

Fig. 2

Ce signal, amplifié, attaque l'électronique de commande du moteur de façon à faire tourner celui-ci dans un sens si le signal est positif et dans l'autre si le signal est négatif : le moteur agit sur l'orientation du capteur (lié aux panneaux solaires) pour ramener celui-ci face au point L.

## 2. SCHEMA THEORIQUE DE LA CHAINE ELECTRONIQUE

### 2.1. Le capteur

L'élément photosensible retenu est une photorésistance ou L.D.R., dont le comportement est plus facile à assimiler que celui d'un phototransistor par exemple. Avec une LDR 05 la résistance est de l'ordre du mégaohm ( $M\Omega$ ) dans l'obscurité et de quelques dizaines d'ohms en plein soleil ; cette dernière valeur est très variable d'un élément à l'autre.

Une LDR est montée en série avec une résistance R entre les pôles extrêmes d'une alimentation symétrique (Fig. 3).

Si r est la résistance de la LDR, en posant  $V_{cc}^+ = V_0$  et  $V_{cc}^- = -V_0$  on voit que :

$$v = U_{BM} = V_0 \frac{r - R}{r + R}$$

si l'éclairement de la LDR augmente r diminue et inversement. On peut faire faire le calcul suivant aux élèves de seconde : supposons que par diminution de l'éclairement r devienne :

$$r' = r + \Delta r \quad \text{alors } v \text{ devient}$$

$$v' = V_0 \frac{r + \Delta r - R}{r + \Delta r + R}$$

On calcule alors la variation de v correspondante

$$\Delta v = v' - v = V_0 \frac{2 R \Delta r}{(R + r)(R + r + \Delta r)}$$

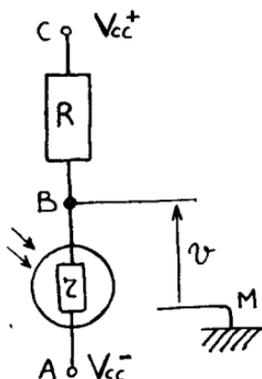


Fig. 3

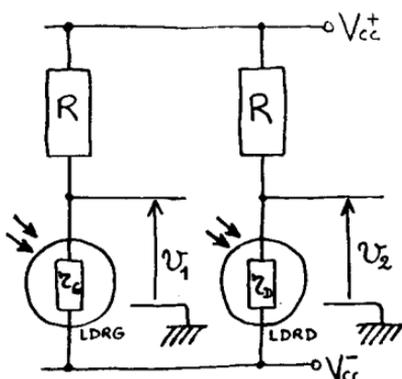


Fig. 4

Pour une petite augmentation  $\Delta r$  de  $r$  on peut négliger  $\Delta r$  devant  $R + r$  d'où

$$\Delta v = \frac{2 V_0 R}{(R + r)^2} \Delta r$$

$$\text{(Par dérivation on aurait obtenu } dv = \frac{2 V_0 R}{(R + r)^2} dr \text{)}$$

Disposons deux systèmes identiques au précédent de façon que chaque LDR ne reçoive la lumière que d'une moitié de l'espace à contrôler (Fig. 4) ; si L (point le plus lumineux de l'espace) est dans l'axe du système, idéalement, on a  $v_1 = v_2$  et  $v_2 - v_1 = 0$  ; si L est du côté de LDRG,  $r_G$  devient inférieur à  $r_D$  et  $v_1$  devient inférieur à  $v_2$ ,  $v_2 - v_1 > 0$  ; de même si L est du côté de LDRD on a  $v_2 - v_1 < 0$ .

Nous obtenons donc un signal,  $v_2 - v_1$ , nul quand le capteur est dirigé vers L, positif quand LDRG est plus éclairée que LDRD et négatif dans le cas contraire.

## 2.2. L'amplificateur

Pour que le système soit sensible il faut amplifier  $v_2 - v_1$ . Un ampli op. monté en soustracteur, ou amplificateur de différence, va remplir ce rôle (Fig. 5). On aura  $v_s = \frac{R_2}{R_1} (v_2 - v_1)$ . Nous adopterons  $R_2/R_1 = 100$  (par exemple  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$  et  $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ ).

Cependant les formules donnant  $v_1$  et  $v_2$  ne sont plus valables car le montage de l'ampli op introduit des dériviatives (Fig. 6) avec  $R' = R_1 + R_2$  et  $i^+ \approx 0$ ,  $i^- \approx 0$ . La tension de sortie de  $v'_s = R_2/R_1 (v'_2 - v'_1)$  influe sur la valeur de  $v'_2 - v'_1$ .

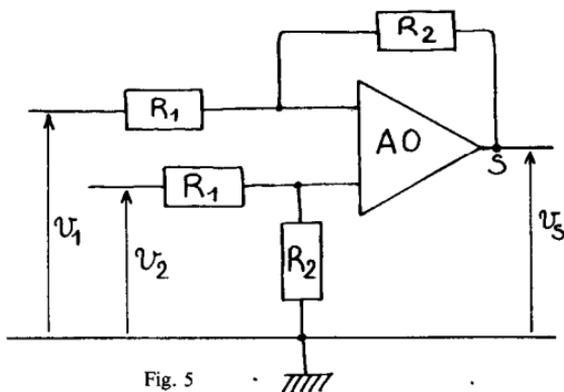


Fig. 5

Le calcul de  $v_2 - v_1$  est possible mais plutôt fastidieux et certainement rébarbatif pour des élèves de seconde. On pourra se contenter de dire que globalement le système se comporte comme prévu ou bien augmenter l'impédance d'entrée de l'amplificateur en prenant par exemple  $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$  et  $R_2 = 10 \text{ M}\Omega$  de façon à pouvoir négliger les courants  $i''_1$  et  $i''_2$  (voir Fig. 6).

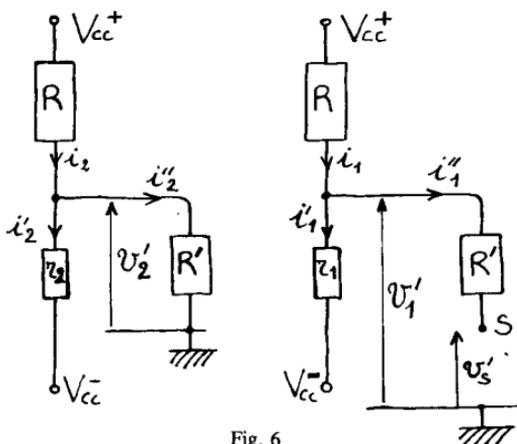


Fig. 6

Néanmoins, la conséquence la plus gênante, ajoutée au fait que deux LDR ne sont jamais tout à fait identiques, est que pour un éclairage égal des deux LDR nous n'avons pas  $v_s = 0$ . Pour remédier à cela nous ajusterons les valeurs des résistances  $R$  d'une manière simple : ces résistances seront constituées par les deux moitiés d'un potentiomètre.

### 2.3. Commande du moteur

La puissance disponible à la sortie d'un ampli op tel que le classique

741 n'est généralement pas suffisante pour actionner un moteur. Et puis une commande proportionnelle n'est pas vraiment intéressante ici, il y a même un risque que le système ne puisse pas se stabiliser et effectue des oscillations autour de la position d'équilibre.

D'autre part si l'on veut seulement suivre la *position* du soleil on peut se contenter d'un moteur tournant à vitesse constante et entraînant l'axe du système par l'intermédiaire d'un réducteur.

Nous voulons que notre système corrige sa position pour un certain écart (par exemple  $1^\circ$ ) par rapport à la position idéale. Mais plus l'appareil est sensible plus nous risquons d'obtenir des oscillations : cela dépend de l'inertie du système mécanique et de sa vitesse de déplacement (notion d'énergie cinétique étudiée en 1<sup>ère</sup>). On pourra faire une certaine analogie avec une balançoire que l'on veut arrêter pour une bonne compréhension du problème posé. Il nous faut donc une vitesse de déplacement assez faible et surtout un freinage efficace autour de la position d'équilibre.

On peut montrer aux élèves qu'un moteur électrique ayant acquis une certaine vitesse de rotation ne s'arrête pas immédiatement lorsqu'on coupe le courant (notion d'énergie emmagasinée). Par contre si l'on court-circuite les bornes d'un moteur à aimant permanent immédiatement après avoir coupé le courant, le moteur s'arrête brusquement (freinage électromagnétique lié aux phénomènes d'induction étudiés en Terminale) - voir Fig. 7 - d'où le montage adopté (Fig. 8) : le moteur est alimenté par deux relais RT (1 contact repos, 1 contact travail) montés en va-et-vient.

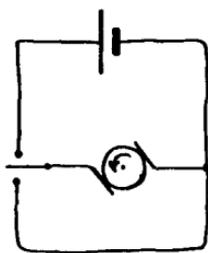


Fig. 7

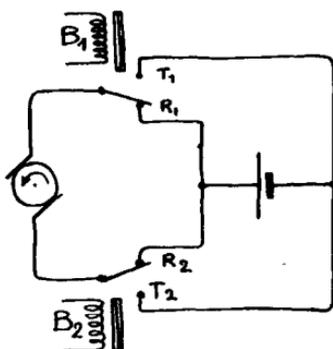


Fig. 8

Il faut que la tension de sortie de l'ampli op actionne un relais ou l'autre (ou exclusif). Deux diodes placées en sens contraire à la sortie permettent d'obtenir le résultat cherché (Fig. 9).

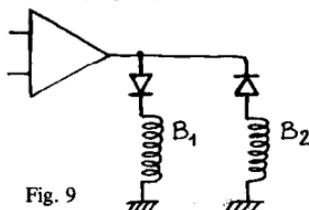


Fig. 9

Il existe des relais en boîtier plastique (DIL 14) 12 V 500  $\Omega$  coupant 250 mA qui peuvent être montés directement à la sortie de l'ampli op comme sur la Fig. 9, mais ils sont assez difficiles à trouver dans le commerce et plutôt chers ! Nous avons utilisé des relais un peu plus courants alimentés chacun par l'intermédiaire d'un transistor dont l'ampli op attaque la base. A partir du moment où l'on utilise un transistor n'importe quel relais 12 V 1 RT convient pourvu qu'il ait un pouvoir de coupure suffisant ; ceux qui ont été adoptés, outre leur petite taille, présentent l'avantage d'être enfichables sur un support 14 broches (attention, ils n'en recouvrent que douze) et donc facilement réutilisables.

Le montage est théoriquement destiné à fonctionner pendant des heures : il doit donc consommer peu et ne pas être trop sensible aux variations de température. Calculons les éléments du circuit en tenant compte de ces remarques.

Les transistors choisis sont des transistors complémentaires BC 327 (PNP) et BC 337 (NPN), dont le gain en courant est assez élevé ( $\beta = 350$  à  $I_C = 100$  mA) avec  $I_{C_{max}} = 1$  A. En se reportant à la Fig. 10 on voit que compte tenu des chutes de tension  $V_{CE}$  et  $V_{R_5}$ ,  $I_C$  sera inférieur à  $\frac{V_O}{R_B}$ ,  $R_B$  étant la résistance de la bobine du relais : avec  $R_B \approx 300 \Omega$  et  $V_O = 15$  V on aura  $I_C < 50$  mA.

Lorsque la température augmente le gain en courant d'un transistor a d'abord tendance à augmenter d'où  $I_C$  plus grand pour un même  $I_B$  (ou  $I_B$  plus petit pour un même  $I_C$ ) entraînant une modification du fonctionnement du circuit (il peut devenir trop sensible d'où oscillations). D'autre part un court-circuit dans la bobine du relais ou dans la diode de protection entraînerait rapidement la destruction du transistor si  $I_B$  est assez grand. La résistance  $R_5$  ou résistance d'émetteur régularise le fonctionnement et protège le transistor : en effet pour  $V_P$  et  $I_B$  donnés.

$$V_{BE} = V_P - R_4 I_B - R_5 I_C = Cste - R_5 I_C$$

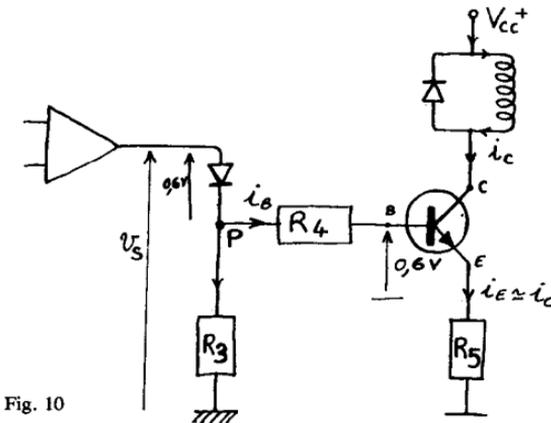


Fig. 10

On voit que si  $I_C$  augmente  $V_{BE}$  diminue d'où la régularisation souhaitée.  $V_{BE}$  étant d'environ 0,6 V quand le transistor conduit on peut adopter arbitrairement une variation  $\Delta V_{R5} = 0,1$  V lorsqu'on a une variation  $\Delta I_C = 20$  mA d'où  $R_5 = \frac{\Delta V_{R5}}{\Delta I_C} = 5 \Omega$  : on adoptera la valeur normalisée  $R_5 = 4,7 \Omega$  (une valeur plus élevée pourrait aussi bien convenir à priori mais plus  $R_5$  est grand plus la tension de sortie de l'AO qui déclenche le fonctionnement du relais doit être grande : en augmentant  $R_5$  on augmente la sécurité mais on diminue la sensibilité).

Lorsque le relais fonctionne le courant de base est au moins égal à  $\frac{I_C}{\beta}$  soit environ 0,14 mA ( $\frac{50 \text{ mA}}{350}$ ).

Pour des raisons de sécurité nous allons limiter ce courant de base en mettant une résistance  $R_4$  en série avec la base. Si l'on veut que  $I_C$  ne dépasse pas 200 mA par exemple il faudra que  $I_B$  reste inférieur à  $\frac{200}{350}$  soit environ 0,6 mA.

A saturation de l'ampli op la tension  $V_P$  ne dépasse pas 14 V compte tenu de la chute de tension dans la diode et du fait que  $V_{S\text{max}} < 15$  V. Nous avons

$$R_4 I_{B\text{MAX}} = V_{P\text{MAX}} - V_{BE} - R_5 I_C = 14 - 0,6 - 4,7 \times 50 \cdot 10^{-3} \approx 13 \text{ V}$$

$$\text{d'où } R_4 = \frac{13}{6 \cdot 10^{-4}} = 2,17 \cdot 10^4 \Omega$$

Nous adopterons la valeur normalisée  $R_4 = 22 \text{ k}\Omega$ .

Il ne reste plus qu'à limiter l'intensité débitée par l'AO par  $R_3$ . La

valeur de cette résistance n'est pas du tout critique et nous avons adopté la valeur normalisée 1,2 k $\Omega$  pour que l'intensité débitée par l'AO reste inférieure à 25 mA mais une valeur supérieure pourrait aussi bien convenir.

Il faut montrer aux élèves que lorsqu'on interrompt le courant passant dans une bobine (alimentée en basse tension), il apparaît une étincelle assez importante entre les bornes de l'interrupteur (le phénomène sera expliqué en Terminale). Il est assez raisonnable de lier la longueur de l'étincelle à la tension qui est apparue et d'admettre que cette tension peut être bien supérieure à celle qui alimentait la bobine. Au moment où le transistor passe de l'état conducteur à l'état bloqué il va apparaître aux bornes de la bobine du relais une tension qui peut être très supérieure à ce que peut supporter le transistor entre collecteur et émetteur (ici  $V_{CEMAX} = 45$  V) et amener la destruction de celui-ci. Cette tension de rupture étant toujours en sens inverse de la tension aux bornes de la bobine quand le courant y passe, une diode montée en inverse aux bornes de la bobine du relais permet de la court-circuiter sans empêcher le fonctionnement normal du relais (diode dite de roue libre).

Une autre conséquence de ce même phénomène est la détérioration des contacts de l'interrupteur (penser à la soudure à l'arc). Or le moteur comporte lui aussi des bobinages et il peut apparaître une étincelle entre les contacts du relais pendant le petit intervalle de temps où l'on passe du contact travail au contact repos (après le moteur est court-circuité). Pas question de mettre une diode puisque le moteur doit pouvoir être parcouru par des courants allant aussi bien dans un sens que dans l'autre. Un petit condensateur placé aux bornes du moteur, en stockant provisoirement l'énergie électrique, va empêcher l'apparition de l'étincelle pendant le laps de temps considéré. D'où le schéma définitif du montage (Fig. 11). Il est évident que d'autres circuits peuvent être imaginés.

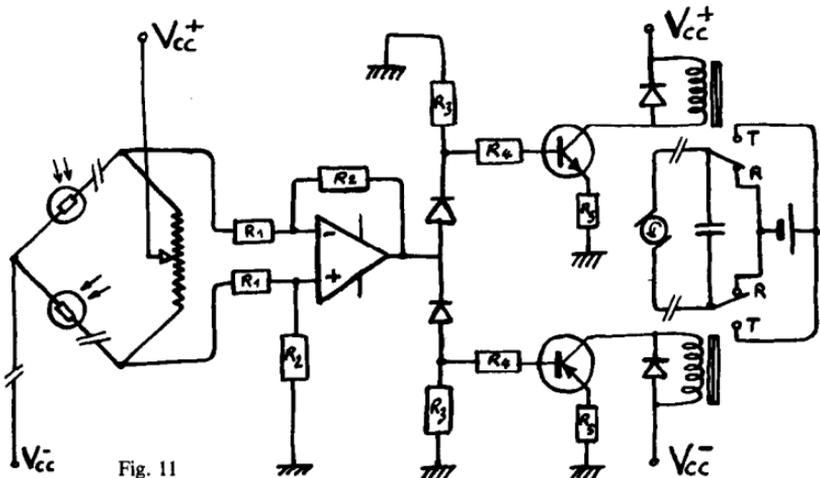


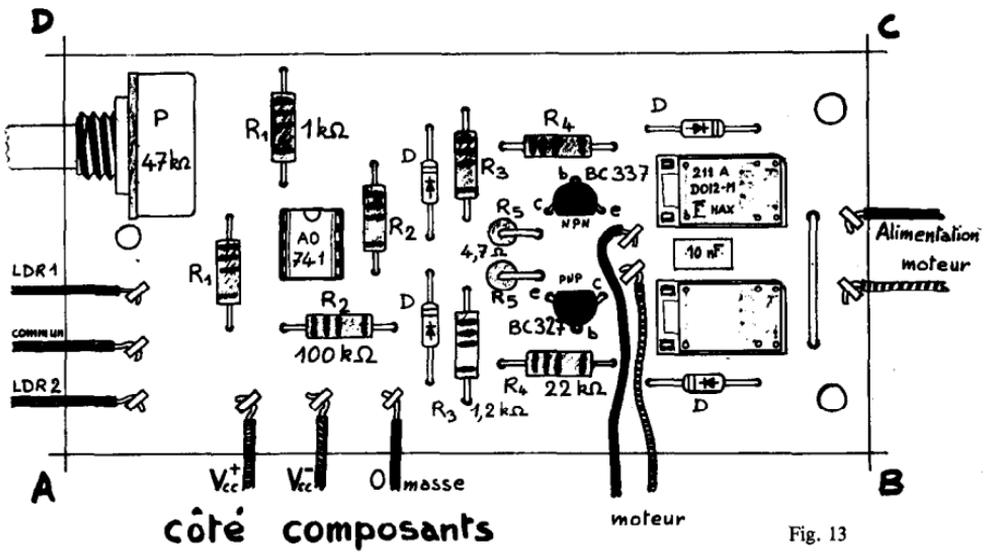
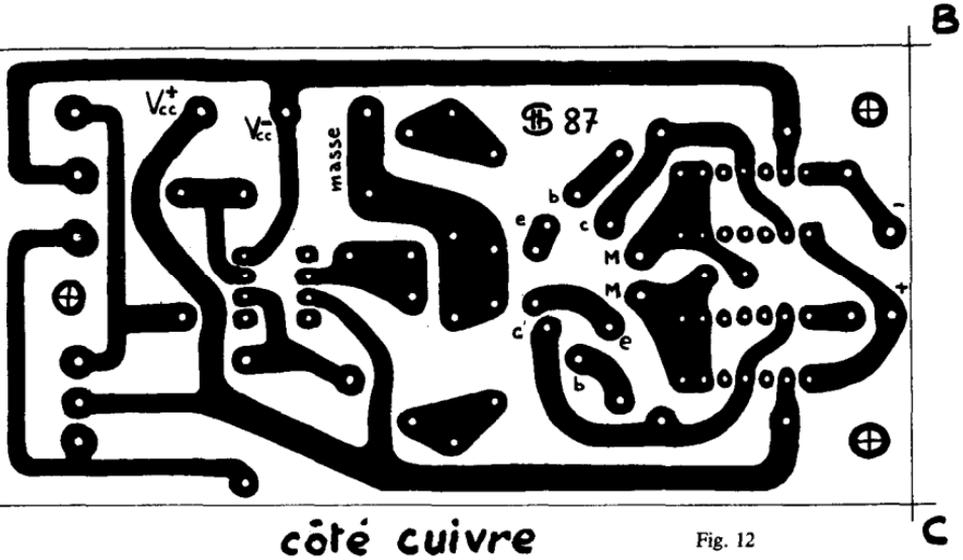
Fig. 11

3. REALISATION PRATIQUE

3.1. Partie électronique

Plusieurs solutions sont possibles :

— réalisation définitive sur circuit imprimé (un circuit est proposé Fig. 12 et 13) ;



- réalisation de la commande moteur sur circuit imprimé (Fig. 14), l'ampli-op étant monté sur une platine d'étude.
- réalisation complète en provisoire sur une platine d'étude.

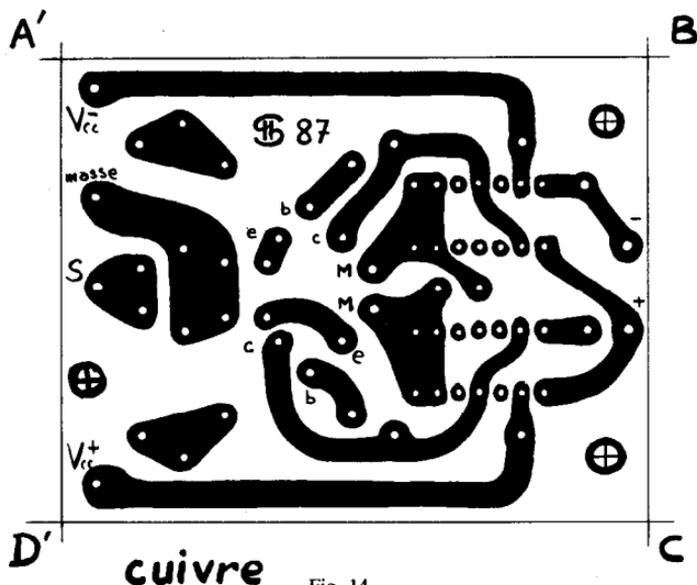


Fig. 14

### 3.2. Le capteur

Un tube de PVC (15-18) de 80 mm de long est entaillé à 45° à 15 mm des extrémités de façon à conserver une bande centrale de 7 mm de large environ (Fig. 15). Un trou de diamètre 3 mm est percé au centre de cette bande. La partie centrale est chauffée et pliée sur une cale de 5 mm d'épaisseur de façon que les axes des deux parties tubulaires (logements des LDR) soient parallèles. Les LDR 05 en boîtier plastique transparent ont un diamètre de 14 mm ; on les entoure d'un morceau de tube de caoutchouc souple (feuille anglaise) pour les coincer dans les deux tubes (Fig. 16 et 17). Une cloison en contreplaqué de 5 mm est taillée en forme de trapèze isocèle de bases 80 mm et 48 mm et de hauteur 20 mm ; la grande base est échancrée au milieu à la demande. On découpe un disque de « plexiglas » fumé de 80 mm de diamètre et un masque rectangulaire (12 mm × 80 mm) en papier cansou noir. Les tubes, la cloison, le masque et le disque sont liés par une vis à aggloméré de  $\varnothing$  3 mm et de longueur 20 mm (Fig. 16, 17 et 18). Deux flasques en acier ou en duralumin, de 12 mm × 50 mm, percés au centre d'un trou de 5 mm de diamètre et courbés aux extrémités, permettent de fixer l'ensemble sur l'axe du système. On pourra ajouter une cale à l'avant du flasque inférieur et une cale identique à l'arrière du flasque supérieur pour incliner l'axe du capteur vers le haut.

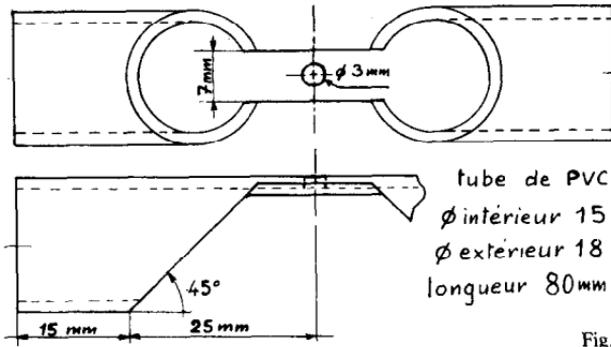


Fig. 15

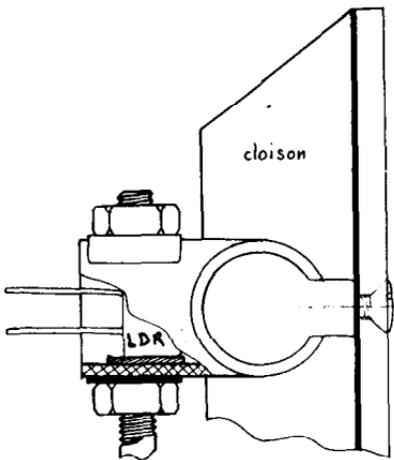


Fig. 16

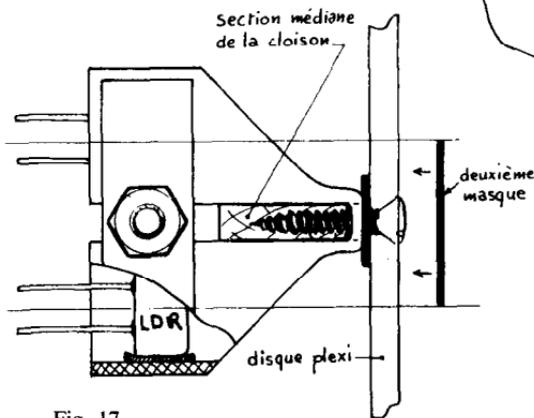


Fig. 17

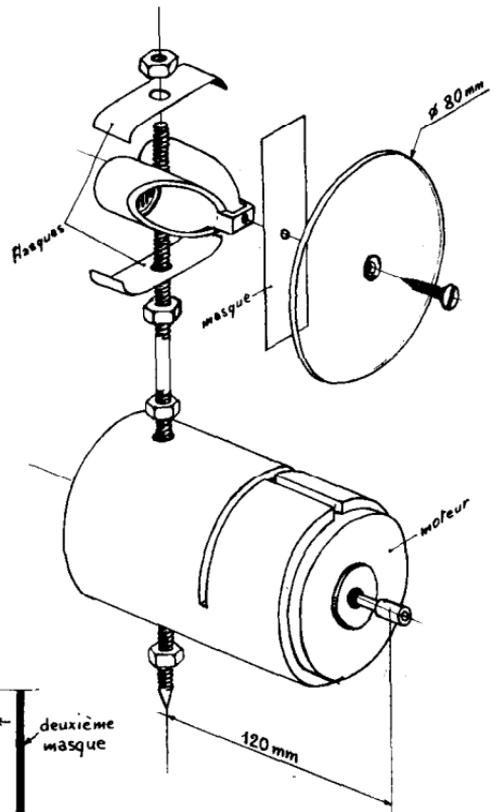


Fig. 18

Le disque en «plexiglas» fumé limite la lumière reçue par les LDR de façon à travailler dans une zone favorable de leur caractéristique résistance-éclairage. Pour suivre le soleil un deuxième masque est ajouté : il a pour largeur la distance entre les axes des deux LDR (23 mm en principe), ce qui permet de conserver une résistance convenable pour les LDR et améliorer la sensibilité angulaire.

L'ensemble, monté sur l'axe, sera enveloppé dans un cône de feutrine noire qui s'appuie sur le disque, la cloison et l'arrière des tubes, ceci pour éviter d'être gêné par des reflets latéraux.

### 3.3. L'axe du système

C'est une tige de 5 mm de diamètre, de 20 cm de long environ, filetée sur 35 mm en haut et 70 mm en bas. L'extrémité inférieure est taillée en cône pour faire pivot. Une petite plaque d'acier (25 mm × 20 mm × 3 mm) comportant un creux conique et fixée au support par deux vis recevra le pivot (crapaudine).

On peut utiliser une tige entièrement filetée mais on aura des frottements irréguliers au niveau du guidage de l'axe.

### 3.4. Le support

Une plaque de bois aggloméré (30 cm × 30 cm × 2 cm) sert de base pour l'ensemble du système. On y fixera deux flancs verticaux de 10 cm de haut environ, à 10 cm l'un de l'autre et qui soutiendront une plaque horizontale de dimensions appropriées, percée d'un trou de 5 mm de diamètre pour le passage de l'axe (Fig. 19). Sur cette même base seront fixés la crapaudine, le rail et le tunnel (voir plus loin).

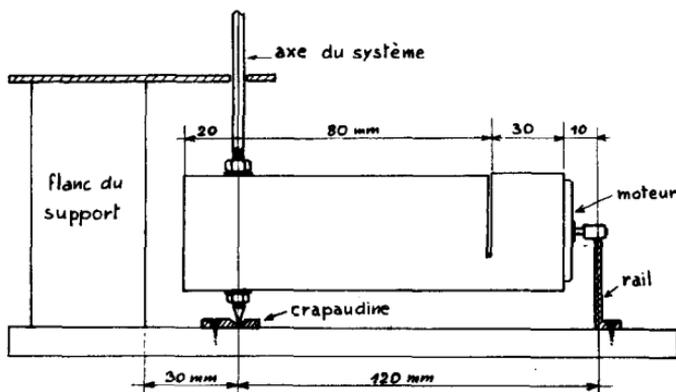


Fig. 19

### 3.5. Le moteur

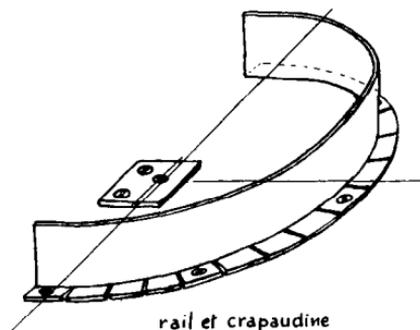
C'est un moteur de magnétophone 12 V. Il faut exclure les moteurs de jouets qui ont un comportement trop irrégulier. Le moteur sera alimenté en 4,5 V : sa vitesse de rotation est alors assez lente et le couple moteur suffisant pour l'effort demandé. La démultiplication est obtenue en faisant rouler l'arbre du moteur sur un rail semi-circulaire (rapport  $\approx \frac{1}{80}$ ).

Le moteur utilisé (SOHO MOTOR TCR-12) a un diamètre de 36 mm (longueur 25 mm) et un axe de  $\varnothing$  2 mm et de 7 mm de long. Un petit morceau de gaine de fil électrique 16/10 enfilé en force sur l'axe sert de galet de friction.

Un tube de PVC rigide de  $\varnothing$  extérieur 40 mm et de  $\varnothing$  intérieur 33 mm, de 13 cm de long est percé suivant un diamètre à 20 mm d'une extrémité pour passage de l'axe. La fixation sur l'axe est faite par deux écrous et rondelles éventail. A trois centimètres de l'autre extrémité on scie le tube sur deux tiers de la circonférence perpendiculairement à l'axe et on fend le grand arc libéré au milieu, parallèlement à l'axe de façon à former une pince. Le moteur est coincé dans cette pince et déborde de 4 ou 5 mm (Fig. 18 et 19).

### 3.6. Le rail

Il est réalisé à partir d'une longueur de 40 cm de « nez de marche » en aluminium (section en L de 30 mm de haut et 8 mm de large). La base du L est sciée tous les 15 mm et le rail est cintré sur un gros tube (bidon ou autre) de façon à former un demi-cercle de 120 mm de rayon. Un morceau de chambre à air de vélo est enfilé sur ce rail pour avoir un bon coefficient de frottement. Le rail est fixé par six vis sur la base du support, le creux de la crapaudine étant au centre de la circonférence (Fig. 20).



Il reste à régler un dernier problème, celui de la limitation de la course de l'appareil. Plutôt que d'utiliser des contacts de fin de course aux deux extrémités du rail, ce qui complique le montage, nous avons préféré utiliser la propriété même du système : le capteur est disposé à l'entrée d'un tunnel

en papier canson noir de façon qu'en bout de course, d'un côté ou de l'autre, une des LDR soit à l'intérieur du tunnel face à une paroi noire, l'autre LDR recevant encore la lumière de l'extérieur. Le système s'arrête donc automatiquement avant cette position extrême et sera susceptible de repartir dans l'autre sens sans intervention.

On peut réaliser un appareil opérationnel sur 360°. Pour cela il faut réaliser un rail circulaire (c'est un peu plus délicat !) et surtout prévoir cinq contacts par balais sur l'axe (3 pour les LDR et 2 pour le moteur).

La plupart des instructions de fabrication ne sont que des suggestions. Sur le prototype le support a été réalisé en «Meccano» et le capteur déguisé en... tournesol !

#### 4. PERFORMANCES

Elles sont tout à fait acceptables compte tenu de la modicité des moyens mis en œuvre.

A l'extérieur, par ciel sans nuage, le système corrige sa position toutes les trois minutes environ (il y a de petites fluctuations) le moteur tournant d'environ un quart de tour à chaque fois. En branchant un voltmètre entre la sortie de l'AO et la masse on peut suivre la rotation apparente du soleil en continu : avec le prototype la tension  $v_S$  passe en trois minutes d'environ + 1,5 V à environ - 3,0 V (les signes dépendent des branchements des LDR) avec une variation comprise entre 20 et 30 mV par seconde. La correction dure une fraction de seconde et la tension  $v_S$  repasse à + 1,5 V etc...

Par beau temps le système a suivi le soleil de 9 h du matin à 18 h sans défaillance.

Attention cependant à l'environnement : des reflets sur des vitres ou des murs clairs peuvent provoquer des changements de positions imprévus !

Par temps nuageux avec éclaircies le comportement est un peu plus erratique ; le point le plus lumineux du ciel n'est pas forcément dans la direction du soleil caché mais le montage remplit bien le rôle prévu contrairement à un système à mouvement d'horlogerie continu.

A l'intérieur le capteur s'oriente vers les fenêtres ou vers les lampes. Mais si l'on voile les fenêtres ou si l'on tourne le capteur vers le mur opposé aux fenêtres le système suit très bien la flamme d'un briquet placé à 30 cm du capteur ou le mouvement d'une lampe de 40 watts placées à 4 ou 5 m du capteur ou encore va s'orienter vers la blouse blanche la plus proche (sinon la plus propre !).