

Etude, conception et expérimentation d'un système de contrôle pour système suiveur de soleil

M.D. Draou^{1*} et B. Draoui²

¹ Unité de Recherche en Energie Renouvelable en Milieu Saharien, 'URERMS',
B.P. 478, Route de Reggane, Adrar

² Centre Universitaire de Béchar, Béchar

(reçu le 15 Mai 2008 – accepté le 30 Juin 2008)

Résumé - Ce travail concerne l'étude d'un circuit électronique pour le contrôle d'un système suiveur de soleil qui peut suivre le soleil même à puissance d'ensoleillement faible, surtout pour les journées à ciel couvert ou complètement couvert de nuages. Une réalisation d'un circuit électronique de contrôle et commande, ainsi qu'une réalisation mécanique d'un héliostat sont traitées. Enfin, une étude de l'éclairement solaire par le modèle de Brichambaut est comparée aux données expérimentales relevés par le système suiveur de soleil réalisé.

Abstract - In this paper, we present a new electronic circuit which controls a sun tracker system even then with low solar radiation. An electronic circuit and a mechanical system were realised in the URERMS center of Adrar. A study for the Brichambaut's solar irradiance model is done, and compared with the measured irradiance using the sun tracker.

Mots clés: Suiveur de soleil - Photovoltaïque - Eclairements solaires - Héliostat

1. INTRODUCTION

Les systèmes d'énergie photovoltaïque connaissent aujourd'hui un essor fulgurant. Introduit il y a un peu plus de 30 ans pour l'alimentation électrique de petites charges dans des sites isolés, les systèmes photovoltaïques côtoient maintenant les centrales électriques dans les villes et les cités. Des installations du kW_c à quelques MW_c sont maintenant couramment utilisées.

Mais dans la grande majorité des cas, le générateur photovoltaïque est fixe. L'énergie solaire incidente sur les modules n'est donc pas optimale en fonction de la variation du temps dans la journée et par rapport aux chargements des saisons.

Des études théoriques [6, 8] montrent que la quantité d'énergie fournie par une cellule photovoltaïque en mode suiveur de soleil (sun tracking) est de 30 % à 40 % supérieure à celle qui est fixe (orientée plein Sud et inclinée d'un angle égal à la latitude).

L'étude de la variation journalière de la position du soleil par rapport à un point fixe sur la terre est importante pour entamer l'étude de la réalisation du système mécanique de poursuite solaire et de son circuit électrique de commande et de contrôle.

2. ETUDE SOMMAIRE DE L'ECLAIREMENT SOLAIRE SUR UN CAPTEUR PLAN

Pour des raisons d'étude géométrique, nous supposons que le soleil se déplace par rapport à un point fixe sur la surface de la terre. D'un point fixe sur la surface de la terre (altitude et longitude), le soleil entame une course d'Est en Ouest avec variation de sa hauteur par rapport à ce point.

Sur ce point fixe de latitude ϕ , il y a un capteur plan (générateur photovoltaïque constitué d'un ou plusieurs modules) installé dans une position caractérisée par les angles α et β et par l'angle de déclinaison du soleil dépendant du numéro du jour de l'année.

* draou-med@hotmail.com

α : Angle compris entre le plan récepteur et le plan vertical normal à l'axe Est-Ouest; β : Angle d'inclinaison sur l'horizontale du plan récepteur à la normale du lieu. φ représente la latitude du lieu où se trouve le plan récepteur.

Si on considère que ce plan capteur est fixe, à un moment quelconque de la journée (caractérisé par l'angle horaire du soleil ω), le rayonnement solaire incident sur ce dernier sera défini par les angles suivants:

ψ est appelé azimut. C'est l'angle compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil. Il est compté positivement vers l'Ouest et négativement vers l'Est.

θ est l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur le plan de captation.

γ est la hauteur angulaire du soleil. Il représente l'angle formé par le plan horizontal au lieu d'observation et la direction du soleil. Il varie tout au long de la journée (du temps).

ω représente l'angle horaire du soleil.

Les croquis de la figure 1 donnent un aspect des angles du plan capteur et des angles relatifs au rayonnement solaire sur le plan capteur.

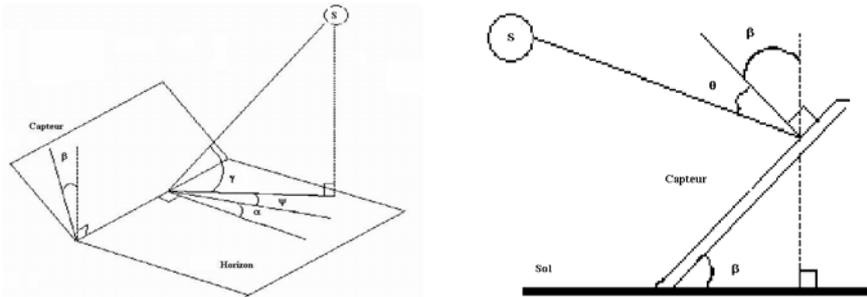


Fig. 1: Croquis définissant les angles et la géométrie de la position du plan capteur par rapport au soleil

Pour connaître les angles maximaux auxquels le système suiveur doit répondre, nous avons procédé à leurs calculs pour les différentes saisons qui correspondent aux hauteurs maximales du soleil et la durée maximale de la journée pour le site d'Adrar.

La hauteur maximale du soleil est atteinte à midi TSV [2], elle est calculée par:

$$\gamma_{12} = 90 - (\varphi - \delta) \quad (1)$$

$$\sin \gamma = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \quad (2)$$

La durée maximale du jour nous renseigne sur l'angle maximal que le système suiveur doit parcourir. Elle est donnée par l'angle horaire ω_0 au lever du soleil et au signe près au coucher du soleil. La relation [2] de l'angle au lever du soleil est la suivante :

$$\omega_0 = \arccos(-\operatorname{tg}(\varphi) \cdot \operatorname{tg}(\delta)) \quad (3)$$

Donc le système suiveur de soleil devra balayer l'azimut d'un angle égal à deux fois ω_0 et devra permettre une inclinaison minimale de quelques degrés (lever et coucher du soleil) jusqu'à la hauteur maximale du soleil γ_{12} .

Le tableau suivant donne les angles maximaux (azimut maximale du soleil et inclinaison du capteur) pour les différentes saisons dans la région d'Adrar.

Tableau 1: Valeurs des angles des principales saisons du site d'Adrar

Numéro du jour	γ_{12} (°C)	β (°C)
21 Décembre	38,72	51,28
21 Juin	85,52	4,42
21 Mars	62,32	27,68
21 Septembre	62,82	27,18

3. ETUDE DU PRINCIPE DE LA POURSUITE SOLAIRE

Le principe utilisé pour la poursuite du soleil à deux axes repose sur l'exploitation du déséquilibre créé entre deux résistances LDR (Light Dependent Resistor) séparées par une paroi opaque au rayonnement solaire. Le circuit à LDR est solidaire du module et du pyranomètre. En fonction de la valeur du déséquilibre et de son sens le moteur du vérin est actionné.

La relation (4) liant la résistance au flux lumineux est de la forme suivante:

$$R = A \times L^{-0.85} \tag{4}$$

où: R est la résistance de la LDR en Ω ; A est une constante ($\sim 340 \times 10^3$); L est l'éclairement lumineux en Lux.

Le croquis de la figure 2 illustre le principe de fonctionnement.

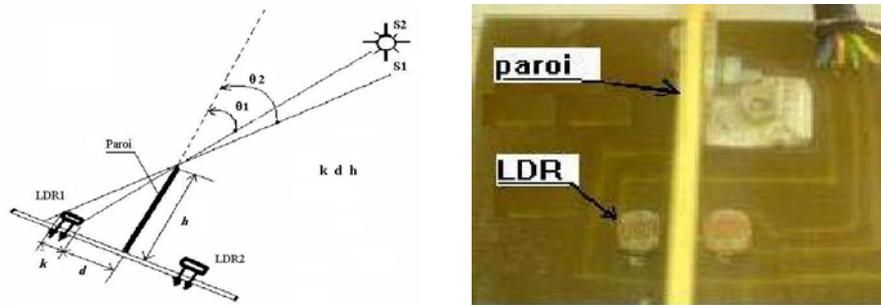


Fig. 2: Schéma et vue photographique du principe d'utilisation des deux résistances LDR exposées au rayonnement solaire

D'après le schéma de la figure 2, on remarque que l'éclairement de la résistance LDR1 va dépendre des paramètres (grandeurs physiques) suivants: d , h et k .

d : est la distance de la paroi au début de la résistance LDR;

h : est la hauteur de la paroi opaque;

k : est le diamètre de la résistance LDR (= 5 mm pour celle que nous avons utilisé).

θ_1 correspond à l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur la résistance LDR 1; tandis que θ_2 est l'angle d'ombre pour la même résistance LDR.

Le diamètre k de la résistance LDR étant connu, on calcule la relation entre d et h . La relation qui lie ces paramètres est donnée par l'expression (5):

$$h = \sqrt{d^2 \cdot (1 - \sin^2 \theta_1)} / \sin \theta_1 \tag{5}$$

$$\theta_2 = \arcsin\left((d + k) / \sqrt{(d + k)^2 + h^2} \right) \tag{6}$$

Pour calculer cette relation, on prend en compte la précision de l'angle d'incidence θ . Connaissant la relation qui lie la valeur de l'éclairement solaire direct et la position (inclinaison) du capteur plan (voir équation X1) ; on peut déduire ce qui suit (cas de l'éclairement directe):

$$B_0 = I_0 \times \cos\theta \quad (7)$$

B_0 : Valeur de l'éclairement solaire direct sur le plan capteur.

I_0 : Eclairement direct du soleil au niveau du sol.

Dans le cas de la poursuite optimale, l'angle d'incidence θ (Fig. 1) devra être très proche de zéro degré. On voudrait que le système de poursuite du soleil puisse être positionné de telle façon que le rayonnement solaire incident soit toujours supérieur à 98 % de l'éclairement I_0 .

De cette hypothèse, on déduit l'écart de l'angle d'incidence à ne pas dépasser pour avoir ce taux de rayonnement solaire. Ceci se traduit par le développement de l'équation (7) et qui donne:

$$0,985 \cdot I_0 = I_0 \cdot \cos\theta_1 \quad (8)$$

On en déduit donc que l'angle θ_1 est voisin de 10° .

4. ETUDE ET ANALYSE DU CIRCUIT ELECTRONIQUE DE CONTROLE ET COMMANDE

Le principe de la poursuite du soleil se résume à ce que les deux résistances LDR (Fig. 2), soient exposées au même éclairement, durant toute la journée. Pour pouvoir identifier le déséquilibre même très faible entre les deux résistances LDR, nous avons opté pour un amplificateur différentiel [7]. Les deux résistances LDR sont montées en pont avec deux résistances identiques dont la valeur est proche de la valeur de la résistance LDR durant un ensoleillement très fort.

Les essais sur les résistances LDR utilisées dans ce travail, ont donné des valeurs variant de 240 à 350 Ω pour un flux lumineux maximal (vers midi par ciel clair).

Le schéma électronique du circuit de détection du déséquilibre entre les résistances LDR est donné en figure 3.

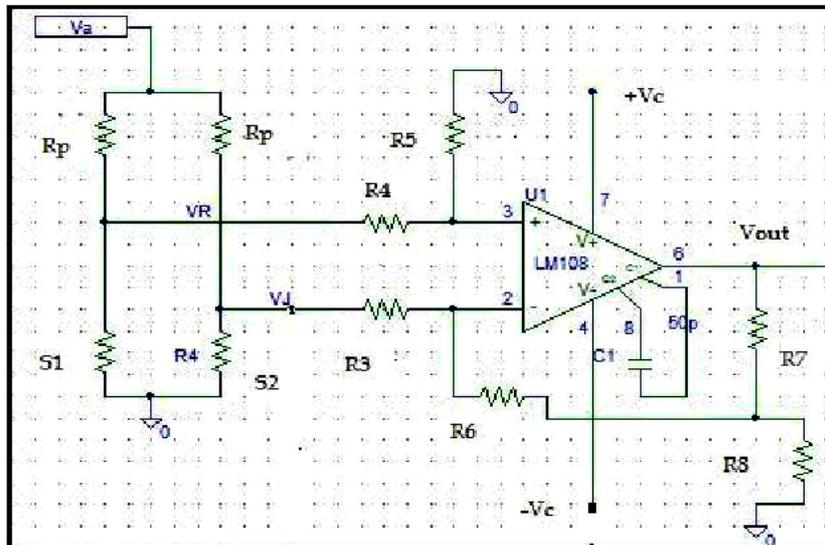


Fig. 3: Schéma électrique de l'amplificateur du déséquilibre entre les LDR

L'analyse de fonctionnement de ce circuit en fonction des valeurs des résistances donne que sa sortie est proportionnelle à la différence de la tension prélevée aux bornes des résistances LDR. La sortie de l'amplificateur est donnée par la relation suivante.

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_7}{R_8}\right) \cdot \left(\frac{S_1}{S_1 + R_p} - \frac{S_2}{S_2 + R_p}\right) \cdot V_a + \frac{R_7}{R_6} \cdot \left(\frac{S_1}{2(S_1 + R_p)} - \frac{S_2}{S_2 + R_p}\right) \cdot V_a \quad (9)$$

Le développement de l'équation (9) donne ce qui suit:

$$V_{out} = \frac{V_a}{(S_1 + R_p)(S_2 + R_p)} \cdot \left[(1 + A_1) \cdot R_p \cdot \Delta S + \frac{A_2}{2} \cdot (-S_1 \cdot S_2) + \frac{A_2}{2} \cdot R_p \cdot (S_1 - 2S_2) \right] \quad (10)$$

Avec:

A_1 : Gain de l'amplificateur équivalent à R_7 / R_8 .

A_2 : Gain additionnel équivalent à R_7 / R_6 .

V_a : la valeur de la tension continue alimentant les LDR.

ΔS : Différence (déséquilibre) entre les deux résistances LDR S_1 et S_2 .

En choisissant les bonnes valeurs pour les résistances R_6 , R_7 et R_8 , on peut minimiser le gain A_2 et par conséquent simplifier l'équation donnant la sortie de l'amplificateur différentiel qui sera donc de la forme suivante.

$$V_{out} = \frac{(1 + A_1) \cdot R_p \cdot \Delta S \cdot V_a}{(S_1 + R_p) \cdot (S_2 + R_p)} \quad (11)$$

Dans le **tableau 1**, nous présentons la sortie de l'amplificateur différentiel en fonction d'une simulation de l'état de l'éclairement lumineux incident sur les deux résistances LDR et de la quantité du rayonnement lumineux.

Tableau 2: Réponse du circuit électronique de contrôle en fonction de l'état de l'éclairement

Etat déséquilibre	Equilibre			Faible déséquilibre			Fort déséquilibre		
Etat	Eclairement			Eclairement			Eclairement		
éclairement	Fort	Moyen	Faible	Fort	Moyen	Faible	Fort	Moyen	Faible
Sortie	-60	-94	-114	-416	-265	-139	-5.13	-1.10	-0.214
Ampli.	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV

En fonction de la valeur de la sortie de l'amplificateur U_1 , un circuit composé de comparateurs permet de:

- régler le seuil de la sensibilité aux variations d'éclairement solaire (niveau d'éclairement);
- vérifier la polarité du signal pour décider la commande du moteur dans le sens voulu;
- vérifier le seuil du niveau d'éclairement pour autoriser ou annuler la commande du moteur.

La sortie de l'amplificateur U_1 est donc comparée à des tensions de référence (des seuils ou niveau de contrôle) qui permettront à travers leurs sorties, de limiter la sensibilité du système suiveur complet ou de l'arrêter en cas de très faible ensoleillement.

La sensibilité dépend aussi de la distance des résistances LDR par rapport à la paroi opaque et de la hauteur de cette dernière.

Les sorties des comparateurs attaqueront ensuite un circuit logique qui permet de commander les circuits drivers du moteur. Ce circuit logique permet de contrôler aussi la course maximale

(butées de fin de course du système mécanique) et de prendre en charge une commande manuelle. Il peut être réalisé en circuit logique discret ou en un circuit logique programmable (PAL ou GAL).

5. EXPERIMENTATION DU SYSTEME SUIVEUR DE SOLEIL

Nous avons donc réalisé un système mécanique avec deux vérins électriques. Le deuxième vérin (celui qui fait le mouvement Nord Sud) est solidaire du vérin principal (Est Ouest).

Sur ce système mécanique, nous avons placé un module UDTS 50 et un pyranomètre calibré du type CM11, ainsi que le circuit contenant les quatre résistances LDR (deux paires). Les circuits de contrôle et de commande sont mis dans une boîte et placé à la base de la monture qui supporte le système mécanique (Fig. 4).

Le banc de mesure est constitué d'une acquisition de données Fluke Hydra série II et d'un ordinateur PC. Le système étant monté sur une cabine saharienne, nous avons procédé à son expérimentation et à la collecte des données concernant l'éclairement global pour ce système suiveur de soleil. Un autre module positionné plein Sud et avec une inclinaison à peu près de 28° (latitude d'Adrar), auquel on a adjoint un autre pyranomètre ; ont été installés sur une cabine mitoyenne à la première.



Fig. 4: Vue du système suiveur de soleil en fonctionnement

Nous donnons dans cette partie, quelques graphes des éclairements solaires du site d'Adrar relevés durant la fin d'année 2007 et le début de 2008. Ces graphes montrent la corrélation entre les mesures expérimentales et ceux issus du modèle de Brichambaut. Les dates des graphes sont repérées par le numéro du jour. Le numéro '0', correspond au 1^{er} janvier de l'année.

Les courbes de la figure 5 montrent les performances du système suiveur de soleil en comparant l'éclairement mesuré avec l'éclairement calculé par la méthode de Brichambaut.

Pour montrer la sensibilité du système suiveur de soleil, nous avons relevé des mesures correspondant à des journées très perturbées par le passage de nuages et des journées entièrement couvertes. Les courbes des éclairements du suiveur de soleil sont comparées à celle du plan capteur orienté plein Sud avec une inclinaison égale à l'angle de la latitude du lieu (Adrar).

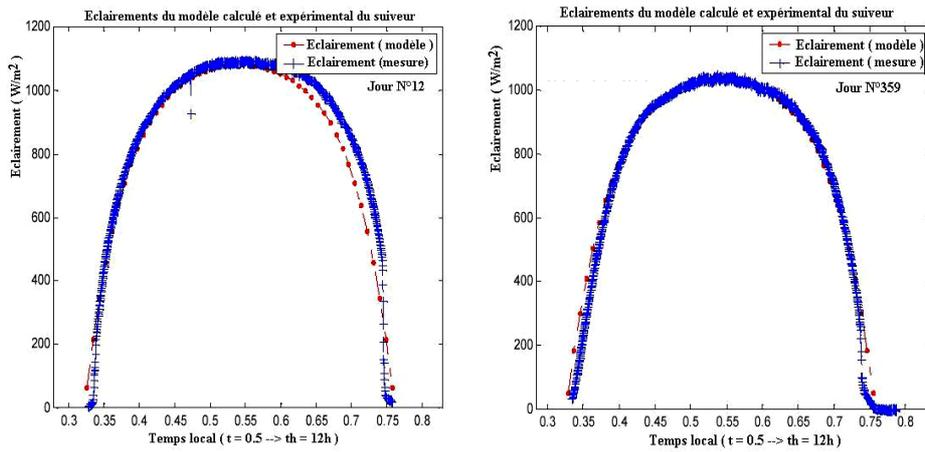
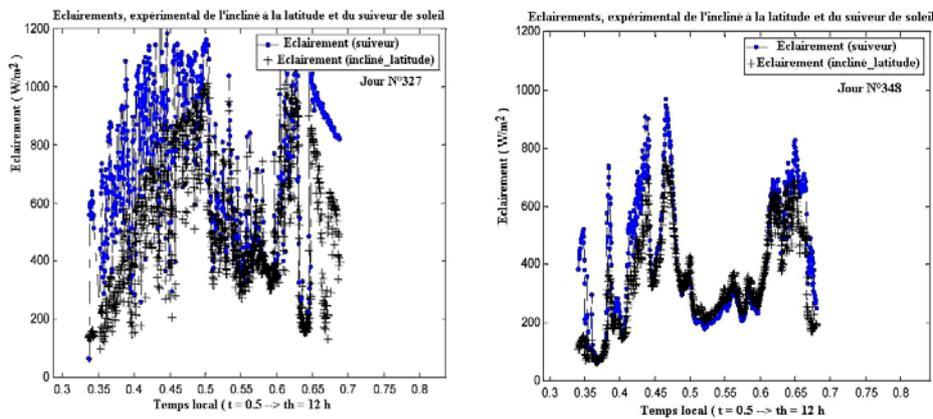


Fig. 5: Courbes des éclairagements solaires en poursuite solaire du modèle de Brichambaut et ceux issus de l'expérimentation par jour clair

Dans les graphes de la figure 6, nous avons les éclairagements du système suiveur de soleil et celui du plan incliné à la latitude et orienté plein Sud. Nous avons choisi des journées où l'éclairement solaire était faible ou perturbé par des passages nuageux plus ou moins importants pour les trois premiers graphes. Le quatrième correspond à une journée claire.

Dans les deux graphes du haut, on remarque que malgré la faiblesse de l'éclairement (moins de 200 W/m²), le système suiveur de soleil accomplit bien sa fonction en suivant l'ensoleillement même faible. Physiquement, nous avons constaté que le système suiveur de soleil se met parfois en position horizontale avec une direction plus ou moins proche de la direction du soleil voilé par les nuages.

Cette position s'explique par le fait que dans ce cas l'éclairement diffus est prédominant et cette position est la meilleure pour capter le maximum d'éclairement solaire.



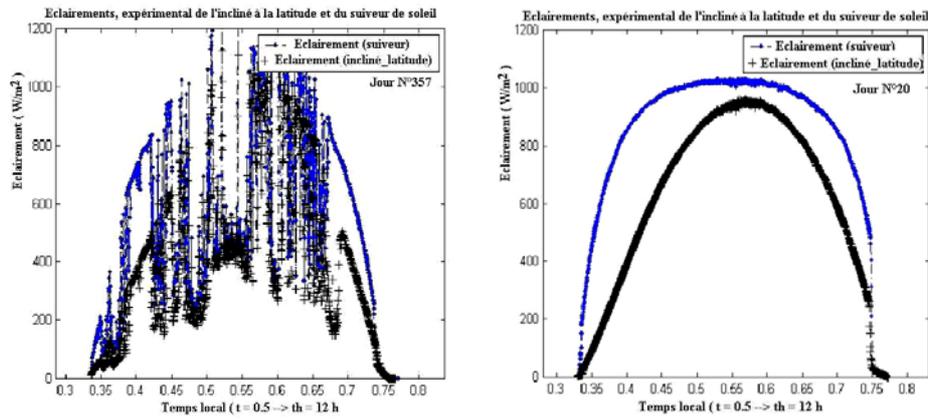


Fig. 6: Courbes des éclairements du suiveur de soleil et de l'incliné latitude plein Sud

Dans le graphe de la figure 6, correspondant au jour N° 357, on remarque que malgré la perturbation nuageuse de 11 h jusqu'à presque 16 h, le système suiveur de soleil reste toujours en bonne position. Une fois la perturbation disparue (vers 16 h 40), le système continue son positionnement correct vis-à-vis de la position du soleil.

6. CONCLUSION

Conformément aux résultats de l'expérimentation du système suiveur de soleil, nous pouvons conclure que ce système et surtout le circuit électronique de commande et de contrôle assurent pleinement la fonction de suiveur de soleil.

La deuxième constatation, montre que conformément à l'étude théorique et aux résultats de l'expérimentation, l'utilisation de cellule LDR non calibrée et avec une précision de $\pm 10\%$ et suffisante pour cette application. Les performances du circuit électronique de contrôle peuvent garantir une bonne poursuite du soleil même à faible éclairement.

La troisième constatation, montre aussi que la précision du système de mouvement mécanique n'est pas vraiment nécessaire (pas de moteur pas à pas de précision). Il n'y a pas lieu de commander un moteur à $\pm 1^\circ$. L'étude ainsi que l'expérimentation (Fig. 5), montrent que l'erreur entre un système avec une précision de 1° et celui de 5 à 10° est comprise entre 1 à 2 %.

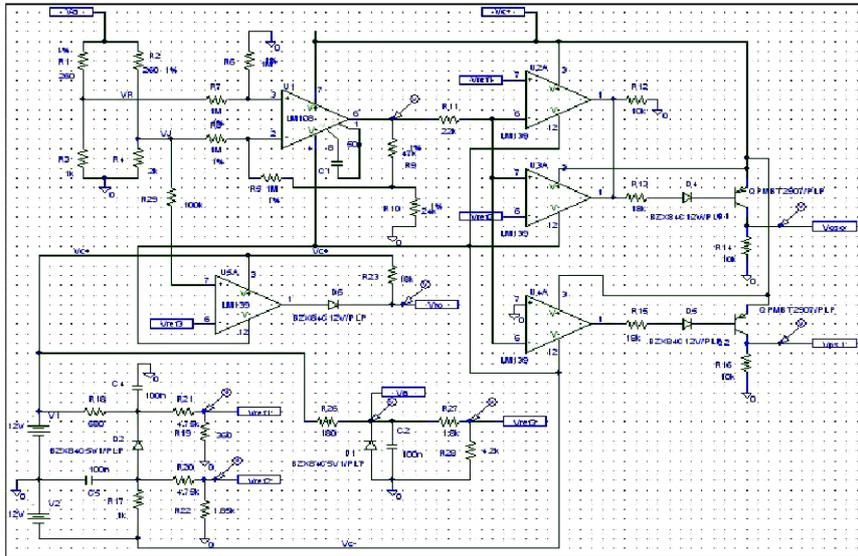
REFERENCES

- [1] Document, 'Les Photodétecteurs', Chapitre 2, ABC électronique.com.
- [2] C. Perrin de Brichambaut et C. Vauge, 'Le Gisement Solaire, Evaluation de la Ressource Energétique', Technique et Documentation, Edition Lavoisier, 1982.
- [3] K.J. Atkins and M.W. Thompson, 'Portable, Inexpensive Instruments to Quantify Stratum Corneum Hydration and Skin Erythema: Applications to Clothing Science', Dermatology Online Journal, Vol. 7, N°2, School of Exercise and Sport Science, Faculty of Health Sciences, the University of Sydney, Australia.
- [4] G. Ash, 'les Capteurs en Instrumentation Industrielle', Edition Dunod, 5^{ème} édition, 1999.
- [5] M. Capderou, 'Atlas Solaire Algérien', Tome 1; 2; 3, Edition Office des Publications Universitaires, Algérie 1986.

- [6] M.D. Draou, 'Analyse et Contribution à l'Amélioration des Performances Energétiques des Systèmes Photovoltaïques: Etude du Cas du Système Suiveur de Soleil', Mémoire de Magister, Centre Universitaire de Béchar, 2007.
- [7] National Semiconductor; 'Application Note N°31: Operational Amplifier Circuit Collection', February 1978.
- [8] T. Markvart and L. Castaner, 'Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications', Elsevier Science Ltd 2003.

ANNEXE 1

Schéma complet du circuit de contrôle du moteur du système suiveur de soleil



ANNEXE 2

Equations pour le calcul de l'éclairement incident sur un capteur plan muni d'un système de suivi du soleil d'après le modèle mathématique de Brichambaut

L'éclairement direct par ciel clair sur la surface du capteur avec suiveur de soleil ($\beta = \xi$ et $\alpha = \psi$) est donné par la relation suivante:

$$B_{e1}(\xi, \psi) = I_{e1}$$

L'éclairement dû au rayonnement diffus du ciel est donné par la relation suivante:

$$D_{ela}(\xi, \psi) = \frac{87 \cdot (\sin \gamma)^{0.4}}{1 + \sin \gamma} \times (1.5 + 0.5 \times \sin \gamma)$$

L'éclairement dû au rayonnement diffus du sol est donné par la relation suivante:

$$D_{eg}(\xi, \psi) = 0.5 \times \rho \times G_e \times (1 - \sin \gamma)$$

L'éclairement global par ciel clair sur une surface inclinée est la somme de l'éclairement direct et des deux composantes du diffus:

$$G_{el}(\xi, \psi) = B_{el}(\xi, \psi) + D_{ela}(\xi, \psi) + D_{eg}(\xi, \psi)$$

I_{el} : Rayonnement direct sur le capteur plan (Formule de Kasten)

G_e : Eclairement global sur plan capteur horizontal

ρ : Valeur moyenne de l'albédo du site considéré.