

## ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : ELECTROTECHNIQUE

### PROJET DE FIN D'ETUDES



SYSTEMES D'ORIENTATION AUTOMATIQUE DES

CONCENTRATEURS DU RAYONNEMENT SOLAIRE

Proposé par : Z. BARSKI

Etudié par : OMAR BELABED  
SAMIR KHERAT

Dirigé par :



PROMOTION : Janvier 1984

المدرسة الوطنية للعلوم التطبيقية  
المكتبة  
ECLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHEQUE



## REMERCIEMENTS.

Nous exprimons notre gratitude à Monsieur Z.BARSKI, Dr.es-sciences, notre promoteur de nous avoir suivi et corrigé dans notre travail. Nos sincères remerciements vont à Mr. le Directeur de la station de l'énergie solaire de Bouzaréah, pour nous avoir autorisé à travailler à la station. Que Mr. LOUALLI, responsable de la maintenance à l'E.N.P, reçoive toute notre gratitude pour nous avoir aidé à monter le bâti.

Résumé: Le projet que nous présentons dans ce mémoire de fin d'études d'ingénieur, consiste en la réalisation d'une commande automatique d'un panneau solaire. Nous avons montré dans ce travail la nécessité de la commande automatique du fait du faible rendement d'un panneau à position fixe. Le déplacement du panneau solaire est assuré par un système hydraulique; la pression de l'eau courante étant rendue variable périodiquement grâce à un impulsateur. Un système électronique détectant le déplacement du soleil commande le système hydraulique.

Pour terminer, nous avons émis quelques améliorations possibles du dispositif de commande automatique du capteur.

Abstract: The project we present in this thesis of final studies of engineering consist on the achievement of an automatic command of a solar panel. In this thesis we have shown the necessity of the automatic command, because of the weak of the panel in a fixed position. The movement of the solar panel is directed by an hydrolic system; as the pressure of the water becomes variable thanks to an impulsator.

An electronic system, detecting the movement of the sun, directs the hydrolic system. Finally, we have presented some suggestions concerning possible improvements of the dispositif of the solar panel with an automatic command.

### ملخص

- يمثل هذا المشروع الذي تتضمنه رسالة نهاية الدراسة في الهندسة، في دراسة وانجاز تحكم آلي للافتة شمسية، ولقد أظهرنا في هذا العمل ضرورة التحكم الآلي بسبب المردود الضئيل للافتة الشمسية ذات الموقع الثابت، وتحقيق حركة للافتة الشمسية بفضل جهاز مائي، ان يصبح الضغط المائي دورى التغيير بتأثير مولد النبضات،

تتحكم الجملة الالكترونية التي تعين موقع الشمس في الجملة المائية،

وفي الختام طرحنا بعض الاقتراحات المتعلقة بإمكانية تحسين فطلية الجملة:



# TABLE DES MATIERES

	Page
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I. ETUDE DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DE LA RADIATION SOLAIRE.	
1.Principale caractéristique physique de la radiation solaire.....	3
2.Pertes dans l'atmosphère en journée claire.....	3
3.Caractéristique du spectre de la radiation directe à la surface terrestre.....	4
4.Action des nuages.....	6
5.Données mondiales pour la radiation globale.....	6
CHAPITRE II. POSITION DU SOLEIL ET ORIENTATION DES CAPTEURS	
1.Définition de la déclinaison.....	12
2.Position optimale d'un capteur fixe.....	13
3.Différences entre un capteur fixe et un capteur tournant.....	15
4.Utilisation du rayonnement solaire et dimensionnement des installations.....	16
CHAPITRE III. SYSTEMES DE CONCENTRATION SOLAIRE.	
1. Introduction.....	18
2. Les systèmes d'orientation automatique.....	19
3. Le système électromécanique.....	19
4. Les régulateurs.....	20
5. Les capteurs.....	20
5.1 Capteur mobile.....	20
5.2 Capteur angulaire.....	21
5.3 Capteur type "boite noire".....	22
5.4 Assemblage matriciel.....	23
5.5 Capteur à "ombre projetée".....	23
5.6 Système en temps réel.....	24
5.7 Méthode hybride.....	24
5.8 Capteur multi-cellules.....	25
5.9 Utilisation du panneau principal comme capteur.	26

.../..

## CHAPITRE IV. DESCRIPTION D'UN DISPOSITIF D'ORIENTATION AUTOMATIQUE DE CAPTEURS SOLAIRES

1. Introduction.....	27
2. Description de l'appareil.....	28
2.1 Etude du système de traction.....	28
2.1.1 Installation hydraulique.....	28
2.1.2 Etude et choix des servomoteurs hydrauliques.....	29
2.1.3 Levier d'entraînement de la roue.....	31
2.1.4 La roue.....	31
2.2 Etude du batit.....	35
2.3 L'impulsateur.....	35
2.4 Etude du circuit de commande.....	38
2.4.1 Senseur optique.....	38
2.4.2 Amplificateur et blocades.....	39
2.5 Circuit de retour dans la position du matin....	43
3. Fonctionnement du dispositif.....	44
4. Mise au point.....	45

## CHAPITRE V. ANALYSE DU SYSTEME

1. Introduction.....	46
1.1 Le senseur optique.....	46
1.2 L'amplificateur.....	47
1.3 Les blocades électromagnétiques.....	48
1.4 Association roue et panneau.....	48
2. Analyse des systèmes non-linéaires.....	48
3. Analyse d'un système non-linéaire par une fonction descriptive.....	49
4. Analyse dynamique des systèmes non-linéaires par la fonction descriptive.....	51
5. Analyse du système par la méthode de la fonction descriptive.....	52
CONCLUSION.....	56
ANNEXE: FONCTIONS DESCRIPTIVES DES ELEMENTS NON-LINEAIRES.....	58
BIBLIOGRAPHIE.....	61



## INTRODUCTION

Depuis les âges les plus reculés de l'histoire de l'homme, le soleil a été une source de créations originales de symboles, de mythes et d'applications pratiques dans le domaine de la technique.

L'homme vivant dans son milieu naturel qu'il ressentait comme hostile, n'a cessé de travailler à dompter les éléments naturels afin de rendre clément son environnement.

Le déplacement cyclique du soleil faisant place par intermittence à la lumière du jour et à l'obscurité de la nuit, à la chaleur de l'été et au froid de l'hiver imposait aux ancêtres de l'homme une angoisse profonde qui déclenchait LA QUESTION. Le mythe y répondait alors, rétablissant le difficile équilibre d'une pensée magique primitive.

Pour l'homme contemporain, le développement du rationalisme a permis de dépasser ces considérations mythiques et d'établir un nouvel espace de connaissances tourné essentiellement vers l'utilité et l'exploitation matérielle des ressources naturelles.

Les ressources naturelles dont dispose l'homme sont de différentes natures.

Au début de l'industrialisation, le charbon constituait une ressource d'énergie primordiale. La découverte du pétrole et ensuite du gaz, quant à elle, révolutionné les techniques de production d'énergie. Nous pouvons constater qu'il existe un rapport entre la nature des ressources utilisées et le développement de la technique. Sur ce point, notre génération est celle de l'atome et de l'énergie solaire.

Vers 1950, l'énergie atomique, utilisée tout d'abord dans un but de destruction, fut appliquée à l'usage industriel. Ainsi, l'Union Soviétique, la Grande Bretagne et les Etats Unis ont-ils inauguré, en 1957 et 1956, des centrales électriques nucléaires produisant du courant électrique commercialisé.

En ce qui concerne l'énergie solaire, l'idée d'une utilisation des ressources du rayonnement solaire fut imminente dès le début de la deuxième moitié du vingtième siècle. La possibilité étant plus effective dans les zones tropicales et les zones arides où l'insolation est à peu près constante.

La source lumineuse émanant du soleil peut conduire à diverses applications. Parmi celles-ci, nous citons l'exemple d'une station de pompage réalisée aux Etats-Unis, en 1902, dans l'Etat de Californie. En Algérie, un miroir dénommé "Heliodyne" était employé en 1954 pour l'oxydation de l'azote de l'air dans la fin d'obtenir du nitrate de soude pour l'agriculture.

Lors du premier symposium mondial sur l'énergie solaire tenu en Arizona, en 1955, neuf cents savants et industriels de trente quatre pays ont discuté des aspects scientifiques et pratiques du problème et passé en revue plus de cinquantes procédés d'utilisation de l'énergie solaire.

Depuis cette première rencontre, bien des progrès ont été réalisés tant au niveau de la recherche pure qu'au niveau de la technique. Il n'en demeure néanmoins que biens de problèmes se posent encore. Parmi ces problèmes, le rendement du capteur solaire et le coût de l'énergie emmagasinée restent d'actualité et entravent la possibilité d'une application possible à l'échelle industrielle.

Le projet que nous présentons dans ce présent travail consiste en la réalisation d'une commande automatique d'un panneau solaire dans le but d'en maximaliser le rendement. Dans le cas où le capteur est orienté d'une manière optimale, il ne capte qu'une infime quantité de rayonnement solaire, bien que le soleil brille. Dans l'autre cas où il suivrait le mouvement du soleil dans sa course diurne, il capterait une plus grande quantité d'énergie; ce qui contribuerait à un accroissement du rendement du dispositif.

Dans notre conception du problème du rendement et du coût, le déplacement du panneau solaire est assuré par la pression de l'eau courante grâce à un système hydraulique. La dépense d'énergie nécessaire étant puisée à l'intérieur même du système. Ce qui résoud le problème d'un apport extérieur d'énergie. Nous avons travaillé à réaliser un système fiable et peu onéreux. Les éléments qui le constituent sont d'une construction assez simple et le dispositif dans son ensemble ne demande pas une importante maintenance.

NOTA: les références bibliographiques sont notées /X/, X étant le numéro de l'ouvrage cité dans la bibliographie.



# CHAPITRE I

## ETUDE DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

### DE LA RADIATION SOLAIRE

#### I. PRINCIPALE CARACTERISTIQUE PHYSIQUE DE LA RADIATION SOLAIRE.

La quantité d'énergie rayonnée atteignant une unité de surface par unité de temps est connue sous le nom "d'irradiation". L'irradiation moyenne extra-terrestre, suivant un plan normal aux rayons solaires, à l'extérieur de l'atmosphère terrestre est de 1,35 kW par mètre carré. Du fait que l'orbite terrestre est elliptique, la distance soleil-terre varie légèrement au cours de l'année, il s'ensuit qu'actuellement l'irradiation extra-terrestre varie de  $\pm 3,4\%$ .

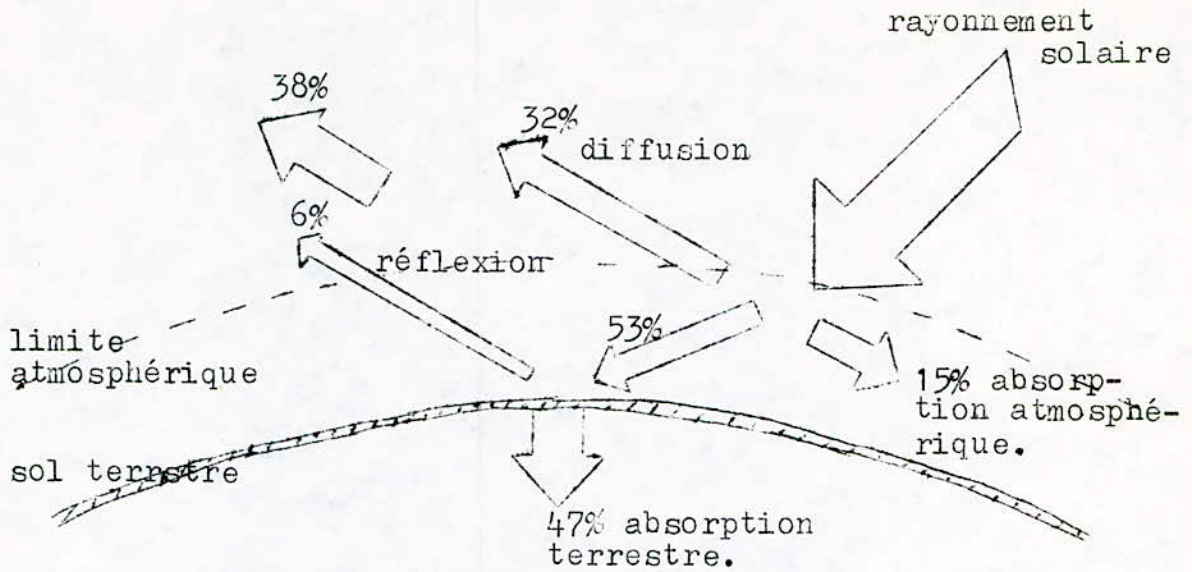
Le rayonnement direct est presque un "faisceau lumineux". Sachant que l'angle du centre du soleil à son bord, vu de la terre, n'est que de 0,00465 radians, soit 16'29", le rayonnement solaire peut être assimilé à un faisceau uniforme.

L'énergie d'une longueur d'onde particulière du spectre atteignant une unité de surface par unité de temps est connue sous le nom d'irradiation spectrale. (fig. I.1)  
On peut assimiler le spectre solaire extra-terrestre à celui du corps noir à 5900 K.

#### 2. PERTES DANS L'ATMOSPHERE EN JOURNEE CLAIRE.

Le spectre solaire est considérablement modifié lorsqu'il passe par l'atmosphère terrestre ; une grande partie de l'énergie est perdue par dispersion et absorption, même en journée claire. (fig. I.2).

Avec un ciel sans nuages et non pollué, plus de 30% de l'énergie incidente est perdue. Cette perte se fait par la



fig; I.2 Le rayonnement solaire : altération et bilan/2/.

réflexion produite par les molécules d'air dans l'espace et par la diffusion dans l'atmosphère par formation de gaz. Parmi ces gaz, on cite l'ozone qui absorbe les ultra-violets, la vapeur d'eau dont l'absorption considérable des infra-rouges se fait par bandes et le dioxyde de carbone qui absorbe fortement les bandes médianes des infra-rouges. (fig. I.2).

Cette absorption d'énergie a d'importantes conséquences thermiques et photochimiques dans l'atmosphère ; par exemple la production de la couche d'ozone.

### 3. CARACTERISTIQUES DU SPECTRE DE LA RADIATION DIRECTE A LA SURFACE TERRESTRE :

La figure I.1 représente la courbe typique de l'irradiation spectrale à la surface terrestre pour un rayonnement direct après son passage dans une atmosphère claire qui contient de la vapeur d'eau et d'autres constituants naturels.

Nous remarquons que la figure du spectre extra-terrestre subit un changement du fait de l'absorption due à l'ozone pour des longueurs d'ondes au dessus de 300 nm, et de l'absorption due au dioxyde de carbone (au dessus de 2500 nm) ; ainsi la radiation solaire enregistrée en surface est limitée à des longueurs d'ondes entre 300 nm (ultra-violet) et 2500 nm (milieu de l'infra-rouge)



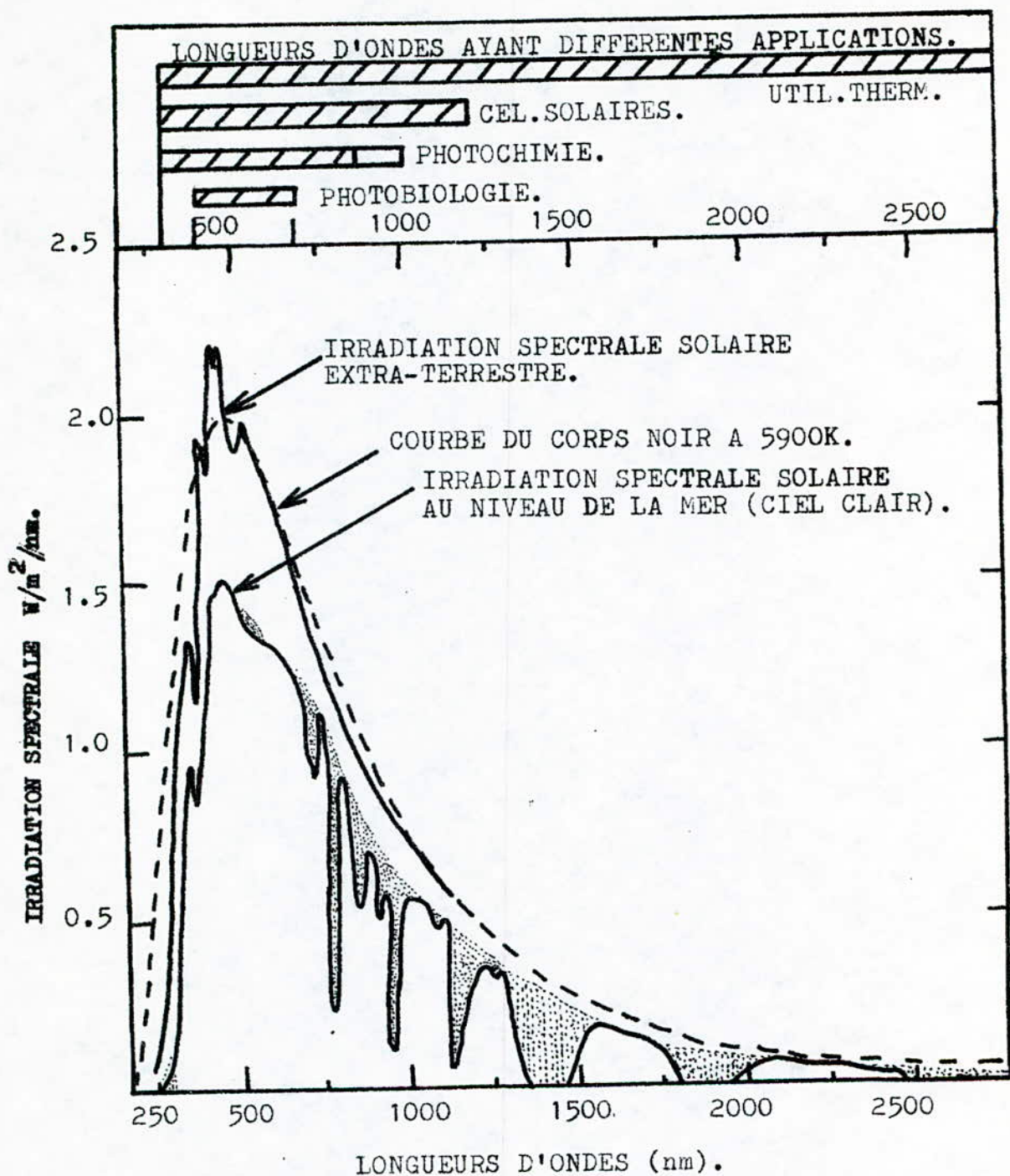


fig.I.1. Courbes de l'irradiation spectrale extra-terrestre et au niveau de la mer. Les régions en pointillées indiquent l'absorption due aux constituants atmosphériques ( $H_2O$ ,  $CO_2$  et  $O_3$ ). /1/.

#### 4. ACTION DES NUAGES.

On définit l'irradiation globale comme étant l'énergie solaire totale atteignant une surface horizontale unitaire par unité de temps. Elle est constituée de deux parties : l'énergie due au rayonnement direct et celle qui est diffuse (albedo).

La quantité d'énergie "directe" dépend du système nuageux et de l'altitude du soleil. La lumière solaire, atteignant des nuages, est diffusée ; une partie atteint le sol et l'autre partie est renvoyée dans l'espace. Les nuages n'absorbent pas beaucoup d'énergie.

En été, avec un soleil haut et un ciel partiellement nuageux, l'irradiation diffuse peut atteindre 400 W par mètre carré et ordinairement dépasse 200 W par mètre carré.

#### 5. DONNEES MONDIALES POUR LA RADIATION GLOBALE.

Un mécanisme performant utilisant l'énergie solaire doit prendre soigneusement en considération la radiation locale là où il est en fonctionnement.

Comme les activités en énergie solaire augmentent, il y aurait, pour l'établissement des projets, une demande plus importante de la part du secteur industriel, des données météorologiques précises.

L'irradiation globale annuelle moyenne pour une surface plane horizontale a été établie par BUDYKO /6/ ( figure I.3). La valeur moyenne de l'énergie disponible en une surface horizontale est meilleure dans les continents désertiques entre les latitudes 25° Nord et Sud. Elle diminue de l'équateur vers les pôles. La plus grande irradiation moyenne est de 300 W par mètre carré sur la mer rouge.

Les nuages des régions équatoriales réduisent considérablement l'irradiation globale moyenne ; par exemple l'irradiation annuelle moyenne pour Singapour est presque la même que pour le centre de la France. Cependant, les régions équatoriales ont de très petites variations de la radiation globale au cours des saisons par opposition aux régions situées au delà des tropiques.

#### 5.1 DONNEES RELATIVES A L'ALGERIE

En Algérie, l'ensoleillement est bon. Les 3/4 du pays reçoivent plus de 2200 kWh par mètre carré par année. Ceci est nettement visible dans le tableau de la page 8 qui donne les durées d'ensoleillement mesurées par la période de 1960 à 1967 (1) (avec des héliographes Jordan, et remplacés depuis par des CAMPBELL)

(1) Source : Etablissement national pour l'exploitation météorologique et aéronautique.



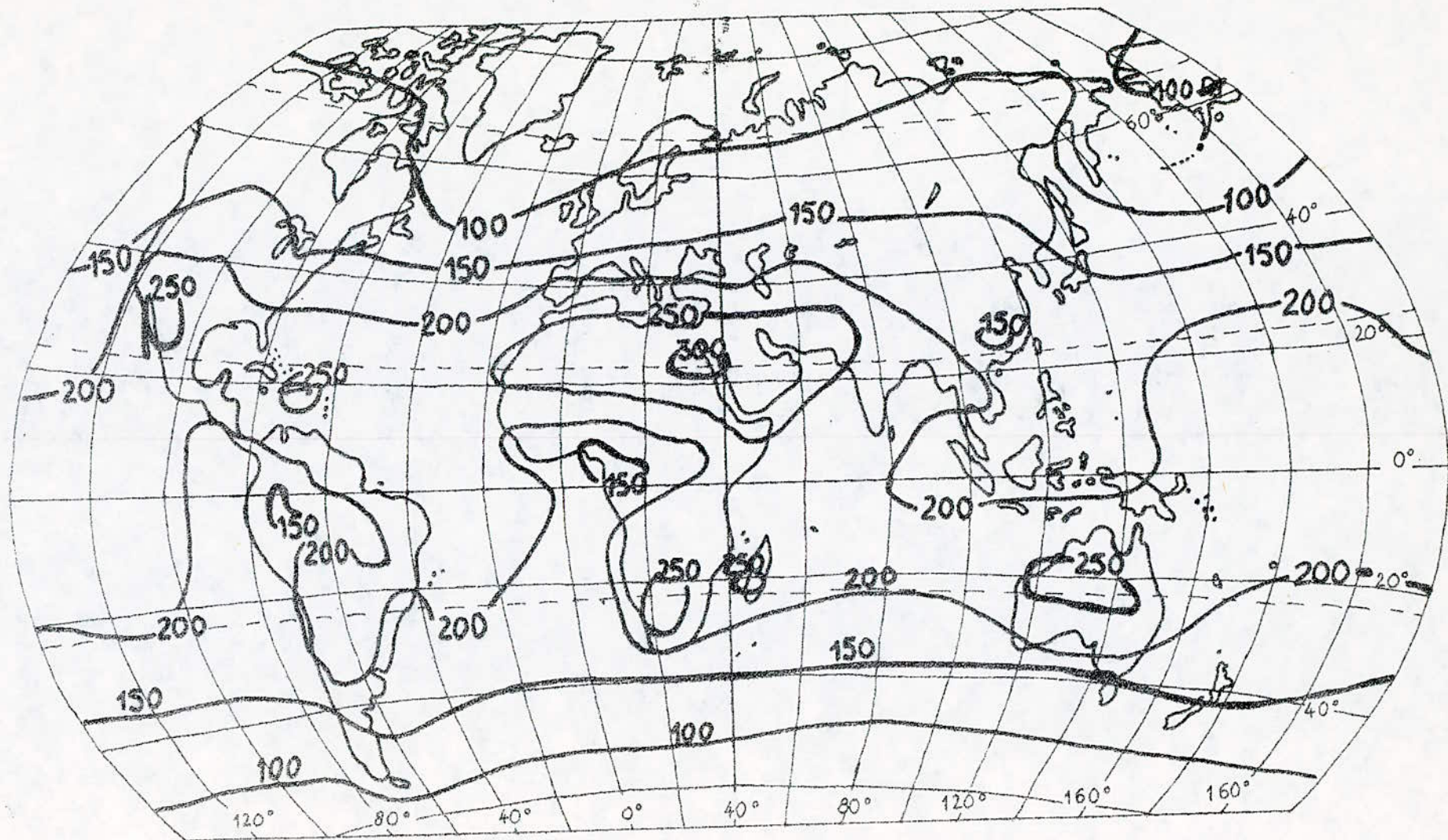


fig.I.3 Moyenne annuelle de l'irradiation globale sur une surface horizontale ( $\text{W/m}^2$  moyenne sur 24heures). /1/.

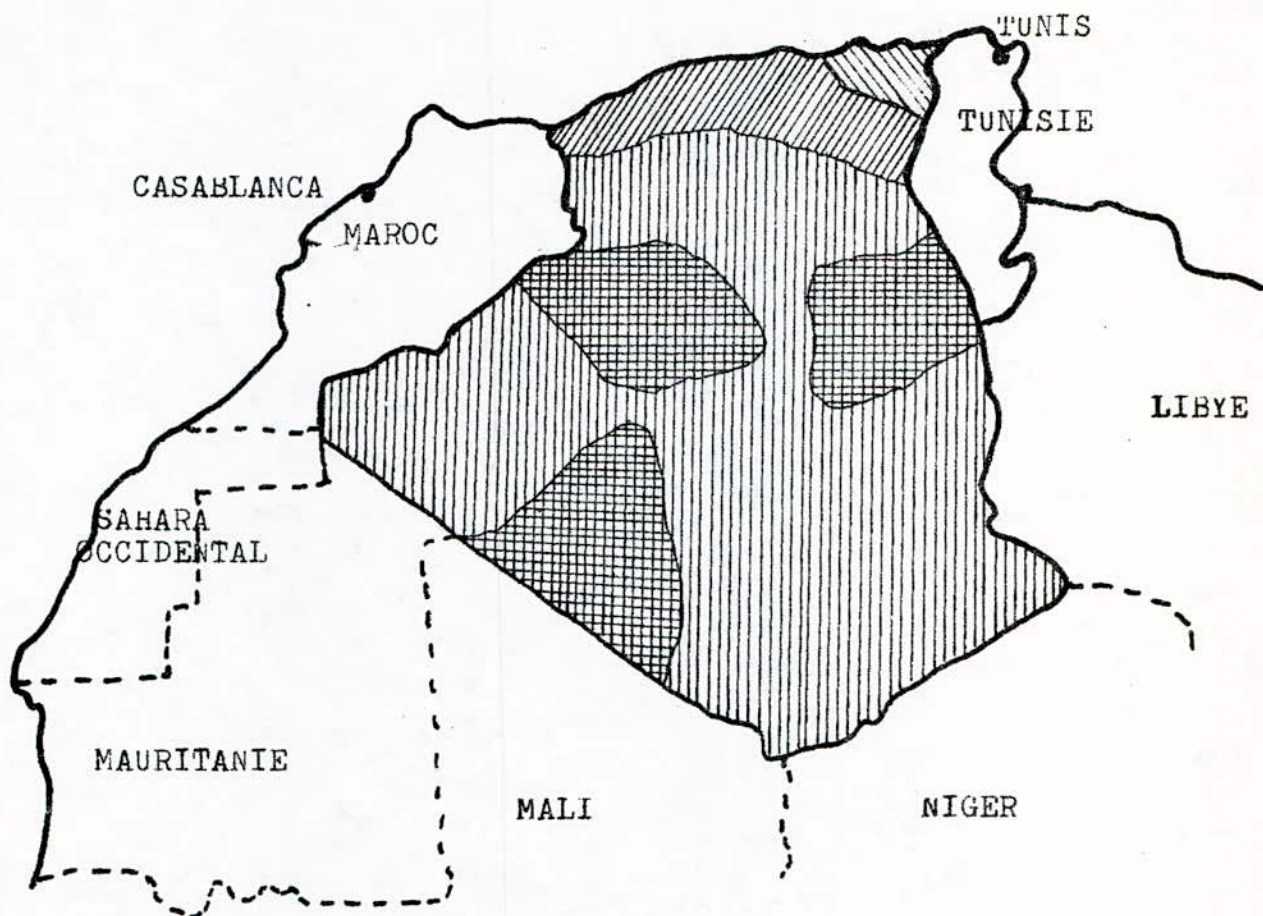


Cette durée est exprimée en heures.

STATION	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	ANNEE
DAR EL BEIDA	161	163	215	244	304	316	356	336	276	227	158	141	2892
ORAN	186	180	243	251	306	300	340	329	279	237	172	164	2944
ANNABA	108	144	182	200	242	275	322	287	230	179	111	83	2363
SKIKDA	135	151	206	239	297	308	356	332	262	217	155	124	2681
CONSTANT INE	137	146	200	242	284	291	340	323	250	215	156	128	2596
EL ASNAM	182	165	208	209	272	298	327	308	262	203	153	145	2996
BISKRA	225	226	274	297	332	329	366	332	266	262	211	216	2996
EL OUED	246	239	288	292	340	340	283	286	299	280	212	238	2868
H.MESSAOUD	246	247	305	304	333	336	372	339	313	281	242	237	3284
OUARGLA	245	253	304	311	345	344	372	350	294	284	232	237	3531
GHARDAIA	251	229	292	300	343	291	346	365	326	260	265	264	2465
EL GOLEA	261	264	315	318	351	355	382	363	305	290	249	258	3571
TIMIMOUN	272	258	315	327	348	350	377	353	290	283	258	264	3446
TINDOUF	256	264	299	342	353	356	336	318	276	290	243	253	3281
ADRAR	282	266	325	326	323	342	358	330	299	284	262	264	3368
IN SALAH	268	268	312	306	329	319	365	346	302	282	284	264	3348
IN AMENAS	251	259	292	287	329	327	371	350	312	273	246	242	3401
BECHAR	250	249	302	316	346	357	365	335	300	283	238	247	3548
LAGHOUAT	209	226	280	270	329	327	356	329	284	266	185	192	3254
TAMAN RASSET	284	269	314	298	320	276	319	313	270	243	238	239	3383
DJANET	288	273	319	311	329	351	369	374	305	300	275	255	3216



La carte suivante montre les régions les plus ensoleillées du pays.







-  De 2000 à 2500 heures d'ensoleillement.
-  De 2500 à 3000 heures d'ensoleillement.
-  De 3000 à 3500 heures d'ensoleillement.
-  De 3500 heures et plus.

fig.I.4. Régions d'égal ensoleillement d'Algérie.  
(moyenne d'heures par année.)

Les mesures des durées d'insolation moyenne nous permettent de calculer la radiation vraie au sol à l'aide de la relation d'Angström.

$$Q = Q_0 \left( a + b \frac{S}{S_0} \right)$$

où :

$Q$  : radiation vraie calculée en kWh/jour/m<sup>2</sup>

$Q_0$  : radiation théorique calculée en kWh/jour/m<sup>2</sup>

$S$  : durée d'insolation mesurée avec un héliographe en h/jour.

$S_0$  : durée d'insolation théorique en h/jour.

Les coefficients a et b dépendent du lieu. Le tableau suivant en donne quelques valeurs /5/ :

Localité	Climat	$\frac{S}{S_0}$ moyen	a	b
Atlanta, USA	continental, humide	78%	0,410	0,370
Bouzaréah, Algérie	méditerranéen tempéré	60%	0,235	0,765
Hamburg, R.F.A.	froid, humide	36%	0,220	0,570
Nice, France	méditerranéen tempéré	61%	0,170	0,630
Tamanrasset, Algérie	tropical désertique	83%	0,30	0,430

En utilisant des données météorologiques, on a pu calculer la radiation vraie pour la ville de Tamanrasset (latitude 23°N), en prenant du tableau précédent : a=0,3 et b=0,43.

Mois	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUI	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC
$Q_0$ kW/jm <sup>2</sup>	6,64	7,8	9,12	10,3	10,9	11,12	11	10,5	9,51	8,17	6,92	6,29
$\frac{S}{S_0}$	0,88	0,83	0,87	0,85	0,80	0,76	0,86	0,83	0,77	0,86	0,85	0,80
$Q$ kWh/jm <sup>2</sup>	4,55	5,13	6,15	6,86	7,04	6,97	10,14	6,9	6	5,47	4,6	4,05

On obtient une radiation moyenne annuelle dépassant 2200 kilowattheures par an et par mètre carré.



Des mesures faites en 12 ans pour la station de Bouzaréah /8/ ( en 12 ans ), entre 1950 et 1961, nous donnent le tableau suivant qui contient les moyennes (corrigées) des heures d'insolation et la radiation vraie calculée par la relation d'Angström

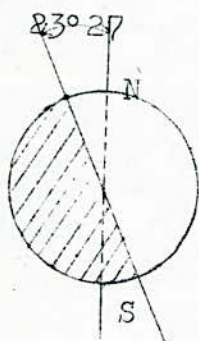
	JAN	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
$\frac{Q_o}{\text{kWh/jm}^2}$	3,48	4,06	5,34	6,61	7,54	8	8,35	7,89	6,96	6,03	4,76	3,59
$\frac{S_o}{\text{(h/j)}}$	9,96	10,8	11,9	12,6	13,6	14,5	14,2	13,4	12,3	11,1	10,1	9,68
$\frac{S \text{ moy.}}{\text{(h/j)}}$	4,4	6,11	6,3	6,95	9,25	8,12	10,2	9,75	7,22	5,85	5,05	3,9
$\frac{Q}{\text{kWh/jm}^2}$	1,2	2,7	3,37	4,33	5,65	5,3	6,55	6,24	4,64	3,73	2,94	2,18

Nous constatons ainssi que la radiation moyenne annuelle à Bouzaréah pour cette période dépasse  $1480 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ .

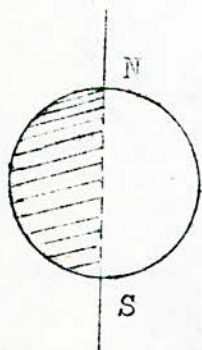
POSITION DU SOLEIL ET ORIENTATION DES CAPTEURS

I. DEFINITION DE LA DECLINAISON.

La déclinaison du soleil est défini comme l'angle mesurant sa hauteur au dessus du plan de l'équateur terrestre. Il est compté positivement dans l'hémisphère nord et négativement dans l'hémisphère sud.

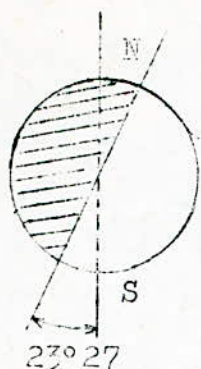


Solstice d'été  
La déclinaison est maximale et égale à  $23^{\circ} 27'$



Equinoxe de printemps et  
Equinoxe d'automne (déclinaison nulle)





Solstice d'hiver  
La déclinaison est maximale et  
égale à  $23^{\circ}27'$

Fig.1. Positions respectives de l'axe des pôles de la terre et du cercle d'illumination de la terre par le soleil aux équinoxes et des solstices /5/

La déclinaison varie au cours de l'année de  $+23^{\circ}27'$  à  $-23^{\circ}27'$  et détermine l'inégalité des durées des jours. L'angle que fait l'axe des pôles avec le cercle d'illumination de la terre par le soleil est égal à l'angle de déclinaison.

## 2. Position optimale d'un capteur fixe :

L'inclinaison de l'axe des pôles détermine la déclinaison du soleil. Cela traduit la variation des saisons. La position optimale d'un capteur solaire sera donc sa position pour laquelle les rayons incidents lui sont perpendiculaires. Les rayons incidents sont deux fois dans l'année perpendiculaires à un plan horizontal dans toutes les régions comprises entre les deux tropiques.

En dehors de ces régions, on remédiera au manque de hauteur du soleil en unclinant le plan du capteur. Mais il faut noter que l'épaisseur des masses d'air que l'énergie incidente doit traverser sera plus importante que pour un soleil exactement à la verticale.

On définit la hauteur solaire  $H$  comme étant l'angle que fait le soleil par rapport à un plan horizontal situé au sol. La hauteur solaire à une époque donnée est calculée par la formule /4/ :

$$H = 90^{\circ} - (\lambda - \delta)$$

où  $\lambda$  est la latitude du lieu de l'installation solaire.

$\delta$  est la déclinaison avec  $\delta = 0,4 \sin N \cdot 360/365$  d'après COOK avec  $N$  le nombre de jours entre l'équinoxe de printemps et le jour considéré, de signe négatif vers la saison froide.

On peut aussi avoir recours à l'annuaire astronomique qui indique directement la déclinaison  $\delta$  chaque jour de l'année.

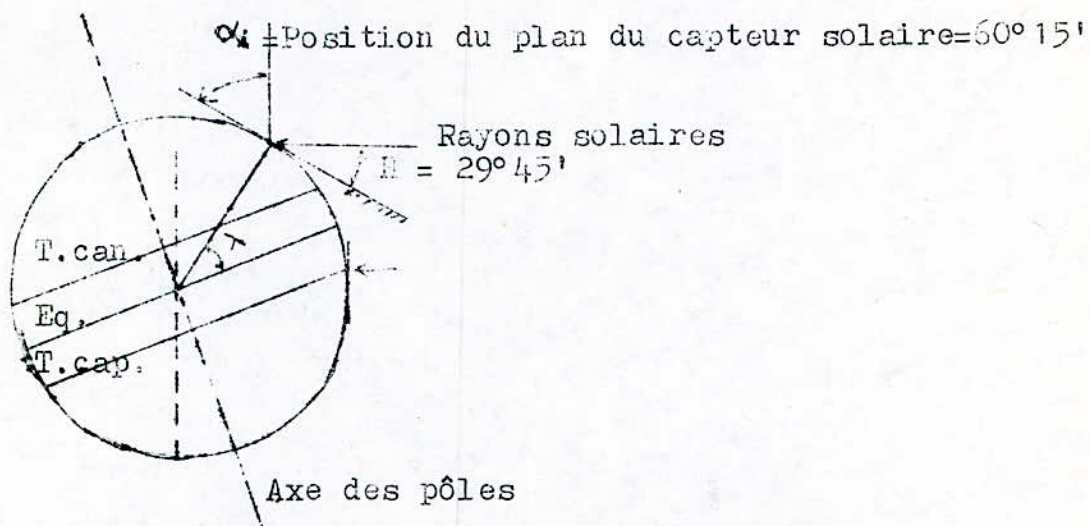
Exemple de positionnement d'un capteur solaire à Bouzaréah dont la latitude est  $\lambda = 36^{\circ}48'$  pour différentes périodes de l'année.

1- Au solstice d'hiver (21 décembre)

La hauteur solaire  $H$  sera à midi vrai :

$$H = 90^{\circ} - (\lambda + \delta)$$

$$H = 90^{\circ} - (36^{\circ}48' + 23^{\circ}27') = 29^{\circ}45'$$

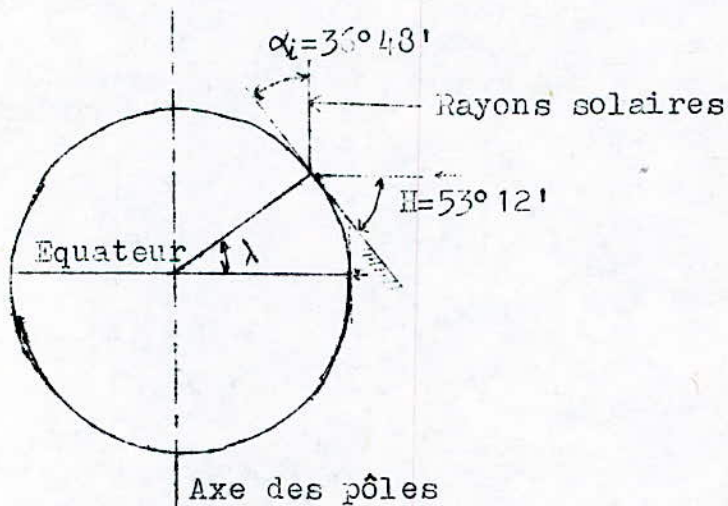


Position de la terre au solstice d'hiver.

2- Aux équinoxes (21 mars et 21 Septembre)

$$H = 90^{\circ} - (\lambda + \delta)$$

$$H = 90^{\circ} - (36^{\circ}48' - 0) = 53^{\circ}12'$$



Position de la terre aux équinoxes.

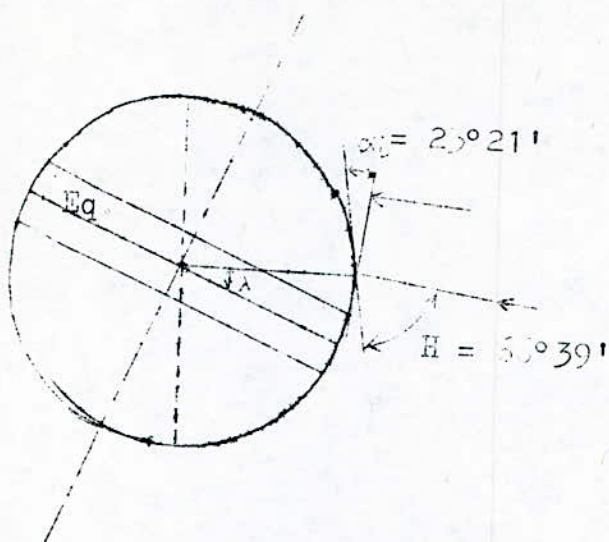
3- Au solstice d'été (21 Juin)

La hauteur solaire  $H$  sera à midi vrai:



$$H = 90^\circ - (\lambda + \delta)$$

$$H = 90^\circ - (36^\circ 48' - 23^\circ 27') = 56^\circ 39'$$



Position de la terre au solstice d'été.

Dans les trois figures précédentes,  $\alpha$  représente le calage idéal et sera en tout lieu et en toute saison égal à :

$$\alpha = 90^\circ - H.$$

Notons qu'il existe une autre méthode très pratique qui consiste à lire directement sur les projections stéréographiques /4/ la valeur de la hauteur solaire à n'importe quelle heure d'un jour d'une année, et de savoir aussi son azimuth, la durée d'ensoleillement. Mais ces projections doivent être établies pour une région donnée c'est à dire une latitude particulière.

Pour un capteur solaire prévu pour une utilisation annuelle sans interventions, son calage idéal est tout simplement  $\alpha = \lambda$  ; c'est à dire qu'on devra l'incliner de la latitude du lieu.

Pour un capteur situé à Bouzaréah, son calage idéal est donc  $\alpha = 36^\circ 48'$ .

Pour un capteur dont on veut tirer le maximum pour la saison froide, son calage idéal serait :

$$\alpha = \lambda + \frac{23^\circ 27'}{2}$$

Pour un capteur à Bouzaréah on aurait :  $\alpha = 36^\circ 48' + \frac{23^\circ 27'}{2}$

$$\alpha = 48^\circ 31'$$

### 3. DIFFÉRENCES ENTRE UN CAPTEUR FIXE ET UN CAPTEUR TOURNANT

Les capteurs solaires, qu'ils soient plans ou à concentration (miroirs), doivent suivre le soleil dans sa course diurne afin de pouvoir recueillir le maximum d'énergie.

La courbe A (fig.II.2) représente le diagramme de la puissance reçue par un capteur en fonction de son inclinaison (celui-ci étant toujours perpendiculaire aux rayons solaires). La courbe B représente la puissance d'un capteur fixe orienté de la latitude du lieu lorsque la déclinaison du soleil varie. La courbe C est obtenue pour un capteur tournant mais avec un ciel totalement couvert (rayonnement diffus).

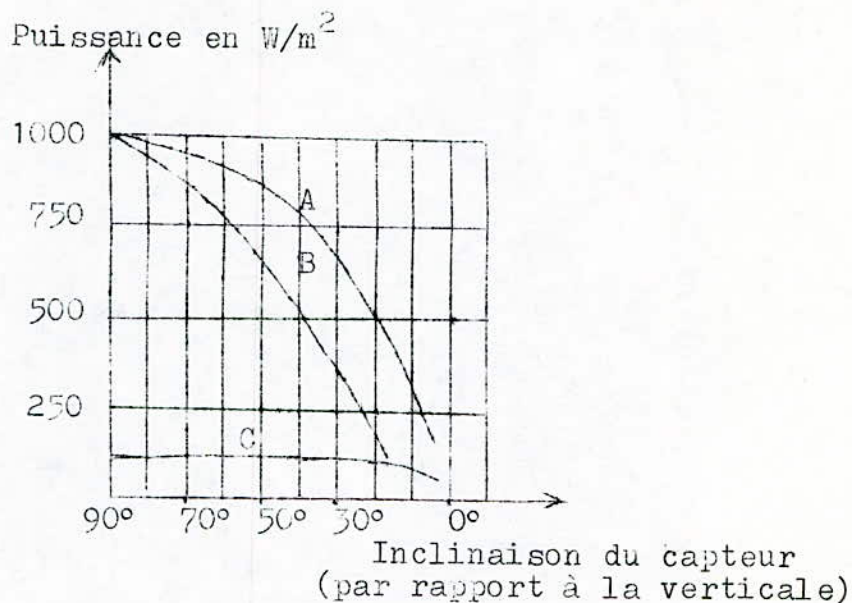


fig.II.2. Diagramme de la puissance reçue par les deux capteurs.

On remarque ainsi la nette différence de puissance reçue par un capteur mobile par rapport à celle reçue par un capteur fixe orienté d'une manière optimale.

#### 4. UTILISATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE ET DIMENSIONNEMENT DES INSTALLATIONS. /7/

Le choix d'un système solaire, l'optimisation d'un capteur ou le calcul de son amortissement, nécessitent la connaissance de l'énergie solaire incidente et ses caractéristiques statistiques en complément aux autres données climatiques générales utiles.

L'énergie solaire n'est pas nécessairement disponible au moment où l'on en a besoin, elle peut l'être au contraire lorsque le besoin est nul ; un stockage intermédiaire est donc indispensable.

Si  $U_p$  et  $U_c$  sont les énergies totales produites et consommées depuis la mise en place de l'installation,  $U_p - U_c$  représente l'exédent produit. Cet exédent est à stocker. Il se produit des pertes au stockage qu'on négligera. L'installation doit être dimensionnée de telle manière que  $U_p - U_c$  ne soit jamais négatif.



Pour cela, on peut par exemple estimer que les variations de l'irradiation annuelle d'une année sur l'autre, sont très faibles, on peut alors considérer qu'à condition de prévoir une capacité de stockage suffisante pour mettre en réserve le plus fort excédent prévisible de l'année, on sera à l'abri de toute pénurie.

Cette solution minimise seulement le coût du collecteur. L'installation doit également comporter un accumulateur pour le stockage. Pour réduire l'investissement total, il peut être avantageux d'augmenter la puissance moyenne fournie par le collecteur, c'est à dire pour un dispositif ayant un rendement  $Q$  donné soumis à une variation temporelle d'éclairement  $E$  donné, la superficie de ce collecteur, afin de réduire l'importance de la capacité de stockage d'énergie de l'accumulateur. Pour cela, il faut chercher comment varient les valeurs minimales du couple éclairement moyen, capacité de stockage minimale en fonction de la durée du stockage.

Un calcul économique est donc indispensable.

Sous forme simplifiée, on peut écrire que le coût  $P_t$  de l'installation est :

$$P_t = \frac{P_c \cdot W}{Q \cdot E} + \frac{P_a \cdot W \cdot U_m}{E}$$

où :

le premier terme représente le coût du collecteur (DA)

Le second terme représente le coût de l'accumulateur (DA)

$P_c$  est le prix du collecteur par unité de surface (DA/m<sup>2</sup>)

$Q$  est le rendement brut du collecteur (rapport puissance fournie/flux reçu).

$W$  est la puissance consommée (distribution supposée uniforme dans le temps). (Watts).

$P_a$  est le prix de l'accumulateur par unité d'énergie stockée (DA/W).

$U_m$  représente la capacité de stockage. (m<sup>2</sup>/W)

$E$  représente l'éclairement moyen. (W/m<sup>2</sup>)

L'optimisation de l'installation dépend donc des caractéristiques météorologiques du lieu.

SYSTEMES DE CONCENTRATION SOLAIRE

I. INTRODUCTION.

Pour que les rayons solaires puissent se concentrer sur des collecteurs thermiques ou photovoltaïques, ils doivent, avec une exactitude variant suivant le rapport de concentration, être orientés en fonction de la position du soleil. Cette orientation nécessite la connaissance exacte de la situation du soleil par rapport à la terre à tout moment. Sagissant de concentrateurs, l'erreur tolérée sur les angles de hauteur du soleil et d'azimut (mouvement d'Est en Ouest) ne doit pas dépasser quelques milliradians (quelques minutes d'angles).

En considérant la terre fixe, le soleil tourne autour de la terre en 23h56'4" ; ce qui signifie qu'en une heure le soleil, dans son mouvement d'Est en Ouest, parcourt un angle de :

$$\frac{360}{23,884} = 15,07 \text{ degré par heure.}$$

Pour un concentrateur admettant une tolérance de 0,1°, il nous faut :

$$\frac{15,07}{0,1} = 150 \text{ alignements à l'heure.}$$

Ces 150 alignements à l'heure nécessitent un mécanisme qui doit agir toutes les :

$$\frac{360}{150} = 24 \text{ secondes au plus.}$$

D'où la possibilité de prévoir un mécanisme de poursuite du soleil sans boucle de retour. Ce serait un mécanisme de pointage vers le soleil très grossier mais suffisant lorsque le ciel est couvert. Ce mécanisme de pointage pourrait fonctionner



en parallèle avec un autre dispositif de guidage fin permettant à ce dernier de ne pas perdre la trajectoire du soleil lorsque le ciel est couvert pour un temps plus ou moins long.

L'objet de ce chapitre est d'examiner les différents systèmes existants du point de vue mécanique et électrique, de discuter des avantages et inconvénients de ces systèmes.

## 2. LES SYSTEMES D'ORIENTATION AUTOMATIQUE.

Plusieurs systèmes peuvent être mis au point pour réaliser une orientation automatique. Cependant deux organes essentiels doivent être bien définis : "le capteur" ou encore appelé senseur optique et "le mécanisme d'orientation".

Le rôle principal du senseur optique est de détecter les variations angulaires du soleil et de transmettre un signal électrique susceptible (après qu'il soit amplifié) de commander le panneau vers la nouvelle position du soleil.

Les différents types de senseurs : /9/.

1. Capteur mobile
2. Capteur angulaire
3. Capteur type "boîte noire"
4. Assemblage matriciel
5. Capteur à "ombre projetée"
6. Système en temps réel
7. Méthode hybride
8. Capteur multi-cellules
9. Utilisation du panneau principal comme capteur

Le mécanisme d'orientation est un système électromécanique transformant le signal électrique, reçu du senseur optique, en une rotation mécanique qui ramène le panneau dans la position d'équilibre.

La liaison entre le senseur optique et le mécanisme d'orientation se fait par un régulateur. Le rôle du régulateur est de comparer le signal de la mesure assignée à la valeur mesurée afin d'élaborer un signal d'action.

## 3. LE SYSTEME ELECTRO-MECANIQUE.

Le déplacement du panneau doit correspondre au mouvement du soleil d'Est en Ouest. Cette poursuite nécessite l'utilisation de moteurs d'entrainements.

Pour des raisons d'économie, l'énergie solaire transformée en courant électrique est directement utilisée pour alimenter des moteurs qui sont :

- . des moteurs basse tension à courant continu
- . des moteurs pas à pas (qui ont de grandes performances pour des pas lents mais nécessitent l'emploi de régulateurs électroniques).



- . relais à bords
- . des moteurs liés à un engrenage réduisant la vitesse de rotation du système et augmentant ainsi la précision.

#### 4. LES REGULATEURS.

Chaque type de capteur doit avoir un régulateur particulier dépendant du système électromécanique utilisé.

Les principaux blocs du système de régulation sont :

- . Des Intégrateurs (analogiques ou digitaux)
- . Des Différentiateurs (analogiques ou digitaux)
- . Des Comparateurs (analogiques ou digitaux)
- . Des Amplificateurs de puissance
- . Des Moteurs pas à pas (à entraînement unitaire)
- . Des Convertisseurs analogiques-digitaux
- . Des Bascules (digitales)
- . Des Lectures de mémoires
- . Des Horloges

#### 5. LES CAPTEURS.

##### 5. 1. CAPTEUR MOBILE.

Un capteur séparé détecte la position du soleil dans le ciel. Après chaque mouvement du capteur, la valeur maximale de luminosité rencontrée est stockée en mémoire avec ses coordonnées.

Après une analyse complète, les dernières valeurs (qui représentent les coordonnées du point le plus lumineux du ciel) sont envoyées vers le moteur d'entraînement qui oriente le panneau principal en direction de ce point.

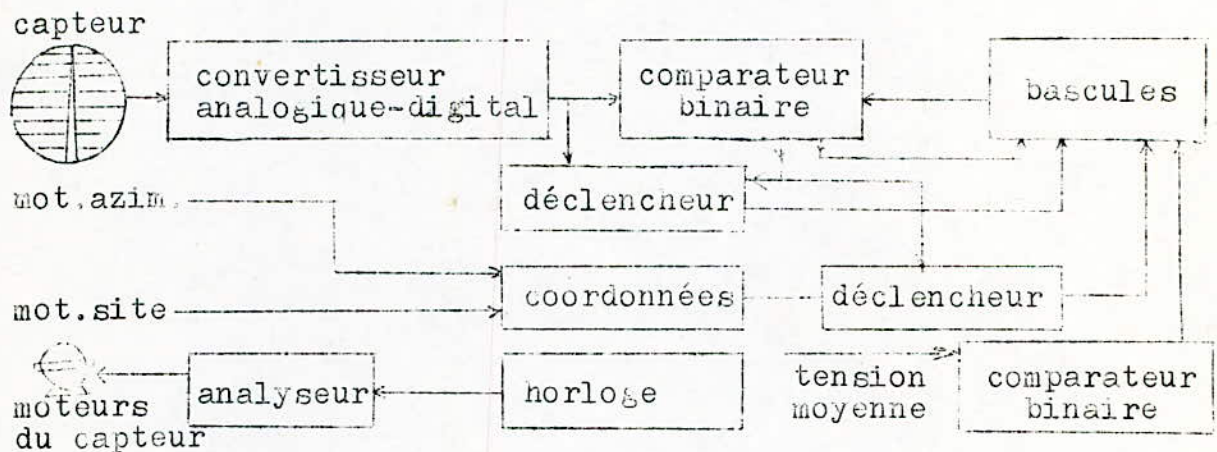


fig.1 Capteur mobile

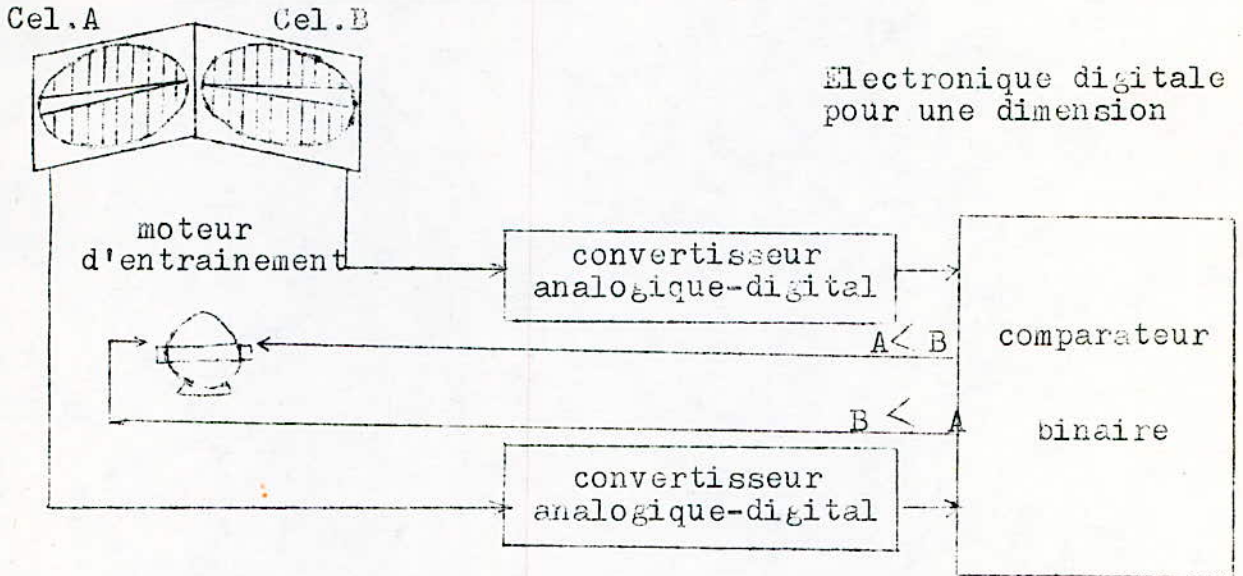
Entre-temps le capteur continue à chercher la possibilité d'un lieu plus lumineux, ce qui supprime les mouvements inutiles



du panneau principal.

Le capteur a deux degrés de liberté, grâce à son moteur d'entraînement son déplacement est continu. Une horloge interne règle le mouvement du capteur mobile; ce qui fait diminuer la puissance consommée. Cette horloge agit sur un analyseur qui actionne les moteurs du capteur.

5.2 CAPTEUR ANGULAIRE.



Electronique analogique.

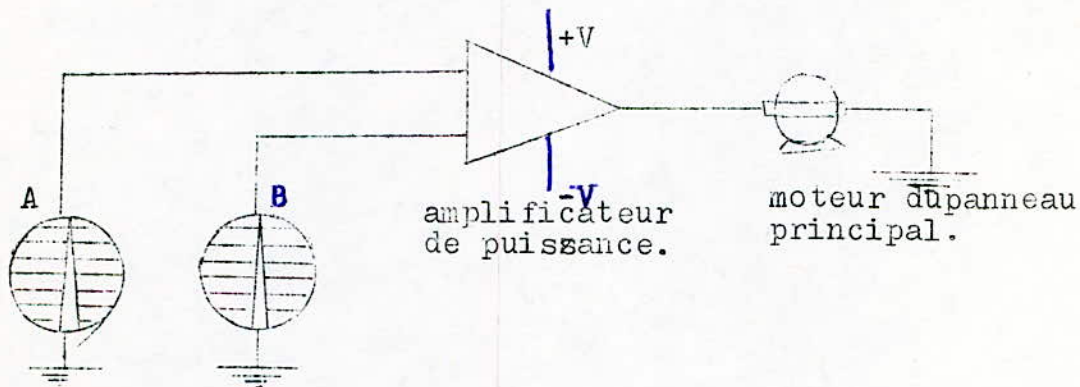
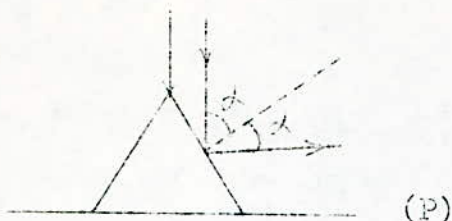


fig.2 Capteur angulaire.

Deux capteurs photosensibles sont placés de telle manière qu'elles fassent un angle déterminé entre-elles. Lorsque les rayons du soleil sont perpendiculaires au plan de base (P) , les deux cellules reçoivent le même flux lumineux.



$$\Phi = E \cdot S = E_0 \cdot s \cdot \cos \alpha$$

où:

$E_0$  est la constante solaire ( $1 \text{ kW/m}^2$  à la surface de la terre)

$S$  est la surface de la cellule

$\alpha$  est l'angle que font les rayons solaires avec la normale de  $S$   
Lorsqu'elles reçoivent le même flux, ces cellules produisent le même courant électrique: c'est la position d'équilibre.

Deux montages électriques peuvent être utilisés pour commander le mouvement du panneau :

. Soit en utilisant une électronique digitale, c'est à dire l'emploi d'un comparateur binaire. La conversion analogique digitale du signal délivré par les cellules photo-électriques est alors indispensable. Le comparateur binaire commande un moteur d'entraînement dans un sens ou dans un autre la différence des signaux des cellules A et B n'est pas nulle.

. Soit en utilisant une électronique analogique, c'est à dire la différence des signaux des cellules A et B est orientée dans un amplificateur de puissance qui commande le moteur du panneau.

Le même système peut être utilisé pour le mouvement en site par adjonction de deux autres cellules décalées de  $90^\circ$  par rapport aux premières.

Ce capteur ne peut fonctionner qu'avec un rayonnement direct : ceci est dû au fait qu'un rayonnement diffus n'a pas de direction fixe.

Ce type de capteur est apparamment le plus simple. Il n'a pas besoin d'un couvercle ou de toute autre précaution. Cependant, sa précision n'est pas très bonne : elle peut être de l'ordre de quelques degrés d'angles.

### 5.3. CAPTEUR TYPE "BOITE NOIRE"

Deux cellules photoélectriques sont placées dans une boîte noire dotée d'une petite ouverture. Cette ouverture laisse passer les rayons solaires incidents qui se réfléchissent au fond de la boîte. Il y a un signal d'action vers le moteur du panneau si la différence des courants de sortie des cellules photoélectriques n'est pas nulle.

Les deux circuits électriques du capteur angulaire peuvent être utilisés pour le capteur du type "boîte noire".

Ce système peut être étendu à deux dimensions en ajoutant deux autres cellules photoélectriques disposées de la même manière que les précédentes mais décalées par rapport aux premières d'un angle de  $90^\circ$ .

Chacune des cellules photoélectriques reçoit la même quantité de rayonnement diffus qui correspond au seuil de déclenchement



de ces cellules.

#### 5.4 ASSEMBLAGE MATRICIEL.

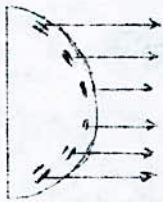
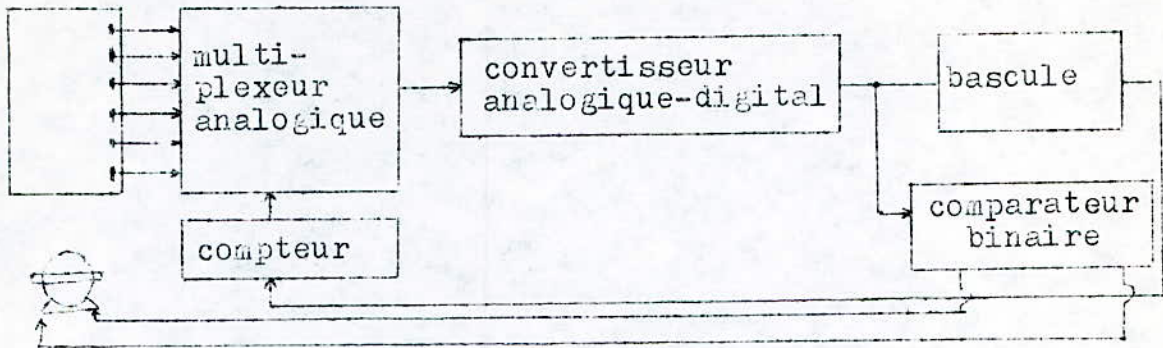


fig.3 assemblage matriciel.

autre possibilité d'arrangement des cellules

Le principal inconvénient de la boîte noire est que sans un équipement optique sophistiqué, le capteur peut perdre facilement la trajectoire du soleil lorsque le ciel est couvert par exemple.

Une solution serait de mettre en rang des cellules photosensibles pour un mouvement sur une dimension (mouvement azimutal) ou une matrice de cellules pour un mouvement en deux dimensions (azimut et site).

Ce système a un déclenchement pour un certain seuil de réponse des cellules photoélectriques.

#### 5.5 CAPTEUR A "OMBRE PROJETEE".

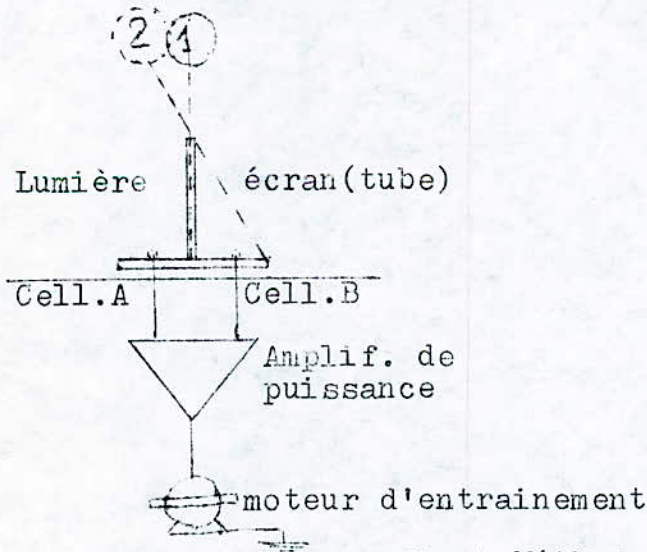


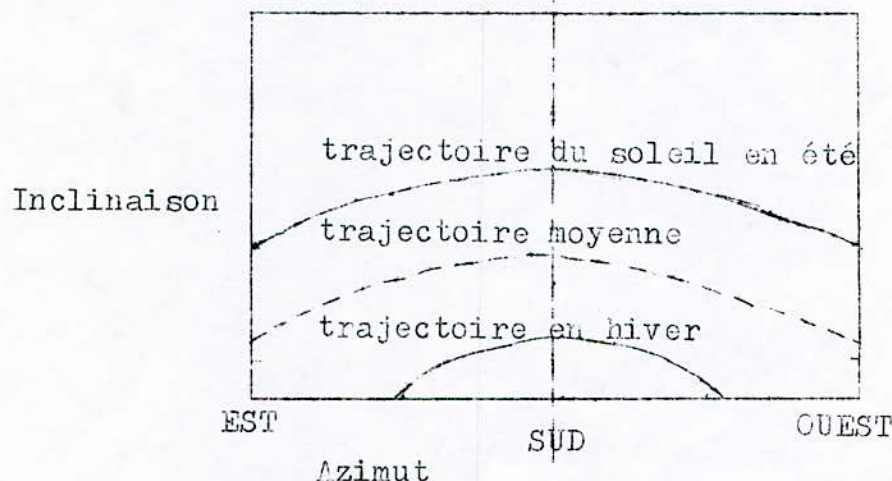
fig.4 Méthode à "ombre projetée".

Des deux côtés d'un écran de lumière (sorte de cache) qui n'est rien d'autre qu'un simple tube noir d'une certaine longueur, sont installées deux cellules photoélectriques A et B qui, quand le soleil est dans la position 1 c'est à dire perpendiculaire au plan des deux cellules, reçoivent la même intensité lumineuse. Lorsque le soleil est dans la position 2 la cellule A reçoit plus de lumière que la cellule B qui est dans l'ombre. Ce déséquilibre engendre un courant qui, après qu'il soit amplifié, commande un moteur d'entraînement, à deux sens de rotation, du panneau solaire. La sensibilité du système peut être facilement réglée par simple changement de la longueur du tube écran. La précision du système augmente avec l'intensité lumineuse.

#### 5.6 SYSTEME EN TEMPS REEL.

Une autre approche est basée sur le fait que la position exacte du soleil pour une heure donnée dans un jour donné peut être déterminée avec une grande précision. Les différents lieux du soleil peuvent être calculés par micro-processeur. Cependant, pour un lieu fixe, il est nécessaire de stocker ces valeurs (qui représentent les coordonnées du soleil) dans une mémoire morte (R.O.M), où les coordonnées exactes peuvent être lus par une horloge en temps réel et commandera le capteur de se diriger vers la position exacte du soleil. La fiabilité du système dépend dans une large mesure de l'exactitude de l'horloge (qui doit être à quartz). Un vérificateur de la position du soleil à midi peut être additionné au système pour augmenter sa fiabilité.

#### 5.7 METHODE HYBRIDE.



La méthode hybride est en fait la combinaison de plusieurs méthodes. Le panneau décrit un mouvement approximatif (mouvement en site et en azimut) en suivant la trajectoire moyenne du soleil, valable pour toute l'année.



Ce mouvement approximatif est actionné par un moteur synchrone agissant sur un transformateur mécanique de coordonnées. Le fonctionnement du transformateur de coordonnées est basé sur le fait que les coordonnées altazimutales et équatoriales du soleil sont liées par des équations données par la trigonométrie sphérique: /10/

$$H = \arcsin(\sin d \cdot \sin L + \cos d \cdot \cos L \cdot \cos AH)$$

$$Z = \arccos\left(\frac{\sin d - \sin L \cdot \sin H}{\cos L \cdot \cos H}\right)$$

où:

H est la hauteur du soleil

Z est l'azimut du soleil

L est la latitude

d est la déclinaison

AH est l'angle horaire.

Ces équations sont symétriques d'une part, pour la hauteur et la déclinaison, et d'autre part, pour l'azimut et l'angle horaire. Elles peuvent être exploitées pour réaliser le transformateur mécanique de coordonnées.

Un système électronique d'ajustement fin est superposé au système mécanique primaire. Ce système corrige les petits angles de déplacement.

Lorsque l'intensité lumineuse est insuffisante pour faire actionner le système électronique, seul le dispositif mécanique assure la traction.

Le capteur à ombre projetée serait le mieux adapté à ce système.

### 5.3 CAPTEUR MULTI-CELLULES.

Avec l'utilisation des circuits intégrés, la méthode du capteur multi-cellules est particulièrement intéressante.

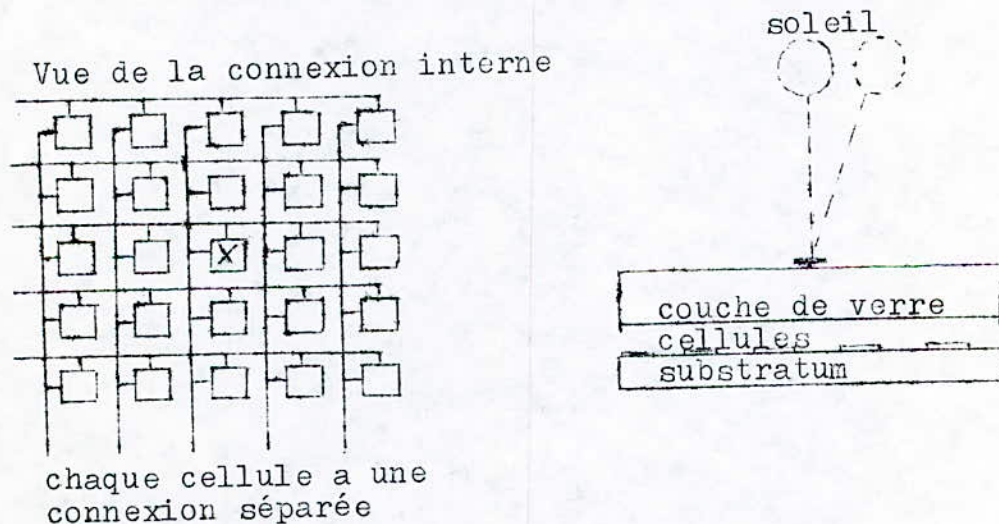


fig.5 Capteur multi-cellules

Ce capteur consiste en une matrice de petites cellules photo-



voltaiques, chacune ayant une connexion séparée. Cette matrice de cellules est recouverte d'une épaisse couche de verre qui possède une tâche noire en son milieu. Les cellules sont comprises entre une couche d'un substratum et la plaque de verre.

Lorsque le soleil est exactement à la perpendiculaire du plan des cellules, sa projection se situe sur la tâche noire. Le courant délivré par chaque cellule est le même. Dans le cas contraire, le courant délivré par chaque cellule n'est plus le même, ce qui entraîne un déplacement du panneau vers une nouvelle position d'équilibre. Les rayons solaires peuvent être amplifiés ou altérés par l'application de lentilles ou des filtres atténuateurs.

### 5.9 UTILISATION DU PANNEAU PRINCIPAL COMME CAPTEUR.

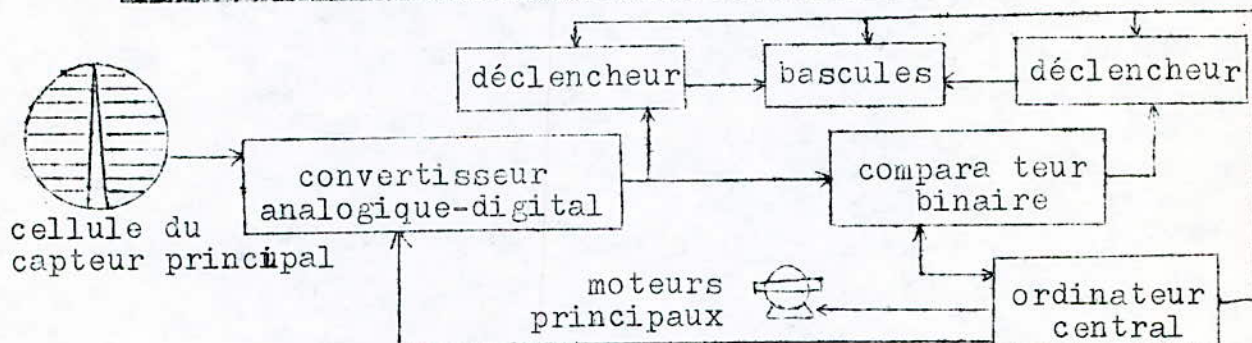


fig.5 Système sans capteur séparé.

On peut éventuellement éliminer le capteur séparé si le panneau est d'un poids relativement faible. Un système comparateur (analogique ou digital) détecte tout changement d'intensité qu'il transmet au "contrôleur logique" (ordinateur central) qui cherchera dans toutes les directions la position d'une meilleure insolation. Le panneau s'immobilise lorsque la valeur du courant mesuré décroît.

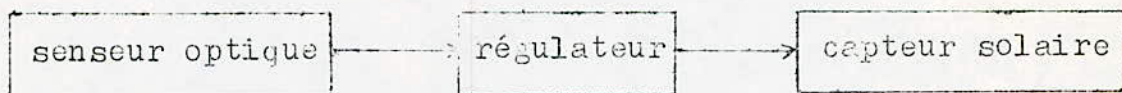
Le système peut être assez précis; sa précision est de l'ordre du degré d'angle. Cependant, il y a un inconvénient majeur dû aux petits mouvements du panneau lors de sa recherche d'une meilleure position d'où un excès de consommation d'énergie.



DESCRIPTION D'UN DISPOSITIF D'ORIENTATION  
AUTOMATIQUE DE CAPTEURS SOLAIRES

1. INTRODUCTION.

Le projet qu'on s'est proposé de réaliser consiste en un dispositif d'orientation automatique d'un capteur solaire. Le principal avantage de ce suiveur solaire réside dans le fait qu'il ne nécessite qu'une maintenance réduite, qu'il est peu onéreux et ~~peu~~ d'énergie. \*)consomme  
Le dispositif comprend trois parties assurant la commande: le senseur optique, le régulateur et le mécanisme d'orientation du panneau. Le schéma synoptique est le suivant:



Le capteur solaire est maintenu constamment endirection du soleil. Il est placé sur un support qui pivote autour d'un axe horizontal (mouvement en site) porté par un cylindre qui lui-même pivote autour d'un axe vertical (mouvement enazimut) Les mouvements de pivotements du support du panneau et du cylindre sont commandés par des servomoteurs hydrauliques utilisant la pression de l'eau courante rendue variable périodiquement par un impulsateur. Ces servomoteurs sont bloqués ou débloqués automatiquement par un signal délivré par des cellules photo-électriques (photorésistances).

Le panneau est muni d'un dispositif qui le met automatiquement en position de service du matin dès la tombée du jour. Il comporte une cellule photoélectrique fixée sur le panneau et exposée au soleil lors du fonctionnement. Cette cellule commande un relais dont le contact fermé au repos est inséré dans le circuit du signal délivré par les photorésistances. De cette manière, à la tombée du jour, le contact commande le déblocage du servomoteur assurant le retour du panneau vers l'Est.

Ainsi, au matin, le panneau reprend son fonctionnement dès que le soleil est à 10° au dessus de l'horizon.



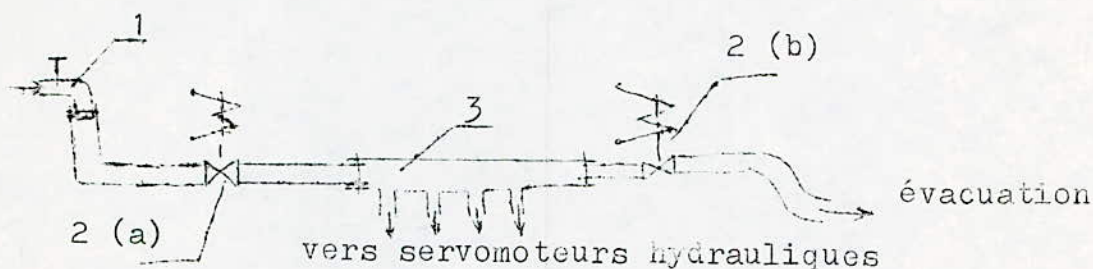
## 2. DESCRIPTION DE L'APPAREIL.

### 2.1 ETUDE DU SYSTEME DE TRACTION.

La force de traction du système est assurée par la pression de l'eau courante ( $2\text{ à }3 \text{ kg/cm}^2$ ) qui passe dans des servomoteurs hydrauliques. Ces servomoteurs transforment la pression d'eau reçue en un déplacement linéaire, assurant la traction du système.

#### 2.1.1 Installation hydraulique.

L'installation hydraulique assurant l'alimentation des servomoteurs est schématisée ci-dessous (fig.IV.1).



- 1- Robinet d'eau courante
- 2-(a et b) Electro-vannes (220 V ; 50Hz )
- 3- Distributeur hydraulique

fig.IV.1 Schéma de l'installation hydraulique

Les électro-vannes sont commandées alternativement par un impulsateur délivrant un signal carré. A la première demi-alternance l'électro-vanne (a) est alimentée, donc ouverte, mais l'électro-vanne (b) ne l'est pas, donc fermée. L'ouverture de l'électro-vanne (a) assure la mise sous pression des servomoteurs par l'intermédiaire du distributeur hydraulique; cela assure le mouvement des pistons des servomoteurs. A la seconde demi-alternance l'électro-vanne (a) n'est plus alimentée, donc fermée; En même temps l'alimentation de l'électro-vanne (b), dont l'ouverture fait évacuer l'eau, ramène les pistons des servomoteurs à leur position initiale. Le système fonctionne ainsi d'une manière continue.

L'alimentation en eau ainsi que son évacuation se fait par l'intermédiaire du distributeur hydraulique (fig.IV.2).



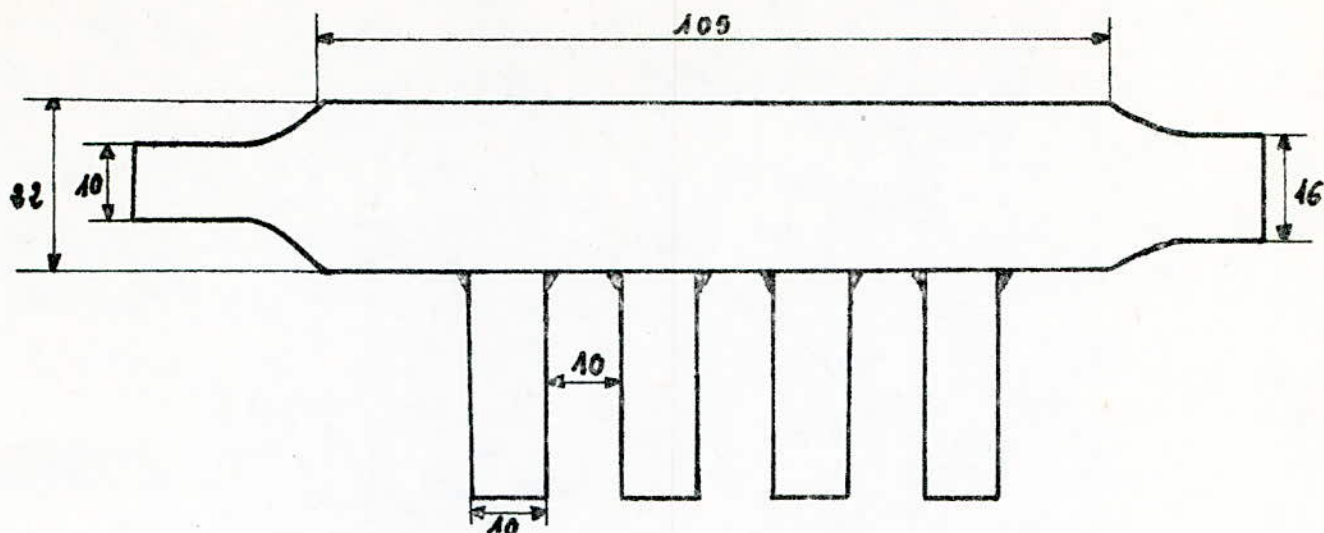


fig.IV.2 Détail du distributeur hydraulique

Il est constitué d'un tube en cuivre de 22 mm de diamètre sur lequel on a soudé quatre autres petits tubes en cuivre de 10 mm de diamètre assurant la liaison avec les servomoteurs. Malgré sa construction relativement simple, ce distributeur doit être convenablement dimensionné. Une section trop faible du cylindre principal peut engendrer un tourbillonnement d'eau donc des perturbations qui s'ajoutent au système.

Les électro-vannes employées dans le système sont alimentées sous 220V, 50Hz et la puissance nécessaire à leur alimentation est de 55Watts. Elles sont fermées au repos. Ces électro-vannes sont du type courant (utilisées dans les machines domestiques).  
 Eventuellement, on pourrait concevoir des électro-vannes alimentées en courant continu (12V ou 24V) pour éviter l'apport d'énergie de l'extérieur. Ainsi le dispositif serait complètement autonome et pourrait fonctionner dans des régions isolées.

### 2.1.2 Etude et choix des servomoteurs hydrauliques.

L'eau sous pression constitue une forme d'énergie pouvant transporter un maximum de puissance avec un minimum d'inertie.

Les servomoteurs hydrauliques sont des éléments assurant la transformation de la pression hydraulique en un déplacement mécanique.

Le type de servomoteur préconisé ici est composé principalement de deux boîtiers (supérieur et inférieur) en tôle d'acier ou en fonte, entre lesquels est prise une membrane élastique.

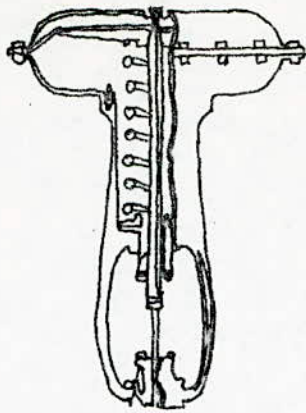


fig.IV.3 Servomoteur hydraulique

Un plateau en acier soutient la membrane. Ce plateau, prolongé par une tige (piston), est maintenu par un ressort de rappel. L'augmentation de la pression hydraulique déplace le piston vers le bas. (fig.IV.3)

Le ressort antagoniste rappelle la tige en sens contraire lorsque la pression diminue.

Pour la réalisation du modèle du mécanisme d'orientation on a utilisé comme servomoteurs les valves à eau de chauffe-eau sur lesquelles on a pris soin de boucher les orifices supplémentaires (fig.IV.4)

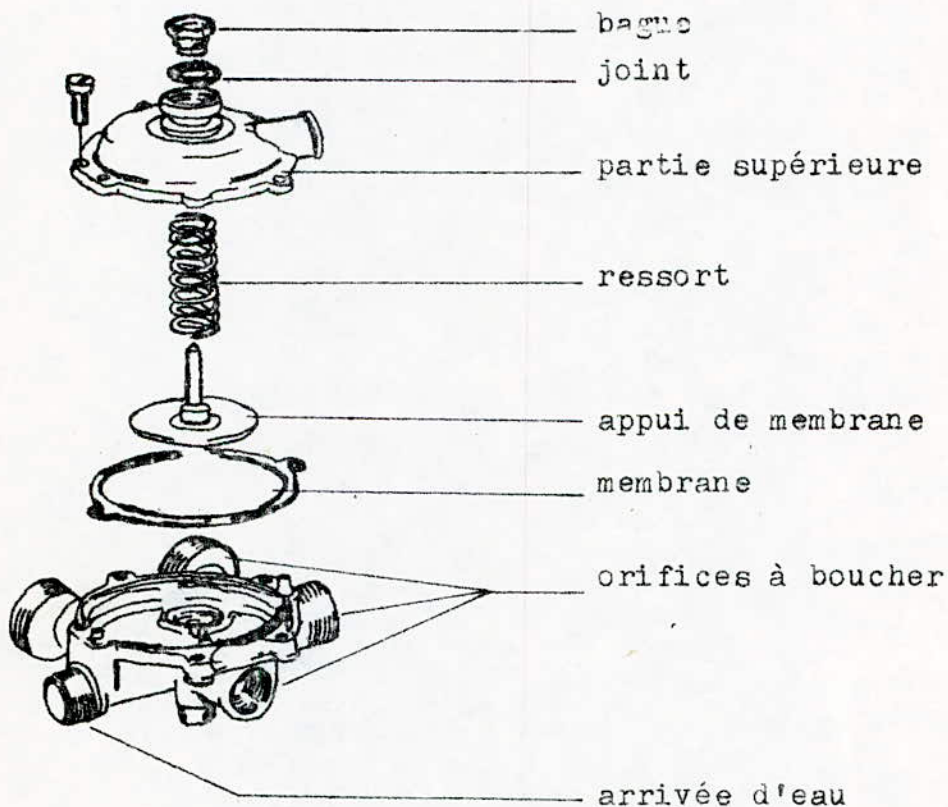


fig.IV.4 Valve à eau



Ces éléments peuvent être facilement récupérés de vieux chauffe-eau dont il faudrait éventuellement remplacer la membrane. Les servomoteurs étant destinés à fonctionner en temps partiel c'est à dire lorsqu'un signal est délivré par le capteur optique. Lorsque le système est en équilibre, une petite languette en acier bloque le mouvement des servomoteurs. Cette languette est donc commandée directement par le capteur optique. Un mécanisme de fixation des servomoteurs et de positionnement de la languette est prévu en conséquence (fig.IV.5). Ce mécanisme servira aussi de guide pour une tige prolongatrice.

### 2.1.3 Le levier d'entraînement de la roue .

Le mouvement des servomoteurs hydrauliques est transmis à la roue par des leviers (fig.IV.6). Les dimensions des leviers ont été calculées pour provoquer un déplacement de 18mm au niveau de la roue. Le déplacement des pistons des servomoteurs étant limité à 5mm environ. Le ressort de rappel sert à maintenir la tige prolongatrice du piston à l'intérieur du support de fixation des servomoteurs et permet au levier assurant le mouvement vers l'Est, de ne pas gêner le mouvement de la roue lorsque l'autre levier complémentaire est en action. Le bout arrondi et mobile du levier lui permet de reprendre sa position de repos sans toucher aux barreaux de la roue d'entraînement.

### 2.1.4 La roue.

Le rôle principal de la roue est de transmettre le déplacement mécanique au panneau principal. deux roues sont nécessaires au dispositif; la première assurant le mouvement azimutal et la seconde le mouvement en site. Les deux roues sont actionnées par des leviers. Ces roues (fig.IV.7) ont un diamètre efficace de 200 mm et comportent 45 barreaux de 12 mm de longueur. Le nombre de barreaux des roues a été choisi de telle manière que la distance entre deux d'entre-eux corresponde à un angle de  $8^{\circ}$ . A chaque pas du servomoteur, la roue tournerait donc d'un angle de  $8^{\circ}$ . Cette précision est suffisante pour commander le mouvement en site du panneau. Cependant pour le mouvement azimutal la transmission du mouvement se fait par une courroie liée à deux poulies. La poulie collée à la roue a un diamètre efficace de 32 mm et celle qui entraîne le panneau a un diamètre de 256 mm. Une rotation de  $8^{\circ}$  de la petite poulie (ce qui correspond à un pas) provoque une rotation de  $1^{\circ}$  de la grande poulie et du panneau. Les supports de la roue et des leviers ont été dimensionnés pour les soutenir d'une manière stable avec le minimum de frottements lors de leurs rotations.(fig.IV.8)

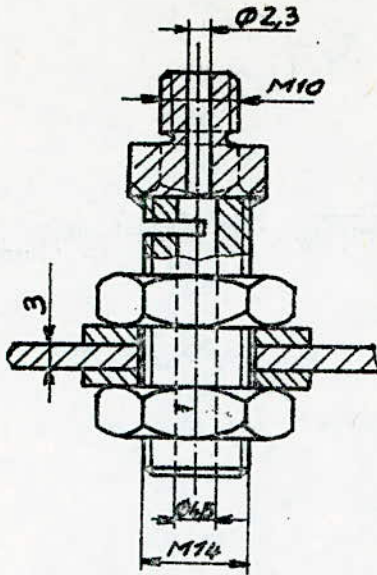
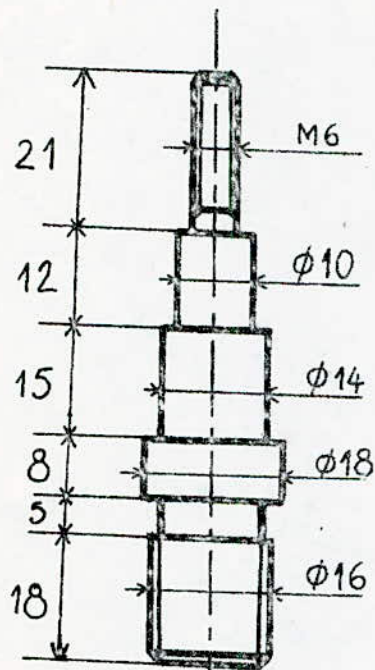
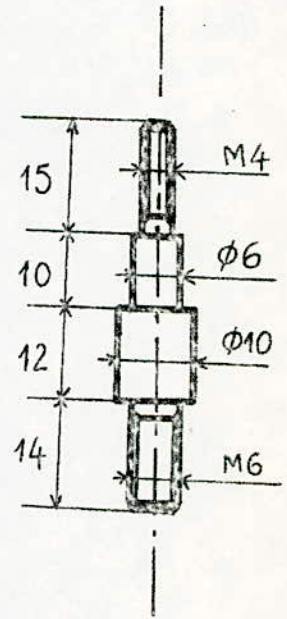


fig.IV.5 Support de fixation des servomoteurs.



Support de la roue



Support de levier

fig.IV.8 Supports de la roue et des leviers



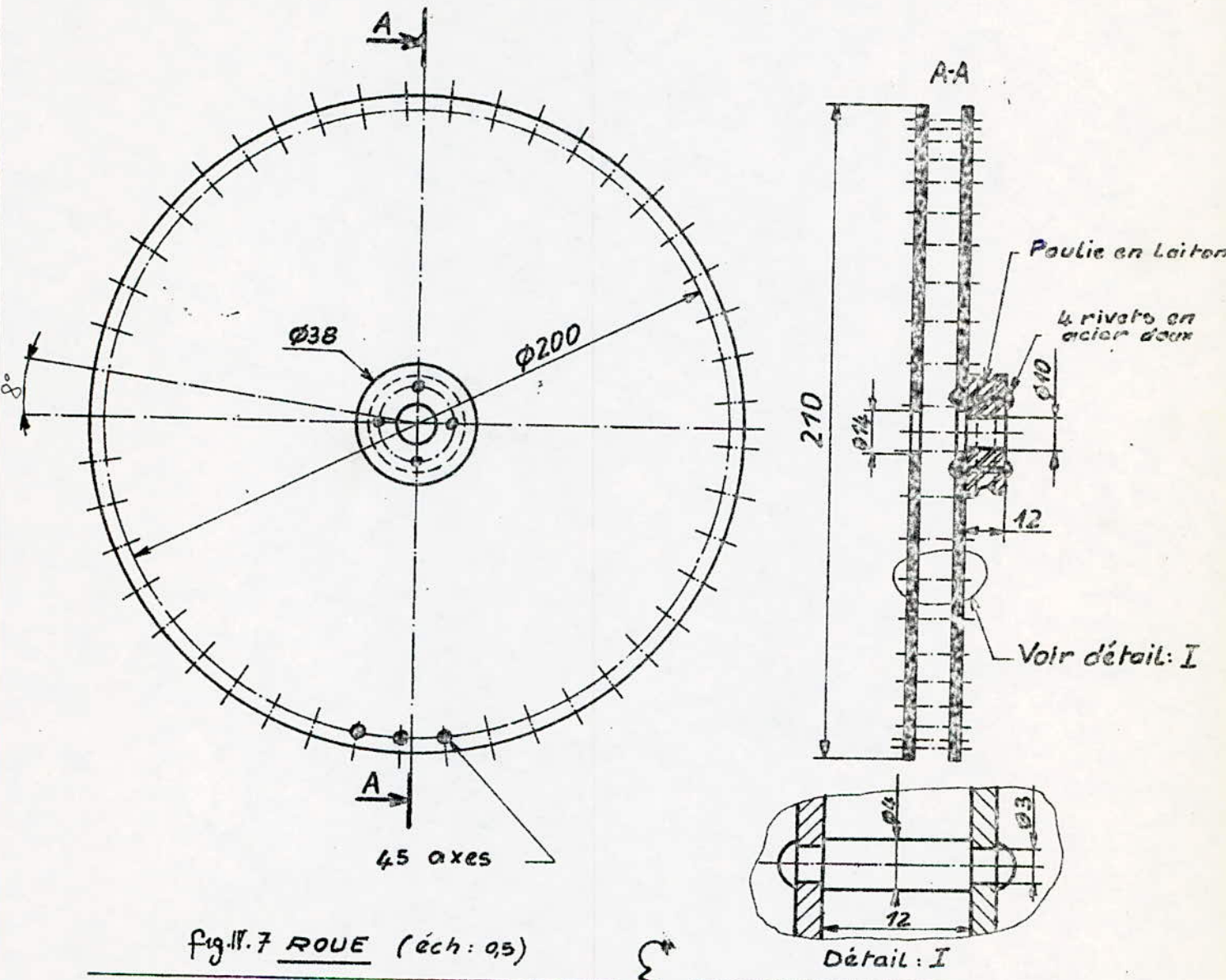


fig. IV.7 ROUE (éch: 0,5)

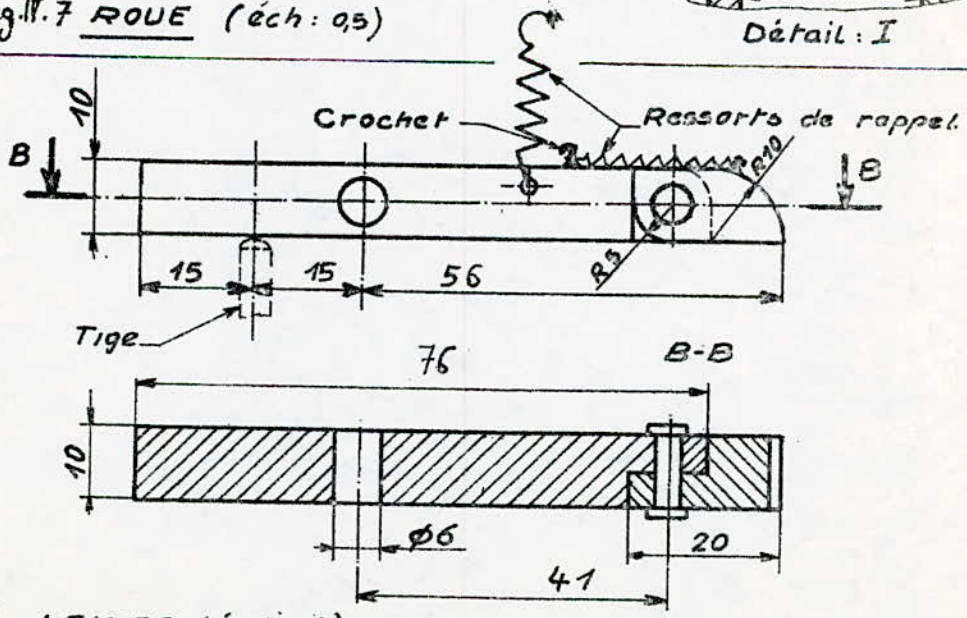
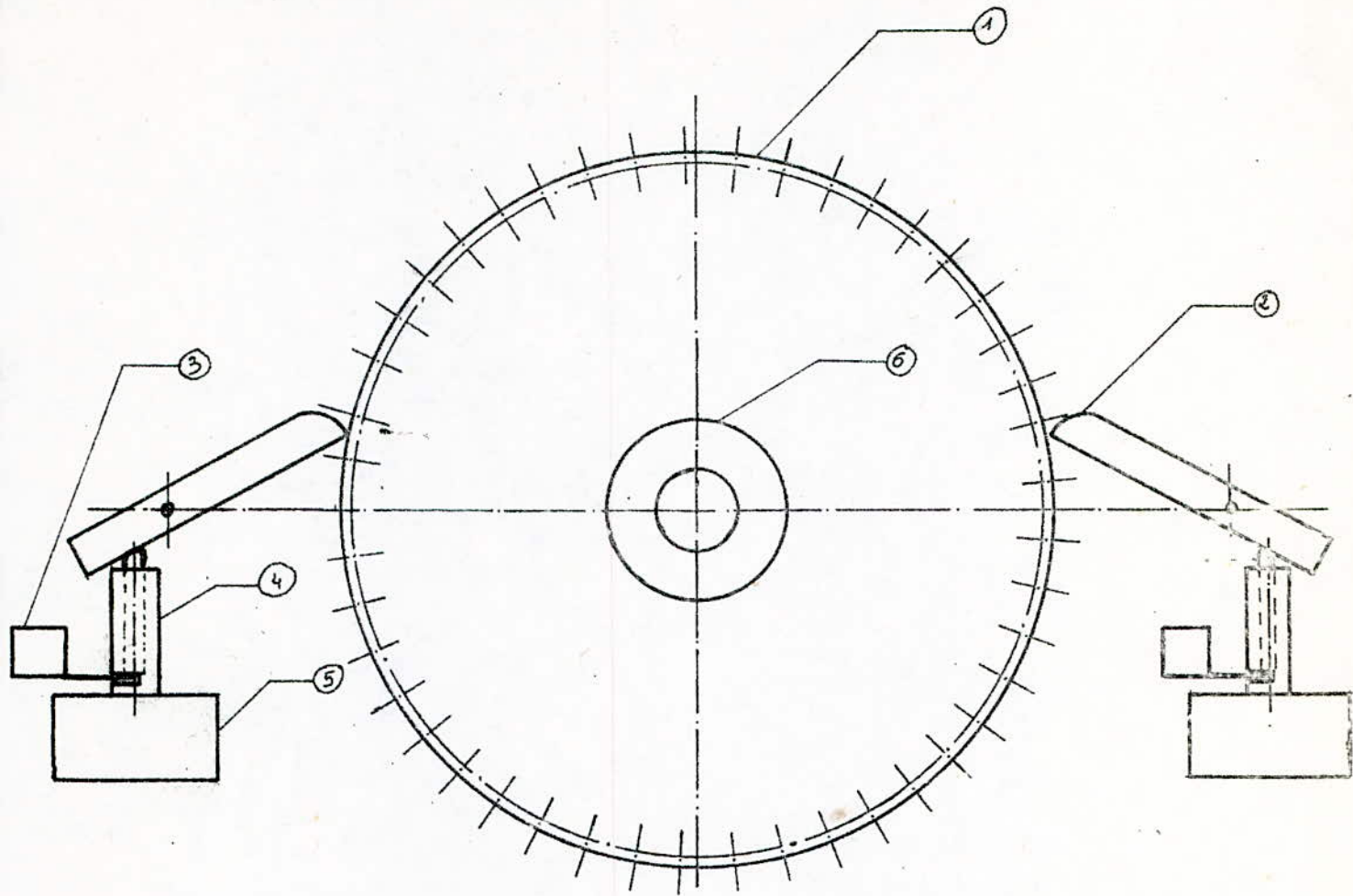


fig. IV.6 LEVIER (éch: 1)

Une vue de dessus montre la disposition de ces divers éléments:



1- Reue à barreaux

2- Levier

3- Blocade électromagnétique.

4- Support de fixation des servomoteurs

5- Servomoteur hydraulique

6- Poulie



## 2.2 ETUDE DU BATIT.

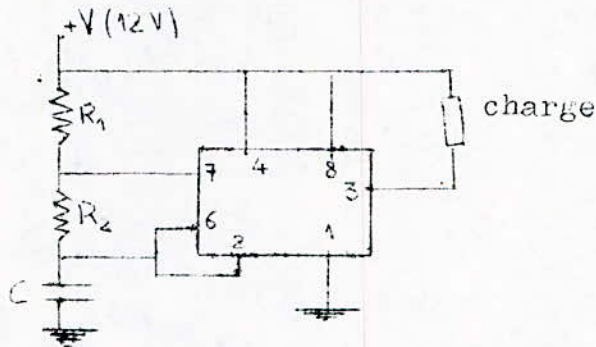
Le support du panneau est formé d'un cadre qui porte une barre mobile assurant au panneau le mouvement en inclinaison. Le cadre est maintenu par un cylindre qui peut pivoter autour d'un axe vertical assurant le mouvement azimutal. L'utilisation de roulement à billes dans les axes de rotation permet de minimiser les frottements. (fig.IV.9)

Le batit est constitué essentiellement d'un cadre (1), d'une roue à barreaux pour le mouvement d'inclinaison (2), d'un roulement à billes (3), de l'arbre (4), d'un écrou hexagonale (5), d'une poulie (6), d'une rondelle (7), de roulement à rouleaux coniques (8), d'une vis à têtou (9), du socle (10), et de vis de fixation (11) et (12).

## 2.3 L'IMPULSATEUR.

L'impulsateur est l'élément indispensable assurant l'alimentation alternée des deux électrovannes. Cet impulsateur délivre un signal carré dont la période est d'environ 20 secondes. Cette période, relativement grande, est nécessaire vu la grande inertie du système de traction.

L'impulsateur utilisé contient le circuit intégré NE 555 monté en multivibrateur astable selon le montage suivant :



Le temps de charge du condensateur C à travers  $R_1$  et  $R_2$  est :

$$t_1 = 0,693 ( R_1 + R_2 ) \cdot C$$

Le temps de décharge du condensateur C à travers  $R_2$  est :

$$t_2 = 0,693 \cdot R_2 \cdot C$$

La période du signal fourni est donc :

$$T = 0,693 ( R_1 + 2R_2 ) \cdot C$$

Pour avoir une période d'environ 20 secondes, on a pris :

$$R_1 = 4,7 \text{ k}\Omega ; R_2 = 38,8 \text{ k}\Omega \text{ et } C = 350 \mu\text{F}$$

Ce qui nous donne :

$$T = 0,693 ( 4,7 \cdot 10^3 + 2 \cdot 38,8 \cdot 10^3 ) \cdot 350 \cdot 10^{-6}$$

$$T = 19,96 \text{ s}$$

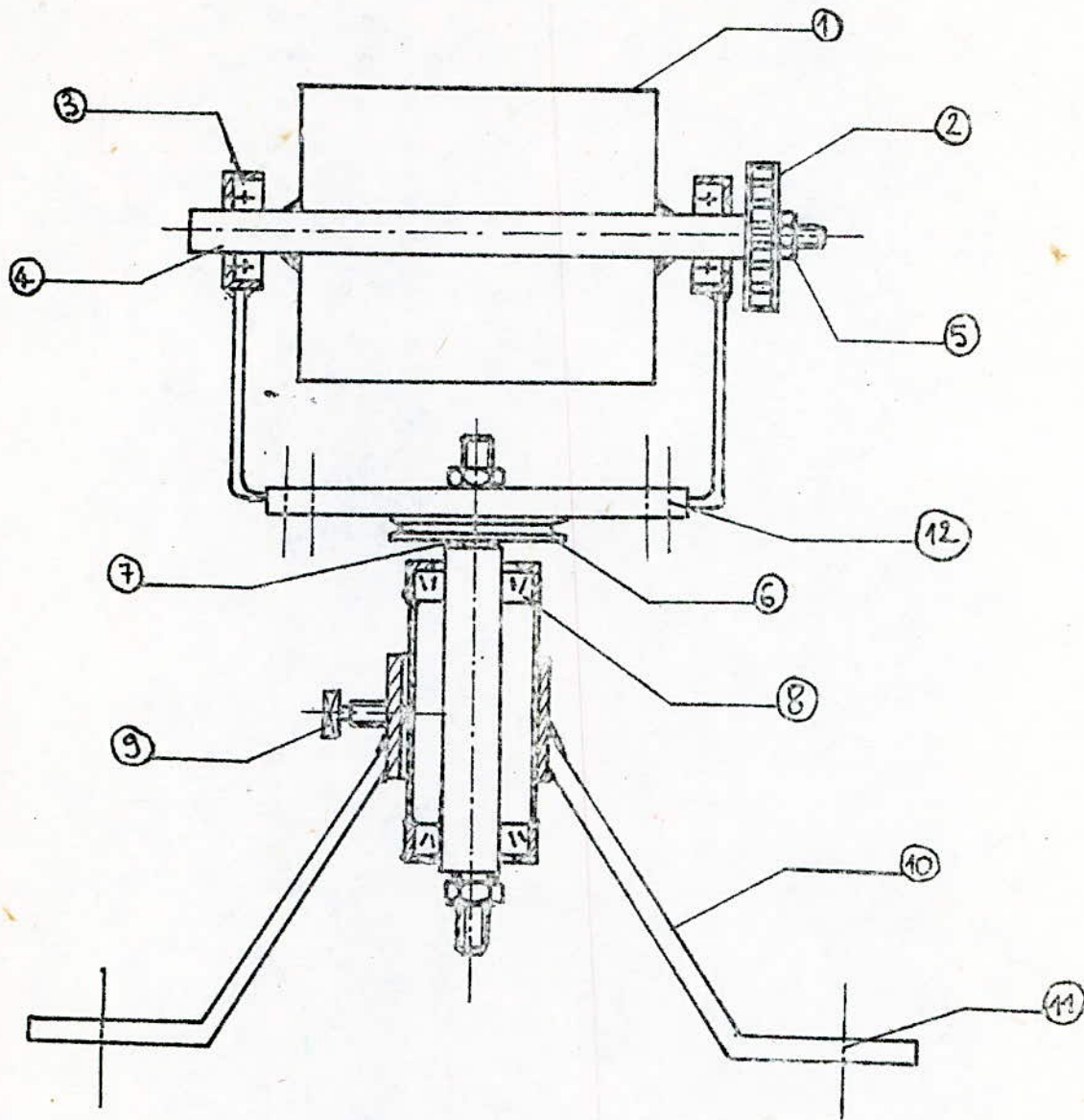
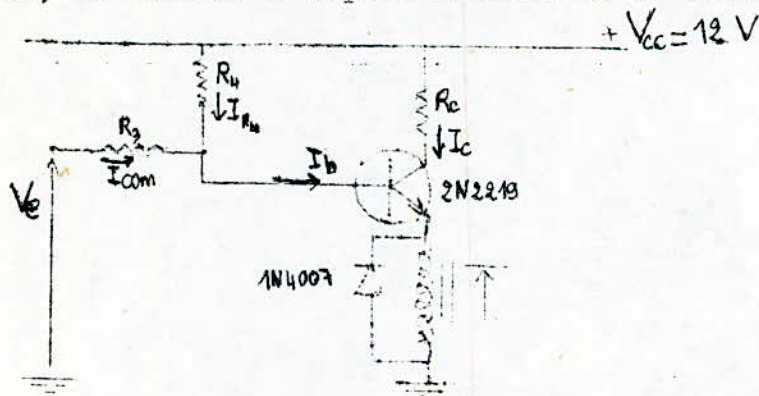


fig.IV.9 Batit du panneau.



LES électro-vannes sont commandées par un relais à deux positions alimentées par l'impulsateur précédent. Etant donné que le relais commute pour un courant de 150 mA, il est nécessaire d'amplifier le courant de sortie du multi-vibrateur à l'aide d'un transistor. Le transistor utilisé est un 2N2219 dont le gain en courant est  $\beta = 50$ . Soit  $V_e$  et  $I_{com}$  la tension et le courant de sortie du multi-vibrateur, le schéma d'amplification de courant est le suivant:



On fixera le courant  $I_c = 150 \text{ mA}$  d'où  $I_b = 3 \text{ mA}$  (car  $\beta = 50$ )

Si  $I_{R4} = 0,5 \text{ mA}$  alors  $I_{com} = 2,5 \text{ mA}$ .

Soit  $I_{com} + I_{R4} = 3 \text{ mA}$ .

A la saturation du transistor :  $V_e = 12 \text{ V}$

d'où  $V_b = V_{RL} + V_{BE \text{ sat.}}$

La résistance du relais étant de 50 ohms,

$$V_b = 7,5 + 0,7 = 8,2 \text{ V}$$

car  $V_{RL} = 150 \text{ mA} \times 50 = 7,5 \text{ V}$  et  $V_{BE \text{ sat.}} = 0,7 \text{ V}$

comme  $V_e - V_b = R_3 \cdot I_{com}$

$$\text{alors, } R_3 = \frac{V_e - V_b}{I_{com}} = \frac{12 - 8,2}{2,5}$$

$$\text{soit } R_3 = 1,52 \text{ k}\Omega$$

$$V_b + R_4 \cdot I_{R4} = 12 \text{ V}$$

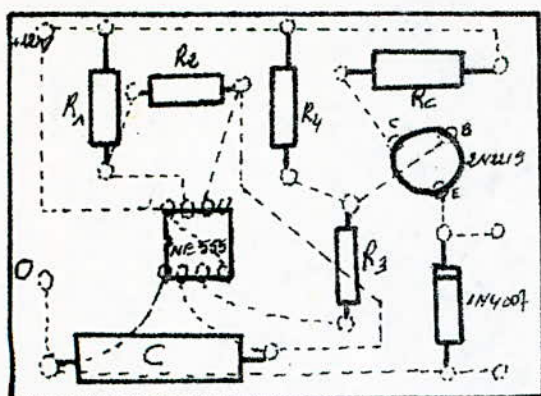
$$\text{d'où } R_4 = \frac{12 - 8,2}{0,5} \quad \text{soit } R_4 = 7,6 \text{ k}\Omega$$

A la saturation du transistor on a:

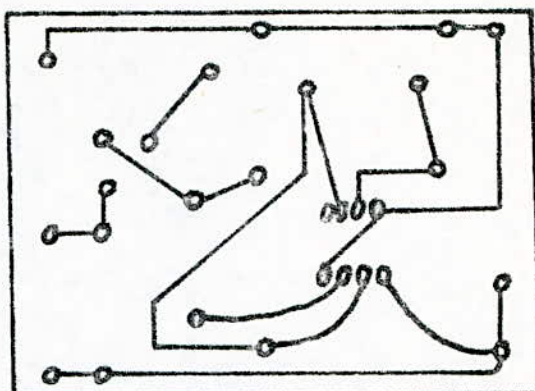
$$R_c I_c + V_{CE \text{ sat.}} + R_L I_c = 12 \text{ V}$$

$$V_{CE \text{ sat.}} \hat{=} 0,1 \text{ V}$$

$$\text{d'où } R_c = \frac{12 - R_L I_c - V_{CE \text{ sat.}}}{I_c} = \frac{12 - 7,5}{0,15} \quad R_c = 30 \Omega$$



côté composants



côté cuivre

fig.IV.10 Schéma de l'impulsateur

La puissance dissipée dans  $R_C$  serait

$$P_{R_C} = 30 \times (0,15)^2 = 0,675 \text{ W}$$

La résistance  $R_C$  doit avoir une dissipation d'environ 1 Watt.

La puissance totale dissipée dans le circuit collecteur-émetteur est:

$$P = R_C \cdot (I_C)^2 + V_{CEsat} \cdot I_C + R_L \cdot (I_C)^2$$

$$P = 0,675 + 0,3 \cdot 0,15 + 50 \cdot (0,15)^2$$

$$P = 1,845 \text{ W}$$

L'impulsateur a été réalisé sur circuit imprimé (fig.IV.10)

#### 2.4 ETUDE DU CIRCUIT DE COMMANDE.

Le circuit de commande est constitué de trois parties: Le senseur optique qui délivre un signal d'action lorsque le système n'est pas en équilibre; un amplificateur de ce signal qui agit sur une blocade laissant le passage aux pistons des servomoteurs actionnant la roue d'entraînement du panneau.

##### 2.4.1 Senseur optique.

Le senseur optique est composé de quatre photorésistances montées en croix commandant les mouvement en hauteur et en azimut.

Les photorésistances employées sont du type LDRO3 dont la sensibilité est limitée à un domaine spectrale bien défini (fig.IV.11).



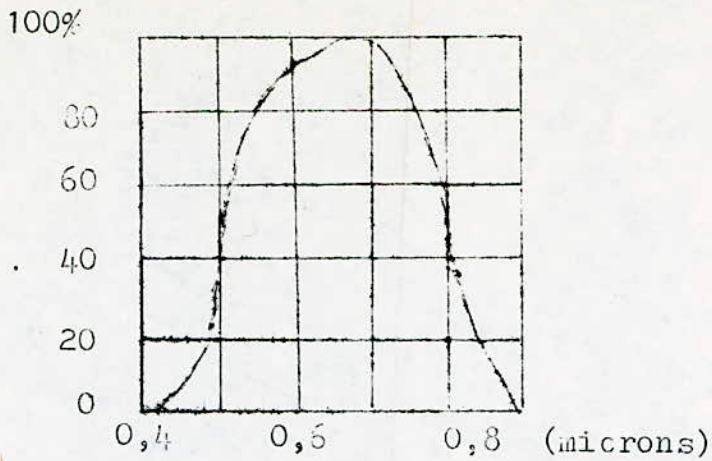


fig.IV.11 Pourcentage de la sensibilité spectrale obtenue en fonction de la longueur d'onde de la lumière incidente.

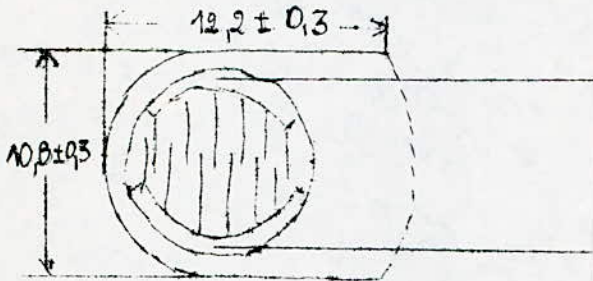
Leurs caractéristiques sont les suivantes:

Surface sensible projetée:  $0,5 \text{ cm}^2$

Résistance d'obscurité :  $10 \text{ M}\Omega$  (à  $V_a=100\text{V}$ )

Résistance à  $50 \text{ lux}/2854 \text{ K}$  :  $3 \text{ k}\Omega$

Tension d'alimentation maximum :  $150\text{V}$



Le batit du senseur optique est fait en plexiglas recouvert d'un tissu noir (fig.IV.12).

La lumière: solaire a été atténuée de 30% par un filtre gris pour faire travailler les photorésistances dans leur: domaine de plus grande sensibilité. La lentille utilisée a un diamètre de 35mm et une distance focale de 190 mm.

#### 2.4.2 Amplificateur et blocades.

La liaison entre les photorésistances et les blocades électromagnétiques est constituée d'un détecteur de zéro, d'un comparateur et d'un amplificateur de puissance agissant sur les blocades commandant le mouvement des servomoteurs (fig.IV.13) L'amplificateur a été réalisé sur circuit imprimé (fig.IV.14)

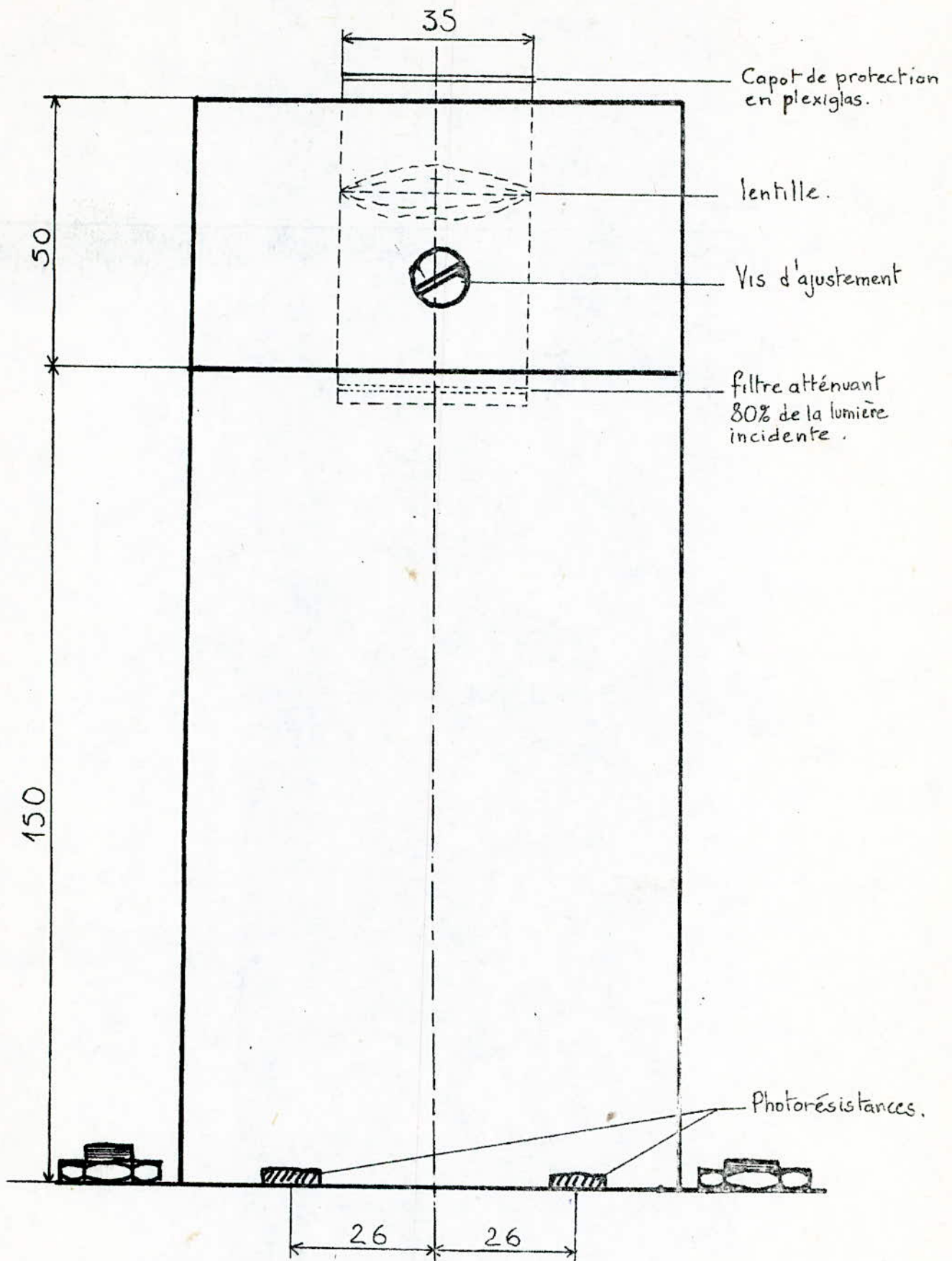
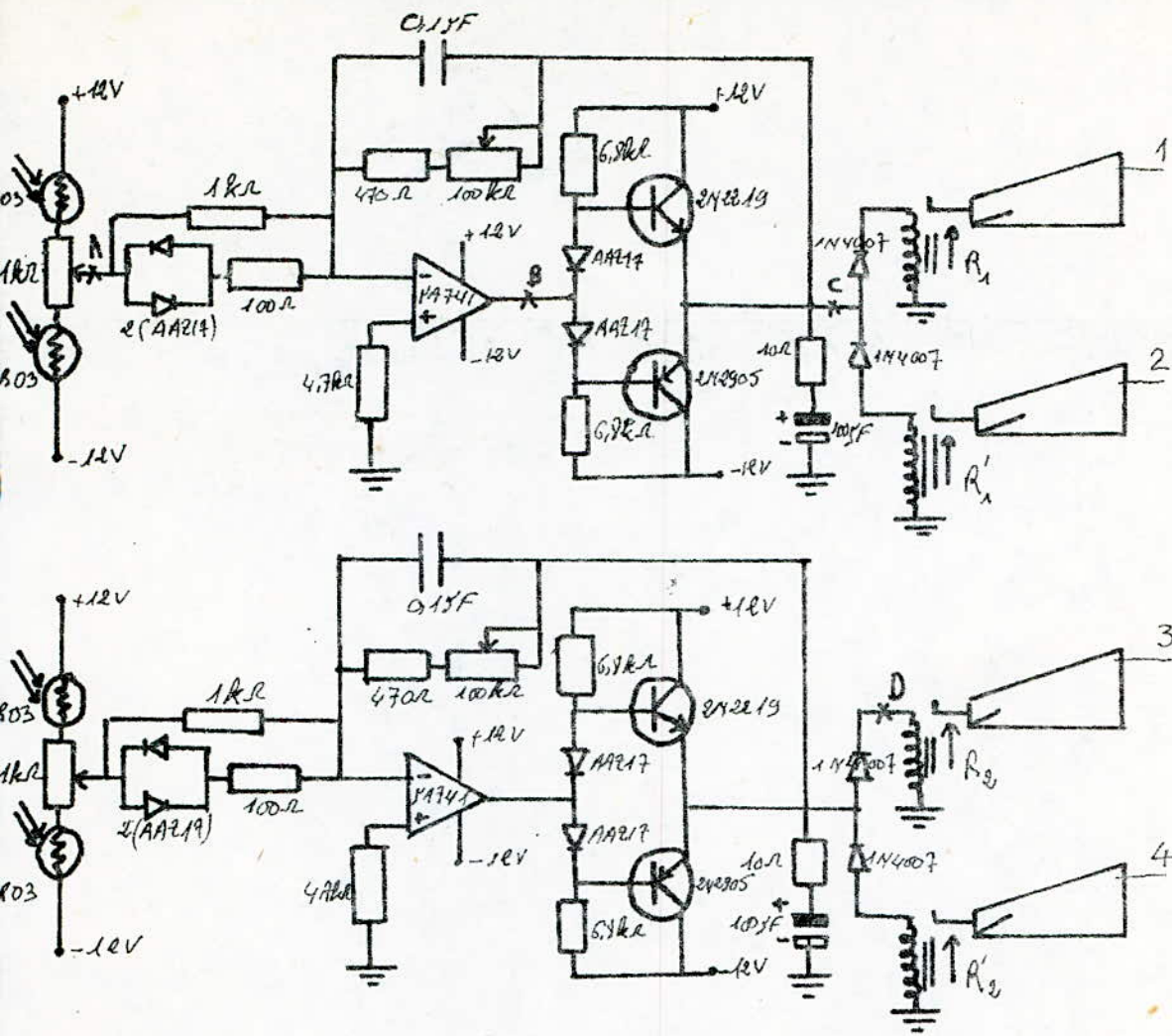


fig.IV.12 Batit du senseur optique.





- 1- Blocade libérant le servomoteur de montée
- 2- Blocade libérant le servomoteur de descente
- 3- Blocade libérant le servomoteur de droite
- 4- Blocade libérant le servomoteur de gauche

fig.IV.13 Schéma de l'amplificateur et blocades

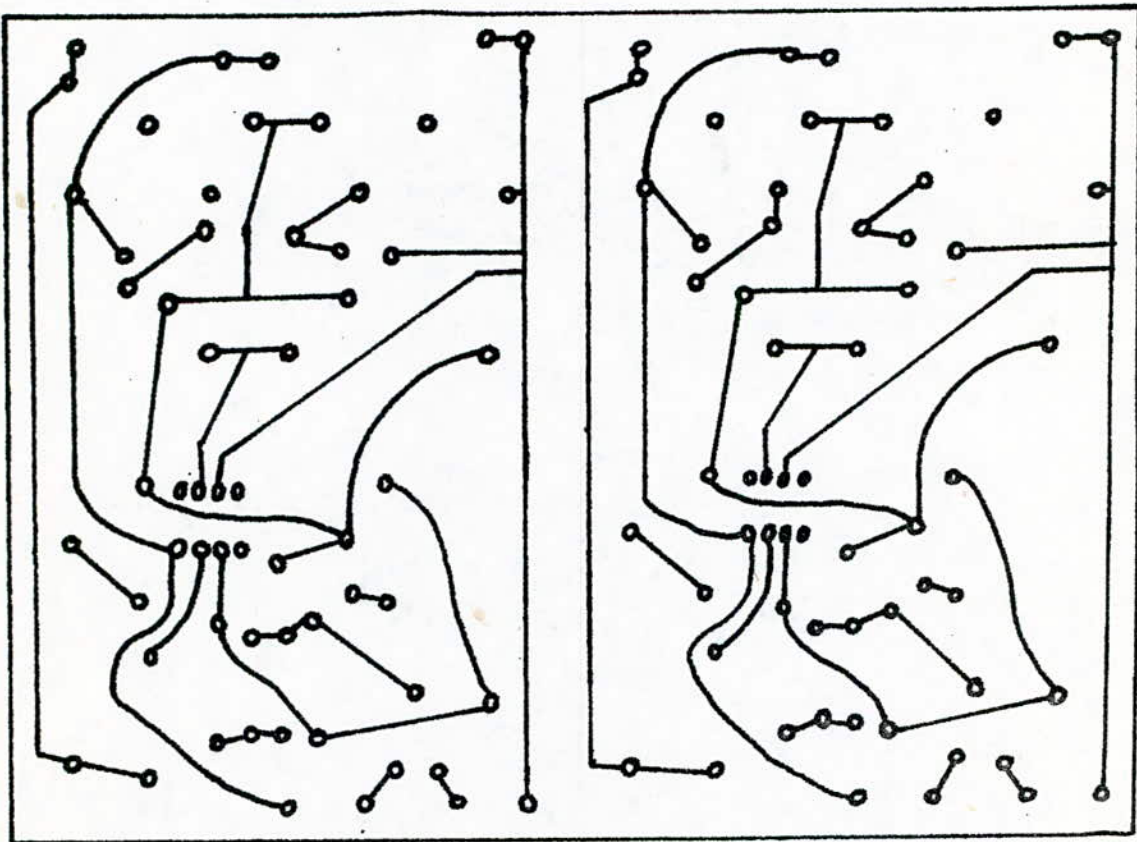
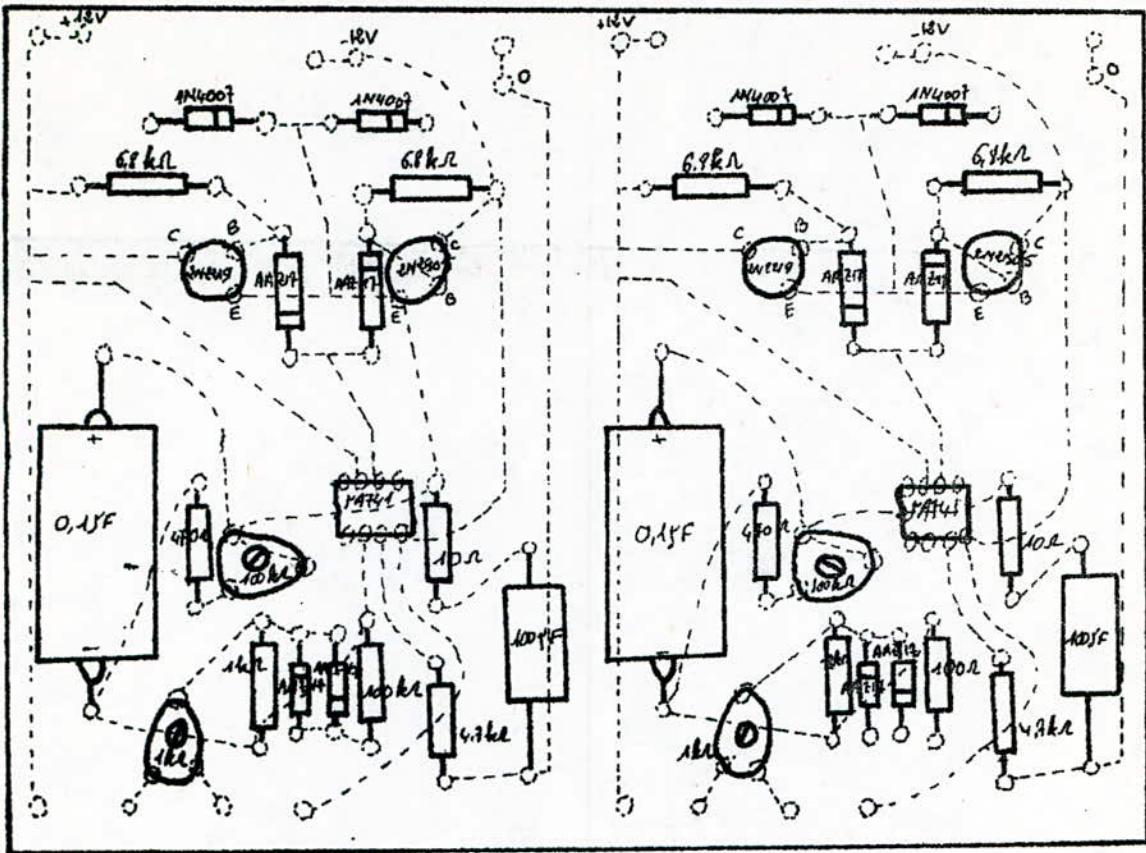


fig.IV.14 Schéma de l'amplificateur sur circuit imprimé.



L'amplificateur fonctionne de la manière suivante. Les photorésistances ont été montées deux à deux en pont diviseur, de sorte que la tension médiane est nulle lorsque les deux cellules ne sont pas éclairées. Si l'une des deux photorésistances est éclairée, il apparaît une tension au point médian A (fig. IV.13). Cette tension est comparée à un seuil de référence par l'amplificateur opérationnel. La tension de sortie de cet amplificateur commande la saturation d'un des deux transistors (suivant que cette tension est positive ou négative) qui actionne un relais.

Les relais utilisés sont d'un type courant à 12V. Le courant nécessaire à leur commutation est de 150 mA. Ces relais ont été prolongés par une languette en acier qui servira de blocage de servomoteur. (fig. IV.15)

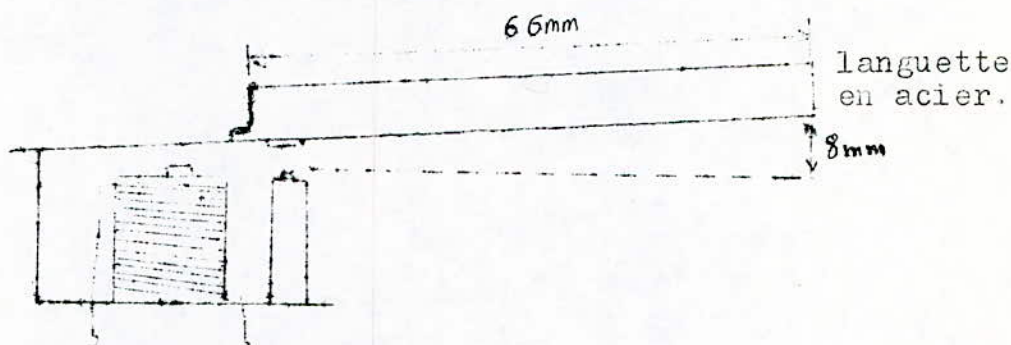


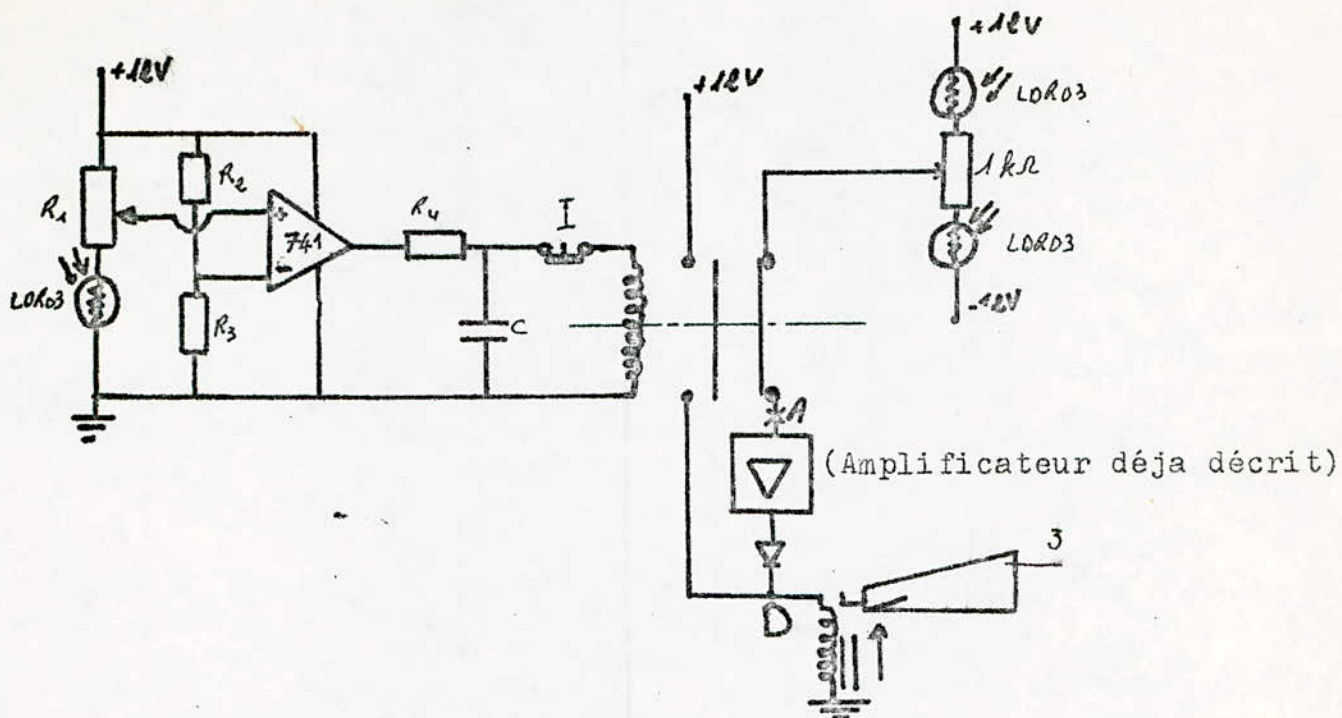
fig. IV.15 Relais avec languette de prolongement

La languette d'acier a une longueur de 66 mm, elle effectue en son extrémité un déplacement de 8 mm. Cette languette est positionnée dans la fente du support de fixation des servomoteurs (fig. IV.5)

## 2.5 CIRCUIT DE RETOUR DANS LA POSITION DU MATIN.

Le panneau comporte une cellule photosensible (potorésistance) fixe qui est exposée au soleil. Si l'intensité lumineuse descend en dessous d'un certain seuil (tombée du jour), cette cellule commande le relais qui agit sur la blocade assurant le retour vers l'Est du panneau (fig. IV.16).

La photorésistance est montée en pont diviseur. La sortie de l'amplificateur opérationnel commande la bobine du relais (celui-ci comporte un contact ouvert au repos et un contact fermé au repos). Lorsque l'éclairage de la cellule est suffisant, le relais n'est pas excité. Le contact fermé au repos alimente le senseur optique. Lorsqu'au soir, l'éclairage de la cellule devient trop faible, le relais est excité. Le contact ouvert au repos se ferme, ce qui excite le relais de la blocade qui laisse le passage au piston du servomoteur assurant le retour vers l'Est.



3- Blocade assurant le retour vers l'Est.

fig.IV.16 Circuit de retour dans la position du matin.

Un contact fermé au repos (noté I) est inséré dans le circuit de la bobine qui s'ouvre grâce à une butée fixée à la poulie d'entraînement du panneau. Son ouverture "désexcite" la bobine, donc le relais de la blocade qui arrête le mouvement du servomoteur. Le panneau étant en position d'attente du matin.

### 3. FONCTIONNEMENT DU DISPOSITIF.

Le dispositif fonctionne de la manière suivante: pendant la journée, le panneau suit automatiquement les déplacements du soleil grâce aux quatre photorésistances du senseur optique.

Chaque déplacement du soleil produit un déséquilibre du pont diviseur formé par deux photorésistances. Ce déséquilibre se traduit par l'excitation de l'un des deux relais  $R_1$  ou  $R'_1$

(sinon  $R_2$  ou  $R'_2$ , fig.IV.13) qui actionne une blocade. Cette blocade laisse le passage libre au piston d'un servomoteur qui fait tourner le panneau en direction du soleil, rétablissant ainsi l'équilibre du pont diviseur formé des deux photorésistances.

Lorsque, au soir, la luminosité baisse, la cellule fixe commande le retour du panneau vers l'Est en déconnectant le circuit du senseur optique et en alimentant le relais de la blocade correspondant à la direction du mouvement.



Le panneau s'arrête quand l'interrupteur de fin de course (noté I, fig.IV.13) est ouvert par une butée fixée sur la roue d'entraînement du panneau.

Le matin, le relais commandé par la cellule fixe n'est pas alimenté. Son contact fermé au repos permet au senseur optique de commander le mouvement du panneau.

#### 4. MISE AU POINT.

Le travail de mise au point du dispositif terminé est particulièrement délicat et devra se faire sur l'ensemble fini. On pointera le capteur solaire avec le senseur optique solidaire, directement vers le soleil, le système de commande étant déconnecté. On vérifiera, avec un procédé quelconque, que le soleil est exactement perpendiculaire au panneau. Il suffira ensuite de modifier la valeur des résistances ajustables liées aux deux paires des photorésistances, de façon à obtenir une tension nulle à la sortie de chaque résistance ajustable; à la sortie de l'amplificateur opérationnel et au niveau de chaque relais (points A, B, C et D fig.IV.13 ).

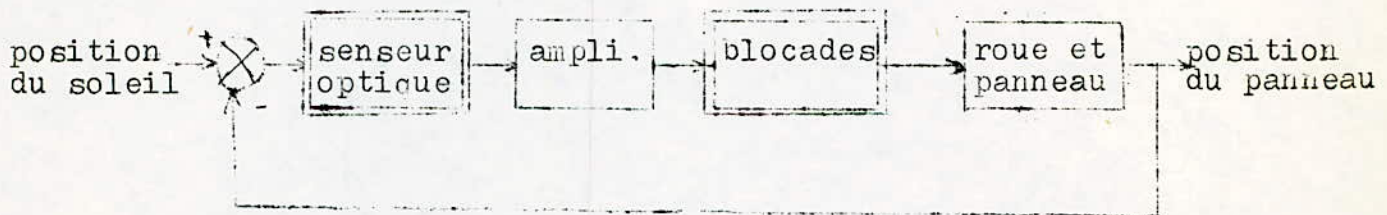
Le système de commande branché, le système est prêt à fonctionner d'une manière continue.

ANALYSE DU SYSTEME

1. INTRODUCTION.

Le dispositif que nous avons proposé présente d'énormes avantages (entretien, coût, fiabilité,..). Cependant son analyse présente quelques difficultés dûs à sa non-linéarité. Les non-linéarités du système proviennent essentiellement des fonctionnements du senseur optique et des blocades électromagnétiques des servomoteurs. Les autres blocs du système sont linéaires ou peuvent être considérés comme tel dans leur domaine de fonctionnement.

Le système de commande se compose des blocs suivants:

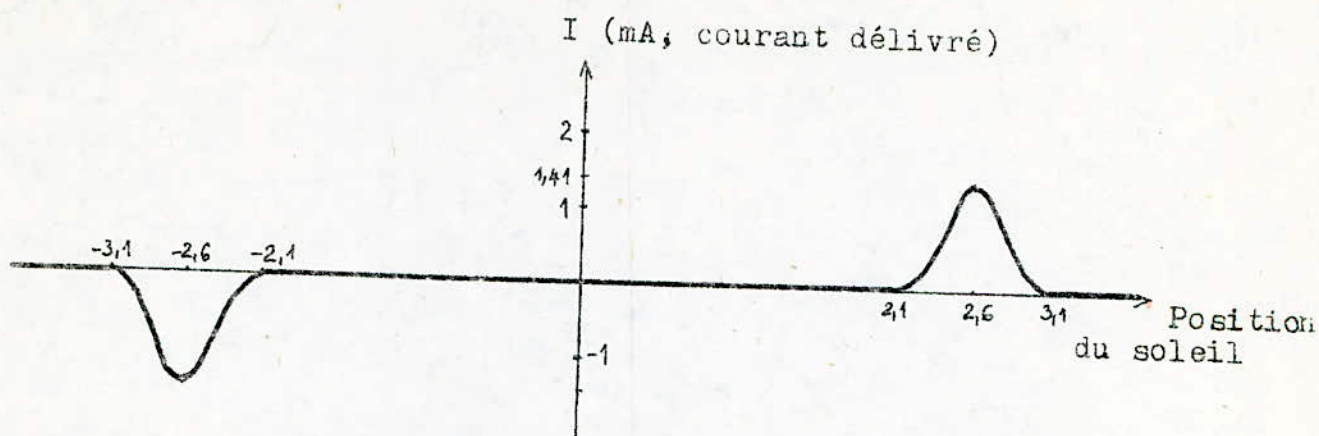


(les éléments non-linéaires ont été encadrés deux fois)

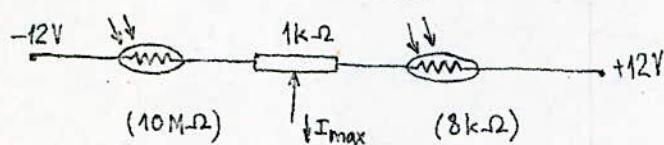
1.1 LE SENSEUR OPTIQUE

Si l'on trace la courbe de réponse (courant délivré) des photorésistances utilisées (LDRO3) en fonction de la position du point focale du soleil au collimateur on obtient la courbe suivante:



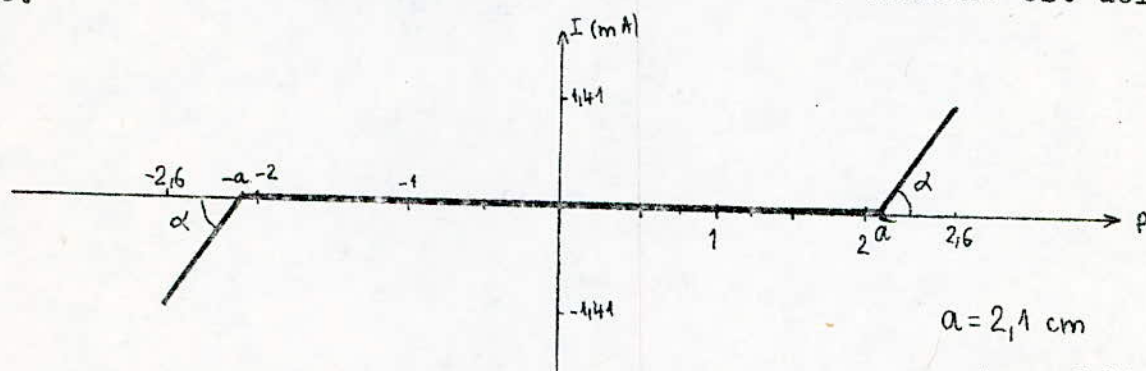


Le courant maximum délivré a été calculé pour le cas où une des photorésistances est éclairée avec le maximum de luminosité alors que l'autre est à l'ombre.



$$I_{\max} = \frac{12}{8,5 \cdot 10^3} \quad I_{\max} = 1,41 \text{ mA}$$

On remarque ainsi la non-linéarité de la réponse des photorésistances en fonction de la position du soleil. Néanmoins, on peut assimiler cette  $V_a$  une somme de trois segments de droite vu que, lors du fonctionnement, la position du point focale du soleil ne dépasse pas le point pour lequel le maximum de courant est délivré. \*) courbe



$$a = 2,1 \text{ cm}$$

$$K = \text{tg} \alpha = 2,82 \text{ mA/cm.}$$

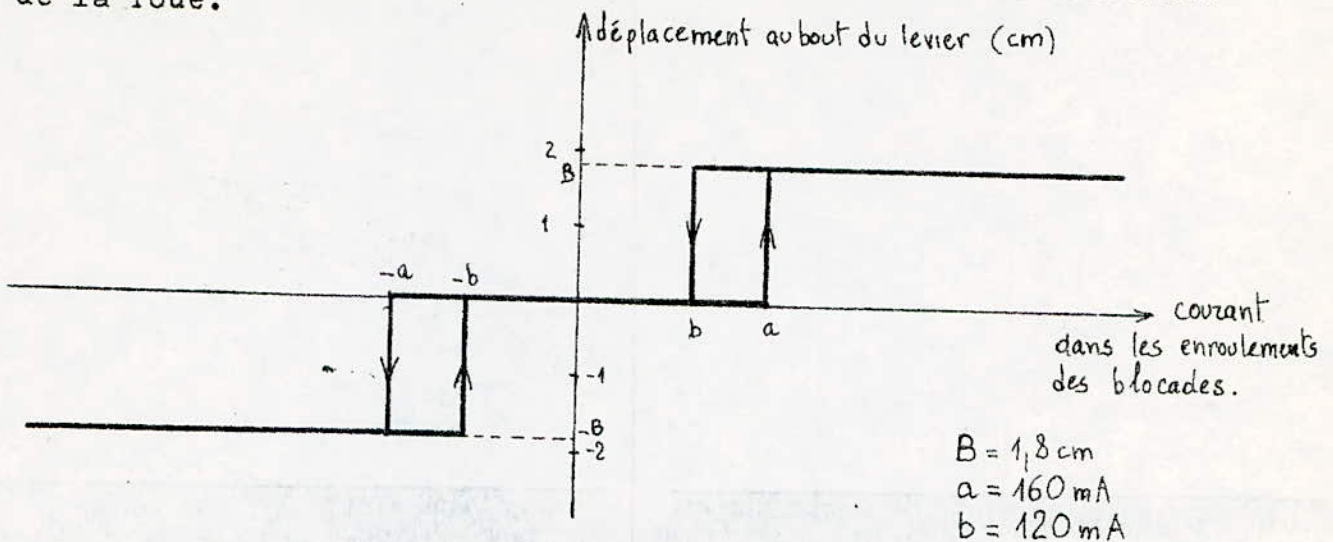
### 1.2 AMPLIFICATEUR.

L'amplificateur introduit une constante de proportionnalité qui peut être facilement calculée.

On a  $K = 100$  (coefficient d'amplification en courant)

### 1.3 LES BLOCADES ELECTROMAGNETIQUES.

Le fonctionnement des blocades électromagnétiques peut être assimilé à un relais à trois position. La position maximale correspond au déplacement du bout du levier d'entraînement de la roue.



B est le déplacement au bout du levier.  
a et b ont été trouvés expérimentalement.

### 1.4 ASSOCIATION ROUE ET PANNEAU.

Le bloc roue d'entraînement et panneau peut être assimilé à un élément linéaire du premier ordre. Sa fonction de transfert serait donc égale à

$$\frac{1}{T_m \cdot s}$$

avec  $T_m = n \cdot T_i$

n étant le nombre de pas qu'il faudrait pour faire une rotation complète (d'Est en Ouest)

$T_i$  étant le temps nécessaire pour faire un pas.

On a

$n = 180$  (nombre de pas maximum en été)

$T_i = 20$  secondes (temps d'impulsion)

D'où

$$T_m = 180 \times 20 = 3600$$

et donc

$$\frac{1}{T_m \cdot s} \equiv \frac{1}{3600 \cdot s}$$

## 2. ANALYSE DES SYSTEMES NON LINEAIRES.

Beaucoup de systèmes physiques présentent des non linéarités. Lors de l'analyse d'un système physique, il arrive que les non-linéarités qu'il présente ne peuvent pas être négligées car les signaux de commande de ces systèmes peuvent être



variables dans des limites larges.

Ces systèmes peuvent être examinés par les méthodes suivantes:

1. Méthode de la fonction descriptive.
2. Méthode du plan de phase.
3. Méthode de modélisation analogique.
4. Méthode de modélisation numérique.

La méthode de la fonction descriptive est une linéarisation harmonique de l'élément non-linéaire. Le système est ensuite analysé par la méthode fréquentielle. La base principale de cette méthode est de négliger les harmoniques supérieurs dans la réponse du système pour l'excitation sinusoïdale. La précision de cette méthode est meilleure si on arrive à filtrer les harmoniques supérieures.

La méthode du plan de phase est précise. La courbe de réponse du système est donnée dans le plan "position" en fonction de la vitesse ( $X, \dot{X}$ ). Elle est applicable pour un système du premier ordre et éventuellement du second ordre subissant un échelon unitaire.

On obtient la courbe  $X=f(t)$  à partir de la trajectoire  $X=f(\dot{X})$ .

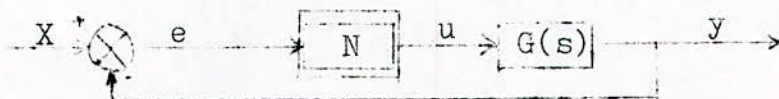
Les méthodes de modélisation analogique et numérique sont les méthodes les plus efficaces et les plus précises dans l'analyse des systèmes non-linéaires. La réponse peut être obtenue plus rapidement dans les systèmes analogiques mais la modélisation numérique est plus précise.

La modélisation numérique permet l'automatisation des processus d'optimisation du système modèle et l'analyse des systèmes non-linéaires même très compliqués. Ensuite la gamme des éléments non-linéaires possibles à appliquer dans la modélisation numérique est illimitée.

### 3. ANALYSE D'UN SYSTEME NON LINEAIRE PAR UNE FONCTION DESCRIPTIVE.

La fonction descriptive est la transmittance approximative d'éléments non-linéaires avec l'hypothèse que le signal d'entrée de ces éléments est sinusoïdal. Cette hypothèse est justifiée si la partie linéaire du système a les propriétés d'un filtre passe-bas.

La méthode de la fonction descriptive permet de trouver le cycle limite et de déterminer les caractéristiques de la réponse du système suivant: //11//



-système de régulation non-linéaire-

N: élément non linéaire

G(s): transmittance linéaire



Le système est décrit par l'équation différentielle:

$$b_0 y(t) + b_1 y^{(1)}(t) + \dots + b_n y^{(n)}(t) = c + a_0 x(t) + a_1 x^{(1)}(t) + \dots + a_m x^{(m)}(t) \quad (1)$$

Si l'erreur harmonique est:

$$e(t) = A \sin \omega t$$

la valeur de sortie  $y(t)$  de l'élément non-linéaire est une fonction périodique non sinusoïdale qui dépend de l'amplitude  $A$  et de la pulsation  $\omega$  et des coefficients de l'équation différentielle (1)

$$y(t) = F(A, \omega, t, b_k, a_i) \quad \text{avec} \quad \begin{matrix} k=0, 1, 2, \dots, n \\ i=0, 1; 2, \dots, m \end{matrix}$$

La fonction  $y(t)$  peut être développée en série de Fourier:

$$y(t) = C_0 + \sum_{r=0}^{\infty} (B_r \sin r\omega t + C_r \cos r\omega t),$$

où:

$$\begin{aligned} C_0 &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F(A, \omega, t, b_k, a_i) d\omega t, \\ B_r &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(A, \omega, t, b_k, a_i) \sin r\omega t d\omega t \\ C_r &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(A, \omega, t, b_k, a_i) \cos r\omega t d\omega t \end{aligned}$$

Si la caractéristique statique de l'élément non-linéaire est symétrique par rapport à l'origine alors  $C_0=0$ . Les coefficients  $B_r$  et  $C_r$  dépendent de l'amplitude du signal d'entrée  $e(t)$  et des coefficients  $a_0, b_0, c_0$  de l'équation (1) décrivant le système. L'équation (1) est valable pour la condition  $m \leq n$ ; les coefficients  $B_r$  et  $C_r$  du développement en série de Fourier dépendent non seulement de l'amplitude  $A$  mais aussi de la pulsation du signal d'excitation  $e(t) = A \sin \omega t$ .

On supposera que l'élément non-linéaire a une caractéristique statique symétrique par rapport à l'origine d'où  $C_0=0$ . Si la partie linéaire du système non-linéaire est un filtre passe-bas le signal  $y(t)$  est représenté par la première composante du développement en série de Fourier.

$$y(t) \hat{=} y_1(t) = B_1(A, \omega) \sin \omega t + C_1(A, \omega) \cos \omega t,$$

où

$$\begin{aligned} B_1(A, \omega) &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} y(t) \cdot \sin \omega t d\omega t \\ C_1(A, \omega) &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} y(t) \cos \omega t d\omega t. \end{aligned}$$

La fonction de description  $J(\omega, A)$  d'un élément non linéaire est donnée par l'équation :

$$J(A, \omega) = \frac{-B_1(A, \omega) + jC_1(A, \omega)}{A}$$

Où :  $A$  est l'amplitude d'une excitation sinusoïdale avec la pulsation  $\omega$ .



Bes  $C$  sont les coefficients du développement de la réponse  $y(t)$  en série de Fourier.

Pour les éléments non-linéaires statiques, la fonction descriptive ne dépend pas de la pulsation  $w$  d'excitation  $e(t)$  alors,

$$J(A) = \frac{B_1(A) + jC_1(A)}{A}$$

Pour les éléments statiques non-linéaires, sans hystérésis, le coefficient  $C_1=0$ . La fonction descriptive de ces éléments est la fonction réelle dépendant de l'amplitude  $A$  et de la forme de la caractéristique statique de l'élément non-linéaire:

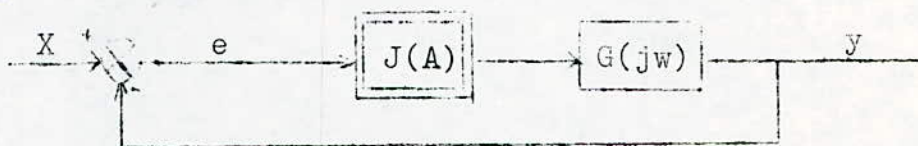
$$J(A) = \frac{B_1(A)}{A} = \frac{1}{\pi A} \int_0^{2\pi} y(A \sin \omega t) \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t$$

Les fonctions descriptives des éléments fréquemment rencontrés sont données en annexe.

#### 4: ANALYSE DYNAMIQUE DES SYSTEMES NON LINEAIRES PAR LA METHODE DE LA FONCTION DESCRIPTIVE.

Méthode des caractéristiques amplitude-phase.

Soit le système non-linéaire:



En appliquant la méthode de la fonction descriptive, on réalise une linéarisation harmonique d'un élément non-linéaire. La fonction descriptive de l'élément non-linéaire est l'équivalent de la transmittance fréquentielle d'un élément linéaire.

Dans le cas le plus général, la fonction descriptive dépend de l'amplitude  $A$  et de la pulsation  $w$  du signal d'entrée. Les équations caractéristiques linéarisées du système de la commande peuvent être présentés sous la forme:

$$G(jw) \cdot J(A, w) + 1 = 0$$

Les oscillations harmoniques sont déterminées par l'équation:

$$G(jw) = - \frac{1}{J(A, w)}$$

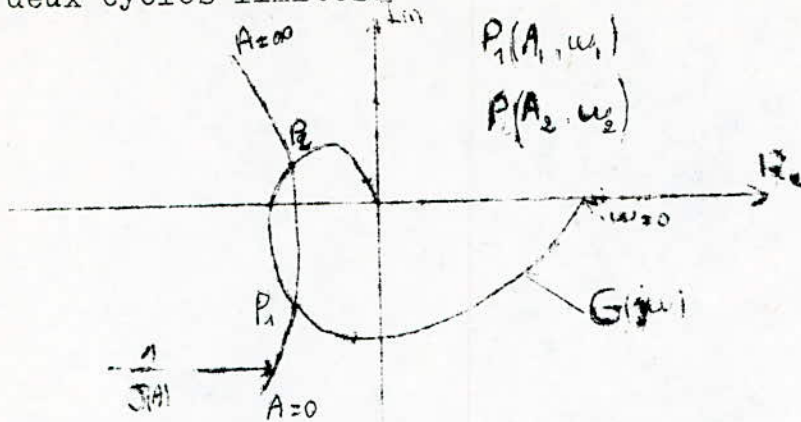
L'amplitude et la pulsation des oscillations harmoniques dans le cycle limite peuvent être facilement déterminés par une méthode graphique.

Pour cela, on trace dans le plan complexe la caractéristique  $G(jw)$  de la partie linéaire du système et la courbe  $J^{-1}(A, w)$ . Les points d'intersections de ces courbes déterminent l'amplitude et la pulsation  $w$  des oscillations harmoniques (le système non-linéaire est dans ce cas instable asymptotiquement)



Si les courbes  $G(j\omega)$  et  $-J^{-1}(A, \omega)$  n'ont pas de points d'intersections pour  $0 \leq \omega \leq \infty$  et  $0 \leq A \leq \infty$  le système est asymptotiquement stable.

Si les courbes  $G(j\omega)$  et  $-J^{-1}(A, \omega)$  ont deux points d'intersections on a deux cycles limites.



Le point  $P_1$  correspond au cycle  $(A_1, \omega_1)$  et le point  $P_2$  au cycle  $(A_2, \omega_2)$ . Un des deux cycles limite est un cycle instable; le cycle limite stable est celui pour lequel les oscillations ont la plus grande amplitude.

Pour les systèmes décrits par la figure précédente, la fermeture de la boucle de retour (contre-réaction) et l'application d'une excitation  $A > A_1$ , augmentent l'amplitude des oscillations qui se stabilisent au point  $P_2$ .

Dans la zone d'amplitude  $A_1 < A < A_2$ , les oscillations sont instables avec une amplitude croissante. L'amplitude de ces oscillations peut augmenter jusqu'à l'amplitude  $A_2$  seulement car pour une amplitude plus grande, le système devient stable et les oscillations diminuent.

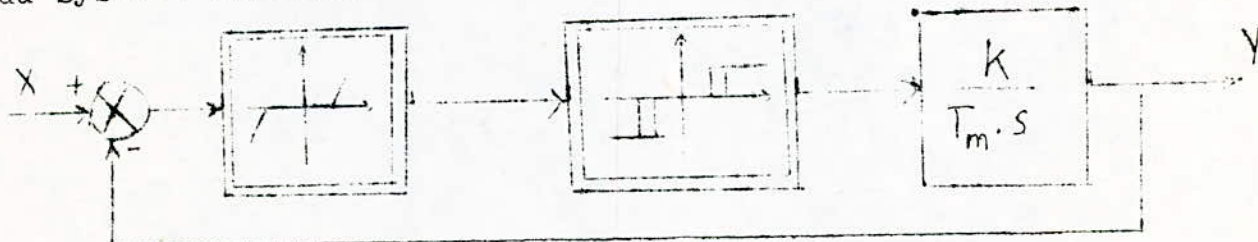
Au dessus du point  $P_2$  la caractéristique de la partie linéaire  $G(j\omega)$  n'encerche pas le point de fonctionnement sur la caractéristique  $-J^{-1}(A)$  et selon Nyquist, le système de régulation est stable c'est à dire que les parcours transitoires du système ont une amplitude décroissante.

Les oscillations peuvent diminuer jusqu'à la valeur  $A_2$  seulement car pour des amplitudes plus petites, le système est entré dans la zone d'instabilité avec l'augmentation de l'amplitude.

En conséquence, pour le système précédent, le cycle limite stable est le cycle au point  $P_2$ .

## 5. ANALYSE DU SYSTEME PAR LA METHODE DE LA FONCTION DESCRIPTIVE.

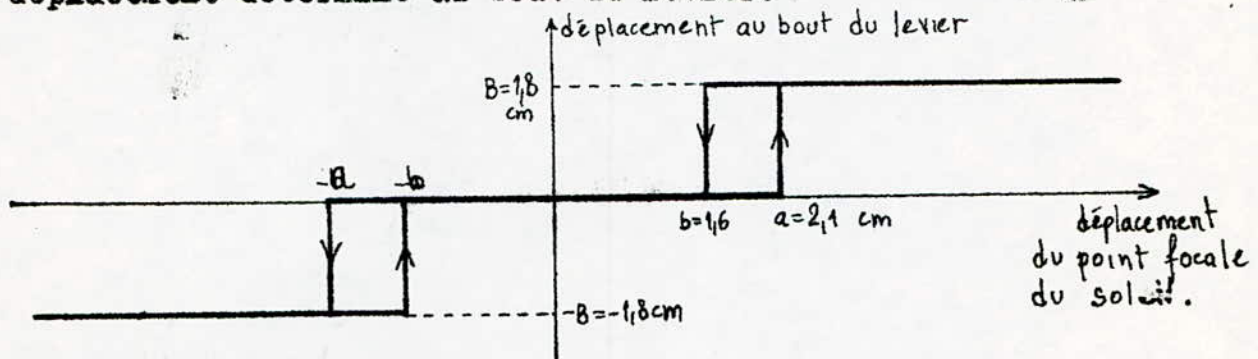
D'après les calculs du paragraphe 1, le schéma bloc du système devient:



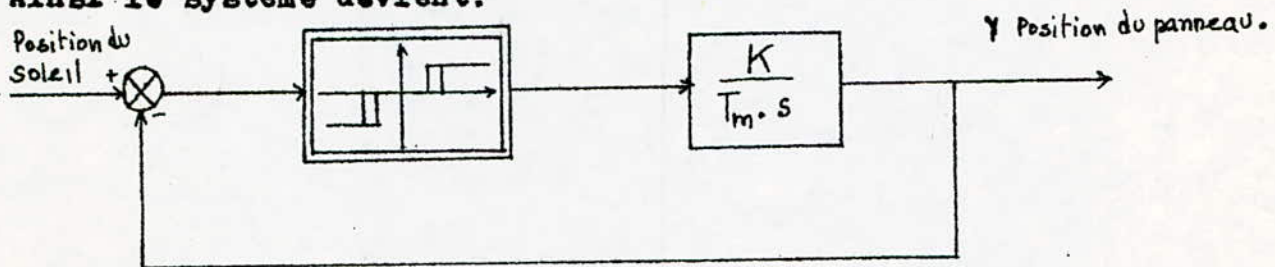


Même avec les simplifications adoptées au au paragraphe 1, le système reste quand même assez compliqué à analyser puisque nous avons deux blocs non-linéaires en cascade. La méthode de la fonction descriptive ne peut pas être appliquée directement car le deuxième bloc non-linéaire est attaqué par un signal qui n'est pas harmonique. Le système peut être examiné par la méthode de modélisation analogique ou numérique. Mais cela implique l'utilisation d'un ordinateur.

Pour l'analyse de notre système, nous supposons que les deux blocs formés par le capteur optique et les blocs électromagnétiques forment un seul bloc non-linéaire assimilable à un relais à trois positions. Pour chaque déplacement du point focale du soleil dans le capteur optique nous obtenons un déplacement déterminé au bout du levier.



Ainsi le système devient:



Appliquons la méthode de la fonction descriptive pour l'analyse de ce système. La fonction descriptive  $J(A)$  du bloc non-linéaire est déduite du tableau de l'annexe. on a

$$J(A) = \begin{cases} 0 & \forall A < a \\ \frac{2B}{a} \sin \varphi (\cos \varphi + \cos \beta - j \sin \delta) & \forall A \gg a \end{cases}$$

avec

$$B = 1,8 \text{ cm}$$

$$a = 2,1 \text{ cm}$$

$$\sin \varphi = \frac{a}{A} = \frac{2,1}{A}$$

$$\sin \gamma = \frac{a-b}{A} = \frac{0,5}{A}$$

$$\sin \beta = \sin \varphi - \sin \gamma$$

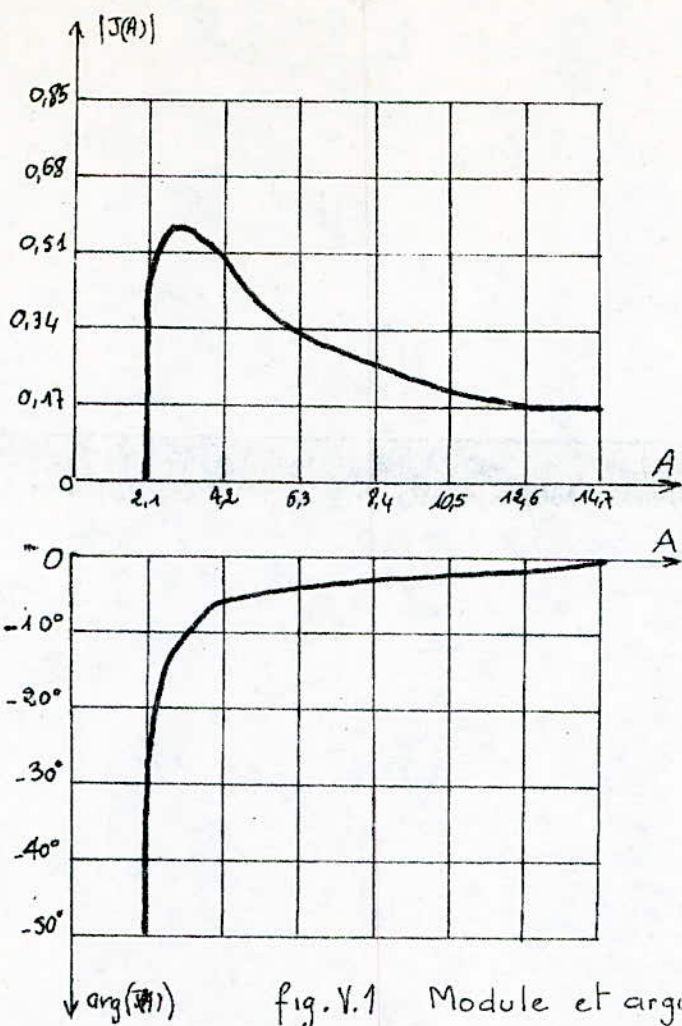


fig.V.1 Module et argument de  $J(A)$ .

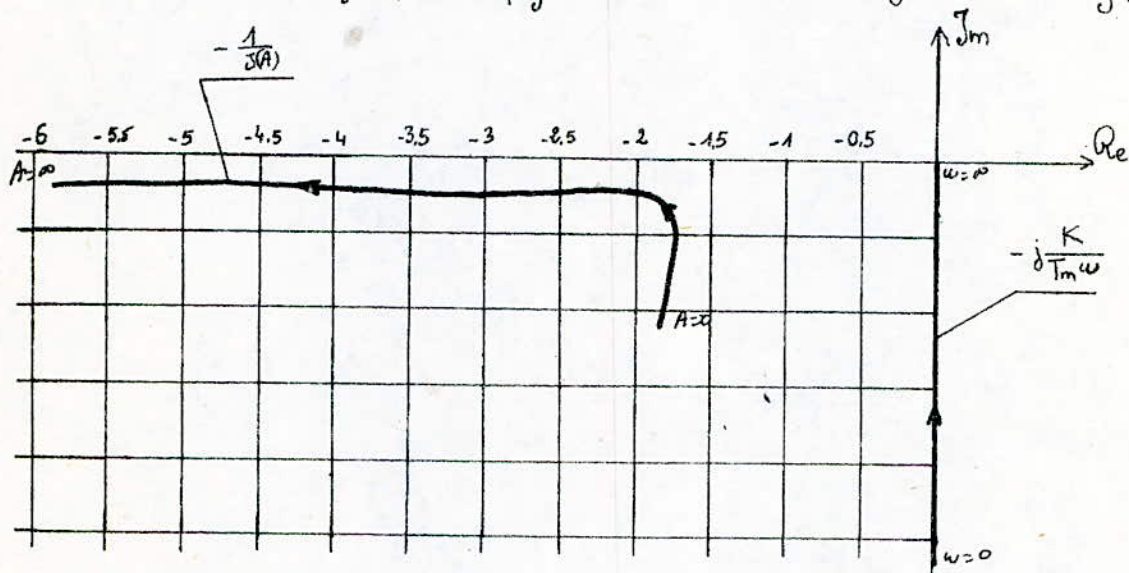


fig.V.2 Courbes  $J(A)$  et  $\frac{K}{T_m j\omega}$  dans le plan complexe.



Les tables de l'annexe nous permettent de tracer le diagramme de la fonction descriptive  $J(A)$ . (fig.V.1)

La présence éventuelle de cycles limites est déterminée par l'équation:

$$J(A) \cdot \frac{K}{T_m \cdot j\omega} - 1 = 0$$

Nous traçons sur le plan complexe les courbes  $-\frac{1}{J(A)}$  et

$$\frac{K}{T_m \cdot j\omega} = -\frac{j}{36 \omega} \quad (K = 100 \text{ et } T_m = 3600) \quad (\text{fig.V.2})$$

Ces courbes n'ont pas de points d'intersections pour  $0 < \omega < \infty$  et  $0 \leq A < \infty$ , le système de régulation est donc stable, d'après la méthode des caractéristiques amplitude-phase.

Il n'y a pas de cycle limite.

Remarque:

Il serait prématuré de dire que l'analyse du système est complète, néanmoins l'étude théorique proposée permet l'analyse dynamique des systèmes non-linéaires, lorsque ceux-ci peuvent être assimilés à des éléments non-linéaires dont la fonction descriptive est relativement simple.

## CONCLUSION

Nous avons étudié et réalisé un dispositif de commande automatique d'un panneau solaire qui fonctionne à l'énergie hydraulique. Dans ce cadre d'étude, les données météorologiques et le choix du site sont d'une grande importance. Nous nous sommes conformés dans notre travail aux chiffres fournis par la station d'énergie solaire de Bouzaréah; chiffres qui ont été établis pour une période de 12ans. Nous avons de même fait des calculs pour déterminer l'irradiation pour la ville de Tamarrasset et la localité de Bouzaréah.

Nous avons montré, après étude, la nécessité de l'asservissement du fait de l'importance de la différence d'énergie recueillie par un capteur à commande automatique par rapport à un panneau fixe.

Un aperçu général a été donné dans ce travail sur divers systèmes de commande qui ont été réalisés dans le monde. Nous avons tenté d'en délimiter les avantages et les inconvénients.

La réalisation du dispositif de commande nous a exigé d'assez amples connaissances dans différents domaines tels que l'hydraulique, la mécanique et l'électronique.

Les éléments que nous avons utilisés dans notre dispositif, bien que fonctionnels, ont été conçus pour d'autres fins et leurs caractéristiques ne peuvent en ce cas correspondre à ce que nous aurions désiré. Néanmoins, on pourrait prévoir la construction d'éléments analogues ayant les caractéristiques voulues.

Une étude plus rigoureuse sur le bâti et les éléments électroniques assurant la commande devrait donner la possibilité d'une exploitation à l'échelle industrielle par l'adjonction d'un embrayage bloquant le mouvement de la roue lorsque le système est en équilibre. Un détecteur de vitesse du vent (anémomètre) lié à un système électronique permettrait au panneau de se mettre en position de sécurité (horizontal) dès que le vent dépasse une vitesse admissible.

Le caractère autonome du dispositif permettrait d'alimenter en électricité des villages isolés situés dans des régions éloignées où l'apport d'énergie par lignes électrifiées est onéreux.

La détermination de la caractéristique statique de chaque bloc non-linéaire ensuite le tracé graphique de la caractéristique résultante du système nous aurait permis d'en faire l'analyse complète. Néanmoins par manque de moyens et de temps nous n'avons pu réaliser ce travail. Nous nous sommes donc résolus à une simplification du schéma du système à un seul bloc non-linéaire en série avec un élément linéaire.

Le bloc non-linéaire regrouperait alors dans ce cas tous les éléments non-linéaires.



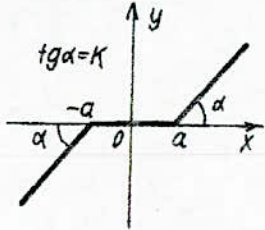
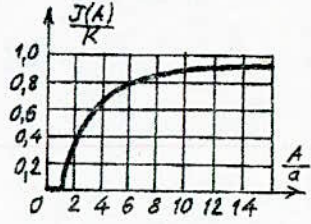
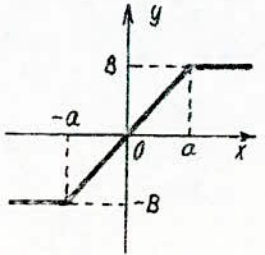
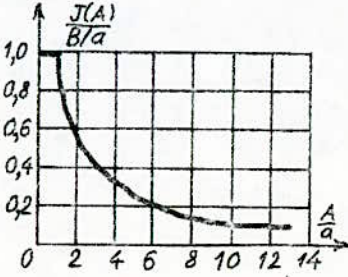
Pour terminer, nous insistons sur le fait que notre système ne représente qu'un dispositif expérimental susceptible de nombreuses améliorations.

(1). Par emploi d'un ordinateur pour la modélisation mathématique complète du système.

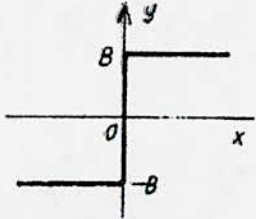
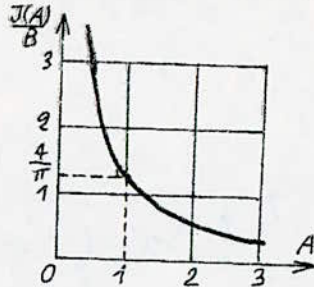
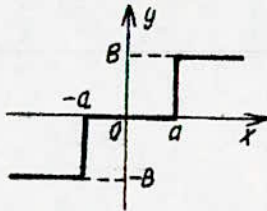
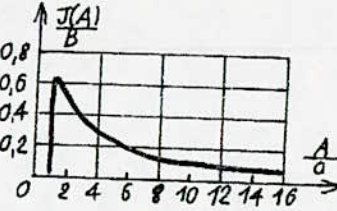
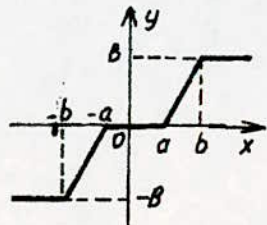
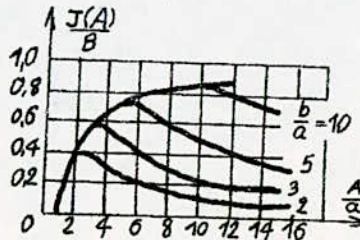
# FONCTION DESCRIPTIVE DES ELEMENTS NON LINEAIRES /12/.

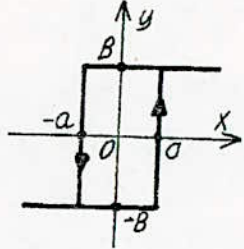
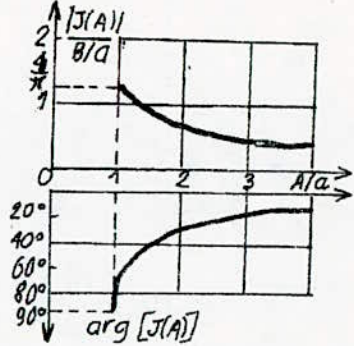
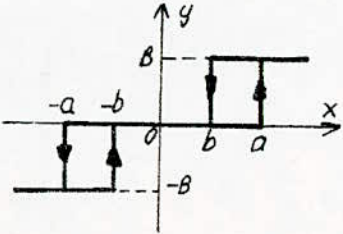
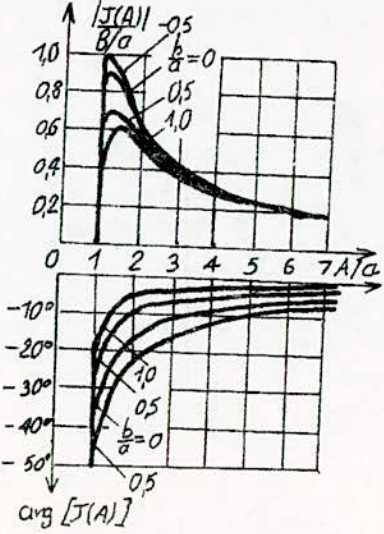
$$x = A \cdot \sin \omega t, \quad \sin \varphi = a/A.$$

-58-

	Eléments	caracteristique ou schéma des éléments	Formules de $J(A, \omega)$ où : $\sin \varphi = a/A$ ; $\sin \alpha = b/A$	Diagramme $J(A, \omega)$
1	Amplificateur avec zone morte.		$J(A) = \begin{cases} 0 & \forall A \leq a \\ \frac{K}{\pi} (\pi - 2\varphi - \sin 2\varphi), & \forall A > a \end{cases}$	
2	Amplificateur avec saturation.		$J(A) = \begin{cases} \frac{B}{a} & \forall A \leq a \\ \frac{2B}{\pi \alpha} (\varphi + \sin \varphi \cos \varphi), & \forall A \geq a \end{cases}$	



3	Relais a deux positions		$J(A) = \frac{4B}{\pi A}$	
4	Relais a trois positions		$J(A) = \begin{cases} 0 & \forall A < a \\ \frac{2B}{\pi a} \sin 2\varphi & \forall A \geq a \end{cases}$	
5	Amplificateur avec zone morte et saturation		$J(A) = \begin{cases} 0 & \forall A \leq a \\ \frac{2H}{\pi} \left( a - \varphi + \frac{\sin 2a}{2} \right) & \forall A > a \end{cases}$	

6	<p>Relais à deux positions avec hystérésis</p>		$J(A) = \begin{cases} 0 & \forall A < a \\ \frac{2B}{\pi \cdot a} (\sin 2\varphi - j 2 \sin^2 \varphi) & \forall A \geq a \end{cases}$	
7	<p>Relais à trois positions avec hystérésis</p>		$J(A) = \begin{cases} 0 & \forall A < a \\ \frac{2B}{\pi \cdot a} \sin \varphi (\cos \varphi + j \cos \beta - j \sin \gamma) & \forall A \geq a \end{cases}$ <p>ou : <math>\sin \gamma = \frac{a-b}{A}</math>  <math>\sin \beta = \sin \varphi - \sin \gamma</math></p>	



## BIBLIOGRAPHIE

- /1/. SOLAR ENERGY IN UK ASSESSMENT. International solar energy  
Published by UK-ISES. May 1976
- /2/. Patrick BARDOU, Archi de soleil, Varujan Arzoumanian  
Editions Parenthèses 1978
- /3/. J.R.VAILLANT, Utilisation et promesses de l'énergie  
solaire. Editions Eyrolles Paris 1978
- /4/. J.L.PERRIER, Energie solaire. Editions techniques et  
scientifiques Française 1979
- /5/. Principles of solar engineering. Mac-Graw Hill company 1978
- /6/. BUDYKO M.I (1958) . The heat balance of earth's surface.  
English trans. by N.Stepanova, US Departement of commerce  
Weather bureau, Washington D.C page 259.
- /7 / . F. DESVIGNES. Le rayonnement solaire ACTA Electronica 18.4.1975
- /8/. Fridal Justan-Coumat . Bouzaréah juin 1961
- /9/. International solar forum 12-14 july 1978 . Congress  
centrum Hamburg.
- /10/. COMPLES. Revue international d'héliotechnique, 2<sup>o</sup> semestre 1982.  
Article de Bruno IMBERT page 40
- /11/. Y.TAKAHASHI, M.J.RABINS, D.M.AUSLANDER. Control and dynamic  
systems. Addison-Wesley publishing company 1972
- /12/. KRZYSZTOF AMBORSKI, ANDRZEJ MARUSAK. Teoria sterowania w  
ćwiczeniach. Panstwowe Wydawnictwo Naukowe. Warszawa 1978

