorte que l'avantage serait moindre que celui calculé dans l'exemple précédent : mais l'énergie solaire absorbée par les vitrages et que nous avons négligée jusqu'à présent, vient annuler cet effet. Donc le vitrage multiple offre un moyen de réduire les pertes par réémission de rayonnement. Bien sûr, chaque vitrage additionnel diminue moins les pertes.

### Selectivité spectrale

Pour réduire plus efficacement les pertes par réémission de rayonnement, la meilleure façon est d'utiliser un absorbeur noir sélectif. On s'arrange pour avoir une valeur faible de  $\epsilon_1$  tout en ayant en même temps une valeur élevée de l'absorptance  $\alpha$ . Toute surface dont le pouvoir réflecteur, la transparence et l'absorptivité varient avec la longueur d'onde du rayonnement incident est dite spectralement sélective. Une surface qui apparaît noire à l'œil mais qui possède un pouvoir réflecteur élevé dans l'infrarouge (ce qui la ferait apparaître métallique à un œil sensible à l'infrarouge) est dite noire sélective.

Soit  $\bar{q}(\lambda)$  le flux rayonné incident par unité de largeur de spectre. La localisation spectrale et la largeur de bande peuvent

être spécifiées de façon équivalente par référence à la longueur d'onde  $\lambda$ , au nombre d'onde  $\nu$  à la fréquence  $\nu_f$  ou à l'énergie  $E$ . Ces valeurs sont liées par la loi d'Einstein

$E = h\nu_f$   $\nu = \nu_f/c$  et  $\lambda = 1/\nu$ . Donc la puissance par unité de surface ( $W/m^2$ ), incidente sur une surface et ayant des longueurs d'ondes comprises entre  $\lambda$  et  $\lambda + d\lambda$ , est  $\bar{q}(\lambda)d\lambda$ .  $\bar{q}(\lambda)$  exprimée en  $W/m^2$  pour s'appelle l'irradiation spectrale. L'irradiation totale en  $W/m^2$  est l'intégrale sur toute la longueur du spectre.

$$\bar{q} = \int_0^{\infty} \bar{q}(\lambda) d\lambda$$

dans chaque région spectrale une fraction  $\alpha(\lambda)$  de l'irradiation est absorbée par une surface.

$$q_{abs} = \int_0^{\infty} \alpha(\lambda) \bar{q}(\lambda) d\lambda$$

L'absorptance totale de la surface :

$$q_{abs}/\bar{q} = \alpha_{\infty} \quad \alpha_{\infty} = \frac{\int_0^{\infty} \alpha(\lambda) \bar{q}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \bar{q}(\lambda) d\lambda}$$

Définissons une fonction partielle entre les longueurs d'onde 0 et  $\lambda$

$$f(\lambda) = \frac{\int_0^{\lambda} \bar{q}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \bar{q}(\lambda) d\lambda}$$

Quand on considère cette quantité, l'absorptance totale est simplement l'absorptance spectrale  $\alpha(\lambda)$  moyennée sur  $f$

$$\alpha_f = \int_0^1 \alpha(\lambda) df(\lambda)$$

La surface dont le micro-état thermodynamique peut être caractérisé par l'identité avec l'état à l'équilibre thermodynamique à la température  $T$  émet le flux spectral :

$$q_{em}(\lambda) = \alpha(\lambda) B(\lambda, T)$$

où  $B(\lambda, T)$  est le rayonnement du corps noir de Planck :

$$B(\lambda, T) = \frac{2\pi h c^2 \lambda^{-5}}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

L'émissance totale est alors :

$$E(T) = \frac{\int_0^{\infty} \alpha(\lambda) B(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^{\infty} B(\lambda, T) d\lambda}$$

On peut définir une fonction partielle pour le rayonnement thermique à l'équilibre thermodynamique par.

$$f_e(\lambda, T) = \frac{\int_0^{\lambda} B(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^{\infty} B(\lambda, T) d\lambda}$$

Pour distinguer cette fonction partielle d'une partielle modifiée à définir plus tard, on l'appelle fonction partielle externe.

D'après cette fonction, l'émissance  $E(T)$  devient.

$$E(T) = \int_0^1 \alpha(\lambda) df_e(\lambda, T)$$

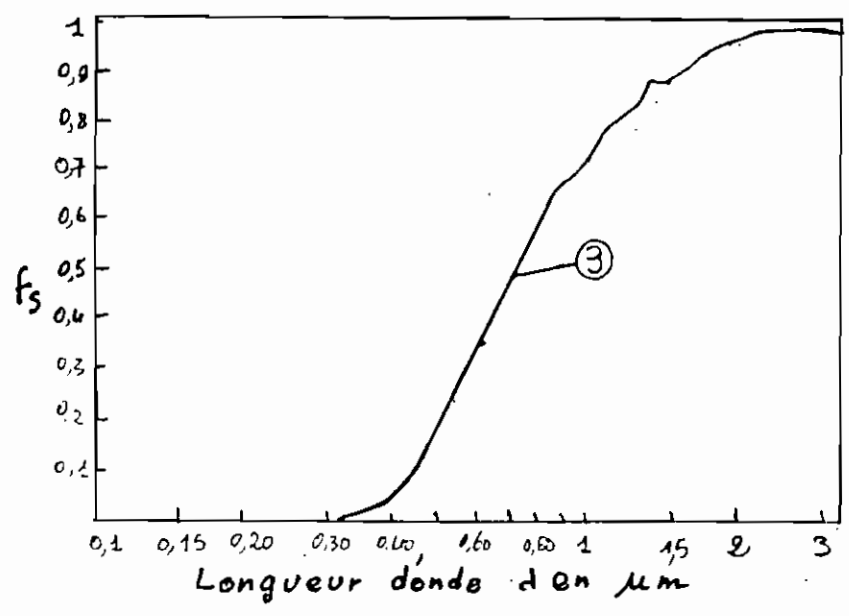
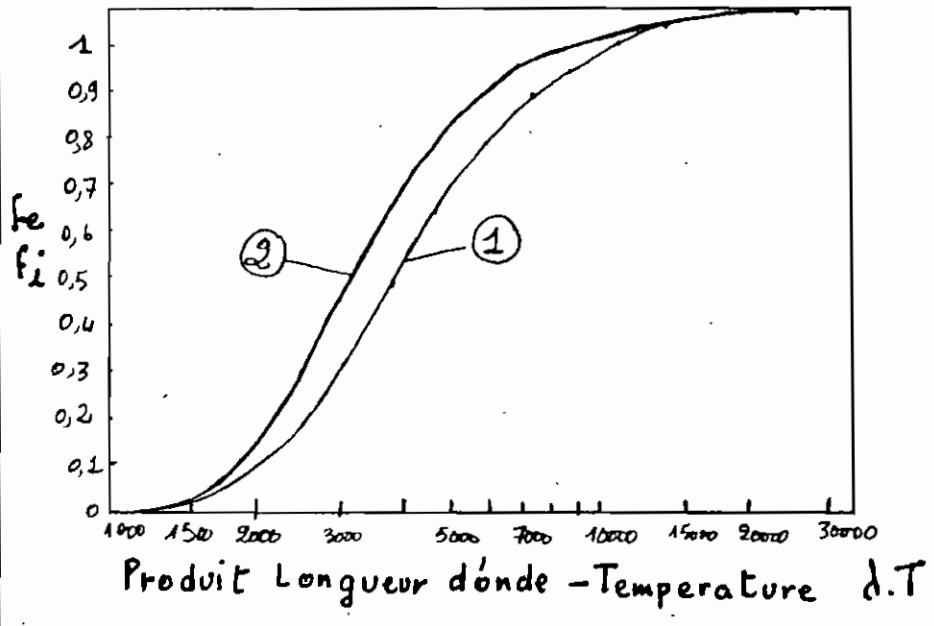
Avec l'approximation raisonnable que le nitrage interne est noir et isotherme à la température  $T_c$   $E(T)$  devient

$$E(T, T_c) = \frac{\int_0^{\infty} \alpha(\lambda) [B(\lambda, T) - B(\lambda, T_c)] d\lambda}{\int_0^{\infty} [B(\lambda, T) - B(\lambda, T_c)] d\lambda}$$

et on peut définir une fonction partielle « interne » modifiée

$$f_i(\lambda T, T_c/T) = \frac{\int_0^{\lambda} [B(\lambda, T) - B(\lambda, T_c)] d\lambda}{\int_0^{\infty} [B(\lambda, T) - B(\lambda, T_c)] d\lambda}$$

$$E(T, T_c) = \int_0^1 \alpha(\lambda) df_i(\lambda T, T_c/T)$$



- ① fonction partielle pour le rayonnement du corps noir
  - ② fonction partielle pour une difference du ray. du corps noir
  - ③ fonction partielle pour le rayonnement solaire
- $f_s$  = fraction solaire       $f_i$  = fraction interne  
 $f_e$  = fraction externe



La longueur d'onde  $\lambda_x$  à laquelle l'absorptance spectrale de l'absorbant  $\alpha(\lambda)$  passe d'une valeur élevée à une valeur faible et celle à laquelle l'irradiation solaire  $q_s^-(\lambda)$  sur l'absorbant devient inférieure au rayonnement du corps noir diminué de l'irradiation du vitrage interne  $B(\lambda, T) - q_c^-(\lambda)$ . Dans le cas idéal, le vitrage est transmetteur seulement aux longueurs d'onde les plus courtes. En d'autres mots, on a

$$\alpha(\lambda) \approx 1 \quad \lambda < \lambda_x$$

$$\alpha(\lambda) \approx 0 \quad \lambda > \lambda_x$$

où  $\lambda_x$  est la racine de

$$B(\lambda_x, T) - q_c^-(\lambda_x) - q_s^-(\lambda_x) = 0$$

ou approximativement

$$B(\lambda_x, T) - B(\lambda_x, T_c) - q_s^-(\lambda_x) = 0$$

A noter que l'irradiation solaire  $q_s^-(\lambda)$  est celle arrivant sur l'absorbant après traversée des vitrages c'est-à-dire après avoir été diminuée dans les longueurs d'onde les plus courtes.

### Absorptance pratique

En faisant à nouveau l'approximation qui consiste à considérer le vitrage interne comme presque noir, la perte thermique devient

$$q \approx \epsilon \sigma (T^4 - T_c^4)$$

alors que le gain de chaleur solaire devient

$$q_{abs} = \alpha_s q_s^-$$

Le gain net de flux de rayonnement thermique est donc

$$q = \alpha_s q_s^- - \epsilon \sigma (T^4 - T_c^4)$$

La fraction de  $q_s^-$  retenue est  $q/q_s^-$  c'est l'absorptance pratique.

$$\alpha_H = \alpha_s - \beta \epsilon$$

$$\beta = \frac{\sigma}{q_s^-} (T^4 - T_c^4)$$

Techniquement parlant, plus  $\alpha_s$  est élevée et meilleur est le résultat

Naturellement ce sont des considérations économiques qui dicteront finalement le choix de la surface absorbante

Exemple de calcul:

Est-ce que la surface sélective avec,  $\alpha_{s1} = 0,7$  et  $\epsilon_1 = 0,3$  est supérieure à une peinture noire pour laquelle  $\alpha_{s2} = 0,95$  et  $\epsilon_2 = 0,88$ ?

L'équation  $\alpha_M = \alpha_s - \beta \epsilon$  nous dit que la surface sélective est supérieure si  $\beta$  dépasse un certain rapport.

$$\beta \geq \frac{(\alpha_{s,2} - \alpha_{s,1})}{(\epsilon_2 - \epsilon_1)}$$

Pour l'exemple la valeur est:

$$\beta \geq \frac{0,95 - 0,7}{0,88 - 0,3} \quad \text{soit } \beta > 0,431$$

Pour continuer avec cet exemple, quelle température  $T$  doit atteindre l'absorbeur pour rendre désirable l'utilisation de la surface sélective? Supposons la température du vitrage  $T_c = 25^\circ\text{C}$  soit  $298,15\text{K}$  et l'irradiation solaire  $q_s^-$  sur l'absorbeur  $= 700 \times 0,86459 = 605 \text{ W/m}^2$

$$\beta = \frac{\sigma(T^4 - T_c^4)}{q_s^-} \rightarrow \sigma T^4 = \sigma T_c^4 + \beta q_s^-$$

$$\sigma T^4 \geq 468 + (0,431)(605) = 708,85 \text{ W/m}^2$$

$$T = 334,4\text{K} \text{ soit } 61,2^\circ\text{C}$$

Transmittance pratique

On pourrait placer un revêtement spectralement sélectif sur un ou plusieurs vitrages, mais quand on utilise un absorbeur noir sélectif, l'emploi du revêtement sélectif sur le vitrage n'est pas habituellement justifié.

Pour simplifier, considérons un absorbeur avec absorptance solaire élevée,  $\alpha_s \approx 1$  et forte émittance infrarouge  $\epsilon = 1$  surmonté d'un vitrage de transmittance  $\tau_s$  et d'émittance

infrarouge  $\epsilon$ . Soit  $q_s^-$  l'irradiation solaire sur le vitrage. L'énergie solaire totale par unité de surface de vitrage, absorbée est alors  $\tau_s q_s^-$ . La quantité perdue par l'absorbeur et le vitrage est  $\epsilon \sigma (T^4 - T_c^4)$  de sorte que l'énergie solaire nette collectée est

$$q = \tau_s q_s^- - \epsilon \sigma (T^4 - T_c^4)$$

La transmittance pratique  $\tau_H$  est la fraction  $q/q_s^-$

$$\tau_H = \tau_s - \beta \epsilon$$

$$\text{où } \beta = \frac{\sigma (T^4 - T_c^4)}{q_s^-}$$

### Revêtements noirs sélectifs

Il existe un grand nombre de manières de créer des surfaces de faible émittance  $\epsilon$  et d'absorptance solaire élevée ( $\alpha_s$ ). Le lecteur a peut-être l'expérience de la sensation désagréable ressentie en touchant un objet de fer galvanisé ou d'aluminium non peint mais altéré et exposé au soleil. Un tel matériau est un corps noir sélectif naturel et, bien que de mauvaise qualité comme couche noire sélective, devient, bien plus que chaud au soleil que même une surface peinte en noire.

Un procédé commercial de fabrication de surfaces d'absorptance élevée, noires sélectives est le dépôt chimique ou électrochimique d'une couche mince de semi-conducteur sur un métal.

On peut aussi utiliser des traitements par oxydation chimique (ex : oxydation du cuivre en solution chlorate)

### Sélectivité directionnelle

Dans un capteur solaire sans concentration, le rayonnement solaire arrive dans un cône de faible angle au sommet. Il est donc possible de mettre au point un système qui absorbe bien les photons arrivant des autres directions. Puisque la surface qui absorbe faiblement réémet faiblement, on obtient ainsi une faible

réémission de rayonnement à l'exception de la direction du soleil. L'émittance hémisphérique, qui est une moyenne convenablement pondérée sur toutes les directions est une bonne mesure du rayonnement réémis par une surface. Elle est définie comme suit.

$$E_H = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} E(\theta, \phi) \cos \theta \sin \theta \, d\theta \, d\phi$$

où  $\theta$  est l'angle avec la normale au plan de la surface moyenne et  $\phi$  est l'angle azimutal mesuré dans le plan de la surface moyenne.

## 24 CONTROLE DE LA CONVECTION

Convection sous un vitrage.

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

$$q = (k/L)(T_1 - T_2)$$

où  $k$  est la conductivité thermique. Reprenons l'exemple utilisé ci-dessus avec  $T_1 = 80^\circ\text{C}$  et  $T_2 = 25^\circ\text{C}$  pour  $L = 0,01\text{m}$  la conduction est

$$q = \frac{0,0283}{0,01} (80 - 25) = 155,65 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Une perte de  $155,65 \text{ W/m}^2$  constituerait  $26,8\%$  des  $581 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  absorbés par l'absorbeur dans l'exemple précédent. Rappelons cependant que la surface noire non sélective présentait une perte de  $318,7 \text{ W/m}^2$  de sorte que la chaleur nette collectée était seulement  $581 - 318,7 = 262,3 \text{ W/m}^2$ , la perte par conduction dans l'air soustrait presque  $73,2\%$  de cette quantité. Il faut donc réduire la conduction dans l'air.

Deux solutions sont possibles : réduire  $k$  ou augmenter  $L$ . Pour réduire  $k$  il faut remplacer l'air par un autre gaz

par exemple le dioxyde de carbone, ou utiliser un verre pour sé. Il semble simple par comparaison et augmenter  $L$ , la présence de la convection rend l'augmentation de  $L$  inefficace donc on peut modifier cette équation en la multipliant par un facteur supérieur ou égal à 1.

$$q = Nu [(k/L)(T_1 - T_2)]$$

Ce facteur est le nombre de Nusselt  $Nu$  fonction du nombre de Grashof  $Gr$  et du nombre de Prandtl  $Pr$ . Le produit  $Pr \times Gr$  est le nombre Rayleigh  $Ra$

$$Gr = \frac{g(\Delta\rho/\rho)L^3}{\nu^2} \quad Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu C_p}{k}$$

$$Ra = Gr Pr = \frac{g(\Delta\rho/\rho)L^3}{\alpha\nu}$$

ou  $g =$  l'accélération de la pesanteur  $\frac{\Delta\rho}{\rho}$  est le rapport de la différence de densité (densité de l'air chaud et froid) à la densité moyenne  $\nu$  est la viscosité cinématique  $\frac{\mu}{\rho}$ ,  $\alpha$  est la diffusivité thermique  $k/\rho C_p$   $C_p$  est la chaleur massique à pression constante et  $k$  est la conductivité thermique

Pour un gaz parfait

$$\Delta\rho = (T_1 - T_2)/T$$

$$T = (T_1 + T_2)/2 \quad (\text{températures absolues})$$

Le nombre de Nusselt est aussi une fonction de  $L/D$  où  $D$  est la longueur de l'axe d'inclinaison de l'absorbeur, de l'angle d'inclinaison  $\tau$  et dans certains cas de  $W/D$ , où  $W$  est la largeur de l'absorbeur perpendiculaire à  $D$ . Quand  $D/L$  et  $W/L$  sont grands et que  $\tau$  (ou  $i$ ) = 0, la surface chaude étant au-dessous,  $Nu = 1$  jusqu'à ce que  $Ra$  dépasse la valeur 1700. Ensuite, le nombre de Nusselt croît d'abord rapidement puis comme  $Ra^{1/4}$ . Cette dernière variation reportée dans l'équation de  $q$  montre que la valeur de  $q$  diminue comme  $L^{-1/4}$  quand  $L$  augmente

On peut donc tirer avantage de l'accroissement de  $L$ .

Si  $L$  et  $Ra$  continuent à croître,  $Nu$  augmente pratiquement comme  $Ra^{1/3}$  et on ne gagne plus rien. Pour cette raison, on a suggéré d'utiliser une valeur de  $L$  de l'ordre de 8 cm.

## 25 ISOLATION THERMIQUE

Les exemples précédents ont montré que la perte de 100 à 200  $W/m^2$  peut avoir des conséquences sérieuses pour un capteur solaire sans concentration. Il est donc souhaitable d'isoler l'arrière du capteur avec un matériau de faible conductivité thermique  $k$ , de faible masse volumique et de basse chaleur massique. Pour une isolation en fibres ou en mousse avec  $k = 0,06 \frac{W}{m \cdot K}$  il faut une épaisseur de

$$L_i = (k/q)(T_1 - T_2) = (0,06/q)(T_1 - T_2)$$

Par exemple on peut limiter les pertes à 1/10 des valeurs ci-dessus soit  $\frac{1}{10} \times 200 = 20 W/m^2$ . Pour  $T_1 = 80^\circ C$   $T_2 = 25^\circ C$

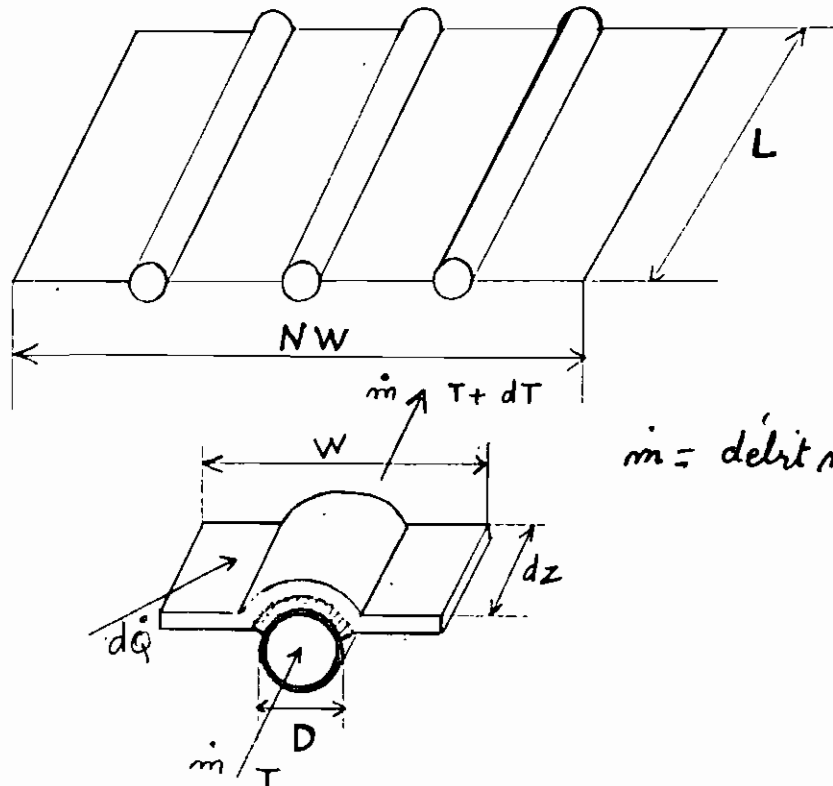
$$L_i = \frac{0,06}{20} (80 - 25) = 0,165 m$$

### 3 COLLECTE DE LA CHALEUR

#### 3-1 ECHANGE DE CHALEUR

Collecte de chaleur

Considérons cet élément de capteur solaire



$\dot{m}$  = débit massique.

Si le fluide de travail reste à l'état liquide (c'est-à-dire si l'eau n'entre pas en ébullition) la puissance thermique  $d\dot{Q}$  ( $W$ ) collectée peut s'exprimer :

$$d\dot{Q} = \dot{m} c_p dT$$

La chaleur collectée est la puissance solaire absorbée diminuée des pertes

$$d\dot{Q} = \alpha_s \tau_s (1 + a) q_s^- dA - U dA (T - T_e)$$

où  $\alpha_s$  est l'absorptivité solaire de l'absorbeur,  $\tau_s$  la transmissivité solaire du vitrage,  $a$  la récupération des pertes par l'absorption du vitrage,  $q_s^-$  l'irradiation solaire ( $W/m^2$ )  $dA$  la surface élémentaire,  $U$  la conductance globale de perte thermique, et  $T_e$  la température à l'équilibre du capteur quand il est exposé au ciel mais à l'om-

bre du soleil.

$$dA = W dz$$

Par commodité, on définit une température d'équilibre équivalente  $T_s$

$$\alpha_s \tau_s (1+a) \bar{q}_s + U T_e = U T_s$$

par exemple si  $\alpha_s = 0,96$ ,  $\tau_s = 0,87$   $a = 0,024$

$$\bar{q}_s = 665 \text{ W/m}^2 \quad U = 6 \text{ W/m}^2 \quad T_e = 20^\circ\text{C} \text{ on a}$$

$$0,96 \times 0,87 (1+0,024) 665 + 6 \times 20 = 6 T_s$$

$$T_s = 114,8^\circ\text{C}$$

On a l'égalité

$$m \frac{dT}{dz} = UW(T_s - T)$$

Efficacité et nombre d'unités de transfert

La précédente égalité peut être résolue pour une température de sortie  $T_o$  à  $z=L$  quand la température d'entrée est  $T_i$  à  $z=0$ . La relation résultante peut s'écrire

$$T_o = T_i + (T_s - T_i) E_{he}$$

où  $E_{he}$  est l'efficacité de l'échangeur de chaleur, qui est donnée par

$$E_{he} = 1 - e^{-N_{tu}}$$

où  $N_{tu} =$  nombre d'unités de transfert  $= \frac{UWL}{\dot{m} C_p}$

On peut réarranger ces deux dernières équations

$$E_{he} \frac{T_o - T_i}{T_s - T_i} \quad N_{tu} = \log \frac{1}{1 - E_{he}}$$

Exemple de calcul

On veut connaître la quantité d'eau à faire passer à travers un capteur.  $W = 0,25 \text{ m}$ ,  $L = 1 \text{ m}$   $T_i = 25^\circ\text{C}$   $T_o = 60^\circ\text{C}$

$U = 6 \text{ W/m}^2$   $\alpha_s = 0,96$   $\tau_s = 0,87$   $a = 0,024$  prenons  $T_e = 20^\circ\text{C}$

$T_s = 114,8^\circ\text{C}$  pour l'eau  $C_p = 4200 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$

$$E_{he} = \frac{60 - 25}{114,8 - 25} = 0,39 \quad N_{tu} = \log \frac{1}{1 - 0,39} = 0,494$$



$$\dot{m} = \frac{UWL}{Ntu C_p} = \frac{6 \times (0,25)(1)}{(0,494)(4200)} = 7,23 \cdot 10^{-4} \text{ kg/sec} = 2,6 \text{ kg/h}$$

Si l'on a besoin d'un débit d'environ 72 kg/h il faut

$$\frac{72}{2,6} = 27,69 = 28 \text{ éléments de largeur } W$$

Calcul de  $U$  et  $T_e$

Supposons le capteur en place mais à l'ombre, et que l'on mesure  $T_e$  avec un débit nul ( $\dot{m} = 0$ ) Puis on alimente en eau chaude à température  $T_i$  et on mesure le débit  $\dot{m}$  et la température d'entrée et de sortie et sachant que  $T_s = T_e$  du fait de l'ombre on utilise l'équation donnant  $E_{he}$  pour trouver sa valeur correspondant aux conditions d'essai on en déduit  $Ntu$

$$\text{alors } U = \dot{m} c_p Ntu / WL$$

Écrivons les bilans thermiques pour l'absorbeur et pour chaque vitre.

Pour l'absorbeur, le flux thermique utile qui est le flux absorbé  $q_a$  diminué des pertes en régime permanent  $q_L$

$$q_u = q_a - q_L$$

Nous savons que  $q_L = q_r + q_c + q_k$

$q_r$  est perte par rayonnement,  $q_c =$  flux de convection

$q_k$  flux de conduction.

$$q_r = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1} \quad q_c = h_c(k/L)(T_1 - T_2)$$

$q_k = (K/L)(T_1 - T_2)$ . Par référence à ces équations on définit

$$h_r = \frac{\sigma(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)}{1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1}$$

$$h_c = Nu K/L_c, \quad U_{ins} = (K/L)_{ins}$$

$$U_i = h_r + h_c$$

Par exemple : avec  $\epsilon_1 = 0,88$   $\epsilon_2 = 0,8$   $T_2 = 335 \text{ K}$

$T_2 = 310 \text{ K}$   $L_c = 6 \text{ cm}$   $k_{ins} = 0,06 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  et  $L_{ins} = 18 \text{ cm}$ .

La valeur de  $U_i$  est:

$$h_c = 3 \times \frac{0,06}{0,06} = \frac{3 \text{ W}}{\text{m}^\circ\text{C}} \quad h_r = \frac{5,6697 \cdot 10^8 (335^2 + 310^2)(335+310)}{1/0,88 + 1/0,8 - 1}$$

$$= 5,5 \text{ W/m}^2\text{C}$$

$$U_i = 5,5 + 3 = 8,5 \text{ W/m}^2\text{C}$$

$$U_{ins} = \frac{0,06}{0,18} = 0,333 \text{ W/m}^2\text{C}$$

La quantité  $q_a$  est, en tenant compte des petites corrections  $a_r$  pour les réflexions intermédiaires

$$q_a = \frac{\alpha_s \tau_s q_s^-}{1 - \rho_s (1 - \alpha_s)} = \alpha_s \tau_s (1 + a_r) q_s^-$$

exemple si  $\alpha_s = 0,95$ ,  $\tau_s = 0,879$  et  $\rho_s = 0,0735$

$$a_r = 0,0037$$

$$\alpha_s \tau_s (1 + a_r) q_s^- - q_u = U_i (T_1 - T_2) \approx U_{ins} (T_2 - T_e)$$

Le bilan thermique sur le vitrage externe à température  $T_n$  (pour un vitrage simple  $n = 2$ ) on déduit que le gain de chaleur depuis l'intérieur  $U_{i,n} (T_{n-1} - T_n)$  et l'irradiation absorbée  $\alpha_g q_s^- + E_g q_{ir}^-$  doivent équilibrer la perte de chaleur par rayonnement  $E_g T_n^4$  et par convection  $h_o (T_n - T_a)$  où  $T_a$  est la température de l'air

$$U_{i,n} (T_{n-1} - T_n) + \alpha_g q_s^- + E_g q_{ir}^- = E_g \sigma T_n^4 + h_o (T_n - T_a)$$

La quantité  $\alpha_g$  est l'absorptivité solaire du vitrage légèrement augmentée pour tenir compte des réflexions intermédiaires. L'irradiation céleste au niveau de la mer est donnée approximativement par l'équation de Brest.

$$q_{ir}^- \approx (0,55 + 1,8 \sqrt{P/P_o}) \sigma T_a^4$$

où  $P_o$  est égale à 1 atmosphère et  $P$  est la pression partielle de vapeur d'eau dans l'atmosphère. En fonction de l'humidité  $r_H$

$$P = r_H P_{vap}(T_a)$$

où  $P_{vap}(T_a)$  est la pression de vapeur de la vapeur d'eau à température ambiante. Par exemple à  $25^\circ\text{C}$  et 50% d'humidité relative, l'irradiation infrarouge céleste est

$$\bar{q}_{ir} = (0,55 + 1,8 \sqrt{0,0115}) (5,6697 \cdot 10^8) (298,15)^4 = 333 \text{ W/m}^2$$

Le bilan thermique conduit à définir  $T_e$ . Le second membre de l'équation s'écrit

$$\epsilon_g \sigma T_n^4 + h_0(T_n - T_a) = \epsilon_g \sigma T_a^4 + U_0(T_n - T_a)$$

$$U_0 = h_0 + \epsilon_g \sigma (T_n^2 + T_a^2)(T_n + T_a)$$

$$U_0 T_a + \epsilon_g \bar{q}_{ir} - \epsilon_g \sigma T_a^4 = U_0 T_e$$

$$T_e = T_a - \frac{\epsilon_g \sigma T_a^4 - \epsilon_g \bar{q}_{ir}}{U_0}$$

Par exemple, avec  $h_0 = 12 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $T_n = 310 \text{ K}$ ,  $T_a = 298 \text{ K}$ ,  $\epsilon_g = 0,8$  et  $\bar{q}_{ir} = 333 \text{ W/m}^2$  comme dans la situation précédente on obtient

$$U_0 = h_0 + \epsilon_g \sigma (T_n^2 + T_a^2)(T_n + T_a)$$

$$= 12 + 0,8 \times 5,6697 \cdot 10^8 (310^2 + 298^2)(310 + 298)$$

$$= 12 + 5,1 = 17,1 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_e = 25 - \frac{0,8 \times 5,6697 \cdot 10^8 \times 298^4 - 0,8 \times 333}{17,1} = 19,66 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Avec ces définitions, on peut écrire le bilan thermique plus simplement

$$U_{i,n}(T_{n-1} - T_n) + d_g \bar{q}_s = U_0(T_n - T_e)$$

Pour le vitrage interne, s'il existe

$$U_{i,m}(T_{m-1} - T_m) + d_{g,s} \bar{q}_s = U_{i,m+1}(T_m - T_{m+1})$$

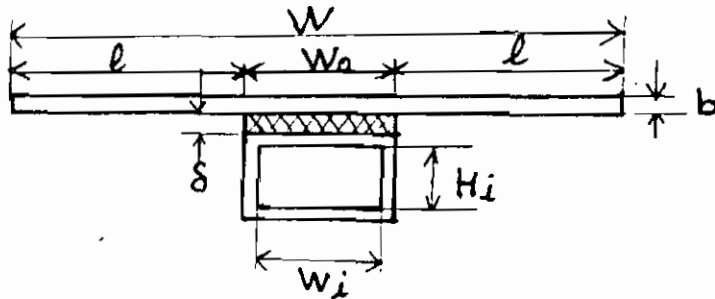
Une fois les températures connues on trouve  $q_u$  et on compare  $dQ = q_u dA$  à  $dQ = d_s \tau_s (1+a) \bar{q}_s dA - U dA(T - T_e)$  pour trouver  $U$

$$U = U_{ins} + \frac{1}{1/U_0 + 1/U_1}$$

et simultanément  $a = a_r + \frac{d_g}{\tau_s d_s} + \frac{U_i}{U_0 + U_i}$

par exemple avec  $U_{ins} = 0,333$ ,  $U_i = 8,5$  et  $U_o = 17 \text{ W/m}^2\text{°C}$  on obtient  $U = 6 \text{ W/m}^2\text{°C}$  et avec  $d_g = 0,05$ ,  $Z_s = 0,879$  et  $\alpha_s = 0,95$  on trouve  $a = 0,024$ .

Efficacité des ailettes et contact thermique  
Considérons un élément de capteur comme une ailette

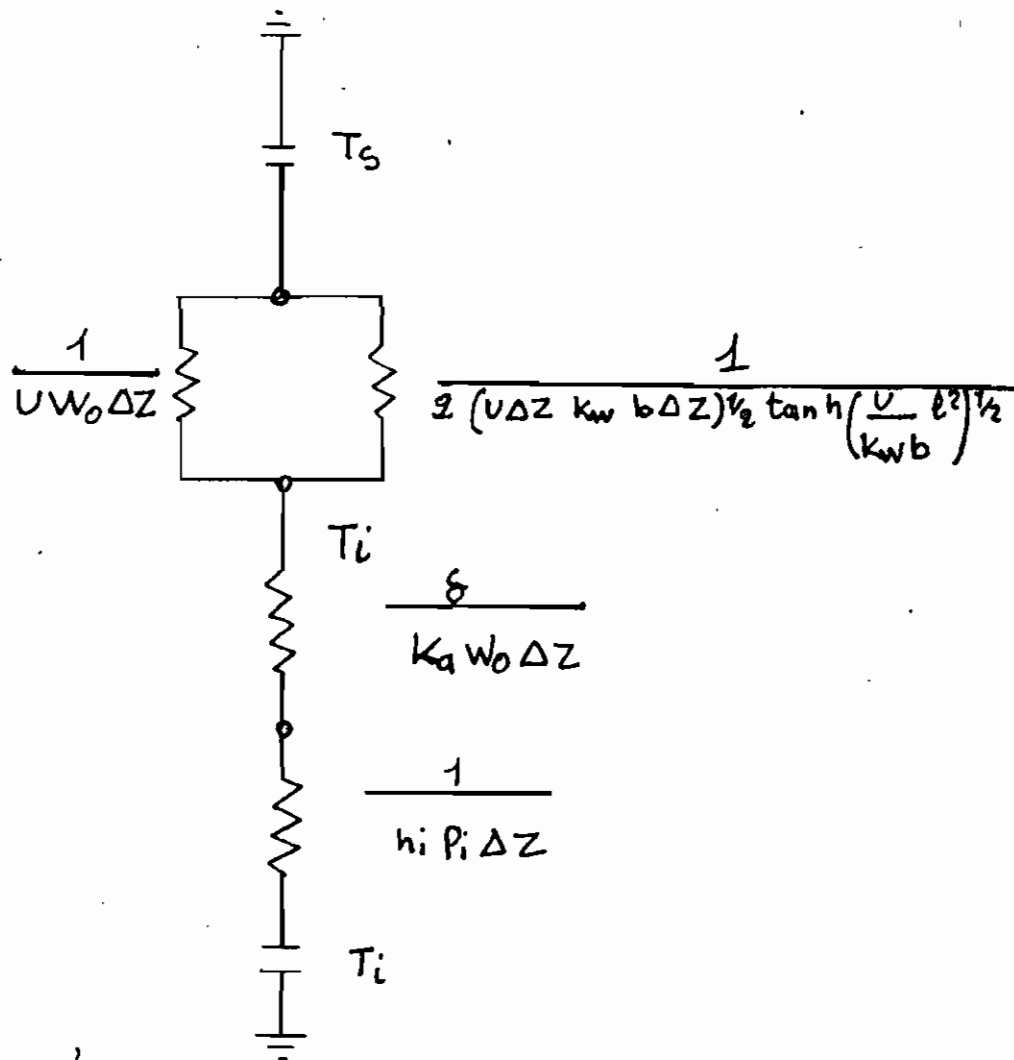


Si toute la surface de l'absorbeur est sèche, l'élément doit jouer le rôle d'ailette pour conduire la chaleur jusqu'au passage où s'écoule le fluide de travail. Il faut donc prendre en considération le contact thermique entre la plaque de l'absorbeur et le conduit de fluide. La valeur de  $U$  apparaissant dans l'équation  $Nt_u = UWL / m c_p$  doit être réduite par un facteur d'efficacité  $\eta_f$  tenant compte de ces effets.

Prenons la situation idéale de deux ailettes de longueur  $l$ , de largeur  $\Delta Z$  et de section droite  $b\Delta Z$ , jointes à une plaque isotherme de surface  $W_0\Delta Z$  conduisant la chaleur à travers une dalle de surface  $W_0\Delta Z$  et d'épaisseur  $\delta$  jusqu'à un tube isotherme de surface interne  $p_i\Delta Z$  où  $p_i$  est le périmètre en contact avec le fluide.

$$p_i = 2(W_i + H_i)$$

La surface  $p_i\Delta Z$  est le siège d'un transfert de chaleur de coefficient  $h_i$ . Ce coefficient se calcule d'après les procédures connues en transfert de chaleur. Pour un écoulement d'eau à  $2,18 \text{ kg/h}$  dans un conduit de  $12 \times 26 \text{ mm}$   $h_i \approx 170 \text{ W/m}^2\text{°C}$ . On peut simuler le circuit thermique.



On en déduit

$$\frac{1}{\eta_f U W} = \frac{1}{2(U k_w b)^{1/2} \tanh(U l^2 / k_w b + U W_0)^{1/2}} + \frac{\delta}{k_a W_0} + \frac{1}{h_i p_i}$$

Exemple

$U = 6 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $W = 0,25 \text{ m}$ ,  $b = 0,25 \text{ mm}$ ,  $k_w = 380 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

(cuivre)  $l = 0,1123 \text{ m}$   $W_0 = 0,9254 \text{ m}$   $\delta = 0,12 \text{ mm}$

$k_a = 0,4 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  (plastique adhésif),  $h_i = 170 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

$p_i = 0,072 \text{ m}$  on obtient

$$\frac{1}{\eta_f U W} = 0,814 + 0,0118 + 0,0817 = 0,908$$

$$\eta_f = 0,7346.$$

Rendement du capteur

Le rendement instantané du capteur est égal à la puissance instantanée collectée divisée par la puissance reçue à la surface du capteur.

EFFICACITE d'ailettes pour différents  $W(\text{cm})$ 

$b(\text{mm}) \backslash W(\text{cm})$	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25
0,15	0,9703	0,9468	0,9160	0,8794	0,8390	0,7965	0,7535	0,7111	0,6703
0,20	0,9709	0,95	0,9234	0,8922	0,8577	0,821	0,7833	0,7455	0,7084
0,25	0,9712	0,9519	0,9279	0,9002	0,8695	0,8369	0,803	0,7687	0,7346
0,30	0,9715	0,9531	0,931	0,9056	0,8777	0,8479	0,8169	0,7854	0,7537
0,35	0,9717	0,9541	0,9332	0,9096	0,8837	0,8561	0,8274	0,798	0,7683
0,40	0,9718	0,9547	0,9349	0,9126	0,8883	0,8624	0,8354	0,8078	0,7799
0,45	0,9719	0,9553	0,9362	0,9149	0,8919	0,8674	0,8419	0,8157	0,7892
0,50	0,9720	0,9557	0,9372	0,9168	0,8948	0,8714	0,8471	0,8222	0,7968

$$U = 6 \text{ W/m}^2\text{°C} \quad k_w = 380 \text{ W/m}^2\text{°C} \quad W_0 = 0,024 \text{ m}$$

$$\delta = 0,12 \text{ mm} \quad k_a = 0,4 \text{ W/m}^2\text{°C} \quad h_i = 170 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

$$p_i = 0,072 \text{ m}$$

## CHAPITRE III

### ETUDE EXPERIMENTALE D'UN CAPTEUR PLAN MODELE

1 BUT: Il s'agit de déterminer expérimentalement les caractéristiques du modèle réalisé qui sont les suivantes :

- la conductance globale des pertes du capteur  $k$
- le rendement  $\eta$
- le débit efficace

Dans un deuxième temps nous comparons l'apport solaire à l'apport électrique.

## 2 DESCRIPTION TECHNIQUE

L'énergie solaire reçue sur la terre est essentiellement discontinue. Elle dépend du lieu, du moment de la journée et des conditions atmosphériques. La vitre laisse passer les rayons solaires qui échauffent l'absorbeur. Elle limite l'émission de chaleur de l'absorbeur vers l'extérieur (arrêt des rayons infra-rouges). C'est l'effet de serre; il accroît la température du fluide caloporteur. Un bon capteur doit résister à la corrosion et aux agents atmosphériques, ce qui limite le choix des matériaux disponibles. Donc les performances d'un capteur solaire simple dépendent :

- de l'ensoleillement (rarement égal à  $1 \text{ kW/m}^2$ )

- de la température du fluide caloporteur
- de la température extérieure.

### 3 MATERIAUX UTILISES

Le capteur modèle a une surface absorbante de  $1,25m \times 0,8m$  soit  $1m^2$

Absorbeur : en acier galvanisé

Serpentin : en cuivre diamètre 10 mm, espacement de 6,7 cm

Le noir sélectif est obtenu avec de la fumée acétylénique

La liaison serpentín - absorbeur est assurée avec du fil de fer.

Coffrage : en bois, longueur = 1,4 m, largeur = 0,96 m  
épaisseur = 0,021 m, hauteur = 0,098 m.

Isolation : Mousse de Polystyrène extrudé : épaisseur 39,2 mm

Vitrage : Plexiglas : longueur = 1,375 m largeur 0,92 m  
épaisseur = 4 mm.

### 4 EXPERIENCE PROPUREMENT DITE

#### Appareils utilisés

- 1 Solarimètre Pana-Vise Metermater RH
- 1 Multimètre Avométer EM 272 N° 186288.
- 1 Potentiomètre Cropicotype P6
- 1 Chronomètre
- 1 Débitmètre

#### Symboles et équations utilisés.

$E$  : apports solaires ( mV )

$E_N$  ou  $q_s^-$  apports solaires normaux ( Kcal/h ) ou ( W )

$T_i$  température d'entrée ( °C )

$T_a$  température ambiante ( °C )

$T_o$  température de sortie ( °C )

$T_{int}$  température interne du capteur ( °C )



$d$  ou  $m$  : débit massique (kg/h)

$Q$  : quantité de chaleur absorbée (kcal/h) par l'eau

AH : angle horaire ( $^{\circ}$ )

$\delta$  : déclinaison solaire.

$\phi$  : latitude du lieu ( $\approx 15^{\circ}$  pour Thiès)

$i$  : inclinaison du capteur.

$\rho$  : masse volumique (kg/dm<sup>3</sup>)

$C$  : pouvoir calorifique (kcal/kg $^{\circ}$ C)

$$Q = P = \rho d c (T_o - T_i)$$

$$E_N \text{ ou } \bar{q}_s = d E$$

$$\text{où } d = \sin h \cos a + \cos h \cos a \sin i$$

$$h: \sin h = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos AH.$$

$$a: \sin a = (\cos \delta \sin AH) / \cos h$$

N.B. Ces formules sont démontrées dans le rapport de projet de A.A. Seydi pages 10, 11, 12.

données météorologiques

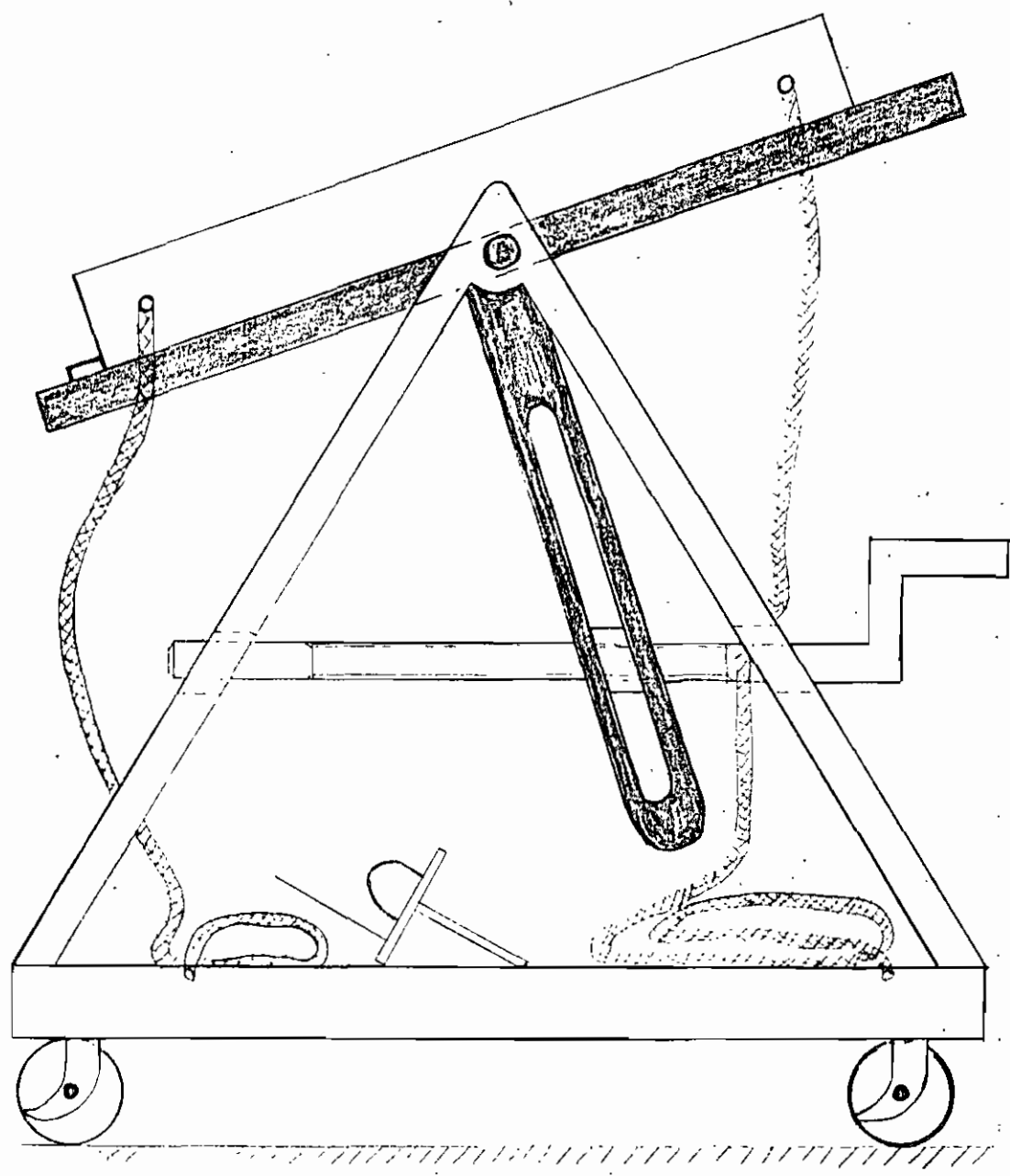
déclinaison moyenne mensuelle du soleil  $\delta$

Mois	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Dec
$\delta$	-20,8	-12,7	-1,9	9,9	18,9	23,1	21,3	13,7	3	-8,8	-18,4	-23

Angle horaire AH

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

5 SCHEMA DE MONTAGE



## 6 MANIPULATIONS

Influence du débit

Il s'agit de faire varier le débit et de mesurer les températures  $T_0$ ,  $T_i$ ,  $T_{int}$  tout en fixant l'inclinaison à  $15^\circ$  (latitude du lieu)

## 7 CALCULS ET RESULTATS

(Voir tableau page )

Exemple de calcul

à 13h

$$E = 9,4 \text{ mV} \quad (105 \text{ mV} = 1 \text{ W/cm}^2)$$

$$S = 1 \text{ m}^2 = 10^4 \text{ cm}^2$$

$$\bar{E} = 9,4 \cdot 10^4 / 105 \times 4180 = 0,21418 \text{ kcal/s} = 779 \text{ kcal/h}$$

$$\phi = 15^\circ \text{ à } 13 \text{ h} \quad \delta = -1,9^\circ \text{ en Mars} \quad AH = 15^\circ \text{ à } 13 \text{ heures}$$

$$h = \sin^{-1}(\sin 15 \sin(-1,9) + \cos 15 \cos(-1,9) \cos 15) = 67,5^\circ$$

$$a = \sin^{-1}(\cos 1,9 \sin 15 / \cos 67,5) = 42,54^\circ$$

$$d = \sin 67,5 \cos 15 + \cos 67,5 \cos 42,54 \cos 15 = 0,966$$

$$q_s^- = E_N = dE = 0,966 \times 779 = 752,5 \text{ kcal/h}$$

$$Q = \rho C m (T_0 - T_i) \quad \rho = 0,992 \text{ kg/dm}^3$$

$$c = 0,998 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$$

pour  $m = d = 35,7 \text{ kg/h}$

$$Q = 0,992 \times 0,998 \times 35,7 (40 - 29) = 388,78 \text{ kcal/h}$$

$$y = \frac{Q}{q_s^-} = \frac{388,78}{752,5} = 51,67 \%$$

$$T_m = (40 + 29)/2 = 34,5^\circ\text{C}$$

$$T_a = 29^\circ\text{C}$$

$$c_d = 0,80688$$

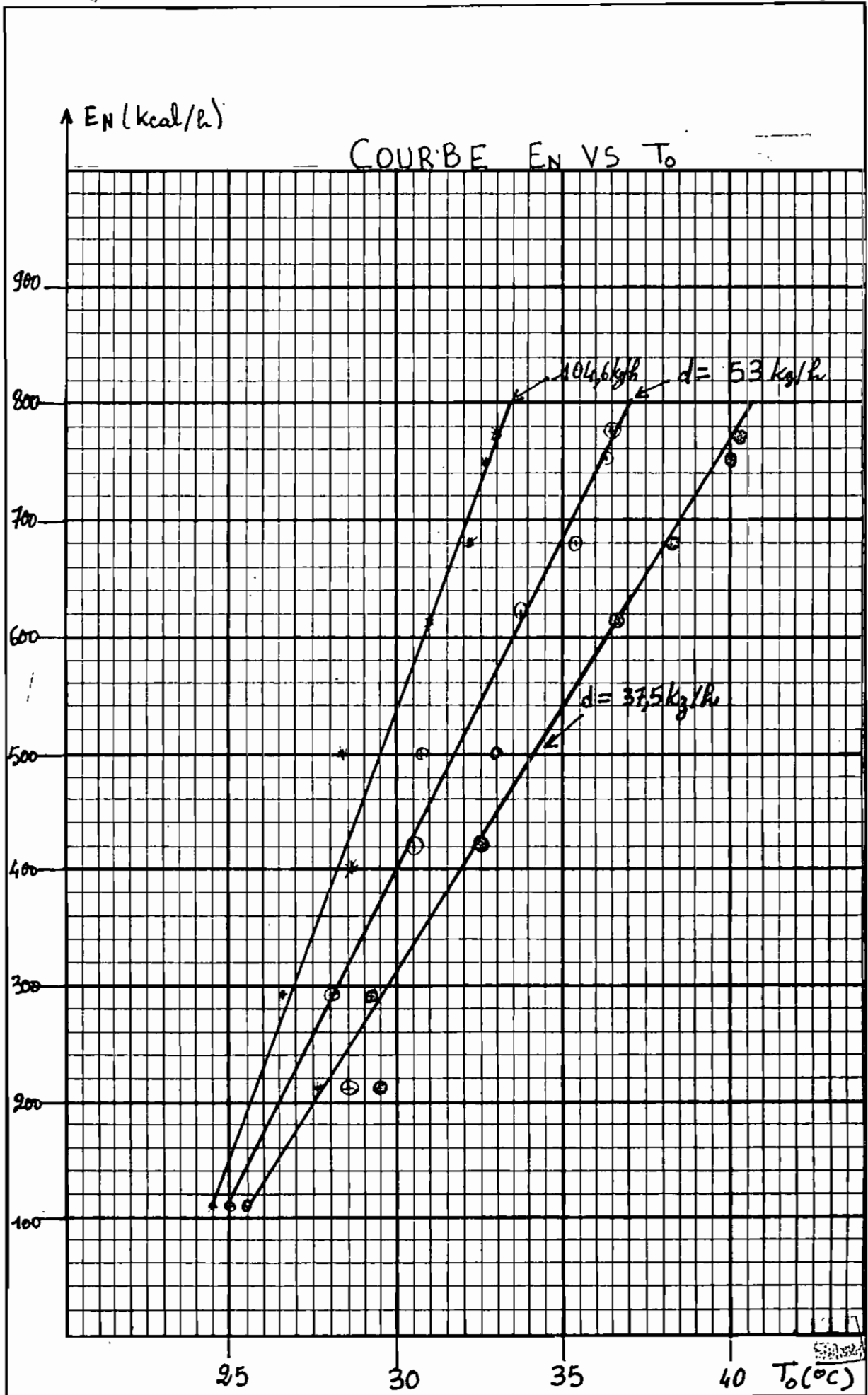
$$k = \frac{q_s^-}{(T_m - T_a)} (c_d - y) = \frac{752,5}{34,5 - 29} (0,80688 - 0,5167) = 39,4 \text{ kcal/h}^\circ\text{C}$$

heures	E (mv)	$\alpha$	$E_N$ (kcal/h)	$T_i$ (°C)	d (kg/h)	$T_0$ (°C)	$T_{air}$ (°C)	P (kcal/h)	$\eta\%$	$T_m$ (°C)	K (kcal/h °C)
8	2,7	0,5	111,6	24	35,7	25,5	27	53,028	47,516	26,75	8,71
					53	25	27	52,47	47	24,5	8,35
					104,6	24,5	26,5	51,768	46,4	24,25	8,06
9	5	0,707	292	25,3	35,7	29,2	35	137,887	47,21	27,25	59,86
					53	27,9	32	136,622	46,7	26,6	41,35
					104,6	26,6	29	134,62	46,1	25,95	33,11
10	7	0,866	500,4	26	35,7	33	42	246,6	49,44	29,5	312,73
					53	30,7	37,4	427,392	49,28	28,35	241,8
					104,6	28,4	32,8	248,53	49,67	27,9	86,23
11	8,5	0,966	678,6	29	35,7	38,5	50	335,808	49,5	33,75	44,56
					53	35,4	44	331,38	49,5	32,2	66,14
					104,6	32,2	37,4	335,772	48,83	30,6	135,11
12	9,3	1	768,6	29,5	35,7	40,3	53	467,2	49,66	34,9	40,48
					53	36,5	47	367,2	47,8	33	63,9
					104,6	33	38,6	362,44	47,16	31	128,85
13	9,5	0,966	750,49	29	35,7	40	52,8	388,8	51,82	34,5	39,4
					53	36,4	45,8	388,3	51,75	32,7	58,7
					104,6	32,8	38,5	393,5	52,45	30,9	111,58
14	8,6	0,866	615,5	28	35,7	36,6	47	303,95	49,374	32,3	58,4
					53	33,8	42	304,326	49,436	30,9	101,24
					104,6	31	34	310,68	50,46	29,5	37,21
15	7,2	0,707	420,843	27	35,7	32,5	40	194,4	46,15	29,75	193,8
					53	30,5	36,4	183,6	43,6	28,75	624,3
					104,6	28,6	32,5	165,672	39,34	27,8	165
16	5,15	0,5	212,76	27	35,7	29,5	34	88,344	41,53	28,25	111
					53	28,5	32	78,696	37	27,75	74,36
					104,6	27,7	30,5	72,468	34	27,35	56,33

$\eta_{moy} = 47\%$

Journée : Lundi 28-3-82

$k_{moy} = 105,5 \text{ kcal/h } ^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2$



Calcul du débit efficace.

$$\dot{m} = K(1 - E\%) / E\% \times 2 \times \rho \times C_p$$

où  $E\% = \frac{(\eta_0 - \eta)}{\eta_0} 100\%$

$\eta_0$  est le rendement au débit infini (voir démonstration dans le rapport de A.A. Seydi pages 25, 26, 27)

nous admettons  $E\% = 50\%$

$$\begin{aligned} \dot{m} &= 105,5 (1 - 0,5) 2 \times 0,5 \times 0,998 \times 0,999 \\ &= 53,3 \text{ kg/h m}^2 \end{aligned}$$

Si la surface de captage est  $1 \text{ m}^2$   $\dot{m} = 53,3 \text{ kg/h}$

Influence de l'inclinaison

Il s'agit de faire varier l'angle d'inclinaison du capteur à débit constant. Comme la précédente, cette manipulation se fait en circuit ouvert (sans connecter le capteur au ballon de stockage)

## CALCULS ET RESULTATS

(Voir tableau page )

Exemple de calcul

à 13h  $\delta = -1,9^\circ$  (Hors)  $AH = 15^\circ$  (Thiès)

$$h = 67,5^\circ \quad a = 42,54^\circ$$

pour  $i = 15^\circ$   $\alpha = 0,966$

$$E_N = \alpha E$$

$$E = 9,14 \text{ mV} \left( 105 \text{ mV} \rightarrow \frac{1 \text{ W}}{\text{cm}^2} \right)$$

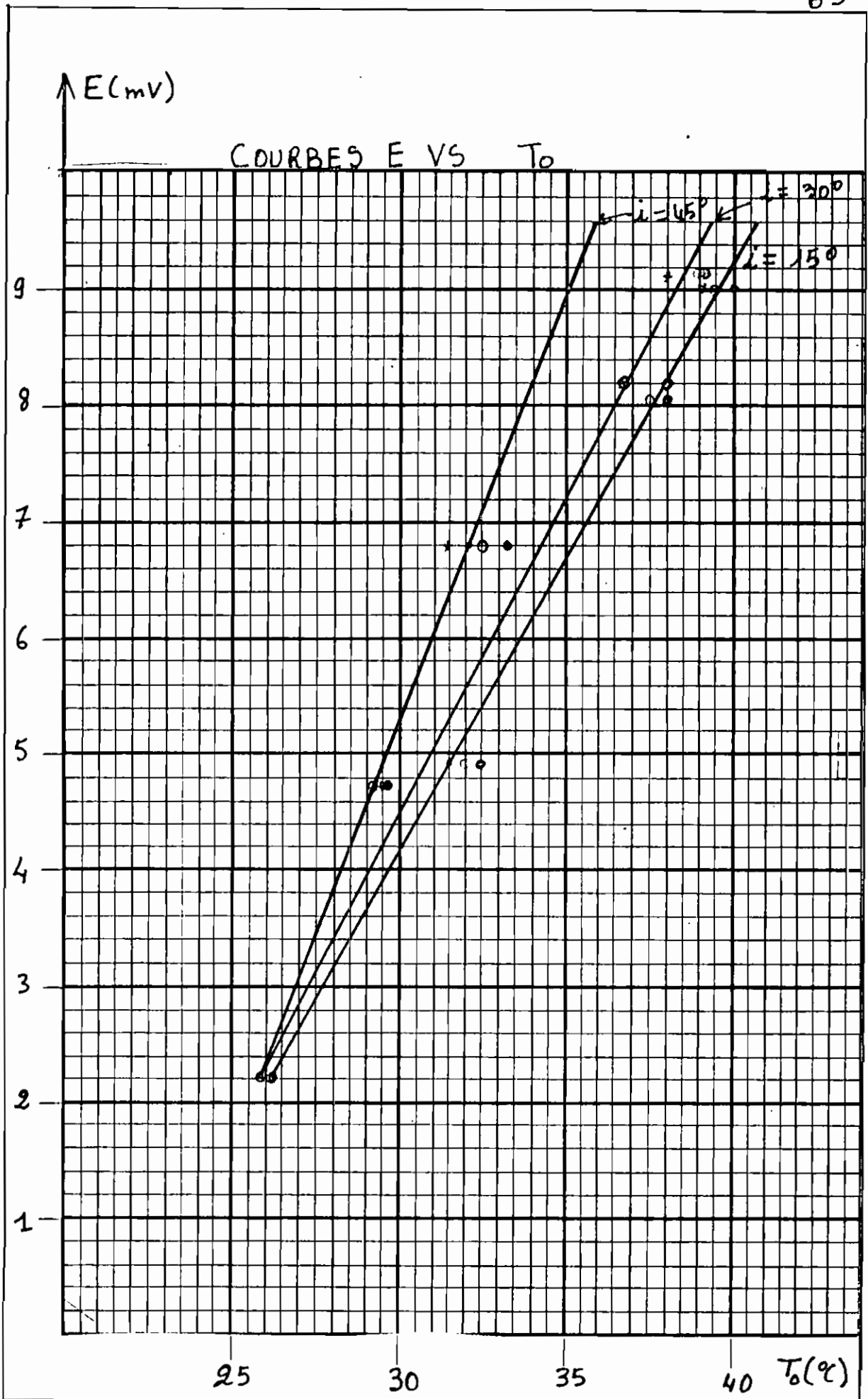
$$= \frac{9,14 \cdot 10^4}{105 \times 4180} \times 3600 = 750 \text{ kcal/h}$$

$$E_N = q_s^- = 0,966 \times 750 = 724,5 \text{ kcal/h}$$

$$Q = 0,998 \times 0,999 \times 35,7 (39,2 - 29) = 360,5 \text{ kcal/h}$$

$$\eta = \frac{Q}{Q_s^-} = \frac{360,5}{724,5} = 49,76\%$$

heures	E (mv)	T <sub>i</sub> (°C)	i (b)	$\alpha$	E <sub>N</sub> (kcal/h)	T <sub>o</sub> (°C)	T <sub>int</sub> (°C)	P (kcal/h)	η %
8	2,2	25	15	0,5	90,9	26,1	29,6	38,88	42,77
			30	0,491	89,352	26,1	29,4	38,88	43,51
			45	0,4493	81,72	25,9	29	32,148	39,32
9	4,7	26	15	0,707	274,608	29,6	35,2	127,08	46,33
			30	0,691	268,6	29,5	35	123,7	46,03
			45	0,63	244,26	29,2	35	114,228	46,77
10	6,8	26,5	15	0,866	496,44	33,2	42,5	239,184	48,18
			30	0,845	474,84	32,5	40,5	212,04	44,66
			45	0,7665	430,92	32,1	40	199,8	46,39
11	8,2	29	15	0,966	654,92	38	49	318,29	48,6
			30	0,941	637,92	36,8	47,2	278,46	48,16
			45	0,853	578,16	36,7	47,1	272,141	47,07
12	9	30	15	1	743,76	40	52	353,44	47,52
			30	0,974	724,68	39,5	51	335,88	46,63
			45	0,882	656,28	39,2	50,4	325,08	49,54
13	9,14	29	15	0,966	730	39,2	51,4	360,36	49,35
			30	0,941	711,1	38,9	50,8	349,92	49,14
			45	0,853	644,6	38	49	318,24	49,37
14	8,3	28	15	0,866	594,28	38	48	282,744	47,6
			30	0,845	579,87	37,5	47	264,96	45,7
			45	0,7664	526	37	46	247,32	47
15	6,8	27	15	0,707	397,5	32,2	39	183,78	46,24
			30	0,691	388,494	32	39	176,76	45,5
			45	0,63	353,412	31,5	38,7	159,12	45,02
16	4,9	26	15	0,5	202,428	28,5	37	88,2	43,65
			30	0,491	199	28	35	70,668	35,52
			45	0,4493	182,052	27,5	34	53,028	29,12
Journée : Mardi 29-3-82 d = 35,7 kg/l      η <sub>moy</sub> = 49,15 %									





# CHAPITRE IV

## INSTALLATION CAPTEUR - BAE

### LON DE STOCKAGE

#### 1 LES DIFFERENTS TYPES

Les installations se différencient par leur mode de circulation (circulation naturelle dite thermosiphon, circulation forcée), par le type de régulation, par le type d'appoint et sa position.

Dans tous les cas, une installation de production d'eau chaude sanitaire relative comprendra des capteurs solaires reliés à un réservoir de stockage de l'eau chaude. Ce réservoir sera calorifugé de façon que l'eau chaude qu'il contient se refroidisse le moins possible.

#### 1-1 TYPE DE CIRCULATION

Pour obtenir le débit voulu on peut utiliser deux moyens principaux : une pompe de circulation, un thermosiphon.

Dans le premier cas il faut employer une pompe capable d'assurer le débit voulu compte tenu des pertes de charge du système de circulation. Un thermosiphon peut fonctionner si l'on dispose d'un fluide de travail froid ( $250^{\circ}\text{C}$ ) à un niveau un peu plus élevé que celui du capteur solaire. Le thermosiphon constitue un moyen bien adapté d'assurer une circulation sans moyens mécaniques et sans besoins en énergie.

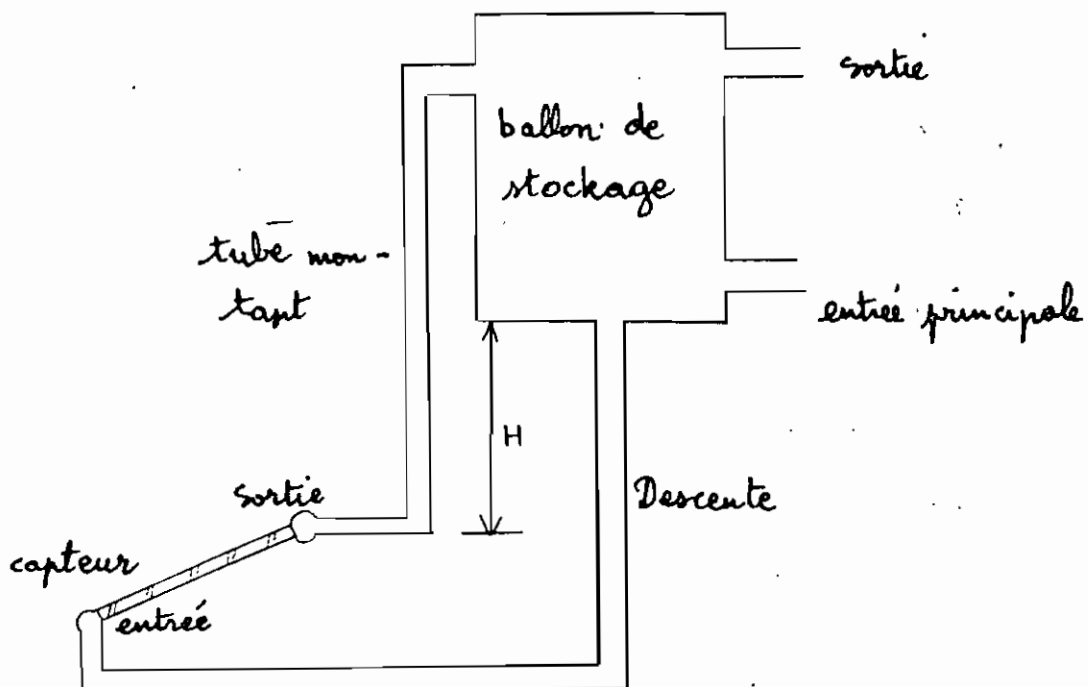
#### SYSTEMES à circuits ouverts ou fermés

Que l'on utilise une pompe ou un thermosiphon, le fluide de travail peut circuler dans un système ouvert ou fermé. Dans un circuit ouvert, le fluide de travail est le fluide que l'on desire chauffer. Dans un système fermé, le fluide circule dans une boucle fermée et ne se mélange pas avec le fluide que l'on doit

chauffer

### Thermosiphon

La pression  $\Delta P$  nécessaire pour assurer le débit  $m$  est fournie par l'accélération de la pesanteur  $g$  agissant sur la différence de masse volumique  $\rho_f - \rho_{ch}$  entre le fluide froid de la canalisation descendante et le fluide chaud de la canalisation montante sur la hauteur  $H$ .



### Thermosiphon ouvert

$$\Delta P(m) = (\rho_f - \rho_{ch}) g H$$

La relation  $\Delta p(m)$  est fortement influencée, par la section et la longueur des canalisations, la rugosité des parois, la progressivité des changements de section, le rayon de courbure des coudes etc --

La relation perte de charge - écoulement est donnée par les relations :

$$\Delta P = \left( f \frac{L}{D} + k_i + k_o \right) \frac{1}{2} \rho v^2$$

$$f = f(Re) \quad (= 64/Re, Re < 2300) \quad Re = vD/\nu$$

$$\dot{m} = \rho v (\pi D^2 / 4)$$

où  $f$  est le coefficient de frottement  $K_i$  et  $K_o$  les coefficients de pertes respectivement à l'entrée et à la sortie,  $\rho$  est la masse volumique  $Re$  est le nombre de Reynolds et  $\nu$  la viscosité cinématique. Prenons  $4H = 1\text{ m}$ ,  $(\rho_f - \rho_{ch})$  correspond à la différence de masse volumique de l'eau entre les températures  $T_f (= 25^\circ\text{C})$  et  $T_{ch}$  (soit  $45^\circ\text{C}$ )

$$\rho(25^\circ\text{C}) = 0,996 \text{ kg/dm}^3 = 996 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho(45^\circ\text{C}) = 0,989 \text{ kg/dm}^3 = 989 \text{ kg/m}^3$$

$$4\Delta P = (996 - 989) \times 9,81 \times 1 = 68,67 \text{ N/m}^2$$

L'équation de  $\Delta P$  donne alors la pression nécessaire qui ne doit pas être supérieure à la pression disponible.

La valeur moyenne  $\rho = 992,5 \text{ kg/m}^3$   $\nu = 0,695 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{sec}}$   
 $K_i = 0,5$   $K_o = 1$   $= 2,502 \cdot 10^3 \frac{\text{m}^2}{\text{h}}$

$L$  = la longueur du tube, prenons  $1\text{ m}$

soit un écoulement laminaire  $f = 64/Re$

$$\Delta P = \left( f \frac{L}{D} + K_i + K_o \right) \frac{1}{2} \rho v^2 = 17,17 \text{ N/m}^2$$

$$= \left( \frac{64 L}{Re D} + K_i + K_o \right) \frac{1}{2} \rho \left[ \frac{\dot{m}}{\rho (\pi D^2 / 4)} \right]^2$$

$$= \left( \frac{64 L \nu}{\frac{\dot{m}}{\rho (\pi D^2 / 4)} D^2} + K_i + K_o \right) \frac{\rho}{2} \left( \frac{\dot{m}^2}{(\pi D^2)^2} \right)$$

$$\text{ou} = \left( \frac{64 L \nu \pi \rho}{4 \dot{m}} + K_o + K_i \right) \frac{1}{2} \rho v^2 = \Delta P$$

avec le débit efficace de  $\dot{m} = 53,3 \text{ kg/h}$

$$\left( \frac{64 \times 2,502 \cdot 10^3 \times \pi \times 992,5}{4 \times 53,3} + 1,5 \right) \frac{1}{2} v^2 \times 992,5 = 17,17$$

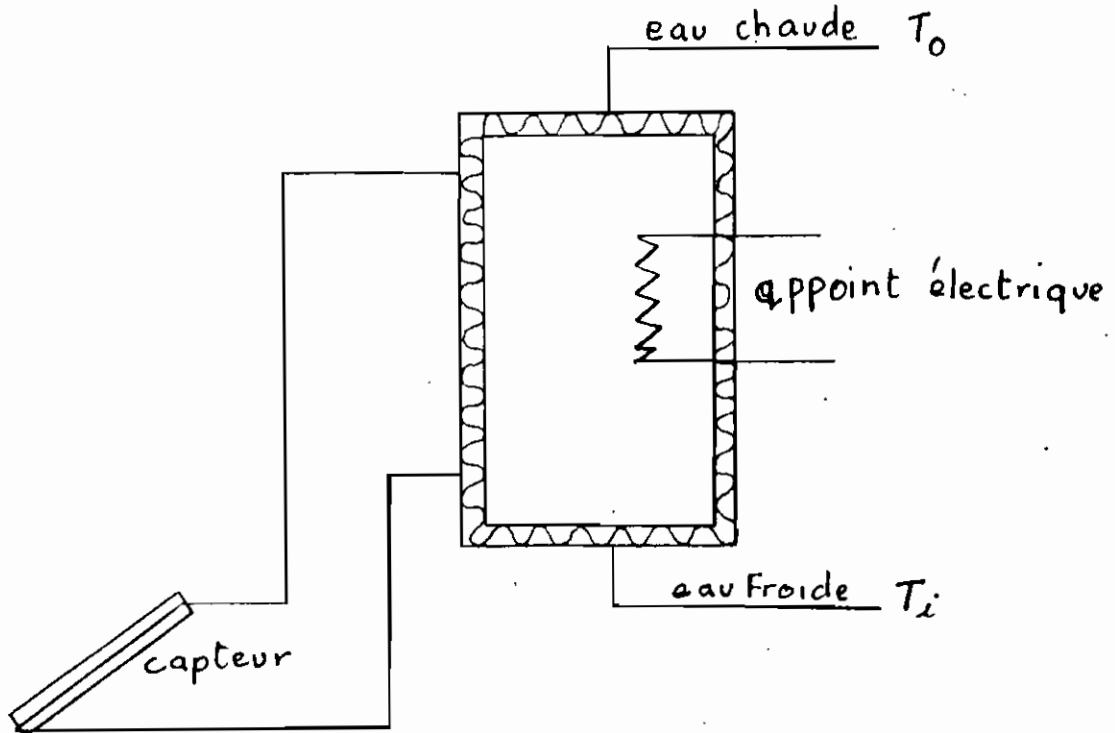
$$v = 0,095 \text{ m/sec} \quad D = \text{diamètre du tuyau} = 14,15 \text{ mm}$$

## 1-2 STOCKAGE ET LA PLACE DE L'APPOINT

Comme nous l'avons déjà dit, le soleil est capricieux, il se fait parfois attendre. Ainsi une énergie d'appoint (combustible ou électrique) est indispensable. Pour effectuer ce complément, plusieurs solutions sont envisageables.

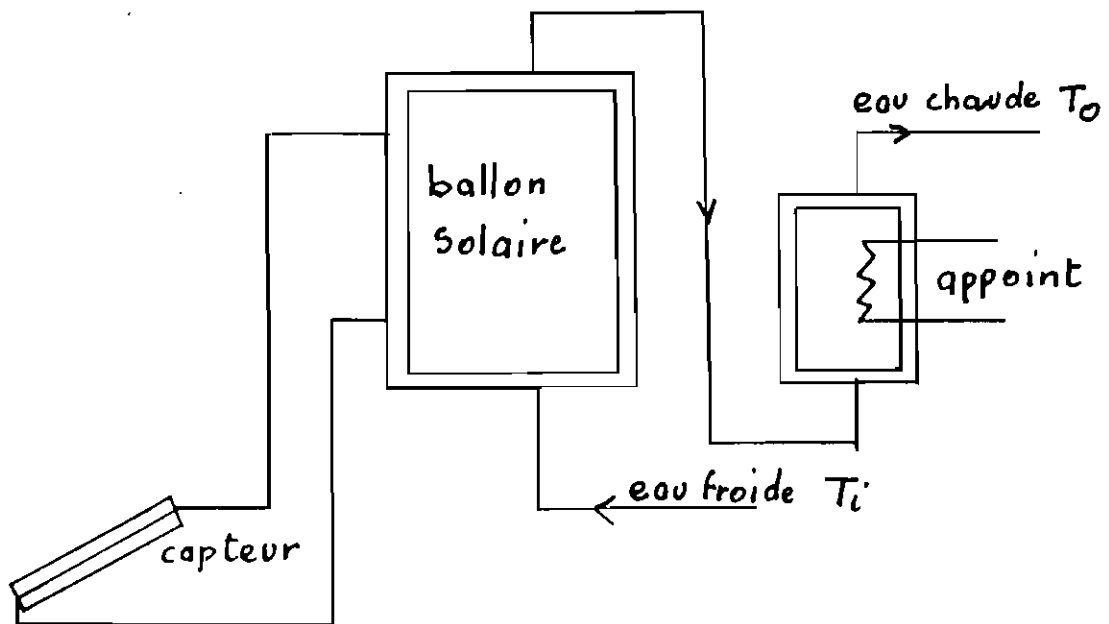
### 1-2-1 Energie solaire et énergie d'appoint dans un même ballon :

C'est la solution qui paraît la plus séduisante parce qu'à priori la moins onéreuse (c'est la solution retenue). Ici l'appoint réchauffe plus ou moins la partie basse du ballon. Cela limite le rendement des capteurs qui ne fonctionnent que lorsqu'ils dépassent la température du bas du ballon, artificiellement relevée.

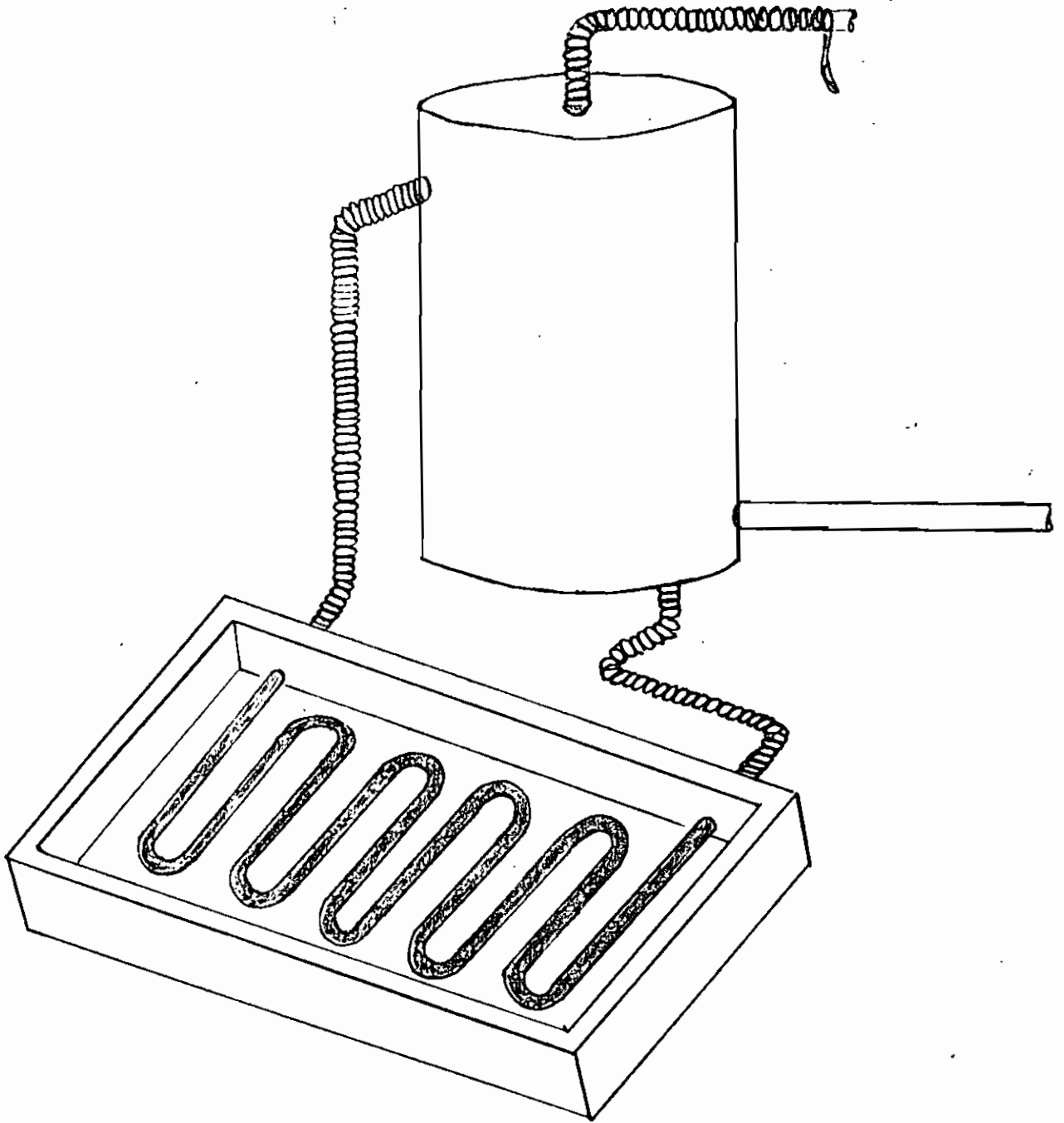


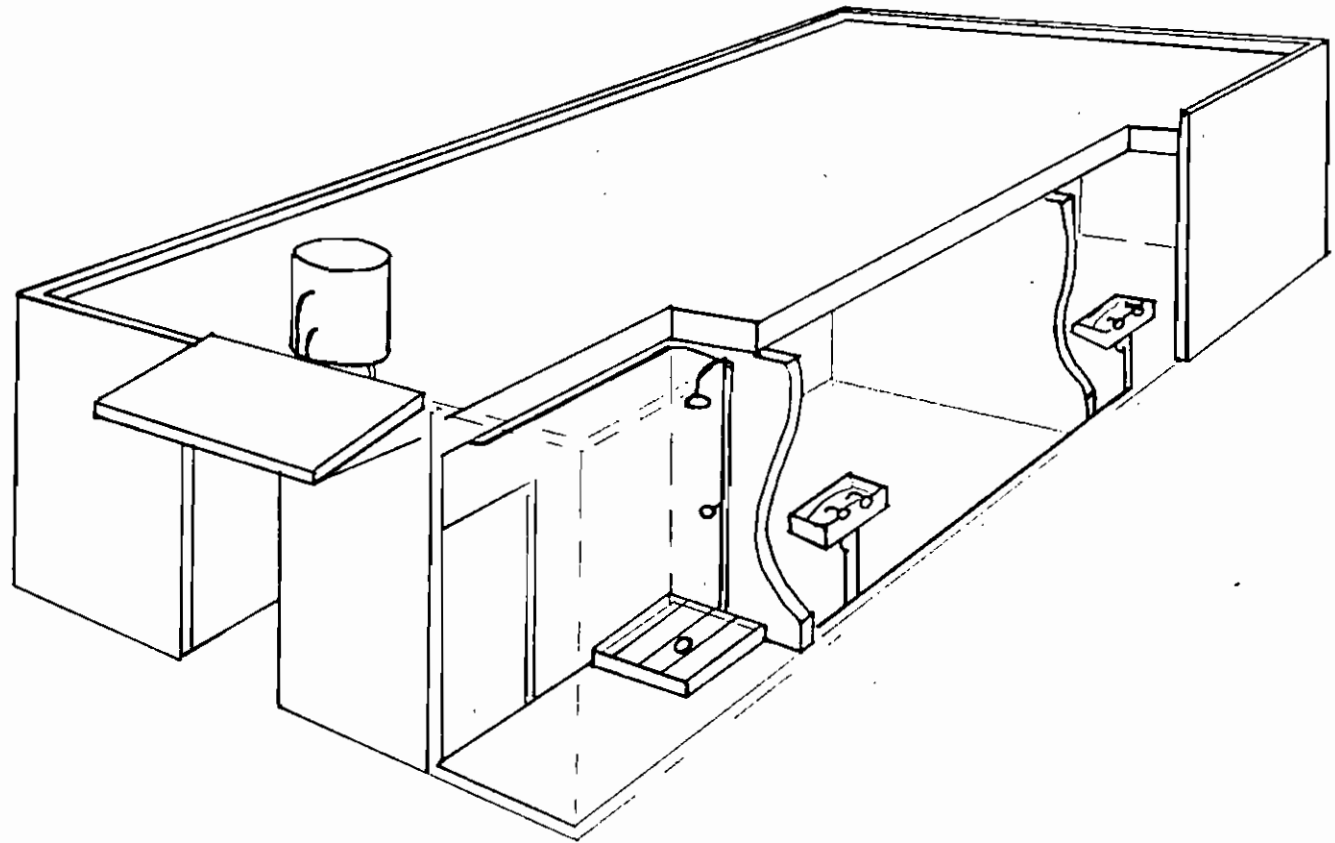
### 1-2-2 Energie solaire et énergie d'appoint dans deux ballons séparés

C'est la solution techniquement satisfaisante. Aucune perturbation ne vient entraver la récupération de l'énergie solaire. De plus si l'eau solaire ne traverse plus le ballon d'appoint dès que la température est suffisante, on ajoute encore aux économies les pertes de ce ballon d'appoint. Cette technique impose que le temps de réchauffage du ballon d'appoint soit très court. Ceci ne pose aucun problème avec le fuel ou le gaz.



# Schéma d'installation





IMPLANTATION DU SYSTEME

## 2 ETUDE EXPERIMENTALE DU SYSTEME

Dans cette partie, il s'agit de connecter le capteur au ballon de stockage. L'inclinaison optimale et le débit efficace étant déterminés au chapitre précédent, nous ferons ensuite fonctionner le système électrique afin de pouvoir faire des comparaisons.

### MATERIELS

- 1 Solarimetre Pana-Visé Metermater RH
- 1 Multimètre Avomètre EM 272 N° 184288
- 1 Potentiomètre Cropicotype P<sub>6</sub>
- 1 capteur solaire 1,25 × 0,8 m<sup>2</sup>
- 1 ballon de stockage 273 l, 3000 W
- 1 Compteur monophasé type A52 N° 016349
- 1 Débitmètre + 1 chromomètre

### SYMBOLES ET EQUATIONS

$E$  : apports solaires (mV)

$E_N$  ou  $q_s^-$  apports solaires normaux (Kcal/h.m<sup>2</sup>)

$E_{abs}$  ou  $q_{abs}^-$  chaleur absorbée (Kcal/h.m<sup>2</sup>) par le système

$T_i$  : température d'entrée (°C)

$T_o$  : température de sortie (°C)

$T_{int}$  = Température interne ou température de l'absorbant.

$T_a$  : température ambiante (°C)

$k$  = conductivité thermique (Kcal/h.m.°C)

$e$  = épaisseur (m)

$d$  ou  $m$  : débit massique (kg/h)



$q_c$ : pertes par convection ( $\text{kcal/h m}^2$ )  
 $q_k$ : pertes par conduction ( $\text{kcal/h m}^2$ )  
 $q_R$ : pertes par réémission du rayonnement  
 $P$ : quantité de chaleur absorbée par l'eau ( $\text{kcal/h}$ ).

$$E_N = \alpha E$$

$$P = m \rho c (T_o - T_i)$$

$$q_c = \left( \frac{k_{\text{air}}}{e_a} \right) (T_{\text{int}} - T_a) \quad e_{\text{air}} = 48,1 \text{ mm}$$

$$k_{\text{air en}} (\text{kcal/h m } ^\circ\text{C})$$

$$q_k = \left( \frac{k_{\text{isolant}}}{e_i} \right) (T_{\text{int}} - T_a) \quad e_{\text{isolant}} = 39,2 \text{ mm}$$

$$k_{\text{isolant}} = 0,024 \text{ kcal/h m } ^\circ\text{C}$$

$$q_R = \frac{\sigma (T_{\text{int}}^4 - T_a^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$$

$$\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4 = 4,983 \cdot 10^{-8} \text{ kcal/h m}^2 \text{ K}^4$$

$$\epsilon_1 = 0,9 \quad \epsilon_2 = 0,8$$

## CALCULS ET RESULTATS

a) Système solaire

Exemple de calcul

$$\text{à } 10 \text{ h} \quad E = 9,8 \text{ MJ} = 803,83 \text{ kcal/h}$$

$$AH = -30^\circ \quad h = 61,075 \quad a = -77,97 \quad \alpha = 0,8715$$

$$E_N = q_s^- = 0,8715 \times 803,83 = 700,54 \text{ kcal/h}$$

$$P = m \rho c_p (t_o - t_i) = 53,3 \times 0,9945 \times 0,9989 (34,6 - 27,5)$$

$$= 375,8 \text{ kcal/h}$$

$$\eta = \frac{P}{q_s^-} = \frac{375,8}{700,54} = 53,66 \%$$

Calcul des pertes.

$$q_c = \left( \frac{k}{e} \right)_{\text{air}} (T_{\text{int}} - T_a) = \frac{0,02397}{0,0481} (48 - 27,5) = 10,216 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

mit: 1,5%

## TABLEAU DES RESULTATS

heures	E(mv)	$\alpha_i$	$E_N$ (kcal/h)	$q_{obs}$ (kcal/h)	$T_i$ (°K)	$T_0$ (°K)	P(kcal/h)	$\eta\%$
8	5,6	0,57	262,565	211,86	299	301,5	132,615	50,5
9	7,6	0,74	462,11	372,88	300	304,5	238,452	51,6
10	9,8	0,87	700,553	565,3	300,5	307,6	375,75	53,66
11	11,3	0,95	883,648	713	302	311	476,5	53,92
12	11,6	0,98	933,67	753,4	303,5	313,1	508,3	54,44
13	11,8	0,95	922,77	744,58	304	313,7	513,6	55,65
14	11,5	0,87	820,642	662,176	303	311,6	455,355	55,49
15	11,2	0,74	679,808	548,537	301,5	308	344,163	50,63
16	10,3	0,57	481,558	388,67	301	305,7	248,857	51,68

(Mercredi 19-5-82)  $\dot{m} = 53,3 \text{ kg/h}$   $Nu = 21$   $\eta_{\text{moy}} = 53,06\%$   
 (Suite)  $i = 150$   $\hat{c}d = 0,8069$

heures	$T_{int}$ (°K)	$T_a$ (°K)	$k_{air}$ (kcal/h m °C)	$q_c$ (kcal/h)	$q_k$ (kcal/h)	$q_R$ (kcal/h)
8	305	298	0,02293	70,08	4,286	27,534
9	312	300	0,02338	122,493	7,367	49,36
10	321	300,5	0,02397	214,536	12,551	88,37
11	329	303	0,02449	278	15,918	117,93
12	336	305	0,02495	337,68	18,98	146,796
13	342	305,2	0,02534	407,127	22,306	179,526
14	339	305	0,02497	370,657	20,816	163,3458
15	335	303	0,02462	343,963	19,592	149,44
16	320	302	0,02403	188,843	11,0205	77,762

$K_{isolant} = 0,024 \text{ kcal/h m } ^\circ\text{C}$  épaisseur isolant = 39,2 mm

$$q_k = \left(\frac{k_e}{e}\right)_{\text{indat}} (T_{\text{int}} - T_a) = \left(\frac{0,024}{0,0392}\right) (48 - 27,5) = 12,551 \text{ kcal/h}$$

soit 1,79%

$$q_R = \frac{\sigma(T_{\text{int}}^4 - T_a^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} = \frac{3,5875(321^4 - 300,5^4)}{1 + 1 - 1} = 88,371 \text{ kcal/h}$$

soit 12,61%

Pour équilibrer prenons  $Nu = 21$   $q_c = 10,216 \times 21 = 214,536 \text{ kcal/h}$  soit 31,5%

$$q_{\text{abs}} = \epsilon_d \times E_N = 0,8069 \times 700,553 = 565,276$$

### b) Système électrique

Dans cette expérience aussi on travaille avec le même débit efficace 53,3 kg/h. Le volume du ballon de stockage est 273 l et les mesures sont prises à partir de 10 heures et toutes les 2 minutes

#### Calculs Préliminaires

Il faut noter que la phase II de l'E.P.T comporte 21 lavabos et 8 éviers soit une consommation probable de :

$$Q = 21 \times 0,99 \times (35 - 27) + 8 \times 0,99 \times (65 - 27)$$

$$= 166,32 + 300,96 = 467,28 \text{ kcal/h}$$

35°C étant la température d'utilisation d'un lavabo

65°C - - - - - évier

27°C - - - - - de l'eau froide

$$0,99 = \rho \cdot c_p$$

### CALCULS ET RESULTATS

Exemple de calcul

à 10h 06  $T = 36^\circ\text{C}$   $Q_{\text{lue}} = 3,75 \text{ kWh}$  soit  $13,5 \cdot 10^6 \text{ J}$

$$(1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}) \quad \rho = 0,9945 \text{ kg/dm}^3 \quad c_p = 4200 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

$$Q = V \rho c (T - 27) = 273 \times 0,9945 \times 4200 (36 - 27)$$

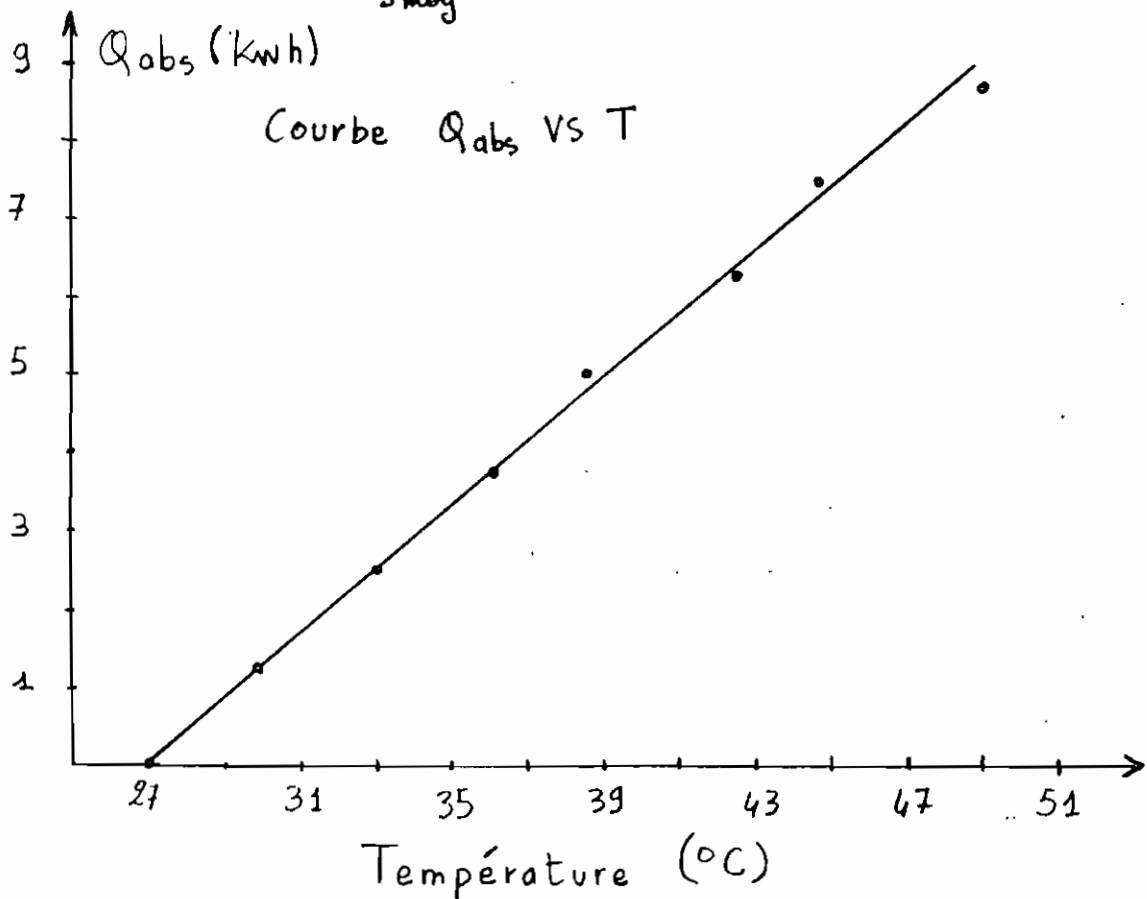
$$= 10,26 \cdot 10^6 \text{ J} \quad \eta = \frac{10,26}{13,5} = 76\%$$

## TABLEAU DES RESULTATS

heure	T(°C)	Q (10 <sup>6</sup> J)	Q <sub>abs</sub> (kWh)	Q <sub>abs</sub> (10 <sup>6</sup> J)	η %
10h 00	27	0	0	0	∞
10h 02	29,8	3,193	1,25	4,5	70,95
10h 04	33	6,84	2,5	9	76
10h 06	36	10,26	3,75	13,5	76
10h 08	38,5	13,113	5	18	72,85
10h 10	42,5	17,67	6,25	22,5	78,537
10h 12	44,7	20,179	7,5	27	74,736
10h 14	49	25,081	8,75	31,5	79,62

$$Q_{abs} = Q_{(the)}$$

$$\eta_{moy} = 75,53 \%$$



### c) Système entier

Dans cette partie on fait fonctionner le système en entier (système solaire + système électrique) au même débit efficace et à la même inclinaison de  $15^\circ$

### CALCULS ET RESULTATS

Exemple de calcul

$$\text{à } 12\text{h} \quad E = 11,7 \text{ mV} \quad AH = 0^\circ$$

$$\text{Pour le mois de Juin } \delta = 23,1^\circ \quad \phi = 15^\circ \quad i = 15^\circ$$

$$m = 53,3 \text{ kg/h}$$

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

$$h = 81,9^\circ$$

$$\sin a = \frac{\cos \delta \sin AH}{\cos h} = 0 \quad a = 0$$

$$d = \sin h \cos i + \cos h \cos a \sin i = 0,99276$$

$$E \text{ (kcal/h)} = \frac{11,7 \times 3600}{4180 \times 105 \cdot 10^4} = 959,6719 \text{ kcal/h}$$

$$E_N = dE = 952,723882 \text{ kcal/h}$$

$$T_i = 46^\circ\text{C} \quad T_o = 55,8^\circ\text{C} \quad \rho_c = 0,9934$$

$$P = \rho_c m (T_o - T_i) = 0,9934 \times 53,3 (55,8 - 46) \\ = 518,892556 \text{ kcal/h}$$

$$y = \frac{P}{E_N} = \frac{518,892556}{952,723882} = 54,46 \%$$

$$Q_{\text{abs}} = 6 \text{ kWh (électricité)}$$

TABLEAU DES RESULTATS								
heures	E(mV)	$\alpha$	EN(kcal/h)	Q <sub>abs</sub> kWh	T <sub>i</sub> (°C)	T <sub>o</sub> (°C)	P.(kcal/h)	$\eta$ %
8	5,3	0,5945	258,443	0	28,5	30,8	120,977	46,81
9	7,8	0,7594	485,85	1,5	34	39	264,741	54,49
10	9,6	0,886	697,657	3	38	45,9	418,291	59,956
11	11,5	0,9656	910,819	4,5	43	53,3	545,367	59,876
12	11,7	0,99276	952,724	6	46	55,8	518,892	54,46
13	11,9	0,9656	942,5	7,5	48	57,5	503,008	53,37
14	11,6	0,886	843	9	44,8	57	645,968	76,627
15	11,3	0,7594	703,859	10,5	43,5	54	555,956	78,987
16	10,1	0,5945	492,504	12	37	42,5	291,215	59,13
17	9,8	0,4023	323,38	13,5	36	39,5	185,3187	57,3
18	7,2	0,1962	115,8593	15	32,6	33,8	63,5378	54,84

Dimanche (6-6-82)

$S = 23,1^\circ$  pour le mois de Juin

$m = 53,3 \text{ kg/h}$

$i = 15^\circ$

$\eta_{\text{moy}} = 59,62\%$

## CHAPITRE V

### ANALYSE ECONOMIQUE

L'examen des qualités économiques d'une installation solaire requiert de définir deux grandeurs :

- Le surcoût solaire

C'est la différence entre le coût de l'installation solaire et celui de l'installation « classique » qui aurait rendu le même service. Il est intéressant de calculer le surcoût solaire par mètre carré de capteur pour le comparer à la productivité.

- La production solaire réelle

C'est la quantité d'énergie solaire réellement utilisée. On la divisera de même par le nombre de mètres carrés de capteurs de l'installation. A l'échelle d'un continent, où les conditions climatiques et économiques varient dans d'énormes proportions, il est difficile de donner des prix de capteurs solaires installés pour la production d'eau chaude sanitaire. Par contre, on sait qu'un capteur de  $1 \text{ m}^2$  peut fournir entre 600 et 1200 kWh par an à l'utilisation.

La détermination du surcoût solaire et de la production réelle permettra de définir le prix du kWh solaire, dès l'instant où nous fixerons une hypothèse d'amortissement pour le surcoût solaire (taux et durée). Ce prix peut naturellement être comparé à celui du kWh d'origine classique (électrique) (pris au même sens).

### 1. OPTIMISATION

Comme nous l'avons dit dans le sommaire, l'optimisation consiste à faire varier les paramètres de conception pour aboutir à un

rapport coût-avantage minimal.

Exemple si l'on augmente  $W$ , l'efficacité d'ailette  $\eta_f$  et le rendement  $\eta$  diminuent, de sorte que les dimensions du capteur doivent augmenter pour satisfaire aux besoins. Cependant la longueur totale de conduit est moindre, ce qui diminue son coût. Soit  $C_L = 500$  F/CA le coût du mètre carré de conduit installé et  $C_A = 25000$  F le  $m^2$  de capteur et de vitrage sans conduit. La surface nécessaire à la collecte d'une quantité  $Q$  est donnée par :

$$Q = \eta A q_s^- \quad A = Q / \eta q_s^- \quad A = \text{Surface}$$

Le coût <sup>en</sup> capital est

$$C = C_A A + C_L N L$$

$$A = N W L$$

$N$  est le nombre d'ailettes  
 $L$  est la largeur du collecteur  
 $W$  est la largeur de l'ailette

On en tire d'après

$$\eta = \frac{\eta_f [U(T_o - T_i) / q_s^-]}{\text{Log} \left[ 1 + \frac{U(T_o - T_i) / q_s^-}{[a_s T_s (1+a)] - [U(T_o - T_e) / q_s^-]} \right]}$$

$$\eta = \eta_f \eta_o$$

$$C = \frac{Q C_A}{q_s^-} \left[ \frac{1 + (R_{LA} L / W)}{\eta} \right] = \frac{Q C_A}{q_s^- \eta_o} \left[ \frac{1 + (R_{LA} L / W)}{\eta_f} \right]$$

$$R_{LA} = C_L / C_A L$$

Quand  $W$  augmente, le terme  $R_{LA} / W$  diminue mais le coefficient  $1/\eta_f$  augmente. Il existe une valeur optimale de  $W$  qui minimise  $C$ . Le coût en capital est bien entendu lié aux charges annuelles par la relation :

$$C_c = \left[ i + \frac{1}{1 + (1+i) + (1+i)^2 + (1+i)^3 + \dots + (1+i)^{n-1}} \right] C$$

$C_c =$  Coût annuel  $i =$  intérêt  $n =$  nombre d'années.



## Effet de l'espacement des tubes sur la rentabilité'

$$R_{LA}L = 0,02m \quad U = 6W/m^2oc, \quad K_w = 380W/m^oC \quad b = 0,25mm$$

$$W_0 = 0,0254m, \quad \delta = 0,12mm, \quad k_a = 0,4W/m^oC \quad h_i = 170W/m^2oc$$

$$p_i = 0,072mm \quad (\text{Voir page 55 Chapitre II})$$

Espacement des tubes (m)	Efficacite d'ailette	Paramètre de rentabilité'
0,05	0,9712	1,442
0,075	0,9519	1,331
0,1	0,9279	1,293
0,125	0,9002	1,289 (Valeur optimale)
0,15	0,8695	1,303
0,175	0,8369	1,331
0,2	0,8030	1,370
0,225	0,7687	1,417
0,25	0,7346	1,47

Le tableau montre la variation du terme  $\left( \frac{1 + R_{LA}L/W}{\eta_f} \right)$  avec  $W$ . Il faut noter que seul le rapport  $C_L/C_A$  affecte la table, et non les valeurs elles-mêmes. On voit que la valeur optimale de  $W$  est obtenue à partir de paramètres à la fois physiques et économiques. Pour décider si l'on optimise en même temps  $b$  et  $W$ , il faut connaître la manière dont l'épaisseur  $b$  affecte le coût  $C_A$  du capteur, puis établir un tableau analogue

On peut par exemple poser

$$C_A = C_{A0} (1 + R_{AB} (b/b_0))$$

La quantité  $R_{AB}$  est le rapport entre le coût de l'absorbeur et l'épaisseur nominale  $b$  et le coût du tirage, de l'isolation, de la fabrication et de l'installation.

$$R_{LA} = \frac{R_{LA_0}}{1 + R_{AB} b/b_0}$$

effet de l'épaisseur et de l'espacement sur la rentabilité

$$R_{LA_0} = 22m, \quad U = 6 \text{ W/m}^2\text{°C} \quad kw = 380 \text{ W/m}^2\text{°C} \quad W_0 = 25,4mm$$

$$\delta = 0,12 \text{ mm} \quad k_a = 0,4 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

épaisseur (mm)	Paramètre de rentabilité			
	$W = 75mm$	$W = 100mm$	$W = 125mm$	$W = 150mm$
0,15	1,398	1,365	1,371	1,402
0,20	1,404	1,365	1,363	1,384
0,25	1,411	1,369	1,362*	1,376
0,30	1,420	1,375	1,365	1,375
0,35	1,429	1,382	1,370	1,377

\* Valeur optimale.

## 2 COUTS D'INVESTISSEMENT

La comparaison se fera directement entre le système solaire et le système électrique. Si nous nous basons sur les résultats obtenus, le capteur plan peut fournir en moyenne 2,677534 kWh par jour soit 977,3 kWh par an à l'utilisation.

Dans cette partie il n'y aura pas de coûts variables (pompe régulation etc...) car le système choisi est un thermosiphon à système ouvert.

Designation	Quantité	Prix / unité CFA	Coût CFA
Plaque d'acier galvanisé (1mm)	1 m <sup>2</sup>	2600	2600
tube en cuivre $\phi 15$ mm	10 m	1060	10600
tube en fer galvanisé $\phi 15$	2 m	330	660
Coude PVC 90	4	605	2420
Soudure à l'étain	3 baguettes	160	480
Polystyrène extrudé	2,5 m <sup>2</sup>	3445	8612,5
Corde	4 m	30	120
Contre plaque 8 mm	1,4 m <sup>2</sup>	985	1379
Planche Samba	5 m	610	3050
Verre commercial	1,3 m <sup>2</sup>	4415	5740
Peinture noire	0,5 kg	1045	522,5
Mastic	1 bouteille	530	530
Total CAPTEUR = 36715 F			
Réservoir en acier galvanisé	300 l 0,3 m <sup>3</sup>	6850 F/m <sup>3</sup>	2055
Polystyrène extrudé	2,2	3445	7579
Mastic	2 bouteilles	530	1060
Total reservoir = 10694 F			
Main d'œuvre	50 heures	185	9250
Total INSTALLATION = 56659 F			
3 SURCÔT SOLAIRE			
D'après les résultats expérimentaux, le système électrique a un rendement de 75,53% et la production solaire moyenne du capteur modèle est 977,3 kWh/an/m <sup>2</sup>			

Pour un même service :

La production électrique annuelle correspondante est :

$$\frac{\text{kWh/an/m}^2 \text{ solaire} \times 100}{\eta_{\text{électrique}}} = \frac{97,3 \times 100}{75,53}$$

$$= 1293,923 \text{ kWh/an/m}^2$$

Or le kWh électrique coûte 75 F, l'économie annuelle est :

$$1293,923 \times 75 = 97044,225 \text{ F/an}$$

Un ballon électrique de 300 l coûte 62400 F, on peut estimer le coût du chauffe-eau électrique de 273 l à 56800 F.

Le taux d'accroissement annuel du kWh électrique est 6,4%

La durée d'amortissement  $n$  du chauffe-eau électrique peut être supposée à 10 ans :

Le coût variable de l'énergie électrique correspondant au capteur de  $1 \text{ m}^2$  est

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

$$R = 97044,225 \text{ F/an} \quad e = 6,4\% \quad n = 10$$

$$C = 97044,225 \frac{[(1+0,064)^{10} - 1]}{0,064} = 1303404,169 \text{ F}$$

Le coût d'investissement  $C$  solaire étant relativement faible, la possibilité de louer d'argent peut se justifier, soit un remboursement étalé sur un an (12 mois) à un taux  $R$  et un intérêt de 8%

$$C = 56659 = R \frac{[(1+i)^n - 1]}{i} = R \frac{[(1,08)^{12} - 1]}{0,08}$$

$$R = 2985,65 \text{ F/mois}$$

## CHAPITRE VI CONCLUSIONS

L'application de l'eau chaude sanitaire apparaît comme un domaine privilégié de l'énergie solaire tout par l'excellente adaptation de la demande thermique et des possibilités solaires, que par l'existence d'une technologie éprouvée et fiable et par une compétitivité indiscutable dans l'état actuel du marché de l'énergie. Mais pour les raisons à venir, l'énergie nucléaire offre beaucoup d'avantages : - prix de revient compétitif, multiplication aisée des usines de traitement, diminution du risque de détournement à fins militaires de l'uranium pacifique - tout en présentant un double danger : pour la flore et la faune aquatiques tout qui il foudra refroidir les centrales, et pour l'homme en cas de catastrophes accidentelles. Mais aucune énergie traditionnelle (bois, charbon, pétrole) n'est irréprochable, notamment au regard de la pollution ou de l'accroissement de la proportion de gaz carbonique dans l'atmosphère à travers la combustion (cette proportion aura doublé d'ici le milieu du XXI<sup>e</sup> siècle). Le bilan du nucléaire semble positif et toutes les nations vont y recourir. Aux yeux du tiers monde, il assurera l'indépendance énergétique, pour un qui il veillent à éviter les contacts négatifs grâce auxquels les détenteurs de brevets rivaux -

raient de remplacer les actuels propriétaires de gisements

Établi sur la même période, le bilan de l'énergie solaire paraît moins favorable. Sa dispersion, sa discontinuité, la nécessité de recherches longues et onéreuses pour mettre au point les technologies de transformation et de stockage, son coût l'emporte sur son caractère inoffensif pour l'homme et non polluant pour la nature, sur sa disponibilité, sur l'impossibilité de son appropriation et même sur la certitude de voir un jour ces inconvénients surmontés.

Les qualités du solaire étant permanentes et ses défauts contingents il appartient aux responsables politiques d'accélérer les progrès de cette « filière » notamment dans le tiers monde. Ce serait un bon « terrain » pour la coopération internationale que de promouvoir :

- la diffusion rapide des techniques déjà au point en affectant des crédits d'aide extérieure à une production de masse qui réduirait les coûts unitaires.
- l'élaboration urgente de programmes de formation du personnel indispensable au fonctionnement des équipements.
- l'imputation sur fonds publics d'une part plus importante de la recherche qui est surtout actuellement le fait d'investissements privés, ce qui grève leurs prix de revient.
- la participation des chercheurs du tiers monde à un effort qui serait reconnu par l'Université des Nations Unies, comme

prioritaire

- l'adaptation de l'infrastructure industrielle mondiale à une énergie qui ne serait plus distribuée sur grandes distances mais directement produite sur les lieux d'utilisation
- l'analyse et l'évaluation des conséquences économiques et politiques du recours généralisé à une énergie à la fois étrangère à chaque nation et disponible sur tout son territoire

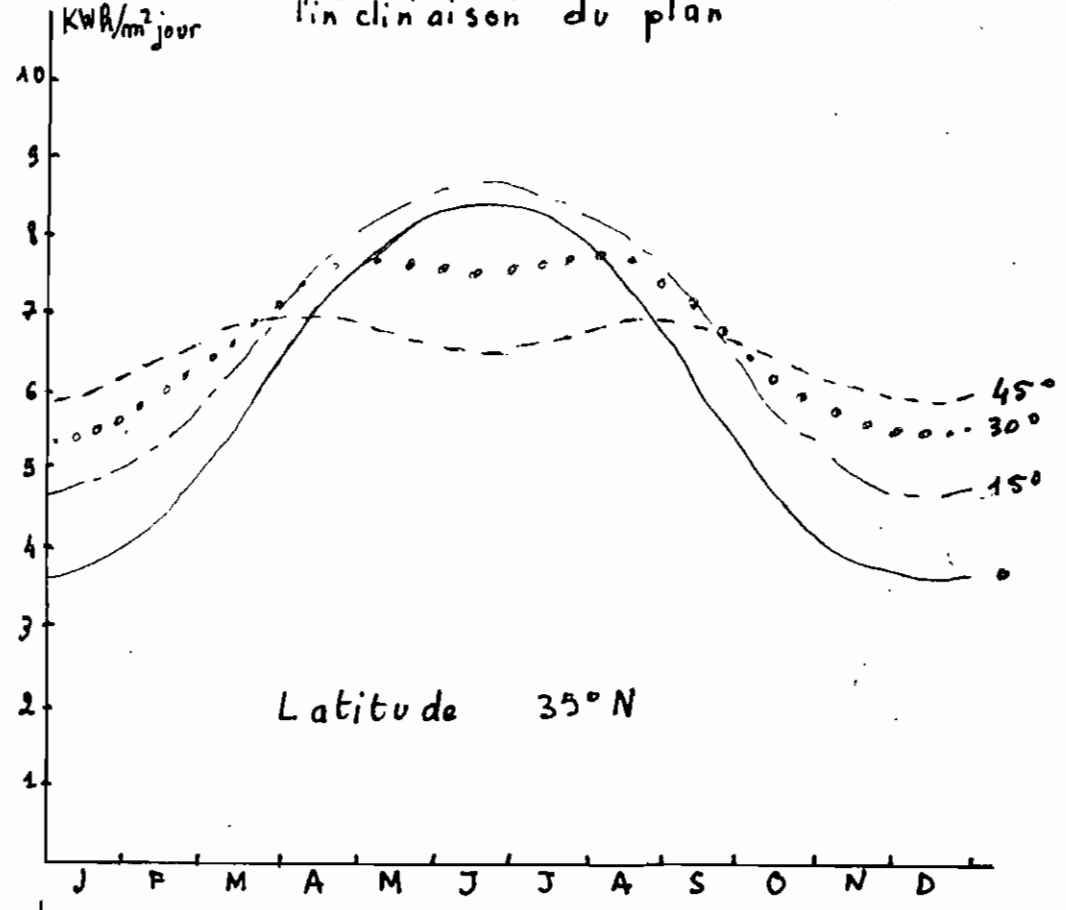
## REFERENCES & BIBLIOGRAPHIES

- MICHEL CHATEAUMINOIS:  
Calcul des installations solaires à eau
- JAN F. KREIDER & FRANK KREITH  
Solar heating and cooling, McGraw-Hill 1975
- J.P. HOLMAN: heat transfer, McGraw-Hill 1976
- D.K EDWARDS: Solar collector design  
Franklin Intitute Press U.S 1977
- COLLECTION DU Comité Français de l'iso-  
lation, Editions Eyrolles

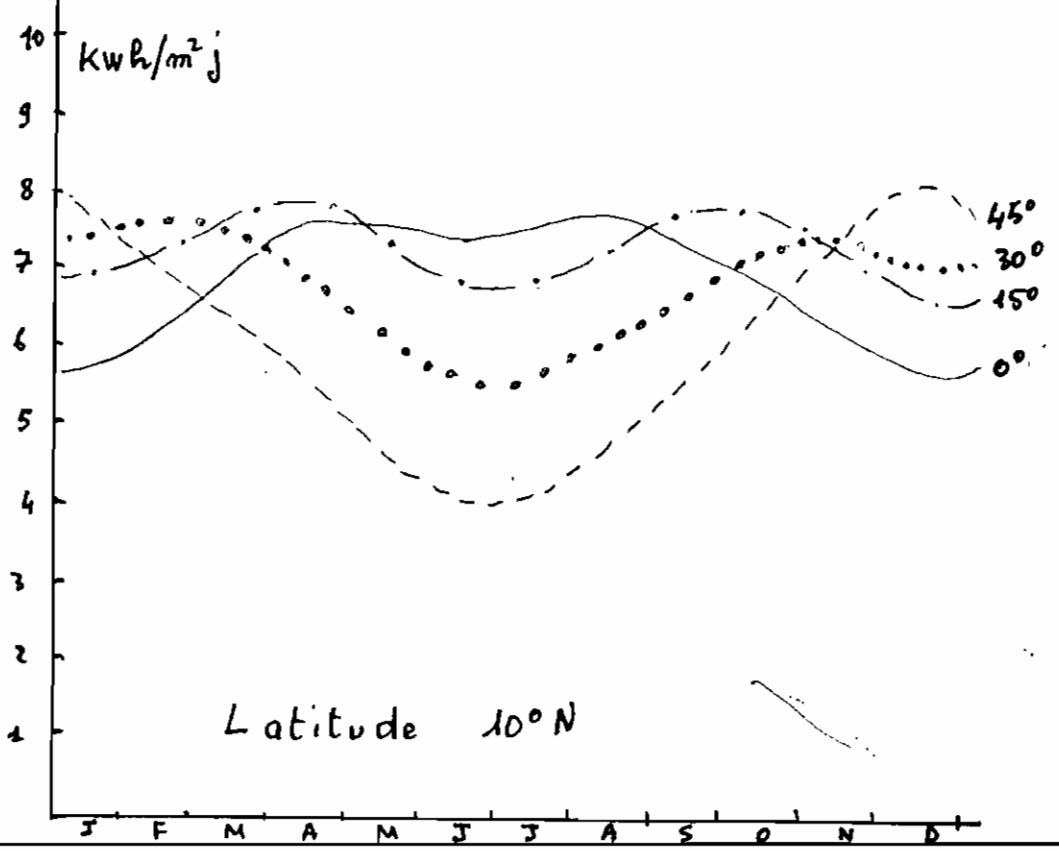


# ANNEXES

A<sub>1</sub> ENERGIE GLOBALE MAXIMUM  
reçue par jour suivant le mois et  
l'inclinaison du plan

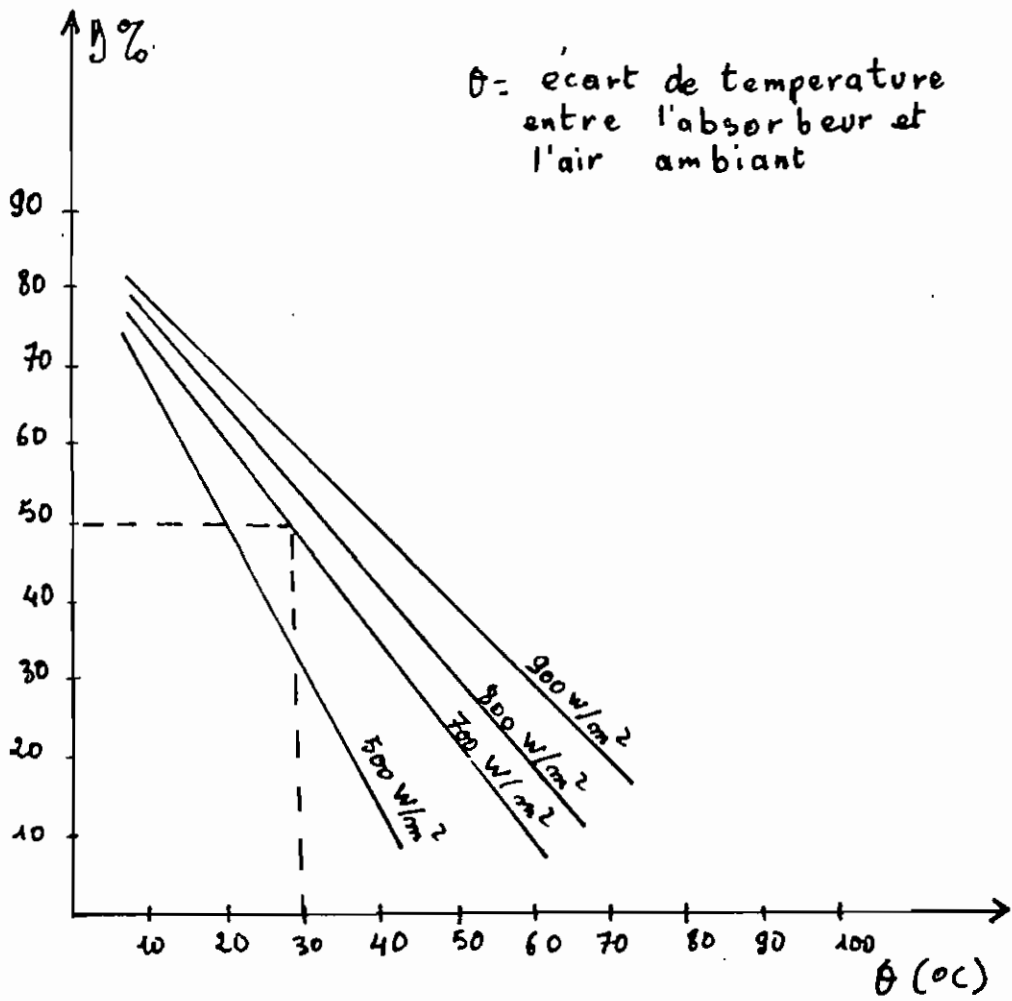


Latitude 35°N



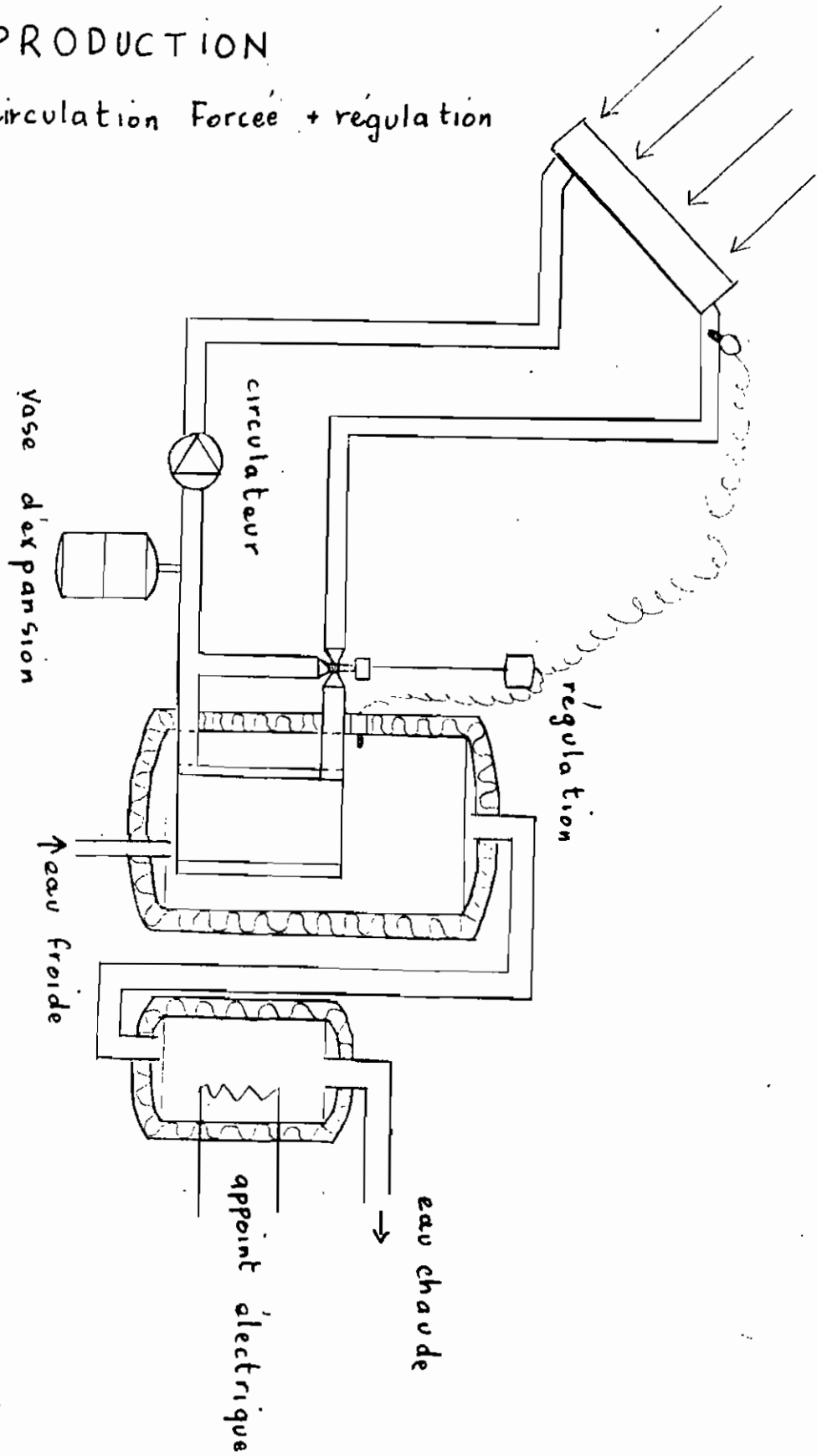
Latitude 10°N

# A<sub>2</sub> RENDEMENT D'UN CAPTEUR SOLAIRE

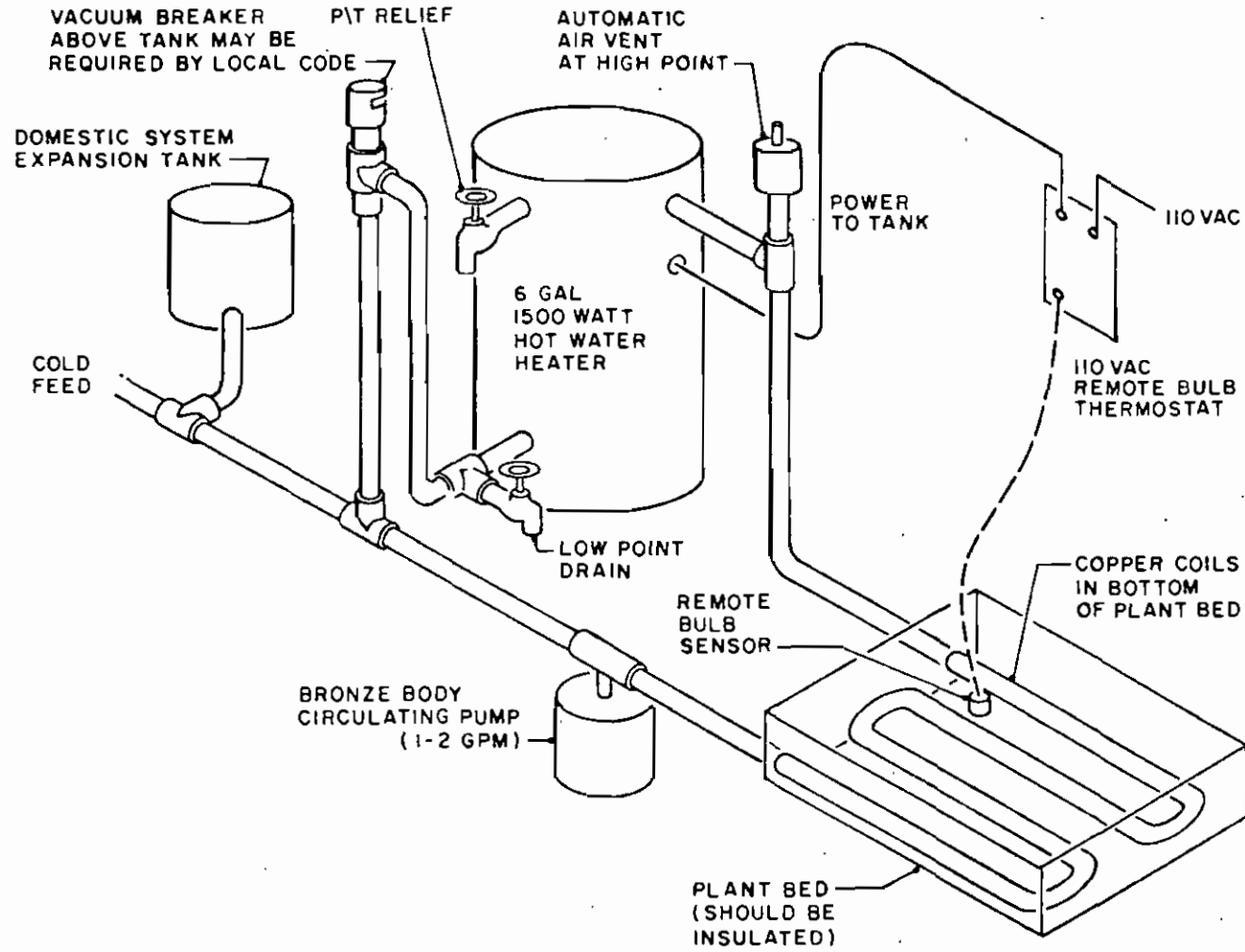


# A<sub>3</sub> PRODUCTION

Circulation Forcée + régulation



A<sub>4</sub> Schematic for a Greenhouse Soil Heater



A5

GLOBAL POUR LE SITE C.E.R.E.R DE 1975 A 1979; VALEURS HORAIRES EN W.M2.

MOIS DE JANVIER

\*\*\*\*\*

*ANNEES*	6H	7H	8H	9H	10H	11H	12H	13H	14H	15H	16H	17H	18H	19H
* 75 *	0.00*	28.90*	168.23*	369.23*	556.17*	678.08*	748.91*	751.23*	671.12*	555.85*	358.78*	163.72*	18.58*	0.00*
* 76 *	0.00*	17.42*	157.91*	351.81*	520.17*	644.41*	710.59*	739.62*	667.63*	541.87*	362.26*	175.33*	27.87*	0.00*
* 77 *	0.00*	17.42*	161.39*	359.94*	527.14*	669.79*	729.17*	745.43*	675.76*	565.46*	366.65*	191.58*	32.51*	0.00*
* 78 *	0.00*	16.26*	147.46*	343.69*	513.21*	652.54*	765.95*	721.04*	664.15*	538.75*	368.87*	186.94*	31.35*	0.00*
* 79 *	0.00*	13.93*	123.83*	306.53*	453.99*	609.42*	672.23*	666.47*	591.03*	503.56*	355.36*	164.83*	25.54*	0.00*
MOY. *	0.00*	17.18*	158.01*	348.24*	514.14*	650.45*	718.38*	724.76*	653.93*	541.54*	366.21*	176.49*	27.17*	0.00*

\*\*\*\*\*

DONNEES STATISTIQUES SUR LE RAYONNEMENT GLOBAL POUR LE SITE C.E.R.E.R DE 1975 A 1979; VALEURS HORAIRES EN W.M2.

MOIS DE FEVRIER

\*\*\*\*\*

*ANNEES*	6H	7H	8H	9H	10H	11H	12H	13H	14H	15H	16H	17H	18H	19H
* 75 *	0.00*	46.44*	232.22*	464.44*	652.54*	790.63*	853.85*	833.67*	748.91*	628.83*	449.35*	238.83*	49.93*	0.00*
* 76 *	0.00*	41.80*	243.83*	476.37*	679.36*	829.83*	918.38*	917.27*	868.58*	711.75*	499.27*	267.65*	55.41*	0.00*
* 77 *	0.00*	35.93*	224.89*	455.15*	643.25*	774.45*	838.19*	829.83*	786.87*	659.51*	449.35*	246.15*	48.77*	0.00*
* 78 *	0.00*	33.67*	235.78*	469.98*	647.89*	786.87*	898.56*	891.73*	828.90*	683.89*	492.71*	272.86*	55.73*	0.00*
* 79 *	0.00*	38.32*	247.31*	471.41*	674.60*	825.68*	885.92*	867.34*	815.89*	683.53*	509.72*	274.82*	58.89*	0.00*
MOY. *	0.00*	39.25*	236.63*	471.87*	659.53*	797.23*	875.81*	887.81*	867.89*	672.74*	498.88*	269.82*	52.96*	0.00*

\*\*\*\*\*

DONNEES STATISTIQUES SUR LE RAYONNEMENT GLOBAL POUR LE SITE C.E.R.E.R DE 1975 A 1979; VALEURS HORAIRES EN W.M2.

MOIS DE MARS

\*\*\*\*\*

*ANNEES*	6H	7H	8H	9H	10H	11H	12H	13H	14H	15H	16H	17H	18H	19H
* 75 *	0.00*	53.99*	257.85*	487.66*	713.38*	861.77*	946.88*	965.69*	894.16*	766.33*	554.77*	319.77*	83.95*	0.00*
* 76 *	0.00*	62.70*	260.89*	496.79*	667.63*	806.96*	877.79*	898.69*	829.83*	703.63*	518.88*	298.28*	76.63*	0.00*
* 77 *	0.00*	56.89*	229.89*	453.99*	615.38*	753.55*	826.78*	824.33*	748.91*	628.16*	436.57*	231.86*	54.57*	0.00*
* 78 *	0.00*	73.15*	293.75*	527.14*	716.48*	847.88*	917.27*	923.87*	832.51*	692.82*	487.65*	264.73*	68.18*	0.00*
* 79 *	0.00*	42.96*	218.16*	445.86*	645.57*	776.78*	852.25*	868.33*	791.87*	645.57*	452.12*	242.67*	68.38*	0.00*
MOY. *	0.00*	57.94*	258.51*	482.69*	671.67*	809.33*	884.18*	894.44*	819.38*	687.14*	498.48*	269.76*	68.34*	0.00*

\*\*\*\*\*

DONNEES STATISTIQUES SUR LE RAYONNEMENT  
GLOBAL POUR LE SITE C.E.R.E.R DE 1975 A  
1979; VALEURS HORAIRES EN W/M2.  
MOIS DE MARS

\*\*\*\*\*

*ANNEES*	6H	* 7H	* 8H	* 9H	* 10H	* 11H	* 12H	* 13H	* 14H	* 15H	* 16H	* 17H	* 18H	* 19H
* 75 *	0.00*	83.60*	301.93*	529.46*	726.85*	871.99*	946.30*	953.26*	836.37*	765.17*	568.81*	326.27*	102.18*	0.00*
* 76 *	0.00*	91.73*	310.61*	527.14*	737.30*	866.18*	923.87*	921.91*	869.50*	732.65*	533.75*	321.63*	97.53*	0.00*
* 77 *	0.00*	77.79*	277.50*	512.05*	702.47*	842.96*	921.91*	926.56*	860.35*	723.01*	545.72*	325.11*	109.14*	8.13*
* 78 *	0.00*	96.37*	326.27*	557.33*	757.04*	832.44*	953.26*	954.42*	833.24*	761.69*	564.29*	322.79*	99.85*	2.32*
* 79 *	0.00*	70.83*	271.70*	493.47*	687.37*	809.29*	901.81*	916.11*	826.72*	701.30*	523.66*	293.40*	92.83*	2.32*
Moy.	0.00*	84.66*	297.47*	523.83*	722.30*	854.57*	923.11*	934.45*	863.04*	737.76*	546.65*	318.84*	109.32*	2.59*

DONNEES STATISTIQUES SUR LE RAYONNEMENT  
GLOBAL POUR LE SITE C.E.R.E.R DE 1975 A  
1979; VALEURS HORAIRES EN W/M2.  
MOIS D'AVRIL

\*\*\*\*\*

*ANNEES*	6H	* 7H	* 8H	* 9H	* 10H	* 11H	* 12H	* 13H	* 14H	* 15H	* 16H	* 17H	* 18H	* 19H
* 75 *	0.00*	110.30*	333.24*	586.36*	764.00*	875.47*	956.75*	957.91*	899.85*	765.17*	571.26*	349.49*	123.63*	0.00*
* 76 *	6.97*	114.95*	351.81*	577.07*	746.59*	863.60*	940.49*	935.65*	863.86*	747.75*	568.94*	341.36*	124.24*	8.13*
* 77 *	4.64*	101.82*	296.03*	498.11*	681.57*	826.70*	833.60*	837.03*	823.22*	703.63*	532.96*	323.95*	117.27*	9.29*
* 78 *	0.00*	96.37*	293.76*	505.03*	697.82*	834.83*	897.53*	899.85*	763.74*	661.63*	483.82*	263.57*	99.85*	5.81*
* 79 *	3.49*	87.03*	260.05*	469.63*	626.16*	753.55*	827.66*	825.54*	768.52*	618.87*	447.82*	263.57*	101.02*	5.81*
Moy.	3.02*	101.95*	307.00*	527.14*	703.63*	834.83*	901.25*	901.25*	826.24*	699.45*	521.60*	308.39*	114.25*	5.81*

DONNEES STATISTIQUES SUR LE RAYONNEMENT  
GLOBAL POUR LE SITE C.E.R.E.R DE 1975 A  
1979; VALEURS HORAIRES EN W/M2.  
MOIS DE JUIN

\*\*\*\*\*

*ANNEES*	6H	* 7H	* 8H	* 9H	* 10H	* 11H	* 12H	* 13H	* 14H	* 15H	* 16H	* 17H	* 18H	* 19H
* 75 *	0.00*	99.85*	280.99*	492.31*	686.21*	823.22*	863.50*	848.76*	777.94*	661.83*	505.63*	293.76*	110.30*	0.00*
* 76 *	5.81*	103.34*	312.34*	517.05*	685.65*	804.64*	894.65*	831.23*	840.64*	726.85*	535.27*	321.63*	126.56*	12.77*
* 77 *	5.81*	85.60*	240.35*	440.66*	602.61*	733.46*	789.55*	793.63*	737.30*	624.67*	465.60*	282.15*	112.63*	12.77*
* 78 *	5.81*	87.03*	249.64*	481.86*	644.41*	740.76*	789.39*	802.32*	663.79*	513.21*	392.45*	243.83*	102.18*	9.29*
* 79 *	4.64*	73.15*	234.54*	421.40*	588.55*	697.22*	747.75*	789.81*	625.30*	542.20*	444.70*	269.70*	109.14*	10.45*
Moy.	4.41*	89.40*	283.57*	478.71*	639.77*	768.93*	817.65*	819.84*	730.10*	613.78*	468.82*	282.15*	112.16*	9.68*

\*\*\*\*\*

*ANNEES*	6H	7H	8H	9H	10H	11H	12H	13H	14H	15H	16H	17H	18H	19H
* 75 *	3.85*	84.76*	238.03*	399.42*	532.95*	575.91*	616.54*	618.87*	563.13*	476.65*	376.39*	233.63*	96.57*	4.64*
* 76 *	5.81*	89.40*	264.73*	429.61*	536.36*	668.79*	704.79*	733.82*	721.04*	585.19*	434.25*	274.02*	109.14*	16.45*
* 77 *	5.81*	77.79*	232.22*	426.12*	593.32*	656.02*	704.79*	716.46*	696.66*	603.77*	465.60*	278.66*	103.34*	11.61*
* 78 *	3.48*	75.47*	223.74*	399.42*	514.37*	615.38*	648.33*	675.76*	575.91*	471.41*	362.26*	23.22*	96.57*	8.13*
* 79 *	4.64*	71.99*	224.09*	467.53*	566.61*	645.57*	717.56*	741.94*	661.83*	535.27*	481.74*	248.48*	98.69*	9.23*
MOY. *	4.71*	79.83*	237.56*	412.42*	537.56*	632.34*	676.92*	697.36*	643.71*	534.34*	406.85*	212.48*	98.48*	8.82*

\*\*\*\*\*

DONNEES STATISTIQUES SUR LE RAYONNEMENT  
GLOBAL POUR LE SITE C.E.R.E.R DE 1975 A  
1979; VALEURS HORAIRES EN W/M2.

MOIS DE AOÛT

\*\*\*\*\*

*ANNEES*	6H	7H	8H	9H	10H	11H	12H	13H	14H	15H	16H	17H	18H	19H
* 75 *	0.00*	71.99*	232.22*	369.23*	479.53*	595.64*	666.47*	692.02*	654.86*	563.92*	382.00*	218.29*	84.76*	3.43*
* 76 *	2.32*	88.24*	242.67*	426.12*	566.81*	666.67*	752.39*	751.23*	695.50*	604.93*	431.93*	234.54*	75.47*	4.64*
* 77 *	3.48*	74.31*	242.67*	433.69*	606.69*	733.46*	796.71*	802.32*	745.43*	613.66*	465.60*	265.69*	106.82*	9.23*
* 78 *	1.16*	63.56*	229.90*	408.56*	541.67*	647.89*	708.27*	717.56*	666.21*	533.85*	413.35*	241.51*	84.76*	3.43*
* 79 *	2.32*	73.15*	251.96*	404.23*	553.49*	631.64*	706.37*	765.95*	654.86*	578.18*	408.71*	241.51*	88.12*	4.64*
MOY. *	1.88*	75.24*	239.89*	412.56*	543.28*	654.86*	725.22*	733.82*	687.37*	569.17*	426.32*	246.35*	86.39*	5.11*

\*\*\*\*\*

MOIS DE SEPTEMBRE

\*\*\*\*\*

*ANNEES*	6H	7H	8H	9H	10H	11H	12H	13H	14H	15H	16H	17H	18H	19H
* 75 *	0.00*	49.93*	207.84*	368.07*	543.40*	644.41*	647.89*	625.83*	563.13*	492.31*	365.75*	221.77*	62.70*	0.00*
* 76 *	0.00*	54.57*	211.32*	372.71*	534.11*	592.16*	633.96*	640.93*	632.80*	573.58*	396.13*	233.33*	76.63*	1.16*
* 77 *	3.48*	62.70*	214.80*	404.06*	565.46*	623.16*	717.56*	707.11*	657.18*	533.85*	406.39*	256.60*	76.63*	4.64*
* 78 *	0.00*	61.54*	236.86*	416.84*	572.42*	681.57*	705.95*	719.83*	687.37*	577.07*	419.16*	239.19*	60.38*	0.63*
* 79 *	0.00*	46.44*	197.39*	414.51*	556.17*	662.93*	731.49*	725.69*	695.50*	606.69*	411.03*	258.93*	78.95*	1.16*
MOY. *	0.70*	55.04*	213.64*	395.24*	554.31*	641.86*	687.37*	683.89*	647.26*	568.58*	396.49*	241.97*	71.68*	1.39*

\*\*\*\*\*



DONNEES STATISTIQUES SUR LE RAYONNEMENT  
 GLOBAL POUR LE SITE C.E.R.E.R DE 1975 A  
 1979: VALEURS HORAIRES EN W/M2.  
 MOIS DE OCTOBRE

\*\*\*\*\*

*ANNEES*	6H	7H	8H	9H	10H	11H	12H	13H	14H	15H	16H	17H	18H	19H
* 75 *	0.00*	35.99*	213.64*	414.51*	593.32*	733.46*	797.63*	801.16*	722.20*	582.87*	393.26*	218.29*	41.90*	0.00*
* 76 *	0.00*	37.16*	210.16*	409.87*	601.45*	732.65*	800.00*	829.03*	755.83*	597.97*	423.45*	239.03*	49.93*	0.00*
* 77 *	1.39*	45.20*	219.45*	436.57*	618.87*	757.04*	844.12*	837.15*	772.13*	636.23*	441.22*	240.35*	43.77*	1.16*
* 78 *	0.00*	41.00*	227.53*	434.25*	606.09*	716.40*	755.33*	774.45*	724.53*	616.74*	435.41*	225.25*	47.61*	0.00*
* 79 *	0.00*	33.67*	212.49*	407.55*	606.03*	710.59*	753.20*	776.78*	730.33*	625.83*	451.67*	232.22*	54.57*	0.00*
MOY. *	0.23*	38.78*	216.66*	420.55*	605.17*	731.03*	791.17*	803.71*	741.01*	616.74*	431.03*	230.83*	43.53*	0.23*

\*\*\*\*\*

MOIS DE NOVEMBRE

\*\*\*\*\*

*ANNEES*	6H	7H	8H	9H	10H	11H	12H	13H	14H	15H	16H	17H	18H	19H
* 75 *	0.00*	30.19*	200.67*	399.42*	577.07*	714.03*	758.20*	734.98*	683.89*	556.17*	377.35*	176.49*	25.54*	0.00*
* 76 *	0.00*	18.50*	162.55*	355.30*	533.75*	691.57*	775.62*	766.33*	704.79*	582.87*	394.77*	183.10*	32.51*	0.00*
* 77 *	0.00*	29.03*	199.71*	414.51*	595.81*	716.40*	784.90*	730.71*	716.40*	587.52*	411.03*	199.71*	32.51*	0.00*
* 78 *	0.00*	19.50*	153.27*	340.20*	507.40*	593.13*	665.31*	652.54*	592.16*	483.02*	332.03*	157.91*	25.54*	0.00*
* 79 *	0.00*	18.50*	170.81*	385.49*	551.52*	696.66*	724.53*	734.98*	717.56*	603.59*	423.45*	193.55*	33.67*	0.00*
MOY. *	0.00*	22.93*	179.04*	378.98*	534.31*	681.57*	741.71*	735.91*	682.96*	563.83*	383.74*	184.15*	29.96*	0.00*

\*\*\*\*\*

DONNEES STATISTIQUES SUR LE RAYONNEMENT  
 GLOBAL POUR LE SITE C.E.R.E.R DE 1975 A  
 1979: VALEURS HORAIRES EN W/M2.  
 MOIS DE DECEMBRE

\*\*\*\*\*

*ANNEES*	6H	7H	8H	9H	10H	11H	12H	13H	14H	15H	16H	17H	18H	19H
* 75 *	0.00*	13.93*	150.94*	380.07*	542.23*	662.93*	734.93*	743.91*	669.90*	541.07*	372.71*	179.97*	26.71*	0.00*
* 76 *	0.00*	15.21*	125.75*	295.96*	489.75*	602.84*	677.50*	643.47*	613.06*	483.02*	323.95*	161.39*	26.71*	0.00*
* 77 *	0.00*	11.81*	130.04*	252.60*	452.83*	575.91*	623.16*	620.03*	568.94*	451.67*	301.89*	142.82*	19.74*	0.00*
* 78 *	0.00*	9.29*	111.47*	260.89*	444.70*	581.71*	678.03*	678.03*	595.64*	485.34*	333.24*	169.52*	23.22*	0.00*
* 79 *	6.97*	15.09*	137.01*	327.43*	470.25*	592.07*	636.23*	624.67*	568.62*	483.02*	320.45*	149.78*	18.53*	0.00*
MOY. *	1.39*	13.03*	131.04*	303.83*	479.95*	601.26*	671.03*	664.03*	602.84*	483.02*	320.45*	160.76*	22.93*	0.00*

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

*ANNEES*	6H	* 7H	* 8H	* 9H	* 10H	* 11H	* 12H	* 13H	* 14H	* 15H	* 16H	* 17H	* 18H	* 19H
* 75 *	3.83*	84.76*	238.03*	399.42*	532.95*	575.91*	618.54*	618.87*	563.13*	476.05*	376.39*	238.03*	90.57*	4.64*
* 76 *	5.81*	89.40*	264.73*	429.61*	586.36*	668.79*	704.79*	733.82*	721.04*	585.19*	434.25*	274.02*	109.14*	16.45*
* 77 *	5.81*	77.79*	232.22*	426.12*	593.32*	656.02*	704.79*	716.46*	696.66*	603.77*	465.66*	278.66*	103.34*	11.61*
* 78 *	3.48*	75.47*	228.74*	399.42*	514.37*	615.38*	648.93*	675.76*	575.91*	471.41*	362.26*	23.22*	90.57*	8.13*
* 79 *	4.64*	71.99*	224.09*	467.55*	566.81*	645.57*	717.56*	741.94*	661.83*	535.27*	461.74*	248.48*	93.89*	9.23*
MOY. *	4.71*	79.83*	237.56*	412.42*	557.56*	632.34*	676.92*	697.36*	643.71*	534.34*	466.85*	212.48*	93.46*	8.92*

\*\*\*\*\*

DONNEES STATISTIQUES SUR LE RAISONNEMENT  
GLOBAL POUR LE SITE C.E.R.E.R DE 1975 A  
1979; VALEURS HORAIRES EN W/m2.

MOIS DE AOÛT

\*\*\*\*\*

*ANNEES*	6H	* 7H	* 8H	* 9H	* 10H	* 11H	* 12H	* 13H	* 14H	* 15H	* 16H	* 17H	* 18H	* 19H
* 75 *	0.00*	71.99*	232.22*	369.23*	479.53*	595.64*	666.47*	692.02*	654.86*	563.92*	332.06*	218.29*	84.76*	3.48*
* 76 *	2.32*	88.24*	242.67*	426.12*	566.81*	666.67*	752.39*	751.23*	695.50*	604.93*	431.93*	234.54*	75.47*	4.64*
* 77 *	3.48*	74.31*	242.67*	433.09*	606.09*	738.46*	798.71*	802.32*	745.43*	613.06*	465.66*	265.89*	106.82*	9.23*
* 78 *	1.16*	68.50*	229.90*	468.58*	541.07*	647.89*	708.27*	717.56*	686.21*	553.85*	413.35*	241.51*	84.76*	3.48*
* 79 *	2.32*	73.15*	251.96*	434.23*	558.49*	631.64*	708.27*	765.95*	654.86*	578.16*	468.71*	241.51*	86.12*	4.64*
MOY. *	1.86*	75.24*	239.88*	412.66*	548.28*	654.86*	725.22*	733.82*	687.37*	583.17*	426.32*	246.35*	86.39*	5.11*

\*\*\*\*\*

MOIS DE SEPTEMBRE

\*\*\*\*\*

*ANNEES*	6H	* 7H	* 8H	* 9H	* 10H	* 11H	* 12H	* 13H	* 14H	* 15H	* 16H	* 17H	* 18H	* 19H
* 75 *	0.00*	49.93*	207.84*	368.07*	543.40*	644.41*	647.89*	625.83*	563.13*	492.31*	365.75*	221.77*	62.70*	0.00*
* 76 *	0.00*	54.57*	211.32*	372.71*	534.11*	592.16*	633.96*	648.93*	632.80*	573.58*	396.13*	233.38*	76.63*	1.16*
* 77 *	3.48*	62.70*	214.80*	404.06*	565.45*	623.16*	717.56*	707.11*	657.18*	553.85*	466.39*	256.60*	76.63*	4.64*
* 78 *	0.00*	61.54*	236.86*	416.84*	572.42*	681.57*	705.95*	719.83*	687.37*	577.07*	419.16*	239.19*	60.38*	0.00*
* 79 *	0.00*	46.44*	197.39*	414.51*	556.17*	662.93*	731.49*	725.69*	695.50*	606.09*	411.03*	258.93*	78.95*	1.16*
MOY. *	0.70*	53.04*	213.64*	395.24*	554.31*	641.86*	687.37*	683.89*	647.20*	566.58*	396.49*	241.97*	71.06*	1.39*

\*\*\*\*\*

DONNEES STATISTIQUES SUR LE RAYONNEMENT  
GLOBALE POUR LE SITE C.E.R.E.R. DE 1975 A  
1979; VALEURS HORAIRES EN W/M2.

MOIS DE OCTOBRE

ANNEES	6H	7H	8H	9H	10H	11H	12H	13H	14H	15H	16H	17H	18H	19H
* 75 *	0.00	35.99	210.64	414.51	593.02	738.46	797.68	801.16	722.20	582.87	398.26	218.29	41.60	0.00
* 76 *	0.00	37.16	210.16	409.87	601.45	732.65	808.00	823.03	755.83	597.97	428.45	238.03	49.93	0.00
* 77 *	1.39	45.23	219.45	436.57	618.87	757.04	844.12	837.15	772.13	636.23	441.22	248.35	48.77	1.16
* 78 *	0.00	41.80	227.58	404.25	606.09	716.48	755.83	774.45	724.53	618.74	435.41	225.25	47.61	0.00
* 79 *	0.00	33.67	212.43	407.55	606.09	710.59	758.28	776.78	730.33	625.83	451.67	232.22	54.57	0.00
MOI.	0.23	38.78	216.66	420.55	605.17	731.03	791.17	803.71	741.01	610.74	431.09	238.83	48.53	0.23

MOIS DE NOVEMBRE

ANNEES	6H	7H	8H	9H	10H	11H	12H	13H	14H	15H	16H	17H	18H	19H
* 75 *	0.00	30.19	200.87	399.42	577.87	714.68	758.20	734.98	683.89	556.17	377.36	176.49	25.54	0.00
* 76 *	0.00	18.58	162.55	355.30	538.75	681.57	775.62	768.33	704.79	582.87	394.77	183.10	32.51	0.00
* 77 *	0.00	29.03	199.71	414.51	596.81	716.40	784.98	730.71	716.40	587.52	411.03	199.71	32.51	0.00
* 78 *	0.00	18.58	153.27	348.28	507.46	599.13	665.31	652.54	592.16	483.02	332.08	157.91	25.54	0.00
* 79 *	0.00	18.58	178.81	365.49	551.52	696.66	724.53	734.98	717.56	609.58	428.45	198.55	33.67	0.00
MOI.	0.00	22.99	179.64	378.98	554.31	681.57	741.71	735.91	682.96	563.83	338.74	184.15	29.96	0.00

DONNEES STATISTIQUES SUR LE RAYONNEMENT  
GLOBALE POUR LE SITE C.E.R.E.R. DE 1975 A  
1979; VALEURS HORAIRES EN W/M2.

MOIS DE DECEMBRE

ANNEES	6H	7H	8H	9H	10H	11H	12H	13H	14H	15H	16H	17H	18H	19H
* 75 *	0.00	13.93	158.94	368.07	542.23	682.99	734.93	743.91	669.96	541.07	372.71	179.97	26.71	0.00
* 76 *	0.00	15.21	125.75	295.96	439.75	602.84	677.58	648.47	613.68	483.02	323.95	161.39	26.71	0.00
* 77 *	0.00	11.81	138.04	292.60	452.83	575.91	628.16	620.03	568.94	451.67	301.89	142.82	19.74	0.00
* 78 *	0.00	9.29	111.47	268.09	444.70	581.71	678.08	678.08	595.64	435.34	303.24	169.52	23.22	0.00
* 79 *	6.97	15.09	137.01	327.43	478.25	582.87	636.23	624.67	566.62	483.02	320.45	143.76	18.58	0.00
MOI.	1.39	13.03	131.04	308.83	479.35	601.26	671.00	664.63	602.84	483.81	320.45	160.78	22.99	0.00