

Ecole Polytechnique THIES



Gm. 0301

ETUDE ET OPTIMI-  
SATION D'UN CHAUFFE-  
EAU SOLAIRE INTEGRÉ  
À UN RESEAU DE DISTRU  
BUTION D'EAU CHAUDE  
SANITAIRE

AUTEUR: Modibo DIOIP

DIRECTEUR: A. WOLSKI

juin 834

## DEDICACE

Cette thèse d'ingénieur est  
dedicacée à:

Tous ceux qui de pres ou de loin  
ont contribué à ma formation.

A ma grand-mère

A ma mère, à mon père

A ma femme

A ma fille chérie

Et enfin à tous  
ceux qui croient  
et œuvrent pour  
un SENE GAL MEILLEUR

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier le plus sincèrement

- M<sup>E</sup> Andre WOLSKY mon directeur de thèse pour sa disponibilité et ses conseils.

- M<sup>E</sup> Bouchard pour son concours technique

- M<sup>E</sup> Martin pour ses conseils et suggestions

- Ainsi que tous mes collègues pour leurs conseils et encouragements dans la poursuite de l'effort de recherche appliqué.

# table des matières

<u>Titre</u>	<u>Page</u>
Page titre	
Dedicace'	i
Remerciements	ii
Sommaire	iii
<b>A</b> <u>Introduction</u>	1
<b>B</b> <u>Etude et optimisation</u>	
<u>Chapitre I</u> : Modeles d'ensoleillement	8
A- Calcul des Irradiances	8
B- Calcul de la radiation	11
C- Optimisation de l'inclinaison $\beta$ du capteur integre'	17
<u>Chapitre II</u> : Etudes des Besoins	23
A- Dimensionnement de l'installation d'Eau chaude Sanitaire	23
I- Evaluation des Besoins	
<u>Chapitre III</u> : Choix des Materiaux	27
I- Definition des proprietes optiques des Materiaux	

II - Absorbance $\alpha_p$ et l'emittance $\epsilon_p$	28
III - Reflectance $\rho_a$	31
IV - Transmittance $\tau$	32
V - Choix des Matériaux du capteur	33

Chapitre IV: Optimisation thermique du capteur intégré 40

A. Modèle d'échange durant le jour sans charge 41

B. Modèle d'échange durant la nuit sans charge 43

C. Réduction des solutions paramétriques des deux modèles en équations Algébriques 44

D. Modèle d'échange thermique durant le jour avec charge 47

Chapitre V: Conception & Expérimentation du capteur solaire 50

A. Description du modèle expérimental

B. Design du réservoir ou absorbeur 53

C. Mesures Expérimentales 60

D. Comparaison prévisions théoriques et réalités expérimentales. 69

2

E. Etude des performances ou économies  
énergétiques dues au système combiné:  
chauffe-eau électrique et chauffe-eau  
solaire. 74

Chapitre VI: Etude Economique ou financière  
81

C Conclusion et recommandations  
84

Annexe p 85 à 114

Courbes n° 1 à 9

Plans Capteur

Document ensoleillement 7 stations Météo-  
Nationale

Programmes calcul  $\beta$  optimum

• Résolution équation différentielle

Méthode Kutta-Gill.

Bibliographie

111

## SOMMAIRE

vi

Cette thèse se situe dans le but des économies d'énergie d'origine classique basées sur la recherche appliquée.

Il s'agit pour des pays comme le nôtre d'alléger la facture pétrolière en intégrant voire même en substituant l'énergie solaire à l'énergie électrique dans des applications aussi importantes que l'utilisation domestique.

Cette tâche est certes difficile car la connaissance de phénomènes solaires et l'augmentation du rendement des installations ne peut reposer que sur des études profondes et sérieuses. Le présent projet se veut une pièce angulaire dans le design de système solaire optimisé en vue de vulgariser la technologie et les bienfaits d'une telle énergie nouvelle et renouvelable aux moindres coûts. L'importance du chauffage de l'eau sanitaire dans les applications domestiques n'est plus à démontrer. Il reste à dimensionner des systèmes de chauffage capables d'honorer ces objectifs avec des rendements performants.

## A INTRODUCTION:

1

Cette étude se situe dans la lignée de l'amélioration du rendement, d'une nouvelle série de capteur solaire récemment expérimentée à l'École Polytechnique. Le capteur solaire intégré rompt avec la tradition des capteurs plans, car son réservoir d'accumulation est directement placé sous le vitrage sélectif; par le phénomène d'effet de serre le réservoir recueille le rayonnement transmis par le vitrage; ensuite par conduction thermique l'eau contenue dans le réservoir s'échauffe.

L'École Polytechnique de Thies est la "marraine" de cette nouvelle ère de capteur.

Le but de cette étude repose sur l'optimisation d'un tel système. Cependant avant d'aborder le corps de l'étude faisons une rétrospective des énergies renouvelables en général et de l'énergie solaire en particulier.

L'énergie solaire se situe dans la gamme des énergies nouvelles et renouvelables dont l'exploitation est devenue une nécessité si l'humanité veut survivre. Le problème de la dégradation et de l'épuisement des énergies classiques pose la question fondamentale de



<sup>2</sup> L'alternative énergétique du monde moderne.

Il s'agit aujourd'hui de repenser le présent pour mieux imaginer et préparer l'avenir dans le but de sauvegarder la civilisation moderne. L'incidence des énergies classiques sur le niveau de la vie moderne est tellement importante qu'il <sup>est</sup> difficile d'imaginer une ville comme New-York sans électricité, quant aux risques que ces énergies présentent du point de vue de leur exploitation et de leur épuisement immédiat, nous voyons qu'il est urgent aujourd'hui que l'humanité toute entière pense à l'alternative énergétique: l'avenir du monde en dépend.

Les énergies nouvelles et renouvelables représentent une alternative de taille à ce problème majeur. Néanmoins il reste à accentuer les recherches appliquées et fondamentales dans ce domaine pour mieux vulgariser leur utilisation.

Cependant ces énergies ne doivent pas être utilisées dans n'importe quelle proportion, il ne faudrait pas que l'humanité commette de nouveau l'erreur que la civilisation moderne a connue à ses débuts: ne pas rationaliser l'exploitation des sources d'énergies classiques.

3

Pour ce faire il s'agit de dimensionner des systèmes optimaux capables aux moindres coûts de disposer efficacement des sources énergétiques modernes. L'objectif de cette étude est d'optimiser l'utilisation de l'énergie solaire dans un domaine aussi important que le chauffage de l'eau sanitaire.

Face à tout problème pratique l'homme a toujours cherché à trouver la meilleure solution: les Héros de l'Antiquité avaient déjà ce souci de l'optimisation. L'utilisation des techniques de l'optimum est tellement répandue qu'il est aujourd'hui difficile de citer un domaine scientifique où l'optimisation n'a pas une place de choix. Car c'est un mode de raisonnement et de recherche qui non seulement a fait ses preuves, mais reste un moyen bon marché d'études des problèmes complexes.

On pourrait se poser la question de savoir comment optimiser un système dont on connaît pas encore ses caractéristiques (formes; dimensions, évolution, ...) ; une telle question serait restée sans réponse s'il n'existaient pas aujourd'hui les techniques de systèmes modélisables théoriquement avant d'être expérimentés.

La modélisation mathématique ou physique doit dégager l'essentiel d'un tout complexe et surchargé de détails, afin de sélectionner les paramètres significatifs qui gouvernent un système donné.

Le modèle mathématique est élaboré pour prédire et prévoir des comportements; ainsi on parvient à déduire (avant la réalisation du système) les paramètres significatifs qui serviront de base à la phase de conception. Il est vrai qu'un modèle ne prétend pas expliquer le comportement complet d'un système, mais il est élaboré pour expliquer et prévoir certains aspects primordiaux du système: donc des écarts naîtront nécessairement entre les prévisions théoriques et les résultats expérimentaux.

L'intelligence et la prouesse de la modélisation résidera dans ses possibilités de prévoir, cerner et expliquer certaines déviations entre théorie et expérience.

Le système que nous nous proposons d'étudier évolue dans un milieu conditionné par le soleil. Dans une première approche nous étudierons

l'ensoleillement suivant ses deux principales manifesta-<sup>5</sup>  
tions: la radiation et l'irradiance, et par la  
suite nous étudierons les lois qui modélisent le  
comportement thermique du capteur intégré

Ces analyses théoriques déboucheront sur  
une meilleure connaissance des paramètres  
qui gouvernent les évolutions du système  
étudié: en fin ces paramètres serviront de  
base au design d'un système optimum.

La modélisation est à mi-chemin entre  
les méthodes empiriques et les méthodes  
spéculatives; ses résultats n'ont de valeur  
que s'ils sont confirmés par l'expérimenta-  
tion faite sur le système modélisé.

## Nomenclature Chapitre I:

- B: coefficient d'extinction ou d'atténuation solaire
- A: valeur apparente de l'intensité solaire extra-terrestre  $\equiv I_0 = \text{fonction } N$
- N: numéro du jour d'expérience 1 à 366
- I: flux solaire ou irradiance arrivant sur une plaque inclinée en  $W/m^2$
- H: flux solaire arrivant sur plaque horizontale en  $W/m^2$
- $\phi$ : latitude du lieu expérimental en degrés
- $\delta$ : déclinaison terre par rapport aux axes des pôles  $-23.5^\circ < \delta < 23.5^\circ$  sur un an.
- $\rho$ : réflectivité du milieu expérimental
- |                  |                            |
|------------------|----------------------------|
| neige            | 60 à 90%                   |
| sol nu           | 10 à 25%                   |
| gravier; prairie | 15 à 30%                   |
| sable clair      | 25 à 40%                   |
| eau calme        | 5% en hiver et 18% en été. |
- $\theta_z$ : angle zénithal du soleil en degrés d'angle
- $\alpha$ : altitude du soleil en degré ou en heures
- $\beta$ : inclinaison du capteur par rapport au plan horizontal de référence.
- P: pression absolue du site expérimental.
- $P_0$ : pression atmosphérique normale

$I_{0N}$ : flux solaire normal au niveau de la surface du sol en  $W/m^2$

$\theta$ : angle d'incidence du soleil par rapport à la normale au collecteur

$\Delta H$ : altitude du lieu expérimental par rapport au niveau moyen des mers.

$H_{0T}$ : radiation totale reçue par une surface horizontale en dehors de la terre.  $W/m^2$

$I_{0I}$ : radiation totale reçue par une surface inclinée en dehors de la terre.

$I_0$ : valeur du rayonnement solaire arrivant sur un site en dehors de la terre.

$\omega_s$ : sunset-sunrise du soleil: durée d'ensoleillement du site expérimental en heures ou en degré d'angle.

$\bar{K}_T$ : indice de clarté

$\bar{H}_{TB}$ : moyenne des valeurs journalières durant un mois du rayonnement, direct arrivant sur une surface horizontale ( $MJ/m^2$ )

$\bar{I}_{TB}$ : idem à  $\bar{H}_{TB}$  mais sur surface inclinée

$\bar{R}_s$ : facteur d'amplification du rayonnement

$\bar{H}_T$ : valeur rayonnement mesurée au solarimètre

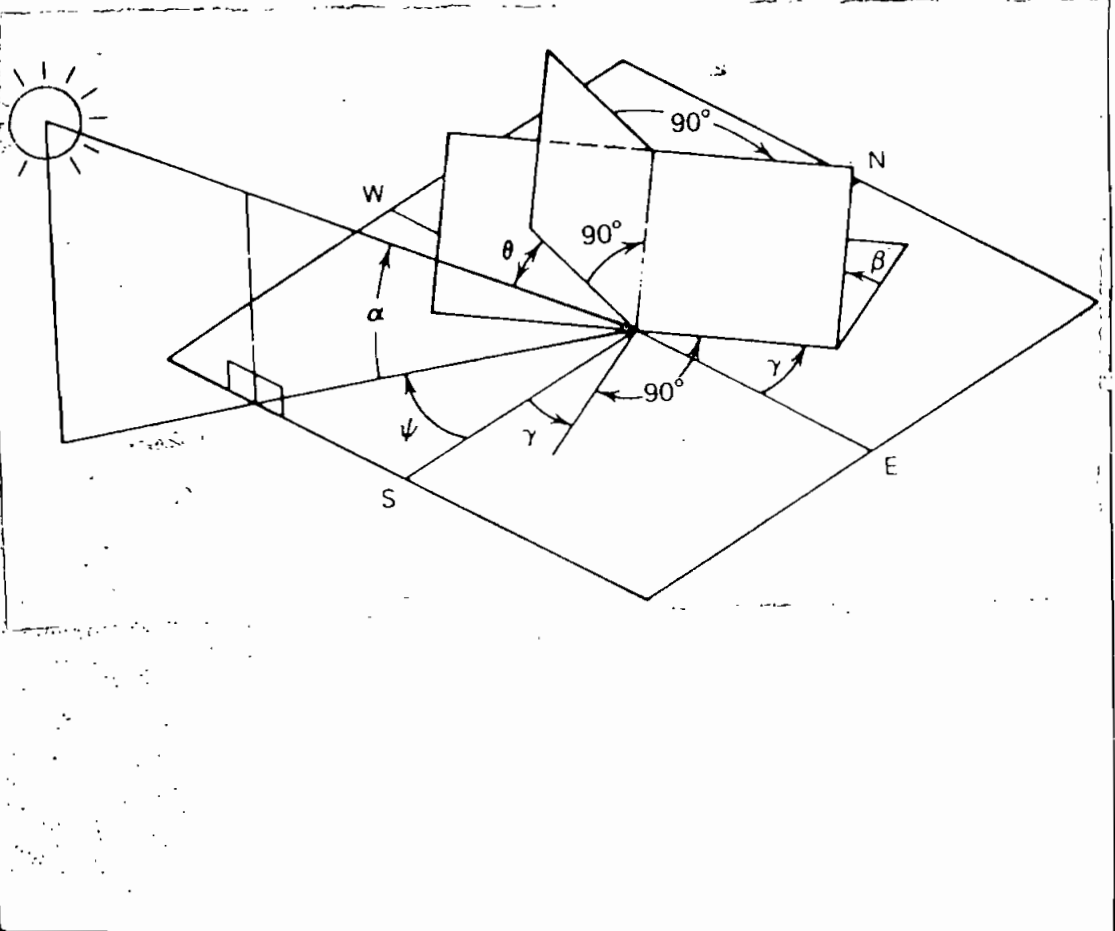
$H_T$ : rayonnement solaire mesurée disponible sur une surface horizontale.

## B ETUDE ET OPTIMISATION DU CAPTEUR

### Chapitre I: les Modeles d'Ensoleillement

#### Ⓐ Calcul des Irradiances ( $\text{W/m}^2$ )

Nous allons tenter de déterminer dans ce sous chapitre quelles sont les variables qui gouvernent la puissance solaire arrivant sur une plaque; d'abord horizontale et ensuite inclinée d'un angle  $\beta$ .



$$\text{on a } I_0 = I_{sc} \left[ 1 + 0.033 \cos \frac{360N}{370} \right]$$

ceci est l'expression de la puissance solaire reçue en dehors de la terre par le ciel pour un jour  $N$  de l'an.

A ce moment la déclinaison de l'axe des pôles de la terre par rapport au Soleil sera de

$$\delta = 23.45^\circ \sin \left[ \left( \frac{N-80}{370} \right) \times 360 \right]$$

Le flux solaire normal  $I_{DN}$  est le flux qui est normal à un point à la surface de la terre

$$I_{DN} = A \exp \left( -\frac{P}{P_0} \times \frac{B}{\cos \theta} \right)$$

le flux direct arrivant sur le sol est  $I_{DIR}$

$$I_{DIR} = I_{DN} \cos \theta$$

Le rayonnement diffus résultant de la diffusion par l'air; les aérosols, les vapeurs condensées, les nuages... etc; ce rayonnement provient de la voûte céleste

$$I_{DIFFUS} = I_{DN} \left[ c + \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + p(c + \sin \alpha) \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \right]$$

$$H_{DIR} = I_{DN} \cdot \sin \alpha$$

$$H_{DIFF} = I_{DN} \times c$$

$$H_{Global} = \sum H_i = I_{DN} (c + \sin \alpha)$$

$$H_{GI} = A \exp \left( -\frac{B}{\cos \theta} \cdot \exp(-0.18410^{-3} \times \Delta H) \right) \quad (1)$$



l'équation montre que le rayonnement en  $W/m^2$  ou irradiance sur une plaque horizontale  $H_G$  est fonction de quatre paramètres que sont:

A: valeur apparente de l'intensité solaire

$\alpha$ : l'altitude du soleil

B: coefficient d'extinction solaire

$\Delta H$ : l'altitude du lieu expérimental

De la même manière on peut déterminer l'irradiance arrivant sur une plaque inclinée d'un angle  $\beta$

$$I_G = I_{DIR} + I_{DIFF}$$

$$= A \exp\left[-\frac{B}{\sin \alpha} \exp(-1.1810^4 \times \Delta H)\right] \left[ \cos \theta + c \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + \right. \\ \left. f (c + \sin \alpha) \left(\frac{c - \cos \beta}{2}\right) \right] \quad (2)$$

l'intensité solaire ou irradiance arrivant une plaque inclinée dépend de sept variables que sont

A: valeur apparente de l'intensité solaire

$\alpha$ : l'altitude du soleil en degrés

B: coefficient d'extinction solaire

$\Delta H$ : l'altitude du point expérimental

$\beta$ : inclinaison de la surface réceptrice

f: valeur dépendant du sol 15 à 30%

$\theta$ : angle incidence soleil p/n normale collecteur

c coefficient compris ds [0, 0.1]

## (B) Calcul des Radiations ( $J/m^2$ ):

La procédure pour déterminer les radiations est un peu différente que celle qui est utilisée pour les irradiances. L'utilisation des données mensuelles sur une surface plane requiert l'estimation du rayonnement correspondant sur une surface inclinée: ceci est un procédé assez délicat, à cause de l'importance du rayonnement diffus et direct; la nouvelle procédure nécessite le calcul de la proportion du rayonnement en dehors de la terre (radiation disponible tous les jours); ensuite de cette dernière on tire une corrélation empirique permettant d'estimer le rayonnement journalier total en dehors de la terre.

### 1- Radiations sur les Surfaces

Horizontales:

$$I_{\text{extra}} = I_0 \cos \theta$$

$$H_0 = I_0 [\cos \phi \cos \delta \omega + \sin \phi \sin \delta]$$

$$H_{0T} = \int_{\text{jour}} H_0 d\lambda$$

$$(3) \quad H_{0T} = \frac{I_0 \text{daily sum}}{\pi} \left[ \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2\pi \omega_s \sin \phi \sin \delta}{360} \right] \quad \checkmark$$

$$I_{0,5} = 24 \times I_0 = 24 \times 0.036 I_0$$

0.036: facteur conversion de l'équation

L'équation (3) nous montre que l'énergie arrivant sur une plaque horizontale en  $J/m^2$  est fonction de:

$N$ : le jour expérimental

$\phi$ : la latitude du point considéré.

$\delta$ : la déclinaison de la terre

$\omega_s$ : la durée d'ensoleillement du jour

## 2 - Radiations sur une surface

### Inclinées

De même on obtient

$$(6) \quad \bar{I}_{OT} = \frac{I_{00} \cdot s}{\pi} \left[ \cos(\phi - \beta) \cos \delta \cdot \sin \omega_s + \frac{2\pi \omega_s}{360} \sin(\phi - \beta) \sin \delta \right] \quad \checkmark$$

Donc la radiation moyenne totale reçue par une surface inclinée de  $\beta$  est une fonction, gouvernée par les variables suivantes:

$N$ : le jour expérimental

$\phi$  la latitude du point expérimental

$\beta$  l'inclinaison du capteur

$\delta$  la déclinaison de la terre

$\omega_s$  la durée de l'ensoleillement

par géométrie on peut écrire

$$\cos \omega_s = -\tan \phi \tan \delta; \text{ pour un capteur}$$

$$\text{incliné} \quad \cos \omega'_s = -\tan(\phi - \beta) \tan \delta$$

On trouve les tables solaires listant les valeurs journalières moyennes du rayonnement solaire (cf Feuilles en Annexe). Ces tables sont nécessaires pour estimer le rapport du rayonnement journalier direct sur une surface inclinée par rapport à celui sur une surface horizontale: ce rapport est dénommé facteur d'amplification du rayonnement.

$$(7) \quad \bar{R}_b = \frac{\bar{I}_{OT}}{\bar{H}_{OT}} \approx \frac{\bar{I}_{TB}}{\bar{H}_{TB}}$$

Etant donné que beaucoup de tables de rayonnement sont globales, il est nécessaire, avant de déterminer la radiation sur une surface inclinée, de connaître la proportion du diffus dans le rayonnement total. Objectivement on peut dire que autant le ciel est nuageux autant est considérable le rayonnement diffus (ref n° [1]).

Les Etudes de Louis Jordan (ref [3]) et celles de Page (ref [2]) ont démontré que les proportions du diffus sur une surface sont une fonction d'un facteur de clarté  $K_T$  et du rayonnement arrivant sur le site

$$(8) \quad K_T = \frac{\bar{H}_T}{\bar{H}_{OT}} \approx \frac{\text{Valeur lue avec Solarimètre}}{\text{Valeur théorique du rayonnement}}$$

Les Etudes de Page fondees sur des mesures de 10 stations meteorologiques aux U.S.A ont permis de trouver une fonction de correlation, ce qui est en accord avec les travaux de Ohoudory (reference [3]), Stanhil (reference [4]) et Norris (reference [7])

$$(9) \frac{\bar{H}_{Td}}{A_T} = 1.00 - 1.13\bar{K}_T$$

✓ → 15

Dui & Jordan ont trouve la correlation suivante

$$\frac{\bar{H}_{Td}}{A_T} = 1.390 - 4.027\bar{K}_T + 5.23\bar{K}_T^2 - 3.108\bar{K}_T^3$$

On voit que pour les Etats unis les travaux de Page sont les plus consistants donc ils possedent une plus grande audience intellectuelle.

Etant donnees les differences parametriques sur les variables solaires assez importantes, les etudes faites aux U.S.A sur ce coefficient ne sauraient servir de base d'analyse; donc il a fallu dans ma demarche d'optimisation de rechercher les coefficients de correlation a partir de donnees rendues disponibles par 7 stations meteorologiques au Senegal (Bamboy, Dakar, Podor, Tamba, Louga, Ziguinchor, Kedougou)

La corrélation que j'ai déduite de l'analyse de ces résultats des stations précitées est la suivante

$$\frac{\bar{H}_{Td}}{\bar{H}_T} = 1.00 - 4.65 \cdot 10^{-2} \bar{K}_T$$

Etant donné que la radiation diffuse est généralement considérée comme isentropique, sa valeur sur une surface inclinée est une proportion fixe de la celle diffuse sur une surface horizontale

$$I_{DIF} = H_{DIF} \times \frac{(1 + \cos \beta)}{2} + \rho (H_{Direct} + H_{DIF}) \times \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

$$(11) \quad \frac{\bar{I}_{Td}}{\bar{H}_T} = \left( \frac{\bar{H}_{Td}}{\bar{H}_T} \right) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

on obtient ainsi

$$(12) \quad \frac{\bar{I}_{Td}}{\bar{H}_T} = \bar{R}_b \cdot \left( \frac{\bar{H}_{TB}}{\bar{H}_T} \right)$$

en combinant (11) et (12) on obtient

$$\bar{I}_T = \bar{R}_b \cdot \bar{H}_T$$

cette relation est fondamentale car elle montre que si la radiation  $\bar{H}_T$  est connue par les tables on peut aisément calculer  $I_T$ . mais avant cela déterminons la valeur de  $\bar{R}_b$ .

les valeurs de  $\bar{R}_b$  ou facteur d'augmentation du rayonnement peuvent être approximées s'il y a des tables d'ensoleillement. Cependant les équations de corrélation tenant compte du facteur de clarté donnent des valeurs plus précises de  $\bar{R}_b$ . Des travaux comme ceux de Klein (ref [17]) ont déterminé une procédure pour estimer la valeur de  $\bar{R}_b$  pour une inclinaison  $0 < \beta < 90^\circ$

$$\bar{R}_b = \left\{ [\cos \beta \sin \delta \sin \phi] (\pi/180) [\tilde{c}_{ss} - \tilde{c}_{sr}] - \right.$$

$$\begin{aligned} & [\sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \delta] (\pi/180) [\tilde{c}_{ss} - \tilde{c}_{sr}] \\ & + [\cos \delta \cos \phi \sin \phi \sin \beta] [\sin \tilde{c}_{ss} - \sin \tilde{c}_{sr}] \\ & \left. + [\cos \delta \sin \beta \sin \delta] [\cos \tilde{c}_{ss} - \cos \tilde{c}_{sr}] \right\} / \end{aligned}$$

$$\left\{ 2 [\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + (\pi/180) \cos \phi \sin \delta] \right\}$$

$$\text{si } \delta < 0 \quad \tilde{c}_{sr} = -\min \left\{ \omega_s; \arccos \left[ \frac{A \cos \beta + \sqrt{A^2 \cos^2 \beta + 1}}{A^2 + 1} \right] \right\}$$

$$\text{si } \delta > 0 \quad \tilde{c}_{ss} = \min \left\{ \omega_s; \arccos \left[ \frac{A \cos \beta + \sqrt{A^2 \cos^2 \beta + 1}}{A^2 + 1} \right] \right\}$$

ou

$$A = \cos \phi / (\sin \delta \tan \beta) + \sin \phi / \tan \delta$$

$$B = \tan \delta [\cos \phi / \tan \delta - \sin \phi / (\sin \delta \tan \beta)]$$

$$\text{et } \omega_s = -\tan \phi \tan \delta.$$

Le coefficient  $R_b$  comme le montre l'équation de Klein est assez complexe; mais les travaux que j'ai fait et que j'expose dans le chapitre de l'optimisation de l'inclinaison d'un capteur solaire montrent quels sont les paramètres qui influent sur  $R_b$  et d'une manière plus simple qu'a fait Klein (ref [3])

### © OPTIMISATION DE L'INCLINAISON $\beta$ DU CAPTEUR:

L'inclinaison d'un capteur solaire a suscité un très long débat beaucoup d'angles ont été avancés sans avoir été théoriquement ni empiriquement prouvé qu'ils étaient les angles optimum. Ici ma démarche consistera à me fier à l'analyse mathématique du modèle d'ensoleillement et en tirer les fonctions qui entre autres ont  $\beta$  pour paramètre; il s'agira ensuite de dériver cette fonction en fonction de  $\beta$ , les autres paramètres étant invariables, et après de s'assurer que la dérivée seconde s'annule pour conclure qu'on est à un optimum en  $\beta$ . L'équation (6) du flux solaire arrivant sur une surface inclinée sera la fonction à étudier



$$\bar{I}_{OT} = \frac{I_{0s} s}{\pi} \left[ \cos(\phi - \beta) \cos \delta \sin \omega s + \frac{2\pi \omega s}{360} \sin(\phi - \beta) \sin \delta \right]$$

on constate avec (6) que l'énergie reçue par un mètre carré de capteur est fonction

$N$ : le jour expérimental 1 à 366

$\phi$ : latitude du lieu expérimental

$\beta$ : inclinaison du capteur

$\delta$ : déclinaison de la terre

$\omega s$ : de la durée de l'ensoleillement.

Ainsi en dérivant (6) par rapport à  $\beta$  et en s'assurant que la dérivée seconde s'annule on trouve l'équation fondamentale de l'angle optimum d'un capteur solaire

$$\tan \beta = \frac{\cos \delta \sin \omega s \cos \phi + \frac{2\pi \omega s}{360} \sin \delta \sin \phi}{\cos \delta \sin \omega s \sin \phi + \frac{2\pi \omega s}{360} \sin \delta \cos \phi}$$

Ceci montre que l'angle optimum est fonction de

$\delta$ : la déclinaison de la terre

$N$ : jour expérimental

$\phi$ : latitude du point expérimental

$\omega s$ : la durée d'ensoleillement.

Cette equation montre la complexité de l'orientation  $\beta$  d'un capteur solaire: on y perçoit l'intérêt d'avoir un suiveur solaire, qui aura à faire une sorte de poursuite du soleil durant le jour. Le but du projet étant de réaliser un capteur le plus simple possible afin de vulgariser la technologie de ce capteur dans toutes les sphères du pays. On pourrait penser à concevoir un système de poursuite du soleil complexe durant le jour; penser même à contrôler la trajectoire par des éléments électroniques mais tel n'est pas l'orientation cherchée dans notre conception.

Vue la complexité du traitement des variables entrant dans le capteur nous avons écrit un programme d'ordinateur qui nous permette d'obtenir pour tous les jours de l'année, la valeur de l'inclinaison optimale. Ce programme nous donne en même temps pour un jour donné  $N$ , et une latitude  $\phi$ , la déclinaison  $\delta$  de la terre, et l'inclinaison  $\beta$  optimum du capteur solaire. (Voir Annexe)

Avec l'obtention de l'angle optimum  $\beta$  par ordinateur on se rend compte que l'on peut maintenant établir les tables de rayonnement pour n'importe quel site. Ce travail est possible

grâce à l'équation (5) donnant la radiation totale reçue par une surface horizontale en  $W/m^2$  en dehors de la Terre.

On avait (5)

$$\bar{H}_{OT} = 24 \times 0.036 I_0 \left[ \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2\pi \omega_s}{360} \sin \phi \sin \delta \right]$$

$$\text{avec } \omega_s = A \cos [-\tan \phi \cdot \tan \delta]$$

les équations (7) et (10) nous donnent

$$\bar{R}_b = \frac{\bar{I}_{OT}}{\bar{H}_{OT}} = 2.0 - 4.65 \cdot 10^2 \bar{K}_T$$

(6) et (5) permettent d'écrire

$$(11) \quad \bar{R}_b = \frac{\left[ \cos(\phi - \beta) \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2\pi \omega_s}{360} \sin(\phi - \beta) \sin \delta \right]}{\left[ \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2\pi \omega_s}{360} \sin \phi \sin \delta \right]}$$

L'équation (11) que nous avons développée est plus simple que la formule de Klein. Elle nous montre que le coefficient  $\bar{R}_b$  qui nous permet de calculer l'énergie reçue par un capteur incliné de  $\beta$  à partir des tables classiques d'ensoleillement est une fonction multivariable  $\bar{R}_b$  dépend de

$\phi$ : latitude du lieu expérimental

$\beta$ : inclinaison du capteur solaire

$\omega_s$ : durée d'ensoleillement

$\delta$ : déclinaison de la terre.

En connaissant  $\bar{R}_G$  on tire aisement le facteur de clarte du site experimental  $\bar{I}_T$ ; donc la radiation moyenne globale arrivantsur une surface plane horizontale est

$$(12) \quad \bar{H}_T = \frac{23.0 - I_{0.5} \left[ \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2\pi \omega_s \sin \phi \sin \delta}{360} \right]}{1.096 \times 10^{-2}}$$

$$\text{avec } I_{0.5} = 24 \times 0.036 I_0$$

$$= I_{sc} \left[ 1 + 0.033 \cos \frac{360N}{370} \right] \times 24 \times 0.036$$

L'interêt de la formule (12) est tres important, car elle permet de trouver la valeur de la radiation solaire en MJ/m<sup>2</sup> sur toute l'etendue du Senegal; car il ne faut pas perdre de vue que l'equation de correlation (10) etait faite a partir de 7 stations meteorologiques du pays. Pour appliquer l'etude dans d'autres pays il s'agirait de revoir la correlation au point (10)

$$\bar{H}_T = \frac{23.0 - 1.4345 \left[ 1 + 0.033 \cos \frac{360N}{370} \right] \left[ A_1 + B_1 \right]}{1.096 \times 10^{-2}}$$

$$\text{ou } A_1 = \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s$$

$$B_1 = \frac{2\pi \omega_s}{360} \sin \phi \sin \delta$$

$\bar{H}_T$  est obtenue en MJ/m<sup>2</sup>

Le but des démonstrations précédentes était de pouvoir déterminer la radiation totale arrivant sur une surface inclinée d'un angle  $\beta$  par la formule  $\bar{I}_T = \bar{R}_\beta \cdot \bar{H}_T$

On constate que connaissant  $\bar{R}_\beta$  (équation (11)) et  $\bar{H}_T$  (équation n° 12) l'on puisse calculer aisément  $\bar{I}_T$  en  $\text{MJ/m}^2$  de capteur.

## CHAPITRE II: ETUDES DES BESOINS

### Ⓐ Calcul de l'installation d'eau chaude Sanitaire:

Après avoir déterminé les modèles mathématiques qui définissent les apports énergétiques sur le capteur intégré, il est maintenant nécessaire de concevoir l'installation sanitaire partant des paramètres optimum que nous avons découverts.

### Ⓘ Evaluation des Besoins:

Une installation d'eau chaude sanitaire est caractérisée par:

- Sa consommation volumique  $c$  en  $l/j$
- Sa température de distribution  $T_d$
- Sa température d'admission d'eau  $T_f$

L'équation du Besoin énergétique en fonction de ces paramètres est

$$(15) \quad B_j = 4.176 \cdot 10^3 \times c \times (T_d - T_f) \text{ en MJ}$$

La consommation volumique  $c$  en  $l/j$  et par personne dépend des besoins en eau et du niveau de confort des utilisateurs de l'eau chaude sanitaire

<u>Confort</u>	<u>Minimum</u>	<u>Moyen</u>	<u>Maximum</u>
C en l/j/personne	30	50	75

Les valeurs de C en l/j sont à peu près une moyenne annuelle, on pourra noter les fluctuations de 20% à -25% en fonction des périodes de l'année. On constate par exemple qu'en période froide ces valeurs varient plus qu'en période chaude. Dans notre étude nous allons considérer une famille de 7 personnes pour un niveau de confort moyen.

Ainsi la consommation d'eau chaude sanitaire varie en fonction de :

- la nature de l'utilisation
- le mode de vie des utilisateurs
- le moment du jour, et de l'année.

La notion de température de bain est très importante, car c'est elle qui crée le confort dans les conditions thermiques et métaboliques stationnaires. Il faut que dans ces conditions qu'à l'homéothermie des régions centrales du corps corresponde l'homéothermie des régions superficielles de l'organisme.

Des études assez récentes ont montré que pour atteindre une telle situation la température de

l'organisme doit atteindre  $34^{\circ}\text{C}$ . Si l'on tient compte de l'évaporation de l'eau au contact de la peau ou de son refroidissement au contact de l'ambiance on peut fixer notre température d'utilisation à  $39^{\circ}\text{C}$ .

Si l'on admet une température de distribution de  $26^{\circ}\text{C}$ , en moyenne pour satisfaire nos besoins (famille 7 personnes) en eau chaude sanitaire il nous faut disposer de  $B_j$  en énergie

$$B_j = 4.16 \times 10^3 \times c (40 - 26)$$

$$B_j = 2.912 \text{ MJ}$$

c'est la quantité d'énergie nécessaire pour assurer au moins un bain à chaque personne dans la famille précitée.

Donc si l'on veut un bain à toutes les 7 personnes de la famille il nous faut un apport énergétique de

$$B_j = 4.04 \text{ kWh.}$$



Arrivé à ce stade, de l'analyse de la demande en eau et en énergie, et connaissant les mécanismes d'échange de chaleur ou d'ensoleillement on détermine aisément nos aires de captation.

Cependant avant d'aborder le chapitre sur les mécanismes de transport et d'échange de chaleur dans le capteur intégré nous allons étudier la méthodologie de choix de matériau constituant le capteur solaire.

Nous allons ainsi voir qu'un choix de matériau repose sur trois grands critères:

- technologiques: résistance; durabilité, disponibilité.
- Critères économiques: finance; prix et qualité.
- Critères sociaux: risques de contamination; sécurité sanitaire; et autres.

## CHAPITRE III: CHOIX DES MATERIAUX

### ① Definition des proprietes optiques d'un materiau:

Le materiau de captage de l'energie solaire, doit posseder outre des proprietes physique de resistance, des proprietes optiques. Il doit posseder un bon coefficient de transmission  $\tau$ , une grande opacite aux longueurs d'ondes  $\lambda$ ; une bonne stabilite thermique pour resister aux changements importants de temperature entre le jour et la nuit

Un materiau selectif solaire rentable est aussi defini comme ayant une haute absorbance  $\alpha$  par rapport a la plage du spectre solaire (0.3 a 2  $\mu\text{m}$ ); il doit aussi posseder une faible emittance  $\epsilon$  pour reduire le rayonnement thermique qui engendre les pertes calorifiques.

La conception et le choix d'un tel materiau aux proprietes presque contradictoires est tout de meme possible; grace au non-chevauchement des longueurs d'ondes solaires et

thermiques. Pour les températures inférieures à 500°C, 98% des radiations thermiques se produisent au delà de la longueur d'ondes de  $\mu\text{m}$ .

## ② Absorbance $\alpha$ et l'émissance $\epsilon$ :

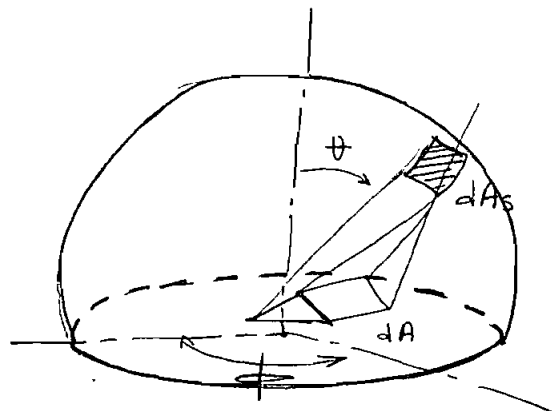
$\alpha$ : taux du rayonnement incident, qui du point de vue énergétique est absorbé par la surface de captation. On constate ainsi que ce coefficient dépend de la longueur d'ondes du rayonnement incident. Pour les fins de notre analyse nous allons étudier ces deux propriétés pour une longueur d'ondes donnée  $\lambda$ .

L'absorbance monochromatique est définie comme la fraction du rayonnement incident de longueur  $\lambda$ , de direction  $\nu$  et  $\phi$

$$\alpha_\lambda = \frac{J_{\lambda,a}(\nu, \phi)}{J_{\lambda,i}(\nu, \phi)}$$

$$= \frac{\text{Energie radiante absorbée (W/m}^2\text{)}}{\text{Energie incidente à la surface.}}$$

L'absorbance directionnelle de l'aire  $A$  est obtenue en intégrant sur toute la surface



$$\alpha(N, \phi) = \frac{\int_0^{\infty} \alpha_{\lambda}(N, \phi) J_{\lambda, i}(N, \phi) d\lambda}{\int_0^{\infty} J_{\lambda, i}(N, \phi) d\lambda}$$

$$\alpha(N, \phi) = \frac{\int_0^{\infty} \alpha_{\lambda}(N, \phi) J_{\lambda, i}(N, \phi) d\lambda}{J_{\lambda, i}(N, \phi)}$$

L'absorbance monochromatique de la sphère est obtenue en intégrant sur toute la sphère, i.e de  $0$  à  $2\pi$  et de  $0$  à  $1$

$$(17) \quad \alpha_{\lambda} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^1 \alpha_{\lambda}(N, \phi) J_{\lambda, i}(N, \phi) \nu d\nu d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^1 J_{\lambda, i}(N, \phi) \nu d\nu d\phi}$$

L'équation (17) nous démontre que l'absorbance d'un matériau ne dépend en grande partie, que de sa forme géométrique (facteur  $\nu$  et  $\phi$ ) et de sa situation par rapport à l'irradiance; et en fin elle est une fonction de la longueur d'ondes incidente.

L'équation (17) que pour un même matériau

la forme géométrique la plus absorbante est la sphère. Si le matériau de captation dont nous disposons pourrait être travaillé dans notre pays, l'on aurait conçu un capteur sphérique du point de vue du rayonnement transmis à l'eau à chauffer.

$\epsilon$ : l'émissance est la capacité d'un matériau à rayonner de l'énergie thermique; c'est le rapport entre la radiance d'une surface et celle d'un corps noir de même géométrie; à la longueur d'ondes  $\lambda$ .

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{J_{\lambda}}{J_{\lambda, \text{black}}}$$

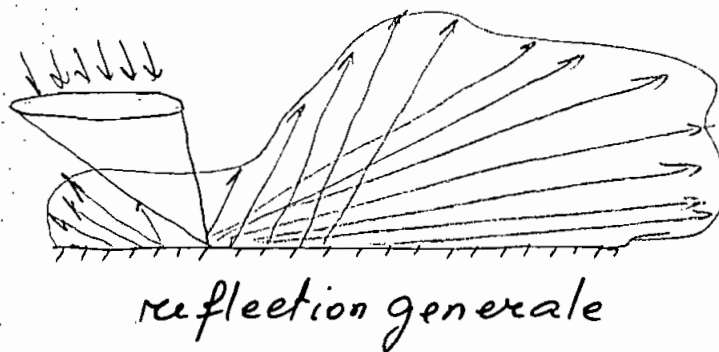
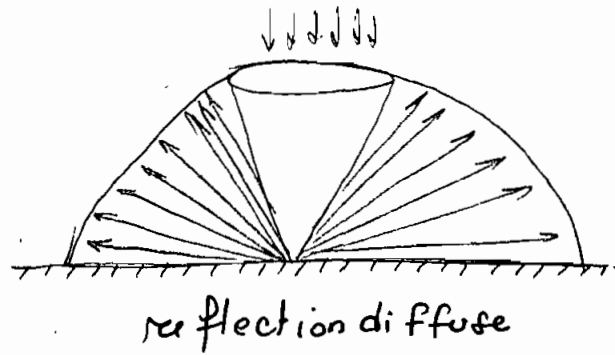
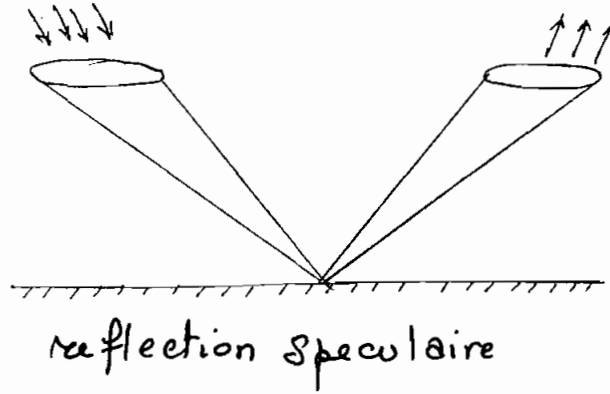
$$\epsilon_{\lambda}(N, \phi) = \frac{J_{\lambda}(N, \phi)}{J_{b, \lambda}(N, \phi)}$$

L'émissance totale est obtenue en intégrant sur toute l'aire géométrique.

$$(18) \quad \epsilon_t = \frac{1}{J_b} \int_0^{\infty} \epsilon_{\lambda}(N, \phi) J_{b, \lambda} d\lambda$$

L'équation (18) nous montre, alors que l'émissance d'un matériau dépend de la longueur d'ondes du rayonnement émis et de la géométrie du matériau.

③ Reflectance  $P_r$ : on distingue 3 types de réflexion



La réflectance  $\rho_\lambda$  est fonction de la longueur d'ondes, de la surface, et du revêtement superficiel de la surface, enfin de la longueur d'ondes  $\lambda$  du rayonnement incident à la surface.

#### ④ La Transmittance $\tau$ :

C'est l'aptitude d'un matériau à laisser passer l'énergie solaire qui lui est incidente

$$\tau_\lambda = \frac{J_{\lambda}(N, \phi)}{J_{\lambda,i}(N, \phi)}$$

pour un corps transparent on a

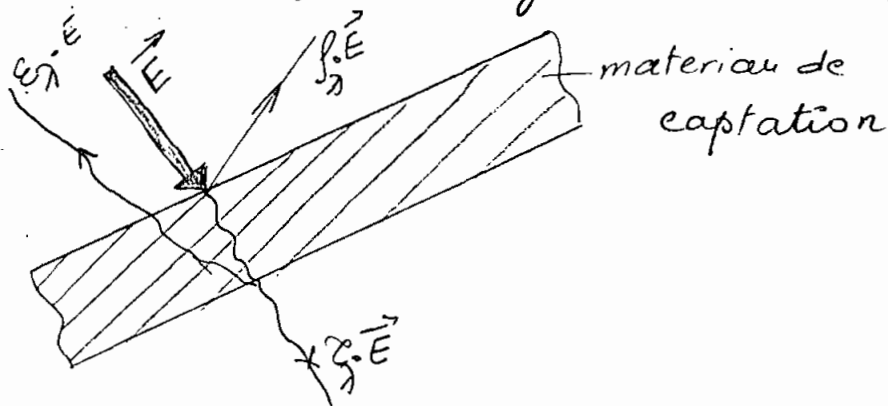
$$(20) \quad \tau_\lambda + \alpha_\lambda + \varepsilon_\lambda = 1$$

Quand le rayonnement solaire atteint une surface on a 3 phénomènes engendrés

$\tau_\lambda \cdot E$ : énergie transmise ( $J/m^2$ )

$\rho_\lambda \cdot E$ : énergie réfléchie ( $J/m^2$ )

$\varepsilon_\lambda \cdot E$ : énergie émise ( $J/m^2$ )



Ces propriétés physiques et optiques étudiées d'une manière théorique doivent selon le cas être des critères qui gouvernent notre choix de matériaux.

On ne pourrait pour un matériau donné avoir un choix où toutes les caractéristiques sont optimales; il faudrait dans tout choix arriver à une sorte de compromis entre plusieurs alternatives possibles.

Nous allons étudier séparément les divers constituants de notre capteur et dégager les propriétés optimales, qui dirigeront les choix que nous aurons à faire.

## ⑤ Choix des Matériaux constituant le Capteur Intégré:

a- Le Vitrage: il doit posséder un grand coefficient de transmission et en même temps un faible coefficient d'absorption: ceci pour éviter son échauffement lors de son exposition au soleil; et enfin il doit posséder une faible réflexion



le rapport  $\frac{\alpha}{\alpha + \rho}$  est un bon coefficient de choix, du vitrage du capteur

$$\alpha + \alpha + \rho = 1$$

le facteur de qualité d'un vitrage est défini comme

$$F.Q. = \frac{1}{\alpha + \rho} - 1$$

$$F.Q. \rightarrow 1 \text{ si } \alpha + \rho \rightarrow 50\%$$

Ainsi on constate que pour posséder une bonne captation on est obligé de choisir un vitrage dont la somme de l'absorbance et de la réflectance est nettement supérieur à 0.5

Le matériau mis à notre disposition pour la réalisation du vitrage est du plexiglas  $\alpha = 0.862$ ;  $\rho = 0.915$  puis  $\rho = 0.089$ .

$$\text{Notre } F.Q. = 86\%$$

On peut déterminer le F.Q. d'un verre

$$F.Q. = 85\%$$

Ainsi on peut remplacer le <sup>verre</sup> plexiglas par du plexiglas dans notre modèle expérimental, car il ne faut pas oublier que même si les F.Q. sont presque semblables, la

tendue aux rayonnements solaires ou stabilité thermique chimique est différente: le plexiglas se dégrade sous l'effet de l'exposition continue au soleil.

Mais pour notre modèle expérimental de capteur il faudrait utiliser ce matériau car les périodes de test ne dépassant pas des jours. Mais dans les conclusions sur le modèle commercial du capteur intégré on ne devrait utiliser du plexiglas.

#### b. L'absorbeur:

Notre capteur intégré pour des impératifs économiques a son réservoir d'accumulation qui sert directement comme absorbeur. Ce réservoir est en acier inoxydable recouvert d'une mince couche de noir de carbone ceci pour améliorer ces capacités d'absorber le rayonnement transmis par le verre par effet de serre.

Les propriétés essentielles sur lesquelles il faut insister c'est la capacité de ce réservoir de recevoir toute l'énergie

retransmise par le vitrage.

Les theories les plus recentes sur les revetement surfaciques [ref n° ] montre que la peinture ou revêtement noir est plus apte pour recevoir donc a accumuler l'energie incidente.

### c - les Isolants thermiques:

Par ce terme on sous-entend tous les materiau qui de par leur caracteristiques physiques sont capables d'isoler thermiquement le constituant principal du capteur qui est l'absorbteur (c'est le reservoir d'accumulation). Le role essentiel des isolants sera alors de diminuer les pertes de chaleur entre le capteur et l'exterieur surtout durant la nuit où le soleil disparaît et pendant laquelle l'absorbteur a tendance a emettre un rayonnement thermique vers le ciel et l'environnement.

A ce fait les propriétés de conservation de la chaleur emmagasinée durant le jour par le capteur permettent de prendre une douche régulière, après la disparition du soleil.

Les isolants sont constitués du support global du capteur; des joints d'étanchéité; du support d'absorbant; des divers mode de fixation

Pour le support global du capteur ou cadre le choix optimum tenant compte des intempéries comme la pluie serait de l'acier galvanisé résistant aux contraintes thermiques mais aussi physiques (poids du réservoir et des isolants.)

Pour les besoins du modèle expérimental nous utilisons un cadre en bois.

Pour les joints nous utilisons du mastic

L'isolation du degré du réservoir sera de la laine de verre d'épaisseur 5mm.

### Nomenclature chapitre IV

$A_p$ : surface collecteur en  $m^2$

$A_s$ : surface de la structure portance  $m^2$

$C_w$ : chaleur spécifique de l'eau  $J/kg^\circ K$

$d$ : différence température diurne entre le collecteur et le fluide =  $T_{abs} - T_w$

$D$ : durée du jour en secondes

$F_g$ : facteur de radiation au sol.

$F$ : Facteur de radiation du ciel.

$h_r$ : coefficient radiatif de transfert  $W/m^2 \cdot ^\circ K$

$M$ : masse thermique équivalente  $\equiv m$  en  $kg$ .  
du volume d'eau dans l'absorbeur

$N$ : durée de la nuit en secondes

$q_T$ : densité total du flux incident  $J/m^2$

$S$ : flux solaire incident au site  $W/m^2$

$S_0$ : valeur de pointe du flux solaire =  $\frac{\Sigma q_T}{20} W/m^2$

$t$ : temps écoulé depuis la levée du soleil

$T_a$ : temp. ambiante en  $^\circ K$

$T_e$ : temp. équivalente du ciel en  $^\circ K$

$T_w$ : température de l'eau stockée ou de

l'eau distribuée par le capteur solaire  $^\circ K$

$T^*$ : temp. d'équilibre du refroidissement

$U_{co}$ : coefficient convection  $W/m^2 \cdot ^\circ K$  du collecteur

$U_s$ : coefficient convection du support en  $W/m^2 \cdot ^\circ K$

$\alpha'$ : absorbance du Collecteur solaire

$T_{abs}$ : température de l'absorbeur en degré

### Nomenclature chapitre IV (Suite.)

$\theta$ : température relative diurne  $\cong T_w + d - T_A$  en degré °K

$\phi$ : température relative nocturne  $\cong T_w - b - T^*$

$\tau$ : constante thermique du capteur

$$\tau = \frac{M c_w}{U A_p} \text{ en sec}$$

$\sigma$ : coefficient de Stephan Boltzman =  $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

$\rho$ : densité de l'eau en  $\text{kg/m}^3$

$\gamma$ : inclinaison du capteur

$b$ : différence de température entre l'absorbeur (ici réservoir) et le fluide  $b = T_w - T_{abs}$

$T_{abs}$ : température du corps de l'absorbeur en °K.

$\dot{m}_1$ : débit d'eau entrant dans le capteur à la température  $t_1$

$\dot{m}_2$ : débit d'utilisation du capteur ou eau sortant à la température  $T_w$ .

## CHAPITRE IV : OPTIMISATION THERMIQUE DU CAPTEUR SOLAIRE.

Le capteur intégré est régi par un type particulier d'échanges de chaleur; il est donc nécessaire, afin de pouvoir prévoir son comportement thermique, d'ébaucher une approche théorique, qui simule et cerne l'ensemble des paramètres, qui gouvernent son comportement thermique.

Une telle démarche est certes très délicate, mais par une approche simplifiée du système nous allons essayer de déterminer deux types de modèles mathématiques qui simulent un fonctionnement probable du capteur durant le jour et la nuit. Les divers modèles sont basés sur un capteur statique.

→ a- le 1<sup>er</sup> est sans échange de matière avec l'extérieur

→ b- le 2<sup>e</sup> est avec échange de matière avec l'extérieur

L'extérieur ici symbolise l'utilisation de l'eau chaude sanitaire.

Ⓐ MODELE D'ECHANGE THERMIQUE

DURANT LE JOUR SANS ECHANGE

DE MASSE AVEC L'EXTERIEUR:

Il s'agit dans ce premier modele d'appréhender les types de mecanismes d'echange de chaleur dans le capteur. Nous allons etudier le systeme soleil et capteur en y appliquant la loi thermodynamique d'echange de chaleur on peut ecrire que

Energie transmise par le Collecteur ou Vitrage = gain de l'eau de l'absorbeur + Pertes thermiques du capteur

Traduisons cette egalite' en expressions mathematique.

$$2 \cdot A_p \cdot S = M C_w \left( \frac{dT_w}{dt} \right) + U A_p T_w + A_p U_d - U A_p T_a$$

le coefficient  $U$  peut-etre assimile' avec de grands ecartés d'appréciation a'

$$U_p + U_s A_s / A_p$$

L'energie solaire recue durant un jour de duree  $D$  en secondes peut être approximee par l'expression

$$S = S_0 \cdot \sin \frac{\pi t}{D}$$

avec  $S_0$ : valeur pointe du rayonnement durant le jour



L'équation d'échange de chaleur précédente sera ramenée à une forme différentielle plus simple.

$$\text{soit } \theta = T_w + d - T_a \cong T_{abs} - T_a$$

L'équation de transfert se réduit alors à l'équation différentielle suivante dont la variable d'intégration est le temps  $t$  ou temps durant lequel le soleil rayonne sur le capteur.

on voit que  $t_{max} = D = \text{durée du jour}$

$$\tau \cdot \frac{d\theta}{dt} + \theta = \frac{\alpha' S_0}{U} \sin \frac{\pi t}{D}$$

La résolution d'une telle équation différentielle nous donne  $\theta = \text{fonction } t$  et ensuite de l'équation  $\theta = T_w + d - T_a$  on tire la valeur de  $T_w$  (température de l'eau sortant du capteur solaire.)  
Les techniques de résolution nous donnent la solution:

$$T_w = \theta_0 e^{-t/\tau} + \frac{\alpha' S_0}{U \left[ \left( \frac{\tau \pi}{D} \right)^2 + 1 \right]} \left[ \sin \frac{\pi t}{D} - \cos \frac{\pi t}{D} \right] + T_a - d$$

Equation (19)

Voir courbe 8 en Annexe: influence de  $V/A_p$  sur  $T_w$  d'après l'équation (19).

## (B) MODELE D'ECHANGES THERMIQUES

### DURANT LA NUIT SANS CHARGE :

Dans ce modèle le soleil disparaît et la seule source de chaleur disponible pour le système, cette fois constituée du capteur et de son environnement, est le réservoir, jouant le rôle d'absorbeur.

Ce réservoir a une tendance à rémettre l'énergie qu'il a accumulée durant le jour, à l'air qui l'entoure et ensuite au ciel.  
Le bilan énergétique est le suivant

Energie Accumulée de l'absorbeur = Pertes convective de l'ambiance + Echange radiatif avec le ciel

$$- M C_w \cdot \frac{dT_w}{dt} = \epsilon' A_p \sigma F_s [(T_w - b)^4 - T_e^4] + F_g [(T_w - b)^4 - T_e^4] + U_{co} [(T_w - b) - T_a]$$

on a  $T_w - b = T_{\text{absorbeur}} = T_{\text{abs}}$

L'équation devient ainsi :

$$- M C_w \cdot \frac{dT_w}{dt} = \epsilon' A_p \sigma F_s [T_{\text{abs}}^4 - T_e^4] + F_g [T_{\text{abs}}^4 - T_e^4] + U_{co} [T_{\text{abs}} - T_a]$$

ceci est une équation différentielle du 1<sup>er</sup> degré, qu'il faut résoudre en intégrant par rapport à la variable  $t$  (temps en s)

© REDUCTION DES SOLUTIONS PARAMETRIQUES  
DES DEUX MODELES SANS CHARGE A DES  
SOLUTIONS ALGEBRIQUES:

Pour pouvoir utiliser les solutions de ces équations, afin de prévoir la température d'eau chaude  $T_w$ ; il est nécessaire de les réduire à des expressions algébriques qui pourront être traitées analytiquement. Pour cela nous allons fixer un certain nombre d'hypothèses qui sont basées sur des valeurs approximatives.

Valeurs des paramètres du capteur

$$M_{\text{eau}} = \rho \cdot V \approx 130 \text{ kg car } V = 136 \text{ litres}$$

$$D = 4.32 \cdot 10^4 \text{ s (12 heures de soleil)}$$

$$N = 4.32 \cdot 10^4 \text{ s (12 heures de disparition du soleil de } 19^{\text{h}} \text{ à } 8^{\text{h}} \text{ matin)}$$

Nous allons fixer la température moyenne de la nuit  $T_{a, \text{N}} = 295 \text{ K (} 22^{\circ} \text{C)}$

$U = 3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  coefficient général pertes du capteur solaire en entier

$U_{\text{co}}: 6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  coefficient général de transfert convectif de l'air emmagasiné dans le capteur.

$$C_w = 4180 \text{ kJ/kg eau } ^\circ\text{C}$$

$$A_p = 2.4 \text{ m}^2 \text{ (surface collecteur solaire)}$$

$$M \cdot C_w = 0.510^6 \text{ J/}^\circ\text{C}$$

$$V = 136 \text{ litres} = 0.13 \text{ m}^3$$

$$\tau = \frac{M C_w}{U A_p} = 1.33 \times 10^6 \text{ s}$$

$$T_{a, N} = \text{temp. moyenne diurne} = 303^\circ\text{K} (30^\circ\text{C})$$

$$T_{cap, \text{fin jour}} = T_{wf}$$

$$T_e = 293^\circ\text{K} (20^\circ\text{C})$$

$$d = 2 \text{ max } 10$$

$$T_a = 298^\circ\text{K} (25^\circ\text{C})$$

$$T_{abs} = 26^\circ (299^\circ\text{K})$$

$$\theta_0 \approx 15^\circ \text{ a } 20$$

Ces hypothèses de travail qui sont en fait des valeurs moyennes nous permettent de déduire l'équation du comportement moyen donc le plus probable du capteur solaire

Nous allons développer les 2 solutions des deux modèles théoriques  
le 1<sup>er</sup> modèle diurne sans charge  
aura ainsi pour solution

$$T_w = \theta_0 e^{-t/1.3310^6} + 2.8410^5 \left[ \sin \frac{7.310^5 t}{4.2410^4} - \cos \frac{7.310^5 t}{4.2410^4} \right] + T_a - d.$$

Equation (19')

L'équation est représentée graphiquement voir courbe n° 1 en Annexe.

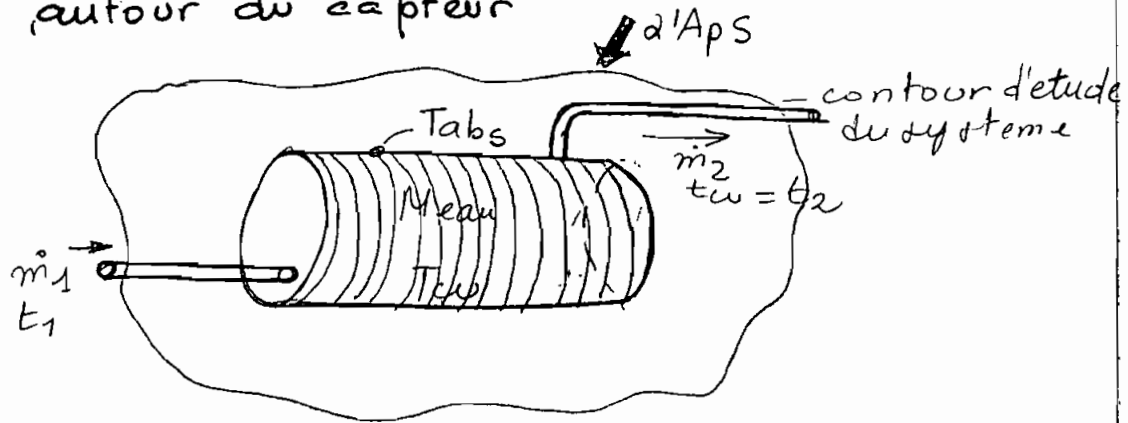
Le deuxième modèle mathématique se réécrit suivant les hypothèses précédentes

$$T_w - T_w p = 1.77 \cdot 10^3 \epsilon' F_5 [T_{ab}^4 - T_e^4] + 2 \cdot 10^6 [T_{ab_s}^4 - T_a^4] + 1.2 \cdot 10^6 [T_{ab}^4 - T_a^4]$$

Cette équation aussi qui décrit le refroidissement de l'eau chaude sanitaire durant la nuit est représentée sur la même courbe n° 1 de l'annexe

## ① Modele d'Echanges Thermiques durant le jour avec une charge

On refait toujours un bilan energetique  
autour du capteur



$$\text{Energie recuee par systeme} = \text{Energie sortant} + \text{Accumulation dans le systeme} + \text{Pertes du systeme}$$

Pour satisfaire la condition  $M$  constante  
on devra faire de telle sorte que  $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$   
ce qui veut dire que le debit d'utilisation  
est egale au debit de remplissage du  
'capteur solaire integre'.

$$d'Aps = M c_w \cdot \frac{dT_{cw}}{dt} + \dot{m} c_w (T_w - T_1) + U A_p (T_{abs} - T_a)$$

Ceci est l'equation qui regit les mecanismes  
d'echange de chaleur dans le capteur  
durant le jour avec un debit d'utilisa-  
tion  $\dot{m}_1$  egale au debit de remplissage  
 $\dot{m}_2$ .  $\dot{m} = \dot{m}_1 = \dot{m}_2$ .

Reduisons l'équation suivante en termes algébriques pour mieux la résoudre

$$c \cdot \frac{d\theta}{dt} + A \cdot \theta + B = \frac{d' S_0}{U} \sin \pi t / \lambda$$

les mêmes hypothèses sur  $S$ ;  $U$  et  $\theta$  sont toujours considérées.

on avait  $c = 1.33 \cdot 10^6$

$$A = \frac{m C_w}{U A_p} + 1 = 2.5 \cdot 10^2 \text{ avec } m = 201/10 \text{ mn.}$$

$$B = \frac{T_1 - T_a + d}{U A_p} = 1.212$$

$$\frac{d'}{U} = 2.7 \cdot 10^5$$

L'équation réduite devient

$$1.33 \cdot 10^6 \frac{d\theta}{dt} + 2.5 \cdot 10^2 \cdot \theta + 1.212 = 62.6 \sin 7.3 \cdot 10^5 t$$

où  $t$  est donné en secondes

Pour résoudre cette équation nous allons utiliser une solution analytique: Méthode de Runge-Kutta (conférence programme de résolution en annexe.)

Le traitement analytique nous permet de déduire  $\theta$  et ensuite  $T_w$  directement. Les résultats obtenus sont:

Resultats Resolution de l'equation  
differentielle donnant  $T_w$  pour un debit  
d'irrigation  $m^3$  (l/s) (Methode Range  
Kutler-Gill)

<u>t (h)</u>	<u><math>\theta</math></u>	<u><math>T_w</math> °C</u>
1	5	27
2	5	27.5
3	6	30.5
4	5	
5	5	43.5
6	4.6	43
7	4	44
8	5	42
9	4	40
10	5	39
11	4	37
12	5	37

ici  $m^3 = 1.21/min$

La courbe n° 2 et 2' traduisent l'equation  
du modele sans avec charge mais pour  
divers debits d'irrigation.



## CHAPITRE V: CONCEPTION ET EXPERIMENTATION DU CAPTEUR INTEGRÉ

La conception du capteur s'est en partie réalisée dans tous les chapitres précédents; dans celui-ci il s'agit de décider des formes définitives des constituants du modèle expérimental, ensuite il s'agira de tester ce modèle expérimental pour en tirer les dimensions, et les formes concrètes qu'on l'on pourrait améliorer du point de vue de la pratique. Car il faut bien tester le modèle expérimental pour décider, à partir des performances obtenues, des dimensions et forme de ce que l'on pourrait nommer le modèle fini ou "commercial". Dans l'analyse des résultats et les recommandations l'on reviendra sur cette question qui est à tout point de vue d'importance capitale.

## ① DESCRIPTION DU MODELE

### EXPERIMENTAL:

Les plans joints en annexe montrent les différents constituants du capteur

Le support ① est un rectangle de  $170 \times 150 \times 30$

Les parois latérales ② sont deux triangles de base 140 et hauteur 70 épaisseur 15mm.

Les supports des réflecteurs ③ sont formés de deux cadres  $150 \times 99$  cm

Ces supports seront recouverts d'un papier aluminium de même dimension servant à récupérer les rayons solaires "égares" pour augmenter le rendement thermique du capteur solaire utilisé.

L'isolant en laine de verre servira à agir comme un écran thermique ceci améliore les performances du capteur durant la nuit qui le disque solaire disparaîtra.

Les tiges métalliques servant à mieux fixer le réservoir sur son support latéral.

Le réservoir est récupéré d'un ancien chauffe-eau électrique c'est un cylindre dont les deux bouts sont en  $1/4$  sphère.

Le réservoir fera l'objet d'un dimensionnement particulier dans le chapitre, à suivre. Il est recouvert d'une couche noire qui améliore son absorbance thermique et diminue son émissivité. Sa capacité volumique totale est de 136 litres.

Diamètre 413 mm

Surface totale  $1,3 \text{ m}^2$

Épaisseur 6 mm

Coefficient transmission  $54 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

Matériau réservoir acier inoxydable de résistance mécanique 1000 MPa.

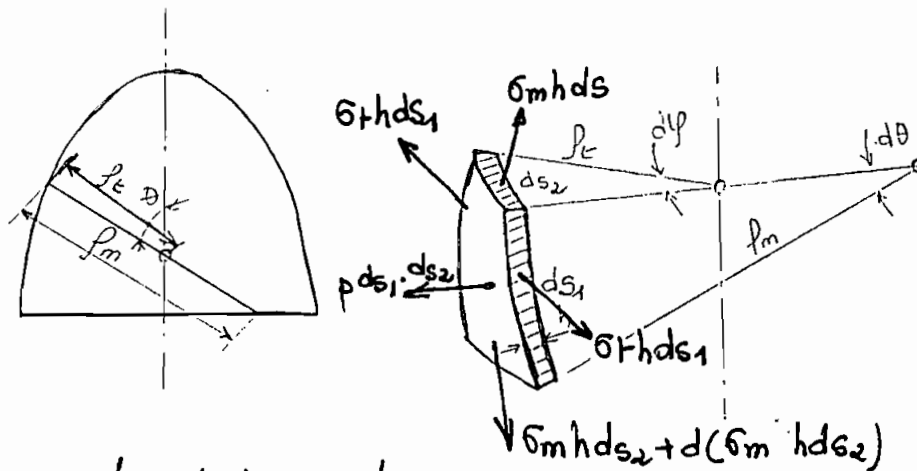
## ⑧ DESIGN DU RESERVOIR OU ABSORBEUR DU CAPTEUR.

Le dimensionnement du reservoir du capteur releve d'un souci de fiabilite du systeme car ce reservoir doit repondre sans se deformer aux sollicitations due a la pression de distribution du reseau de la SONEES. Ce reseau de distribution delivre l'eau a peu pres 2.5 bars; le reservoir doit être conçu de tel sorte que la distribution soit continue.

Le reservoir étant constitué de deux parties geometriques: deux  $\frac{1}{4}$  de spheres accolées a une partie cylindrique. Ces elements geometriques doivent être dimensionnées selon des theories differentes. Nous allons examiner les deux theories qui regissent le dimensionnement de ces parties du reservoir.

Le calcul des reservoirs se fait selon la theorie des plaques et enveloppes. Si l'on admet que les contraintes dans l'enveloppe sont distribuées d'une maniere uniforme dans l'epaisseur de l'enveloppe; ou il n'existe pas de flexion dans l'enveloppe; la theorie de l'enveloppe se reduit ainsi a la theorie de la membrane.

B1: Determination des Contraintes dans la partie cylindrique du reservoir.



$h$ : epaisseur du reservoir

$\sigma_m$ : contrainte meridiennne

$\sigma_t$ : contrainte tangentielle

$R_t$ : rayon de courbure section normale a l'arc meridien

$R_m$ : rayon de courbure de l'arc meridien.

$P$ : pression dans le reseau de distribution

L'equilibre des forces sur la normale nous donne l'equation suivante:

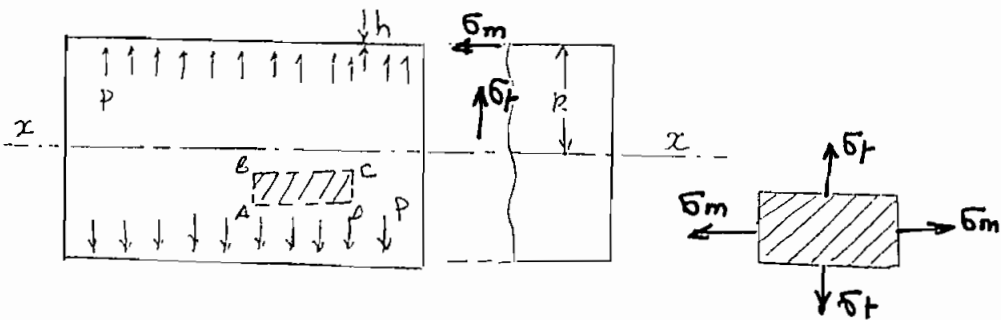
$$p ds_1 \cdot ds_2 - \sigma_m h ds_2 d\theta - \sigma_t h ds_1 d\varphi = 0$$

Du fait de la geometrie on a

$$d\theta = \frac{ds_1}{R_m} \quad \text{et} \quad d\varphi = \frac{ds_2}{R_t}$$

En definitive on obtient l'equation d'equilibre de Laplace

$$\frac{\sigma_m}{\rho_m} + \frac{\sigma_t}{\rho_t} = \frac{p}{h}$$



Étudions la section droite ABCD du cylindre.  
Nous allons supposer un état de contrainte bi-axial ( $\sigma_t; \sigma_m$ )

Si une surface quelconque est sollicitée par une pression uniforme, ainsi quelque soit sa forme, la projection de la résultante des forces de pression sur un axe donné est égale au produit de la pression  $p$  par l'aire de la projection de la surface sur un plan perpendiculaire à l'axe donné

$$P_x = \int_F p \cos \varphi dF$$

L'équilibre de la rosette ABCD donne

$$\sigma_m 2\pi R h = P$$

la composante axiale des des forces de pression est  $P_x = p \pi R^2$

L'équation de Laplace donne ainsi

$$\sigma_m = \frac{PR}{2h}$$

pour un cylindre  $P_m = \infty$  et  $P_t = P$

$$\sigma_t = \frac{P \cdot R}{h} = 2 \cdot \sigma_m.$$

On constate que la contrainte circonferentielle est le double de la contrainte méridienne.

La contrainte réelle résultante de ces deux contraintes est  $\sigma$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_m^2}$$

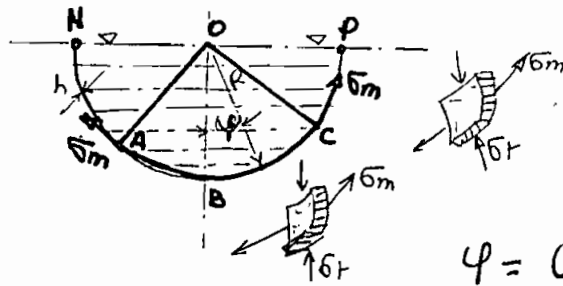
$$\sigma = \sqrt{(2\sigma_m)^2 + \sigma_m^2} = \sqrt{5\sigma_m^2}$$

$$\sigma = 2.24\sigma_m$$

Donc le réservoir cylindrique devrait résister à cette valeur de la contrainte sans se déformer.

Les formules précédentes montrent que la longueur du réservoir n'intervient pas dans la résistance mécanique, seuls  $R$  et  $h$  conditionnent les contraintes mécaniques.

B2: Determination des Contraintes  
Dans les parties Spheriques  
du Reservoir



$$\varphi = (\widehat{OAC})$$

$P$ : resultante de la force de pression du liquide

$\gamma$ : poids specifique de l'eau en  $N/m^3$

Considerons le segment decoupe dans la sphere ABC, son volume a pour expression

$$V_{\text{segm}} = \int_0^{\varphi} \pi (R \sin \varphi)^2 R \sin \varphi d\varphi$$

$$V_{\text{seg}} = \pi R^3 \left( \frac{2}{3} - \cos \varphi + \frac{1}{3} \cos^3 \varphi \right)$$

le Volume total NABCP est

$$V_T = \frac{2}{3} \pi R^3 (1 - \cos^3 \varphi)$$

$$P = \gamma \cdot V_T$$

$$P = \frac{2}{3} \pi R^3 \gamma (1 - \cos^3 \varphi)$$

Donc

$$\sigma_m = \frac{\gamma R^2}{3h} \frac{1 - \cos^2 \varphi}{\sin^2 \varphi}$$



Dans le cas de l'enveloppe spherique on a

$$r_m = r_t = R$$

L'equation d'equilibre de Laplace donne

avec  $p = \gamma R \cos \varphi$

$$\sigma_t = \frac{\gamma R^2}{3h} \left[ 3 \cos \varphi - \frac{1 - \cos^3 \varphi}{\sin^2 \varphi} \right]$$

On constate ici que  $\sigma_m$  et  $\sigma_t$  ne dependent que de la geometrie du reservoir  $\varphi$  et du poids specifique du liquide qu'il contient.

On pourrait rechercher une contrainte equivalente a l'etat bi-axial de contrainte  $(\sigma_m, \sigma_t)$

$$\sigma_{\text{equi}}^{\text{max}} = \frac{\gamma R^2}{3h} (1+k)$$

B3: Etude des diverses Contraintes:

Pour que le réservoir supporte sans  
faillir aux sollicitations il faut qu'il résiste  
dans ses parties respectives aux sollicitations  
 $\sigma$  et  $\sigma_{\text{eq}}^{\text{max}}$ .

soit  $p = 2.5 \text{ à } 3 \text{ bars}$

Déterminons l'épaisseur  $h$  pouvant  
résister à la pression de 2.5 bars pour  
un rayon de réservoir  $R = 187 \text{ mm}$ .

L'équation de  $\sigma_t = \frac{p \cdot R}{h}$  donne

$$h = \frac{p \cdot R}{\sigma_t} \quad \text{soit } \sigma_t = 500 \text{ MPa}$$

$$h = \frac{2.5 \times 10^5 \times 0.187}{1000 \times 10^6} = \frac{0.935 \times 10^{-4}}{2} \text{ m}$$

$$h = \frac{0.935 \text{ mm}}{2} = 0.4675 \text{ mm}$$

Donc avec  $h = 0.935 \text{ mm}$  le réservoir  
pourra résister aux contraintes développées  
dans la partie cylindrique. (C'est dans cette  
partie où les sollicitations sont les plus  
importantes)

Nous avons un réservoir de fortune dont  
 $h = 6 \text{ mm}$ , donc il convient pour résister à 2.5 bars.

© Mesures Experimentales:

Schema de l'installation où le capteur solaire est integre au reseau chauffe-eau Electrique.

$R_1, R_2, R_3, R_4$ : robinetterie

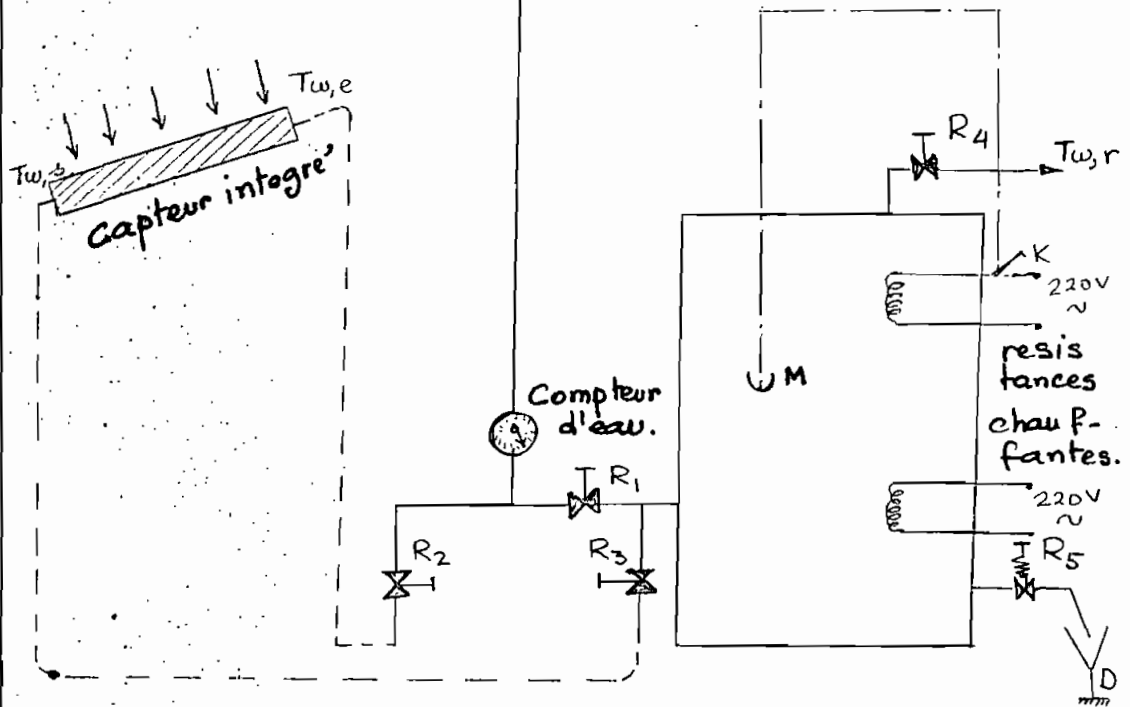
$R_5$ : soupape de securite tarée à  $150 \text{ lb}/\text{po}^2$

D: drain collecteur du chauffe eau sanitaire

K: thermostat

M: sonde thermique

reseau SONEES entre 2.5 et 3 bars.



CI: Mesures d'ensoleillement:

Materiel utilisé: solarimetre Pana-Visa  
Metermayer

Multi metre SIMPSON

Il s'agit ici de relever de 8h à 20h les valeurs en mV de la lecture delivrée par le solarimetre car  $1\text{mV} = 105\text{WATT}/\text{m}^2$  ensuite l'on traduira les valeurs lues en puissance par  $\text{m}^2$  de capteur. Le tableau n° 1 compile les valeurs obtenues.

L'approximation theorique de l'ensoleille-  
ment etait donnee par la formule

$$s = s_0 \sin(\pi t / D)$$

$s_0$ : valeur maximale journaliere de  
l'energie solaire reveue en  $\text{W}/\text{m}^2$

$t$ : tps d'exposition ou duree en s entre  
l'heure de levee du soleil et l'heure experi-  
mental.

$D$ : duree d'un jour solaire moyen en s  
 $D = 4.32 \cdot 10^4 \text{ s}$  (soit 12h)

La courbe n°2 montre la comparaison entre  
les mesures theoriques et les lectures experi-  
mentales. les ecartes notes seront expliques dans  
la conclusion

## c2: Mesures des températures du capteur:

On utilise ici des thermomètres pour mesurer la température de l'absorbeur; de l'eau à l'entrée du réservoir et de l'eau à la sortie du réservoir. La température de l'eau au milieu du réservoir peut être approximée par la moyenne entre l'entrée et la sortie car le phénomène de stratification intervient dans la distribution des températures dans le réservoir.

Le modèle mathématique où le capteur est sans charge a ses mesures dans le tableau 1. Les courbes de description de ces résultats ou courbe 1 permettent de comparer les résultats expérimentaux et les prévisions que notre modèle sans charge avait donné.

Dans la conclusion nous reviendrons sur les explications entre prévision théorique et mesures expérimentales.

Le modèle avec charge possède ses mesures avec un débit aux heures indiquées dans le tableau n°2, et n°2'

Les courbes n°3 traduisent ces mesures sur le papier; on y représente en même temps les valeurs que la prévision théorique nous a permis d'établir dans l'étude du modèle avec charge: car il faut le rappeler il s'agissait de prévoir le comportement de la température d'utilisation  $T_u$  aux diverses heures d'expérimentations.

Sur cette courbe on peut visualiser les écarts entre théorie et pratique, dans la conclusion nous aurons à revenir sur ces considérations

### c3: Mesure de la consommation électrique du chauffe eau électrique:

Nous disposons d'un chauffe-eau électrique composé de deux modules de 4.5 kW et d'une capacité de 72 gal. (273 l). Pour mesurer sa consommation électrique on simule des charges d'utilisation d'une durée variable (10 mn; 20 mn; 5 mn) et à l'aide d'une pince ampèremétrique on mesure sa consommation en Amperes. Ensuite on procédera à l'opération suivante;  $I$  étant connu et  $U = 220V$

$$P = U \cdot I \quad \text{en WATT}$$

Connaissant le temps de consommation de  $I$  ampères en heures on en déduit aisément la puissance consommée en kWh par la formule  $U \cdot I \cdot T$  (en kWh)

Les thermostats du chauffe-eau sont réglés à  $115^{\circ}F$ . Tout de même nous contrôlons la température de l'eau chauffée.

Le Tableau n°3 donne les valeurs expérimentales obtenues.

c4: Mesures de la température de distribution d'eau et de la consommation électrique du système chauffe-eau électrique combiné au chauffe-eau solaire:

Nous conservons le même système de la pince ampèremétrique et de l'enregistreur ampèremétrique pour calculer la puissance consommée en kWh.

Les tableaux n° 4<sup>1</sup> et 4<sup>2</sup> montrent les valeurs expérimentales obtenues dans un tel système combiné.

Dans la conclusion nous analysons les performances et les économies qu'un tel système combiné peut procurer à l'utilisateur d'un système intégré.



Tableau 1.

## Mesures Capteur Integre'.

Date: 22/05/1984

Observations: Capteur independant modele  
sans charge. 45° inclinaison reflecteurs

Journee Claire et ensoleillee.

Heures	$I_h$ $W/m^2$	temp. $^{\circ}C$ Absorbeur	temp. $^{\circ}C$ Ambiante	temp. eau Entree $^{\circ}C$	temp. eau Sortie $^{\circ}C$
8	0.0	26.0	26.5	26.0	27.0
9	105.0	40.0	27.0	28.0	39.0
10	682.5	39.0	29.0	30.0	41.0
11	850.5	57.5	31.0	35.0	43.0
12	966.0	68.0	32.0	40.0	58.0
13	1050.0	74.0	35.0	45.0	60.0
14	997.5	77.0	32.0	48.0	63.0
15	829.5	68.0	34.0	46.0	51.0
16	661.5	67.0	31.0	45.0	50.0
17	535.5	64.0	30.0	44.0	48.0
18	120.0	52	27.0	43.0	44.0
19	0	49.0	24.0	45.0	35.0
20	0	45.0	22.0	42.0	30.0

Tableau n°2

Projet Fin d'Etudes 83/84

Mesures Capteur intégré

Date: 23/05/84

Observations: Journée diffuse sans soleil  
 le soir à 15h. Modèle avec débit 17l/10mn à 12h et 15h

Heures	I <sub>h</sub> w/m <sup>2</sup>	temp. °C Absorbéur	temp. °C Ambiante	temp. Eau Entree	temp. Eau Sortie
8	0.0	37.0	25.0	33.0	39.0
9	30.0	44.0	28.0	33.0	38.0
10	630.0	48.0	28.0	37.0	42.0
11	800.0	52.0	30.0	40.0	42.0
12*	850.0	52.0	31.0	30.0	57.0
13	790.0	62.0	30.0	43.0	54.0
14	20.0	59.0	29.0	39.0	47.0
15	0.0	57.0	29.0	38.0	43.0
16	0.0	52.0	28.0	35.0	42.0
17	0.0	50.0	27.0	34.0	43.0
18	0.0	48.0	26.0	34.0	43.0
19	0.0	45.0	25.0	32.0	46.0
20	0.0	44.0	25.0	30.0	45.0

Projet Fin d'Etudes 83184  
 Mesures Capteur Integre'  
 Date: 24/05/84

Tableau 2'

Observations: Modele avec charge 12  
 3.6 l/min aux heures en \*. Journee tres diffuse

Hres	In $W/m^2$	temp °C Absorbeur	temp. °C Ambiante	temp. °C Eau Entree	temp. °C Eau Sortie
8	0.0	36.0	24.0	32.0	38.0
9	0.0	36.5	26.0	33.0	38.0
10	0.0	37.0	27.0	36.0	38.0
(3.6 l/min) 11 *	300.0	38.0	26.0	30.0	43.0
12	800.0	52.0	29.0	33.0	40.5
(3.6 l/min) 13 *	0.0	48.0	30.0	33.0	43.0
14	0.0	48.0	29.0	34.0	42.0
15 *	0.0	48.0	28.0	34.0	41.0
16	0.0	48.0	27.0	35.0	40.0
17	0.0	49.0	27.0	35.0	40.0
18	0.0	49.0	26.0	36.0	38.0
19	0.0	47.0	25.0	35.0	37.0
20	0.0	45.0	25.0	35.0	37.0

① COMPARAISON ENTRE LES MODELES  
THEORIQUES ET LES MESURES  
EXPERIMENTALES.

DI: Le Modèle d'ensoleillement:

Les courbes n° 2<sup>v</sup> et 2' nous renseignent assez clairement sur les 2 évolutions entre la théorie prévisionnelle du comportement du flux solaire et les mesures faites au Solarimètre.

Le modèle théorique était basé sur l'approximation sinusoidale de l'irradiance  $S$  en  $W/m^2$

$$S = S_0 \sin \pi t / D$$

$t$ : temps écoulé entre l'heure d'expérimentation et l'heure de levée du soleil en s.

$D$ : durée en s d'une journée solaire

$S_0$ : valeur pointe de l'irradiance reçue durant la journée. Elle se situe entre

12h et 16 (pour la journée du 22/5/84

$S_0 = 1050 W/m^2$  à 13h voir courbe n° 2)

En évaluant les divers écarts entre les valeurs théorique et expérimentale, on constate que l'on a des différences dont les valeurs maximum se situe entre 13h et 15h.

L'écart maximum est de 11.5% (à 13h)

Une telle différence s'explique par l'approximation sinusoidale du rayonnement solaire arrivant sur le site durant une journée; car dans le modèle on a pris comme hypothèse une journée solaire de 12h et qui est une hypothèse vérifiée que durant les périodes de plein ensoleillement; généralement les journées solaires enregistrées ont une durée de 10 à 12h.

La courbe n°2 donne une idée plus précise des valeurs absolues des écarts enregistrés. De tels écarts sont explicables et ils sont aussi inévitables, ce qu'il faut faire c'est de les conserver dans un range ou marge raisonnable (10 à 12% en valeur relative.)

D2: Comparaison de  $T_w$  et des Mesures expérimentales:

D2a: Modèle sans charge:

Ce modèle mathématique qui nous a permis de calculer  $T_w$ , était une équation diffé-

rentielle du 1<sup>er</sup> degré

$$\tau \cdot \frac{d\theta}{dt} + \theta = \frac{\alpha' S_0}{U} \sin \pi t / D$$

$$\text{ou } \tau = \frac{MC_w}{U A_p} \quad \text{et } S = S_0 \sin \pi t / D$$

Le coefficient  $U$  ou coefficient général de transfert de chaleur du capteur intégré était estimé à  $3 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ; ceci a été une hypothèse de travail pour élaborer l'équation du modèle théorique.

Comme tout coefficient convectif il est fonction de la température ambiante; sa valeur peut même tripler pour une augmentation de température de  $10^\circ\text{C}$ .

Les écarts les plus importants (10%) enregistrés durant la période de 11h à 16h sont alors dus à la variation de  $U$  en fonction de la température ambiante.

Si nous faisons intervenir cette variation de  $U$  dans l'équation du modèle l'on pourrait réduire les écarts jusqu'à 2%.

A tout point de vue la déviation maximum de 10% enregistrée à 13h est très acceptable et ceci encore une fois valide le modèle théorique utilisé dans l'analyse.

### D2b: Modèle avec charge:

Le modèle de base de la l'expérimentation des douches de la famille où le système est installé'. Pour les journées durant lesquelles ce modèle avec charge est expérimenté on a tenté de simuler des bains à diverses heures 11<sup>h</sup>, 12<sup>h</sup>, 13<sup>h</sup>, 14<sup>h</sup>, 15<sup>h</sup> pour des débits de 1.2 l/min à 8 l/min durant 10 mn.

Les résultats obtenus du comportement thermique du capteur sont représentés par les courbes 2 et 2'. Les deux journées d'expérimentation ont des moyennes journalières respectives de 260 W/m<sup>2</sup> et 92 W/m<sup>2</sup>, ces journées sont pratiquement "sans soleil" car de telles moyennes sont nettement inférieures à celles enregistrées dans des périodes aussi pires que le mois de décembre. Les courbes 2 et 2' nous donnent une idée de la comparaison que l'on peut faire de la théorie et de l'expérience. La courbe théorique 2' est une courbe qui enveloppe entièrement la courbe pratique avec un écart maximum de 7.79% enregistrée à 9h. Ceci est dû au fait que le soleil n'est apparu qu'à 10h et redisparu à 12h (Voir tableau 2').

La courbe n° 2 montre un écart maximum de 11.2% enregistré à 9h. La cause est semblable car la courbe 2, représente l'évolution thermique du capteur

durant un jour où la moyenne d'ensoleillement est très médiocre  $260 \text{ W/m}^2$  (inférieure à la moyenne de décembre.)

Les conclusions que l'on peut tirer de l'expérimentation durant ces journées aux ensoleillements médiocres sont:

— Une possibilité d'extrapolation des performances thermiques du capteur dans les mois médiocres comme décembre

— La capacité d'accumulation thermique excellente de l'absorbeur: car malgré l'ensoleillement très médiocre dû à l'importance du rayonnement diffus, nous avons des températures très performantes (courbe 2, 2', 3)



(E) ETUDE DES PERFORMANCES ECONOMIQUES DU SYSTEME COMBINÉ CHAUFFE EAU ELECTRIQUE & CHAUFFE EAU

SOLAIRE:

Le but de cette étude n'est pas de supplanter l'énergie électrique par l'énergie solaire, mais plutôt d'alléger la consommation d'énergie électrique de certains appareils domestiques: comme le chauffe eau électrique; les climatiseurs; etc... On pourrait penser à substituer totalement l'énergie électrique par l'énergie solaire mais le coût d'une telle installation serait prohibitif et ce coût ne justifierait pas un tel choix: car économiquement une telle installation ne serait pas rentable. Pour l'état actuel des recherches dans le domaine des matériaux sélectifs et des cellules photopiles.

Nous allons étudier dans ce chapitre les économies d'énergie que l'on peut réaliser en intégrant un chauffe-eau solaire à un réseau déjà existant de chauffe-eau électrique.

Nos valeurs de comparaison seront les mesures faites et compilées au tableau n°3: où le chauffe-eau électrique marche de 8<sup>h</sup> à 19<sup>h</sup>.

Le problème général de l'énergie solaire c'est son stockage sous forme d'eau chaude en vue d'une ultérieure utilisation. Les courbes 1 et 2 prouvent que la température d'eau chaude les plus élevées sont enregistrées aux heures où les bains sont les moins probables (12h et 16h); car les températures ambiantes sont assez importantes (30°C et 35°C)

Ainsi il faudrait donc penser à stocker cette eau chaude même si cela influe sur le coût d'acquisition du capteur solaire. Pour satisfaire ce propos on devrait concevoir un réservoir de stockage intégré au circuit et isolé thermiquement.

Les performances économiques du système intégré dépendent des habitudes sanitaires de la famille où le chauffe-eau électrique et solaire sont installés, elles dépendent en même temps de l'ensoleillement moyen reçu durant le jour, le mois et l'année.

Ainsi pour déduire les performances de notre système nous allons faire un ensemble d'hypothèses sur l'utilisation du système intégré.

Le réglage du thermostat du chauffe-eau électrique est à 110°F (43.3°C). On suppose

que dans la famille quelqu'un prend une douche durant 10 min avec un débit de 1.2 l/min minimum à toutes les heures entre 8<sup>h</sup> et 19<sup>h</sup>

Les tableaux 4, 4' et 4'' traduisent les mesures obtenues dans de telle hypothèse de base. Ces mêmes tableaux montrent que l'on réalise des économies journalières allant de 10% à 68%. Plus un site est ensoleillé, plus le chauffe-eau électrique est by-passé et moins un site est ensoleillé, plus le chauffe-eau électrique fonctionne et redoit les économies réalisées.

Les tableaux 4, 4' et 4'' donnent

<u>Journee</u>	<u>Moyenne Solaire</u>	<u>Economie</u>
24/5	92 W/m <sup>2</sup>	10%
23/5	260 W/m <sup>2</sup>	68%
22/5	567 W/m <sup>2</sup>	32%

Si les conditions d'utilisation du chauffage combine restent identiques on peut tirer une corrélation entre l'économie moyenne réalisée et l'ensoleillement moyen arrivant sur le site durant un mois; cette corrélation nous permet de déterminer la courbe des moyennes d'économie durant l'année.

Tableau n°3: Chauffe-eau fonctionnant seul  
thermostat réglé à 110°F (43.3°C)

Mesures de la puissance consommée

Heures	Temp. Eau Entrée °C	Temp. °C Eau Sortie	Puissance kwh
8	27	42	3.3
9	27	43	0
10	27	43	0
11	29	38	1.6
12	29	42	0
13	29	37	1.4
14	20	43	0
15	29	25	1.0
16	29	43	0
17	29	43	1
18	28	43	0
19	27	43	1

Consommation journalière totale 9.3 kwh

débit de bain de 1.2ℓ/min durant 10 min

à toutes les heures indiquées

Tableau 4'': Couplage chauffe eau Electrique  
et chauffe - eau solaire

Journee du 22/05/84

Moyenne solaire de 567 W/m<sup>2</sup>

Heures	temp. eau Capteur	temp. eau C.E	P kwh
8	27	43.3	3.36
9	39	43.3	0.88
10	41	43.3	0.474
11	43	43.3	0.619
12	58	57	0
13	60	59	0
14	63	62	0
15	51	50	0
16	50	49	0
17	48	48	0
18	44	43	0
19	40	43.3	0.68

Consommation journaliere

6.013 kwh

soit une economie de :

$$\frac{9.3 - 6.013}{9.3} \times 100 \approx 35\%$$

Tableau 4: Couplage chauffe-eau Solaire et  
chauffe-eau Electrique

Journee du 24/5/1984

Moyenne ensoleillement  $92 \text{ W/m}^2$

Journee mediocre - tres diffuse.

Heures	temp. eau Sortie Capteur	temp. eau chauffe-eau	P kwh
8	38	43.3	1.09
9	38	43.3	1.09
10	38	43.3	1.09
11	43	43.3	0
12	40.5	43.3	0.56
13	43	43.3	0.062
14	42	43.3	0.268
15	41	43.3	0.473
16	40	43.3	0.68
17	40	43.3	0.68
18	38	43.3	0.68
19	37	43.3	1.2

Consommation journaliere totale 8.283 kwh

soit economie de  $\frac{9.3 - 8.283}{9.3} \times 100 \approx 10\%$

Debit de bain 1-2l/min durant 10min a toutes  
les heures indiquees.

Tableau 4': Couplage chauffe-eau électrique et  
chauffe-eau solaire

Journée du 23/05/1984

Moyenne solaire 260W/m<sup>2</sup>

Heures	temp. eau sortie capteur	temp. Eau sortie e.e	P kwh
8	39	43.3	0.228
9	38	43.3	1.093
10	42	43.3	0.268
11	42	43.3	0.268
12	57	55	0
13	54	53	0
14	47	46	0
15	42	43.3	0.0619
16	42	43.3	0.268
17	43	43.3	0.0619
18	46	45	0
19	45	44	0

Consommation journalière totale 2.91kwh

Soit une économie de  $\frac{9.3 - 2.91}{9.3} \times 100 = 68.7\%$

Debit de bain de 1.22l/min durant 10min  
à toutes les heures indiquées





soit  $P_n$  la valeur en  $n$  années de l'argent  $P_0$  au taux d'intérêt  $i$  on a

$$P_n = P_0(1+i)^n$$

Si la somme  $P_0$  doit être payée partiellement chaque année sous forme d'annuité on a

$$R = \frac{P_n \times i}{(1+i)^n - 1} = \frac{P_0(1+i)^n \times i}{(1+i)^n - 1}$$

Soit  $P'_0$  la somme, que quelqu'un veut investir sur le capteur solaire pour en tirer profit au taux d'inflation  $j$  et soit  $R'_0$  son annuité. Nous allons poser que  $n$  est la durée de vie du système.

$$P'_0 = R'_0 \frac{(1+ie)^n - 1}{ie(1+ie)^n}$$

$$\text{ou } ie = \frac{1+i}{1+j} - 1$$

soit  $i$  = taux d'intérêt de 12%

$j$ : taux augmentation annuelle kWh

Senelec, prix actuel 80 cFA

Soit  $n = 5$ :

$$P_5 = P_0(1+i)^5$$

$$= 118089(1+12\%)^5 = 208113.2 \text{ cFA}$$

$$R = \frac{208113.2 \times (0.12)^5}{(1.12^5 - 1)} = 32759 \text{ cFA}$$

$$i_e = \frac{1.12}{1.064} - 1 = 0.0526$$

$$R'_0 = \frac{118089 \times (1.0526)^5 \times 0.053}{1.053^5 - 1}$$

$$R'_0 = 27471.9 \text{ cFA}$$

n	5	6	7	8
R	32759.	28722.	25875.4	23772.0
R'_0	27472.	<del>23459.4</del>	20757.5	18463
$\Delta R$	5287	+5262.5	5118	5309

On voit que le chauffe-eau est rentable car l'économie minimum réalisée par année permet de compenser  $R - R'_0 = \Delta R \approx 5400 \text{ cFA}$ .

Même pour une durée de vie inférieure à 5 ans le chauffe-eau est financièrement rentable.

## C CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.

Au terme de cette étude, il est important de tirer des conclusions et de proposer des recommandations sur le projet capteur solaire intégré

Les équations du modèle avec charge et sans charge ont permis de constater que les performances thermiques du capteur peuvent être améliorées en jouant sur le rapport  $V/A_p$  (voir courbe n° 8 traduisant l'équation [19]). Cette même courbe montre que on peut augmenter la température de distribution de l'eau  $T_w$  jusqu'à même  $100^\circ\text{C}$  si le rapport  $V/A_p$  est de  $20\text{l/m}^2$ , ainsi l'on obtient un capteur moins volumineux et plus performant, son temps de réponse augmente en même temps. Avec un tel capteur on pourrait penser à diversifier l'utilisation du chauffe-eau solaire dans les applications autres que domestiques (hotels et industries chimiques.) Ces applications solaires contribueraient à améliorer l'allègement des factures d'électricité des hotels et des industries où le chauffe-eau est installé.

Les équations de conception du réservoir montrent de même que l'on peut avoir un capteur plus grand ou <sup>plus</sup> petit et plus performant que le capteur expérimental.

Les expérimentations ont permis de voir que les économies énergétiques moyennes réalisées durant une année sont au minimum de 20%. Pour mieux valider nos résultats d'autres tests sur des périodes plus longues (ex: 9 mois) pourraient être faits.

La courbe n°9 des économies énergétiques moyennes durant une année pourrait être améliorée si le capteur était muni d'un réservoir de stockage qui pourrait permettre d'accumuler l'eau chaude obtenue entre 12h et 16h pour des utilisations nocturnes. Ce réservoir serait dimensionné et isolé thermiquement afin qu'il puisse accumuler sans pertes l'eau chaude produite le jour.

Une étude devrait porter sur l'automatisation du système d'ouverture des vannes de couplage et de découplage du système capteur solaire et chauffe-eau afin de réduire au minimum l'intervention humaine.

Le capteur ainsi obtenu sera placé dans un endroit très accessible à l'entretien et à la surveillance des matériaux composant le système.

Pour améliorer la capacité d'accumulation thermique du capteur on a pensé le placer dans une enceinte en béton qui absorbe le rayonnement diurne et le reemet durant la nuit

Ainsi malgré les caprices du soleil cette thèse de recherche appliquée a su démontrer scientifiquement que l'astre du jour adoré et adulé par les Egyptiens (Dieu RÂ) peut aujourd'hui être apprivoisé par l'homme dans des applications aussi variées que le domestique et l'industrie.

Annee:

Programme de Calcul de l'angle  
d'Inclinaison Optimum  $\beta$  d'un capteur  
en fonction des divers jours de l'annee.

N.B: Listing Micro Mega 32 Marque Thompson.s.f  
installe a U.E.P.T

```
00050 REM DEFINITION DES VARIABLES
00060 REM B INCLINAISON DU CAPTEUR
00070 REM N = NUMERO DU JOUR
00080 REM D DECLINAISON DE LA TERRE LE JOUR DE L'EXPERTIMENTATION
00090 REM A LATTITUDE DU LIEU
00100 REM W SUNSET-SUNRISE
00110 REM DEFINITION DES FONCTIONS SOLAIRES
00115 OPEN (6) "LP"
00120 DEF FNR(N) = 40.927 * SIN(3.60 * ((N-80) / 370))
00130 PRINT "INTRODUIRE LE JOUR"
00140 INPUT N
00150 LET D=FNR(N)
00160 PRINT "INTRODUIRE LA LATTITUDE DU POINT"
00170 INPUT A
00175 LET A=A* 0.174532
00180 LET W=ACS((-TAN(A))*TAN(D))
00190 REM CALCUL DE L'ANGLE D'INCLINAISON B
00200 LET E=COS(D)*SIN(W)*COS(A)- 0.174532*SIN(D)*SIN(A)
00210 LET F=COS(D)*SIN(W)*SIN(A)+ 0.174532*W*SIN(D)*COS(A)
00220 LET B=ATN((=E)/F)
00221 LET D=D*57.295778
00222 LET A=A*57.2929578
00223 LET W=W*57.295778
00224 LET B=B*57.295778
00230 PRINT (6) a(10), "D", a(20), "A", a(30), "W", a(40), "B"
00240 PRINT (6) a(10), D, a(20), A, a(30), W, a(40), B
00250 PRINT (6) ; PRINT (6) "Pour le jour ", N, " l'inclinaison optimale
00260 PRINT (6) ; PRINT (6)
00270 END
```

Annexe: Programme itulisé pour résoudre l'équation différentielle du modèle mathématique avec charge de m<sup>3</sup>(e/s)

Conditions initiales →  $\begin{cases} x_0 \text{ représente le temps } t_{\text{initial}} \ x_0 = 0.5 \\ y_0 \text{ représente } \theta_0; \ y_0 = 5 \end{cases}$   
F: l'équation différentielle réduite  
 $\theta' = F = f(x,y) = f(t, \theta)$

Resolution Equation différentielle par Methode Range-Kutta-Gill

```
10: "A":INPUT "X0= ";X,"Y0= ";Y,"H= ";H
20: A=1+J.5:B=1-J.5:USING :Q=0
30: GOSUB 500
40: K=H*F:Y=Y+(K-2*Q)/2
50: Q=Q+3*((K-2*Q)/2)-K/2
60: X=X+H/2:GOSUB 500
70: K=H*F:Y=Y+B*(K-Q)
80: Q=Q+3*(B*(K-Q))-B*K
90: GOSUB 500
100: K=H*F:Y=Y+A*(K-Q)
110: Q=Q+3*(A*(K-Q))-A*K
120: X=X+H/2:GOSUB 500
130: K=H*F:Y=Y+(K-2*Q)/6
140: Q=Q+3*((K-2*Q)/6)-K/2
150: BEEP 3:PRINT X,Y
160: GOTO 30
500: F = 4.7107sin 7.23105X - 1.9104Y - 9105
```

510: Return

\* An example containing y = -xy (line 500)  
Write y', x, and y by using F memory, X memory, and Y memory, respectively.

N.B.: Listing Micro-ordinateur PC1211 appartenent à Modibo DIOP Polytechnique

Annexe: Résolution Analytique d'une  
Equation différentielle par la méthode de  
Runge Kutta-Gill:

L'équation différentielle doit être réduite  
à la forme  $y' = \text{fonction}(x, y)$  et sous  
les conditions initiales  $(x_0, y_0)$

Il s'agit dans cette méthode de prendre  
des valeurs de  $x$  à des intervalles réguliers  
 $h$ .

Donc  $x_n = x_0 + nh$  ( $n = 1, 2, \dots$ )  
à la valeur de  $x_n$  correspond une  
solution nominale  $y_n$ .

les formules pour obtenir  $x_{n+1}$  et  $y_{n+1}$   
à partir de  $x_n, y_n$  sont données par  
les équations de Runge Kutta-Gill

$$k_0 = h f(x_n, y_n) \quad r_1 = (1/2)(k_0 - 2q_0)$$

$$y^{(1)} = y_n + r_1 \quad q_1 = q_0 + 3r_1 - (1/2)k_0$$

$$k_1 = h f(x_n + h/2, y^{(1)})$$

$$r_2 = (1 - \sqrt{1/2})(k_1 - q_1)$$

$$y^{(2)} = y^{(1)} + r_2 ; \quad q_2 = q_1 + 3r_2 - (1 + \sqrt{1/2})k_1$$

$$k_2 = h f(x_n + h/2, y^{(2)})$$

$$r_3 = (1 + \sqrt{1/2})(k_2 - q_2)$$

$$y^{(3)} = y^{(2)} + r_3$$



## Suite Methode R. Kutta. Gill

$$q_3 = q_2 + 3r_3 - (1 - \sqrt{1/2})k_1$$

$$k_2 = h f(x_n + h/2, y^{(2)})$$

$$r_3 = (1 + \sqrt{1/2})(k_2 - q_2)$$

$$y^{(3)} = y^{(2)} + r_3$$

$$q_3 = q_2 + 3r_3 - (1 + \sqrt{1/2})k_2$$

$$k_3 = h f(x_{n+1}; y^{(3)})$$

$$r_4 = (-1/6)(k_3 - 2q_3)$$

$$y_{n+1} = y^{(3)} + r_4; \quad q_4 = q_3 + 3r_4 - (1/2)k_3$$

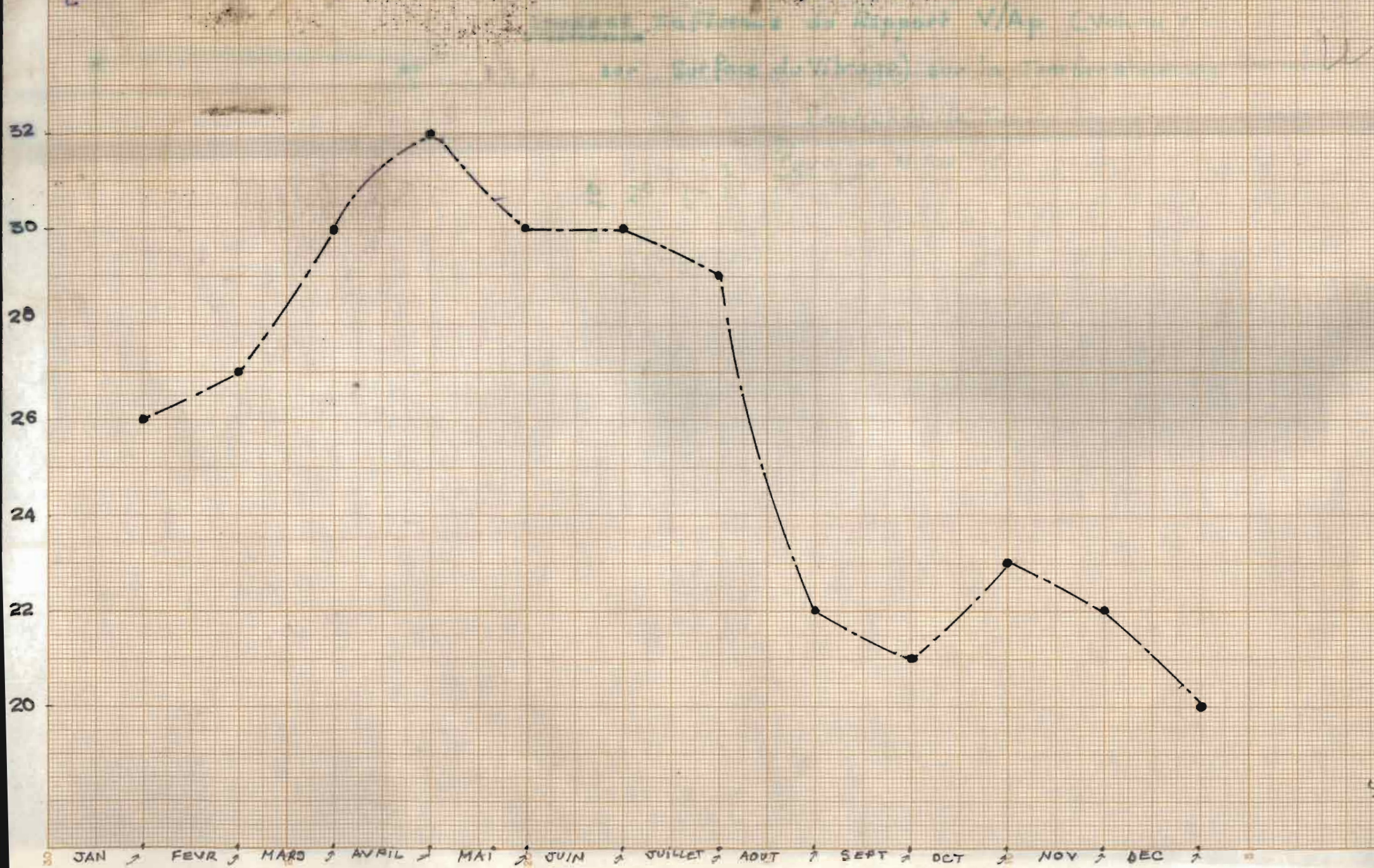
Ainsi  $y_{n+1}$  est déterminé par  $y_n$

ici  $n = 0, 1, 2$

La valeur de  $q_0$  est 0 au point  $x_0$  et  $q_4$  est pris comme nouvelle valeur de  $q_0$  et ainsi de suite.

TABLEAU 02 Economies Moyennes du Systeme integre' chauffe-eau

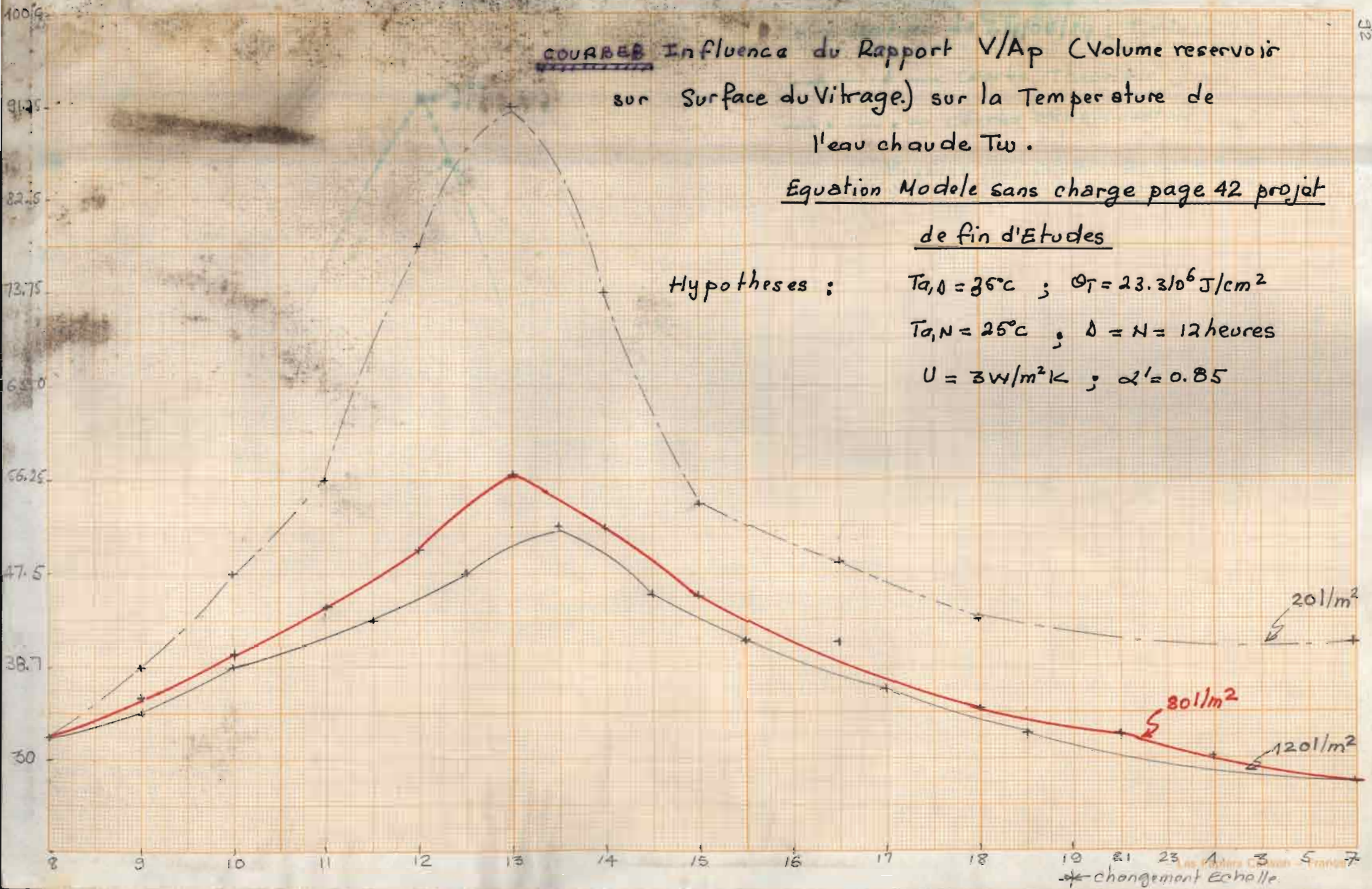
Electrique- chauffe eau Solaire durant 12 mois



COURBES Influence du Rapport V/Ap (Volume reservoir sur Surface du Vitrage) sur la Temperature de l'eau chaude Tw.

Equation Modele sans charge page 42 projet de fin d'Etudes

Hypotheses :  $T_{a,D} = 35^{\circ}C$  ;  $\Theta_T = 23.3 \cdot 10^6 J/cm^2$   
 $T_{a,N} = 25^{\circ}C$  ;  $\delta = N = 12$  heures  
 $U = 3 W/m^2K$  ;  $\alpha' = 0.85$



\* changement Echelle.

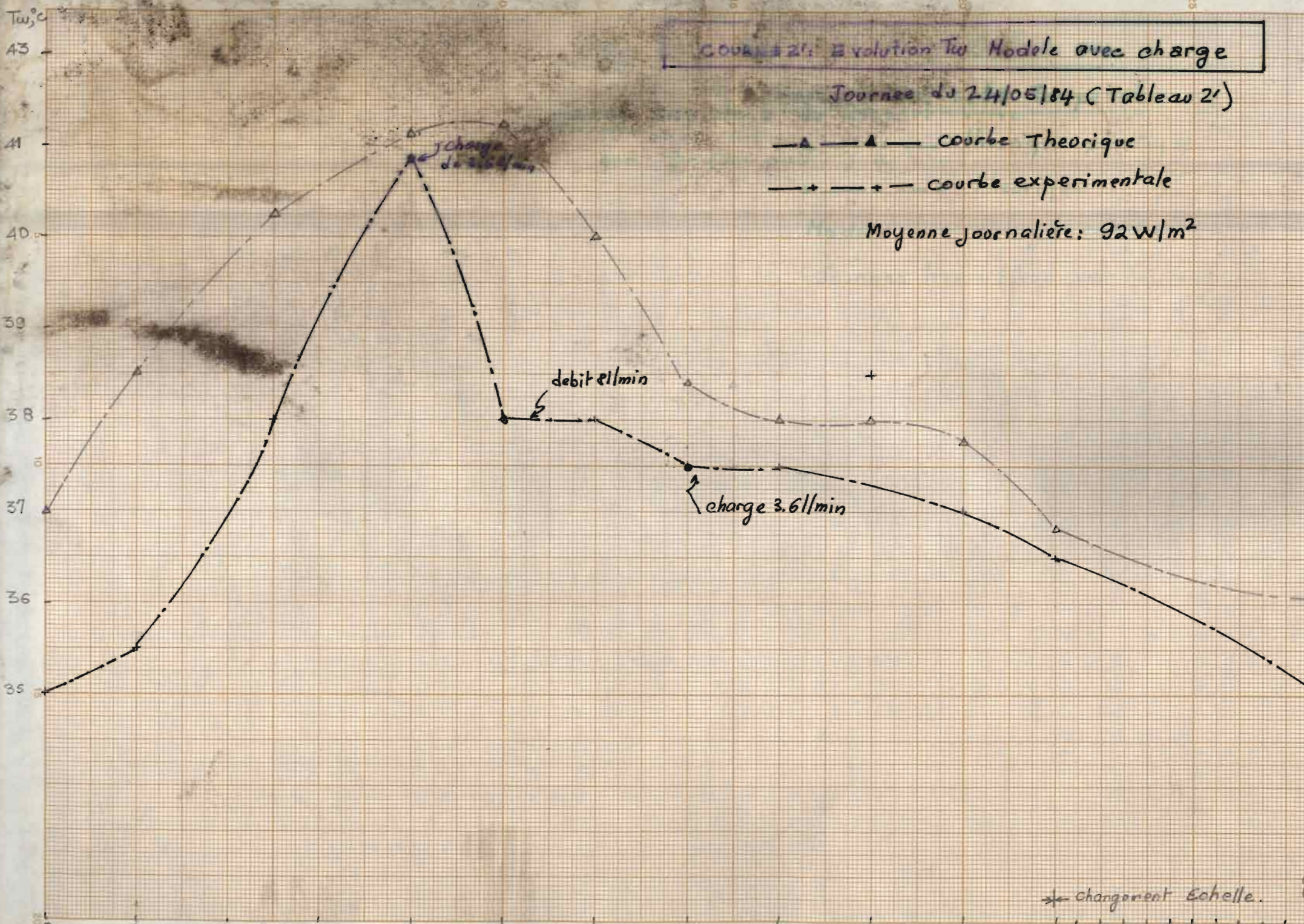
COUPE 21: Evolution  $T_w$  Modèle avec charge

Journée du 24/05/84 (Tableau 2')

—▲—▲— courbe Théorique

—+—+— courbe expérimentale

Moyenne journalière:  $92 \text{ W/m}^2$



\* changement Echelle.

Courbe 3: 23/05/84 Temperature eau sortie

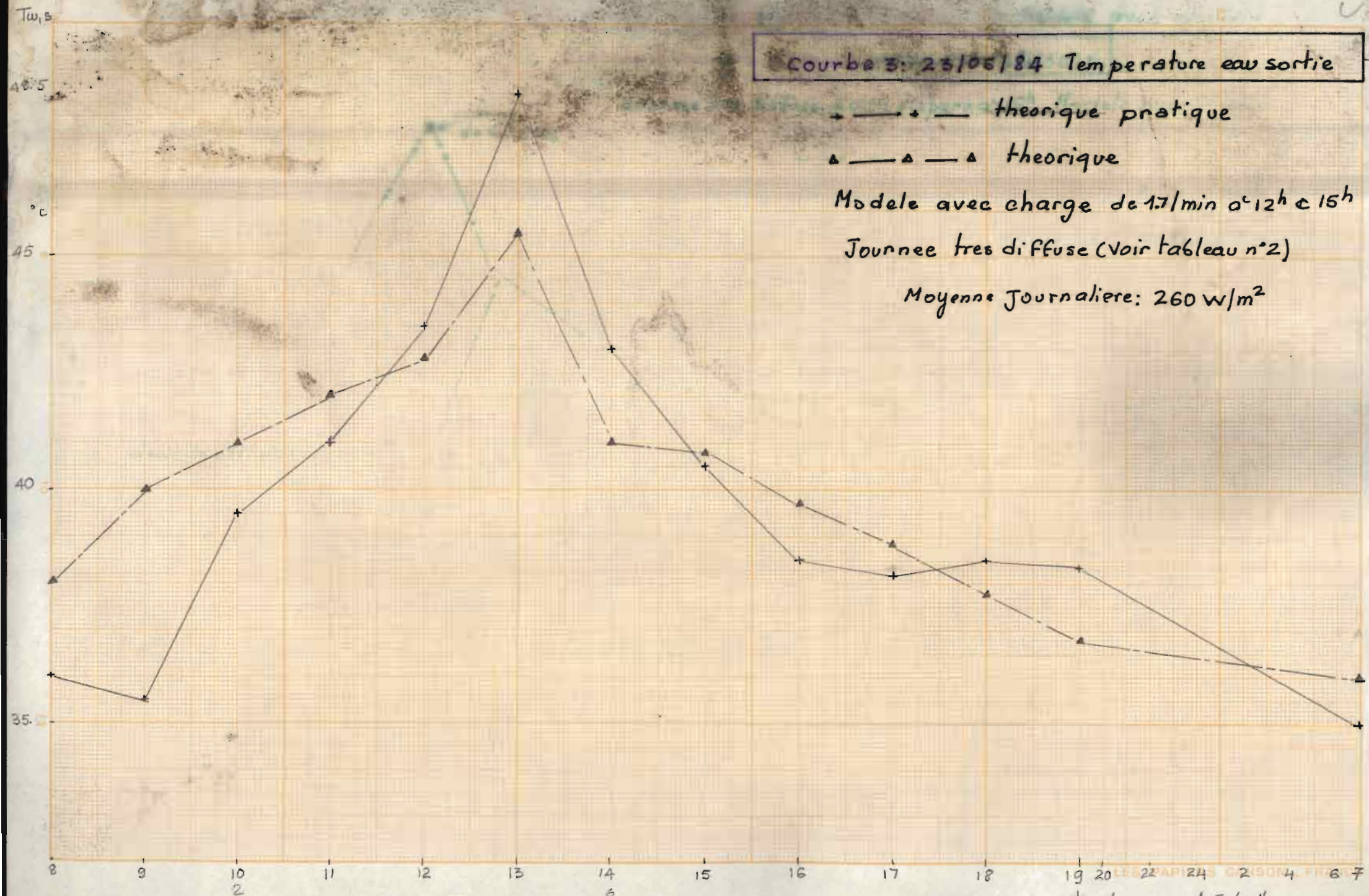
—+— theorique pratique

—▲— theorique

Modele avec charge de 17/min a 12h e 15h

Journee tres diffuse (Voir tableau n°2)

Moyenne Journaliere: 260 W/m<sup>2</sup>

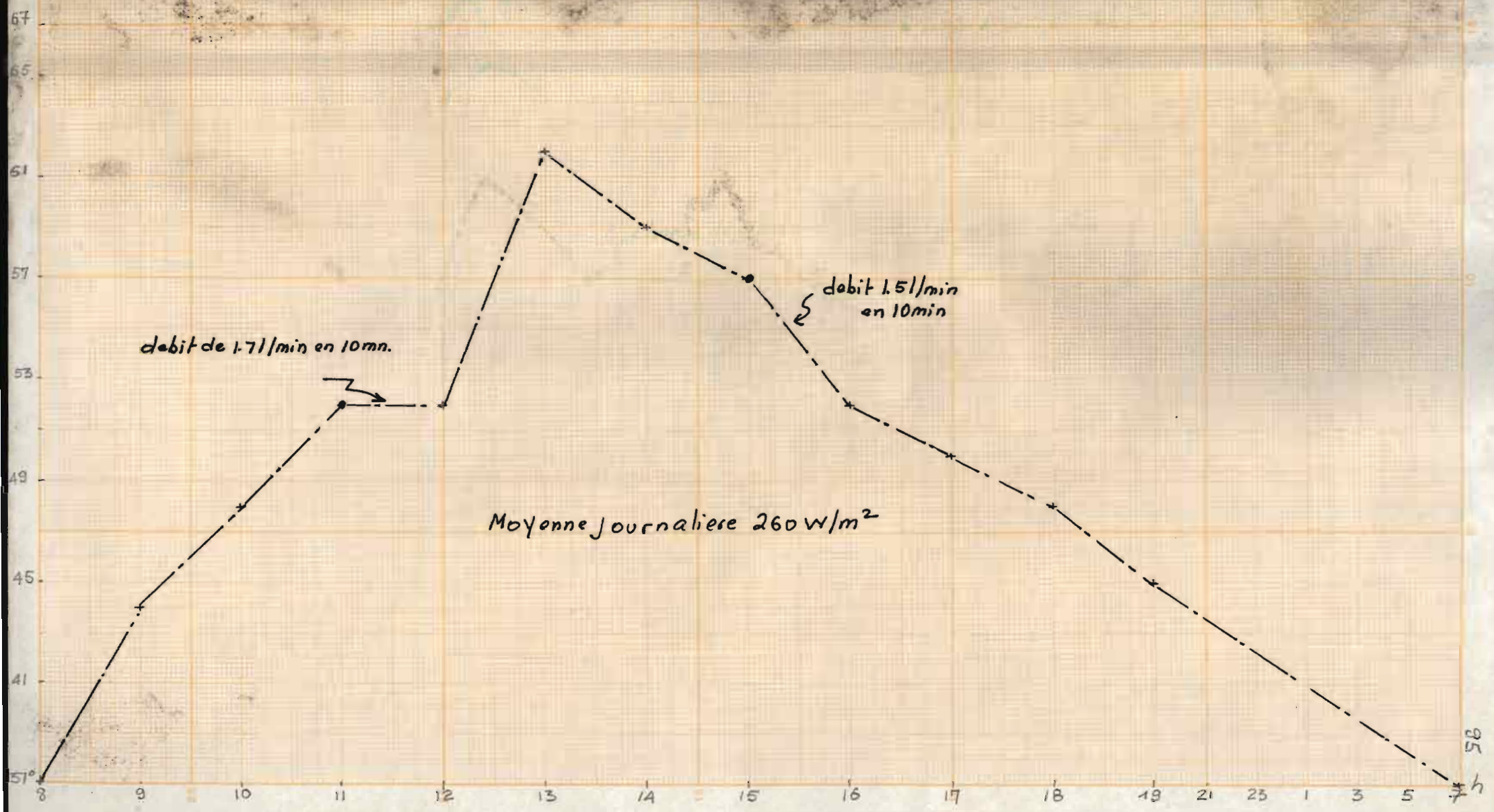


\* changement Echelle.

Tab<sub>s</sub> °C

Courbe: Evolution Tab<sub>s</sub> durant le 23/06/84

Journee tres diffuse. Soleil disparu a 15h. Modele avec charge.



debit de 1.7l/min en 10mn.

debit 1.5l/min en 10min

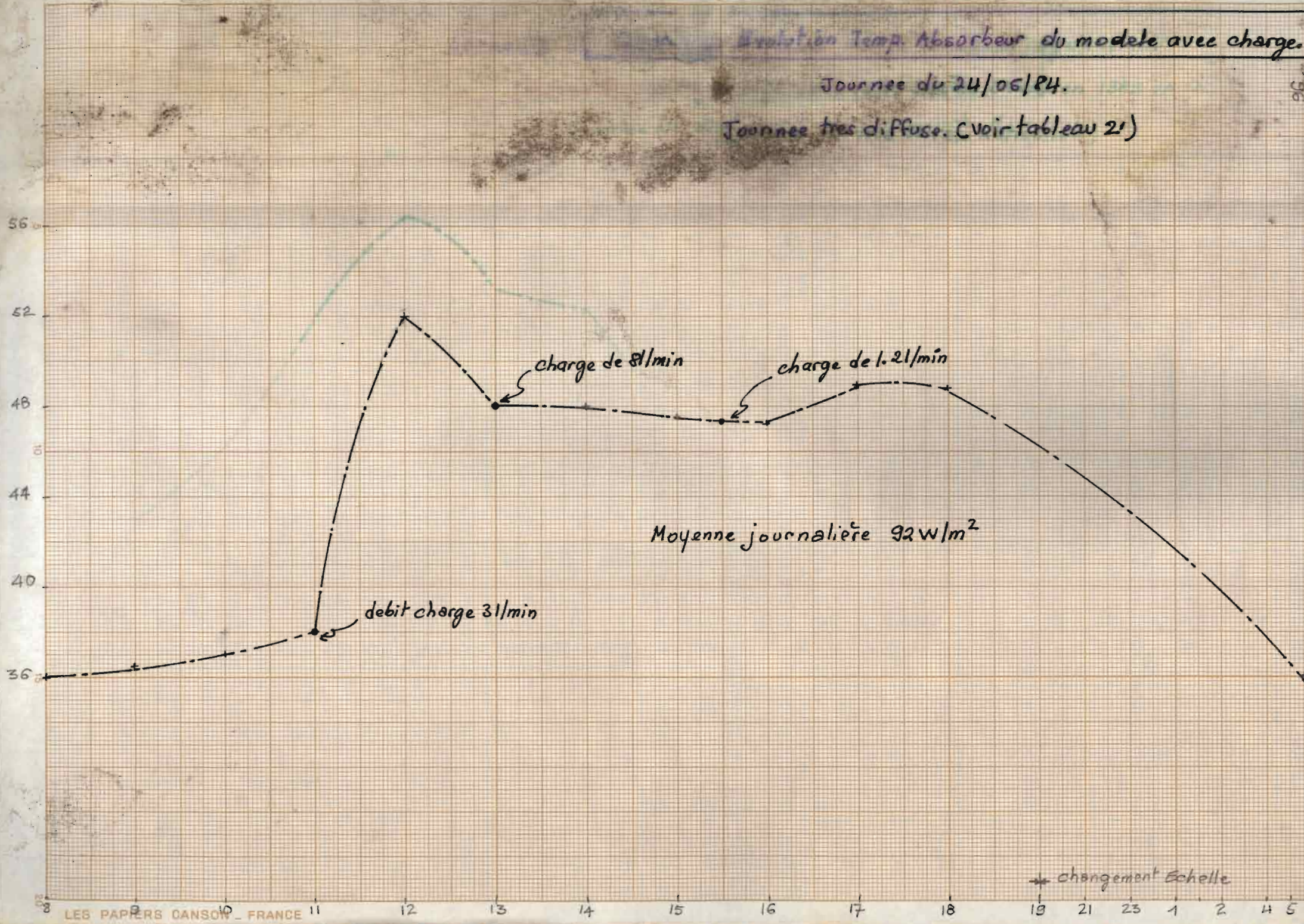
Moyenne journaliere 260 W/m<sup>2</sup>

95 h

Evolution Temp. Absorbteur du modele avec charge.

Journee du 24/06/84.

Journee tres diffuse. (voir tableau 2')



W/m<sup>2</sup>

Evolution des moyennes de l'intensité du rayonnement  
(mensuel) solaire reçu sur un site comme DAKAR en 1983 en W/m<sup>2</sup>  
(Source Service Météo. Nationale)



Moyenne annuelle: 487 W/m<sup>2</sup>

JANV FEVR MARS AVRIL MAI JUIN JUILLET AOUT SEPT OCT NOV DEC



COURBE 1: 22/06/1984

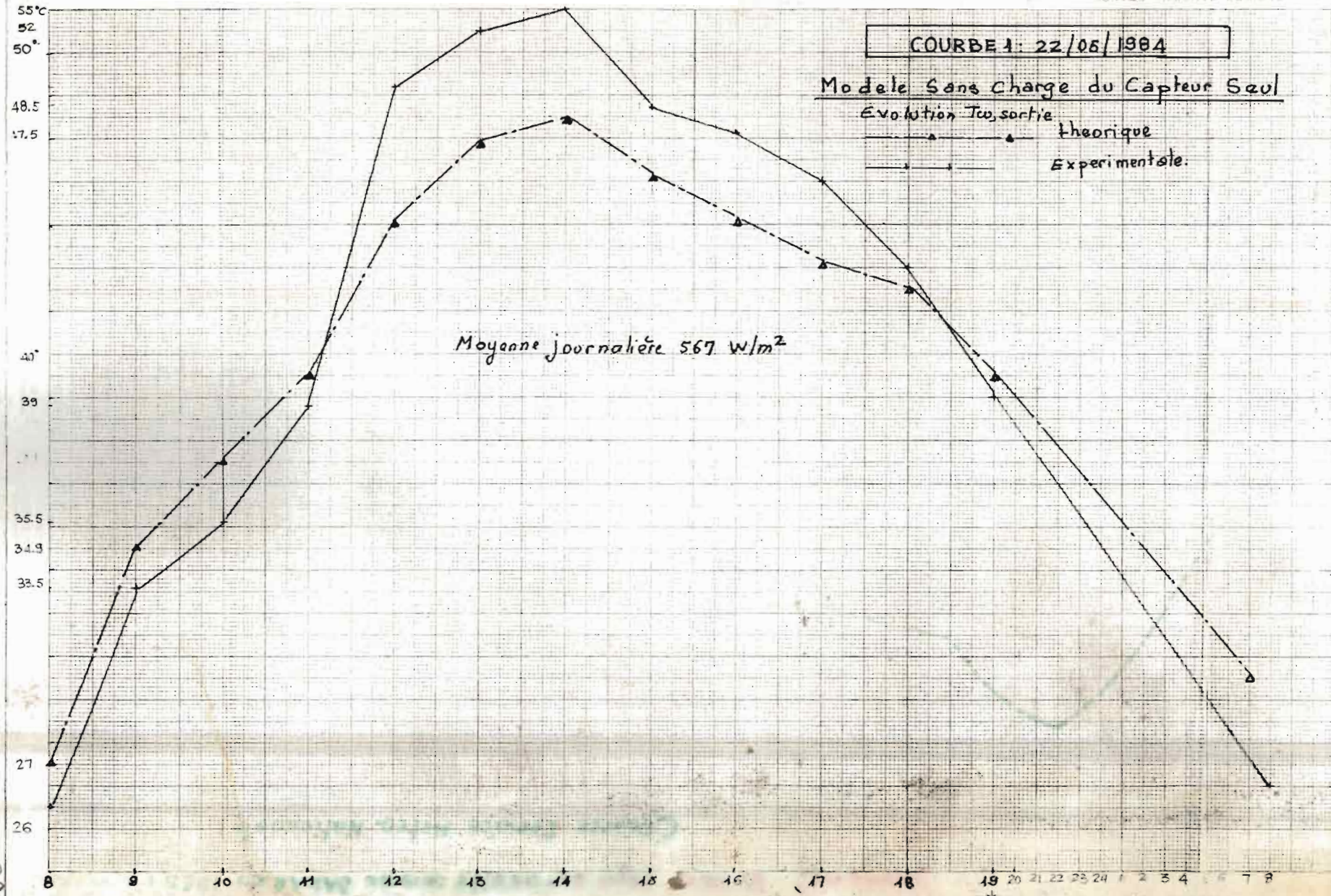
Modele Sans Charge du Capteur Seul

Evolution  $T_{co, sortie}$

theorique

Experimentale

Moyenne journaliere 567  $W/m^2$



\* Changement Efficace

98



WMO X BMO  
TOTAL radiation (sun and sky) T, 10E4J/m2  
Duration of sunshine sa, hours/

month and year FEVRIER

1983

Country SENEGAL

DAILY TOTALS T

LATITUDE	14 42N	14 43N	12 34N	15 37N	16 36N	13 46N	12 33N
LONGITUDE	16 28W	17 26W	12 13W	16 13W	14 56W	15 41W	16 16W
ELEVATION	20.00m	4.00m	165.45m	38.000m	5.37m	48.68m	19.30m
STATION	BAMBEY	DAKAR- HANN	KEDOUGOU	LOUGA	PODOR	TAMBA- COUNDA	ZIGUIN- CHOR
DATE							
1		1675		1520		1940	1095
2		1959		1915		1980	1045
3		2086		2103		2031	1377
4		XXXX		2148		2060	1328
5		XXXX		2002		2009	1429
6		2074		2018		1150	1553
7		2120		2128		1858	1442
8		1799		1871		1509	1471
9		1770		1430		10904	1545
10		2362		2421		2072	1513
11		2165		1979		2015	1341
12		2087		1841		1930	1432
13		2217		1839		1404	1461
14		1917		1977		1814	1332
15	EN PANNE	2215	EN PANNE	2128	NON PARU	1498	1029
16		2360		2260		1350	1139
17		2252		2157		1488	1318
18		2223		2167		2006	1455
19		2234		2179		1940	1479
20		2262		XXXX		1927	1553
21		2337		XXXX		2148	1601
22		2432		XXXX		2221	1574
23		XXXX		XXXX		2290	1035
24		2364		XXXX		2325	1572
25		2215		XXXX		2350	1209
26		2244		2055		2011	1013
27		1994		1947		1896	1686
28		1847		1813		1863	XXXX
MONTHLY TOTALS		39483		55870		51989	38398
DAILY MEANS		2124.4		1995.4		1856.7	1371.4
MONTHLY TOTALS	240.3	252.3	233.8	241.7	245.6	243.5	251.0
DAILY MEANS	8.58	9.01	8.35	8.63	8.77	8.70	8.96
TYPES OF INSTRUMENT	Inte Pyr	L&N K&Z CM5	JYRA-G K&Z CM5	CIMEL K&Z CM5	JYRA-E K&Z CM5	CIMEL K&Z CM5	CIMEL K&Z CM5

TOTAL radiation (sun and sky) T, 10E4J/m<sup>2</sup>  
Duration of sunshine sa, hours/

month and year JANVIER

1983

Country SENEGAL

DAILY TOTALS T							
LATITUDE	14 42N	14 43N	12 34N	15 37N	16 36N	13 46N	12 33N
LONGITUDE	16 28W	17 26W	12 13W	16 13W	14 56W	15 41W	16 16W
ELEVATION	20.00m	4.00m	165.45m	38.000m	5.37m	48.68m	19.30m
STATION	BAMBEY	DAKAR- HANN	KEDOUGOU	LOUGA	PODOR	TAMBA- COUNDA	ZIGUIN- CHOR
DATE							
1		1236		1176		1415	1429
2		1277		1295		1432	1342
3		1310		1314		1463	1287
4		1234		1218		1500	1481
5		1509		1442		1620	1376
6		1174		1125		1482	1233
7		XXXX		1403		1384	0938
8		XXXX		1759		1730	1309
9		1835		1904		1766	1228
10		XXXX		1782		1720	1378
11		XXXX		1555		1622	1130
12		1660		1332		1579	1398
13		1589		1562		1604	1424
14		1499		1282		1414	1543
15	EN PANNE	1536	EN PANNE	1463	NON PARU	1405	1456
16		1567		1560		1396	1248
17		1651		1673		1666	1131
18		1798		1855		1600	1077
19		2131		1968		1870	1214
20		1939		1922		1931	1067
21		2027		1908		1776	1262
22		2015		1959		1784	1372
23		1953		2028		1881	1311
24		1958		1952		1801	1175
25		1906		1820		1798	1333
26		1814		1876		1917	1302
27		1900		1770		1788	1390
28		1646		1738		1659	1290
29		1309		1579		1249	1229
30		1716		1584		1447	1499
31		1834		1978		1971	1267
MONTHLY TOTALS		49847		50782		50670	40119
DAILY MEANS		1607.9		1638.2		1634.5	1294.2
MONTHLY TOTALS	223.4	191.1	253.2	220.5	189.1	260.9	263.6
DAILY MEANS	7.20	6.29	8.17	7.11	6.10	8.49	8.90
TYPES OF INSTRUMENT	Inte Para	L&N K&Z CM5	JYRA-G K&Z CM5	CIMEL K&Z CM5	JYRA-E K&Z CM5	CIMEL K&Z CM5	CIMEL K&Z CM5

TOTAL radiation (sun and sky) T, 10E4J/m<sup>2</sup>  
Duration of sunshine say, hours/

month and year MAI

1983

Country SENEGAL

DAILY TOTALS T							
LATITUDE	14 42N	14 43N	12 34N	15 37N	16 36N	13 46N	12 33N
LONGITUDE	16 28W	17 26W	12 13W	16 13W	14 56W	15 41W	16 16W
ELEVATION	20.00m	4.00m	165.45m	38.000m	5.37m	48.68m	19.30m
STATION	BAMBEY	DAKAR- HANN	KEDOUGOU	LOUGA	PODOR	TAMBA- COUNDA	ZIGUIN- CHOR
DATE							
1		1815		1368		1346	1110
2		2015		1846		1874	1284
3		1959		1899		1657	10387
4		1972		1118		10274	10611
5		1876		1497		10692	1017
6		1731		1845		1090	1474
7		XXXX		2210		1537	1355
8		XXXX		2090		1466	1614
9		XXXX		1838		1763	1622
10		1544		1566		2075	1440
11		1803		2023		1853	1390
12		2017		2005		1693	1408
13		2124		2011		1582	1553
14		1226		0867		1929	1258
15	EN PANNE	XXXX	EN PANNE	0918	NON PARU	1856	1546
16		1961		2022		1869	1505
17		1915		2263		2194	1652
18		2124		2195		2119	1321
19		2321		2085		2031	1606
20		2211		2343		2157	1248
21		2360		2632		1763	1696
22		2475		2826		2182	1656
23		2075		2524		2176	1439
24		2041		2546		1868	1470
25		2074		2719		2080	1616
26		1033		1026		2086	1392
27		1064		XXXX		2182	1611
28		2210		2280		1882	1184
29		1836		2444		1921	1836
30		2162		2820		2297	2021
31		2445		2969		2342	1763
MONTHLY TOTALS		60150		62718		55836	44085
DAILY MEANS		1940.3		2023.2		1801.2	1422.1
MONTHLY TOTALS	166.3	191.6	198.7	184.3	175.4	217.5	241.3
DAILY MEANS	5.36	6.18	6.41	5.95	5.66	7.02	7.78
TYPES OF INSTRUMENT	Inte Pyra	L&N K&Z CM5	JYRA-G K&Z CM5	CIMEL K&Z CM5	JYRA-E K&Z CM5	CIMEL K&Z CM5	CIMEL K&Z CM5

WMO /BMO  
 TOTAL radiation(sun and sky) T,10E4J/m2  
 Duration of sunshine sa, hours/

Month and year JUIN 1983 Country SENEGAL

DAILY TOTALS T

LATITUDE	14 42N	14 43N	12 34N	15 37N	16 36N	13 46N	12 33N
LONGITUDE	16 28W	17 26W	12 13W	16 13W	14 56W	15 41W	16 16W
ELEVATION	20.00m	4.00m	165.45m	38.000m	5.37m	48.68m	19.30m
STATION	BAMBEY	DAKAR-HANN	KEDOUGOU	LOUGA	PODOR	TAMBA-COUNDA	ZIGUINCHOR
DATE							
1		2018		2486		1910	1700
2		1964		2676		2128	1604
3		1770		2710		2191	1292
4		1891		2560		2051	1821
5		2032		2097		1965	1549
6		1716		2107		1721	1680
7		1299		2197		1785	1178
8		1578		2204		1869	1854
9		2026		2568		2097	1623
10		2190		2434		2101	1848
11		2184		2567		2262	10971
12		2180		2352		10899	1060
13		2133		1480		10999	1161
14		1894		1528		1721	1393
15	EN PANNE	1894	EN PANNE	2160	NON PARV	2007	1711
16		2244		2770		2130	1673
17		XXXX		2483		10728	1128
18		XXXX		2772		2344	1356
19		XXXX		2520		1512	1349
20		2251		3205		10921	1923
21		2445		3127		2179	1628
22		XXXX		2072		1868	1951
23		2248		2905		1740	1708
24		XXXX		3156		2199	1795
25		1760		2900		2162	1729
26		2169		2958		2370	1241
27		1747		2830		10061	1276
28		2273		3125		1067	1529
29		XXXX		3000		10331	1563
30		1885		2858		1776	1527
MONTHLY TOTALS		59739		80401		52797	45821
DAILY MEANS		1991.3		2596.6		1703.1	1527.4
MONTHLY TOTALS	209.9	201.3	243.6	226.5	221.2	222.6	216.7
DAILY MEANS	6.99	6.71	8.12	7.55	7.37	7.42	7.22
TYPES OF INSTRUMENT	Inte L&N Pyra K&Z CM5	JYRA-G K&Z CM5	CIMEL K&Z CM5	JYRA-E K&Z CM5	CIMEL K&Z CM5	CIMEL K&Z CM5	CIMEL K&Z CM5

TOTAL radiation (sun and sky) T, 10E4J/m2  
Duration of sunshine say, hours/

Month and year MARS

1983

Country SENEGAL

DAILY TOTALS T

LATITUDE	14 42N	14 43N	12 34N	15 37N	16 36N	13 46N	12 33
LONGITUDE	16 28W	17 26W	12 13W	16 13W	14 56W	15 41W	16 16
ELEVATION	20.00m	4.00m	165.45m	38.000m	5.37m	48.68m	19.30
STATION	BAMBEY	DAKAR-HANN	KEDOUGOU	LOUGA	PODOR	TAMBA-COUNDA	ZIGUI-CHOR
DATE							
1		2011		2044		1079	1636
2		2219		2108		1843	XXXX
3		2281		2134		1762	1311
4		2180		1854		1163	1448
5		1948		XXXX		1692	1735
6		2373		XXXX		2248	1721
7		2434		1956		2229	1698
8		2389		1994		2208	1708
9		XXXX		2214		2277	1476
10		1933		1849		1720	1276
11		1515		1914		1864	1311
12		1172		1031		1835	1838
13		1961		1830		2080	1831
14		2211		2178		2141	1723
15	EN PANNE	2127	EN PANNE	2215	NON PARU	2056	1902
16		XXXX		2318		2267	1949
17		2391		2326		2252	1913
18		XXXX		2210		2216	1871
19		XXXX		2379		2305	1930
20		2192		2152		2295	1821
21		2358		2336		2354	1788
22		2393		2316		2236	1821
23		1637		2150		2132	1440
24		2201		2176		1808	1504
25		1486		1059		1613	1886
26		1868		1742		2365	1630
27		2035		2091		2316	1757
28		2525		2305		2434	1873
29		2600		2379		2402	1854
30		2117		1984		2326	1941
31		2660		2487		2439	1971
MONTHLY TOTALS		65694		63851		63957	53282
DAILY MEANS		2191.1		2059.7		2063.1	1718.7
MONTHLY TOTALS	233.7	234.2	246.1	226.8	230.7	263.4	270.5
DAILY MEANS	7.54	7.55	7.94	7.31	7.44	8.50	8.73
TYPES OF INSTRUMENT	Inte Pura	L&N K&Z CM5	JYRA-G K&Z CM5	CIMEL K&Z CM5	JYRA-E K&Z CM5	CIMEL K&Z CM5	CIMEL K&Z CM5

TOTAL radiation (sun and sky) T, 10E4J/m2

Duration of sunshine say, hours/

Month and year AVRIL

1983

Country SENEGAL

## DAILY TOTALS T

LATITUDE	14 42N	14 43N	12 34N	15 37N	16 36N	13 46N	12 33
LONGITUDE	16 28W	17 26W	12 13W	16 13W	14 56W	15 41W	16 16
ELEVATION	20.00m	4.00m	165.45m	38.000m	5.37m	48.68m	19.30
STATION	BAMBEY	DAKAR- HANN	KEDOUGOU	LOUGA	PODOR	TAMBA- COUNDA	ZIGUI CHOR
DATE							
1		XXXX		2419		2483	1796
2		XXXX		2378		2199	1964
3		XXXX		2455		2247	1733
4		XXXX		2418		2084	1656
5		XXXX		2365		2107	1767
6		XXXX		2175		2154	1436
7		2577		2291		2025	1736
8		2755		2370		2248	1969
9		2825		2542		2340	2016
10		2754		2611		2378	1944
11		2621		2534		2328	1984
12		XXXX		2546		2466	1884
13		2305		2247		1984	1758
14		2575		2482		2126	1747
15	EN PANNE	2563	EN PANNE	2363	NON PARV	2133	1778
16		2474		2417		2154	1846
17		2675		2519		2361	1666
18		2312		2351		2016	1562
19		2304		2257		2116	1596
20		2504		2398		1970	1865
21		2390		2328		2224	1231
22		1639		1626		1309	1277
23		2007		2077		1454	1687
24		2145		0929		1919	1715
25		2260		3496		1936	1702
26		2060		2198		2188	1684
27		XXXX		2128		1946	1811
28		2383		2308		2261	1809
29		1469		1273		2253	1080
30		1665		1779		0690	1039
MONTHLY TOTALS		67076		68280		62099	49248
DAILY MEANS		2235.9		2276.0		2069.9	1641.6
MONTHLY TOTALS	234.1	244.5	257.5	252.6	264.8	260.2	278.4
DAILY MEANS	7.80	8.15	8.58	8.42	8.83	8.67	9.28
TYPES OF INSTRUMENT	Inte Para	L&N K&Z CM5	JYRA-G K&Z CM5	CIMEL K&Z CM5	JYRA-E K&Z CM5	CIMEL K&Z CM5	CIMEL K&Z CM5





REPUBLIQUE DU SENEGAL  
 MINISTERE DE L'EDUCATION  
 DIRECTION DE LA METEOROLOGIE NATIONALE  
 DAKAR YOFF 194014

BULLETIN METEOROLOGIQUE ANNUEL 1982  
 RAYONNEMENT GLOBAL EN J/CM<sup>2</sup>

Localite : FANGAY Latitude : 14 42N Longitude : 16 28W Elevation : 20.00M Integrateur et Fyrarc : LEN 182 CM5 Jrc : 084

JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
EN FA	EN FA	EN FA	EN FA	EN FA	EN FA	EN FA	EN FA	XXXX	2275	2228	1805
								XXXX	3222	2547	1909
								XXXX	3741	2424	2024
								XXXX	2894	2476	2376
								XXXX	1048	2442	2555
								XXXX	2462	2217	2336
								2910	2412	XXXX	2405
								2647	2747	2350	2492
								1966	2374	2284	2579
								3093	2278	XXXX	1959
								2620	2314	2206	XXXX
								1269	2746	XXXX	XXXX
								3015	2654	2015	XXXX
								1375	XXXX	1830	0867
								3090	XXXX	2184	1685
								2663	2214	2240	1659
								2429	1408	2367	XXXX
								2871	1533	2515	XXXX
								XXXX	2539	2118	XXXX
								2482	1974	1860	XXXX
								2578	2748	2314	XXXX
								2469	2558	2369	XXXX
								2668	2570	2106	XXXX
								2720	2686	0493	XXXX
								2796	2214	2125	XXXX
								1122	2540	2003	XXXX
								2999	2628	1925	XXXX
								2765	2607	XXXX	XXXX
								2833	1791	1488	XXXX
								2827	2644	1910	XXXX
									2749		XXXX
									38207	77737	35438
									1816	2153	1730

Σ Total mensuel M: Moyenne mensuelle  
 X FA: Degré par heure EN FA: En verre  
 X et C : Degré maximale

REPUBLIQUE DU SENEGAL  
 MINISTERE DE L'EGILTIEMENT  
 DIRECTION DE LA METEOROLOGIE NATIONALE  
 DAKAR YOFF EP4014

BULLETIN RADIMETRIQUE ANNUEL  
 RAYONNEMENT GLOBAL EN J/CM<sup>2</sup>

1982

Localite : FCDOR      Latitude : 16° 36' N      Longitude : 14° 56' W      Elevation : 5.37 m      Integrateur et Fyrarc : CIMEL 182 CM5      Inc : 001

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
EN FA	NON F	NON F	NON F	NON F	NON F	EN FA	NON F	NON F	NON F	XXXX	2022	1372
										XXXX	1857	1453
										XXXX	1411	1566
										XXXX	1823	0706
										XXXX	1839	0675
										1991	1697	1049
										2071	1397	1440
										2028	1668	1631
										2048	1781	1716
										1991	1809	1760
										1854	1737	1621
										1793	1681	1718
										1578	1724	1259
										0876	0976	0760
										1292	1745	1477
										1765	1902	1263
										1947	1702	1681
										1648	1803	1716
										1963	1812	1687
										1676	1420	1524
										1996	1303	0941
										1530	1425	0764
										1838	1520	0881
										1955	1634	1437
										2039	1314	1403
										1968	1285	1428
										2048	1397	1587
										1911	1042	1757
										1519	0875	1737
										1967	1571	1547
										2056		1318
											27274	27374
											1433	1476
												1297

T : Total mensuel      M : Moyenne mensuelle  
 EN FA : Degré par parvenu      EN FA : En garre  
 XXX et C : Degré mensuelle

FEDERATION DU SENEGAL  
 MINISTERE DE L'ECLAIRAGE  
 DIRECTION DE LA METEOROLOGIE NATIONALE  
 DAKAR YCFF EF4014

BULLETIN RADIMETRIQUE ANNUEL 1982  
 RAYONNEMENT GLOBAL EN J/CM<sup>2</sup>

Localité : LILGA Latitude : 15 37N Longitude : 16 12W Elevation : 38.000m Intégrateur et Fyrene : JYFA-ELEC KEZ CM5 Jrc : 030

	JAN	FEB	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
1982	1723	1813	2013	2121	2239	2141	1998	2018	1847	1845	1555	1474
1981	1861	1861	1831	2192	2406	2167	2141	2417	2018	2111	1888	1743
1980	1547	1830	2373	2378	2400	2214	2368	2272	0918	1904	1744	1744
1979	1647	1962	1918	2459	2427	2178	1985	2329	2166	1427	1604	1604
1978	1740	1846	2198	2314	2429	2223	1651	2282	2194	1867	1728	1728
1977	1629	2116	1998	2290	2396	2166	2228	1984	2141	1609	1882	1882
1976	1482	2136	1754	2494	2161	2259	2219	2257	2054	1779	1920	1920
1975	2001	2166	2219	2436	2149	1473	1531	2344	1954	1902	1897	1897
1974	2101	2405	2391	2408	2237	2278	2161	1690	2119	1793	1709	1709
1973	2065	2057	2443	2401	2258	2294	1662	1990	2084	1812	1706	1706
1972	1747	1964	2457	1636	2299	2247	2395	2276	1942	1557	1290	1290
1971	2087	2190	2198	2498	2080	2155	1011	889	1191	1603	1241	1241
1970	2095	2144	2434	2488	1970	2029	2430	2289	1576	1895	1453	1453
1969	2266	2107	2406	2483	2360	1600	2158	2332	1839	1670	1387	1387
1968	2300	2241	2377	2434	2172	2439	2202	2419	1990	1684	1743	1743
1967	2162	1828	2328	2400	2165	2227	1630	2460	1738	1889	1752	1752
1966	1961	2268	2442	2317	2397	2416	2164	1993	1989	1531	1817	1817
1965	2289	2389	2414	2402	2290	2136	2314	1803	1883	1531	1481	1481
1964	2116	2468	2398	2281	2285	2347	1922	1764	2097	1887	1006	1006
1963	2221	2282	2381	2456	2575	2176	2387	1879	2075	1690	0887	0887
1962	2304	2347	2310	2215	2398	1940	2023	1953	1744	1632	1245	1245
1961	1444	2289	2384	2227	2343	1476	2274	2071	2098	1724	1253	1253
1960	1733	2374	2241	2411	2375	1423	2386	XXXX	2028	1480	1473	1473
1959	2050	2338	1472	2437	2375	2299	2395	0728	1860	1487	1590	1590
1958	2118	1981	2341	2467	2289	2240	2202	2071	2123	1314	1756	1756
1957	2183	1667	2328	2400	2394	2423	2320	2268	2010	1118	1882	1882
1956		2263	2375	2378	2439	1934	2103	2232	1972	0713	1857	1857
1955		2269	2159	2336	2343	2411	2413	1977	2013	1652	1662	1662
1954		2252		2386		2346	2518		2208		1365	1365
1953	52271	52271	22312	27558	73521	22377	22117	22278	55193	21583	45832	48722
1952	1723	1813	2013	2121	2239	2141	1998	2018	1847	1845	1555	1474

T : Total mensuel  
 M FA : Degré par surface  
 M et C : Degré horizontal  
 M : Moyenne mensuelle  
 EN FA : En degré

REPUBLIQUE DU SENEGAL  
 MINISTERE DE L'ENCLIMAT  
 DIRECTION DE LA METEOROLOGIE NATIONALE  
 DAKAR YCFF EF4014

BULLETIN METEOROLOGIQUE ANNUEL 1982  
 RAYONNEMENT GLOBAL EN J/CM<sup>2</sup>

Localite : DAKAR-FANN Latitude : 14.43N Longitude : 17.26W Elevation : 4.00M Integrateur et Fyrant : JYFA-GALVA KEZ CM5 Jrc : 0.83

JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
1824	2045	2281	2577	2920	3506	2800	1928	1790	2088	2281	1827
105	1994	2256	2782	2890	2182	2570	1754	2384	2161	1988	1418
018	1520	2525	2817	2692	2499	2474	1724	1975	2169	1975	1653
999	2149	2054	2466	2822	2376	2304	2168	1498	2132	2014	1874
123	1699	2070	2834	2704	2684	2253	1948	1754	1214	2103	1953
848	1857	2216	2466	2767	2723	2557	1879	1958	2264	1957	1804
887	2112	1973	2519	2739	2677	2311	1581	2179	2066	1960	1716
108	1900	2138	2223	2668	2553	2388	1324	2077	2261	1857	1845
163	1536	2038	1764	2681	2322	2010	2208	1908	2046	1930	1960
273	2131	2034	2540	2631	2589	1977	1218	1956	2244	2047	1838
113	2231	2617	2611	2557	2382	2591	1457	1514	2101	1810	1607
286	2175	2546	2746	2589	2569	1048	1449	1724	2237	1581	1523
174	1948	2347	2783	1680	2455	1786	2392	2103	2087	1693	0984
973	2233	2430	2361	2628	2215	2428	0982	1070	0727	1614	1556
080	2415	2384	2740	2750	1967	1904	1812	2101	1314	1621	1470
523	2504	2387	2672	2696	2526	1855	1654	2120	1574	1565	1849
103	2483	2532	2781	2657	2337	1992	1396	2045	2146	1856	1848
999	2385	1900	2722	2574	2207	2135	1837	2217	2001	1993	1830
095	2220	2631	2722	2765	2536	2232	2111	1862	1976	1483	1842
882	2538	2742	2577	2503	2532	2127	2168	1904	1859	1360	1346
971	2288	2687	2474	2334	2202	2135	2113	1673	2077	1938	1286
103	2345	2481	2782	2563	2496	2135	1134	1929	2144	1800	0633
058	2450	2670	2665	2281	2458	2135	1945	1405	2063	1743	1565
058	1080	2586	2695	2375	2454	2135	0971	1943	2128	1630	1244
1997	1632	2588	2337	2536	2539	2135	1707	2096	2187	1647	1289
1988	2398	2443	2442	2428	2606	1955	1803	1049	1965	1335	1480
030	2539	2273	2747	2244	2261	2101	1885	1657	2245	1412	1821
164	2326	2177	2660	2133	2283	1908	1389	1942	2111	1163	2021
241		2542	2760	2324	2450	2095	1856	2063	1996	0731	1825
185		2387	2309	2528	2660	2183	2257	2049	2138	1828	1682
173		2580		2509		2135	0833		2319		1498
2020	55733	72252	77522	79778	72242	22754	52487	55545	27221	57922	50087
1828	1969	2219	2420	2397	2268	2003	1588	1746	1863	1620	1515

T : Total mensuel M : Moyenne mensuelle  
 FA : Degré par parvenue EN FA : En ferre  
 et C : Degré par quart

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Solar Thermal Engineering P. J. Lunde  
John Willey & Sons
- [2] J. K. Page "The estimation of monthly mean value of daily total short wave radiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitudes  $40^{\circ}\text{N}$  -  $40^{\circ}\text{S}$ " paper N<sup>o</sup> 35/5/98 (1961)
- [3] S. A. Klein, W. A. Beckman and J. A. Duffie  
Monthly average solar radiation on inclined surface. Report 44 Engineering Experiment Station, University of Wisconsin Madison 1977.
- [4] S. A. Klein "Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces" Solar Energy 10, 325-329 (1977)
- [5] B. Y. H. Liu & Jordan "The interrelationship and characteristics distribution of direct, diffuse, and total solar radiation" Solar Energy.
- [6] Choudury "Solar Radiation at New Delhi" Solar Energy 7 (2), 44-52 (1963)
- [7] D. J. Norris "Solar Radiation on inclined surfaces" Solar Energy 10, 72-77 (1966)
- [8] Gupta "Selective Surface" Mac - Graw - Hill
- [9] Delebecque. R. "Les installations sanitaires"

BIBLIOGRAPHIE (suite.)

[10] Sayigh. A.M Solar Energy engineering, Academic Press Inc.

[11] Solar Energy volume 20, Number 2, 1978

[12] Techniques de l'ingenieur Tome B2: chauffage et Froid

[13] Ashrae Guide: American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineer N.York (1966)

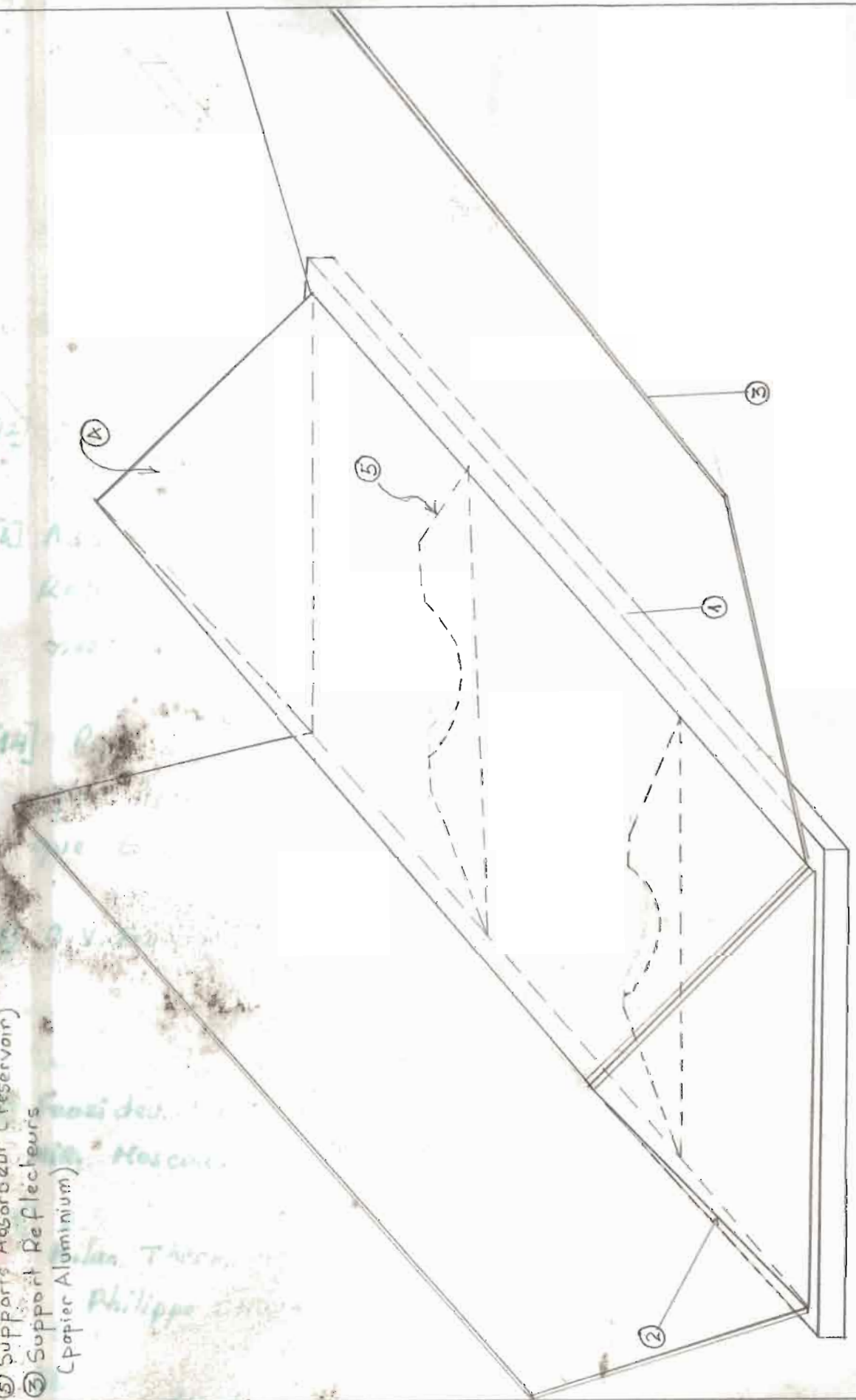
[14] Projets fin d'Etudes Solaires parrainés par Andre- WOLSKY (disponibles bibliothèque Ecole Polytechnique.)

[15] C.V. Feuvrier "La Simulation des Systemes" Maîtrise d'Informatique. Unod Universités.

[16] Feosidev. "Resistance des Materiaux" Editions MIR. Moscou.

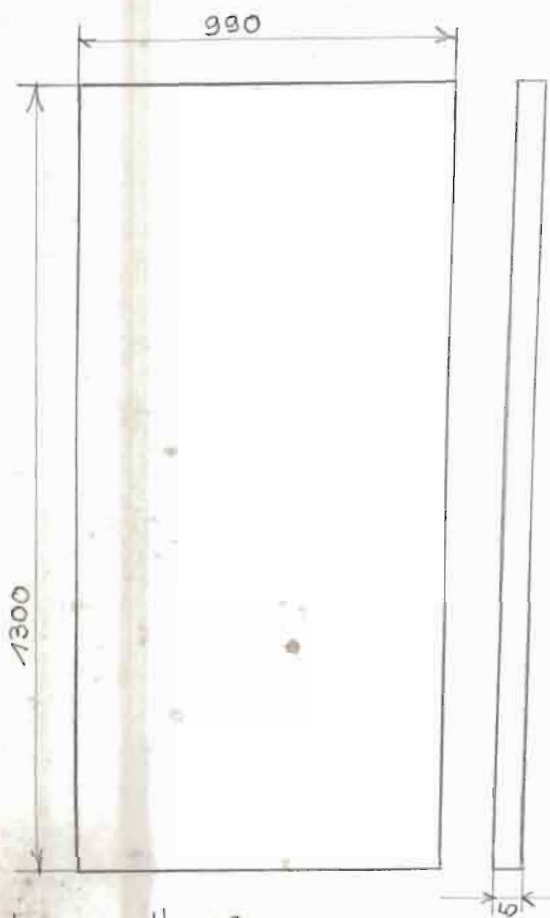
[17] Bilan Thermique d'une maison solaire  
Philippe CHOUARD, H. Michel, M.F. SIMON  
Eyrolles Paris collection de la  
direction des Etudes et Recherches d'E.D.F

- ① Support principal
- ② Support lateral
- ④ Vitrage sélectif
- ⑤ Supports Absorbant (réservoir)
- ③ Support Reflecteurs  
(Papier Aluminium)

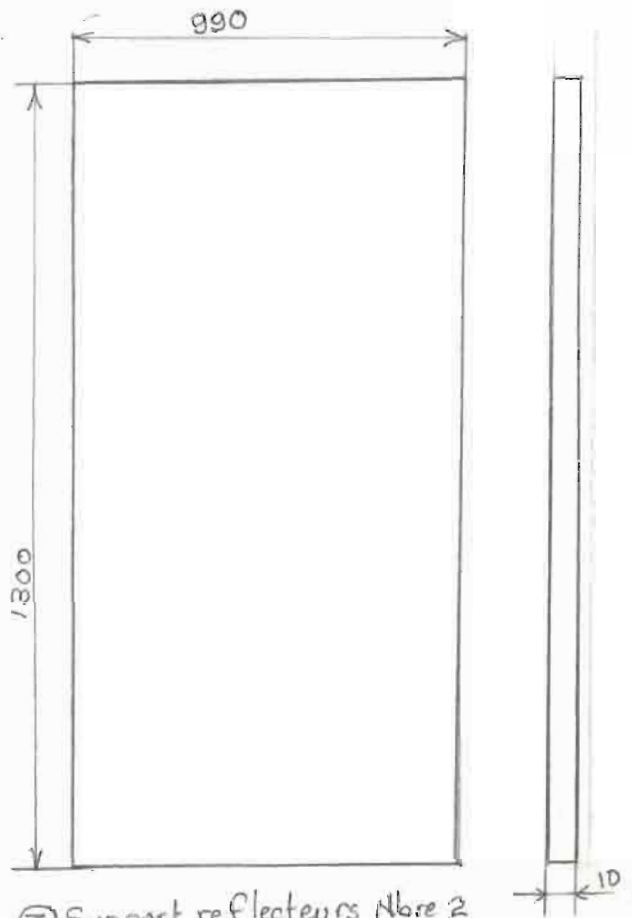


Modibo	DIOP	PROJET FIN D'ETUDES 83/84
Matricule	371	PERSPECTIVE DU CAPTEUR INTEGRE
	23/3/1984	
	Pas à l'Echelle	





④ Vitrage Nbre:2

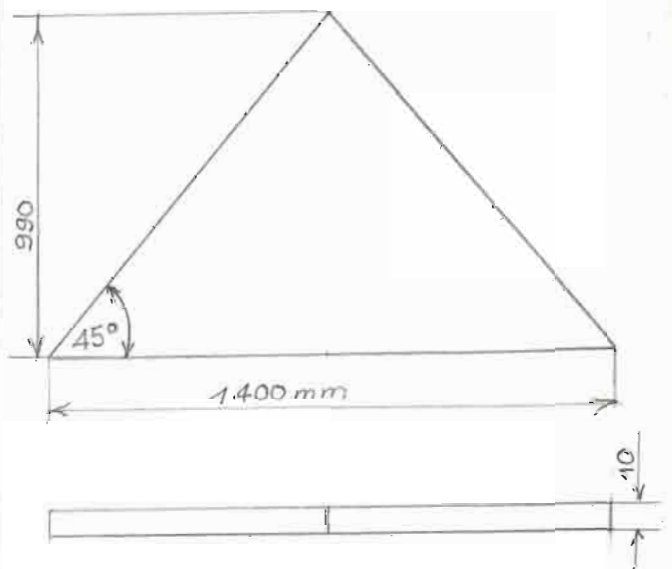


③ Support réflecteurs Nbre 2

② Support lateral Nbre:2



① Support Principal Nombre 1



Modibo DIOP

Matricule 371

23/31 1384

Pas à l'Echelle

PROJET FIN D'ETUDES 83/84

VUES DÉTAILLÉES  
DES  
ELEMENTS.