

REPUBLIQUE DU SENEGAL  
ECOLE POLYTECHNIQUE DE THIES  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTROMECHANIQUE

Gm. 0163

*PROJET DE FIN D'ETUDES*

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR DE CONCEPTION

TITRE: CONCEPTION D'UN FOUR SOLAIRE DOMESTIQUE  
POUR LA CUISINE ET LE CHAUFFAGE

AUTEUR: DAKPOGAN Mahusi Eric

DIRECTEURS DE PROJET: **M. Serigne DIOP**  
PROFESSEUR à L'E.P.T.  
**M. Maurice DUVAL**  
PROFESSEUR à L'E.P.T.

A toutes les personnes à qui je  
pense, et à travers elles, à LA PERSONNE à  
qui je me dois de penser par dessus toute  
chose.

**REMERCIEMENTS.**

Toute situation naît de la convergence d'une suite de circonstances perçues différemment comme étant plus heureuses les unes que les autres, mais dont la régularité exclut de notre part tout ressentiment .

Aussi tiens-je à remercier toutes les personnes qui, volontairement, m'ont poussé à progresser dans ma voie, et qu'une seule page ne suffirait pas à nommer; ainsi que ceux qui y ont contribué involontairement.

Je remercie particulièrement, Monsieur Sérigne DIOP , qui a été mon directeur de projet, et qui m'a impressionné par son détachement; ainsi que Monsieur Maurice DUVAL qui lui aussi a été mon directeur dans ce projet.

**TABLE DES MATIERES.**

Remerciements .....	1
Introduction .....	2
Généralités sur les fours solaires.....	4
Présentation de la démarche suivie.....	5
Enquête sur les besoins énergétiques domestiques.....	6
Liste des symboles utilisés .....	8
<b>Première partie : ETUDE THEORIQUE .....</b>	<b>9</b>
I - Le concentrateur .....	10
1. Choix du type de concentration .....	10
2. Choix de la configuration .....	12
3. Etude théorique .....	14
II - Le dispositif de stockage .....	19
1. Choix du type de stockage .....	19
2. Choix des matériaux .....	20
3. Utilisation pour la cuisine .....	21
4. Utilisation pour le chauffage .....	21
5. Structure du dispositif de stockage .....	21
<b>Deuxième partie : DIMENSIONNEMENT .....</b>	<b>24</b>
1 - Résultats de l'enquête .....	25
2 - Etude des courbes d'éclairement.....	27
3 - Dimensionnement du concentrateur .....	29
1. Dimensionnement des paraboles .....	29
2. Dimensionnement du focalisateur.....	32

4 - Etude dynamique .....	34
- Etude du support .....	36
- Résistance mécanique du support .....	36
- Etude du mouvement .....	39
5 - Dimensionnement du mécanisme de suivi du soleil ....	41
1. Etude .....	41
2. Calculs .....	47
6 - Dimensionnement du dispositif de stockage .....	50
7 - Etude en régime transitoire .....	55
8 - Calcul du circuit d'eau chaude .....	51
9 - Etude de l'installation expérimentale .....	61
10 - Vue d'ensemble de l'installation .....	64
Conclusion.....	66
Références .....	68

### INTRODUCTION.

Face aux problèmes économiques et écologiques nés de l'exploitation des ressources énergétiques naturelles, aujourd'hui appelée gaspillage à cause des rendements relativement faibles de leurs utilisations, tous les yeux se tournent vers les Energies 'Nouvelles'. Cette dénomination est une adaptation très réaliste du terme Energies Renouvelables, parce que tenant compte du caractère relatif du renouvellement de certaines d'entre elles.

Au delà de son aspect merveilleux, dû au caractère apparemment gratuit de ces énergies, leur exploitation est une nécessité vitale pour nos pays qui sont confrontés à la desheritification et à des problèmes économiques majeurs à la base.

On pourrait se demander si notre gaspillage n'a pas été plus grand de laisser s'échapper toute cette énergie disponible à profusion dans nos pays. Mais l'excuse est là toute prête : les coûts relativement élevés de leur exploitation et la mise en oeuvre qui bien souvent constituent un frein à leur vulgarisation.

Or leur utilisation pour la satisfaction des besoins énergétiques à la base est le seul moyen de préserver nos forêts, qui jusqu'à un passé récent ont constitué la seule ressource énergétique de nos populations. Dans nos pays où le froid n'est ni permanent, ni sévère, les besoins énergétiques sont très modestes et se réduisent principalement à la cuisine, au chauffage occasionnel de l'eau chaude sanitaire et à l'éclairage des locaux. Ces besoins ne demandent pas une très grande puissance, mais des températures élevées.

Dans l'industrie un problème analogue s'est posé lorsqu'il s'est agi de traiter les métaux rares et les matériaux réfractaires, qui exigeaient de plus une atmosphère exempte de toute impureté. On s'est alors tourné vers les fours solaires qui permirent d'atteindre des températures de l'ordre de 3500 °Celcius.

Par une démarche analogue, nous allons dans les pages suivantes procéder à l'étude et à la réalisation d'un four solaire domestique devant permettre la satisfaction des besoins énergétiques de base ci-dessus cités, aussi bien dans les villes que dans les campagnes.

### GENERALITES SUR LES FOURS SOLAIRES.

Les fours solaires sont une application directe des lois du transfert de chaleur par rayonnement, principalement de la loi de Stephan - Boltzmann, qui stipule que la densité de flux émise ou reçue par un corps est proportionnelle à la 4e puissance de sa température.

Certains traitements des matériaux, notamment les matériaux réfractaires et certains procédés industriels nécessitent des températures très élevées, de l'ordre de 3000°C et une atmosphère exempte de toute impureté. Le seul moyen efficace pour ces processus est la création de grandes densités de flux sur les surfaces à traiter qui sont protégées des impuretés par des parois transparentes. C'est ainsi que les fours solaires ont fait l'objet de beaucoup de recherches ayant abouti sur la construction de très grands fours, le plus souvent expérimentaux.

Ces fours sont construits en climat tempéré où l'ensoleillement n'est pas des meilleurs et ont conduit à l'élaboration de méthodes variées plus efficaces les unes que les autres pour la concentration de l'énergie solaire incidente, de façon à obtenir les densités énergétiques voulues.

Les installations se composent en général de deux parties :

- Un module de concentration de l'énergie, composé de miroirs à géométrie et arrangement spatial variables, dictés par l'utilisation prévue pour l'énergie ainsi concentrée
- Un module d'utilisation de cette énergie.



### **PRESENTATION DE LA DEMARCHE SUIVIE.**

Cette démarche peut être divisée en 2 parties :

- 1 - L'Evaluation des besoins énergétiques domestiques sur un échantillon de la population.
- 2 - L'Etude proprement dite qui a consisté en :
  - 1) Choix de la configuration du concentrateur
  - 2) Synthèse du concentrateur
  - 3) Etude du dispositif de stockage
  - 4) Synthèse du dispositif de stockage
    - Utilisation pour la cuisine
    - Utilisation pour le chauffage de l'eau
  - 5) Evaluation des besoins énergétiques domestiques :
    - Résultats de l'enquête
    - Valeur utilisée dans les calculs
  - 6) Dimensionnement du concentrateur
  - 7) Dimensionnement du dispositif de stockage
  - 8) Etude du dispositif de suivi du soleil
  - 9) Synthèse globale de l'installation expérimentale

## ENQUETE SUR LES BESOINS ENERGETIQUES DOMESTIQUES.

### **Objectifs.**

Déterminer avec une approximation valide les besoins énergétiques domestiques au Sénégal. La valeur à considérer doit être une valeur maximale pour pouvoir satisfaire les besoins des familles à grande densité.

### **Raisons du choix de la ville de Thiès.**

Du point de vue énergétique, les villes dépensent beaucoup plus que les villages parce que les besoins sont plus nombreux et que les normes d'hygiène et de bien être diffèrent considérablement.

D'autre part au Sénégal, les grandes villes sont situées sur le littoral et les températures y sont en général faibles, ce qui réhausse les dépenses énergétiques.

Il nous faut donc une ville pouvant connaître à la fois les baisses de température du littoral et les hausses de chaleurs de l'intérieur du pays. Pour ces raisons nous nous sommes trouvés vers la ville de Thiès et spécialement vers la CITE MILLIONNAIRE où nous avons supposé trouver les plus grandes consommations d'énergie.

Le formulaire d'enquête est donné à la figure 1.

**EVALUATION DES BESOINS  
ENERGETIQUES DOMESTIQUES**

Cette évaluation s'inscrit dans le cadre d'un projet pour lequel une connaissance précise des dépenses énergétiques domestiques est indispensable. Vous nous aiderez beaucoup en répondant à ce questionnaire

Veuillez (\*) encadrer les mentions correspondant à vos réponses, et inscrire les valeurs en précisant les unités lues ou utilisées

**CUISINE**

Type(s) de cuisinière(s) utilisé(s) :

CUISINNIERE A GAZ

Nombre de bouteilles utilisées par mois :

Type de bouteilles : grande , moyenne , petite (\*) .

Moments d'utilisation : matin , midi , soir (\*) .

CUISINNIERE ELECTRIQUE

Puissance de la cuisinière (elle est inscrite sur une fiche à l'arrière de l'appareil) :

Moments d'utilisation : matin de heures à heures  
midi de heures à heures  
soir de heures à heures.

FOYER A CHARBON

Volume approximatif de charbon utilisé par jour :

Moments d'utilisation : matin de heures à heures  
midi de heures à heures  
soir de heures à heures.

**CHAUFFAGE**

EAU LOCAUX (\*)

Type(s) de chaudière(s) utilisé(s) :

CHAUDIERE A GAZ

Nombre de bouteilles utilisées par mois :

Type de bouteilles : grande , moyenne , petite (\*) .

Moments d'utilisation : matin , midi , soir (\*) .

CHAUDIERE ELECTRIQUE

Puissance de la cuisinière (elle est inscrite sur une fiche à l'arrière de l'appareil) :

Moments d'utilisation : matin de heures à heures  
midi de heures à heures  
soir de heures à heures.

CHAUDIERE A CHARBON

Volume approximatif de charbon utilisé par jour :

Moments d'utilisation : matin de heures à heures  
midi de heures à heures  
soir de heures à heures.

**ECLAIRAGE**

Pour un niveau moyen de confort dans votre maison, quelle est l'aire de la surface minimale à éclairer ?

Quelle est l'aire de la surface libre découverte dont vous disposez ? :

NOUS VOUS REMERCIONS POUR VOTRE COLLABORATION.

**LISTE DES SYMBOLES UTILISES.**

E: ensoleillement ( $W/m^2$ )  
 D: diamètre de conduite ( m )  
 d: diamètre de la parabole (m)  
 f: distance focale ( m )  
 t: temps (s)  
 Q,  $Q_s$ ,  $Q_i$  : quantités de chaleur  
 $\alpha_1$ : angle d'ouverture de la parabole ( degrés )  
 h: profondeur de la parabole (m)  
 Sd: aire d'ouverture de la parabole (  $m^2$  )  
 Sl: surface apparente de l'image focale (  $m^2$  )  
 Sl': surface réelle de l'image focale (  $m^2$  )  
 A: rapport de concentration de l'énergie  
 $f_r$ : facteur de réflexion des miroirs  
 $\epsilon$ : émissivité de l'absorbeur  
 $\rho$ : masse volumique ( $kg/m^3$ )  
 k: conductivité thermique (  $W/m^2 \cdot ^\circ C$  )  
 Cp: capacité thermique ( $kJ/kg \cdot ^\circ C$ )  
 T: température (  $^\circ C$  )  
 G: centre de gravité  
 F, P, R: forces ( N )  
 g: accélération de la pesanteur ( $m/s^2$ )  
 $\sigma$ : contrainte longitudinale (MPa)  
 $\tau$ : contrainte transversale (MPa)  
 I: moment d'inertie ( $mm^4$ )  
 Su, Sy: résistances ultime et à l'écoulement des matériaux ( MPa )  
 b , c, a, l: dimensions (m)

M: moment (N.m)  
 $\Omega$ : vitesse angulaire (rad/s)  
 $\theta_f, r_f$ : angle et rayon du cercle de frottement  
 $T_r$ : période de rotation de la terre (s)  
FS: facteur de sécurité  
v: vitesse (m/s)  
V,  $V_x$ ,  $V_a$ : volume ( $m^3$ )  
 $P_{min,max,a}$ : pressions (MPa)  
 $R_{eq}$ : résistance thermique  
 $\phi$ : Flux de chaleur (W)  
dm/dt: débit massique (kg/s)  
 $\tilde{\nu}$ : viscosité cinématique (cst)  
Re: nombre de Reynolds  
Pr: nombre de Prandtl  
Nu: nombre de Nusselt  
 $h_i$ : coefficient de transfert de chaleur par convection ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )

**PREMIERE PARTIE**

**ETUDES THEORIQUES.**

## **I - LE CONCENTRATEUR.**

### **1 - CHOIX DU TYPE DE CONCENTRATION.**

Pour pouvoir stocker l'énergie avec le maximum de rendement, et l'utiliser efficacement, il faudra que même à la limite d'autonomie, la température soit suffisamment élevée pour être utilisée.

Le transfert devant se faire par rayonnement, il faudra une grande densité d'énergie. Nous éliminons donc les concentrateurs plans. Nous avons alors le choix entre :

#### **1) Les concentrateurs semi-cylindriques ou cylindroparaboliques (fig. 2a):**

L'énergie concentrée est répartie sur une bande rectangulaire. Ils conviennent pour réchauffer l'eau ou un fluide quelconque dans des tubes placés au foyer et ne donnent pas de très grandes densités d'énergie. Ils sont donc à écarter pour notre utilisation.

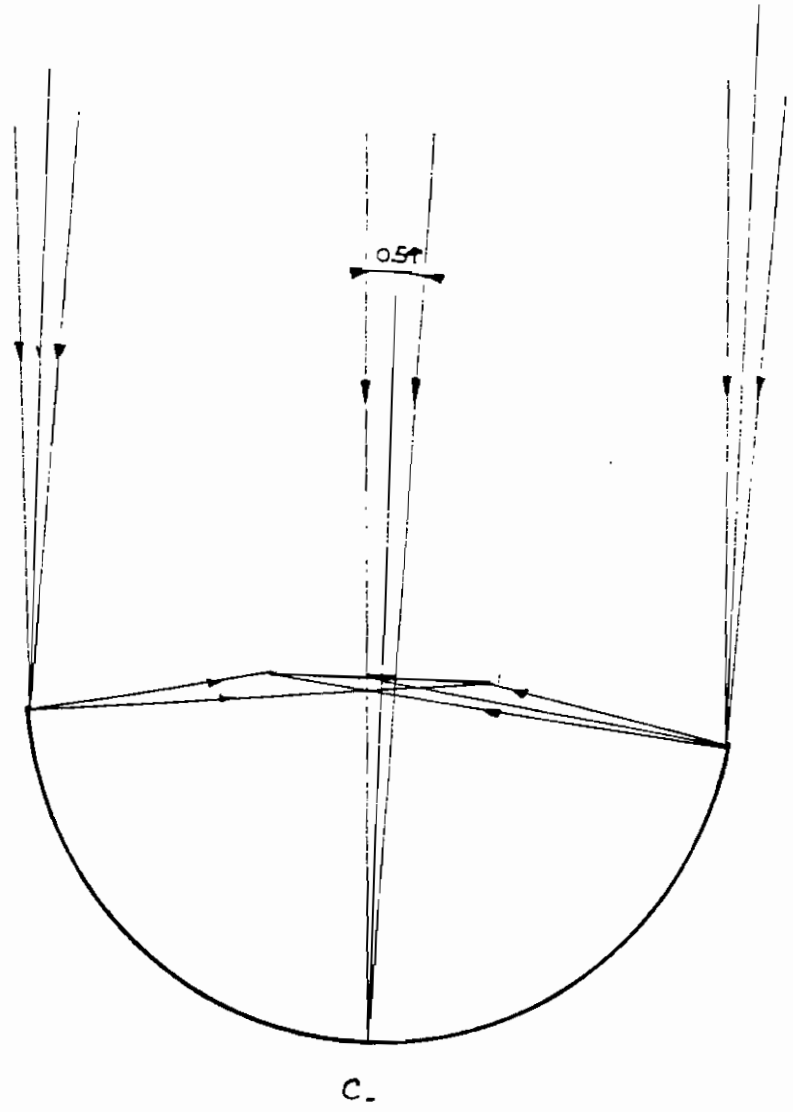
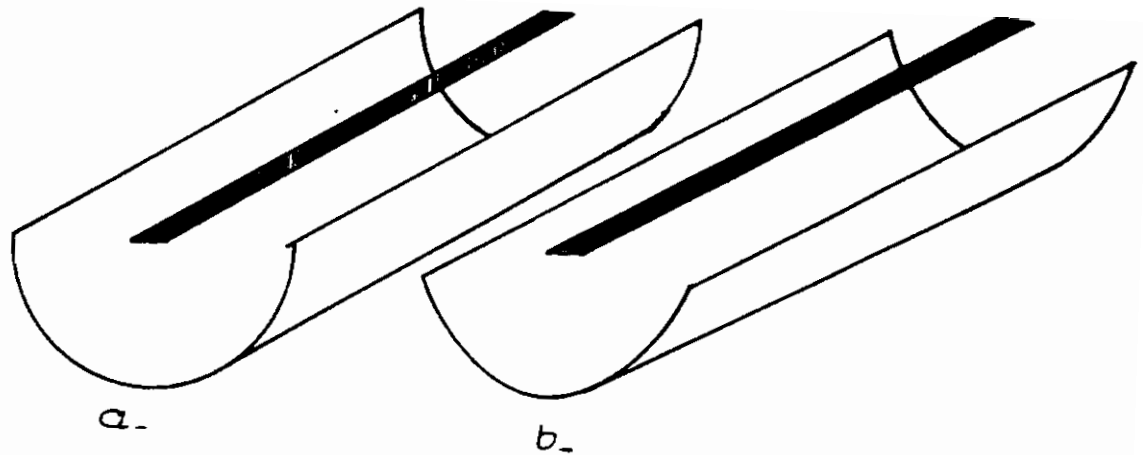
#### **2) Les concentrateurs semi-sphériques (fig. 2b):**

La distance locale est faible et l'énergie concentrée qui peut être très grande est répartie sur une image focale apparente assez grande pour rendre le rendement faible. Ils sont aussi à écarter pour notre utilisation.

#### **3) Les concentrateurs paraboliques (fig. 2c):**

On peut faire varier leur distance focale et donc obtenir des surfaces d'images focales aussi petites qu'on veut, et aussi des rendements qu'on peut fixer en fixant les dimensions. A cause de cette flexibilité, notre étude portera exclusivement sur eux.

Fig. 2





## 2 - CHOIX DE LA CONFIGURATION.

### 1ère configuration.

Parabole fixe et miroir orienteur mobile (fig. 3a):

Elle est la plus efficace parce que le miroir orienteur qui est plat est plus faible à orienter que la parabole ; mais une fois que le soleil a dépassé un certain angle, elle devient inutilisable pour le reste de la journée parce qu'alors l'énergie est réfléchie hors du champ de la parabole.

### 2ème Configuration. (fig. 3b)

Une amélioration de la 1ère configuration peut consister à opposer deux miroirs orienteurs. Une fois l'angle limite du premier miroir dépassé, la réflexion se fera sur le deuxième miroir qui renverra son image sur le premier qui l'orientera à son tour sur la parabole.

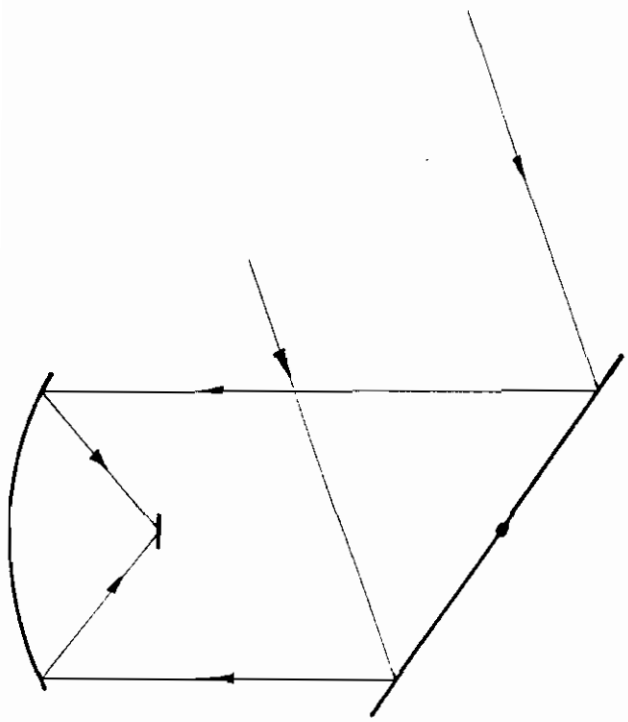
Ce montage nécessiterait un dispositif de précision pour coordonner les mouvements des deux miroirs orienteurs. De plus la réflexion multiple réduira l'énergie à la sortie.

### 3ème Configuration.

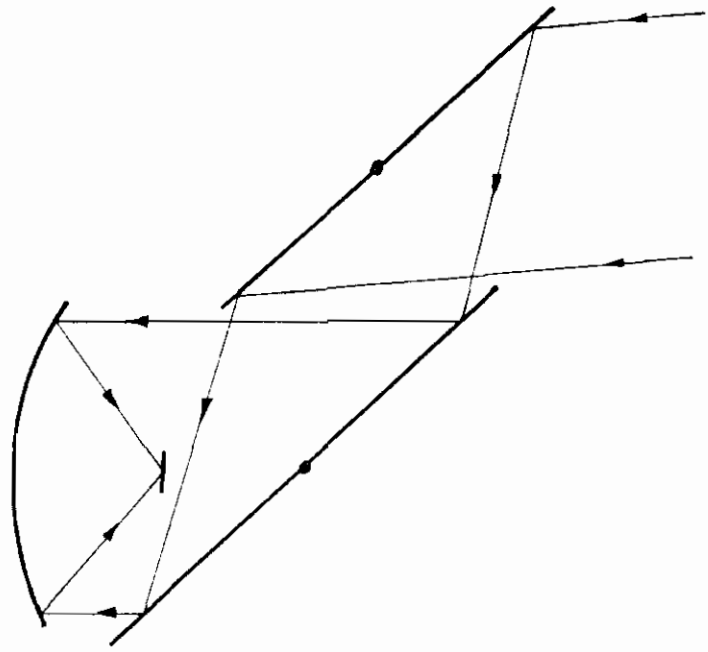
Orientataion du miroir parabolique (fig. 3c):

La parabole décrit un angle de  $180^\circ$ . Mais là aussi la réflexion multiple réduira l'énergie à la sortie.

Cependant, pour des raisons de relative simplicité, c'est une configuraion simplifiée de cette dernière qui sera adoptée.

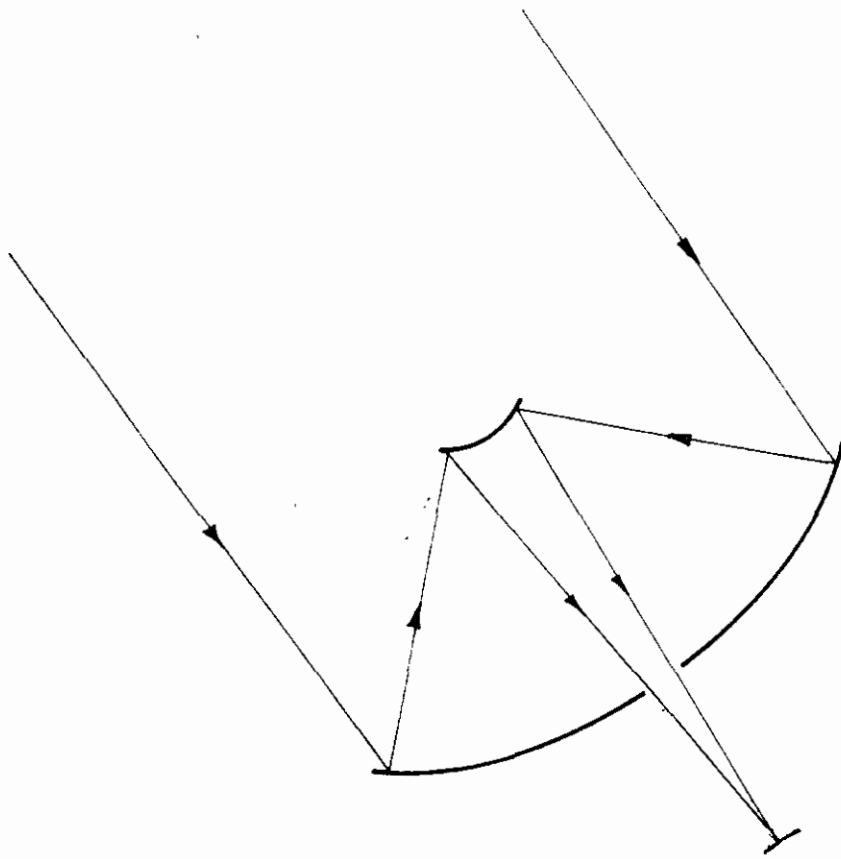


a.



b.

Fig. 3



c.

### 3 - ETUDE THEORIQUE.

(fig. 4)

#### 1) Diamètre de la parabole.

$\frac{\text{Energie à stocker}}{\text{temps de stockage}} = \text{Puissance reçue par la parabole.}$

$$\frac{Q}{t} = E * \frac{d^2}{4} \implies d^2 = \frac{4*Q}{E*t}$$

#### 2) Diamètre de l'image.

$$l = 2*f*\tan(0.27^\circ)$$

#### 3) Diamètre apparent.

$$l' = 2*f'^2 + \frac{d^2}{4} * \text{tg}(0.27) * \frac{1}{\sin(\alpha_1)}$$

$$\sin(\alpha_1) = \frac{d^2}{f^2 + \frac{d^2}{4}}$$

$$l' = 2*(f^2 + \frac{d^2}{4}) * \frac{2*\text{tg}(0.27^\circ)}{d} \quad \text{avec } f' = f - h$$

Toute l'énergie réfléchiée est reçue dans le diamètre apparent. La répartition d'énergie dans le plan focal est une fonction de f et de d. Elle est donnée à la figure 5.

#### 4) Rapports de concentration.

$$\text{Rapport apparent : } A = \frac{S_d}{S_l}$$

Le choix de  $f$  en fonction de  $d$  est conditionné par le

rapport  $\frac{S_l}{S_l'}$  qui régit le rendement de l'installation.

D'après le tableau II, un compromis entre l'envergure de

l'installation ( $f$  grand avec  $\frac{S_l}{S_l'} \rightarrow 1$  et un rendement élevé)

et ( $f$  petit avec  $\frac{S_l}{S_l'} \rightarrow 0$  et un rendement faible) correspond

à  $f = d$  auquel correspond un rapport de concentration réel de 10223 .

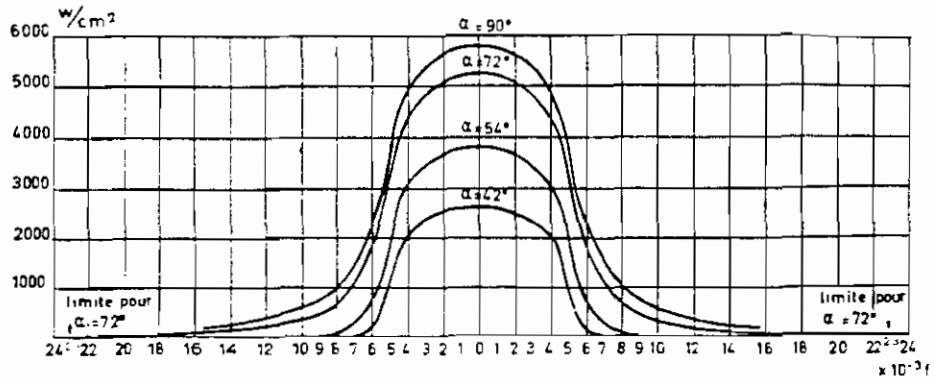


FIG. 5 — Densité de flux en watt·cm<sup>2</sup> sur le plan focal en fonction du rayon angulaire  $\alpha$ , du miroir et de la distance à l'axe focal, ( $\varrho = 10^{-2} f$ ). ( $f$ , distance focale du miroir).

TABEAU I

$n = \frac{\text{diamètre du miroir}}{\text{distance focale}} = \frac{D}{f}$	0,2	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	
Rapport $\frac{S}{s}$ de la surface du miroir à la surface de l'image centrale (de Gauss)	462	2 890	11 560	26 015	46 250	72 250	104 060	141 640	185 000	
Concentration (énergie reçue par cm <sup>2</sup> dans la zone centrale) (énergie moyenne) $E = Cte$ solaire	459 E	2 797 E	10 223 E	19 959 E	29 546 E	37 300 E	42 545 E	45 351 E	46 165 E	
Rapport $W_1/W_2$ , entre l'énergie totale réfléchie par le miroir et l'énergie reçue dans l'image centrale	$\frac{1}{0,99}$	$\frac{1}{0,97}$	$\frac{1}{0,88}$	$\frac{1}{0,77}$	$\frac{1}{0,64}$	$\frac{1}{0,52}$	$\frac{1}{0,41}$	$\frac{1}{0,32}$	$\frac{1}{0,25}$	
Puissance théoriquement reçue par cm <sup>2</sup> et sur l'image centrale	$E = 0,1$ W/cm <sup>2</sup> cas de la surface terrestre	46	280	10 22	1 996	2 954	3 730	4 254	4 535	4 616
	$E = 0,135$ W/cm <sup>2</sup> cas de l'espace	62	378	1 380	2 694	3 988	5 035	5 743	6 122	6 231
Puissance reçue (en W/cm <sup>2</sup> ) pour un facteur de réflexion 0,9 du miroir parabolique:	Surface terrestre	41	252	920	1 796	2 658	3 357	3 828	4 081	4 154
	Espace	56	340	1 242	2 242	3 589	4 531	5 169	5 510	5 608
Température du corps noir émettant les précédentes puissances $W = \sigma T^4$	Surface terrestre	1 640 °K	2 582 °K	3 569 °K	4 219 °K	4 653 °K	4 933 °K	5 097 °K	5 179 °K	5 203 °K
		1 367 °K	2 309 °K	3 296 °C	3 946 °C	4 380 °C	4 660 °C	4 824 °C	4 906 °C	4 930 °C
	Espace	1 772 °K	2 783 °K	3 847 °K	3 946 °C	5 016 °K	5 317 °K	5 495 °K	5 583 °K	5 608 °K
		1 499 °C	2 510 °C	3 574 °C	4 27 °C	4743 °C	5 044 °C	5 222 °C	5 310 °C	5 335 °C

**5) Energie disponible à la sortie.**

Soient  $f_r$  le facteur de réflexion des miroirs et  $Q_i$  l'énergie incidente. L'énergie à la sortie, si on suppose l'air parfaitement transparent est :  $Q_s = 0.88 * f_r^3 * Q_i$  .

Pour des raisons économiques, le matériau choisi pour la réalisation des miroirs est l'aluminium poli qui n'absorbe pas les rayons ultraviolets contrairement aux miroirs de verre.

$$(1) \quad \epsilon = 0,04 \implies \rho = 1 - \epsilon = f_r = 0,96$$

$$f_r^3 = 0,885$$

$$Q_s = 0,88 \times 0,885 \times Q = 0,778 Q_i$$

(1) En considérant l'aluminium comme un corps gris.

Handwritten notes and scribbles in the top right corner of the page.

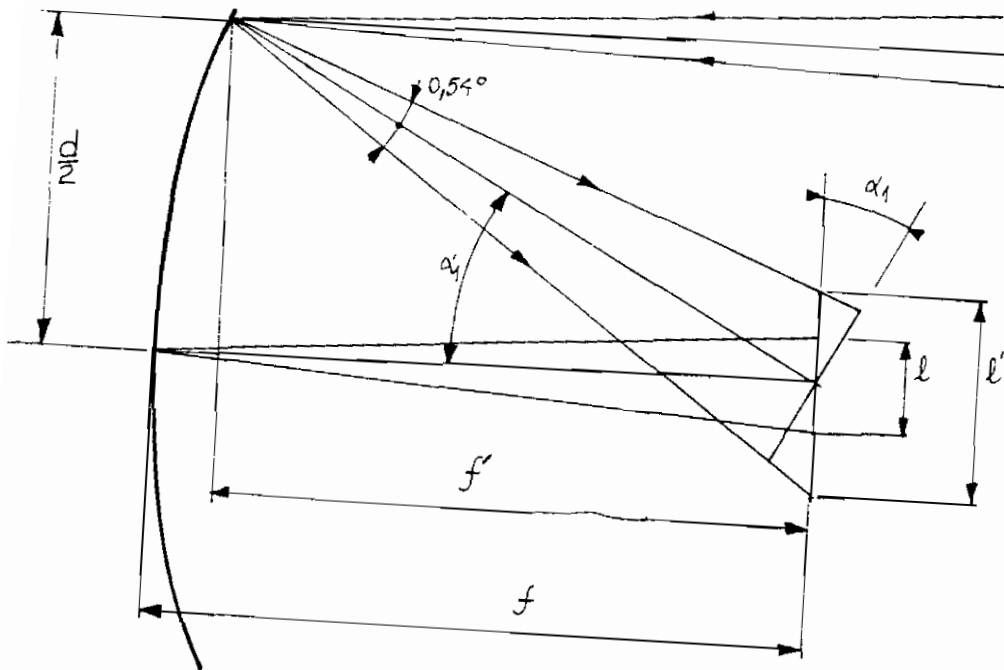


Fig. 4

## **II - LE DISPOSITIF DE STOCKAGE**

### **1 - CHOIX DU TYPE DE STOCKAGE.**

Le stockage est le problème le plus difficile à résoudre dans les dispositifs énergétiques.

Les moyens les plus utilisés sont actuellement :

- **le stockage électrique dans des accumulateurs** ( capacitances, inductances ou batteries ). Il nécessite une conversion de l'énergie à stocker en énergie électrique.

- **le stockage mécanique :**

- . par compression d'un gaz ( accumulateurs pneumatiques )
- . par déformation d'un corps élastique
- . par élévation d'un corps pesant.

cette forme de stockage nécessite la disponibilité de l'énergie sous forme d'énergie mécanique.

- **le stockage thermique**

- Par utilisation des changements de structure (ou de phase) au cours desquels la température est constante.
- Par utilisation de la capacité thermique de certains corps solides ou le plus souvent liquides.

Dans tous ces dispositifs, l'énergie est disponible sous une forme directement utilisable.

Dans le cas qui nous intéresse l'énergie n'est pas sous une pareille forme . Il nous faut la transformer en chaleur par absorption dans un corps noir. Il sera donc plus économique de la stocker dans ce même corps.



## 2 - CHOIX DES MATERIAUX .

### -Matériau de l'absorbeur.

Il s'agira de trouver un matériau qui pourra résister aux hautes températures et qui aura une émissivité proche de l'unité. La température espérée étant de l'ordre de 2500°C, l'utilisation d'un métal sera écartée car elle devra avoir un point de fusion très élevé . De plus aux hautes températures, les métaux sont facilement oxydés, ce qui exigera un dispositif anticorrosion.

On utilisera donc un matériau réfractaire comme corps noir. La brique rugueuse présente aux hautes températures  $\epsilon = 0,85$ , il en est de même du béton rugueux et de la brique de magnésie. On les retiendra comme absorbeurs. Dans Les calculs qui suivent nous utiliserons les propriétés de la brique de magnésie :

$$\rho = 2800 \text{ kg/m}^3$$

$$k = 4,65 - 0.0017 \cdot \theta^\circ\text{C}$$

$$C_p = 1,05 + 0.0003 \cdot \theta^\circ\text{C}$$

### - Matériau intermédiaire.

Il doit avoir une  $C_p$  et conductivité thermique moyennes.

Nous prendrons la brique dina :  $\rho = 1400 \text{ Kg/m}^3$

$$C_p = 0,8 + 0,0002$$

$$k = 0,99 + 0,0007$$

$$T_{\text{max}} = 17000^\circ\text{C}$$

### - Matériau de l'isolant.

Nous choisirons de la laine minérale

$$\rho = 200 \text{ kg/m}^3$$

$$k = 0,058 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{max}} = 500^\circ\text{C}$$

### **3 - UTILISATION POUR LA CUISINE .**

Une lumière pratiquée dans une paroi du four permettra, au contact d'un ustensile de cuisine d'élever la température suffisamment haut pour faire cuire les aliments. La vitesse de cuisson sera réglée par des cales disposées dans l'ouverture. Nous avons adopté la forme conique en l'absence de toute spécification. Dans la pratique ,dépendamment du type d'ustensile des formes particulières permettront de réduire les pertes dues à l'utilisation.

### **4 - UTILISATION POUR LE CHAUFFAGE.**

Un serpentin placé dans le matériau intermédiaire , à une une distance adéquate de la paroi externe permettra de porter la température de l'eau à environ 100°C . Le matériau du serpentin sera de l'acier galvanisé pour éviter une corrosion à laquelle les températures élevées sont très favorables dans le cas du cuivre.

### **4 - STRUCTURE DU DISPOSITIF DE STOCKAGE.**

Elle est donnée à la figures 6 et 7 .

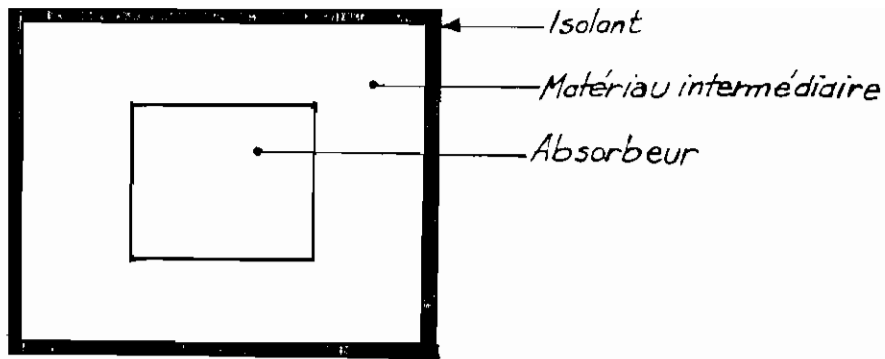


Fig. 6

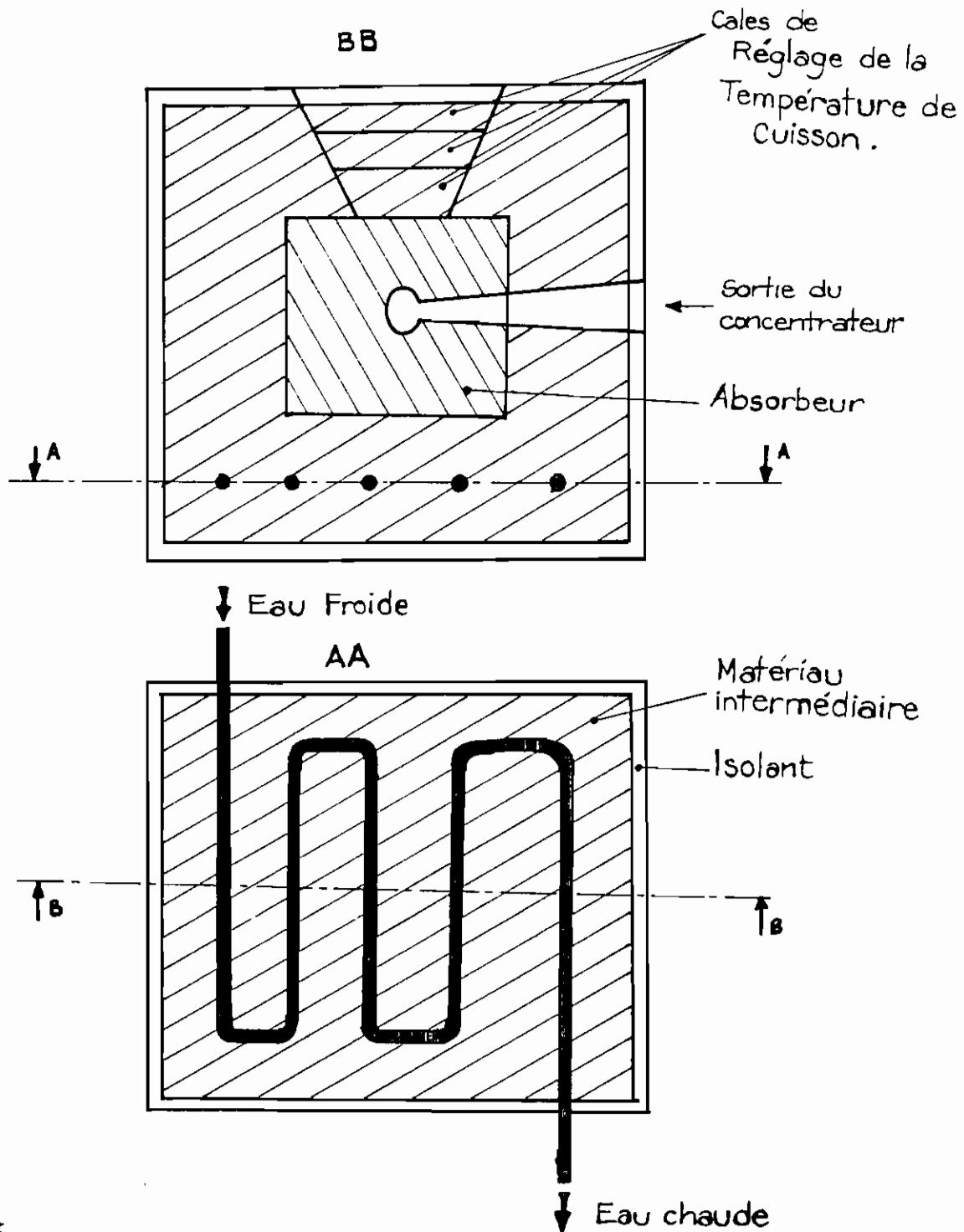


Fig. 7

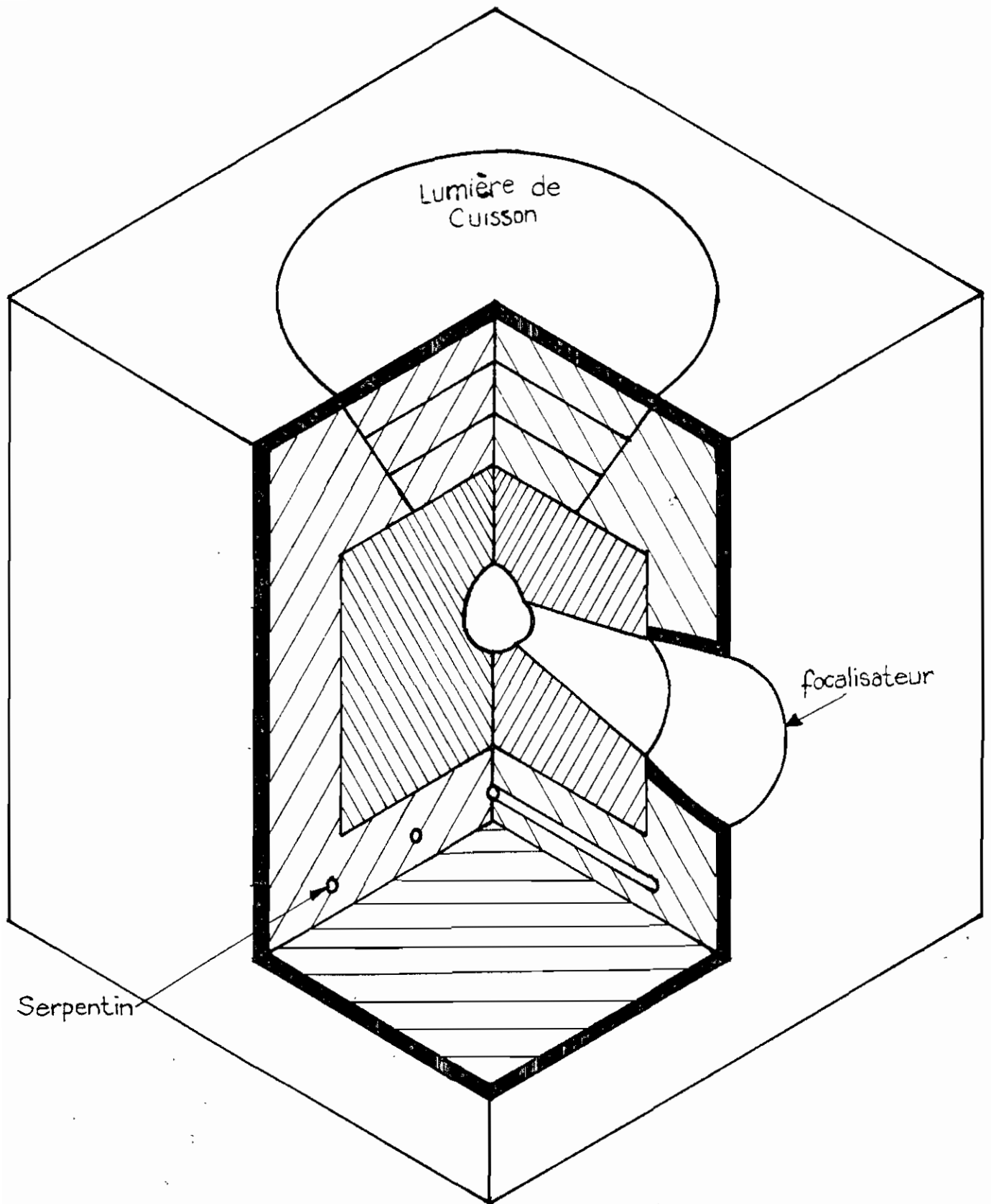


Fig. 8

**DEUXIEME PARTIE**

**DIMENSIONNEMENT**

### 1 - RESULTATS DE L'ENQUETE .

Il a été observé que dans la CITE MILLIONNAIRE, la plupart des maisons possèdent le chauffage central de l'eau. Toutes utilisent à la fois du gaz et du charbon.

Le maximum de consommation enregistrée a été

Gaz : 10 bouteilles de 12 Kg/mois ( masse de gaz )

Charbon : 1 sac/mois (50 kg)

Eau chaude : 1200 W x  $\frac{1}{2}$  h/jour

Eclairage : 80 m<sup>2</sup> sont à éclairer au minimum pour un confort moyen.

Les Pouvoirs calorifiques inférieurs standards sont:

- Gaz : 10900 kcal/kg

- Charbon : 6830 kcal/kg

On a supposé que pour le niveau de confort recherché , 40 Watts suffisent pour éclairer 10 m<sup>2</sup> et que l'éclairage s'étend de 19 h 30 à 22h.

Ceci nous donne les consommations suivantes (journalières)

- Gaz : 50.6 kWh
- Charbon : 13.22 kWh
- Eclairage : 1.2 kWh
- Eau chaude: 0.6 kWh.

Le rendement des foyers courants est très faible, de l'ordre 10%. Nous prendrons le rendement d'un foyer à charbon amélioré dont le rendement est de l'ordre de 15% , valeur que nous arrondirons à 20%.

On peut donc estimer la consommation journalière à environ

$$( 50.6 + 13.22 ) * 20\% + 1.2 + 0.6 = 14.56 \text{ kWh.}$$

Avant de construire le prototype, nous contruirons d'abord un modèle réduit pouvant stocker 3.3 kWh qui sera notre modèle expérimental.

## 2 - ETUDE DES COURBES D'ECLAIREMENT.

Le mois de septembre étant l'un des mois les moins éclairés de l'année , cette étude sera faite sur une courbe typique du mois de septembre (fig. 8).

Le moment de la journée que nous retiendrons est celui compris entre 11 heures et 16 heures: moments dont l'éclairement est le plus significatif.

Le mouvement de la terre autour du soleil fait que l'intensité de l'éclairement varie suivant l'inclinaison des faisceaux solaires. La courbe d'éclairement nous permet de conclure que la courbe est presque sinusoidale.

Son équation peut donc s'écrire :  $E = E_{\max} * \cos(\alpha + \phi)$ .  
 $\phi$  est le déphasage et sa valeur est :  $\phi = (\delta t/24)*2*\pi = -0.39$  rad.  
 $E_{\max}$  est lue sur le graphique et est égal à  $788 \text{ W/m}^2$ .  
 A 16 heures correspond un angle de  $3.798$  rad et à 11 heures  
 un angle de  $2.879$  rad.

L'éclairement moyen est donc:

$$E = \frac{1}{\pi - 2.879} * \int_{2.879}^{\pi} E_{\max} * \cos(\alpha - 0.39) * d\alpha$$

soit  $E = 786.18 \text{ W/m}^2$ .



M'BORO, 25 September 1991

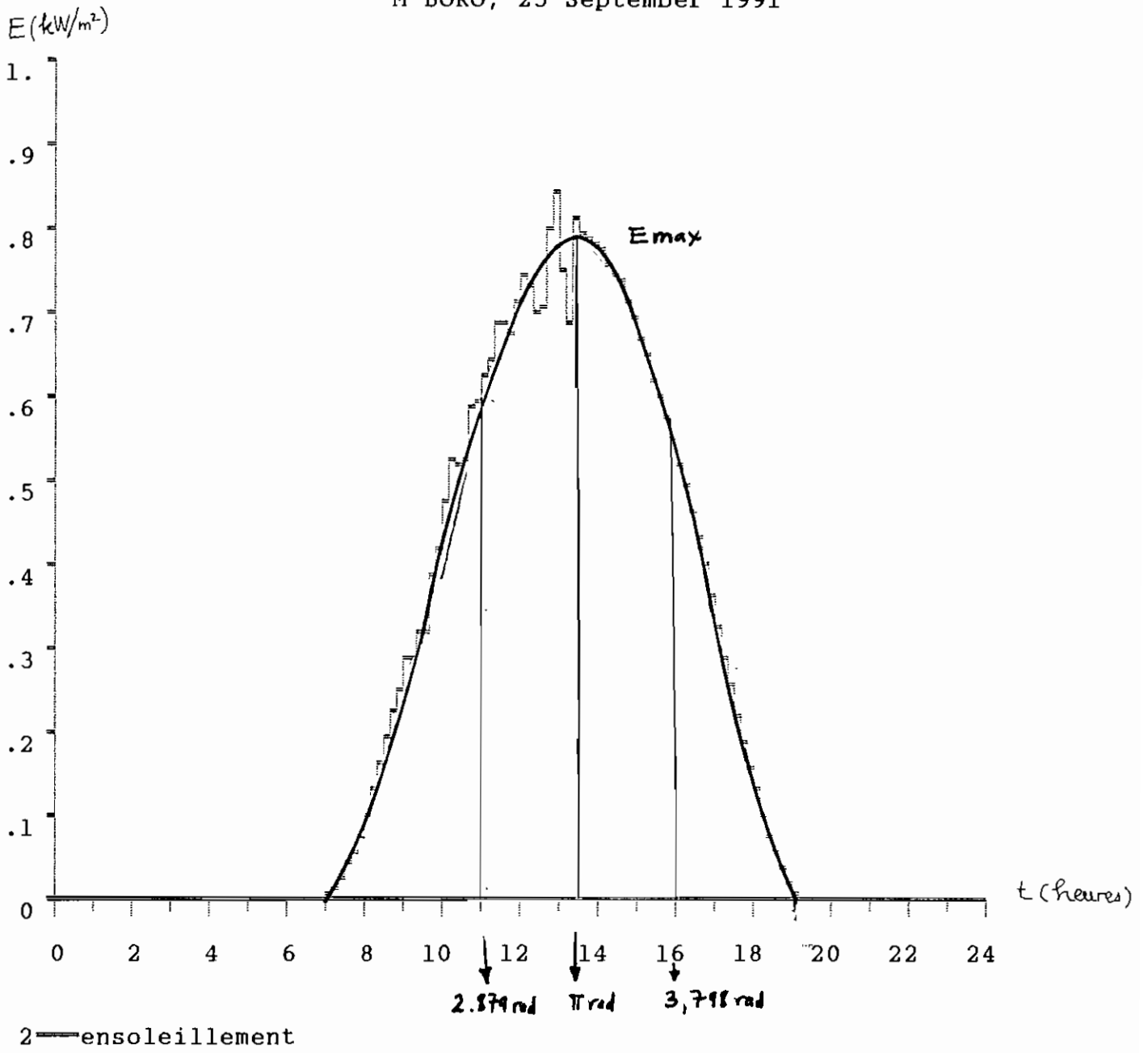


Fig. 8

### 3 - DIMENSIONNEMENT DU CONCENTRATEUR.

#### 1) Dimensionnement des paraboles. (fig. 9)

La puissance utile est donc  $3,3 \text{ kWh}/5\text{h} = 0.66 \text{ kW}$ . Elle sera majorée de

- 33 % pour les pertes thermiques ( Nous nous sommes fixés un rendement de 75% ).

-  $(1 - 0,95^3)$  pour tenir compte de la triple réflexion

- 0,11 pour tenir compte des 90 % d'absorption de l'absorbeur.

Ceci nous donne une puissance de :

$$\frac{3,3}{5} * 1,33 * 1,11 * (2 - 0,95^3) = E * \pi * (d^2/4) \implies$$

$$d = 1.378\text{m} \approx 1.5 \text{ m}$$

$$f = d = 1,5 \text{ m}$$

L'équation de la parabole de foyer  $f$  est  $y = \frac{x^2}{4f} = \frac{x^2}{6}$

ce qui donne  $h = \frac{0,75^2}{6} = 0,09375 \text{ m} = 9,375 \text{ cm}$

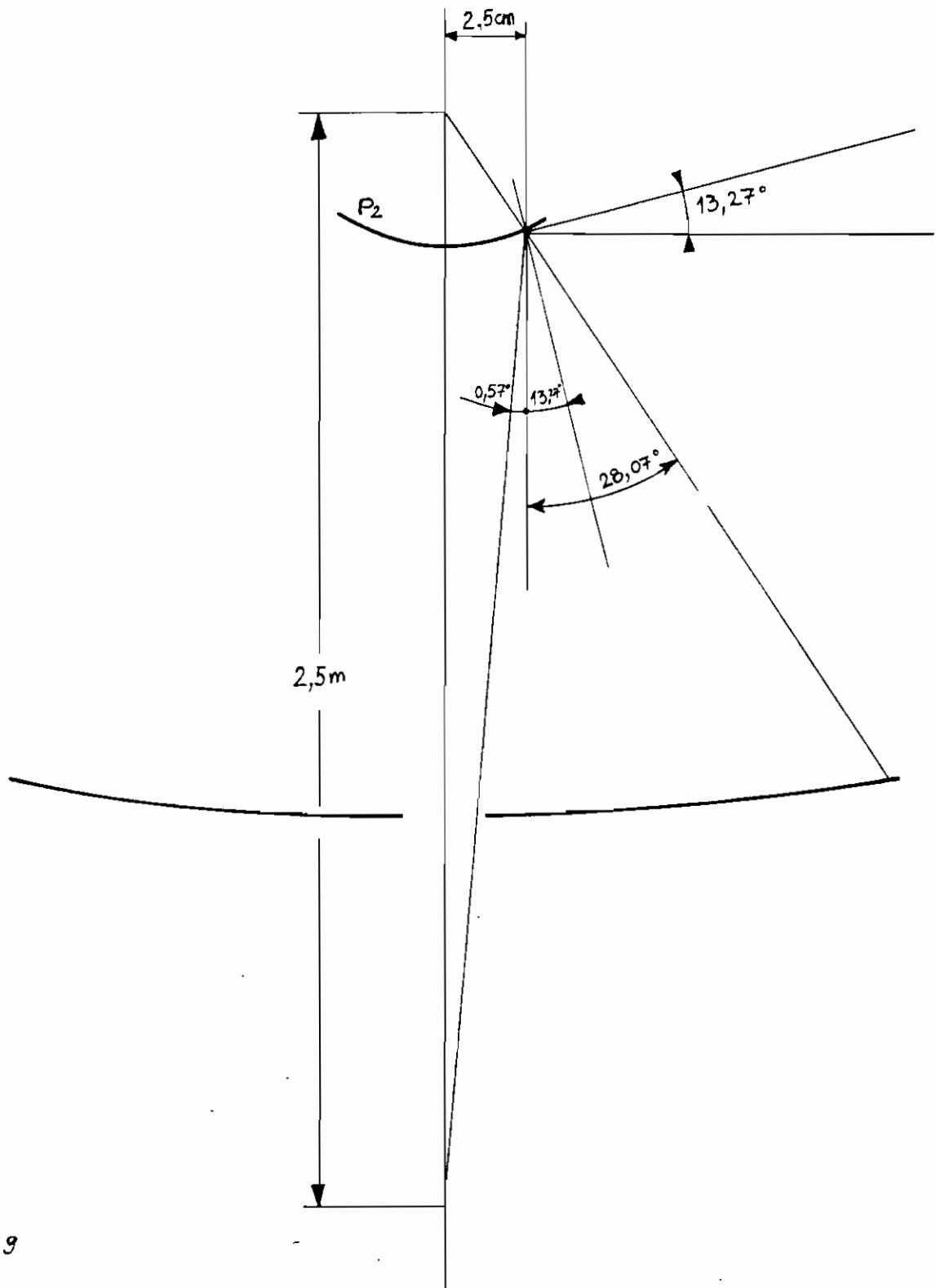


Fig. 9

**Diamètre apparent de l'image focale :**

$$l = 2 * f * \tan(0.27^\circ) * \frac{0,93 f}{100} = 1,395 \text{ cm}$$

$$\sin(\alpha_1) = \frac{d/2}{\left(\frac{d^2}{4} + (f - h)^2\right)^{0.5}} = 0,4706 \implies$$

$$\alpha_1 = 28,07^\circ$$

**Diamètre de l'image focale :**

$$l' = 2 * \left( (f - h)^2 + \frac{d^2}{4} \right)^{0.5} * \frac{2 \tan(0.27)}{d}$$

$$= 3,1496 \text{ cm} \quad (\text{nous prendrons } l' = 5 \text{ cm})$$

### Determination de la parabole $P_2$ .

$P_2$  doit permettre de récupérer l'image focale 2,5 m plus bas.

La pente de la tangente est  $\tan(13,27^\circ)$  soit 0,2452 ;

$$y = ax^2 \quad ; \quad y' = 2ax = 0,2452 \implies x = 2,5 \text{ cm}$$

$$a = \frac{1}{20,389} - \frac{1}{20,4}$$

$$y = \frac{x^2}{20,4} \quad (\text{cm})$$

### 2) Calcul du focalisateur. (fig. 10)

$\tan(27,75^\circ) = 0,528 =$  pente de la courbe

$$\text{or } y = a*x^2 \implies y' = 2*a*x$$

$$2*a*27,459 = 0,528 \implies$$

$$a = \frac{1}{104,012}$$

$$y = \frac{1}{104,012}$$

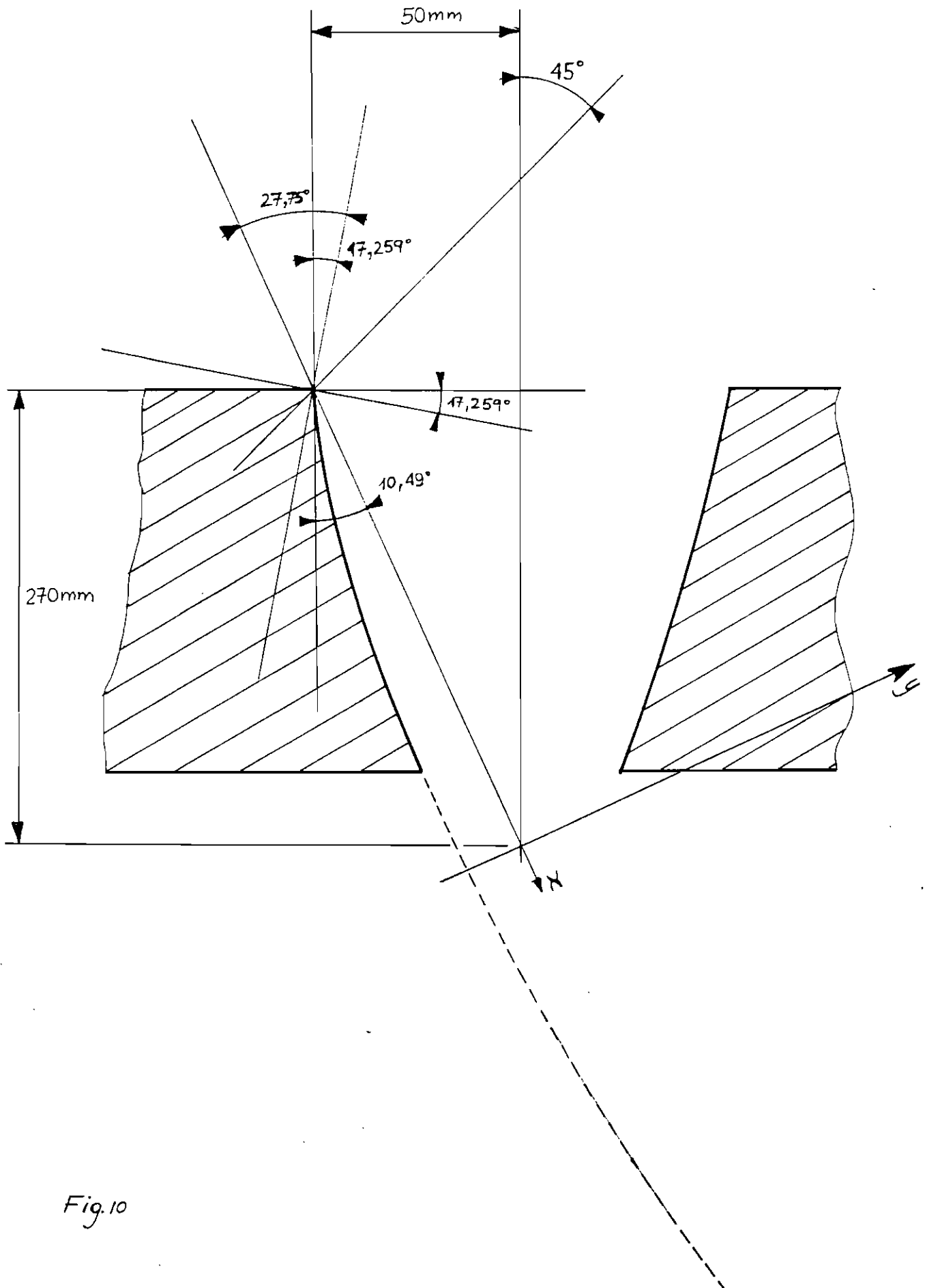


Fig.10

#### 4 - ETUDE DYNAMIQUE.

##### 1) Etude du dispositif support du concentrateur.

On prend une valeur moyenne de  $\rho$  pour les bois durs soit :

$$\rho = 800 \text{ kg/m}^3.$$

Centre de gravité. (fig. 11).

Point	x(cm)	y =(cm)	S(cm <sup>2</sup> )	e(cm)	m(kg) ]
G	0	25	5100	5	23.6
G' <sub>p</sub>	0	42,5	36425.39	1	14
G''	0	52.5	5025.56	5	20.106
G11	0	115.625	0.785		0.964
G9	-34.976	115.625	0.785		0.964
G10	34.976	115.625	0.785		0.964
G8	0	181.25	19.92	1	0.046
G2	-40.10	10.675	525		2.1
G3	40.10	10.675	525		2.1
G4	0	40	800	5	3.2
G5	26.66	36.66	200	5	0.8
G6	-26.66	36.66	200	5	0.8

Masse totale : 42.640 kg

Centre de gravité : Gt ( x=0 cm , y= 53.926 cm ).

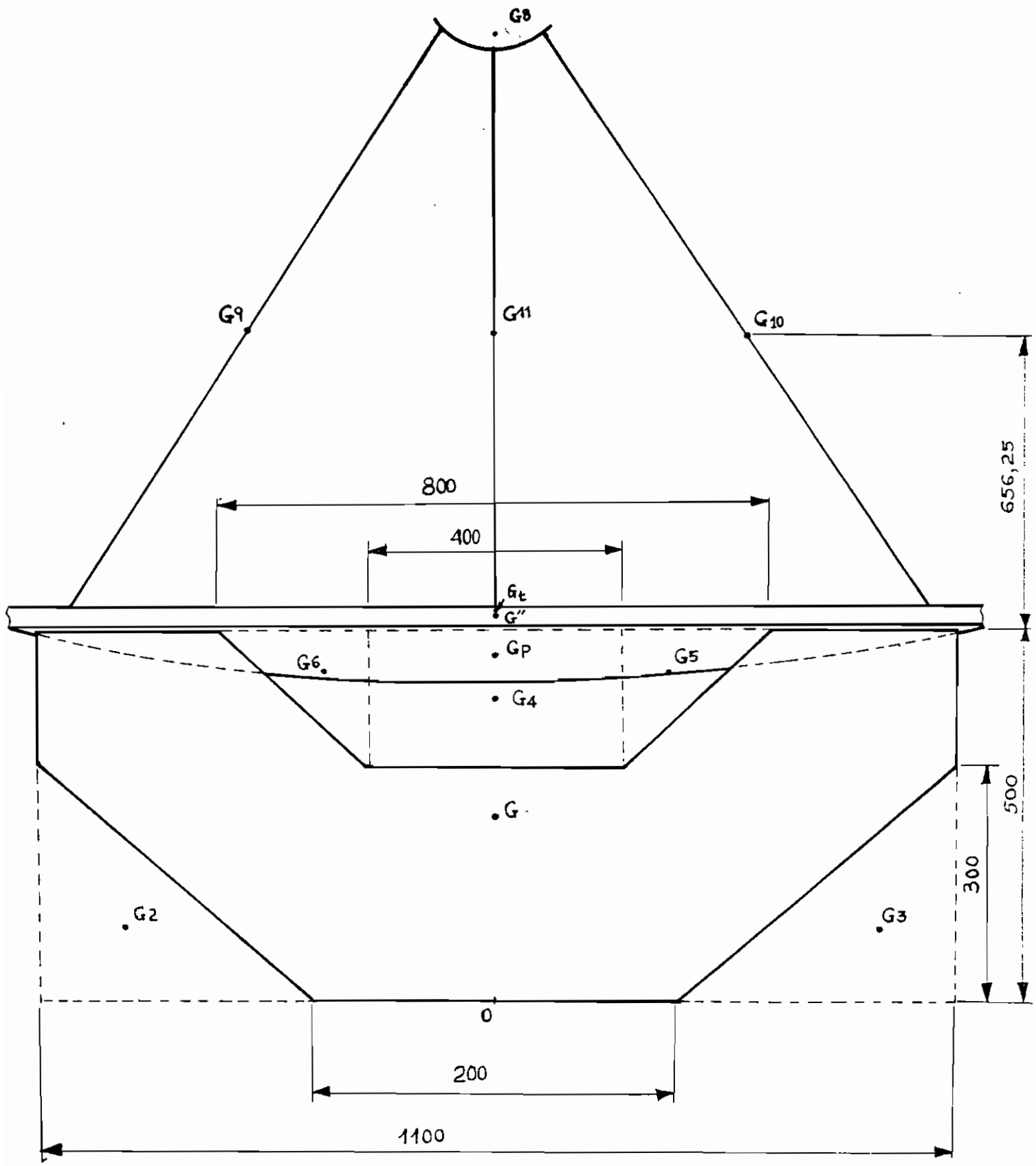


Fig.11



## 2 - Résistance mécanique du support. (fig. 12)

L'étude sera faite en supposant que le support est en équilibre sous l'action des seules forces dues à la parabole .

$$F_1 = \frac{\text{masse ( paraboles + tiges )} * g}{4} = 90.85 \text{ N}$$

$$P_2 = \frac{(\text{masse supports}) * g}{2} = 27.468 \text{ N}$$

### Etude sommaire en Cisaillement.

La section la plus sollicitée est la section  $\mu$ .

Effort tranchant en  $\mu$  :  $R = 2 * F_1 + P_2 = 209.68 \text{ N}$

Contrainte correspondante :  $\sigma = \frac{R}{A}$

$$A = 50 * 300 = 15000 \text{ mm}^2 \Rightarrow \sigma = 0.013978 \text{ MPa}$$

La résistance moyenne au cisaillement du bois est

$$1900 \text{ lb/in}^2 = 13.1 \text{ MPa.}$$

La section est donc très largement sécuritaire en cisaillement.

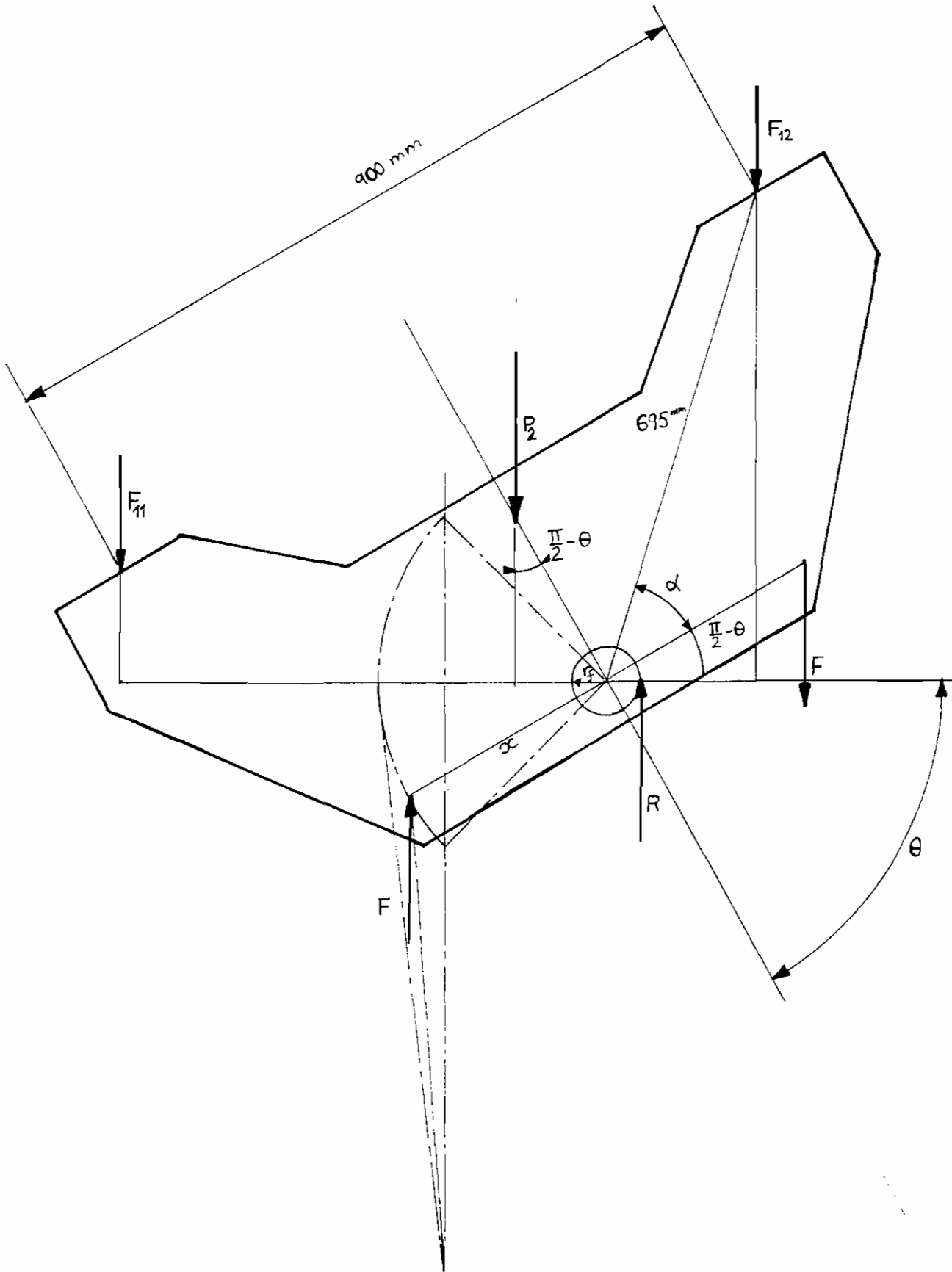


Fig. 12

Etude sommaire en Flexion.

$$M_{\max} = F_1 * 450 = 40882.5 \text{ N.mm}$$

$$\tau = \frac{M_{\max} * c}{I}$$

$$I = \frac{b * h^3}{12} = 11250000 \text{ mm}^4$$

$$c = h/2 = 150 \text{ mm}$$

$$\tau = 0.545 \text{ MPa}$$

La résistance limite perpendiculairement aux fibres est

$$S_u = 650 \text{ lb/in}^2 = 4.482 \text{ MPa}$$

Ici aussi la section est largement sécuritaire.

Il y a eu surdimensionnement parce que les propriétés des bois locaux ne sont pas disponibles et que les moyennes utilisées se rapportent à des bois européens et américains.

### 3) Etude du mouvement.

On suppose  $\beta$  négligeable de sorte que  $F$  est à tout instant verticale.

Diamètre de l'axe de rotation.

$$2*\tau = R/(0.25*\pi*D^2) \Rightarrow \tau = 2*R/(\pi*D^2)$$

Pour l'acier  $Sy_{moyen} = 180$  MPa

Pour un facteur de sécurité de 4, on trouve  $D = 1.72$  mm

Nous prendrons  $D = 20$  mm ( valeur courante sur le marché ).

Frottement acier-bois.

La vitesse angulaire étant presque nulle, nous, prendrons le coefficient de frottement statique, soit 0.35 .

L'angle de frottement est  $\theta_f = \arctan(0.35) = 19.29^\circ$ .

Le rayon du cercle de frottement est donc  $r_f = 10*\sin(\theta_f) = 3.3$  mm.

Calcul de  $\chi$ .

La Relation Fondamentale de la dynamique donne

$$\Sigma M = I * \Omega$$

$$|\Omega| = 2 * \pi / T \quad \text{avec } T : \text{période de rotation de la terre}$$

$$T = 24*3600 = 86400 \text{ secondes,}$$

$$\text{ce qui donne } |\Omega| = 0.000072722 \text{ rad/s.}$$

1) Accumulation dans un ressort. (fig. 13)

Il suffira d'utiliser un ressort en spirale qu'on déforme par rotation d'une manivelle et qui en se détendant exercera la force requise. Le système de régulation pourra être constitué d'un ressort antagoniste qui sera taré de manière à maintenir une vitesse constante de rotation.

Le principal inconvénient de ce dispositif est qu'il est très sensible aux surcharges : par exemple une force due au vent pourra comprimer l'un ou l'autre des ressorts et modifier spontanément la vitesse de rotation.

2) Utilisation d'un accumulateur oléopneumatique. (fig. 14).

L'air comprimé de l'accumulateur crée au dessus du liquide une pression qui est transmise aux vérins.

La valve  $V_1$  permet de régler la pression transmise. La valve  $V_3$  permet de régler la vitesse d'écoulement du liquide, donc la vitesse de rotation du concentrateur. Le clapet anti retour  $V_2$  permet un retour facile à la position initiale en fin de journée.

$\Omega$  étant négligeable, on peut écrire  $\Sigma M = 0$ .

$$M(F) + M(F^{11}) + M(F_{12}) + M(P_2) + M(R) = 0 \quad (1)$$

$$M(F) = F \cdot 2 \cdot x \cdot \cos(\theta)$$

$$M(F_{12}) = F_{12} \cdot 695 \cdot \sin(0.768 - \theta)$$

$$M(F^{11}) = -F_{11} \cdot [900 \cdot \cos(\pi/2 - \theta) - 695 \cdot \sin(\theta - 0)]$$

$$M(P_2) = -P_2 \cdot 539.926 \cdot \sin(\pi/2 - \theta)$$

$$M(R) = -R \cdot r_f$$

Les plus grandes sollicitations sont obtenues dans les positions limites, soit  $45^\circ$  et  $135^\circ$ .

L'équation (1) équivaut alors à

$$2 \cdot x \cdot F(x, 45^\circ) = 2 \cdot x \cdot F_{\max} = 197509.88 \text{ N.mm} \quad \text{soit}$$

$$F_{\max} = \frac{98754,9}{xp}$$

## 5 - ETUDE DU MECANISME DE SUIVI DU SOLEIL.

### 1) Etude.

La force  $F(x, \theta)$  est calculée à partir de l'équation (1) .

$$F(x, \theta) = \frac{1}{2 \cdot x} \cdot \left[ \frac{1}{\sin(\theta)} \cdot (-126281.5 \cdot \sin(\theta - 0.8028) + 691.944 + 113212.52 \cdot \cos(\theta)) \right]$$

Elle permet d'équilibrer le concentrateur dans ses différentes positions. Pour obtenir le mouvement de la parabole, il faudra exercer une force un peu supérieure à  $F(x, \theta)$  et trouver un système de régulation qui sera ajusté en fonction des conditions existant sur le terrain pour avoir la vitesse requise.

La vocation du dispositif étant de réaliser des économies d'énergie, nous n'utiliserons pas de moteur électrique pour réaliser le mouvement. Il nous faudra donc trouver des systèmes mécaniques permettant d'emmagasiner de l'énergie le matin de façon manuelle et de le restituer petit à petit dans la journée. Nous analyserons deux possibilités :

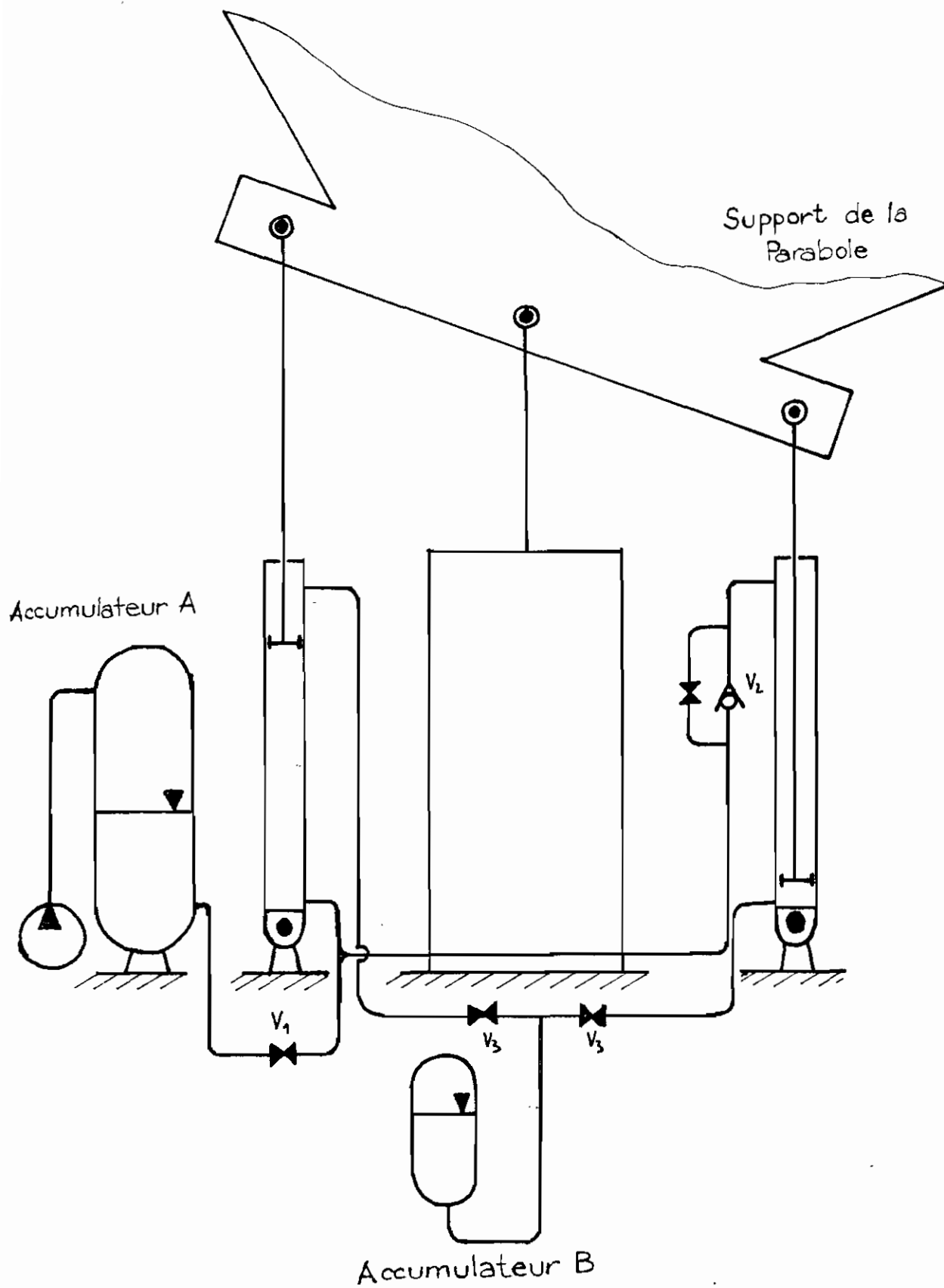


Fig. 14



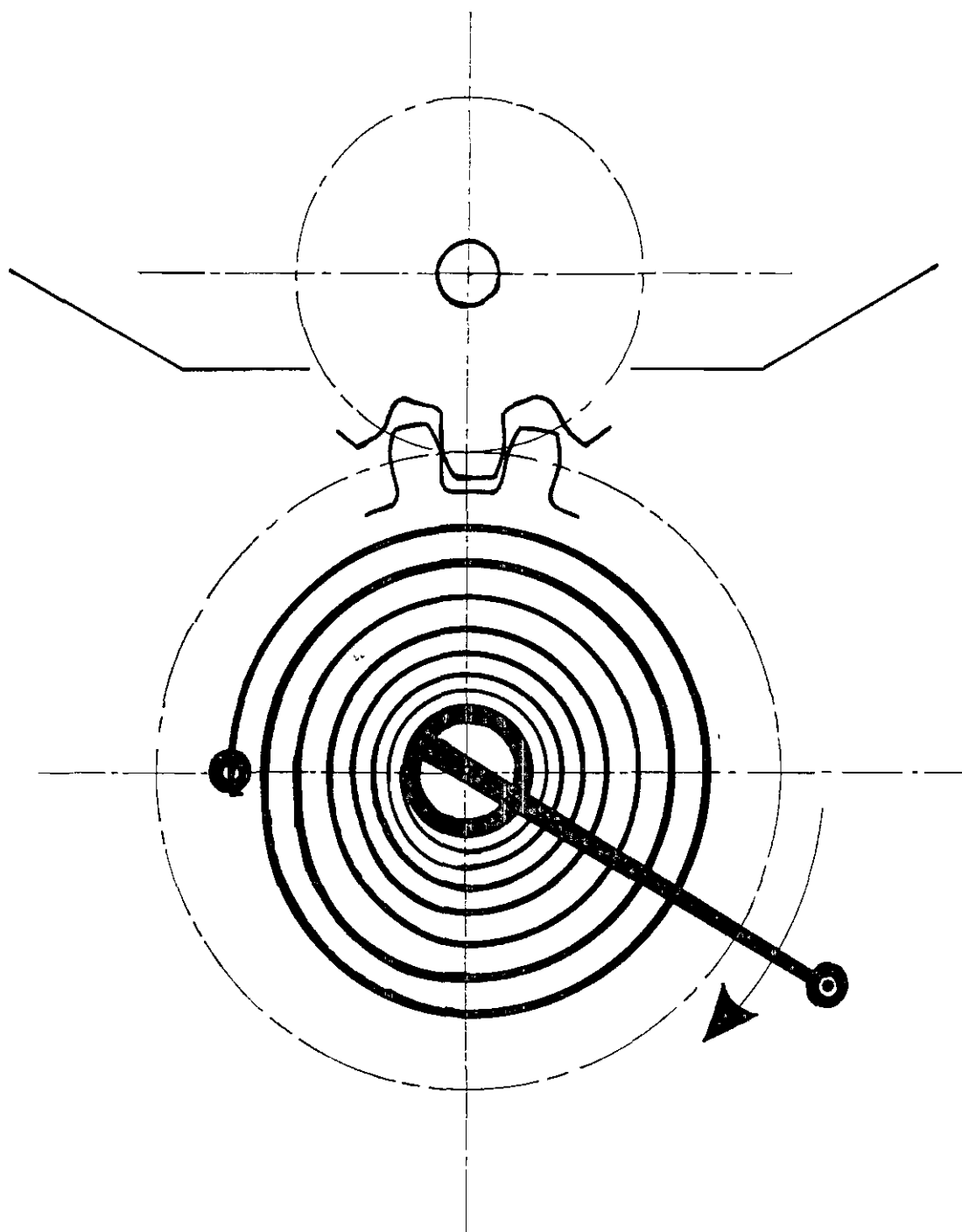


Fig. 13

L'intérêt de ce dispositif est que le liquide étant très peu compressible sous l'effet d'une surcharge tendant à modifier la vitesse de rotation, les vérins se bloquent et la vitesse ne variera que si cette surcharge est maintenue pendant un temps assez long. C'est ce dispositif que nous adopterons.

## 2) Calculs. (fig. 15)

### 1) Calcul de la course du piston du vérin.

La course du piston est:  $c = 2*x*\sin(\pi/4) = 1.414*x$

Nous prendrons  $L = 2.5*c$  .

La charge critique de flambement est  $F_{cr} = \frac{E d^4}{64*(\xi*L)^2 * F_s}$

on prend  $F_s = 5$  (valeur courante en flambement) et  $E = 200$  GPa;

on trouve :

$$F_{cr} = \frac{6168,5*d^4}{L^2} = \frac{493,5*d^4}{X^2}.$$

= coefficient d'élanement

= 1 pour un vérin articulé aux deux extrémités.

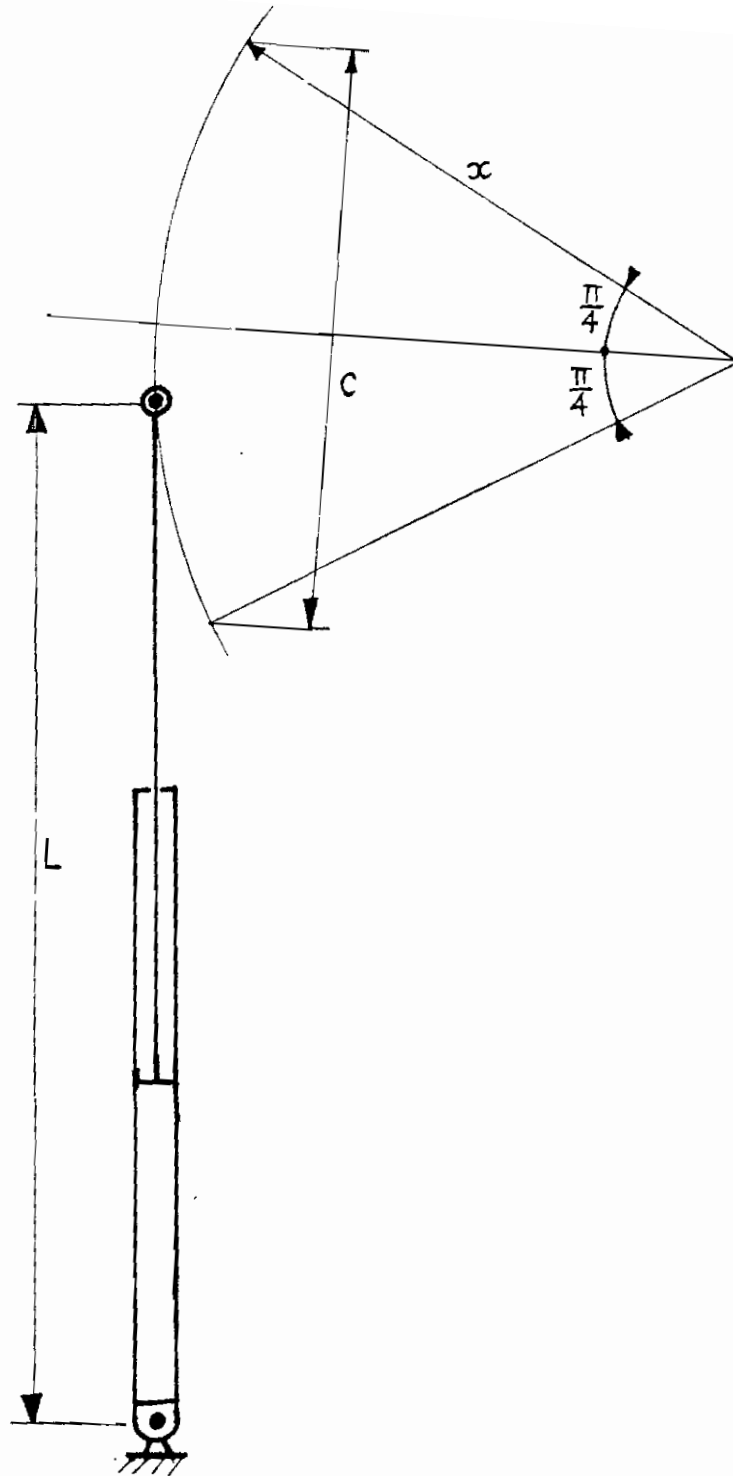


Fig. 15

$$F_{cr} = 4 * F_{max} = \frac{4 * 98754,90}{x} \implies$$

$$\frac{493,5 * d^4}{x^2} = \frac{4 * 98754,9}{x} \implies \frac{d^4}{x} = 800,44$$

$$x = \frac{d^4}{800,44}$$

Nous prendrons  $x = 500$  mm soit  $d = 25$  mm. On trouve alors

$$F_{max} = 197,51 \text{ N} \quad \text{et} \quad L = 1767,77 \text{ mm} .$$

## 2) Calcul du cylindre.

L'épaisseur de la paroi du cylindre est donné par la formule :

$$w = \left( \frac{F}{\pi * p} \right)^{0.5} * \left[ \frac{\left( \frac{S_y}{F_s} + p \right)^{0.5}}{\left( \frac{S_y}{F_s} - p \right)^{0.5}} - 1 \right]$$

En fixant le diamètre intérieur du cylindre à 35 mm, on aura une

$$\text{pression:} \quad P_{max} = \frac{4 F_{max}}{\delta * d^2 / 4} = \frac{16 F_{max}}{\delta * d^2} = 0,821 \text{ MPa}$$

on trouve alors  $w = 0.1443$  mm.

Toutes les valeurs commerciales conviendront donc.

3) Calcul de la vitesse du piston.

$$v = \Omega * x = 0,036 \text{ m/s}$$

Les pertes de charges étant proportionnelles à  $v^2$ , on peut les négliger.

4) Calcul du volume de l'accumulateur.

Le volume de fluide nécessaire aux vérins est

$$V_x = 2 * ((\pi * d^2 / 4) * 1.25 * x) = 1,2026 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

La pression minimale est  $P_{\min} = (1/4) * P_{\max}$

$$P_{\min} = 0,205 \text{ MPa} \quad (\text{pression minimale dans le vérin})$$

$$P_{\max} = 0,821 \text{ MPa}$$

$$P_a = 0,9 * P_{\min} = 0,184725 \text{ MPa} \quad (\text{pression minimale dans l'accumulateur}).$$

Le volume minimal de l'accumulateur est donné par la formule

$$V_a = \frac{V_x * (P_{\min}/P_a)^{1/\Gamma}}{1 - (P_{\min}/P_{\max})^{1/\Gamma}}.$$

Etant données la faible pression de travail et la décharge relativement lente de l'accumulateur, nous supposerons une décharge isotherme, ce qui fixe  $\Gamma = 1$ .

On a alors :

$$V_a = 1,781 \text{ litres.}$$

Nous prendrons  $V_a = 3$  litres.

## **5 - DIMENSIONNEMENT DU DISPOSITIF DE STOCKAGE.**

Pour limiter les pertes, le design sera fait pour que l'absorbeur stocke 75 % de l'énergie.

Dans un premier temps, nous supposerons qu'après utilisation nous retournons à la température de 100°C (cette hypothèse conduit à un sous dimensionnement), soit  $T_i = 100^\circ\text{C}$  (373°K).

Au démarrage  $T_i = 20^\circ\text{C}$ , mais au cours des cycles stockage et d'utilisation  $T_i$  tiendra à se stabiliser dans un intervalle de températures qui pourra être précisé lors de l'expérimentation.

Le fonctionnement du dispositif lors des puisages ou du stockage est en régime transitoire. Il serait difficile de dimensionner à partir de cette hypothèse. Aussi dans un premier temps, nous supposerons un régime permanent avec comme

hypothèses :

- 1) On néglige les serpentins d'eau chaude.
- 2) On suppose qu'à toute température les surfaces sont en contact intime, donc on néglige les résistances de contact.
- 3) On néglige l'effet de la dilatation.
- 5) On supposera valable le calcul au milieu des parois.

Les calculs porteront sur une seule paroi pour des raisons de symétrie.

On prendra  $S = S_2$  et  $R = 0$  pour simplifier. On a :

$$R_{\text{eq}} = \frac{l_1}{k_1 * S_2} + \frac{l_2}{k_2 * S_2} + \frac{1}{h * S_2} \quad (\text{fig. 16})$$

On fixe  $T_2$  à  $40^\circ\text{C}$  et  $T_1 = 500^\circ\text{C}$ .

$S_2$  est déterminée par le fait que le milieu intermédiaire stocke 25 % de l'énergie :

$$0,25 * Q_{\text{abs}} = l_2 * Cp_2 * V_2 * (T_2 - T_i)$$



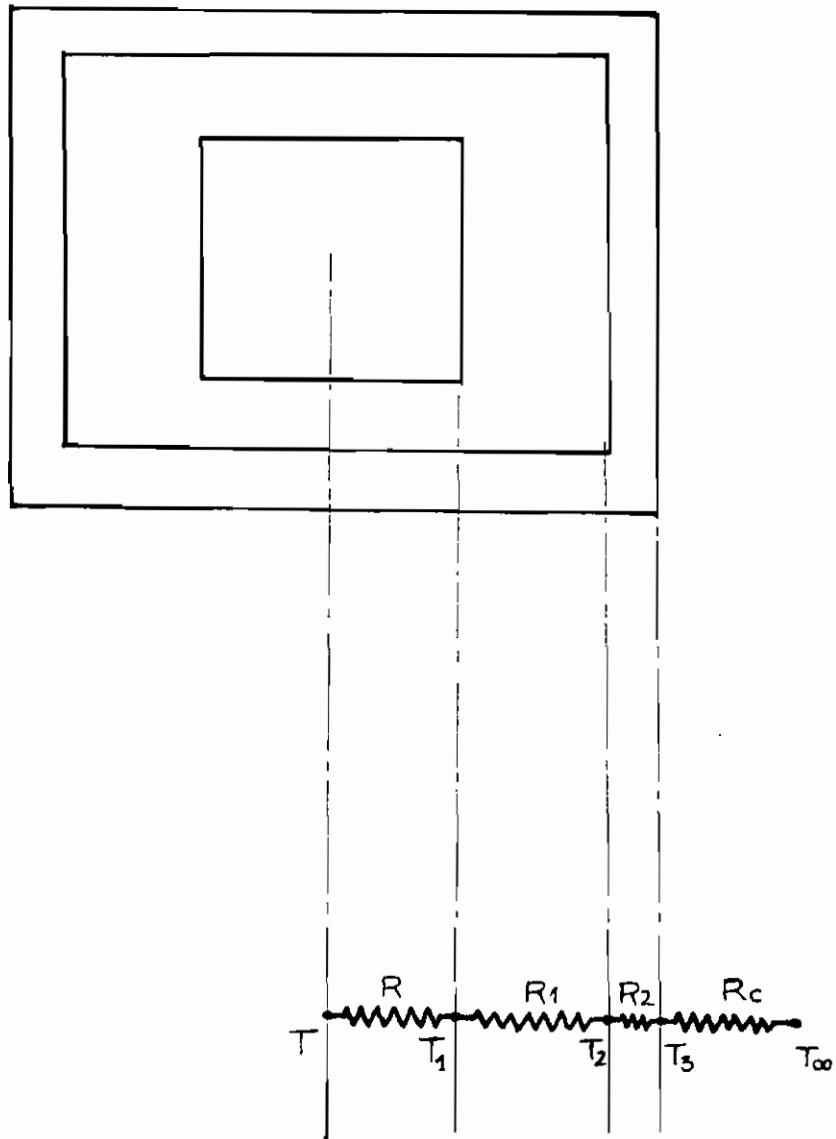


Fig. 16

$$T_2 = T_{\text{moyenne}} = \frac{500 + T}{2}$$

$$V_2 = \frac{0,25 * Q_{\text{abs}}}{l_2 * Cp_2 * (T_2 - T_i)}$$

$$S_2 = (V_2)^{2/3} = \left[ \frac{0,25 Q_{\text{abs}}}{l_2 Cp_2 (T_2 - T_i)} \right]^{2/3}$$

On en tire

$$\Phi = \frac{T_1 - T}{\frac{1}{h * S_2}} = h * S_2 * (T_1 - T)$$

$$\text{et } l_1 = \frac{k_1 * S_2 * (T'_2 - T_1)}{\Phi}$$

On doit avoir  $Q_{\text{abs}} = 3,3 \text{ kwh} = 11,88 \text{ MJ}$ .

$T = T_{\text{espérée}} = 3095\text{K} = 2822^\circ\text{C}$ .

Le volume de l'absorbeur est donc

$$V_{\text{abs}} = \frac{Q_{\text{abs}} \times 0,75}{\int_{\text{abs}} *Cp*(T - T_i)}$$

$$= \frac{3,3.3600.10^3 \times 0,75}{2800 \times (1,05 + 2500 \times 0,0003) \times (2500)}$$

$$= 0,0007366 \text{ m}^3 ; \text{ ce qui donne}$$

$$l = 0,0903 \text{ m} \approx 10 \text{ cm}$$

Le coeur étant à 2822°C et la périphérie à beaucoup moins, nous prendrons une plus grande dimension soit 15 cm.

La masse de l'absorbeur est alors :  $m_{\text{abs}} = 9.5 \text{ kg}$ .

$$V_2 = \frac{0,25 \times 3,3.3600.10^3}{1400 \times (1500 - 100) \times 1,976} = 0,766.10^{-3} \text{ m}^3$$

$$V_2 = V'_2 - V_{\text{absorbeur}} = V'_2 - 0,003375 \implies$$

$$V'_2 = 0,76945 \implies S_2 = 0,02578 \text{ m}^2$$

$$l_2 = 16 - 15 = 1 \text{ cm}$$

Calculons  $l_2$  pour avoir  $T_2 = 500^\circ\text{C}$

On pose  $S_2 = 2*S = 2 * 0,15^2 = 0,045\text{m}^2$ , on aura

$$\text{avec } h = 8 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}.$$

$$\phi = (T_1 - T_\infty) * 0,0045 * 10 = 10 \text{ W (valeur estimée)}.$$

$$l_2 = \frac{k_2 S_2 (T' - T'_2)}{\phi} = \frac{1,95 \cdot 0,045 \times (2500 - 500)}{10} = 18 \text{ cm.}$$

$$l_1 = \frac{k_1 S_2 (500 - 40)}{10} = \frac{0,058 \times 0,045 \times 460}{10}$$

$$= 0,1 \text{ cm}$$

Nous prendrons  $l_1 = 2 \text{ cm}$ ,  $l_2 = 20 \text{ cm}$

#### 7 - ETUDE EN REGIME TRANSITOIRE. (fig. 17)

Ce qui importe dans cette étude est l'ordre de grandeur des températures car l'exactitude dans les propriétés des matériaux utilisés étant très relative, elle ne justifierait pas des calculs trop poussés. Nous considérerons donc qu'on est en présence d'un mur plan et nous n'étudierons que la variation transversale des températures. L'équation générale de la chaleur s'écrit:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Dans notre cas il n'y a pas génération interne d'énergie et seule la variation transversale des températures nous intéresse.

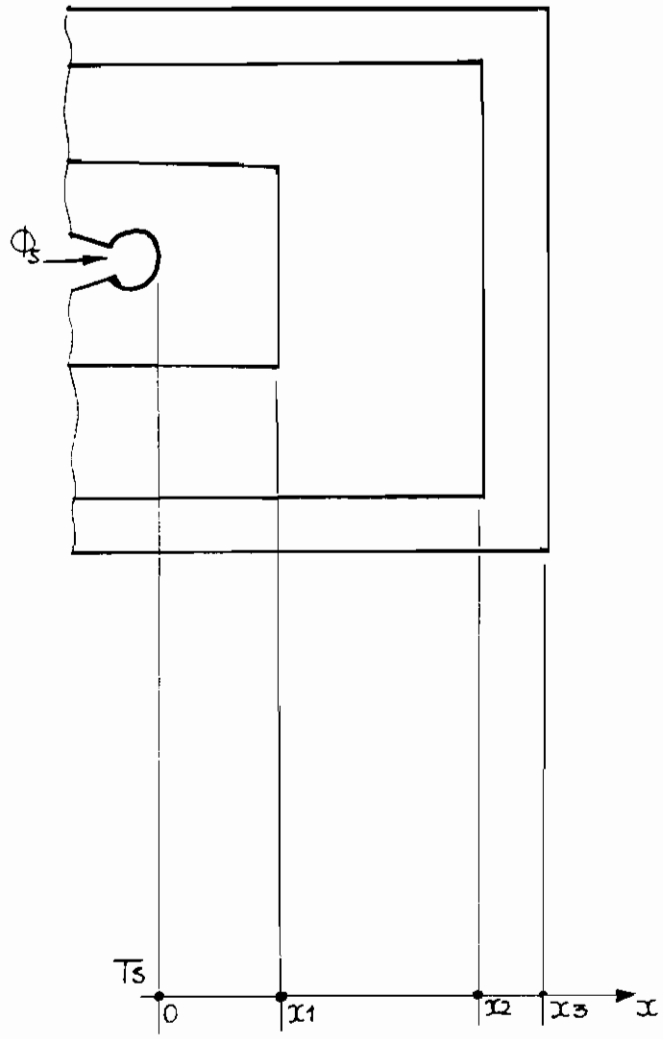


Fig. 17

Nous réécrivons l'équation (1) sous la forme

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Avec les conditions aux limites :

(11) Flux constant en surface :  $q_0$  .

(12) Température constante en surface, imposée par la loi de Boltzman :  $q_0 = \sigma T_s^4$

(13) Et la condition initiale  $T(x,0) = T_i$ .

La condition (11) s'écrit :  $-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \sigma \varepsilon T^4(x,t) \Big|_{x=0}$

Avec ces conditions initiales et limites, la résolution de (1) devient très complexe . Par contre le cas du flux constant surface et de la température constante en surface sont traités et donnent les résultats suivants :

-Température surfacique constante:

$$T(x,t) = T_s - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right) .$$

-Flux surfacique constant:

$$T(x,t) = T_i + \frac{2q_0}{k} \sqrt{\frac{\alpha t}{\pi}} \exp \left( -\frac{x^2}{4\alpha t} \right) - \frac{q_0 x}{k} \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right) .$$

La superposition de ces deux cas nous permettra de résoudre notre problème en appliquant des coefficients de manière à satisfaire la condition  $T_s = T_{\text{espérée}}$ .

## TEMPERATURES OBTENUES PAR LE CALCUL

Durée d'exposition ( heures )

X	1	2	3	4	5	6
0.0000	2822.0	2822.0	2822.0	2822.0	2822.0	2822.0
0.0075	2761.0	2779.2	2787.2	2791.9	2795.1	2797.5
0.0150	2686.7	2729.5	2747.7	2758.3	2765.4	2770.6
0.0225	2599.5	2672.9	2703.5	2721.1	2732.8	2741.3
0.0300	2499.8	2609.6	2654.7	2680.4	2697.4	2709.6
0.0375	2388.7	2539.9	2601.4	2636.2	2659.1	2675.6
0.0450	2267.3	2463.9	2543.7	2588.7	2618.1	2639.2
0.0525	2136.8	2382.1	2481.8	2537.8	2574.4	2600.5
0.0600	1998.8	2294.9	2415.9	2483.8	2528.1	2559.6
0.0675	1855.0	2202.8	2346.1	2426.7	2479.2	2516.5
0.0750	1706.9	2106.3	2272.8	2366.6	2427.8	2471.3
0.0750	1706.9	2106.3	2272.8	2366.6	2427.8	2471.3
0.0950	1464.1	1941.9	2146.9	2263.3	2339.3	2393.4
0.1150	1226.9	1767.6	2010.4	2150.2	2242.2	2307.9
0.1350	1009.4	1590.1	1866.9	2029.8	2138.0	2215.7
0.1550	820.9	1415.7	1720.1	1904.3	2028.4	2118.2
0.1750	665.5	1249.9	1573.6	1776.2	1915.0	2016.5
0.1950	542.6	1096.7	1430.8	1647.9	1799.7	1912.1
0.2150	448.8	959.1	1294.5	1521.6	1684.2	1806.3
0.2350	378.8	838.6	1166.9	1399.4	1570.2	1700.4
0.2550	327.1	735.3	1049.6	1282.8	1458.9	1595.7
0.2750	288.7	648.5	943.6	1173.2	1351.8	1493.2
0.2758	288.7	648.5	943.6	1173.2	1351.8	1493.2
0.2766	100.0	100.0	511.4	819.1	1048.3	1225.4
0.2774	100.0	100.0	100.0	464.4	744.3	957.2
0.2782	100.0	100.0	100.0	109.4	440.0	688.8
0.2790	100.0	100.0	100.0	100.0	135.3	420.0

**8 - DIMENSIONNEMENT DU CIRCUIT D'EAU CHAUDE. (fig. 18)**

$$R_p = \frac{1}{2\pi k} * \ln \frac{D_2}{D_1}$$

$$R_i = 1/(h_i * S)$$

$$R = R_p + R_i$$

$$\frac{dQ}{dx} = \frac{Te - Ti}{R} = (dm/dt) * Cp.$$

En remplaçant  $R_p$  et  $R_i$  par leurs valeurs, on trouve

$$\frac{dT_i}{Te - T_i} = \frac{dx}{\left( \frac{1}{h_i * \pi * D_1} + \frac{1}{2 * \pi * k} * \ln \frac{D_2}{D_1} \right) * (dm/dt) * Cp}$$

A  $x = 0$ ,  $T_i = T_a$ . L'intégration entre 0 et  $x$  donne :

$$Te - T_i(x) = \exp \left( - \frac{x}{R * (dm/dt) * Cp} + \ln (Te - T_a) \right)$$

**Calcul de  $h_i$ .**

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\mu}$$

$$Pr = \frac{\rho * \tilde{h} * Cp}{k}$$



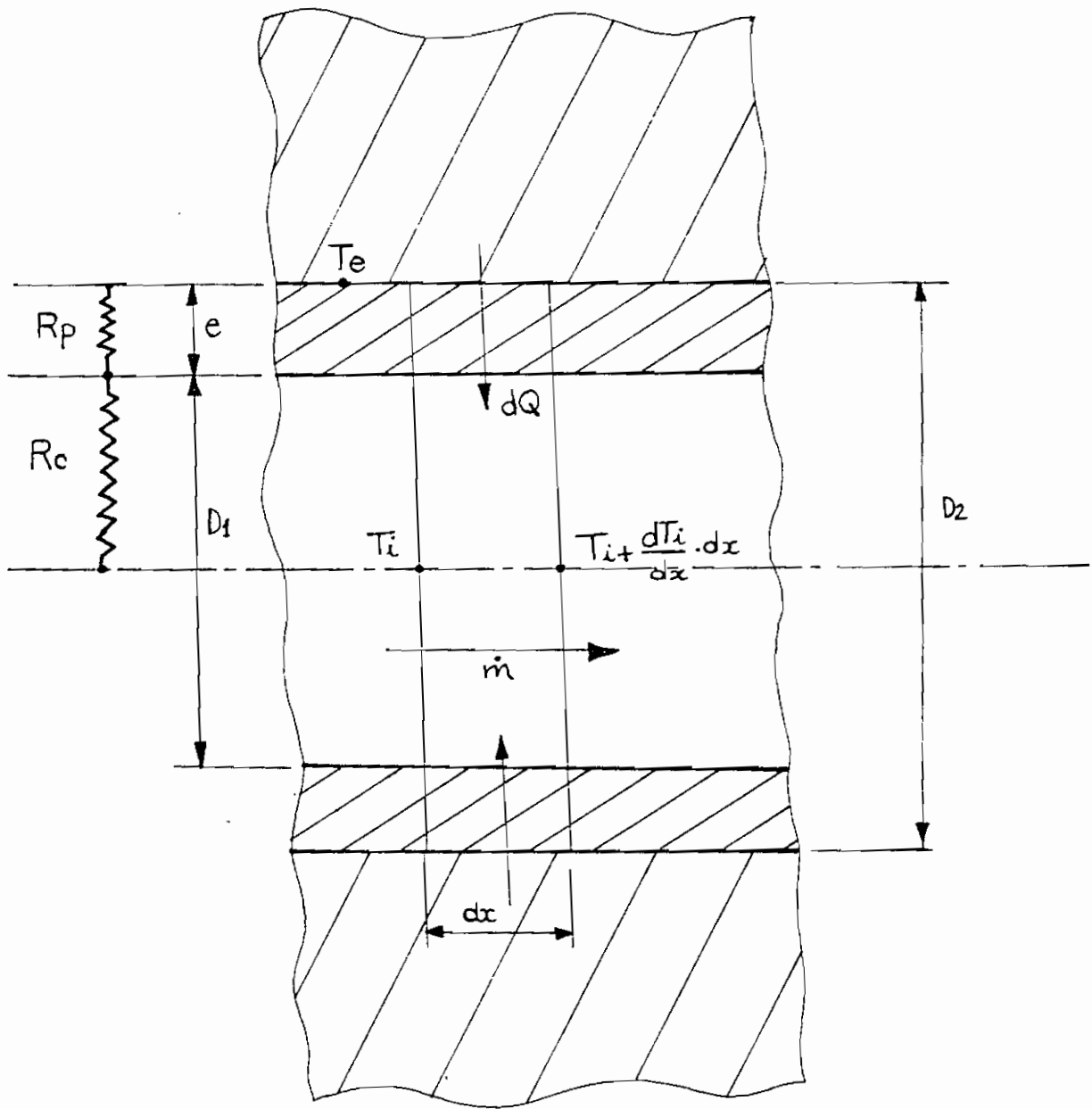


Fig. 18 .

Pour une tranche de températures comprises entre 20°C et 100°C

$$\rho \approx 970 \text{ kg/m}^3 ; \quad C_p \approx 4 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} ; \quad \eta \approx 0.007 \text{ cst} ; \quad k \approx 6.5 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$Pr \approx 4,3 .$$

Avec une vitesse de 25 m/s et  $D_i = 100 \text{ mm}$  , on a  $Re = 3462.5$  .

On est donc à la limite entre un régime laminaire et un régime turbulent . On étudiera les deux cas:

- Régime laminaire.

$$Nu = 0.332 \cdot Pr^{1/3} \cdot Re^{1/2} = 31.76 .$$

$$Nu = h_i \cdot D_i / k \implies h_i = 20649 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} .$$

- Régime turbulent.

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} = 27.96 ,$$

$$\text{ce qui donne } h_i = 18178 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} .$$

Nous prendrons le cas le plus défavorable, soit  $h_i = 18178 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ .

En choisissant l'acier inox pour le serpentín , on pour  $D_i = 10 \text{ mm}$

$$D_e = 12 \text{ mm} \text{ et } k \approx 30 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} .$$

$$\left(\frac{dm}{dt}\right) = \rho \cdot v \cdot \pi \cdot D_i^2 / 4 = 0.19 \text{ kg/s}$$

$$\ln(T_e - T_i(x)) = -0.48406 \cdot x + \ln(T_e - T_a) \text{ qui s'écrit encore}$$

$$\frac{T_e - T_i(x)}{T_e - T_a} = \exp(-0.48406 \cdot x)$$

Pour ne pas trop perturber le champ de températures , nous espaçerons les tubes de 30 mm et nous les placerons à 50mm des parois externes . Ceci nous donne une longueur de 900mm .

Avec à la sortie  $T(1) = 100^{\circ}\text{C}$  et à l'entrée  $T_a = 20^{\circ}\text{C}$  , on trouve  $T_e = 319.8^{\circ}\text{C}$  .

Nous mettrons le serpentin à une profondeur de 25.5 cm du centre.

## **9 - ETUDE DE L'INSTALLATION EXPERIMENTALE.**

Pour satisfaire aux exigences du dispositif de stockage, l'installation doit avoir la configuration suivante (fig.20) . Cette configuration serait très satisfaisante. Mais sur le plan théorique elle nécessiterait des calculs très précis pour le guidage du miroir M3 devant permettre à tout instant d'avoir un faisceau horizontal. Ce type de précision, très difficile à obtenir dans la pratique sera réservée pour une étude plus poussée.

Le dispositif expérimental devant permettre l'étude et la mise au point du système sera une forme simplifiée de la deuxième configuration et consistera en un stockage fixe.

Il se compose de 2 parties :

- Une partie motrice constituée de
  - 2 verins
  - 2 accumulateur oléopneumatique
  - 1 pompe à pied ou un compresseur.
- Une partie stockage et utilisation. (fig. 21).

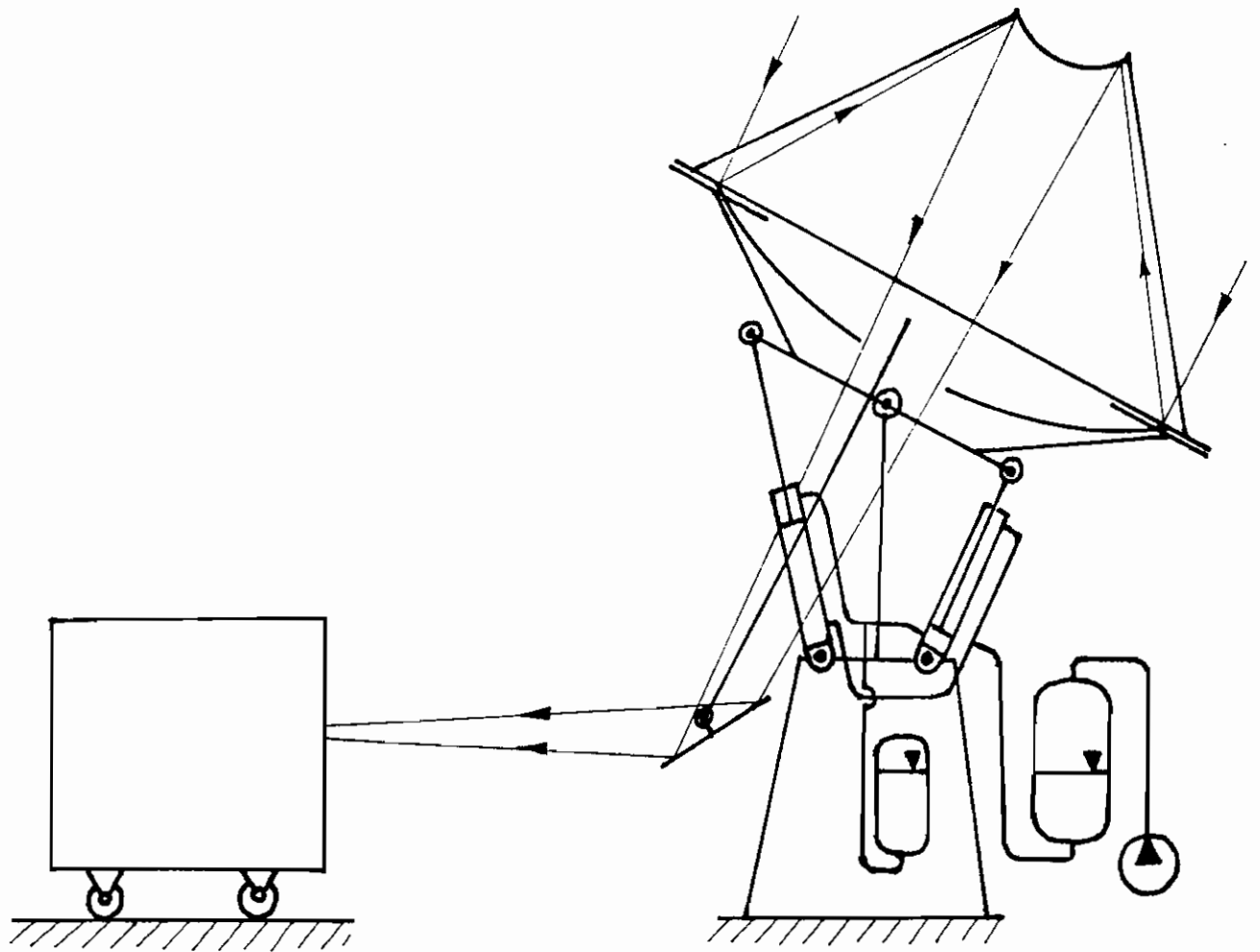


Fig. 20

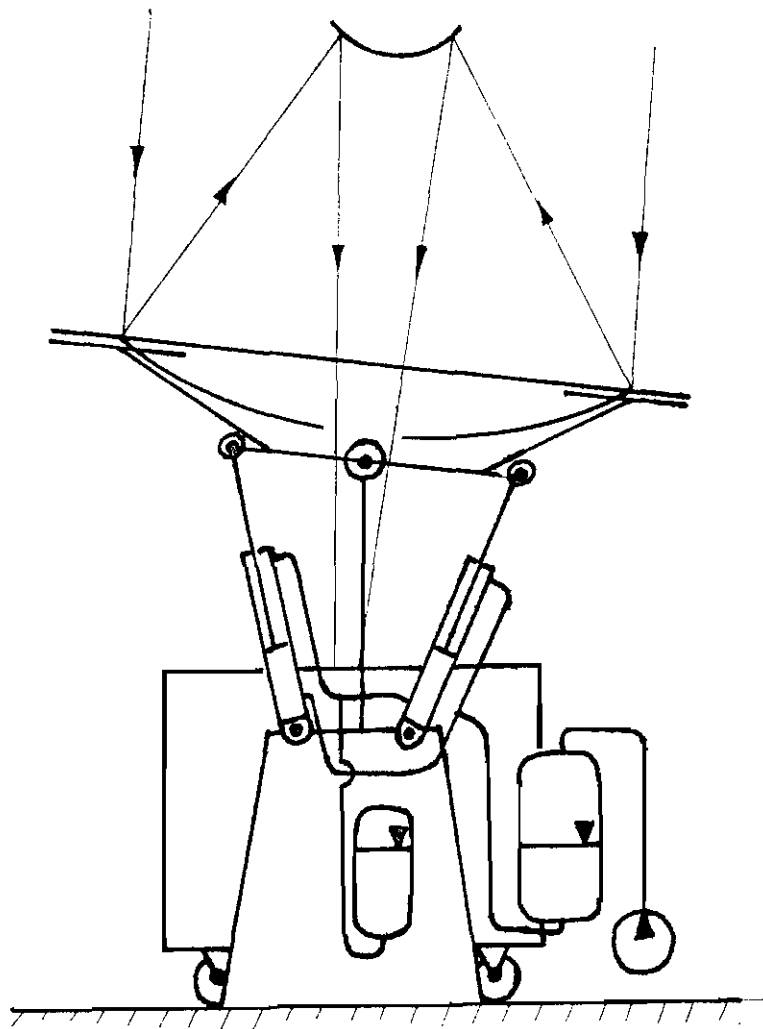


Fig. 21

10 - VUE D'ENSEMBLE DE L'INSTALLATION EXPERIMENTALE. ( fig. 22)

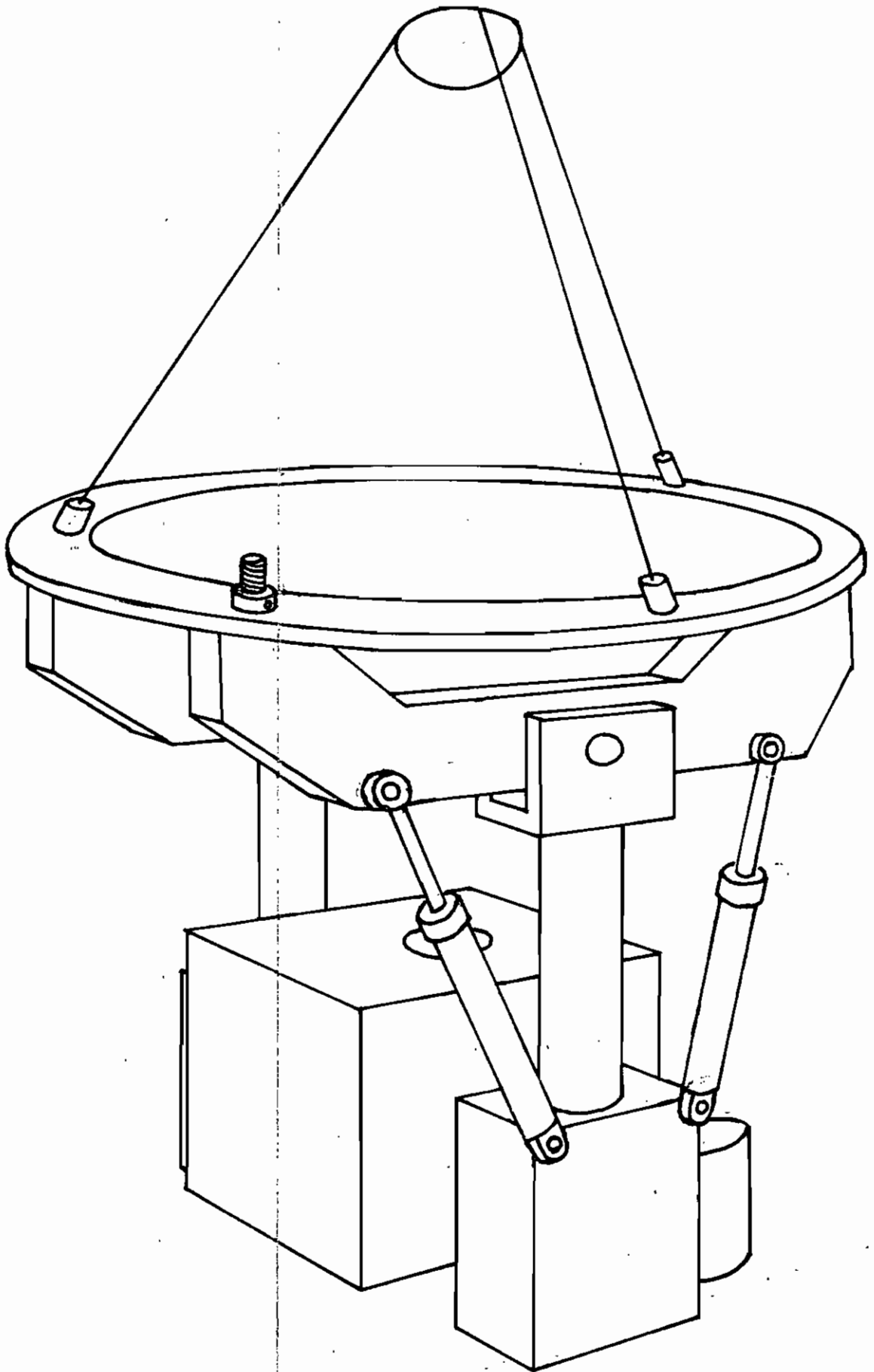


Fig 22



### CONCLUSION.

Au terme de cette étude, nous tenons à attirer l'attention sur trois points qui ont été nos principaux guides , ce sont :

- Des dispositifs à mise en oeuvre simple.
- Des méthodes de calcul simples.
- Des matériaux courants.

Ils nous ont été dictés par nos objectifs qui étaient de trouver un dispositif simple, accessible à tous. Une petite réserve s'impose cependant. Elle est relative au dispositif de suivi dont les coûts peuvent sembler élevés. Nous tenons à préciser que son désign a été fait pour l'installation expérimentale et que ce n'est qu'à la suite de l'expérimentation que le modèle pourra être optimisé . On aura alors une connaissance plus précise du champ de température, et de ses variation lors des différentes phases puisage et stockage, des efforts réels sollicitant le dispositif et du comportement des matériaux utilisés.

Le rendement qui a été pris arbitrairement égal à 75% dans les calculs constitue à nos yeux une estimation pessimiste; parce que le rendement du concentrateur est de 88.5% et qu'il suffit de bien isoler pour rendre négligeable les déperditions.

La simplicité de l'installation qui constitue un gage pour la réussite de ce projet qui nous l'espérons bénéficiera d'un financement adéquat pour sa réalisation.

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.**

Basic Heat Transfer, par Frank Kreith ( éd. Harper et Row ) .

Problèmes de Transfer de Chaleur , par E. Krasnochtchékov  
( éd. MIR ).

Les Hautes Températures, par G. Chaudron ( Masson éd. ).

Transmission de la Chaleur, par E. de Vriendt  
( Presses Polytechniques Romandes ) .