

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

4/79

U. S. T. A.

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DÉPARTEMENT MÉCANIQUE

24

PROJET DE FIN D'ÉTUDES

ÉTUDE ET RÉALISATION DE DEUX TYPES DE CUISEURS SOLAIRES

Proposé par Mr Mustapha BOUHADEF

Directeur de la S.E.S. de Bouzaréah - Alger

Suivi par Mrs :

M. BOUHADEF

J. P. MILLET

Étudié par :

Ahfaïed BENSANAH ✓

Larbi GHEROUAT

J. Christophe NOSY-HARINONY



JUIN 1979



REMERCIEMENTS

Nous tenons, ici, à transmettre notre vif respect et nos sincères remerciements à Monsieur Mustapha BOUHAFEF, Directeur de la station de l'énergie solaire, pour :

- nous avoir mis sur ce travail ,
- avoir mis à notre disposition tout le potentiel matériel de la station, .
- et surtout pour ses multiples et précieux conseils.

Nous remercions également les professeurs de l'ENP, particulièrement ceux avec qui nous avons eu une entrevue sur ce sujet.

Nos remerciements vont aussi à tout le personnel de la station solaire.

Bensanah - Gherouat - Nosy-Harinony

A:

Monsieur MILLET pour avoir accepte d'être
notre promoteur à l'école.

-Monsieur DIMITROV president du Jury.

-Monsieur DOBRE membre du Jury.

-Monsieur BARDOKINE membre du Jury.

-Nous transmettons toute notre reconnaissance.

BENSANAH. GHEROUAT. NOSY-HARINONY.

T A B L E D E S M A T I E R E S

Préface

Résumé

PREMIERE PARTIE : INTRODUCTION

Chapitre 1 - RAPPELS D'ASTRONOMIE

1.1 Généralités.

1.2 Quelques définitions se rapportant aux coordonnées angulaires du soleil.

1.2.1 Déclinaison solaire

1.2.2 Angle horaire AH

1.2.3 Repérage du soleil : hauteur h

1.2.4 Azimut du soleil : a.

Chapitre 2 - RAYONNEMENT SOLAIRE

2.1 Constante solaire

2.2 Influence de l'atmosphère.

2.3 Rayonnement solaire au sol.

2.4 Appareils de mesure.

2.4.1 Les héliographes.

2.4.2 Les pyréliomètres.

2.4.3 Les pyranomètres.

Chapitre 3. RAPPELS SUR LA TRANSMISSION DE CHALEUR

3.1 Transmission de chaleur par conductibilité.

3.1.1 Conduction dans un mur plan.

3.1.2 Conduction dans des parois planes accolées.

3.1.3 Conduction d'un cylindre.

3.1.4 Conduction des parois cylindriques accolées.

3.2 Transmission de chaleur par convection.

3.2.1 Loi de Newton.

3.2.2 Exemple de calcul de h.

3.3 Transmission de chaleur par convection et conduction.

3.3.1 Mur plan séparant 2 fluides.

3.3.2 Mur cylindrique séparant 2 fluides.

3.4 Transmission de chaleur par rayonnement.

3.4.1 Loi de Stefan-Boltzmann.

3.4.2 Absorption, réflexion, transmission d'un corps quelconque.

3.4.3 Rayonnement réciproque entre deux plans parallèles.

3.4.4 Rayonnement réciproque entre un plan et une masse gazeuse.

3.4.5 Coefficient d'échange par rayonnement entre une surface et une masse gazeuse.

3.4.6 Coefficient d'échange par convection et rayonnement.

3.5 Protection contre le rayonnement. Effet écran.

Chapitre 4. APPLICATIONS THERMIQUES DE L'ENERGIE SOLAIRE

4.1 Principe de la transformation énergie solaire - énergie thermique.

4.2 Niveau d'énergie - Niveau de température.

4.3 Paramètres et caractéristiques de fonctionnement des capteurs solaires.

4.3.1 Paramètres externes.

4.3.2 Paramètres internes.

4.3.3 Caractéristiques de fonctionnement.

4.4. Applications à basses températures.

4.4.1 Chauffage des habitations.

4.4.2 Distillation solaire.

4.5 Application à moyennes et hautes températures.

4.5.1 Nécessité de la construction.

4.5.2 Facteurs de concentration.

4.5.3 Rappel de quelques notions fondamentales d'optique géométrique.

- a) Loi de Descartes relatives à la réflexion
 - b) Stigmatisme (cas du miroir sphérique).
 - c) construction géométrique de l'image d'un objet perpendiculaire à l'axe et situé à l'infini.
- 4.5.4 Exemples de concentrateur.
- 4.5.5 Les applications.

DEUXIEME PARTIE : ETUDE ET REALISATION D'UN CUISEUR SOLAIRE A CONCENTRATION DIRECTE.

Chapître 1 - DIMENSIONNEMENT.

- 1.1 Besoins énergétiques.
- 1.2 Rendements.
- 1.3 Surface de captage.
- 1.4 Distance focale.

Chapître 2 - REALISATION

- 2.1 Détermination de la portion de paraboloïde.
 - 2.1.1 Equation d'un plan perpendiculaire au plan tangent.
 - 2.1.2 Détermination d' l'intersection paraboloïde-plan P.
 - 2.1.3 Distance du point I au plan tangent.
 - 2.1.4 Calcul de tous les points d'intersection.
 - a) Equation du plan P_i
 - b) Distance du point I (j,i) au plan tangent.
- 2.2 Tracé des couples.
 - 2.2.1 Couple correspondant à une ligne.
 - 2.2.2 Couple correspondant à une colonne.
- 2.3 Découpage des couples.
- 2.4 Taille des encoches.
- 2.5 Assemblage des couples.
- 2.6 Rectification.
- 2.7 Détermination de la concentration.
 - 2.7.1 Détermination par la méthode graphique.
 - a) Expression de b.
 - b) Image du miroir plan.
 - 2.7.2 Détermination expérimentale.
- 2.8 Fabrication des capteurs et leur rapport.
- 2.9 Détermination de la surface exacte de captage.
 - 2.9.1 Méthode pour tracer la projection.
 - 2.9.2 Valeur de la surface de captage.

TROISIEME PARTIE : CUISEUR SOLAIRE AVEC FLUIDE CALOPORTEUR.

Chapître 1 - DIMENSIONNEMENT

- 1.1 Caractéristiques de l'installation.
 - 1.1.1 Bilan thermique au niveau de la zone focale.
 - 1.1.2 Bilan thermique au niveau de l'absorbeur.
 - 1.1.3 Bilan thermique du fluide caloporteur au niveau de la zone focale.
 - 1.1.4 Bilan thermique au niveau du réservoir.
 - 1.1.5 Equation de la circulation d'huile.
- 1.2 Calcul des besoins énergétiques.
 - 1.2.1 Besoin au niveau de la marmite
 - 1.2.2 Estimation des pertes.
 - a) pertes par rayonnement.
 - b) pertes par convection.
- 1.3 Evaluation du volume de stockage.
- 1.4 Calcul de la surface de captage.

Chapître 2 - REALISATION

- 2.1 Capteur.
 - 2.1.1 Détermination de la parabole.

- 2.1.2 Tracé des couples.
- 2.1.3 Découpage et perçage des couples.
- 2.1.4 Découpage des feuilles d'aluminium.
- 2.1.5 Fixation des feuilles d'aluminium.
- 2.2 Support.
- 2.3 Réservoir de stockage.
- 2.4 Vase d'expansion.
 - 2.4.1 Calcul du volume.
- 2.5 Circuit du fluide de caloporteur.
- 2.6 Montage de l'enveloppe.
- 2.7 Calorifugéage.
 - 2.7.1 Réservoir.
 - 2.7.2 Conduite.

Chapitre 3 - EXPERIENCES.

- 3.1 Avec cuiseur à concentration directe.
- 3.2 Avec cuiseur à fluide caloporteur.

P R E F A C E

Avec l'accroissement démographique, la surconsommation, le gaspillage, etc... Les besoins énergétiques de l'homme n'ont cessé de s'accroître. Certaines prévisions annoncent que ceux-ci vont doubler dans dix ans.

Ainsi donc, l'épuisement des réserves de pétrole, d'uranium, de gaz, etc... va se trouver accéléré au fil des ans. Longtemps déjà l'homme a compris qu'il faut tôt ou tard trouver d'autres sources d'énergies. C'est ainsi que des recherches ont vu le jour, suivi de quelques réalisations. Mais c'est l'année 1973 (crise énergétique) et l'augmentation des prix des hydrocarbures qui ont contribué énormément à porter un intérêt accru aux "Sources Nouvelles" d'énergie. L'une de ces sources est le soleil.

Le soleil a toujours été utilisé, que ce soit directement ou indirectement. Il constitue, bien entendu, une source d'énergie inépuisable.

Des centaines de milliers de réalisations à caractère solaire témoignent aujourd'hui que le soleil peut dans ces cas remplacer immédiatement complètement ou partiellement, certaines formes d'utilisation de l'énergie. Les cas des chauffe-eau et des pompes solaires sont connus de tous.

R E S U M E

Dans l'étude qui va suivre, nous allons nous intéresser et par suite réaliser deux types de cuisinières solaires. En réalité nous nous sommes proposés d'en réaliser trois.

Les deux premières ont le même principe de fonctionnement. Elles utilisent directement les rayons solaires, après leur concentration sur un foyer par un capteur paraboloidal. Ce qui va changer est la surface réfléchissante du paraboloidal, et leur support respectif.

La troisième cuisinière utilise des capteurs cylindro-paraboliques. Ici l'utilisation des rayons solaires sera pour chauffer un fluide caloporteur (huile dans notre cas) qui à son tour sera notre source de chaleur. Un réservoir de stockage est prévu pour cette dernière.

3

- 3 -

PREMIERE PARTIE

I N T R O D U C T I O N

Pour la compréhension de notre exposé nous avons jugé utile de faire quelques rappels sur l'astronomie et sur le rayonnement.

1 - RAPPELS D'ASTRONOMIE

1 - 1 - GENERALITES

Le soleil est une sphère gazeuse de 700.000 Km de rayon. Il n'est pas homogène et est constitué de trois parties différentes.

a) L'intérieur où des réactions nucléaires se produisent, et dont le rayonnement est totalement absorbé par les couches extérieures du soleil.

b) La photosphère : couronne d'environ 300 Km d'épaisseur et qui fournit presque la totalité du rayonnement que la terre reçoit.

c) La Chromosphère et la couronne solaire : régions les moins denses, ce qui explique la faiblesse de leur rayonnement.

La terre, elle aussi, est presque sphérique. Elle est aplatie aux deux pôles.

Elle tourne sur elle-même en 24 heures et autour du soleil en 365 jours. 5 heures, 48 mn, 46 s, suivant une trajectoire elliptique de faible excentricité.

Le plan contenant la trajectoire de la terre s'appelle plan de l'ecliptique. (voir fig. 1.1)

Régulièrement une hémisphère de la terre et son atmosphère est baignée dans le rayonnement émis par le soleil.

La distance moyenne séparant le soleil de la terre est de 149.450.000 Km.

Une personne sur le globe verrait le soleil sous un angle d'environ 1 degré.

1 - 2 QUELQUES DEFINITIONS SE RAPPORTANT AUX CORDONNEES ANGULAIRES DU SOLEIL

1 - 2 - 1 DECLINAISON SOLAIRE

La déclinaison du soleil qu'on désigne par δ , est l'angle fait par le plan de l'écliptique et le plan équatorial.

Voici deux formules qui servent à calculer δ . Elles ne sont qu'approximatives et ne peuvent servir à des calculs précis.

1ère formule :

$$\delta = 23,5 \sin \frac{360 d}{365}$$

où d = nombre de jours depuis l'équinoxe du printemps.

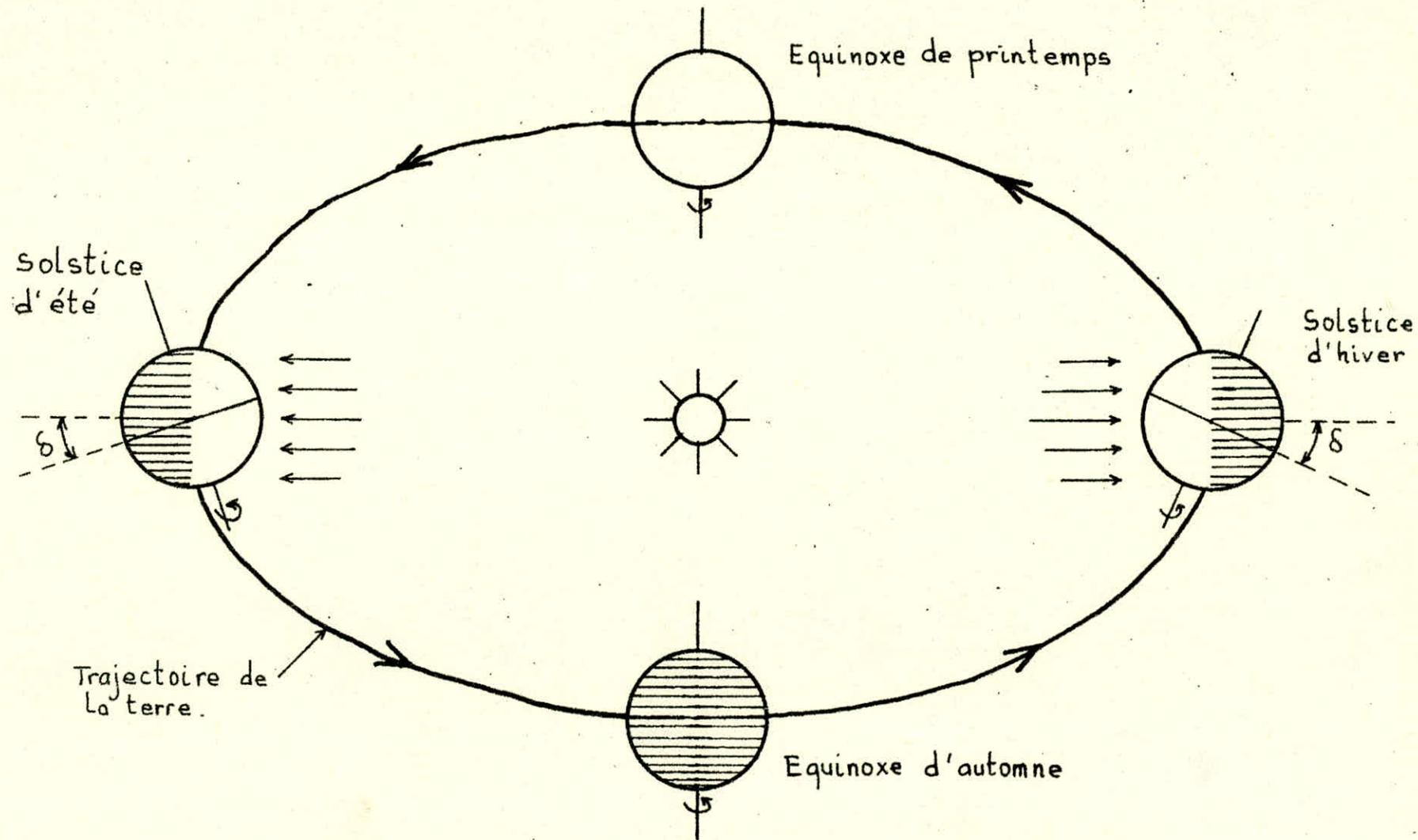


Fig 1-1

2ème formule :

$$\sin \delta = 0,4 \sin \frac{360}{365} N$$

où N = nombre de jours depuis le premier Janvier.

Voici quelques valeurs particulières :

$\delta =$	+	23° 27'	au solstice d'été	(22 Juin)
$\delta =$	-	23° 27'	au solstice d'hiver	(22 Décembre)
$\delta =$		0°	aux équinoxes de printemps	(21 Mars)
			et d'automne	(23 Septembre)

1 - 2 - 2 ANGLE HORAIRE AH

Nous avons vu que la terre tourne autour de son axe propre en 24 heures. Nous nous proposons maintenant de choisir une correspondance liant directement le temps (heures, minutes, secondes) à la position du soleil. L'angle horaire est un angle qui indique la rotation apparente du soleil autour de l'axe polaire : C'est l'angle fait entre le méridien passant par le centre du soleil et le méridien du lieu proprement dit.

Par convention AH = 0 quand il est midi temps solaire vrai.

$$- AH = \frac{360}{24} t \quad \begin{array}{l} \text{AH en degré} \\ \text{et } t \text{ en heure} \end{array}$$

La durée du jour solaire vrai varie avec les époques de l'année.

Nous obtenons le T S V à partir de la relation suivante :

$$\begin{array}{l} \text{TSV : temps universel} \\ \downarrow \\ \text{montres} \end{array} - N + \text{correction de longitude} + \text{correction du temps}$$

\downarrow (en mn) \downarrow (en mn)
 N° du fuseau
 N° 1 = 1 H
 N° 2 = 2 H

Pour la correction de longitude nous avons les correspondances suivantes :

1 heure de temps	=	15°	en angle horaire
1 minute -"-	=	15"	-"- -"
1 seconde -"-	=	15'''	-"- -"

d'autre part AH est positif du midi vrai au coucher, et négatif du lever au midi. ainsi donc nous avons :

$$\begin{array}{l} AH = 90^\circ \quad \text{à} \quad 18 \text{ H} \quad \text{TSV} \\ AH = -90^\circ \quad \text{à} \quad 06 \text{ H} \quad \text{TSV} \end{array}$$

pour la correction du temps, nous avons des graphes. (voir fig. 1.2)

1 - 2 - 3 REPERAGE DU SOLEIL : HAUTEUR H : (FIG. 1.3)

H indique la hauteur du soleil au dessus de l'horizon. On assimile $H = \widehat{mM}$ à l'angle mOM .

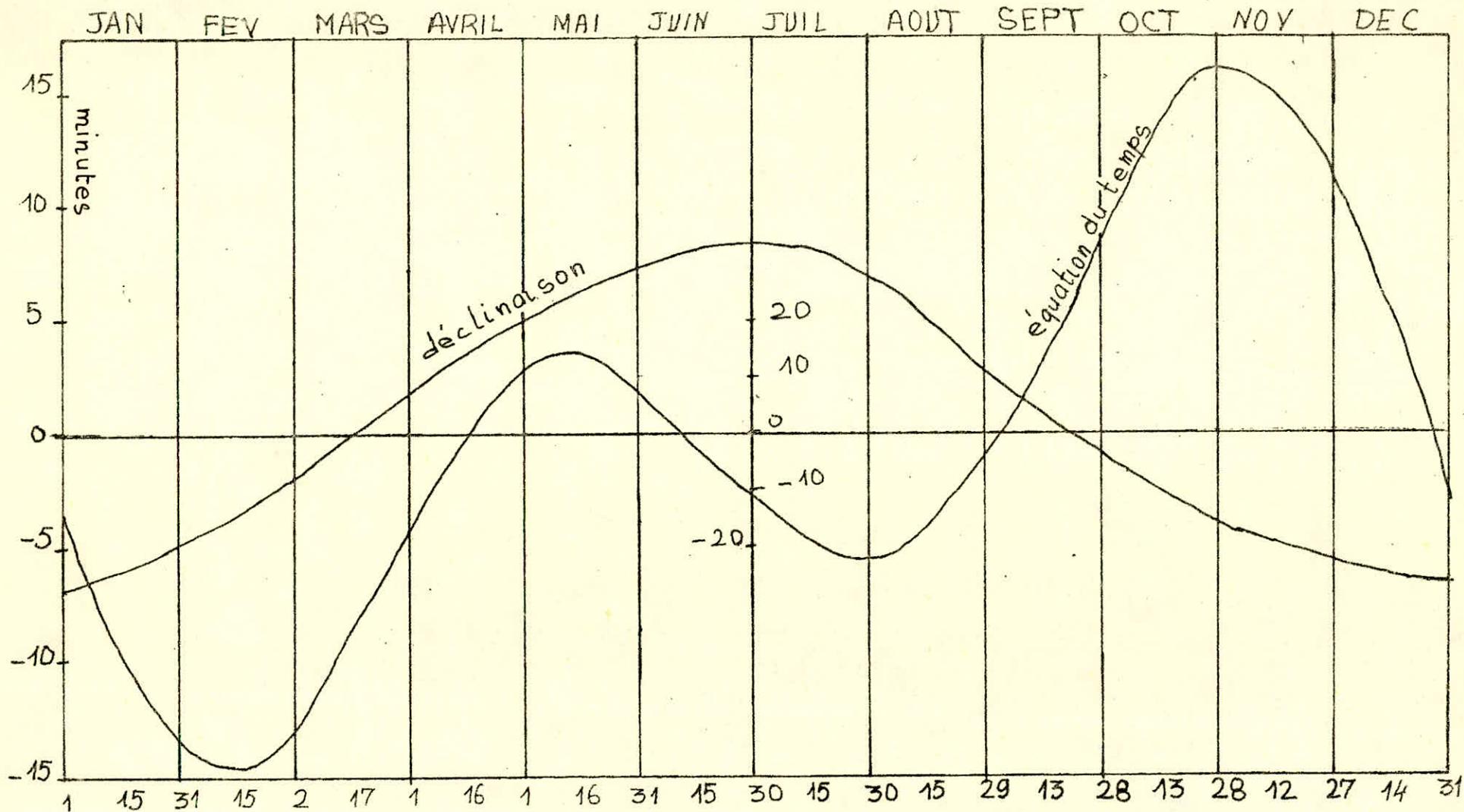


Fig 1-2. Equation du temps et variation de la déclinaison.

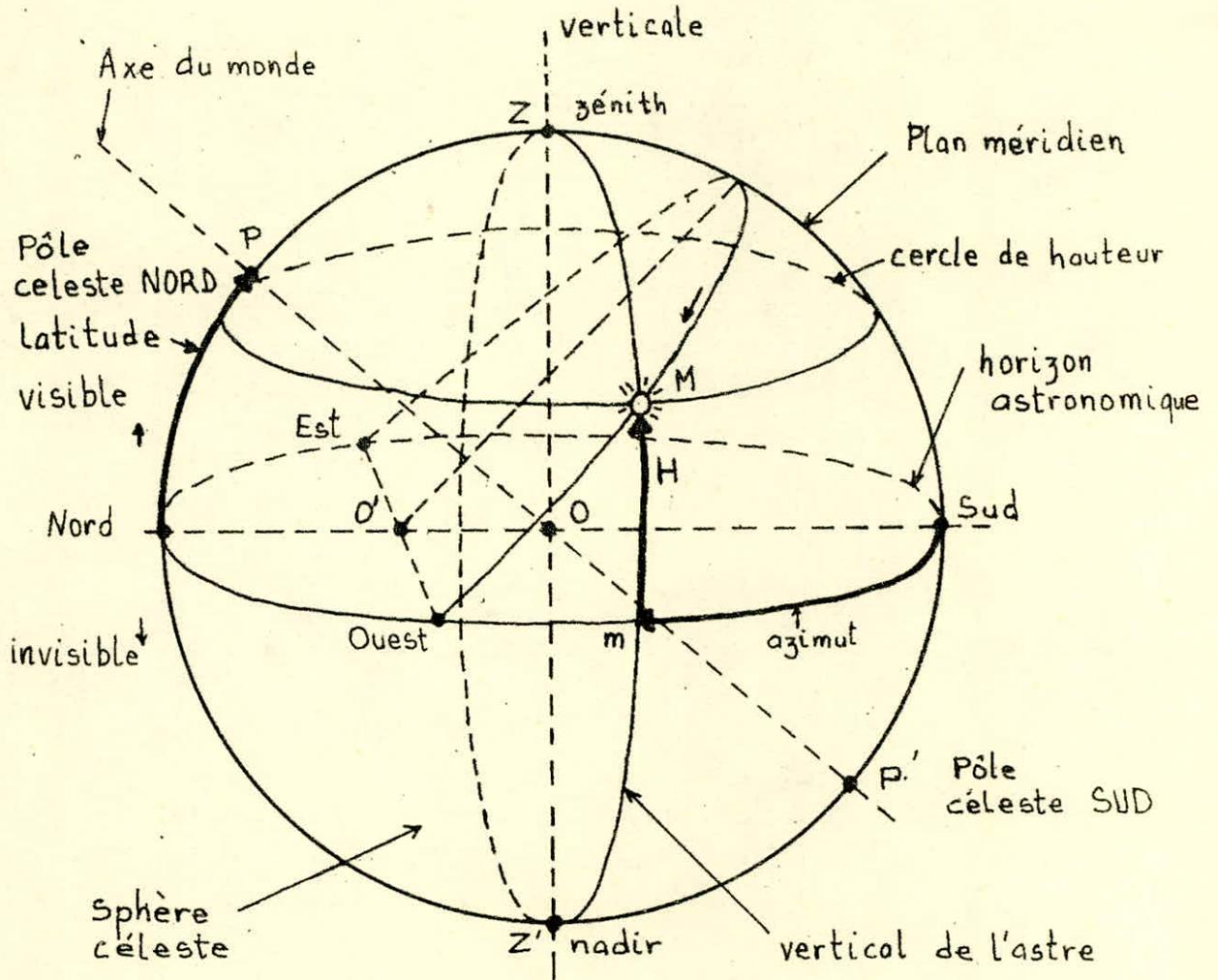


Fig 1-3. Repérage du Soleil

H = 0 à 90° vers le zenith

H = 0 à 90° vers le nadir

Le complément de l'angle H est appelé distance zenithale et on le désigne par Z.

$$Z + H = 90^\circ$$

H ou Z est donné par la formule suivante :

$$\sin H = \cos Z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos AH \cos \delta .$$

H = altitude ou hauteur du soleil en degré.

Z = distance zenithale du soleil en degré

ϕ = latitude du lieu

δ = déclinaison du soleil

AH = angle horaire

REMARQUES :

au lever on a H = 0

et au coucher on a H = 0

$$0 = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos AH \cos \delta .$$

$$\boxed{\cos AH = - \operatorname{tg} \phi \operatorname{tg} \delta .}$$

De même on a la hauteur maximale journalière quand AH = 0°.

ce qui nous donne

$$\boxed{H \text{ max} = 90^\circ - \phi + \delta .}$$

1 - 2 - 4 - AZIMUT DU SOLEIL, a

L'azimut a permet le repérage du vertical du soleil par rapport au plan méridien du lieu.

(voir fig.13)

a est donné par la formule suivante :

$$\sin a = \frac{\cos \delta \sin AH}{\cos H}$$

a positif à l'ouest et négatif à l'est.

2 - RAYONNEMENT SOLAIRE :

Nous avons vu qu'une partie de l'énergie émise par le soleil est reçue par la terre sous forme de rayonnement. En effet on admet que le soleil se comporte comme un corps noir dont la température superficielle avoisine 6000°K .

Les radiations qui arrivent jusqu'à la terre ont leur longueur d'ondes se situant essentiellement entre $0,25 \mu\text{m}$ et $0,5 \mu\text{m}$. Celles qui transportent le plus d'énergie sont avoisinantes de $0,5 \mu\text{m}$. On estime que le rayonnement solaire est constitué de 3 % d'ultra violet, 42 % de visible et de 55 % d'infra-rouges.

2 - 1 CONSTANCE SOLAIRE :

Généralement il est admis qu'une surface horizontale de 1 m^2 , avant l'entrée dans l'atmosphère reçoit environ 1400 W . Cette valeur représente la constante solaire. Au niveau du sol, elle varie de zéro à 1100 W/m^2 .

2 - 2 INFLUENCE DE L'ATMOSPHERE (FIG 2.1)

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire se trouve plus ou moins absorbé, suivant la position du soleil. C'est ainsi que fut introduite la masse d'air.

$m = 1$ correspondant à OM_0 et pour une pression P au sol de 1000 millibars.

si $P \neq 1000$ millibars on a :

$$OM_0 = m = \frac{P}{1000} \quad P \text{ en mb.}$$

Il est évident que nous recevons le plus d'énergie quand le soleil est au zenith.
($H = 90^{\circ}$)

OM = trajet des rayons solaires

$$OM = \frac{OM_0}{\sin H} = \frac{P}{1000 \sin H}$$

Durant la traversée de l'atmosphère les radiations sont absorbées suivant leur longueur d'ondes, ainsi nous avons pour : (voir fig. 2.2)

- $\lambda > 0,18 \mu\text{m}$ (rayons X et ultra-violets) : totalement absorbé au dessus de 60 Km.
- $0,18 < \lambda < 0,25 \mu\text{m}$: absorbé O_2 et O_3
- $0,25 < \lambda < 0,4 \mu\text{m}$: partiellement absorbé entre 10 à 50 Km.
- $0,4 < \lambda < 0,75 \mu\text{m}$ (visible est peu absorbé)
- l'infra-rouge quant à lui, est absorbé ^{par} CO_2 , H_2O , et O_3 .

A ces absorptions vient s'ajouter la diffusion moléculaire: En effet une partie de la lumière est diffusée par les particules contenues dans l'atmosphère et par les molécules.

Voir spectre du rayonnement solaire fig. 2.3

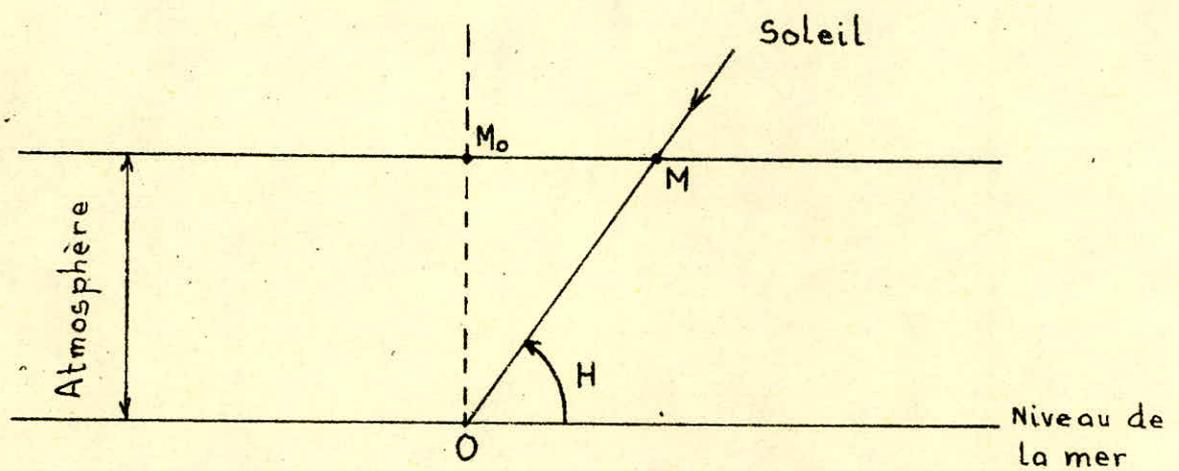


Fig 2.1 . Définition de la masse d'air.

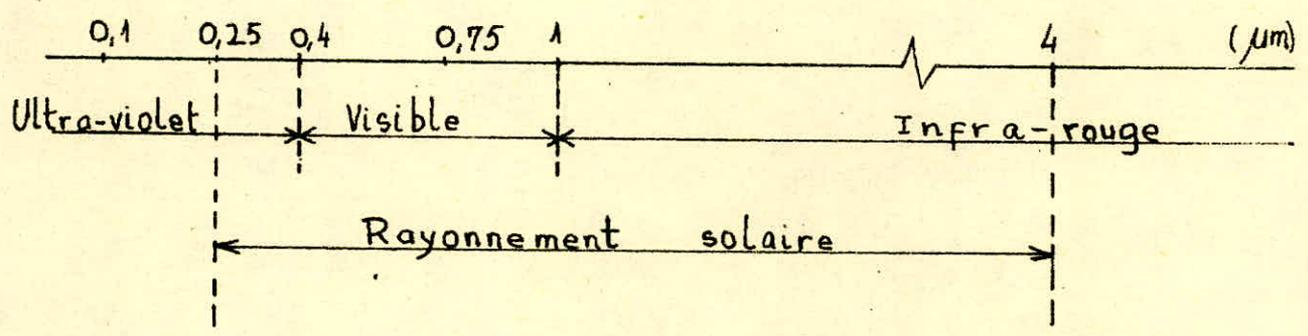


Fig 2-2 . Longueurs d'onde du rayonnement solaire.

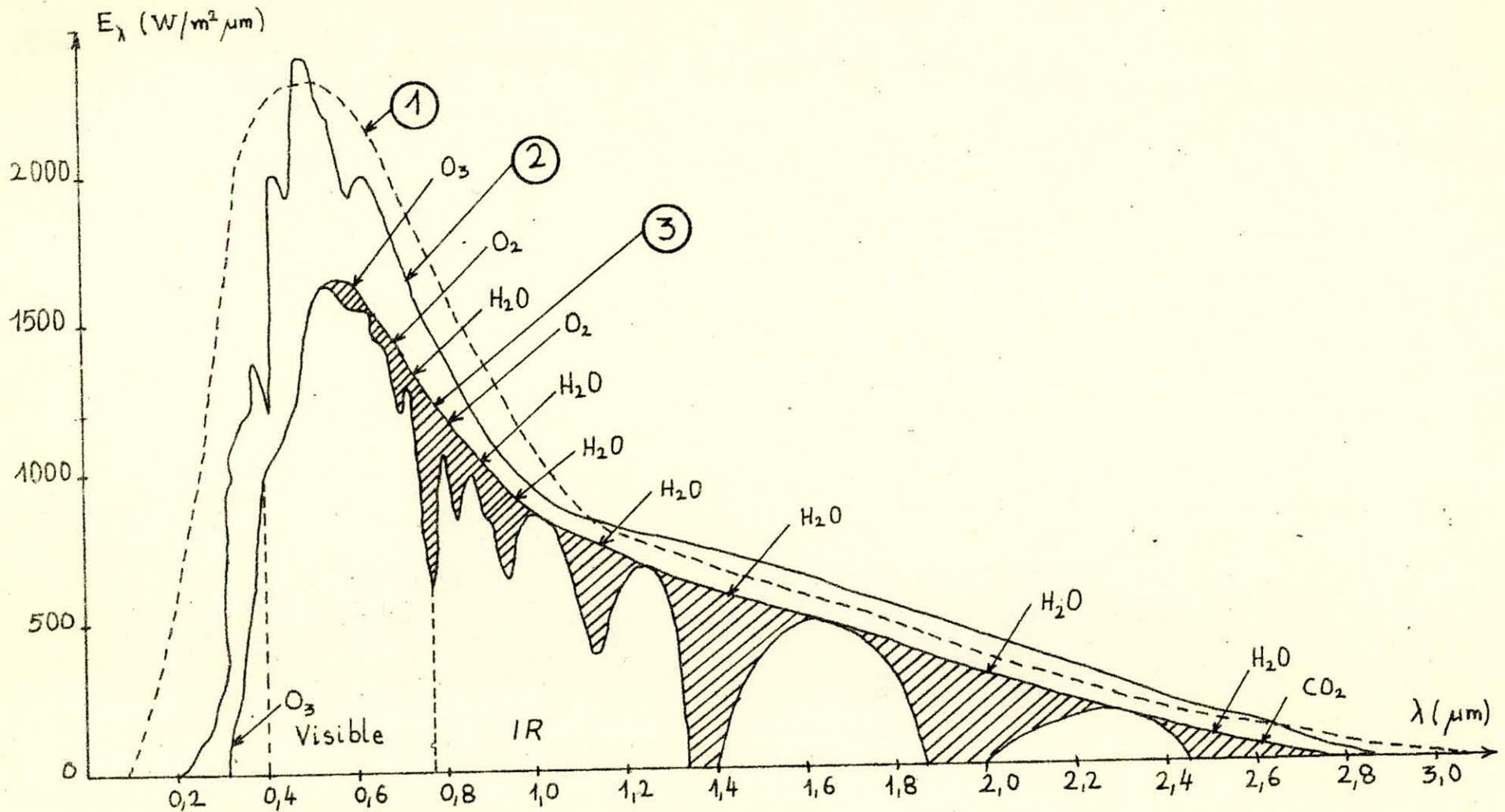


Fig 2.3. Spectre du rayonnement solaire.

- 1. Corps noir a 5800 K
 - 2. Courbe de l'énergie rayonnée à la limite de l'atmosphère
 - 3. Courbe de l'énergie au niveau de la mer.
- Les zones hachurées représentent les bandes d'absorption.

2 - 3 RAYONNEMENT SOLAIRE AU SOL

Le rayonnement solaire au sol est formé de rayonnement direct et de rayonnement diffus. Soit I_0^* rayonnement direct, après traversée de l'atmosphère.

D_{OH} désigne le rayonnement diffus provenant de la voûte céleste et G_{OH} le rayonnement global.

$$G_{OH} = I_0^* \sin H + D_{OH} = S_{OH} + D_{OH}$$

S_{OH} représente le rayonnement reçu par une surface horizontale au sol, généralement il est augmenté par le phénomène de l'albédo. En effet l'absorption du rayonnement diffus n'est pas entière - Elle dépend des couleurs des sols et varie avec la longueur d'onde. Ainsi par exemple : Pour une prairie la fraction d'absorption est de

$$0,94 \text{ si } \lambda > 0,55 \mu\text{m} \text{ et } 0,78 \text{ si } \lambda < 0,55 \mu\text{m}$$

On appelle albédo a la fraction d'énergie incidente diffusée par un corps lumineux. pour un corps noir $a = 0$

pour la neige fraîche $a = 0,90$, pour un sol nu $a = 0,15$ à $0,25$

Pour une surface inclinée d'un angle i et orientée vers le sud on a :

$$S = I_0^* (\cos H \sin i \cos a + \sin H \cos i)$$

$$\text{et } D = 0,065 (1 + \cos i) I_0^*$$

Pour une surface inclinée d'un angle i et orienté par un angle γ par rapport au sud on a. (voir fig. 2 - 4)

$$S = I_0^* [\cos H \sin i (\cos a \cos \gamma + \sin a \sin \gamma) + \sin H \cos i]$$

$$S = I_0^* [\cos H \sin i \cos (a - \gamma) + \sin H \cos i]$$

Des formules empiriques donnent G_{OH} pour une surface horizontale.

$$G_{OH \text{ max}} = 1130 (\sin H)^{1,15} \text{ par ciel pur}$$

$$G_{OH \text{ mini}} = 995 (\sin H)^{1,25}$$

2 - 4 APPAREILS DE MESURES :2 - 4 - 1 LES HELIOGRAPHES :

Ce sont des appareils qui mesurent les durées d'insolations où l'intensité du rayonnement direct dépasse un certain seuil. Ce seuil dépend du type d'appareil et des caractéristiques du papier d'enregistrement.

On distingue entre autres l'héliographe de CAMPBELL - STOKES. Le rayonnement γ est concentré à l'aide d'une lentille sur un carton bien défini qui se brunit, se décolore etc... suivant que le rayonnement est plus ou moins intense. Ainsi on définit la fraction d'insolation qui représente le rapport de l'insolation journalière sur la durée théorique.

2 - 4 - 2 LES PYRHÉLIOMÈTRES :

Ces instruments mesurent le rayonnement solaire direct I_0 . Ils sont orientables et permettent ainsi de mettre normalement, leur surface réceptrice, aux rayons solaires.

2 - 4 - 3 LES PYRANOMÈTRES :

Ils servent à mesurer le rayonnement global. Ce sont des générateurs électriques à surface horizontale et qui débitent un $f.e.m.$ proportionnel à l'éclairement reçu.

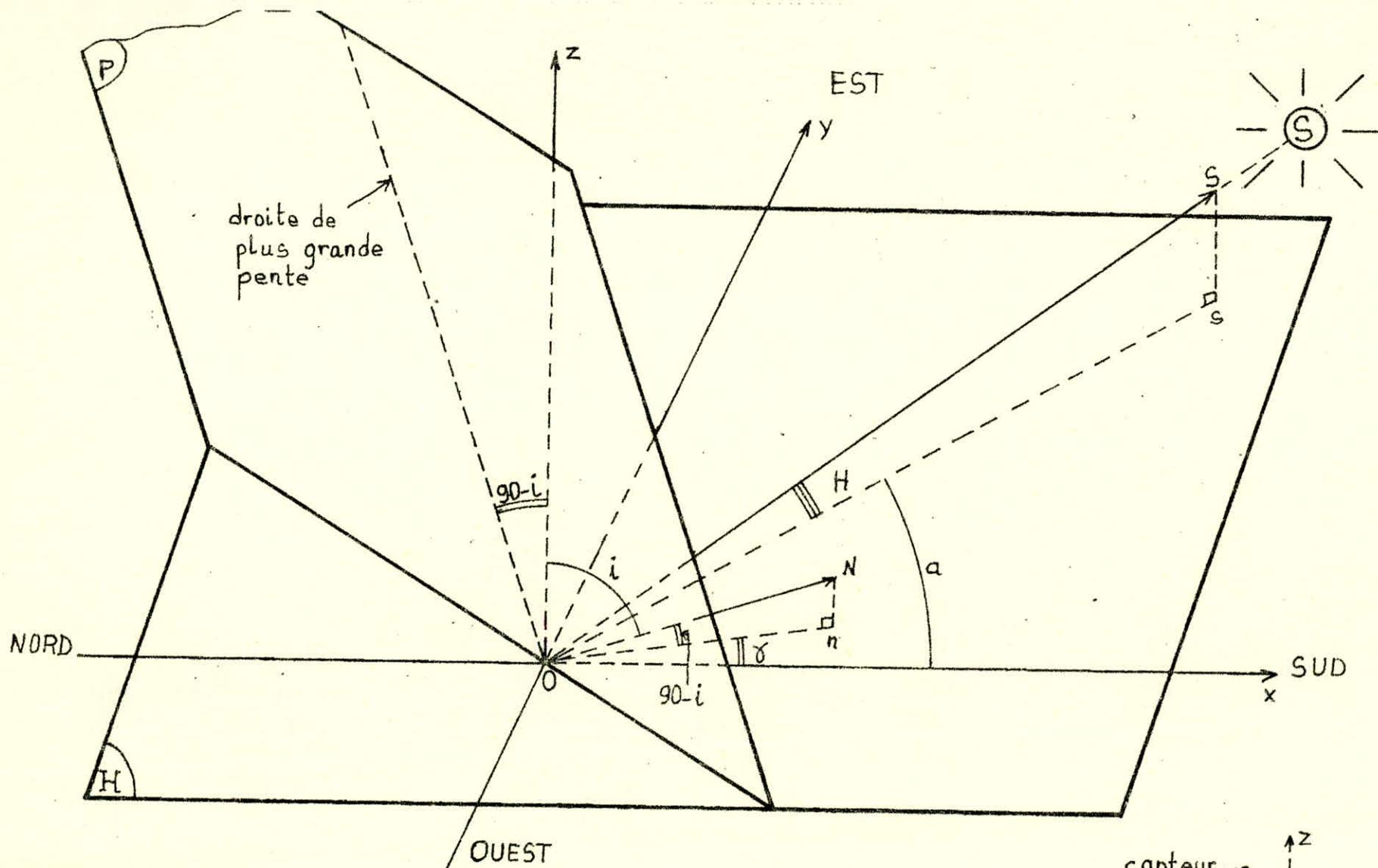


Fig 2-4 - Position d'une surface plane P

3 - RAPPELS SUR LA TRANSMISSION DE CHALEUR

On peut classer les types de transmission de chaleur en :

- Transmission par conductibilité, dans les solides
- Transmission par convection, d'une paroi à un fluide (gaz, liquide)

On distingue :

La convection naturelle : le fluide se met en mouvement par lui-même. La convection forcée : le fluide est mis en mouvement par une pompe ou un ventilateur.
Transmission par rayonnement, aucun support matériel comme dans les deux premiers cas. Ici la propagation de l'énergie a une nature ondulatoire.

Rappelons les lois fondamentales régissant ces trois types de transmission de chaleur.

3 - 1 TRANSMISSION DE CHALEUR PAR CONDUCTIBILITE

Nous ne rappelons ici que les formules essentielles. De plus amples explications peuvent être trouvées dans des ouvrages spécialisés (cf bibliographie).

3 - 1 - 1 CONDUCTION DANS UN MUR PLAN (fig. 3.1)

$T = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{e} \times$ température à l'intérieur, où :

T_1 température de la face chaude ($^{\circ}\text{C}$)

T_2 " " " froide ($^{\circ}\text{C}$)

e épaisseur du mur (m)

x distance d'un point intérieur à la face chaude (m)

$\phi = S (T_1 - T_2) / \frac{e}{\lambda}$, flux de chaleur à travers le mur.

ϕ (W)

S : surface du mur (m^2)

λ : conductivité ($\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$), caractérise le matériau du mur.

3-1-2 CONDUCTION DANS DES PAROIS PLANES ACCOLES (fig. 3-2)

- Flux à travers les parois :

$$\phi = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{S} \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i}} \quad \phi = S (T_1 - T_2) / \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i}$$

e_i épaisseur du mur i (m)

λ_i conductivité du mur : ($\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$)

température entre les parois k et $k+1$

$$T_{k, k+1} = T_1 - \frac{\phi}{S} \sum_{i=1}^k \frac{e_i}{\lambda_i} = T_2 + \frac{\phi}{S} \sum_{i=k+1}^n \frac{e_i}{\lambda_i}$$

3 - 1 - 3 CONDUCTION D'UN CYLINDRE (fig. 3-3)

$$T = T_1 - \frac{(T_1 - T_2) \ln(r/R_1)}{\ln(R_2/R_1)}$$

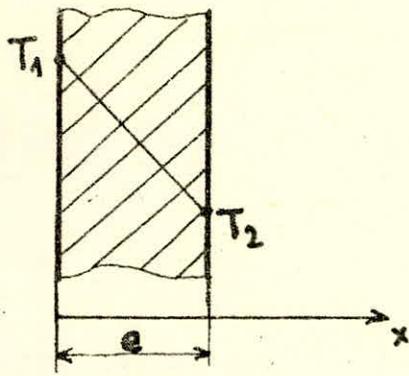


Fig 3-1

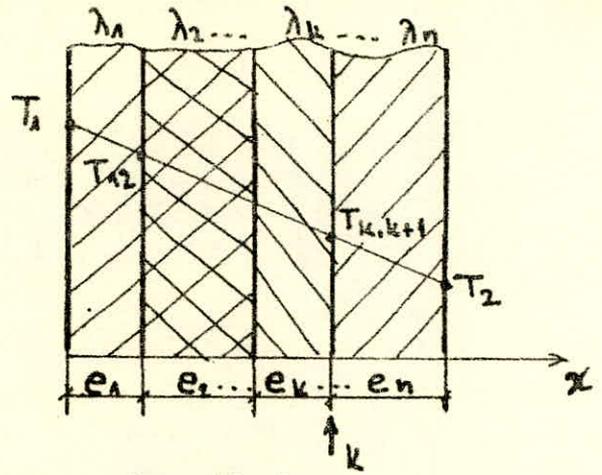


Fig 3-2

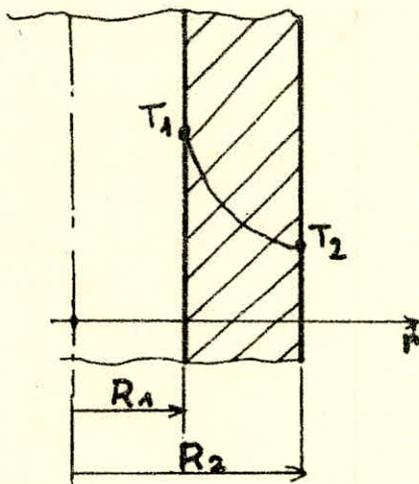


Fig 3-3

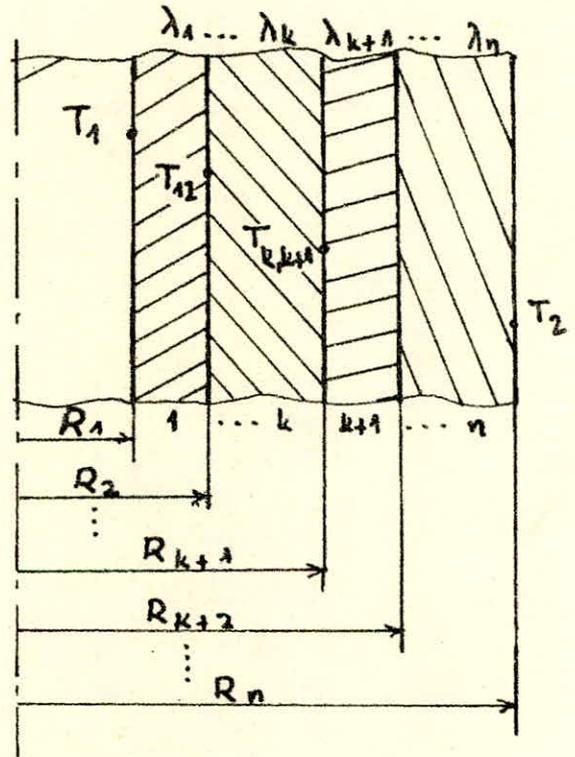


Fig 3-4

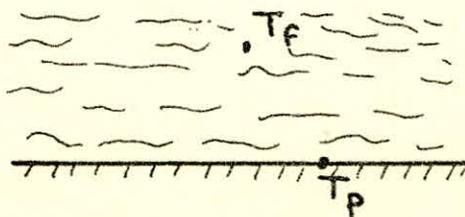


Fig 3-5.

T1 Face intérieure du cylindre ($^{\circ}\text{C}$)

T2 Face externe du cylindre ($^{\circ}\text{C}$)

R1 Rayon intérieur (m)

R2 Rayon extérieur (m)

r distance à l'axe d'un point intérieur à la paroi (m)

$$R_1 \leq r \leq R_2$$

- Flux par unité de longueur

$$\phi_l = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}} \quad (\text{W/m})$$

λ Conductivité du matériau ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$)

d1 Diamètre intérieur (m)

d2 diamètre extérieur (m)

3 - 1 - 4 CONDUCTION DES PAROIS CYLINDRIQUES ACCOLEES (fig. 3-4)

- Flux par unité de longueur

$$\phi_l = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}} \quad (\text{W/m})$$

d_i diamètre intérieur de la paroi i (m)

d_{i+1} diamètre extérieur de la paroi i (m)

λ_i conductivité de la paroi i ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$)

Température entre les parois k et k+1.

$$T_{k,k+1} = T_1 - \phi_l \sum_{i=1}^k \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} = T_2 + \phi_l \sum_{i=k+1}^n \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}$$

3 - 2 TRANSMISSION DE CHALEUR PAR CONVECTION (fig. 3.5)

3 - 2 - 1 LOI DE NEWTON

$$\varphi = h(T_f - T_p)$$

φ densité de flux de chaleur (W/m^2)

T_f température du fluide ($^{\circ}\text{C}$)

T_p température de la paroi, $T_p < T_f$ ($^{\circ}\text{C}$)

h Coefficient de transfert par convection ($\text{W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$)

h dépend de :

- la nature du fluide (viscosité en particulier)
- la vitesse de l'écoulement (laminaire ou turbulent),
- l'état de surface de la paroi,

- des températures de la paroi et du fluide

3 - 2 - 2 EXEMPLE DE CALCUL DE H

a) Convection chez l'écoulement laminaire à l'intérieur des tubes (fig. 3-6)

$$Re < 2300$$

L'écoulement se fait à vitesse pas trop élevée. Il existe une couche limite au voisinage de la paroi du tube qui diminue l'échange de chaleur par convection. si l est la longueur du tube et d son diamètre intérieur, pour l/d inférieur à 50 l'influence de la couche limite n'est pas négligeable.

on a :
$$h = \frac{Nu_f \times \lambda_f}{d_H}$$

- λ_f coefficient d'échange par conduction du fluide, pris à la température T_f .

$$T_f = \frac{T_e - T_s}{2} \quad e = \text{entrée tube}, \quad s = \text{sortie tube.}$$

- d_H diamètre hydraulique (cf fig. 3 - 7)

$$d_H = 4S / P \text{ mouillé, } P \text{ mouillé} = \text{périmètre mouillé, } S = \text{surface}$$

$$- Nu_f = 0,15 \times Re^{0,33} \times Pr_f^{0,43} \times Gr_f^{0,1} \times \left(\frac{Pr_f}{Pr_p} \right)^{0,25} \times \bar{\epsilon}_e$$

indice f : le nombre est pris à la température du fluide

indice p : " " " " de la paroi.

Nu nombre de Nusselt

Re " " Reynolds

Pr " " Prandtl

Gr " " Grachov

$\bar{\epsilon}_e$ est fonction de l/d

l/d	1	2	5	10	15	20	30	40	50
$\bar{\epsilon}_e$	1,9	1,7	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1

b) convection chez l'écoulement transitaire à l'intérieur des tubes

$$2300 < Re < 10^4$$

$$Nu_f = k_0 Pr_f^{0,43} \left(\frac{Pr_f}{Pr_p} \right)^{0,25}$$

k_0 est donné en fonction de Re_f .

$Re_f \times 10^3$	2,2	2,3	2,5	3,0	3,5	4	5	6	7	8	9	10
k_0	2,2	3,6	4,9	7,5	10	12,2	16,5	20	24	27	30	33

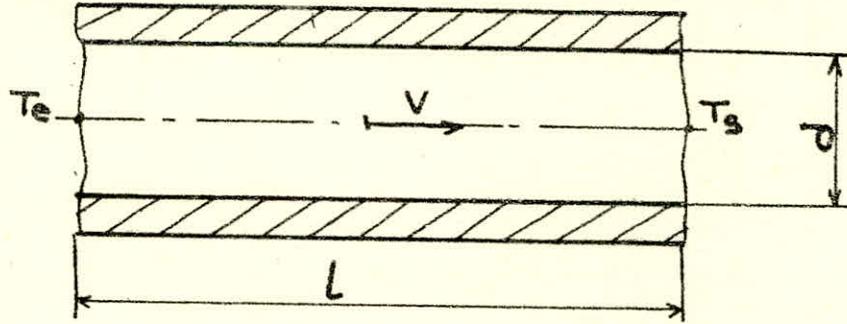
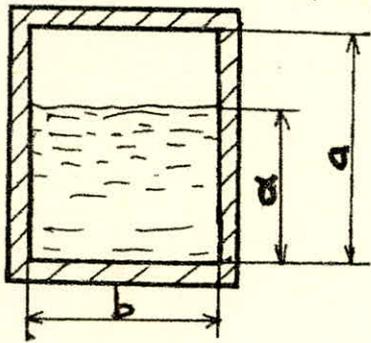
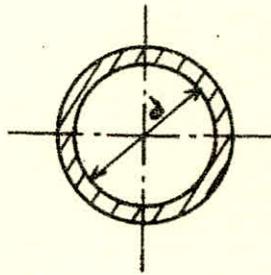


Fig 3.6



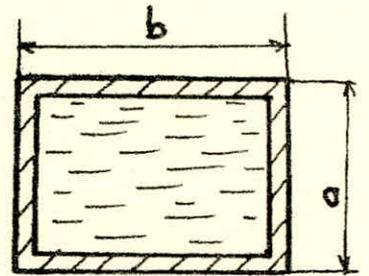
3-7a

$$d_H = \frac{4S}{P_{\text{moille}}} = \frac{4ab}{2(\alpha+b)}$$



3-7b

$$d_H = d$$



3-7c

$$d_H = \frac{2ab}{a+b}$$

Fig 3.7

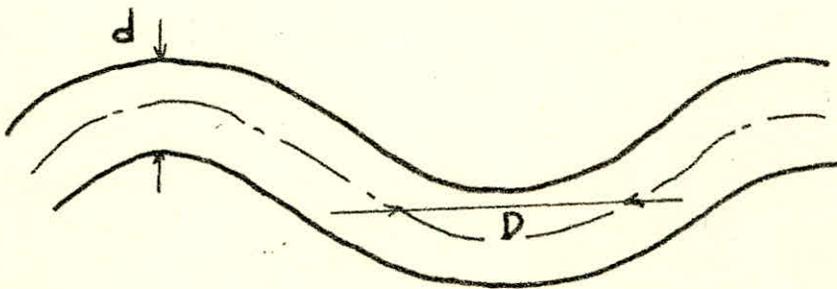


Fig 3.8

c) convection chez l'écoulement turbulent à l'intérieur des tubes

$$Re > 10^4$$

la formule suivante est valable pour
et $0,6 < Pr_f < 2500$

$$10^4 < Re_f < 5 \cdot 10^6$$

$$Nu_f = 0,021 Re_f^{0,8} \times Pr_f^{0,43} \times \left(\frac{Pr_f}{Pr_p} \right)^{0,25} \times \bar{E}_L$$

\bar{E}_L est donné dans le tableau ci-dessous:

$\frac{D}{d}$	\bar{E}_L		
	$Re = 2 \cdot 10^3$	$Re = 2 \cdot 10^4$	$Re = 1 \cdot 10^5$
1	1,90	1,51	1,28
2	1,70	1,40	1,22
5	1,44	1,27	1,15
10	1,28	1,18	1,10
15	1,18	1,13	1,08
20	1,13	1,10	1,06
30	1,05	1,05	1,03
40	1,02	1,02	1,02
50	1	1	1

Pour une conduite en serpentin on remplace \bar{E}_L par

$$\bar{E}_{serp} = 1 + 3,6 \frac{d}{D}$$

D diamètre de courbure du serpentin (fig. 3-8)

d diamètre intérieur de la conduite

empiriques donnent h dans des conditions

Remarque : d'autres formules plus ou moins bien déterminées. On peut les trouver dans les ouvrages spécialisés en transfert de chaleur.

3 - 3 Transmission de chaleur par convection et conduction

3-3-1 Mur plan séparant 2 fluides (fig. 3-9)

$$\Phi = k S (T_{F1} - T_{F2})$$

Φ Flux de chaleur (W)

S surface du mur en contact avec les fluides 1 et 2 (m²)

T_{F1} température du fluide chaud (°C)

T_{F2} température du fluide froid (°C)

k Coefficient globale de transmission (W/m² °C)

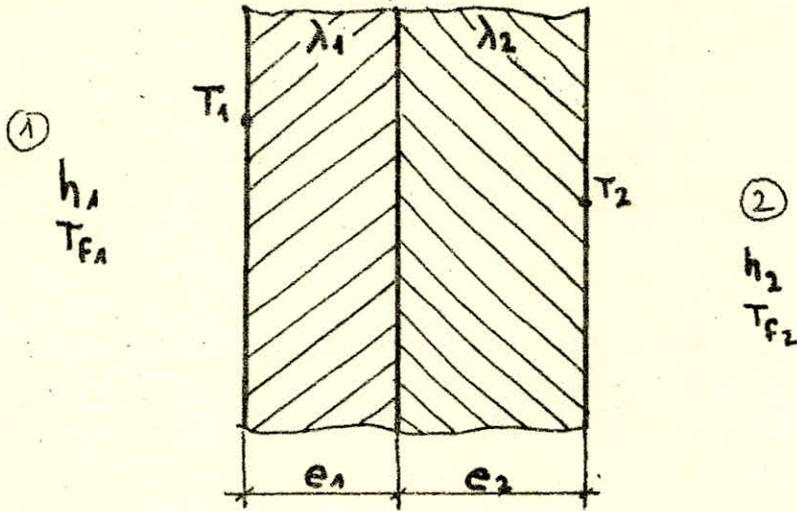


Fig 3.9

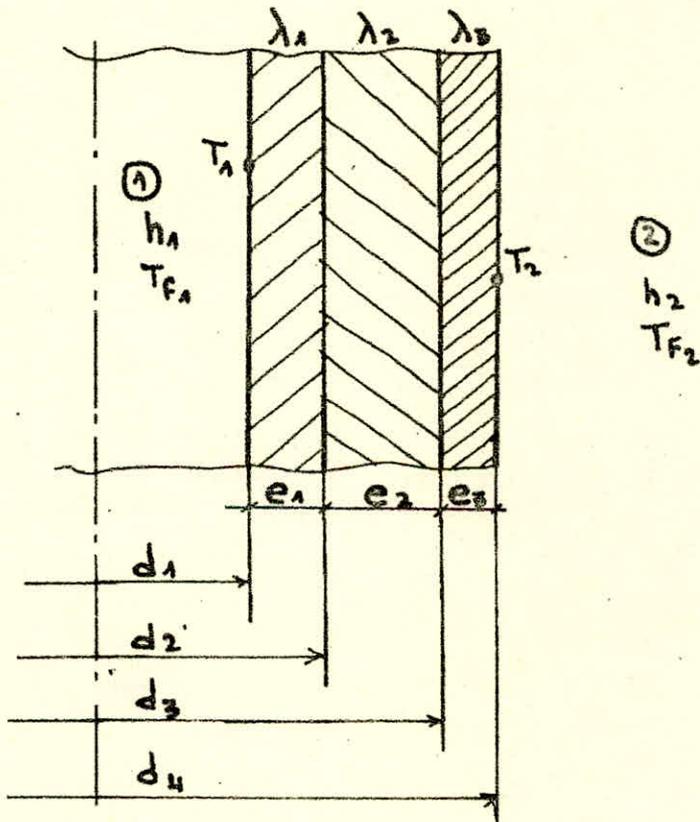


Fig 3.10

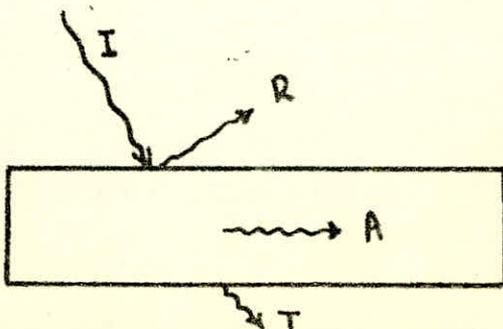


Fig 3.11

$$k = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \sum_i \frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_2}} \quad (\text{cf fig 3.9})$$

3-3-2 Mur cylindrique séparant 2 fluides (fig. 3.10)

$$\phi_e = k_e \pi (T_{F1} - T_{F2})$$

ϕ_e flux de chaleur par unité de longueur (W/m)

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{h_1 d_1} + \frac{1}{2} \sum_i \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{h_2 d_2}} \quad (\text{W/m}^\circ\text{C})$$

3 - 4 Transmission de chaleur par rayonnement

3 - 4 - 1 Loi de Stephan - Boltzmann

Emission du corps noir

$$E_n = \sigma_n T^4$$

E_n énergie rayonnée par unité de surface ($\frac{W}{m^2}$)

$\sigma_n = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ constante d'émission du corps noir ou constante de Stephan

T Température absolue du corps ($^\circ K$)

Emission d'un corps quelconque

$$E = \sigma_n \epsilon T^4$$

E énergie rayonnée par unité de surface (W)

ϵ facteur total d'émission du corps, il dépend de :

- la température de l'émetteur
- son état de surface. ϵ est fort pour les corps de couleur sombre et faible pour les corps de couleur claire.

$\epsilon = 1$ pour le corps noir

$0 < \epsilon < 1$ pour les autres corps.

3-4-2- ABSORPTION, REFLEXION, TRANSMISSION D'UN CORPS QUELCONQUE

Soit un rayonnement incident I, frappant un corps (S) (fig. 3-11). Suivant le corps (S), l'énergie incidente sera réfléchiée, absorbée ou transmise.

Soient :

I = énergie totale incidente
 R = " " réfléchiée
 A = " " absorbée
 T = " " transmise

On peut caractériser le corps (S) par les coefficients suivants, coefficients qui dépendent du rayonnement incident (nature du spectre et direction du rayonnement.)

$r = \frac{R}{I}$ facteur total de réflexion

$\alpha = \frac{A}{I}$ " " d'absorption

$\tau = \frac{T}{I}$ " " de transmission

On a la relation

$$r + a + t = 1$$

- corps solides opaques : $t \approx 0$ et $r + a \approx 1$
- corps transparents : $a \approx 0$ et $t \approx 1$

Pour un verre ordinaire de faible épaisseur, r et a sont faibles, si l'angle d'incidence n'est pas trop grand, mais t a une valeur élevée.

3 - 4 - 3 Rayonnement réciproque entre 2 plans parallèles séparés par le vide (fig. 3.12)

Le flux de chaleur échangé entre les plans 1 et 2 (T_1 supérieure à T_2) est donné par :

$$\Phi_{12} = \frac{A\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (W)$$

A surface d'un plan (m²)

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$$

T_1, T_2 température (°K)

ϵ_1, ϵ_2 facteur total d'émission

3 - 4 - 4 Rayonnement réciproque entre un plan et une masse gazeuse (fig. 3.13)

La surface considérée a des dimensions faibles, par rapport à l'espace environnant. Le flux de chaleur échangé est :

$$\Phi_{12} = \sigma A \epsilon_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (W)$$

3 - 4 - 5 Coefficient d'échange par rayonnement entre une surface et une masse gazeuse

$$\Phi_{12} = \Phi_r = \sigma A \epsilon_1 (T_1^4 - T_2^4)$$

Par analogie avec la loi de Newton relative à la convection, on définit un coefficient d'échange par rayonnement :

$$h_r = \frac{\Phi_r}{A(T_1 - T_2)} = \frac{\sigma A \epsilon_1 (T_1^4 - T_2^4)}{A(T_1 - T_2)}$$

Donc on peut écrire pour un échange par rayonnement.

$$\Phi_r = h_r A (T_1 - T_2)$$

3 - 4 - 6 Coefficient d'échange par convection et rayonnement (fig. 3-14)

En général il ya échange par convection et par rayonnement. Le flux de chaleur totale est :

$$\begin{aligned} \Phi_t &= \Phi_r + \Phi_c \\ &= A(h_c + h_r)(T_1 - T_2) = A h_{cr} (T_1 - T_2) \end{aligned}$$

avec $h_{cr} = h_c + h_r$ coefficient d'échange par convection et rayonnement.

3 - 5 Protection contre le rayonnement - effet écran (fig. 3.15)

On veut diminuer l'échange par rayonnement entre deux surfaces (planes ou cylindriques). Pour cela on place entre les deux surfaces une feuille métallique mince ayant un bon facteur total de réflexion et une grande conductivité.

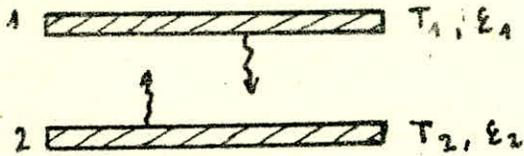


Fig 3.12

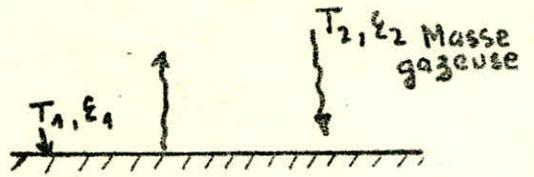


Fig 3.13

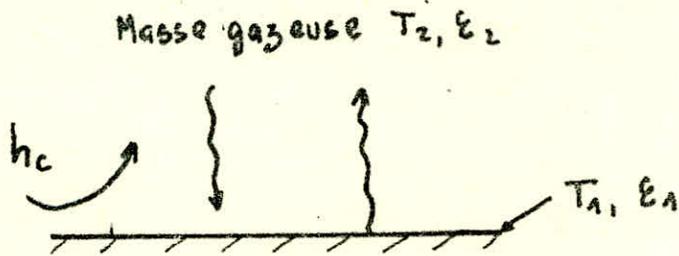
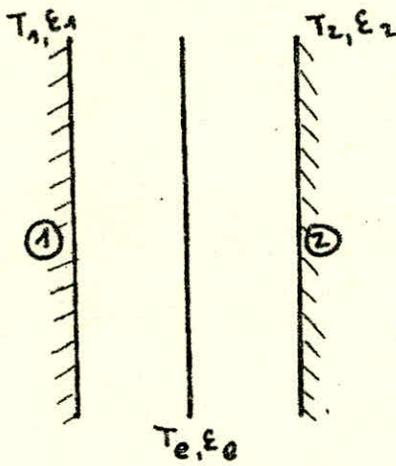
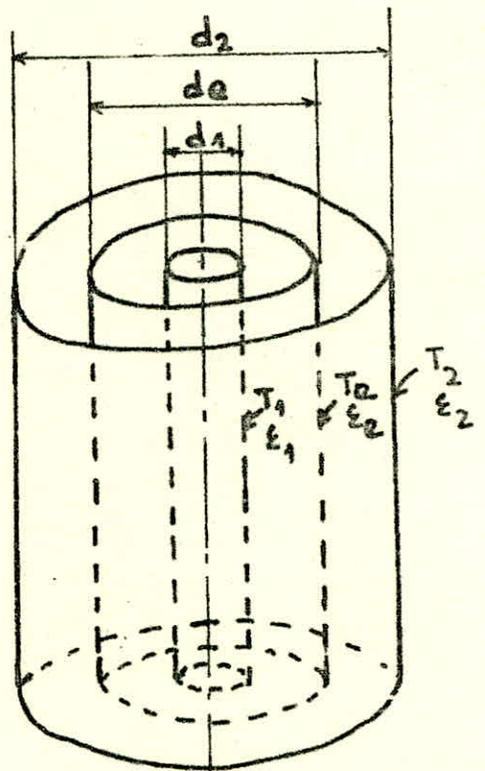


Fig 3.14



3.15a



3.15b

Fig 3.15.

.... (feuille d'aluminium polie par exemple) Cette feuille joue le rôle d'écran contre le rayonnement. En effet une grande partie du rayonnement venant de la surface chaude 1 est réfléchi vers cette surface par l'écran. Le flux échangé entre les surfaces 1 et 2 a pour expression :

surfaces planes (fig. 3 - 15 a)

$$\Phi_{12} = \frac{A \sigma_n (T_1^4 - T_2^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} - \frac{1}{2}\right) + 2 \sum_1^m \left(\frac{1}{\varepsilon_{ei}} - \frac{1}{2}\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - \frac{1}{2}\right)} \quad (W)$$

ε_{ei} facteur total d'émission de l'écran i.

n nombre d'écrans entre les surfaces 1 et 2.

surfaces cylindriques (fig. 3 - 15 b)

$$\Phi_{12} = \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1 d_1} + 2 \sum_1^{m+1} \frac{1}{\varepsilon_i d_i} - \sum_1^{m+1} \frac{1}{d_i}} \quad \left(\frac{W}{m}\right)$$

d_1 diamètre du cylindre 1 (m)

d_i " " " i (m)

4 APPLICATIONS THERMIQUES DE L'ENERGIE SOLAIRE

L'énergie solaire nous vient sous forme de rayonnement qui ne peut être utilisé en tant que tel. Une transformation s'avère nécessaire actuellement il existe plusieurs voies pour exploiter cette énergie :

- conversion biologique (plante, etc ...)
- photochimie et thermochimie
- électrique (effet photovoltaïque)
- thermique

Nous allons nous intéresser seulement aux applications thermiques. L'énergie incidente peut être transformée en énergie thermique utilisée directement (chauffage de fluides, séchage), ou encore transformée en énergie mécanique, puis électrique.

4 - 1 Principe de la transformation énergie solaire - énergie thermique

Frappé par le rayonnement solaire un corps s'échauffe. Cette chaleur peut être transférée par conduction et convection à un fluide qui se trouve en contact avec le Corps. Le fluide chaud ainsi obtenu peut être transporté au lieu d'utilisation où il cèdera sa chaleur à un corps plus froid. Le fluide est appelé fluide caloporteur. Un fluide caloporteur, cédant de la chaleur sensible doit avoir :

- une chaleur massique C_p élevée
- une masse volumique ρ grand

Il est en général un liquide de préférence à un gaz.

4 - 2 niveau d'énergie - niveau de température

Considérons un système quelconque qui fournit de l'énergie thermique à un fluide caloporteur.

L'énergie utilisable que véhicule le fluide dépend :

- de son débit \dot{m} ,
- de sa température T_1 ,
- de sa chaleur massique C_p ,

Mais aussi du niveau énergétique de référence, c'est à dire de la nature de la source froide qui va recevoir l'énergie. En effet, soit T_2 la température du récepteur de chaleur. La quantité de chaleur maximale prélevée au fluide caloporteur est :

$$\dot{q} = \dot{m} C_p (T_1 - T_2)$$

On peut donc avoir de grandes quantités d'énergie avec de faibles températures de fluide si on met un jeu des débits forts, Il est préférable de caractériser les niveaux d'énergie par les niveaux de température plutôt que par des quantités d'énergie. En effet, si on se rapporte à l'unité de masse d'un corps quelconque, une forte énergie est caractérisée par une forte température (notion d'enthalpie). On classe les applications thermiques de l'énergie solaire comme suit, étant entendu que cette classification est arbitraire :

- Application à basse température (inférieure à 100° C) capteurs sans concentration
- Application à moyenne température (entre 100 et 500° C) capteurs avec concentration, jusqu'aux températures correspondant aux premiers traitements thermiques importants.
- Applications à haute température (supérieure à 500° C) capteurs avec concentration élevée.

4 - 3 Paramètres et caractéristiques de fonctionnement des capteurs solaires

Ce qui va suivre est valable pour les capteurs avec ou sans concentration.
On peut classer les paramètres relatifs à un capteur en deux catégories.

4 - 3 - 1 Paramètres externes

- Paramètres d'ensoleillement : éclairage énergétique dû au rayonnement globale, position du soleil, durée d'insolation,

- Température extérieure sèche,
- humidité relative
- vitesse du vent sur le capteur

4 - 3 - 2 Paramètres internes

a) paramètres géométriques.

- Paramètres de position : **inclinaison**, orientation du capteur.

- Dimension des différentes parties : épaisseur, longueur, largeur.

trois paramètres sont particulièrement importants :

- superficie du capteur $A =$ c'est celle de son ombre au soleil sur un **plan** parallèle au plan d'ouverture, quand le plan d'ouverture du capteur est normal aux rayons du soleil (fig. 4 - 1 a)

- superficie d'entrée $A_a =$ c'est l'aire de la section droite du rayonnement direct normal pouvant atteindre directement ou par réflexion le volume contenant l'absorbeur (fig. 4 - 1 b)

- Section de passage du fluide caloporteur : c'est l'**aire** intérieure de la section droite de l'échangeur thermique dans lequel circule le fluide caloporteur (échangeurs à plaques ou à tubes).

b) paramètres de fonctionnement

- température d'entrée du fluide caloporteur dans le capteur :

- Débit du fluide caloporteur :

- température des différentes parties du capteur

- facteur de concentration pour les concentrateurs. Il est défini comme étant le rapport.

$$C = \frac{A_1}{A_2}$$

A_1 aire recevant l'énergie incident (m^2)

A_2 aire de la partie chauffée de l'absorbeur (m^2)

4 - 3 - 3 Caractéristiques de fonctionnement

Ces caractéristiques sont très importantes car elles permettent, en tenant compte du coût, d'effectuer un choix parmi différents types de capteurs ce sont :

- température de sortie du fluide caloporteur T_{2p}

- puissance thermique du capteur

$$\dot{q}_c = \dot{m}_f c_{pf} (T_{2p} - T_{1f})$$

\dot{m}_f débit du fluide caloporteur,

sa chaleur massique.

- rendement du capteur :

$$\eta_c = \frac{\dot{q}_c}{AG_n}$$

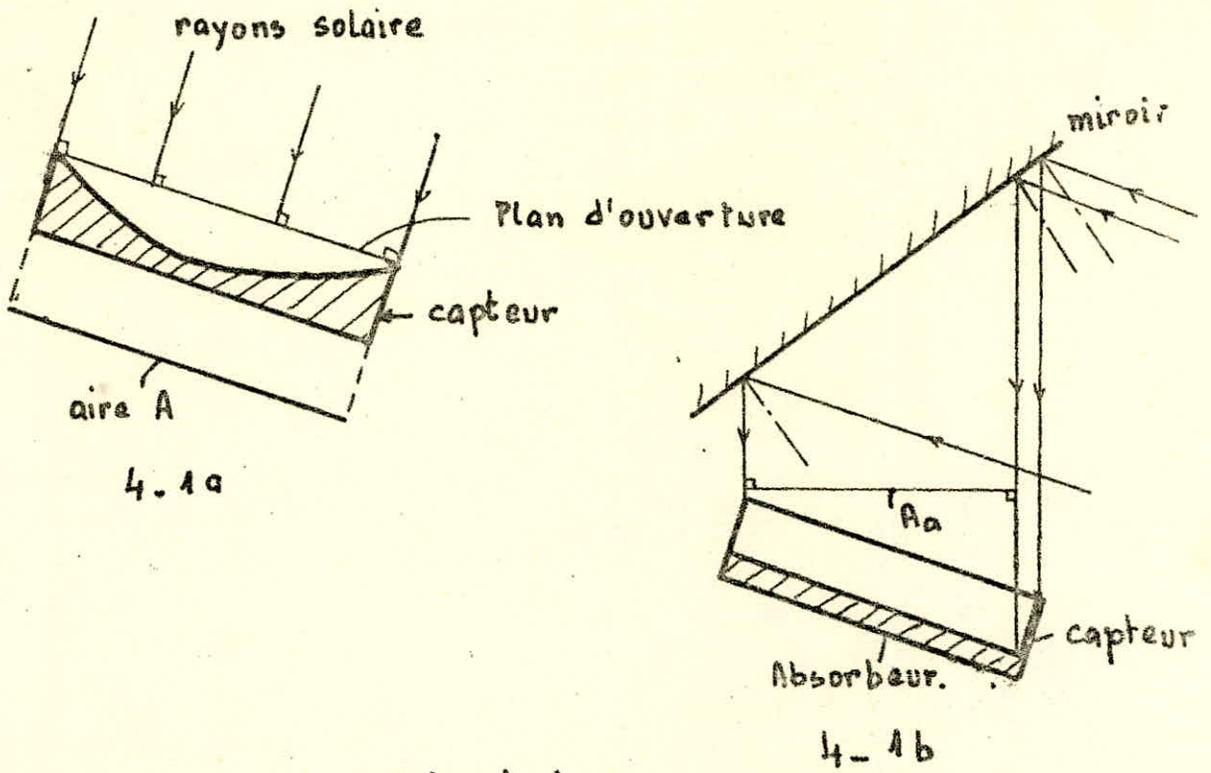


Fig - 4-1

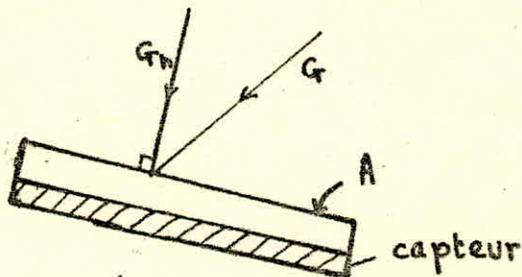
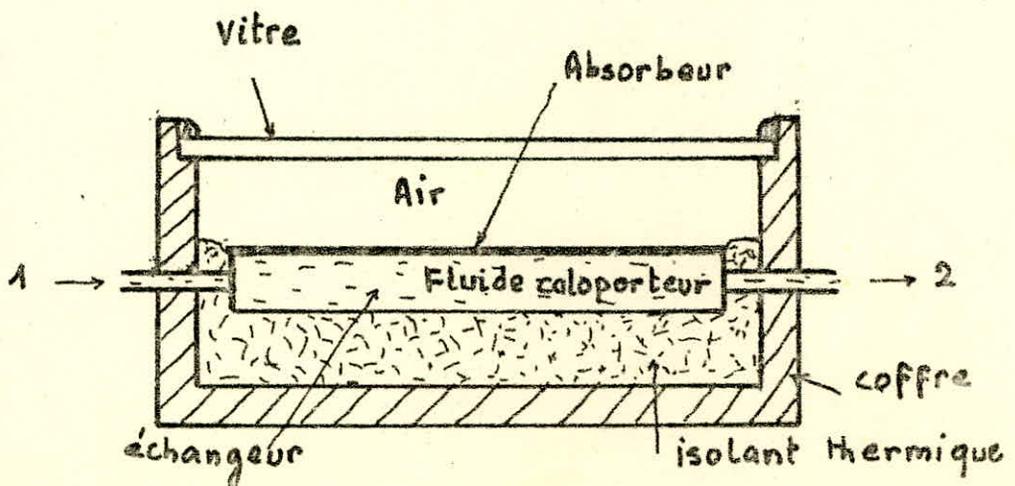


Fig 4-2



- 1. Entrée
- 2. Sortie

Fig 4-3

G_n : Composante normale de l'éclairement énergétique solaire global tombant sur le plan capteur (fig. 4 - 2)

- rendement globale de l'installation : $\eta_g = \frac{q_r}{AG_n}$

$q_r = q_c$ - pertes dans le réservoir de stockage et les canalisations
 q_r quantité de chaleur stockée dans le réservoir de stockage par unité de temps.

4 - 4 Applications à basse température

En général on utilise pour la basse température les capteurs plans à effet de serre. Sur la figure 4-3 nous donnons un schéma simple d'un capteur plan utilisant l'effet de serre. Pour avoir une idée sur la performance de ce type de capteur sur la figure 4-4 nous avons représenté la répartition du flux incident. Notre but n'est pas développer la théorie des capteurs plans mais de voir les principales applications de l'énergie thermique à basse température que l'on peut obtenir avec ces capteurs.

4 - 4 - 1 chauffage des habitations

Il existe plusieurs systèmes de chauffage solaire. On distingue deux grandes catégories selon que le système fait appel ou non à une énergie auxiliaire pour actionner les appareils qui captent et distribuent la chaleur solaire. Ne pas confondre énergie auxiliaire et énergie d'appoint qui est destinée à compléter le chauffage solaire, lorsqu'il est défaillant.

Les systèmes actifs comprenant des organes tels que circulateurs, électrovannes, ventilo - convecteurs, etc, qui nécessitent l'utilisation d'une énergie non solaire, le plus souvent électrique.

Les systèmes passifs qui n'utilisent pas d'énergie auxiliaire (sauf humaine pour la manoeuvre éventuelle de certains éléments mobiles).

Nous donnons dans les pages suivantes deux exemples choisis parmi tant d'autres.

- exemple 1 sur le système actif figure 4 - 5
- exemple 2 sur le système passif figure 4 - 6

Le lecteur désirant de plus amples explications pourra se reporter à l'ouvrage (1) cité dans la bibliographie.

4 - 4 - 2 Distillation solaire (fig 4-7)

Un distillateur solaire est constitué d'une capacité étanche surmontée d'une vitre. La partie inférieure absorbante (noire) est recouverte d'un plan d'eau (eau saumâtre, eau de mer ou eau douce) à distiller, l'eau s'évapore sous l'action du flux incident, se condense sur la vitre, puis est récupérée dans un récepteur placé sous celle-ci. Un appoint d'eau doit compenser le débit de distillat.

La mise en circulation interne de la vapeur d'eau se fait par thermosiphon qui prend naissance du fait de la différence de température ($T_e - T_v$) entre les sources chaudes et froides (cf fig. 4-7)

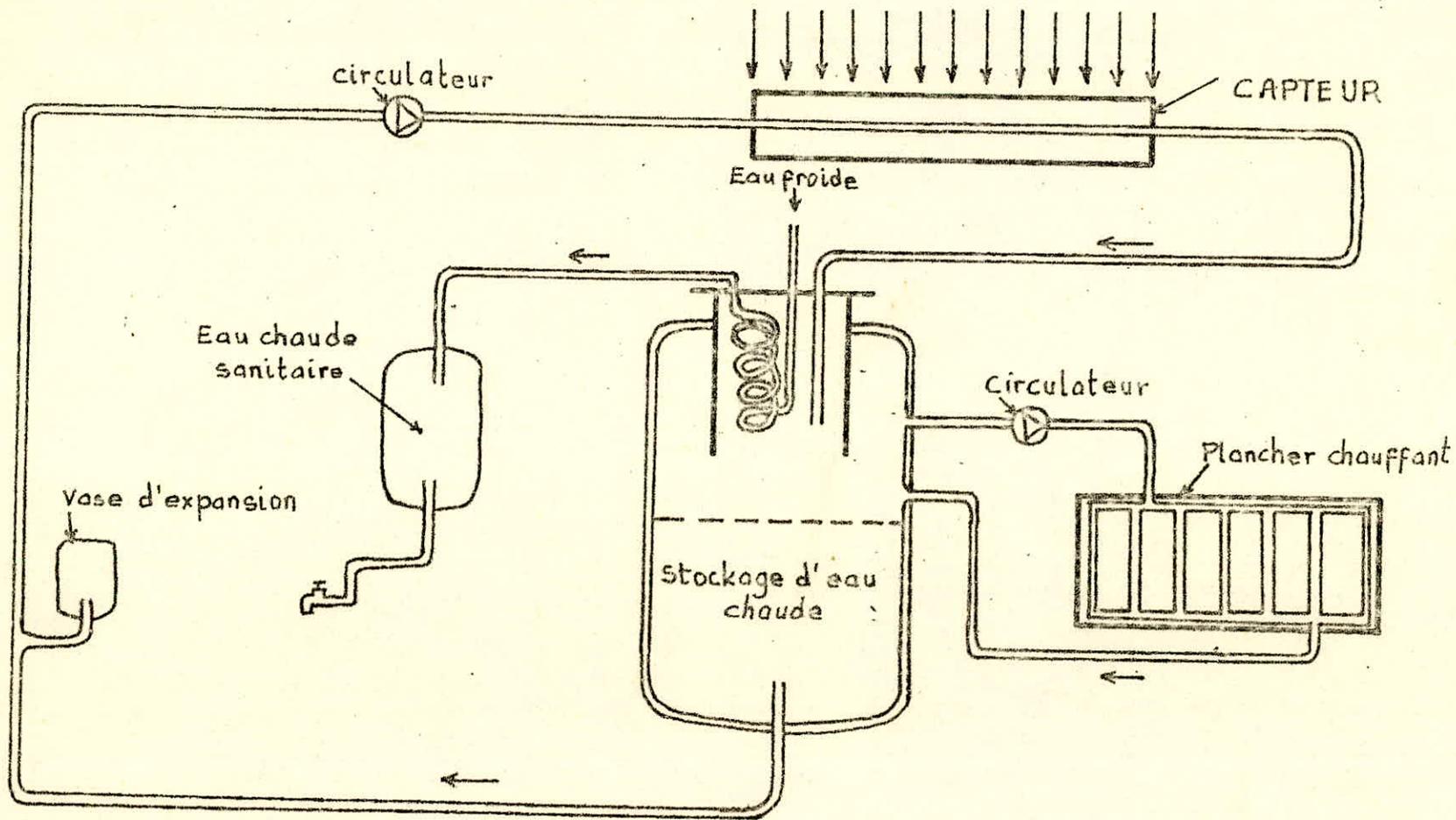


Fig 4.5 - Exemple 1 : Système actif à eau

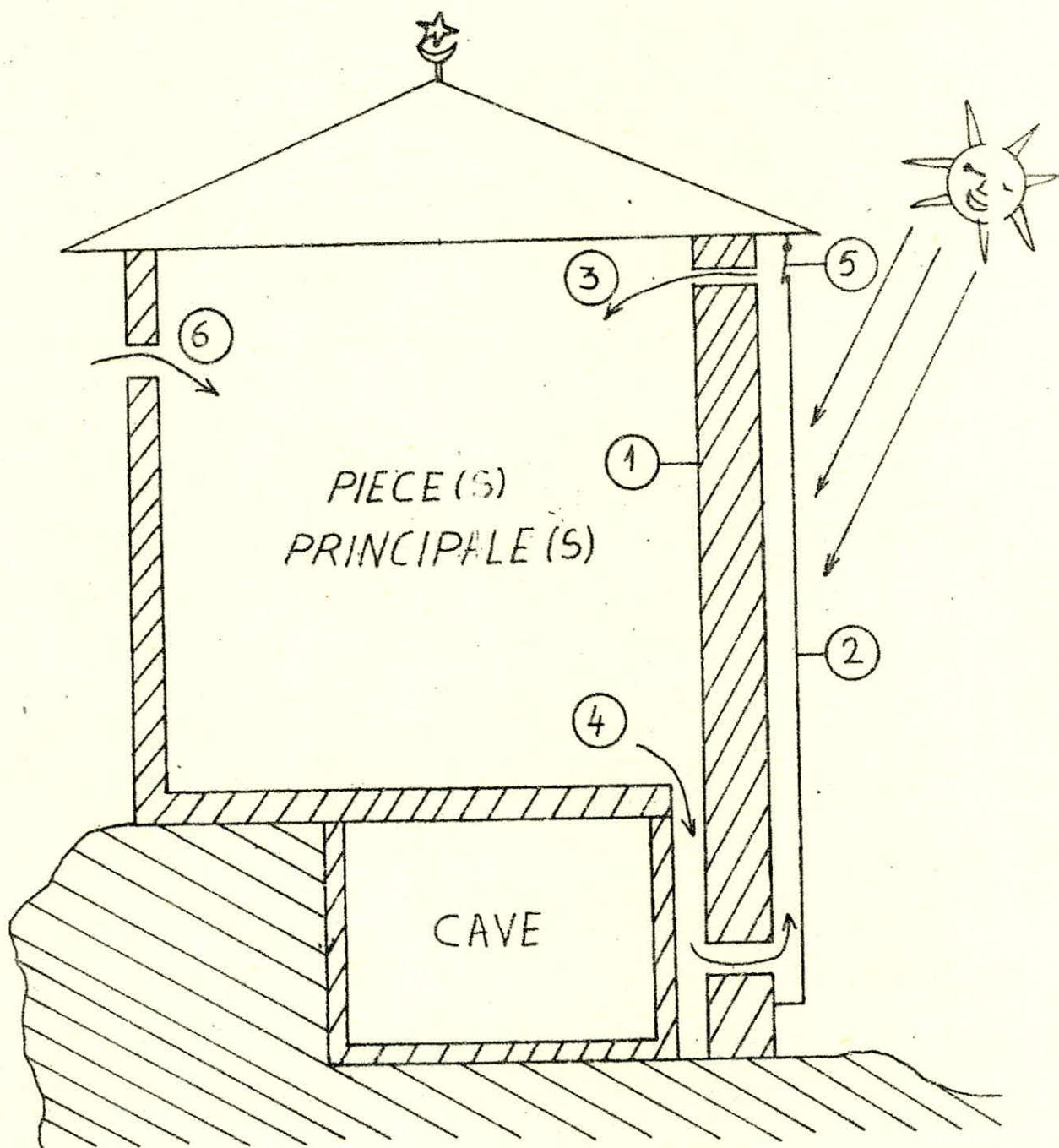


Fig 4-6 - Exemple 2 : Système passif à mur stockeur.

1. Mur capteur en béton.
2. Vitrage.
3. Entrée de l'air chaud.
4. Sortie de l'air froid.
5. Volet basculant pour évacuer l'air chaud en été.
6. Prise d'air frais en été.

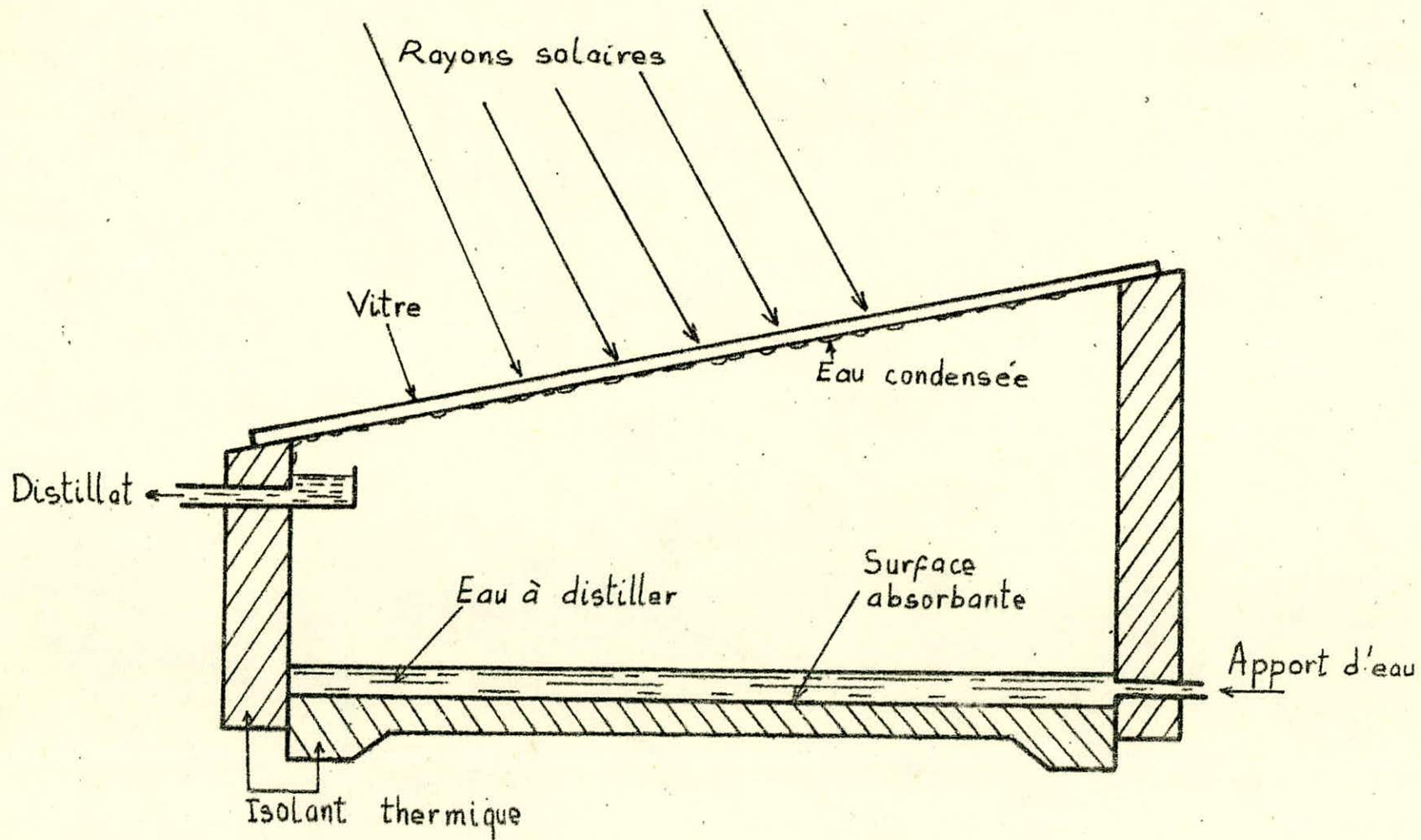


Fig - 4.7 - Coupe d'un distillateur

34

4 - 5 Applications à moyenne et haute températures4 - 5 - 1 Nécessité de la concentration

En général, les capteurs plans ne permettent pas d'avoir des températures supérieures à 130° C. Cette température peu élevée constitue une limite au rendement thermodynamique des systèmes. Pour l'augmenter, il faut élever la température de la source chaude et par conséquent, concentrer le rayonnement solaire. Dans ce qui suit nous donnons les avantages et inconvénients des concentrateurs comparés aux capteurs plans.

Avantages

- 1 - Les surfaces réfléchissantes nécessitent moins de matière et structurellement plus simples que les collecteurs plans. Le coût au m² de l'échangeur thermique est inférieur.
- 2 - Aire d'absorption plus faible du fait de la concentration.
- 3 - densité d'énergie supérieure au niveau de l'absorbeur, donc le fluide peut travailler à température plus élevée.
- 4 - A cause de la moindre surface spécifique de l'absorbeur, on peut utiliser des surfaces à absorption sélective ou même une isolation sous vide pour réduire les pertes thermiques et augmenter le rendement de manière économique.
- 5 - Quantité de chaleur stockée plus grande car température plus haute. Donc coût de stockage plus faible.
- 6 - En cas de non fonctionnement en hiver il faut moins d'antigel dans les systèmes à concentration que dans les systèmes à capteurs plans.

Inconvénients

- 1 - On collecte peu ou pas du tout de rayonnement diffus.
- 2 - Ajustement périodique du concentrateur ou du récepteur thermique selon l'époque de l'année. Rendement plus faible que pour les systèmes à poursuite qui, par contre, sont plus coûteux.
- 3 - Dans les systèmes à chaudière mobile, il faut au moins une *connexion* flexible pour extraire le fluide chaud de l'échangeur thermique, d'où nécessité d'un entretien périodique et source de panne possible.
- 4 - Le pouvoir réflecteur des miroirs décroît dans le temps et il faut les reargenter ou les repolir.
- 5 - Il existe encore peu de réalisations de grande puissance à réflecteur stationnaires à haute concentration et des recherches supplémentaires sont nécessaires pour étudier la fiabilité, et la maintenance de tels systèmes.

4 - 5 - 2 Facteur de concentration géométrique (fig. 4-8)

C'est le rapport de la surface de captage A_1 (perpendiculaire aux rayons solaires) et de la surface chauffée A_2 de l'absorbeur.

$$C = \frac{A_1}{A_2}$$

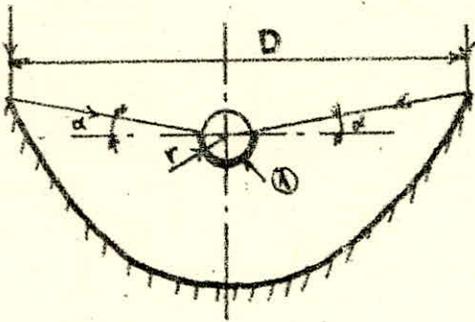


Fig 4-8

D diamètre d'ouverture

L longueur du capteur

$$A_1 = D \times L$$

① Surface chauffée de l'absorbeur.

r rayon de l'absorbeur, α radian.

$$A_2 = (\pi + 2\alpha) r L.$$

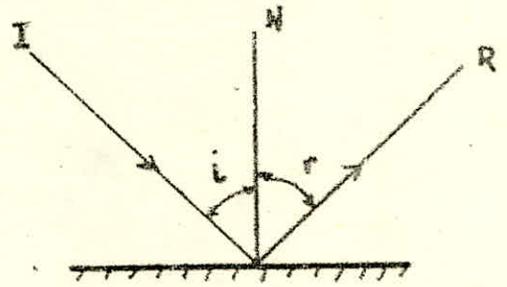


Fig 4-9

Lois de Descartes

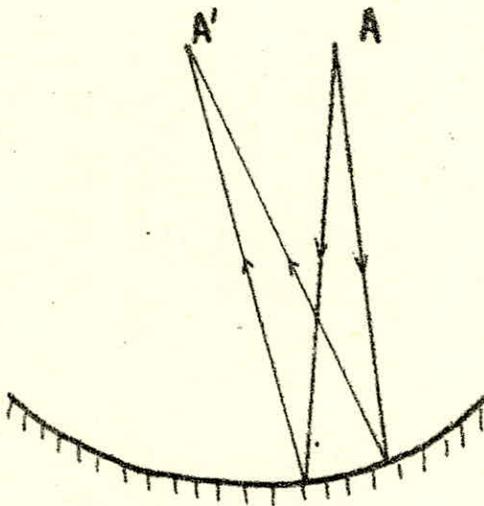


Fig 4-10

Stigmatisme

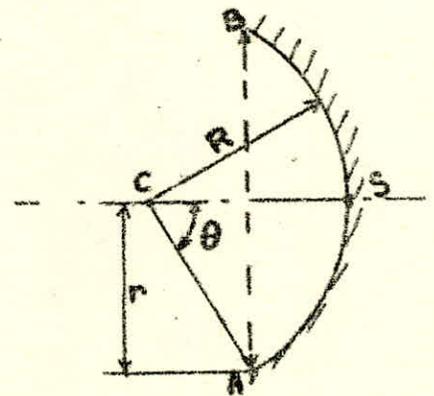


Fig 4-11 - Définition de l'angle et du rayon d'ouverture.

- c centre de la sphère
- S pôle de la calotte = sommet
- θ angle d'ouverture
- r rayon d'ouverture
- AB base de la calotte.

Connaissant la géométrie de la parabole nous définissons la surface A_2 comme étant celle atteinte par les rayons extrêmes réfléchis (fig. 4-8) nous avons donc pour un capteur cylindro-parabolique l'expression suivante pour la concentration.

$$C = \frac{D}{(\pi + 2\alpha)r}$$

où D : diamètre d'ouverture (m)

α : angle en radian (voir fig. 4-8)

r : rayon du tube absorbeur (m)

Pour fabriquer des concentrateurs on utilise des surfaces optiques de grandes dimensions. On a deux catégories de systèmes :

- Les systèmes dioptriques (lentilles de verre) Ils sont exclus du fait de leur fragilité, de leur prix de revient élevé.
- Les systèmes catadioptriques (miroirs). Dans les meilleurs des cas la réflectivité globale atteindra 90 %.

quel que soit le système utilisé la concentration doit être aussi parfaite que possible.

4 - 5 - 3 Rappel de quelques notions fondamentales d'optique géométrique.

a) Loi de Descartes relatives à la réflexion (fig. 4-9)

1 - Le rayon incident, le rayon réfléchi et la normale au miroir se trouvent dans un même plan appelé plan d'incidence.

2 - L'angle de réflexion est égale à l'angle d'incidence.

b) Stigmatisme (cas du miroir sphérique) fig. 4-10

Le point lumineux A a pour image le point lumineux A' en vertu du retour inverse de la lumière A' aura pour image A .

A et A' sont dits conjugués par rapport au système optique ou bien on dit que le système optique est stigmatique. Soit le miroir sphérique représenté sur la figure 4-11. On se limite à une calotte sphérique. L'axe CS est l'axe principal du miroir, tout autre droite passant par C et rencontrant la surface réfléchissante est un axe secondaire. Tout plan passant par l'axe est une section principale.

Un faisceau lumineux formé de rayons parallèles à l'axe principal est transformé, après réflexion, en un faisceau convergent en un point F de l'axe principal appelé foyer image.

F est l'image du point à l'infini sur l'axe principale. Réciproquement tout rayon incident dont le support passe par F est réfléchi parallèlement à l'axe. Pour un miroir sphérique, F est le milieu de CS . La distance $SF = f$ est la distance focale (fig. 4-12)

Le plan perpendiculaire à l'axe et passant par F est le plan focal image.

On démontre qu'un miroir sphérique ne donne d'un objet une image satisfaisante que si :

1 - Le miroir est de faible ouverture

2 - L'objet est plan, petit, perpendiculaire à l'axe principal et centré sur lui (ou vu sous un petit angle s'il est à l'infini)

3 - Les dimensions de l'objet et l'ouverture du miroir sont : telles que tous les rayons lumineux sont des rayons centraux (peu inclinés sur l'axe).

On dit alors que le miroir travaille dans les conditions d'approximation de Gauss (ou qu'il y a stigmatisme approché).

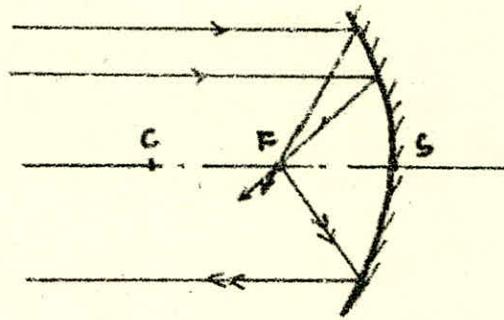


Fig 4-12 . $SF = f$ distance focale

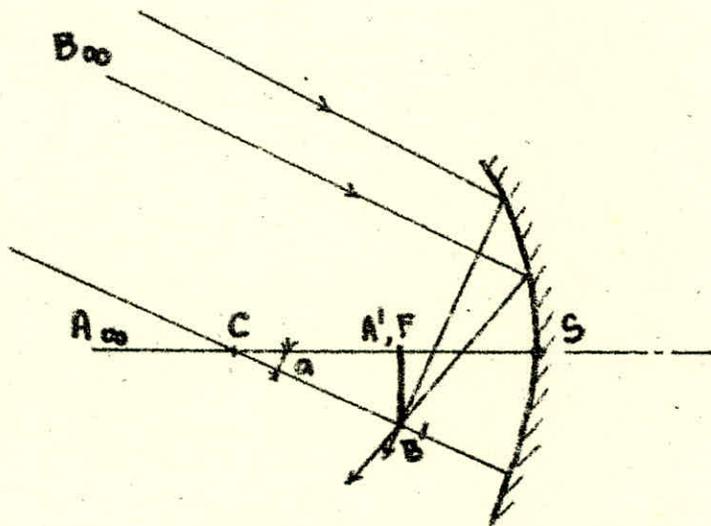


Fig 4-13 . Construction de l'image d'un objet à l'infini

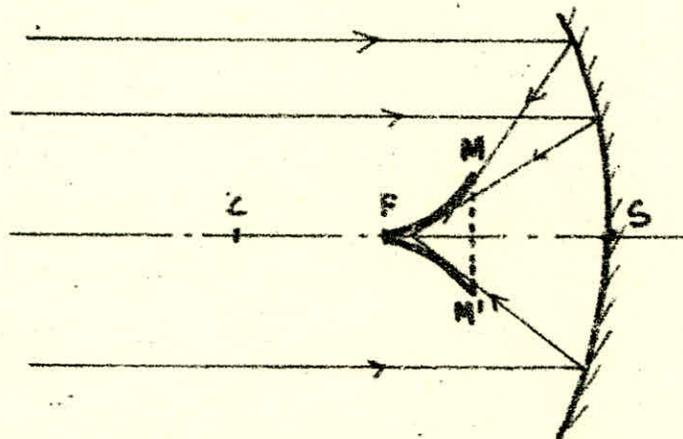


Fig 4-14. Caustique d'un miroir sphérique
MFM' surface de révolution à 2 nappes

c) Construction géométrique de l'image d'un objet perpendiculaire à l'axe et situé à l'infini (fig. 4-13)

Si le plan de l'objet est à l'infini alors son image est dans le plan focal. Le point A sur l'axe a son image A' en F, un point B en dehors de l'axe et dont la distance angulaire au point A est $\hat{\alpha}$ ($\hat{\alpha}$ faible car on est dans les conditions de Frauss), a son image B' au point d'intersection du plan focal et de l'axe secondaire B'C (avec $SC B' = \hat{\alpha}$). L'image est renversée. On peut calculer A'B' dans le triangle C A' B'.

$$A' B' = C A' \hat{\alpha} = \frac{CS}{2} \hat{\alpha} = \frac{R \hat{\alpha}}{2} \quad (\text{miroir sphérique})$$

Exemple : Le diamètre apparent du soleil est 32', soit

$\frac{32}{10.000}$ radian. Le diamètre de l'image solaire donné par un miroir concave de 1 m de rayon d'ouverture est :

$$\frac{1000 \times 32 \times 3}{2 \times 10000} = 4,8 \text{ mm}$$

Dans la pratique le diamètre d'ouverture D n'étant plus petit par rapport au rayon de courbure R du miroir il n'y a plus de stigmatisme. Les rayons réfléchis sont tangents à une surface de révolution à deux nappes appelée caustique (fig. 4-14). Un point lumineux situé à l'infini sur l'axe principal n'a plus pour image le point F mais toute une surface. Il en résulte que la concentration est inférieure à celle d'un système stigmatique.

Sur la page suivante nous avons la distribution de l'éclairement sur différentes sections de la caustique (fig. 4-15).

En général un miroir sphérique de faible ouverture est un assez bon concentrateur. Cependant, si l'on désire des facteurs de concentration plus élevés, il est nécessaire d'utiliser des miroirs paraboliques.

4 - 5 - 4 Exemples de concentrateurs

a) paraboloïde de révolution (fig. 4-16)

Il s'obtient par rotation d'une parabole autour de son axe;

Si D est le diamètre d'ouverture du miroir, f la distance focale, l'angle d'ouverture maximum est :

$$\theta = 2 \text{ Arctg } \frac{D}{4f}$$

La propriété fondamentale d'un miroir parabolique est d'être stigmatique pour le point à l'infini (l'image d'un point à l'infini sur l'axe se trouve au foyer F, fig. 4 - 17)

Cependant même pour un miroir parfait, l'image du soleil n'est pas un point à cause de l'existence d'un diamètre apparent fini ϵ . Le diamètre de l'image du disque solaire est :

$$d = f \times \epsilon$$

Comme $\epsilon = 0,0093$ radian $\approx 0,01$ radian, $d = 0,01 f$

On obtient une image nette du soleil si le rapport du diamètre d'ouverture à la distance focale est faible.

$$\frac{D}{f} < 0,1$$

Si le rapport D/f est grand (il peut dépasser 4) on n'obtient plus une image nette du soleil mais une tache circulaire avec une partie centrale très chaude, dont le diamètre correspond à la formule $d = f \times \epsilon$ (fig. 4-18) nous remarquons que nous ne récupérons pas, dans la tache focale, la totalité de l'énergie captée par le miroir.

Facteur de concentration

Si θ est l'angle d'ouverture, ϵ le diamètre apparent de l'objet à l'infini (soleil par exemple), on montre que la concentration est :

$$C = \frac{4 \sin^2 \theta}{\epsilon^2}$$

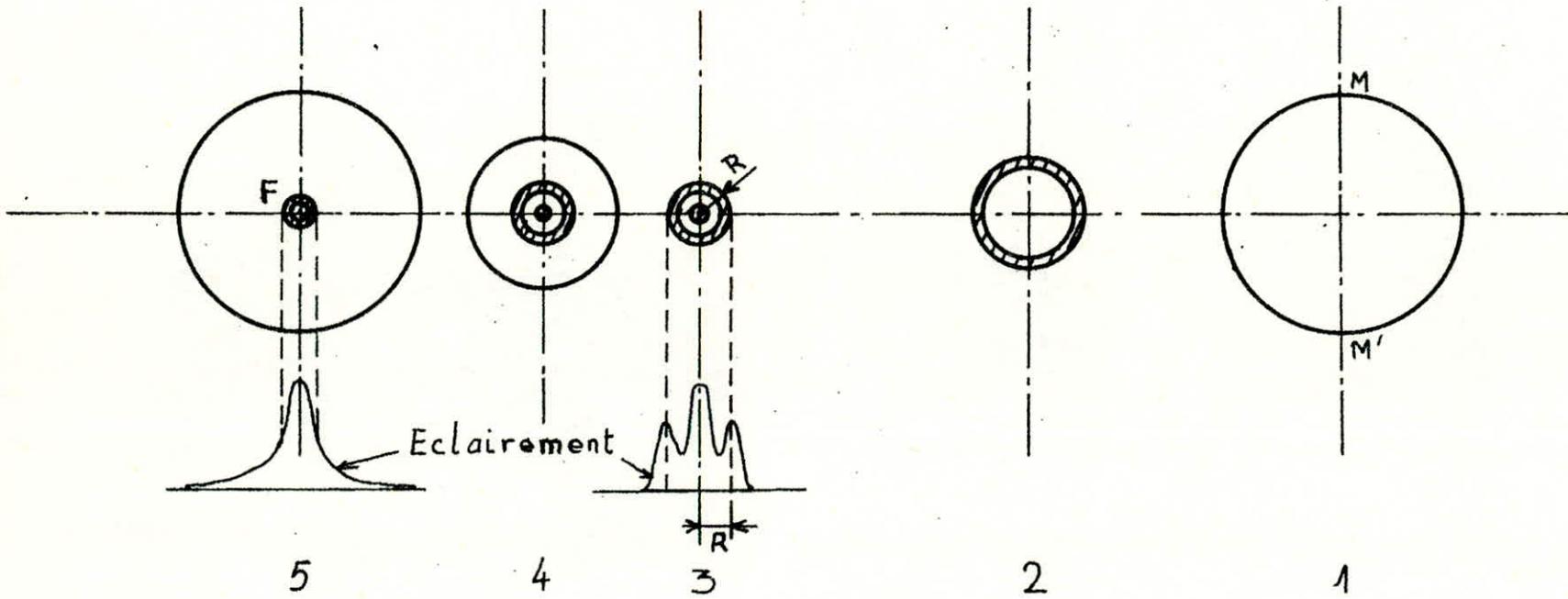
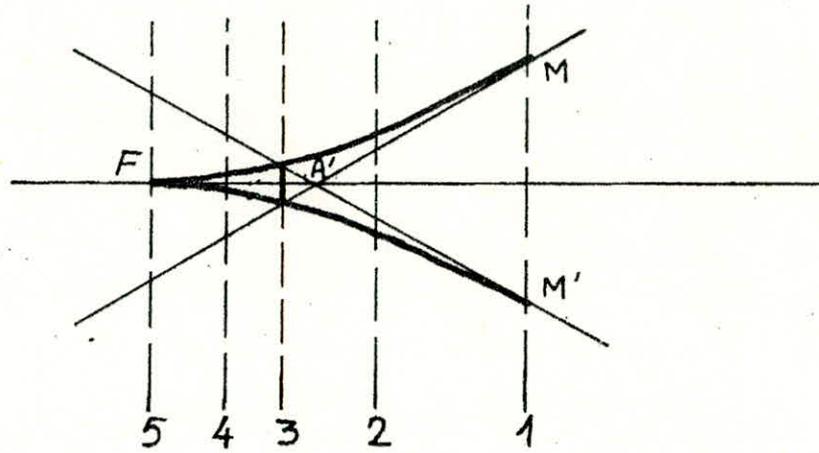


Fig. 4.15. Distribution de l'éclairément sur différentes sections de la caustique.

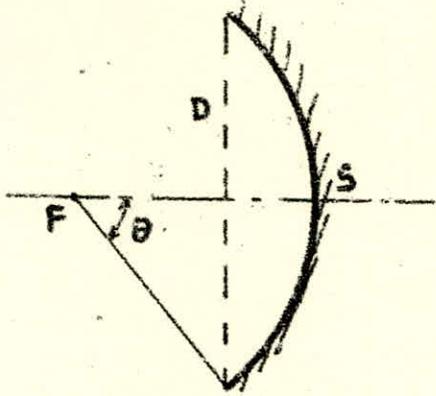


Fig 4-16. Miroir paraboloid

S pôle
 F foyer
 θ angle d'ouverture
 D diamètre d'ouverture.

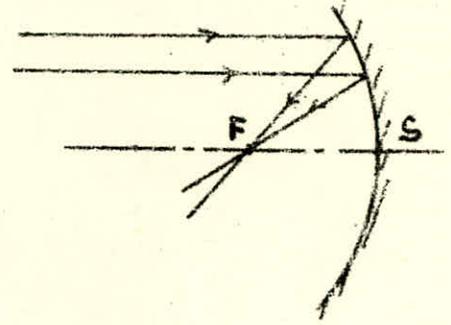


Fig 4-17. Stigmatisme du miroir parabolique.

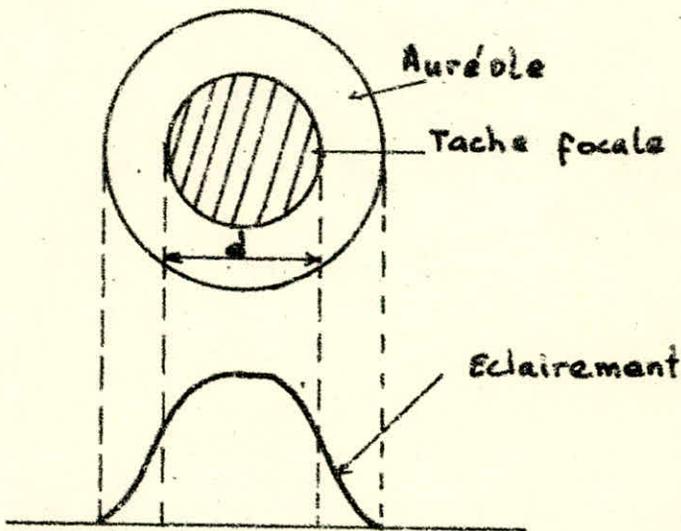


Fig 4-18. Image de Gauss du miroir paraboloid.

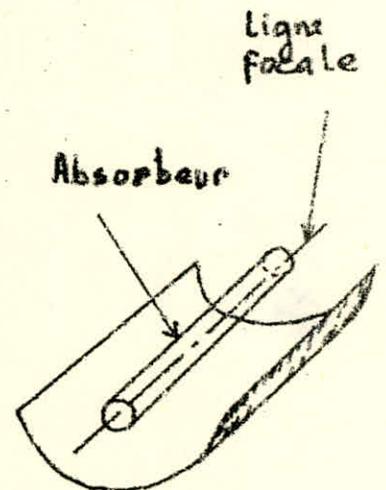


Fig 4-19. Concentrateur cylindro-parabolique.

$$\text{Pour } \theta = 90^\circ \text{ on a } C_{\max} = \frac{4^2}{\varepsilon^2} = 46250$$

Cette valeur est théorique car elle ne tient pas compte des imperfections.

Efficacité du miroir parabolique

C'est le rapport entre l'énergie dans l'image de Gauss (fig. 4-18) et l'énergie incidente. On l'exprime par :

$$\eta = \cos^4\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

Ainsi pour $\theta = 90^\circ$, $\eta = \frac{1}{4}$ l'image de Gauss ne reçoit que le quart de l'énergie incidente. Une partie de cette énergie se répartit dans l'auréole, une partie absorbée par la surface réfléchissante, une partie perdue par rayonnement et convection.

Concentration effective

En plus des facteurs de pertes cités ci-dessus nous avons les irrégularités géométriques de la surface du réflecteur dues à la construction, l'ombre des montures et supports qui diminue la surface de captage et les imperfections de réglage. Tous ces facteurs diminuent l'énergie disponible sur le plan focal. On définit un facteur F appelé facteur de four qui tient compte de ces facteurs et la concentration effective est :

$$C_a = F \times C$$

où C : Concentration géométrique

Températures atteintes

L'énergie incidente I (W/m^2) est reçue, après réflexion dans le plan focal du miroir parabolique, par le corps à chauffer. sa température augmente et il restitue l'énergie par rayonnement et conduction. En limitant les pertes à celles dues au rayonnement (calorifugeage) et en assimilant le four à un corps noir on a :

$$C_e I = \sigma T^4$$

$C_e I$ énergie reçue (W/m^2)

σT^4 énergie émise (loi de Stephan - Boltzmann)

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$$

d'où T, température absolue de l'absorbeur (four)

Exemple

Si $I = 1000 \text{ W/m}^2$, $C_e = 20000$ on a :

$$T = 4310^\circ \text{K} \text{ ou } t = 4037^\circ \text{C} \approx 4000^\circ \text{C}$$

Mais les écarts avec le corps noir et les pertes par conduction ne permettent pas de dépasser 3800°C .

b) cylindre parabolique (fig. 4 -19)

Encore appelé cylindro-parabolique ce type de concentrateur a la forme d'un cylindre droit parabolique. Sa construction est facile et donc peu coûteux cependant il ne permet pas d'atteindre des facteurs de concentration élevés.

Les rayons incidents sont réfléchis sur la ligne focale qui est l'ensemble des foyers des paraboles constituant le cylindro-parabolique.

L'expression de la concentration est :

$$C = \frac{8 \sin \theta}{\pi \varepsilon}$$

(formule approchée)

θ angle d'ouverture

ε diamètre apparent de l'objet à l'infini sur l'axe de la parabole.

Pour le soleil , si $\theta = 90^\circ$

$$C_{\max} = \frac{8}{\pi \varepsilon} = 274$$

La température maximale atteinte par le corps noir placé sur la ligne focale du miroir est de l'ordre de 1200°C . Mais vu l'écart avec le corps noir et les pertes par convection et conduction on atteint des températures inférieures.

4 - 5 - 5 - LES APPLICATIONSa) Le Moteur solaire (fig. 4-20)

D'après le principe de Carnot, on peut obtenir un travail entre une source chaude et une source froide en utilisant un moteur à piston ou une turbine. La source chaude est la chaleur fournie par le concentrateur et comme source froide l'eau pompée pour refroidir le fluide d'expansion (butane ou fréon) dans le condenseur. L'énergie mécanique obtenue pourrait alors servir à actionner une pompe ou un alternateur.

b) Le four solaire

C'est un instrument pour la recherche. On peut étudier dans une atmosphère pure :

- Les réactions à haute température
- Valorisation de matériaux par fusion
- Détermination des performances de matériaux à haute température.

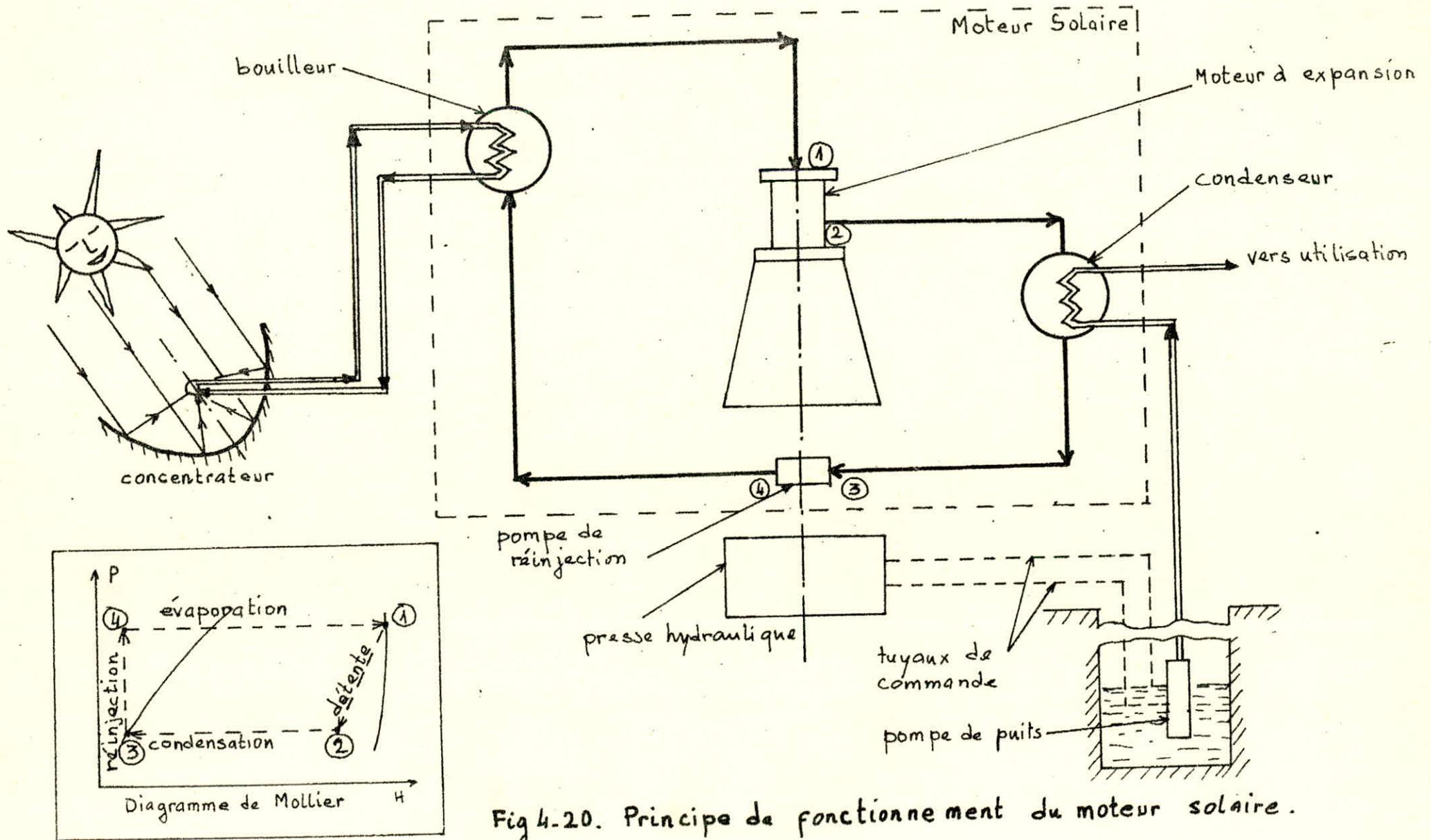


Fig 4-20. Principe de fonctionnement du moteur solaire.

DEUXIEME PARTIE

ETUDE ET REALISATION D'UN CUISEUR SOLAIRE
A CONCENTRATION DIRECT

Comme nous l'avons signalé au début dans le résumé, ce cuiseur va utiliser le rayonnement direct. Nous utiliserons comme concentrateur une portion de paraboloïde.

Le principe est le suivant. Le capteur reçoit l'énergie incidente, la concentre après réflexion dans la zone focale. L'énergie ainsi concentrée peut servir à chauffer notre marmite, ou tout autre corps.

Nous nous proposons en premier temps de calculer nos besoins énergétiques et de déterminer les différents paramètres nécessaires au dimensionnement de notre capteur.

Nous décrivons ensuite les différentes étapes de la réalisation. Et nous terminerons par les expériences.

1 - DIMENSIONNEMENT

1 - 1 - Besoins énergétiques

Nous supposons que nous chauffons de l'eau jusqu'à ébullition. Soit Q la quantité de calories nécessaires pour amener à l'ébullition la masse d'eau m , on a :

$$Q = mc(T_F - T_i)$$

C = chaleur spécifique de l'eau = $1 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$

T_F = température finale = $100 \text{ }^\circ\text{C}$

T_i = Température initiale = $20 \text{ }^\circ\text{C}$

Prenons $m = 4 \text{ kg}$, soit 4 litres d'eau à faire bouillir.

$$Q = 4 \times 1 \times (100 - 20) = \underline{320 \text{ K cal}}$$

Si nous voulons arriver à l'ébullition en 50 mn, la puissance du cuiseur doit être :

$$P = \frac{Q}{t} = \frac{320 \times 4,18}{50 \times 60} = 0,446 \text{ KW} = \underline{446 \text{ W}}$$

1 - 2 - Rendements

Les rayons incidents sont réfléchis vers la zone focale à l'aide de facettes de miroirs dont le pouvoir de réflexion est $r = 0,85$.

La marmite qui sera placée dans la zone focale est peinte en noir mat et son pouvoir d'absorption est évalué à $a = 0,7$

Nous introduisons enfin un rendement qui tient compte des imperfections de la réalisation du concentrateur et des pertes par rayonnement, convection et conduction :

soit $\eta = 0,8$

Le rendement global de notre installation est donc :

$$\eta_g = 0,85 \cdot 0,7 \cdot 0,8 = \underline{0,476}$$

1-3- Surface de captage

A Bouzaréah la valeur du rayonnement direct est en moyenne

$I = 800 \text{ W/m}^2$. D'après les calculs précédents la puissance totale est :

$$P_t = \frac{P}{\eta_g} = \frac{446}{0,476} = \underline{937 \text{ W}}$$

La surface de captage nécessaire est alors (cf chap 4, 1^{ère} partie)

$$S = \frac{P_t}{I} = \frac{937}{800} = \underline{1,171 \text{ m}^2}$$

1-4- Distance focale

Nous avons choisi un secteur de paraboloïde, ceci pour éviter l'ombre de la marmite sur la surface du capteur. L'équation du paraboloïde est :

$$z = \frac{x^2 + y^2}{4f} \quad (\text{fig. 1-1 a})$$

où f est la distance focale.

Si f est grand le paraboloïde est aplati (fig. 1-1b). La surface réelle se rapproche de sa projection orthogonale sur xOy . Vue que le foyer est loin de la surface réfléchissante les effets des erreurs dues à la construction s'accroissent. En optique géométrique on montre que si un miroir réfléchissant tourne d'un angle α alors le rayon réfléchi tourne de 2α .

Par contre si f est petite le paraboloïde est étroit (fig. 1-1c) Le rapport surface réelle sur sa projection orthogonale sur xOy est très grand. Donc il nous faut une très grande surface pour satisfaire nos besoins énergétiques.

Nous prenons $f = 60 \text{ cm}$

L'équation du paraboloïde est alors :

$$z = \frac{x^2 + y^2}{240}$$

2 REALISATION

2-1- Détermination de la portion de paraboloïde

Considérons un plan perpendiculaire à YOZ , tangent au paraboloïde et faisant un angle $\alpha = 35^\circ$ avec le plan XOY . Remarquons que si α est grand la portion est prise loin du foyer, s'il est petit alors la concavité de la partie inférieure de la portion de paraboloïde est très accentuée. Nous avons pris une valeur située dans la moyenne.

Soit M le point de tangence et (X_M, Y_M, Z_M) ses coordonnées. La droite T projection du plan tangent dans le plan YOZ a pour équation.

$$z = \tan 35^\circ \times y + b_0$$

Calculons b_0 .

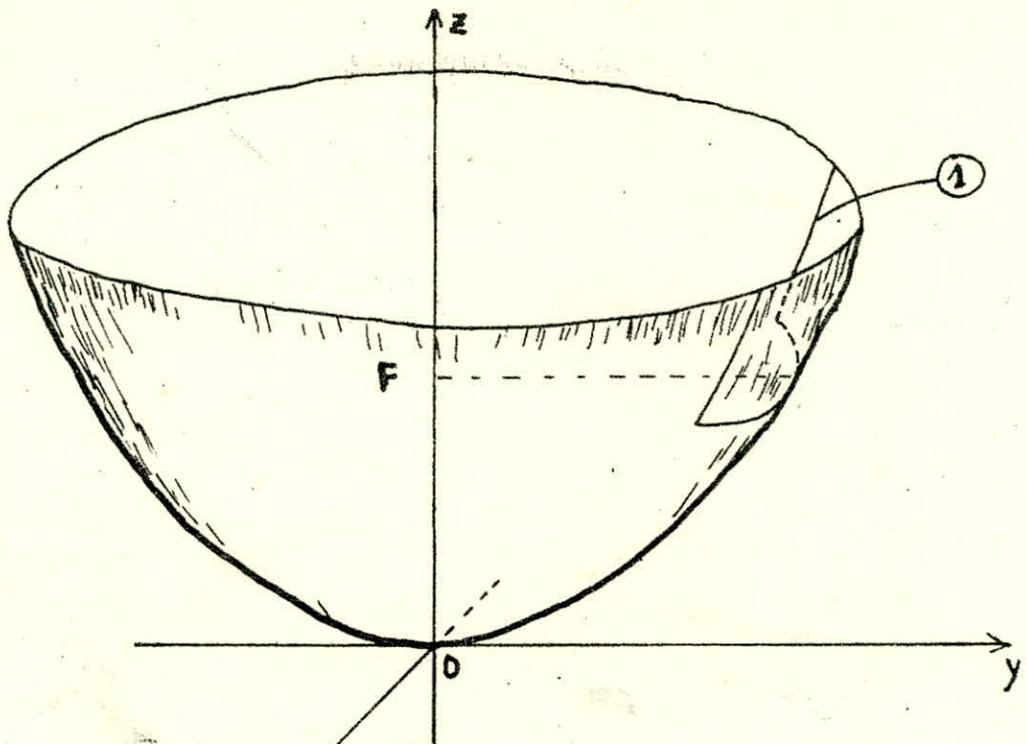


Fig 1-1a

Paraboloïde d'équation $z = \frac{x^2 + y^2}{4f}$

$f = OF$ distance focale.

① Portion de paraboloïde.

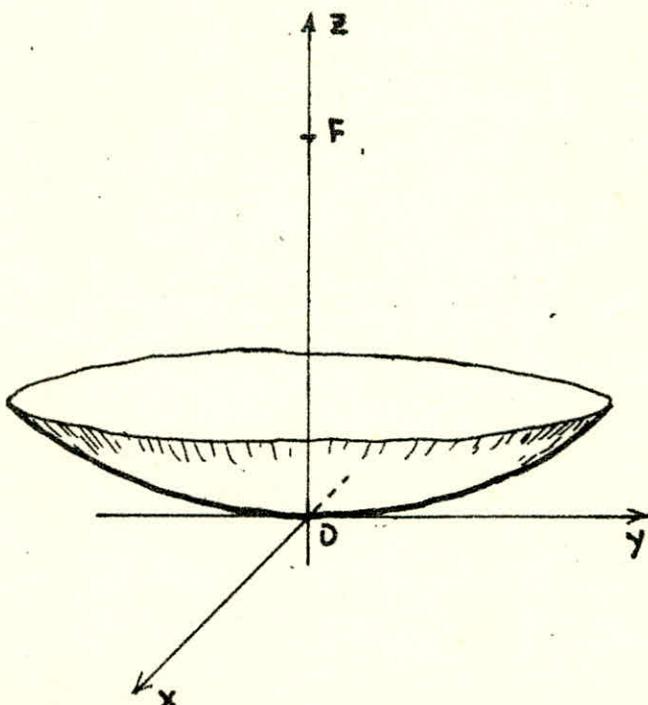


Fig 1-1b. $f = OF$ grand
Paraboloïde aplati

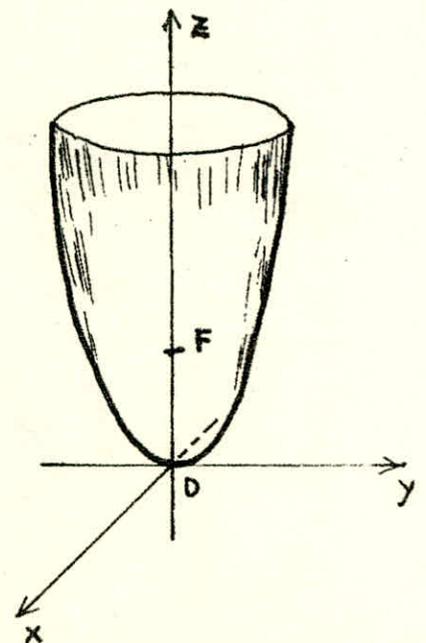


Fig 1-1c. $f = OF$ petit
Paraboloïde étroit.

M appartient à YOZ, donc $x_M = 0$

M appartient au paraboloides, donc

D'où $y_M = 120 \operatorname{tg} 35^\circ = 84,025 \text{ cm}$

On tire $z_M = \frac{(84,025)^2}{240} = 29,417 \text{ cm}$

Les coordonnées du point M sont :

$$\begin{aligned} x_M &= 0 \\ y_M &= 84,025 \text{ cm} \\ z_M &= 29,417 \text{ cm} \end{aligned}$$

M appartient à la droite T

$$z_M = \operatorname{tg} 35^\circ y_M + b_0$$

$$29,417 = \operatorname{tg} 35^\circ \times 84,025 + b_0$$

D'où $b_0 = -29,418$

L'équation de la tangente T est

$$\boxed{Z = \operatorname{tg} 35^\circ X Y - 29,418}$$

2-1-1- Equation d'un plan perpendiculaire au plan tangent

Soit P le plan perpendiculaire au plan tangent et passant par le point M. son équation est de la forme.

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (\text{on prend } d = 1)$$

Pour déterminer a, b, c, il nous faut 3 points distincts appartenant au plan P.

Considérons la droite D intersection de P avec YOZ. D est perpendiculaire à la droite T. Son équation est donc :

$$z = -\frac{1}{\operatorname{tg} 35^\circ} y + b_1$$

M appartient à D :

$$29,417 = -\frac{1}{\operatorname{tg} 35^\circ} \cdot 84,025 + b_1$$

On trouve $b_1 = 149,417$

Donc l'équation de D est :

$$z = -\frac{1}{\operatorname{tg} 35^\circ} y + 149,417$$

Soit N l'intersection de D avec OY . Donc $x_N = z_N = 0$

N appartient à D :

$$0 = \frac{1}{\text{tg } 35^\circ} y_N + 149,417$$

D'où $y_N = 104,623$ cm

Les coordonnées du point N sont :

$$(x_N = 0 ; y_N = 104,623 ; z_N = 0)$$

Soit N_1 un autre point du plan P tel que ses coordonnées soient :

$$(x_{N_1} = 10 ; y_{N_1} = 104,623 ; z_{N_1} = 0)$$

N_1 est un point du plan xOy

Trouvons maintenant les coefficients a, b, c, dans l'équation du plan P.

M appartient à P :

$$(1) a \cdot 0 + b \cdot 84,025 + c \cdot 29,417 + 1 = 0$$

N appartient à P :

$$(2) a \cdot 0 + b \cdot 104,623 + c \cdot 0 + 1 = 0$$

N_1 appartient à P :

$$(3) a \cdot 10 + b \cdot 104,623 + c \cdot 0 + 1 = 0$$

$$(2) \text{ donne } b = - \frac{1}{104,623} = - \underline{9,558 \cdot 10^{-3}}$$

$$(3) \text{ donne donc } \underline{a = 0}$$

$$\text{De (1) on a } c = \frac{-1 + 84,025/104,623}{29,417} = \underline{-6,69310^{-3}}$$

D'où l'équation du plan P perpendiculaire au plan tangent et au plan YOZ :

$$- 9,558 \cdot 10^{-3} y - 6,69310^{-3} z + 1 = 0$$

soit

$$\boxed{9,558 Y + 6,693 Z - 1000 = 0}$$

2-1-2- Détermination de l'intersection parabolofide - plan P

L'intersection du parabolofide et du plan P perpendiculaire au plan tangent sera déterminée à l'aide de quelques points reperés par rapport au plan tangent.

En partant du plan YOZ ($x = 0$) nous allons considérer les plans $x = 10$, $x = 20$, $x = 30$, $x = 40$, $x = 50$ et $x = 60$. (unité cm)

Si $x = 0$, nous avons le point M (fig. 2-1-a)

Soit $x = 10$ cm. Le point d'intersection de ce plan, du parabolofide et du plan P est défini par le système.

$$\begin{cases} x = 10 \\ z = \frac{x^2 + y^2}{240} \\ 9,558 y + 6,693 z - 1000 = 0 \end{cases}$$

Soit $9,558 y + 6,693 \frac{(100 + y^2)}{240} - 1000 = 0$

$$6,693 y^2 + 2293,92 y - 239\,330,7 = 0$$

Nous prenons la valeur positive de y. On trouve :

y = 83,829 cm

Donc $z = \frac{100 + (83,829)^2}{240} = \underline{29,697 \text{ cm}}$

Les Coordonnées du point d'intersection I sont alors :

$$\begin{aligned} x_I &= 10 \text{ cm} \\ y_I &= 83,829 \text{ cm} \\ z_I &= 29,697 \text{ cm} \end{aligned}$$

2-1-3- Distance du point I au plan tangent

Soit H la projection orthogonale de I sur le plan tangent T (fig. 2-1b). Les points I, H et M sont dans le plan P. Le triangle II'M du plan YOZ (fig. 2-1 a) nous permet de calculer cette distance. L'angle I'M est égal à 35° (angles à côtés perpendiculaires).

La distance est :

$IH = IM = \frac{I'I}{\cos 35^\circ}$, or $II' = z_I - z_M$

Donc $IH = IM = \frac{z_I - z_M}{\cos 35^\circ} = \frac{29,697 - 29,417}{\cos 35^\circ}$

Soit IH = 0,341 cm

D'après la symétrie du parabolofide, le symétrique du point I qui est I^m, a pour coordonnées.

$$\begin{aligned} x_{I^m} &= -10 \text{ cm} \\ y_{I^m} &= 83,829 \text{ cm} \\ z_{I^m} &= 29,697 \text{ cm} \end{aligned}$$

En faisant varier x, nous obtenons les points d'intersection correspondants. Les résultats sont portés sur le tableau suivant.

x (cm)	0	10	20	30	40	50	60
IH (cm)	0,000	0,341	1,367	3,085	5,495	8,616	12,461

2-1-4- Calcul de tous les points d'intersection

Traçons des plans parallèles à P, tels que deux plans successifs soient distants de 10 cm. On note ces plans P₁, P₂,, P₇ = P,, P₁₃

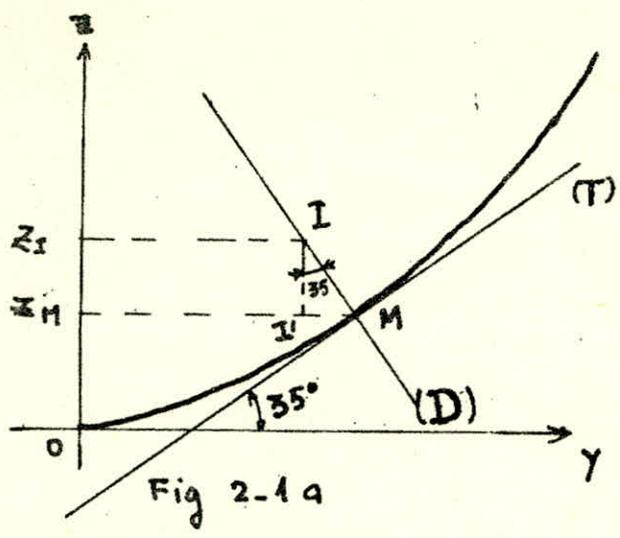


Fig 2-1 a
Projection sur yOz de I

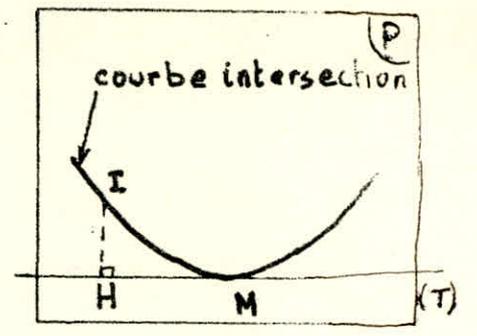


Fig 2-1 b
Projection sur (T) de I

Fig 2-1

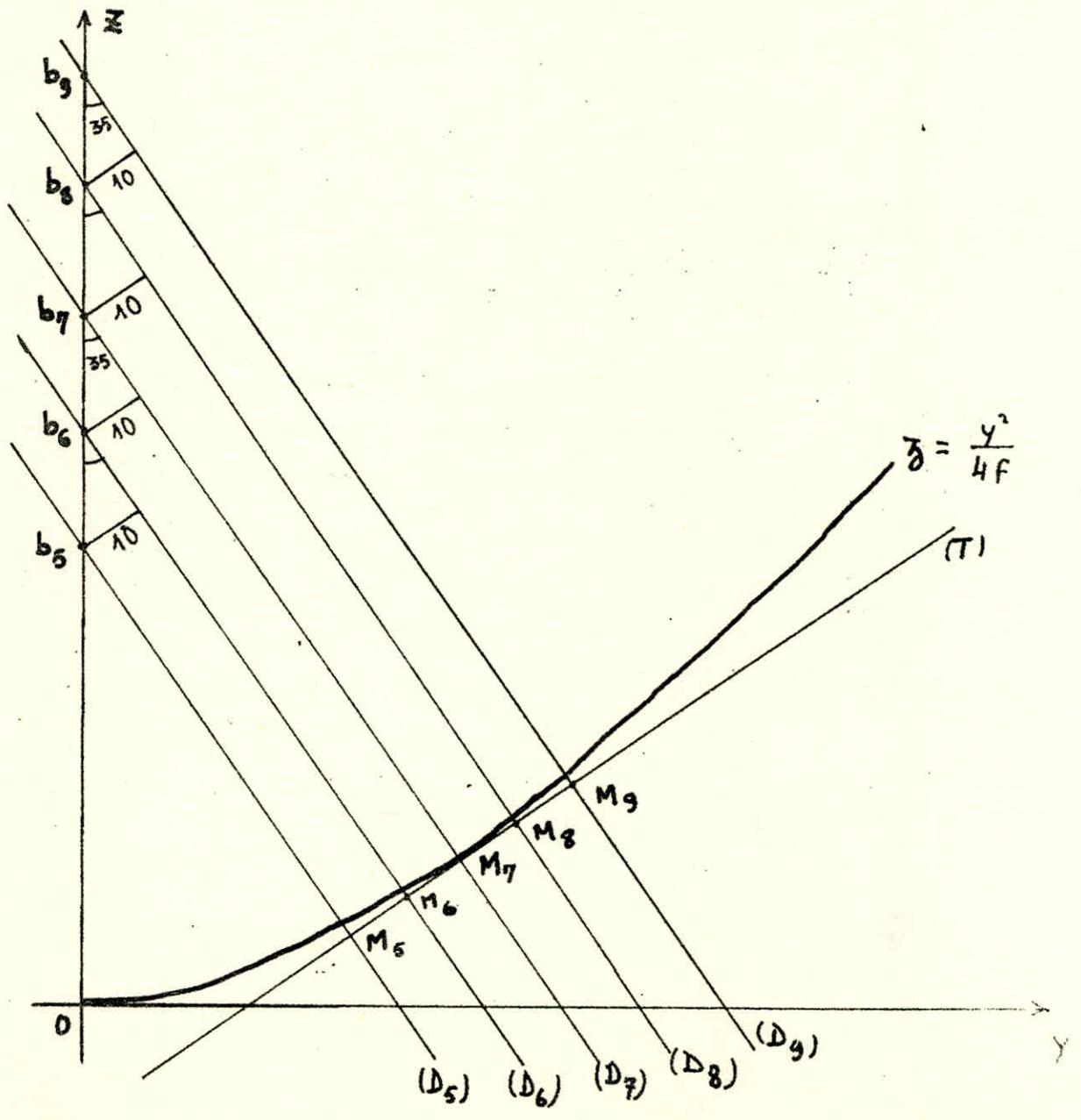


Fig - 2.2. (Echelle 1/10)

A chaque P_i correspond une droite D_i , trace de P_i dans le plan YOZ (fig. 2-2)

a) Equation du plan P_i

L'équation de chaque D_i est de la forme

$$z = -\frac{1}{\operatorname{tg} 35^\circ} y + b_i$$

On sait que $b_7 = 149,417$ cm

D'après la figure 2-2

$$b_8 = b_7 + k, \quad k = \text{constante}$$

$$b_9 = b_8 + k = b_7 + 2k$$

$$b_6 = b_7 - k$$

$$b_5 = b_6 - k = b_7 - 2k$$

D'où la formule générale :

$$b_i = b_7 + (i - 7)k$$

Calculons k

$$k = b_7 - b_6$$

$$\sin 35^\circ = \frac{10}{b_7 - b_6}$$

$$\text{D'où } k = \frac{10}{\sin 35^\circ} = \underline{17,434 \text{ cm}}$$

L'équation des D_i est alors :

$$z = -\frac{1}{\operatorname{tg} 35^\circ} y + 149,417 + (i - 7) 17,434$$

Ou encore

$$\boxed{z = -\frac{1}{\operatorname{tg} 35^\circ} y + 27,379 + i \cdot 17,434}$$

Et l'équation de chaque plan P_i se déduit de l'équation de D_i , (car ^{pour} chaque plan P_i d'équation: $a_i x + b_i y + c_i z + d_i = 0$, le coefficient $a_i = 0$)

$$\boxed{(P_i) : 1,428 y + z - (27,379 + i \cdot 17,434) = 0}$$

b) Distance du point $I(j, i)$ au plan tangent

Soit M_i l'intersection du plan P_i , du plan tangent T et du plan $x = 0$

M_i appartient à la droite T (paragraphe 2-1)

$$z_{M_i} = \operatorname{tg} 35^\circ Y_{M_i} - 29,418$$

M_i appartient au plan P_i

$$1,428 Y_{M_i} + z_{M_i} - (i \cdot 17,434 + 27,379) = 0$$

D'où les coordonnées de M_i

$$= 0$$

$$Y_{M_i}$$

$$z_{M_i}$$

$$x = j = 0$$

Y_{Mi}

z_{Mi}

Pour déterminer les coordonnées de chaque point d'intersection du paraboloïde, du plan P_i et du plan x = j (avec j = 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60) nous avons le système :

$$\begin{cases} x = j \\ z = \sqrt{x^2 + y^2} \\ 1,428 Y + z - (27,379 + i \cdot 17,434) = 0 \end{cases}$$

En fixant la valeur de i on se situe dans le plan P_i, Quand on fait varier j on a les différents points d'intersection du plan P_i et du paraboloïde, soit

$$I(j, i) = (x = j, Y_{ji}, z_{ji})$$

La distance qui sépare ce point du plan tangent T est alors :

$$d_{ji} = \frac{z_{ji} - z_{Mi}}{\cos 35^\circ}$$

Nous avons consigné les résultats dans le tableau de la page suivante. Remarquons que d'après la symétrie nous avons deux couples 60, deux couples 50, etc, deux couples 10 et un couple 0.

2-2- Tracé des couples

2-2-1- Couple correspondant à une ligne

Si nous prenons par exemple la ligne 1, nous pouvons tracer la courbe (1) à partir du plan tangent T. (fig. 2-3) Nous traçons ensuite une deuxième courbe, translaturée de 5 cm de la première. Nous obtenons ainsi un couple que nous numérotions (1).

2-2-2- Couple correspondant à une colonne

D'après la colonne 60, par exemple, nous traçons la courbe (I) à partir du plan de tangence T (fig. 2-4). Nous traçons une deuxième courbe, translaturée de (I) de 5 cm. Nous avons alors un couple que nous numérotions 60.

Les tracés sont faits sur une planche de bois contreplaqué ayant pour dimensions.

Largeur : 1,20 m

Longueur : 2,40 m

Épaisseur : 12 mm

2-3 - Découpage des couples

Matériels utilisés

- Scie - sauteuse électrique
- Ponceuse électrique
- Rube à bois
- Ciseaux à bois
- Scie
- Marteau

Tableau donnant la distance des points I_{ji}
 au plan tangent T (valeurs en mm).

i \ J	0	100	200	300	400	500	600
I3	69,6	72,5	81,2	95,8	116,2	142,6	175,1
12	49,6	52,5	61,5	76,4	97,4	124,4	157,6
11	32,6	35,6	44,8	60,1	81,5	109,3	143,4
I0	18,8	21,9	31,3	47,0	69,1	97,6	132,7
9	8,6	11,8	21,5	37,6	60,3	89,6	125,7
8	2,2	5,5	15,5	32,1	55,5	85,7	122,9
7	0,0	3,4	13,7	30,8	54,9	86,2	124,6
6	2,4	5,9	16,5	34,2	59,2	91,5	131,3
5	9,8	13,4	24,4	42,8	68,7	102,2	143,5
6	22,9	26,7	38,1	57,2	84,1	119,0	162,0
3	42,3	46,2	58,1	78,1	106,1	142,5	187,5
2	68,8	72,9	85,4	106,3	135,7	173,9	221,1
1	103,6	107,9	121,0	143,0	173,9	224,1	263,9

A la ligne i correspond un couple (i)
 A la colonne j correspond un couple (j)
 26 couples au total.

Echelle : 1/10

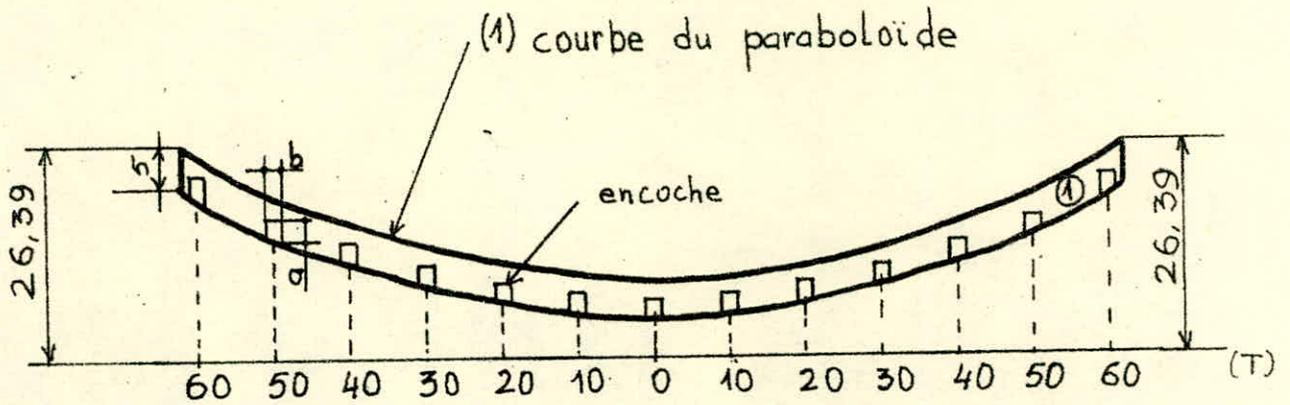


Fig 2.3

Couple correspondant à la ligne n° 1 du tableau.

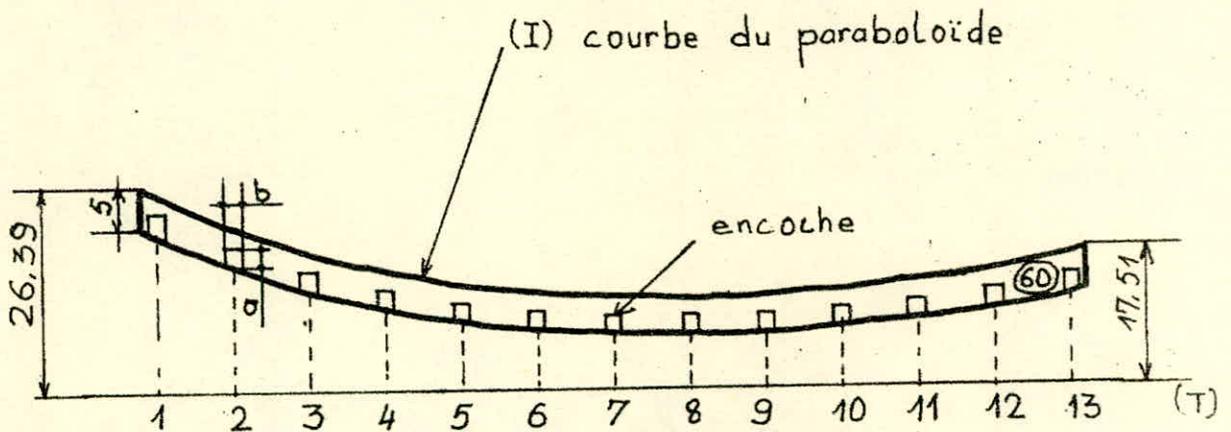


Fig 2-4

Couple correspondant à la colonne n° 60 du tableau.

Nota : $a = 2,5 \text{ mm}$ $b = 1,2 \text{ mm}$

Les encoches ne sont pas représentées à l'échelle pour une raison de clarté.

Les couples tracés seront découpés à l'aide d'une scie - sauteuse qui nous permet de suivre avec une assez bonne précision la courbe (1), ou, (I). Les petits défauts de découpage seront réduits à la rappe.

2-4 Taille des encoches

Les couples sont destinés à être assemblés. L'assemblage se fera par l'intermédiaire des encoches pratiquées sur chaque couple.

La figure 2-3 montre la position des encoches sur les couples correspondant aux lignes du tableau et la fig. 2-4 la position des encoches correspondant aux colonnes.

2-5 Assemblage des couples

Lors de l'assemblage quelques ajustement à la rappe s'avèrent nécessaires au niveau de certaines encoches. Ceci est dû au fait que leur tracé n'étant pas parfait leur emboîtement ne peut l'être. Après avoir assemblé tous les couples nous les collons avec une colle forte au niveau de chaque encoche. Pour maintenir le contact il est nécessaire de fixer par un fil de fer au niveau des endroits collés. Nous laissons l'ensemble ainsi pendant deux heures de sorte que la colle se sèche.

La figure 2-5 montre les couples assemblés

2-6 Rectification

Une dernière rectification à la ponceuse a été faite sur l'ensemble ainsi monté. Elle a pour but d'approcher le plus possible la forme parabololoïde. Pour situer les défauts nous prenons deux miroirs plans 10 X 10 cm. En maintenant fixe un des miroirs nous laissons circuler l'autre. Nous avons dans la zone focale deux taches images. Quand elles se superposent la zone correspondant au miroir mobile est bonne, sinon une rectification est à faire.

2-7 Détermination de la concentration

Nous collons sur la partie concave rectifiée des papiers cartons d'épaisseur 1 mm et nous obtenons la surface de la portion de parabololoïde considérée. Sur toute cette surface seront collées des plaquettes de miroir plan 5 X 2 cm.

Remarquons que plus ses dimensions sont petites plus le miroir épouse la forme parabololoïde.

2-7-1- Détermination par la méthode graphique

Soit un miroir de dimensions $L \times l$, faisant avec le plan horizontal un angle b (fig. 2 - 6) démontrons que l'angle $a = b$

$$a = (\overline{AR}, \overline{AN})$$

$$b = (\overline{BA}, \overline{BC})$$

\overline{AN} est perpendiculaire à \overline{BA}

\overline{AR} " " à \overline{BC}

Donc $a = b$ (angles à côtés perpendiculaires)

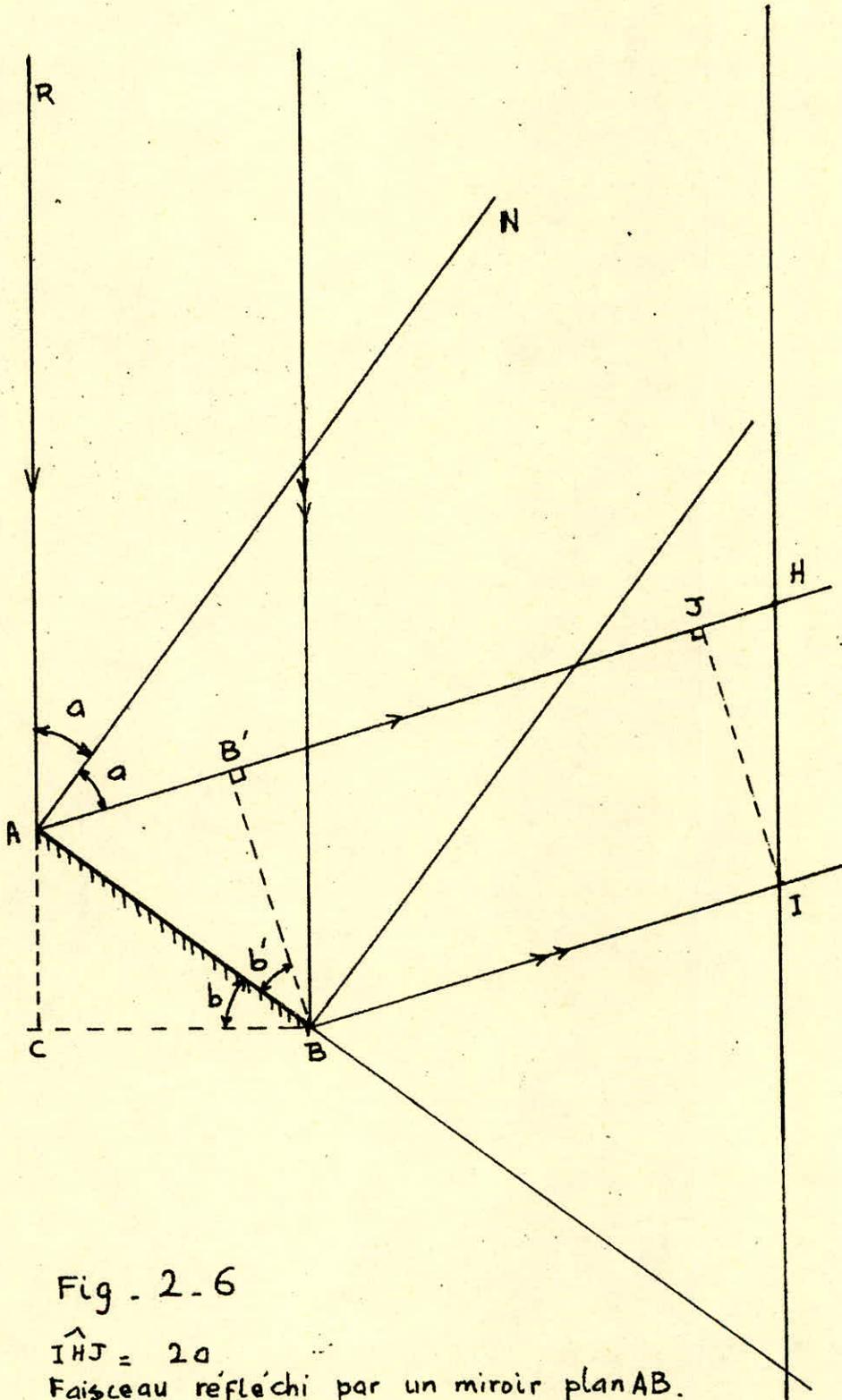
On démontre de même que $a = b'$

Donc $b = b'$ et on peut alors écrire :

$$BC = BB' = AB \cos b = L \cos b.$$

a) expression de b (fig. 2 - 7)

D'après la figure 2-7 nous avons :



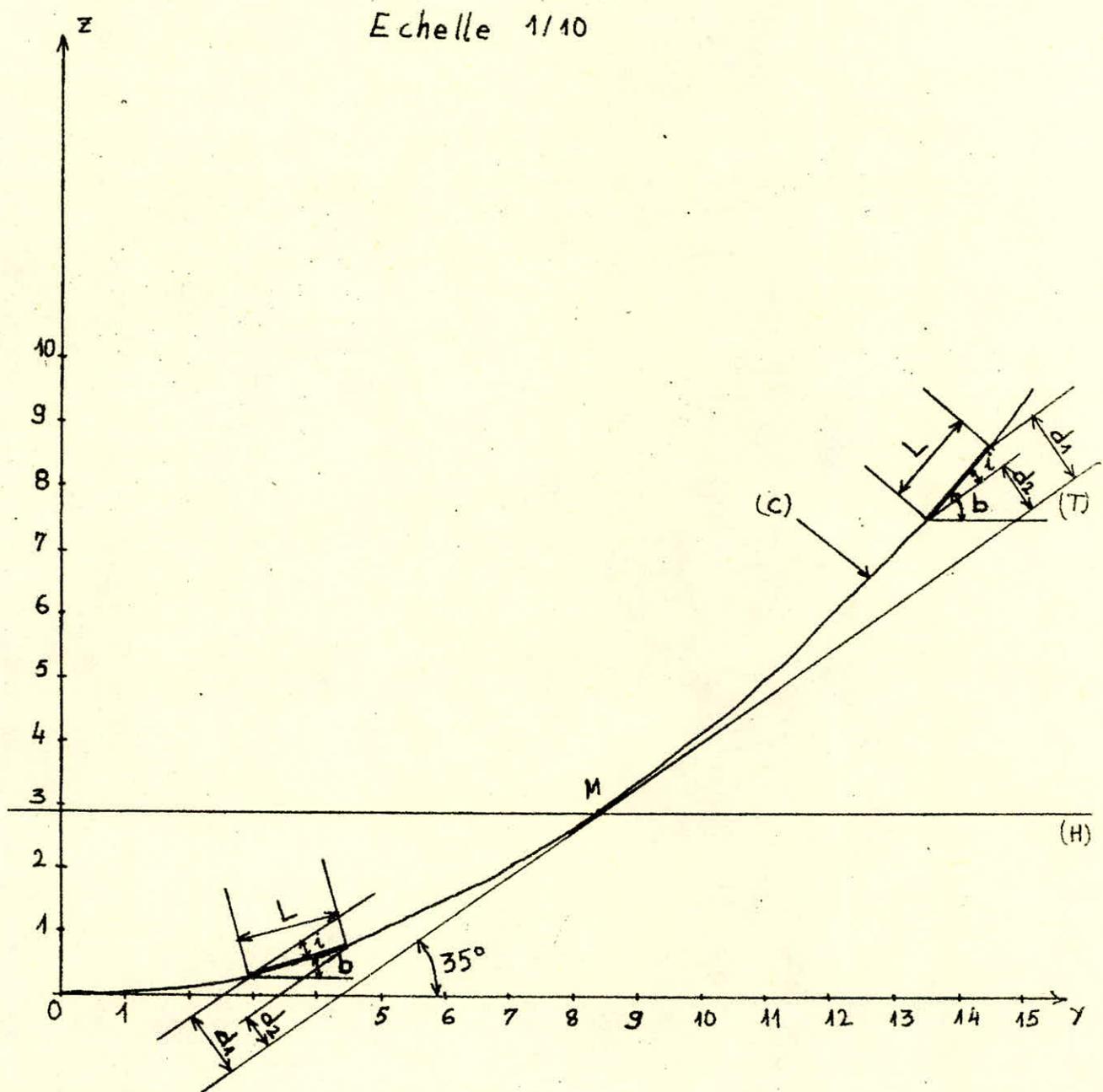


Fig 2-7. Position des plaquettes de miroir plan.

(T) plan tangent

(H) plan horizontal

(C) parabole d'équation $z = \frac{y^2}{240}$

- $b = 35^\circ + i$, si le miroir se trouve au dessus du plan horizontal H passant par le point de tangence M.

L'angle i est donné par la relation :

$$\sin i = \frac{d_1 - d_2}{L}$$

i est variable car $(d_1 - d_2)$ l'est

- $b = 35^\circ - i$, si le miroir est au dessous du plan H.

b) Image du miroir plan

Dans un plan perpendiculaire au faisceau réfléchi cette image est un rectangle de dimensions $l \times L \times \cos b$.

la largeur l de la plaquette est perpendiculaire aux rayons incidents, donc sa longueur reste inchangée après réflexion.

Nous avons donc l'expression de la surface:

$$S = l L \cos (35^\circ + i), \text{ miroir au dessus du plan H}$$

$$S' = l L \cos (35^\circ - i), \text{ miroir au dessous du plan H.}$$

Nous voulons que S ou S' soient assez petites (bonne concentration). Voyons les cas défavorables qui correspondent à S ou S' grandes (mauvaise concentration) :

$\cos x$ est maximum pour x minimum.

- $35^\circ + i$ est minimum pour $i = 0$, mais i ne s'annule pas, donc l'expression S n'est pas à considérer.

- $35^\circ - i$ est minimum pour i maximum, c'est à dire pour $\sin i = \frac{d_1 - d_2}{L}$ maximum donc i est maximum pour $(d_1 - d_2)$ maximum.

D'après le tableau des valeurs donnant la distance des points de la portion de paraboloïde au plan tangent T, nous voyons que $(d_1 - d_2)$ maximum correspond à la colonne 0, ligne 1 et 2. Donc :

$$d_1 = 10,358 \text{ cm}$$

$$d_2 = 6,882 \text{ cm}$$

$$\sin i = \frac{3,476}{L}$$

Premier cas

Prenons un miroir plan carré

$$L = 10 \text{ cm}$$

$$l = 10 \text{ cm}$$

$$\sin i = 0,3476, \text{ d'où } i = 20^\circ$$

$$S' = L \cos (35^\circ - 20^\circ) = 10 \times 10 \cos 15^\circ$$

$$S' = 10 \times 9,660 \text{ cm}^2 \quad (\text{fig. 2 - 8 a})$$

Deuxième cas

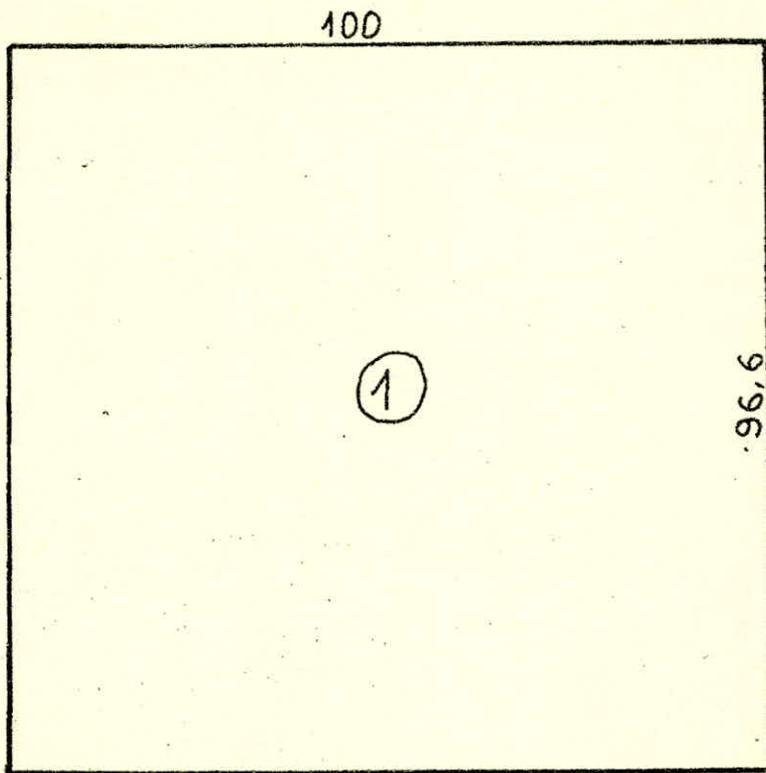
$$L = 5 \text{ cm}$$

$$l = 2 \text{ cm}$$

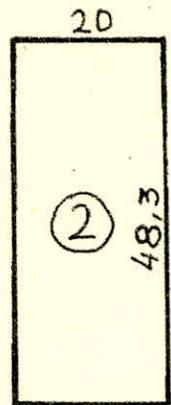
$$S' = 2 \times 5 \cos 15^\circ$$

$$S' = 2 \times 4,83 \text{ cm}^2 \quad (\text{fig. 2-8 a})$$

Les miroirs étant plus petits, nous obtenons une meilleure concentration car nous nous approchons de la forme paraboloïde.



2.8 a
 $S' = 9660 \text{ mm}^2$



2.8 b
 $S' = 96,60 \text{ mm}^2$

Fig 2-8 Echelle 1/1

Section du faisceau réfléchi dans le plan (IJ):

- ① donné par un miroir 100 x 100
- ② donné par un miroir 50 x 20

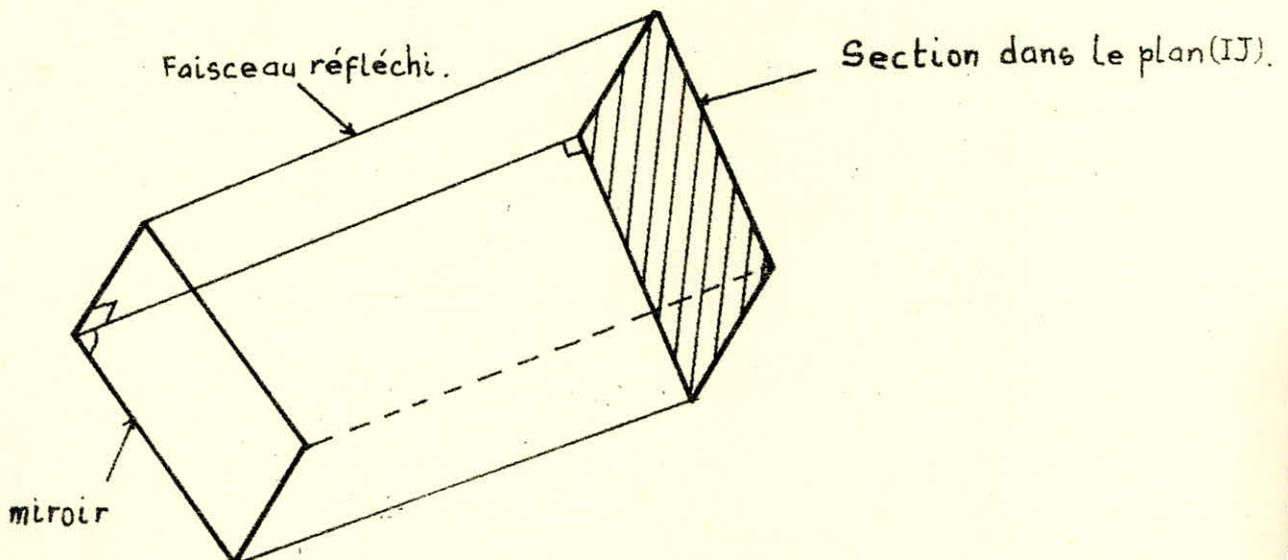


Fig. 2-9

Dans le plan vertical xoz l'image aura pour surface (fig. 2-6)

$$S_v = \frac{S'}{\sin 2b} = \frac{LL \cos b}{\sin 2b} = \frac{LL}{2 \sin b}$$

soit

$$S_v = \frac{2 \times 5}{2 \sin 15^\circ} = 19,32 \text{ cm}^2$$

Nous avons donné sur la figure 2-9 un faisceau réfléchi et la surface S' qui lui est perpendiculaire. La figure 2-10 montre une ~~vue~~ schématique en perspective du capteur et de sa zone focale.

2-7-2 Détermination expérimentale

Comme il est difficile de calculer la surface de la tache focale nous avons préféré la déterminer expérimentalement.

Après avoir collé tous les miroirs nous avons fait un essai. Quand le capteur est correctement orienté (axe vers le soleil) nous avons obtenu une tache très claire d'un diamètre moyen $d = 10 \text{ cm}$, entourée d'une auréole moins claire. La tache très claire est la tache focale.

Plus loin (paragraphe 2-9) nous donnons une méthode pour déterminer la surface de captage? Nous trouvons qu'elle vaut :

$$S_p = 13376 \text{ cm}^2$$

La tache focale a pour surface :

$$S_f = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi 10^2}{4} = 78,54 \text{ cm}^2$$

La concentration effective obtenue est donc :

$$C_e = \frac{S_p}{S_f} = 170$$

Calculons la température maximale qu'on peut obtenir, en supposant que toute l'énergie de la tache focale est absorbée par un corps noir.

Nous avons (cf chap 4, sous paragraphe 4-5-4) :

$$C_e I = \sigma T^4$$

$$I = 800 \text{ W/m}^2$$

$$C_e = 170$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$$

la température du corps noir est donc :

$$T = 1244^\circ \text{K} = 971^\circ \text{C}$$

comme dans la zone focale nous ne placerons pas un corps noir ^{mais} un corps qui l'approche n'obtiendrons donc pas cette température.

Deux expériences ont été faites le même jour que l'essai.

Jour : Lundi 12 Mars 1979

temps: ensoleillé

heure: 13 h 30 mn

Expérience 1

Une feuille de zinc d'épaisseur 1 mm est fondue en 30 s, pour l'élément zinc (zn) la température de fusion est $T_f = 419,5^\circ \text{C}$. Nous pouvons donc dire que la température de la zone de concentration est au moins 420°C .

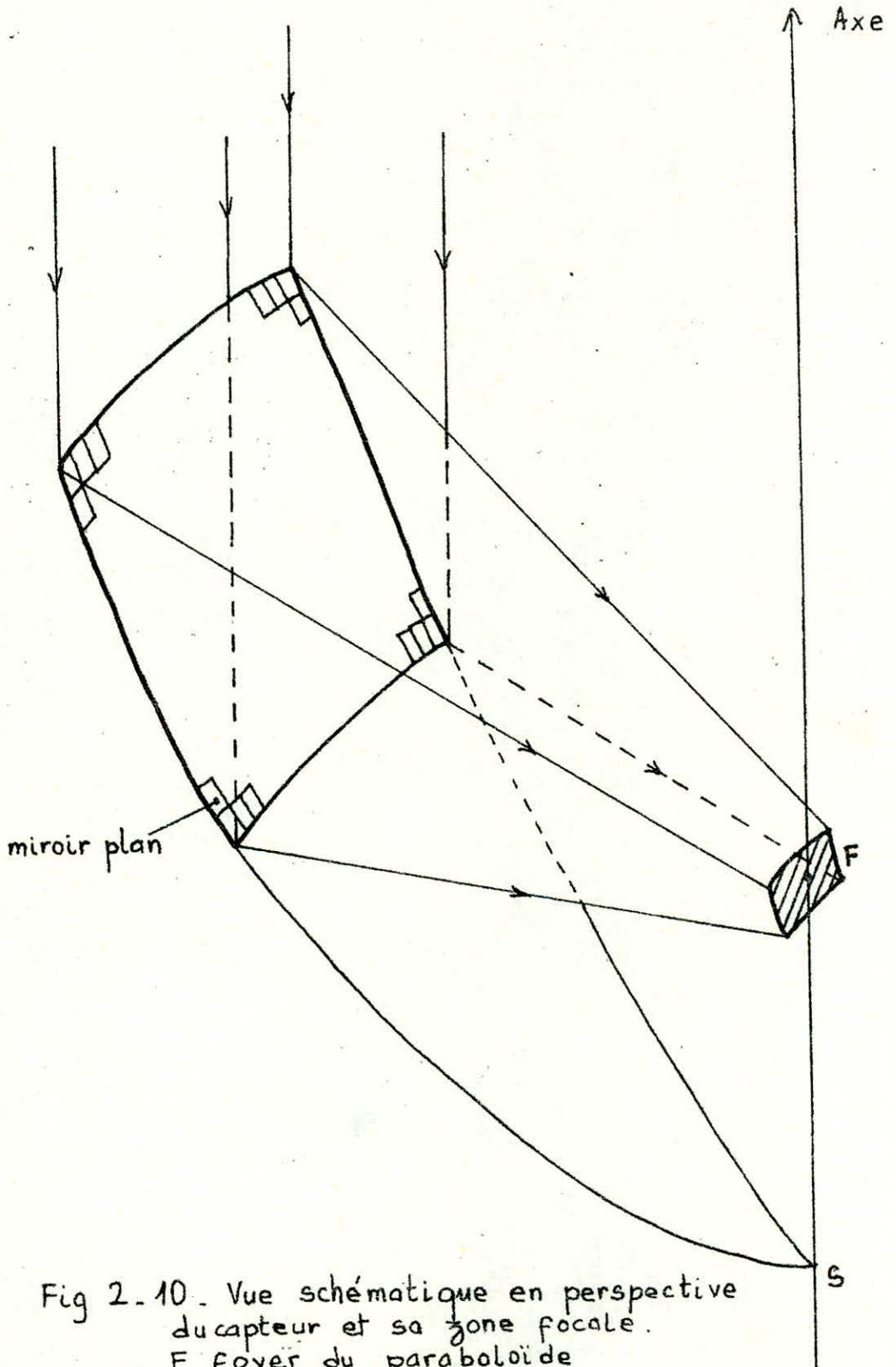


Fig 2-10. Vue schématique en perspective
 du capteur et sa zone focale.
 F foyer du paraboloïde
 S sommet
 $SF = 600 \text{ mm}$ distance focale.

Expérience 2

Un kilogramme de pomme de terre placé dans une marmite peinte en noir mat extérieurement et contenant un demi-litre d'eau à 20°C, est cuit en 40 mn.

Nous concluons d'après nos résultats que la surface du capteur a été réalisée avec une bonne précision. Nous enlevons les plaquettes de miroir et les morceaux de papier carton. Après une autre rectification pour enlever les restes de colle nous remplaçons d'autres papiers carton et nous avons notre modèle.

2 - 8 - Fabrication des capteurs et leur support

Avec l'aide d'un ouvrier nous avons réalisé à l'Unité plastique de la S.N.Métal (Avenue ALN, HUSSEIN-DEY) le moule et les deux capteurs. Ils sont en tissus de verre et polyrésine. Le moule a une épaisseur de 3 mm, et peut nous servir à couler autant de capteurs que nous voulons.

Parallèlement nous avons réalisé le support de chaque capteur à l'atelier du Département de Mécanique.

Nous donnons ci-après les dessins de support et leur montage. Sur l'un des capteurs nous collons les plaquettes de miroir 5 X 2 cm et sur l'autre des feuilles d'aluminium polies, découpées en bande de 10 cm. Nous obtenons ainsi deux surfaces réfléchissantes. Dans les expériences qui vont suivre nous comparerons les performances des deux cuiseurs correspondant.

2 - 9 Détermination de la surface exacte de captage

Nous décrivons maintenant la méthode permettant de tracer la projection de la portion de parabolofide sur un plan perpendiculaire à son axe.

Cette projection n'est autre que la surface de captage. Comme elle n'est pas facile à calculer nous le découpons en trois parties A1, A2, et A3. on peut calculer facilement A2. Mais A1 et A3 seront planimétrées (fig. 2-11).

2-9 -1 - Méthode pour tracer la projection (fig. 2-11)

Traçons à l'échelle 1/2 la parabole $z = y^2/240$, puis la droite tangente T faisant 35° avec l'axe Oy. De part et d'autre de M sur la droite T considérons 6 points de 5 cm en 5 cm. De ces points élevons des droites perpendiculaire à T.

Soit le point 6. De 6 nous abaissons une droite D (6') parallèle à Oz. D (6') coupe l'axe Oy du plan xOy en 6'.

Considérons le plan horizontal (AC). B1 et B2 ses intersections avec le parabolofide et le plan P (6) sur la figure B1 et B2 sont confondus.

De B1 abaissons la droite D (B1) parallèlement à Oz. Traçons à partir de O sur le plan xOy un arc de cercle de rayon AC. ses intersections avec la droite D (B1) sont B'1 et B'2.

On détermine de la même manière d'autres couples de points correspondant à différents rayons, nous avons alors la courbe projection sur le plan xoy de la courbe intersection du parabolofide, du plan horizontal définissant le rayon et du plan P (6) cette courbe est notée (6).

Nous traçons ainsi les courbes 1 et 13 qui délimitent la surface de captage. Nous divisons cette surface en 3 : A1, A2 et A3.

2 - 9 - 1 Valeur de la surface de captageCalcul de A2

$$A2 = L \times l$$

$$L = 120 \text{ cm}$$

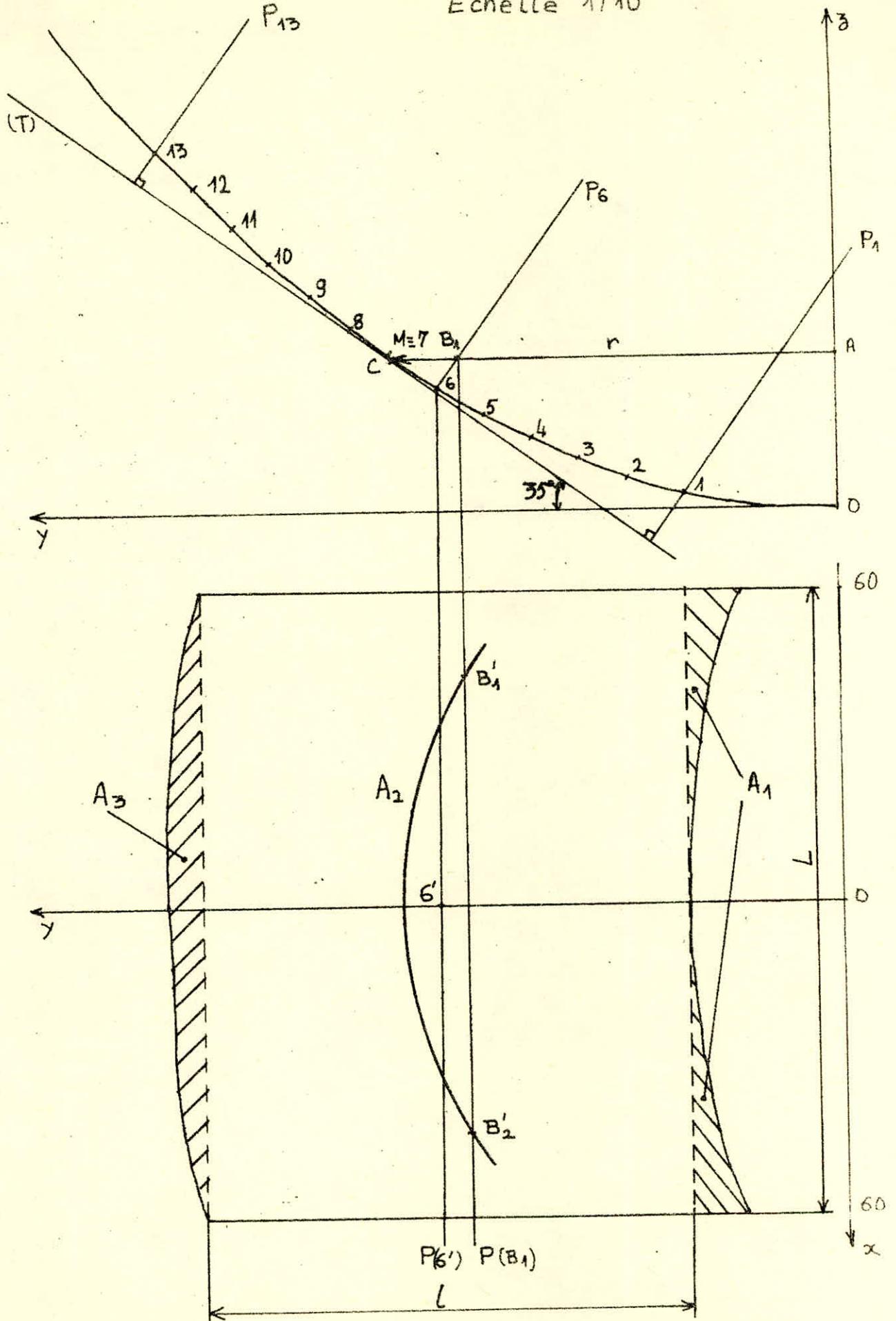


Fig. 2-11. Méthode de tracé de la surface de captage A
 $A = A_1 + A_2 + A_3$

On mesure l et on trouve $l = 94,6$ cm (fig. 2-11)

$$\text{Donc } A_2 = 120 \times 94,6 = 11352 \text{ cm}^2$$

Planimétrage de A_1 et A_3

Nous trouvons :

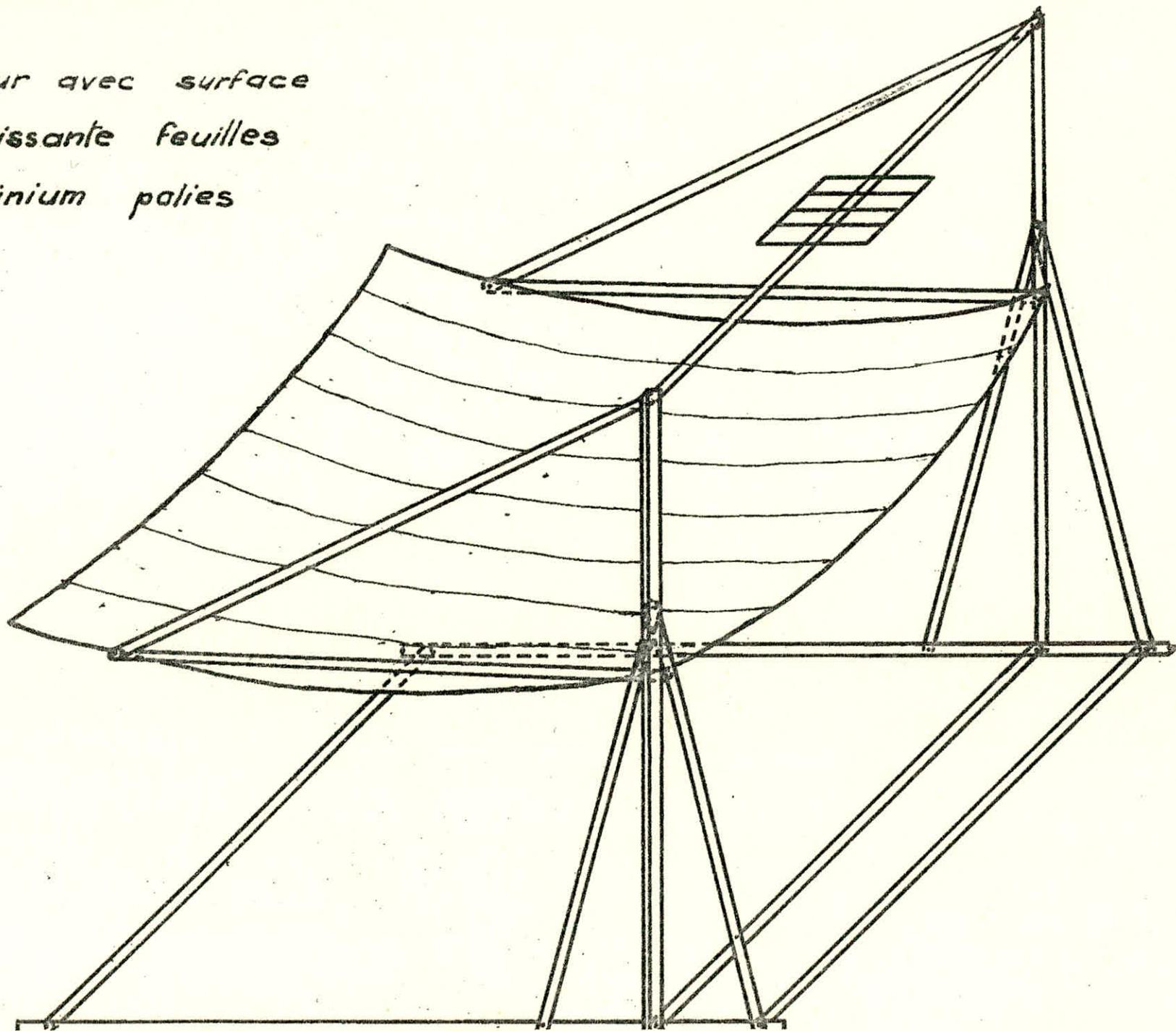
$$A_1 = 504 \text{ cm}^2$$

$$A_3 = 1520 \text{ cm}^2$$

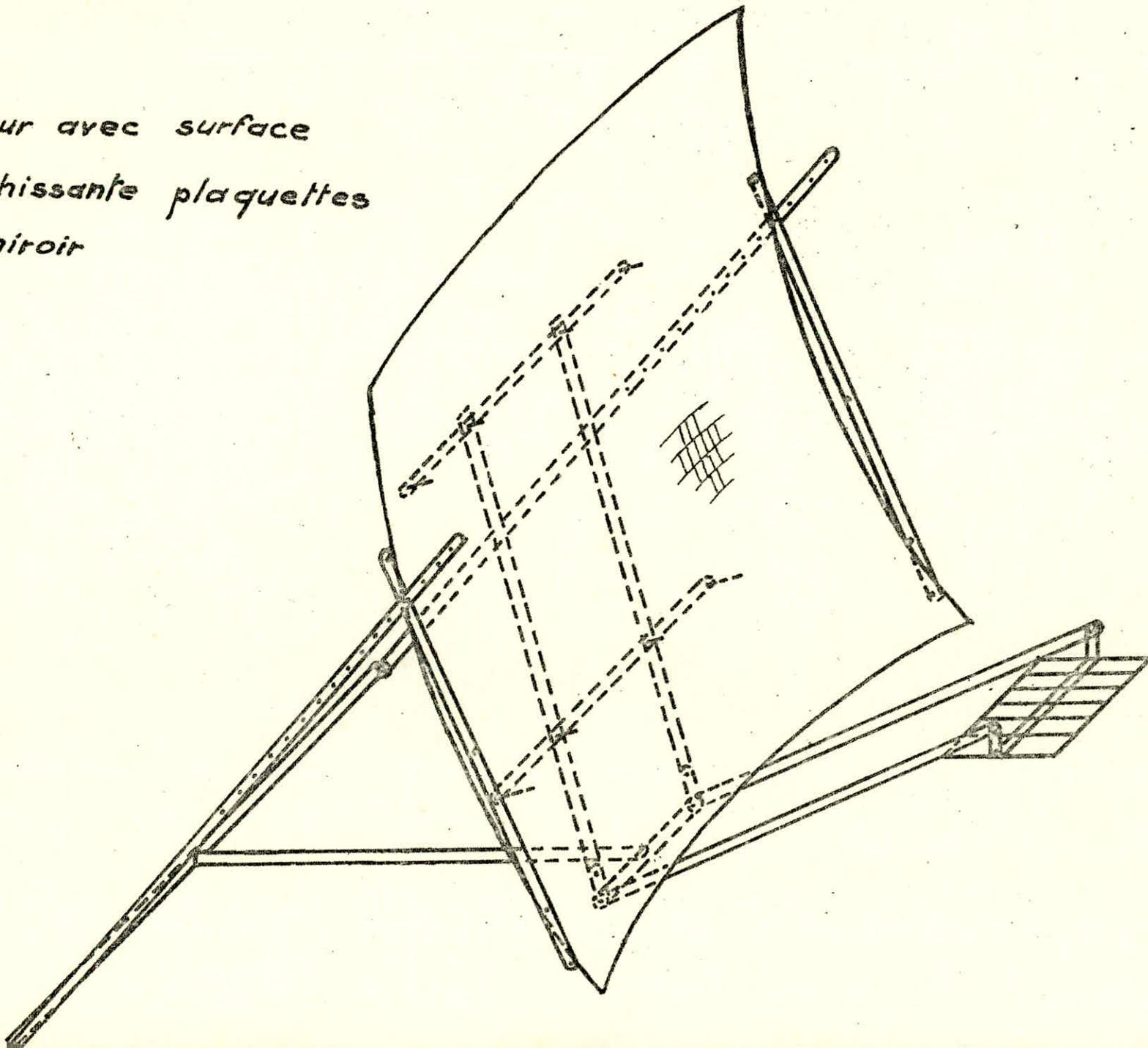
La surface totale est donc :

$$S_p = A_1 + A_2 + A_3 = 13\,376 \text{ cm}^2$$

Capteur avec surface
réflechissante feuilles
d'aluminium polies



Capteur avec surface
réflechissante plaquettes
de miroir



TROISIEME PARTIE

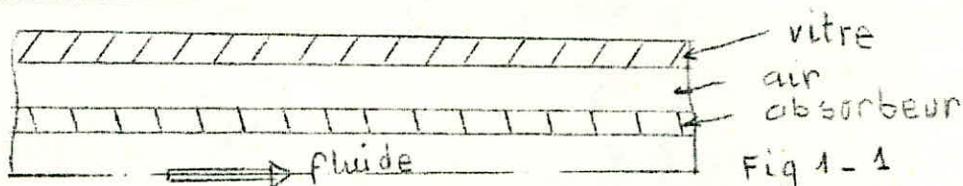
CUISEUR SOLAIRE AVEC
FLUIDE CALOPORTEUR

Pour ce deuxième type de cuiseur nous utilisons un capteur cylindro-parabolique. Les rayons solaires incidents sont réfléchis sur un absorbeur, dans notre cas un tube en galvanisé peint en noir mat protégé à l'aide d'un tube en verre.

La circulation se fait naturellement par thermosiphon. Toutefois nous avons prévu un emplacement pour une pompe si cela s'avérait nécessaire pour notre étude. Le fluide caloporteur est une huile torada TC, fabriqué par SONATRACH. Après son passage au capteur, pour son chauffage l'huile pénètre directement dans le réservoir de stockage. Ce dernier est un tube de grand diamètre auquel nous avons soudé deux plaques l'une en acier (en bas), l'autre en cuivre (en haut) et qui constitue la plaque chauffante du cuiseur. Le réservoir et les conduites sont calorifugés.

1 - DIMENSIONNEMENT DE L'INSTALLATION (1), (4)11- Caracteristiques de l'installation :

Avant de passer au dimensionnement proprement dit, nous avons jugé utile de donner un bref aperçu sur la façon de déterminer ses caractéristiques en régime transitoire. Pour cela un bilan énergétique au niveau des différentes parties est nécessaire.

1-1-1- Bilan thermique au niveau de la zone focale

Soit Q_v la chaleur effective reçue par la vitre pendant un temps dt .

$$Q_v = M_v C_v \frac{dT_v}{dt} = Q_1 + Q_2 + Q_3 - Q_4 - Q_5 \quad (1)$$

Q_1 = chaleur absorbée par la vitre

$Q_1 = a_v \cdot A \cdot G_n$ (on suppose que l'absorbeur est un corps noir idéal).

a_v = coefficient d'absorption du verre.

A = Surface de la vitre illuminée

G_n = densité du flux solaire incident

$Q_2 = A \sigma a_v (T_A^4 - T_v^4)$ = chaleur rayonnée par l'absorbeur vers la vitre

$Q_3 = A h_{c1v} (T_A - T_v)$ = chaleur convective de l'absorbeur vers la vitre.

$Q_4 = A \sigma a_v (T_v^4 - T_c^4)$ = chaleur rayonnée par la vitre vers le ciel

$Q_5 = A h_{cva} (T_v - T_a)$ = chaleur convective de la vitre vers l'air.

1-1-2- Bilan thermique au niveau de l'absorbeur

Soit Q_a = chaleur effective reçue par l'absorbeur

$$Q_a = M_a C_a \frac{dT_a}{dt} = A (G_n \tau_v - Q_2 - Q_3 - Q_6) \quad (2)$$

$Q_6 = A h_{c1f} (T_A - T_f)$ = chaleur convective de l'absorbeur vers le fluide caloporteur.

Avec T_f = température moyenne du fluide

$$T_f = \frac{T_{1f} + T_{2f}}{2} \quad (1. \text{ entrée, } 2. \text{ sortie de l'absorbeur})$$

1-1-3- Bilan thermique du fluide caloporteur au niveau de la zone focale

Soit Q_f = chaleur effective reçue par le fluide

$$Q_f = M_f C_f \frac{dT_f}{dt} = Q_6 - Q_7 - Q_8$$

$Q_7 = h_{cfa} A (T_f - T_a)$ = chaleur échangée entre l'huile et l'extérieur par conduction et convection.

$Q_8 = \dot{m}_f C_f (T_{2f} - T_c)$ = Chaleur emportée par l'huile

1-1-4- Bilan thermique au niveau du réservoir

Soit Q_r = chaleur stockée dans le réservoir R.

$$Q_r = M_r C_r \frac{dT_r}{dt} = \dot{m}_F C_F (T_{2F} - T_{1F}) - Q_g - Q_{10}$$

$C_r = C_f$ (nous avons un circuit sans échangeur)

T_r = température moyenne du réservoir

$$Q_g = A_r h_{crd} (T_r - T_a) = \text{chaleur perdue par convection}$$

A_r = surface extérieure du réservoir après son calorifugeage.

1-1-5- Equation de la circulation d'huile

Dans le cas d'une circulation forcée, le débit étant constant cette équation est éliminée.

$$P_1 + P_2 = \int p g dz + \Delta P$$

avec P_1 = perte de charge linéaire

P_2 = " " locales.

ΔP = charge due à la pompe, si on en place une.

De ces différents bilans nous obtenons 4 équations à 4 inconnues dont la résolution est délicate sans l'aide d'un ordinateur.

$$\frac{d(T_v)}{dt} = f_1(T_v, T_1, t), \quad t = \text{temps}$$

$$\frac{d(T_1)}{dt} = f_2(T_v, T_1, T_F, t)$$

$$\frac{d(T_F)}{dt} = f_3(T_v, T_1, T_F, t)$$

$$\frac{d(T_r)}{dt} = f_4(T_v, T_1, T_F, t)$$

Mais généralement ces caractéristiques T_v , T_1 , T_F , T_r , sont déterminées en régimes permanent.

1-2 - Calcul des besoins énergétiques

1-2-1- Besoin au niveau de la marmite

De même que pour le premier cuiseur nous prenons 4 litres d'eau. Soit Q la quantité de chaleur nécessaire pour faire passer sa température de 20° à 100°.

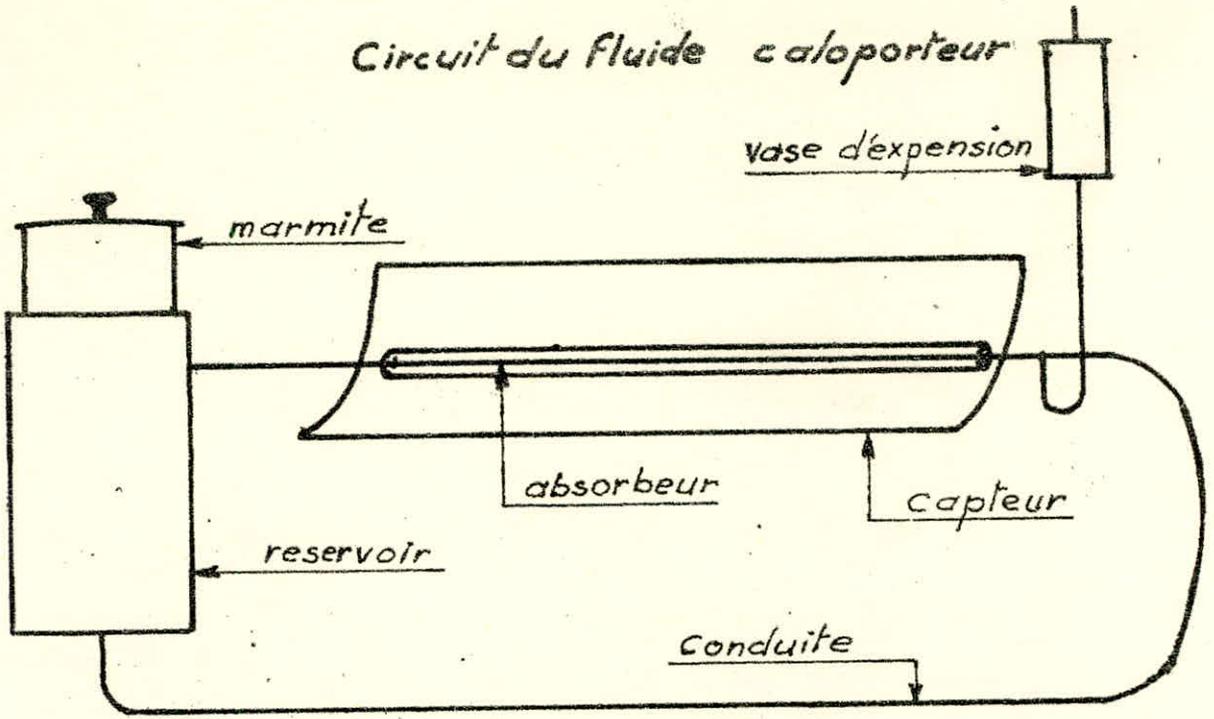
$$Q = M C_p (T_2 - T_1) \\ = 4 \cdot 1 \cdot 80 = 320 \text{ kcal/h.}$$

Le temps nécessaire est supposé 1 heure.

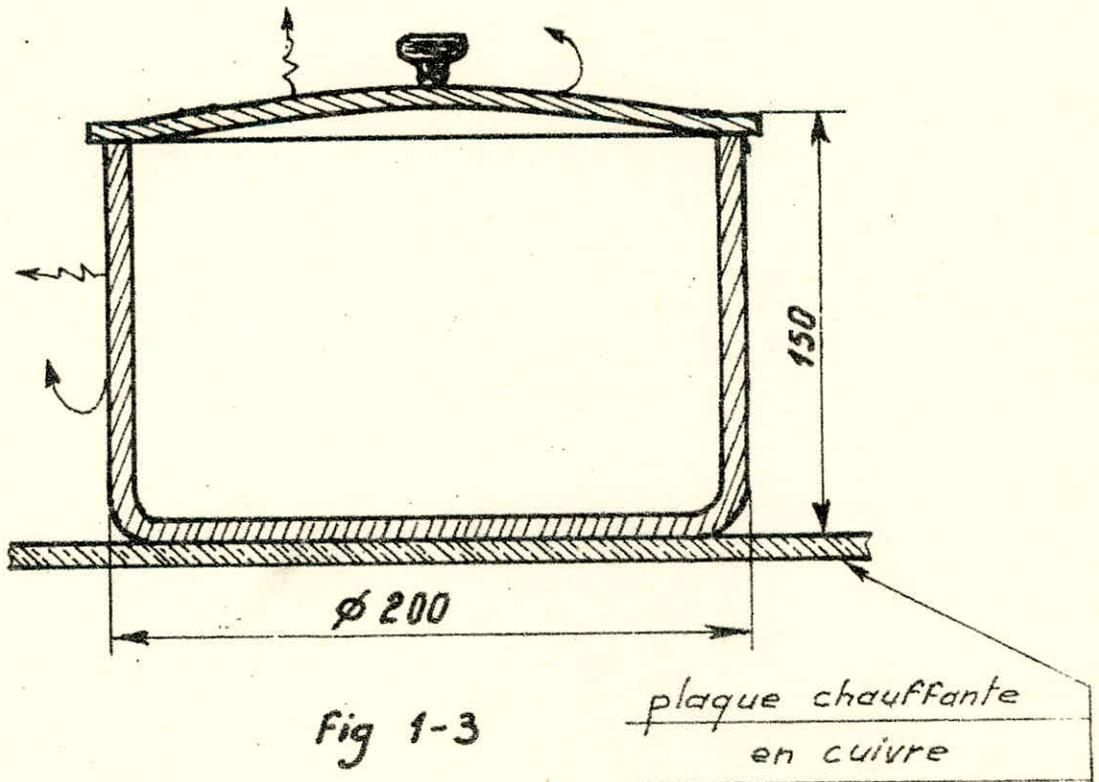
1-2-2- Estimation des pertes (fig. 1-2)

Les différentes pertes calorifiques que nous avons se situent au niveau :

- du tube de verre
- de la conduite calorifugée
- du réservoir de stockage
- de la marmite



Pertes au niveau de la marmite



N'ayant aucune donnée sur les différentes températures le long de l'installation nous ne pouvons pas calculer correctement les trois premières pertes. Nous allons les estimer comme étant la moitié des pertes de la marmite.

Calculons alors les pertes par rayonnement et par convection au niveau de cette marmite fig. (1.3)

Hypothèses

- 1 - Marmite parfaitement étanche
- 2 - surface extérieure à température uniforme $T = 180^\circ \text{C}$
- 3 - seule la marmite est cause des pertes (les pertes dues au rebord de la plaque chauffante seront négligées)
- 4 - La marmite est en acier inox de constante d'émission $\sigma = 1,51 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$

a) pertes par rayonnement (fig. 1-3)

$$\phi_r = \epsilon S = \sum \epsilon_n S = \epsilon S \sigma_n T^4$$

$$\epsilon = \frac{\sigma}{\sigma_n} = \frac{1,51 \cdot 10^{-8}}{5,67 \cdot 10^{-8}} = \frac{1,51}{5,67}$$

$$S = \frac{\pi D^2}{4} + \pi D h \quad \text{avec } D = 0,2 \text{ m et } h = 0,15 \text{ m}$$

Donc

$$S = 0,1257 \text{ m}^2$$

$$\sigma_n = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$$

$$T = 180 + 273 = 453 \text{ K}$$

$$\text{D'où } \phi_r = 80 \text{ W}$$

b) pertes par convection (fig. 1-3)

- Surface horizontale

Le coefficient de convection est donné par la formule suivante (d'après technique de l'Ingénieur tome B 1).

$$h = 2,44 \times (\Delta T)^{0,25}$$

$\Delta T = (180 - 20) = 160^\circ \text{C}$ est la différence entre la température du corps rayonnant et celle du milieu ambiant.

D'où le flux rayonné :

$$Q_{ch} = h S_h \Delta T$$

$$= 2,44 \times (160)^{0,25} \times (0,1)^2 \times 160$$

$$= \underline{45 \text{ W}}$$

Surface verticale

D'après la bibliographie citée ci-dessus, pour un tube vertical dont la hauteur est supérieure à 0,6 m :

$$\alpha = 5,82 \left(\frac{\Delta T}{D} \right)^{0,25}$$

$$\Delta T = 160^\circ \text{C}$$

$$D = 200 \text{ mm}$$

$$\text{et } \alpha = 5,504 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{C}}$$

Si la hauteur H est inférieure à 0,6 m, α est multiplié par un coefficient correctif :

$$\alpha_H = 1,5 \alpha = 1,5 \times 5,504 = 8,256 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

$$Q_{cv} = 8,256 \times \pi \times 0,2 \times 0,15 \times 160 = 125 \text{ W}$$

D'où la somme des pertes :

$$\phi_p = \phi_r + \phi_{ch} + Q_{cv} = 80 + 45 + 125 = \boxed{250 \text{ W}}$$

Cette valeur s'exprime en K cal/h :

$$\phi_p = \frac{250 \times 3600}{4,18} = \boxed{215 \text{ K cal/h}}$$

Nous essayerons de diminuer ces pertes par calorifugeage. En réalité il n'est pas commode de manipuler une marmite calorifugée, nous avons donc préféré l'encastrer dans du liège lorsqu'elle est posée sur la plaque chauffante.

Nous supposons que les autres pertes s'élèvent à :

$$\phi'_p = \frac{\phi_p}{2} = \boxed{107,5 \text{ K cal/h}}$$

D'où le besoin énergétique total :

$$= 320 + 215 + 107,5 = \boxed{642,5 \text{ K cal/h}}$$

1-3 - Evaluation du volume de stockage

Hypothèses :

- Température maximale atteinte dans le réservoir $T_{Ri} = 300 \text{ } ^\circ C$
- Température minimale permettant la cuisson des aliments $T_{Rf} = 200 \text{ } ^\circ C$
- Température de l'huile avant la première chauffe $T_{Si} = 20 \text{ } ^\circ C$
- A la fin de chaque chauffe $T_{Sf} = 300 \text{ } ^\circ C$

La quantité de chaleur utilisable dans le réservoir est

$$Q_R = M C (T_{Ri} - T_{Rf}) = M C \Delta T_R$$

La masse d'huile nécessaire pour satisfaire le besoin énergétique total pendant 1 heure est donc :

$$M = \frac{Q}{C \Delta T_R}$$

$$Q = 642,5 \text{ K cal/h}$$

C = chaleur massique de l'huile

$$C = \frac{C(200^\circ C) + C(300^\circ C)}{2} = \frac{0,61 + 0,69}{2} = 0,65 \frac{\text{K cal}}{\text{kg } ^\circ C}$$

$$\Delta T_R = 100^\circ C$$

$$\text{et } M = \frac{642,5}{0,65 \times 100} = \underline{\underline{9,88 \text{ Kg}}}$$

La densité de l'huile entre 200 et 300°C peut être prise égale à :

$$d = \frac{d(200^\circ) + d(300^\circ)}{2} = \frac{0,75 + 0,68}{2} = \boxed{0,72}$$

Le volume de stockage sera donc :

$$V = \frac{M}{d} = \frac{9,88}{0,72} = \underline{13,7 \text{ l}}$$

Pour construire le réservoir nous avons pris un tube en acier de diamètre intérieur $d_i = 210 \text{ mm}$.

La hauteur nécessaire est donc :

$$h = \frac{V}{S} = \frac{V \times 4}{\pi \times d_i^2} = \frac{13,7 \times 10^6 \times 4}{\pi \times 210^2}$$

Soit $h = 395,5 \text{ mm}$

Nous prenons $\boxed{h = 400 \text{ mm}}$

Et le nouveau volume sera :

$$V' = 400 \times \pi \times \frac{(210)^2}{4} = \boxed{13,85 \text{ l}}$$

La masse réellement stockée est alors :

$$M = V' d = 13,85 \times 0,72 = \boxed{9,97 \text{ kg}}$$

1-4 Calcul de la surface de captage

(Voir 1ere partie Chap. 4, 4-3-2)

Nous supposons arriver à passer de 20°C à 300°C en 2 h.

$$\text{Soit } Q_S = M C (T_{sf} - T_{si}) = MC \Delta T_S$$

La quantité de chaleur nécessaire,

$$M = 9,97 \text{ Kg}$$

$$C = 0,65 \frac{\text{K cal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}$$

$$\Delta T_S = 300 - 20 = 280^\circ\text{C}$$

$$\text{D'où } Q_S = 1814,5 \text{ K cal (en 2 h)}$$

Cette quantité de chaleur doit être fournie par le concentrateur qui capte le rayonnement incident et le concentre sur l'absorbeur.

Les rendements suivant interviennent dans le calcul de l'énergie que doit fournir le capteur :

$$- \eta_c = \text{tenant compte de l'imperfection de la construction, } \eta_c = 0,7$$

$$- \eta_o = \text{rendement optique (état de surface et réflexion)}$$

$$= 0,6$$

La capteur doit alors fournir :

$$Q_c = \frac{Q_s}{\eta_c \times \eta_o} = \frac{1814,5}{0,7 \times 0,6} = 4320 \text{ K cal}$$

Nous supposons que notre cylindre nous fournit cette énergie non pas en 2 h mais en 1 h 30, par une intensité du rayonnement solaire $I = 800 \text{ W/m}^2$.

La surface de captage devra donc être plus grande que si le capteur fournissait Q_c en 2 h. On a :

$$S = \frac{Q_c \times 4,18 \cdot 10^3}{t \times I}$$

Avec $Q_c = 4320 \text{ k cal}$
 $t = 1 \text{ h } 30 \text{ mn} = 5400 \text{ s}$
 $I = 800 \text{ W/m}^2$

et $\boxed{S = 4,18 \text{ m}^2}$

Nous allons maintenant décrire la construction des différentes parties de notre installation qui sont :

- Capteur
- Support
- Réservoir de stockage
- Vase d'expansion
- Tuyauteries

2 REALISATION

Matériels utilisés:

- Scie - sauteuse électrique
- Perceuses
- Rappe
- Postes de soudure oxy-acétylénique et électrique
- Meule électrique
- Cisaille

2-1 Capteur

2-1-1 Détermination de la parabole (fig. 2-1)

Nous avons adopté une distance focale $f = 30$ cm. D'autre part, lors du dimensionnement, nous avons fixé le diamètre d'ouverture du cylindre à $\phi = 140$ cm. Ce qui nous donne un angle d'ouverture θ .

$$\theta = 2 \operatorname{arctg} \frac{d}{4f} = 98,79^\circ$$

2-1-2 Tracé des couples :

L'équation de la parabole est $y = \frac{x^2}{120}$. Tous les couples ici, sont identiques et leur largeur est de 10 cm (voir fig. 2-2)

Le tracé est fait point par point à partir du tableau suivant.

x (cm)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
y (cm)	0,21	0,83	1,87	3,33	5,21	7,5	10,21	13,33	16,87	20,83	25,20	30,00	35,20	40,83

2-1-3 Découpage et parage des couples

Le découpage est fait à l'aide d'une scie sauteuse. L'assemblage des différents couples est fait à l'aide de tuyaux, les traversant de part en part.

Ceci nous a contraint à les empiler, les serrer et les percer en même temps : Ce qui a facilité leur assemblage.

2-1-4 Découpage des feuilles d'aluminium

Soit S la longueur de courbure de la parabole. Prenons un petit élément ds . Dans un repère orthonormé.

$$\text{on a } ds = \sqrt{dx^2 + dy^2}$$

$$s = \int ds = \int \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx = \int \sqrt{1 + y'^2} dx$$

$$S = \int_0^{70} \sqrt{1 + \frac{x^2}{3600}} dx = \frac{1}{60} \int_0^{70} \sqrt{3600 + x^2} dx$$

Faisons un changement de variable pour calculer l'intégrale -

$$x = 60 \operatorname{sh} \theta \Rightarrow dx = 60 \operatorname{ch} \theta d\theta$$

$$\begin{aligned} S &= \frac{1}{60} \int_{\theta_0}^{\theta_1} \sqrt{3600(1 + \operatorname{sh}^2 \theta)} \times 60 \operatorname{ch} \theta d\theta \\ &= 60 \int_{\theta_0}^{\theta_1} \sqrt{1 + \operatorname{sh}^2 \theta} \operatorname{ch} \theta d\theta \\ &= 60 \int_{\theta_0}^{\theta_1} \operatorname{ch}^2 \theta d\theta \\ &= 60 \int_{\theta_0}^{\theta_1} \frac{1 + \operatorname{ch} 2\theta}{2} d\theta \\ &= 30 \left[\theta + \frac{\operatorname{sh} 2\theta}{2} \right]_{\theta_0}^{\theta_1} \end{aligned}$$

Avec $\theta_0 = 0$

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \operatorname{Arg} \operatorname{sh} \frac{7}{6} = \ln \left[\frac{7}{6} + \sqrt{\left(\frac{7}{6}\right)^2 + 1} \right] \\ &= \ln \left(\frac{7 + \sqrt{85}}{6} \right) \end{aligned}$$

Donc

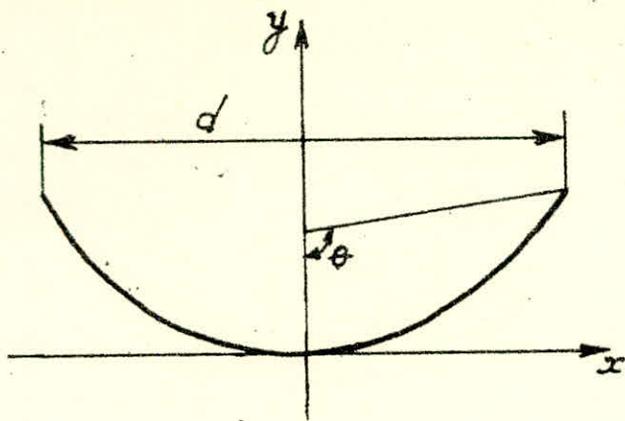
$$S = 30 \left[\theta_1 + \frac{\operatorname{sh} 2\theta_1}{2} \right]$$

On trouve $S = 83,6 \text{ cm}$.

La longueur de la feuille à découper est alors

$$2S = 167,2 \text{ cm}$$

Le capteur fait 3m de long, comme la largeur de la feuille d'aluminium est 0,5m, il nous en faut 6.



Parabole d'équation $y = \frac{x^2}{4F}$

$f = OF = 30 \text{ cm}$

$\theta = 2 \text{ Arctg } \frac{d}{2F}$

$d = 140 \text{ cm}$: diamètre d'ouverture

fig 2-1

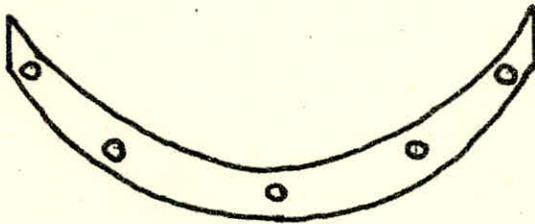
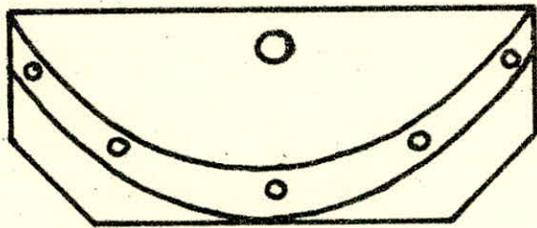
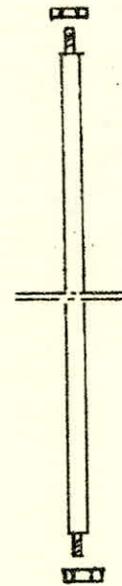
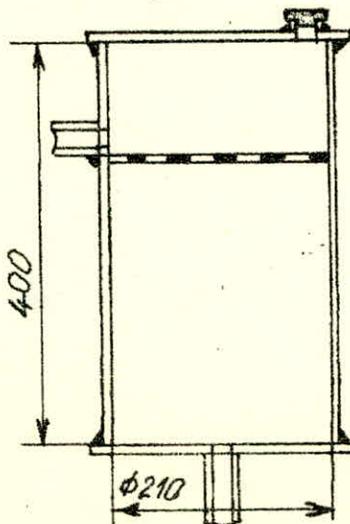


fig 2-2



tube 17/21



Reservoir de
stockage

fig 2-3

2-1-5- Fixation des feuilles d'aluminium

Nous les fixons avec des clous sur le rebord de chaque couple. Pour faciliter le passage des clous nous perçons les bords de la feuille au diamètre 2 mm. Seule la fixation de la feuille aux deux extrémités du capteur est un peu difficile, et pour les couples intermédiaires les deux feuilles reposent sur chaque moitié de l'épaisseur du couple.

2-2- Support

Nous avons trouvé un support de capteur cylindre qui a la même forme que celui que nous avons prévu pour notre cas. Seule la longueur, trop petite, restait à modifier. Nous rajoutons en suite le support du caisson contenant le réservoir et son calorifugeage et à l'autre extrémité nous fixons un autre support pour une pompe éventuelle.

2-3 Réservoir de stockage

Comme nous l'avons déjà mentionné, le corps du réservoir est découpé dans un tube d'acier de diamètre intérieur 210 mm. La hauteur est 400 mm.

A 100 mm d'une extrémité nous soudons un disque perforé en acier pour aider la stratification de la température. L'huile chaude doit rester en effet à la partie supérieure le plus de temps possible.

Une plaque d'acier percée au diamètre 22 mm en son centre, de même épaisseur que le tube est soudée à une extrémité. A l'autre nous soudons un disque en cuivre d'épaisseur 1 mm. Un orifice pour purger l'air entre l'huile et la plaque chauffante en cuivre est prévu (l'huile doit être en contact avec la plaque, pour un meilleur échange thermique).

Après toutes les soudures un essai à l'étanchéité doit être fait, en remplissant d'eau le réservoir. Les points de fuite doivent être éliminés par un autre dépôt de métal.

2-4 Vase d'expansion

C'est un volume qui permet la dilation de l'huile entre la température ambiante et celle du régime de fonctionnement.

Calcul du volume

La formule donnant la dilation volumique est :

$$V = V_0 (1 + 3 \alpha t)$$

V_0 Volume à température 0°C

V " " " $t^\circ\text{C}$

t température ($^\circ\text{C}$)

α coefficient de dilatation

Si le volume change avec la température la masse, elle, reste constante.

Nous avons :

$$V = \frac{M}{d}, \text{ donc } V_0 = \frac{M}{d_0}$$

$$\text{D'où } \frac{V}{V_0} = \frac{d_0}{d} = (1 + 3 \alpha t)$$

$$\text{et } \alpha = \frac{d_0/d - 1}{3t}$$

avec d_0 densité à 0°C

d " " à $t^\circ\text{C}$

Nous avons prévu un fonctionnement à 300°C.

Calculons α pour 20°C et 300°C

$$d_{0^{\circ}} = 0,875$$

$$d_{20^{\circ}} = 0,863$$

$$d_{300^{\circ}} = 0,682 \quad (\text{interpollation})$$

Nous trouvons d'après la formule précédente

$$\alpha_{20^{\circ}} = 23,175 \quad 10^{-5}$$

$$\alpha_{300^{\circ}} = 31,443 \quad 10^{-5}$$

A la température ambiante 20°C l'installation (reservoir-conduite) contient environ 16 l.

Volume V_0 : 16

$$V_0 = \frac{16}{1 + 3 \times 23,175 \times 10^{-5} \times 20} = 15,78 \text{ l}$$

Volume à 300°C

$$V = 15,78 (1 + 3 \times 31,443 \times 10^{-5} \times 300) = 20,24 \text{ l}$$

L'excès de volume à 300°C est donc $\boxed{4,24 \text{ l}}$

Nous prenons un volume de 5 l.

La vase d'expansion est faite d'un tube d'acier de diamètre intérieur 105 mm, d'où une hauteur supérieure ou égale à 580 mm. Nous l'avons fermée aux deux extrémités par deux disques en acier (voir fig. 2-4)

2-5 Circuit du fluide caloporteur (fig. 2-5)

Nous avons adopté une conduite en acier galvanisé de diamètre 15/21. Le circuit se compose de trois tronçons:

- 1 - Tronçon rectiligne (absorbeur)
- 2 - Tronçon cintré en une seule région
- 3 - Tronçon cintré en deux régions

Nous avons préféré, cintré les tubes pour éviter l'utilisation des coudes à 90° (causes de pertes de charge importantes).

L'assemblage des différentes parties de l'installation se fait à l'aide de raccords démontables.

Les tronçons 2 et 3 sont reliés entre eux par un té qui sert en même temps de trou de vidange.

Trois autres tés (sortie de l'absorbeur, sortie du réservoir, entrée de l'absorbeur) sont montés pour le placer des thermomètres. Un dernier té placé lui aussi à l'entrée de l'absorbeur nous permettra de brancher la vase d'expansion.

2-6 Montage de l'enveloppe

Il serait intéressant d'avoir une enveloppe en un seul morceau, mais les tubes de verre manquent sur le marché national. Nous avons monté trois tronçons de tube de verre de diamètre extérieur 42 mm, d'épaisseur 3 mm. Ils sont centrés sur l'absorbeur à l'aide de bagues.

Vase d'expansion

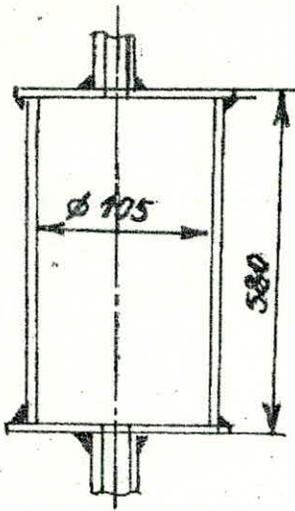


Fig 2-4

Calorifugeage du reservoir

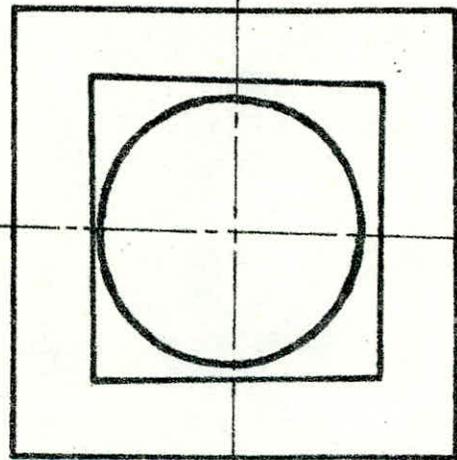
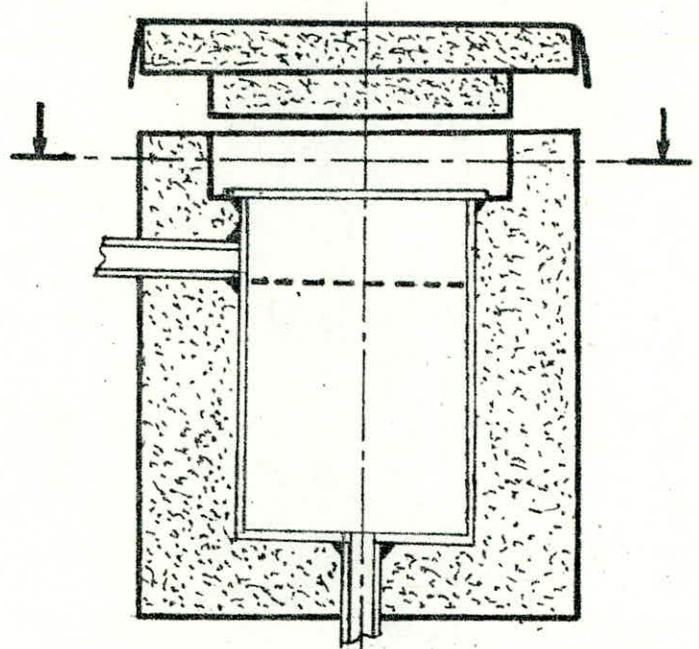


Fig 2-6

Conduite

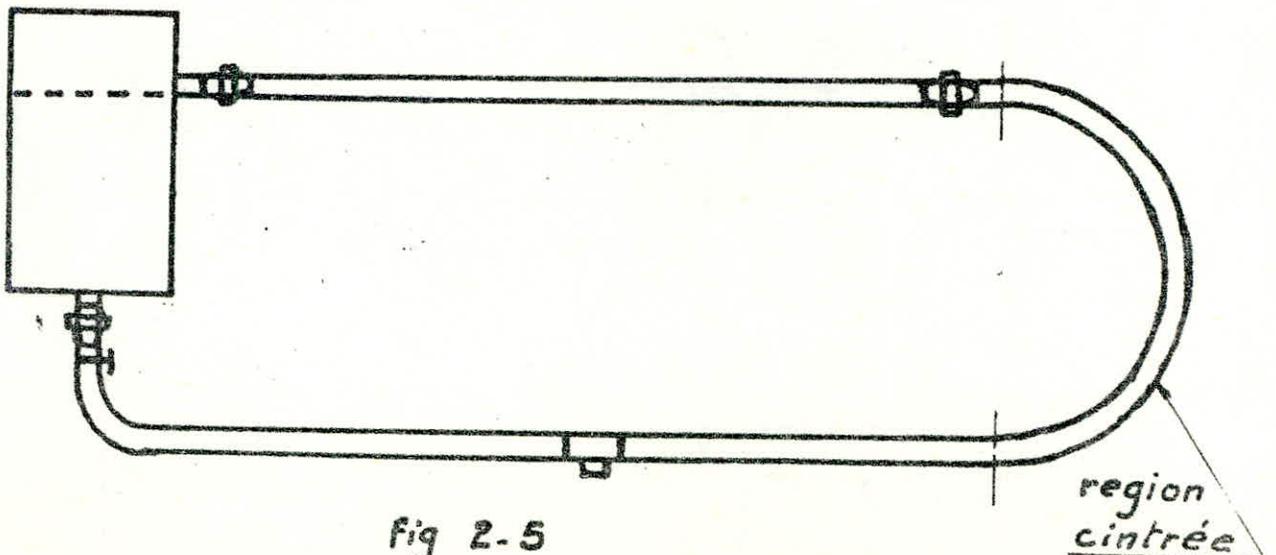


Fig 2-5

2-7 Calorifugeage

2-7-1 Réservoir

Ses diamètres sont :

intérieur $d_i = 210$ mm

extérieur $d_e = 220$ mm

Il est en acier de coefficient de conduction

$$\lambda_1 = 43 \frac{W}{m^{\circ}C}$$

Nous choisissons comme isolant thermique le liège de coefficient de conduction:

$$\lambda_2 = 0,043 \frac{W}{m^{\circ}C}$$

Le diamètre critique de calorifugeage est :

$$d_{cr} = \frac{2\lambda_2}{h_2}$$

$h_2 = 10 \frac{W}{m^2^{\circ}C}$ coefficient d'échange par convection avec l'air ambiant.

d'où $d_{cr} = 86$ mm

Nous devons avoir $\lambda_2 \leq \frac{h_2 d_e}{2}$ et $d_{cr} \leq d_e$ pour que l'isolation soit effective.

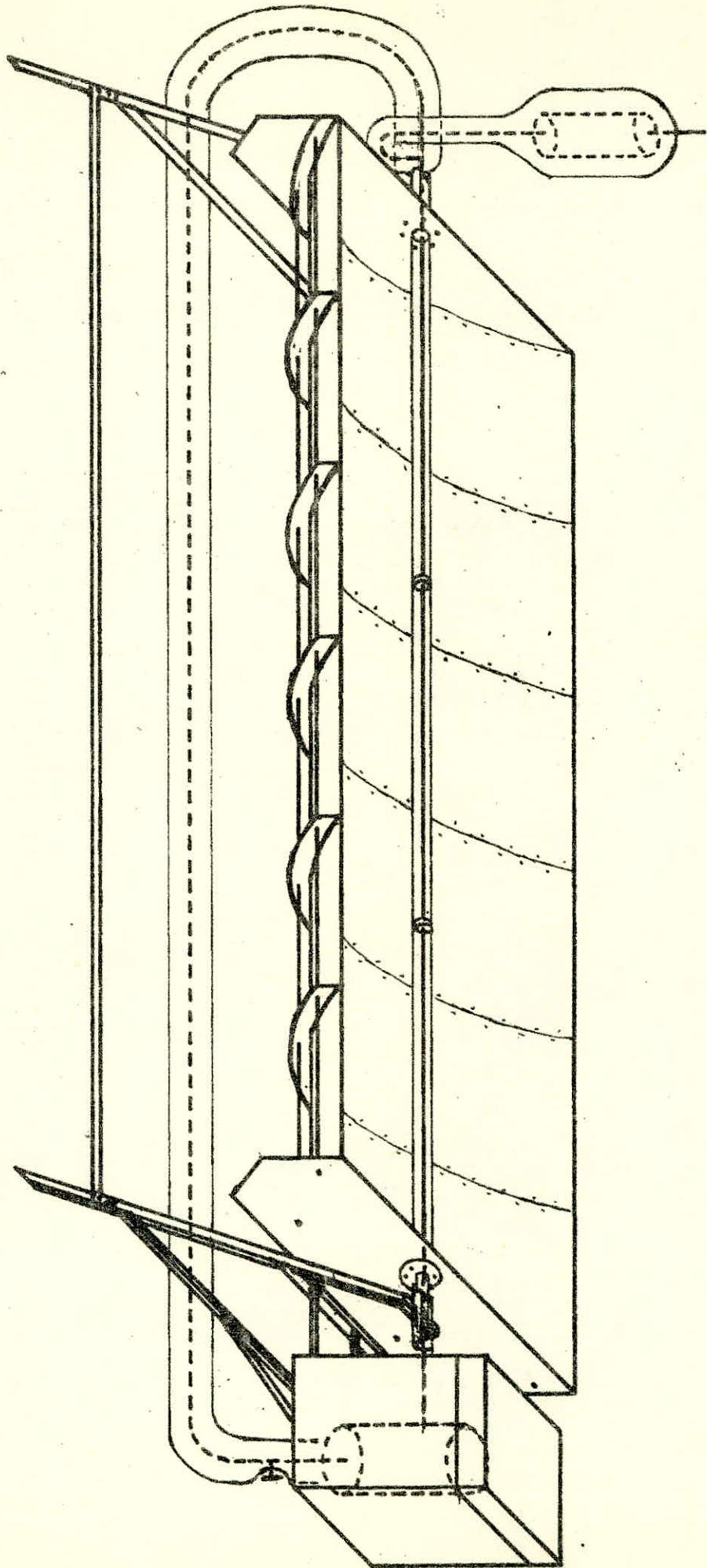
Nous adoptons une épaisseur de calorifugeage de 80 mm sur la paroi latérale du réservoir et 40 mm pour le bas. L'ensemble réservoir-Calorifugeage sera placé dans un caisson en zinc. Un couvercle calorifugé est prévu pour le cas où on n'utilise pas la plaque chauffante. Nous donnons sur la figure 2-5 une représentation de l'ensemble.

2-6-2 Conduite

Pour la tronçon entre la sortie de l'absorbeur et l'entrée du réservoir, et celui reliant la vase d'expansion au circuit principal nous avons pris comme isolant de la laine de verre entassée ($\lambda = 0,033 \frac{kcal}{hm^{\circ}C}$ à une température d'utilisation d'environ $40^{\circ}C$).

Le calorifugeage de la conduite principale est fait en coquilles de lièges. Ces coquilles ont un diamètre intérieur de 40 mm donc supérieur à celui du tuyau à isoler et un diamètre extérieur de 140 mm. Nous les avons centrées à l'aide d'anneaux faits en laine de verre entassée. On introduit ainsi une certaine épaisseur d'air (environ 9 mm) entre la conduite et le liège. Ceci nous est favorable car après le vide, l'air sec est l'un des meilleurs isolants thermiques.

Tout le calorifugeage doit être isoler contre l'humidité extérieure, car une fois humide un isolant perd toutes ses qualités thermiques. Nous utilisons une feuille en matière plastique que nous enroulons puis fixons sur l'isolation à l'aide de fil de fer.



3. EXPERIENCES :

Nous allons maintenant vérifier les caractéristiques de nos deux types de cuiseurs. A cet effet nous signalons que nous n'avons pas pu avoir le rayonnement incident avec exactitude pour des causes extérieures à la station (coupures de courant fréquentes dues au vieillissement du réseau électrique). Ainsi nous avons adopté un rayonnement moyen de 800 W/m^2 (admis à la station).

3.1 Cuiseur à concentration ou chauffe directe avec :

- surface réfléchissante : feuilles d'aluminium.

Les paramètres à mesurer sont :

- La température de la zone focale T_F ,
- Le rendement global de l'installation. η .

Pour mesurer la température nous utilisons un thermocouple soudé à la grille sur laquelle est posée la marmite.

Nous trouvons $T_F = 300 \text{ }^\circ\text{C}$. à 16^{h} (12-06-79)

Pour le rendement nous chauffons une masse $M = 1,5 \text{ kg}$ (contenance de notre marmite) jusqu'à ébullition.

$$\eta = \frac{M c \Delta T}{S I t} \quad 4,18 \cdot 10^3$$

$c = 1 \text{ Kcal/kg}^\circ\text{C}$, la chaleur spécifique de l'eau.

$s = 1,34 \text{ m}^2$, surface de captage.

T_i = température initiale de l'eau.

T_F = température finale de l'eau.

$I = 800 \text{ W/m}^2$

t = Durée de l'expérience.

Expérience du 12.06.79 :

Nature du temps : ciel clair avec nuages passagers.

$T_i = 25^\circ$

$T_F = 100^\circ\text{C}$

$t = 50 \text{ mn} = 3000 \text{ s}$.

$M = 1,5 \text{ kg}$.

$$\eta = \frac{1,5 \times 1 \times 4,18 \cdot 10^3 (100 - 25)}{1,34 \times 800 \times 3000}$$

$\eta = 14,6 \%$.

Les caractéristiques de ce cuiseur sont donc :

! Surface de captage.....	1,34 m ²	!
! Distance focale.....	60 cm	!
! Concentration.....	118	!
! Temperature moyenne de la zone focale.....	> 300 °C	!
! Rendement globale.....	14,6 %	!

Remarque :

La puissance du capteur dépend de la valeur du rayonnement direct I, donc elle est fonction du temps. Si P est cette puissance, nous avons :

- $P = S I r$
- S = 1,34 m², constante si le capteur est régulièrement orienté.
 - I W/m² varie avec le temps.
 - r = 0,7 facteur total de réflexion.

Ainsi pour I = 800 W/m², P = 750 W.

- Surface réfléchissante plaquettes de miroir.

La même expérience a été faite simultanément pour pouvoir comparer les performances des deux capteurs. Pour le cuiseur précédent la chauffe se fait par le dessous de la marmite, tandis que celui-ci chauffe par la parois latérale.

Nous avons les caractéristiques suivantes.(mêmes calculs).

! Surface de captage.....	1,34 m ²	!
! Distance focale.....	60 cm	!
! concentration.....	170	!
! Température de la zone focale.....	> 420 °C	!
! Rendement globale.....	18,3 %	!

Pour les miroirs le facteur total de réflexion est r = 0,8.

Si I = 800 W/m² on a pour ce cuiseur P = 860 W.

3.2 Cuiseur avec fluide caloporteur :

Pour ce type de cuiseur l'expérience consiste à relever certains paramètres de fonctionnement qui sont :

- Durée en heure et minute.
- T_b température au dessous du réservoir mesurée par thermomètre.
- T_e température à l'entrée de l'absorbeur mesurée par thermomètre.
- T_{ve} température extérieure de la vitre enveloppe mesurée par thermocouple.
- T_s température à la sortie de l'absorbeur mesurée par thermomètre.
- T_p température de la plaque chauffante mesurée par thermocouple.

T_F température de la source froide mesurée par thermomètre.

$-T_m$ température dans la marmite mesurée par thermomètre.

Au début nous vérifions le niveau d'huile dans le réservoir. Elle doit en effet être en contact avec la plaque chauffante pour un meilleur échange thermique. Si le niveau est trop bas il faut rajouter de l'huile par l'orifice de la vase d'expansion. Nous laissons le fluide s'échauffer tout en gardant le réservoir de stockage ouvert (orifice de purge). Quand l'huile est sur le point de déborder nous fermons l'orifice de purge d'air. Nous pouvons maintenant commencer les mesures.

Nous plaçons une marmite (diamètre extérieur du fond = 175 mm épaisseur = 2 mm, hauteur = 88 mm, matière alliage d'aluminium) contenant 0,5 l d'huile d'olive sur la plaque chauffante. Pour favoriser l'échange de chaleur entre la marmite et la plaque (éviter toute couche d'air), nous mettons un peu d'huile (la même que le fluide caloporteur) sur celle-ci, d'où la formation d'un film plus conducteur de chaleur que l'air.

Nous groupons dans le tableau des mesures suivant les résultats trouvés.

Date d'expérience : Mardi 12.06.79

Lieu : Bouzaréah Altitude 345 m

Latitude + 36°48'04"

Longitude 0h 12' 08" Est

Température ambiante : 28°C

Temps : ensoleillé avec nuages passagers.

TABLEAU DES MESURES

Durée hef(mn)	T _b °C	T _e °C	V _A mV	T _F °C	T _{Ve} °C	T _s °C	V _Z mV	T _P °C	T _F °C	T _m °C
1h 02	36	29	1,57	25,2	63,5	65	0,52	40,0	25,2	37
06	36	29	1,60	25,9	64,9	75	0,61	43,3	25,9	37
10	37	29	2,07	26,0	76,5	88	0,68	45,4	26,0	38
15	38	29	2,23	26,1	80,5	105	0,69	45,8	26,1	38
21	38	29	2,73	26,5	93,1	130	0,89	51,9	26,5	41
26	38	29	2,70	26,5	92,3	139	1,02	55,6	26,5	45
35	38	29	2,95	28,0	99,9	148	1,45	69,4	28,0	56
40	38,5	30	2,90	28,6	99,3	155	1,61	74,6	28,6	62
45	39	30	3,40	30,0	112,9	161	1,75	80	30,0	68
50	39	30	3,50	31,1	116,4	163	1,95	86,7	31,0	72
55	39	30	3,50	31,4	116,8	179	2,15	92,8	31,4	76
12h 00	39,5	30,5	3,85	31,4	125,3	188	2,45	101,4	31,4	82
05	40	31	4,00	31,7	129,3	195	2,80	111,7	31,7	87
10	40	32	3,55	31,9	118,5	199	3,15	121,9	31,9	91
15	40	33	4,10	31,9	131,9	199	3,40	129,0	31,9	97
20	40,5	33,5	4,05	31,5	130,3	205	3,60	134,4	31,5	103
25	41	35	3,95	31,6	127,9	209	3,95	144,5	31,6	107
30	42	35	4,05	31,6	130,4	211	4,15	150,5	31,6	110
35	42	35	4,10	31,7	131,7	213	4,35	156,0	31,7	112
40	43	36	4,00	31,9	129,5	215	4,50	160,5	31,9	114

Durée hetmn	T_b °C	T_e °C	V_A mV	T_{F0C}	T_{Ve} °C	T_{S0C}	V_2 mV	T_{P0C}	T_{F0C}	T_m °C
12h45	44	37	3,95	32,1	128,4	216	4,75	167,8	32,1	118
50	45	37	3,55	32,2	118,8	216	4,95	173,6	32,2	122
55	47	37	2,75	32	99,1	207	5,05	176,3	32	125
13h00	48	38	2,60	32	95,4	205	5,15	179,1	32	129
05	49,5	38	2,55	31,8	94,0	202	5,30	183,2	31,8	131
10	51	38	2,35	32	89,3	200	5,20	180,6	32	135
15	53	38,5	2,20	32,0	85,6	206	5,30	183,4	32,0	139
20	55	38,5	2,0	32,2	88,3	204	5,40	186,4	32,2	141
25	57	38,5	2,0	32,4	86,0	202	5,40	186,7	32,4	145
30	58	39	2,00	32,6	81,4	203	5,50	189,7	32,6	146,5
35	59,5	39	2,20	32,7	86,3	205	5,50	189,8	32,7	148
40	62	39	1,90	32,6	78,9	205	5,55	191,2	32,6	150
45	63	39	2,15	32,6	85,0	205	5,55	191,2	32,6	151,5
50	64	39	2,10	32,4	83,6	205	5,60	192,4	32,4	152
55	65	39	2,25	32,2	87,1	204	5,60	192,2	32,2	153
14h00	66,5	39	2,10	32,2	83,4	204	5,60	192,2	32,2	154
05	68	40	2,10	32,3	83,5	204	5,60	192,3	32,3	155
10	69	40	2,10	32,6	83,8	202	5,60	192,6	32,6	155
15	69	40	1,95	32,6	80,2	200	5,60	192,6	32,6	155

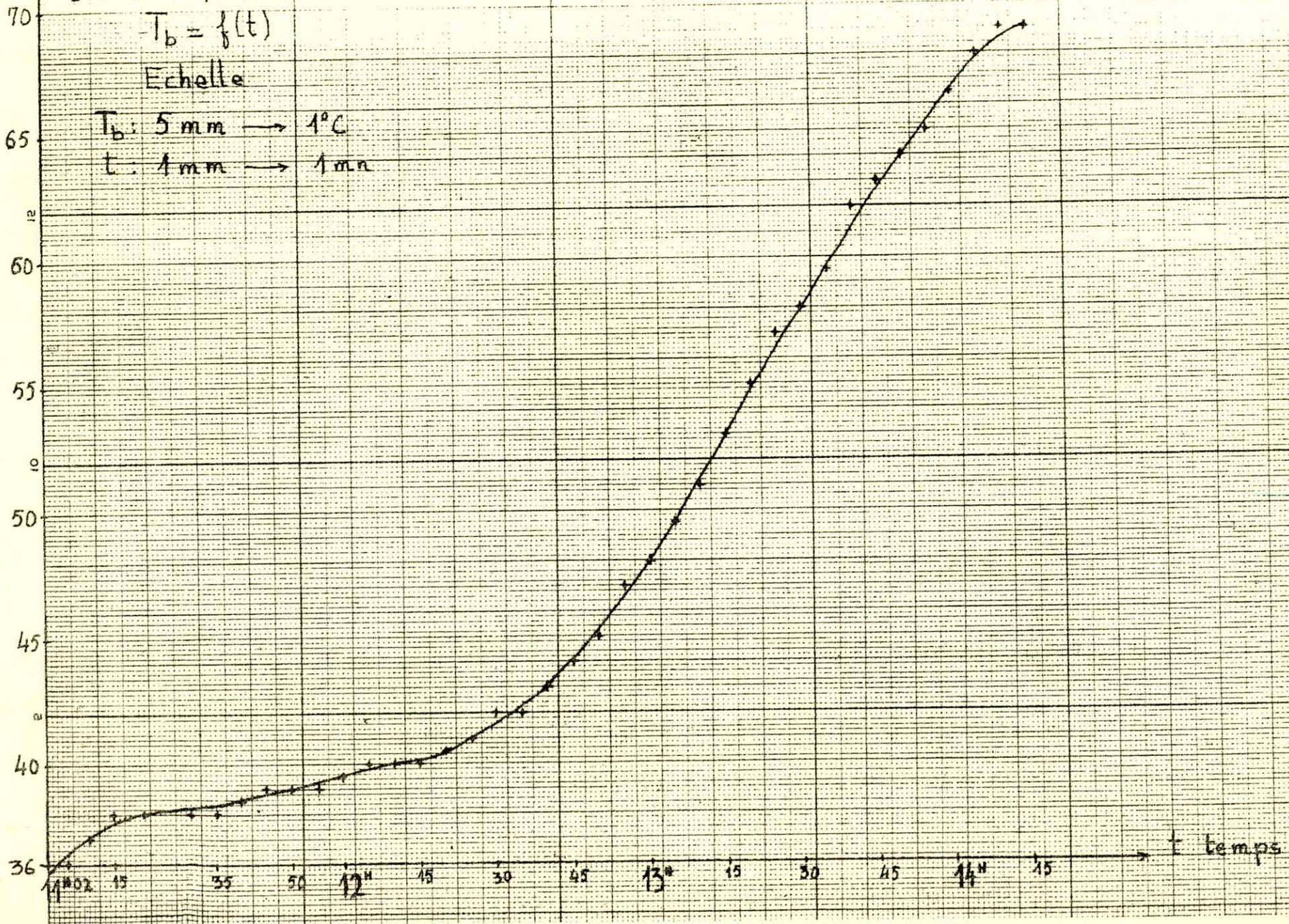
T_b (°C) Température du dessous du réservoir

$$T_b = f(t)$$

Echelle

T_b : 5 mm \rightarrow 1°C

t : 1 mm \rightarrow 1 mn



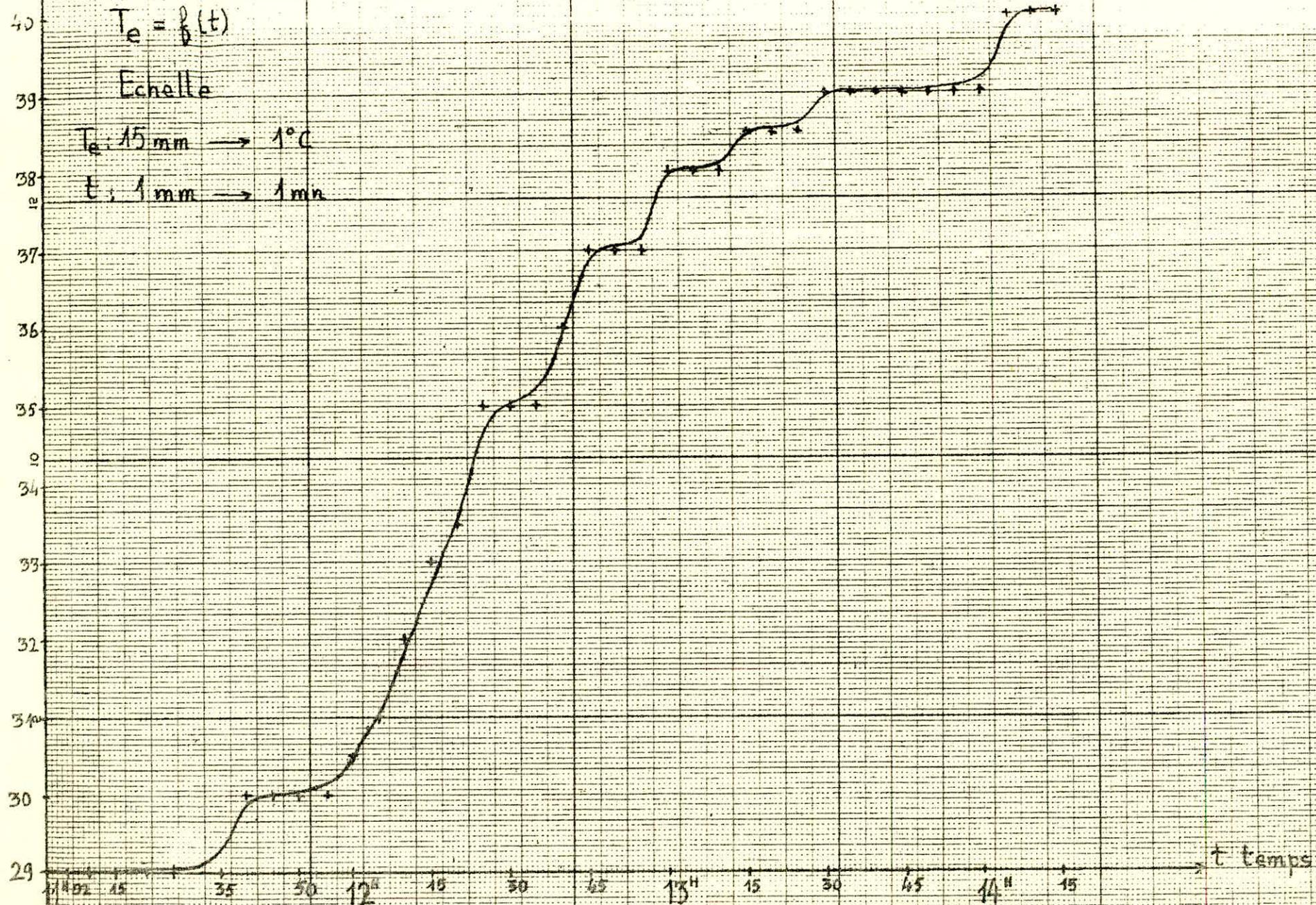
1e (°C) température à l'entrée de l'absorbeur

$$T_e = \theta(t)$$

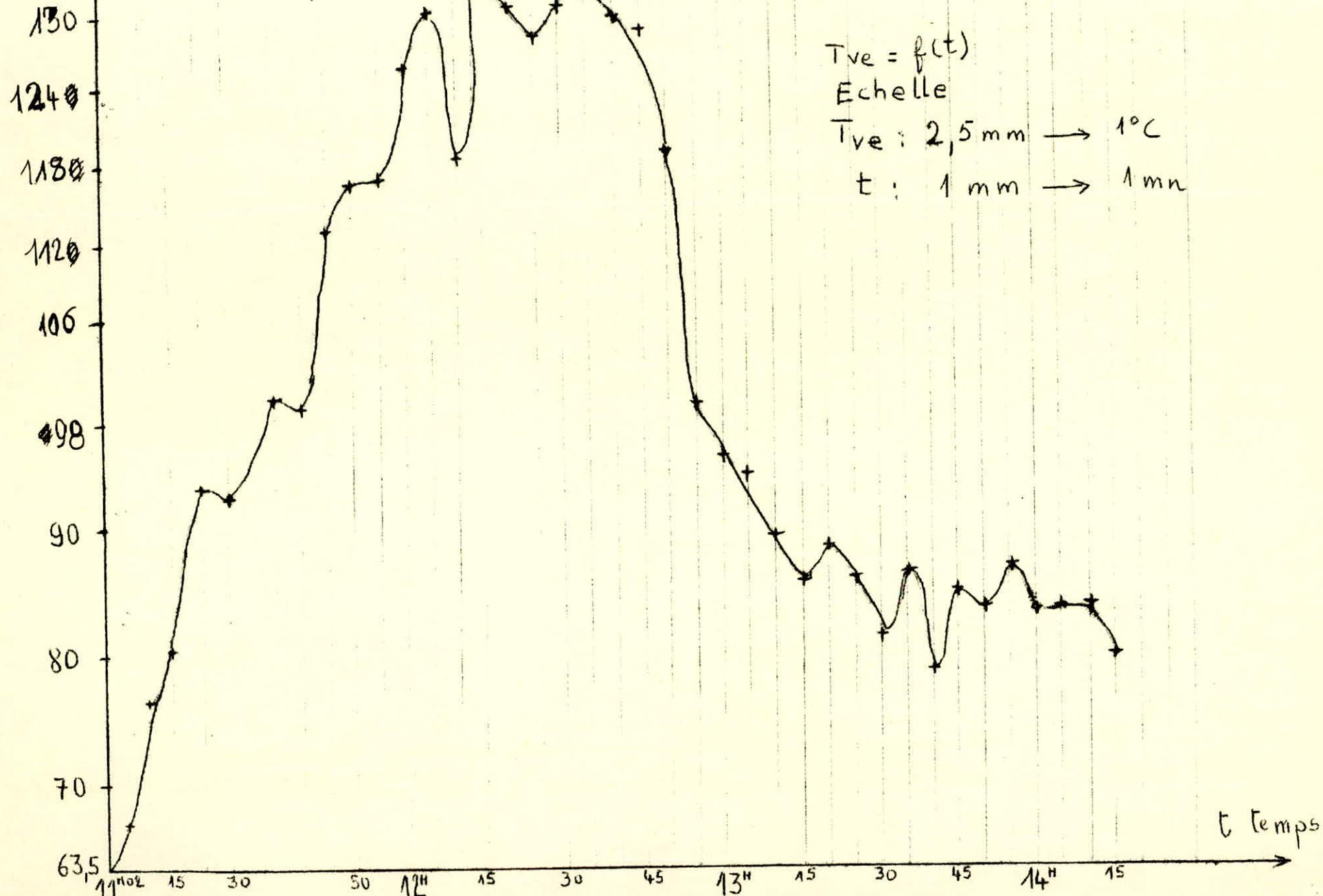
Echelle

T_e : 15 mm \rightarrow 1°C

t : 1 mm \rightarrow 1 mn



$T_{ve} (°C) = \text{Température extérieure de la vitre.}$



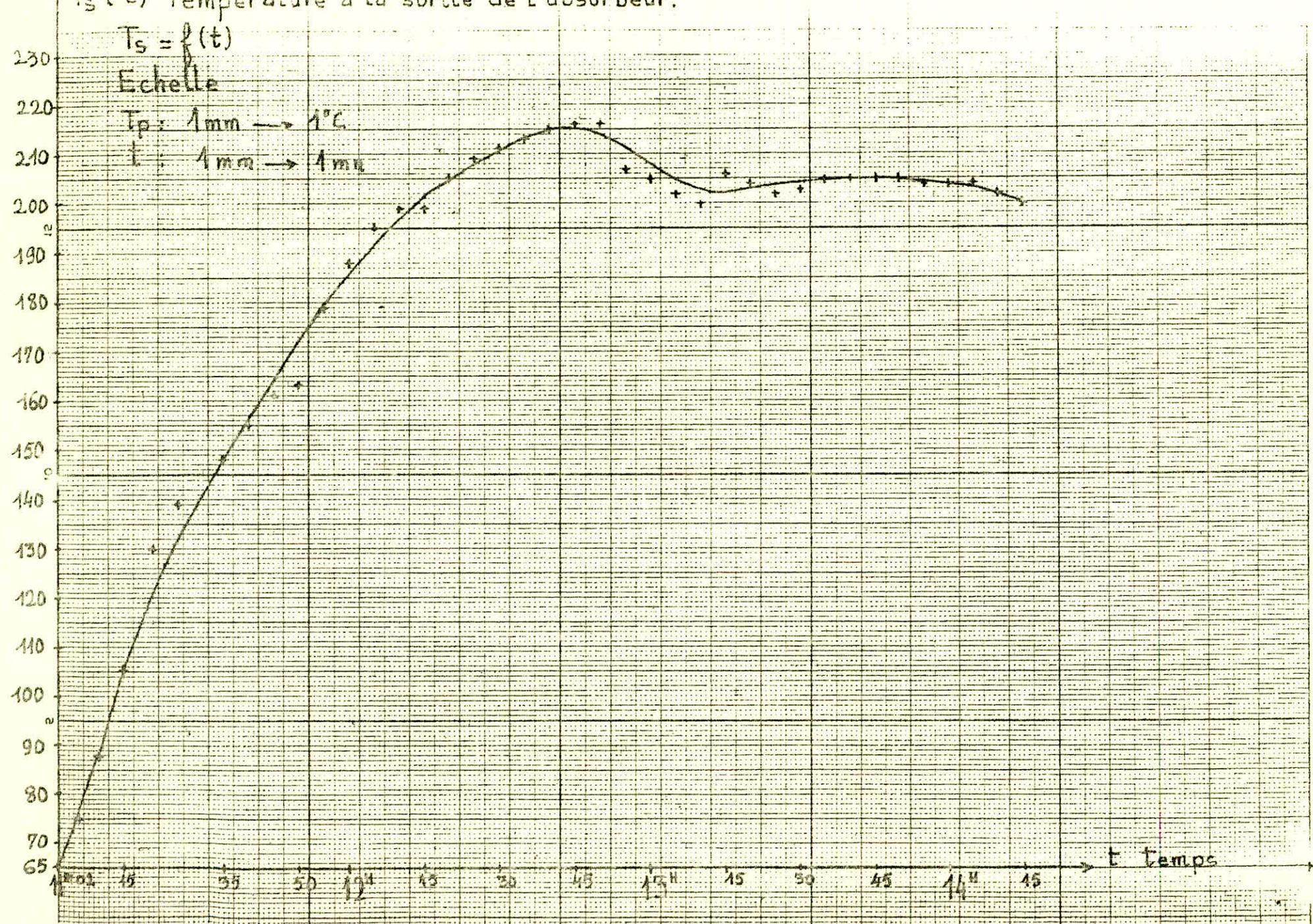
T_s (°C) Température à la sortie de l'absorbeur.

$T_s = f(t)$

Echelle

T_p : 1mm \rightarrow 1°C

t : 1mm \rightarrow 1ms



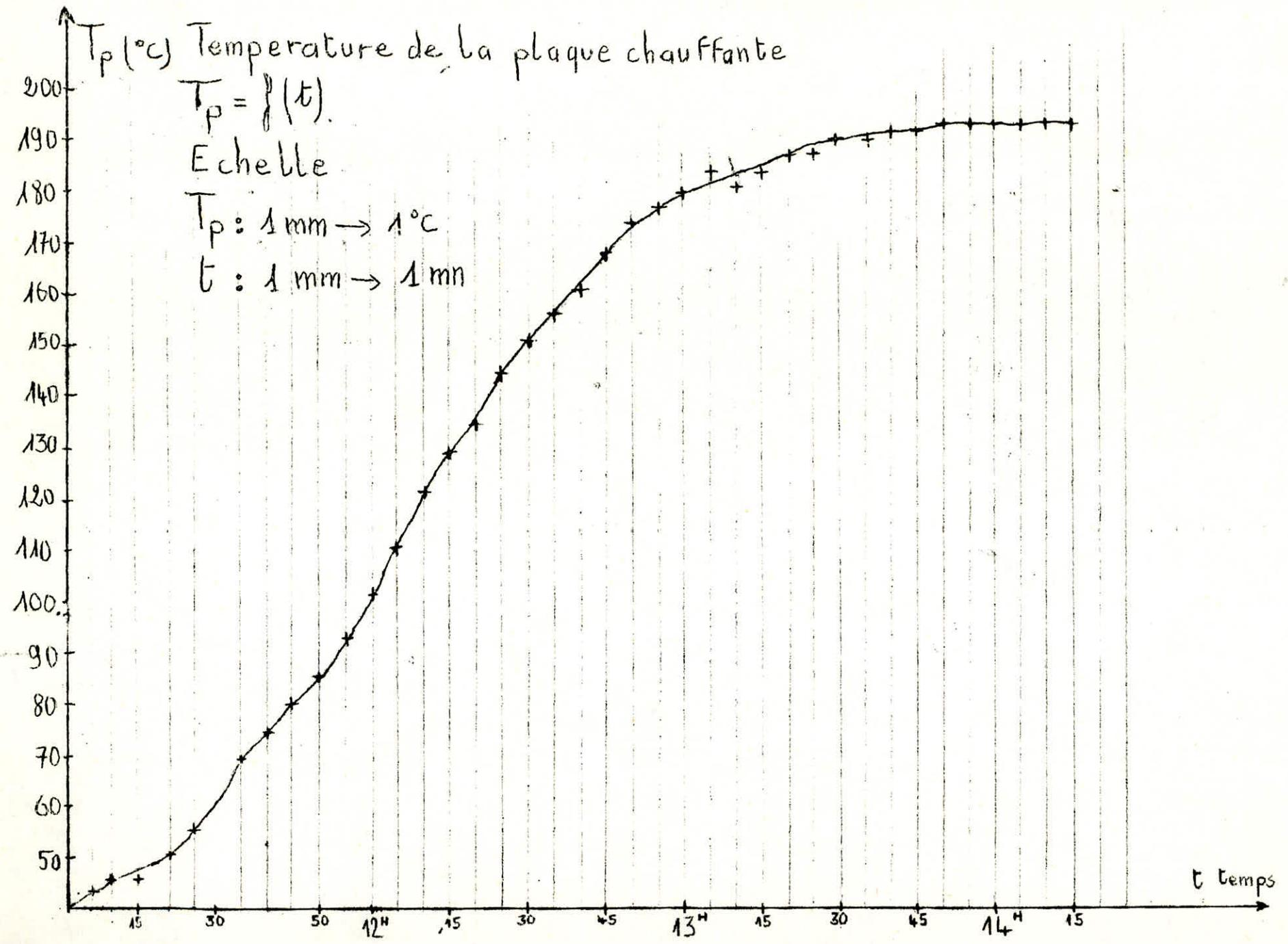
T_p (°C) Temperature de la plaque chauffante

$T_p = f(t)$

Echelle

$T_p : 1 \text{ mm} \rightarrow 1^\circ\text{C}$

$t : 1 \text{ mm} \rightarrow 1 \text{ mn}$



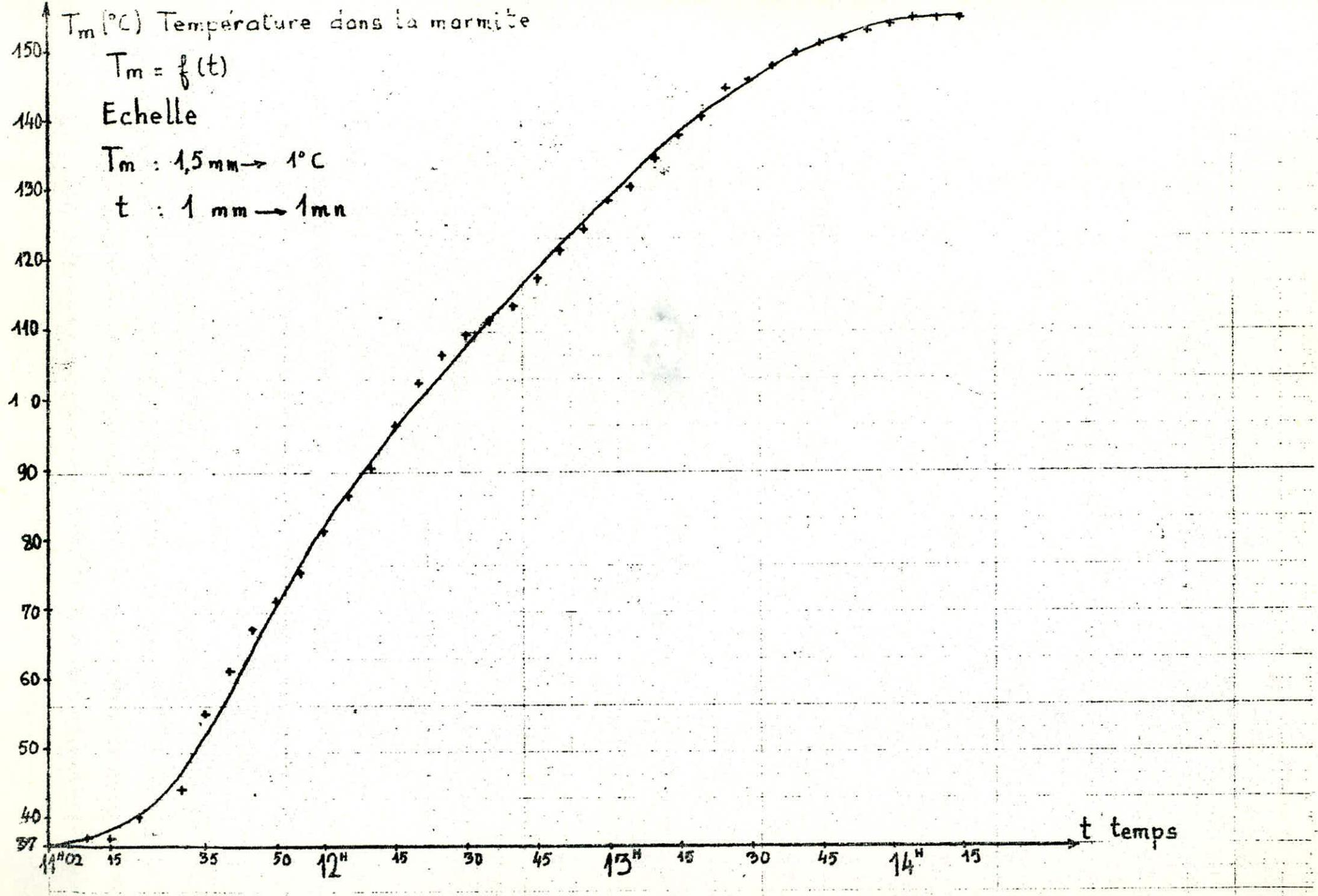
T_m (°C) Température dans la marmite

$$T_m = f(t)$$

Echelle

$T_m : 1,5 \text{ mm} \rightarrow 1^\circ\text{C}$

$t : 1 \text{ mm} \rightarrow 1 \text{ mn}$



Conversion des mV en °C :

Les différences de potentiel lues sur le galvanomètre correspondent à la différence de température entre la source chaude et la source froide. Les courbes d'étalonnage des deux thermocouples (cuivre-constantan) que nous avons utilisés sont des droites, seule leur pente diffère.

Thermocouple fixé à la vitre enveloppe :

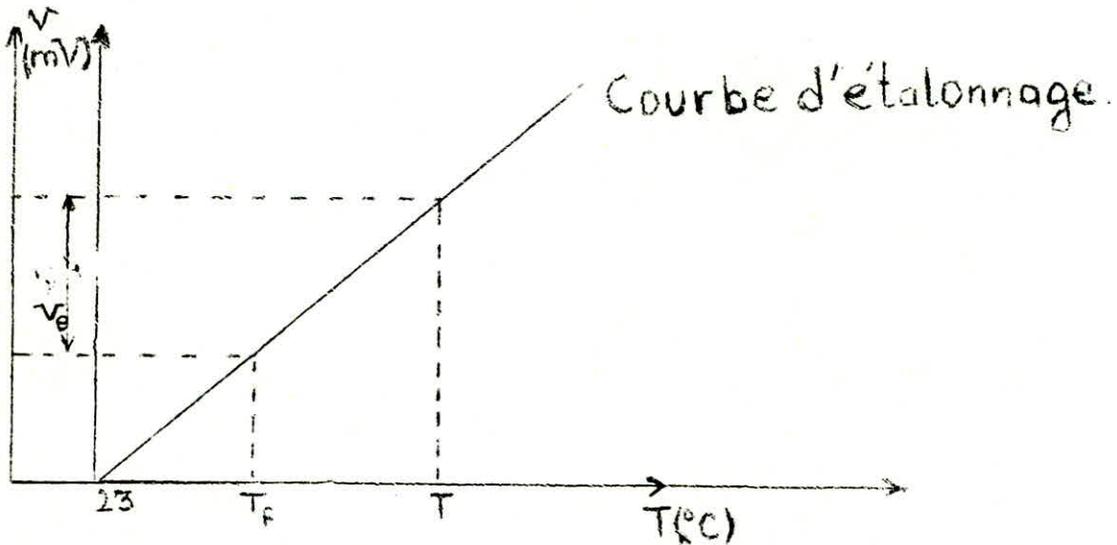
- pente = $4,10 \cdot 10^{-2}$ mV/°C

- à 0 mV correspond 23°C.

Thermocouple fixé à la plaque chauffante :

- pente = $3,5 \cdot 10^{-2}$ mV/°C.

- à 0 mV correspond 23°C.



v_e d.d.p lue

on a pour l'enveloppe $v_e = v_1$ (voir tableau)

$$T_{ve} = T_p + \frac{v_1}{4,10 \cdot 10^{-2}}$$

et pour la plaque $v_e = v_2$ (voir tableau).

$$T_p = T_f + \frac{v_2}{3,5 \cdot 10^{-2}}$$

La source froide est la même dans les deux cas :

Commentaire des courbes :

- $T_b = f(t)$:

Nous remarquons que la température T_b varie peu. Elle est vraiment très inférieure à la température de sortie T_s .

L'huile venant de l'absorbeur rentre dans le réservoir pour se mélanger, dans la zone haute avec l'huile locale. La tôle perforée aidant, le transfert de chaleur se fait par conduction quand le thermosiphon est à l'arrêt.

L'emplacement du thermomètre donnant T_b , par rapport au point chaud le plus bas de l'absorbeur ne permet pas l'augmentation de T_b au delà d'une valeur (liée bien entendu, à la pente donnée à l'installation).

$$- T_e = f(t).$$

La température à l'entrée de l'absorbeur n'augmente que très lentement. il est évident que sa valeur est intimement liée à celle de T_p .

Sa variation est très irrégulière et passe par des paliers, on atteint un maximum de 40°C .

$$- T_{ve} = f(t).$$

Nous obtenons une courbe très "accidentée". T_{ve} dépend de plusieurs facteurs :

- le vent (coefficient de conversion $h = 5,7 + 3,8 V$, V la vitesse du vent en m/s).

- les nuages (soleil plus ou moins caché).

- l'ombre sur le point chaud du thermocouple.

Le maximum de T_{ve} ^{est atteint} vers 12 h 15 car le soleil est au zénith et le rayonnement incident est maximum à cette position du soleil. L'effet d'ombre sur le capteur est aussi faible à cette heure. Nous tenons à signaler qu'à partir d'une certaine heure la source chaude est dans l'ombre. Ainsi pendant l'expérience on a noté:

- à 15 h 26 mn, l'ombre sur l'enveloppe atteint 52 cm à partir de la sortie de l'absorbeur.

- à 15 h 52 mn, elle est de 62 cm.

$$T_s = f(t).$$

La montée en température (régime transitoire) se fait assez vite. Dès qu'on oriente le capteur l'absorbeur s'échauffe rapidement, donc le fluide caloporteur voit également sa température augmenter. L'huile chaude monte et arrive au point où nous prenons T_s .

T_s atteint un maximum de 216°C à 12 h 45 et diminue légèrement puis tend à se stabiliser aux environs de 205°C .

Le temps de montée en température est environ 1 h 45 mn.

$$T_p = f(t).$$

T_p présente une même allure que T_s , mais elle atteint son maximum 1h30 environ après que T_s passe par son maximum. Elle tend à se stabiliser autour de 192°C pour une température correspondante de la sortie de l'absorbeur $T_s = 200^\circ\text{C}$.

$$T_m = f(t)$$

L'allure de variation de T_m est identique à celle de T_p . La montée en température dans la marmite est assez lente. Nous avons mis environ 2 heures pour passer de 37°C à 156°C . (température maximale en fin d'expérience).

Notons que la température de cuisson des pommes de terre frites se fait vers 130°C à pression atmosphérique (de la salle de cuisine).

CALCUL ECONOMIQUE

Désignation	prix unitaire	quantité	total
Tube galvanisé 15/21	25,00 DA	17,50	437,50
vanne d'arrêt 15/21	98,50	1	98,50
té 17/21	15,00	4	60,00
Raccord-union 15/21	45,00	4	180,00
Raccord simple 15/21	4,50	2	9,00
Bouchon en cuivre 15/21	3,40	5	17,00
Laine de verre	40,00	1 m	40,00
Liège en coquille	20,00	8 m	160,00
Feuille en plastique	3,00	5 m	15,00
Vase d'expansion	10,00	1	10,00
Réservoir	50,00	1	50,00
Thermomètre en verre	50,00	3	150,00
Feuille d'aluminium	12,00	6 kg	72,00
Contre-plaqué	42,00	6 m ²	242,00
Clou	4,00	0,100 kg	0,40
Tube de verre $\phi = 42$	27,00	3 m	81,00
Support	150,00	1	150,00
huile	2,40	16 l	38,40
T O T A L			1810,80 DA

Conclusion :

- cuisEUR à chauffe directe :

Ce type de cuisEUR a certains avantages. En effet sa réalisation peut ne pas être honéreuse. De même il peut être très léger et par conséquent transportable. En Algérie, il peut convenir aux nomades.

Si la zone focale est trop petite, le rîsque de griller des aliments à la surface sans pour cela les faire cuire à l'intérieur est grand.

- cuisEUR avec fluide caloporteur:

Ce deuxième type s'adresse aux sédentaires. L'existence d'un stockage d'énergie efficace plaide beaucoup en sa faveur. Ainsi un passage momentané ou de courte durée des nuages ne gênerait pas la cuisson des aliments.

Ils est possible d'utiliser un petit capteur plan comme absorbeur, ce qui pourrait augmenter les performances d'un cuisEUR. Un système d'orientation du capteur de la cuisinière est envisageable.

Remarques :

- Avec le cuisEUR à chauffe directe (1) un poulet en sauce avec des pommes de terre est cuit en 1 h 30 (expérience faite le mardi 12.06.79).

(1) surface réfléchissante en Aluminium.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) - Le rayonnement solaire.
Conversion thermique et applications
(R.BERNARD , G.MENGUY , M. SCHWARTZ)
- (2) - Le chauffe eau solaire
(T.CABRIOL, A.PELISSOU, D.ROUX)
- (3) Cours de thermique (F en 146)
de M.STUYANOV (1^{er} semestre 77.78).
- (4) - Technique de l'Ingénieur.
B.1.Chaudière.
- (5) Eléments de Construction à l'usage de l'Ingénieur .
Tome 6.
- (6) - Transmission de la chaleur et thermodynamique
(F.KREITH)
- (7) L'énergie solaire dans le bâtiment.
(Ch. Chauviagnet. P.Baratcabal, J.P Batelier)
- 8 - Energie solaire et stockage d'énergie.
(R.DUMON)
- (9) - Thèses de fin d'étude :
 - Etude et réalisation d'un réfrigérateur solaire .
(Benmoussa. Gharbi. Mammeri)
 - Chauffe eau solaire (Ouail - Zigadi)

