

Ecole Polytechnique de Thiès

Département de Génie Mécanique-Industriel

Juin 1980

GM.0569

ETUDE

THEORIQUE ET EXPERIMENTALE

D'UN CUISEUR SOLAIRE

Auteur

Mamadou Sow , Elève-Ingénieur

A mon père défunt

# TABLE DES MATIERES

## INTRODUCTION

|   |      |
|---|------|
| Remerciements   | i    |
| Préliminaire  | ii   |
| Avant propos  | ii   |
| Historique sur les applications de<br>l'énergie solaire | iv   |
| Sommaire  | vi   |
| Liste des symboles                                      | viii |

## PARTIE THEORIQUE

|   |    |
|---|----|
| 1- Revue de quelques modes de transfert<br>de chaleur | 1  |
| 1.1 Conduction  | 1  |
| 1.2 Rayonnement                                       | 3  |
| 1.3 Convection  | 4  |
| 2. Rayonnement solaire                                | 5  |
| 2.1 Rayonnement extraordinaire                        | 5  |
| 2.1 Rayonnement à la surface terrestre                | 6  |
| 3. Etude théorique du cuiseur                         | 8  |
| 3.1 Description                                       | 8  |
| 3.1.1 Corps du cuiseur                                | 8  |
| 3.1.2 Superstructure                                  | 10 |
| 3.2 Calcul de $E_v$                                   | 12 |

|       |                                     |    |
|-------|-------------------------------------|----|
| 3.3   | Calcul des températures d'équilibre | 13 |
| 3.3.1 | Bilan énergétique sur le verre      | 13 |
| 3.3.2 | Bilan énergétique sur l'air confiné | 15 |
| 3.3.3 | Bilan énergétique sur le gravier    | 16 |
| 3.3.4 | Résolution du système               | 17 |

## PARTIE EXPERIMENTALE

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1.  | Matériaux de construction                                 | 23 |
| 2.  | Construction du réflecteur                                | 24 |
| 2.1 | Technique graphique de développement du tronc de cône     | 24 |
| 2.2 | Formage, Coupage, Rivetage                                | 28 |
| 3.  | Construction des cylindres du corps                       | 28 |
| 3.1 | Tracage des développements                                |    |
| 3.2 | Coupage, formage, soudage                                 | 33 |
| 4.  | Construction des supports en bois                         | 33 |
| 5.  | Expérimentation du cuiseur                                | 35 |
| 6.  | Calculs des pertes de chaleur et du rendement énergétique | 51 |
| 7.  | Estimation du coût de revient                             | 54 |

## CONCLUSION 57

## REFERENCES

|               |    |
|---------------|----|
| Appendice     | 61 |
| Bibliographie | 68 |

# INTRODUCTION

## REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de projet Michel PETITEAU pour sa disponibilité, son assistance, ses suggestions et ses conseils.

Mes remerciements iront également :

- Aux responsables de l'I.P.M pour les documents aimablement mis à notre disposition.
- A Maurice DESMARQUEST pour son aide précieuse sur les réalisations de chaudronnerie.
- A Claude Bertrand et Marcel Blais, techniciens
- Aux responsables du Casernement de l'école pour les constructions en bois
- Enfin à tous ceux qui m'ont apporté leur contribution et leur soutien moral.

## PRELIMINAIRE

### i- Avant propos

Depuis 1970 un intérêt renouvelé dans le domaine de l'Énergie Solaire s'est développé, résultant de l'augmentation sans cesse croissante du coût de l'ENERGIE, notamment de celle provenant du Pétrole.

En un siècle (de 1850 à nos jours), le monde a consommé près des trois quarts de ses ressources énergétiques conventionnelles.

L'horizon du 21<sup>e</sup> siècle nous paraîtrait sombre si nos espoirs ne se fondaient sur deux sources d'appoints : l'atome et le soleil.

En 1935, recevant son prix Nobel de Physique Frédéric Joliot-Curie disait : « Si, tournés vers le passé, nous jetons un regard sur le progrès accompli par la Science à une allure toujours croissante, nous sommes en droit de penser que les chercheurs, brisant ou construisant les atomes à volonté, sauront réaliser des réactions nucléaires en chaînes explosives. Si de telles transmutations arrivent à se propager

dans la matière, on peut concevoir l'énorme énergie qui sera libérée. »

Cette prédiction se réalise de nos jours en ce sens que nous entrons dans l'ère industrielle de l'utilisation de l'énergie nucléaire. Plus d'une dizaine de pays déjà distribuent dans leur réseau électrique du courant d'origine nucléaire et plusieurs centaines de réacteurs sont utilisés actuellement dans le monde.

Bien qu'émervillé par cette maîtrise quasi totale de l'atome, l'Homme n'en redoute pas moins certains phénomènes nouveaux. Ceux-ci ont donné lieu à des applications destinées à changer la face du monde soit en bien, soit en mal selon le mode d'utilisation.

Ce spectre de danger permanent disparaît quand il s'agit de l'exploitation de l'Énergie Solaire.

Nous savons maintenant que l'énergie solaire provient de réactions de fusion nucléaire et de radioactivité positogène. La libération de l'énergie est due pour près de 85% au cycle "carbone" ou cycle de Bethe, et 15%



environ au processus de Critchfield. Depuis près de 3 milliards d'années le Soleil n'a consommé jusqu'à présent que 7,5% de son combustible (hydrogène). Il irradie dans toute notre galaxie une quantité impressionnante d'énergie dont une faible partie est reçue par la Terre.

Cette irradiation est sous forme de rayons lumineux, elle a une structure discontinue et est répartie en particules énergétiques ayant le même quantum d'énergie  $h\nu$  : les photons.

## ii - Historique sur les applications de l'Energie Solaire

Archimède (287 - 212 av J.C), aurait déjà incendié les vaisseaux romains qui assiégeaient Syracuse, avec ses "miroirs ardents" par concentration ponctuelle des rayons solaires.

En 1660, Benedetto Brégnans de Dresde construisit un dispositif optique (actuellement exposé au Museo di Storia della Scienze à Florence) pour le grand duc Casimo III de Médicis. Cet appareil était composé d'un grand condenseur, d'une lentille et d'un plateau montés sur un mécanisme orientable et réglable. En 1710, Averain et Targioni

l'expérimenterent sur la combustion des corps.  
En 1810, il permit à Faraday et à Davy de découvrir la composition chimique du diamant.

Buffon (1707-1788) avait de son côté étudié la concentration des rayons solaires avec des miroirs plans, pour réaliser un four solaire. Les miroirs concaves (qui permettent une concentration des rayons au foyer) présentaient en effet au XVIII<sup>e</sup> siècle de sérieuses difficultés de réalisation. On contourna ces difficultés en disposant ingénieusement de nombreuses facettes planes pour obtenir une certaine concavité.

Lavoisier (1743-1794), pour réfuter la théorie du « phlogistique » selon laquelle tout corps perdait un « élément insaisissable » en brûlant, utilisa un « verre ardent » ou lentille convergente. Il démontra, ainsi, que la masse d'un système (un combustible brûlant à l'intérieur d'un vase clos renfermant de l'air) était invariable, malgré le passage de la chaleur de l'intérieur à l'extérieur.

En 1880, Mouchot fabriqua une chau-

-dière solaire, qu'Abel Pifre, utilise le 6 Aout 1882 pour tirer un journal dans le jardin des Tuileries à Paris.

En 1901, des usines utilisant l'énergie solaire, sont construites en Californie, aux USA.

En 1913, des pompes solaires sont utilisées en Egypte pour l'irrigation.

En 1961, à la Conférence des Nations Unies sur « les nouvelles sources d'énergie » il a été présenté un concentrateur solaire produisant de la vapeur actionnant de petites turbines. Son but était de concurrencer le moteur Diésel.

### iii - Sommaire

Le cuisEUR que nous nous proposons d'étudier est un véritable four permettant la cuisson des aliments courants dans des conditions de rapidité et d'efficacité satisfaisantes.

Le corps du cuisEUR est constitué par deux cylindres mecano-soudés, fermés sur une base en tôle d'acier et de diamètres différents.

Ils sont séparés par une matière isolante (laine de verre) et sont solidaires d'un cadre

en bois contreplaqué. Le cylindre intérieur est peint en noir mat et contient un lit de gravier noir destiné à accumuler la chaleur.

Le réflecteur est constitué par un tronc de cône à 60 degrés en aluminium poli. La petite base est fermée par une plaque de verre et le tout est solidaire d'un cadre en contreplaqué qui vient coulisser sur le cadre du corps du cuiseur, au moyen d'une glissière.

Le four est orienté de façon que les rayons solaires soient perpendiculaires au plan du cadre du four. L'énergie pénètre par le hublot dont le diamètre est la moitié du diamètre de la grande base du réflecteur, ce qui correspond à une concentration théorique de 4.

L'ouverture du four s'effectue en faisant glisser le cadre du réflecteur sur celui du cuiseur par la glissière.

L'adjonction de trois thermocouples permet de mesurer à tout moment les températures d'équilibre du verre, de l'air confiné dans la chambre de cuisson et du gravier.

Les résultats obtenus sont systématisés dans la partie expérimentale du projet.

iv- Liste des symboles

|           |  |
|-----------|--|
| $A_g$     | Surface d'échange du gravier et de la paroi                            |
| $A_v$     | Surface d'échange de la plaque de verre                                |
| $D_e$     | Diamètre du cylindre externe du corps                                  |
| $D_i$     | " " interne "  |
| $D_r$     | " de la grande base du réflecteur                                      |
| $d_r$     | " " petite base " "  |
| $E_v$     | Rayonnement solaire qui atteint la plaque de verre après concentration |
| $e$       | Épaisseur de la tôle d'acier   |
| $f_{v-g}$ | Facteur de forme et d'efficacité du verre par rapport au gravier.      |
| $h$       | Hauteur du cylindre interne  |
| $h_u$     | Coefficient d'échange de chaleur de la face supérieure du verre        |
| $h_d$     | Coefficient d'échange de chaleur de la face inférieure du verre        |
| $h_g$     | Coefficient d'échange de chaleur du gravier                            |
| $I$       | Intensité moyenne du rayonnement solaire                               |
| $R_d$     | Rayon du développement de la grande base                               |
| $r_d$     | " " de la petite base du réflecteur.                                   |

|              |   |
|--------------|---|
| $T_a$        | Température d'équilibre de l'air confiné            |
| $T_g$        | " " du gravier                                      |
| $T_v$        | " " du verre  |
| $T_0$        | " ambiante  |
| $T_\infty$   | " des hautes couches de l'atmosphère                |
| $\alpha_r$   | Facteur d'absorption du réflecteur                  |
| $\alpha_v$   | " " du verre  |
| $\epsilon_g$ | " d'émission du gravier                             |
| $\epsilon_v$ | " " du verre  |
| $\sigma$     | Constante de Stéfan-Boltzman                        |
| $\theta$     | Angle du rayon réfléchi incident avec l'axe de four |
| $\tau_v$     | Facteur de transmission du verre                    |
| $\rho_r$     | Facteur de réflexion du réflecteur                  |
| $\rho_v$     | Facteur de réflexion du verre                       |
| $Q$          | Rayonnement - Energie - Chaleur                     |
| $\alpha_g$   | Facteur d'absorption du gravier                     |
| $\beta$      | Angle de développement                              |
| $t$          | Surdéveloppement (Pour rivetage du réflecteur)      |
| $h'$         | hauteur de la chambre de cuisson                    |

PARTIE THEORIQUE

# 1. Revue de quelques modes de transfert de chaleur

## 1.1 - Conduction

La conduction est un phénomène au moyen duquel la chaleur s'écoule à l'intérieur d'un milieu (solide, liquide ou gazeux) d'une région à haute température vers une autre à basse température ou entre deux milieux mis en contact. L'énergie se propage par contact direct des molécules sans déplacement appréciable de celles-ci. Conformément à la théorie cinétique, la température d'un élément de matière est proportionnelle au coefficient de l'énergie cinétique des molécules qui la constituent. Lorsque dans une région, les molécules acquièrent une énergie cinétique moyenne plus grande que celle d'une région adjacente, comme cela se manifeste par une différence de température, un transfert de chaleur se fait de la région à haute température vers la région à basse température. S'il n'y a aucune perte on observera à l'équilibre l'égalisation des températures des deux régions. Mais l'évacuation (ou l'apport)



de chaleur maintient des différences dans les températures entre différents points en établissant un écoulement continue de chaleur.

La conduction est le seul mode par lequel la chaleur peut s'écouler dans les corps solides. Elle n'est pas négligeable non plus dans les fluides mais y est souvent accompagnée d'un transfert par convection et/ou par rayonnement.

La relation fondamentale de la transmission de chaleur par conduction a été proposée par le savant français J.B.J. Fourier en 1822. Elle s'établit ainsi :

$$q_c = -k A \frac{dT}{dx} \quad (1.1.1)$$

$q_c$  = flux de chaleur (en kcal/h )

$k$  = conductivité thermique du milieu (en kcal/h.m.°C)

$A$  = aire de la section, mesurée perpendiculairement à la direction du flux, à travers laquelle s'écoule la chaleur par conduction. (en m<sup>2</sup>)

$\frac{dT}{dx}$  = gradient de température dans la section (°C/m)

## 1.2 Rayonnement

Le rayonnement est le mécanisme par lequel la chaleur se transmet d'un corps à haute température vers un corps à basse température, lorsque ces corps sont séparés dans l'espace ou même lorsqu'un vide existe entre eux. L'émission continue de chaleur, par rayonnement est constatée au niveau de tous les corps. L'intensité du rayonnement est proportionnelle à la quatrième puissance de la température absolue du corps rayonnant. Cette intensité dépend également de la nature de la surface de ce corps. L'énergie rayonnante se propage à la vitesse de la lumière. Elle présente des analogies avec le rayonnement lumineux à la différence de leurs longueurs d'ondes. Elle se formule ainsi :

$$q_r = \sigma A_1 T_1^4 \quad (1.2.1)$$

$q_r$  = Energie rayonnée par unité de temps, par une surface d'un corps noir (radiateur idéal)  
(en kcal/h)

$A_1$  = Aire de la surface (en  $m^2$ )

$\sigma$  : Constante de Stéfan - Boltzman  
=  $4,88 \times 10^{-8}$  kcal / h  $m^2$  °K

$T_1$  = Température absolue en degré Kelvin

Si le corps noir est entouré d'une enceinte à la température  $T_2$ , dont la surface est également noire (c.à.d qu'elle absorbe toute l'énergie incidente) la quantité de chaleur effectivement transmise est:

$$q_r = \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.2.2)$$

Généralement les corps réels (souvent appelés corps gris) émettent une fraction constante de l'intensité du corps noir aux mêmes longueurs d'onde et températures. Dans ce cas la quantité de chaleur transmise d'un corps gris à  $T_1$  à un corps noir à  $T_2$  entourant le premier, s'écrit:

$$q_r = \sigma A_1 \epsilon_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.2.3)$$

$\epsilon_1$  = facteur d'émission de la surface grise

Pour deux corps gris dans une enceinte fermée l'échange effectif de chaleur par rayonnement est donné par :

$$q_r = \sigma A_1 \mathcal{F}_{1-2}^* (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.2.3)$$

$\mathcal{F}_{1-2}^*$  = facteur de forme et d'efficacité de 1 par rapport à 2.

### 1.3 Convection

La convection (naturelle ou forcée) est un mécanisme très complexe. Les difficultés rencontrées se situent essentiellement au niveau de la détermina-

-tion du coefficient d'échange de chaleur qui fait intervenir en outre des phénomènes assez sérieux relevant de la mécanique des fluides (convection forcée). Le flux de chaleur transmis par convection entre une surface et un fluide est donné par:

$$q_c = h_c A \Delta T \quad (1.3.1)$$

$A$  = Aire de transmission de chaleur ( $m^2$ )

$\Delta T$  : Différence de température entre la surface et le fluide ( $^{\circ}C$ )

$h_c$  : Coefficient d'échange de chaleur par convection ( $Kcal/h.m^2.^{\circ}C$ )

Dans la majorité des cas, ce coefficient peut être simplement évalué à partir de tableaux, graphes ou abaques préétablis.

## 2. Rayonnement solaire

### 2.1 Rayonnement extraterrestre

Le Soleil est une sphère de masse gazeuse dont le diamètre est évalué à 1,39 million de kilomètres. La température effective de sa surface est de  $5762^{\circ}K$  environ. Tandis que dans sa partie centrale la température est estimée de 8 à 40 millions de degrés Kelvin. Sa den-

-site' est environ 80 à 100 fois celle de l'eau.

La constante solaire est l'énergie par unité de temps et de surface qui atteindrait la Terre si celle-ci était dépourvue d'atmosphère. Les estimations de la Constante solaire ont été faites, jusqu'à récemment, sur la base de mesures du rayonnement solaire, après que celui-ci ait traversé la couche atmosphérique dont les composantes en absorbent et en diffusent une partie. Des mesures beaucoup plus précises, prises à partir de Satellites, d'avions à hautes altitudes, et de ballons sondes ont donné le chiffre récent de  $1367 \text{ watts/m}^2$  comme valeur de la constante solaire.

## 2.2 Rayonnement à la surface terrestre

Tout le rayonnement extraterrestre n'atteint pas la surface de la Terre. Seule une gamme de longueurs d'onde s'étalant de  $0,29 \mu\text{m}$  à  $2,5 \mu\text{m}$  atteindrait celle-ci, aux pertes par absorption et par diffusion près.

Les rayons X et autres longueurs d'onde ultra-courtes sont presque totalement absorbés dans l'ionosphère par l'azote et l'oxygène. Une partie

non moins importante de l'ultraviolet est absorbée par l'ozone.

Parallèlement, les longueurs d'onde supérieures à  $2,5 \mu\text{m}$  sont fortement absorbées par le gaz carbonique  $\text{CO}_2$  et la vapeur d'eau. Ce phénomène d'atténuation a été sujet à bon nombre d'études, pour estimer quantitativement son effet.

Ce que nous devons en définitive retenir, c'est que seule une partie de la constante solaire, variant selon le lieu et les conditions atmosphériques, atteint effectivement la Terre.

2.3\_ Données expérimentales sur le rayonnement solaire à Thiès. (Voir Appendice)

### 3. Etude théorique du cuiseur

#### 3.1. Description

Le cuiseur est essentiellement constitué par deux parties : le corps du cuiseur et la superstructure

##### 3.1.1 Corps du cuiseur

- Composantes :

1. Un cylindre interne en tôle d'acier d'épaisseur 1,2 mm, ayant un diamètre de 450 mm (mesuré extérieurement) et une hauteur de 395 mm

2. Un cylindre externe du même matériau ayant un diamètre de 500 mm (mesuré intérieurement)

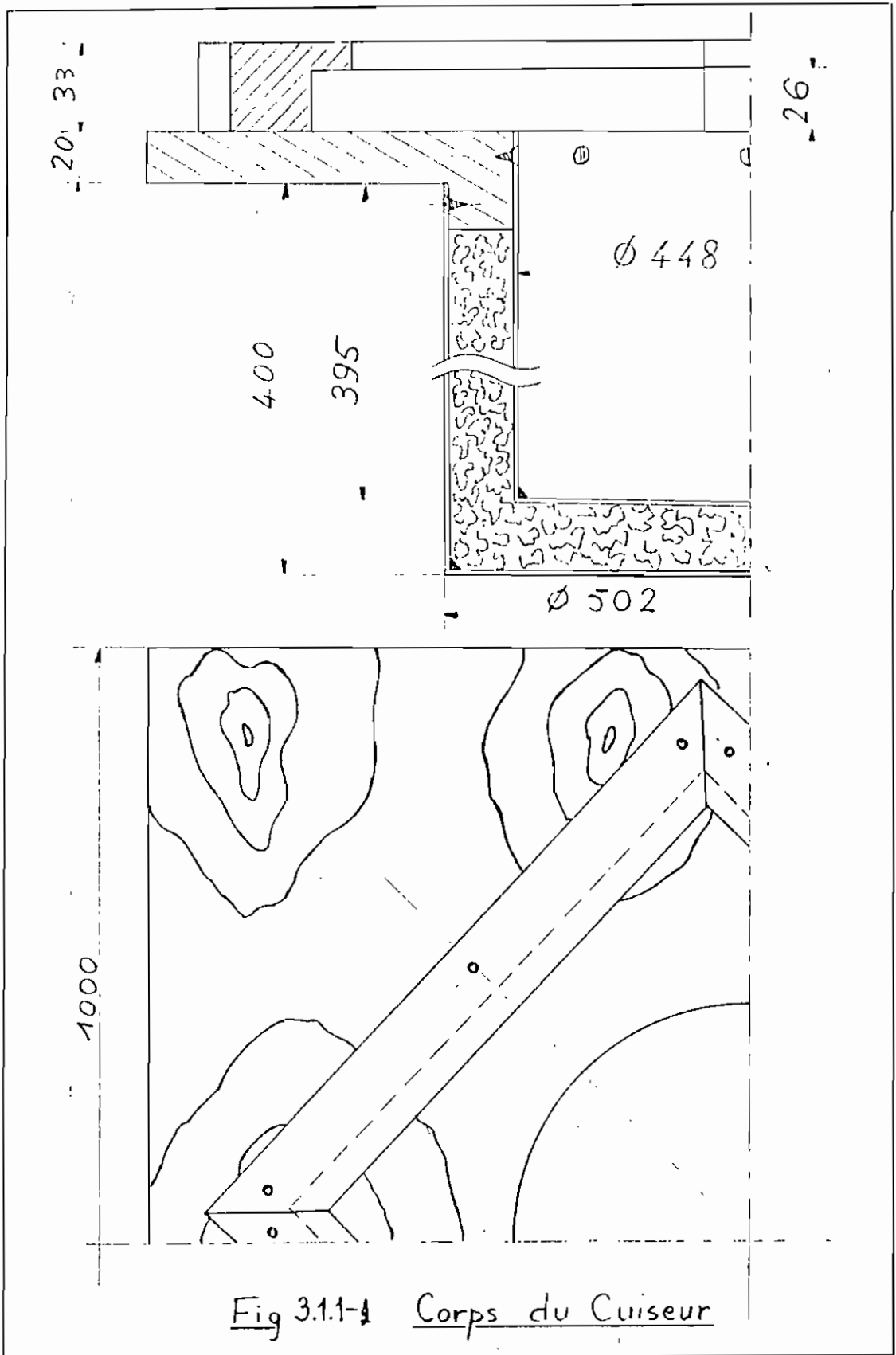
Ces 2 cylindres sont fermés sur leurs bases inférieures.

3. Un cadre (1000 x 1000 mm) en bois contreplaqué d'épaisseur 20 mm et percé d'un trou central rigoureusement coté à 450 mm.

4. Un isolant thermique constitué par de la laine de verre.

- Montage :

Les deux cylindres sont concentriquement fixés sur le cadre. Ils sont séparés par la laine de verre qui isole thermiquement la chambre





de cuisson. Celle-ci est constituée par le cylindre interne qui est recouvert de 2 couches de peinture noire mate.

### 3.1.2 Superstructure

- Composantes :

1- Un cadre (600x600 mm) en bois contre-plaqué de 20 mm d'épaisseur percé d'un trou central de 450 mm biseauté suivant un angle de  $60^\circ$  vers le haut. Une plaque de verre carré (520x520 mm) est fixée à la partie inférieure avec un jeu prévenant la dilatation du verre.

2- Un réflecteur tronconique à  $60^\circ$  en aluminium poli d'épaisseur 1 mm. Nous reviendrons sur ses détails de construction plus loin.

- Montage :

La petite base du réflecteur vient s'adapter sur la partie biseauté du cadre et le tout est maintenu fixe par 8 vis à bois 3-16

La superstructure s'ajuste au corps du cuisinier par une glissière confectionnée sur le cadre du corps, ouvrant et fermant ainsi la chambre de cuisson. Le hublot formé par le verre permet de piéger l'énergie dans la chambre de cuisson par effet de serre.

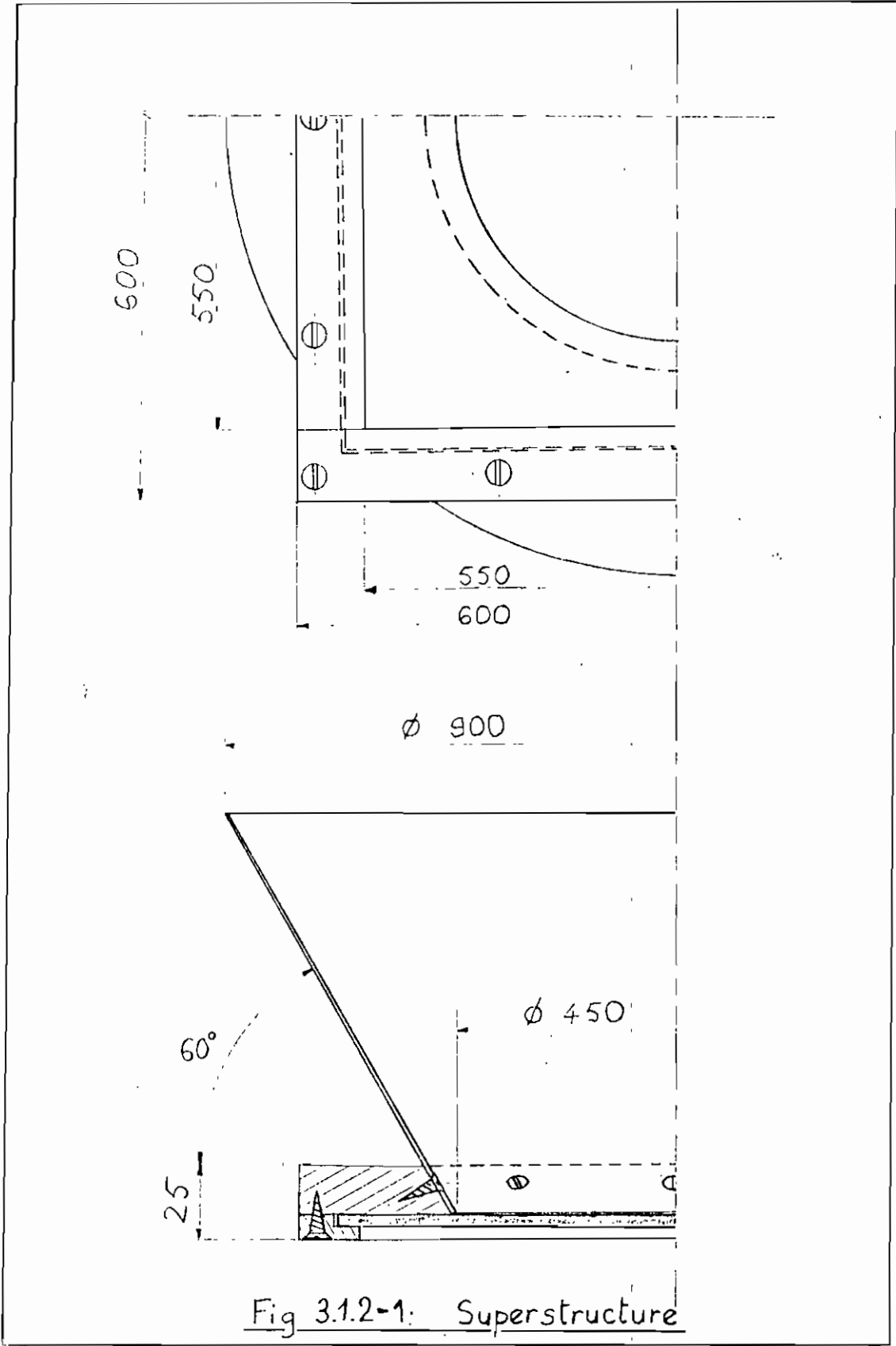


Fig 3.1.2-1: Superstructure

### 3.2 Calcul de $E_v$

$$I = 1050 \text{ watts/m}^2 \quad (\text{Voir Appendice})$$

$$E_v = E_1 + E_2 \cos \theta$$

$E_1$  = Energie qui atteint la plaque sans être concentrée

$E_2$  = Energie qui est réfléchié et concentrée par le collecteur

$$E_1 = \frac{I \pi d_r^2}{4}$$

$$E_2 = \rho_r I \pi \frac{(D_r^2 - d_r^2)}{4}$$

D'où

$$E_v = \frac{I \pi}{4} \left[ d_r^2 + \rho_c (D_r^2 - d_r^2) \cos \theta \right] \text{ watts}$$

A.N. : Voir Appendice pour les valeurs numériques des paramètres  $\rho_c$  et  $\theta$ .

$$\underline{E_v = 343 \text{ watts}} \quad \text{ou} \quad \underline{295,4 \text{ kcal/h}}$$

N.B.

Ce calcul est basé sur un ensoleillement égal à la moyenne de valeurs mesurées à Thiès, entre 10h A.M. et 15h par temps clair et dégagé.

### 3.3 Calcul des températures d'équilibre du verre ( $T_v$ ), de l'air confiné ( $T_a$ ) et du lit de gravier ( $T_g$ )

Dans ce qui suit nous allons élaborer trois bilans énergétiques sur le verre, sur l'air confiné et sur le gravier, desquels nous tirerons trois équations à trois inconnues ( $T_v$ ,  $T_a$  et  $T_g$ ). Par substitution, ces équations seront réduites à une seule à une inconnue mais au 4<sup>e</sup> degré. Sa résolution se fera à l'aide d'une calculatrice programmable CASIO f.x 201.P. La suite deviendra aisée.

#### 3.3.1. Bilan énergétique sur le verre

$$Q_{in} = Q_{out}$$

$Q_{in}$  = rayonnement total absorbé par le verre

$Q_{out}$  = " " émis " "

$$Q_{in} = Q_s + Q_a + Q_t + Q_g$$

$Q_s$  = rayonnement solaire absorbé =  $\alpha_v E_v$

$Q_a$  rayonnement atmosphérique absorbé. Ce terme disparaît parce que nous considérons les échanges entre les hautes couches de l'atmosphère et la plaque de verre. Sinon nous en tiendrions compte deux fois dans le bilan. Donc  $Q_a = 0$

$Q_t$  rayonnement terrestre absorbé. Ce terme aussi s'annule parce que le verre ne "voit" pas la terre.  $Q_{t=0}$

$Q_g$  rayonnement émis par le gravier et la paroi latérale interne.

$$Q_{out} = Q_{cu} + Q_{cd} + Q_{rd} + Q_{ru}$$

$Q_{cu}$  Convection naturelle au dessus du verre

$Q_{cd}$  " " au dessous "

$$Q_{cu} = h_u A_v (T_v - T_o)$$

$$Q_{cd} = h_d A_v (T_v - T_a)$$

$Q_{ru}$  Rayonnement émis par le verre vers les hautes couches atmosphériques =  $\epsilon_v \sigma A_v (T_v^4 - T_\infty^4)$

$Q_{rd}$  Rayonnement émis par le verre vers le gravier et la paroi interne.

Le bilan s'écrit :

$$\alpha_v E_v + Q_g = h_u A_v (T_v - T_o) + h_d A_v (T_v - T_a) + \epsilon_v \sigma A_v (T_v^4 - T_\infty^4) + Q_{rd}$$

Après réarrangement des termes on obtient:

$$\alpha_v E_v - A_v [h_u (T_v - T_o) + h_d (T_v - T_a)] - \epsilon_v \sigma A_v (T_v^4 - T_\infty^4) = Q_{rd} - Q_g$$

Le membre de droite est un échange net de chaleur par rayonnement entre deux surfaces considérées comme grises et dans une enceinte fermée.

$$Q_{rd} - Q_g = Q_v \Leftrightarrow q = A_v \overline{f}_{v-g} \sigma (T_v^4 - T_g^4)$$

Le bilan devient donc :

$$\begin{aligned} \alpha_v E_v - h_u A_v (T_v - T_0) - h_d A_v (T_v - T_a) \\ = A_v \overline{f}_{v-g} \sigma (T_v^4 - T_g^4) - \varepsilon_v \sigma A_v (T_v^4 - T_\infty^4) \end{aligned}$$

(3.3.1)

### 3.3.2 Bilan énergétique sur l'air

confiné

Les échanges thermiques se font essentiellement par convection naturelle.

$$Q_{in} = \text{échange avec le gravier et la paroi interne} = h_g A_g (T_g - T_a)$$

$$Q_{out} = \text{échange avec le verre} \\ = h_d A_v (T_a - T_v)$$

En régime permanent  $Q_{in} = Q_{out}$

$$\Leftrightarrow h_g A_g [T_g - T_a] = h_d A_v [T_a - T_v]$$

$$\Leftrightarrow \boxed{T_a [h_d A_v + h_g A_g] = h_g A_g T_g + h_d A_v T_v}$$

(3.3.2)

On en tire

$$T_a = \frac{h_g A_g T_g + h_d A_v T_v}{h_d A_v + h_g A_g} \quad (3.3.2)'$$

### 3.3.3 - Bilan énergétique sur le gravier

$$Q'_{in} = Q'_{out}$$

$Q'_{in}$  = Energie totale qui entre dans la masse de gravier

$Q'_{out}$  = Energie totale émise par le gravier

$$Q'_{in} = Q'_s + Q'_{rv}$$

$Q'_s$  Rayonnement solaire qui atteint le gravier  
 $= \alpha_g \tau_v E_v$

$Q'_{rv}$  Rayonnement émis par le verre sur le gravier.

$$Q'_{out} = Q'_c + Q'_{rg}$$

$Q'_c$  Convection naturelle à la surface du gravier  
 $= h_g A_g (T_g - T_a)$

$Q'_{rg}$  Rayonnement émis par le gravier sur le verre.

Le bilan donne :

$$\alpha_g \tau_v E_v + Q'_{rv} = h_g A_g (T_g - T_a) + Q'_{rg}$$

$$\Leftrightarrow \alpha_g \tau_v E_v - h_g A_g (T_g - T_a) = Q'_{rg} - Q'_{rv}$$

Le membre de droite est un échange net de chaleur par rayonnement entre les surfaces  $A_v$  et  $A_g$  considérées comme grises et dans une enceinte fermée.

$$Q'_{rg} - Q'_{rv} = Q_{g \rightleftharpoons v} = A_g F_{g-v} \sigma (T_g^4 - T_v^4)$$

D'après le théorème de réciprocité

$$A_g F_{g-v} = A_v F_{v-g}$$

D'où

$$Q_{g \rightleftharpoons v} = A_v F_{v-g} \sigma (T_g^4 - T_v^4)$$

L'équation devient :

$$\alpha_g \tau_v E_v - h_g A_g (T_g - T_a) = A_v F_{v-g} \sigma (T_g^4 - T_v^4)$$

(3.3.3)

3.3.4 Résolution du système forme'  
par les équations (3.3.1), (3.3.2) et (3.3.3)

En substituant (3.3.2)' dérivée de  
(3.3.2), soit

$$T_a = \frac{h_g A_g T_g + h_d A_v T_v}{h_d A_v + h_g A_g}$$

dans les équations (3.3.1) et (3.3.3), on obtient respectivement :

$$\alpha_v E_v - h_d A_v (T_v - T_0) - \varepsilon_v \sigma A_v (T_v^4 - T_\infty^4) = \frac{h_d h_g A_v A_g}{h_d A_v + h_g A_g} (T_v - T_g) + A_v F_{v-g} \sigma (T_v^4 - T_g^4)$$

(3.3.4.1)



et

$$\alpha_g T_v E_v = \frac{h_d h_g A_v A_g}{h_d A_v + h_g A_g} (T_g - T_v) + A_v \mathcal{F}_{v-g} \sigma (T_g^4 - T_v^4)$$

(3.3.4.2)

Les membres de droite des équations (3.3.4.1) et (3.3.4.2) sont égaux en valeur absolue mais ont des signes opposés.

On obtient en faisant la substitution adéquate et en réarrangeant les termes :

$$(\alpha_v + \alpha_g T_v) E_v - h_u A_v (T_v - T_0) - \varepsilon_v \sigma A_v (T_v^4 - T_\infty^4) = 0$$

(3.3.4.3)

C'est une équation du quatrième degré en  $T_v$ .

### Résolution numérique

On remplace, dans la formule (3.3.4.3), tous les paramètres et constantes par leurs valeurs (cf. Appendice).

$$(0,06 + 0,9 \times 0,87) 295,4 - 5,92 \times 0,159 (T_v - 300) - 0,9 \times 4,88 \times 10^{-8} \times 0,159 (T_v^4 - 223^4) = 0$$

$$\Leftrightarrow T_v^4 + 1,348 \cdot 10^8 T_v - 785,698 \cdot 10^8 = 0$$

La résolution donne  $T_v = 398^\circ\text{K}$   
 ou  $T_v = 125^\circ\text{C}$

En introduisant cette valeur dans la formule (3.3.4.2) et en remplaçant les constantes et les paramètres par leurs valeurs, on obtient en réarrangeant les termes :

$$0,9 \times 0,87 \times 295,4 - \frac{3,395 \times 4,444 \times 0,159 \times 0,512}{3,395 \times 0,159 + 4,444 \times 0,512} (T_g - 398)$$

$$- 0,159 \times 0,9 \times 4,88 \cdot 10^{-8} (T_g^4 - 398^4) = 0$$

Ce qui donne en simplifiant l'équation :

$$T_g^4 + 0,625 \cdot 10^8 T_g - 830,882 \cdot 10^8 = 0$$

La résolution donne  $T_g = 480^\circ\text{K}$   
 ou bien  $T_g = 207^\circ\text{C}$

En introduisant ces valeurs de  $T_v$  et  $T_g$  dans la formule (3.3.2)' donnant  $T_a$  nous obtenons :

$$(3.3.2)' \rightarrow T_a = \frac{h_g A_g T_g + h_d A_v T_v}{h_d A_v + h_g A_g}$$

En remplaçant les paramètres par leurs valeurs :

$$T_a = \frac{4,444 \times 0,512 \times 480 + 3,395 \times 0,159 \times 398}{4,444 \times 0,512 + 3,395 \times 0,159}$$

$$\Leftrightarrow T_a = 464 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$\text{ou bien } T_a = 191 \text{ } ^\circ\text{C}$$

### Récapitulation

| Température d'équilibre | $^{\circ}\text{K}$ | $^{\circ}\text{C}$ |
|-------------------------|--------------------|--------------------|
| Gravier $T_g$           | 480                | 207                |
| Air Confiné $T_a$       | 464                | 191                |
| Verre $T_v$             | 398                | 125                |

### Remarques sur les résultats

Il va sans dire qu'ils constituent les températures maximales auxquelles nous pourrions, théoriquement, accéder dans le cuiseur. Dans le calcul nous avons idéalisé toutes les conditions de fonctionnement du cuiseur, ceci dans le souci de ne pas compliquer outre mesure les équations et leurs résolutions.

D'abord nous avons négligé les pertes de chaleur par conduction, résultant du fait qu'aucune isolation n'est absolument parfaite.

Ensuite nous n'avons pas considéré la convection forcée sur la face de dessus du verre dans le calcul de son coefficient d'échange de chaleur.

Tout ceci nous amène à modérer notre optimisme à vérifier exactement ces calculs dans nos expériences. Nous ne serions pas surpris d'avoir des mesures inférieures, qui elles découleraient des véritables conditions d'exploitation du cuiseur.

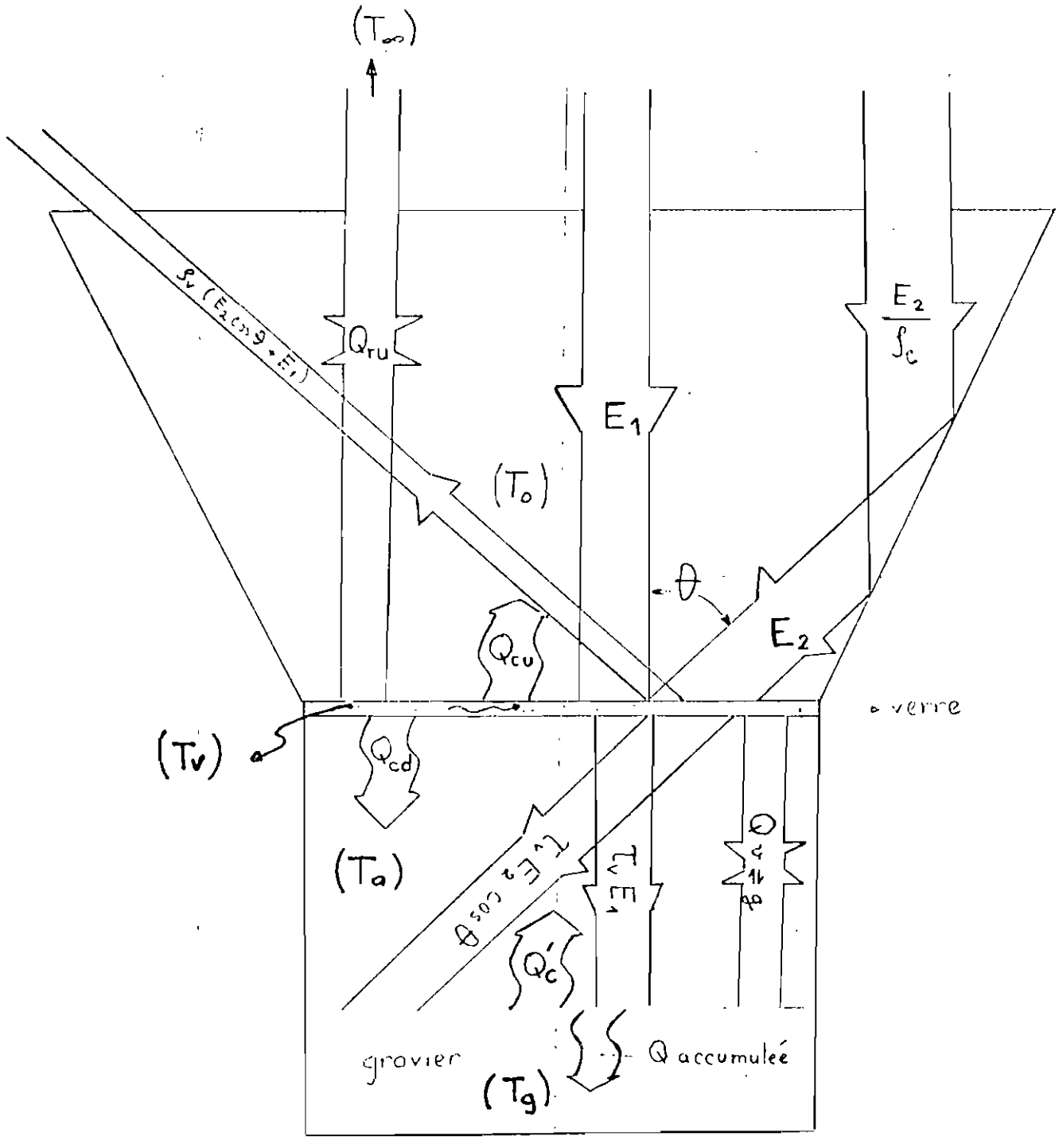


figure 3.3-1: Mécanismes simplifiés de transfert de chaleur dans le cuiseur.

# PARTIE EXPERIMENTALE

## 1\_ Matériel de construction

Il entre dans la réalisation du cuisinier les matériaux suivants

- 1 feuille d'aluminium poli 1mm  
1m x 2m
- 2 feuilles d'acier ordinaire 1,2mm  
1m x 1,5m
- Bois :
  - Contreplaqué de 20mm  
1m x 1m et 0,6m x 0,6m
  - Rouge 35mm x 35mm x 2m
  - Contreplaqué de 6 mm x 25mm  
2,5m (longueur)
- Plaque de verre simple de 3mm  
520 x 520 mm
- Isolant thermique en laine de verre
- 1 pot de peinture noire mate
- Des vis à bois (3x16mm), des rivets, des pointes, etc...
- Des gravillons de basalte

## 2. Construction du réflecteur

### 2.1. Technique graphique de développement d'un tronc de cône. ( c.f fig 21-2)

Elle se fait en plusieurs étapes :

1. Dessiner une vue de face du tronc de cône.

2. Prolonger les 2 génératrices limites jusqu'au sommet du cône qu'elles forment (point O)

3. Les rayons de développement  $R_d$  de la grande base, et  $r_d$  de la petite base, sont ainsi définis sur la génératrice prolongée :

$R_d$  : du point O à l'intersection de la grande base avec la génératrice.

$r_d$  : du point O à l'intersection de la petite base avec la génératrice.

4. Déterminer l'angle de développement

$$\beta = 2\pi \frac{\pi D_r}{2\pi R_d} = \pi \frac{D_r}{R_d} \quad (\text{en rad})$$

5. Tracer un arc de cercle de rayon  $R_d$ , d'angle  $\beta$  et de centre O.



6. Tracer un arc de cercle de rayon  $r_d$ , d'angle  $\beta$ , concentriquement au 1<sup>er</sup>.

7. Le développement correspond au secteur de couronne définie par les 2 arcs de cercles et les cotés de l'angle inscrit  $\beta$ .

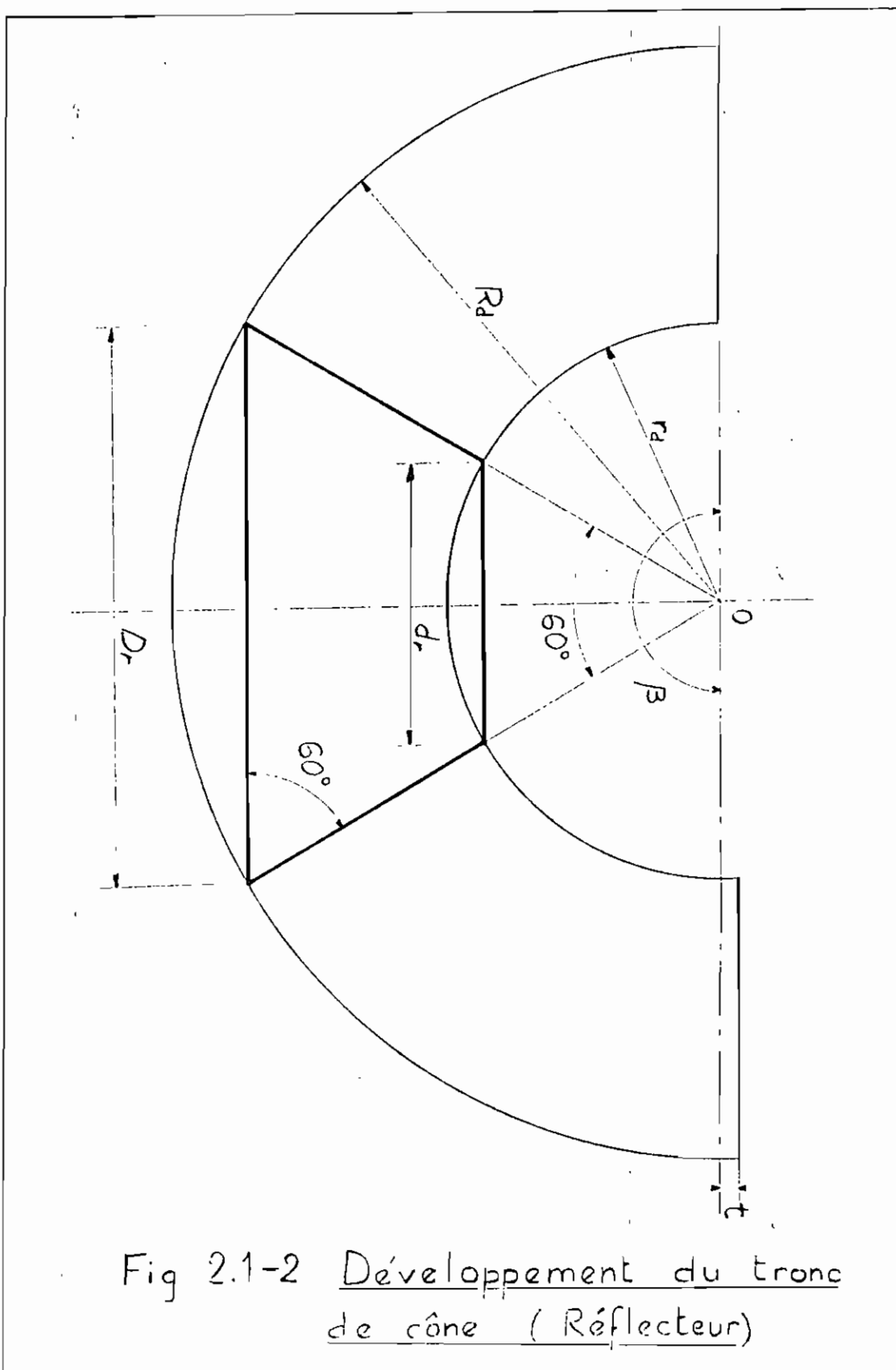
8. Prévoir un surdéveloppement  $t$  dans le cas d'une fixation par rivets des bords (génératrices) du réflecteur

Dans notre cas particulier :

L'ouverture du tronc de cône étant de  $60^\circ$  ( $\frac{\pi}{3}$ ), nous avons  $R_d = D_r = 900$  mm et  $r_d = d_r = 450$  mm (triangles équilatéraux)

$$\text{D'où } \beta = \pi \frac{D_r}{R_d} = \pi \quad (180^\circ)$$

Le développement du réflecteur prend alors la forme d'une demi-couronne. On prévoit  $t = 15$  mm. ( Voir fig 21-2 )



## 2.2 - Coupage, Formage et Rivetage

Le coupage est fait manuellement avec une cisaille à main, en suivant méticuleusement les contours de traçage. L'aluminium n'étant pas dur à travailler, le formage du tronc de cône est réalisé sur un montage bricolé en tordant le développement suivant les génératrices. Le réflecteur ainsi obtenu est rivé et est d'une conicité quasi parfaite.

## 3 - Construction des cylindres du corps

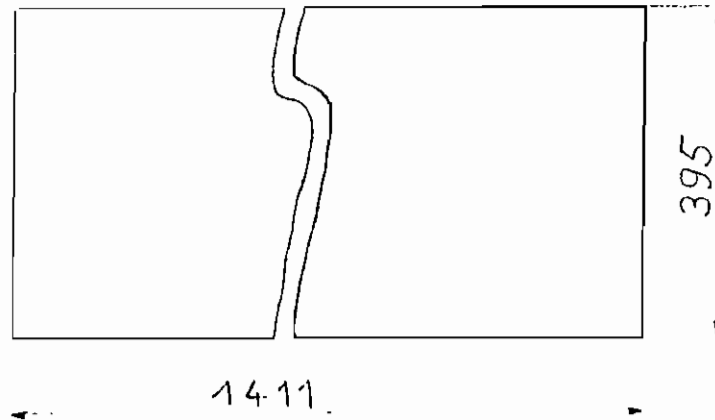
### 3.1 Traçage des développements

#### 3.1.1 Cylindre interne

Le matériau utilisé est une feuille d'acier ordinaire d'épaisseur  $e = 1\text{mm}$ .

Le développement de la paroi latérale est un rectangle dont la largeur est égale à la hauteur du cylindre et dont la longueur est égale au périmètre de la fibre neutre du même cylindre.

Paroi latérale



Fond circulaire

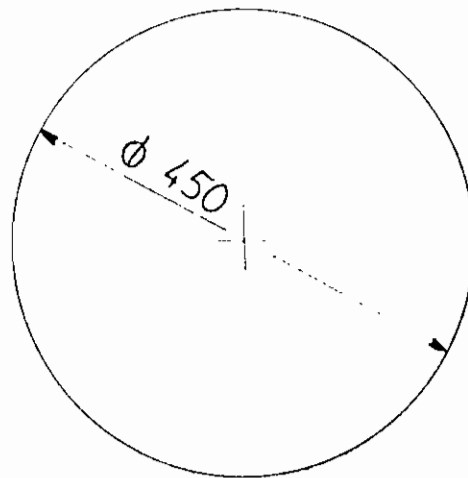
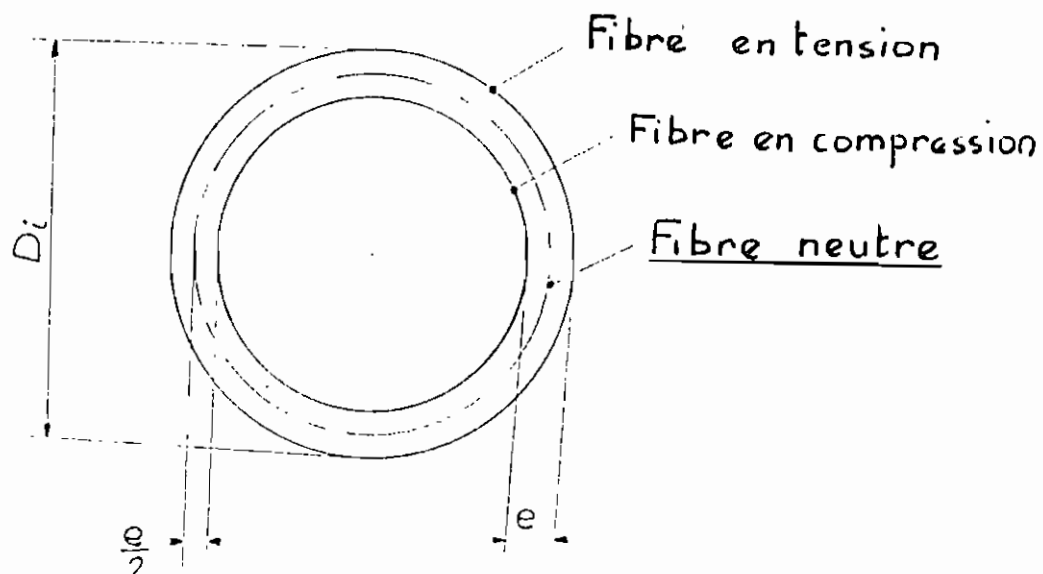


Fig. 311-2 Cylindre interne · dimensions  
à la découpe



Diamètre à la découpe du fond =  $D_i = \underline{450 \text{ mm}}$

Longueur de développement

$$= \pi \left( D_i - 2 \times \frac{e}{2} \right)$$

$$= \pi (D_i - e)$$

$$= \pi (450 - 1) = 1410,57 \text{ mm}$$

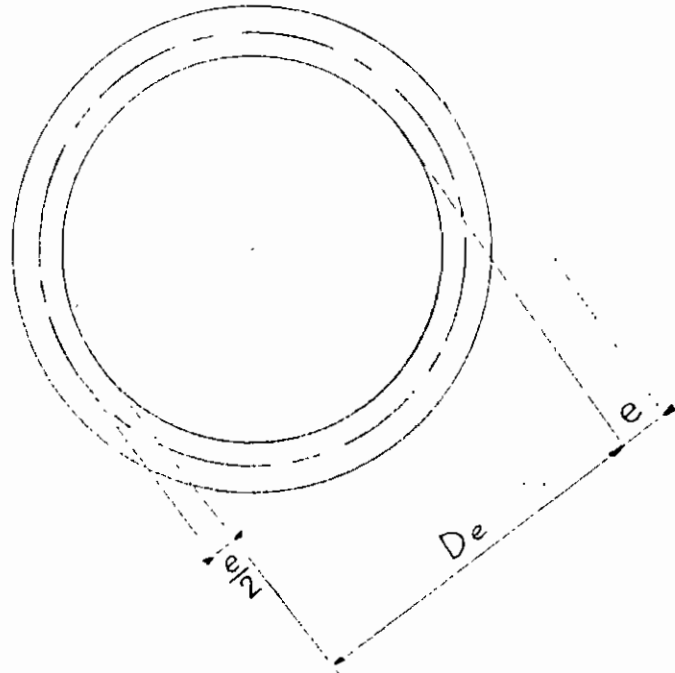
$$\text{ou } \underline{1411 \text{ mm}}$$

Remarque:

Dans le calcul ci-dessus, on ne considère pas la fibre en tension ni la fibre en compression parce que dans le premier cas le développement sera en excès et dans le second cas, il sera en défaut.

Dans les 2 cas il ne coïncidera pas au cercle de base, une fois le formage cylindrique effectué.

### 3.1.2 Cylindre externe



Longueur du développement

$$= \pi \left( D_e + 2 \times \frac{e}{2} \right)$$

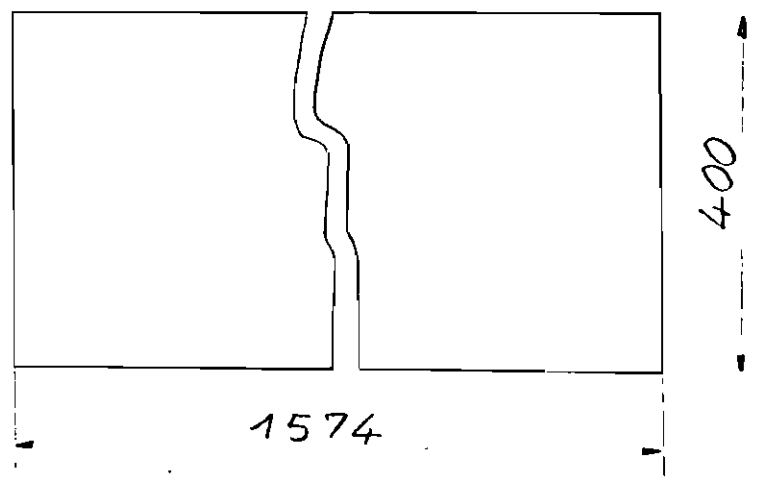
$$= \pi (D_e + e)$$

$$= \pi (500 + 1) = 1573,94 \text{ mm}$$

$$\text{ou } \underline{1574 \text{ mm}}$$

Le fond circulaire correspond à un diamètre à la découpe de  $D_e + 2e$  ou égal à 502 mm

Paroi laterale



Fond circulaire

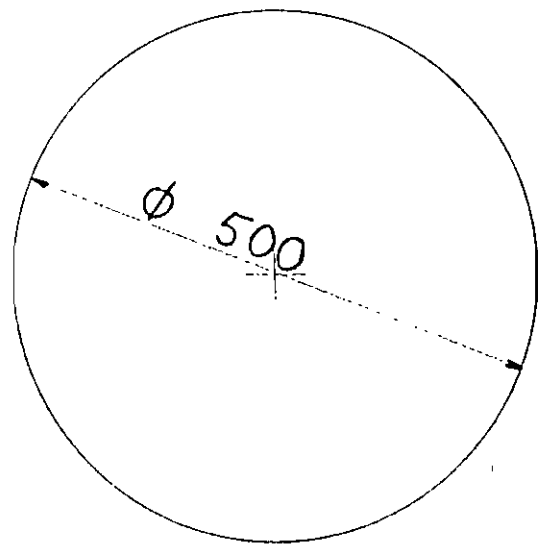


Fig 312-2

Cylindre externe :

Dimensions à la découpe

### 3.2 Coupage, formage et soudage

Après le traçage sur les feuilles (tôles) d'acier, on procède à un coupage aux dimensions calculées, après une première phase de dégrossissage. La rigidité de l'acier ne permettant pas un formage aisé à la main (comme pour le réflecteur), on a eu recours aux machines du D.N. de Thiès. On termine par une opération de soudage au chalumeau oxy-acétylénique, en fermant les parois latérales et en y apposant les fonds circulaires.

## 4. Construction des supports en bois

les figures peuvent se passer de commentaires.

### 4.1 Support du verre et du réflecteur

Voir fig 312-1

### 4.2 Support des 2 cylindres

Voir fig 41.2



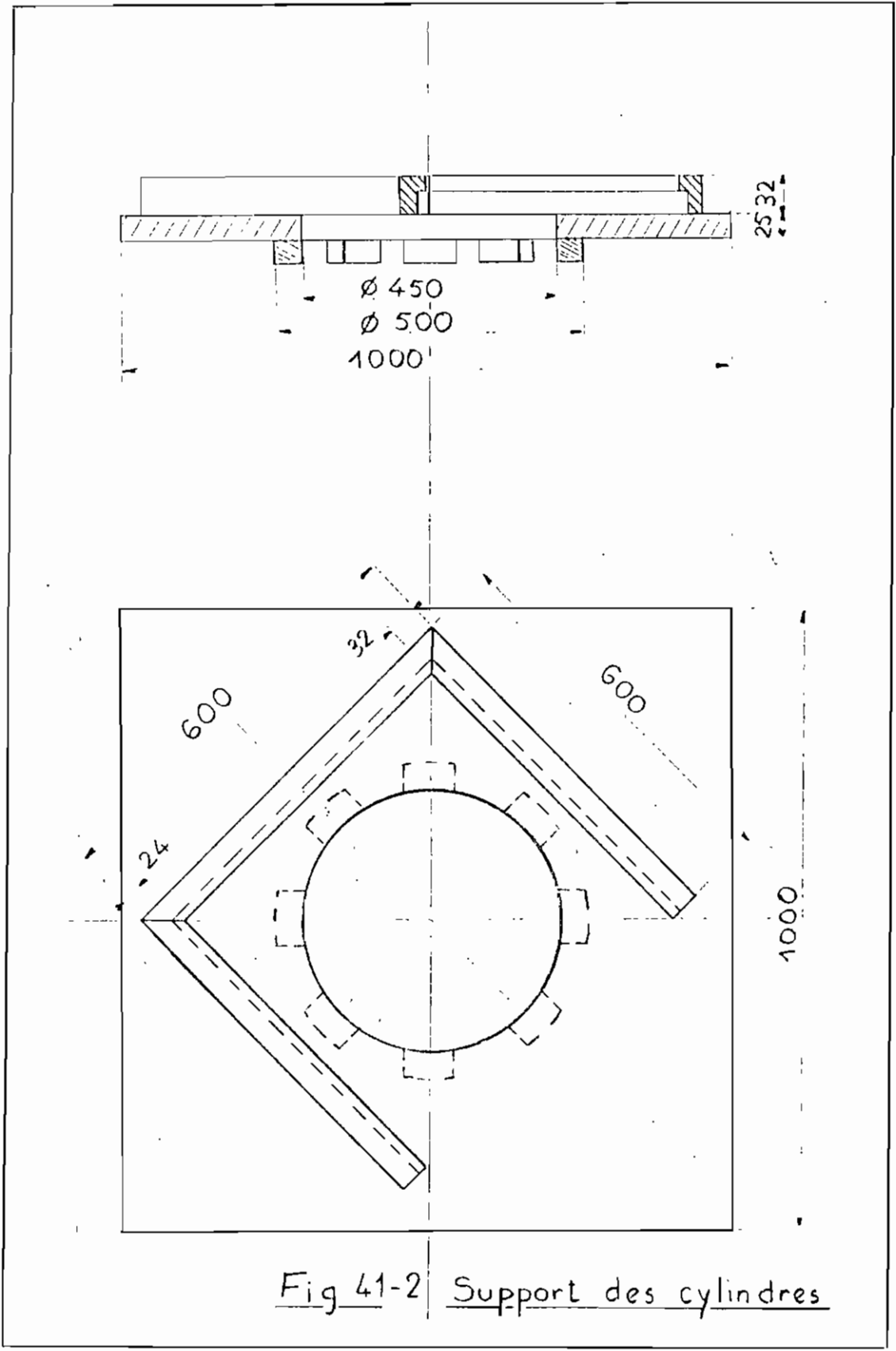


Fig 41-2 Support des cylindres

## 5. Expérimentation du cuiseur

Dans cette partie, notre objectif est d'expérimenter le cuiseur sur la préparation de certains aliments de consommation courante chez les Sénégalais, en même temps que d'évaluer ses performances.

Notre choix se porte sur la cuisson de riz (à l'eau et à l'huile), de viande, de poisson, de légumes, d'œufs et de pain.

Des contraintes indépendantes de notre volonté (conditions atmosphériques insatisfaisantes et surtout l'avènement de cours accélérés et intensifs) n'ont pas favorisé cette planification. Néanmoins nous avons pu faire trois expériences portant sur le riz à l'eau, le riz à l'huile et la viande dont les résultats sont compilés dans les pages qui suivent.

## 5.1. Expérience du 19 Avril

### Riz à l'eau

Quantité de riz 300 grammes

Quantité d'eau 1000 ml (27°C)

Conditions atmosphériques :

- Ciel clair et dégagé
- Vent relativement fort

10<sup>h</sup> 55 mn - Début de préchauffage : le lit de gravier est à 30°C

12<sup>h</sup> 45 mn - Fin de préchauffage : le lit de gravier est à 120°C

On introduit la marmite contenant l'eau

14<sup>h</sup> 00 mn - On ajoute le riz

14<sup>h</sup> 45 mn - On retourne le riz, il est à moitié cuit

15<sup>h</sup> 30 mn - Le riz est cuit

d'eau

La quantité d'eau était trop grande comparativement à celle du riz. On a obtenu une bouillie.

## Tableau des mesures

Préchauffage : Début 10<sup>h</sup> 55 mn

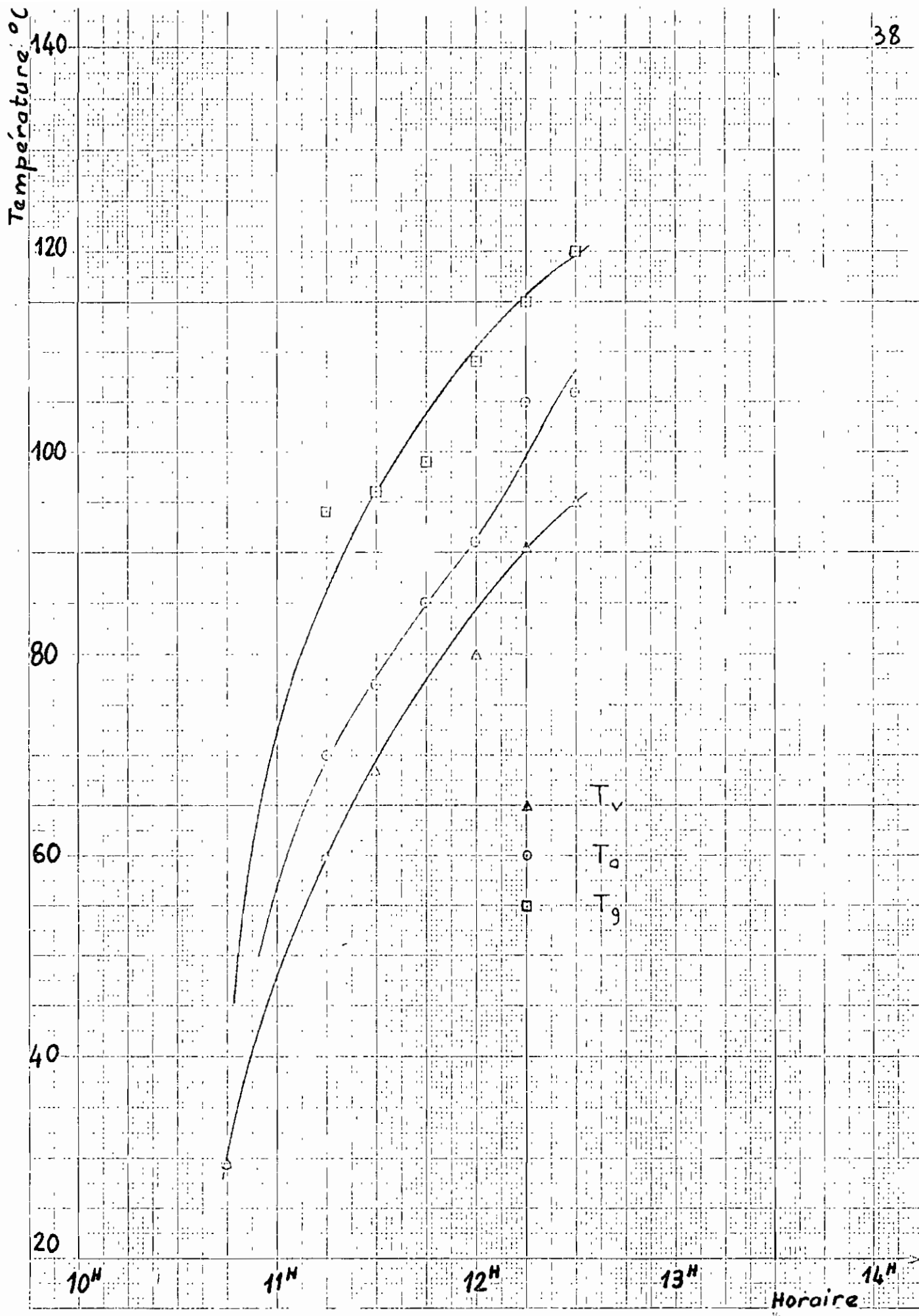
$T_v$  : température du verre

$T_a$  : température de l'air confiné

$T_g$  : température du gravier

| Horuire               | $T_v$ | $T_a$ | $T_g$ |
|-----------------------|-------|-------|-------|
| 11 <sup>h</sup> 15 mn | 60    | 70    | 94    |
| 11 <sup>h</sup> 30 mn | 67    | 77    | 96    |
| 11 <sup>h</sup> 45 mn | 70    | 85    | 99    |
| 12 <sup>h</sup> 00 mn | 80    | 91    | 109   |
| 12 <sup>h</sup> 15 mn | 91    | 105   | 115   |
| 12 <sup>h</sup> 45 mn | 95    | 106   | 120   |

Les températures sont en degrés Celsius



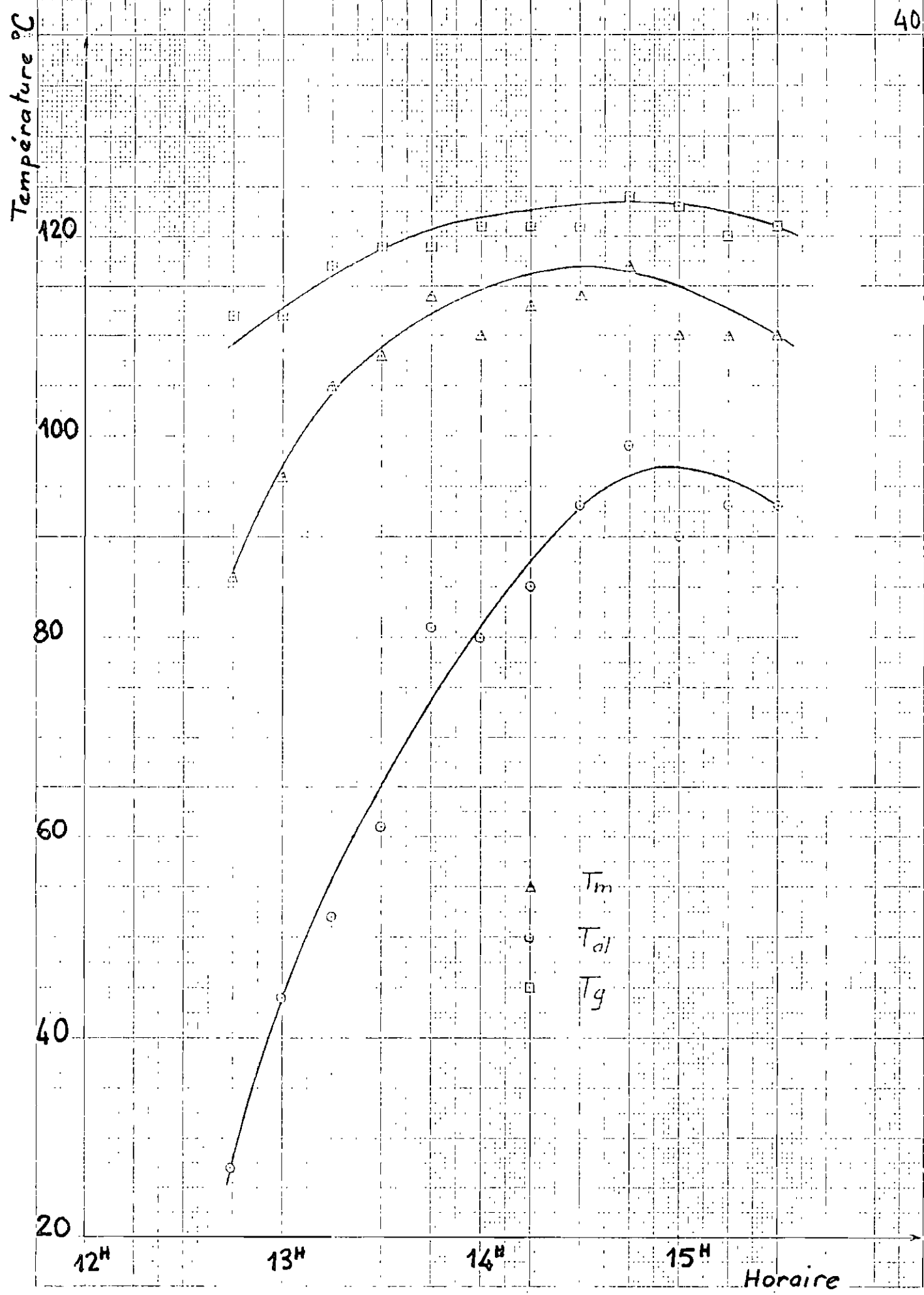
Cuisson : Début 12<sup>h</sup> 45mn

$T_m$  : température de la marmite

$T_{al}$  : température de l'aliment

$T_g$  : " " gravier

| Horaire              | $T_m$ | $T_{al}$ | $T_g$ |
|----------------------|-------|----------|-------|
| 12 <sup>h</sup> 45mn | 86    | 97       | 112   |
| 13 <sup>h</sup> 00   | 96    | 44       | 112   |
| 13 <sup>h</sup> 15   | 105   | 52       | 117   |
| 13 <sup>h</sup> 30   | 108   | 61       | 119   |
| 13 <sup>h</sup> 45   | 114   | 81       | 119   |
| 14 <sup>h</sup> 00   | 110   | 80       | 121   |
| 14 <sup>h</sup> 15   | 113   | 85       | 121   |
| 14 <sup>h</sup> 30   | 114   | 93       | 121   |
| 14 <sup>h</sup> 45   | 117   | 99       | 124   |
| 15 <sup>h</sup> 00   | 110   | 90       | 123   |
| 15 <sup>h</sup> 15   | 110   | 93       | 120   |
| 15 <sup>h</sup> 30   | 110   | 93       | 121   |



## 5.2 - Expérience du 22 Avril

### Riz à l'huile

|                  |             |
|------------------|-------------|
| Quantité de riz  | 250 grammes |
| Quantité d'huile | 150 ml      |
| Quantité d'eau   | 500 ml      |

Conditions atmosphériques :

- Ciel clair et dégagé
- Vent très fort

10<sup>h</sup> 15 mn . Début de préchauffage : la température du lit de gravier est 29°C

10<sup>h</sup> 00 mn . Fin de préchauffage : le lit de gravier atteint une température de 123°C.

On introduit la marmite contenant l'huile

12<sup>h</sup> 15 mn . On ajoute l'eau .

13<sup>h</sup> 20 mn . On ajoute le riz .

14<sup>h</sup> 35 mn . Le riz est cuit .

Une séance de thé a été parallèlement servie . Elle a commencé à 13<sup>h</sup> 20 mn et les trois services ont duré jusqu'à 14<sup>h</sup> 50 mn .



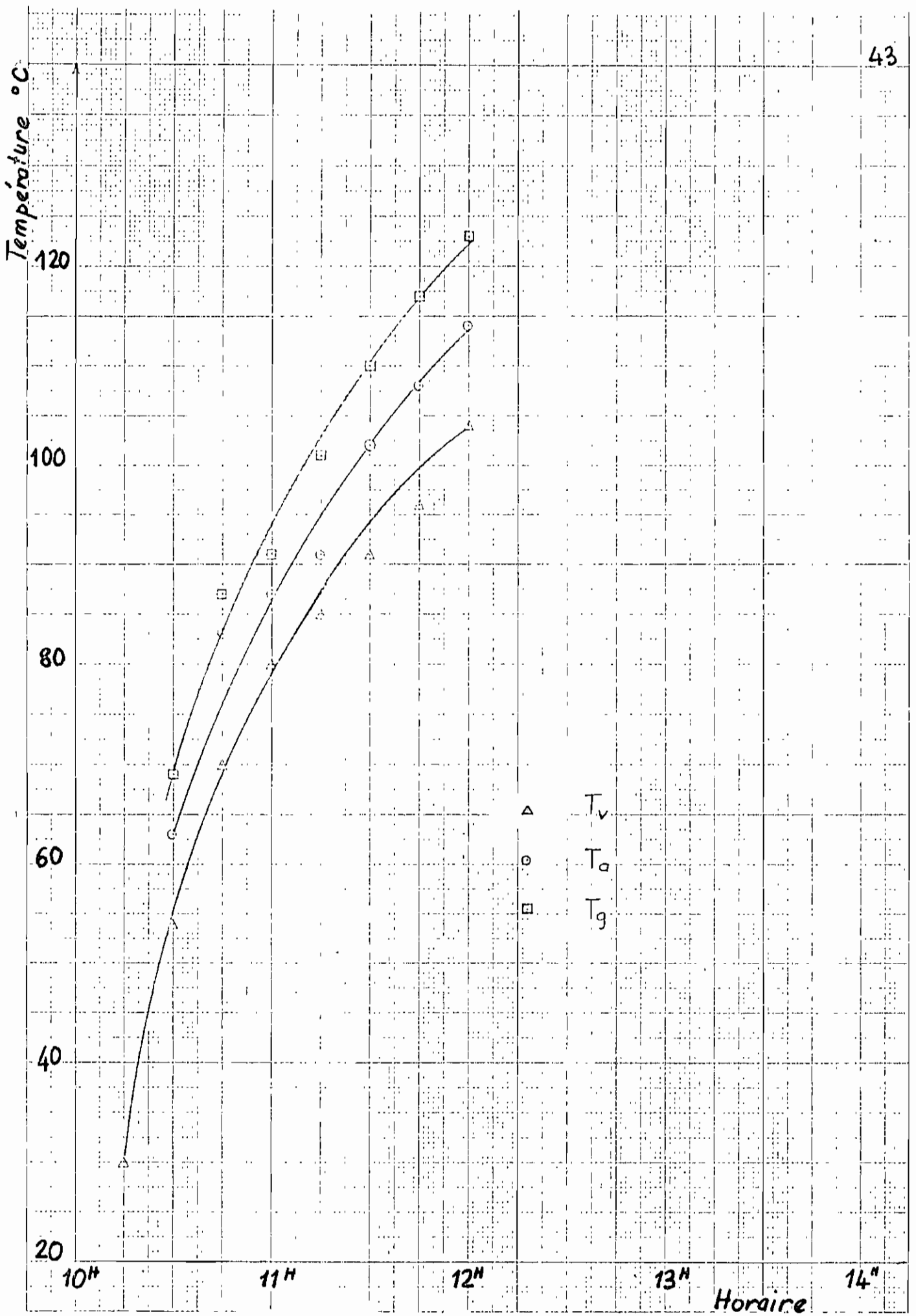
## Tableau des mesures

Préchauffage :

Début 10<sup>h</sup> 15mn

| Horaire              | T <sub>v</sub> | T <sub>a</sub> | T <sub>g</sub> | I    |
|----------------------|----------------|----------------|----------------|------|
| 10 <sup>h</sup> 30mn | 54             | 63             | 69             | 1010 |
| 10 <sup>h</sup> 45   | 70             | 83             | 87             | 1000 |
| 11 <sup>h</sup> 00   | 80             | 87             | 91             | 1040 |
| 11 <sup>h</sup> 15   | 85             | 91             | 101            | 1050 |
| 11 <sup>h</sup> 30   | 91             | 102            | 110            | 1060 |
| 11 <sup>h</sup> 45   | 96             | 108            | 117            | 1080 |
| 12 <sup>h</sup> 00   | 104            | 114            | 123            | 1080 |

I : intensité du rayonnement mesurée  
par un solarimètre en  $W/m^2$



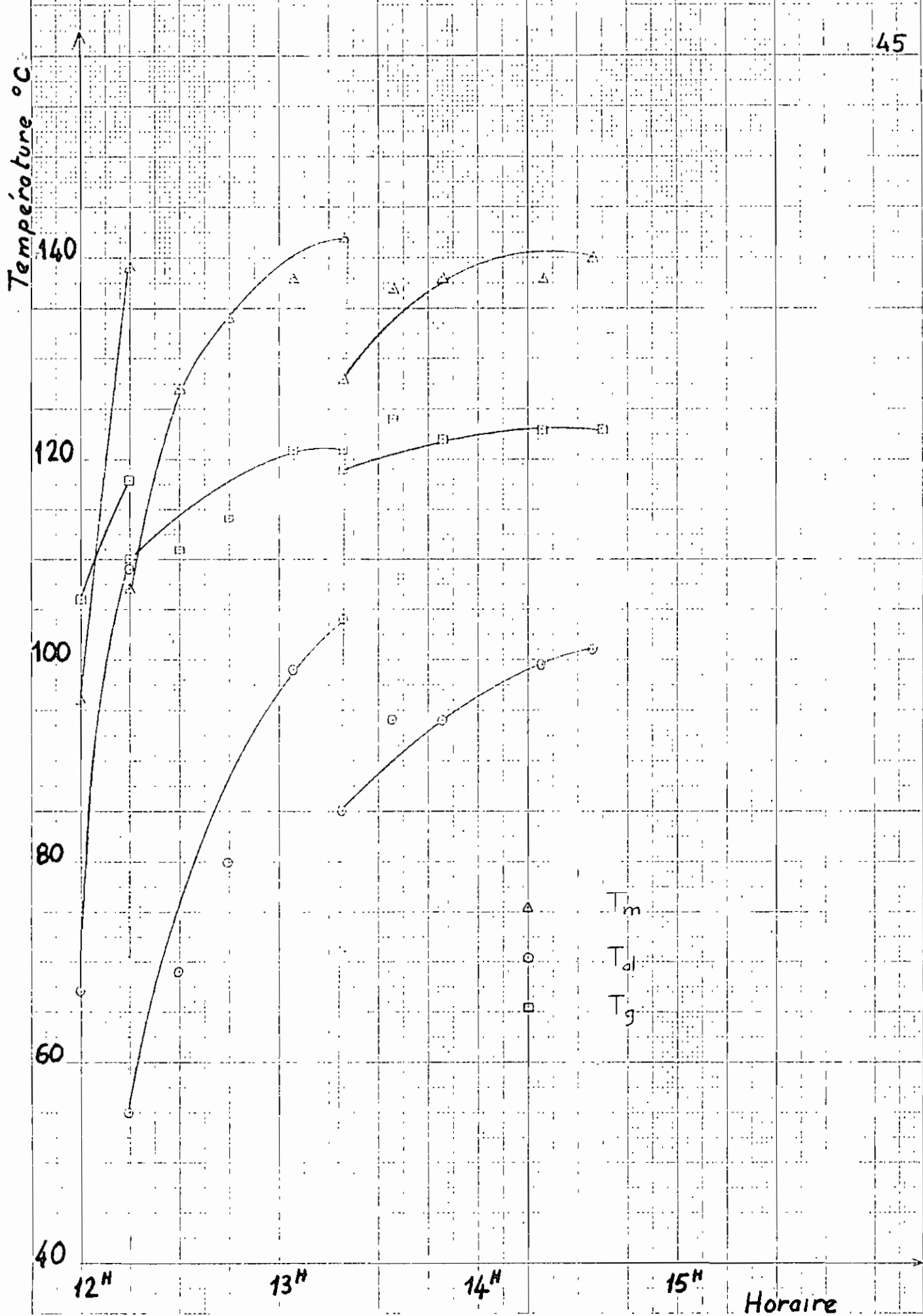
## Cuisson

Début 12<sup>h</sup> 00 mn

| Horaires              | T <sub>m</sub> | T <sub>al</sub> | T <sub>g</sub> | I    |
|-----------------------|----------------|-----------------|----------------|------|
| 12 <sup>h</sup> 00 mn | 96             | 67              | 106            | 1080 |
| 12 <sup>h</sup> 15    | 139            | 109             | 118            | 1080 |
| 12 <sup>h</sup> 15 *  | 107            | 55              | 110            | 1080 |
| 12 <sup>h</sup> 30    | 127            | 69              | 111            | 1080 |
| 12 <sup>h</sup> 45    | 134            | 80              | 114            | 1080 |
| 13 <sup>h</sup> 05    | 138            | 99              | 121            | 1070 |
| 13 <sup>h</sup> 20    | 142            | 104             | 121            | 1070 |
| 13 <sup>h</sup> 20 ** | <del>128</del> | 85              | 119            | 1070 |
| 13 <sup>h</sup> 40    | 137            | 94              | 124            | 1070 |
| 13 <sup>h</sup> 55    | 138            | 94              | 122            | 1070 |
| 14 <sup>h</sup> 20    | 138            | 99              | 123            | 1040 |
| 14 <sup>h</sup> 35    | 140            | 101             | 123            | 1020 |

\* l'eau est ajoutée

\*\* le riz est ajouté



### 5.3-Expérience du 23 Avril

#### Rôti de Viande

Quantité de viande            600 grammes  
 Quantite de l'huile            80 ml  
 Autres ingrédients : sel , oignon , etc...

Conditions atmosphériques:

- Ciel clair et dégagé
- Vent très fort

10<sup>h</sup> 55mn . Début de préchauffage

12<sup>h</sup> 55mn . Fin de préchauffage : le lit de gravier atteint une température de 132°C.

On introduit la marmite contenant la viande l'huile et les ingrédients.

14<sup>h</sup> 55mn . La viande est rôtie

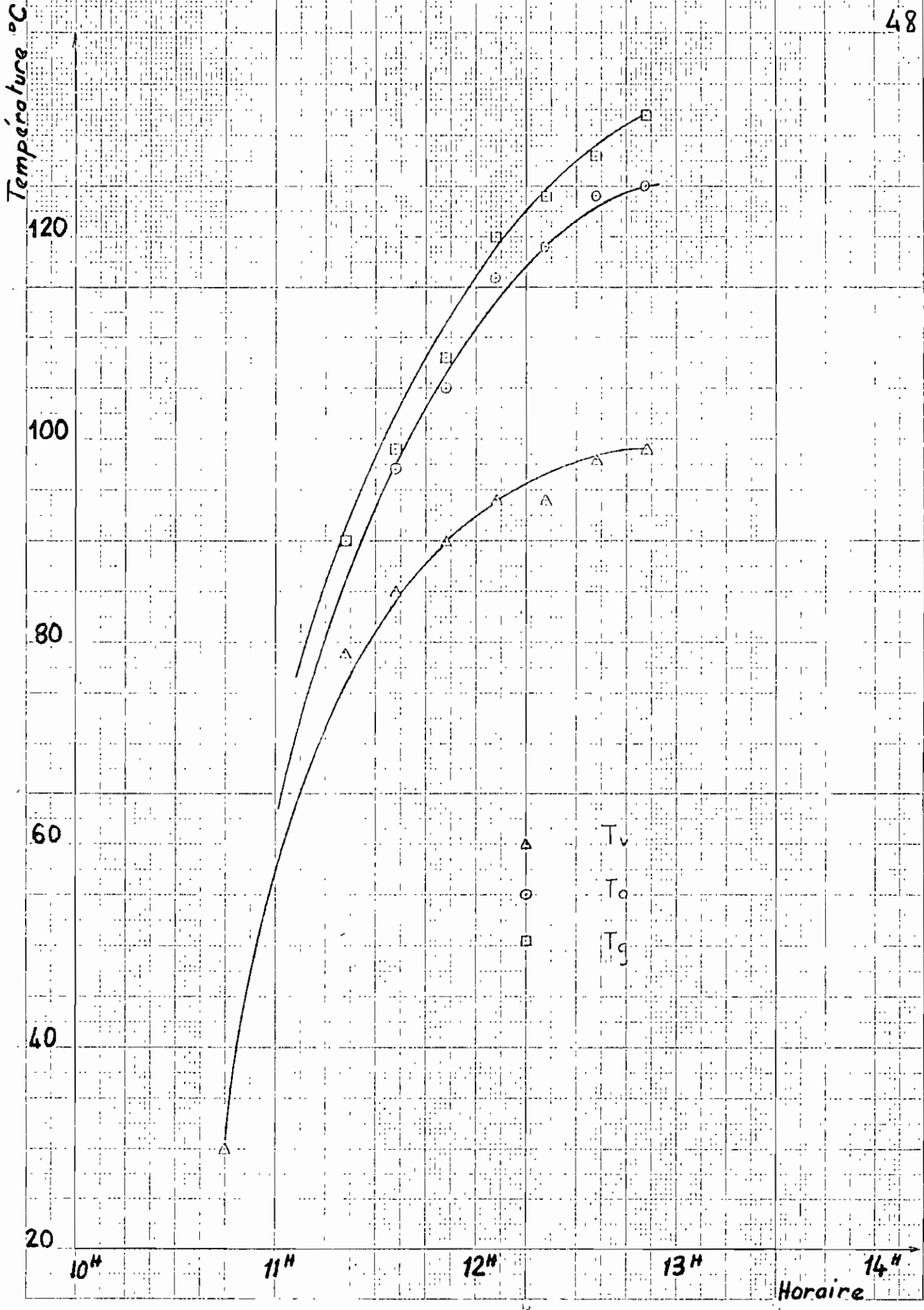
N.B. Température du lit de gravier au début du préchauffage = 30°C

## Tableau des mesures

### Préchauffage

Début : 10<sup>h</sup> 55 mn

| Horaire               | T <sub>v</sub> | T <sub>a</sub> | T <sub>g</sub> | I    |
|-----------------------|----------------|----------------|----------------|------|
| 11 <sup>h</sup> 20 mn | 79             | 90             | 90             | 950  |
| 11 <sup>h</sup> 35    | 85             | 97             | 99             | 940  |
| 11 <sup>h</sup> 55    | 90             | 105            | 108            | 960  |
| 12 <sup>h</sup> 10    | 94             | 116            | 120            | 960  |
| 12 <sup>h</sup> 25    | 94             | 119            | 124            | 990  |
| 12 <sup>h</sup> 40    | 98             | 124            | 128            | 990  |
| 12 <sup>h</sup> 55    | 99             | 125            | 132            | 1000 |



Cuisson :

Début 12<sup>h</sup> 55 mn

| Horaire               | T <sub>m</sub> | T <sub>a1</sub> | T <sub>g</sub> | I    |
|-----------------------|----------------|-----------------|----------------|------|
| 13 <sup>h</sup> 00 mn | 82             | 30              | 104            | 1010 |
| 13 <sup>h</sup> 10    | 125            | 51              | 103            | 1010 |
| 13 <sup>h</sup> 25    | 128            | 61              | 101            | 1010 |
| 13 <sup>h</sup> 40    | 132            | 76              | 104            | 1020 |
| 13 <sup>h</sup> 55    | 130            | 83              | 108            | 940  |
| 14 <sup>h</sup> 10    | 128            | 93              | 110            | 940  |
| 14 <sup>h</sup> 25    | 125            | 98              | 111            | 920  |
| 14 <sup>h</sup> 40    | 126            | 101             | 114            | 910  |
| 14 <sup>h</sup> 55    | 131            | 103             | 116            | 1030 |



Température °C

140  
120  
100  
80  
60  
40  
20

12<sup>H</sup>

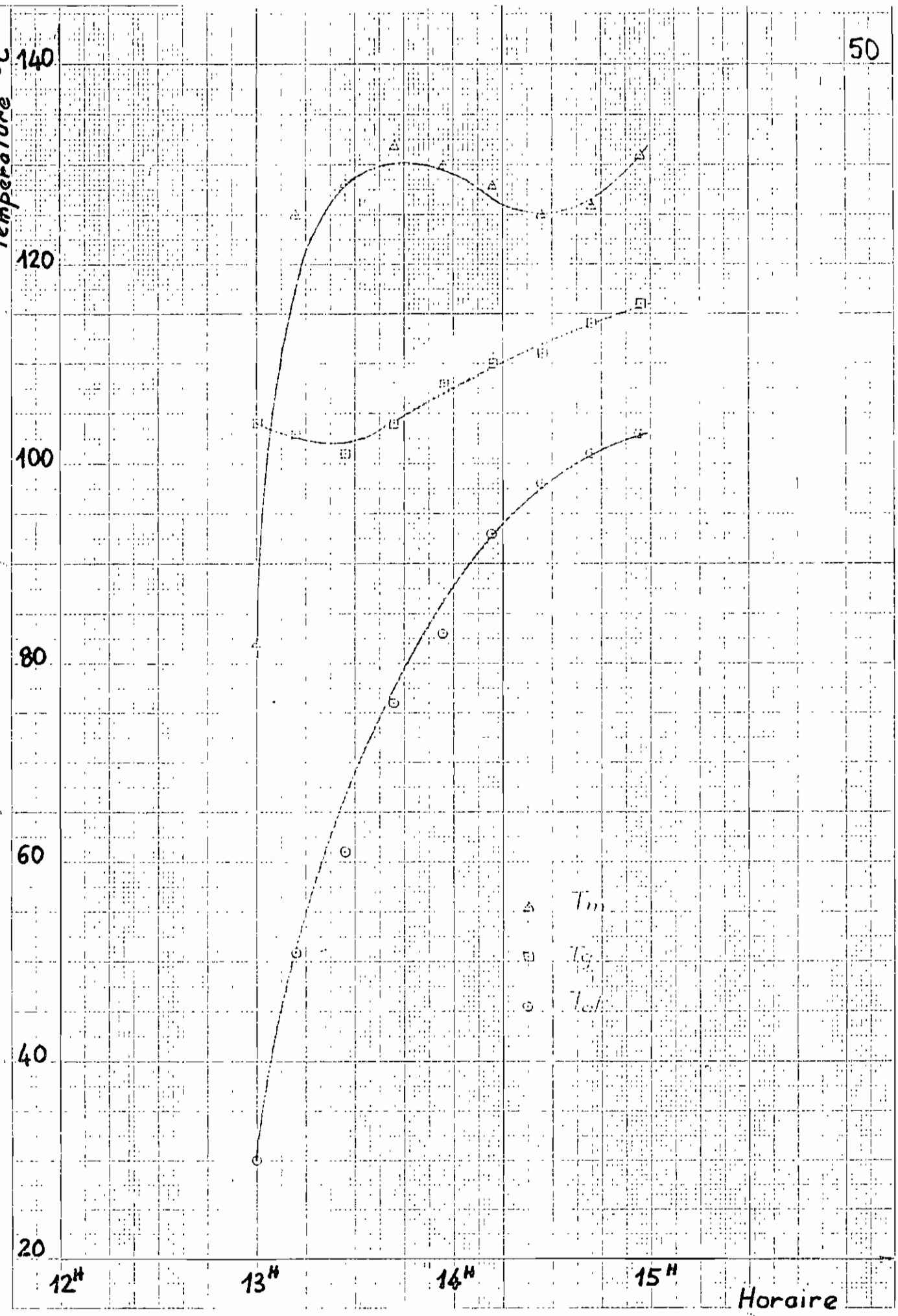
13<sup>H</sup>

14<sup>H</sup>

15<sup>H</sup>

Horaire

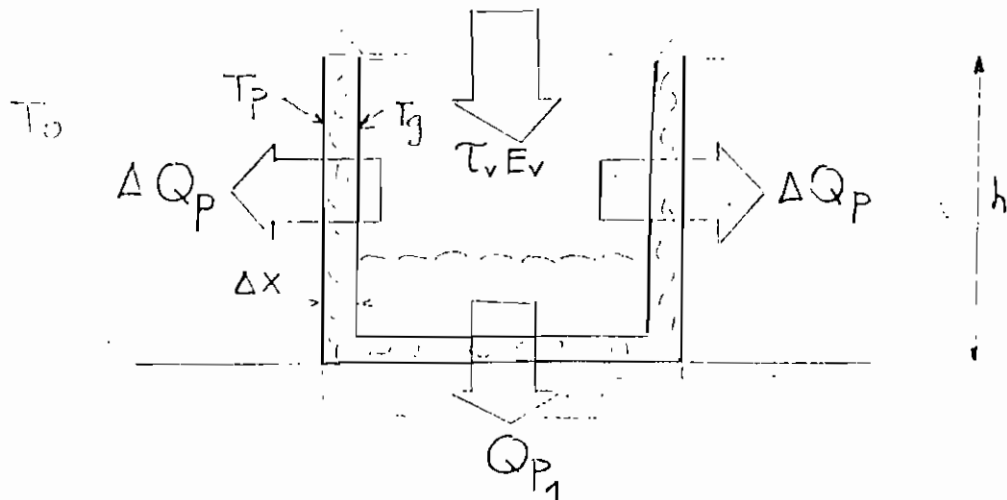
△ T<sub>m</sub>  
□ T<sub>g</sub>  
○ T<sub>ch</sub>



## 6 Calcul des pertes de chaleur et du rendement du cuiseur

Ces pertes seront calculées au niveau du cylindre externe.

$$Q_p = Q_{p_1} + Q_{p_2} + Q_{p_3}$$



$Q_p =$  perte totale  $\rightarrow$

$Q_{p_1} =$  perte par conduction

$Q_{p_2} =$  perte par rayonnement

$Q_{p_3} =$  " " convection forcée

### 6.1 Calcul de $Q_p$

#### 6.1.1 Calcul de $Q_{p_1}$

Pour toute fin pratique nous ne considérons que la conduction dans l'isolant. De par sa faible épaisseur (1mm) nous négligeons la

résistance thermique de la tôle d'acier

$$Q_{P_1} = \frac{-k A (-T_g + T_p)}{\Delta X}$$

$k$  = conductibilité thermique de la laine  
de verre entassée =  $0,064 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C}$   
(tirée de Kreith)

$$T_p = 40^\circ\text{C} \text{ (mesuré sur la paroi)}$$

$T_g$  = Température mesurée sur la paroi  
interne et le lit de gravier =  $120^\circ\text{C}$

$$A = \pi D_e h + \pi \frac{D_e^2}{4}$$

$$= \pi \times 0,5 \times 0,4 + \pi \frac{0,5^2}{4} = 0,825 \text{ m}^2$$

$$\Delta x = 0,025 \text{ m}$$

$$Q_{P_1} = \frac{-0,064 \times 0,825 \times (-120 + 40)}{0,025} = 114 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

### 6.1.2 Calcul de $Q_{P_2}$

$$Q_{P_2} = \varepsilon \sigma A_1 (T_p^4 - T_o^4)$$

$\varepsilon$  = facteur d'émission de la tôle  
=  $0,94$  (tirée de Kreith)

$$A_1 = \pi D_e h = \pi \times 0,5 \times 0,4 = 0,628 \text{ m}^2$$

$$Q_{P_2} = 0,94 \times 4,88 \times 10^{-8} \times 0,628 (313^4 - 302^4) = 34 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

6.1.3 Calcul de  $Q_{p3}$ 

$$Q_{p3} = h_p A_1 (T_p - T_o)$$

$h_p$  : coefficient d'échange de chaleur par convection forcée ( Détermination voir Appendice ) =  $10,75 \text{ kcal/hm}^2\text{°C}$

$$Q_{p3} = 10,75 \times 0,628 (323 - 303)$$

$$= 67,5 \text{ kcal/h.}$$

$$Q_p = 114 + 34 + 67,5 = \underline{\underline{215,5 \text{ kcal/h}}}$$

6.2 Calcul du rendement  $\eta$ 

Nous définirons par rendement du cuiseur le rapport de l'énergie accumulée ( $\tau_v E - Q_p$ ) sur l'énergie totale qui traverse le vitre  $\tau_v E_v$

$$E_v = 295,4 \text{ kcal/h}$$

$$\tau_v = 0,87$$

$$\eta = \frac{\tau_v E_v - Q_p}{\tau_v E_v}$$

$$\eta = \frac{295,4 \times 0,87 - 215,5}{295,4} = 0,27$$

$$\underline{\underline{\eta = 27\%}}$$

## 7. Estimation du coût de revient

### 7.1 Données sur les matériaux utilisés.

| Matériaux                | Dimensions standard (m) | Surface brute (m <sup>2</sup> ) | Prix* (FCFA) |
|--------------------------|-------------------------|---------------------------------|--------------|
| Bois contreplaqué (20mm) | 2,5 x 1,4               | 3,50                            | 10 500       |
| Verre double             | 1,70 x 0,81             | 1,38                            | 7 500        |
| Tôle d'acier 10/10       | 1,5 x 1,0               | 1,50                            | 4 865        |
| Tôle d'al. poli 8/10     | 2,0 x 1,0               | 2,00                            | 10 425       |

\* Ces prix sont très instables, cependant ils correspondent aux cours actuels.

## 7.2 Calcul

Nous convenons de le baser sur la surface de matériaux effectivement employée.

### 7.2.1 Contreplaqué

- Surface utilisée

$$S_1 = 1 \times 1 + 0,6 \times 0,6 = 1,36 \text{ m}^2$$

- Coût

$$C_1 = 10500 \times \frac{1,36}{3,50} = 4080 \text{ FCFA}$$

### 7.2.2 Verre

- Surface utilisée

$$S_2 = 0,502 \times 0,502 = 0,27 \text{ m}^2$$

- Coût

$$C_2 = 7500 \times \frac{0,27}{1,38} = 1273 \text{ FCFA}$$

### 7.2.3 Tôles d'acier

- Surface utilisée

$$S_3 = 2 \times 1,5 \times 1 = 3 \text{ m}^2$$

- Coût

$$C_3 = 4865 \times \frac{3}{1,5} = 9730 \text{ FCFA}$$

### 7.3.4 Tôle d'aluminium

- Surface utilisée

$$S_4 = 2 \times 1 = 2 \text{ m}^2$$

- Coût

$$C_4 = 10425 \times \frac{2}{2} = 10425 \text{ FCFA}$$

### Coût total des matériaux

$$\begin{aligned} C_T &= C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \\ &= 4080 + 1273 + 9730 + 10425 \end{aligned}$$

$$C_T = 25708 \text{ F CFA}$$

Ce coût ne comprend pas la main d'œuvre et celui du tout petit matériel (clous, vis, rivets, etc...). Nous n'avons pas non plus inclus le coût de la laine de verre par man. que de donnée la dessus.

Compte tenu approximativement de tout cela nous estimerons le prix de revient à 35 000 F CFA.

|  |
|--|
| Coût de revient = 35000 <sup>F</sup> CFA |
|--|

## DISCUSSIONS ET CONCLUSION



Comme nous l'avions prévu, les températures relevées sont très en dessous des résultats théoriques. D'autres éléments viennent s'ajouter aux raisons avancées plus haut pour expliquer plus profondément cet écart.

Des difficultés pratiques nous ont amené à utiliser un verre simple plutôt qu'un verre double, ce qui s'est répercuté sur les performances de l'effet de serre. De plus nous avons dû employer des gravillons de basalte (gris-noir) au lieu du gravier recouvert de peinture noire mate prévu dans le design. Cette substitution a inévitablement baissé le facteur d'absorption du lit de gravier. Un relevé de température sur la paroi externe du corps met en évidence des pertes de chaleur considérables, par conduction, par convection forcée et par rayonnement.

En ce qui concerne les expériences, elles ne sont pas statistiquement nombreuses et nous ne pouvons pas cataloguer, en prenant leurs espérances mathématiques, les

temps de cuisson des aliments. Cependant, sous la forme où ils sont compilés, ils nous donnent un ordre de grandeur.

Examinant de près le coût de revient évalué, nous sommes à même de penser que l'investissement sur un cuiseur du même type ne peut être que très rentable. Son temps de récupération est nécessairement court compte tenu de la tendance à une montée exorbitante du prix de l'énergie en général. L'aspect gratuit et disponible de l'énergie solaire annule ou réduit très considérablement les coûts d'exploitation du cuiseur. Sa vulgarisation, qui ne doit pas être négligée, est fonction de sa facilité d'acquisition, donc de son prix.

Dans la partie théorique, nous n'avons pas abordé un aspect qui concerne l'étude du régime transitoire d'accumulation de la chaleur par le gravier. Cette étude permettrait de prévoir l'évolution temporaire

de la température  $T_g$  au sein de la masse de gravier avant qu'elle n'atteigne la stabilité, -c'est à dire le regime stationnaire. L'intérêt fondamental de l'étude est qu'elle offrirait un moyen d'évaluation du temps optimal de préchauffage du cuiseur.

Une étude systématique d'un support orienteur pour suivre le mouvement solaire devrait aussi être menée. Ses qualités seront la maniabilité et l'adaptation facile au corps du cuiseur. Par exemple nous suggérons l'utilisation du suiveur solaire conçu et réalisé par notre collègue Ousmane Cissé en 1978 dans le cadre de son projet de fin d'études.

Globalement, cette étude ne peut prétendre d'être parfaite parcequ'elle requiert des éléments de retouche et de complétion, pour défalquer son caractère quelque peu sommaire.

Cependant si le lecteur est sensibilisé à tout ce que les Hommes peuvent tirer de l'Energie Solaire, de ses applications

nombreuses et variées en général, du cuis-  
seur solaire en particulier, notre étude  
aura atteint un de ses objectifs et non  
des moindres.

REFERENCES

## APPENDICE

### A.1 - Intensité du rayonnement solaire à Thiès

Les mesures qui ont permis d'estimer l'intensité moyenne du rayonnement solaire à Thiès ont été prises par Ousmane Cissé en Mars 1978. Cette période correspond à peu près à un des 2 moments (Equinoxes (21 Mars, 23 Sept.)) où le Soleil traverse l'équateur celeste. Sa déclinaison étant alors nulle, nous notons alors de grandes intensités de rayonnement. Notons que le ciel était clair et dégagé.

#### Mesures

| Horaires                  | 10 <sup>h</sup><br>00 | 10 <sup>h</sup><br>30mn | 11 <sup>h</sup><br>15mn | 12 <sup>h</sup><br>15mn | 13 <sup>h</sup><br>00 | 14 <sup>h</sup><br>15mn | 15 <sup>h</sup><br>00 |
|---------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| I<br>(W/cm <sup>2</sup> ) | 0,10                  | 0,10                    | 0,11                    | 0,11                    | 0,11                  | 0,11                    | 0,10                  |

Pour toute fin pratique nous sommes intéressés par la fourchette 10<sup>h</sup> - 15<sup>h</sup> mentionnée, où I varie entre 1000 W/m<sup>2</sup> et 1100 W/m<sup>2</sup>

Nous prendrons donc comme valeur de I, 1050  $\frac{W}{m^2}$  pour nos calculs théoriques.

## A-2 - Valeurs numériques des constantes

$$D_e = 500 \text{ mm}$$

$$D_i = 450 \text{ mm}$$

$$D_r = 900 \text{ mm}$$

$$d_r = 450 \text{ mm}$$

$$e = 1,2 \text{ mm}$$

$$h = 400 \text{ mm} , h' = 250 \text{ mm}$$

$$T_a = 27^\circ \text{C} \text{ ou } 300^\circ \text{K}$$

$$T_\infty \approx -50^\circ \text{C} \text{ ou } 223^\circ \text{K}$$

$$\alpha_r = 0,3 \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \leftarrow \text{Kreith}$$

$$f_r = 0,7$$

$$\alpha_v = 0,06$$

$$f_v = 0,07$$

$$\tau_v = 0,87$$

$$\epsilon_v = 0,90$$

$$\alpha_g = 0,90$$

$$\epsilon_g = 0,90$$

$$\sigma = 4,88 \times 10^{-8} \text{ kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$$

① tirées de "Chauffe-eau solaire" Cabriol, Pelisson et Roux.

### A-3 - Valeurs numériques des paramètres

$$A_g = 0,512 \text{ m}^2$$

$$A_v = 0,159 \text{ m}^2$$

$$E_v = 295,4 \text{ kcal/h}$$

$$J_{v-g} = 0,9 \quad (\epsilon_v)$$

$$h_u = 5,92 \text{ kcal/h.m}^2.\text{°C}$$

$$h_d = 3,395 \text{ kcal/h.m}^2.\text{°C}$$

$$h_g = 4,444 \text{ kcal/h.m}^2.\text{°C}$$

$$R_d = 900 \text{ mm}$$

$$r_d = 450 \text{ mm}$$

$$\theta = 60^\circ$$

$$\beta = 180^\circ$$

$$t = 15 \text{ mm}$$



### A-4 - Calcul de certains paramètres

$$- A_v = \frac{\pi D_i^2}{4} = \frac{\pi \times 0,45^2}{4} = 0,159 \text{ m}^2$$

$$- A_g = \frac{\pi D_i^2}{4} + \pi D_i h' = \frac{\pi \times 0,45^2}{4} + \pi \times 0,45 \times 0,25$$

$$= 0,512 \text{ m}^2$$

- Coefficient  $h_u$

Formule (5), page B 94-4, Techniques de l'ingénieur

$$h_u = 2,44 (T_v - T_o)^{1/4} \text{ w/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$= 2,44 \times \frac{3600}{4180} (T_v - T_o)^{1/4} \text{ kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Prenons pour valeurs approximatives

$$\frac{1}{2} \quad T_a = 180^\circ\text{C}, \quad T_v = 90^\circ\text{C}$$

$$T_g = 200^\circ\text{C}, \quad T_\theta = 27^\circ\text{C}$$

$$h_u = 2,44 \times \frac{3600}{4180} \times (63)^{0,25}$$

$$h_u = 5,92 \text{ kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Coefficient  $h_d$   
formule ⑥, même référence

$$\begin{aligned}
 h_d &= 1,28 \times \frac{3600}{4180} \times (T_a - T_v)^{0,25} \frac{\text{kcal}}{\text{h.m}^2.\text{°C}} \\
 &= 1,28 \times \frac{3600}{4180} (90)^{0,25} \\
 &= 3,395 \quad \text{kcal/h.m}^2.\text{°C}
 \end{aligned}$$

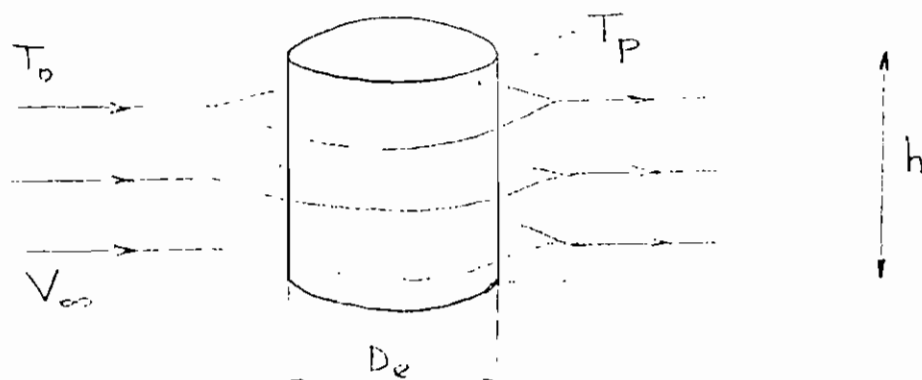
- Coefficient  $h_g$   
formule ⑤

$$\begin{aligned}
 h_g &= 2,44 \times \frac{3600}{4180} (T_g - T_a)^{0,25} \\
 &= 2,44 \times \frac{3600}{4180} (20)^{0,25} \\
 &= 4,444 \quad \text{kcal/h.m}^2.\text{°C}
 \end{aligned}$$

$$- E_v = 343 \times \frac{3600}{4180} = 295,4 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

- Coefficient  $h_p$  (paroi externe)

Convection forcée autour d'un cylindre



Vitesse max. du vent à Thiès  $\approx 4 \frac{m}{s}$

On prend  $V_\infty = 4 \text{ m/s}$  = vitesse du vent

$T_p = 40^\circ\text{C}$  (mesurée pratiquement)

$$T_f = \frac{T_p + T_0}{2} = \frac{40 + 30}{2} = 35^\circ\text{C}$$

$T_f$  est la température du film d'air ou couche limite entourant le cylindre.

Données de l'air\* à  $30^\circ\text{C}$  (ou  $35^\circ\text{C}$ )

$$\rho = 1,150 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 1,90 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$$

$$Pr = \text{Nombre de Prandtl} = 0,72$$

$$C_p = 0,240 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$$

Calcul du Nombre de Reynolds

$$Re = \frac{\rho V_\infty D_e}{\mu}$$

$$Re = \frac{1,15 \times 4 \times 0,5}{1,9 \times 10^{-5}} = 121129$$

Table 13.3.1 (Transport Phenomena)

$\Rightarrow$

$$J_H = 0,0022$$

$$\text{or } J_H = \frac{h_p}{\rho C_p v_\infty} (Pr)^{2/3}$$

D'où on tire le coefficient  $h_p$

$$h_p = \frac{J_H \rho C_p v_\infty}{(Pr)^{2/3}}$$

$$= \frac{0,0022 \times 1,15 \times 0,24 \times 4}{(0,72)^2}$$

$$= 0,00298 \text{ kcal/s.m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\underline{h_p = 10,75 \text{ kcal/h.m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

\* tirées de Kreith.

## BIBLIOGRAPHIE

- F. KREITH    Transmission de la chaleur  
et Thermodynamique  
Masson et Cie Editeurs , 1967
  
- J. CABIROL , A. PELISSOU , D. ROUX  
    Le chauffe-eau solaire  
Edisud    Aix-en-Provence    1976
  
- J.A. DUFFIE , W.A. BECKMAN  
    Solar Energy thermal processes  
John Wiley & Sons    Edition    1974
  
- Congrès International de Physique Nucléaire  
    Paris , 2-8 Juillet    1974
  
- Planification habitat information , Juin 1975  
    La cuisinière solaire type "Calebasse" , BCEOM  
    p. 88
  
- O. CISSE , Conception et réalisation d'un  
suiveur solaire , E.P.T    Juin 1978