

UNIVERSITE D'ALGER

3/77

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Départements Electricité  
et Mécanique

*Jess*

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية  
المكتبة  
THESE DE FIN D'ETUDES  
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHEQUE

# CONCEPTION D'UN FOUR

## SOLAIRE DE 10m<sup>2</sup>

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية  
المكتبة  
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHEQUE

9 PLANS

ETUDE OPTIQUE ET ENERGETIQUE

Jury :

MM. ADANE

Président

BOUHADEF

DAMERDJI

EL GHANDOUR

MOUKHINE

Promoteurs

Etudié par :

D. AZOUZ

A. MANDI

M. BENFARHAT

M. SMATI

A. YOUSFI

Elec.

G. Méca.

Janvier 1977



UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Départements Electricité  
et Mécanique

THESE DE FIN D'ETUDES

***CONCEPTION D'UN FOUR  
SOLAIRE DE 10m<sup>2</sup>***

TOME I

ETUDE OPTIQUE ET ENERGETIQUE

Jury :

MM. ADANE                      Président  
BOUHADEF  
DAMERDJI                      } Promoteurs  
EL GHANDOUR }  
MOUKHINE

Etudié par :

D. AZOUZ                      } Elec.  
A. MANDI                      }  
M. BENFARHAT                }  
M. SMATI                      } G. Méca.  
A. YOUSFI                      }

Janvier 1977

II II OUS DEDIONS CETTE THESE

II II NOS II II ARENTS

Nous exprimons nos remerciements à Monsieur ADANE, Chargé de Cours à l'ENPA et Chef de Département d'électronique d'avoir bien voulu présider ce jury.

Nous remercions Monsieur DAMERDJI, Chargé de Cours à l'USTA et Responsable de la Station d'Energie Solaire de Bouzaréah (Alger) qui malgré ses lourdes charges a bien voulu nous faire bénéficier de ses conseils et nous a soutenu tout le long de notre travail.

Qu'il nous soit permis également d'exprimer notre profonde reconnaissance à Monsieur EL-GHANDOUR, Maître de Conférences à l'USTA, pour son soutien constant durant ce travail.

Nos remerciements vont également à Monsieur MOUKHINE, Chef du Département de Génie Mécanique et à Monsieur BOUHADEF, Chargé de Cours à l'Université d'Alger, qui ont bien voulu accepter de faire partie de ce jury.

Messieurs les Professeurs PEUBE et LE PHAT VINH, Directeurs du Centre CNRS d'Odeillo ont bien voulu nous accueillir dans leurs laboratoires. Qu'ils en soient remerciés ici.

Enfin, que tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de cette thèse trouvent ici l'expression de notre gratitude.

III (C) III III IE - I -

ETUDE OPTIQUE & ENERGETIQUE

## TABLE DES MATIERES

-----

Avant propos

Introduction

Disposition géographique du Four Solaire

### A - GENERALITES

A-I- Le rayonnement solaire

A-II-Absorption et réflexion du rayonnement solaire par les réflecteurs

### B - ETUDE DU CONCENTRATEUR

B-I- Etude géométrique et optique du réflecteur parabolique

I-1- Notations et formules générales

I-2- Calculs de prédétermination du concentrateur

B-II-Etude énergétique

II-1- Concentration théorique

II-1-1- Cas d'une faible ouverture relative

II-1-2- Cas d'une cible sphérique

II-1-3- Concentration maximum dans le cas d'une cible sphérique

II-1-4- Concentration dans le cas d'une cible plate

II-1-5- Concentration maximum dans le cas d'une cible plate

II-2- Concentration effective

II-3- Relations entre les différentes caractéristiques du concentrateur

II-4- Répartition de l'énergie au foyer

### C - ORIENTEUR UNIQUE OU CHAMP D'HELIOSTATS

C-I - Mouvement apparent du soleil

I-1- Mouvement du soleil dans une journée

I-2- Mouvement du soleil au cours d'une année

I-3- Rappels de cosmographie

I-3-1- Définition de la hauteur

I-3-2- Définition de l'azimut

I-4- Conclusion

C-II- Etude de l'orienteur plan

II-1- L'orienteur unique

II-1-1- Ses variations de positions globales au cours d'une journée

II-1-2- Les dimensions de l'orienteur unique

II-1-3- Dimensions de l'orienteur unique dans le cas où il se meut pas à pas

II-2- Le champ d'héliostats

II-2-1- Dimension de la nappe de lumière à énergie constante

II-2-2- Disposition relative des héliostats

La progression d'allure exponentielle des besoins d'énergie de l'humanité jointe à la progression de même forme de la population du globe pose avec acuité le problème des ressources d'énergie.

Il est essentielle pour l'équilibre même de la civilisation technique actuelle que le problème soit posé dans l'immédiat et en termes précis.

Il ne s'agit que de conjectures sans doute et nul ne sait de quoi demain la Physique sera faite. Mais, il existe une solution à ce problème de la consommation grandissante des moyens énergétiques matériels: combustibles fossiles, combustibles nucléaires, que notre globe ne contient qu'en quantité limitée (une étude faite en 1965 par le Professeur M. VERON conclut à des temps d'extinction de cette quantité inférieurs à 3 siècles).

Cette solution, qui apparait comme la véritable bouée de sauvetage à laquelle notre civilisation technique doit se raccrocher, c'est évidemment l'Energie Solaire.

Certes l'Energie Solaire, par sa variation normale en fonction de la hauteur du soleil au dessus de l'horizon et sa variation accidentelle due à la climatologie est donc une énergie sauvage, et ce caractère la rend très difficile à industrialiser; par contre elle a l'avantage d'être inépuisable et de ne dégager en cours de transformation aucun sous produit susceptible de polluer l'atmosphère.

Il semble donc que des efforts particulièrement importants devraient être faits pour capter cette énergie radiante. Malheureusement on se heurte à une autre difficulté: la nécessité de développer les appareils de captation sur de très grandes surfaces si l'on désire convertir des puissances importantes. Il en résulte des investissements très élevés.

Lorsqu'on fait le tour des techniques de captation utilisées, on s'aperçoit rapidement qu'il y a trois zones de températures:

- une zone de basses températures qui n'excède guère 50°C (insolateurs plats etc...)
- une zone intermédiaire qui va de 100°C à 200°C (effet de serre etc...)
- une troisième zone, celle des hautes températures (fours solaires).

## INTRODUCTION

Les machines et les dispositifs optiques qui permettent de produire des hautes températures sont dans l'ensemble appelés des "fours solaires", terme consacré par l'usage mais évidemment impropre, puisque le four lui même, où se produisent les hautes températures, est souvent réduit à une surface réceptrice située au foyer du capteur concentrant le rayonnement du soleil, dont on utilise que la radiation directe afin de développer au foyer une énergie maximale.

La surface captatrice de l'énergie fournie par le soleil à une importance capitale, car il faut rechercher les caractéristiques du capteur qui feront converger le plus efficacement ce rayonnement solaire.

Pour obtenir la concentration du rayonnement solaire, plusieurs procédés ont été envisagés par de nombreux chercheurs. Ces procédés ont en commun la nécessité de disposer d'installations mobiles pour suivre le soleil.

On distingue trois grandes tendances :

### 1) Les héliodynes :

Ce sont des capteurs dont la face réfléchissante et le foyer du paraboloïde suivent d'un seul mouvement le soleil autour de deux axes orthogonaux, l'un horizontal, l'autre vertical. Les mouvements en hauteur et en azimut sont réalisés par des groupes motoréducteurs électriques agissant sur des roues dentées. Un exemple précis de ce type de capteur se trouve à la Station de l'Energie Solaire de Bouzaréah (Alger), réalisé en 1954 pour des synthèses chimiques étant aujourd'hui à la disposition de l'ONRS pour des recherches en thermodynamique.

Ce concentrateur mobile présente quelques inconvénients :

- Dispositif très lourd et difficile à équilibrer du fait de l'existence de gros moteurs de guidages.

- Le foyer thermique est mobile puisqu'il est solidaire du concentrateur.

- La concentration du rayonnement est limitée de par les dimensions du concentrateur.

2) Concentrateur à facettes mobiles :

Dans ce type de dispositif, le foyer est fixe et le concentrateur est formé d'un ensemble de capteurs qui sont mûs séparément.

3) Capteurs à champs d'héliostats :

Ce sont des dispositifs composés d'un concentrateur fixe concentrant le rayonnement dans un foyer fixe et d'un ou plusieurs miroirs intermédiaires, appelés aussi miroirs secondaires ou orienteurs mobiles chargés de suivre le soleil et de renvoyer son rayonnement dans une direction fixe, celle du concentrateur. Ces miroirs secondaires sont plans et sont mûs soit séparément, soit "d'une seule pièce".

Les avantages de ce troisième type de dispositif est d'avoir un foyer thermique fixe, d'où la simplicité d'effectuer des expériences physiques ou chimiques. Par ailleurs le champ d'héliostats par la mise en jeu ou l'élimination des orienteurs constitue un élément de réglage de la puissance admise au foyer.

Par contre il a l'inconvénient d'une réflexion supplémentaire qui introduit une diminution du rendement énergétique, ainsi que selon les incidences une modification des propriétés du rayonnement lumineux qui parvient en définitif au foyer.

Cette technique est adoptée par la plupart des installations de fours solaires, c'est le cas des fours du Laboratoire du CNRS à Mont Louis et Odeillo (France) ; à Natrick (US Army Quarter Master Research and Engéneering Center) ; Ljubljana (Yougoslavie) et à Nogoya (Japon).

Notre projet d'études consiste en la conception d'un dispositif répondant à la troisième technique ; en effet il s'agit :

a) De concevoir la forme et la construction d'un concentrateur de  $10 \text{ m}^2$  de section droite, constitué de miroirs plans de  $0,25 \text{ m} \times 0,25 \text{ m}$  en verre argenté de  $3 \text{ mm}$  d'épaisseur et de  $450 \text{ g}$  de poids.

Le même travail doit être réalisé pour un héliostat de  $2,25 \text{ m}^2$  de surface, constitué de  $36$  petits miroirs de mêmes dimensions et de même nature que ceux utilisés pour le concentrateur.

b) De concevoir et d'étudier un système (simplifié, précis, économique) destiné à asservir les rayons solaires réfléchis par l'héliostat à une direction fixe quelle que soit la position du soleil dans la voûte céleste ou de manière plus précise quelle que soit la direction des rayons incidents.

On conçoit très aisément que l'unique moyen de conserver la direction du faisceau de lumière réfléchi, consiste à agir sur la position de l'héliostat.

En effet, une petite variation de position du soleil se traduit par rapport à un point quelconque de l'héliostat par un petit angle. Notre but est de détecter, de contrôler et d'asservir ces très faibles déplacements angulaires afin de positionner une rotation du miroir avec une très grande précision.

## DISPOSITION GEOGRAPHIQUE DES ELEMENTS DU FOUR SOLAIRE

Comme il a été souligné dans l'introduction, le "four" se compose de deux éléments fondamentaux : un miroir concentrateur et un héliostat (Fig 1).

### 1) Le concentrateur :

Son axe focal est dans la direction Nord-Sud ; la surface réfléchissante étant dirigée vers le Nord. Ce sens n'a pas été pris au hasard, mais imposé par le mouvement apparent du soleil et de notre situation géographique (hémisphère Nord).

### 2) L'héliostat :

Son rôle est de réfléchir les rayons du soleil sur le concentrateur. Il se trouve donc au Nord du concentrateur. De plus, pour éviter toute aberration le faisceau réfléchi doit être parallèle à l'axe focal du concentrateur.



## II-) - GENERALITES

### A - I - Le rayonnement solaire.

L'énergie du rayonnement solaire est essentiellement variable :

- dans sa répartition spectrale
- suivant la composition gazeuse de l'atmosphère terrestre
- en latitude et en altitude
- suivant les différentes périodes de l'année et de la journée.

Le soleil est une source radiante de haute énergie qui émet dans toutes les directions un **rayonnement** dont la répartition spectrale est voisine de celle d'un corps noir porté à 6000 °K (Fig A 1). Le maximum d'émission énergétique se situe dans le visible à 475 nm. Une telle **surface** devrait émettre suivant la loi de Stefan  $W = \sigma.T^4$  ( $\sigma = 5,67.10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{°K}^{-4}$ ,  $T \simeq 6000 \text{ °K}$ ), soit  $7.500 \text{ W. cm}^{-2}$ . Mais cette énergie est très fortement atténuée par suite d'absorptions (diffusions moléculaires dues à la vapeur d'eau, au gaz carbonique, à l'ozone, diffusions par aérosols) et réflexions entre le soleil et la terre.

Sur la terre, un élément de surface perpendiculaire au rayonnement solaire reçoit entre 0,09 et 0,12  $\text{W.cm}^{-2}$  (1) par beau temps suivant la latitude et l'altitude du lieu de réception. Aux confins de l'atmosphère il recevrait 0,135  $\text{W.cm}^{-2}$ .

Le flux énergétique reçu par la terre dépend des périodes de l'année. Il est en effet plus important en été qu'en hiver au même lieu (Fig A 2, Fig A 3). Cela est dû au mouvement de déclinaison du soleil.

Ce même flux varie également au cours d'une journée en fonction de la hauteur du soleil au dessus de l'horizon (on remarque sur la figure A4 que l'éclairement varie de 300 à 720  $\text{W.m}^{-2}$  entre 9h et 13h). Il varie aussi en fonction de l'état du ciel (clair ou nuageux).

Ces quelques généralités nous contraignent pour la suite de notre étude, notamment le choix des lentilles et des éléments photosensibles, à ne considérer qu'une valeur moyenne du flux solaire reçu par le système et à se limiter à la gamme des longueurs d'onde du spectre qui transportera la plus grande énergie.

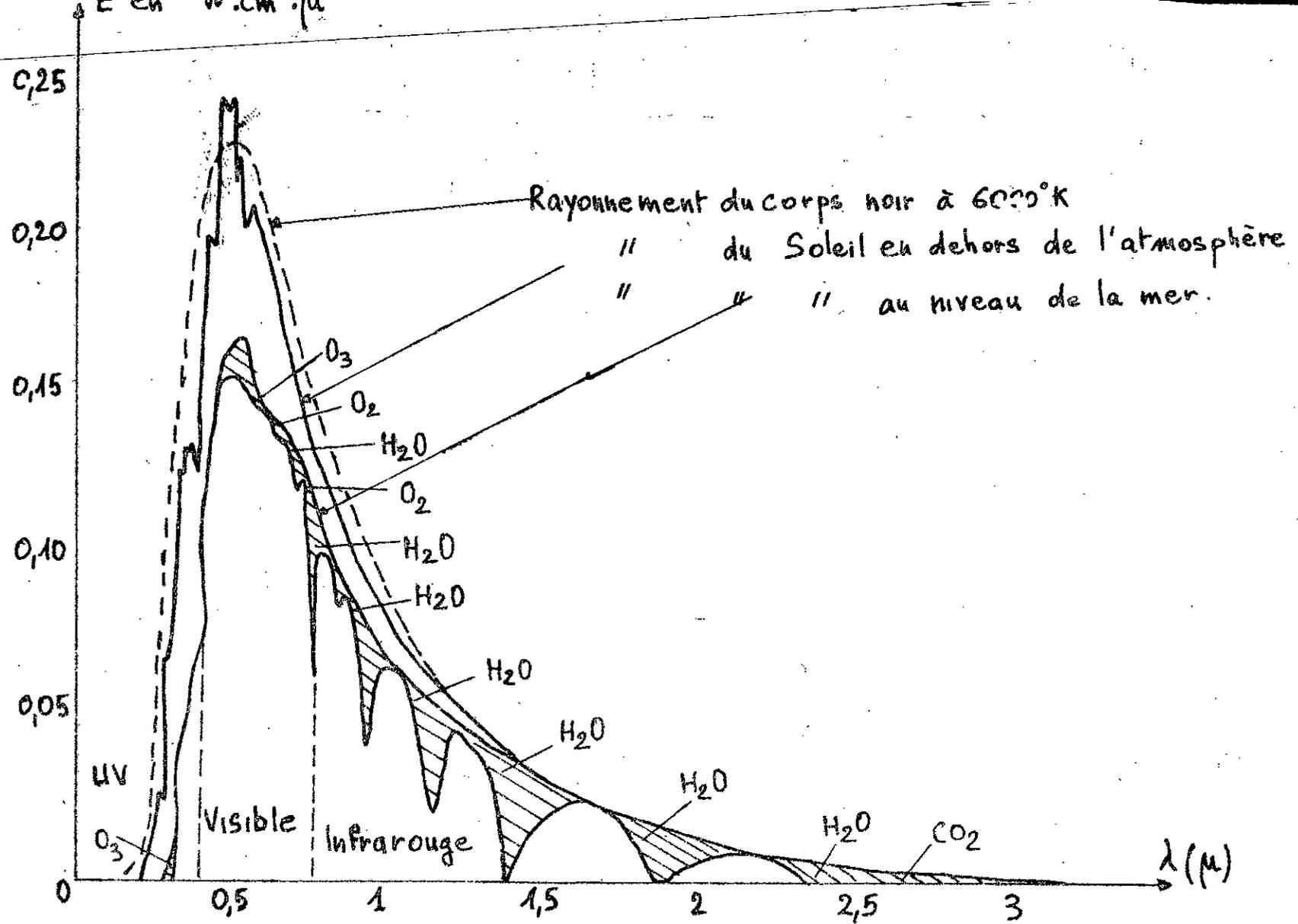


Fig-A1. Spectre d'emission du Soleil

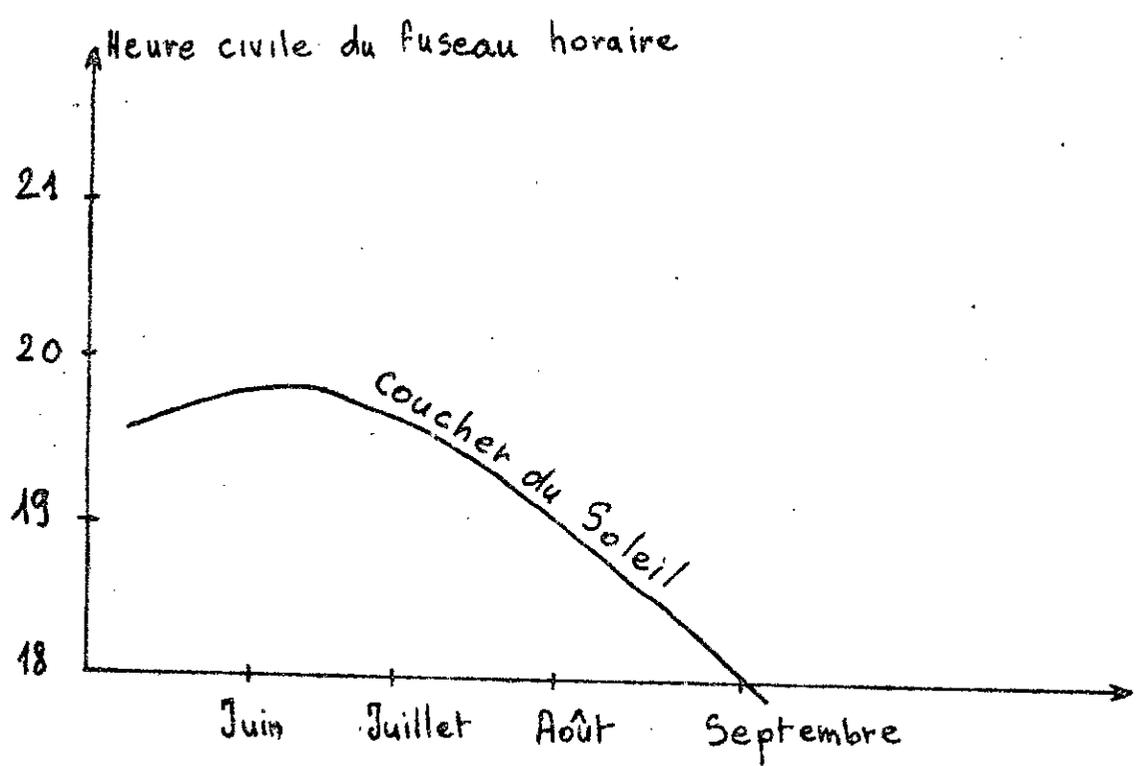


Fig-A2. Variation du coucher en fonction des mois.



Fig-A3. Variation de l'éclairement en fonction du temps pour la demi-heure qui précède et celle qui suit le coucher.

D'autre part, l'installation ne pourra fonctionner évidemment que durant les périodes ensoleillées de l'année, particulièrement entre Avril et Septembre, et pratiquement 6 heures par jour entre 10h et 16h. (Fig A 4, Fig C 9).

A - II - Absorption et réflexion du rayonnement solaire par les réflecteurs (le parabolique et les héliostats).

Les facettes des réflecteurs sont des petits miroirs plans  $0,25 \times 0,25 \text{ m}^2$  en verre (crown léger,  $n = 1,5$ ) recouvert d'une couche d'argent sur sa face postérieure. Les deux surfaces de séparation (air-verre et verre-métal) étant optiquement polies, la réflexion est spéculaire et répond aux lois de Descartes. Elle dépend de l'angle d'incidence  $i$  du faisceau tombant sur le miroir (Fig A 5).

On voit d'après la figure que pour des angles d'incidence varient entre  $0^\circ$  et  $45^\circ$ , le pouvoir réflecteur  $R$  reste pratiquement constant, et égal à  $R_m = 0,9$  pour l'argent et  $R_v = 0,04$  pour le verre (2).

L'argenture se fait "face arrière", en effet la couche d'argent exposée aux intempéries serait rapidement altérée ; mais une nouvelle difficulté surgit : l'épaisseur du verre est traversée pratiquement deux fois par les rayons réfléchis (Fig A 6).

Le trajet ainsi parcouru dans le verre est de l'ordre du centimètre. Sous cette épaisseur l'absorption est pratiquement totale pour les rayons infra-rouges supérieurs à  $2.000 \text{ nm}$ .

Mais étant donnée la forme de la courbe intensité-longueur d'onde du rayonnement solaire (Fig A 1), arrivant à la surface terrestre, ce n'est qu'une fraction très faible de l'aire sous la courbe qui se trouve de ce fait amputée de l'énergie utilement réfléchi.

Si l'on désigne par 100 l'énergie globale tombant sur la face avant d'un miroir de l'héliostat, la fraction 4% (2) subit sur cette face la réflexion vitreuse et se retrouvera dans le rayonnement utile, 6% sera absorbée par le verre au cours de la première traversée (d'après la loi  $F = F_0 \exp(-kx)$ ,  $k$  : indice d'absorption ;  $x$  : épaisseur du verre traversée), 10% du reste lors de la réflexion métallique, et à nouveau 6% du reste par le verre au cours de la seconde traversée. Au total 80% de

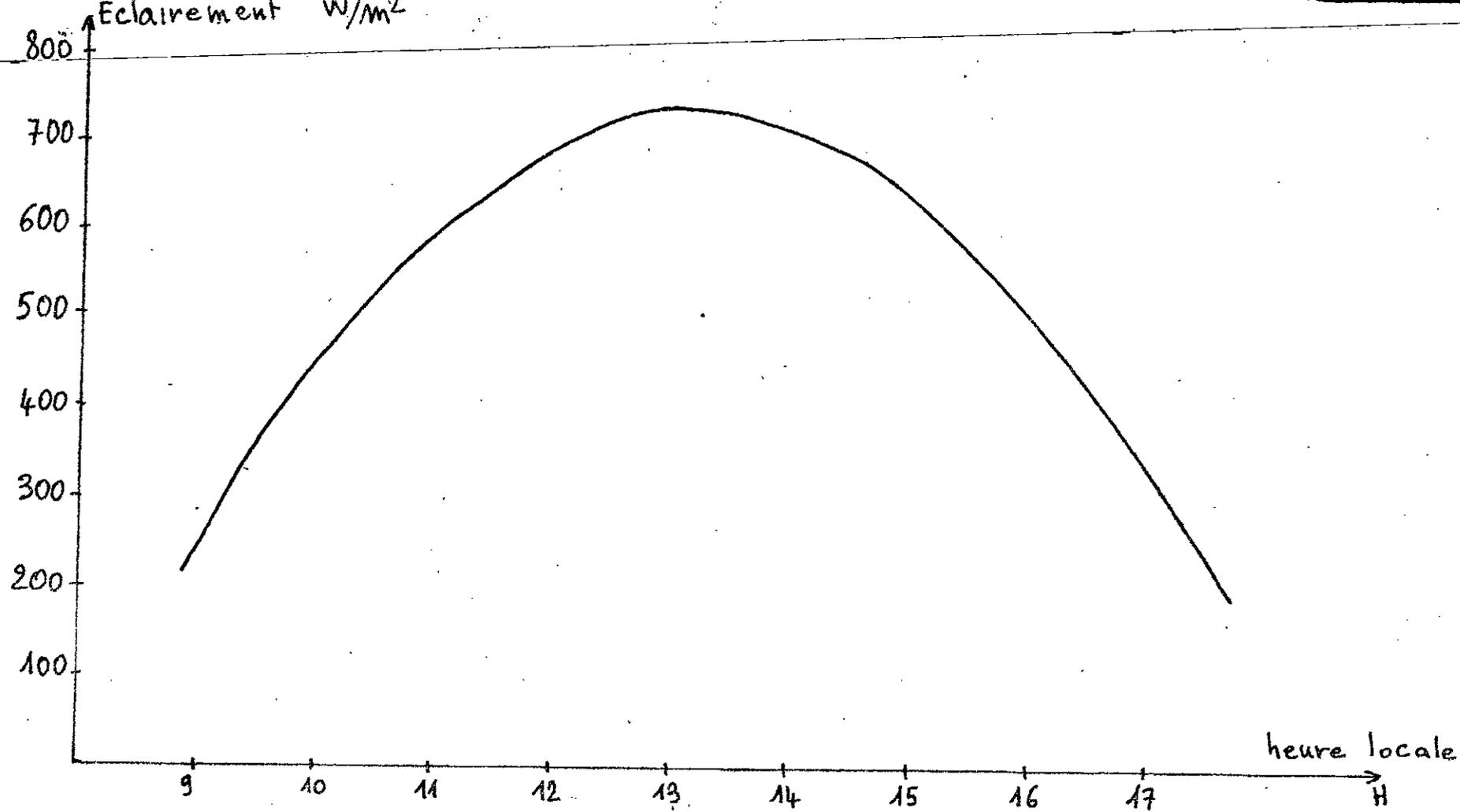


Fig. A4 - Diagramme de la radiation horizontale relevé par Solarigraphe à Marseille le 1<sup>er</sup> Mars 1964.

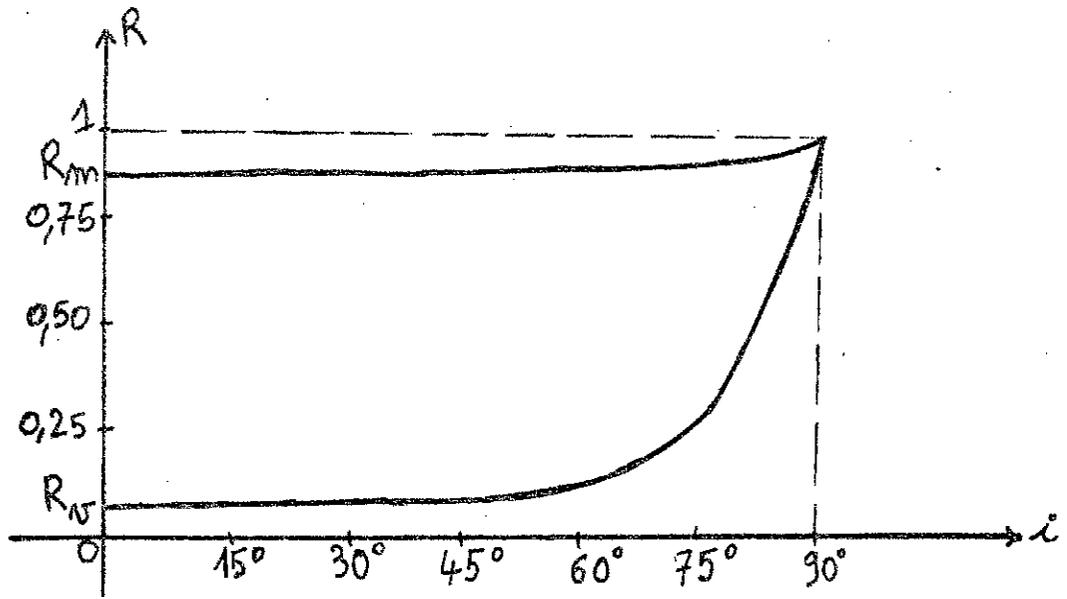


Fig-A5 - Variation du pouvoir reflecteur en fonction de l'angle d'incidence

- a) Reflexion vitreuse
- b) Reflexion métallique

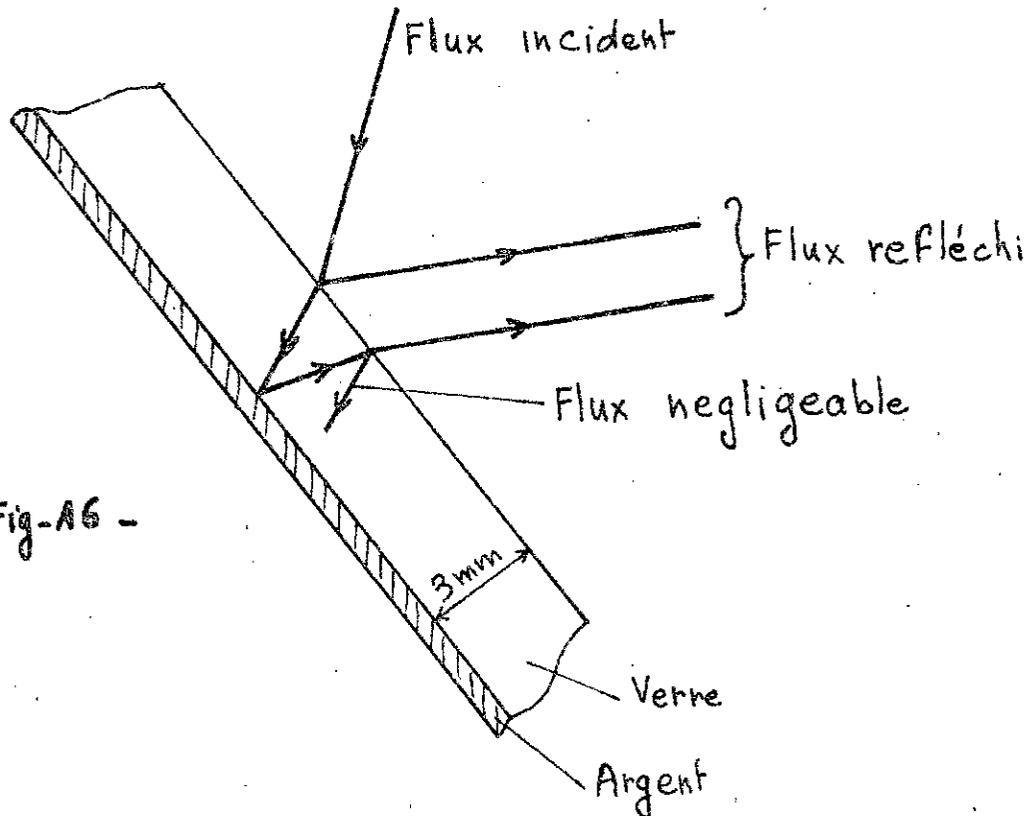


Fig-A6 -

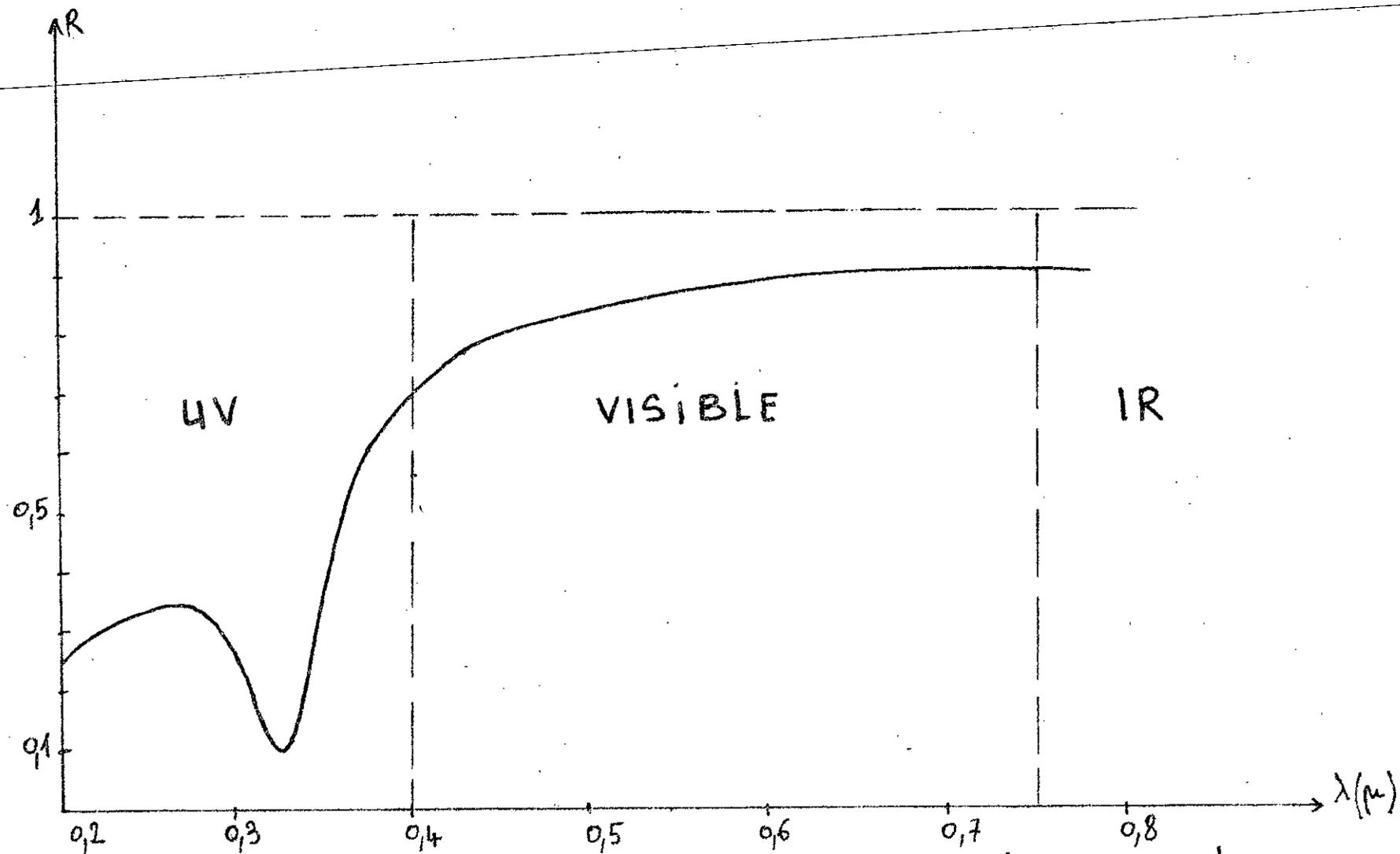


Fig-A7 - Facteur de réflexion de l'Argent sous incidence normale en fonction de la longueur d'onde de rayonnement.

l'énergie se retrouvent acheminés vers le concentrateur, 9% sont dispersés par le revêtement métallique et 11% contribuent à l'échauffement du verre dans sa masse.

Le rendement total théorique du four solaire est donc égal à 64%.

D'autre part, comme l'absorption est le plus souvent sélective, les verres transparents d'apparence non colorée, se trouvant en dehors du spectre visible, il y a toujours une bande dans l'ultraviolet qui est absorbée. En effet les coefficients de transmission des verres couramment utilisés, mesurés pour les différentes longueurs d'onde présentent un maximum entre 500nm et 600 nm, et ils diminuent plus ou moins régulièrement de part et d'autre du spectre visible ; il est pratiquement nul au dessous de 300 nm et au dessus de 4.500 nm.

Le facteur de réflexion métallique varie lui aussi en fonction de la longueur d'onde de la lumière incidente. On peut noter sur la figure A 7 la chute du pouvoir réflecteur de l'argent vers  $\lambda = 320$  nm, accompagnée de la perte due à l'absorption métallique.

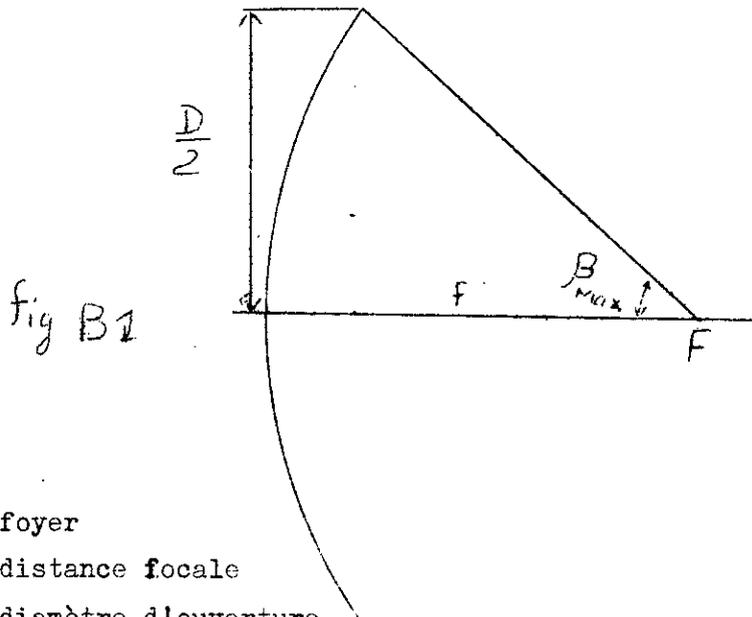
#### Conclusion.

Le rayonnement solaire réfléchi par l'héliostat est pratiquement constitué par la lumière visible, son énergie est 80% de celle du rayonnement tombant sur le miroir. Au foyer, autrement dit après la deuxième réflexion, sur le concentrateur l'énergie est à 64% de celle du rayonnement frappant l'héliostat.

# B - ETUDE DU CONCENTRATEUR

## B - I - Etude géométrique et optique du réflecteur parabolique.

### I - 1 - Notations et formules générales



F : foyer

f : distance focale

D : diamètre d'ouverture

$\beta_{max}$  : demi angle d'ouverture

$n = D/f$  : ouverture relative

$S = \pi D^2/4$  : surface de la section droite du paraboloïde

A : surface réelle du paraboloïde

$$A = \frac{\pi}{3f} ((4f^2 + D^2/4)^{3/2} - 8f^3) = K \pi D^2/4 \quad -1-$$

$$\text{avec } K = \frac{2}{3} \cdot \cotg^2\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot (\sec^3\left(\frac{\beta}{2}\right) - 1) \quad -2-$$

Equation de la parabole en coordonnées polaires :

$$\rho = 2f/(1 + \cos(\beta))$$

Diamètre d'ouverture en fonction de  $\beta_m$  :

$$D = 4f \cdot \sqrt{\frac{1 - \cos(\beta_m)}{1 + \cos(\beta_m)}} \quad -3-$$

Longueur approchée de l'arc de la méridienne :

$$l = 2f \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot \left(1 + \operatorname{tg}^2\left(\frac{\beta}{2}\right)/6\right) \quad -4-$$

Relation entre  $\beta_{n_{ox}}$  et  $n$  :

$$\cos \beta_{n_{ox}} = \frac{1 - n^2/16}{1 + n^2/16} \quad -5-$$

### I - 2 - Calculs de prédétermination du concentrateur.

Comme donnée on nous fixe la section droite du paraboloïde :

$S = 10 \text{ m}^2$  ce qui correspond à un diamètre  $D = 3,6 \text{ m}$ .

Nous nous fixons un rapport d'ouverture  $n = D/f = 2,5$

d'où la distance focale  $f$  :

$$f = D/n = 3,6/2,5 = 1,44 \text{ m}$$

Le demi angle d'ouverture est donnée par la relation -5-

$$\beta_{n_{ox}} = \arccos \left( \frac{1 - n^2/16}{1 + n^2/16} \right)$$

$$\beta_{n_{ox}} = \arccos \left( \frac{1 - 2,5^2/16}{1 + 2,5^2/16} \right) = 0,438$$

$$\beta_{n_{ox}} = 64^\circ$$

A partir de la relation -2- on calcul la constante  $K$  d'où la surface réelle du paraboloïde, d'après la relation -1-

$$K = \frac{2}{3} \cdot \cotg^2(64) \cdot (\sec^3(64) - 1) = 1,09$$

d'où  $A = K \pi D^2/4 = 1,09 \cdot 3,6^2/4$

$$A = 11 \text{ m}^2$$

## B - II - Etude énergétique.

"Tache solaire" ou image focale.

Parmi les surfaces réfléchissantes comme nous l'avons déjà vu précédemment, le parabolôide de révolution est la seule surface optique qui permette la focalisation en un point d'un faisceau de rayons parallèles issue d'une source radiante à l'infini.

Si le diamètre d'ouverture  $D$  est faible devant la distance focale  $f$ , on obtiendra une image du soleil ayant la forme d'un disque de diamètre  $d = 2f \cdot \text{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \simeq f \cdot \alpha$  (3) ( $\alpha$ : diamètre apparent du soleil). Dans le cas de notre concentrateur on prendra un rapport  $D/f > 1$  (ouverture relative), ceci pour augmenter l'angle solide du rayonnement solaire reçu, on aura donc au voisinage du foyer une énergie plus importante. Seule, la partie centrale d'un tel miroir donnera dans le plan focal une image correcte de diamètre  $d = f \cdot \alpha$  car la parabole n'est stigmatique que pour un point situé sur son axe; pour les parties latérales les rayons réfléchis issus d'un point du miroir forment un cône d'angle au sommet qui coupe le plan focal suivant une ellipse. En réalité l'image focale sera obtenu par la rotation de toutes les ellipses, ce qui donne une tache circulaire ayant pour diamètre le grand axe d'une ellipse.

### II - 1 - Concentration théorique (4)

La concentration théorique est définie comme étant le rapport de la densité d'énergie dans l'image focale à la densité d'énergie reçue par le concentrateur.

On fera le raisonnement d'abord pour une faible ouverture relative puis, pour des valeurs de  $n$  supérieur à l'unité.

On fera aussi intervenir la forme de la tache focale (cible) suivant qu'elle est plate ou sphérique.

On déterminera ensuite les valeurs de  $n$  pour lesquelles la concentration est maximum.

II - 1 - 1 Cas d'une faible ouverture relative.

La concentration à pour expression :

$$C = \frac{Q_c/A_c}{Q_m/A_{mn}}$$

$Q_c$  : rayonnement reçu par la cible

$Q_m$  : rayonnement reçu par le concentrateur

$A_c$  : aire de la cible

$A_{mn}$  : aire du concentrateur normale au rayonnement

Comme il s'agit d'un calcul théorique nous supposons que la réflexion du concentrateur est idéale et que les pertes d'énergie sont nulles ; par suite :

$$Q_c = Q_m$$

donc 
$$C = A_{mn}/A_c$$

cette expression de la concentration sera valable pour tous les autres cas.

D'après la figure B 2 on a :

$$C = \frac{\pi D^2/4}{\pi d^2/4} = D^2/d^2$$

La méthode consiste à aboutir à une relation de la forme :

$$C = f(n)$$

D'après la formule de définition de l'ouverture relative on a :

$$D = nf$$

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{d/2}{f} \quad \Rightarrow \quad d = 2f \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

d'où 
$$C = D^2/d^2 = (nf)^2 / (2f \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right))^2$$

$$C = n^2 / (2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right))^2$$

Rappelons que l'angle  $\frac{\alpha}{2}$  est le demi-angle sous-tendu par l'image du soleil (le soleil n'étant pas, à notre distance considérée comme une étoile ponctuelle).

- Calcul de l'angle  $\alpha$

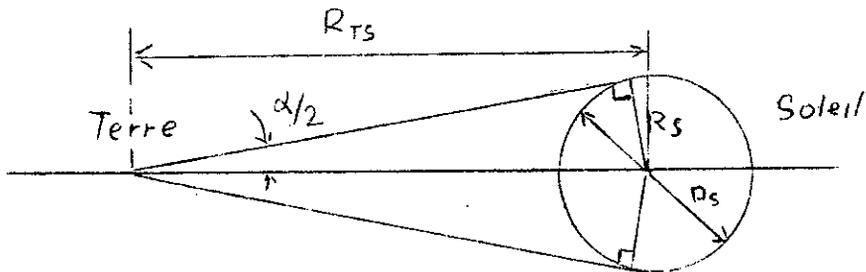


Fig B<sub>3</sub>

$R_{TS}$  : distance terre-soleil

$R_S$  : rayon du soleil

$$\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = R_S/R_{TS} \quad \Rightarrow \quad \frac{\alpha}{2} = \arcsin(R_S/R_{TS})$$

$$R_S/R_{TS} \simeq 7 \cdot 10^8 / 1,5 \cdot 10^{11} = 4,66 \cdot 10^{-3}$$

$$\frac{\alpha}{2} = \arcsin(4,66 \cdot 10^{-3}) \quad \Rightarrow \quad \frac{\alpha}{2} \simeq 0,267^\circ \simeq 16,08 \text{ minutes}$$

donc

$$\alpha \simeq 32,16 \text{ minutes}$$

II - 1 - 2 Calcul de la concentration dans le cas d'une cible sphérique.

Le diamètre de la cible qui reçoit tout le rayonnement, d'après la figure B 4 est déterminé par le rayon réfléchi par l'extrémité du miroir.

La concentration est donc :

$$C = A_{mn}/A_c = (\pi \cdot D^2/4) / (\pi d^2) = D^2/4 \cdot d^2$$

Comme précédemment le développement du calcul consiste à aboutir à un résultat de la forme  $C = f(n)$



On a  $D = nf$

d'après la figure  $\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = (d/2)/l_m$   $d = l_m \cdot (2 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right))$

donc  $C = n^2 \cdot f^2 / 4 \cdot l_m^2 (2 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right))^2 = D^2 / 4d^2$

avec  $l_m = \sqrt{(f - y_m)^2 + x_m^2}$

or l'équation de la parabole dans le repère  $(x, y)$  est :

$$x^2 = 4f \cdot y$$

soit à son extrémité :

$$x_m^2 = 4f \cdot y_m$$

donc  $l_m = \sqrt{(f - y_m)^2 + 4f \cdot y_m} = \sqrt{(f + y_m)^2} = f + y_m$

mais  $y_m = x_m^2 / 4f$  et  $n = D/f = 2x_m/f$  où  $x_m = nf/2$

en substituant on trouve donc :

$$l_m = f + y_m = f + x_m^2 / 4f = f + n^2 \cdot f^2 / 16f = f + n^2 \cdot f / 16$$

finalement la concentration a pour expression :

$$C = D^2 / 4d^2 = (nf)^2 / 4(f(1 + n^2/16)(2 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right))^2$$

ou  $C = n^2 / 4(1 + n^2/16)^2 (2 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right))^2$

## II - 1 - 3 Concentration maximum dans le cas de la cible sphérique.

La dérivée de l'expression de la concentration en fonction de l'ouverture relative donne une équation en  $n$  qui donne la valeur de  $n$  pour la concentration maximum :

$$C = n^2 / 4(1 + n^2/16)^2 (2 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right))^2$$

$$C = K.n^2/(1 + n^2/16)^2$$

avec

$$K = 1/4(2.\sin(\frac{\alpha}{2}))^2$$

$$\frac{dC}{dn} = K \left( \frac{2n}{(1+n^2/16)^2} - \frac{2n^2(2n/16)}{(1+n^2/16)^3} \right) = 0$$

$$\iff 2n(1 + n^2/16) - 4 \frac{n^3}{16} = 0$$

$$\iff 2n^3 = 32n \implies n = \pm 4$$

La solution négative n'ayant pas de signification, le maximum de concentration sera donné par la valeur  $n = 4$

$$C_{\max} = (1/2.\sin(\frac{\alpha}{2}))^2$$

## II - 1 - 4 Concentration dans le cas d'une cible plate.

D'après la symétrie de la figure B 5, la cible plate obtenue représente un cercle de diamètre  $d$  :

$$\text{donc } C = (\pi D^2/4)/(\pi d^2/4) = D^2/d^2$$

$$D = nf$$

d'après la figure nous avons la relation :

$$d' = l_m (2.\text{tg}(\frac{\alpha}{2})) = f(1 + n^2/16)(2.\text{tg}(\frac{\alpha}{2}))$$

ainsi que :

$$\cos(\beta) = (f - y)/l$$

$$\text{ou } \cos(\beta_m) = (f - y_m)/l_m \quad (\text{l'indice } m \text{ représente les grandeurs maximums}).$$

$$\text{or } l_m = f + y_m \quad (\text{voir cas précédent})$$

$$\text{donc } \cos(\beta_m) = (f - y_m)/(f + y_m).$$

de même on a :

$$y_m = x_m^2/4f$$

ou  $x_m = nf/2$

soit  $y_m = (nf/2)^2 \cdot (1/4f) = n^2 f/16$

après substitution de  $y_m$  dans  $\cos(\beta_m)$  :

$$\cos(\beta_m) = (f - n^2 f/16)/(f + n^2 f/16) = (1 - n^2/16)/(1 + n^2/16)$$

La réflexion du miroir en son extrémité donne :

$$d = d'/\cos(\beta_m) = \frac{f(1 + n^2/16)(2 \cdot \text{tg}(\frac{\alpha}{2}))}{(1 - n^2/16)/(1 + n^2/16)}$$

ou

$$d = \frac{f(1 + n^2/16)^2 (2 \cdot \text{tg}(\frac{\alpha}{2}))}{(1 - n^2/16)}$$

La concentration est donc dans le cas d'une cible plate :

$$c = D^2/d^2 = \frac{(nf)^2}{\frac{(f(1 + n^2/16)^2 (2 \cdot \text{tg}(\frac{\alpha}{2})))^2}{(1 - n^2/16)^2}}$$

soit finalement :

$$c = \frac{n^2(1 - n^2/16)^2}{((1 + n^2/16)^2 (2 \cdot \text{tg}(\frac{\alpha}{2})))^2}$$

II = 1 - 5 Concentration maximum dans le cas de la cible plate.

$$c = \frac{n^2(1 - n^2/16)^2}{(1 + n^2/16)^4 (2 \cdot \text{tg}(\frac{\alpha}{2}))^2}$$

$$C = \frac{K n^2 (1 - n^2/16)^2}{(1 + n^2/16)^4}$$

où K représente une constante :

$$k = 1 / (2 \cdot \operatorname{tg}(\frac{\alpha}{2}))^2$$

$$\frac{dC}{dn} = \frac{K(2n(1-n^2/16)^2 + 2n^2(1-n^2/16)(-n/8)(1+n^2/16)^4 - (n^3/2(1-n^2/16)^2(1+n^2/16)^3)}{(1+n^2/16)^8}$$

cette équation effectuée et ordonnée devient :

$$n^4 - 96n^2 + 256 = 0$$

on pose  $N = n^2$

cette équation devient :

$$N^2 - 96N + 256 = 0$$

soit :

$$N = 96/2 \pm \sqrt{2048}$$

d'où :

$$n = \pm \sqrt{96/2 \pm \sqrt{2048}}$$

Le résultat applicable est :

$$n = \sqrt{96/2 - \sqrt{2048}} \approx 1,65$$

Cette valeur de n remplacée dans l'expression de la concentration on aura :

$$C_m = \frac{(1,65)^2 (1 - (1,65)^2/16)^2}{(1 + (1,65)^2/16)^4 (2 \cdot \operatorname{tg}(\frac{\alpha}{2}))^2}$$

$$C_m \approx \frac{1}{(2 \cdot \operatorname{tg}(\frac{\alpha}{2}))^2}$$

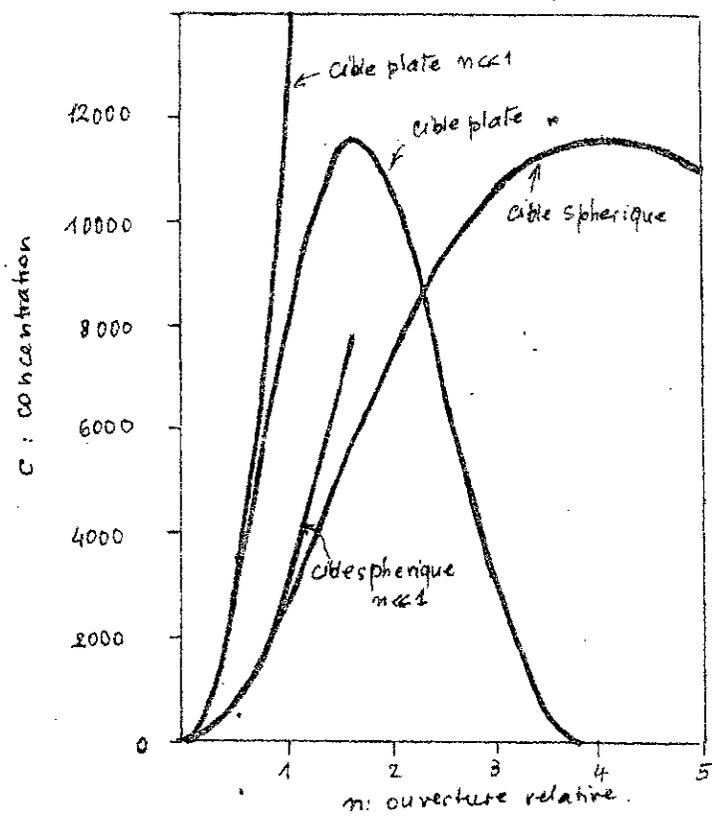


fig. B 6

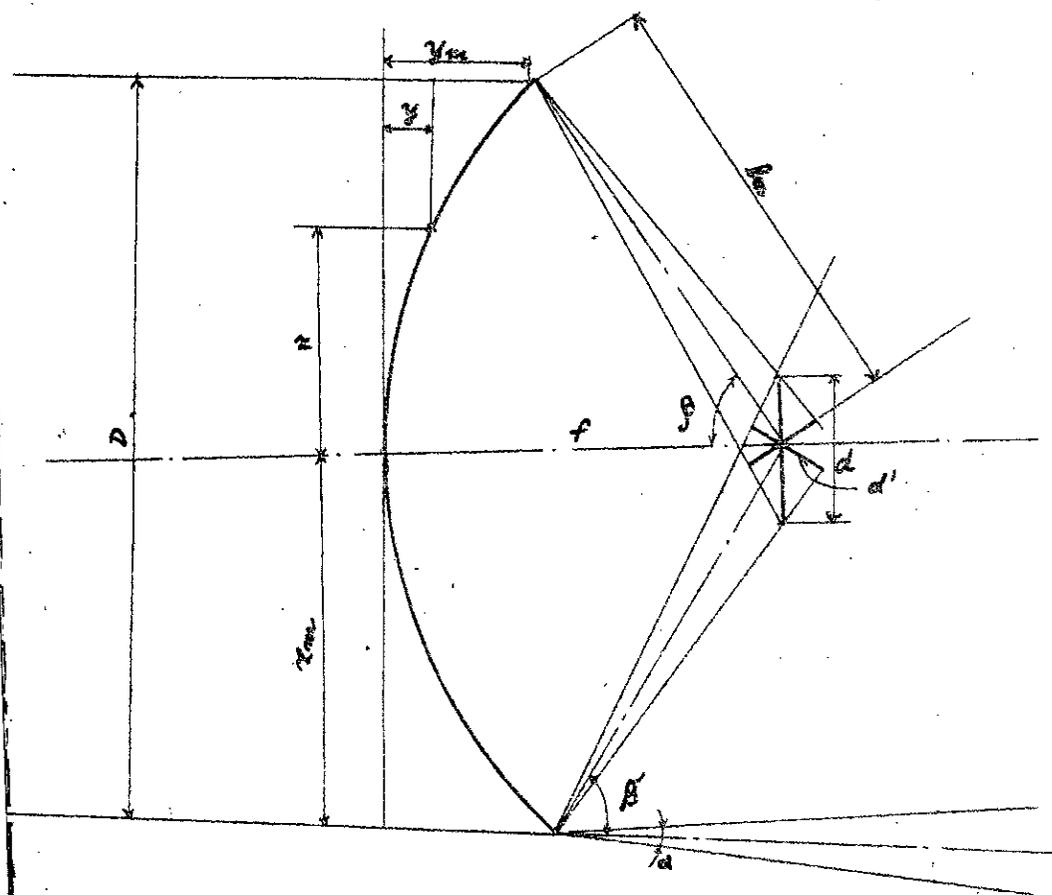


fig. B5

## II - 2 - Concentration effective.

En fait, la réalité est tout autre, ce facteur de concentration théorique est considérablement diminué et cela par suite de pertes multiples pour différentes causes.

La concentration effective doit donc s'écrire  $C_e = FC$  où  $F$  est le facteur du four s'écrivant lui même :

$$F = f(P_1, P_2, \dots, P_n)$$

$P_i$   $i = (1, n)$  représente les différentes pertes.

- Mesures expérimentales de  $C_e$  et  $F$  :

On place dans le plan focal l'ouverture d'un calorimètre à circulation d'eau ce qui donnera le flux total reçu, connaissant les dimensions de la cible on déduit  $C_e$  et  $F$ .

La valeur de  $F$  varie entre 0,35 et 0,69.

Il apparaît donc clairement que c'est dans le facteur  $F$  que se situe le problème le plus délicat de la réalisation du four solaire.

## II - 3 - Rérelations entre les différentes caractéristiques du concentrateur.

La majorité des caractéristiques spécifiques d'un réflecteur parabolique peuvent être déduites à partir de deux équations fondamentales, l'une donnant le diamètre de la tache solaire, et l'autre donnant l'intensité du rayonnement obtenue à l'intérieur de cette image.

$$d = f \alpha \quad (1)$$

$$\phi = e \frac{4}{\alpha^2} F \cdot \sin^2(\beta_m) \quad (2)$$

$\phi$  = densité de flux au foyer

$e$  = constante solaire

$\beta_m$  = demi angle d'ouverture du paraboloïde

$F$  = facteur du four

Le rapport  $C_e = \frac{\phi}{e}$  représente la concentration effective

$$C_e = \frac{\Phi}{e} = \frac{4}{\alpha^2} \cdot \sin^2\left(\frac{\beta}{m}\right) \cdot F \quad (3)$$

En combinant les équations (1), (3) et celle qui donne l'aire du paraboloïde :

$$A = \frac{8}{3} \frac{f^2}{\alpha^2} \left( \frac{1 - \cos^3\left(\frac{\beta}{m}\right)}{\cos^3\left(\frac{\beta}{m}\right)} \right) \quad (4)$$

On obtient une relation reliant l'aire, le rapport de concentration, le facteur du four et le diamètre du foyer.

On représente sur les figures B 7, B 8, B 9, B 10 les résultats de cette opération algébrique.

Sur ces quatre graphes la surface du paraboloïde est donnée en fonction du rapport de concentration, du diamètre du foyer (variant de 1 à 5 inches), et du facteur du four (variant de 0,30 à 0,60).

Ces figures montrent très bien l'augmentation rapide de la surface du paraboloïde par rapport à l'accroissement du diamètre de la "tache solaire" ou du rapport de concentration.

L'équation (3) est traduite par le graphe de la figure B 11.

$$C_e = f(F, n, \frac{\beta}{m})$$

La figure B 12 représente le pourcentage de la surface totale du paraboloïde en fonction du pourcentage de la concentration maximum.

En effet, pour 70% de la concentration maximum on doit avoir 25% de la surface et pour passer de 70% à 90% de la concentration il faut doubler la surface réfléchissante.

A partir de ce graphe nous pouvons conclure que la limite pratique de l'angle d'ouverture est de 70° pour la bonne raison qu'au delà de cette valeur comme on le voit très bien sur la figure le gain de concentration est très faible par rapport à l'augmentation de surface.

Sur la figure B 13 est représentée l'efficacité de concentration sur les différentes régions du concentrateur, à la fois en fonction de l'angle  $\beta$  et de l'aire à proximité du sommet du paraboloïde.

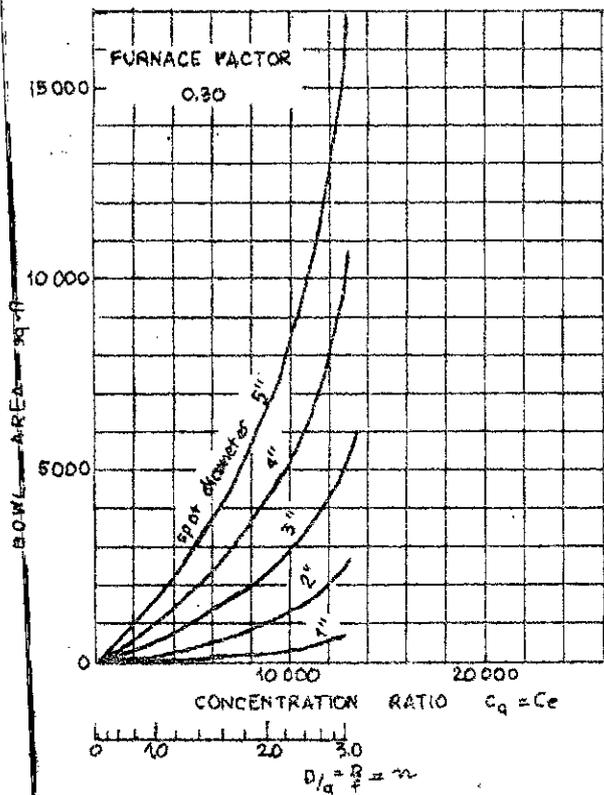


Fig. 87—Paraboloid bowl area vs. concentration ratio,  $F = 0.30$

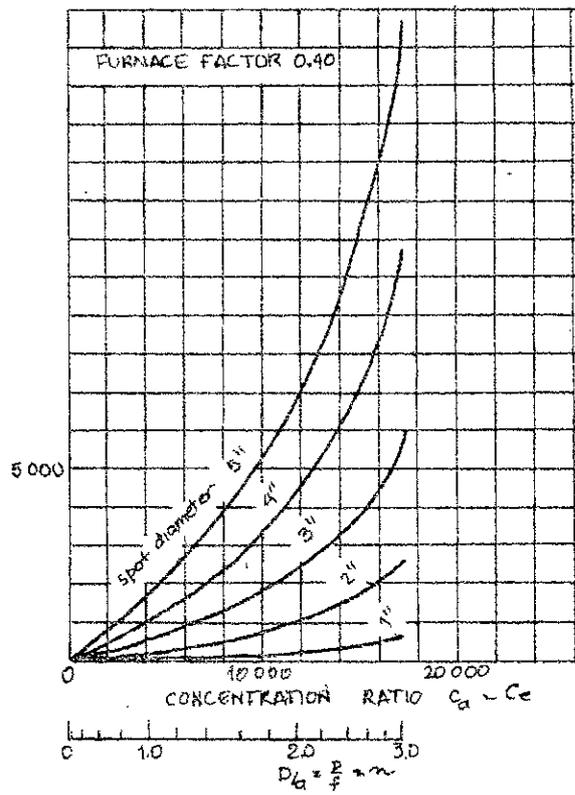


Fig. 88—Paraboloid bowl area vs. concentration ratio,  $F = 0.40$

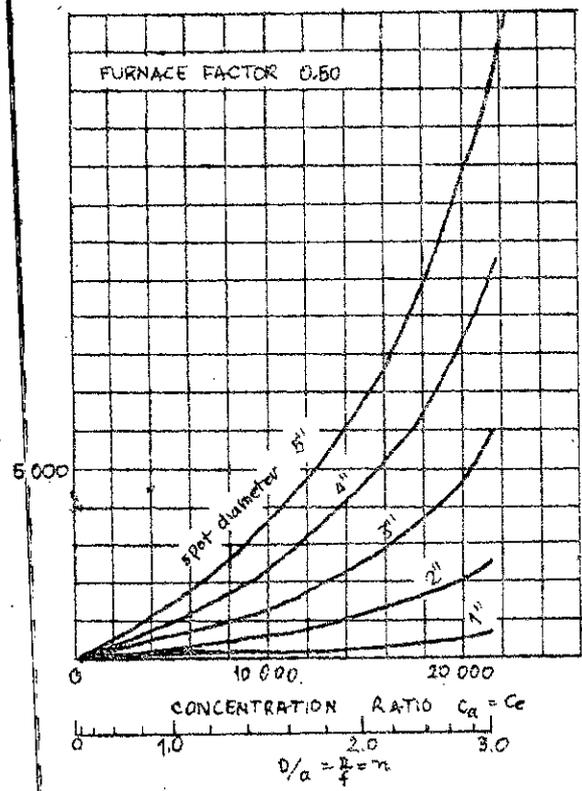


Fig. 89—Paraboloid bowl area vs. concentration ratio,  $F = 0.50$

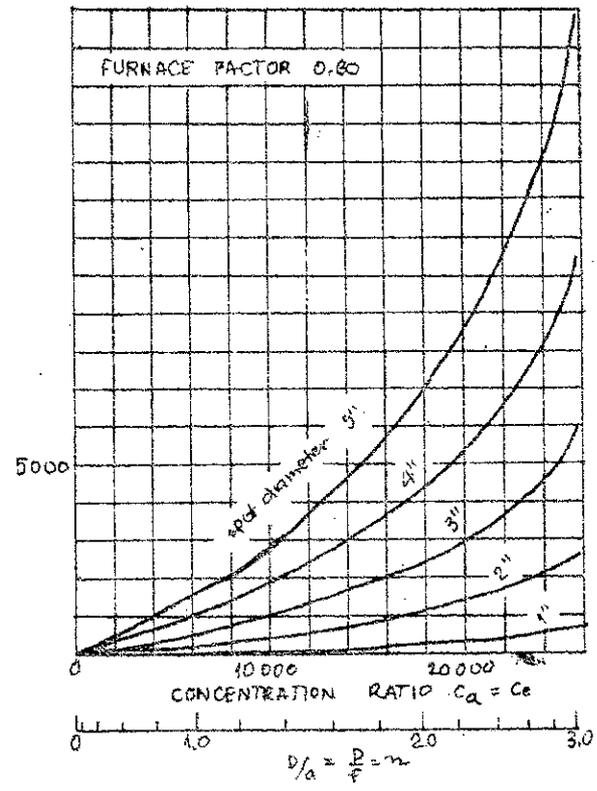


Fig. 90—Paraboloid bowl area vs. concentration ratio,  $F = 0.60$

L'efficacité de concentration par unité d'aire du parabolofide localisée par l'angle  $\beta$  est donnée par la courbe de la figure B 13.

En effet, à titre d'exemple, pour une portion d'aire située à un angle de  $60^\circ$ , l'efficacité de concentration est égale à 24% de celle donnée par le sommet du parabolofide. Autrement dit, l'énergie réfléchie par une surface située au sommet du parabolofide est réfléchie par une surface 4 fois plus grande située à  $\beta = 60^\circ$ .

La courbe supérieure de la figure B 13 donne par exemple une efficacité de concentration moyenne de tout le parabolofide d'angle d'ouverture  $\beta = 60^\circ$  de 52% de la valeur qui devrait avoir, si on supposait que chaque unité de surface donnait la même concentration qu'au sommet.

Sur la figure B 14 on représente pour plusieurs valeurs du rapport de concentration, les variations de l'aire du parabolofide en fonction du facteur du four.

#### Conclusion :

Il apparaît d'après ce chapitre que du point de vue théorique la construction d'un concentrateur s'avère assez simple.

En fait ce n'est qu'une apparence trompeuse et le problème n'est pas si simple ; particulièrement quand il s'agit de construire un concentrateur dont le facteur a été fixé et qu'on veut obtenir d'une façon assez précise. Par ailleurs, du point de vue économique il faudra optimiser ce facteur en effectuant des expériences préliminaires.

#### II - 4 - Répartition de l'énergie au foyer.

Comme on a vu au paragraphe (II-1), l'image focal est constituée de l'image théorique paraxiale (image de Gauss de diamètre  $d = f \alpha$ ) et d'une zone annulaire dans laquelle l'énergie est moins concentrée.

BOWL AREA VS CONCENTRATION

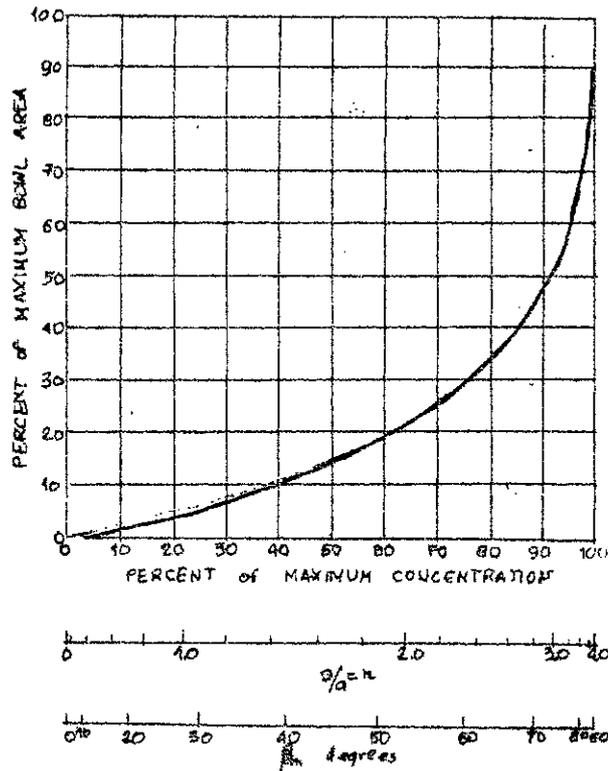
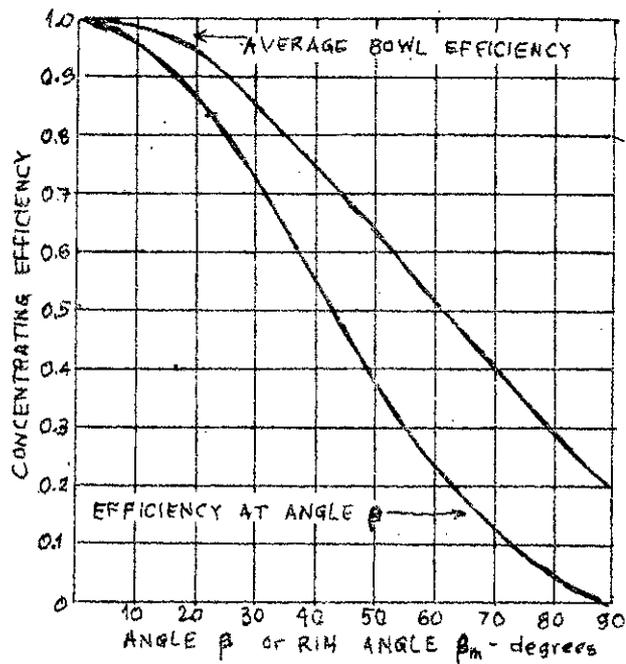


FIG 12--Percentage of maximum bowl area required to attain a given percentage of maximum attainable concentration ratio.

FIG 13--Relative concentrating efficiency of different portions of the paraboloid bowl.



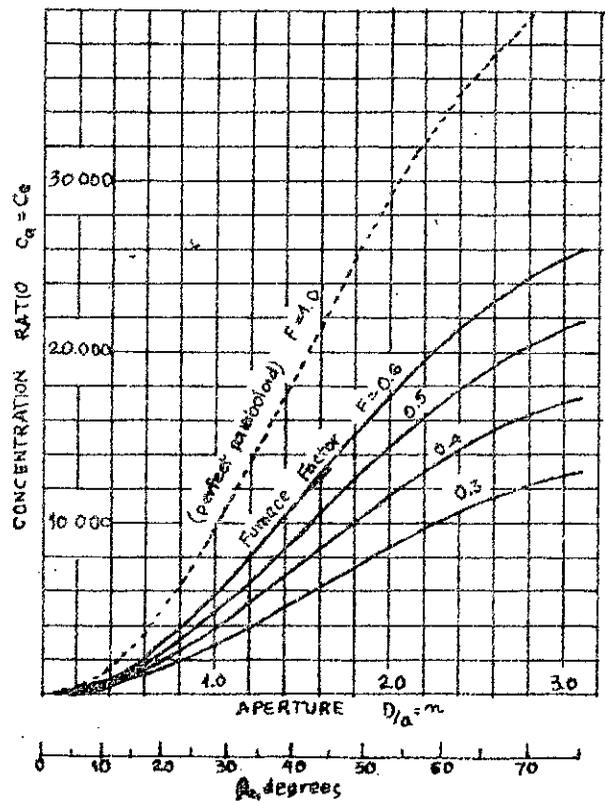


Fig. B11—Solar furnace concentration ratio vs. paraboloid aperture ratio.

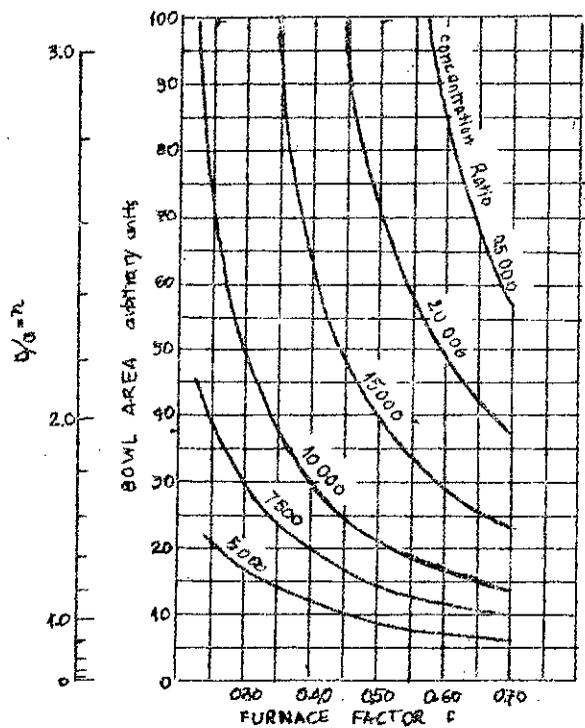


Fig. B14—Bowl area vs. furnace factor

## II - 4 - 1 Flux au foyer (8)

1. Hypothèse :

La répartition de l'intensité sur le disque solaire n'est pas uniforme et dépend de la longueur d'onde.

Pour un certain interval de longueur d'onde ; soit  $I_0$  l'intensité au centre du disque et  $I$  l'intensité à une distance  $r$ .

$$\text{On pose } I/I_0 = f(x) \quad \text{où } x = r/R_S$$

$R_S$  : rayon du disque solaire.

2. Calcul de  $I_0$  :

Soit :  $e$  le flux d'énergie en cal/mn recueilli sur une surface de  $1 \text{ cm}^2$  normale à la direction du Soleil pour la bande de longueur d'onde choisie.

$r$  le rayon de l'image du disque solaire formée sur un écran plan perpendiculaire à l'axe du cône de lumière réfléchi par la surface de  $1 \text{ cm}^2$ .

Le flux qui passe à travers ce disque est égal à  $e$  (en négligeant les pertes).

Par définition on a :

$$e = \int_S I \cdot dS$$

$$e = \int_0^R I(r) \cdot 2 \pi r \cdot dr \quad \text{avec } I(r) = I_0 f(x)$$

Le changement de variable suivant donne :

$$x = r/R$$

$$e = 2 \pi R^2 \int_0^1 I_0 x \cdot f(x) \cdot dx$$

d'où

$$I_0 = \frac{e}{2 \pi R^2} \cdot \frac{1}{\int_0^1 x \cdot f(x) \cdot dx} = \frac{e}{2 \pi R^2 \cdot S}$$

avec

$$S = \int_0^1 x \cdot f(x) \cdot dx$$

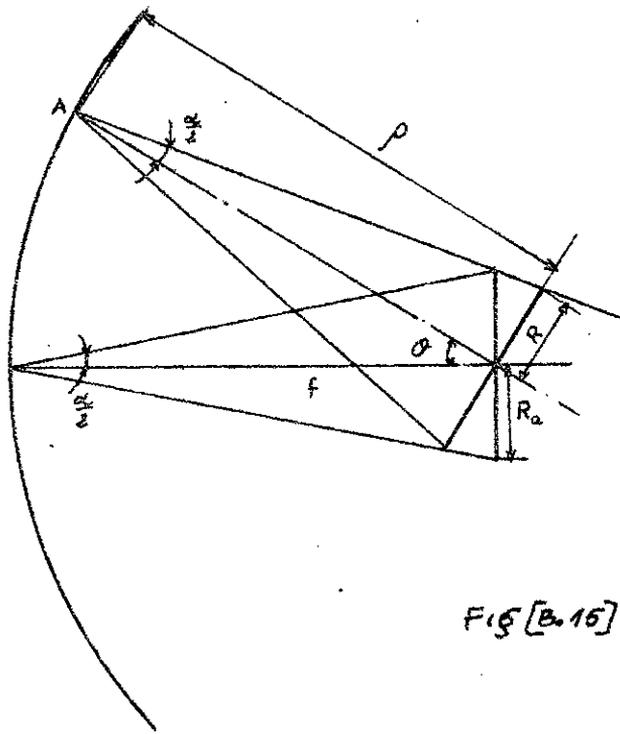


FIG [B.15]

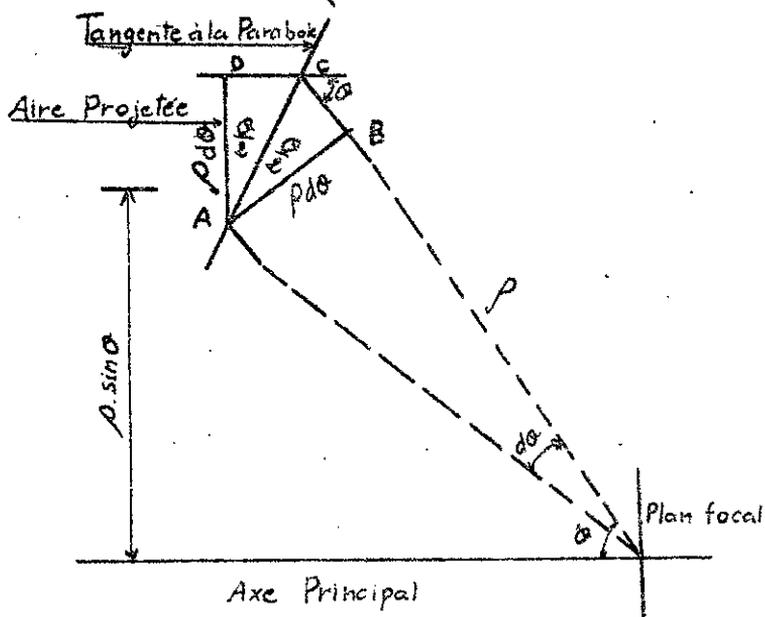


Fig [B.17]

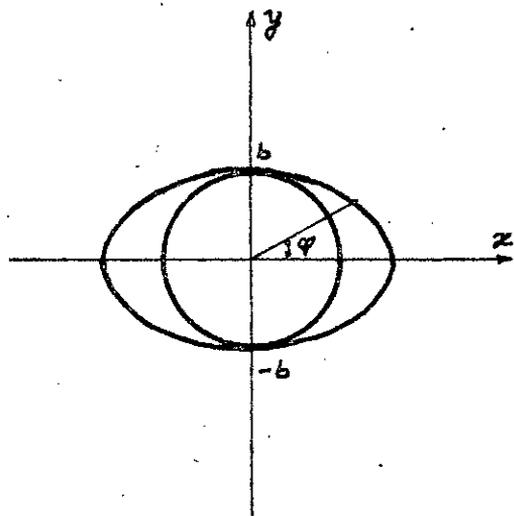


Fig [B.15]

### 3. Calcul de la densité de flux de chaleur au foyer.

Comme nous l'avons vu précédemment, la tache focale (ou cible), est un cercle de rayon  $R_a = f \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \approx f \cdot \frac{\alpha}{2}$

La base du cône de lumière réfléchi par un point A du paraboloïde, d'angle  $\theta$ , a un rayon  $R = \rho \frac{\alpha}{2}$  figure (B 15)

$$R = \frac{2f}{1 + \cos(\theta)} = \frac{2 R_a}{1 + \cos(\theta)}$$

Le flux à travers une surface elliptique centrée au foyer est une fraction du flux total issue du point A.

Cette ellipse a pour demi grand axe  $a = R_a$  et pour demi petit axe  $b = R_a \cdot \cos(\theta)$ . Un point de la surface de l'ellipse est défini en coordonnées polaires par  $r$  et  $\varphi$ .

Le flux d'énergie à travers cette ellipse sera :

$$E(\theta) = E_{\lambda_1}(\theta) + E_{\lambda_2}(\theta)$$

$E_{\lambda_2}(\theta)$  : représente le flux à travers le cercle de rayon  $b = R_a \cdot \cos(\theta)$ .

$$E_{\lambda_2}(\theta) = \int_0^b I(r) \cdot 2\pi r \cdot dr = \int_0^{x_2} 2 \cdot \pi R^2 \cdot I_0 \cdot f(x) \cdot x \cdot dx$$

avec

$$x_2 = b/R = (1 + \cos(\theta)) \cdot \cos(\theta) / 2$$

$E_{\lambda_1}(\theta)$  : représente le flux à travers la surface achurée : (voir Fig B 16).

$$E_{\lambda_1}(\theta) = 4 \int_b^{a-b} \left( \int_0^{\Phi(r)} I(r) \cdot r \cdot d\varphi \right) \cdot dr = 4 \int_b^{a-b} I(r) \cdot r \cdot \Phi(r) \cdot dr$$

L'équation de l'ellipse en coordonnées polaires est donnée par l'expression suivante :

$$r^2 = \frac{R_a^2 \cdot \cos^2(\theta)}{\cos^2(\theta) \cdot \cos^2(\varphi) + \sin^2(\varphi)}$$

à partir de cette relation on tire  $\Phi(r)$ .

$$\Phi(r) = \arcsin\left(\operatorname{cotg}(\theta) \cdot \sqrt{\frac{R^2(1 + \cos(\theta))^2}{4r^2} - 1}\right)$$

$$E_{\lambda'}(\Theta) = 4 \int_b^{a-b} I(r) \cdot r \cdot \arcsin\left(\cotg(\Theta) \cdot \sqrt{\frac{R^2(1 + \cos(\Theta))^2}{4r^2} - 1}\right) \cdot dr$$

changement de variable :

$$x = \frac{r}{R} ; I(r) = I_0 \cdot f(x)$$

$$E_{\lambda'}(\Theta) = 4 \int_{x_2}^{x_1} I_0 \cdot x \cdot R^2 \cdot \arcsin\left(\cotg(\Theta) \cdot \sqrt{\frac{(1 + \cos(\Theta))^2}{2x} - 1}\right) \cdot dx$$

avec  $x_2 = (1 + \cos(\Theta)) \cdot \cos(\Theta) / 2$

$$x_1 = a/R = (1 + \cos(\Theta)) / 2$$

d'où d'expression de  $E_{\lambda}(\Theta)$  en remplaçant  $I_0$  par sa valeur :

$$I_0 = e/2 \cdot R^2 S$$

$$E_{\lambda}(\Theta) = (2e/\pi S) \cdot \int_{x_2}^{x_1} x \cdot f(x) \cdot \bar{\Phi}(x) \cdot dx + (e/S) \cdot \int_0^{x_1} x \cdot f(x) \cdot dx$$

avec  $\bar{\Phi}(x) = \arcsin\left(\cotg(\Theta) \cdot \sqrt{\frac{(1 + \cos(\Theta))^2}{2x} - 1}\right)$

$E_{\lambda}(\Theta)$  est l'énergie reçue par l'ellipse par unité de surface du paraboloïde.

Considérons maintenant une couronne élémentaire obtenue en faisant tourner le segment AC autour de l'axe du paraboloïde. La projection sur un plan perpendiculaire à l'axe du miroir donne un anneau de surface :  $dS = 2 \pi \rho^2 \sin(\Theta) \cdot d\Theta$  (Fig B 17).

La fraction de l'énergie totale reçue par cette couronne et retrouvée dans l'ellipse précédemment définie est :

$$dE_{\lambda}(\Theta) = E_{\lambda}(\Theta) \cdot 2 \pi \rho^2 \sin(\Theta) \cdot d\Theta$$

d'où l'énergie totale  $E_{\lambda}^T$  recueillie par le paraboloïde de demi angle d'ouverture  $\Theta_1$  :

$$E_{\lambda}^T(\Theta) = \int_0^{\Theta_1} dE_{\lambda}(\Theta) = \int_0^{\Theta_1} E_{\lambda}(\Theta) \cdot 2 \pi \rho^2 \sin(\Theta) \cdot d\Theta$$

Equation de la parabole en coordonnées polaires :

$$\rho = 2f / (1 + \cos(\Theta))$$

d'où

$$E_{\lambda}^T(\Theta) = 8\pi f^2 \int_0^{\Theta_1} E_{\lambda}(\Theta) \cdot \sin(\Theta) \cdot \frac{d\Theta}{(1 + \cos(\Theta))^2}$$

on déduit donc la densité de flux de chaleur au foyer :

$$\Phi_{\lambda}^T = \frac{E_{\lambda}^T}{s} \quad s : \text{section du foyer}$$

$$s = \pi R_a^2 = \pi f^2 \alpha^2 / 4$$

$$\Phi_{\lambda}^T = \frac{32}{\alpha^2} \int_0^{\Theta_1} E_{\lambda}(\Theta) \cdot \sin(\Theta) \cdot \frac{d\Theta}{(1 + \cos(\Theta))^2}$$

La densité totale pour toutes les longueurs d'ondes est :

$$\Phi_{\lambda}^T = \sum_{\lambda} \Phi_{\lambda}^T$$

#### 4. Application numérique.

##### 4.1 Caractéristique du paraboloïde.

$$\Theta_1 = 63^{\circ},7$$

$$f = 1,44 \text{ m}$$

$$\alpha = 32'$$

##### 4.2. Calcul de la densité de flux.

Le tableau (1) d'après "SMITHSONIAN PHYSICAL TABLES" nous donne les valeurs de la fonction  $f(x)$  en fonction de  $x$  et  $\lambda$ .

TABLEAU 1  $f(x)$

$x \backslash \lambda$	0.425	0.625	0.875	1.25	1.75	2.25	2.75	3.75
0.30	0.977	0.978	0.985	0.988	0.993	0.995	0.996	0.996
.50	.906	.937	.953	.967	.980	.980	.983	.988
.60	.855	.902	.928	.947	.969	.968	.972	.980
.70	.797	.855	.895	.922	.952	.953	.959	.969
.80	.710	.785	.847	.885	.928	.931	.939	.952
.90	.577	.687	.771	.821	.882	.891	.905	.928
.95	.470	.605	.703	.759	.837	.850	.870	.902
.975	.389	.537	.647	.710	.792	.814	.837	.875

Le tableau (2) nous donne  $e$  en fonction de  $\lambda$

$\lambda$	$e$	$\lambda_c$	$\Delta \lambda$
0.35 - 0.50	0.44	0.425	0.15
.50 - .75	.48	.625	.25
.75 - 1.00	.28	.875	.25
1.00 - 1.50	.32	1.25	.50
1.50 - 2.00	.14	1.75	.50
2.00 - 2.50	.04	2.25	.50
2.50 - 3.00	.03	2.75	.50
3.00 - 4.50	.03	3.75	1.50

tableau (3);  $xf(x)$  en fonction de  $x$  et  $\lambda$ , (voir tableau (3) sur la page suivante)

tableau (4); calcul de  $s$  en fonction de  $x$  et  $\lambda$ .

$$s = \int_0^1 xf(x) dx$$

$$\text{On pose } xf(x) = g(x) \text{ d'où } s = \int_0^1 g(x) dx = \int_0^{0,3} g(x) dx + \int_{0,975}^1 g(x) dx$$

Par la méthode des trapèzes, on calcule les différentes intégrales.

$$\int_{x_0}^{x_1} g(x) dx = \frac{x_1 - x_0}{2} (g(x_1) + g(x_0))$$

(voir tableau (4) sur la page suivante)

$\lambda \backslash x$	0.425	0.625	0.875	1.25	1.75	2.25	2.75	3.75
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
.30	.293	.296	.296	.296	.298	.299	.299	.299
.50	.453	.468	.477	.484	.490	.490	.492	.494
.60	.513	.541	.557	.568	.581	.581	.583	.588
.70	.558	.599	.627	.645	.666	.667	.671	.678
.80	.568	.628	.678	.708	.742	.745	.751	.761
.90	.519	.618	.694	.739	.794	.802	.814	.835
.95	.497	.575	.668	.721	.795	.807	.826	.855
.975	.379	.524	.631	.692	.772	.794	.816	.853

Tableau (3)

$X \backslash \lambda$	0.425	0.625	0.875	1.25	1.75	2.25	2.75	3.75
0.00-0.30	0.0440	0.0440	0.0444	0.0444	0.0447	0.0449	0.0449	0.0449
.30- .50	.0746	.0761	.0773	.0780	.0788	.0789	.0791	.0793
.50- .60	.0483	.0505	.0527	.0526	.0536	.0536	.0538	.0541
.60- .70	.0536	.0570	.0592	.0607	.0624	.0624	.0627	.0633
.70- .80	.0563	.0614	.0653	.0677	.0704	.0706	.0711	.0720
.80- .90	.0544	.0623	.0686	.0724	.0768	.0774	.0783	.0798
.90- .95	.0242	.0299	.0341	.0365	.0397	.0402	.0410	.0423
.95- .975	.0103	.0137	.0163	.0177	.0196	.0200	.0205	.0214
.975-1.00	.0047	.0065	.0079	.0087	.0097	.0099	.0102	.0107
	0.3704	0.4017	0.4258	0.4387	0.4557	0.4579	0.4616	0.4678

Tableau (4)

tableau (5):  $\frac{2e}{\pi S}$  et  $\frac{e}{S}$  en fonction de  $\lambda$

$\lambda$	$\frac{2e}{\pi S}$	$\frac{e}{S}$
0.425	0.756	1.188
0.625	.761	1.295
0.875	.419	0.658
1.25	.464	.729
1.75	.195	.307
2.25	.0556	.0874
2.75	.0414	.0650
3.75	.0411	.0646

tableau (6)  $x_1$  et  $x_2$  en fonction de  $\theta \in (10; 63,7)^\circ$

$\theta$	$x_1$	$x_2$	$\Delta x = x_1 - x_2$
0°	1.000	1.000	0.000
10°	0.993	0.978	.015
20°	.970	.912	.058
30°	.933	.808	.125
40°	.883	.676	.207
50°	.822	.529	.293
60°	.750	.375	.375
63,7°	.724	.324	.400

tableau (7) :  $\phi(x)$  en fonction de  $\theta$  et de  $x$

$$\phi(x) = \arcsin \left\{ \cotg \sqrt{\left( \frac{1 + \cos \theta}{2x} \right)^2 - 1} \right\}$$

$\theta^\circ$	Intervales	h	x	$\phi(x)$
10°	1	0.015	0.978	1.571
			.993	0.000
20°	1	.058	.912	1.571
			.970	0.000
30°	1	.125	.808	1.571
			.993	0.000
40°	2	.103	.676	1.571
			.779	0.693
			.883	.000
50°	3	.098	.529	1.571
			.627	0.792
			.725	.466
60°	4	.094	.822	.000
			.375	1.571
			.469	0.793
			.563	.533
63,7°	4	.1	.657	.323
			.324	1.570
			.424	0.766
			.524	0.498
			.624	0.299
			.724	0.000

tableau (8) :

Par interpolation à partir du tableau (1) on calcule des nouvelles valeurs de  $f(x)$ .

(voir tableau (8) page suivante )

$\theta$ °	$\lambda$ $\chi$	0.425	0.625	0.875	1.25	1.75	2.25	2.75	3.75
10	0.978	0.342	0.531	0.569	0.625	0.697	0.716	0.718	0.770
20	.912	.551	.667	.755	.806	.871	.881	.897	.922
30	.808	.699	.777	.841	.880	.924	.928	.936	.950
40	.676	.811	.866	.903	.928	.956	.957	.963	.972
	.779	.728	.800	.857	.893	.933	.936	.943	.956
50	.529	.891	.927	.946	.961	.987	.977	.980	.986
	.627	.840	.890	.919	.940	.964	.964	.969	.977
	.725	.775	.837	.883	.913	.946	.948	.954	.965
60	.375	.950	.962	.973	.980	.988	.989	.991	.993
	.469	.917	.943	.958	.970	.982	.982	.985	.989
	.563	.874	.915	.937	.954	.973	.972	.976	.985
	.657	.822	.875	.910	.933	.959	.959	.965	.974
63,7	.324	.965	.968	.980	.985	.991	.993	.994	.991
	.424	.933	.963	.965	.975	.985	.986	.988	.990
	.524	.891	.931	.947	.961	.976	.976	.979	.986
	.624	.841	.891	.919	.941	.964	.965	.970	.977

Tableau (8)

tableau (9) :

Calcul de  $E_{\lambda_1}(\theta)$   $\theta \in (10; 63,7)^\circ$

$$E_{\lambda_1}(\theta) = \frac{2e}{\pi S} \int_{x_2}^{x_1} x f(x) \cdot \phi(x) dx$$

On pose  $x f(x) \phi(x) = G(x)$

$$\text{donc } E_{\lambda_1}(\theta) = \frac{2e}{\pi S} \int_{x_2}^{x_1} G(x) dx$$

On intègre numériquement par la méthode des trapèzes.

Exemple :

$$\theta = 63,7^\circ$$

$$\Delta x = 0,1$$

$$\lambda = 0,425 \quad \frac{2e}{\pi S} = 0,756$$

$$E_{\lambda_1}(\theta) = 0,756 \times \frac{0,1}{2} \left\{ G(0,324) + 2 G(0,424) \right. \\ \left. + 2 G(0,524) + 2 G(0,624) \right\}$$

$$E_{\lambda_1}(\theta) = 0,0709$$

$$E_{\lambda_1}(\theta)$$

$\theta \setminus \lambda$	0.425	0.625	0.875	1.25	1.75	2.25	2.75	3.75
10	0.00298	0.00466	0.00275	0.00334	0.00157	0.00046	0.00034	0.00037
20	.0173	.0211	.0132	.0155	.00706	.00204	.00154	.00158
30	.0419	.0469	.0280	.0324	.0143	.00409	.00307	.00311
40	.0641	.0699	.0407	.0466	.0203	.0060	.00435	.00449
50	.0777	.0828	.0471	.0534	.0231	.0066	.00491	.00493
60	.0751	.0784	.0439	.0467	.0211	.0060	.00451	.00451
63,7	.0709	.0737	.0411	.0460	.01966	.0056	.0042	.0042

Tableau (10) :

Calcul de  $E_{\lambda 2}(\theta)$

$$E_{\lambda 2}(\theta) = \frac{e}{S} \int_0^{x_2} x f(x) dx$$

On calcule les valeurs de  $E_{\lambda 2}(\theta)$  par la même méthode que précédemment.

$\theta \backslash \lambda$	0.425	0.625	0.875	1.25	1.75	2.25	2.75	3.75
10	0.4353	0.5125	0.2757	0.3142	0.1373	0.0393	0.0294	0.0296
20	.4004	.4643	.2472	.2803	.1216	.0347	.0260	.0261
30	.3342	.3807	.2003	.2254	.0970	.0277	.0207	.0206
40	.2468	.2770	.1443	.1612	.0689	.0196	.0147	.0146
50	.1575	.1745	.0901	.1004	.0427	.0122	.0091	.0090
60	.0854	.0939	.0482	.0537	.0229	.0065	.0049	.0048
63,7	.0602	.0658	.0338	.0377	.0159	.0045	.0034	.0033
$E_{\lambda}(\theta)$	.1311	.1395	.0749	.0837	.0355	.0101	.0076	.0075
			$E_{\lambda}(\theta)$ en cal/mn.cm <sup>2</sup>					

$$E_{\lambda}(\theta) = E_{\lambda 1}(\theta) + E_{\lambda 2}(\theta)$$

Tableau (11) :

$\theta$ °	$\sin \theta (1 + \cos \theta)^2$
10	0.0442
20	0.0909
30	0.144
40	0.206
50	0.284
60	0.385
63,7	0.426

Calcul de  $\phi_\lambda$  (densité de flux)

$$\phi_\lambda = \frac{32}{\alpha^2} \int_0^{\theta_1} E_\lambda(\theta) \frac{\sin \theta}{(1 + \cos \theta)^2} d\theta$$

à partir des tableaux (11) et (10) on calcule  $\phi_\lambda$ , toujours par intégration numérique.

Tableau (12) :

$\lambda$	$\theta = 63,7 ; \phi_\lambda$
0.425	20468
0.625	22920
0.875	11307
1.25	12687
1.75	5478
2.25	1565
2.75	1170
3.75	1167
$\phi$ cal/mn.cm <sup>2</sup>	76762

On a donc une densité de 1279 cal/s.cm<sup>2</sup> au foyer soit 7,5 KW dans une tache de 1,4 cm<sup>2</sup>.

## II - ORIENTEUR UNIQUE OU CHAMP D'HELIOSTATS

### C - I - Mouvement apparent du soleil.

Dans ce chapitre, nous tenons surtout à rappeler des notions qui nous permettront de définir des paramètres intervenant directement dans le processus d'asservissement.

L'étude de la trajectoire du centre du soleil sur la sphère céleste se fera par rapport à un observateur placé dans l'hémisphère nord et regardant dans la direction sud. Pour nous placer dans le cadre de notre étude, cet observateur sera confondu avec un point quelconque de l'héliostat.

Il faut considérer à priori deux points fondamentaux. L'asservissement s'opère non seulement sur une journée, mais également au cours de l'année, puisque la rotation de la Terre sur elle même définit un mouvement apparent uniforme au cours d'une journée et sa révolution autour du soleil définit ses trajectoires apparentes au cours de l'année.

#### I - 1 - Mouvement du soleil dans une journée.

Ce mouvement peut se décomposer en deux déplacements uniformes simultanés (Fig C 8) : une trajectoire d'Est en Ouest dans un plan horizontal et une variation d'altitude dans un plan vertical. Nous verrons dans le tome II que l'utilité d'une telle décomposition apparaîtra au niveau du nombre et de la disposition des cellules photosensibles (t.2).

#### I - 2 - Mouvement du soleil au cours de l'année.

Les déplacements de l'astre solaire sont compris entre ses trajectoires extrémales. Ces trajectoires sont celles correspondant aux solstices et déterminent sur la voûte céleste une zone dans laquelle peut se trouver le soleil (Fig C 9).

Par ailleurs il faut réduire cette zone par une limite au dessous de laquelle le soleil devient énergétiquement inutilisable. Ce mouvement au cours des saisons appelé mouvement de déclinaison n'aurait

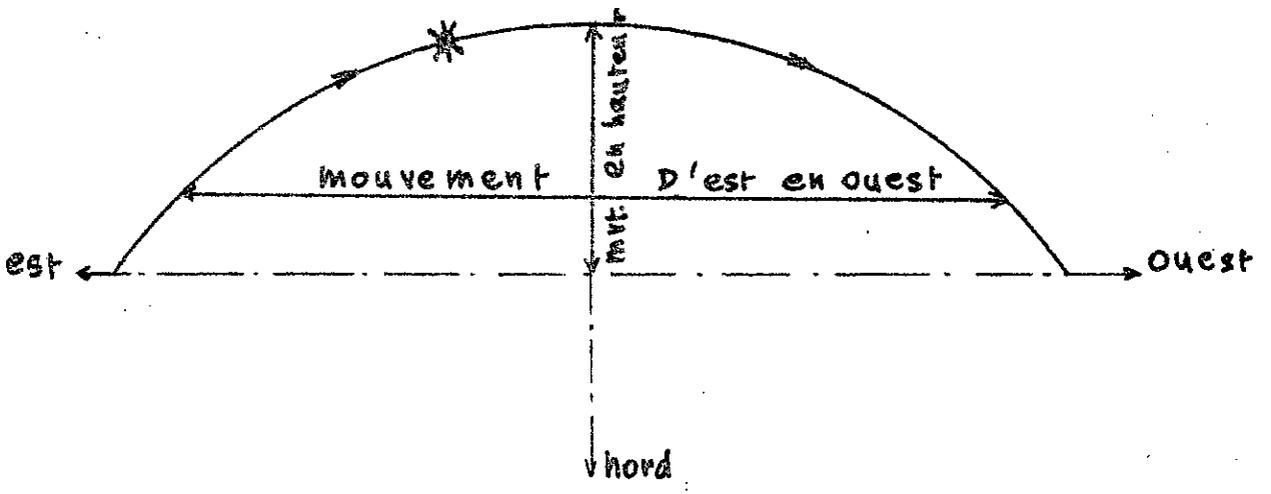


Fig. C8 - Mouvement apparent du Soleil

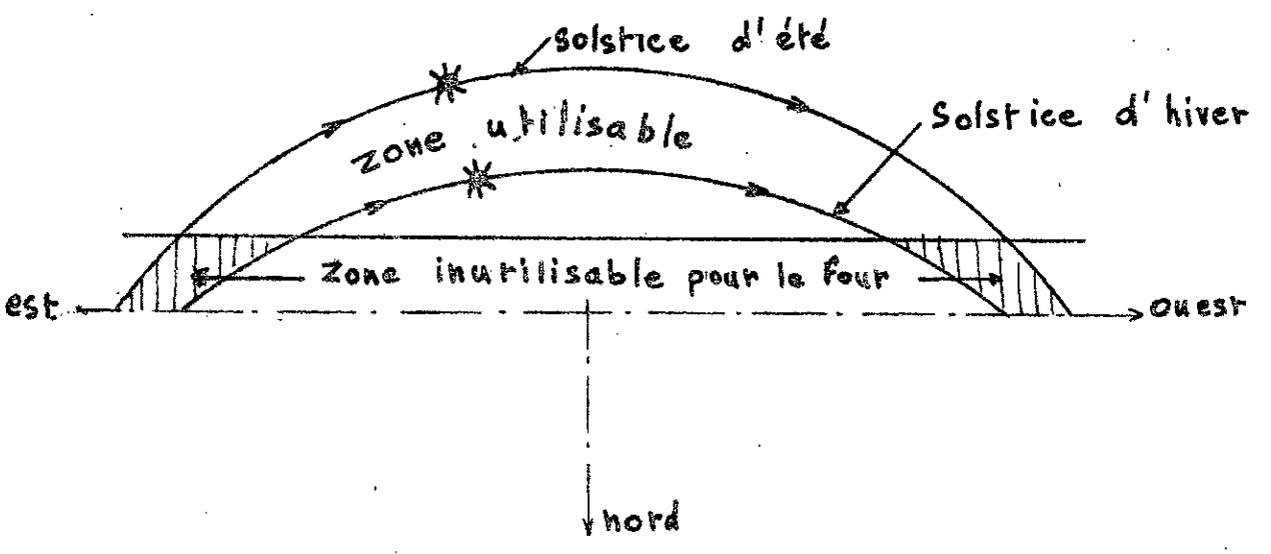


Fig. C9 - Zones du déplacement Solaire

aucun effet sur le procédé d'assèvissement si ce n'était le fait que l'angle apparent du soleil change de valeur au cours de l'année (la trajectoire apparente du soleil étant une ellipse).

### I - 3 - Rappels de cosmographie (6)

La position du soleil à une période donnée de l'année, à une déterminée de la journée et à une certaine latitude est définie par ses coordonnées horizontales, soient sa hauteur et son azimut (Fig C 10).

#### I - 3 - 1 Définition de la hauteur (ha)

C'est l'angle que fait avec l'horizon le rayon visuel venant du soleil.

En trigonométrie sphérique le complément  $z$  à la hauteur  $h$  s'exprime par :

$$\cos(\epsilon) = \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(H)$$

où  $\varphi$  est la latitude du lieu considéré.

$\delta$  la déclinaison du soleil à la période du jour et de l'année considérée. La déclinaison est la distance angulaire d'un corps céleste à l'équateur céleste (donnée par la table des éphémérides astronomiques).

$H$  l'angle horaire ; l'angle horaire est le temps écoulé depuis qu'un corps céleste a croisé le méridien d'un observateur (positif), ou temps qui s'écoulera avant qu'il n'y passe (négatif).

Il est donné par :

$$H = T_{SL} - \alpha_a$$

où  $T_{SL}$  est le temps sidéral local.

$\alpha$  l'ascension droite au jour considéré à l'heure universelle désirée ( $T_U$ )  $T_{SL}$  s'exprime par :

$$T_{SL} = T_U + T_{SG(0)} - L + \Delta t$$

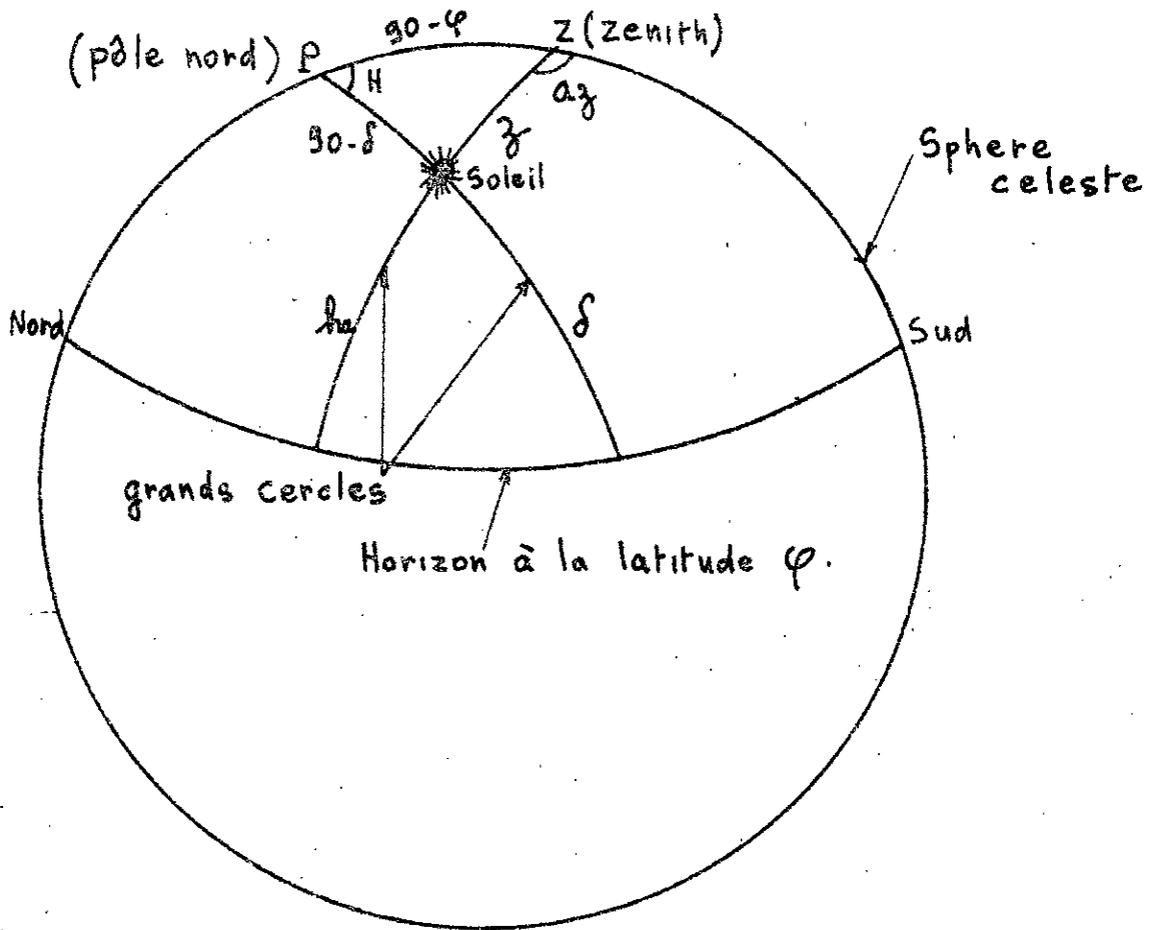


Fig. 610. Coordonnées horizontales du Soleil

- $T_U$  = Temps universel.  
 $T_{SG_0}$  = temps sidéral au méridien de Greenwich à 0 heure pour le jour considéré (donné par la table).  
 $L$  = la longitude du lieu.  
 $\Delta t$  = la correction qu'il faut apporter à  $T_{SG_0}$ , quand on passe de 0 heure à TU (donnée par la table).

$\alpha$  s'exprime par :  $\alpha_a = \alpha_{a_0} + \Delta \alpha_a$   
 où  $\alpha_{a_0}$  = est l'ascension droite du soleil à 0 heure (table).  
 $\Delta \alpha_a$  = la correction nécessaire lorsqu'on passe de 0 heure à TU (table).

Remarque :

Si le soleil se trouve au midi du méridien considéré alors  $H = 0$ .

I - 3 - 2 Définition de l'azimut.

On appelle azimut ( $a_z$ ) d'un corps céleste l'angle formé par la vertical de ce dernier et par la vertical d'un repère terrestre : la direction Sud.

L'azimut est donné par :

$$\sin(a_z) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(H)}{\sin(z)}$$

I - 4 - Conclusion.

Le mouvement apparent du soleil nous impose deux variables (dont on gardera la notation tout au long du travail).

- L'angle  $\Theta$  ; traduisant une variation de position du soleil par rapport à un point quelconque de l'héliostat.

- L'angle  $\alpha$  ; angle apparent du soleil. Il est maximum au 1er Janvier 32'30" et minimum au 1er Juillet et vaut alors 31'30".

La variable  $\Theta$  est la plus importante des deux, c'est elle qui nous impose la poursuite du soleil.

La variable  $\alpha$  est relativement constante au cours de l'année.

Nous ne considérons dans nos calculs que la valeur moyenne  $\alpha = 32'$ .

Pour s'affranchir de la petite variation de  $\alpha$ , nous apporterons une légère amélioration au système de guidage (écran mobile), (t.2).

D'autre part ce système doit pouvoir se libérer des perturbations (passages d'un quelconque obstacle à la lumière devant le faisceau incident tombant sur l'héliostat ou réfléchi par ce dernier).

### C - II - Etude de l'orienteur plan.

Pour simplifier notre étude, nous commencerons par supposer que le concentrateur est totalement éclairé par un orienteur unique, d'une certaine dimension (que l'on calculera) ; le mouvement de cet appareil est supposé uniforme. Ensuite nous reviendrons à l'héliostat ( $2,25 \text{ m}^2$ ) intégré dans un champ d'héliostats.

#### II - 1 - L'orienteur unique.

II - 1 - 1 Ses variations de position globales au cours d'une journée.

Pour des raisons l'optimisation nous choisissons la journée du 22 Juin 1977 : le solstice d'été 1977, et nous considérons un fonctionnement minimal de 6 heures par jour (10 heures à 16 heures) afin que le flux solaire soit utilisable en toute saison à Alger - Bouzaréah.

a) Calcul du déplacement angulaire de l'orienteur dans le sens azimutal.

Calculons d'abord le déplacement angulaire du Soleil, soit :

$$(a_z)_s = a_{z2} - a_{z1}$$

$a_{z1}$  = azimut à 10 heures.

$a_{z1}$  = azimut à 16 heures.

avec :

$$\sin(a_{z_1}) = \frac{\cos(\xi_1) \cdot \sin(H_1)}{\sin(z_1)}$$

$$H_1 = T_{U_1} + T_{SG_0} - L + \Delta t_1 - \alpha a_1$$

$$\cos(z_1) = \sin(\delta_1) \cdot \sin(\varphi) + \cos(\delta_1) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(H_1)$$

on a  $T_{U_1} = 10$  heures ;  $L = - 12$  mn 08 s ;  $\varphi = 36^\circ 48' 13''$

La table des éphémérides cosmographiques de 1977 donne :

$T_{SG_0} = 18$  heures 00 mn 08 s,  $\Delta t_1 = 1$  mn 38,6 s,  $\alpha a_1 = 6^h 03$  mn 47 s,

$$\delta_1 = 23^\circ 26'.$$

on trouve  $\sin(a_{z_1}) = 0,917$

De la même manière, pour  $T_U = 16^h$ ,  $\sin(a_{z_2}) = 0,998$

soit encore  $a_{z_1} = 66,56$

$$a_{z_2} = 86,57$$

d'où  $(a_z)_s = 153,13$ .

Pour couvrir ce déplacement du soleil, le miroir doit effectuer un déplacement angulaire :

$$(a_z)_o = \frac{(a_z)_s}{2}$$

$$\text{soit } (a_z)_o = 76,56$$

ce qui correspond, pour la projection dans le sens nord-sud à

$$(a'_z)_o = \frac{(a_z)_o}{2}$$

$$\text{soit } (a'_z)_o = 38,28$$

b) Calcul de l'inclinaison de l'orienteur.

Du schéma de la figure C 1, on peut très facilement en déduire

qué :

$$(i_n)_0 = \frac{h_a}{2}$$

$h_a$  étant la hauteur apparente du soleil le 22 Juin 1977 au midi du méridien ( $H = 0$ )

on a 
$$h_a = 90^\circ - z$$

$$\cos(z) = \sin(\delta) \cdot \sin(\varphi) + \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi) = \cos(\varphi - \delta)$$

d'où 
$$h_a = 90^\circ - \varphi + \delta$$

avec 
$$\varphi = 36^\circ 48'$$

$$\delta = 23^\circ 26'$$

soit 
$$h_a = 76^\circ,63$$

d'où 
$$(i_n)_0 = 38^\circ,32$$

on remarque que 
$$(a'_z)_0 \simeq (i_n)_0$$

## II - 1 - 2 Les dimensions de l'orienteur unique.

Cet appareil qui prend différentes positions pour suivre la course du soleil doit toujours présenter une surface apparente dans la direction Nord, de telle manière que le paraboloïde de 3,58 x 3,58 m soit toujours totalement éclairé.

### a) Dimensions approximatives.

Dans une première approximation nous considérons que le soleil est une source lumineuse rejetée à l'infini, éclairant donc par un faisceau de lumière à rayons parallèles et à énergie constante sous un certain angle d'incidence.

Dans le cas d'une réflexion spéculaire, les dimensions de l'orienteur sont :

en largeur 
$$l_0 = \frac{D}{\cos(a'_z)_0} = 4,560 \text{ m}$$

en hauteur 
$$h_0 = \frac{D}{\cos(i_n)_0} = 4,560 \text{ m}$$

c'est donc un carré de 4,560 m de côté.

b) Dimensions réelles de l'orienteur.

En réalité le soleil n'étant pas un objet à l'infini, il faut donc tenir compte dans le faisceau réfléchi par l'orienteur des pénombres latérales dues au diamètre apparent du soleil.

L'interception du rayonnement solaire réfléchi par un miroir plan sur un écran donne une image en forme d'un cercle où la densité énergétique est constante et d'un halo concentrique où la densité énergétique décroît en allant vers la périphérie (Fig C 2), (7).

Cette particularité est importante pour l'étendue de la densité énergétique de lumière qu'on peut obtenir sur le concentrateur.

On voit en effet que les dimensions de l'orienteur précédemment calculées en première approximation doivent être légèrement augmentées pour écarter les pénombres sur le parabolique.

D'autres considérations compliquent ce calcul, le choix de la distance orienteur-concentrateur qui déterminent la dimension de la nappe à énergie constante disponible au récepteur. Or cette distance est elle même fonction de la hauteur du concentrateur et de son support : en effet, il faut éviter que l'héliostat unique soit dans la zone d'ombre du parabolique. Comme cette zone d'ombre est variable dans la journée et dans l'année, nous retiendrons pour des raisons d'optimisation, le solstice d'hiver (22/12/77), à l'heure où le soleil est le plus bas entre 10 heures et 16 heures.

b 1 - calcul de la zone d'ombre ( $d_0$ ).

D'après la figure C 3, on a :

$$d_0 = D' \cdot \cotg(h_r)$$

où  $D'$  = hauteur totale du concentrateur et vaut 4 m.

$d_0$  = longueur de l'ombre sur le sol.

avec  $h_r = h_a + R_r$

où  $h_a = 90^\circ - z$  = hauteur apparente du soleil.

$R_r$  = terme correctif dû à la réfraction.

La table des éphémérides en donne la valeur pour la date fixée.

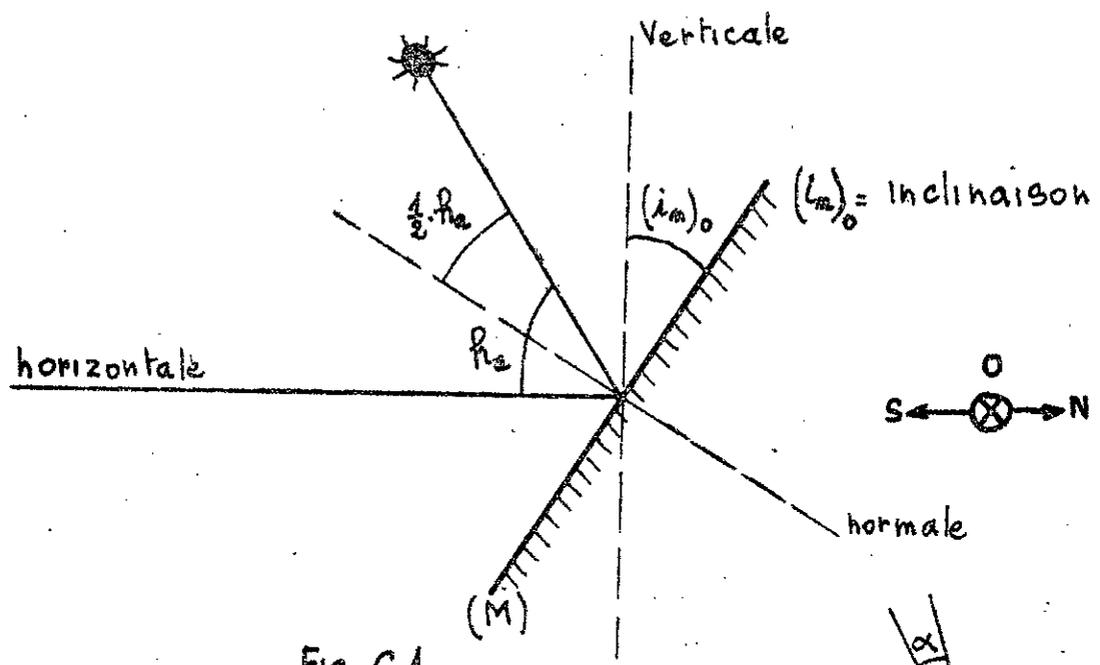


Fig. C1.

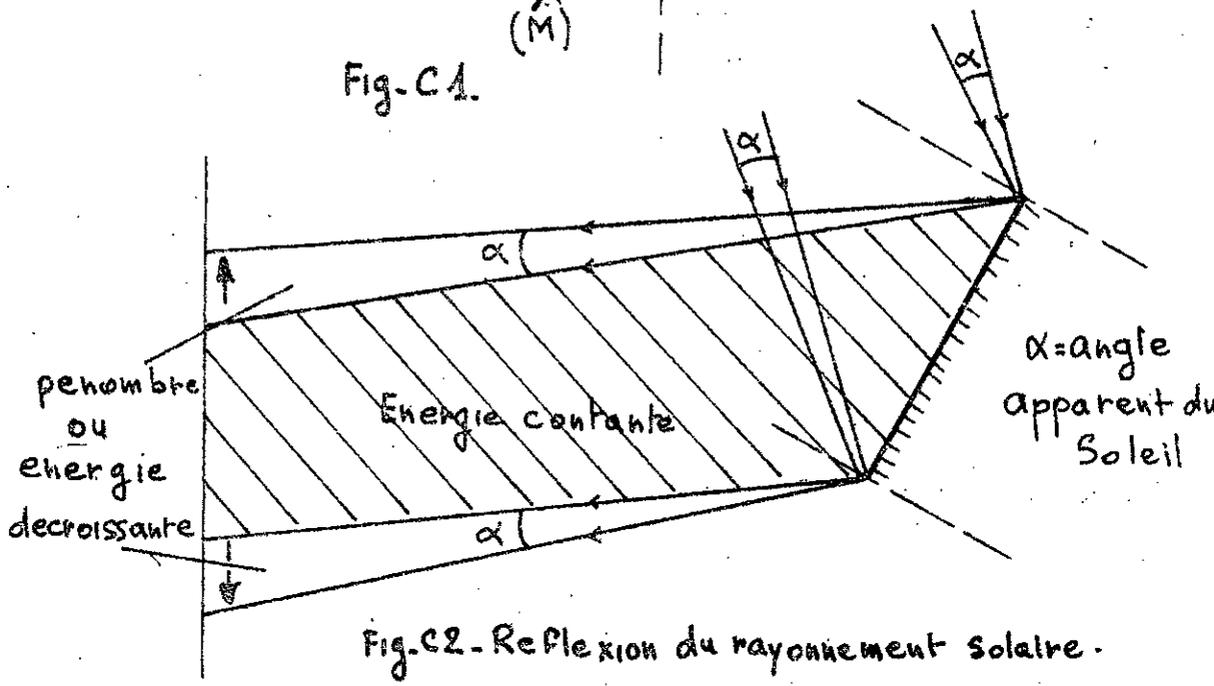


Fig. C2. Reflexion du rayonnement solaire.

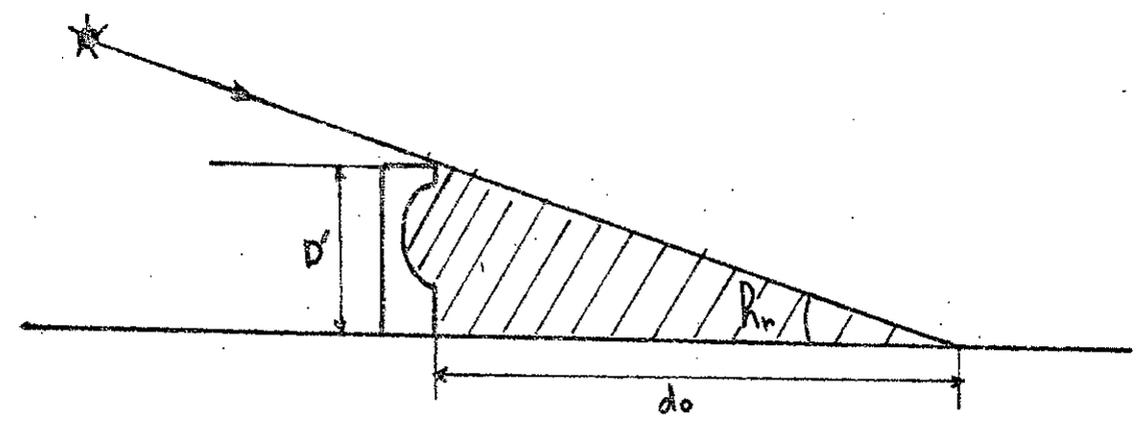


Fig. C3. Zone d'ombre due au parabolique

Il faut d'abord calculer  $h_a$  pour  $T_U = 10$  heures puis pour  $T_U = 16$  heures et ne retenir que la hauteur la plus faible des deux, c'est-à-dire  $z$  le plus grand.

$$\cos(z) = \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(H)$$

pour  $T_U = 10^h$  on calcul  $H_1$       $H_1 = 3749,29$

pour  $T_U = 16^h$  " "      $H_2 = 3800,85$

soit      $z_1 = 61^{\circ},70$

$z_2 = 63^{\circ},40$

On ne retient que la valeur  $z_2$ , nous avons par conséquent :

$$h_{a2} = 26^{\circ},60$$

Pour une telle hauteur du soleil, la réfraction vaut :

$$R_{r2} = 0^{\circ},033$$

nous avons      $h_{r2} = 26^{\circ},633$

La longueur  $d_o$  de l'ombre du parabolique vaut :

$$d_o = 8 \text{ m}$$

Pour se mettre hors de cette zone, nous disposerons l'orienteur à une distance  $d' = 10$  m. Nous pouvons alors déterminer les nouvelles dimensions du miroir.

b 2 - calcul des dimensions réelles de l'orienteur.

Nous désirons calculer  $\Delta h$  et  $\Delta h'$ , pour augmenter de ces valeurs la hauteur  $h_o$  de l'orienteur (Fig C 4).

on a

$$\Delta h = \frac{y}{\cos(i_n)_o}$$

avec

$$y = (d' + \frac{1}{2} \cdot h_o \cdot \sin(i_n)_o) \cdot \text{tg}(\frac{1}{2} \cdot \alpha)$$

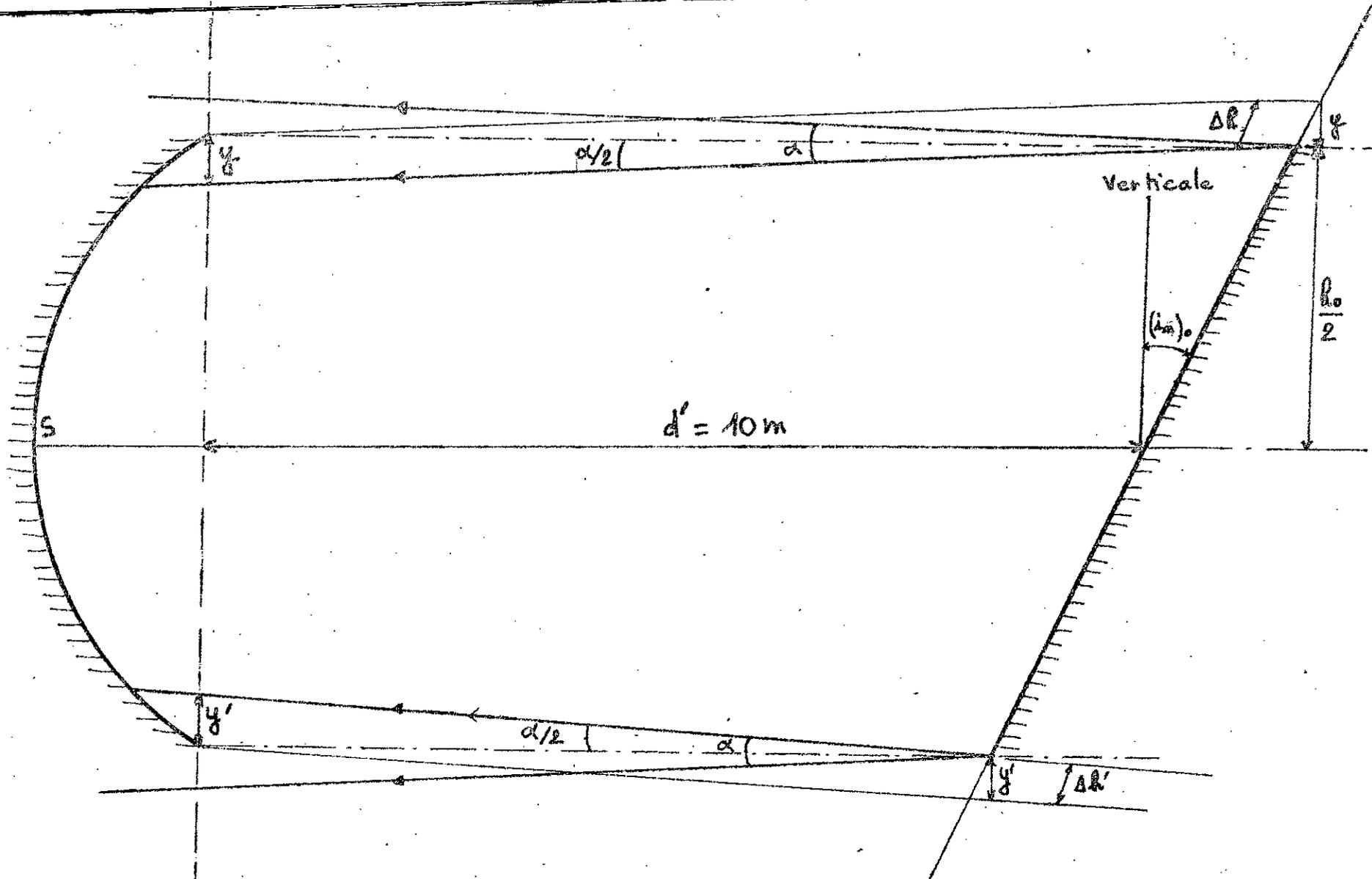


Fig-C4.

De la même manière :

$$\Delta h' = \frac{y'}{\cos(i_n)_0}$$

avec  $y' = (d' - \frac{1}{2} \cdot h_0 \cdot \sin(i_n)_0) \cdot \text{tg}(\frac{1}{2} \cdot \alpha)$

$\alpha = 32'$  angle apparent moyen du soleil.

on trouve :  $\Delta h = 7 \text{ cm}$

$$\Delta h' = 5 \text{ cm}$$

Pour une raison de symétrie, nous augmenterons  $h_0$  de  $2 \cdot \Delta l$ .

donc  $h_1 = h_0 + 2 \cdot \Delta h$

soit  $h_1 = 4,700 \text{ m}$

Pour le calcul de  $\Delta l$  et  $\Delta l'$ , valeurs à ajouter à la largeur  $l_0$  de l'orienteur, on a vu que  $l_0 = h_0$  et  $(a_z)_0 = (i_n)_0$  on peut en déduire que :

$$l_1 = 4,700 \text{ m également.}$$

II - 1 - 3 Dimensions de l'orienteur dans le cas où il se meut pas à pas.

Ces dimensions dépendent évidemment du cycle marche-arrêt.

Preons par exemple un cycle de 24s ; sachant que la vitesse apparente angulaire moyenne du soleil est de  $15^\circ$  par heure, on en déduit que durant un arrêt de 12s de l'orienteur le soleil s'est déplacé de  $6'$ .

Il suffit donc de reprendre les calculs pour un angle

$$\alpha' = \alpha + 6' = 38' \text{ à la place de } \alpha.$$

$$\Delta h'' = \Delta l'' = \frac{(d' + \frac{1}{2} h_0 \cdot \sin(i_n)_0) \cdot \text{tg}(\frac{1}{2} \alpha')}{\cos(i_n)_0}$$

$$\Delta h'' = \Delta l'' = 8,0 \text{ cm}$$

d'où  $l_2 = h_2 = h_0 + 2 \Delta h'' = 4,720 \text{ m}$

$l_2$  et  $h_2$  sont la largeur et la hauteur de l'orienteur mobile fonctionnant pas à pas avec un pas marche-arrêt et arrêt-marche de 12s, capable de couvrir totalement et constamment d'une nappe de lumière à énergie constante le concentrateur.

## II - 2 - Le champ d'héliostats.

Le problème consiste dans la détermination du nombre d'héliostats de 1,5 m X 1,5 m et leur disposition permettant le recouvrement total à énergie constante du paraboloïde d'ouverture  $D = 3,580$  m.

II - 2 - 1 Dimension de la nappe à énergie constante donnée par un miroir carré de 1,5 m de côté à une distance  $d_1$  du paraboloïde.

D'après la figure C 5 et les calculs effectués au paragraphe C.II.1.2.b.2, on peut écrire :

$$l_a = l_o \cdot \cos(i_n)_o$$

$$l_o = 1,5 \text{ m}$$

on trouve

$$l_a = 1,173 \text{ m}$$

par ailleurs

$$y = (d_1 + \frac{1}{2} \cdot l_o \cdot \sin(i_n)_o) \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

$$y' = (d_1 - \frac{1}{2} \cdot l_o \cdot \sin(i_n)_o) \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

pour des raisons de symétrie, on ne considérera que la valeur de  $y$ .

on a

$$l_{u_1} = l_a - 2 \cdot y = (1,173 - 9,3 \cdot 10^{-3} \cdot d_1) \text{ m}$$

$l_{u_1}$ , étant la dimension de la nappe à énergie constante du petit héliostat, recueillie à la distance  $d_1$ .

## II - 2 - 2 Disposition relative des héliostats.

Si le rayonnement était ponctuel, il suffirait que les alignements nord-sud des bandes d'orienteur se recouvrent. Or comme le soleil possède un diamètre apparent moyen de 32' d'arc, la surface de la zone à énergie constante  $l_{u_1}^2$  diminue avec la distance  $d_1$  au profit des zones à énergie décroissante.

Considérons d'abord les deux rangées d'orienteurs I et II d'une même terrasse (on conçoit aisément que pour couvrir le parabolique en hauteur, il faille disposer d'héliostats répartis sur des terrasses). Les deux lignes est-ouest correspondant au centre des appareils étant décalées dans le sens nord-sud d'une distance  $L'$  (elle doit être suffisante pour éviter aux orienteurs II d'être dans la zone d'ombre des orienteurs I), il faut que les rayonnements issus des orienteurs de la

série II recouvrent les pénombres des orienteurs de la première série.

Un tel résultat n'est évidemment pas obtenu, comme le montre la figure C 6 s'il n'y a pas débordement des orienteurs II sur les orienteurs I par rapport à l'axe nord-sud. Par exemple, d'un point M situé au niveau du paraboloïde et de telle manière que les rayons qu'il reçoit soient tangents à l'orienteur I, on voit le soleil dans l'orienteur II bien au delà de la limite de l'axe nord-sud (2).

Les bandes d'orienteurs supplémentaires ont des largeurs  $a$  et  $a'$  (Fig C 6) qui peuvent être calculées en fonction de l'inclinaison  $\beta$  des orienteurs, de leur distance  $L'$  dans la direction nord-sud et de la largeur totale  $l_0$  des orienteurs.

En réalité étant donné que l'inclinaison des orienteurs est symétrique à l'est et à l'ouest, on prendra la valeur maximum  $a$ .

La figure C 7 montre le schéma d'ensemble horizontal des orienteurs. On peut définir aussi la distance optimale  $2 L''$  entre deux orienteurs d'une même série pour obtenir, pour un angle donné  $\beta$ , une nappe à énergie constante.

On trouve d'après la figure :

$$a = \frac{(L' + l_0 \cdot \sin(\beta)) \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\cos(\beta)}$$

$$L'' = l_0 \cdot \cos(\beta) - a$$

Pour que l'ombre des premiers héliostats ne gêne pas les seconds, il est nécessaire de les disposer à une distance :

$$L_m = \sqrt{(L')^2 + (L'')^2}$$

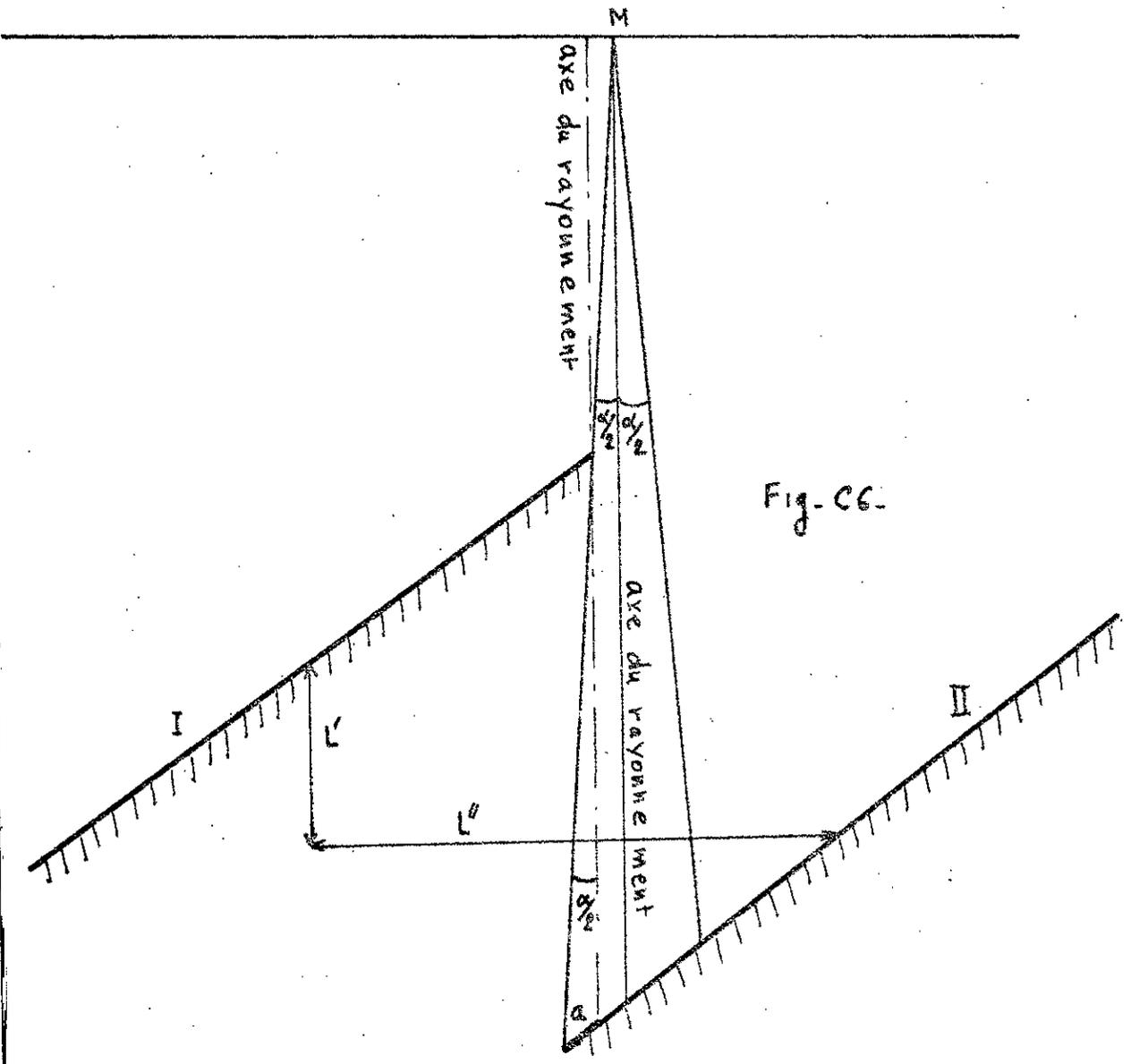
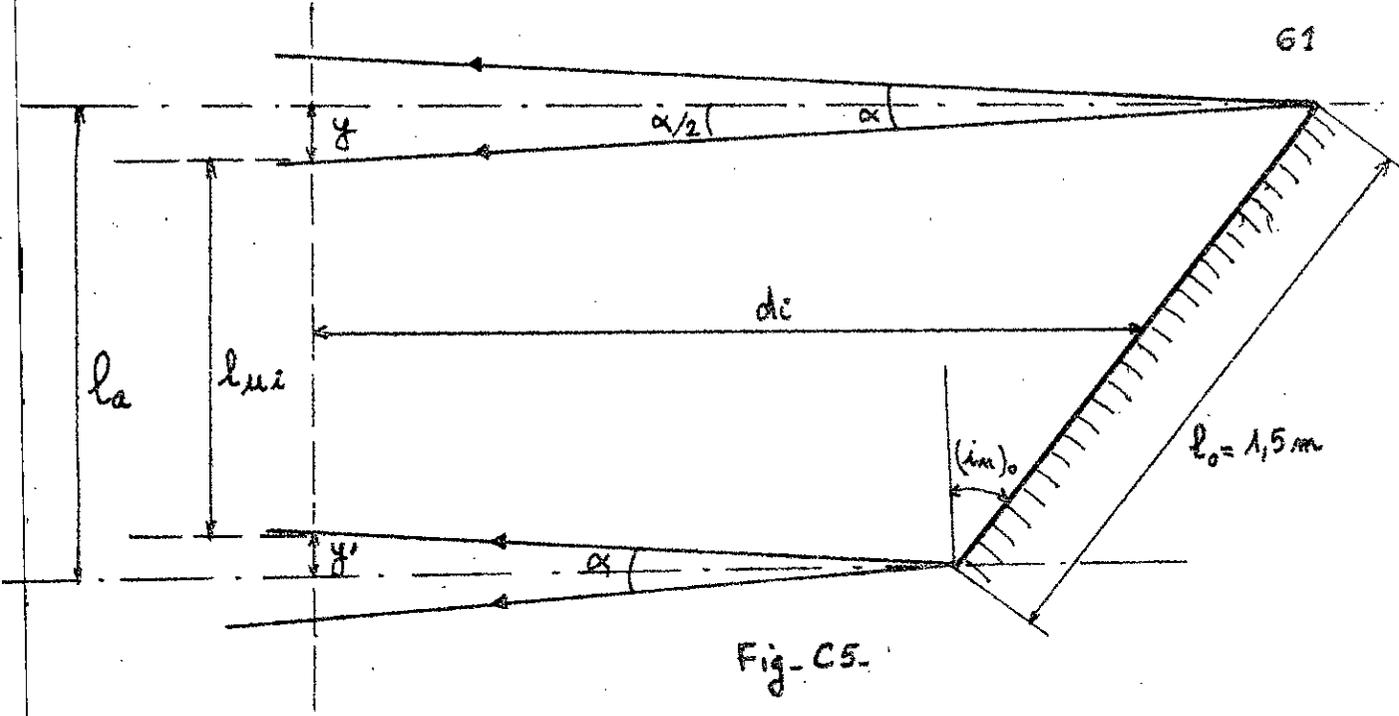
supérieure à la longueur de la zone d'ombre de l'héliostat soit  $l_0 \cdot \cotg(h_{r2})$

donc 
$$\sqrt{(L')^2 + (L'')^2} > l_0 \cdot \cotg(h_{r2})$$

soit 
$$L' > \sqrt{(l_0 \cdot \cotg(h_{r2}))^2 - (L'')^2}$$

pour 
$$l_0 = 1,500 \text{ m} \quad ; \quad \beta = (i_n)_0 = 38^\circ,32'$$

$$\alpha = 32' \quad ; \quad h_{r2} = 26^\circ,633'$$



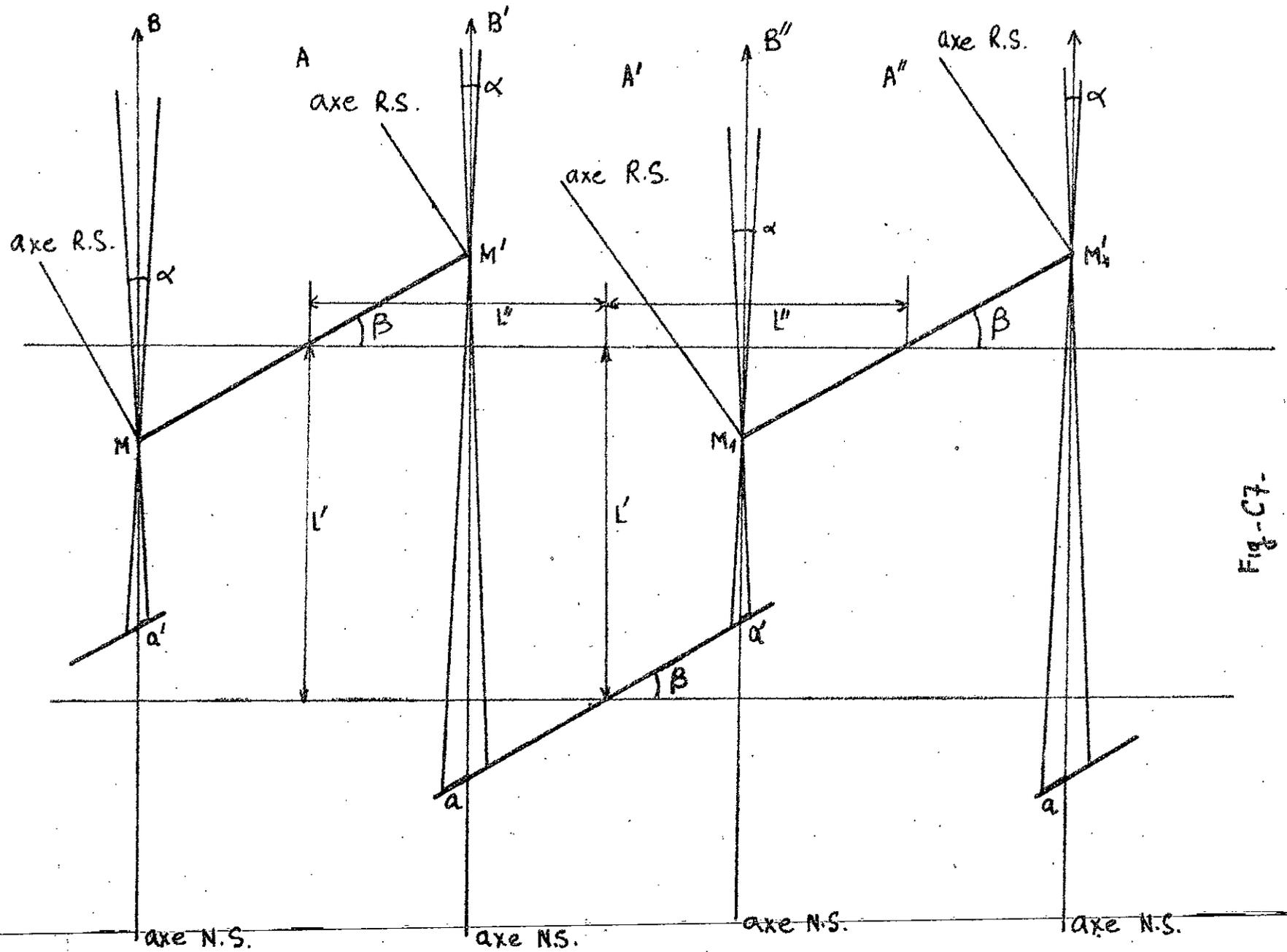


Fig.-C7-

on a  $a = (0,0059.L' + 0,55) \text{ cm}$

$$L'' = (117,68 - a) \text{ cm}$$

$$(L')^2 > 8,95 \cdot 10^4 \text{ cm} + (L'')^2$$

d'où  $L'' = (117,13 - 0,0059.L') \text{ cm}$

$$(L')^2 > 8,95 \cdot 10^4 \text{ cm} + (L'')^2$$

soit l'inégalité

$$(L')^2 + 1,38 \times L' - 10^5 > 0$$

dont la solution est

$$L' > 316,0 \text{ cm}$$

on prend  $L' = 330,0 \text{ cm}$

d'où  $a = 2,5 \text{ cm}$

$$L'' = 114,6 \text{ cm}$$

Nous disposerons les héliostats en deux séries par terrasse, la distance entre chaque série est  $L' = 330,0 \text{ cm}$ .

Sachant que  $l_{ui}$  diminue lorsque  $d_i$  croît, nous retiendrons pour nos calculs la surface utile  $l_{ui}^2$  donnée par les miroirs de la deuxième série d'orienteurs de chaque terrasse.

Ces calculs s'arrêteront lorsque  $\sum_{i=1}^n l_{ui}$  sera égal ou supérieur à  $D$  ( $n$ : nombre de terrasses).

a) Calcul du nombre de terrasses.

- Première terrasse.

$$d_1 = d' + 3,300 \text{ m} = 13,300 \text{ m}$$

$$l_{ui} = 1,049 \text{ m}$$

- Deuxième terrasse.

La distance minimale entre les orienteurs de la deuxième série d'une terrasse et ceux de la première série de la terrasse suivant est  $l_0/2$ .

Pour majorer, on prend  $L'_t = 0,900$  m.

Nous avons donc :

$$d_2 = d_1 + L'_t + L' = 17,500 \text{ m}$$

$$l_{u2} = 1,010 \text{ m}$$

- Troisième terrasse.

$$d_3 = d_2 + L'_t + L' = 21,700 \text{ m}$$

$$l_{u3} = 0,971 \text{ m}$$

- Quatrième terrasse.

$$d_4 = d_3 + L'_t + L' = 25,900 \text{ m}$$

$$l_{u4} = 0,932 \text{ m}$$

On remarque qu'avec 4 terrasses, on peut couvrir le paraboloïde d'une nappe à énergie constante de  $\sum_{i=1}^4 l_{ui} = 3,962$  m de hauteur.

Pour des raisons de symétrie, nous centrons cette nappe sur le parabolique (Fig C 11).

b) Détermination du nombre d'héliostats par terrasse.

D'après la figure, le nombre d'héliostats pour la terrasse  $i$  est donné par :

$$n_i = \frac{A_i \cdot A'_i}{l_{ui}}$$

La valeur de la corde  $A_i \cdot A'_i$  est donnée par la simple relation de Pythagore. Cependant, il faut signaler qu'il ne faut considérer que la plus grande des cordes (Fig C 11).

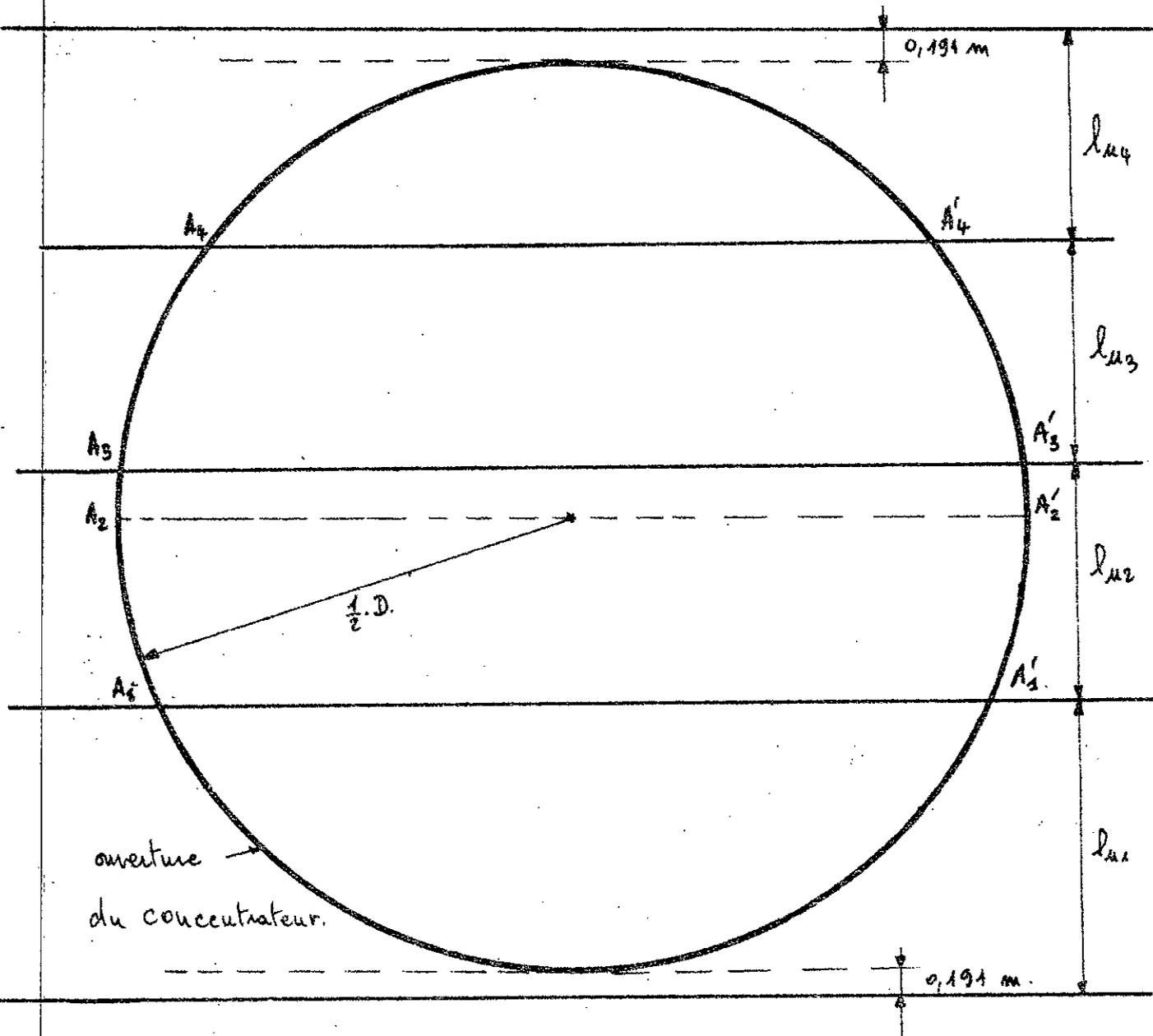


Fig-C11 - bandes à énergie constante données par les différentes terrasses.

- Première terrasse.

$$A_1 \cdot A'_1 = 2 \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - (l_{u_1} - 0,191 \text{ m})\right)^2}$$

on trouve  $n_1 = 3$

- Deuxième terrasse.

$$A_2 A'_2 = D$$

d'où  $n_2 = 4$

- Troisième terrasse.

$$A_3 A'_3 = 2 \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - (l_{u_3} + l_{u_4} - 0,191 \text{ m})\right)^2}$$

d'où  $n_3 = 4$

- Quatrième terrasse.

$$A_4 A'_4 = 2 \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - (l_{u_4} - 0,191 \text{ m})\right)^2}$$

d'où  $n_4 = 3$

Ainsi donc pour couvrir totalement le parabolique avec une nappe de lumière à énergie constante, il est nécessaire d'utiliser 14 héliostats de 1,5 m x 1,5 m disposés comme l'indique la figure C 12.

Nous sommes à même de pouvoir réaliser une comparaison entre le système à orienteur unique et celui utilisant le champ d'héliostats dans le cas d'un paraboloïde de 3,58 m de diamètre d'ouverture.

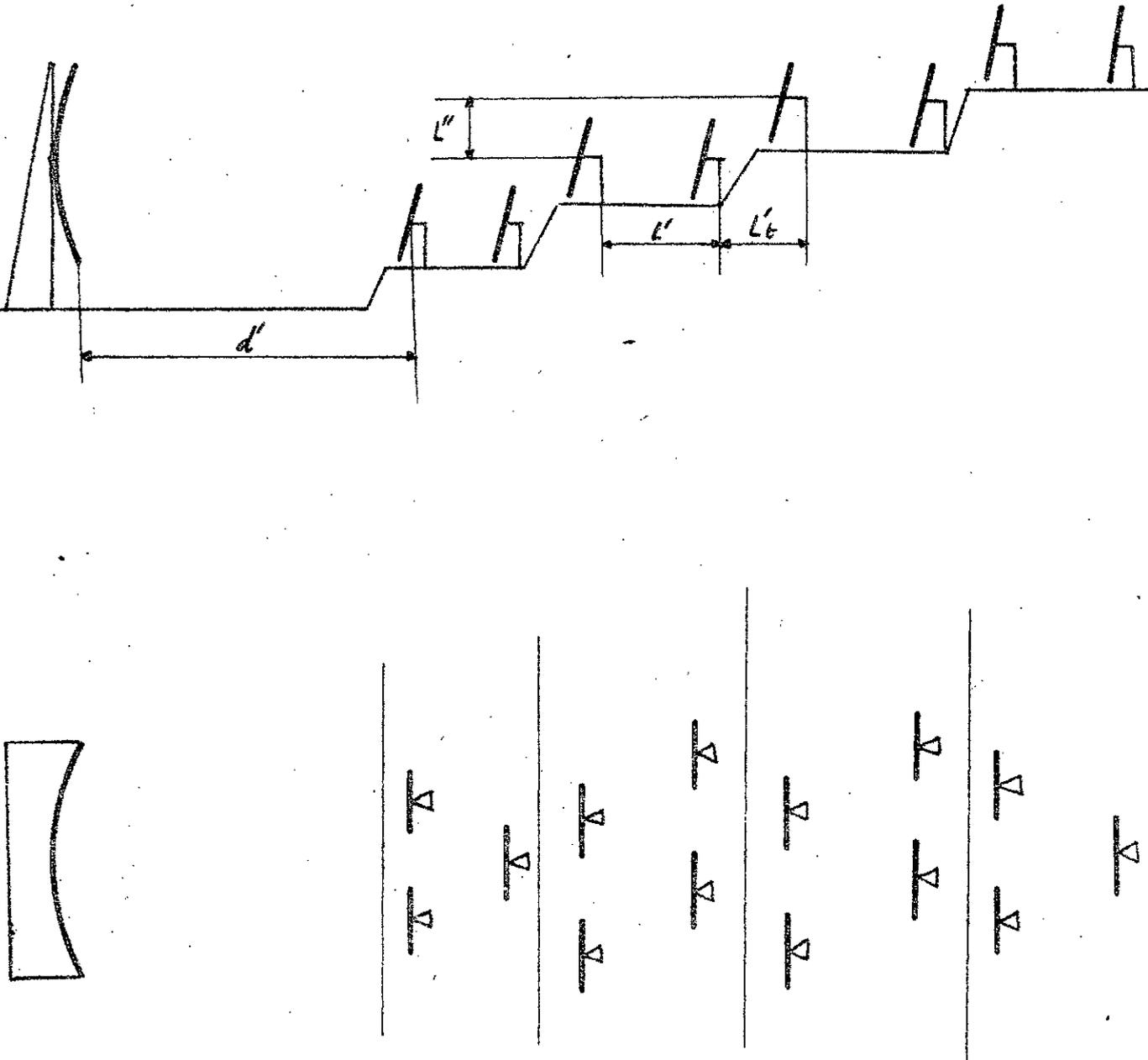


Fig. C12 - Disposition relative des heliostats.

	ORIENTEUR UNIQUE	CHAMP D'HELIOSTATS
SURFACE D'UN MIROIR	$(4,700\text{m})^2 = 22,09\text{m}^2$	$(1,500\text{m})^2 = 2,25\text{m}^2$
SURFACE TOTALE	$22,09 \text{ m}^2$	$14 \times 2,25\text{m}^2 = 31,50\text{m}^2$
NOMBRE DE FACETTES DE $0,25 \times 0,25\text{m}^2$	354	504
NOMBRE DE LUNETTES (VOIR TOME 2)	1	14
RESISTANCE AU VENT	grande	faible
NAPPE DE LUMIERE SUR LE CONCENTRATEUR	continue, parallèle	quelque discontinuité
MANIABILITE	simple	complexe
PRIX DE REVIENT AP- PROXIMATIF	l'installation du miroir unique est moins onéreuse que celle du champ d'héliostats (terrasses).	
REGLAGE DES FACETTES ALIGNEMENT OPTIQUE	sans grande difficulté.	

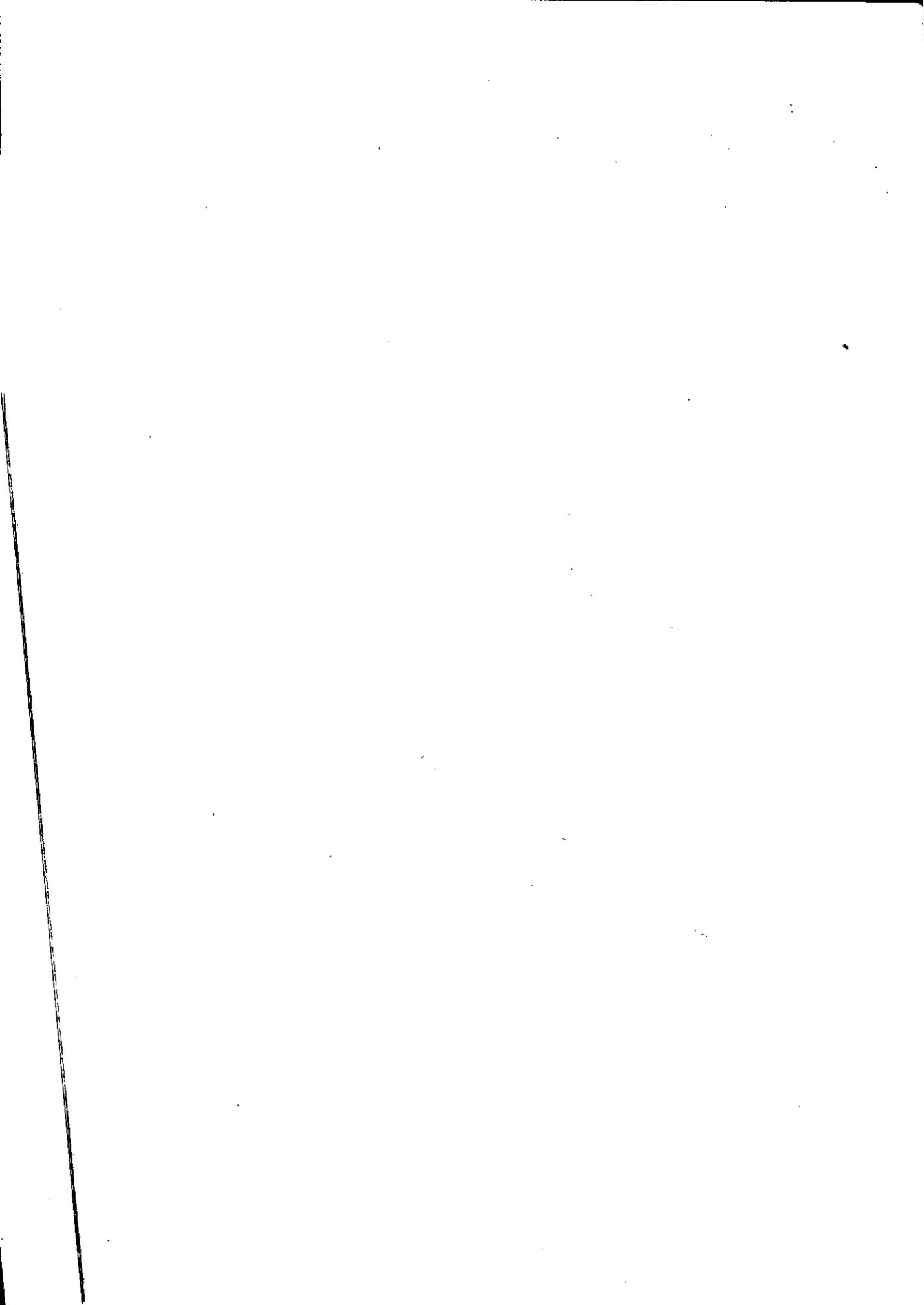
### II - 3 Conclusion.

Dans le cas du paraboloïde d'ouverture  $D = 3,58 \text{ m}$ , il n'est pas avantageux d'utiliser un champ d'héliostats de  $1,5 \times 1,5 \text{ m}$ , mais plutôt un héliostat unique de  $4,7 \text{ m}$  de côté.

B I B L I O G R A P H I E

---

- (1) - Ralph H. WIGHT J.  
Solar Sci. Eng. 1957
- (2) - Application thermique de l'énergie solaire dans le domaine de la recherche et de l'industrie (CNRS. 1958)
- (3) - E. LOH, P. DUWER, N.K. HIESTER and T.E. TIETZ  
Theoretical considerations on performance characteristics of solar furnaces.  
Astia. Document n° AD 81521 (AFOSR TN 5669 - 1956)
- (4) - M.H. CABLE  
Solar Energy April-July 1961
- (5) - Raymond BLISS  
Designing Solar Furnaces for specific performance  
Solar Energy - April - July 1957
- (6) - Paul D. JOSE  
Solar Energy - April - July 1957
- (7) - P. SEIMPERE  
Thèse soutenue à l'Université des sciences et techniques du Languedoc - Centre Universitaire de Perpignan le 26 janvier 1974.
- (8) - Alfred W. SIMON  
Solar Energy - April 1958
-



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Départements Electricité  
et Mécanique

2001

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية  
المكتبة  
THESE DE FIN D'ETUDES  
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHEQUE

**CONCEPTION D'UN FOUR  
SOLAIRE DE 10m<sup>2</sup>**

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية  
المكتبة  
TOME 3  
MECANIQUE ET ENERGETIQUE

9 PLANS

Jury :  
MM. ADANE                      Président  
  
BOUHADEF  
DAMERDJI                      Promoteurs  
EL GHANDOUR  
MOUKHINE

Etudié par :  
D. AZOUZ  
A. MANDI                      Elec.  
M. BENFARHAT  
M. SMATI                      G. Méca.  
A. YOUSFI



UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Départements Electricité  
et Mécanique

THESE DE FIN D'ETUDES

**CONCEPTION D'UN FOUR  
SOLAIRE DE 10m<sup>2</sup>**

TOME 3

MECANIQUE ET ENERGETIQUE

Jury :

MM. ADANE                      Président  
  
BOUHADEF  
DAMERDJI                      )  
EL GHANDOUR                 ) Promoteurs  
MOUKHINE

Etudié par :

D. AZOUZ  
A. MANDI                      } Elec.  
  
M. BENFARHAT  
M. SMATI                      } G. Méca.  
A. YOUSFI

Janvier 1977

III (C) IIII IE - IIIII -

MECANIQUE ET ENERGETIQUE

TABLE DES MATIERES  
-----

PREMIERE PARTIE : - LE CONCENTRATEUR  
-----

CHAPITRE I : CONCEPTION DU PARABOLOIDE REFLECTEUR.

- I.1 - Etude du dispositif focalisant.
- I.2 - Caractéristiques des tubes supports de glace.
- I.3 - Caractéristiques des semelles paraboliques.

CHAPITRE II : CALCUL DU BATI.

- II.1 - Calcul des efforts dans les barres.
- II.2 - Calcul des réactions.
- II.3 - Vérification des barres.

CHAPITRE III : ETUDE TECHNOLOGIQUE DU CONCENTRATEUR.

- III.1 - Fixation des glaces.
- III.2 - Réglage des miroirs du concentrateur.
- III.3 - Bati.
- III.4 - Montage du bati.

CHAPITRE IV : ENERGIE AU FOYER.

- IV.1 - Réflexions du rayonnement solaire.
- IV.2 - Position des glaces par rapport au foyer.

- IV.3 - Etude du disque solaire image dans le plan focal.
- IV.4 - Energie fournie par chaque glace.
- IV.5 - Energie totale au foyer.

CHAPITRE V : MESURES DES TEMPERATURES AU FOYER.

- V.1 - Causes des perturbations des mesures.
- V.2 - Principe de mesure des températures avec utilisation de filtre.
- V.3 - Principe de mesure des températures avec occultation du rayonnement solaire.
- V.4 - Description des instruments de mesures.
  - V.4.1 - Pyromètre à radiation monochromatique.
  - V.4.2 - Pyromètre à radiation monochromatique équipé d'un filtre interférentiel étalon.
  - V.4.3 - Pyromètre à radiation totale.

-----0°0°0-----

DEUXIEME PARTIE : - L'HELIOSTAT  
-----

CHAPITRE I : CONCEPTION DE L'HELIOSTAT.

- I.1 - Fixation des glaces.
- I.2 - Méthode d'alignement des glaces.
- I.3 - Le bati.

CHAPITRE II : ETUDE DU GROUPE MOTO-REDUCTEUR.

- II.1 - Evaluation de la puissance du moteur.
- II.2 - Choix du groupe moto-réducteur.

CHAPITRE III : EFFET DU VENT SUR L'HELIOSTAT.

III.1 - Description de la maquette.

III.2 - Méthodes de mesures.

III.3 - Résultats obtenus.

III.4 - Conclusion.

---0°0°---

CONCLUSION :  
=====

---0°0°---

BIBLIOGRAPHIE :  
=====

*PREMIERE PARTIE*

. LE CONCENTRATEUR

## // CHAPITRE I - CONCEPTION DU PARABOLOÏDE REFLECTEUR

---

### I.1 Etude du dispositif focalisant.

La réalisation d'une surface réfléchissante donnant un rayonnement convergent comporte des solutions variées.

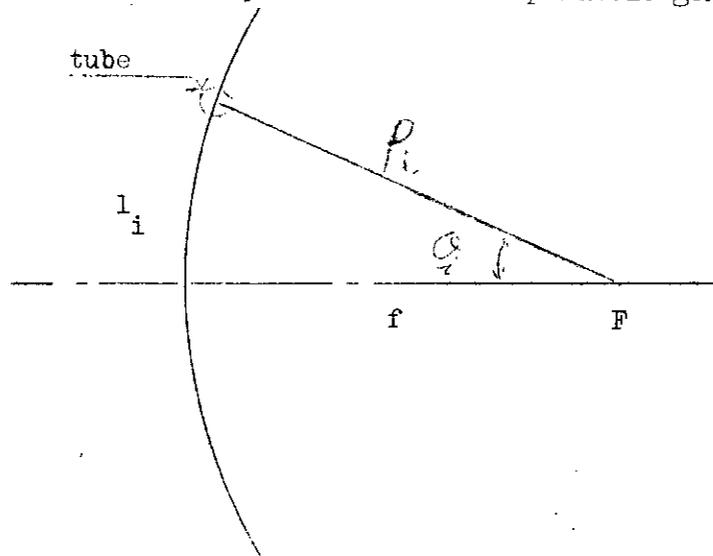
Lorsqu'il s'agit de très grandes surfaces, on est naturellement conduit à fragmenter cette surface en un grand nombre de glaces élémentaires planes ou concaves. L'emploi de glaces planes réglées individuellement implique, pour obtenir de très hautes températures, une fragmentation trop poussée du système réflecteur. L'emploi de surfaces courbes dont la concavité est réalisée par le travail optique est évidemment une solution valable mais extrêmement coûteuse. Toutefois, il nous est imposé d'utiliser des miroirs plans (250 x 250) mm et la solution que nous adopterons consistera à monter ces miroirs en bandes.

Ces miroirs reposeront sur des supports réglables fixés sur les tubes en formes de paraboles eux mêmes supportés par des poutres en treillis. on prendra le soin de laisser un intervalle de 4 mm entre chaque miroir pour faciliter leur fixation et aussi pour permettre le réglage (cf planche n°1).

Il existe aussi une autre technique de montage qui consiste à placer les miroirs sur les couronnes concentriques; Or cette disposition implique que les glaces doivent être coupées, on laisse donc de côté cette solution qui ne répond pas à nos conditions.

## I.2 Caractéristiques des tubes supports de glaces

Pour le calcul des tubes, on considère la parabole génératrice



Soit  $l_i$  la longueur de l'arc :  $l_i = n_i \times 0,25 + 4 \cdot n_i \cdot 10^{-3} + 0,127$   
 $n_i$  : nb de glaces

A partir de l'équation ;

$$l_i = 2 \cdot f \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\theta_i}{2}\right) \cdot \left(1 + \frac{1}{6} \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\theta_i}{2}\right)\right)$$

l'on déduit par résolution de l'équation

$$f \cdot \operatorname{tg}^3\left(\frac{\theta_i}{2}\right) + 6 \cdot f \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\theta_i}{2}\right) - 3 \cdot l_i = 0$$

On pose :  $\operatorname{tg}\left(\frac{\theta_i}{2}\right) = T$

$$f \cdot T^3 + 6 \cdot f \cdot T - 3 \cdot l_i = 0$$

On résoud cette dernière équation par itération de NEWTON

d'où  $\theta_i = 2 \cdot \operatorname{arctg}(T)$

et  $\rho_i = 2 \cdot f / (1 + \cos(\theta_i))$  (équation en coordonnées polaires de la parabole).

La distance focale de notre tube sera égale à :  $f_i = \rho_i$

La longueur développée du tube est calculée en fonction du nombre de glaces alignées sur celui-ci en tenant compte de l'intervalle de 4 mm laissé entre chaque glace.

$$L_i = N_i \cdot 0,25 + 4 (N_i - 1) \cdot 10^{-3}$$

On donnera également l'angle d'ouverture maximum  $\beta_{\max}$  et le diamètre d'ouverture D

$$D_i = 4 \cdot f_i \cdot \frac{1 - \cos(\beta_{\max})}{1 + \cos(\beta_{\max})}$$

Exemple de calcul :

Tube n°3 :  $f = 1,44$  ;  $n_3 = 2$  glaces

$$L_3 = 2 \cdot 0,25 + 4 \cdot 2 \cdot 10^{-3} + 0,127 = 0,635 \text{ m}$$

$$1,44 \cdot T^3 + 8,64 \cdot T - 1,905 = 0$$

Itération de NEWTON :

$$T_{n+1} = T_n - \frac{1,44 \cdot T_n^3 + 8,64 \cdot T_n - 1,905}{4,32 \cdot T_n^2 + 8,64}$$

Solution de l'équation :

$$T = 0,2186$$

d'où  $\Theta_3 = 2 \cdot \arctg(0,2186) = 24^\circ,66$

et  $\rho_3 = 2 \cdot f / (1 + \cos(\Theta_3)) = 2 \cdot 1,44 / (1 + \cos(24,66)) = 1,508 \text{ m}$

$$f_3 = \rho_3 = 1,508 \text{ m}$$

Longueur du tube

Sur le tube 3 on doit aligner 15 glaces

donc :

$$L_3 = 15 \cdot 0,250 + 4(15 - 1) = 3,806 \text{ m}$$

Avec la même méthode on détermine  $\beta_3 \text{ max}$

en prenant  $f_3 = 1,508 \text{ m}$

$$f_3 \cdot \text{tg}^3\left(\frac{\beta_3 \text{ max}}{2}\right) + 6 \cdot f_3 \cdot \text{tg}\left(\frac{\beta_3 \text{ max}}{2}\right) - 3 \cdot L_3/2 = 0$$

$$1,508 \cdot \text{tg}^3\left(\frac{\beta_3 \text{ max}}{2}\right) + 6 \cdot 1,508 \cdot \text{tg}\left(\frac{\beta_3 \text{ max}}{2}\right) - 3 \cdot 3,806/2 = 0$$

On pose :

$$\text{tg}\left(\frac{\beta_3 \text{ max}}{2}\right) = T$$

$$1,508 \cdot T^3 + 9,048 \cdot T - 5,709 = 0$$

d'après l'itération de NEWTON, la solution de l'équation sera :

$$T = 0,5974$$

d'où :

$$\beta_3 \text{ max} = 2 \cdot \text{arctg} \cdot 0,5974 = 61^\circ 56'$$

et le diamètre d'ouverture :

$$D_3 = 4 \cdot f_3 \sqrt{\frac{1 - \cos(\beta_3 \text{ max})}{1 + \cos(\beta_3 \text{ max})}}$$

$$D_3 = 3,593 \text{ m}$$

Les autres résultats des calculs des tubes sont donnés dans le tableau ci-dessous :

N°	$L_i$ m	$\Theta_i$	$\rho_i = f_{i m}$	$n_i$	$l_i$ m	$\beta_{max}$	$D_i$ m
1	0,127	5,04	1,443	15	3,806	63,570	3,576
2	0,381	15,02	1,465	15	3,806	62,889	3,583
3	0,635	24,66	1,508	15	3,806	61,568	3,593
4	0,889	33,8	1,573	15	3,806	59,666	3,608
5	1,143	42,3	1,656	13	3,298	51,238	3,176
6	1,397	50,14	1,755	11	2,790	42,386	2,722
7	1,651	57,2	1,868	9	2,282	33,489	2,248
8	1,905	63,7	1,995	7	1,774	24,871	1,759

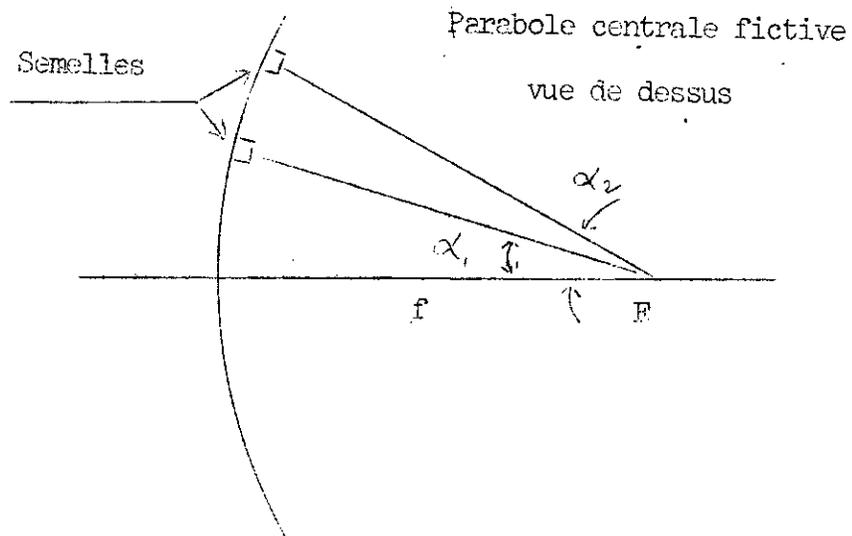
### I.3 Caractéristiques des semelles paraboliques

Les tubes sont fixés sur 4 semelles verticales (poutre U) de forme parabolique, leur paramètre se détermine de la même manière que pour les tubes.

On définit ces semelles par rapport à cette parabole fictive par un angle  $\alpha$  imposé par des considérations technologiques (cf chapitre III)

$$= 20^\circ$$

$$= 53^\circ$$



$$f_1 = 2 \cdot f / (1 + \cos(\alpha_1)) = 2 \cdot 1,44 / (1 + \cos 20) = 1,485 \text{ m}$$

$$f_2 = 2 \cdot 1,44 / (1 + \cos(53)) = 1,798 \text{ m}$$

Calcul des angles d'ouverture :

On procède de la même manière que pour les tubes.

1ère semelle :  $\alpha_1 = 20^\circ$

$$l_1 = 15 \cdot 0,25 + 14 \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 3,806 \text{ m}$$

$$f_1 \cdot \text{tg}^3\left(\frac{\theta_1}{2}\right) + 6 \cdot f_1 \cdot \text{tg}\left(\frac{\theta_1}{2}\right) - 3 \cdot l_1 / 2 = 0$$

on pose :  $\text{tg}\left(\frac{\theta_1}{2}\right) = T$

$$f_1 \cdot T^3 + 6 \cdot f_1 \cdot T - 3 \cdot l_1 / 2 = 0$$

$$1,485 \cdot T^3 + 6 \cdot 1,485 \cdot T - 3 \cdot 3,806 / 2 = 0$$

on résoud cette équation par la méthode de NEWTON

$$T_{n+1} = T_n - \frac{1,485.T_n^3 + 8,91.T_n - 5,709}{4,455.T_n^2 + 8,91}$$

solution de l'équation :  $T = 0,6040$  d'où  $\Theta_1 = 62,27^\circ$

Diamètre d'ouverture :

$$D = 4.f_1 \sqrt{\frac{1 + \cos(\Theta_1)}{1 + \cos(\Theta_2)}} \quad \text{d'où } D_1 = 3,59 \text{ m}$$

2ème semelle :  $\alpha = 53^\circ$

La deuxième semelle vient se fixer au niveau de la 2ème bande de glaces à partir de l'extrémité. Ce qui correspond à un angle de  $53^\circ$  par rapport à la parabole centrale fictive et à un nombre de glace égale à 9.

Donc la longueur développée de la parabole :

$$l = 9 \cdot 0,250 + 8 \cdot 4 \cdot 10^{-3}$$

$$l = 2,282 \text{ m}$$

connaissant  $l_2$  et  $f_2$  on en déduit  $\Theta_2 = 34,24^\circ$

et  $D = 2,22 \text{ m}$

CHAPITRE II :

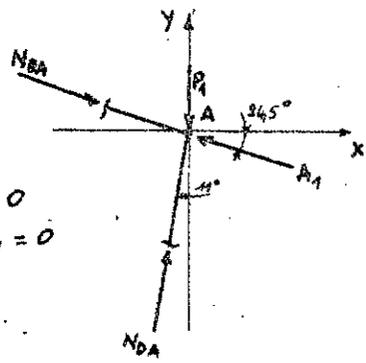
CALCUL DU BATI

1ère Console

1. Calcul des efforts dans les barres.

- Nœud A

P<sub>1</sub> = 30 daN  
A = 50 daN



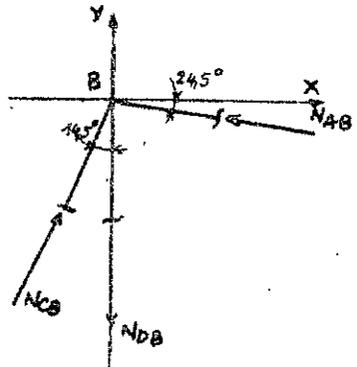
Σ X = NBA cos 24,5° + NDA sin 11° - A<sub>1</sub> cos 24,5° = 0  
Σ Y = -NBA sin 24,5° + NDA cos 11° + A<sub>1</sub> sin 24,5° - P<sub>1</sub> = 0

NBA cos 24,5° + NDA sin 11° = 45,5  
-NBA sin 24,5° + NDA cos 11° = 9,3

N<sub>DA</sub> = 28 daN      N<sub>BA</sub> = 44 daN

- Nœud B

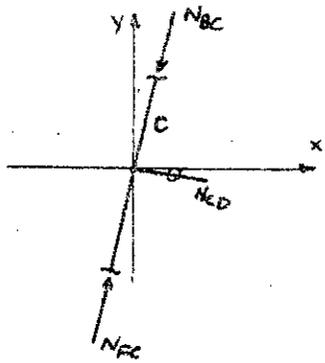
Σ X = NCB sin 14,5° - NAB cos 24,5° = 0  
Σ Y = NCB cos 14,5° + NAB sin 24,5° - NDB = 0



N<sub>CB</sub> = (N<sub>AB</sub> cos 24,5°) / sin 14,5°  
N<sub>DB</sub> = 180 cos 14,5° + 44 sin 24,5°  
N<sub>CB</sub> = 160 daN      N<sub>DB</sub> = 173 daN

- Nœud C

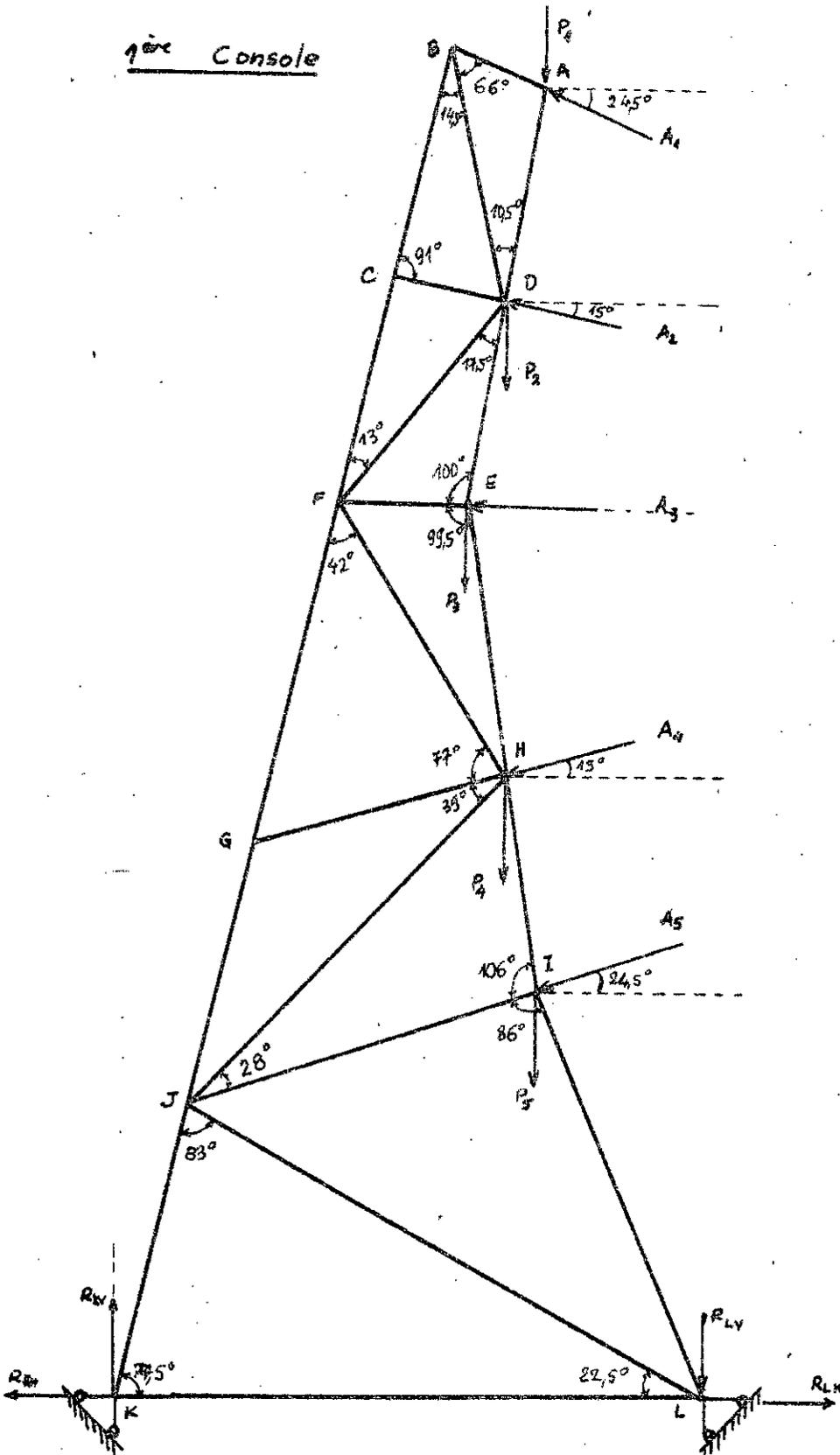
N<sub>CD</sub> = 0  
|N<sub>BC</sub>| = |N<sub>CB</sub>| = 160 daN



- Nœud D

N<sub>AD</sub> = 28 daN      N<sub>BD</sub> = 173 daN  
A<sub>2</sub> = 50 daN      P<sub>2</sub> = 30 daN

90° Console



$$\Sigma X = N_{FD} \sin 28^\circ + N_{ED} \sin 10,5^\circ - A_2 \cos 15^\circ - N_{AD} \sin 19,5^\circ = 0$$

$$\Sigma Y = N_{FD} \cos 28^\circ + N_{ED} \cos 10,5^\circ - P_2 + A_2 \sin 15^\circ - N_{AD} \cos 19,5^\circ + N_{BD} = 0$$

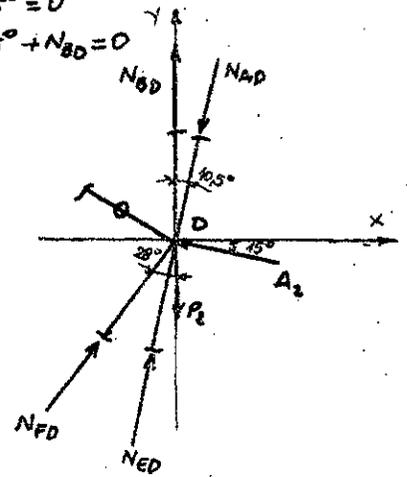
$$N_{FD} \sin 28^\circ + N_{ED} \sin 10,5^\circ = 53,4$$

$$N_{FD} \cos 28^\circ + N_{ED} \cos 10,5^\circ = -128,4$$

$$N_{ED} = \frac{53,4 \cdot \cos 28^\circ + 128,4 \cdot \sin 28^\circ}{\sin 10,5^\circ \cdot \cos 28^\circ - \cos 10,5^\circ \cdot \sin 28^\circ}$$

$$N_{FD} = \frac{-128,4 + N_{ED} \cos 19,5^\circ}{\cos 28^\circ}$$

$$N_{ED} = -357 \text{ dan} \quad N_{FD} = 252 \text{ dan}$$



- Node E.

$$N_{DE} = 357 \text{ dan} \quad P_3 = 30 \text{ dan} \quad A_3 = 50 \text{ dan}$$

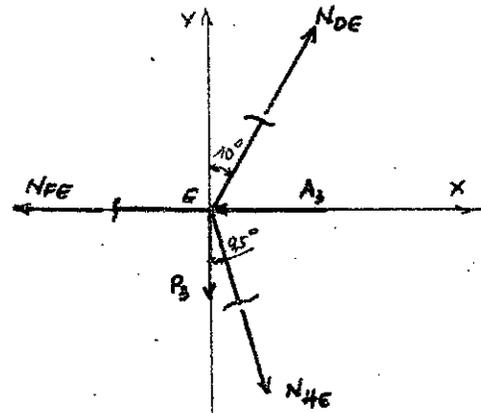
$$\Sigma X = N_{DE} \sin 10^\circ - A_3 - N_{FE} + N_{HE} \sin 9,5^\circ = 0$$

$$\Sigma Y = N_{DE} \cos 10^\circ - N_{HE} \cos 9,5^\circ - P_3 = 0$$

$$N_{HE} = N_{DE} \cos 10^\circ - P_3 = 357 \cos 10^\circ - 30$$

$$N_{FE} = N_{HE} \sin 9,5^\circ + 12$$

$$N_{HE} = 322 \text{ dan} \quad N_{FE} = 65 \text{ dan}$$



- Node F.

$$N_{CF} = 160 \text{ dan} \quad N_{DF} = 262 \text{ dan} \quad N_{EF} = 65 \text{ dan}$$

$$\Sigma X = N_{GF} \sin 14,5^\circ + N_{HF} \sin 27,5^\circ + N_{EF} - N_{DF} \cos 62,5^\circ - N_{CF} \sin 14,5^\circ = 0$$

$$\Sigma Y = N_{GF} \cos 14,5^\circ - N_{HF} \cos 27,5^\circ - N_{DF} \sin 62,5^\circ - N_{CF} \cos 14,5^\circ = 0$$

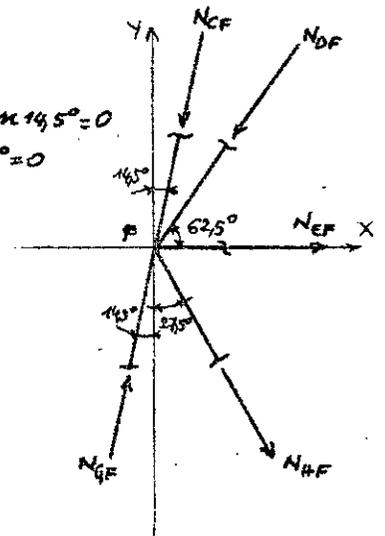
$$N_{GF} \sin 14,5^\circ + N_{HF} \sin 27,5^\circ = 91,4$$

$$N_{GF} \cos 14,5^\circ - N_{HF} \cos 27,5^\circ = 378,4$$

$$N_{GF} = \frac{91,4 \cos 27,5^\circ + 378,4 \cdot \sin 27,5^\circ}{\sin 14,5^\circ \cdot \cos 27,5^\circ + \cos 14,5^\circ \cdot \sin 27,5^\circ}$$

$$N_{HF} = \frac{91,4 - 383 \cdot \sin 14,5^\circ}{\sin 27,5^\circ}$$

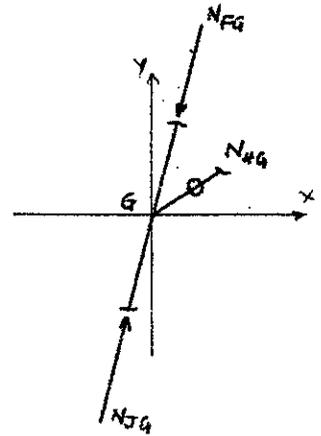
$$N_{GF} = 382 \text{ dan} \quad N_{HF} = -9,3 \text{ dan}$$



- Nœud G.

$$N_{G6} = N_{J6} = 382 \text{ daN}$$

$$N_{H6} = 0 \text{ daN}$$



- Nœud H.

$$N_{FH} = 322 \text{ daN} \quad N_{EH} = 9,3 \text{ daN}$$

$$N_{GH} = 0 \quad P_4 = 30 \text{ daN} \quad A_4 = 50 \text{ daN}$$

$$\Sigma X = N_{JH} \sin 36^\circ + N_{IH} \sin 10^\circ - A_4 \cos 15^\circ - N_{EH} \sin 10^\circ + N_{FH} \sin 18^\circ = 0$$

$$\Sigma Y = N_{JH} \cos 36^\circ - N_{IH} \cos 10^\circ - A_4 \sin 15^\circ + N_{EH} \cos 10^\circ - N_{FH} \cos 18^\circ - P_4 = 0$$

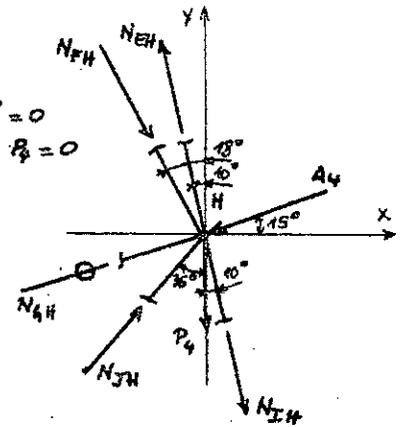
$$N_{JH} \sin 36^\circ + N_{IH} \sin 10^\circ = 101$$

$$N_{JH} \cos 36^\circ - N_{IH} \cos 10^\circ = -265$$

$$N_{JH} = \frac{101 \cos 10^\circ - 265 \sin 10^\circ}{\sin 36^\circ \cos 10^\circ + \cos 36^\circ \sin 10^\circ}$$

$$N_{IH} = \frac{101 - N_{JH} \sin 36^\circ}{\sin 10^\circ}$$

$$N_{JH} = 74,3 \text{ daN} \quad N_{IH} = 330 \text{ daN}$$



- Nœud I.

$$\Sigma X = -N_{JI} \cos 24,5^\circ + N_{LI} \cos 69,5^\circ - A_5 \cos 24,5^\circ - N_{HI} \sin 8,5^\circ = 0$$

$$\Sigma Y = -N_{JI} \sin 24,5^\circ - N_{LI} \sin 69,5^\circ - A_5 \sin 24,5^\circ + N_{HI} \cos 8,5^\circ - P_5 = 0$$

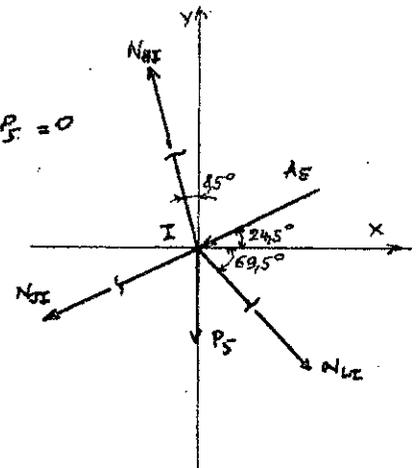
$$-N_{JI} \cos 24,5^\circ + N_{LI} \cos 69,5^\circ = 94,3$$

$$N_{JI} \sin 24,5^\circ + N_{LI} \sin 69,5^\circ = 275,6$$

$$N_{LI} = \frac{94,3 \sin 24,5^\circ + 275,6 \cos 24,5^\circ}{\cos 69,5^\circ \sin 24,5^\circ + \sin 69,5^\circ \cos 24,5^\circ}$$

$$N_{JI} = \frac{275,6 - N_{LI} \sin 69,5^\circ}{\sin 24,5^\circ}$$

$$N_{LI} = 290,6 \text{ daN} \quad N_{JI} = 8 \text{ daN}$$



- Nœud J

$$\sum X = N_{KJ} \sin 14,5^\circ - N_{LJ} \sin 68,5^\circ + N_{IJ} \cos 25,5^\circ - N_{HJ} \sin 36,5^\circ - N_{GJ} \sin 14,5^\circ = 0$$

$$\sum Y = N_{KJ} \cos 14,5^\circ + N_{LJ} \cos 68,5^\circ + N_{IJ} \sin 25,5^\circ - N_{HJ} \cos 36,5^\circ - N_{GJ} \cos 14,5^\circ = 0$$

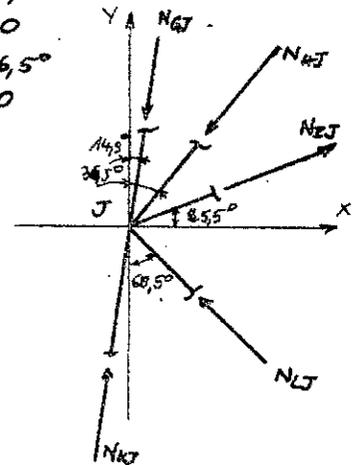
$$N_{KJ} \sin 14,5^\circ - N_{LJ} \sin 68,5^\circ = 132,6$$

$$N_{KJ} \cos 14,5^\circ + N_{LJ} \cos 68,5^\circ = 426,3$$

$$N_{KJ} = \frac{132,6 \cos 68,5^\circ + 426,3 \sin 68,5^\circ}{\sin 14,5^\circ \cos 68,5^\circ + \cos 14,5^\circ \sin 68,5^\circ}$$

$$N_{LJ} = \frac{426,3 - N_{KJ} \cos 14,5^\circ}{\cos 68,5^\circ}$$

$$N_{KJ} = 440,6 \text{ daN} \quad N_{LJ} = -22 \text{ daN}$$

2. Calcul des réactions d'appuis

Les réactions verticales sont obtenues à l'aide des équations de la statique.

Les réactions horizontales sont calculées par la méthode déduite du théorème de Castigliano et qui consiste à chercher la force  $x$  qu'il faudrait appliquer au point  $u$  pour que le déplacement de ce même point soit nul sous l'action simultanée des charges extérieures et de cette force  $x$ .

2.1. Réactions verticales.

$$\sum M_K = A (457 \cos 24,5^\circ + 372,5 \cos 15^\circ + 288 + 202,5 \cos 15^\circ + 119 \cos 24,5^\circ) - P(2 \times 132,5 + 2 \times 117,5 + 102,5) - 180 R_{LV} = 0$$

$$R_{LV} = 279,5 \text{ daN}$$

$$\sum M_L = A (457 \cos 24,5^\circ + 372,5 \cos 15^\circ + 288 + 202,5 \cos 15^\circ + 119 \cos 24,5^\circ) + P(2 \times 47,5 + 2 \times 62,5 + 77,5) - 180 R_{KV} = 0$$

$$R_{KV} = 420,5 \text{ daN}$$

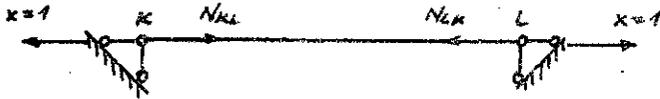
2.2 Réactions horizontales

l'effort  $x$  étant déterminé, l'effort normal dans la barre (i) est:

$$N_i = \bar{N}_i + \pi_i x$$

$$x = \left( \sum_i \frac{N_i \pi_i}{S_i} \ell_i \right) / \left( \sum_i \frac{\pi_i^2 \ell_i}{S_i} \right)$$

- Calcul de  $\pi_i$



La force horizontale appliquée en K n'influe que sur la barre horizontale d'où :

$$N_{KL} = 1$$

- Calcul de  $R_{LH}$

$$\bar{R}_{LH} = \sum (\text{actions extérieures horizontales})$$

$$\bar{R}_{LH} = A (2 \cos 14,5^\circ + 2 \cos 15^\circ + 1) = 50 (1 + 2 \cos 15^\circ + 2 \cos 24,5^\circ)$$

$$\bar{R}_{LH} = 237,6 \text{ dan}$$

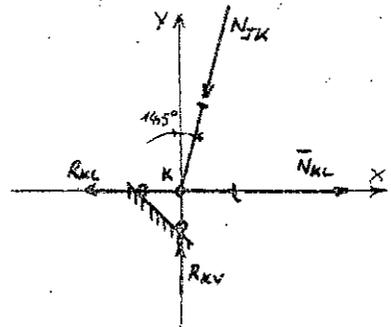
- Calcul de  $\bar{N}_{JK}$

$$\sum Y = R_{KV} - N_{JK} \cos 14,5^\circ = 0$$

$$N_{JK} = \frac{R_{KV}}{\cos 14,5^\circ} = \frac{429,5}{\cos 14,5^\circ} = 448,6 \text{ dan}$$

$$\text{d'où } \bar{N}_{KL} = N_{JK} \sin 14,5^\circ = 448,6 \sin 14,5^\circ$$

$$\bar{N}_{KL} = 111,1 \text{ dan}$$



Pour la barre KL,  $i = 1$  ;

$$n = 1 \quad n^2 \ell / S = \ell / S \quad \bar{N} = 111,1 \quad n \bar{N} \ell / S = 111,1 \ell / S$$

donc  $x = 111,1 \text{ dan}$

et par conséquent  $R_{KH} = x = 111,1 \text{ dan}$

$$\text{et } R_{LH} = x + \bar{R}_{LH} = 111,1 + 237,6 \Rightarrow R_{LH} = 348,7 \text{ dan}$$

d'où l'effort dans la barre KL :

$$N_{KL} = \bar{N}_{KL} + n x = 111,1 + 1 \times 111,1 = 222,2 \text{ dan}$$

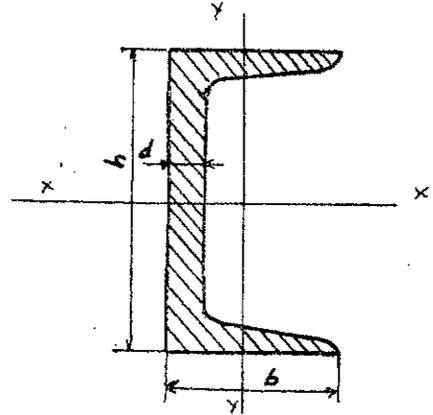
### 3. Calculs de vérification des barres.

La section des barres, et leur profils sont choisis par mesure constructive ou que les efforts calculés ne sont guère importants. Il sera quant même nécessaire de vérifier la sécurité de chacune de ces barres. Les flexions locales seront négligées. Par contre, on tiendra compte de la traction, de la compression et du flambement.

#### 3.1 Caractéristiques des poutres

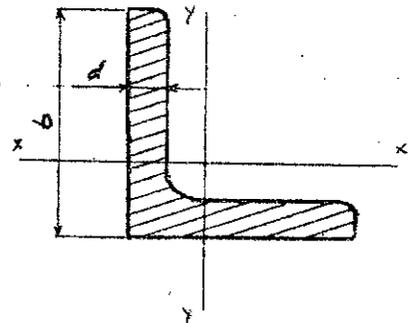
##### 3.1.1 Semelles (poutres en U)

$$\begin{aligned} h &= 50 \text{ mm} \\ b &= 32 \text{ mm} \\ I_x &= 22,8 \text{ cm}^4 \\ I_y &= 5,61 \text{ cm}^4 \\ i_x &= 1,92 \text{ cm} \\ i_y &= 0,954 \text{ cm} \\ A &= 6,16 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$



##### 3.1.2 Treillis (poutres en L)

$$\begin{aligned} b &= 26 \text{ mm} \\ d &= 3 \text{ mm} \\ I_x &= 2,56 \text{ cm}^4 \\ i_x &= 1,10 \text{ cm} \\ A &= 2,10 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$



#### 3.2 Méthode de vérification.

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_t &= 2400 \text{ daN/cm}^2 \\ \bar{\sigma}_{\text{comp}} &= 1600 \text{ daN/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Coefficient de sécurité } n = \frac{\bar{\sigma}_t}{\bar{\sigma}_{\text{comp}}} = 1,5$$

Poutres soumises à la traction :

$$\frac{N}{A} \leq \bar{\sigma}_t$$

Poutres soumises à la compression : Flambement.

$$\sigma = \frac{N}{A} \leq \bar{\sigma}_{\text{comp}} \quad \text{et} \quad \sigma = \frac{N}{A} \leq \frac{1}{k} \bar{\sigma}_{\text{comp}} = \varphi \bar{\sigma}_{\text{comp}}$$

$$\text{avec } \varphi = \frac{\bar{\sigma}_{\text{t}}}{\bar{\sigma}_{\text{comp}}} = f(\lambda) \quad (\text{voir tableau } \varphi = f(\lambda))$$

Exemple de calcul

Poutre JK

$$N_{JK} = 448,6 \text{ daN}$$

$$\frac{N}{A} = \frac{448,6}{6,16} = 72 \text{ daN/cm}^2 < 1600 \text{ daN/cm}^2$$

$$\lambda = \frac{L_e}{L_{\text{limi}}} = \frac{65}{0,954} = 68$$

D'après le tableau  $\varphi = f(\lambda)$  on détermine  $\varphi$  :

$$\lambda = 60 \rightarrow \varphi = 0,79$$

$$\lambda = 70 \rightarrow \varphi = 0,72$$

$$\lambda = 68 \rightarrow \varphi = 0,72 + 0,007 \times 2 = 0,734$$

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{448,6}{6,16} = 72 < \varphi \bar{\sigma}_{\text{comp}} = 0,734 \times 1600 = 1174 \text{ daN/cm}^2$$

Le reste des résultats pour les différentes bases sera résumé dans des tableaux.

$\lambda$	$\varphi$
0	1,00
10	0,97
20	0,95
30	0,91
40	0,87
50	0,83
60	0,79
70	0,72
80	0,65
90	0,55

$\lambda$	$\varphi$
100	0,43
110	0,35
120	0,30
130	0,26
140	0,23
150	0,21
160	0,19
170	0,17
180	0,15
190	0,14
200	0,13

### 3.3 Résultats obtenus pour la 1<sup>ère</sup> console.

#### 3.3.1 Vérification à la traction

$$\bar{\sigma}_t = 2400 \text{ daN/cm}^2 \quad \text{coefficient de sécurité } n = 1,5 \quad ; \quad \bar{\sigma}_{\text{cr}} = 1600 \text{ daN/cm}^2$$

Poutres	BD	ED	FE	KL	HE	IH	IJ	LI	LJ
N daN	173	357	66	111	322	330	8	290,6	22
A cm <sup>2</sup>	2,10	6,16	2,10	2,10	6,16	6,16	2,10	6,16	2,10
$\sigma = N/A$ daN/cm <sup>2</sup>	82	58	31	53	52	53	4	47	11

#### 3.3.2 Vérification à la compression : Flambement

$$\bar{\sigma}_{\text{comp}} = 1600 \text{ daN/cm}^2$$

Poutres	BA	DA	CB	FC	FD	GF	HF	JG	JH	KJ	CD	GH
N daN	44	28	160	160	250	382	9,3	382	743	4486	0	0
A cm <sup>2</sup>	2,10	6,16	6,16	6,16	2,10	6,16	2,10	6,16	2,10	6,16	2,10	2,10
$l_f$ cm	165	85	87,5	93	95	105,5	84,5	125	173	65		
$i_{\text{min}}$ cm	1,10	0,954	0,954	0,854	1,10	0,984	1,10	0,954	1,10	0,954		
$\lambda$	15	89	92	98	86	96	86	134	157	68		
$\phi$	0,960	0,880	0,826	0,454	0,580	0,478	0,580	0,257	0,199	0,794		
$\bar{\sigma}_c = \frac{N}{A \phi}$ daN/cm <sup>2</sup>	1536	896	842	726	944	765	944	411	378	1174		
$\sigma = \frac{N}{A}$ daN/cm <sup>2</sup>	21	5	26	26	120	62	5	62	35	73		

## 2<sup>ème</sup> Console

### 1. Calcul des efforts dans les barres.

#### - Nœud A

$$A_1 = 50 \text{ daN}$$

$$P_1 = 30 \text{ daN}$$

$$\sum X = N_{BA} \cos 15^\circ + N_{DA} \sin 5^\circ - A_1 \cos 15^\circ = 0$$

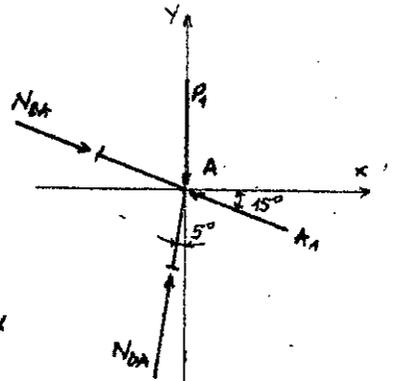
$$\sum Y = -N_{BA} \sin 15^\circ + N_{DA} \cos 5^\circ + A_1 \sin 15^\circ - P_1 = 0$$

$$N_{BA} \cos 15^\circ + N_{DA} \sin 5^\circ = 48,29$$

$$-N_{BA} \sin 15^\circ + N_{DA} \cos 5^\circ = 17$$

$$N_{DA} = \frac{48,29 \sin 15^\circ + 17 \cos 15^\circ}{\sin 5^\circ \cdot \sin 15^\circ + \cos 5^\circ \cdot \cos 15^\circ} = 29,36 \text{ daN}$$

$$N_{BA} = \frac{-N_{DA} \sin 5^\circ + 48,29}{\cos 15^\circ} = 47,34 \text{ daN}$$



#### - Nœud B

$$\sum X = N_{DB} \sin 22^\circ + N_{CB} \sin 13^\circ - N_{AB} \cos 15^\circ = 0$$

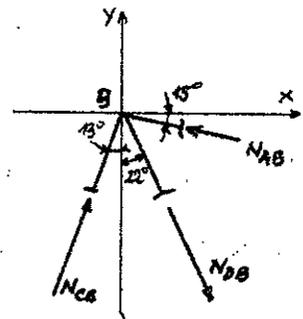
$$\sum Y = -N_{DB} \cos 22^\circ + N_{CB} \cos 13^\circ + N_{AB} \sin 15^\circ = 0$$

$$N_{DB} \sin 22^\circ + N_{CB} \sin 13^\circ = 45,73$$

$$-N_{DB} \cos 22^\circ + N_{CB} \cos 13^\circ = -12,25$$

$$N_{CB} = \frac{45,73 \cos 22^\circ - 12,25 \sin 22^\circ}{\sin 13^\circ \cos 22^\circ + \cos 13^\circ \cdot \sin 22^\circ} = 65,92 \text{ daN}$$

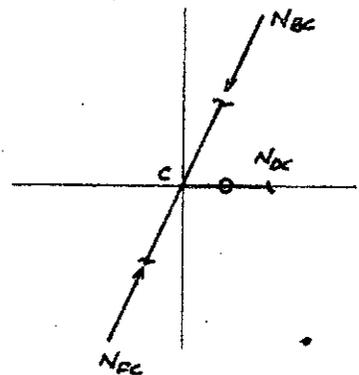
$$N_{DB} = \frac{45,73 - N_{CB} \sin 13^\circ}{\sin 22^\circ} = 82,49 \text{ daN}$$



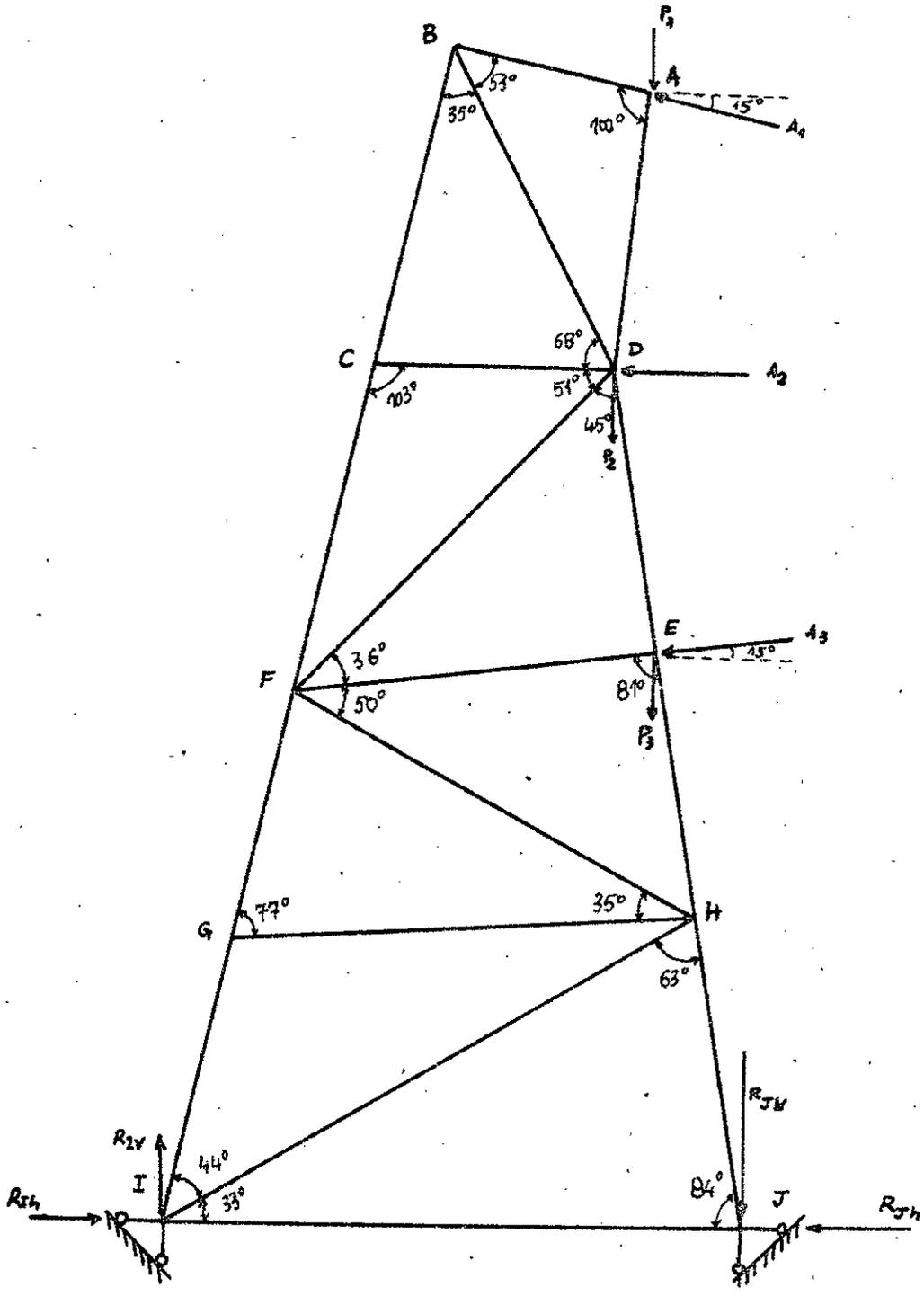
#### - Nœud C

$$N_{FC} = N_{BC} = 65,92 \text{ daN}$$

$$N_{OC} = 0 \text{ daN}$$



2iame Console



- Node D.

$$A_2 = 50 \text{ daN} \quad N_{DB} = 82,49 \text{ daN}$$

$$P_2 = 30 \text{ daN} \quad N_{DA} = 29,36 \text{ daN}$$

$$\sum X = N_{FD} \cos 51^\circ + N_{DE} \sin 6^\circ - A_2 - N_{DA} \cos 85^\circ - N_{DB} \cos 68^\circ = 0$$

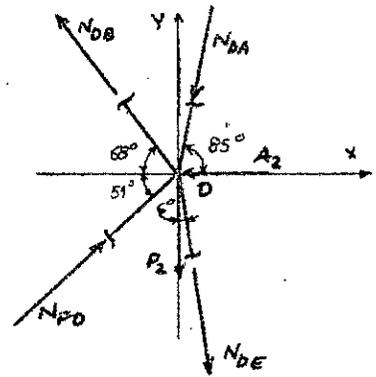
$$\sum Y = N_{FD} \sin 51^\circ - N_{DE} \cos 6^\circ - P_2 - N_{DA} \sin 85^\circ + N_{DB} \sin 68^\circ = 0$$

$$N_{FD} \cos 51^\circ + N_{DE} \sin 6^\circ = 83,46$$

$$N_{FD} \sin 51^\circ - N_{DE} \cos 6^\circ = -17,24$$

$$N_{FD} = \frac{83,46 \cos 6^\circ - (-17,24) \sin 6^\circ}{\sin 6^\circ \sin 51^\circ + \cos 6^\circ \cos 51^\circ} = 114,84 \text{ daN}$$

$$N_{DE} = \frac{-114,84 \cos 51^\circ + 83,46}{\sin 6^\circ} = 107,07 \text{ daN}$$



- Node E.

$$\sum X = -N_{FE} \cos 15^\circ + N_{HE} \sin 6^\circ - A_3 \cos 15^\circ - N_{DE} \sin 6^\circ = 0$$

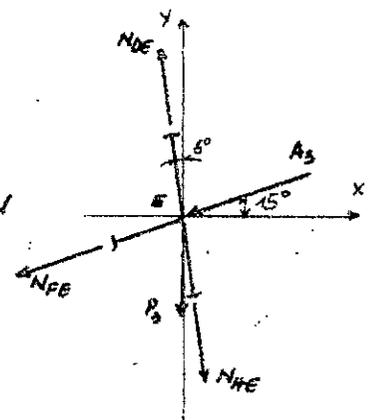
$$\sum Y = -N_{FE} \sin 15^\circ - N_{HE} \cos 6^\circ - P_3 - A_3 \sin 15^\circ + N_{DE} \cos 6^\circ = 0$$

$$N_{HE} \sin 6^\circ - N_{FE} \cos 15^\circ = 59,49$$

$$N_{FE} \cos 6^\circ + N_{HE} \sin 15^\circ = 63,54$$

$$N_{HE} = \frac{59,49 \sin 15^\circ + 63,54 \cos 15^\circ}{\sin 6^\circ \sin 15^\circ + \cos 6^\circ \cos 15^\circ} = 77,73 \text{ daN}$$

$$N_{FE} = \frac{N_{HE} \sin 6^\circ - 59,49}{\cos 15^\circ} = -53,18 \text{ daN}$$



- Node F

$$\sum X = N_{GF} \sin 13^\circ - N_{HF} \sin 55^\circ - N_{EF} \cos 15^\circ - N_{DF} \sin 39^\circ - N_{CF} \sin 13^\circ = 0$$

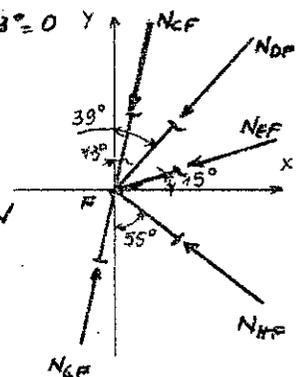
$$\sum Y = N_{GF} \cos 13^\circ + N_{HF} \cos 55^\circ - N_{EF} \sin 15^\circ - N_{DF} \cos 39^\circ - N_{CF} \cos 13^\circ = 0$$

$$N_{GF} \sin 13^\circ - N_{HF} \sin 55^\circ = 138,47$$

$$N_{GF} \cos 13^\circ + N_{HF} \cos 55^\circ = 167,24$$

$$N_{GF} = \frac{138,47 \cos 65^\circ + 167,24 \sin 55^\circ}{\sin 13^\circ \cos 55^\circ + \cos 13^\circ \sin 55^\circ} = 233,42 \text{ daN}$$

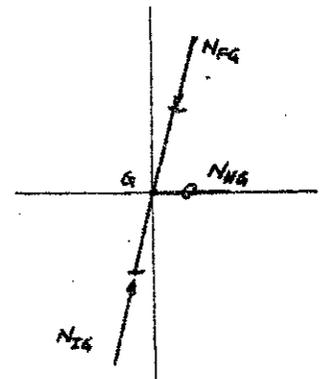
$$N_{HF} = \frac{167,24 - 233,42 \cos 13^\circ}{\cos 55^\circ} = -104,95 \text{ daN}$$



- Nœud G.

$$N_{FG} = N_{IG} = 233,42 \text{ daN}$$

$$N_{HG} = 0 \text{ daN}$$



- Nœud H.

$$N_{FH} = 104,95 \text{ daN}$$

$$N_{EH} = 77,73 \text{ daN}$$

$$\sum X = N_{JH} \sin 6^\circ - N_{IH} \cos 33^\circ - N_{FH} \cos 35^\circ - N_{EH} \sin 6^\circ = 0$$

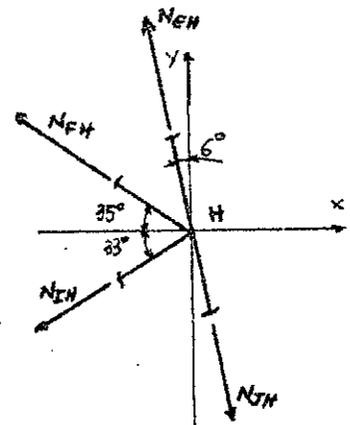
$$\sum Y = -N_{JH} \cos 6^\circ - N_{IH} \sin 33^\circ + N_{FH} \sin 35^\circ + N_{EH} \cos 6^\circ = 0$$

$$N_{JH} \sin 6^\circ - N_{IH} \cos 33^\circ = 94,10$$

$$N_{JH} \cos 6^\circ + N_{IH} \sin 33^\circ = 137,50$$

$$N_{JH} = \frac{137,50 \cos 33^\circ + 94,10 \sin 33^\circ}{\sin 6^\circ \sin 33^\circ + \cos 6^\circ \cos 33^\circ} = 186,94 \text{ daN}$$

$$N_{IH} = \frac{137,50 - 186,94 \cos 6^\circ}{\sin 33^\circ} = -88,89 \text{ daN}$$



## 2. Calcul des réactions.

### 2.1 Réactions verticales

$$\sum M(I) = R_{JY} \times 1670 + P(2 \times 1450 + 1360) - 3735 A_1 \cos 15^\circ - A_2 \times 2880 - A_3 (\cos 15^\circ) \times 2030 = 0$$

$$R_{JY} = \frac{50 (3735 \cos 15^\circ + 2880 + 2030 \cos 15^\circ) - 30 (2900 + 1360)}{1670}$$

$$R_{JY} = 176,42 \text{ daN}$$

$$\sum M(J) = 0 \text{ d'où}$$

$$R_{2Y} = \frac{30 (2 \times 220 + 310) + 50 (3735 \cos 15^\circ + 2880 + 2030 \cos 15^\circ)}{1670}$$

$$R_{2Y} = 266,42 \text{ daN}$$

## 2.2 Réactions horizontales.

- Nœud J.

$$N_{HJ} = \frac{176,42}{\cos 6^\circ} = 177,39 \text{ daN}$$

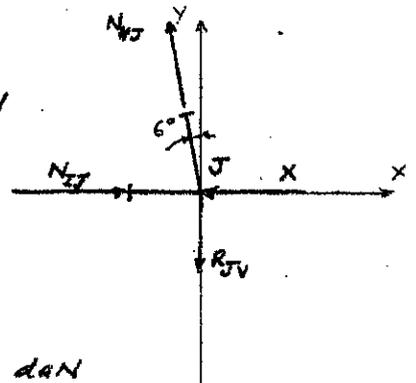
$$\bar{N}_{HJ} = N_{HJ} \sin 6^\circ = 177,39 \sin 6^\circ = 18,54 \text{ daN}$$

$$\bar{R}_{ZH} = A(\cos 15^\circ + 1 + \cos 15^\circ) = 50(2\cos 15^\circ + 1)$$

$$\bar{R}_{ZH} = 146,59 \text{ daN}$$

$$X = R_{JH} = 18,54 \text{ daN}$$

$$R_{ZH} = \bar{R}_{ZH} + X = 146,59 + 18,57 = 165 \text{ daN}$$



## 3. Vérification des barres.

### 3.1 Traction

$$\bar{\sigma}_c = 2400 \text{ daN/cm}^2$$

$$n = 1,5$$

$$\bar{\sigma}_{tra} = 1600 \text{ daN/cm}^2$$

Poutres	DB	DE	HE	HF	HJ	CD	GH
N daN	82,49	107	77,73	104,95	187	0	0
A cm <sup>2</sup>	2,10	6,16	6,16	2,10	6,16	2,10	2,10
$\sigma = N/A$ daN/cm <sup>2</sup>	39	17	13	50	30		

3.2 Vérification à la compression, flambement

$$\bar{\sigma}_{\text{comp}} = 1600 \text{ daN/cm}^2$$

Poutres	BA	DA	CB	FC	FD	FE	F9	I9	IH	IJ
N daN	4734	2936	6592	6592	11484	53	23342	23342	88,9	37
A cm <sup>2</sup>	2,10	6,16	6,16	6,16	2,10	2,10	6,16	6,16	2,10	6,16
l <sub>f</sub> cm	48	86	109,5	115	145	104	20,5	103	185	165
i <sub>min</sub> cm	1,10	0,954	0,954	0,954	1,10	1,10	0,954	0,954	1,10	0,954
λ	44	90	105	121	132	95	84	108	168	173
φ	0,854	0,550	0,390	0,296	0,254	0,490	0,610	0,366	0,174	0,154
$\bar{\sigma}_R = \phi \bar{\sigma}_{\text{comp}}$ daN/cm <sup>2</sup>	1366	880	624	474	406	784	976	586	278	262
σ = N/A daN/cm <sup>2</sup>	23	5	11	11	55	25	38	38	42	6

Remarque : Vu la différence entre les contraintes admissibles et les contraintes appliquées aux bases, la stabilité de notre système est nettement vérifiée.

## /// CHAPITRE III - ETUDE TECHNOLOGIQUE DU CONCENTRATEUR

---

Le paraboloïde est constitué de 16 tubes paraboliques horizontaux fixés sur 4 poutres paraboliques verticales elles-mêmes soutenues par 4 consoles constituant le bâti.

### III.1 Fixation des glaces sur les tubes (planche n°1).

Les glaces sont posées sur des plaques de tôle et fixées par des agrafes en fil d'acier (45.S.8) pour minimiser les effets d'ombres (diminution de la surface réfléchissante) et faciliter un éventuel remplacement en cas de défectuosité de l'une d'elles.

Les plaques de tôle doivent être orientables pour un réglage précis des glaces afin d'approcher la forme idéale du paraboloïde et récupérer le maximum de flux au foyer.

Le collier fixé sur le tube permet, en lui donnant une légère inclinaison, de diriger la face de la glace vers le foyer. Le réglage précis se fait avec le système écrou-tige filetée. Pour avancer la glace, il suffit de dévisser l'écrou H et de visser l'écrou à l'oreille plate. Pour reculer on fait l'opération inverse. La longueur de filetage de la tige permet une orientation de 10° de part et d'autre, ce qui est suffisant puisque en réalité un réglage de 1° ou 2° seulement est nécessaire.

Etant donné que sur le même tube sont fixées deux glaces situées l'une au dessus de l'autre, l'axe de chaque tige filetée n'est pas perpendiculaire au plan de la plaque d'où la nécessité d'avoir des rondelles sphériques.

Les tubes sont en acier UZ10 ; 24x30 ;  $R_p = 25 \text{ daN/mm}^2$  ;  
en forme de parabole dont les paramètres sont donnés dans le tableau  
du paragraphe 12.

### III.2 Réglage des miroirs du concentrateur.

Le miroir expérimenté est placé en un point de la parabole de  
manière que son plan de symétrie passe par le foyer géométrique  
(dont la position est déterminée par des opérations topographiques  
simples), reçoit le rayonnement réfléchi par l'héliostat.

L'"image" du soleil est formée par réglage des vis de poussée latérale  
sur un écran matérialisant le plan focal. Le réglage est effectué de  
manière que l'image de forme elliptique soit centrée sur le foyer géo-  
métrique. En réalité la section par le plan focal du cône de révolution  
formé par les rayons réfléchis en un point du miroir est une ellipse  
dont le centre n'est pas sur l'axe du cône et ne coïncide pas avec le  
foyer géométrique. Mais les contours de la tache lumineuse obtenue sur  
l'écran de réglage sont trop imprécis pour qu'il soit possible de  
reproduire ce décalage donné par la formule :

$$\delta = \frac{1}{2} f \sin \frac{\alpha}{2} \left[ \frac{1}{\cos(\beta + \frac{\alpha}{2})} - \frac{1}{\cos(\beta - \frac{\alpha}{2})} \right]$$

pour  $\beta = 63^\circ$  ce décalage est de :  $\delta = 0,18 \text{ mm}$  ; alors que pour ce  
même angle le grand axe de l'ellipse est de :  $b = 66,21 \text{ mm}$  ; l'influ-  
ence du décentrage de l'image élémentaire par rapport au foyer est donc  
peu importante.

L'image élémentaire formé sur le plan focal est ensuite explorée avec  
une thermopile afin de mesurer la concentration d'énergie obtenue au  
centre et en différents points du plan focal.

### III.3 Le bâti.

Le bâti est formé par quatre consoles assemblées par des cornières à ailes égales, fixées par des rivets (planches n° 2, 3, et 4). Quatre semelles paraboliques supportent les tubes. Le mode de fixation a été étudié de manière à corriger l'angle bêta que fait le rayon polaire du paraboloïde avec la parallèle à l'axe principale passant par le point de fixation (fig III.1).

Cet angle bêta varie avec les tubes puisque ceux-ci n'ont pas les mêmes paramètres ( $l$ ,  $\Theta$ ,  $D$ ,  $f$ ).

Nous avons adopté un système mobile (planche n°2). La fixation est simple une fois le tube introduit dans le collier il suffit de visser le boulon de serrage.

Les positions de ces quatre semelles sont définies par les angles :

$$\alpha_1 = 20^\circ$$

$$\alpha_2 = 53^\circ$$

de façon à avoir une répartition uniforme des efforts en particulier ceux dûs au vent. De plus il faut que les colliers de soutient des tubes soient au milieu de la plaque support de miroir de façon à ne pas gêner la fixation de celle-ci.

### III.4 Montage du bâti.

La position des quatre consoles est donnée par la figure III.2.

$$d = f_1 \cdot \cos(\alpha_2) - f_2 \cdot \cos(\alpha_2)$$

$$d = 1485 \cdot \cos(20) - 1798 \cdot \cos(53) = 313,3 \text{ mm}$$

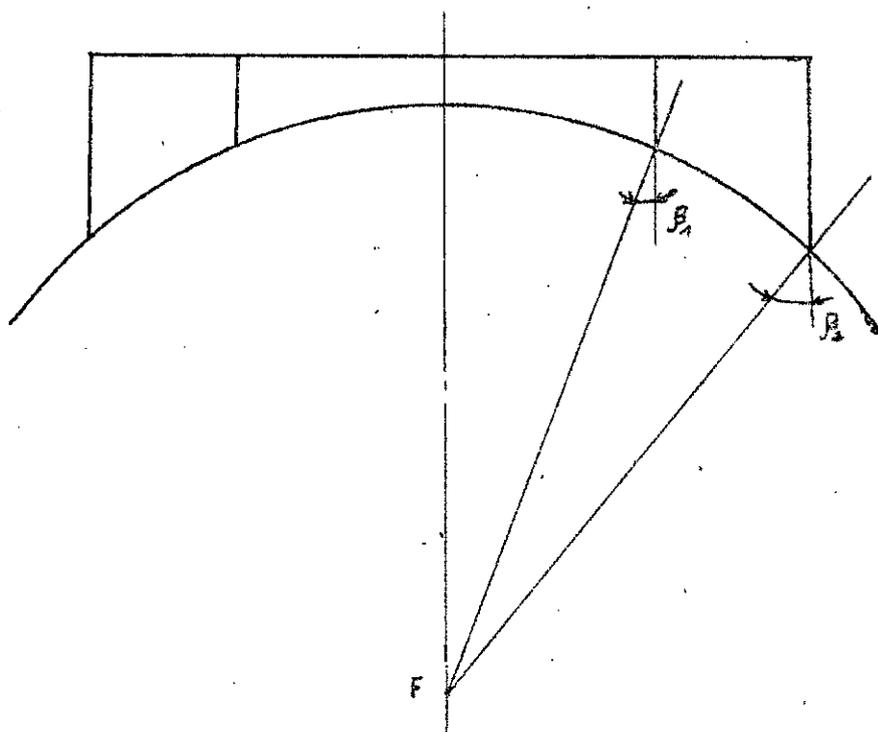


fig [III 1]

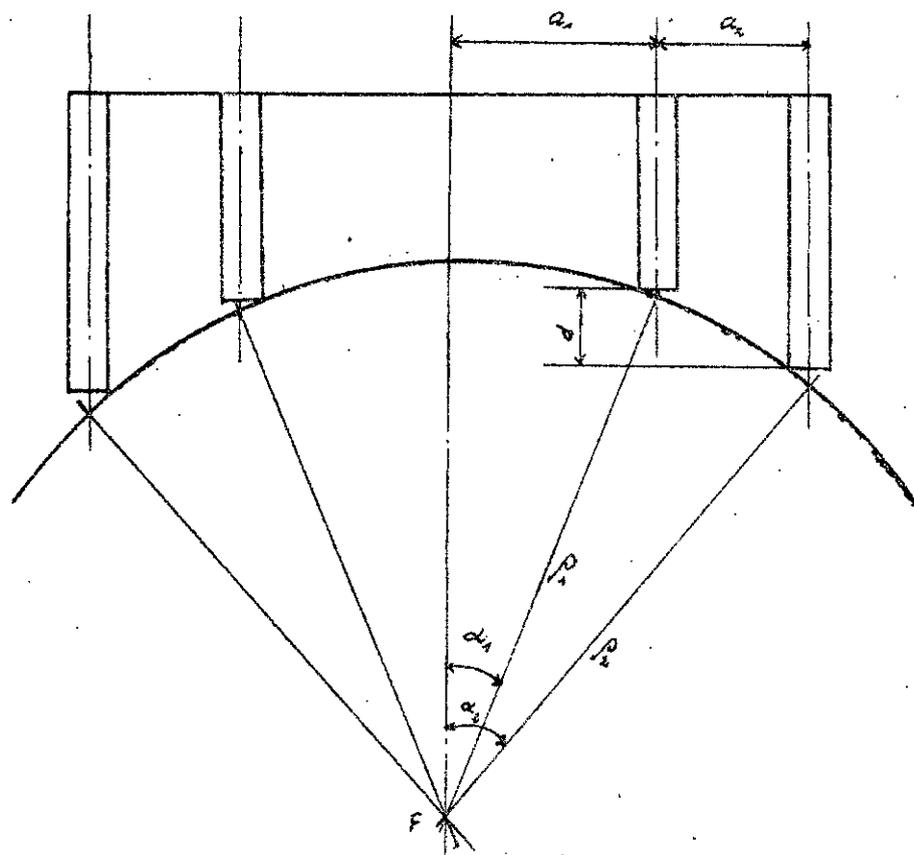


fig [III 2]

$$a_1 = f_1 \cdot \sin(\alpha_1)$$

$$a_1 = 1485 \cdot \sin(20) = 508 \text{ mm}$$

$$a_2 = f_2 \cdot \sin(\alpha_2) - f_1 \cdot \sin(\alpha_1)$$

$$a_2 = 1798 \cdot \sin(53) - 1485 \cdot \sin(20)$$

$$a_2 = 1436 - 508 = 928 \text{ mm}$$

## /// CHAPITRE IV - REPARTITION DE L'ENERGIE AU FOYER

---

### IV.1 Réflexion du rayonnement solaire.

Le rayonnement solaire réfléchi par un miroir plan sur un écran donne une tache dans laquelle la répartition d'énergie n'est pas uniforme et dépend de la taille du miroir et de sa position.

La projection des bords de la glace suivant l'axe du rayonnement réfléchi (cf fig IV.1) et dans un plan perpendiculaire à cet axe détermine une ligne dont la densité énergétique est la moitié de celle existant au centre de la tache.

On détermine géométriquement la zone au-delà de laquelle on ne peut plus voir le disque solaire et où la densité d'énergie est nulle.

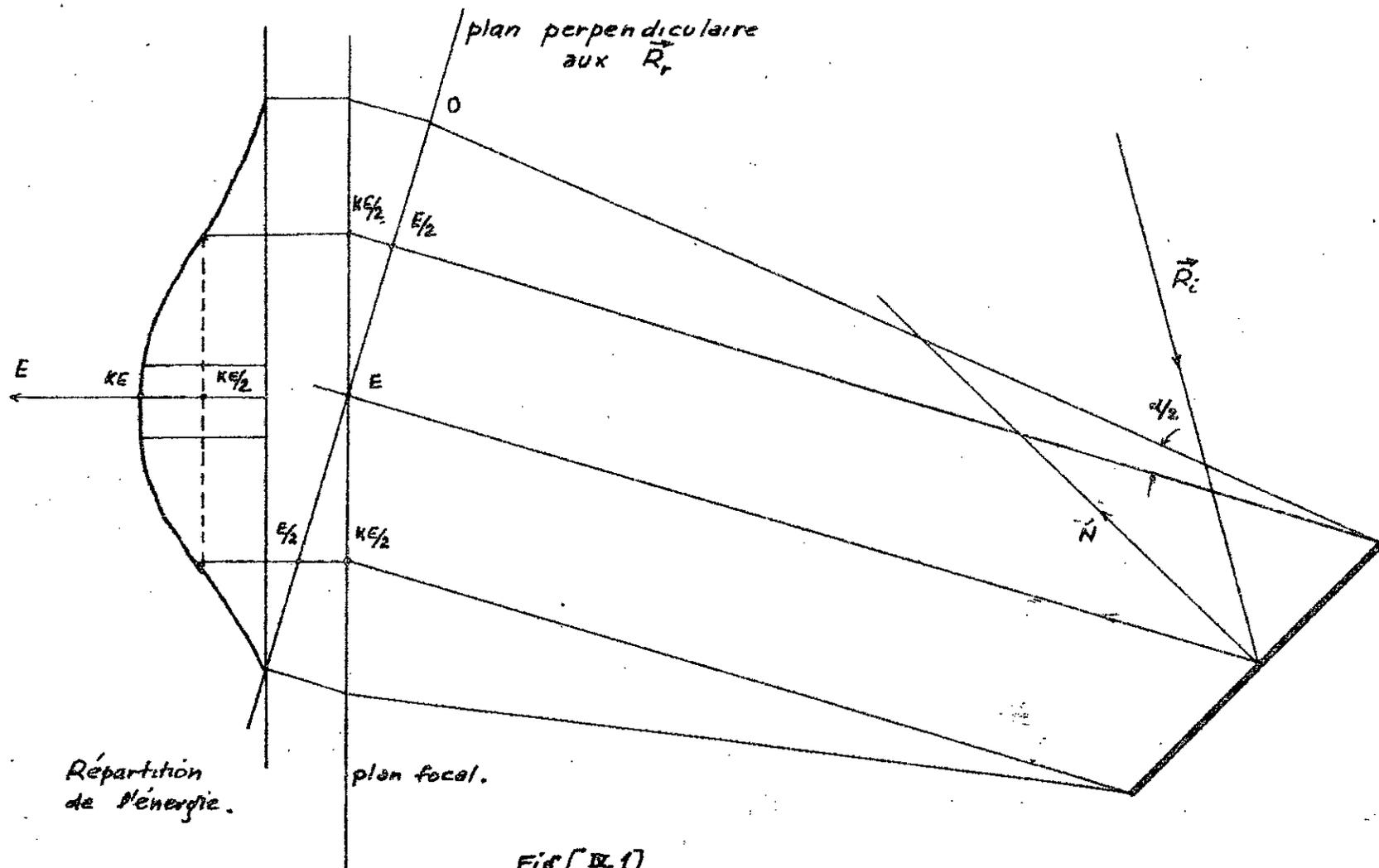
La densité d'énergie au foyer se déduit par simple projection dans le plan focal des valeurs établies dans des plans perpendiculaires à l'axe, joignant le centre du miroir au foyer.

Dans le plan focal, on obtient des répartitions de densité d'énergie ayant l'allure de la courbe (fig IV1).

#### Exemple :

En prenant un miroir de dimension (25x25 cm), la répartition d'énergie est donnée par la figure IV2a en supposant que le gradient de densité est linéaire et en supposant que ce flux est reçu sur un plan parallèle au miroir :

- diamètre du disque solaire image à 144 cm :  $d = f \cdot \alpha \approx \frac{144}{100} = 1,44 \text{ cm}$



- plage de densité maximum :  $d_0 = 25 - 1,44 = 23,56$  cm
- étendue de la tache :  $D = 25 + 1,44 = 26,44$  cm

Pour deux miroirs identiques la répartition sur la tache est donnée par la figure IV2b.

Il importe donc pour étudier l'énergie totale au foyer de déterminer la part d'énergie fournie par chaque glace du concentrateur. Pour cela il est nécessaire de déterminer les coordonnées du milieu de la glace, par rapport au foyer F du paraboloïde. En raison de la symétrie de la disposition des glaces, nous ne ferons le calcul que pour une partie du concentrateur (cf fig IV4).

#### IV.2 Position des glaces par rapport au foyer.

Pour le calcul des coordonnées, on adopte la même méthode que celle utilisée dans le calcul des tubes (cf paragraphe I2).

Pour les glaces A<sub>1</sub> ; B1 ; C2 ; D3 ; E4 et F5 on fait le calcul par rapport à la parabole centrale de foyer  $f = 1,44$  m. Les paramètres des glaces sont notés dans le tableau par :

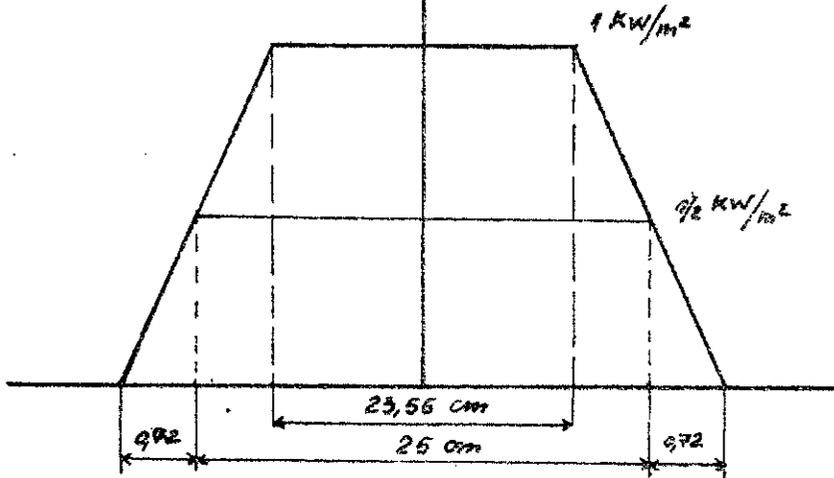
- $l$  : longueur de la méridienne
- $\theta$  : demi-angle d'ouverture
- $\rho$  : rayon polaire

Les autres glaces sont calculées par rapport aux tubes support. Les paramètres sont notés par :

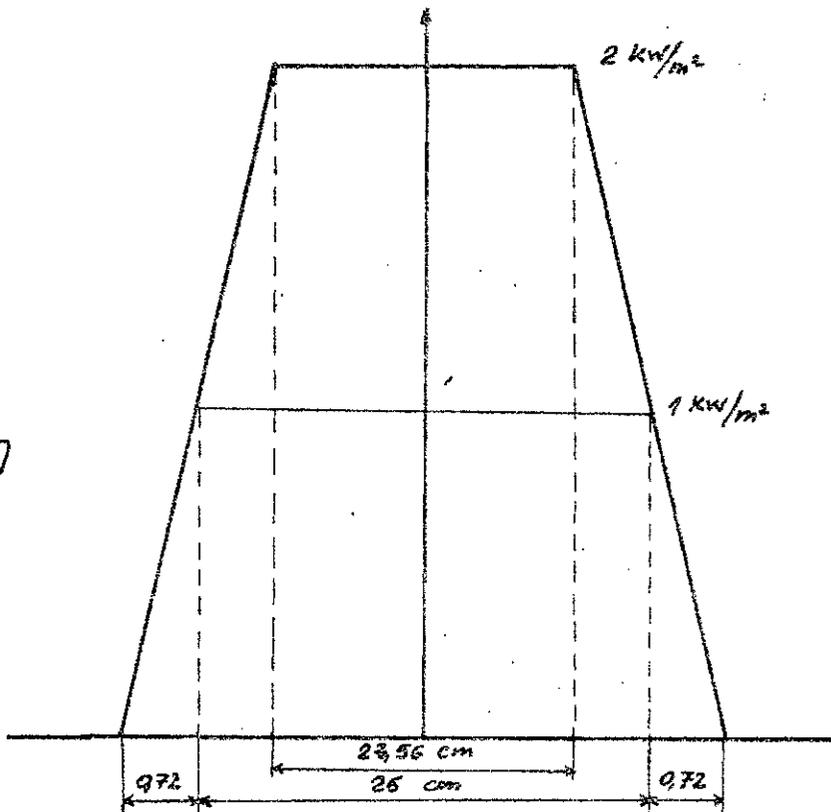
- $l'$  : longueur de la méridienne

A Densité d'énergie

Fig[IV.2a]



Fig[IV.2b]



- $\alpha$ : demi-angle d'ouverture
- $\rho$ : rayon polaire

Exemple de calcul :

Glace A1 :  $l = 25$  cm  
 $f = 144$  cm

$$144 \cdot \operatorname{tg}^3\left(\frac{\Theta}{2}\right) + 864 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\Theta}{2}\right) - 75 = 0$$

on pose :  $T = \operatorname{tg}\left(\frac{\Theta}{2}\right)$

$$144 \cdot T^3 + 864 \cdot T - 75 = 0$$

on résoud l'équation par itération de NEWTON.

$$T_{n+1} = T_n - \frac{144 \cdot T_n^3 + 864 \cdot T_n - 75}{432 \cdot T_n^2 + 864}$$

Solution :  $T = 0,08669 \Rightarrow \Theta = 2 \cdot \operatorname{arctg}(T) = 9,9^\circ$

$$\rho = 2 \cdot f / (1 + \cos(\Theta)) = 2 \cdot 144 / (1 + \cos(9,9)) = 145 \text{ cm}$$

Glace B2 : On considère la parabole "2" (cf fig IV3) de distance focale  $f_2 = \rho_{A2} = 148,3$  cm.

On détermine l'angle alpha connaissant la longueur de la méridienne :

$l' = 25$  cm d'où l'équation :

$$148,3 \cdot T^3 + 889,7 \cdot T - 75 = 0$$

avec  $T = \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)$ .

$$T = 0,084 \Rightarrow \alpha = 9,6^\circ \text{ et } \rho = 149 \text{ cm}$$

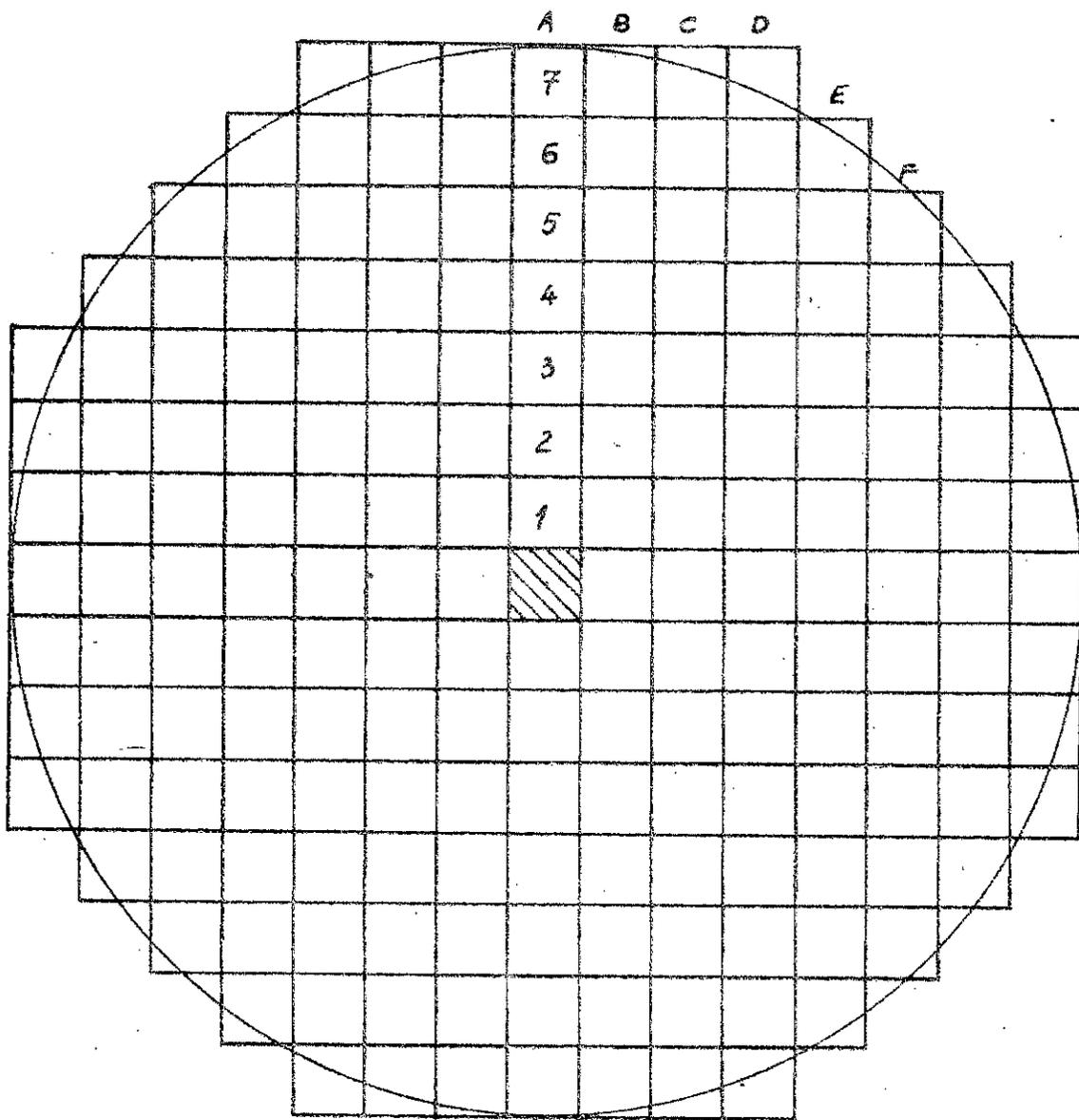


Fig [IV. 3]

Les résultats sont donnés dans le tableau ci-dessous :

GLACES	l cm	$\ominus$	$\rho$	$l'$	$\alpha$
A1	25	9,9	145		
A2	50	19,6	148		
A3	75	28,9	154		
A4	100	37,6	161		
A5	125	45,7	170		
A6	150	53,1	180		
A7	175	60	192		
B1	35,36	13,9	146		
B2			149	25	9,6
B3			155	25	9,3
B4			162	25	8,9
B5			171	25	8,4
B6			181	25	7,9
B7			193	25	7,6
C2	71	27,4	153		
C3			158	50	18,4
C4			165	50	17,6
C5			173	50	16,7
C6			184	50	15,7
C7			197	50	14,8
D3	106	39,6	163		
D4			169	75	26,1

D5			178	75	24,7
D6			188	75	23,4
D7			199	75	21,9
E4	141,5	50,7	176		
E5			184	100	32,4
E6			194	100	30,6
F5	176,8	60,3	193		

#### IV.3 Etude du disque solaire image dans le plan focal.

D'après la forme des miroirs utilisés la tache solaire doit être un carré de dimensions supérieures à celles de la glace. En raison de la symétrie du concentrateur on peut supposer que la tache focale est un cercle.

Soit :

- a : dimension du miroir
- d : diamètre du disque solaire image
- $\delta$  : angle que fait le miroir avec la verticale
- $\beta$  : angle que fait le plan focal avec le plan perpendiculaire aux rayons réfléchis.

D'après la figure IV4 on a :

$$a' = a \cdot \cos(\delta)$$

$$d = a' - 2 \cdot \rho \frac{\alpha}{2} \approx a' - \frac{\rho}{100}$$

avec

$$\alpha \approx 10^{-2} \text{ rad}$$

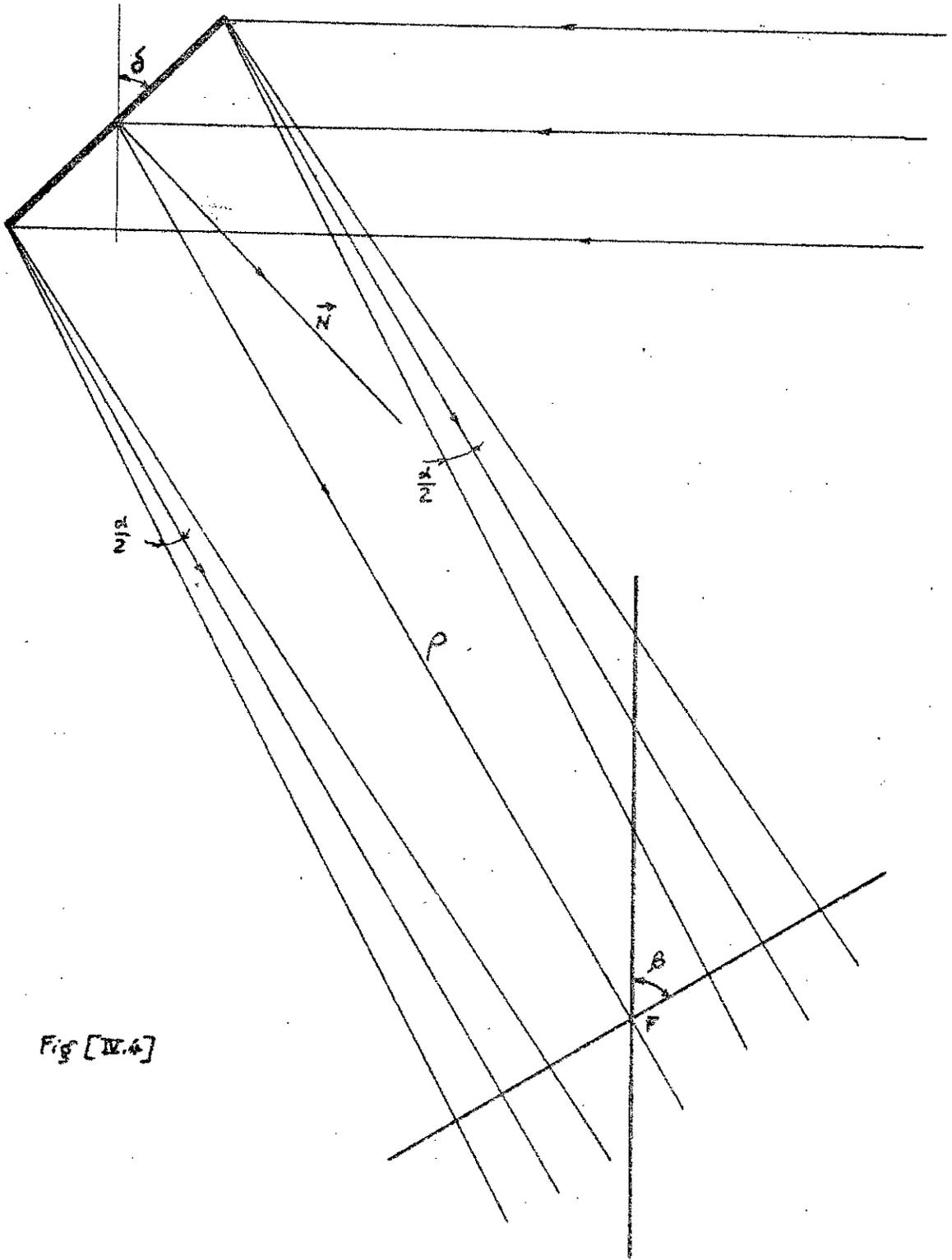


Fig [IV.4]

#### IV.4 Energie fournie par chaque glace.

##### Notation :

- $d$  : diamètre du disque solaire image  
 $\varphi$  : densité d'énergie dans le disque solaire image  
 $E$  : énergie dans le plan focal (projection du disque solaire image)  
 $\rho$  : rayon polaire  
 $s$  : surface du disque solaire image  
 $E'$  : énergie dans le disque solaire image minimum  
 $e$  : constante solaire :  $1,76 \text{ cal/cm}^2 \text{ mn}$   
 $a$  : dimension du miroir

##### Calculs :

L'étude de la répartition d'énergie dans la tache focale est longue et demande une analyse pratique. Nous évaluerons la quantité de flux arrivant dans le plus petit disque solaire donné par le miroir D7 et où la densité de flux est maximum.

Dimension de cette tache :

$$a = 25 \text{ cm}$$

$$a' = 25 \cdot \cos(29,9) = 22 \text{ cm}$$

$$\delta = 29,9'$$

$$d = a' - \frac{P}{100} = 22 - \frac{199}{100} = 20 \text{ cm}$$

$$s' = 315 \text{ cm}^2$$

Pour chaque glace nous calculerons :

$d$  : le diamètre du disque solaire image

$s$  : sa surface

$\Psi$  : la densité de flux dans le disque

$E$  : l'énergie dans ce disque

$E'$  : la part d'énergie dans le disque solaire image minimum de section  $s'$

Exemple :

Glace A1 :  $\Theta = 9^{\circ},9$        $\delta = \frac{\Theta}{2}$        $\rho = 145 \text{ cm}$

$$a' = a \cdot \cos(\delta) = 25 \cdot \cos(4,9) = 24,9 \text{ cm}$$

$$d = a' - \frac{\rho}{100} = 24,9 - 1,45 = 23,6 \text{ cm}$$

$$s = 437 \text{ cm}^2$$

$$\Psi = e \cdot \cos(\delta) = 1,76 \cdot \cos(4,95) = 1,75 \text{ cal/cm}^2 \text{ mn}$$

$$E = \Psi s \cdot \cos(\beta)$$

avec

$$\beta = \Theta = 9^{\circ},9$$

$$E = 1,75 \cdot 437 \cdot \cos(9,9) = 753 \text{ cal/mn}$$

$$E' = \Psi s' \cdot \cos(\beta) = 1,75 \cdot 314 \cdot \cos(9,9) = 541 \text{ cal/mn}$$

Le tableau suivant récapitule les résultats des calculs.

Glaces	$\theta$	$\delta$	$\rho$ cm	$a'$ cm	$d$ cm	$s$ cm <sup>2</sup>	$\Psi$ cal/cm <sup>2</sup> mm	E cal/mm	E' cal/mm
A1	9,9	5,0	145	25	23,6	437	1,75	753	541
A2	19,6	9,8	148	25	23,5	434	1,73	707	512
A3	28,8	14,4	154	24	22,5	398	1,70	593	468
A4	37,6	18,8	161	24	22,4	394	1,67	521	416
A5	45,7	22,9	170	23	21,3	356	1,62	403	355
A6	53,1	26,6	180	22	20,2	321	1,57	303	296
A7	59,8	29,9	192	22	20,1	317	1,53	244	186
B1	9,9	5,0	146	25	23,5	434	1,75	748	541
B2	19,6	9,8	149	25	23,5	434	1,73	707	512
B3	28,8	14,4	155	24	22,5	398	1,70	593	468
B4	37,6	18,8	162	24	22,4	394	1,67	521	416
B5	45,7	22,9	171	23	21,3	356	1,62	403	355
B6	53,1	26,6	181	22	20,2	321	1,57	303	296
B7	59,8	29,9	193	22	20,1	317	1,53	244	186
C2	19,6	9,8	153	25	23,5	434	1,73	707	512
C3	28,8	14,4	158	24	22,4	394	1,70	587	468
C4	37,6	18,8	165	24	22,4	394	1,67	521	416
C5	45,7	22,9	173	23	21,3	356	1,62	403	355
C6	53,1	26,6	184	22	20,2	321	1,57	303	296
C7	59,8	29,9	195	22	20,1	317	1,53	244	186
D3	28,8	14,4	163	24	22,4	394	1,70	587	468
D4	37,6	18,8	169	24	22,3	391	1,67	517	416

D5	45,7	22,9	178	23	21,2	353	1,62	399	355
D6	53,1	26,6	186	22	20,1	317	1,57	299	296
D7	59,87	29,9	199	22	20,0	314	1,53	241	241
E4	37,6	18,8	159	24	22,3	391	1,67	517	416
E5	45,7	22,9	184	23	21,2	353	1,62	399	355
E6	53,1	26,6	194	22	20,1	317	1,57	299	296
F5	15,7	22,9	193	23	21,1	350	1,62	396	355

#### IV.5 Energie totale du foyer.

Pour avoir l'énergie totale, il suffit de faire la somme de toutes les énergies fournies par chaque miroir précédemment calculées et notées par E' en tenant compte de la symétrie du concentrateur. On prend comme tache focale le disque solaire image donné par le miroir D7 (le plus éloigné du foyer).

$$E_{\text{totale}} = 4 \cdot \sum_{i=1}^7 E_{Ai} + 8 \cdot \sum_{i=2}^7 E_{Bi} + 8 \cdot \sum_{i=3}^7 E_{Ci} + 8 \cdot \sum_{i=4}^7 E_{Di}$$

$$+ 8 \cdot E_{E5} + 8 \cdot E_{E6} + 4(E_{B1} + E_{C2} + E_{D3} + E_{E4} + E_{F5})$$

$$E_{\text{totale}} = 4,7 \text{ KW}$$

## //CHAPITRE V -- MESURE DES TEMPERATURES AU FOYER

---

Il est important de pouvoir mesurer d'une façon assez précise les températures au foyer d'un four solaire afin de permettre un contrôle efficace des expériences effectuées.

Pour cela il a été mis au point des méthodes pratiques de mesures de ces températures. Dans l'industrie on utilise habituellement les thermocouples, dans notre cas la température variant entre 2000° et 3000° rend pratiquement impossible leur utilisation. On pourrait penser à utiliser des thermocouples réfractaires (tungstène / rhenium) mais du fait qu'ils sont le plus souvent au contact des produits de réactions, ceux-ci deviennent rapidement contaminés : On a donc recours pour la mesure de ces températures à des moyens optiques. Nous verrons dans ce qui suit que même avec ces procédés, des erreurs sont commises et cela pour plusieurs causes.

### V.1 Causes des perturbations des mesures.

La mesure par des moyens optiques de la température d'une surface placée au foyer du four solaire, soumise directement à l'action de rayonnement de haut éclairement énergétique, est perturbée à la fois par le facteur d'émission de cette substance et par les réflexions parasites du rayonnement solaire non absorbé. Compte-tenu du facteur d'émission de la substance, le résultat est donné par défaut, tandis que la réflexion donne une température par excès. En général les effets de la réflexion sont plus importants que ceux du facteur d'émission, il s'ensuit que le résultat global apparaît par excès.

Nous précisons que dans tout ce qui suivra nous assimilerons la source et le corps visé à des corps noirs et donc que leur brillance ne dépend que de la température pour une longueur d'onde donnée.

Dans le cas des surfaces métalliques, il est possible d'éviter l'action parasite du rayonnement solaire ; Il suffit d'effectuer des visées situées en dehors des zones de réflexions. On voit donc aisément que pour effectuer des mesures assez exactes il est nécessaire d'utiliser des dispositifs spéciaux à l'abri des effets parasites.

Nous examinerons deux dispositifs très employés, l'un utilisant des filtres et l'autre procédant avec occultation du rayonnement solaire.

#### V.2 Principes des mesures des températures avec utilisation des filtres.

Sur le trajet du rayonnement solaire incident est placé un filtre présentant une bande d'absorption intense pour un domaine bien défini de longueurs d'ondes, mais laissant passer autant que possible le reste du rayonnement solaire, de façon à ne diminuer que légèrement l'énergie reçue au foyer. On procède aux mesures de températures au foyer au moyen d'un pyromètre optique muni lui-même d'un filtre monochromatique interférentiel opaque pour l'ensemble du rayonnement du soleil, à l'exception toutefois d'une bande de transmission correspondant à la bande d'absorption du premier filtre. Cette méthode nécessite l'usage de pyromètres sensibles au rayonnement infrarouge, c'est-à-dire d'appareils fonctionnant avec des thermopiles ou avec des cellules photoélectriques.

#### V.3. Principe de mesure des températures avec occultation du rayonnement solaire.

Un procédé simple consiste, au moment des mesures de températures, à occulter le rayonnement du soleil avec un écran.

Cependant, lorsque la quantité de matière traitée est faible (installation de faible puissance), le passage de l'écran doit être rapide afin d'éviter un refroidissement excessif de la matière. Dans le but d'éviter cet inconvénient, il a été utilisé des écrans tournants synchronisés (cf fig V1a et V1b) obturant le rayonnement solaire incident au moment où le rayonnement de la substance chauffée parvient au pyromètre, et inversement.

Dans ces conditions, il est possible d'employer un pyromètre monochromatique à disparition de filament (que nous décrirons dans ce qui suit). Notons que l'emploi d'une telle méthode limite notablement l'énergie reçue par la substance.

#### V.4 Description des instruments de mesures.

La mesure pyrométrique consiste donc à déterminer la température en mesurant la puissance rayonnée, ou plus généralement la brillance (puissance rayonnée par unité de surface et par unité d'angle solide). On doit connaître le pouvoir émissif du corps sauf dans le cas du corps noir. Afin d'avoir une mesure précise de la température on doit se placer dans une bande de longueur d'onde très étroite.

##### V.4.1 Pyromètre à radiation monochromatique.

Le principe est basé sur celui d'une lunette à disparition de filament.

L'énergie émise par le corps visé dans une bande de longueur d'onde très étroite ( $\lambda, \lambda + \Delta\lambda$ ), est comparée à l'énergie émise par une source étalon dans la même bande. La bande étroite de longueur d'onde est obtenue à l'aide d'un filtre.

Fig [113] Dispositif d'écran tournant permettant d'occulter rapidement le rayonnement solaire en vue de procéder à des mesures de température à l'aide d'un pyromètre.

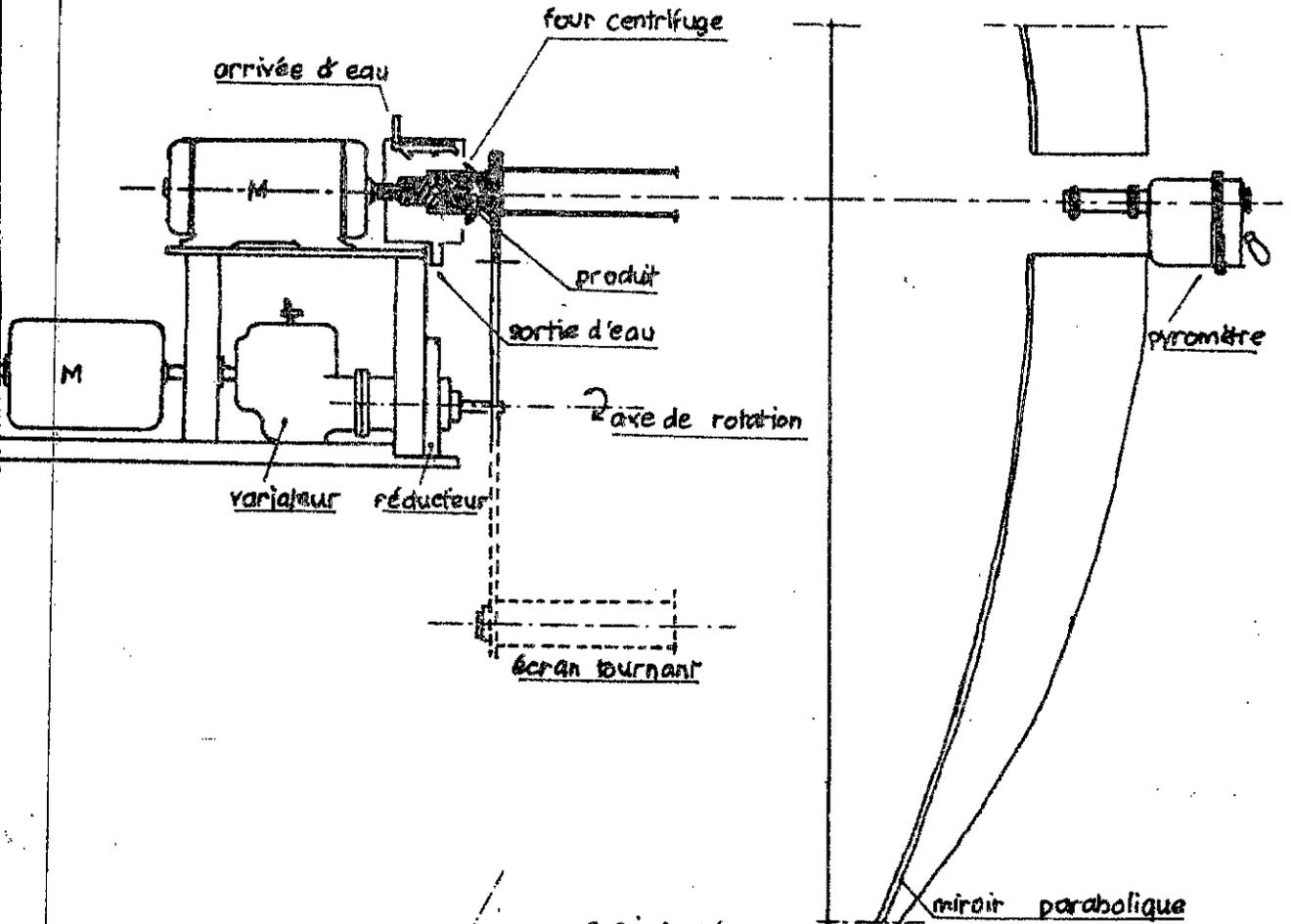


Fig [114] Dispositif à écran réflecteur permettant de procéder à la mesure de température d'une paroi soumise à un rayonnement de haut éclairissement énergétique.

D'une manière pratique dans le pyromètre à disparition du filament, on compare la brillance du corps visé à celle d'un filament de tungstène, chauffé par effet joule, pour la longueur d'onde  $\lambda = 0,65 \mu$  correspondant aux radiations traversant un filtre rouge monochromatique.

Le principe de la lunette à disparition du filament est représenté sur la figure V2a.

Elle comprend :

- Un objectif O donnant de la source visée S une image S' dans le plan du filament F d'une lampe étalon.
- Un filtre rouge R délimitant la bande étroite de longueur d'onde où s'effectue la comparaison.
- Un oculaire permettant de voir à la fois l'image de la source et celle du filament.

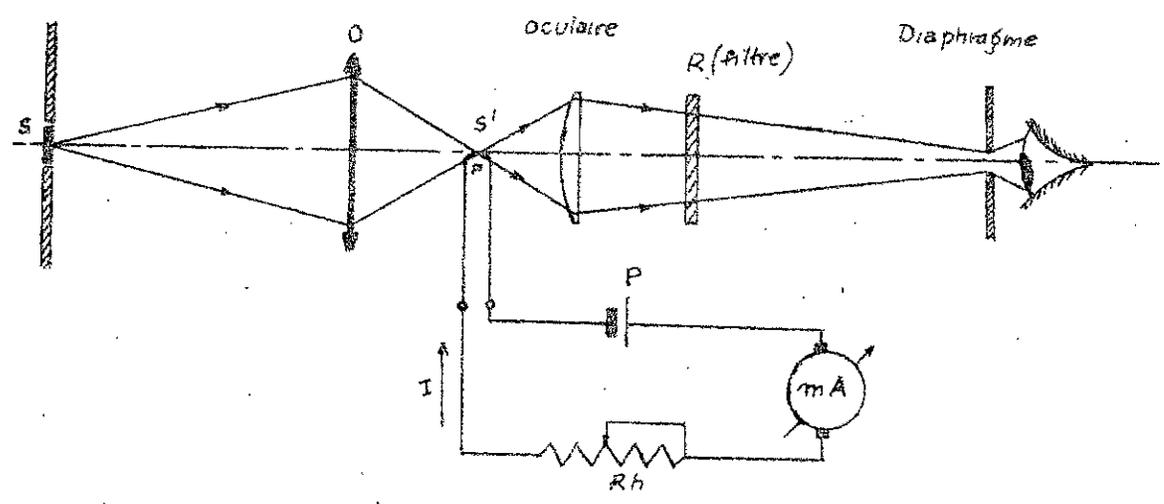
#### Principe de la mesure par disparition du filament.

1° Si la température du filament de tungstène est inférieure à celle de la source, il apparaît plus sombre que la source.

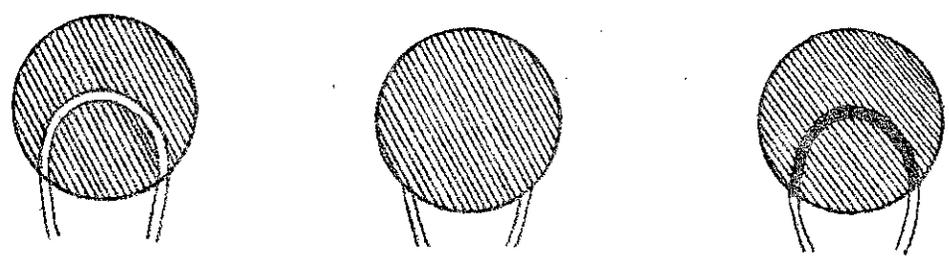
2° On fait croître la température du filament en augmentant le courant qui passe dans le filament jusqu'à ce que le filament "disparaisse" cf fig V2b : on a alors égalité de brillance entre le filament et la source. C'est à ce moment là que l'on peut déduire la température du corps visé puisqu'elle est égale à celle du filament.

Pratiquement la température indiquée par le pyromètre est inférieure à la température réelle de la source, cette différence est due au pouvoir émissif de la source, en effet il n'atteint presque jamais l'unité. Par ailleurs on choisit dans la plupart des cas une longueur d'onde de

$\lambda = 0,65 \mu$  appartenant à la bande de longueurs d'ondes correspondant à l'infrarouge. Ce choix provient du fait que la plus grande partie de



Fig[22a] - Principe de la lunette à disparition de filament



Fig[22b] - Disparition du filament

- 1. Brillance du filament trop élevée
- 2. Disparition du filament (égalité des brillances)
- 3. Brillance du filament trop faible

l'énergie rayonnée se présente sous forme de rayons infrarouges; ce qui permet aussi de diminuer le moins possible l'énergie arrivant à la source.

V.4.2. Pyromètre à radiation monochromatique équipé d'un filtre interférentiel étalon.

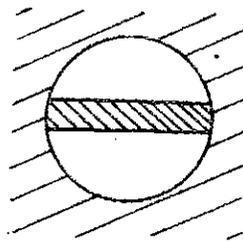
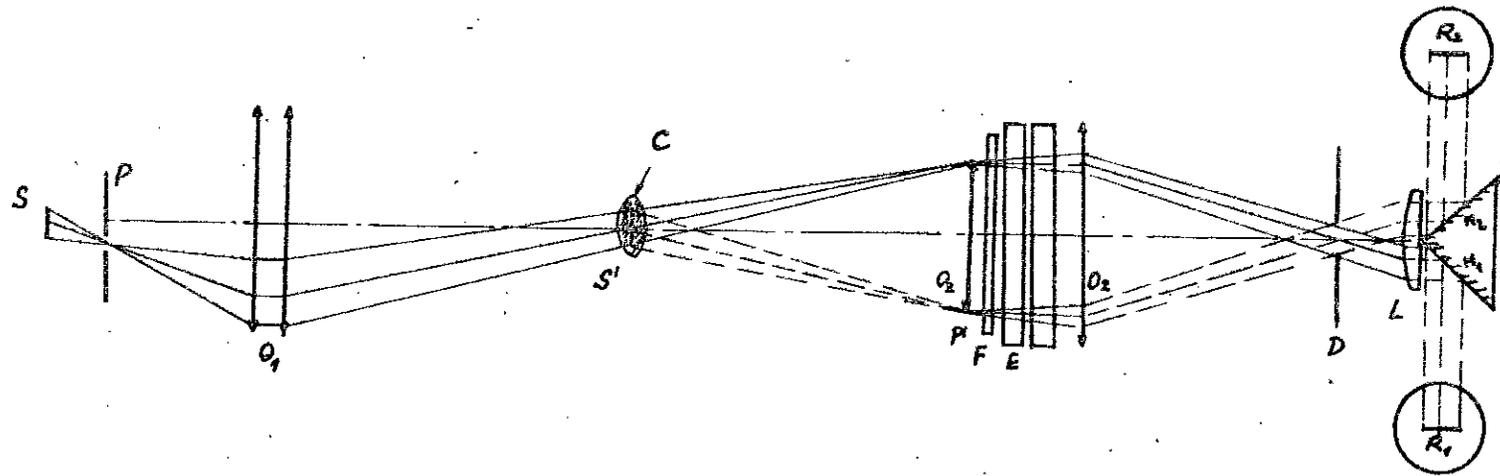
Ce sont des appareils très sensibles à cellules photoélectriques déjà décrit brièvement précédemment.

Le schéma de ce type de dispositif de mesure des températures est représenté par la figure V3 et comprend :

- S : source étalon.
- S' : image de S formée dans le plan formé par  $O_1$  contenant la source dont la température doit être déterminée.
- $O_1$  : objectif projecteur.
- P' : image de l'obturateur au voisinage de l'objectif  $O_2$ .
- P : obturateur à bord rectiligne.
- F : filtre interférentiel.
- E : étalon interférentiel.
- C : corps visé.

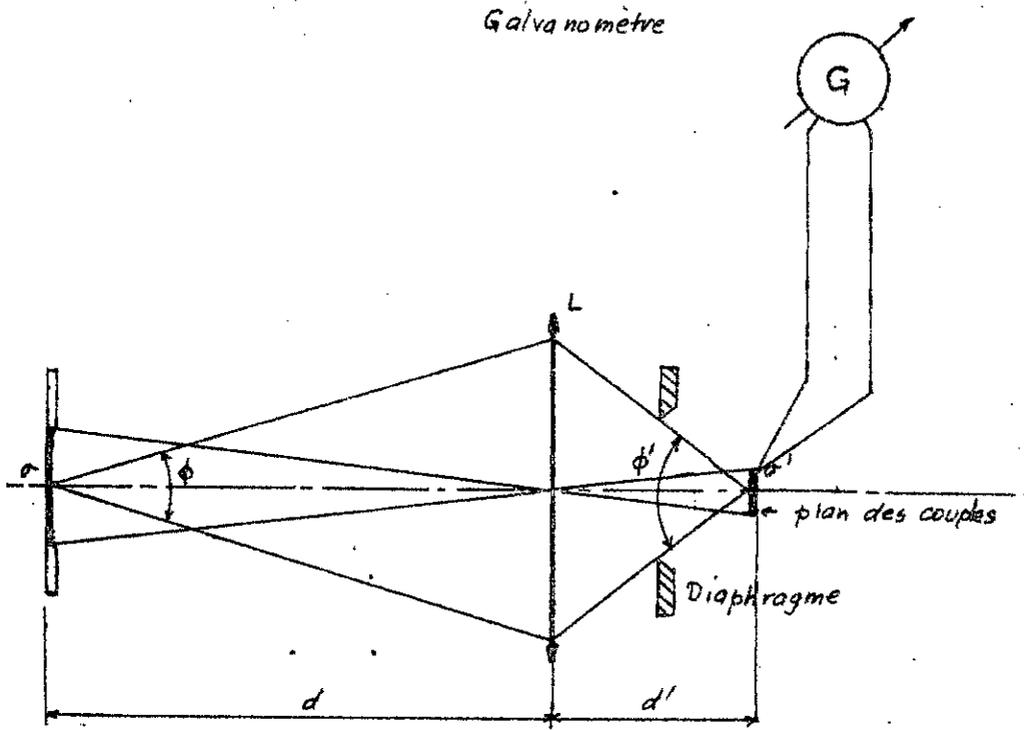
L'image de l'obturateur P tombe au milieu d'une bande opaque placée dans le plan P' de sorte qu'une moitié du diaphragme reçoit le flux provenant de la source et transmis par le corps et que l'autre moitié laisse passer le seul flux émis par le corps. Le faisceaux sortant traverse normalement un filtre interférentiel F, puis l'étalon interférentiel E, F élimine les bandes passantes parasites de l'étalon.

Fig[2.3] - Principe optique équipé de filtres.



Diaphragme dans le plan  $P'$

$R_1, R_2$ : Cellules photo-sensibles.



Fig[24] - Principe de la Lunette à radiation totale

- $S$  Surface utile de la source
- $S'$  Surface des couples
- $\phi$  Angle solide utile d'émission
- $\phi'$  Angle solide de réception
- $S$  Surface utile de la lentille
- $d$  distance de la source à la lentille
- $d'$  distance de la lentille aux couples.

### V.4.3 Pyromètre à radiation totale.

Au foyer d'un système optique est concentré le rayonnement émis par une source et est placé un ou plusieurs thermocouples. Du fait de l'augmentation de température les thermocouples développent une certaine force électromotrice proportionnelle à la température de la source. Si le corps visé n'est pas un corps noir parfait, il faudra effectuer certaines corrections.

#### Description de la lunette à radiation totale.

Le schéma de principe est représenté par la figure V4 et comporte :

- une lentille L
- un diaphragme D
- un galvanomètre G lié aux thermocouples.

DEUXIEME PARTIE

. / ' HELIOSTAT

## // CHAPITRE I -- CONCEPTION DE L'HELIOSTAT

---

La poursuite du soleil par l'héliostat se fait suivant deux axes orthogonaux (site et gisement). En site le parcours de l'héliostat est d'environ 38° dans une journée et de 76° en gisement (cf tome I).

Nous avons prévu deux vitesses :

- Une vitesse lente pour la poursuite automatique.

- Une vitesse rapide qui sert à mettre l'héliostat en position avant chaque manipulation ou bien à renvoyer son rayonnement réfléchi hors foyer du paraboloïde en cas d'incident.

. Vitesse lente :  $4,53 \cdot 10^{-3}$  tr/mn ou 1° en 36,8 s

. Vitesse rapide :  $1,242 \cdot 10^{-2}$  tr/mn ou 1° en 13,42s

On utilise pour cela un moteur à courant continu, à excitation séparée, commandé par l'induit avec un variateur électronique de vitesse (cf tome II)

### I.1 Fixation des glaces.

Pour la réalisation de l'héliostat de dimension (1,5x1,5) m, il nous est imposé l'utilisation de glaces identiques à celles du concentrateur.

Le problème majeur dans la réalisation d'un héliostat, est la recherche d'une surface réfléchissante plane. Les glaces doivent être donc réglables. La planche n°5 montre le mode de réglage adopté. Il doit être simple et précis. Le système sert également de fixation des glaces sur le cadre métallique.

## I.2 Méthode d'alignement des glaces.

La méthode suivante est proposée par GORDON. HUGHE (ref:Solar Energy Juillet 1958) utilisant un instrument spécial décrit sur la figure I.1.

Il est constitué d'un tube métallique muni de quatre ouvertures. Un miroir "a" faisant un angle de  $45^\circ$  avec l'axe du tube, un deuxième miroir "b" placé comme l'indique la figure. Une lampe dont les filaments forment un "X" placée au foyer d'une lentille  $L_1$  est observée à travers la lentille  $L_2$  avec un oculaire.

L'appareil est placé devant l'héliostat et visant deux miroirs  $M_1$  et  $M_2$ . L'alignement est assuré lorsque les deux images "X" du filament données par  $M_1$  et  $M_2$  sont superposées. Un filtre F peut être employé pour distinguer facilement ces deux images.

## I.3 Le bâti. (planches n°6, 7, 8 et 9)

Les dimensions du cadre de l'héliostat sont de 1526x1526 mm. Il est formé de poutrelles métalliques (cornières et poutrelles U) assemblées entièrement par soudure.

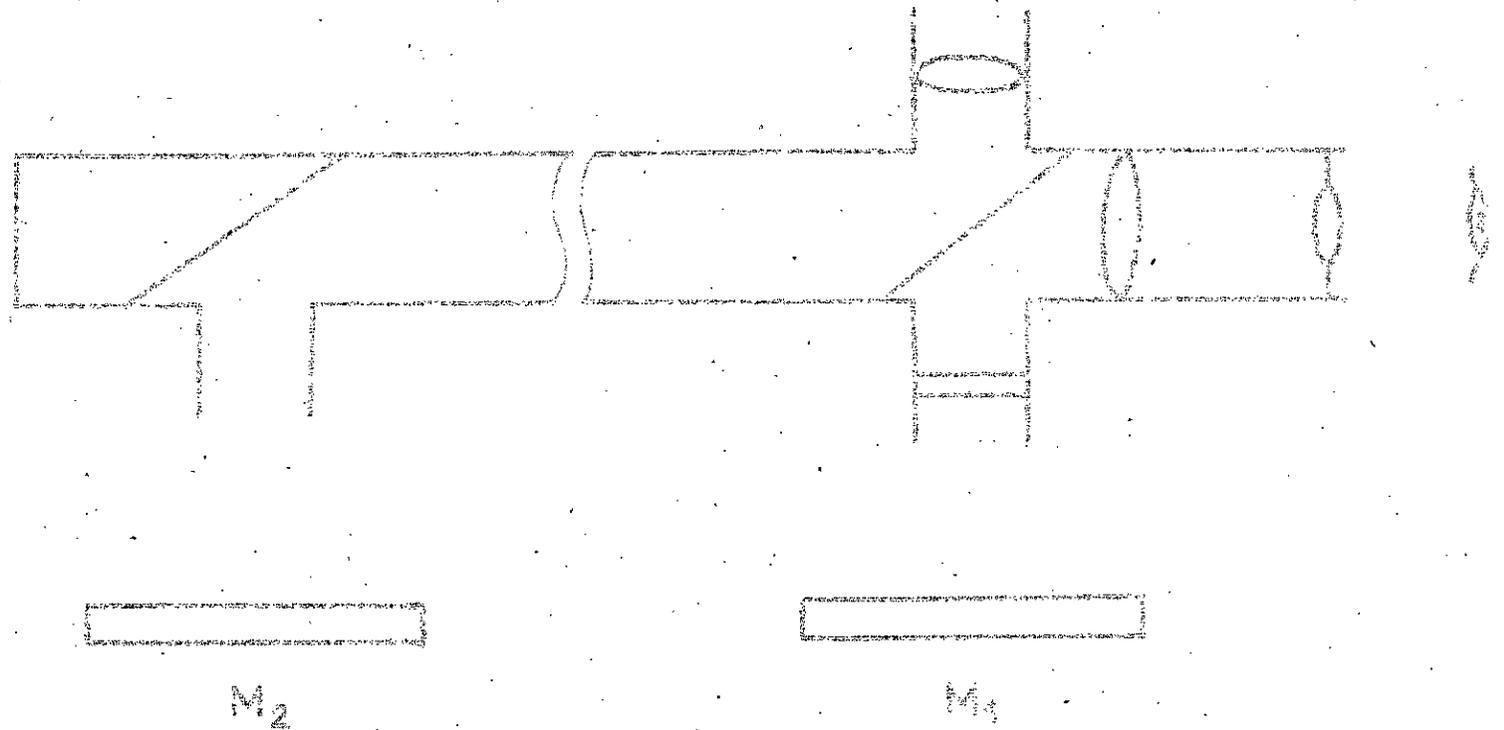
Pour l'alignement et le montage des paliers de l'arbre de rotation dans le mouvement en site, nous avons placé au niveau de l'axe de rotation deux plaques en forme de demi-disque munies de trois trous pour des boulons de fixation H6.

Le guidage est assuré par des paliers à roulements à aiguilles (ref. INA NA 6907).

Pour le mouvement en gisement, nous avons prévu des paliers à roulements combinés à cause des efforts axiaux dus au poids de l'héliostat.

Fig. I.1

Source lumineuse



Schema du dispositif de réglage des glaces

Roulements à aiguilles et à billes pour le palier supérieur ;  
à rouleaux et à aiguilles pour le palier inférieur. Les roulements  
à billes et à aiguilles servent au centrage alors que le roulement  
à rouleaux support les efforts axiaux (ref. INA NKXR 20).

## CHAPITRE II - ETUDE DU GROUPE MOTO-REDUCTEUR.

---

### II.1 Evaluation de la puissance du moteur.

#### II.1.1 Inertie de la charge (héliostat) cf fig II.1.

Poids total de l'héliostat : environ 150 Kg.

$$M_h = 80 \text{ Kg}$$

$$M_b = 15 \text{ kg}$$

$$M_a = 5 \text{ kg}$$

Inertie de la charge (héliostat).

$$I_c \simeq I_h + 2 \cdot I_b + I_a$$

$$I_c \simeq \frac{M_h \cdot L_h^2}{12} + 2 \cdot \frac{M_b \cdot L_b^2}{12} + \frac{M_a \cdot L_a^2}{12}$$

$$I_c \simeq \frac{80 \cdot (1,5)^2}{12} + 2 \cdot \frac{15 \cdot (0,9)^2}{12} + \frac{5 \cdot (1,8)^2}{12}$$

$$I_c \simeq 40 \text{ Kg.m}^2$$

#### II.1.2 Charge $C_v$ due au vent.

D'après les essais effectués en soufflerie, nous avons relevé la pression maximale s'exerçant sur l'héliostat, pour une

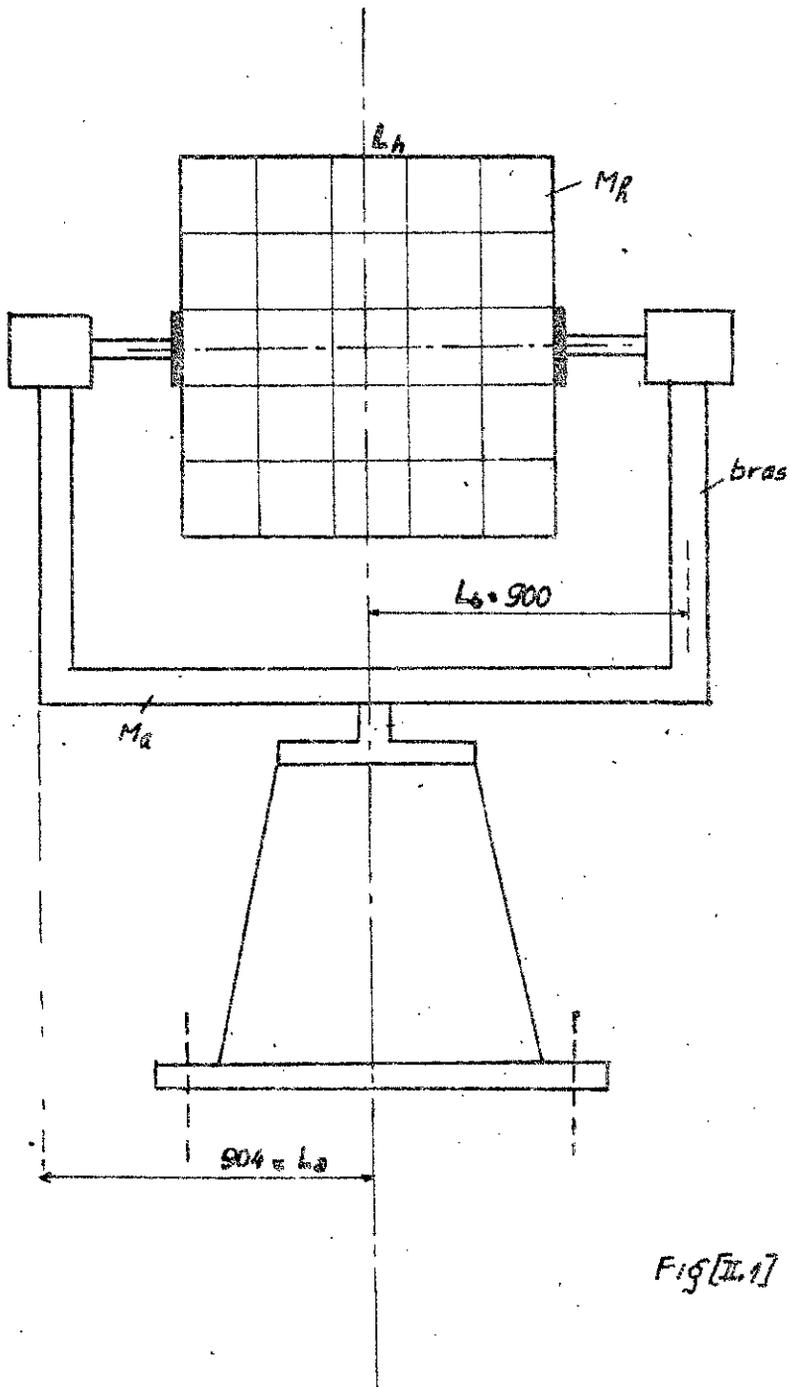
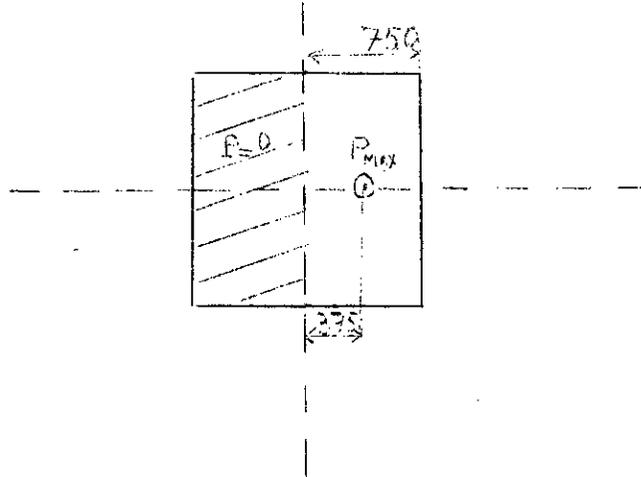


FIG [II.1]

$$P_{\text{Max}} = 110 \text{ Kgf/m}^2 = 1100 \text{ N/m}^2$$

Pour augmenter le coefficient de sécurité, nous supposons que cette pression maximale s'exerce sur une moitié de l'héliostat ce qui entraînera une charge maximale due au vent.



Force maximale appliquée sur une moitié de l'héliostat :

$$F_{\text{Max}} = \frac{S_h}{2} \cdot P_{\text{Max}} \quad S_h : \text{surface de l'héliostat}$$

$$F_{\text{Max}} = \frac{750 \cdot 1500 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot 1100 \approx 620 \text{ N}$$

D'où le couple maximum :

$$C_{\text{VMax}} = 620 \cdot 375 \cdot 10^{-3} \approx 233 \text{ N.m}$$

Nous négligerons tous les frottements sur les paliers ainsi que l'inertie du réducteur.

Le couple maximum que doit vaincre le moteur est donc :

$$C_M = C_{VMax} + I_c \cdot \dot{\theta}''$$

$$C_M = 233 + 40 \cdot 1,58 \cdot 10^{-1} = 240 \text{ N.m}$$

d'où la puissance du moteur :

$$P_M = C_M \cdot \dot{\theta}'$$

$$P_M = 240 \cdot 1,242 \cdot 10^{-2} = 3 \text{ W}$$

## II.2 Choix du groupe moto-réducteur.

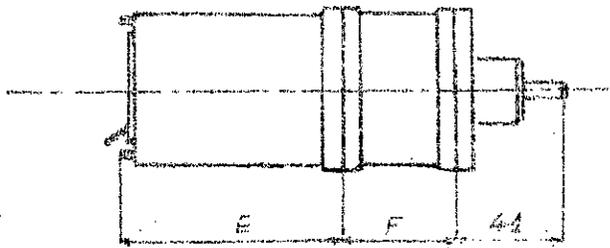
Pour des raisons d'encombrement nous avons choisi, en tenant compte de la puissance nécessaire, des moteurs et réducteurs de série miniature dans un catalogue (C<sup>ie</sup> Electro-mécanique).

. Caractéristiques du moteur.

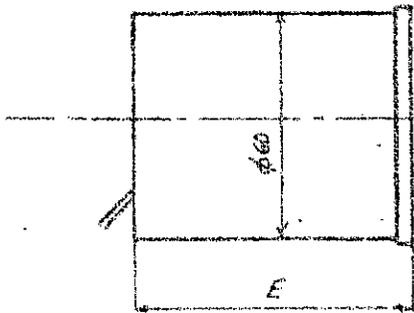
Le moteur choisi est à excitation per aimant permanent, tension nominale 24 V, puissance utile 50 W, son rendement est de 70%.

Moteur à c.c. 30. C 40 A/M

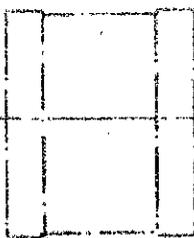
TYPE	w P <sub>u</sub>	ch	Aliment	N <sub>tr/mn</sub>	E
A2/M	50	1/15	24v	7000	91



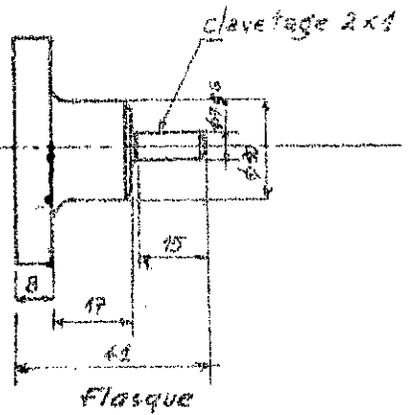
Moto-Réducteur



Moteur



Réducteur



Flasque

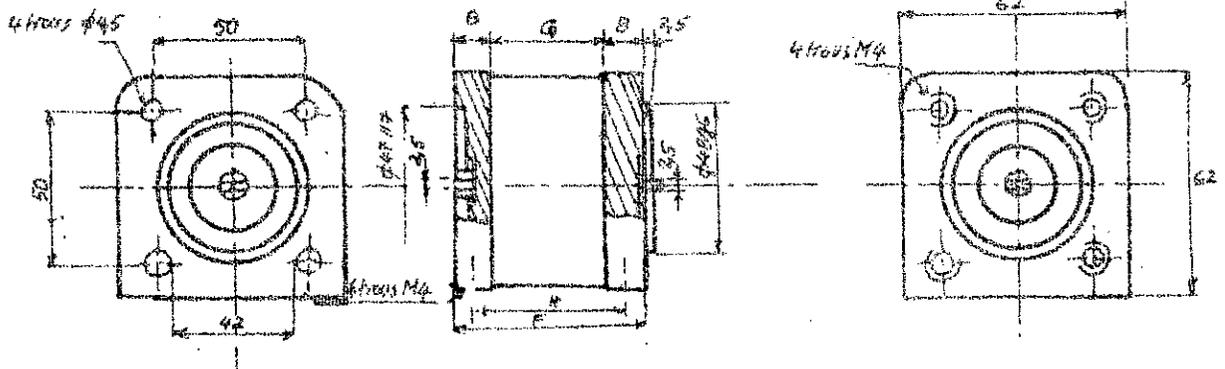


Fig [R.2.7]

Ce moteur est accouplé à trois réducteurs de vitesse en série, de rapport de réduction  $r = 1/100$  chacun.

TYPE	R 65
F	41
G	25
H	33

On a donc une réduction totale  $r' = 1/10^6$

Le coefficient de rendement par étage de réduction est  $\eta = 0,95$

Sur la figure II.2 on donne les côtes des éléments choisis.

/// CHAPITRE III - EFFETS DU VENT SUR L'HELIOSTAT  
ESSAIS EN SOUFFLERIE

---

Il s'agit d'effectuer des mesures de pressions sur une maquette d'héliostat placée dans une soufflerie pour étudier leur répartition et de prévoir les effets du vent. Dans le but de reproduire autant que possible ces effets, on crée dans la soufflerie (en avant de l'héliostat) un écoulement à caractère turbulent.

Le temps alloué à cette manipulation n'étant pas suffisant pour faire une étude très approfondie, on se limitera à mesurer les pressions suivant les positions (site et gisement) de l'héliostat qui nous semblent les plus critiques.

L'angle alpha permet de se repérer en site, et l'angle bêta en gisement.

III.1 Description de la maquette (fig IIIb et c).

L'héliostat comprend :

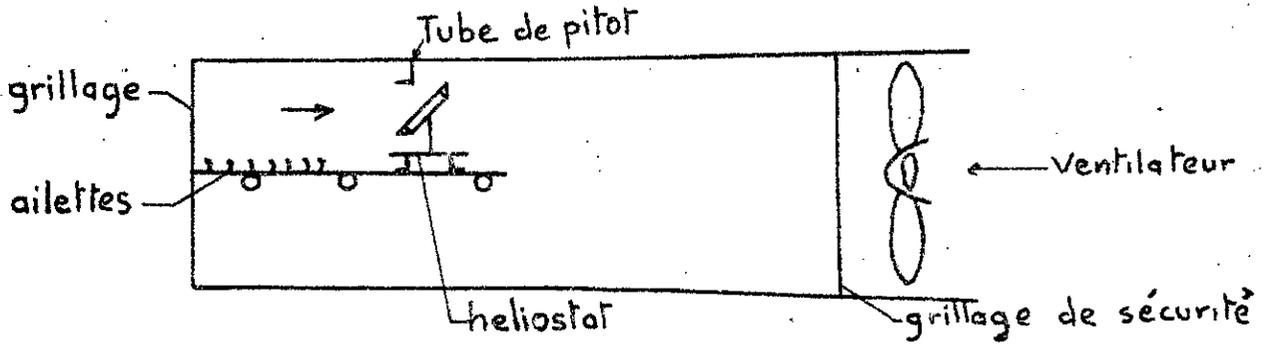
- 2 glaces rectangulaires dont les dimensions sont données sur la figure correspondante,

- 36 pitots simples, opposés deux à deux (face avant et arrière) placés sur 6 rangées horizontales et repérés par les lettres A, B, C, D, E, F et 3 colonnes verticales numérotées 1, 2, 3 pour les prises face avant ; les numéros 4, 5, 6 leur sont respectivement opposés. Cette disposition permet d'avoir les pressions réelles s'exerçant sur la maquette en effectuant les différences 1 - 4 ; 2 - 5 et 3 - 6.

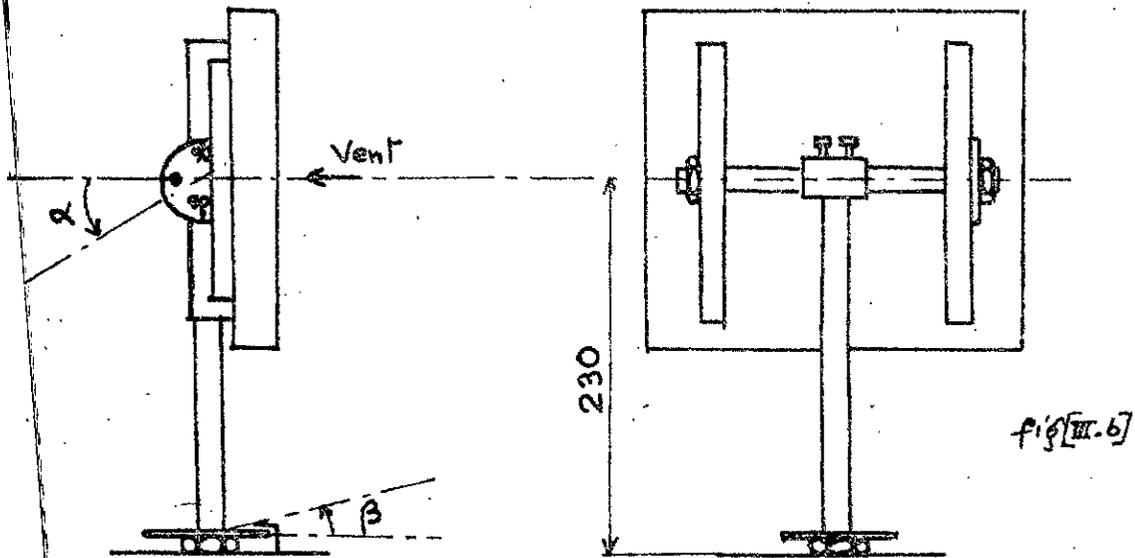
Dans un premier temps les orifices sont obturés avec du ruban adhésif de sorte que l'on puisse considérer un héliostat à glace unique, essais du numéro 1 à 6.

Soufflerie

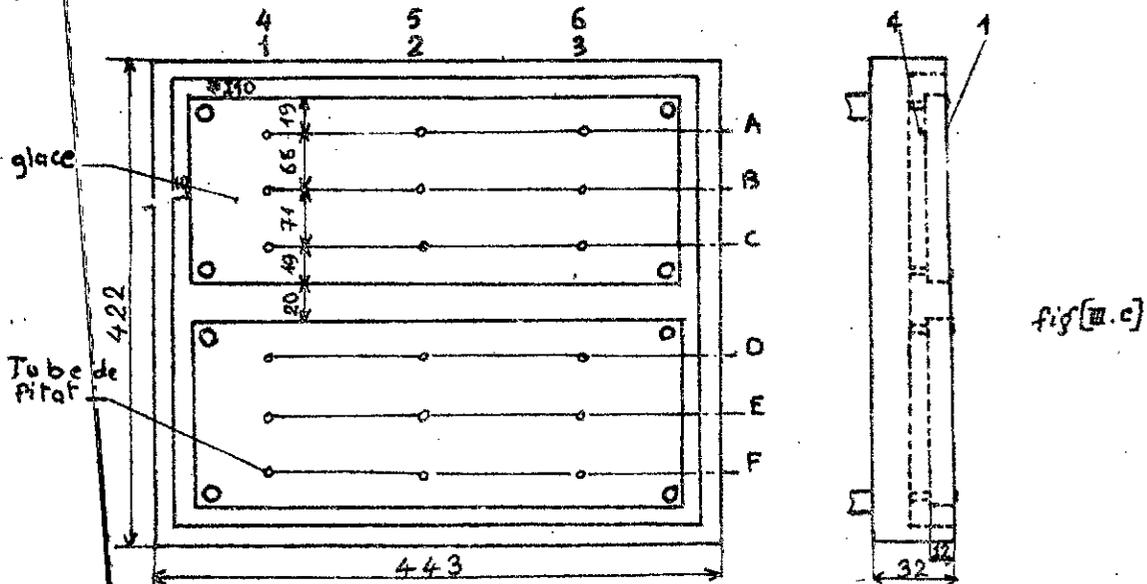
fig[III.a]



HELIOSTAT



fig[III.b]



fig[III.c]

Puis on enlève le ruban, l'héliostat compte alors plusieurs glaces essais n°7 à 12.

### III.2 Méthodes de mesures.

#### III.2.1 Mesure de la vitesse d'écoulement.

Avec un tube de pitot placé en avant de la maquette et parallèle à l'écoulement, on relève la dénivellation  $\Delta H$  de la hauteur d'eau dans un tube en U puis on calcule la vitesse avec la formule :

$$V = \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta P}{\rho}} \quad \text{ou} \quad V = \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta H}{\rho}}$$

On a relevé la température et la pression atmosphérique à l'intérieur du laboratoire :

$$t = 15^{\circ}\text{C}$$

$$P_a = 760 \text{ mm Hg} \quad \rho = \frac{1,225}{9,81} \simeq \frac{1}{8} \quad (\text{système MK}_p\text{S})$$

$$\text{d'où :} \quad V = 4 \cdot \sqrt{\Delta H} \quad \Delta H : \text{ en mm d'eau}$$

#### III.2.2 Mesure des pressions.

Pour la mesure des pressions le même procédé est employé sauf que le pitot est à tube simple. Autrement dit un bout du tube en U est relié à la prise de pression de l'héliostat et l'autre communique directement avec l'atmosphère.

Du fait de l'inclinaison du tube en U ( $12^{\circ}$  avec l'horizontale) une correction est faite sur les valeurs lues sur la règle graduée.

III.3 Résultats obtenus.

Les résultats sont donnés dans les tableaux portants les numéros des essais pour différentes valeurs des angles alpha et bêta avec une vitesse constante de 20 m/s :

- $\alpha = 0^\circ$  ;  $\beta = 0^\circ$
- $\alpha = 0^\circ$  ;  $\beta = 180^\circ$
- $\alpha = 30^\circ$  ;  $\beta = 180^\circ$
- $\alpha = 30^\circ$  ;  $\beta = 0^\circ$
- $\alpha = 30^\circ$  ;  $\beta = 45^\circ$
- $\alpha = 30^\circ$  ;  $\beta = 90^\circ$

Les pressions sont données en mm d'eau ;  $\Delta H$  représente la valeur lue directement sur la règle et  $\Delta H' = \Delta H \cdot \sin(12)$  la valeur corrigée pour tenir compte de l'inclinaison du tube.

Essai : 1

$\Delta H$

$\alpha = 0^\circ$  (Site)  
 $\beta = 0^\circ$  (gisement)

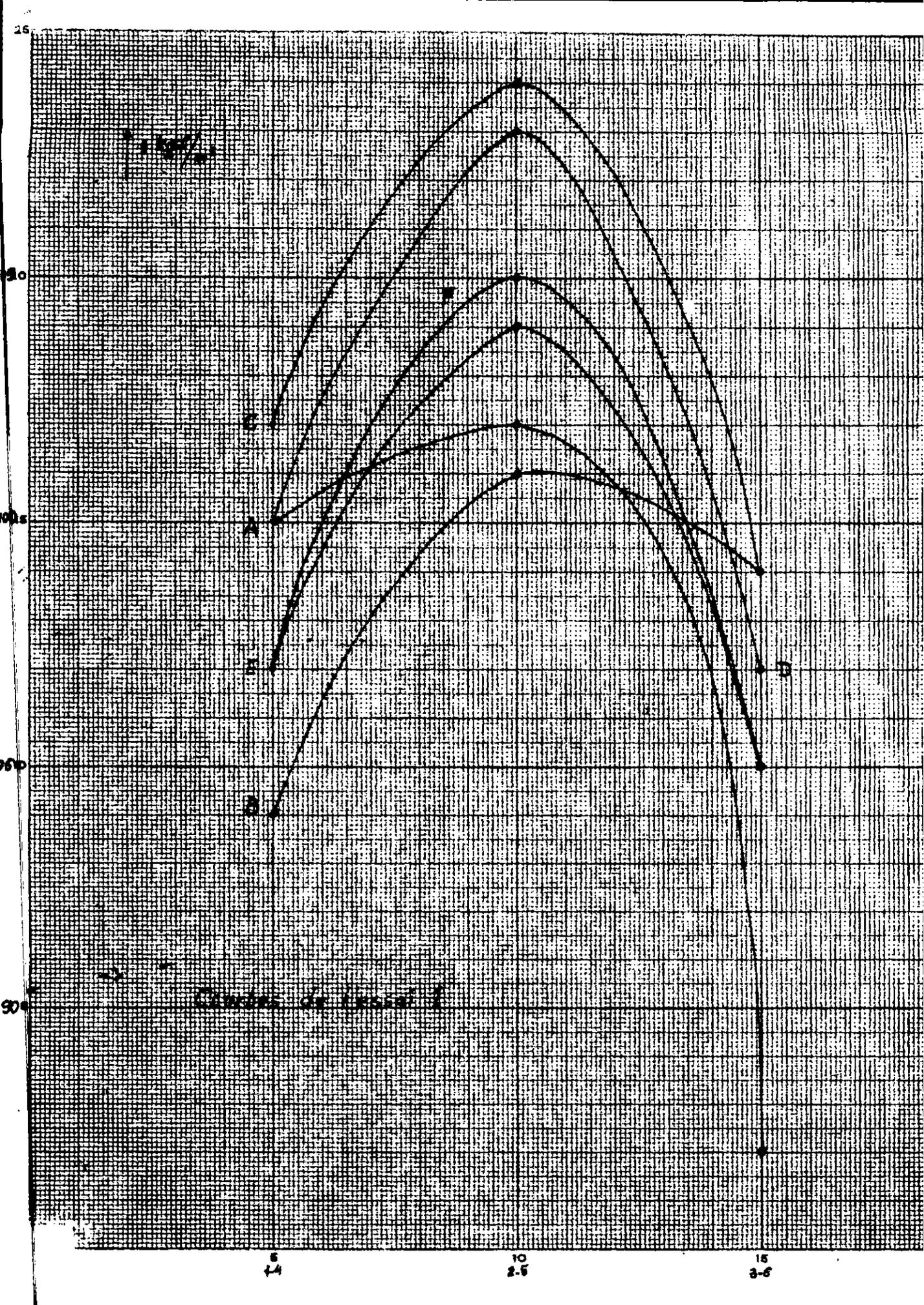
Orifices bouchés.

$V = 20$  m/s (Vent de face)

	1	2	3	4	5	6	1-4	2-5	3-6
A	36	27	50	516	516	518	480	489	468
B	68	34	83	519	519	519	451	485	476
C	23	-2	42	514	520	520	491	522	478
D	35	-1	52	515	520	520	480	521	468
E	42	9	52	510	510	510	468	501	458
F	46	11	60	513	515	515	467	504	455

$\Delta H'$

	A	B	C	D	E	F
1-4	100	94	102	100	97	97
2-5	102	101	109	108	104	105
3-6	87	99	99	97	95	95



Essai : 2

$\Delta H$

$\alpha = 0^\circ$  (site)  
 $\beta = 180^\circ$  (gisement)

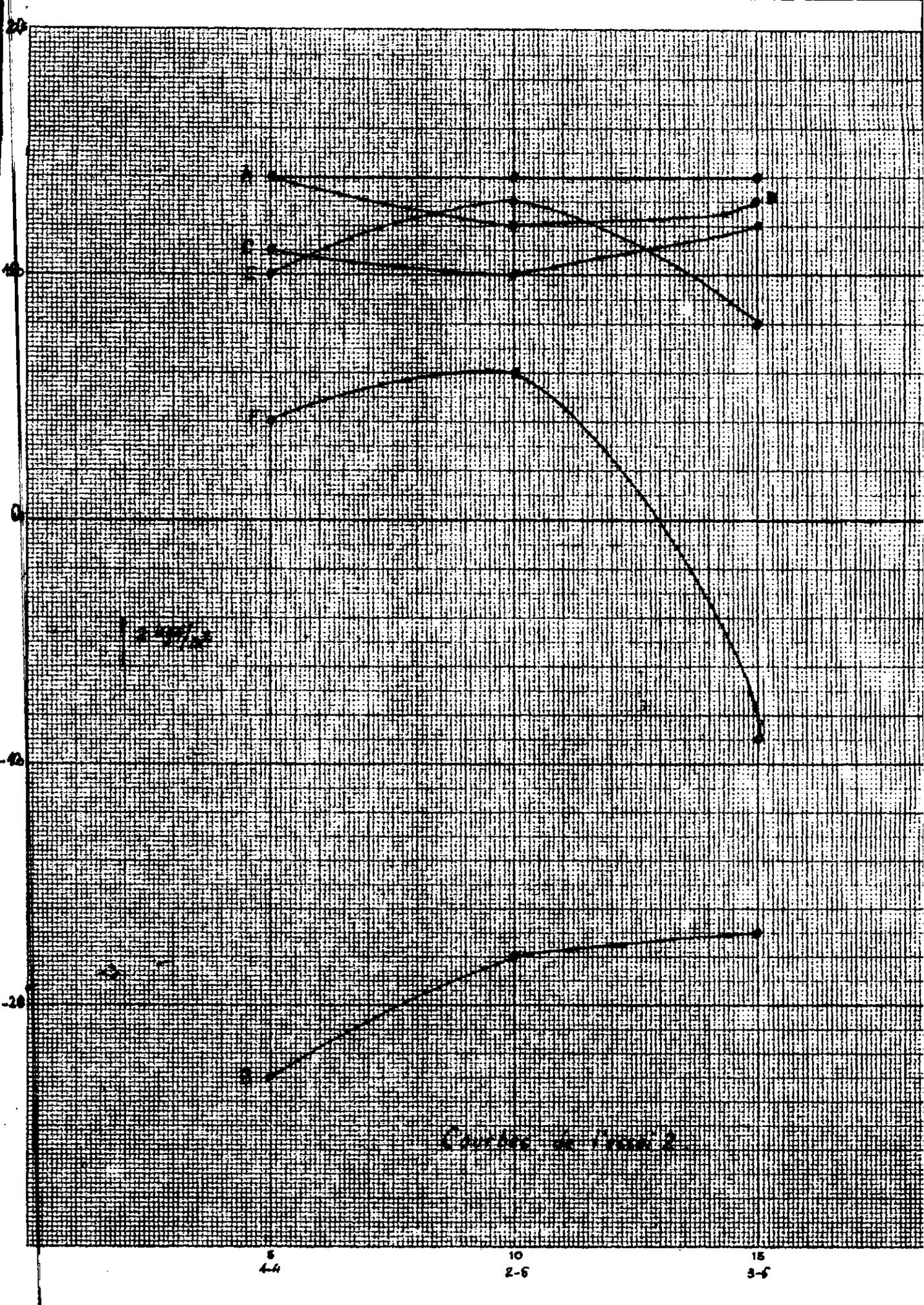
Orifices bouchés.

$V = 20$  m/s (Vent de dos)

	1	2	3	4	5	6	1-4	2-5	3-6
A	410	410	409	477	477	477	67	67	68
B	587	563	558	475	475	478	-112	-88	-80
C	420	427	417	475	475	476	55	48	59
D	401	411	406	470	471	470	63	60	64
E	420	405	433	468	469	470	48	64	37
F	450	433	512	468	460	470	18	27	-42

$\Delta H'$

	A	B	C	D	E	F
1-4	14	-23	11	14	10	4
2-5	14	-18	10	12	13	6
3-6	14	-17	12	13	8	-9



Essai : 3

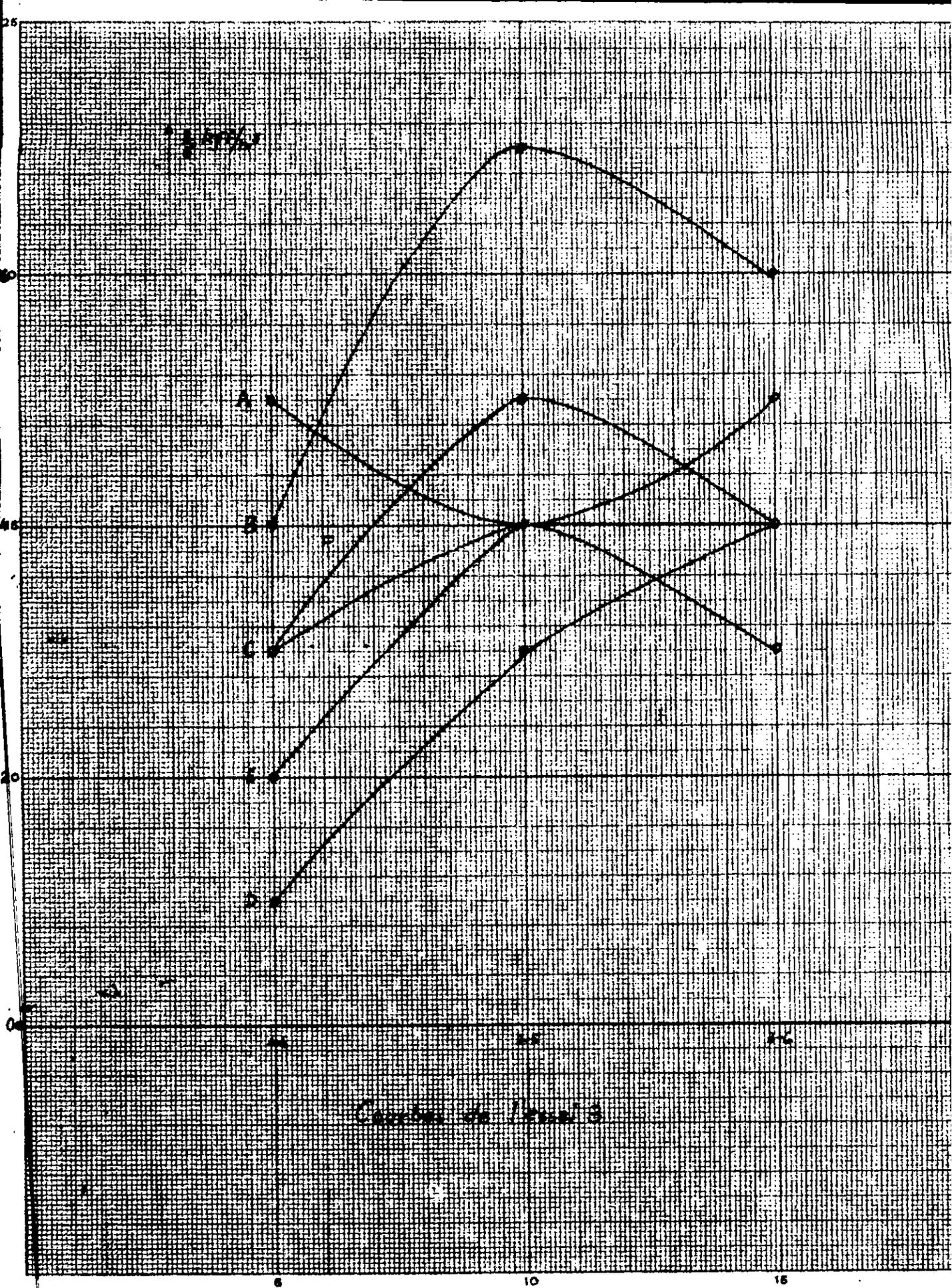
$\Delta H$

$\alpha = 30^\circ$  (site)  
 $\beta = 180^\circ$  (gisement)      Orifices bouchés  
 $V = 20 \text{ m/s}$  (Vent de dos)

	1	2	3	4	5	6	1-4	2-5	3-6
A	577	580	577	600	600	600	23	20	23
B	580	566	572	600	600	600	20	34	28
C	584	580	577	598	598	598	14	18	21
D	590	582	577	596	596	596	6	14	19
E	579	572	578	591	591	591	12	19	13
F	576	568	571	592	592	592	16	24	21

$\Delta H'$

	A	B	C	D	E	F
1-4	5	4	3	1	2	3
2-5	4	7	4	3	4	5
3-6	5	6	4	4	3	4



Essai: 4

$\Delta H$

$\alpha = 30^\circ$  (site)  
 $\beta = 0^\circ$  (gisement)

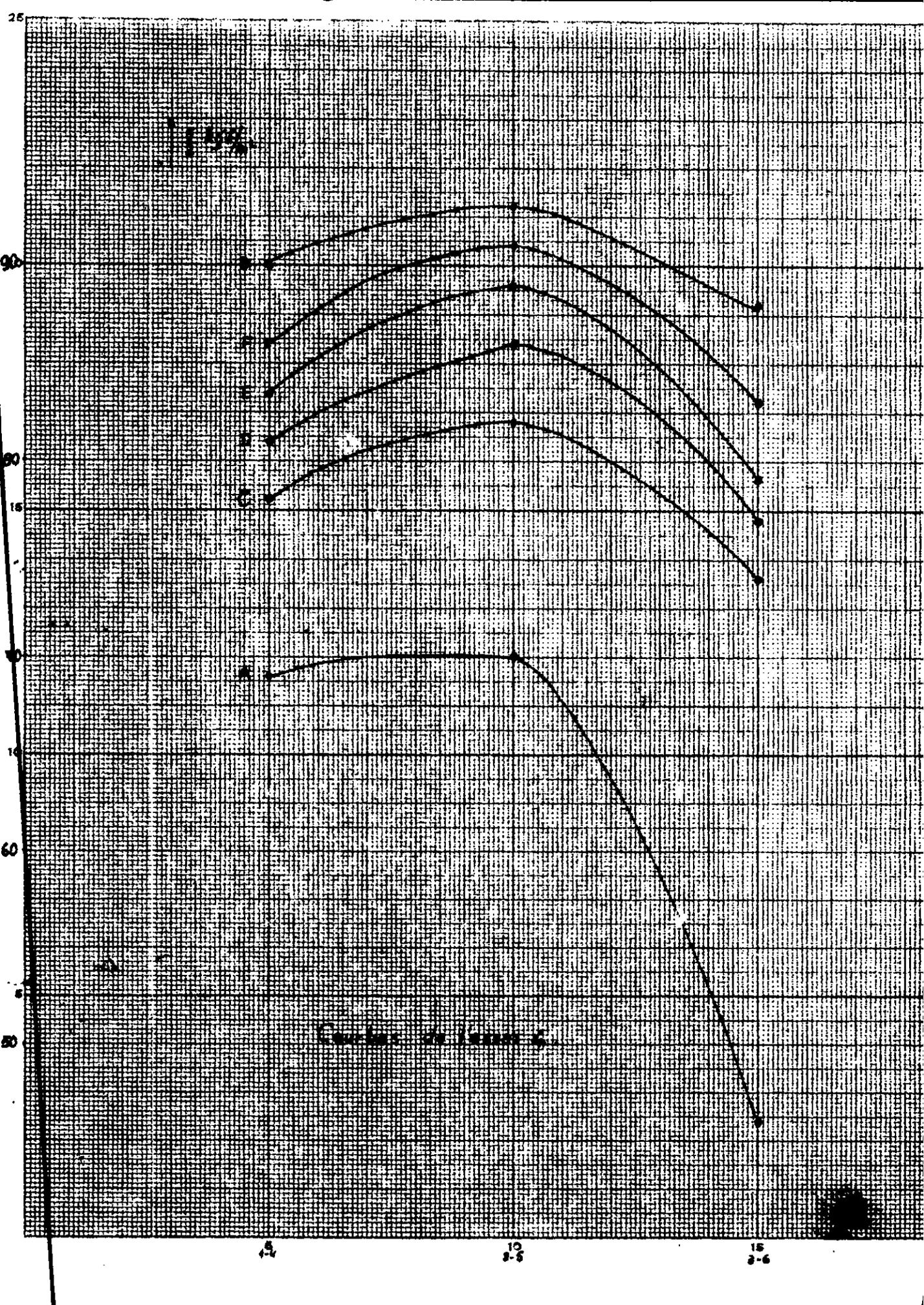
Orifices bouchés

$V = 20$  m/s (Vent de face).

	1	2	3	4	5	6	1-4	2-5	3-6
A	200	192	210	530	530	530	330	338	210
B	99	83	107	530	530	530	431	447	423
C	157	138	172	530	530	530	373	392	358
D	142	115	159	530	530	530	388	415	371
E	132	104	149	530	530	530	398	426	381
F	118	92	132	530	530	530	412	438	398

$\Delta H'$

	A	B	C	D	E	F
1-4	69	90	78	81	83	86
2-5	70	93	82	86	89	91
3-6	46	85	74	77	79	83



ESSAI: 5

$\Delta H$

$\alpha = 30^\circ$  (site)  
 $\beta = 45^\circ$  (gisement)

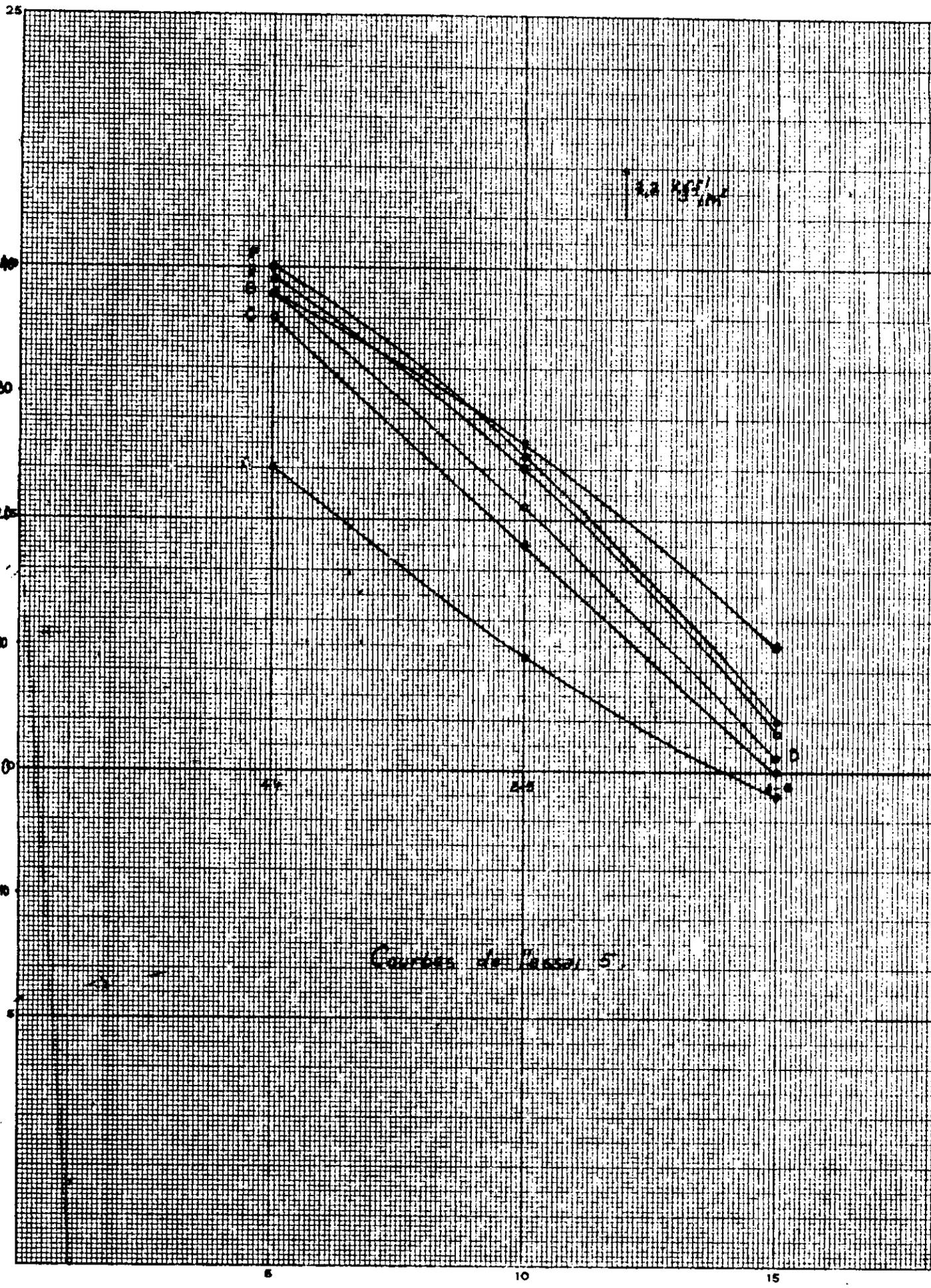
Orifices bouchés.

$V = 20 \text{ m/s}$

	1	2	3	4	5	6	1-4	2-5	3-6
A	225	300	350	340	342	341	115	42	-11
B	155	215	294	339	340	340	184	125	46
C	169	258	339	341	341	340	172	88	1
D	155	239	334	339	339	340	184	100	6
E	154	226	325	339	340	340	188	114	15
F	149	220	319	339	339	340	190	119	21

$\Delta H'$

	A	B	C	D	E	F
1-4	24	38	36	38	39	40
2-5	9	26	18	21	24	25
3-6	-2	10	0	1	3	4



Essai : 6

$\Delta H$

$\alpha = 30^\circ$  (site)  
 $\beta = 90^\circ$  (gisement)

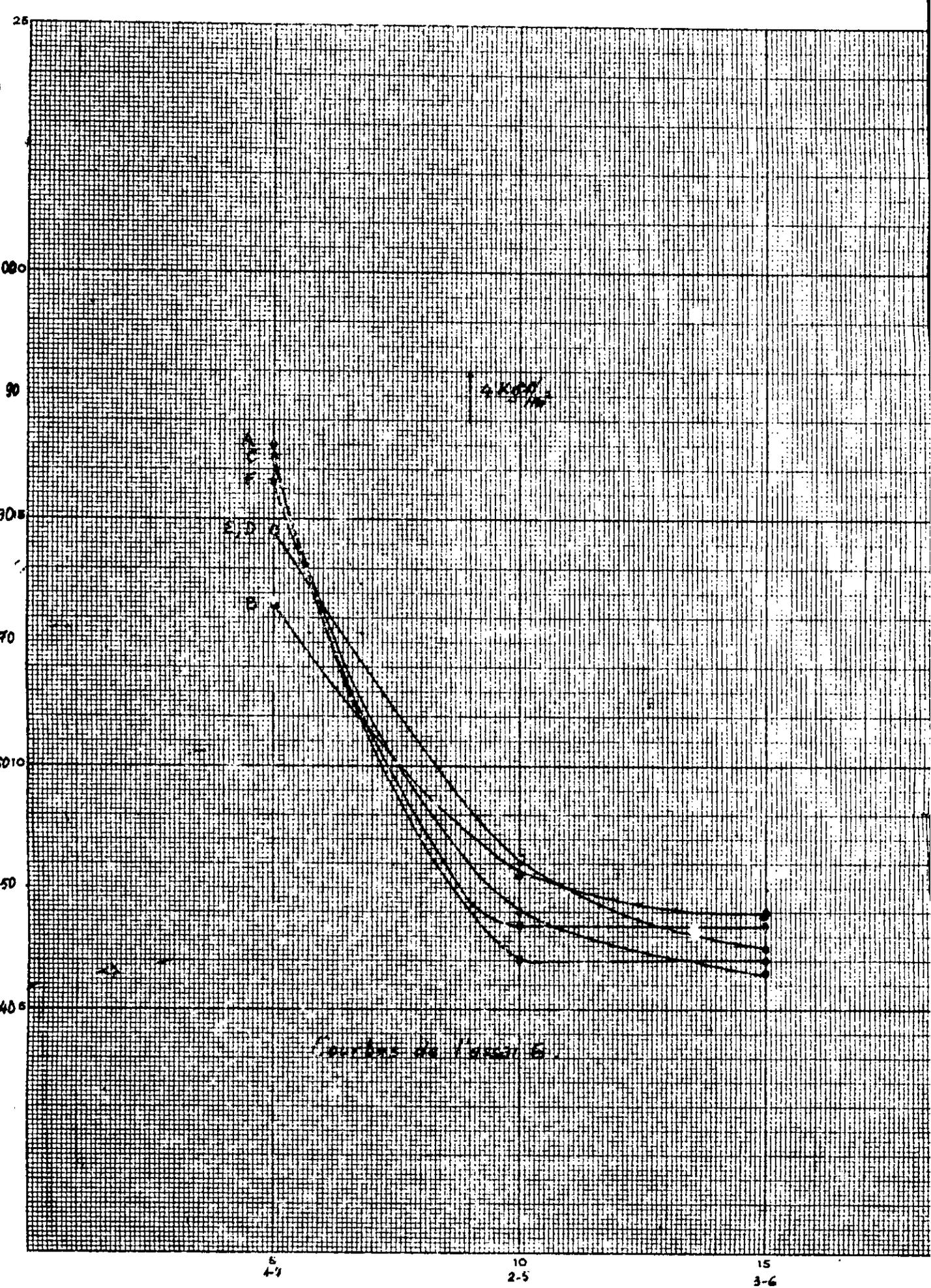
orifices bouchés

$V = 20$  m/s (vent de côté)

	1	2	3	4	5	6	1-4	2-5	3-6
A	640	437	440	227	226	226	-413	-211	-214
B	581	470	459	227	227	227	-353	-243	-232
C	636	459	433	227	226	226	-409	-233	-207
D	610	480	444	229	228	229	-381	-252	-215
E	609	460	445	230	230	230	-379	-250	-215
F	630	456	454	232	229	230	-398	-227	-224

$\Delta H'$

	A	B	C	D	E	F
1-4	-86	-73	-85	-79	-79	-83
2-5	-44	-51	-48	-52	-52	-47
3-6	-44	-45	-43	-45	-45	-47



5  
4-1

10  
2-5

15  
3-6

Essai: 7

$\Delta H$

$\alpha = 30^\circ$  (site)  
 $\beta = 90^\circ$  (gisement)

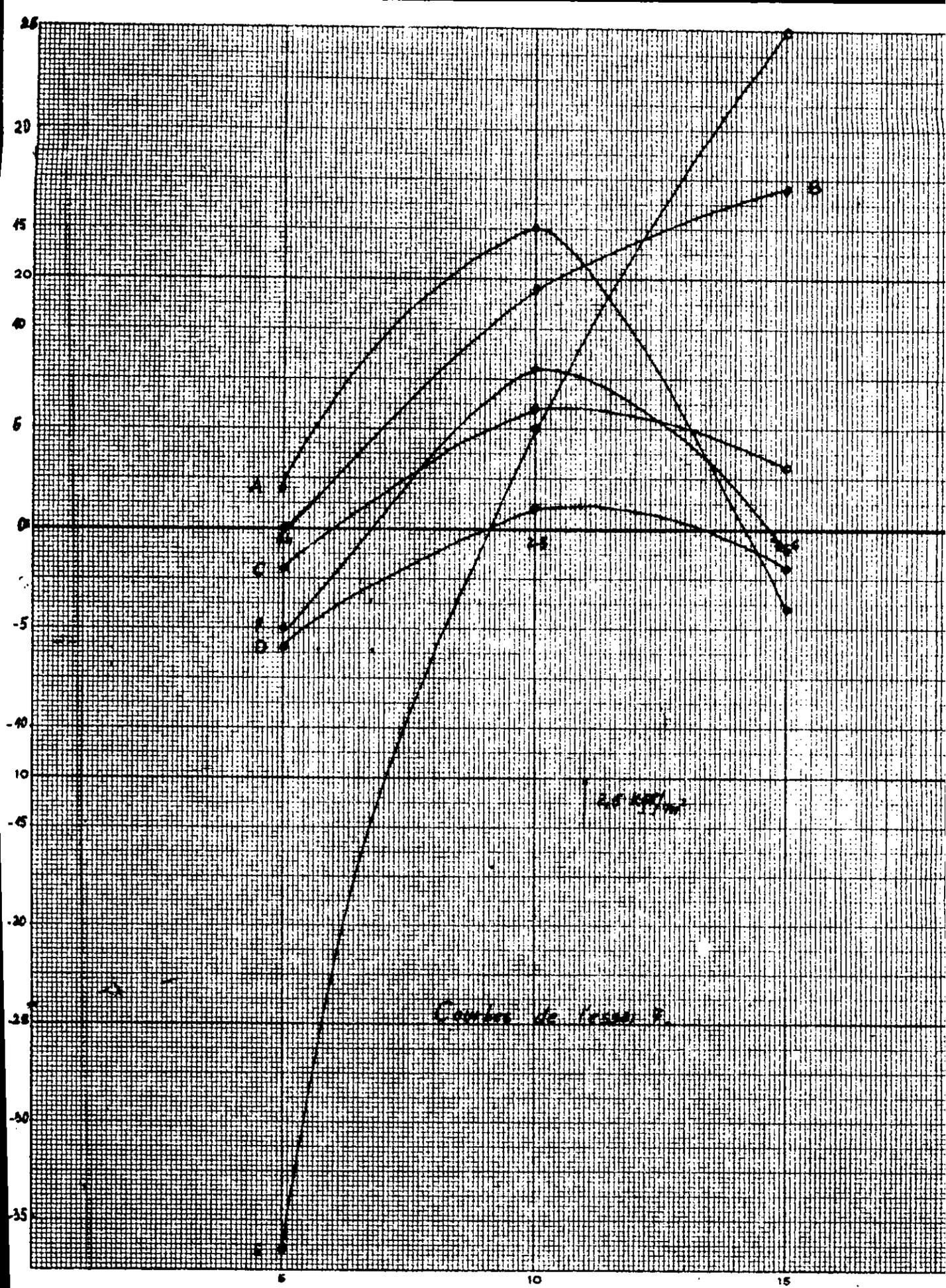
Héliostat à plusieurs glaces

$V = 20$  m/s

	1	2	3	4	5	6	1-4	2-5	3-6
A	505	352	338	515	424	319	10	72	-19
B	487	376	353	489	436	433	2	60	80
C	509	382	339	499	409	355	-10	27	16
D	500	390	344	469	387	332	-31	7	-12
E	510	385	345	337	471	464	-173	26	110
F	503	386	349	477	425	343	-23	39	-6

$\Delta H'$

	A	B	C	D	E	F
1-4	2	0	-2	-6	-36	-5
2-5	15	12	6	1	5	8
3-6	-4	17	3	-2	25	-1



25 1971

Cuerpo de Tesis P.

5

10

15

Essai : B

$\alpha = 30^\circ$  (site)  
 $\beta = 45^\circ$  (gisement)

Héliostat à plusieurs glaces.

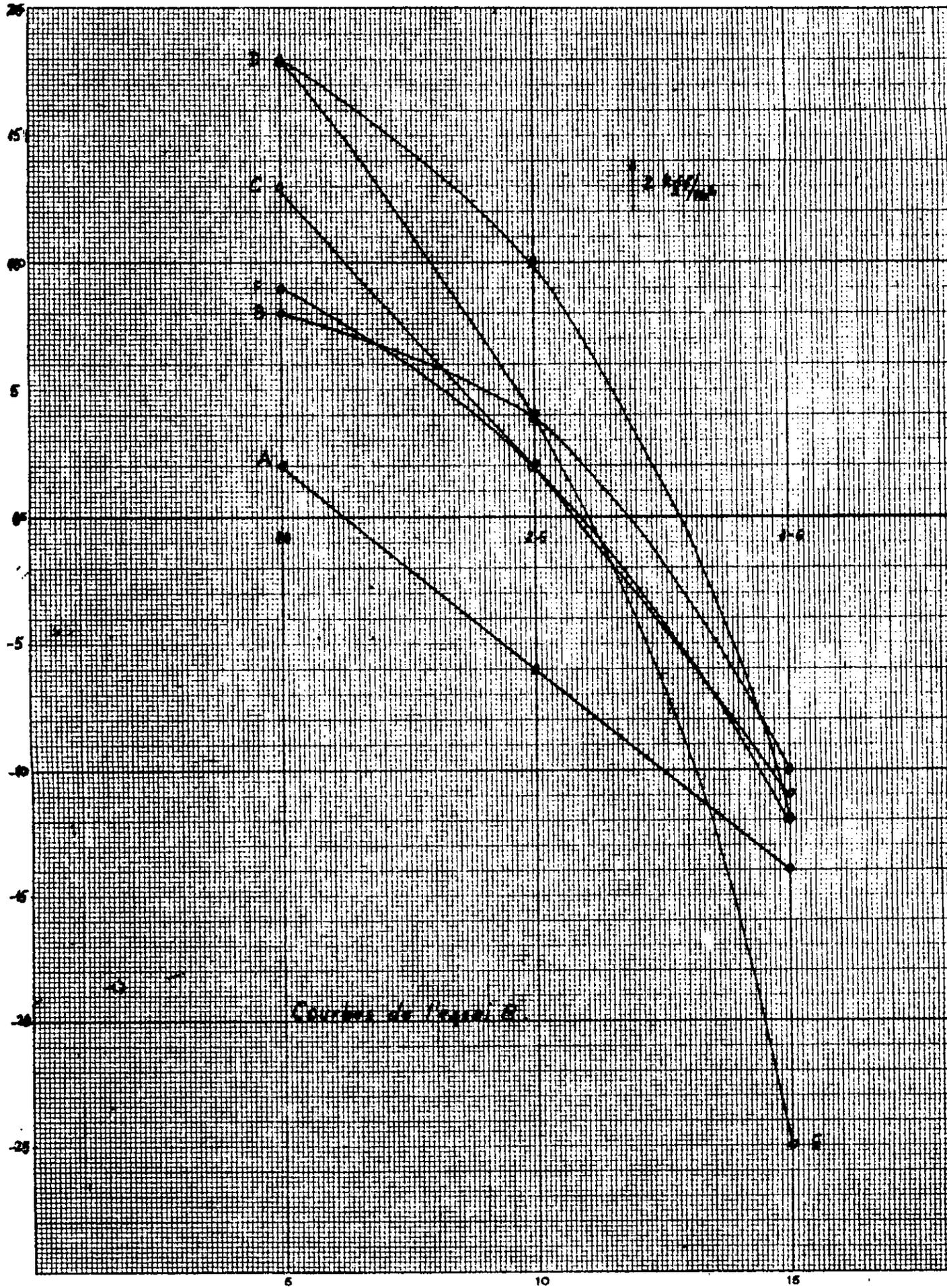
$V = 20$  m/s

$\Delta H$

	1	2	3	4	5	6	1-4	2-5	3-6
A	123	203	234	133	173	168	10	-30	-66
B	68	126	188	108	145	142	40	19	-46
C	54	137	198	115	148	144	61	11	-54
D	37	116	197	125	165	139	88	49	-58
E	48	104	182	134	122	64	86	18	-118
F	37	105	179	82	113	121	45	8	-58

$\Delta H'$

	A	B	C	D	E	F
1-4	2	8	13	18	18	9
2-5	-6	4	2	10	4	2
3-6	-14	-10	-11	-12	-25	-12



Essai : 9

$\Delta H$

$\alpha = 30^\circ$  (site)

$\beta = 0^\circ$  (gisement)

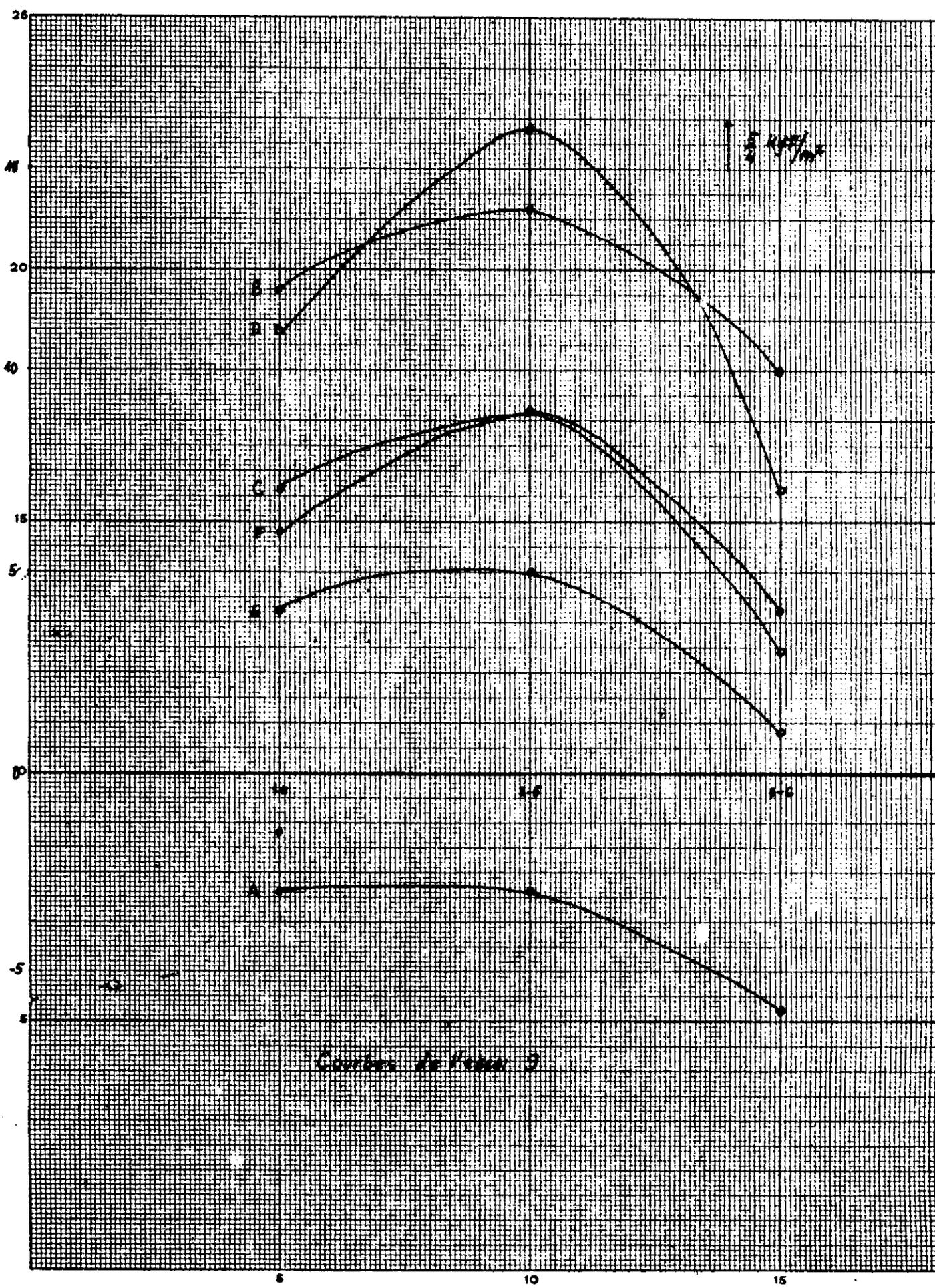
Héliostat à plusieurs glaces

$v = 20$  m/s

	1	2	3	4	5	6	1-4	2-5	3-6
A	99	96	117	84	82	88	-15	-14	-29
B	1	-9	12	60	58	58	59	67	46
C	58	44	78	92	86	92	84	42	14
D	42	18	65	87	94	97	55	76	32
E	39	16	43	57	42	50	18	26	7
F	24	0	39	53	45	59	29	45	20

$\Delta H'$

	A	B	C	D	E	F
1-4	-3	12	7	11	4	6
2-5	-3	14	9	16	5	9
3-6	-6	10	3	7	1	4



Essai : 10

$\Delta H$

$\alpha = 0^\circ$  (Site)

$\beta = 0^\circ$  (gisement)

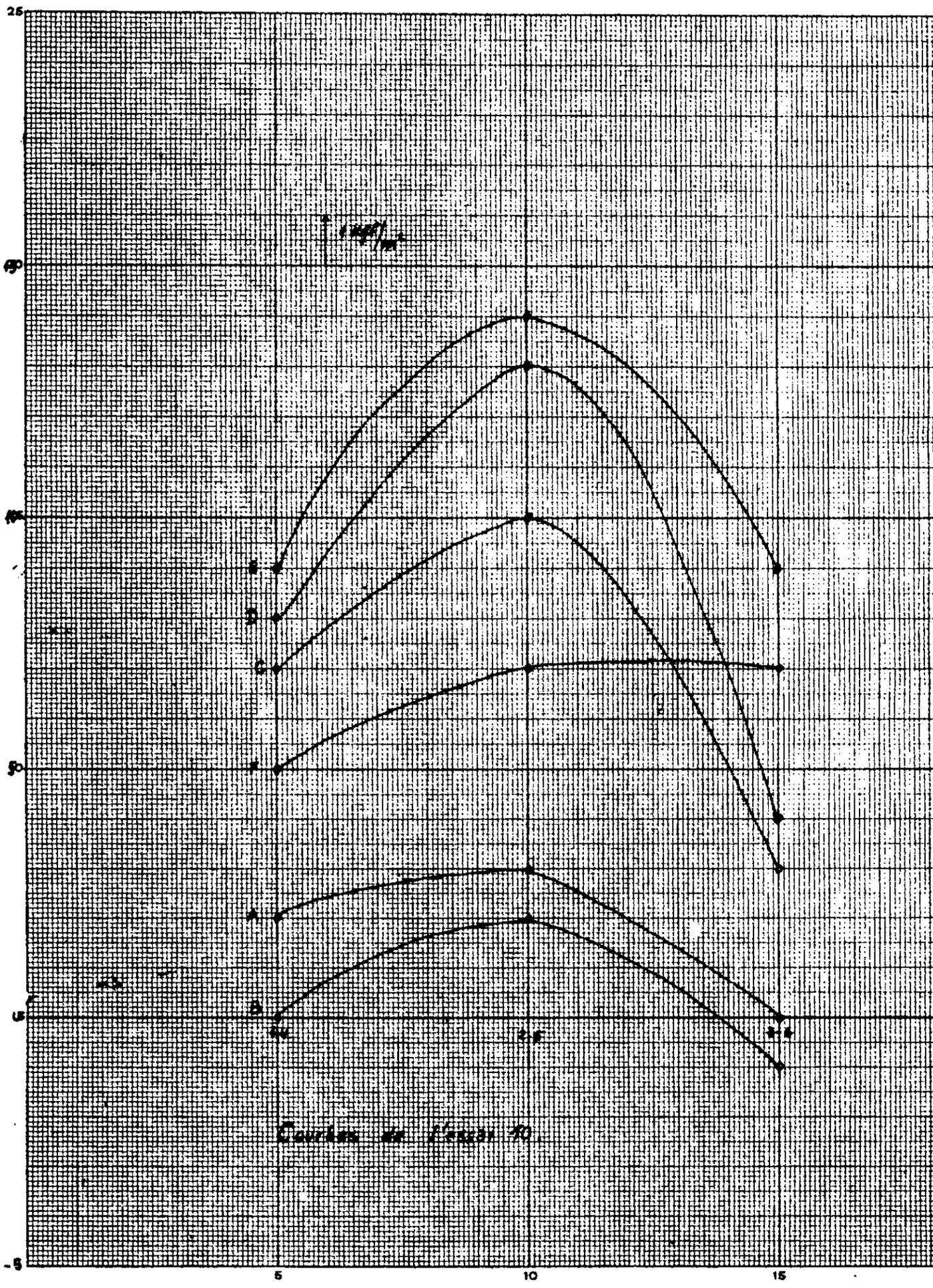
Héliostat à plusieurs glaces.

$V = 20$  m/s (Vent de face).

	1	2	3	4	5	6	1-4	2-5	3-6
A	2	-2	17	12	12	17	10	14	0
B	30	4	36	28	16	32	-2	12	-4
C	-12	-31	10	22	18	24	34	49	14
D	0	-29	18	38	32	36	38	61	18
E	10	-25	6	51	44	51	41	69	45
F	11	-8	5	36	24	38	25	32	33

$\Delta H'$

	A	B	C	D	E	F
1-4	2	0	7	8	9	5
2-5	3	2	10	13	14	7
3-6	0	-1	3	4	9	7



Essai: 11

$\alpha = 0^\circ$  (Site)  
 $\beta = 180^\circ$  (gisement)

Héliostat à plusieurs glaces

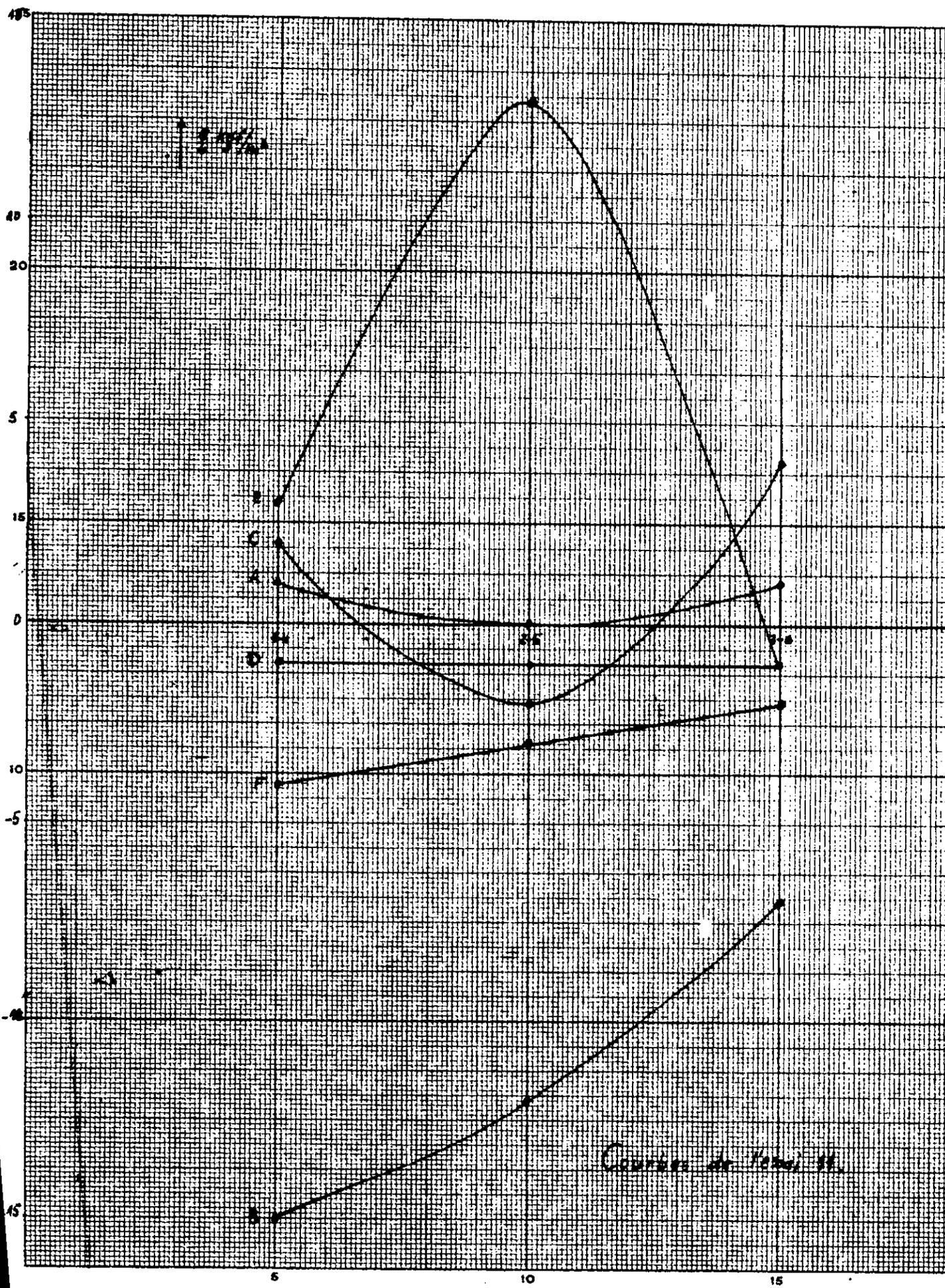
$\Delta H$

$V = 20$  m/s (Vent de dos)

	1	2	3	4	5	6	1-4	2-5	3-6
A	370	374	364	374	373	370	4	-1	6
B	516	499	475	445	440	440	-74	-59	-35
C	388	388	380	399	380	400	11	-8	20
D	403	385	430	400	380	424	-3	-5	-6
E	444	392	471	460	454	468	16	62	-3
F	478	459	504	460	446	448	-18	-13	-56

$\Delta H'$

	A	B	C	D	E	F
1-4	1	-15	2	-1	3	-4
2-5	0	-12	-2	-1	13	-3
3-6	1	-7	4	-4	-1	-12



Essai : 12

$\alpha = 30^\circ$  (Site)  
 $\beta = 180^\circ$  (gisement)

Héliostat à plusieurs glaces

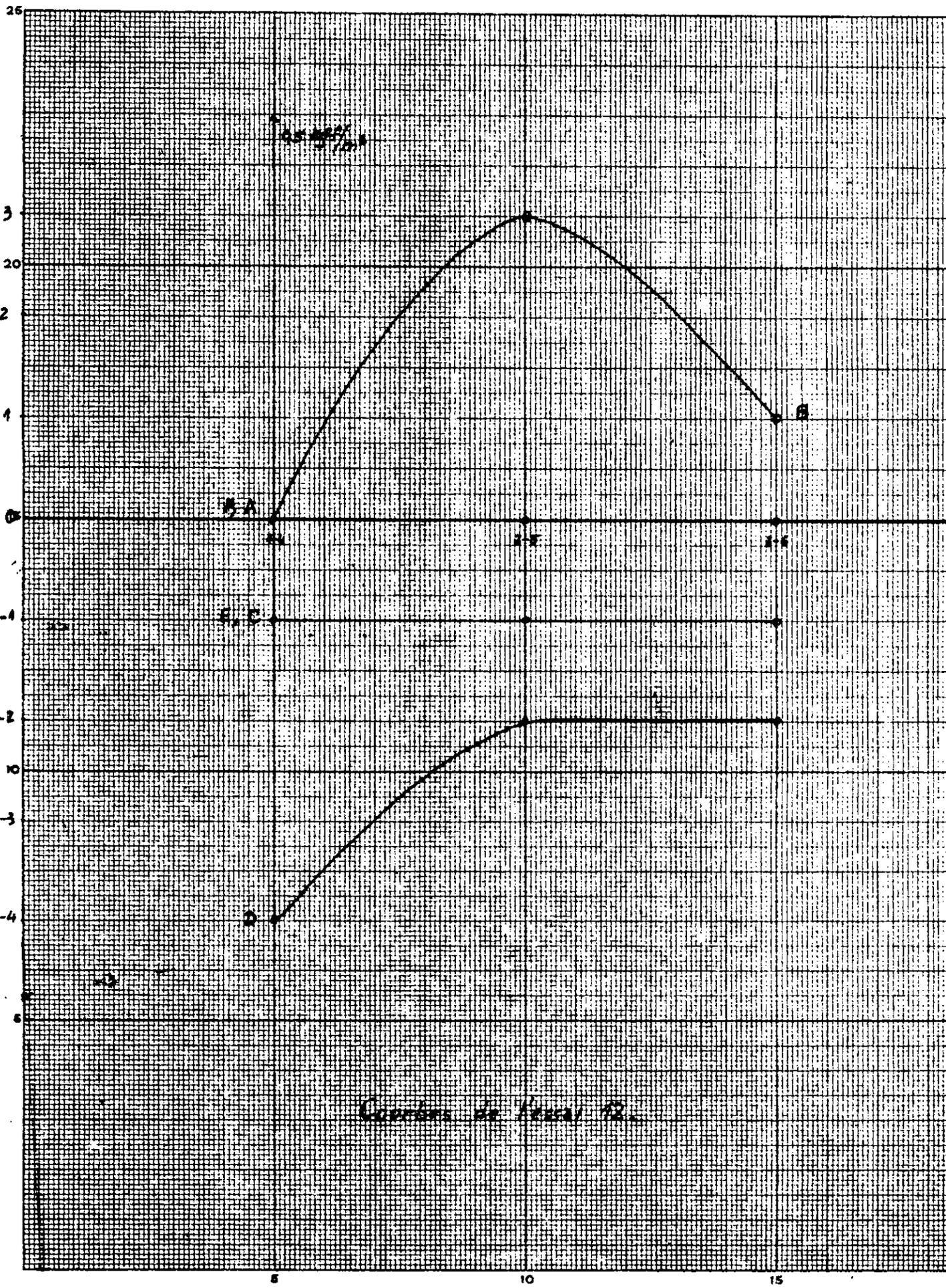
$\Delta H$

$V = 20$  m/s (Vent de dos).

	1	2	3	4	5	6	1-4	2-5	3-6
A	488	488	490	490	490	490	1	1	0
B	490	480	487	490	495	490	0	15	3
C	497	497	497	490	490	490	-7	-7	-7
D	510	503	503	492	492	492	-18	-11	-11
E	498	498	498	492	492	492	-6	-6	-6
F	492	492	492	492	492	492	0	0	0

$\Delta H'$

	A	B	C	D	E	F
1-4	0	0	-1	-4	-1	0
2-5	0	3	-1	-2	-1	0
3-6	0	1	-1	-2	-1	0



### III.4 Conclusion.

Nous remarquons que dans le cas d'un héliostat à glace unique les pressions sont nettement supérieures à celles relevées pour l'héliostat à plusieurs glaces. Cette différence est due au fait que dans le second cas les intervalles entre les miroirs permettent un équilibre de pressions entre les faces avant et arrière.

Cet essai confirme l'option qu'on a prise en concevant un héliostat à plusieurs glaces.

## CONCLUSION

---

La conception d'un concentrateur solaire dépend du flux d'énergie que l'on désire au foyer, donc de son utilisation.

Messieurs Damerdji et El-Ghandour nous ont demandé d'utiliser des miroirs plans de 250 mm de côté comme surface réfléchissante, aussi bien dans le concentrateur que dans les héliostats. Nous avons vu que cela nous a imposé une tache focale de 231,4 mm de diamètre et un flux moyen dans la tache de densité maximum de 4,7 Kw.

Nous avons été amenés dans ce travail à résoudre plusieurs types de problèmes :

- Astronomiques pour déterminer les facteurs géométriques d'implantation de l'installation.
- Energétiques pour prévoir la taille de la tache focale et le flux qu'elle reçoit ; pour faire un choix entre un héliostat unique ou un champ d'héliostats.
- Electroniques pour définir, avec une précision de 2%, le flux au foyer durant la poursuite du soleil par les héliostats ; ceci nous a conduit à proposer un modèle de collimateur associant dans un même tube les cellules de contrôle et les cellules de raccrochage. La stabilité de l'asservissement est assurée par un variateur électronique de vitesse.

- Mécanique : adoption et calcul d'un bâti du concentrateur en fonction de la forme des miroirs élémentaires. Utilisation des résultats expérimentaux en soufflerie pour le calcul de la puissance des moteurs de l'héliostat.

Il est évident que plusieurs des solutions que nous avons adoptées peuvent être améliorées ou optimisées. Nous pensons que ce premier pas que nous avons accompli à la Station de l'Energie Solaire de Bouzaréah pourra faciliter la tâche des chercheurs qui nous succéderont.

BIBLIOGRAPHIE

-----

- Solar Energy April - July 1957
- Solar Energy July - October 1958
- Elements de construction mécanique Tome I
- Lenormand  
Mémento de dessin industriel
- F. Cabanne et A. Le Phat - Vinh  
Calcul de la répartition de l'énergie solaire réfléchi  
par un miroir parabolique.
- A. Le Phat - Vinh  
Contribution à l'étude de la répartition de l'énergie au  
foyer d'un miroir parabolique.
- Timoshenko  
Résistance des matériaux.
- Courbon  
Résistance des matériaux.
- J.P. Rey  
Pyromètre sans inertie à cellule photo-électrique  
CNRS Mont-Louis 1958

-M. Terry

La mesure des températures -- Paris 1962

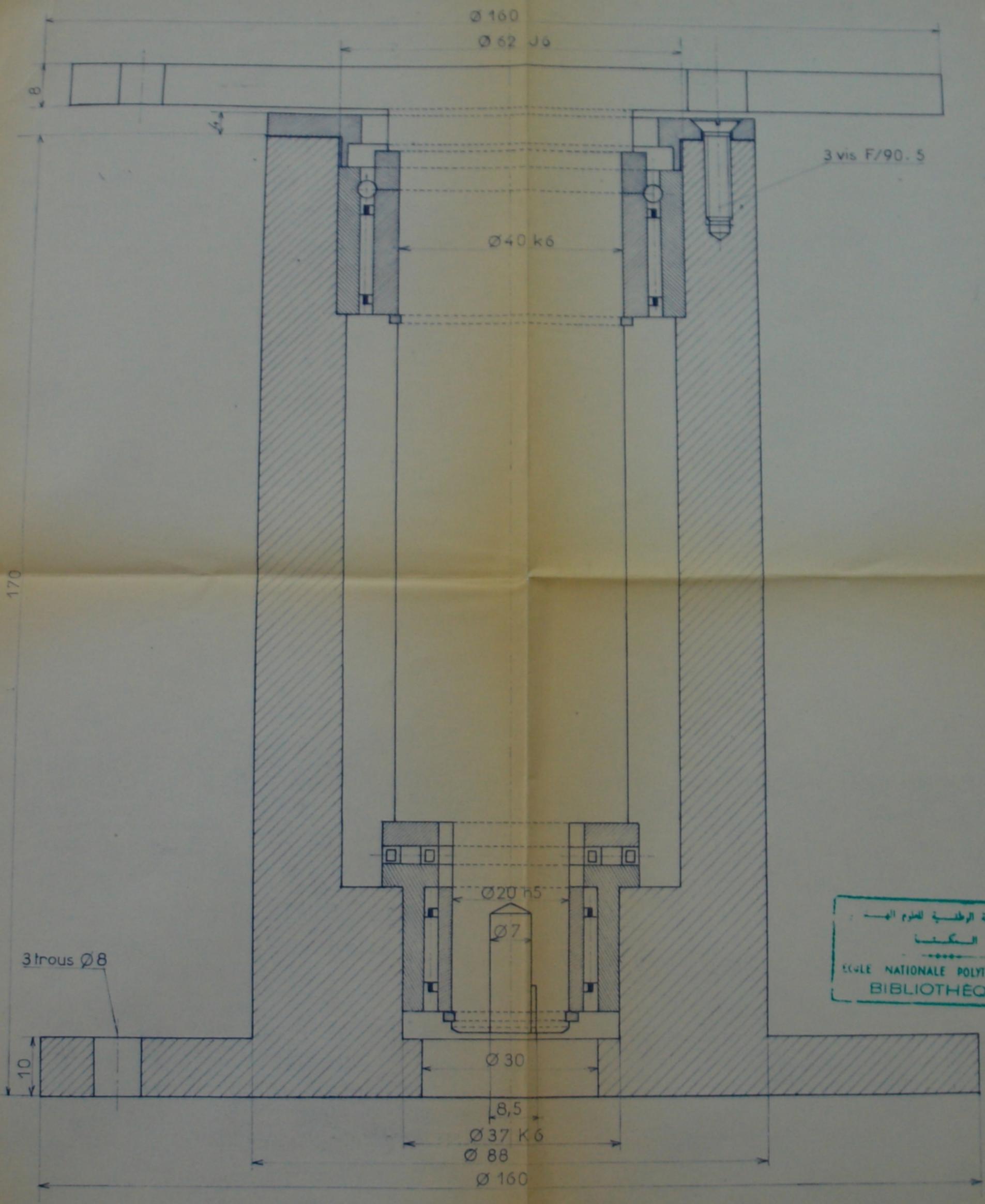
- New Sources of Energy

Proceeding of the conference.

Augustus 1961 - Volume 6

- Notes on the performances design of parabolic solar furnace.

Journal of Solar Energy, Volume 1 n° 1 1957



3 vis F/90.5

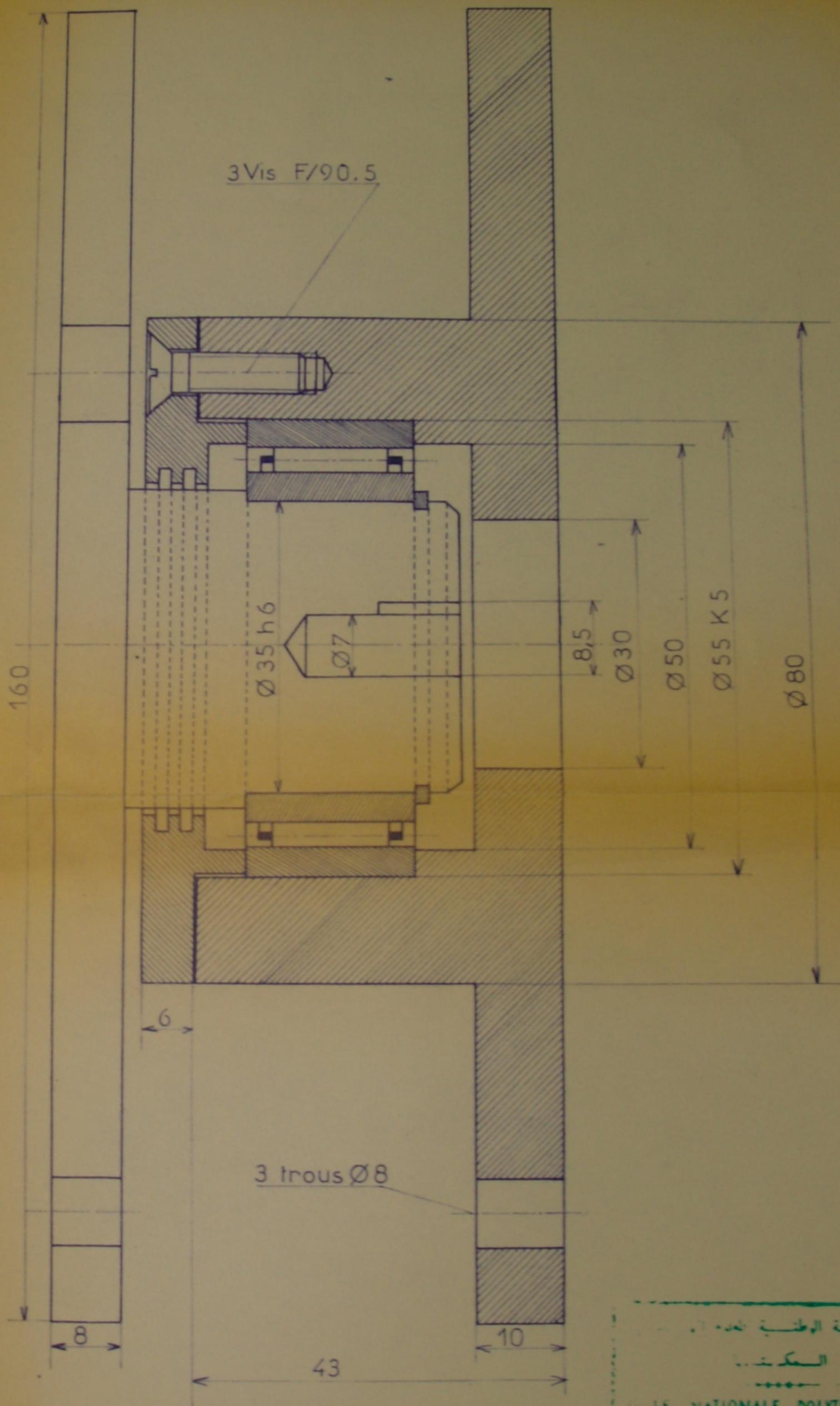
3 trous Ø8

الخدمة الوطنية للعلوم  
الكتاب  
.....  
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHEQUE

PM003177

- 1 -

ECOLE POLYTECHNIQUE D'ALGER	
AXE DE ROTATION	Echelle: 2
GISEMENT	Janvier 1977
BENFARHAT. SMATI.YOUSFI	N°9
	AZOUZ. MANI



3 Vis F/90.5

160

Ø 35 h6

Ø 7

8,5

Ø 30

Ø 50

Ø 55 K5

Ø 80

6

3 trous Ø8

8

10

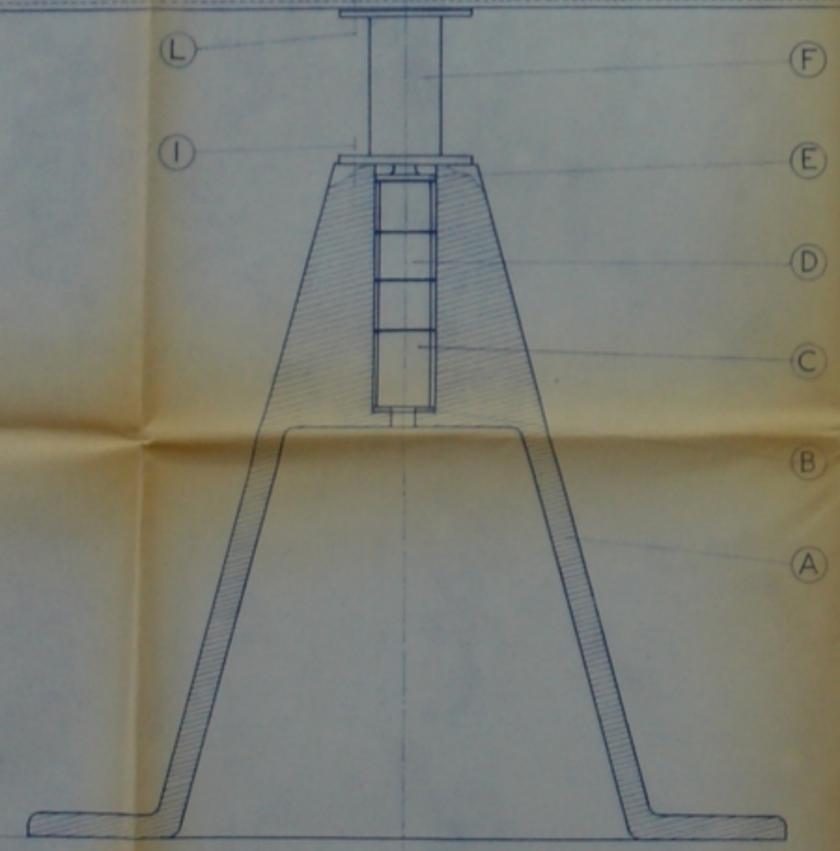
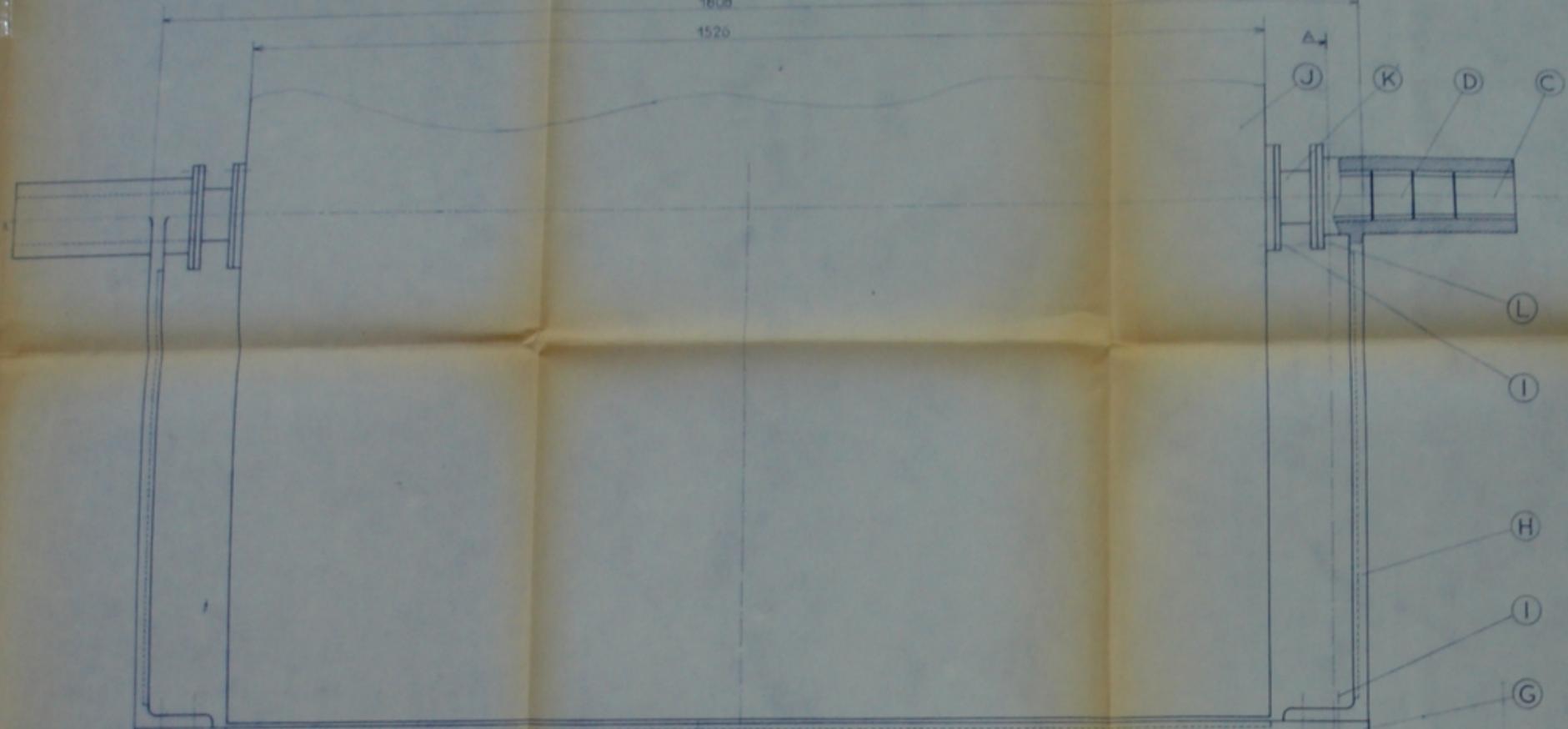
43

مدرسة الوطنية للعلوم والتقنية  
 المكتبة  
 ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
 BIBLIOTHÈQUE

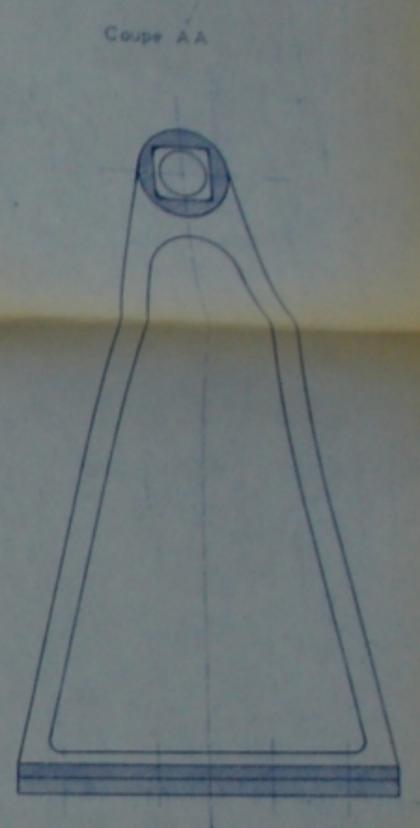
PM 003177

-2-

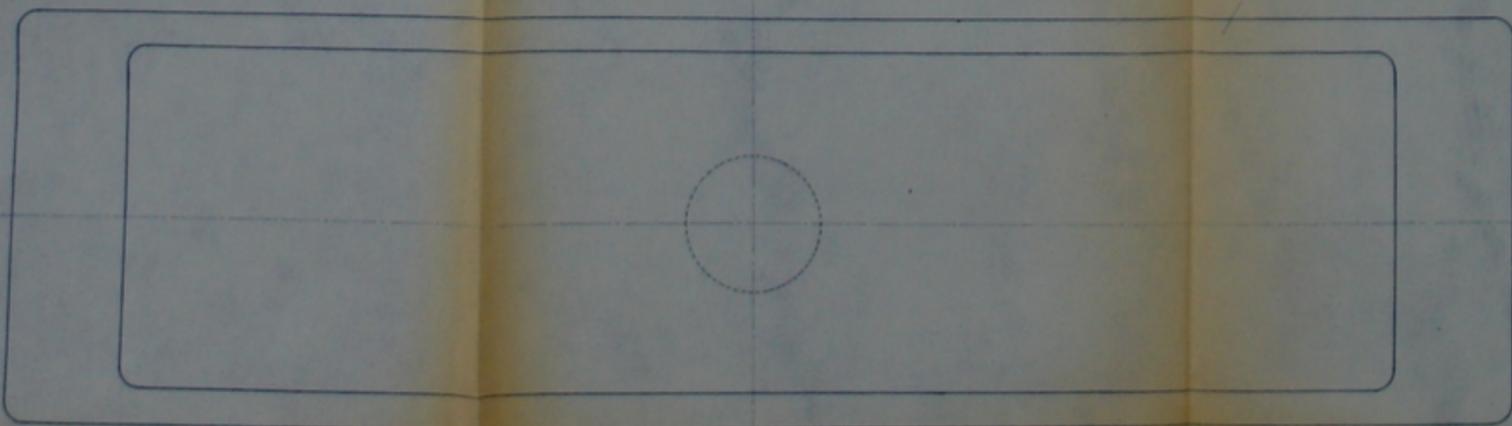
ÉCOLE POLYTECHNIQUE D'ALGER	
AXE DE ROTATION	Echelle: 2
SITE	N°8 Janvier 1977
BENFARHAT. SMATLYOUSFI	AZOUZ. MANDI



Vue de dessus de G

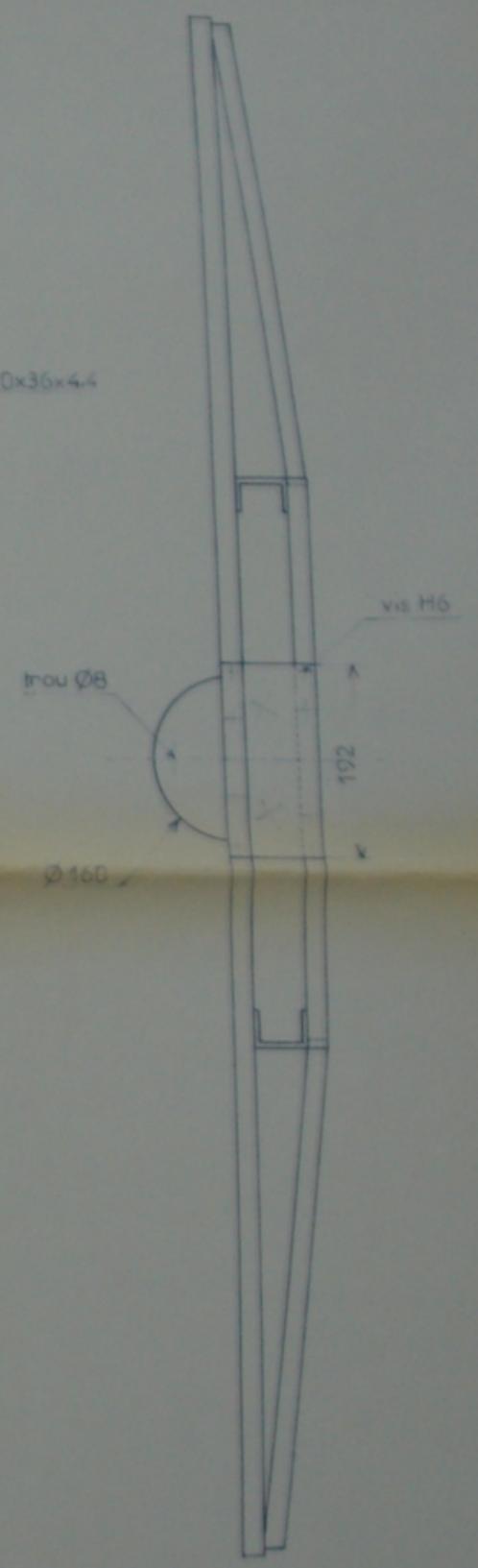
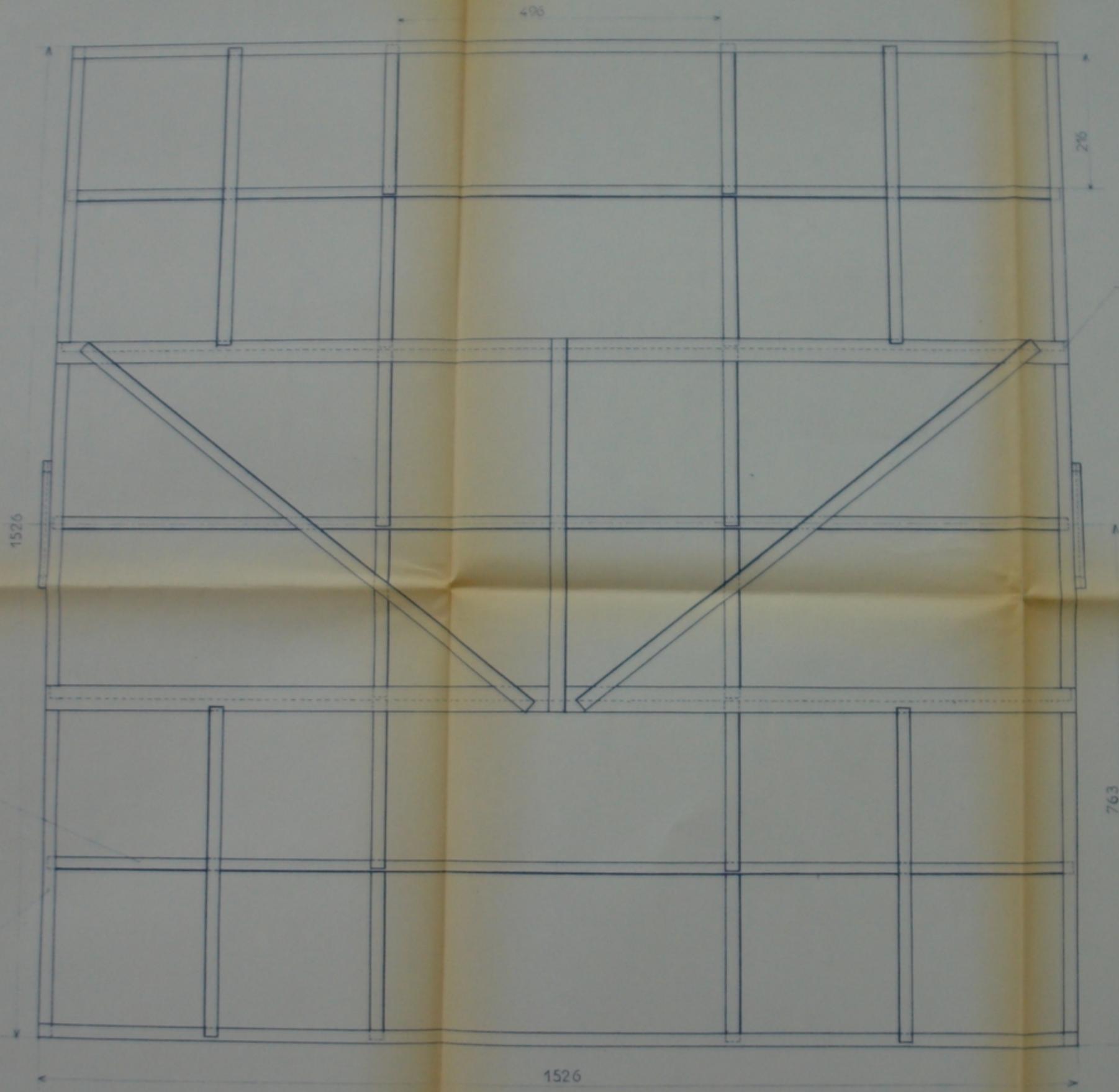


المعهد الوطني للعلوم الهندسية  
البيزنطية  
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHEQUE



Pr 7002177  
-3-

Rp/nb	Désignation	Matériau	Quantité	Observations
L 9	Boylon H6	Acier		
K 2	axe de rotation sûre	Acier		
J 1	support de glaces	Acier		
I 25	Vis H6	Acier		
H 2	Montant	Fonte		
G 1	Semelle	Fonte		
F 1	axe d'rotation gisement	Acier		
E 2	Flasque	Acier		
D 6	Reducteur			
C 2	Moteur			
B 1	Rondelle	Caoutchouc		
A 1	Bati	Fonte		
ECOLE POLYTECHNIQUE D'ALGER				
HELIOSTAT			N°7	Echelle 1/4
BENFARHAT, SMATI, YOUSFI				Janvier 1977
				AZOUZ, MAMEI



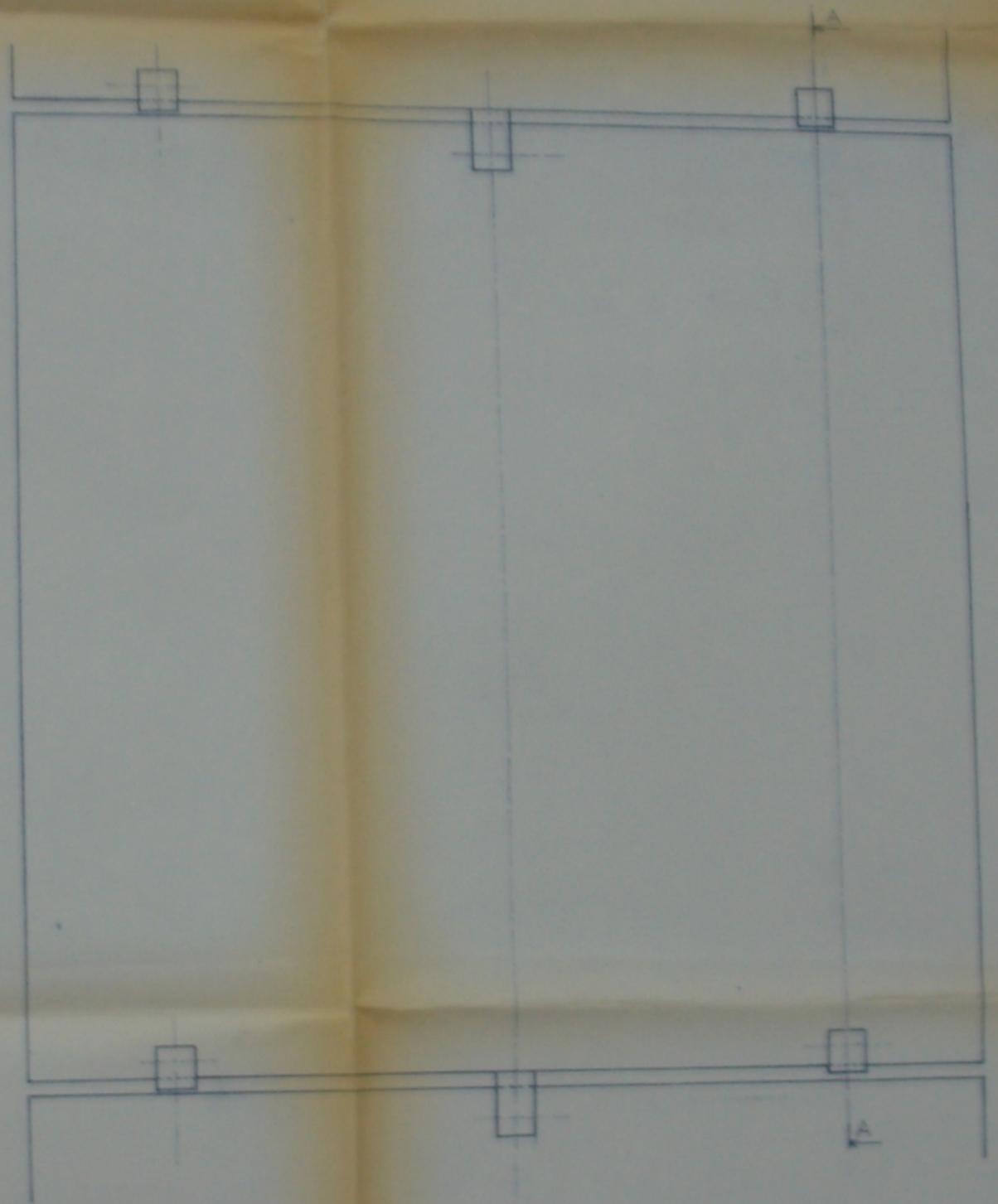
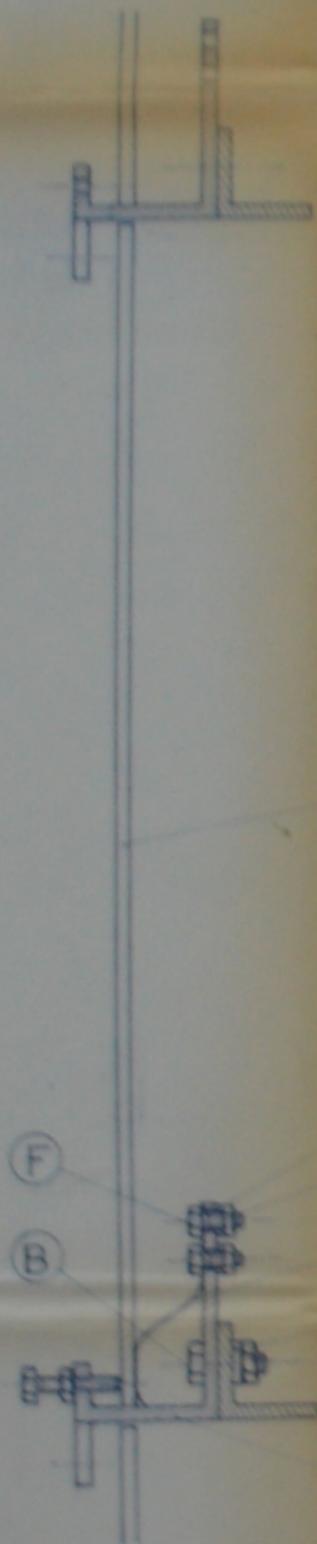
L 20x20x3  
L 20x20x3

L 50x36x4.4

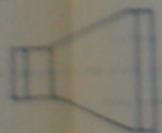
المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية  
البيضاء  
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHEQUE

Pr 1003177  
- 4 -

ECOLE POLYTECHNIQUE D'ALGER  
SUPPORT DE GLACES  
BENFARHAT, SMATI, YOUSFI  
N°6 Echelle: 1/4  
Janvier 1977  
AZOUZ MANSOUR



Vue de dessus de 1



جامعة الجزائر  
 المكتبة  
 ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
 BIBLIOTHÈQUE

ملاحظات  
 5-

Qté	Désignation	Matériau	Remarques
I 1	Glace	Vitre	
H 9	Rondelle	Acier	
G 9	Ecrou H3	Acier	
F 9	Boulon H3	Acier	
E 3	Lame	Acier	
D 6	Rondelle	Acier	
C 6	Ecrou H4	Acier	
B 6	Boulon H4	Acier	
A 1	Cornière	Acier	20x20x3

ÉCOLE POLYTECHNIQUE D'ALGER  
 Echelle: 1  
 Janvier 1977  
 RENFARHAT SMATLYOUSFI

Vue de derrière du bâti  
sur le plan incliné  
Nomenclature voir planche n° 2

N14  
D. TROU  
BENJAMIN  
STATI  
YOUSFI  
1977

الجامعة التونسية للعلوم الهندسية  
التقنية  
الوطنية  
LE GUYE NATIONAL POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHÈQUE

2872

928

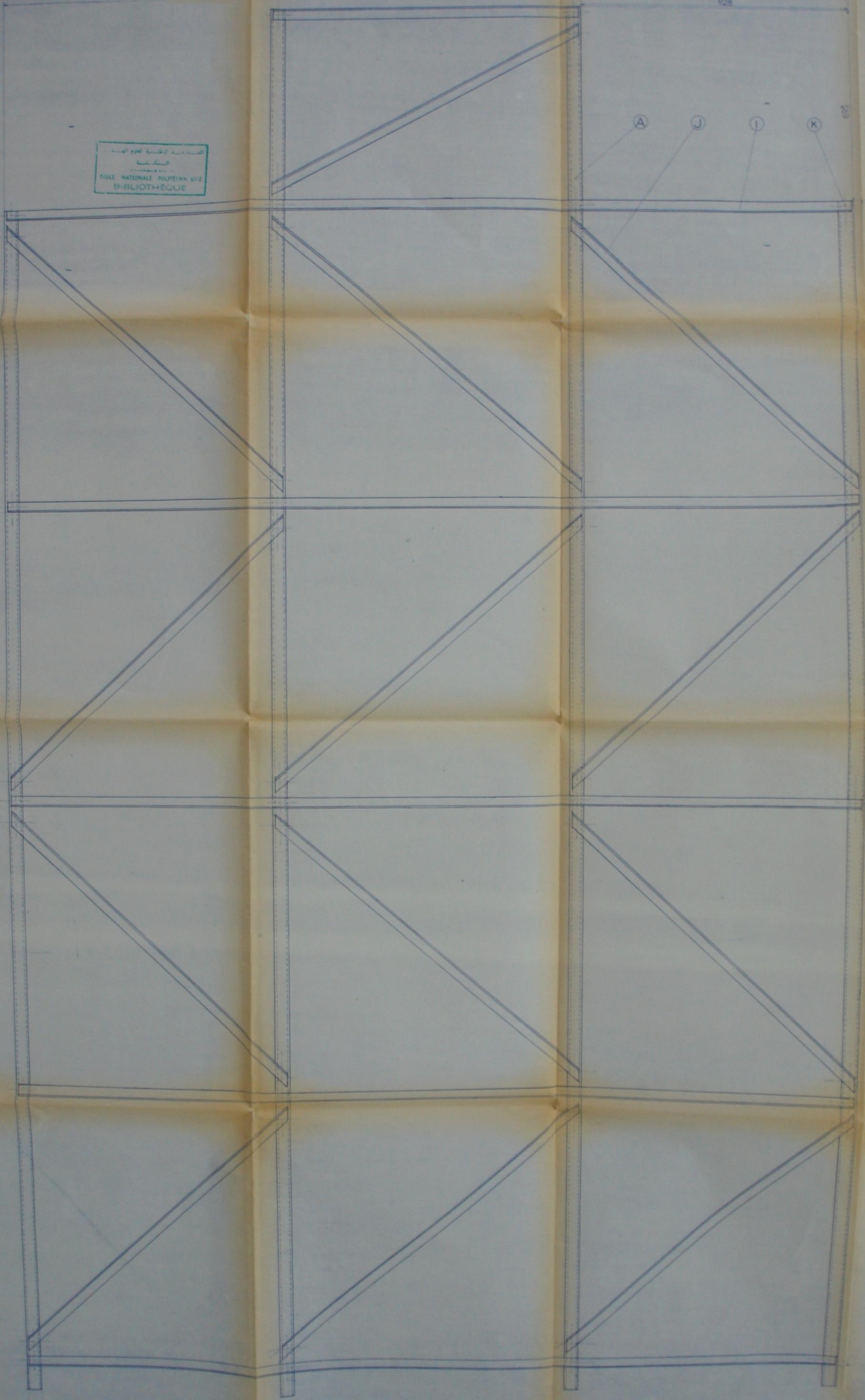
695

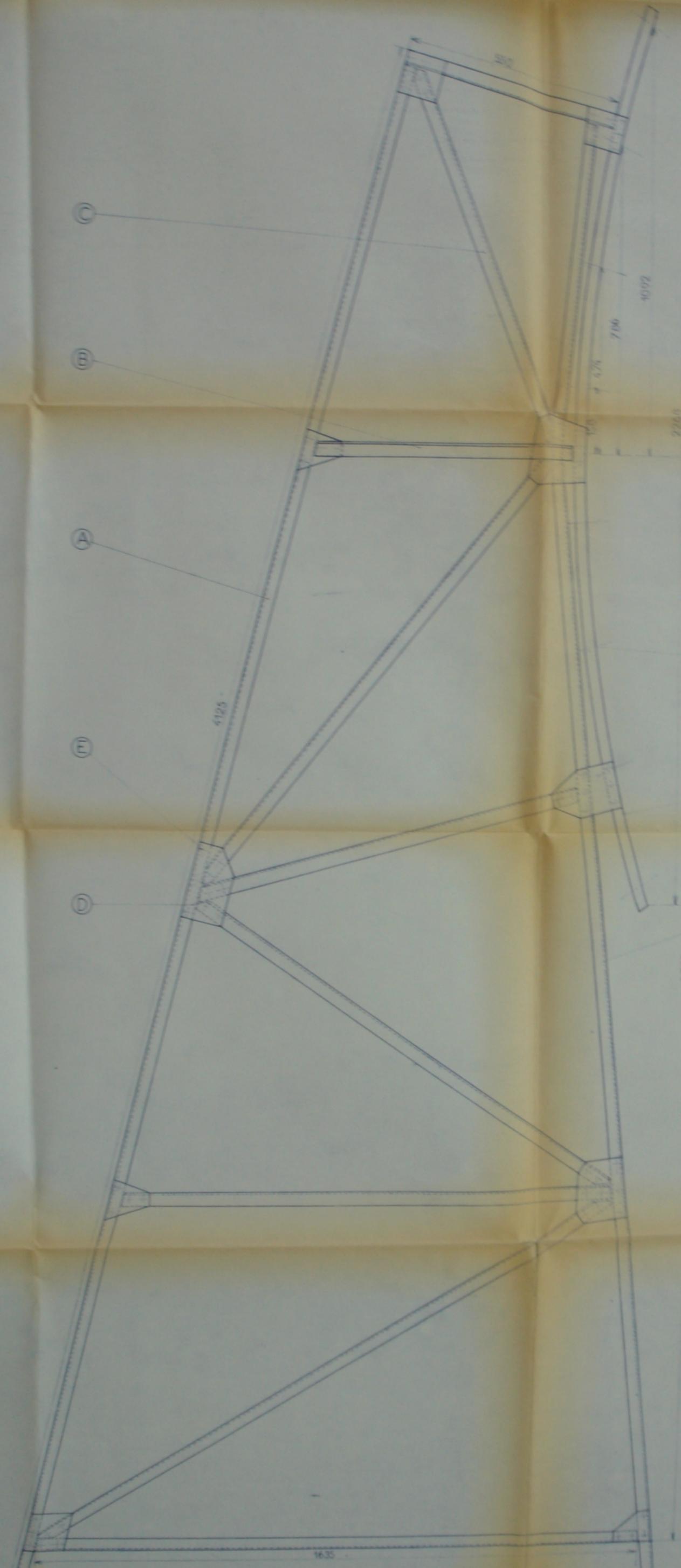
A

J

I

K

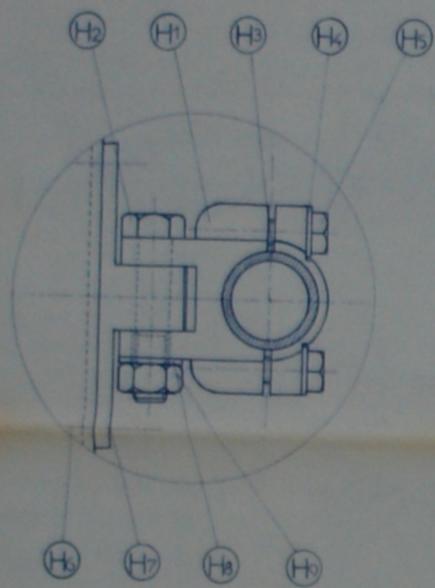




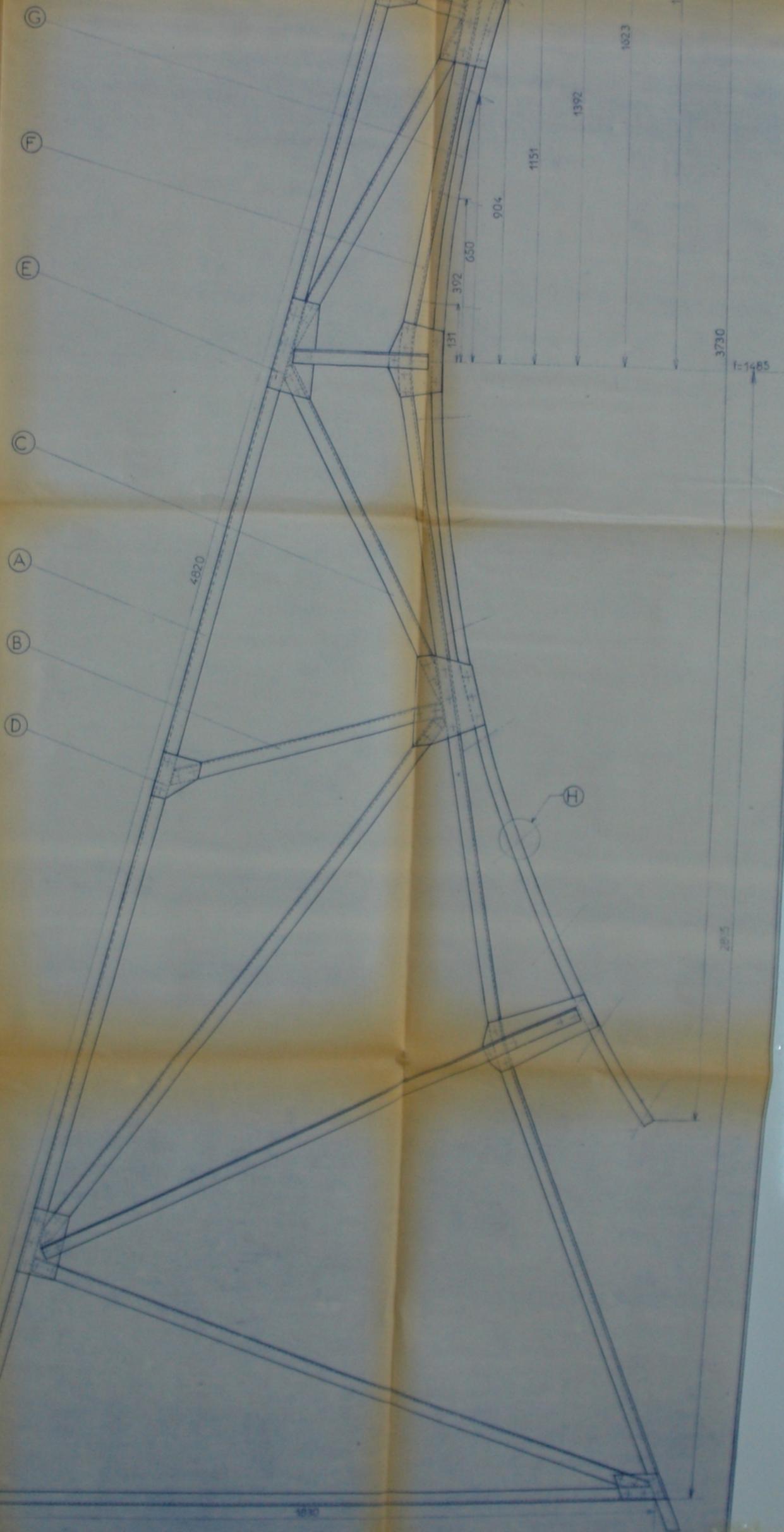
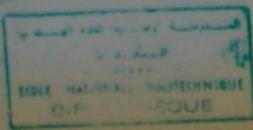
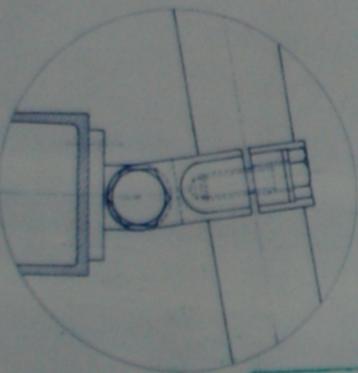
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE  
 D'INGÉNIEURS  
 D'ALGER

H	8	Support de tube	AS 13	
G	1	Semelle	AU40M	L 150x30x4
F	1	Semelle	AU40M	L 150x30x4
E	75	Rivet	AU40M	Ø: 8
D	10	Coxart	AU40M	Ø: 4
C	4	Diagonale	AU40M	L 30x30x3
B	5	Morant	AU40M	L 30x30x3
A	1	Semelle	AU40M	L 150x30x4
N° de		Désignation	Marque	Notes
<b>ÉCOLE POLYTECHNIQUE D'ALGER</b> (N°) Echelle 1/5 <b>CONSOLE</b> Janvier 19...				
BENFARHAT. SMATI-YOUSF				

Support de tube  
Echelle 1



Vue de dessus



K	48	Rivet	AU4GM	$\varnothing = 6$
J	13	Diagonale	AU4GM	L 36x36x3
I	6	Montant	AU4GM	L 36x36x3
H <sub>9</sub>	1	Ecrou H <sub>9</sub> 10	Acier	
H <sub>8</sub>	1	Rondelle	Acier	
H <sub>7</sub>	4	Boulon H4	Acier	
H <sub>6</sub>	4	Ecrou H <sub>6</sub> 4	Acier	
H <sub>5</sub>	2	Vis H5	Acier	
H <sub>4</sub>	2	Rondelle	Acier	
H <sub>3</sub>	1	Tube	UZ 10	30x24
H <sub>2</sub>	1	Boulon H10	Acier	
H <sub>1</sub>	1	Corps	AS 13	
H	16	Support de tube	AS 13	
G	1	Semelle	AU4GM	L 50x32x44
F	1	Semelle	AU4GM	L 50x32x44
E	88	Rivet	AU4GM	$\varnothing = 6$
D	13	Goussier	AU4GM	e = 4
C	5	Diagonale	AU4GM	L 36x3x3
B	6	Montant	AU4GM	L 36x36x3
A	1	Semelle	AU4GM	L 50x36x44
Ref		Désignation	Matériau	Massé
Ecole Polytechnique d'Algèr				
Echelle 1/5 N°2				
Janvier 1977				
BENFARHAT SMATI YOUSFI				



