

UNIVERSITE DE DAKAR

FACULTE DES SCIENCES

Laboratoire des Semi-Conducteurs et Energie Solaire

Rapport de Stage en vue de l'obtention du

DIPLÔME D'ETUDES APPROFONDIES EN

ENERGIE SOLAIRE

ETUDE ET REALISATION D'UN

SUIVEUR SOLAIRE

Présenté par

Roger ZOGBI

Maitre es-Sciences



Soutenu le 24 Février 1983 devant la commission d'examen

	D. LAPLAZE	Président
Jury	G.W. COHEN SOLAL	Assesseurs
	D. FALL	
	M. CADENE	Invités
	R. REISS	

A mon père  
A ma mère  
qu'ils reposent en paix

## AVANT - PROPOS

Que Monsieur Daniel LAPLAZE, veuille accepter ma vive reconnaissance pour m'avoir accueilli au Laboratoire des semi-conducteurs et Energie Solaire de la Faculté des Sciences de Dakar ; qu'il soit remercié de toute l'aide qu'il m'a apportée à la réalisation de ce travail et d'avoir accepté la présidence du jury.

Je remercie également Messieurs G.W. COHEN-SOLAL et D. FALL de me faire l'honneur d'être membres du jury.

Mes remerciements vont aussi à Monsieur R. REISS qui, lorsque j'ai repris mes études supérieures après 8 années d'interruption, a su m'encourager.

Je ne peux oublier Monsieur M. CADENE qui, de Montpellier, à fait faire la partie mécanique de ce suiveur , qu'il en soit remercié.

Ma reconnaissance va aussi aux dirigeants de l'ORSTOM, notamment Messieurs C. MONNET et B. DALMAYRAC qui m'ont tour à tour soutenu pour l'accomplissement de ce travail.

Je dois aussi remercier dans cette page tous ceux qui m'ont aidé à la réalisation de ce mémoire, notamment Monsieur P. SOSSOU qui a fait la frappe.

# S O M M A I R E

## Introduction -

### Chapitre I : Le gisement solaire

- I - Le rayonnement solaire
- II - Mouvement apparent du soleil
- III - Variation du flux solaire
- IV - Le gisement solaire
- V - Les mesures du rayonnement solaire

### Chapitre II - Etude des différents systèmes de poursuite

- I - Suiveur commandé par un moteur synchrone
- II - Suiveur commandé par un moteur asynchrone et assisté par un ordinateur
- III - Suiveur commandé uniquement par un programme mis sur ordinateur
- IV - Suiveur asservi uniquement par un système opto-électronique
- V - Suiveur thermo-hydro-dynamique

### Chapitre III - Description du suiveur solaire

#### Principe de Base - Description du prototype

- I - Description du dispositif mécanique
- II - Ensemble électronique de détection et commande de moteur.
- III - Electronique auxiliaire

### Tests et conclusions

#### Annexe I - Calcul de l'angle

#### Annexe II - Rappel sur les semi-conducteurs

#### Annexe III - Calcul de la précision de visée

#### Bibliographie

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

En 1881, Camille FLAMARION, astronome français, en parlant du soleil a dit : "la force silencieusement dispensée pour élever les réservoirs de pluie... pour fixer le carbone des plantes, pour donner à la nature terrestre sa vigueur et sa beauté, a pu être évaluée à 217 milliards 316 millions de chevaux vapeurs ! Voilà le travail permanent du Soleil sur la Terre".

Depuis, les connaissances ont évolué et on sait aujourd'hui capter artificiellement l'énergie solaire. Pour cela l'homme a copié la nature et l'utilisation artificielle de l'énergie solaire se fait actuellement selon trois processus :

- La conversion photothermique qui transforme le rayonnement en chaleur utilisable de diverses manières (1) (moteurs thermiques, fours, chauffe-eau...).
- La conversion photovoltaïque qui transforme directement le rayonnement en courant électrique continu (2).
- La conversion photochimique qui permet par la déformation des molécules de stocker l'énergie thermique, ou de réaliser des piles photoélectrochimiques ou encore de réaliser la photolyse de l'eau donnant ainsi de l'hydrogène (3,4).

Pour chacune de ces filières, l'énergie reçue et transformée est bien sûr proportionnelle à la surface des capteurs et il paraît évident qu'en maintenant les capteurs perpendiculaires au rayonnement direct on augmentera l'énergie captée au cours de la journée.

On a montré (5) dans le cas des capteurs plans photovoltaïques que l'on avait un gain moyen de 20 % par rapport à un capteur horizontal si on maintenait le capteur perpendiculaire au rayonnement solaire.

Des capteurs plus sophistiqués que les capteurs plans ont vu le jour aussi bien dans la filière thermique que photovoltaïque. Ce sont les capteurs à concentration. Dans la majorité des cas (6), il est indispensable de prévoir un dispositif de poursuite du soleil.

Le but de ce travail est la réalisation d'un suiveur solaire qui doit répondre aux trois objectifs suivants :

- Possibilité de mesures du rayonnement direct et la composition spectrale pour préciser le gisement solaire, notamment en Afrique où les stations de mesure sont peu nombreuses.
- Possibilité d'évaluation des effets climatiques sur les systèmes à concentration (Effet des brumes sèches qui produisent une lumière diffuse importante qui risque de limiter l'intérêt des dispositifs à concentration.)
- Possibilité de pilotage d'une station de capteurs plans ou à concentration.

Cependant, si pour les deux premiers objectifs "de recherche scientifique" le prix de revient d'un suiveur solaire n'est pas déterminant, pour le 3ème objectif par contre, il faut comparer l'augmentation du coût de l'installation à l'augmentation de la production d'énergie.

Les idées de base qui ont justifié le montage réalisé sont d'une part, le faible coût de l'appareil et d'autre part une fiabilité et une précision suffisante pour les mesures de laboratoire. Les problèmes de maintenance ont été également pris en compte et nous avons cherché à n'utiliser que du matériel standard.

Dans le premier chapitre, après avoir rappelé les principales propriétés du rayonnement solaire, nous donnerons quelques méthodes permettant de définir le gisement solaire pour un site déterminé. Le chapitre II sera consacré à l'étude des principes des différents suiveurs utilisés jusqu'à présent.

Le système que nous proposons, ainsi que sa réalisation est décrit dans le chapitre III et la dernière partie de ce mémoire résumera les performances et les applications possibles de l'appareil en mettant en évidence aussi bien sa fiabilité que sa mise en oeuvre très simple.

## - CHAPITRE I -

Le gisement solaire

Pour toute application de l'énergie solaire, il est indispensable de connaître de façon détaillée les caractéristiques de l'ensoleillement et du rayonnement sur le site géographique choisi. Ces caractéristiques qui constituent le gisement solaire peuvent être déduites des mesures régulières effectuées pendant plusieurs années par une station météorologique locale. Dans le cas où il n'existe pas de telles stations on peut extrapoler les mesures de stations voisines en utilisant une méthode de calcul fondée sur des corrélations statistiques (1). Les difficultés majeures des mesures du rayonnement solaire proviennent à la fois des fluctuations climatiques et du mouvement apparent du soleil au lieu d'observation. Certaines mesures, réalisées de façon continue nécessitent l'utilisation d'un suiveur solaire de même que toutes les installations à concentration (7). Il est donc important de bien connaître les lois qui régissent ce mouvement apparent et de voir leurs influences sur le rayonnement utilisable au sol.

I - Le Rayonnement Solaire

Le soleil est une sphère incandescente de plasma dont la température apparente en surface est de l'ordre de 5700°K. Son diamètre angulaire est d'environ 30 minutes d'angle (variable de 31,5" à 32,6") (8) ce qui correspond à un diamètre de 1,39 millions de km, la distance moyenne entre la terre et le soleil étant de 150 millions de km.

En première approximation, le soleil rayonne comme un corps noir suivant la loi de Plank et la distribution spectrale s'exprime en fonction de la fréquence  $\nu$  par.

$$B_{\nu}(T) = \frac{2 h \nu^3}{c^2} \left[ \text{Exp} \left( \frac{h\nu}{kT} - 1 \right) \right]^{-1}$$

ou de la longueur d'onde  $\lambda = \frac{c}{\nu}$

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2 h c^2}{5} \left[ \text{Exp} \frac{1,55 \cdot 10^{-2}}{T} - 1 \right]^{-1}$$

ou  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  J.s. : constante de Plank

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  J/degré : constante de Boltzman

$c = 3 \cdot 10^8$  m/s : célérité de la lumière

$T$  : Température en Kelvin.

Les mesures effectuées par satellite à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (9) confirment ces hypothèses et la figure 1 met en évidence les légères différences entre le spectre solaire et celui du corps noir à 5700 K. Les écarts les plus importants se situent dans le domaine des rayonnements U.V.,  $\gamma$  et X.

La repartition de l'énergie solaire dans les 3 bandes du spectre de rayonnement thermique est donnée dans le tableau I.

On peut estimer que le flux moyen reçu par 1 m<sup>2</sup> de surface perpendiculaire au rayonnement, à la limite de l'atmosphère terrestre est de  $I_0 = 1352 \text{ w/m}^2$  (1). Cette quantité s'appelle la constante solaire.

Tableau 1 :

	% E solaire	% E corps noir à 5762°K
Ultra-violet $\lambda < 0,38 \mu$	7 %	9,9 %
Visible $0,38 < \lambda < 0,78$	47,3 %	46,4 %
Infra-rouge $0,78 < \lambda < 15$	45,1 %	43,6 %

## II - Mouvement Apparent du Soleil

La terre décrit une orbite elliptique autour du soleil, ce dernier occupant un des foyers de l'ellipse. La figure 2 schématise ce déplacement et l'on constate que la rotation journalière de la terre sur elle-même se fait autour d'un axe qui est incliné de  $23^{\circ}27'$  par rapport à la normale au plan de l'écliptique. On voit également sur ce schéma que la distance terre soleil dépend de l'excentricité de l'orbite et varie avec la date de l'année.

Sur la figure 3, on a représenté le mouvement apparent du soleil en un point de l'équateur. Si le point est à la latitude L dans l'hémisphère nord, le mouvement apparent est représenté par les figures 4 , b et c.

On peut donc repérer le soleil grâce à 2 angles (fig. 5)

1/ l'azimuth  $\alpha$  ou angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. Cet angle est positif vers l'ouest.

2/ La hauteur  $h$  ou angle de la direction du soleil avec l'horizontale.

Ces deux angles sont évidemment fonction de la latitude, du lieu, de la date et de l'heure.

La date sert à déterminer la déclinaison  $\delta$  du soleil qui est l'angle que fait le plan de l'équateur avec le plan de l'écliptique à midi solaire. La valeur de la déclinaison est donnée par :

$$\delta = 23,45 \sin 0,980 \left[ (j + 284) \right]$$

ou j est le jour de l'année.



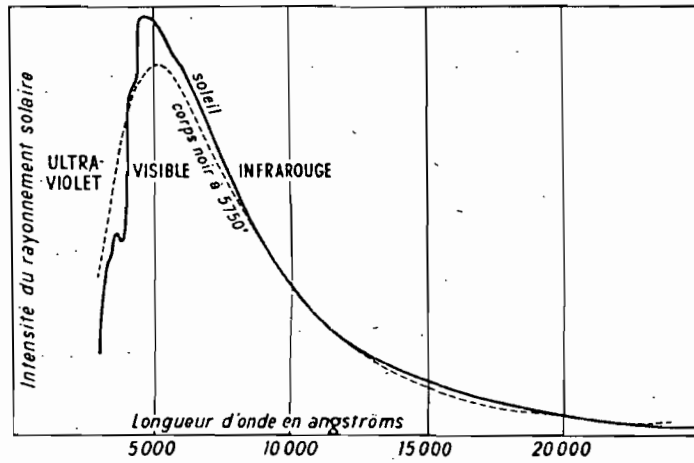


Fig. I - 1

- COMPARAISON DU RAYONNEMENT SOLAIRE AVEC CELUI D'UN CORPS NOIR produisant la même quantité globale d'énergie. On voit que la photosphère s'écarte notablement du radiateur idéal.

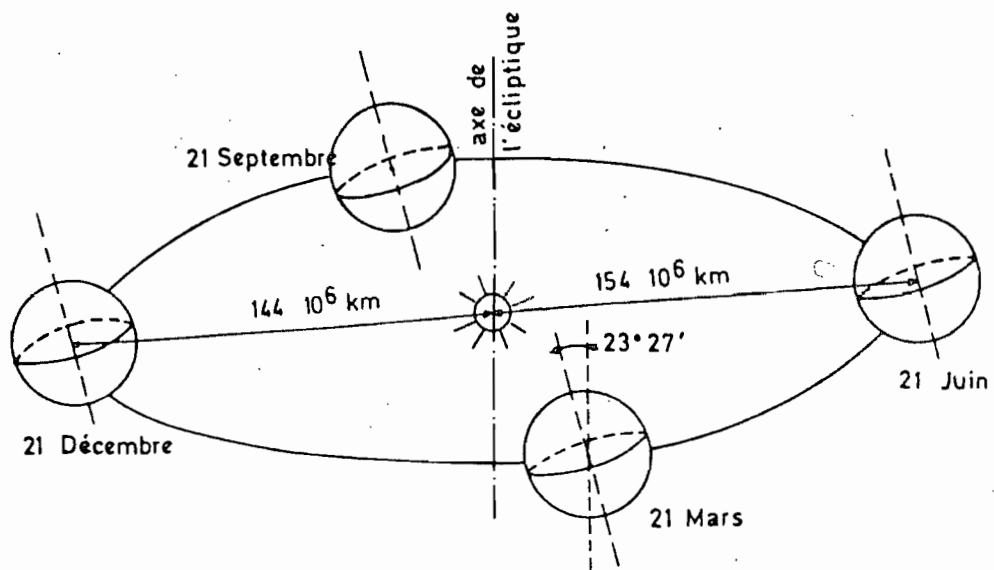


Fig. 2.

Mouvement de la terre autour du soleil

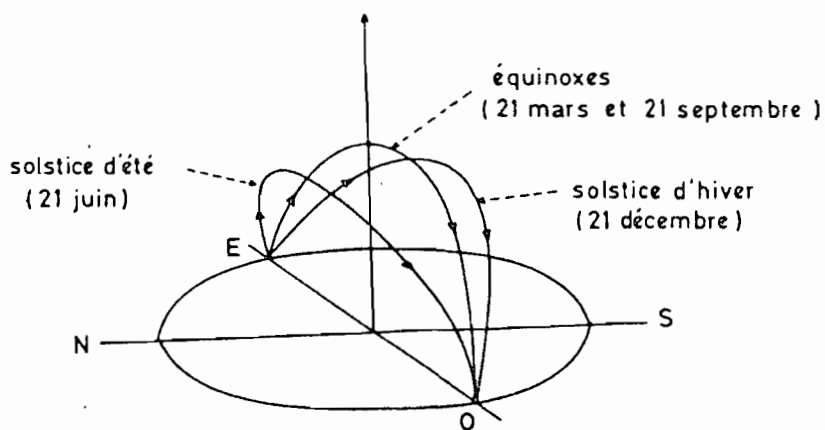


Fig. 3.

Mouvement apparent du soleil en un point de l'équateur

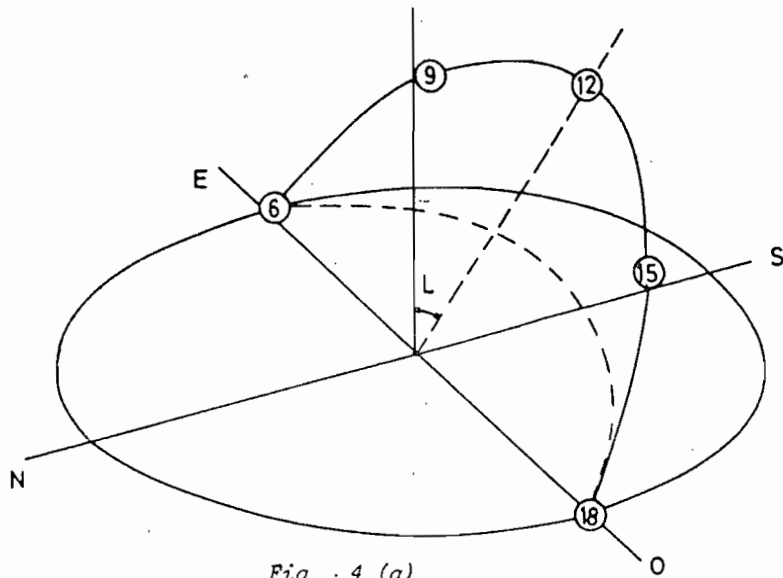


Fig . 4 (a)  
Mouvement apparent du soleil aux équinoxes

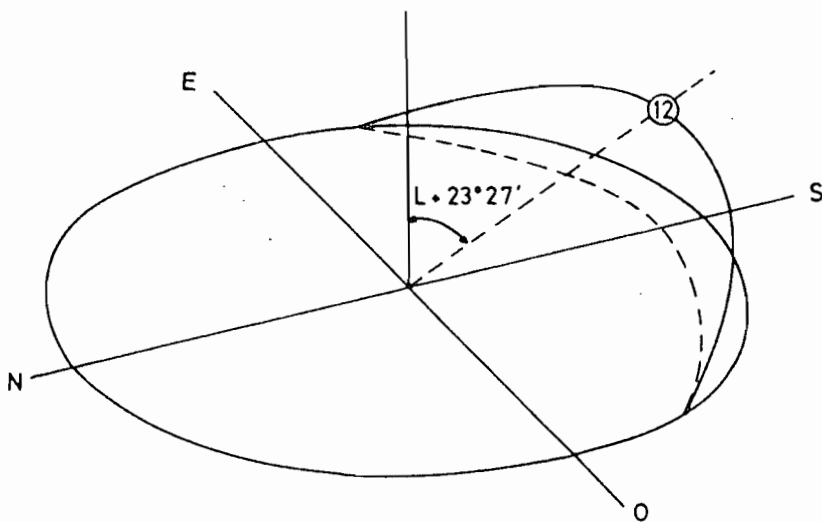


Fig . 4 (b)  
Mouvement apparent au solstice d'hiver  
(21 décembre)

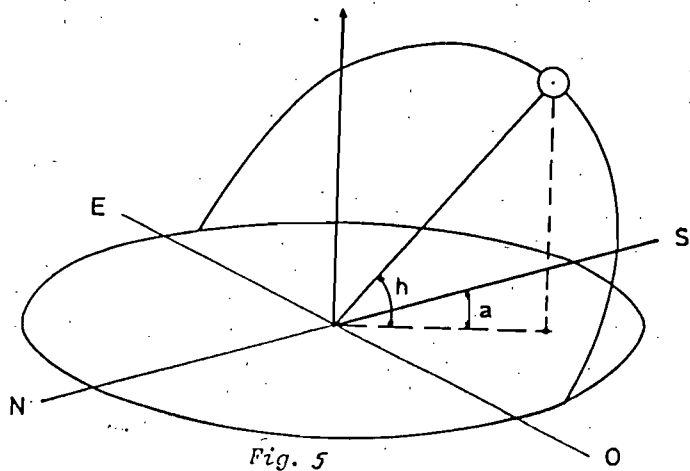
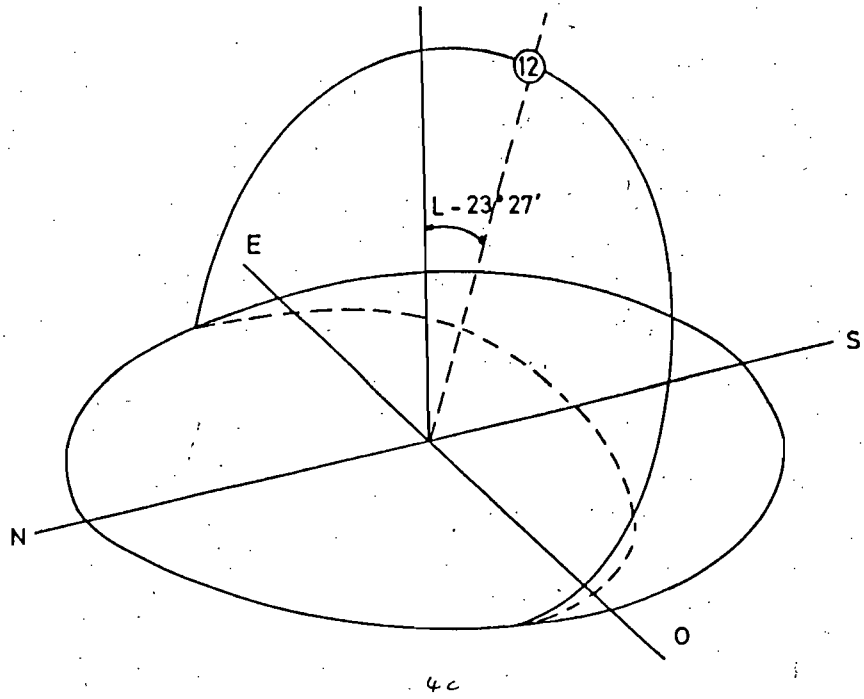


Fig. 5  
Repérage du soleil.

Si l'on désire une plus grande précision, on pourra utiliser le développement en série de Fourier (10).

$$\begin{aligned} \delta = & 0,33281 - 22,984 \cos J - 0,3499 \cos 2J - 0,1398 \cos 3J \\ & + 3,7872 \sin J + 0,03205 \sin 2J + 0,07187 \sin 3J \\ & \text{avec } J = 0,984 j \end{aligned}$$

Si l'on appelle  $\omega$  l'angle horaire qui est égal à 15 fois le nombre d'heures de différence avec midi solaire (le signe positif étant pour l'après-midi), on peut exprimer  $a$  et  $h$  par les relations :

$$\left. \begin{aligned} \sin h &= \sin l \cdot \sin \delta + \cos l \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega & (a) \\ \sin a &= \cos \delta \cdot \sin \omega / \cosh & (b) \end{aligned} \right\} \text{II} \quad l = \text{latitude}$$

Dans toutes ces relations, l'heure est l'heure solaire vraie qui diffère de l'heure légale à cause :

- 1/ de la différence entre la longitude  $L$  du lieu considéré et la longitude servant de référence  $L$  réf.
- 2/ du décalage horaire introduit dans certains pays  $C$
- 3/ de la correction  $ET$  due à l'équation du temps qui tient compte des variations de la durée du jour en fonction de la position de la terre sur son orbite.

Le temps solaire est donc donné par :

$$\begin{aligned} T_S &= T_L + ET + (L_{\text{ref}} - L_{\text{lieu}}) / 15 + C \\ &\text{ou } T_L \text{ représente le temps légal.} \end{aligned}$$

Les corrections dues à l'équation du temps sont données par (10)

$$\begin{aligned} ET = & 0,0072 \cos J - 0,0528 \cos 2J - 0,0012 \cos 3J - 0,1229 \sin J \\ & - 0,1565 \sin 2J - 0,0041 \sin 3J \end{aligned}$$

et sont représentée sur la courbe de la figure 6.

On peut également repérer la direction du soleil par rapport à la verticale du lieu. Ce qui permettra de calculer l'angle  $\theta$  entre la normale à un capteur et la direction du soleil en fonction de l'heure et du lieu considérés.

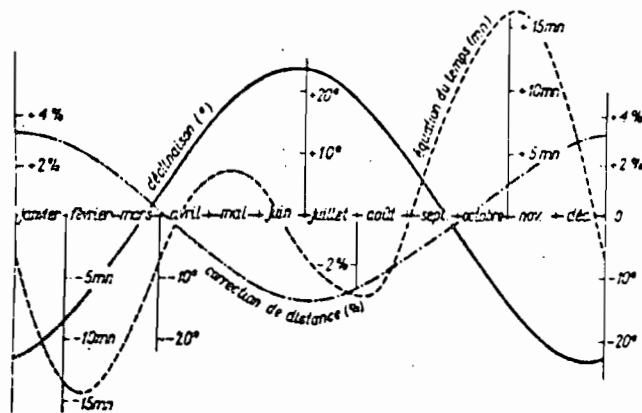
Pour un capteur plan incliné d'un angle  $i$  par rapport à l'horizontale, on obtient pour  $\theta$

$$\cos \theta = \cos \delta \cos h \cos (l-i) + \sin \delta \sin (l-i)$$

ou  $H$  est l'angle entre le méridien du lieu et le méridien où il est midi solaire (figure 6).

Le calcul de  $\cos \theta$  est donné dans l'annexe I.

Dans de nombreux cas, les valeurs de  $a$  et  $h$  peuvent être obtenues grâce à des abaques valables pour une latitude donnée.



.. — Variations annuelles de la déclinaison solaire, de la correction de distance Terre-Soleil (en %) et de l'équation du temps.

Fig. 6

5 Janvier	: + 3,4 %	soit 1 450 W · m <sup>-2</sup>
25 Février	: + 2 %	soit 1 430 W · m <sup>-2</sup>
2 Avril	: 0 %	soit 1 400 W · m <sup>-2</sup>
11 Mai	: - 2 %	soit 1 370 W · m <sup>-2</sup>
5 Juillet	: - 3,4 %	soit 1 350 W · m <sup>-2</sup>
27 Août	: - 2 %	soit 1 370 W · m <sup>-2</sup>
4 Octobre	: 0 %	soit 1 400 W · m <sup>-2</sup>
11 Novembre	: + 2 %	soit 1 430 W · m <sup>-2</sup>

Moyenne  
de l'année : 1 400 W · m<sup>-2</sup>

(constante solaire)

Tableau II

### III - Variation du Flux Solaire

Le flux solaire, à la limite de l'atmosphère terrestre, varie en fonction de la position de la terre sur son orbite. En effet, cette dernière est elliptique et le soleil occupe un des foyers de l'ellipse de telle sorte que la distance terre-soleil varie avec la date entraînant une variation de  $I_0$ .

Cependant, on peut remarquer que le mouvement de la terre est régi par la loi des aires et que la surface  $ds$  balayée par un rayon vecteur pendant le temps  $dt$  est égal.

$$ds = \rho \frac{d\alpha}{dt} \rho dt.$$

$\frac{d\alpha}{dt}$  étant la vitesse angulaire et  $\rho$  le rayon vecteur

d'où l'on déduit que  $\frac{d\alpha}{dt} \sim \frac{1}{\rho^2}$

Le flux envoyé par la surface  $S$  du disque solaire sur le grand cercle de surface  $S'$  de la terre s'écrit :

$$dw = \frac{S S'}{2} \cdot E \cdot dt \sim K dt$$

Ainsi, quelle que soit la portion de la trajectoire parcourue, l'énergie provenant à la terre durant cette période est proportionnelle à l'angle formé par les rayons vecteurs au début et à la fin de la période considérée.

Bien que les intervalles de temps entre les solstices et les équinoxes soient inégaux, les quantités d'énergie reçues par la terre pendant ces périodes sont égales.

Cependant, pour une date précise de l'année, l'éclairement énergétique est fonction de la distance terre-soleil qui varie de  $\pm 1,67\%$  ce qui entraîne une variation de la constante solaire de  $3,34\%$  (Tableau II).

A ces variations, s'ajoutent celles dues à l'atmosphère terrestre. Le rayonnement solaire traverse une épaisseur d'atmosphère importante et subit des alterations dues :

- à la diffusion moléculaire
- à l'absorption sélective des gaz et de la vapeur d'eau
- à la diffusion par les aérosols.

Ces phénomènes qui se produisent simultanément dépendent de la longueur d'onde de l'épaisseur et de la composition de l'atmosphère (11).

On peut exprimer le rayonnement direct provenant au sol  $I_{b\lambda}$  par la relation:

$$I_{b\lambda} = I_{0\lambda} \text{ EXP } ( - m B_{\lambda} )$$

ou  $B_{\lambda}$  est le coefficient d'extinction atmosphérique lié à la composition et  $m$  un paramètre lié à l'épaisseur traversée. On appelle  $m$  le nombre de masse atmosphérique.

Ce nombre représente le rapport du trajet optique des rayons sur le trajet lorsque le soleil est à la verticale en un site où la pression barométrique est de 1000 mb (100 m d'altitude en atmosphère standard). Dans ce cas, le trajet vertical est équivalent à un parcours de 8 km dans l'atmosphère standard sous une pression constante de 1000 mb.

Le nombre d'air masse dépend de la hauteur  $h$  du soleil et de l'altitude ou de la pression barométrique du lieu. Lorsque  $h$  est plus grand que 20, on peut négliger la courbure de l'atmosphère figure (7) et on a :

$$m = \frac{P}{1000 \sin h}$$

Plus généralement et particulièrement pour les faibles hauteurs  $h$  on a

$$m = P / \left[ 1000 (\sin h + 0,15 (h + 3,885)^{-1,253} \right]$$

où en fonction de l'altitude  $Z$  exprimée en km

$$m = (1 + 0,12Z) / \left[ \sin h + 0,15 (h + 3,885)^{-1,253} \right]$$

#### IV - Le Gisement Solaire

On peut définir le gisement solaire comme étant l'énergie reçue par unité de surface et susceptible d'être transformée en un site donné en fonction de la date de l'année.

Cette quantité dépend bien sûr des facteurs astronomiques qui conduisent à des expressions analytiques. Mais elle dépend aussi de la composition de l'atmosphère, ce qui rend les résultats aléatoires et nécessite des observations sur des périodes étendues de façon à obtenir des valeurs moyennes convenables. Deux quantités seront prépondérantes : il s'agit de la durée de l'ensoleillement et de l'irradiation journalière. Pour une étude plus minutieuse, il conviendrait aussi de connaître la distribution spectrale du rayonnement reçu.

##### 1) Durée de l'ensoleillement :

En nous reportant aux relations II a,b qui donnent la hauteur et l'azimut du soleil, on peut déterminer l'heure du lever et du coucher du soleil.

Si l'horizon a une hauteur nulle (en plaine ou au bord de la mer) on écrira que: au lever ou au coucher :  $\sin h = 0$  ce qui donne :

$$\cos \omega_s = -\operatorname{tg} L \cdot \operatorname{tg} \delta$$

D'où l'on déduit les heures de lever

$$H_{SL} = 12 - \frac{\omega_s}{15}$$

$$\text{et de coucher } H_{Sc} = 12 + \frac{\omega_s}{15}$$

Si l'horizon a une hauteur  $h_0$  on écrira que le lever ou le coucher aura lieu quand  $\sin h = \sin h_0$

On peut également utiliser des abaques comme celles de la figure 8. Pour une latitude donnée, l'azimut du soleil est lu directement par rapport au sud et la hauteur sur les cercles concentriques correspondant chacun à une hauteur donnée.





Figure 7  
Masse d'air optique

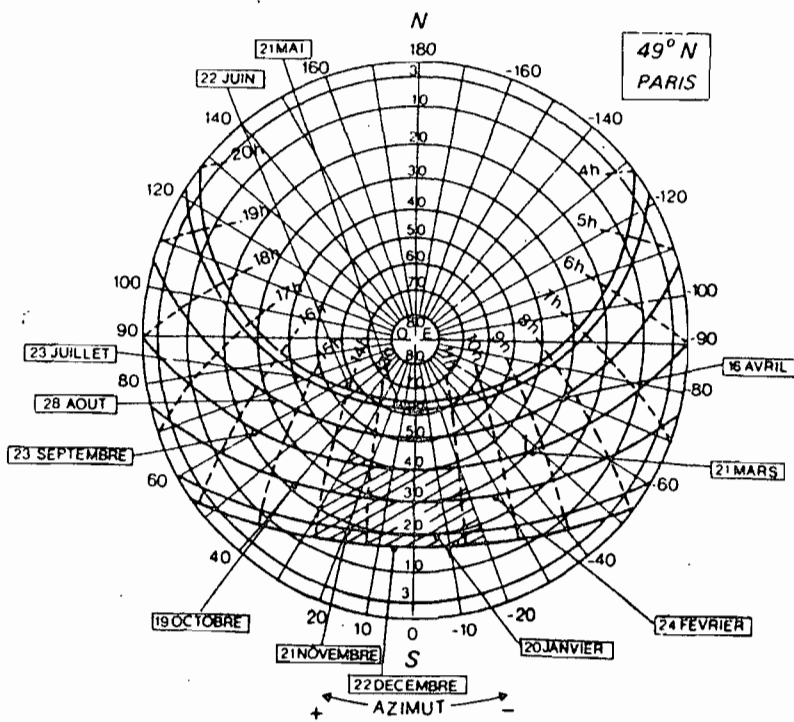


Figure 8  
Diagramme solaire pour 49° de latitude nord

D'autres abaques donnent la hauteur du soleil en fonction de l'azimut pour différentes dates de l'année et ceci pour une latitude donnée.

Si l'on trace sur ces abaques le contour du paysage (défini par une fonction  $h(\alpha)$ ) on peut lire directement la durée d'ensoleillement possible.

Enfin, l'abaque de la figure 9, due à Perrin de Brichambault (12) donne la durée quotidienne d'insolation en fonction de la latitude et de la date de l'année.

## 2) Durée réelle d'ensoleillement

Les valeurs précédentes sont les valeurs maximum qui ne tiennent pas compte de la couverture nuageuse du site étudié. Pour compléter ces informations, il est nécessaire de mesurer cette durée d'ensoleillement en utilisant soit l'héliographe de Campbell-Stokes (13), soit des dispositifs photovoltaïques (13) (14). Ces appareils permettent de définir la durée de l'ensoleillement comme étant l'intervalle de temps pendant lequel le flux direct est supérieur à  $125 \text{ w/m}^2$ .

De telles mesures, effectuées sur des périodes assez longues permettent de pondérer les résultats précédents pour chaque site étudié.

## 3) Irradiation journalière

On peut définir l'irradiation journalière comme le flux lumineux reçu par unité de surface horizontale ou inclinée sur le site. Le flux incident se décompose en deux parties : le flux direct et le flux diffus. Certains dispositifs solaires sont sensibles à la fois au flux direct et au flux diffus, c'est-à-dire au rayonnement global. D'autres dispositifs à concentration ne sont sensibles qu'au flux direct.

Nous ferons donc la distinction entre les deux types d'irradiation.

### a) Irradiation directe à la limite de l'atmosphère

Si  $I_0$  est le flux incident à la limite de l'atmosphère, le flux capté par une surface unitaire horizontale est égal à

$$I_{0h} = I_0 \cdot \sin h$$

L'irradiation journalière s'écrit :

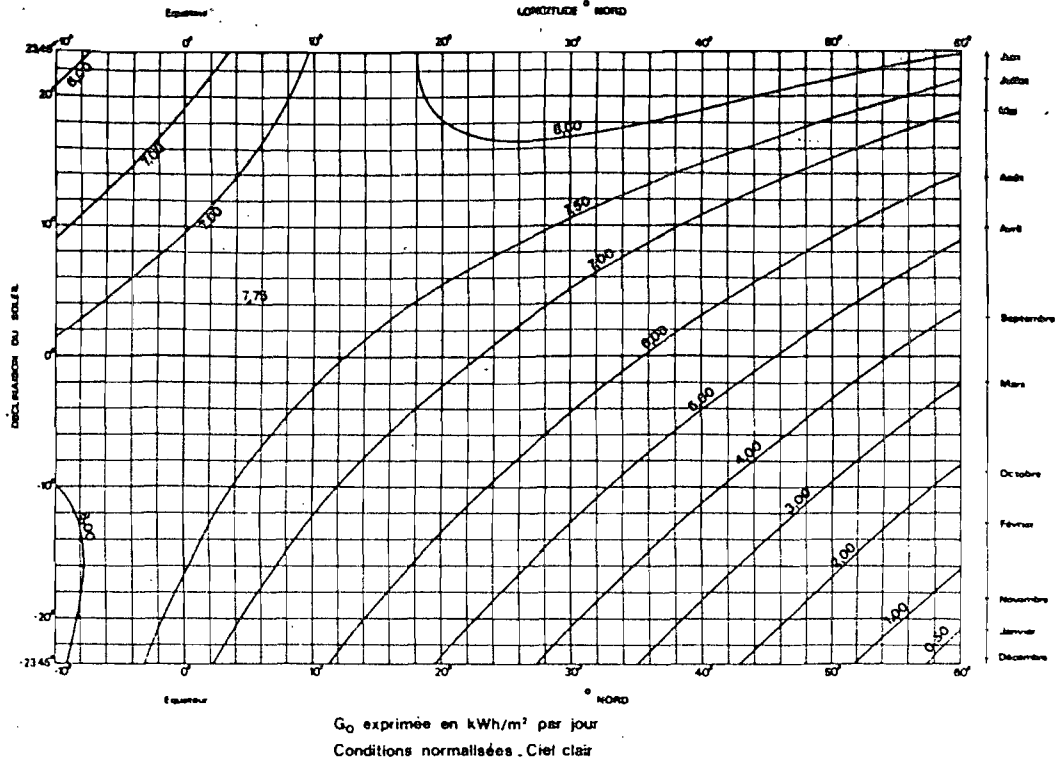
$$H_0 = \int_{T_S \text{ lever}}^{T_S \text{ coucher}} I_0 \cdot \sin h \cdot d(T_S)$$

$I_0$  ne varie pas au cours d'une journée en fonction des facteurs astronomiques.

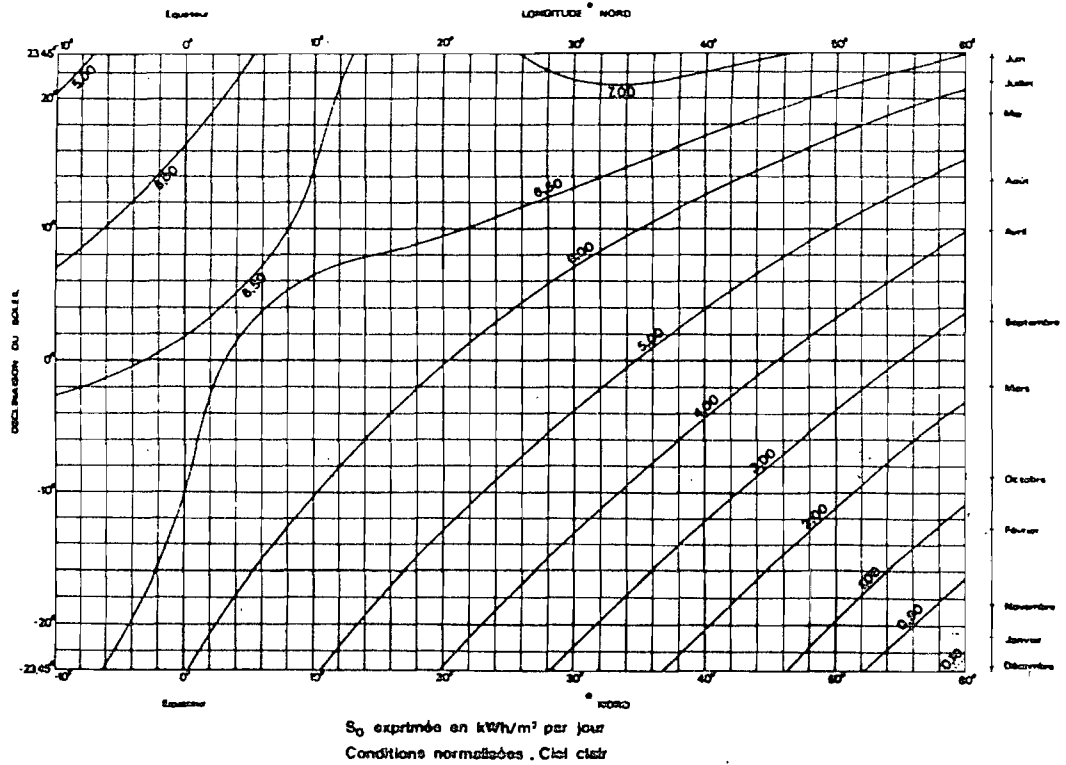
On obtient donc :

$$H_0 = I_0 \int_{-\omega_S}^{+\omega_S} \sin h \cdot \frac{d(T_S)}{d\omega} d\omega$$

### IRRADIATION QUOTIDIENNE GLOBALE D'UNE SURFACE HORIZONTALE

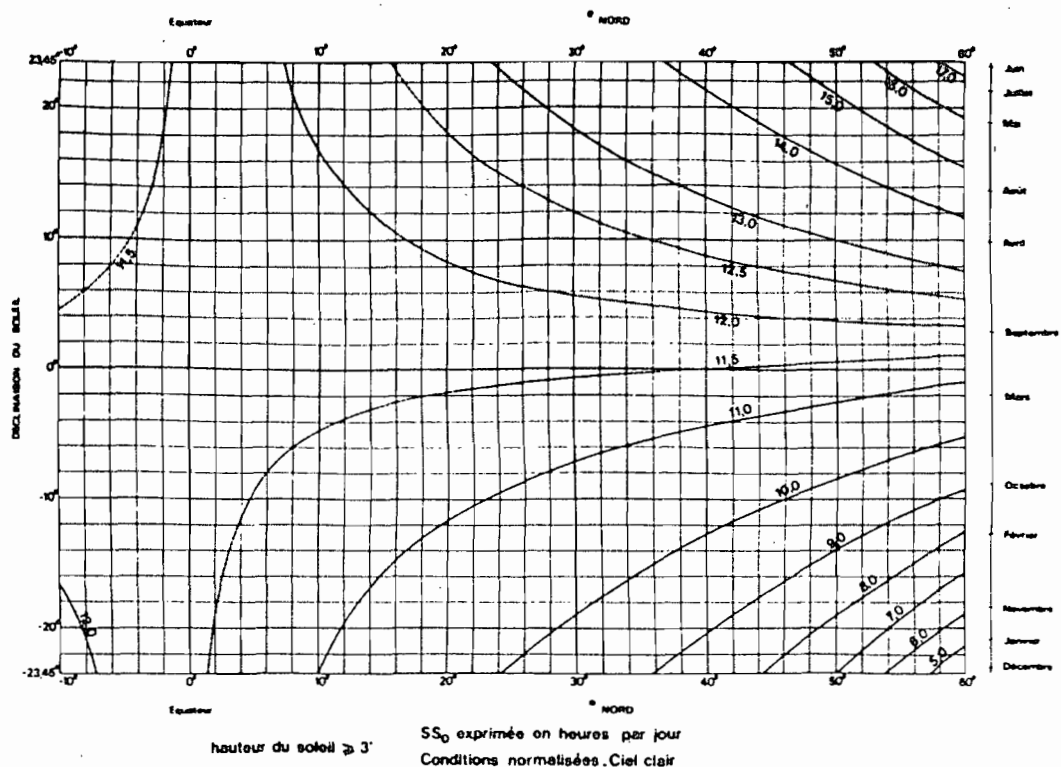


### IRRADIATION QUOTIDIENNE DIRECTE D'UNE SURFACE HORIZONTALE

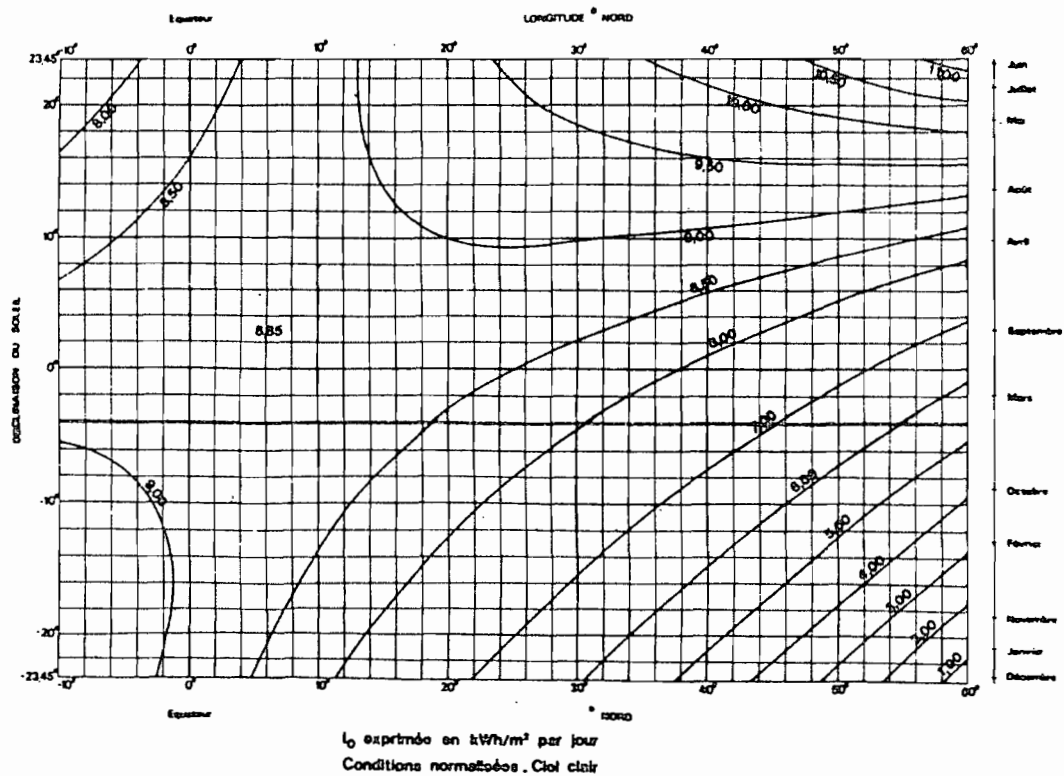


Figures 9

### DUREE QUOTIDIENNE D'INSOLATION



### IRRADIATION QUOTIDIENNE DIRECTE A INCIDENCE NORMALE



Figures 9

En remplaçant  $\sin h$  par sa valeur, on obtient :

$$H_o = I_o (2 \omega_s \sin L \sin \delta + 2 \cos L \cos \delta \sin \omega_s) \frac{dT_s}{d\omega}$$

$$H_o = 2 I_o \cos L \cos \delta (\omega_s \operatorname{tg} L \operatorname{tg} \delta + \sin \omega_s) \frac{dT_s}{d\omega}$$

Or  $\cos \omega_s = -\operatorname{tg} L \operatorname{tg} \delta$

soit :  $H_o = 2 I_o \cos L \cos \delta (\sin \omega_s - \omega_s \cos \omega_s) \frac{dT_s}{d\omega}$

où  $\frac{dT_s}{d\omega} = \frac{3600}{\pi/12}$  secondes/radian.

#### b) Irradiation directe au niveau du sol

Au niveau du sol, nous devons tenir compte de l'effet de l'atmosphère. Dans l'intégrale donnant  $H_o$ , cela se traduit par un terme

$$e^{-m\beta_\lambda} \quad \text{où } m = \frac{P}{1000 \sin h} \quad \text{et l'expression devient plus}$$

complexe.

D'autre part, les variations aléatoires de composition de l'atmosphère notamment au point de vue des aérosols modifient de façon aléatoire le coefficient d'extinction  $\beta_\lambda$ . Il est là encore nécessaire d'effectuer de mesures de  $H_{sol}$  sur des périodes assez grandes pour obtenir une valeur moyenne sur le site.

Perrin de Brichambault propose la relation suivante pour calculer l'irradiation solaire moyenne par ciel clair

$$\overline{H} = H_o \operatorname{EXP} \left\{ \left[ -T/7,5 \right] \cdot \cos(L - \delta) \right\}^{-0,75}$$

où  $T$  est le coefficient de trouble de Wolko donné par

$$T = 2,5 + 14,8 \varrho + 0,4 (1 + 2 \varrho) \operatorname{Log}(\omega \overline{\sin h}).$$

Dans ces expressions,  $\varrho$  est le coefficient de trouble d'Augotröm ;  $\omega$  l'épaisseur d'eau condensable et  $\overline{\sin h}$  la moyenne journalière de  $\sin h$ .

#### c) Irradiation Diffuse

Peu de stations météorologiques sont équipées pour mesurer le flux direct et le flux diffus.

On peut déduire l'irradiation diffuse par la relation suivante par ciel clair :

$$\overline{H_d} = H_o (T/31,6) \left[ (\cos(L - \delta)) \right]^{-0,5}$$

Liu et Jordan (16) ont montré que par ciel variable, il existait une relation entre  $\overline{H_d}/\overline{H_h}$  et l'indice de clarté moyen  $\overline{K_t} = \frac{\overline{H_h}}{H_o}$ . Cette relation s'écrit :

$$\overline{H_d}/\overline{H_h} = 1,39 - 4,027 \overline{K_t} + 5,531 \overline{K_t}^2 - 3,108 \overline{K_t}^3.$$

Enfin, en faisant l'hypothèse que le flux diffus est isotrope, on peut calculer le flux diffus  $I_{di}$  sur un plan incliné par la relation :

$$I_{di} = I_d \cdot F_{pe}$$

où :  $I_d$  est le flux diffus sur un plan horizontal

$F_{pe}$  est le facteur d'angle

avec  $F_{pe} = \frac{1}{2} (1 + \cos i)$  où  $i$  est l'inclinaison par rapport à l'horizontale.

Le facteur d'angle  $F_{pe}$  est constant pour une inclinaison fixe et on peut calculer l'inclinaison diffuse sur un plan incliné par

$$H_{di} = \frac{H_d}{2} (1 + \cos i)$$

#### 4) Remarques

Divers abaques comme celle de la figure 9. due à Perrin de Brichambault donne l'irradiation quotidienne directe à incidence normale et l'irradiation quotidienne globale sur une surface horizontale en fonction de la latitude et de la date de l'année par ciel clair.

Enfin, il faut noter qu'avec une bonne approximation, on peut calculer l'énergie totale reçue pendant une journée de ciel clair par la relation :

$$\Phi = \frac{2}{\pi} \cdot G_{\text{Max}}^* \Delta T$$

où  $\Delta T$  est la durée de l'ensoleillement et  $G_{\text{Max}}^*$  l'éclairement énergétique maximum à midi vrai.

#### V - Les mesures du rayonnement solaire

L'étude précédente montre l'intérêt d'effectuer des mesures de rayonnement solaire au voisinage des sites où l'on projette une installation. Les résultats précédents permettent de minimiser les mesures à effectuer et montrent que l'étude expérimentale du rayonnement direct est fondamentale. L'utilisation des pyréliomètres peut être automatisée grâce aux suiveurs solaires ce qui représente une part importante de l'intérêt de ces dispositifs. D'autre part, dans certains cas, une étude de la distribution spectrale du rayonnement est indispensable et ne pourra être réalisée qu'avec un suiveur solaire.

Enfin, il semble beaucoup plus commode d'utiliser un suiveur solaire que de programmer à l'avance un dispositif mécanique capable de maintenir une surface toujours perpendiculaire au rayonnement solaire.

## CHAPITRE II

### Etude de différents systèmes de poursuite

De très nombreux systèmes de poursuite du soleil ont été conçus à ce jour et le but de ce chapitre est de mettre en évidence les différences essentielles qui existent entre chaque type.

Parmi les différents suiveurs, nous pouvons distinguer :

- Le suiveur commandé par une mécanique d'horlogerie ou des moteurs synchrones pré-réglés.
- Le suiveur commandé par des moteurs asynchrones et assistés par un ordinateur
- Le suiveur entièrement commandé par un ordinateur
- Le suiveur est totalement asservi par un système opto-électronique
- Le suiveur thermo-hydro-dynamique.

#### I - Suiveur commandé par un système de moteur synchrone

L'exemple que nous prendrons est celui décrit par A.D. Dimarogonas et A. Mourikis (5) qui ont réalisé l'étude uniquement pour la poursuite en azimut. La figure II-1 donne le principe de montage.

- M est un motoréducteur tournant 1 tour par 24 heures et actionnant les 3 tiges a, b et c de longueurs réglables.
- la distance d peut également être ajustée.
- les tiges et la distance d sont réglés en fonction de la date de l'année de sorte qu'une rotation de  $\varphi$  du moteur M entraîne une rotation

$$\psi \text{ de } -\frac{\pi}{\epsilon S} \text{ à } +\frac{\pi}{\epsilon S} \text{ du tambour T.}$$

- E est l'amplitude angulaire de l'azimut pour une date et un site donnés.
- S est un paramètre arbitraire
- les valeurs de a, b, c et d sont calculées en utilisant une méthode mathématique utilisant les polynômes de Tchebichev. Les valeurs obtenues sont optimisées à l'aide d'un ordinateur et la précision obtenue est de 3,64 %

Ce système a l'avantage d'être très sûr et très bon marché, les calculs pouvant être faits par un ordinateur une fois pour toute.

On peut lui reprocher sa mise en oeuvre qui semble très contraignante (correction des longueurs à apporter régulièrement si on veut conserver une bonne précision). De plus, le système ne peut pas se déplacer aisément car son calage en direction doit être repris à chaque fois.

C

C

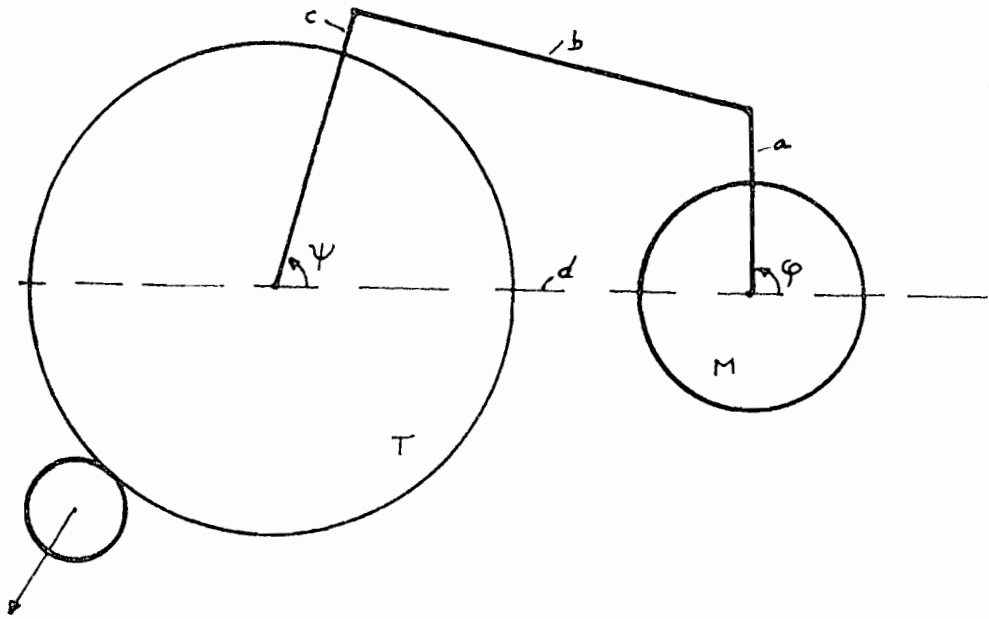


Figure II-1

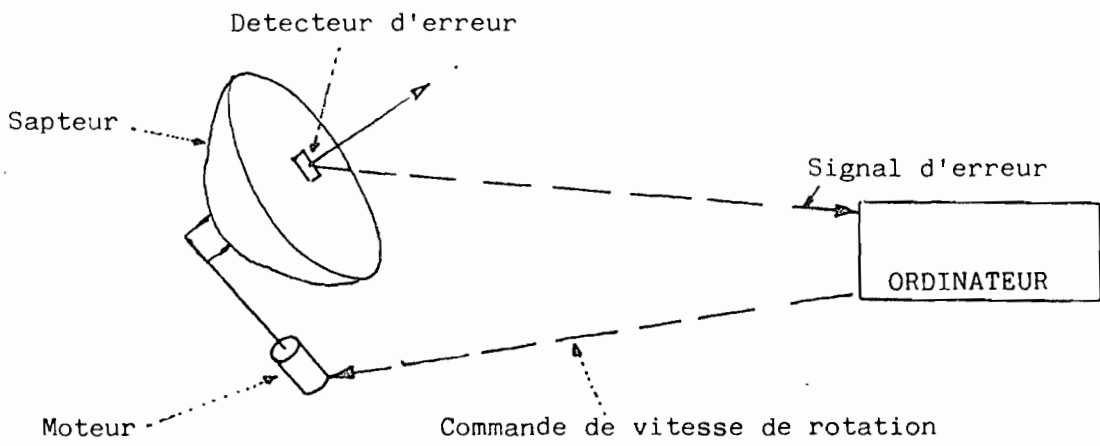


Figure II-2



## II - Suiveur commande par des moteurs synchrones et assistés par ordinateur

P.O. Carden a décrit un système de commande de champ d'héliostats (17) dont le principe est schématisé sur la figure II-2.

Le signal d'erreur lu par un détecteur est transmis au calculateur. Celui-ci est programmé pour pondérer l'erreur future due à la correction qu'il va apporter. Cette correction s'effectue en faisant varier la vitesse de rotation du moteur de commande.

La figure II-3 montre le schéma synoptique simplifié du système et pour prévoir la vitesse future du moteur, il faut un logiciel élaboré.

Pour peu que ce système dispose d'un ordinateur rapide, on peut presque atteindre la perfection. L'auteur ne donne pas la précision des pointés obtenus mais il est probable qu'elle est excellente.

Ce système semble être idéal mais son prix de revient est assez élevé, car il exige d'avoir un puissant ordinateur à sa disposition.

## III - Suiveur commandé uniquement par un programme mis sur ordinateur

La description d'un tel système est superflue. Un ordinateur programmé et possédant une référence de temps de haute précision commande les déplacements du suiveur en site et en azimut.

La position des axes est contrôlée par des capteurs de position à haute résolution qui transmettent à l'ordinateur les informations nécessaires.

La précision d'un tel système peut aller jusqu'à l'extrême, mais exige un matériel de haute technologie, donc très cher.

## IV - Suiveur asservi uniquement par un système opto-électronique

Nous donnerons plus de détails sur ce type de suiveur car ce sont les plus utilisés et que le but de ce travail est la réalisation d'un dispositif de ce genre.

Le principe de base de ce système est le suivant :

Une platine est montée sur un système d'axes universel. Un couple de détecteurs donne un signal d'erreur correspondant à chaque axe. Ce dispositif électronique est placé en aval des détecteurs et par l'intermédiaire d'amplificateurs-comutateurs. On commande la rotation des moteurs d'asservissement. On tente de ramener à zéro soit de façon continue soit en faisant évoluer le système par impulsions.

Ces systèmes se distinguent les uns des autres principalement par la disposition et la nature des détecteurs, par la mécanique et l'électronique d'asservissement.

a) Félix Trombe décrit un système de détection optique (18) représenté sur la figure II-4 où

- L est une lentille convergente
- $C_1, C_2...$  des cellules de recherche
- l'écran E est placé avant le foyer de la lentille et ses dimensions sont telles qu'il masque exactement l'image du soleil.
- $a_1, a_2, b_1, b_2$  sont des cellules montées sur le plan focal de L.

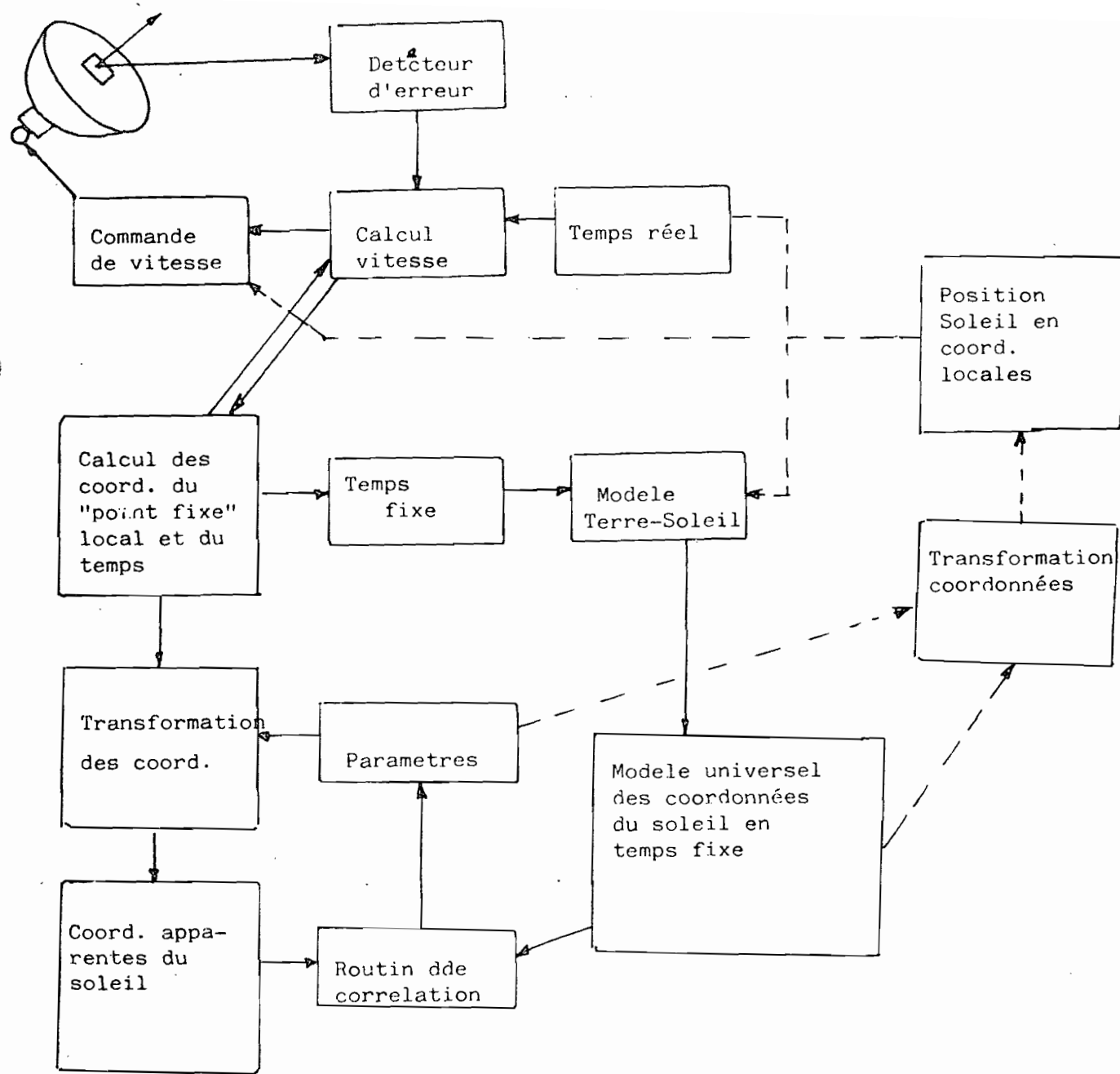


Figure II-3

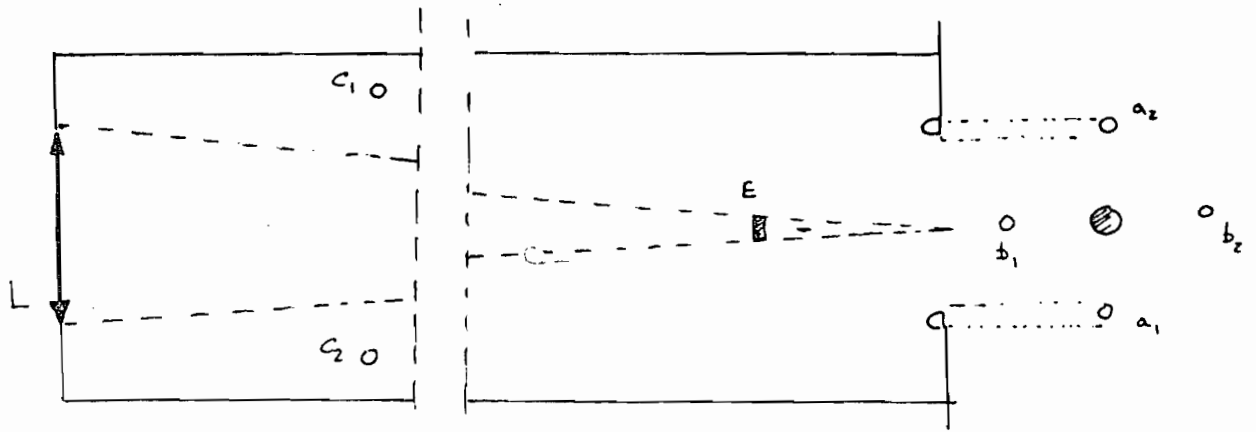


Figure II -4

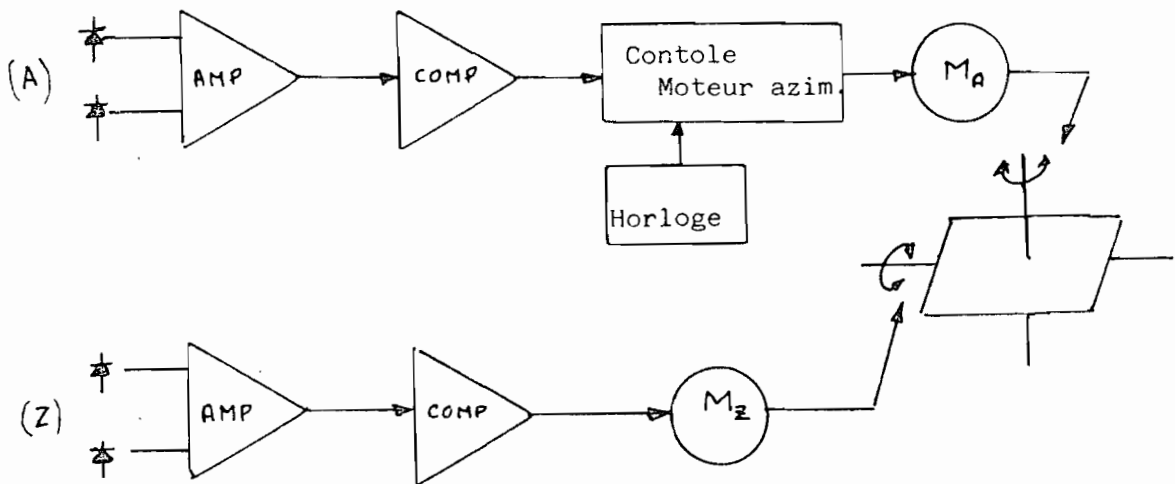


Figure II-5

Si l'axe de visée est aligné avec la direction du soleil, l'image de ce dernier est occultée par l'écran.

Si l'axe est légèrement à côté, l'image du soleil déborde de E et éclaire une ou plusieurs des cellules placées en arrière de E.

Un système (électro-pneumatique au début puis électronique actuellement) permet de rattraper l'erreur.

Si l'écart de visée est important, à la suite d'une occultation prolongée du soleil par exemple, les cellules de recherche permettent une première approche.

Ce système très efficace a été repris par la suite par plusieurs auteurs. De bonne qualité, ce système exige un dispositif optique assez élaboré et relativement cher.

b) Pizzini et al. (19), ont conçu un système représenté sur la figure II-5.

Un couple de photodiodes A détecte l'erreur en azimut et un autre couple de photodiodes Z détecte l'erreur en site.

Une horloge provoque un mouvement de la structure à une heure déterminée le matin et ce déplacement se fait avec la vitesse apparente moyenne du soleil ( $\sim 10^\circ/\text{heure}$ ). Le système de détection (A) permet la finition du suivi en azimut. En site, les photodiodes (Z) commandent linéairement le mouvement.

La précision atteinte est de  $10'$  d'arc.

Les auteurs ne précisent pas si les détecteurs sont protégés de la lumière parasite qui peut affecter leur réponse.

Cependant, la précision atteinte nous laisse supposer que les détecteurs sont occultés latéralement et, dans ce cas, la perte du soleil peut (en site) être difficile à rattraper.

c) Suiveur solaire conçu par J. Grysberg.

Le système de visée optique est représenté sur la figure II-6.

4 plans A1...A4 qui partagent l'espace, laissent une ouverture de  $1/4$  de sphère à chacun des détecteurs D.

Le plan E est tel que, lorsque la visée est correcte, les 4 détecteurs sont quasiment couverts par son ombre, donc protégés thermiquement.

Pour éviter le phénomène de "pompage" inhérents aux systèmes à asservissement linéaire on utilise un montage "Floating Control System" : C'est un système régulateur discontinu à action "Proportionnelle-Derivée" :

On envoie au moteur, des impulsions : plus l'erreur de visée est grande, plus les impulsions sont rapprochées les unes des autres. Les battements sont totalement supprimés, mais on tolère une erreur dès le départ due à la discontinuité du mouvement. Il est probable qu'avec les dispositifs électroniques actuels, on peut arriver à un pas d'impulsion très court et donc admettre une erreur négligeable par rapport à celle due aux détecteurs eux-mêmes.

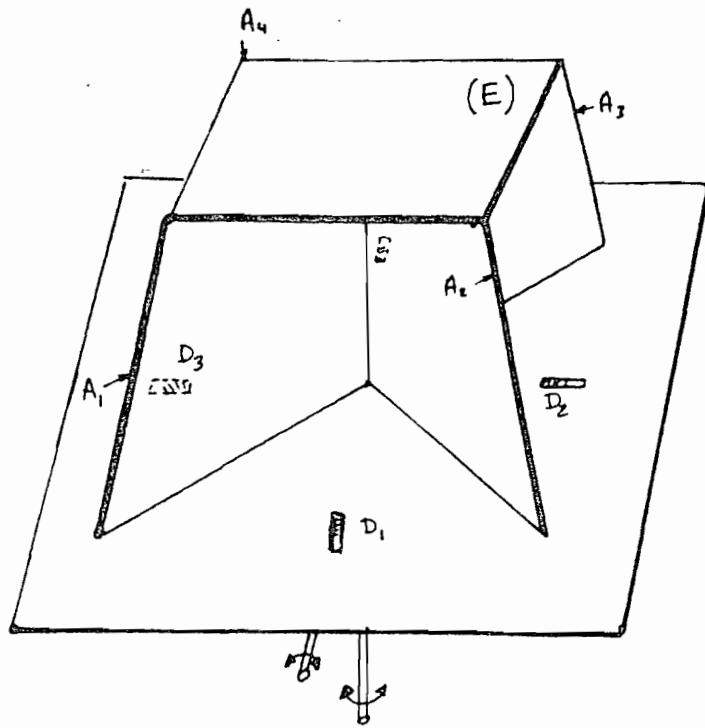


Fig. II - 6

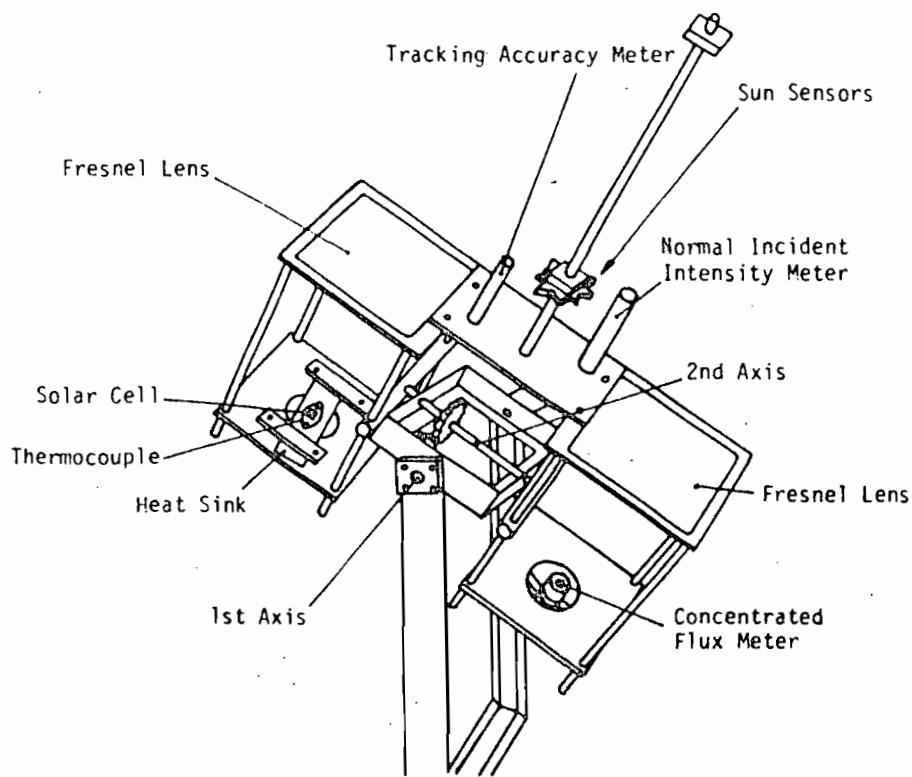


Fig. II - 7

d) Suiveur réalisé par Yekutieli et al. (21).

C'est toujours un système à 2 axes avec des contrôles de visée, d'incidence normale et de vérification de suivi.

De plus, un système électronique permet d'arrêter la poursuite en cas d'occultation du soleil. Le suiveur est en arrêt total et ne redemarre que lors de la réapparition du soleil.

On voit, d'après la figure II-7, que les capteurs sont logés dans un support en V disposé horizontalement.

Un cache ayant sensiblement la même dimension que la surface des supports, est placé au-dessus de l'axe de telle sorte que les détecteurs ne reçoivent plus de rayonnement direct lorsque le système est correctement aligné.

Ces cellules ne sont pas protégées des rayonnements parasites dûs aux obstacles environnants.

#### V - Suiveur thermo-hydro-dynamique

Ce système, très différent des autres est dû à D.H. Mass et P.W. Ross (22) est schématisé par la figure II-8.

Il est basé sur une commande pneumatique du mouvement.

Les deux chambres à gaz A et B sont reliées d'une part à un piston appelé bloc-magnétique (Magnetic Slug) et d'autre part à un système de piston double permettant une communication avec le volume intérieur de la sphère qui est étanche.

L'inertie de déplacement blo-magnétique est supérieure à celle du piston double. Un aimant est placé à l'extérieur de la sphère et fixé au sol.

On peut résumer le principe de fonctionnement comme suit : on suppose que le système est désaligné au départ et que la chambre A reçoit les rayons lumineux.

- 1) Les radiations sont absorbées par la chambre A et le gaz à l'intérieur de cette chambre s'échauffe, sa pression augmente.
- 2) La pression s'exerce simultanément sur le piston double (figure D-9) et le bloc-magnétique. L'inertie du bloc-magnétique étant plus grande que celle du double piston, ce dernier se déplace vers la droite (figure II-9-b) et met en communication la chambre B avec le reste du volume de la sphère.
- 3) La pression à gauche du bloc-magnétique est maintenant plus forte qu'à droite et il glisse vers la droite.  
Comme il est en face d'un aimant fixé, c'est l'ensemble de la sphère qui tourne à gauche.
- 4) La rotation de la sphère aligne l'axe optique et "A" se refroidit. Le gaz à l'intérieur de A se contracte ramenant le double piston à gauche (figure II-9-c). A se met en communication avec le reste du volume de la sphère. B n'ayant pas été sollicité (en température), l'équilibre se fait et le système se stabilise.

Ce système n'est évidemment pas conçu pour faire des mesures de routine du gisement solaire mais il est tellement particulier que nous avons jugé intéressant de le décrire.

De plus, il faut noter qu'il n'utilise aucune source auxiliaire d'énergie.

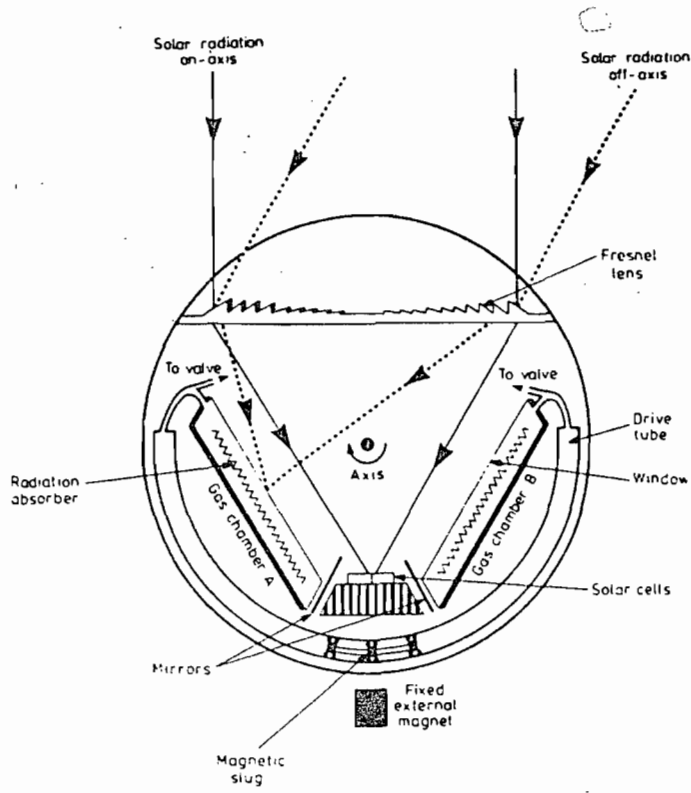
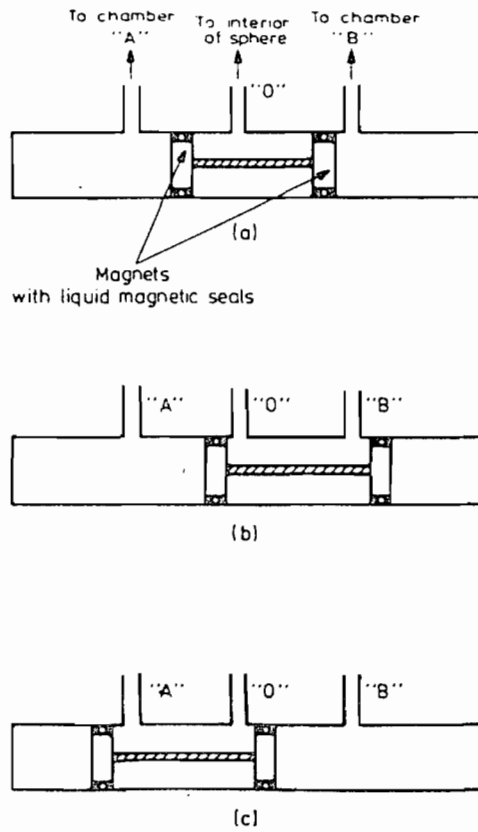


Figure II-8



Figures II-9 a,b,c

C.

Nous avons décrit un modèle de suiveur de chaque type et cette description n'est pas exhaustive. Elle permet cependant de mettre en évidence les principaux systèmes utilisés.

En nous servant de ces expériences, nous nous réalisons un suiveur asservi par un dispositif opto-électronique que nous allons décrire dans le chapitre suivant.

C=



## CHAPITRE III

### Description du suiveur solaire

#### Principe de base - Description du prototype

Le principe que nous avons adopté est classique ; il consiste à contrôler l'égalité d'éclairement de 4 détecteurs répartis dans les 4 quadrans définis par les plans  $P_1$  et  $P_2$  qui se coupent suivant l'axe  $\Omega$ . (Fig. ci-dessous)

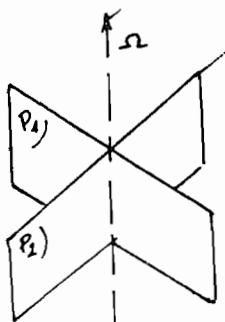
De façon à réduire le prix de revient, nous n'avons pas utilisé de dispositif optique comme par exemple certains suiveurs qui commandent les héliostats du four solaire d'Odeillo

Ce système de 4 détecteurs est fixé sur une monture universelle à 2 axes permettant la rotation en site et en azimut. Ces quatre photo-détecteurs ont une vue globale du ciel, l'ouverture de chacun étant d'environ  $1/8$  de sphère, suivant 4 directions perpendiculaires. Chaque paire de détecteur  $d - d'$  est reliée à un amplificateur différentiel et il apparaît un signal d'erreur quand l'axe  $\Omega$  n'est plus dans la direction du soleil. Ce signal convenablement amplifié commande le moteur d'entraînement correspondant jusqu'à ce que l'alignement soit réalisé. A ce moment-là, le signal à la sortie des détecteurs est nul.

Ce système, utilisé dans de nombreux dispositifs (chapitre II) a une grande ouverture et peut facilement retrouver le soleil à son lever ou après les passages nuageux. Toutefois, les photo-détecteurs peuvent être influencés par la lumière diffusée par des obstacles environnants aussi bien que par certains nuages très lumineux les jours de faible ensoleillement.

Pour accroître la précision du pointé, sans supprimer la grande ouverture, nous avons placé des écrans latéraux amovibles ce qui peut être réalisé grâce à un système mécanique simple, d'un prix de revient bien plus bas qu'en utilisant un dispositif optique. Une description mécanique du dispositif est donnée sur la figure III-1. Les quatre photo-détecteurs sont placés dans les quatre rainures d'un piston mobile. En position haute, l'ouverture angulaire de chaque détecteur est grande et permet une recherche rapide du soleil. En position basse, l'ouverture est faible et le pointé plus précis. Le mouvement du piston est assuré par le moteur  $M_p$ , solidaire de la came  $C$ . Ce mouvement est commandé par le photo-détecteur LDR placé à l'intérieur d'un petit tube cylindrique tel qu'il ne reçoit le rayonnement solaire que lorsque l'appareil est presque réglé.

Pour remédier aux difficultés qui apparaissent dans les régions intertropicales, pour lesquelles le soleil passe au zénith plusieurs jours par an, nous avons incliné le suiveur d'un angle légèrement supérieur à la différence  $24-L$  où  $L$  est la latitude du lieu. Dans ces conditions, la rotation en azimut a toujours lieu dans le même sens.



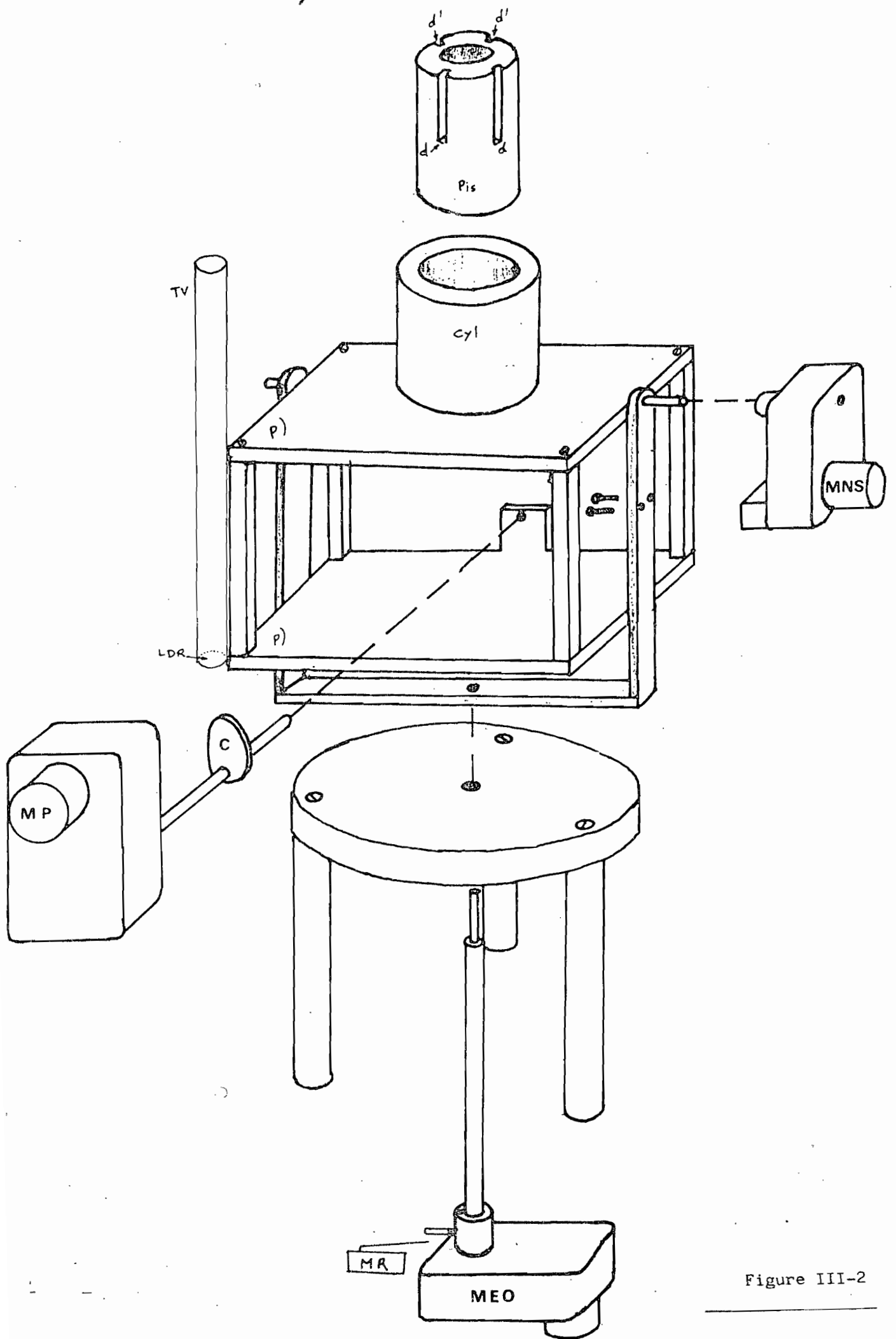


Figure III-2

## I - Description du Dispositif Mécanique

La figure III-1 représente une vue en éclaté du montage mécanique. Nous avons choisi une monture universelle les deux axes de rotation étant l'axe NS et EO.

Pis : Piston comportant quatre gorges diamétralement opposées et au fond desquelles se trouvent les 2 couples de photo-transistors d et d'.

Cyl : Le cylindre qui reçoit le piston.

P et P' : Les platines portant le piston-cylindre et le tube de visée TV.

T V : Tube de visée au fond duquel se trouve la LDR qui commande la montée ou descente du piston.

MNS : Moto-réducteur permettant la rotation selon un méridien.

MP : Moto-réducteur commandant le mouvement du piston à travers le came C.

MEO : Moto-réducteur commandant la rotation Est-Ouest.

MR : Microrupteur de butée vers l'Est arrêtant le système pour la nuit.

Piston : La course du piston est telle que, en position haute, les détecteurs d et d' sont juste au niveau du bord supérieur du cylindre Cy. En position basse, le piston dépasse de 2 millimètres. Les deux positions sont réglées par microrupteur inverseurs non figurées sur ce dessin. Le piston est tiré vers le bas par un ressort fixé sur la platine P'

Axes de rotation Les deux axes de rotation sont limités avant d'arriver en butée par des microrupteurs coupant l'alimentation générale. Le microrupteur MR située sur l'axe E-O et limitant la rotation vers l'Est a en plus un branchement particulier pour le retour à l'Est.

Moto-réducteurs : Ce sont des réducteurs CROUZET 1 tour/6 minutes sur lesquels nous avons adapté des moteurs 9 V à courant continu.

## II - Ensemble Electronique de Commande

### 1/ Description du système de détection et commande des moteurs

Dans ce qui suit, on se reportera à la figure III-2 et à l'annexe II pour des rappels sur les fonctions électroniques

- d et d' sont des photo-transistors . . . . .
- A<sub>1</sub> et A<sub>2</sub> : des amplificateurs opérationnels du type 741
- R<sub>3</sub> : est une photo-résistance du type LDR 03
- D<sub>1</sub> à D<sub>4</sub> : des diodes de signal (1 N 4148)).

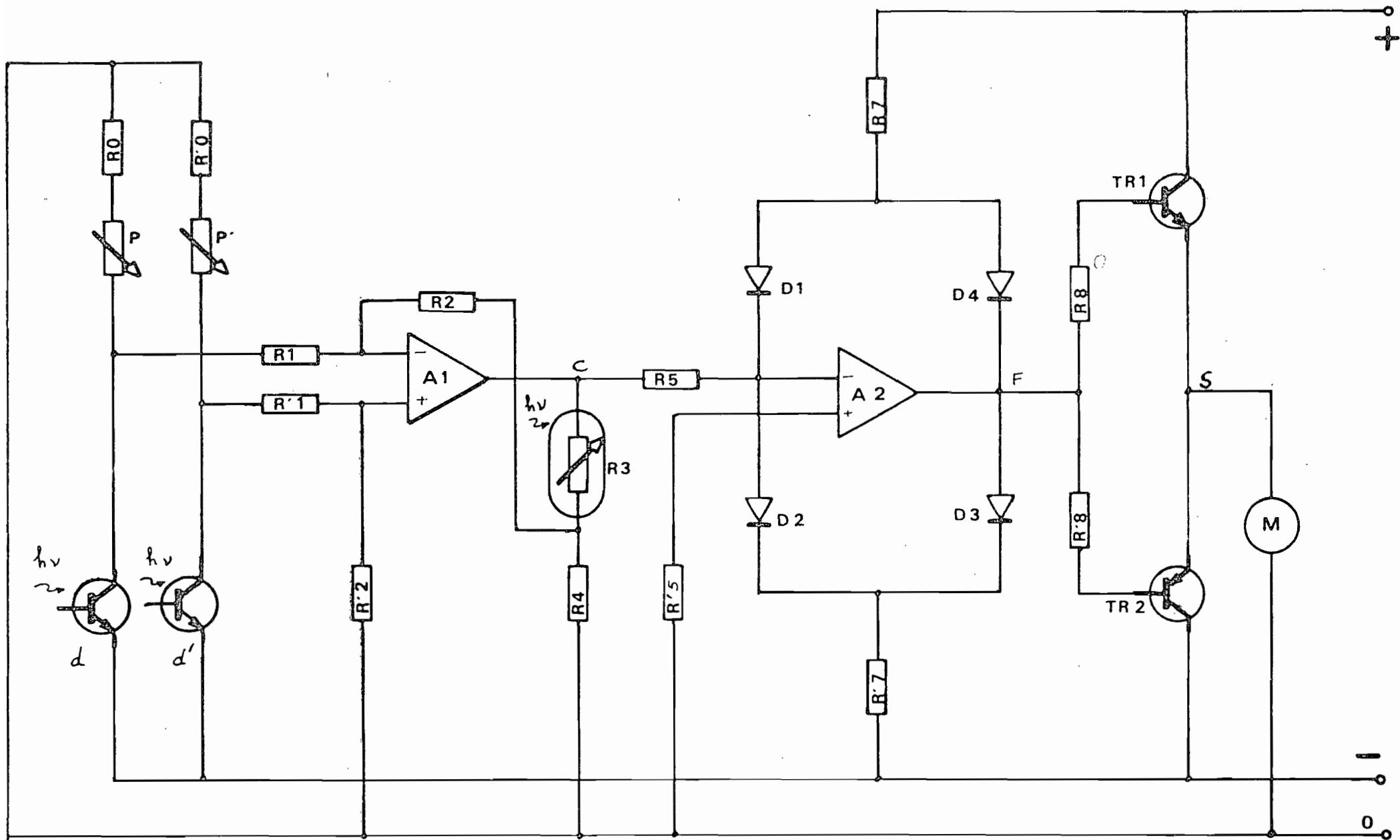


Figure III-2

- TR<sub>1</sub> et TR<sub>2</sub> : des transistors darlington complémentaires du type BD 262/263
- M est un moteur à courant continu du type universel 9 V
- P = P' des potentiomètres 1 KR
- R<sub>0</sub> = R'<sub>0</sub> : résistances 1 KR, 1/4 W
- R<sub>1</sub> = R'<sub>1</sub> : résistances 1 MR, 1/4 W
- R<sub>2</sub> = R'<sub>2</sub> : résistances de 3,9 MR
- R<sub>4</sub> : résistances de 10 KR
- R<sub>5</sub> = R'<sub>5</sub> : résistances de 10 KR
- R<sub>7</sub> = R'<sub>7</sub> : résistances de 100 KR
- R<sub>8</sub> = R'<sub>8</sub> : résistances de 1 KR 1 W

Les alimentations sont  $\pm 12$  V symétriques.

## 2/ Fonctionnement

Les deux détecteurs d et d' produisent à l'entrée de A<sub>1</sub> deux tensions d'entre e et e' à travers les résistances d'entrée R<sub>1</sub> et R'<sub>1</sub>.

Le circuit R<sub>1</sub>, R'<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R'<sub>2</sub>, A<sub>1</sub>, R<sub>3</sub> et R<sub>4</sub> à un gain  $G = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{R_3 + R_4}{R_4}$

R<sub>3</sub> est une photo-résistance placée à l'extérieur, sur la platine de visée et perpendiculaire au rayonnement solaire.

Pour un fort éclairage (à partir de 5000 Lux) R<sub>3</sub> devient très petit devant

R<sub>4</sub>. Alors on peut écrire :  $G_0 = \frac{R_2}{R_1}$

Pour un faible éclairage, R<sub>3</sub> prend une valeur beaucoup plus grande que R<sub>4</sub>,

et on a :  $G_1 = G_0 \cdot \frac{R_3}{R_4}$

Ceci permet d'avoir un gain variable dans ce rapport :

$$\frac{G_0}{G_1} = \frac{R_4}{R_3}$$

R<sub>3</sub> varie entre plusieurs M $\Omega$  et 100 $\Omega$ , ce qui donne pour une valeur de R<sub>4</sub> = 10 K $\Omega$  un rapport G<sub>0</sub>/G<sub>1</sub> de l'ordre de 100.

La contre-réaction est proportionnelle à l'intensité lumineuse, ou bien le gain est inversement proportionnel à l'intensité lumineuse.

Ce gain variable a deux effets selon les conditions expérimentales :

- a) Le soleil est au lever ou au coucher (ou couvert de petits nuages), et l'éclairage est faible. Le gain est grand et la moindre erreur de visée est immédiatement interprêtée.
- b) L'éclairage est très intense, le gain diminue et c'est le phénomène inverse du précédent : on diminue l'amplitude du signal d'erreur.

Ainsi, quel que soit l'éclairage, un certain angle d'erreur donne à peu près le même signal électrique à la sortie de A<sub>1</sub>.

On dispose donc d'un signal d'erreur fonction de l'angle d'erreur. Ce signal est appliqué à A<sub>2</sub> et son circuit spécial constitué du pont D1 à D4, R7 et R'7, R5 et R'5.

A l'équilibre (0 volts à la sortie de A<sub>1</sub>), le circuit est équivalent à celui de la figure III-3.

L'application numérique faite à la fin de l'annexe II, s'applique ici et on a  $V = 0,480$  volts (ici  $I_d = 115/2 \mu A$  car D1//D4 et si on se réfère à la figure II-4 qui représente la caractéristique  $I = f(V)$  de cette diode (1 N 4148) on voit que le point de fonctionnement se situe sur la courbe à  $I_d = 60 \mu A$ .

Supposons un petit signal d'entrée sur A<sub>1</sub> (signal  $> 0$ ), la sortie F de A<sub>2</sub>, passe de 0 à + 2 V par exemple. On se trouve alors dans la situation de la figure III-5.

En effet, l'entrée de A<sub>2</sub> est ici considérée comme une masse virtuelle. D1 impose la tension de cathode de D4 qui se bloque, D1 laisse passer tout le courant, traversant R7, donc tend à élever la tension à l'entrée ( - ) de A<sub>2</sub>, s'opposant ainsi au signal négatif original. D3 est dans une situation identique, elle conduit le courant, traversant R7.

$I_{D2}$  diminue, entraînant une diminution de la tension négative à l'entrée ; on aboutit à une deuxième contre-réaction.

Cependant, il faut noter que le passage de l'état initial à l'état de blocage des diodes D4 et D2 passent par la courbure entre 460 et 400 mV. Cette variation n'est pas linéaire et on peut la considérer comme logarithmique. Ce qui donne un résultat de contre-réaction semi-logarithmique.

Etant donné le point de fonctionnement des diodes D1 à D4, ce système de contre-réaction permet d'avoir une contre-réaction efficace pour les petits signaux (  $1/5$  du signal d'entrée, rapport de  $2R7/R5$ ).

L'étage de sortie étant constitué d'un push-pull complémentaire utilisant des darlington, tout signal intérieur à  $\pm 1,2$  V à la sortie de A<sub>2</sub> n'est pas pris en compte.

En effet, la figure III-6 montre la constitution interne à un transistor Darlington PN ; on voit qu'il y a une double jonction PH entre base et émetteur. Les transistors utilisés étant du silicium, la conduction B-E ne peut avoir lieu qu'au-delà de 1,2 V.

En résumé, de 0 à 0,5 volts, les diodes D1 à D4, du fait de leur point de fonctionnement, produisent une contre-réaction semi-logarithmique. De 0,5 à 1,2 V, la contre-réaction fixe due à R7, R'7 atténue le signal. Pour des signaux inférieurs à 1,2 V on a une contre-réaction "semi-logarithmique", verrouillant le système. A partir de  $\pm 1,2$  volts, les transistors montés en push pull complémentaire et ayant une alimentation symétrique permettant d'inverser la tension d'alimentation du moteur par rapport au zéro.

Si le signal de sortie de A<sub>2</sub> est positif, c'est TR1 qui entre en action et inversement pour TR2.

L'étage push a un gain en tension inférieur à l'unité mais le  $\beta$  est de l'ordre de 600.

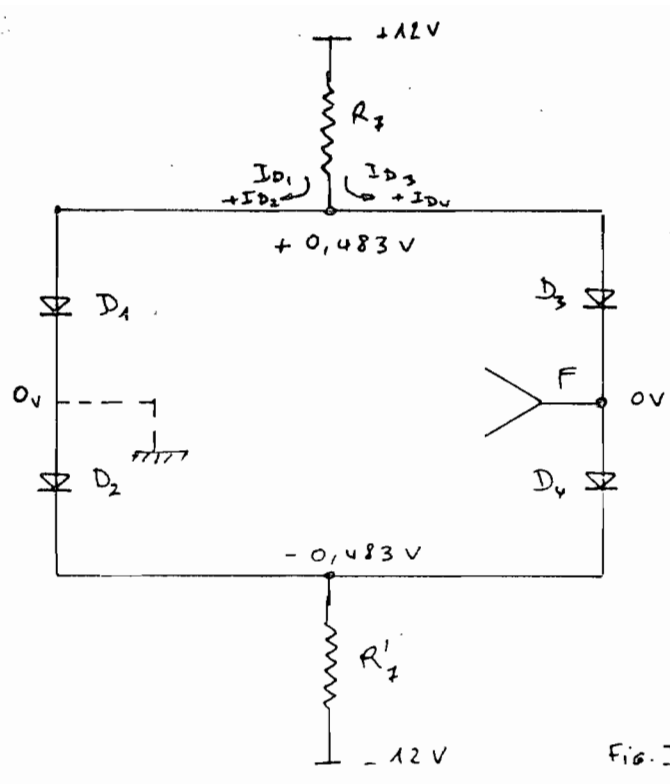


Fig. III - 3

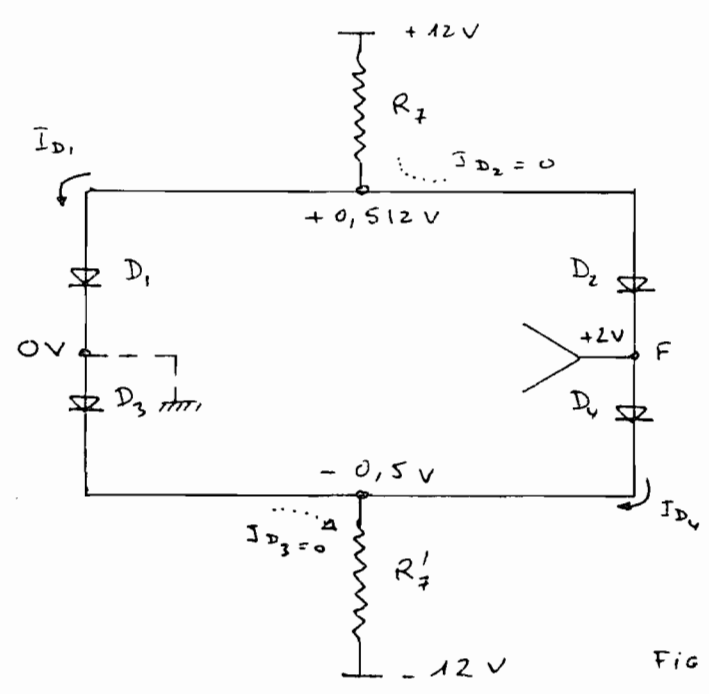


Fig III - 5

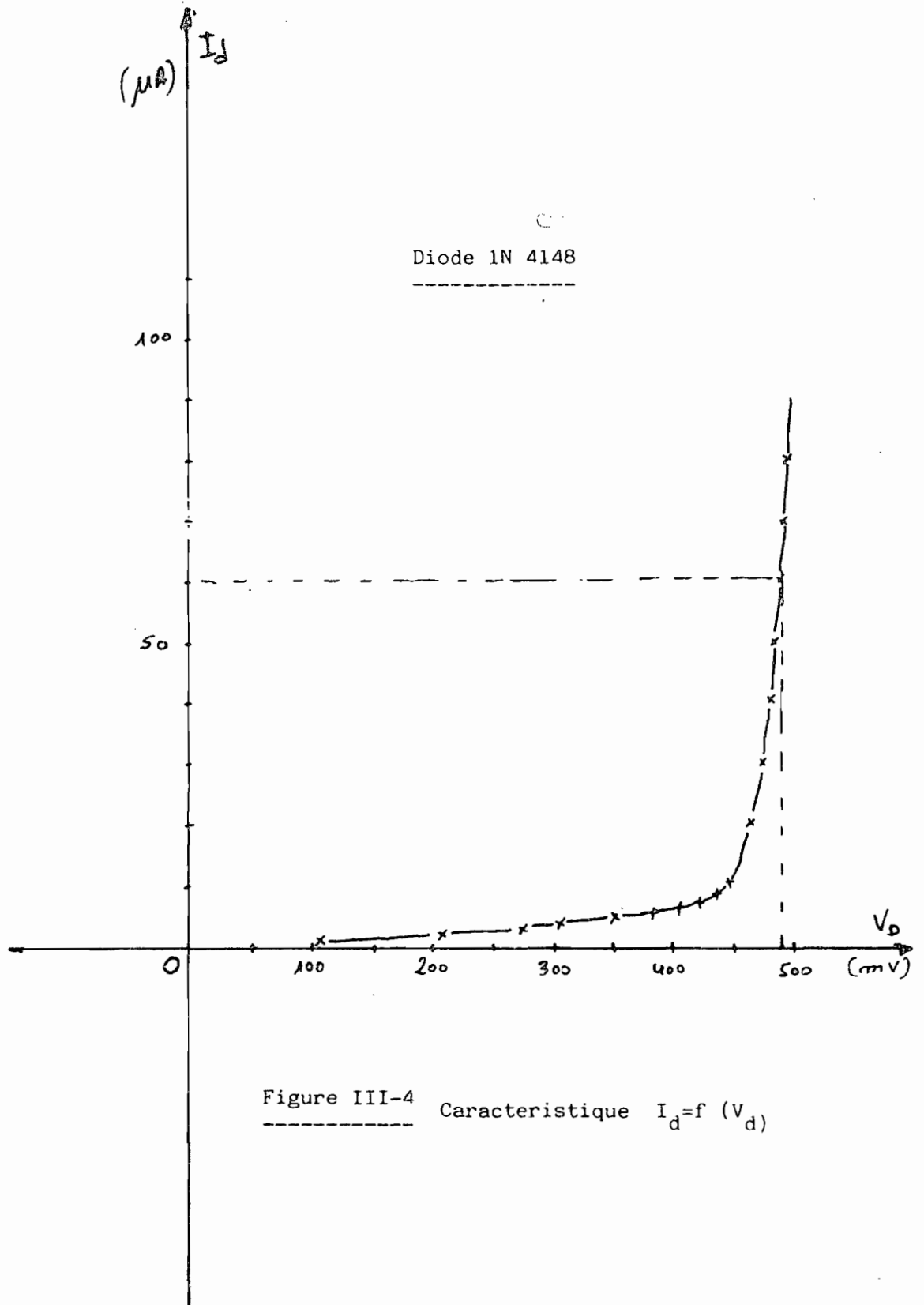


Figure III-4 Caractéristique  $I_d = f(V_d)$



Les mesures faites de façon statique (les photo-transistors étant remplacés par des sources de tension stabilisées) donnent pour les points C, F, S de la figure III-2 les valeurs suivantes (en volts).

C	F	S	Commentaires
0,000	0,000	0,000	Equilibre
- 1,05	+ 0,755	+ 0,050	Très petit signal
- 1,457	+ 1,437	0,300	
- 2,159	+ 2,761	1,5	Petit signal

Ce tableau montre les tensions de sortie de l'étage push-pull qui ne deviennent efficaces qu'à partir de 1,5 volts de signal en F.

Le système est très stable car pour obtenir en C = - 1,5 V, il faut une tension différentielle à l'entrée de R1, R'1 de 10 mV.

On dispose d'un système identique à celui qu'on vient de décrire pour commander chaque moteur.

### III - Electronique auxiliaire

#### 1/ Description

Cette électronique est appelée auxiliaire par opposition à celle permettant la visée. Elle comprend un circuit de base reproduit deux fois et permettant l'un de commander la montée ou descente du piston et l'autre l'indication de fin de journée et l'ordre de retour vers l'Est et l'attente du lendemain.

Le schéma de ce circuit est donné à la figure III-7.

Ces circuits C1 à C4 sont des portes NOR (NON-OU) à 2 entrées, intégrés dans un seul composant : le C D 4001.

LDR : est une photo-résistant type LDR 03

R1 = 100 KR

R2 = 1KR

Ro et P seront fonction du but final du circuit.

T : un transistor NPN quelconque (type 2 N 1711)

Rel : relais 12 V, faible consommation (quelques mA).

#### 2/ Fonctionnement

Les circuits C1 à C3 sont montés en inverseurs.

Le circuit C1 - C2 - R1 est un trigger de Schmitt.

Si la LDR est éclairé, sa résistance devient petite et à l'entrée de C1, on atteint la valeur donnant un niveau logique zéro (33 % de V+). La sortie de C1 passe à 2 et celle de C2 à zéro. Le retour pour R1 verrouille franchement le système au niveau bas.

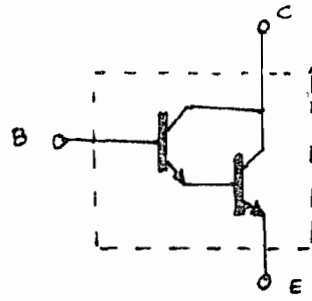


Figure III-6

Transistor Darlington

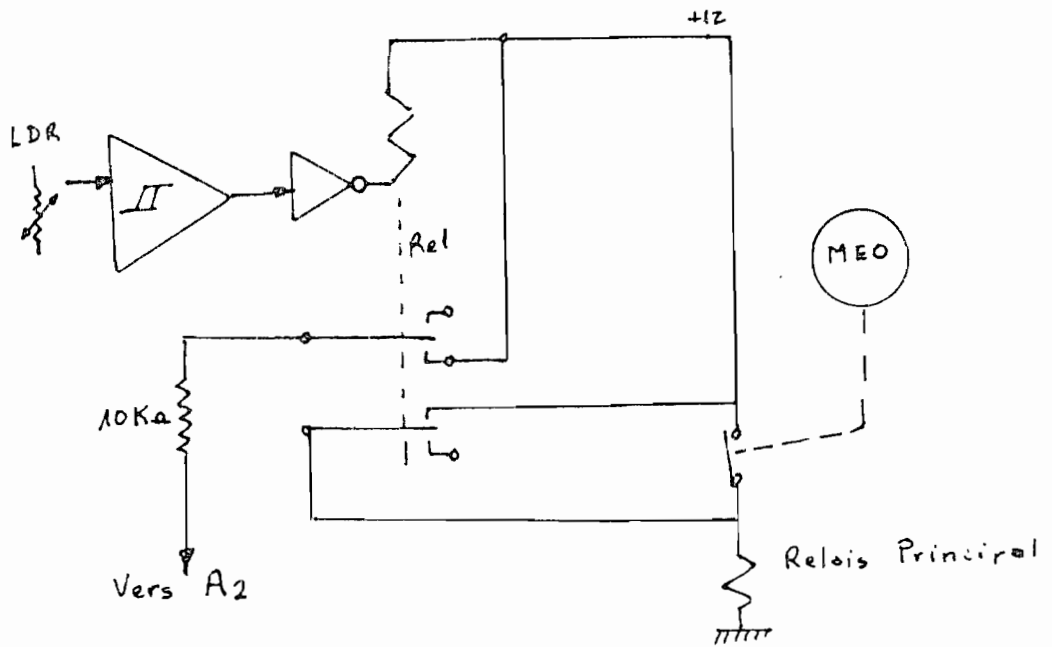


Figure III-8

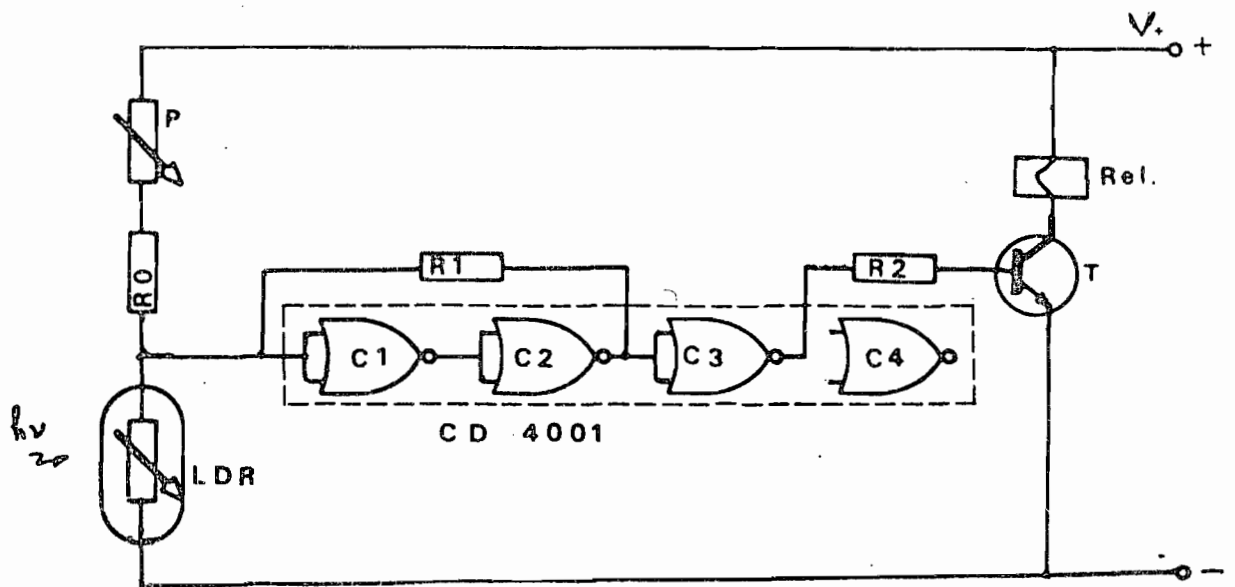


Figure III-7

C3 inverse le signal et à travers R2, la base de T reçoit un courant tel que :

$$I_b > \frac{I_c}{\beta}$$

T se sature et Rel colle.

Lorsque l'éclairement diminue, même progressivement, le trigger de Schmitt ne basculera pas tant que toute la tension à l'entrée de C1 (qui est déterminée par la LDR et R1, n'atteint pas le seuil du niveau logique "1" (75 % de la valeur de V+). A ce moment, C1 - C2 changent d'état et c'est le niveau logique "1" qui se trouve présent à la sortie de C2, ce qui verrouille cette fois-ci C1-C2 au niveau 1. T se bloque, Rel décolle.

### 3/ Utilisation

Ce circuit a été utilisé pour deux fonctions :

- La commande de lever et descente du piston
- La commande de retour vers l'Est.

#### a) Commande de lever et descente de piston

Nous avons vu que le piston est commandé par un moto-réducteur et une came. Ce piston comprenant 4 gorges latérales et situées E-O et N-S au fond, desquelles se trouvent les couples d et d' les photo-transistors décrits en III-2. Un couple est placé dans les gorges E-O et l'autre N-S. Si l'axe de visée du système n'est pas sur le soleil ou si pour une raison quelconque l'intensité lumineuse est insuffisante sur la LDR, par l'intermédiaire du relais Rel, on donne l'ordre au piston de remonter et de présenter à chaque détecteur 1/8 de la sphère céleste.

La LDR est située au fond d'un tube de 30 cm de long et de 2 centimètres de diamètre.

Quand le système se rapproche de l'axe de visée du soleil, LDR est éclairée. Toujours par Rel, on fait descendre le piston au fond du cylindre et les couples d et d' se "voient" plus que le soleil.

b) Le même circuit est utilisé pour le retour vers l'Est en fin de journée et pour l'attente. La différence essentielle se situe au niveau de la LDR qui est nue et du relais Rel qui est un 2 RT.

Quand l'intensité devient insuffisante, un des contacts Rel se ferme et relie le + 12 volts à l'une des entrées de A2 à travers une résistance de 10 K , forçant le moteur de commande de rotation E-O à revenir vers l'Est (figure III-8).

En butée, un microrupteur coupe le relais principal d'alimentation 2T et sépare tous les circuits électroniques de l'alimentation, sauf le circuit de retour lui-même.

Le deuxième contact de Rel est en parallèle sur le microrupteur qui alimente le circuit principal quand le jour se lève, Rel se ferme et ce deuxième contact réalimente le relais principal et la machine se met en marche.

- TESTS ET CONCLUSIONS -

Le suiveur solaire que nous avons conçu et fabriqué a été testé pendant plusieurs semaines à Dakar. L'appareil a fonctionné convenablement aussi bien par ciel clair que par ciel nuageux et nous avons pu constater une rotation régulière du dispositif ce qui confirme bien nos prévisions concernant l'étage d'amplification et d'asservissement

Les problèmes rencontrés se situent au niveau de l'ensemble mécanique. Sur ce prototype on a pu constater une mauvaise rigidité de l'ensemble qui est néfaste au bon fonctionnement de l'appareil lorsqu'il y a du vent. Nous envisageons donc, pour les mesures de rayonnements que nous devons faire, de modifier la partie mécanique afin d'éviter ces effets.

Nous avons également testé la précision du suivi. Pour faire cette mesure, nous avons incliné l'axe vertical de l'appareil soit dans le plan de l'écliptique. La mesure a été faite en Juillet et la variation d'angle, par rapport au calage normal est petite.

L'axe NS de l'appareil est donc perpendiculaire au plan de l'écliptique dans ce cas. On peut alors comparer la rotation du plan P par rapport à la rotation du soleil.

Nous avons mesuré, à la sortie de l'étage d'asservissement correspondant, la fréquence des impulsions de commande du moteur.

L'intervalle de temps entre deux impulsions correspond donc à un écart angulaire de visée que tolère l'appareil. Sur la figure 4, on peut voir l'enregistrement des impulsions de commande du moteur NS. La vitesse de déroulement du papier est de  $5 \text{ cm/min}$ . L'intervalle de temps maximum entre deux impulsions est de 20 secondes, ce qui correspond à une rotation apparente du soleil de 5'arc.

Ainsi, la précision du pointé peut être évaluée à 5' d'arc. Cette précision est très suffisante pour la plupart des applications que nous projetons et montre la qualité des dispositifs que l'on peut obtenir avec des moyens électriques relativement simples.

A titre d'application, nous avons également comparé les réponses de deux cellules photovoltaïques l'une maintenue perpendiculaire au rayonnement solaire par le suiveur, l'autre placée sur un plan horizontal fixe. Ces deux cellules ont été testées au préalable en laboratoire et nous nous sommes assuré de l'identité de leurs caractéristiques et de leur réponse à l'éclairement.

L'enregistrement simultané des courants de court circuit des deux cellules est représenté sur la courbe de la figure 2. On constate un gain d'environ 20 % sur la journée, ce qui est conforme aux prévisions ( ).

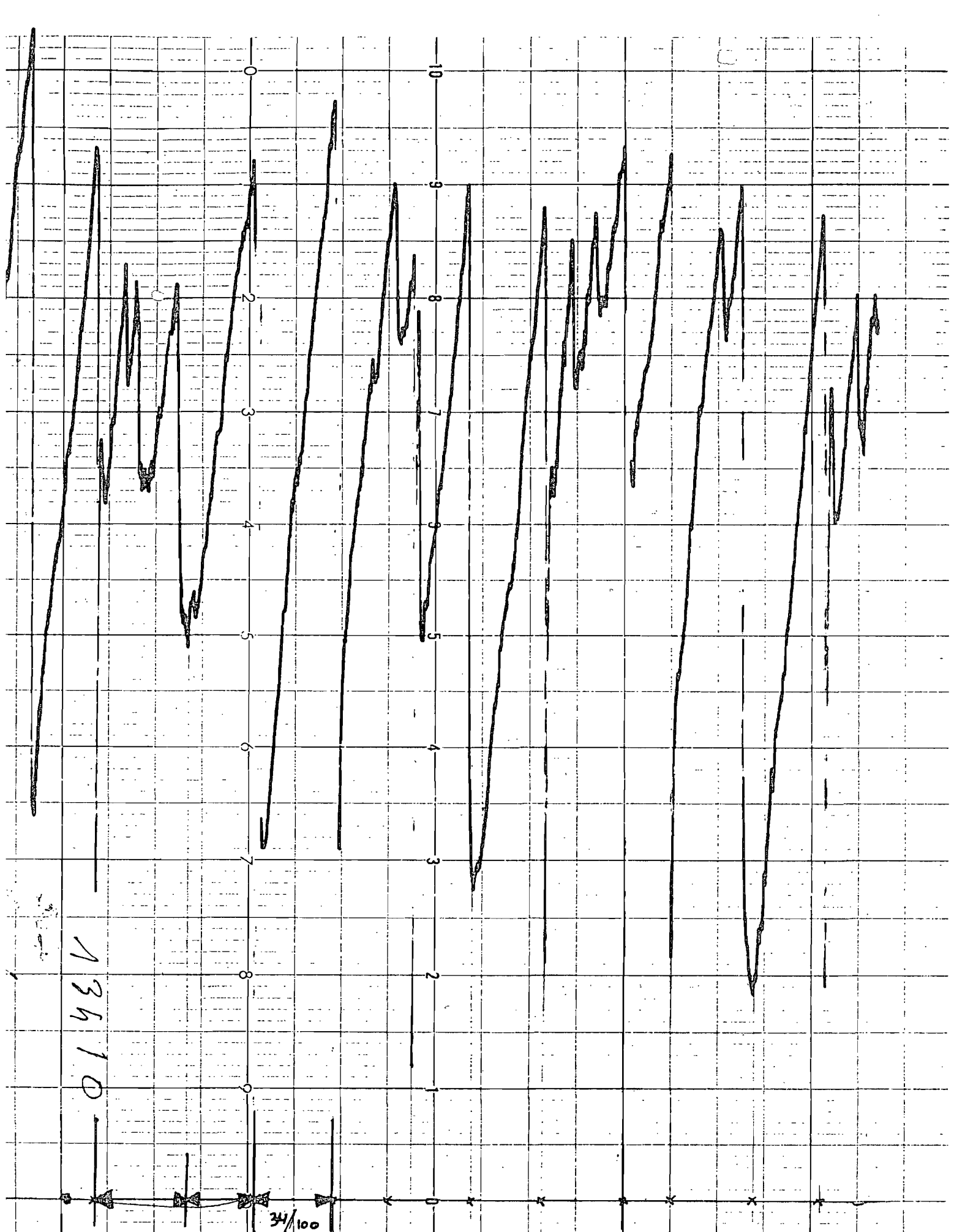
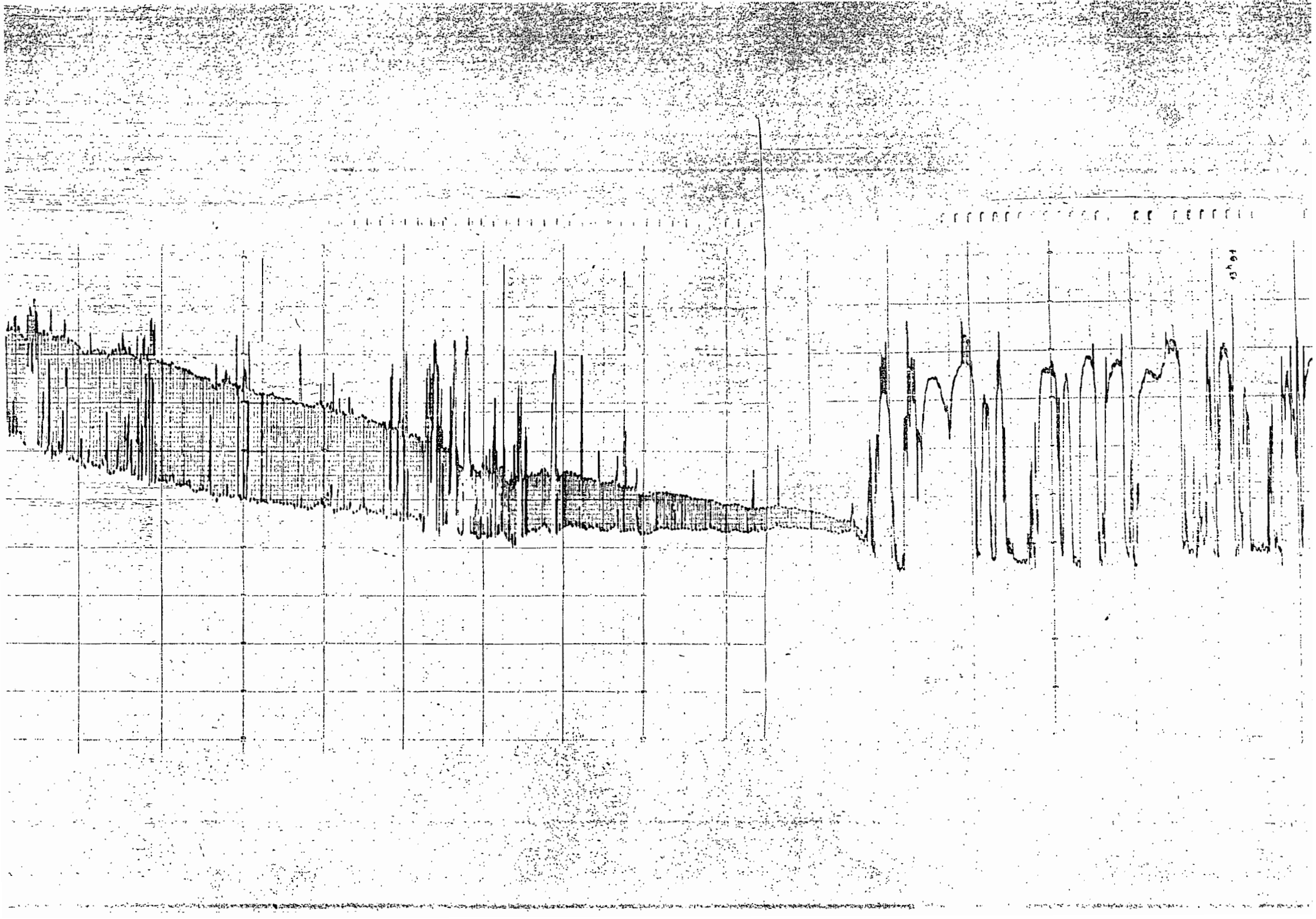


Fig. 1

5 cm/min



43 91





A N N E X E 1

- Calcul de l'angle entre la direction du soleil et la verticale du lieu (angle  $\theta$ ).

Soit un capteur solaire C placé à l'origine d'un système d'axes orthonormés Oxyz.

Soit une sphère de rayon R centrée sur le collecteur. On place la normale au capteur dans le plan xoz.

En référant à la figure I/2, on a les intersections sur cette sphère, des directions suivantes.

Z = Zénith ; N : normale au collecteur

S = Soleil ; E<sub>s</sub> et E<sub>c</sub> : Méridien du soleil et du capteur avec l'équateur de la sphère.

Ceci nous donne :

$l = \widehat{E_c Z}$  : latitude du collecteur

$i = \widehat{ZN}$  : inclinaison du collecteur par rapport au plan horizontal local.

$h = \widehat{E_c E_s}$  : Angle horaire du soleil

$\delta = \widehat{E_s S}$  : Déclinaison du soleil.

$\theta = \widehat{NS}$  : Angle d'incidence des rayons du soleil sur le collecteur.

On a les coordonnées suivantes :

Dans le triangle CNS :  $NS^2 = CN^2 + CS^2 - 2 CN.CS.Cos \theta$

$$Cos \theta = \frac{CN^2 + CS^2 - NS^2}{2 CN.CS} \quad \text{or } CS = CN = R$$

$$\text{d'où } Cos \theta = \frac{2R^2 - NS^2}{2 R^2} \quad (1)$$

$$\text{Or, } NS^2 = (x_s - x_n)^2 + (y_s - y_n)^2 + (z_s - z_n)^2$$

$$NS^2 = \left[ (R \cos \delta \cdot \cosh - R \cos (l-i)) \right]^2 + \left[ R \cos \delta \cdot \sin h - 0 \right]^2 + \left[ R \sin \delta - R \sin (l-i) \right]^2$$

$$NS^2 = R^2 \left[ \cos^2 \delta \cos^2 h + \cos^2 (l-i) - 2 \cos \delta \cdot \cosh \cdot \cos (l-i) + \cos^2 \delta \sin^2 h + \sin^2 \delta + \sin^2 (l-i) - 2 \sin \delta \sin (l-i) \right]$$

$$= R^2 \left[ \cos^2 \delta (\cos^2 h + \sin^2 h) + \sin^2 \delta + \sin^2 (l-i) + \cos^2 (l-i) - 2 \cos \delta \cosh \cos (l-i) - 2 \sin \delta \sin (l-i) \right]$$

$$= R^2 \left[ \left[ 1+1 - 2 \left[ \cos \delta \cosh \cos (1-i) + \sin \delta \sin (1-i) \right] \right] \right]$$

$$= 2R^2 \left\{ 1 - \left[ \cos \delta \cosh (1-i) + \sin \delta \sin (1-i) \right] \right\}$$

$$(1) \text{ devient : } \cos \theta = \frac{2R^2 - 2R^2 \left\{ 1 - \left[ \cos \delta \cosh (1-i) + \sin \delta \sin (1-i) \right] \right\}}{2R^2}$$

$$\cos \theta = 1 - \left\{ 1 - \left[ \cos \delta \cosh (1-i) + \sin \delta \sin (1-i) \right] \right\}$$

$$\text{d'où } \boxed{\cos \theta = \cos \delta \cosh \cos (1-i) + \sin \delta \sin (1-i)} \quad [2]$$

$$l \text{ et } i \text{ étant pour un lieu donné fixés, on voit que } \cos \theta = f(\delta, h) \quad [3]$$

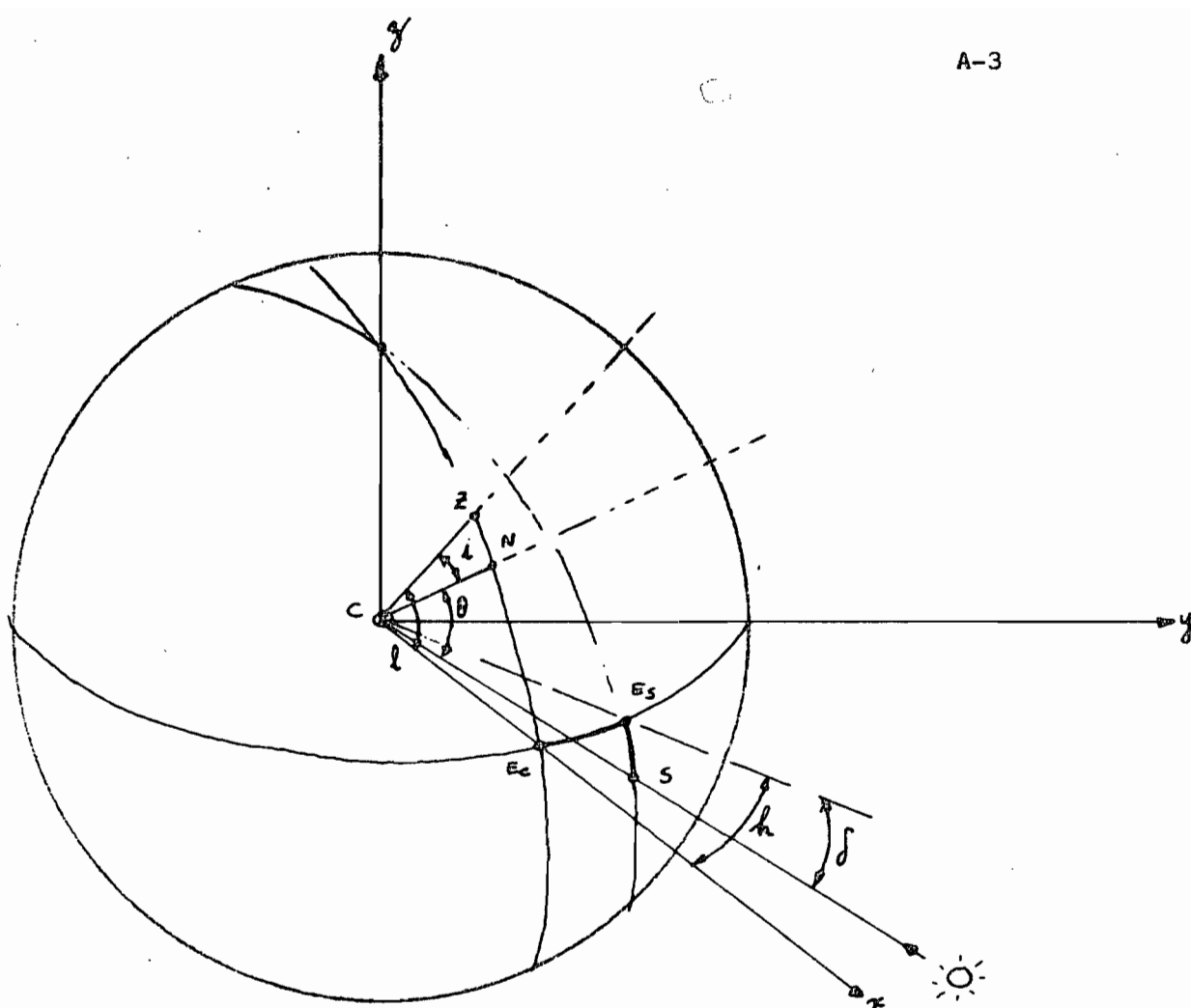


Figure I-2

$$E_c = \begin{cases} R \\ 0 \\ 0 \end{cases} \quad E_s = \begin{cases} R \cosh \\ R \sinh \\ 0 \end{cases} \quad Z = \begin{cases} R \cos l \\ 0 \\ R \sin l \end{cases}$$

$$N = \begin{cases} R \cos(l-i) \\ 0 \\ R \sin(l-i) \end{cases} \quad S = \begin{cases} R \cos \delta \cosh \\ R \cos \delta \sinh \\ R \sin \delta \end{cases}$$

A N N E X E II

RAPPEL SUR LES SEMI- CONDUCTEURS

Cristal semi-conducteur

Grâce à un traitement approprié (solidification très lente) les atomes de semi-conducteurs (germanium, silicium) se disposent selon un arrangement très régulier.

On obtient un réseau cristallin - cubique dont l'arrête de la maille élémentaire est :

= 5,66 Å pour le germanium  
= 5,43 Å pour le silicium.

Trous et électrons

L'agitation thermique peut rompre certaines liaisons. Un électron peut quitter le réseau et devient disponible pour la conduction. Il laisse une place vacante appelé trou et peut capter un électron vagabond. Le trou se comporte comme une charge positive.

Dans un semi-conducteur intrinsèque c'est-à-dire on a  $n = p$

$n$  et  $p$  étant le nombre d'électrons et de trous par unité de volume.

Sous l'effet de l'agitation thermique, les atomes vibrent autour de leur position d'équilibre et acquièrent une énergie de l'ordre  $KT$ .  
avec  $K = 1,3805 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$  constante de Boltzman

$T$  : température absolue en degré Kelvin exprimé en électrons volts  
(pour  $T = 300^\circ\text{K}$ )

$$KT/q = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \times 300}{1,6021 \cdot 10^{-19}} = 0,0259$$

Nous prendrons par la suite  $KT/q = 0,026 \text{ eV}$

Concentration intrinsèque

On a :  $n \cdot p = n_i^2$

$n_i$  : densité intrinsèque

$n_i^2 : N_e V_v \exp. (- EG/KT)$

$EG$  = largeur de la bande interdite.

$EG = 1,12 \text{ eV}$  pour le silicium

$EG = 0,72 \text{ eV}$  pour le germanium.

$N_c = 2 \cdot \frac{(2 \pi m_N \cdot KT)^{3/2}}{h^3}$  : Nombre effectif d'états permis dans la bande de conduction.

$N_v = 2 \cdot \frac{(2 \pi m_P \cdot KT)^{3/2}}{h^3}$  : n.e. d'e. permis dans la bande de valence.

$m_N$  et  $m_p$  : masse apparentes des électrons et des trous

$h = 6,625 \cdot 10^{-34}$  constante de Planck

Si le semi-conducteur est parfaitement pur, on peut écrire :

$$n = p = n_i \quad \text{et} \quad m_p = m_N = m_e$$

et à 300°K, on a environ pour le silicium :

$$n = 2 \cdot \left( \frac{2 \pi m_e K T}{h^2} \right)^{3/2} \cdot e^{-\frac{E_g}{2KT}}$$

$\exp(-E_g/2KT) \approx 4 \cdot 10^{-10}$  à 300°K

Si on veut le nombre de porteur par cm<sup>3</sup>, nous prendrons en GGS :

$$K = 1,38 \cdot 10^{-16} \text{ Erg/}^\circ\text{K}$$

$$h = 6,62 \cdot 10^{-27} \text{ Erg/s}$$

$$m = 0,9 \cdot 10^{-27} \text{ g.}$$

$$n = 2,47 \cdot 10^{-19} \times 4 \cdot 10^{-10} = 10 \cdot 10^{+9} \text{ porteurs/cm}^3$$

$$n = 10^{+10} \text{ porteurs/cm}^3$$

#### Concentration dans les semi-conducteurs extrinsèques

Soit  $N_A$  et  $N_D$  les densités d'accepteurs et donneurs à une certaine température, certains donneurs restent non ionisés, alors que d'autres le sont (ils deviennent ionisés positivement).

Si  $n_D$  est la densité des donneurs non ionisés,  $N - n_D$  est celle des donneurs ionisés.

De même, pour les accepteurs, si  $p_A$  est la densité des accepteurs non ionisés  $N_A - p_A$  est celle des accepteurs ionisés.

L'équation de neutralité du semi-conducteur s'écrit alors :

$$p + N_D - n_D = n + N_A - p_A$$

$$\text{ou } n + n_D - p - p_A = N_D - N_A$$

pour  $n_D = p_A = 0$  (zone d'épuisement du semi-conducteur)

$$n - p = N_D - N_A$$

Pour un s.c. du type N,  $p \ll n$

$$n = N_D - N_A$$

Or, on a  $n \cdot p = ni^2 = (N_c \cdot N_v \cdot \exp. (-E_g/KT))$

$$p = \frac{ni^2}{N_D - N_A}$$

et, si  $p \gg n$   $n = \frac{ni^2}{N_A - N_D}$

### Mobilité et conductivité.

Si on applique un <sup>champ</sup> électrique  $E$  à un barreau de semi-conducteur de longueur  $d$  les vitesses apparentes des trous et des électrons sont :

$$v_p = \mu_p \cdot E \quad \text{et} \quad v_n = \mu_n \cdot E$$

$\mu_p$  et  $\mu_n$  : mobilités des trous et des électrons (en  $m^2/s/V$ )

on a pour le silicium et le germanium les valeurs suivantes :

Silicium :	$\mu_n = 0,12 \text{ m/s}$	}	pour un champ de 1 Volt/mètre
	$\mu_p = 0,05 \text{ m/s}$		
Germanium :	$\mu_n = 0,38 \text{ m/s}$		
	$\mu_p = 0,19 \text{ m/s}$		

Les courants des trous et des électrons sont respectivement :

$$I_p = q \cdot p \cdot v_p \cdot S$$

$$I_n = q \cdot n \cdot v_n \cdot S$$

$v_p$  et  $v_n$  : vitesse des trous et des électrons traversant perpendiculairement une section de surface  $S$ .

Le courant total est  $I = I_p + I_n$

$$I = q \cdot (p \cdot v_p + n \cdot v_n) \cdot S = q \cdot (p \cdot \mu_p + n \cdot \mu_n) \cdot E \cdot S$$

La densité de courant est :  $\tau = \frac{I}{S}$

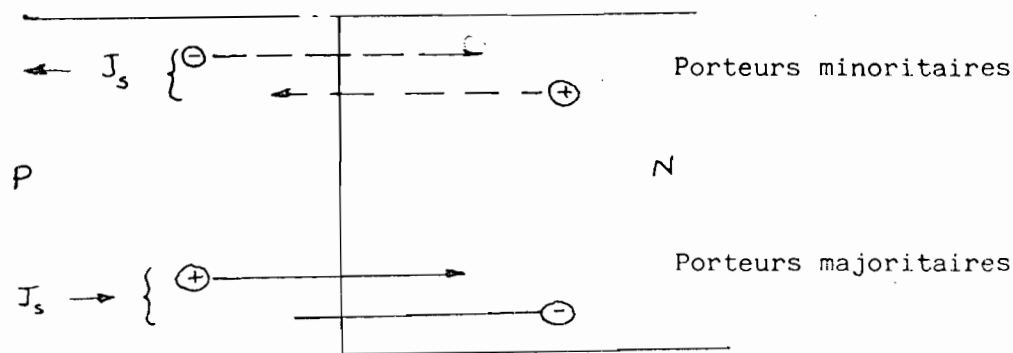
Par définition, la conductivité est :  $\sigma = \frac{\tau}{E}$

cad 
$$\sigma = q \cdot (p \cdot \mu_p + n \cdot \mu_n)$$

## La jonction PN

L'existence de charges de transition à la jonction PN freine très rapidement le mouvement des porteurs majoritaire alors que les porteurs minoritaire ont au contraire le passage facilité.

On aboutit à un état d'équilibre thermodynamique où le courant de conduction dû aux porteurs majoritaires est exactement compensé par le courant de diffusion dû aux porteurs minoritaires.



Le courant d'équilibre, appelé courant de saturation a pour densité :

$$J_s = J_p + J_n = q \left( D_p \frac{n_p}{L_p} + D_n \frac{p_n}{L_n} \right)$$

avec  $D_p = \mu_p \left( \frac{KT}{q} \right)$  et  $D_n = \mu_n \left( \frac{KT}{q} \right)$  constantes de diffusion relative aux trous et aux électrons.

$L_p$  et  $L_n$  Longueur de diffusion relative aux trous et aux électrons.

Lorsqu'une jonction PN est soumise à un potentiel  $V$ , le courant dû aux porteurs minoritaires ne change pas  $I_m = I_s$  alors que celui dû aux majoritaires est :

$$I_M = I_s \exp \left( \frac{qV}{KT} \right)$$

avec  $I_s$  : courant de saturation.

Le courant résultant est :  $I = I_M + I_m = I_s \left[ \exp \left( \frac{qV}{KT} \right) - 1 \right]$

Comme nous avons défini  $\frac{KT}{q} = 0,026 \text{ eV}$

on utilisera  $E = \frac{KT}{q}$

et on écrira :  $I = I_s \left[ \exp \left( \frac{V}{E_T} \right) - 1 \right]$

Si la jonction (la diode) est polarisée dans le sens passant on a :

$$I = I_d \quad V = V_d$$

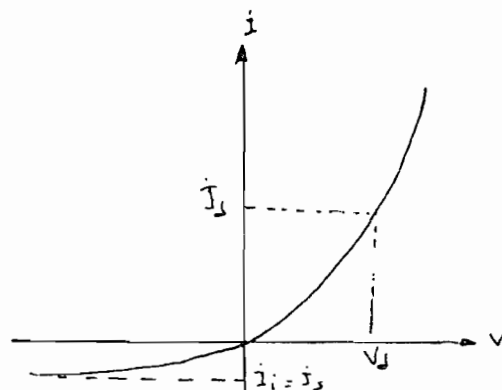
$$I_d = I_s \left[ \exp \left( \frac{V_d}{E_T} \right) - 1 \right] \approx I_s \exp \left( \frac{V}{E_T} \right)$$

Dans le sens bloquant (inverse) :  $I = -I_i$  ;  $V = -V_i$

$$-I_i = I_s \left[ \exp\left(-\frac{V_i}{E_T}\right) - 1 \right]$$

$$I_i = I_s \left[ 1 - \exp\left(-\frac{V_i}{E_T}\right) \right] \approx I_s$$

d'où la caractéristique d'une diode PN :



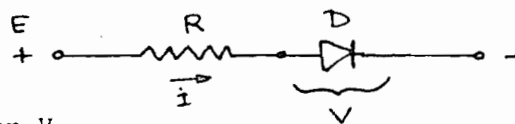
Pour diode au silicium, on voit que si  $V_d$  augmente par palier de 0,026 volt,  $I_d$  croît alors selon une progression géométrique  $e = 2,7$ .

On a le tableau suivant :

$\Delta V_d$	$V_d$	$I_d/I_s - 1$	$I_d$
-	0	0	-
+ 0,026	0,026	2,27	1 x 2,7
+ 0,026	0,052	7,44	2 x 2,7
+ 0,026	0,78	20,09	3 x 2,7

Diode polarisée dans le sens passant

Soit une résistance  $R$  en série avec un diode  $D$  polarisé dans le sens passant.



Pour trouver  $V$ ,

On doit résoudre le système :

$$\begin{cases} I = I_s \exp\left(\frac{V}{E_T}\right) & (1) \\ I = (E - V) / R & (2) \end{cases}$$

$$(1) \rightarrow \text{Log}\left(\frac{I}{I_s}\right) = \frac{V}{E_T} \rightarrow V = E_T \cdot \text{Log}\left(\frac{I}{I_s}\right)$$

$$(2) \rightarrow I = \frac{E}{R} - \frac{V}{R} = \frac{E}{R} - \frac{E_T}{R} \text{Log}\left(\frac{I}{I_s}\right)$$



$$I = \frac{E}{R} - \frac{E_T}{R} \log \frac{E}{I_s R} - \frac{E_T}{R} \log \left( 1 - \frac{V}{E} \right)$$

En application dans les circuits électroniques on a généralement  $V \ll E$

$$\rightarrow \log \left( 1 - \frac{V}{E} \right) \approx -\frac{V}{E}$$

d'où

$$I = \frac{E}{R} - \frac{E_T}{R} \log \frac{E}{I_s R} + \frac{E_T \cdot V}{R \cdot E}$$

$$RI = E - E_T \log \frac{E}{I_s R} - \frac{E_T \cdot V}{E} \quad (2)$$

d'après (2)  $V = E - RI$

On porte dans (3)

$$\rightarrow RI \left( 1 - \frac{E_T}{E} \right) = E - E_T - E_T \log \frac{E}{I_s R}$$

$$RI = E \left( \frac{E}{E + E_T} + \frac{E_T}{E + E_T} + \frac{E_T}{E + E_T} \log \frac{E}{I_s R} \right)$$

Or  $E \gg E_T$  d'où :

$$I = \frac{E}{R} \left( 1 + \frac{E_T}{E + E_T} \log \frac{E}{I_s R} \right)$$

Exemple : pour le silicium  $I_s = 10^{-12} \text{ A} \approx 300^\circ \text{K}$   
 $E_T = 0,026 \text{ V}$

Pour  $R = 100 \text{ k}\Omega$   
 $E = 12 \text{ V}$  }  $I = 115 \mu\text{A}$

d'où  $V = E - RI = 0,483 \text{ V}$

## C A N N E X E 3

=====

Calcul de la précision de visée.

L'enregistreur potentiometrique étant branché au point C de la Figure III-2, l'amplitude sur l'axe des ordonnées est proportionnel à l'amplitude du signal déerreur.

Le calibrage pour effectuer une telle mesure est long et délicat.

Par contre le controle du défilement du papier est très aisé, ceci d'autant plus que l'enregistreur utilisé a son système d'entraînement entièrement digitalisé.

Il nous suffira donc de mesurer l'écart entre deux impulsions de rattrapage pour avoir l'intervalle de temps entre deux corrections.

La Terre effectuant une rotation par 24 heures nous avons une variation angulaire de

15'/min.

L'écart entre deux rattrapages, lu sur l'enregistrement est de:

34/100 de minute

Ceci correspond a une variation angulaire de:

$$\frac{15.34}{100} = 5' 1$$

On peut remarquer que les intervalles entre deux rattrapages n'est pas régulier; ceci est du aux frottements mécaniques de toutes sortes et aux à-coups dus aux rafales de vent.

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

- 1 - A.A. SFEIR ; G. GUARRACINO ; Ingénierie des Systèmes solaires -  
Technique et Documentation - PARIS - 1981.
- 2 - Y. MARFAING - Cahiers A.F.E. D.E.S.
- 3 - P. CHARTIER ; S.S. FALL ; M. FAYE ; B. BA ; M. CADENE et G.W. COHEN-SOLAL  
Photovoltaic Solar Energy - Conférence - Luxembourg 1977 - D.RIEDEL Pub.  
C. P. 1192.
- 4 - E.L. JOHSON ; J.S. KILLY - 4 EC. Photovoltaic Solar Energy - Conférence.  
Strassar 1982.
- 5 - A. DIMAROGONAS ; A. MOURIKIS ; Solar Energy 25-195 - 1980.
- 6 - Stage Blact Montpellier Juillet 1982 (A paraître).
- 7 - Cours de Maîtrise Physique Appliquée. D. LE GOURIERES - Dakar.
- 8 - Paul MULLER ; Dictionnaire de l'Astronomie - Larousse - 1966.
- 9 - THEKACKORA M.P. Solar Energy - 14 - 1973.
- 10 - DOGNIAUX R. - Compte rendu Congrès UNESCO / W.M.O. n° 477 - Genève 1976.
- 11 - M. BASHAHU - Rapport Stage D.E.A. - Dakar - 1982.
- 12 - Ch. Perrin de BRICHAMBAULT - Estimation du Rayonnement solaire.  
Direction de la Météorologie - Secrétariat d'Etat auprès du Ministère de  
l'Equipement - Janvier 1978.
- 13 - Cahier A.F.E.D.E.S. n° 1 - Janvier 1968.
- 14 - D. DIOP - Rapport Stage D.E.A. - Dakar - 1982.
- 15 - D. LAPLAZE ; D. DIOP ; M. BASHAHU - Solar Energy (A paraître)
- 16 - D.H. LIU ; A. C. JORDAN - Solar Energy - 4 - 1980.
- 17 - P. O. CARDEN - Solar Energy - Vol. 20 p. 343-355.
- 18 - Applications thermiques d'Energie Solaire dans le domaine de Recherche  
et l'Industrie ; Colloques Internationaux du CNRS n° LXXV - 1958.
- 19 - PIZZINI ; GIUFFRIDA ; ZANI ; SCARPI ; DIONISIO ; CONTI ; MODELLI  
"Development of 1 pKW photovoltaic - Module with concentration" ;  
2and E.C. Photovoltaic Energy conference - Berlin 1979 - Dr. RIEDEL  
Publishing CY.
- 20 - "Suiveur solaire", J. GRYSSBERG - Ecole Hassania - Energie Solaire -  
Juillet 1979 - Casablanca.
- 21 - G. YEKUTIELI ; A. BRANDSTETTER ; B. HABER ; R. JOULZARY ; e; kritchman  
and J. MANDELKORN - The Weizmann Institute of Science - Rehovot, Israël -  
Photovoltaic Solar - Energy Conference - Luxembourg - September 27-30 -  
1977.
- 22 - D. H. MASH and P.W. ROSS - Standard Telecommunication Laboratoires Limited  
London Road, Harlow, Essex - Photovoltaic Solar - Energy Conference -  
Luxembourg, September 27-30 - 1977.