

## Dispositif d'Orientation de Panneaux Solaires

A. Chermitti<sup>(1)</sup> et B. Benyoucef<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Université Aboubekr Belkaid, faculté des sciences de l'ingénieur, BP 119, 13000 Tlemcen

<sup>(2)</sup> Université Aboubekr Belkaid, faculté des sciences, BP 119, 13000 Tlemcen Algérie

**Résumé** – Un dispositif de guidage automatique des panneaux solaires dans la direction de provenance du flux lumineux améliore sensiblement le rendement de ces générateurs. Dans cet article, il est proposé un capteur basé sur un asservissement extrémal de la tension. Cette dernière est délivrée par un module photovoltaïque placé à proximité du foyer d'un concentrateur de rayonnement solaire. La caractéristique de tension en fonction de l'écart angulaire (angle formé par les directions du soleil et de la normale au capteur) présente un maximum localisé pour un écart nul. Le dispositif recherche en permanence la position optimale de la caractéristique et délivre un signal au système d'entraînement du panneau qui corrige ainsi l'orientation.

**Abstract** – A device of solar panel positioning and guidance in the direction of source of the luminous flux improves the output of these generators more or less appreciably. In this paper, a sensor based on an extreme servo-control mechanism is proposed. Electrical power is delivered here by a photovoltaic module placed close to focus of a solar radiation concentrator. The characteristic voltage versus angular gap (angle formed by direction of the sun and the normal to the sensor) presents a maximum localized for a zero gap. The device permanently searches the extreme point of the characteristic and delivers a signal to the driving system of the panel that corrects its orientation.

**Mots clés** : Panneaux solaires – Concentrateur de rayonnement – Poursuite solaire – Système extrémal – Automatique.

### 1. INTRODUCTION

On observe aisément, aux bornes d'un module photovoltaïque, chargé par une résistance électrique de valeur adéquate, une variation de l'amplitude de la tension en fonction du flux de rayonnement incident. On peut mettre en évidence ce résultat en écartant légèrement le module de part et d'autre de la direction de la source de lumière émettant à flux constant. On établit ainsi une relation entre la tension mesurée et l'écartement angulaire  $\alpha$  par rapport à la direction du rayonnement incident. Dans cette relation la valeur de la tension mesurée est maximale pour  $\alpha$  valant zéro degré. Pour les processus physiques ayant une caractéristique semblable, et qu'on désire réguler de manière à ce qu'ils ne s'écartent pas considérablement de ce point de fonctionnement remarquable, un système de poursuite extrémale pourrait être une bonne solution [1-4]. C'est le dispositif proposé dans ce qui suit pour poursuivre le soleil en azimut durant son déplacement apparent journalier.

Les mesures ont été réalisées sur un miroir parabolique gonflable, auquel est fixé à proximité du foyer, un module photovoltaïque composé de neuf cellules connectées en série. Ce dernier est disposé de manière à baigner complètement dans le halo résultant de l'opération de concentration. L'ensemble est fourni par la firme allemande Bomin solar.

### 2. ETUDE EXPERIMENTALE DE LA CARACTERISTIQUE STATIQUE $V=f(\alpha)$ .

Les mesures ont eu lieu à flux solaire constant ( $1000\text{W}/\text{m}^2$ ) pour différentes valeurs de résistances de charge, par une journée très ensoleillée sans perturbations notables, à la faculté

des sciences exactes de l'université A. Belkaid, à Tlemcen en Algérie [1]. Les résultats obtenus sont représentés par les courbes de la figure 1.

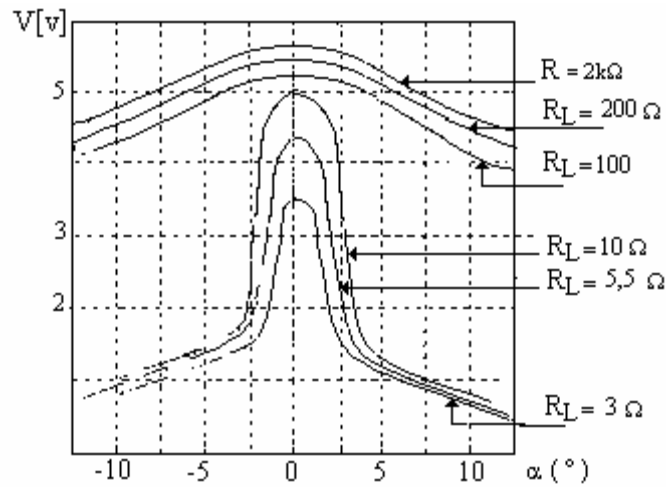


Fig. 1: Caractéristique tension-écart angulaire du miroir parabolique bomin solaire

On observe que les courbes présentent un maximum pour  $\alpha = 0$  et qu'elles sont pratiquement symétriques par rapport à l'axe des ordonnées. A proximité du maximum ( $V_{max}$ ), les courbes peuvent être représentées par un modèle parabolique simple. Ainsi on vérifie que pour  $R=10\Omega$  et  $|\alpha| \leq 5^\circ$ , l'expression

$$V = -\frac{63}{125}\alpha^2 + 5$$

représente un modèle acceptable.

Le dispositif décrit dans cet article permet, à tout moment d'un ensoleillement régulier, de rechercher la position du maximum. La position est atteinte puis dépassée d'une valeur angulaire  $\alpha_s$  préalablement fixée. Le sens d'entraînement est alors modifié, le dispositif repasse dans l'autre sens par la position maximale et la dépasse jusqu'à atteindre une valeur angulaire  $-\alpha_s$ . Le processus se répète en permanence.

Le schéma synoptique décrivant le processus est proposé à la figure 2.

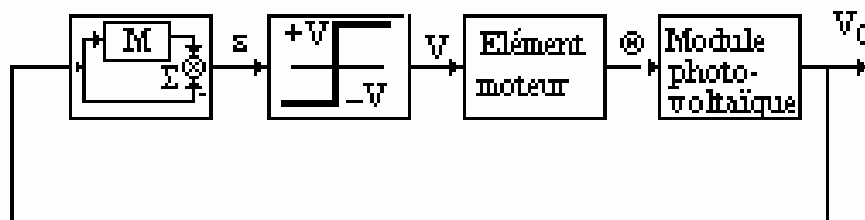


Fig. 2: Synoptique du système de guidage

Le premier bloc mémorise la dernière plus grande valeur de la tension  $V_m$  aux bornes de sortie du capteur photovoltaïque. Il élabore ensuite la différence  $\varepsilon$  avec la valeur courante  $V_c$  à ces mêmes bornes :

$$\varepsilon = V_c - V_m$$

Selon la valeur et le signe de  $\varepsilon$ , les actionneurs sont sollicités pour réorienter le dispositif de manière à annuler  $\varepsilon$ . Le fonctionnement peut être déduit de la caractéristique statique (Fig.3) : supposons que le système se trouve à l'instant initial  $t_0$  au point 1 et qu'il se meut, entraîné par ses actionneurs, vers le point 3 d'abord puis vers E. Pendant la durée de temps qui correspond au déplacement  $1 \rightarrow E$  sur la figure, on aura à la sortie du comparateur  $\varepsilon = 0$  car dans cet intervalle  $V_c = V_m$ . Après le point E, la mémoire analogique (M) sauvegarde la valeur maximum ( $V_{max}$ ) de la tension enregistrée en ce dernier point, alors que la valeur courante  $V_c$  se met à décroître ; la valeur absolue de  $\varepsilon$  atteindra  $\varepsilon_s$  au point 3. Le sens de déplacement est alors inversé grâce au système de commande. On efface le contenu de la mémoire et on entame le retour vers E de manière similaire à l'étape ci-dessus. Il s'établit alors une oscillation entretenue entre les points 2 et 3.

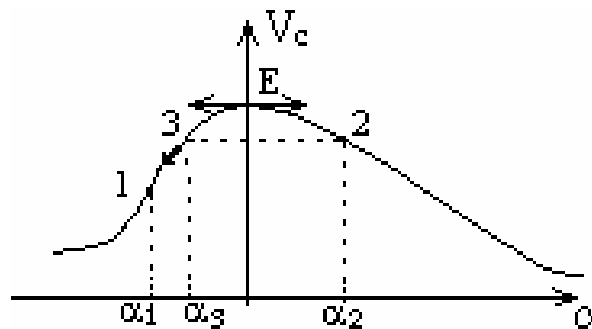


Fig. 3: Caractéristique présentant un maximum

### 3. CIRCUIT ELECTRONIQUE

La mémoire analogique est réalisée à l'aide d'un détecteur de crête (Fig. 4), composé d'un amplificateur opérationnel ( $A_1$ ), d'un condensateur (C) et d'une diode (D).

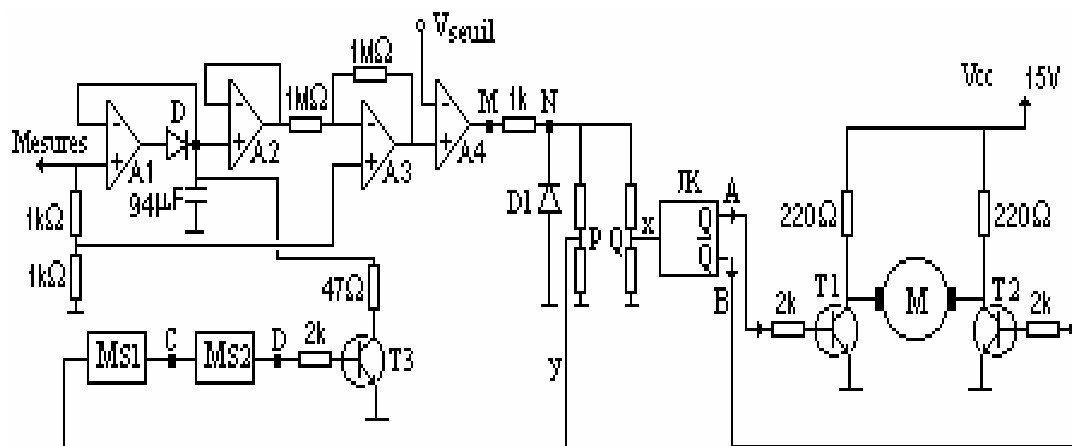


Fig. 4: Schéma électronique de réalisation

L'ampli  $A_3$  effectue la différence  $\varepsilon = V_c - V_m$ . A la sortie de  $A_4$  on recueille un signal rectangulaire (Fig. 5b). A l'aide de deux diviseurs on prélève, aux points P et Q, des tensions

x et y compatibles TTL pour attaquer le monostable  $Ms_1$  et la bascule JK. La sortie Q, de cette dernière, change d'état à chaque front descendant du signal d'entrée (Fig. 5c et 5d).

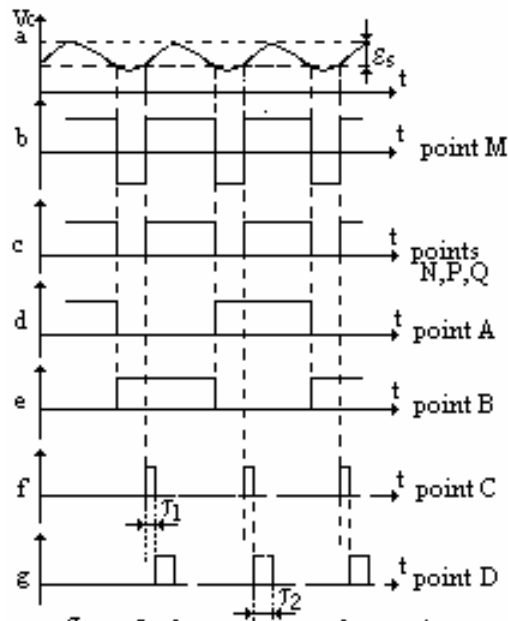


Fig. 5: Chronogramme des tensions

La saturation de  $T_1$  par le signal appliqué sur sa base lorsque Q est à l'état haut, provoque la mise sous tension du moteur à courant continu  $\underline{M}$ . Le capteur de rayonnement solaire, couplé mécaniquement au moteur, est alors actionné de manière à capter le maximum de flux disponible. Quand, de nouveau, la tension courante  $V_c$  se met à chuter à cause du dépassement de la position correspondant au maximum, et que le seuil de basculement est atteint, Q passe à l'état bas,  $T_1$  se bloque et  $T_2$  se sature.

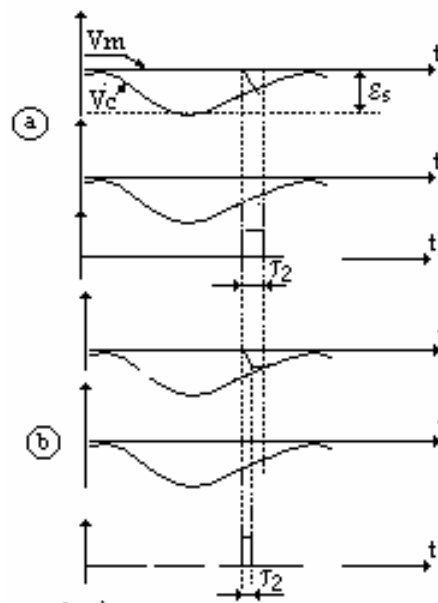


Fig. 6: (a) Temps de décharge suffisant  
(b) Impulsion de durée insuffisante

L'alimentation du moteur est commutée, le sens de rotation est ainsi inversé et le dispositif est ramené dans la direction souhaitée. Les monostables  $Ms_1$  et  $Ms_2$ , assurent la remise à zéro de la mémoire. A la sortie de  $Ms_1$  les impulsions de durée  $\tau_1$  se forment à

chaque front montant du signal rectangulaire prélevé au point P. Les impulsions à la sortie de  $Ms_2$  ont une durée  $\tau_2$  et son basculement a lieu durant le front descendant des impulsions d'entrée (Fig. 5 f et g). Ces impulsions saturent le transistor  $T_3$  pendant la durée  $\tau_2$  durant laquelle le condensateur C doit se décharger jusqu'à une valeur  $V_m \leq V_c$  (Fig. 6). La charge de C reprend au blocage de  $T_3$ . Le processus se répète à l'impulsion suivante. L'ampli opérationnel  $A_4$  permet le réglage du seuil de commutation.

#### 4. REPOSITIONNEMENT DU PANNEAU SOLAIRE

Les actionneurs pour la remise en position du panneau sont sollicités chaque fois que l'écart angulaire  $\theta$  atteint la valeur de consigne fixée  $\theta_c$ . L'illustration est donnée sur la figure 7 :

- l'orientation est correcte; le capteur oscille de part et d'autre de la position du soleil ;
- le soleil s'étant virtuellement déplacé vers l'ouest , les axes du panneau et du capteur font entre eux un angle  $\theta$ .

Dès que  $\theta$  atteint la valeur  $\theta_c$ , un contact s'établit dans le circuit d'alimentation du moteur d'entraînement du panneau solaire qui est ainsi réorienté. Il serait judicieux de prévoir un système auxiliaire d'orientation approximative pour les cas d'écarts angulaires importants notamment les matins à la détection du jour ou après un passage nuageux de longue durée.

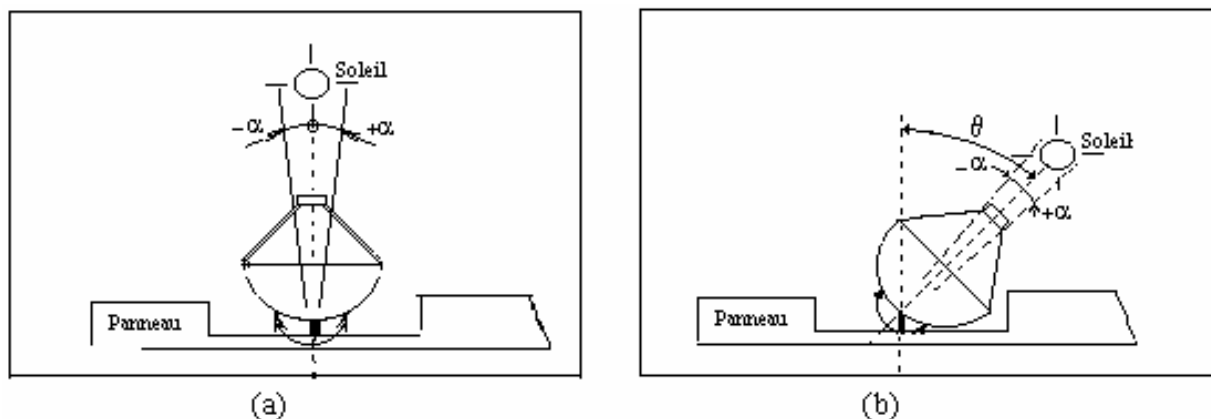


Fig. 7: Position du panneau par rapport au soleil (a) correcte, (b) dérivée de  $\theta^\circ$

#### 5. ETUDE DU SYSTEME EN PRESENCE D'UNE DYNAMIQUE DU PROCESSUS

La représentation de la trajectoire est proposée dans le plan de phase qui permet de disposer simultanément, sur la même courbe, de la vitesse de rotation et de la position relative du capteur par rapport à la direction du soleil. On acceptera dans un souci de simplification les hypothèses suivantes :

- le circuit d'alimentation du moteur permet une inversion instantanée de la polarité de la tension aux bornes de ce dernier.
- le couple résistant est proportionnel à la vitesse.

Par ailleurs, le moteur avec réducteur incorporé, utilisé dans les essais pratiques, a les caractéristiques nominales suivantes :

- tension d'alimentation  $U = \pm 15$  volts.
- constante de temps électromécanique  $T_0 = 12$  ms.

- vitesse à la sortie du réducteur  $\omega_f = 60^\circ / s$ .
- en régime permanent la commutation a lieu pour un seuil correspondant à un angle  $\alpha = 2.5^\circ$ .
- la dynamique de mesure a une transmittance égale à l'unité (la conversion du flux lumineux incident en énergie électrique est supposée instantanée comparativement à la lenteur du mouvement mécanique) [2].
- Le modèle mathématique auquel s'identifie la caractéristique statique dans les conditions précitées et à proximité du maximum est:

$$V = -\frac{63}{125}\alpha^2 + 5$$

$V$  en volt ;  $\alpha$  en degrés

Déterminons dans ces conditions les expressions de la vitesse de rotation  $\omega$  et de la position angulaire  $\alpha$  du capteur fixé sur l'arbre de sortie du réducteur. Les équations relatives au moteur à courant continu considéré sont:

$$\begin{cases} J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + f \frac{d\alpha}{dt} = ki & (\text{équation de couples}) \\ E - k \frac{d\alpha}{dt} = Ri & (\text{équation de tension}) \end{cases}$$

$$T_0 \frac{d^2\alpha}{dt^2} + \frac{d\alpha}{dt} + \alpha A = 0 \quad (1)$$

en éliminant le temps, on déduit

$$T_0 = \frac{J}{f + \frac{k^2}{R}} ; \quad A = -\frac{kE}{R \left( f + \frac{k^2}{R} \right)}$$

où  $T_0$  représente la constante de temps électromécanique et  $A$  une constante dépendant de  $E$ .

En introduisant la vitesse  $\omega = \frac{d\alpha}{dt}$  dans cette équation il vient :

$$T_0 \frac{d\omega}{dt} + \omega + \varepsilon A = 0 \quad (2)$$

où  $\varepsilon = \pm 1$  selon la polarité de la tension aux bornes du moteur et

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} \omega = |\omega_f|$$

La résolution de l'équation (2) donne :

$$\omega = -\varepsilon A + (\omega_0 + \varepsilon A) e^{-\frac{t}{T_0}} \quad (3)$$

et puisque

$$\alpha = \int \omega dt + C$$

on tire l'expression de l'écart

$$\alpha = -\varepsilon A t - T_0(\omega_0 + \varepsilon A) e^{-\frac{t}{T_0}} + \alpha_0 + T_0(\omega_0 + \varepsilon A) \quad (4)$$

L'aspect de la trajectoire de phase, pour  $\varepsilon = -1$  par exemple, s'obtient à l'aide des équations suivantes :

$$\omega = A + (\omega_0 - A) e^{-\frac{t}{T_0}} \quad (5)$$

et

$$\alpha = A t - T_0(\omega_0 - A) e^{-\frac{t}{T_0}} + \alpha_0 + T_0(\omega_0 - A) \quad (6)$$

pour  $\varepsilon = +1$  les expressions à considérer sont :

$$\omega = -A + (\omega_0 + A) e^{-\frac{t}{T_0}} \quad (7)$$

et

$$\alpha = -A t - T_0(\omega_0 + A) e^{-\frac{t}{T_0}} + \alpha_0 + T_0(\omega_0 + A) \quad (8)$$

La commande par plus ou moins appliquée ici fait qu'après la disparition d'un court régime transitoire, le système fini par se stabiliser dans une oscillation périodique d'amplitude constante. C'est le cycle limite.

#### Aspect de la trajectoire de phase.

En déduisant le temps  $t$  de l'équation (7) et en remplaçant dans (8) on obtient :

$$\alpha = A T_0 [\text{Ln}(\omega + A) - \text{Ln}(\omega_0 + A)] - T_0(\omega + A) + \alpha_0 + T_0(\omega_0 + A) \quad (9)$$

Cette relation permet de tracer  $\alpha = f(\omega)$  pour différentes configurations initiales (Fig. 8). Les équations (5) et (6) permettent de déduire  $\alpha = f(\omega)$  pour  $\varepsilon = -1$  ; ceci est représenté par les courbes de la figure 8 a.

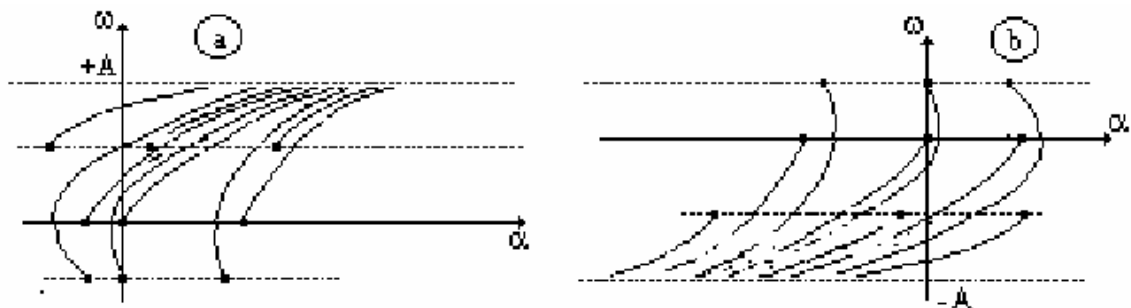


Fig. 8: Trajectoire de phase (a)  $\varepsilon = -1$  (b)  $\varepsilon = 1$

#### Etude du cycle limite

ce cas le cycle limite (Fig. 9).

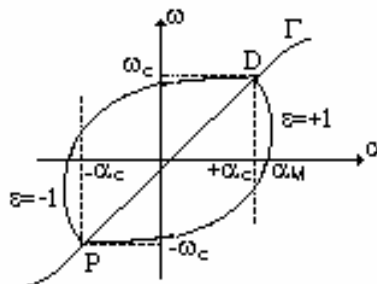


Fig. 9: Courbe du cycle limite

L'une des commutations place le système dans l'état correspondant au point D par exemple:

$$\begin{cases} \alpha = \alpha_0 = \alpha_c = 2,5^\circ \\ \omega = \omega_0 = \omega_c \end{cases}$$

En appliquant l'expression (9), on peut prévoir que la commutation suivante correspondra au point P de la figure où les nouvelles valeurs de  $\alpha$  et de  $\omega$  seront :

$$\begin{cases} \alpha = -\alpha_0 \\ \omega = -\omega_c \end{cases}$$

l'équation (9) devient :

$$-2\alpha_0 = AT_0 \left[ \text{Ln} \frac{1-x}{1+x} \right] + 2A T_0 \quad \text{avec} \quad x = \frac{\omega}{A}$$

On en tire le résultat suivant :  $\omega = -\omega_c = -59,98^\circ/s$  Il est évident qu'au point D on obtient :

$$\begin{cases} \alpha = \alpha_c = \alpha_0 = 2,5^\circ/s \\ \omega = \omega_c = 59,98^\circ/s \end{cases}$$

## 6. REGIME DYNAMIQUE

Considérons un point initial  $M(\omega_0, \alpha_0)$  du plan de phase; deux situations sont possibles :

- Le point initial est à l'intérieur de la zone du cycle limite. L'évolution du système tend vers le point du maximum. C'est un régime de fonctionnement stable.
- Le point considéré est situé à l'extérieur du domaine appartenant au cycle limite et la trajectoire s'éloigne du point du maximum. Dans ce cas on ne peut pas conclure à la stabilité sans analyser les différents cas envisageables.

Etudions l'évolution du système en partant d'un état de repos, ( $\omega_0=0$ ), pour différentes positions initiales  $\alpha_0$  et une caractéristique  $v = f(\alpha)$  donnée. Considérons dans un premier temps une polarité de la tension aux bornes du moteur correspondant à  $\varepsilon = +1$  et des conditions initiales telles que :

$$\begin{cases} \alpha_0 \geq 0 \\ \omega_0 = 0 \end{cases}$$

Soit, par exemple, les points suivants :

$$M_1(\alpha_0=5^\circ), \quad M_2(\alpha_0=1.5^\circ) \text{ et } M_3(\alpha_0=0^\circ)$$

Déterminons la trajectoire de phase pour chacun de ces points (Fig. 10). L'équation (9) s'écrit avec  $AT_0=0,72$

$$\alpha = 0.72[x + \ln(1-x)] + \alpha_0 ;$$

Le module photovoltaïque se meut vers le maximum E et le dépasse; par ailleurs, en fixant le seuil de commutation à la valeur  $\alpha = \pm \alpha_c = \pm 2,50^\circ$ , il vient :

$$\varepsilon = V_c - V_{\max} = -\frac{63}{125} \alpha^2$$

La commutation a lieu quand  $\varepsilon = -\sigma = -3.15^\circ$  correspondant à  $\alpha = -\alpha_c = -2.50^\circ$ .

En partant de  $M_1$ , le point N, intersection avec la droite de commutation, figure 10 donne :  $x=0.999985$  et  $\omega_c = -59.9991^\circ/s$  ;

En partant de  $M_2$ , l'intersection avec la droite a lieu au point Q (Fig. 10 b). On déduit les valeurs :  $x = 0.9985$  et  $\omega_c = -59.91^\circ/s$



En partant du point M3, le même procédé, donne au point d'intersection R :  $x=0.989$   
 et  $\omega_c = -59.34$  °/s

Or quand on parcourt le cycle limite, en régime permanent, on a vu que  $\omega$  atteignait au point P la valeur  $\omega_c = -59.98$ °/s, on observe donc, en comparant les valeurs, que dès la première commutation on atteint pratiquement le cycle limite. Dans le pire des cas considérés,  $\omega_c$  ne diffère de la pulsation correspondant au cycle limite que de 1%. Le système est stable.

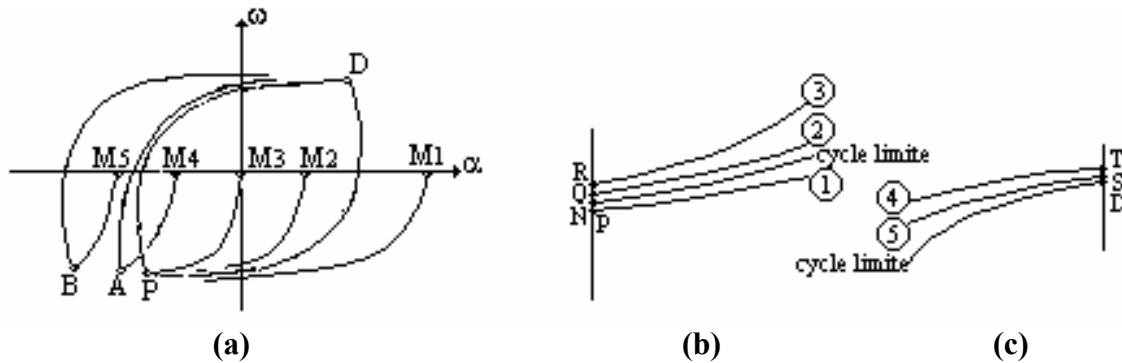


Fig. 10: Evolution de la trajectoire (a) pour différentes conditions initiales  
 (b) agrandissement au point P, (c) agrandissement au point D

Supposons maintenant que l'opération débute en un point où  $\alpha_0 < 0$ , soit, par exemple les points M4 et M5 où on enregistre respectivement :  $\alpha_0 = -1.5^\circ$  et  $\alpha_0 = -3.5^\circ$ ; le module s'éloignant de la position E du maximum . La valeur mémorisée est alors

$$V_M = -\frac{63}{125}\alpha_M^2 + 5 \quad \text{et} \quad V = -\frac{63}{125}\alpha^2 + 5$$

$$\Rightarrow \varepsilon = V - V_M = -\frac{63}{125}(\alpha_M^2 - \alpha^2) = -\frac{63}{125}(\alpha_c')^2$$

d'où pour une trajectoire débutant au point initial M4 ( $\alpha_0 = -1.5^\circ$ ), la commutation a lieu en  $\alpha_c = -2.9155$ . Pour le point M5 ( $\alpha_0 = -3.5^\circ$ ), il correspond un lieu de commutation en ( $\alpha_c = -4.3^\circ$ )

La vitesse au point A (Fig. 10a), correspondant à un début de mouvement à partir de M4, atteint  $\omega = -56.7$ °/s ( $x = -0.945$ ); pour le point M5, elle atteint en B la valeur  $\omega = -51.6$ °/s ( $x$  valant  $-0.86$ ). Les points A et B sont situés tous les deux à l'extérieur du cycle limite.

Après la commutation ( $\varepsilon = -1$ ) survenant au point A (ou au point B), l'évolution du système est rectifiée dans le sens correct, c'est-à-dire vers le maximum de la caractéristique. L'équation qui permet d'étudier la trajectoire de phase se déduit des équations (5) et (6), soit :

$$\alpha = -AT_0[x + \ln(1-x)] + AT_0[x_0 + \ln(1-x_0)] + \alpha_0 \tag{10}$$

avec

$$\omega = xA$$

et

$$\begin{cases} \alpha_0 = -2.9155 \\ \omega_0 = -56.7^\circ/s \\ x_0 = -0.948 \end{cases} \quad \text{pour le point initial A}$$

L'expression (10) devient :

$$\alpha = -0.72[x + \ln(1-x)] - 3.1169$$

La commutation ayant lieu pour  $\alpha_c = 2.5^\circ$ , on en tire les valeurs du point T correspondant :  $x = 0.99985$  et  $\omega_c = 59.991^\circ/s$ .  
Pour le point B les valeurs initiales sont :

$$\begin{cases} \alpha_0 = -4.3 \\ \omega_0 = -51.6^\circ/s \\ x_0 = -0.86 \end{cases}$$

l'équation transcendante obtenue est  $\alpha = -0.72[x + \ln(1-x)] - 4.4724$

On obtient alors au point de commutation S les valeurs :  $\begin{cases} \omega_c = 59.96^\circ/s \\ x = 0.9993 \end{cases}$

Les deux situations sont indiquées sur la figure 11 dont un agrandissement est réalisé sur la figure 10 c. Dans les deux cas cités, à la deuxième commutation, on est dans les conditions du cycle limite. Le mouvement autour du maximum est un mouvement régulier stable. Dans le cas où l'un des points A et B eut donné des valeurs de  $\alpha$  inférieurs à  $-5^\circ$ , le modèle parabolique adopté pour représenter la caractéristique ne serait plus valable et on n'aurait pas pu conclure.

## 7. CONCLUSION

Les systèmes classiques d'orientation des panneaux solaires vers le soleil sont souvent dépointés lorsqu'il existe un déséquilibre dans l'illumination de la paire d'éléments constituant le senseur [5-7]. Ceci survient suite à l'obstruction partielle ou totale de la surface active du capteur. Des impuretés naturelles peuvent provoquer cette situation.

Le système étudié présente l'avantage d'être pratiquement insensible aux différentes impuretés qui peuvent facilement fausser l'équilibre des systèmes classiques. Seule la caractéristique extrême est considérée pour élaborer le signal de commande du système d'entraînement du panneau. Il peut être très utile dans les sites éloignés où l'entretien n'est pas fréquent. Cependant l'existence du cycle limite fait que le dispositif oscille constamment. Pour limiter l'effet de ce mouvement, il faut diminuer autant que possible les dimensions du dispositif ainsi que le poids de la charge. D'autre part, on peut améliorer le système en diminuant l'amplitude du cycle limite jusqu'à rendre les oscillations imperceptibles.

## REFERENCES

- [1] A. Chermitti, "Guidage automatique de panneaux solaires à l'aide d'un système quasi-extrémal", Thèse de magister, juillet 1987.
- [2] P. Decaulne, J.Ch. gille et M. Pélebrin, "Introduction aux systèmes asservis extrémaux et adaptatifs", Dunod 1986
- [3] S. Calin et C. Belea, "Système adaptative optimale", édition technique Bucarest.
- [4] M. Méerov, Y. Mikhaïlov et V. Friedman, "Principes de la commande automatique", Mir 1983.
- [5] Y. Zoubov, "Théorie de la commande", Mir 1978.
- [6] A. Essadki, M. Cherkaoui et A. Aït Ouahman, "*Utilisation de la méthode du plan de phase dans l'étude de l'ensemble convertisseur-machine asynchrone*", J.O.T, COMAEI'96, 1996, Tlemcen.
- [7] J. J. E Slotine and W. Li, "Applied Nonlinear Control", Prentice-Hall International, 1991.