

## Effet de la variation de l'angle d'inclinaison du générateur sur le rendement des systèmes photovoltaïques Application aux systèmes de pompage de l'eau

B. Bouzidi \*

Division Energie Solaire Photovoltaïque  
Centre de Développement des Energies Renouvelables  
B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger, Algérie

(reçu le 01 Février 2012 – accepté le 29 Septembre 2012)

**Résumé** – Les habitants des régions sahariennes, malgré la faible densité de la population, doivent bénéficier de certaines commodités socio économiques pour éviter une migration vers les grands centres urbains. Cependant, les besoins pour l'approvisionnement en eau domestique, l'irrigation des récoltes et l'abreuvement des animaux augmentent en fonction de la croissance de la population. En l'absence des eaux de surface, les eaux souterraines localisées dans les couches aquifères semblent être la seule alternative à ce dilemme, mais difficile pour le pompage manuel et animal. La préservation des écosystèmes dans ces régions sahariennes ne peut être obtenue qu'avec la fixation de la population dans leurs régions par les moyens de l'amélioration et le développement de leur niveau de vie. Le développement socio-économique de ces régions est très lié à deux facteurs principaux qui sont la présence de l'eau et la disponibilité de l'énergie. Dans ce contexte, les énergies renouvelables de part leur fiabilité et leurs caractères non polluants, peuvent contribuer grandement au développement de ces régions éloignées. Le fonctionnement des systèmes photovoltaïques (PV) dépendent de plusieurs paramètres, appelés grandeurs d'influence entre autres, l'irradiation globale sur le plan des modules PV, la température des modules PV, etc. L'irradiation solaire varie donc selon la position géographique du site, les saisons, et l'angle d'inclinaison du générateur par rapport à l'horizontale. Ce travail présente donc les méthodes d'estimation du potentiel énergétique solaire sur le plan des modules photovoltaïques pour différents angles d'inclinaison par rapport à l'horizontal avec une application dans un système de pompage de l'eau.

**Abstract** - The inhabitants of the Saharan regions despite, the low population density must be given certain socio-economic facilities to prevent migration to urban centers. However, the needs for domestic water supply, crop irrigation and watering the animals increase in the growth of the population. In the absence of surface water, groundwater aquifers located in seemed to be the only alternative to this dilemma, but difficult to pump manual and animal. Ecosystem conservation in the Saharan regions cannot be achieved with the determination of the population in their regions by means of the improvement and development of their living standards. The socio-economic development of these regions is closely related to two main factors are the presence of water and energy availability. In this context, renewable energy because of their reliability and their non-polluting, can contribute greatly to the development of these remote areas. The operation of photovoltaic (PV) depends on several parameters, called influence quantities include: the global irradiation in terms of PV modules, the temperature of PV modules, etc.. The solar radiation varies according to the geographical position of the site, the seasons and the tilt angle of the PV array. This work therefore presents methods for estimating solar energy potential in terms of PV modules for different angles of inclination with an application in a water pumping system.

---

\* bouzidi\_b@cder.dz

**Mots clés:** Système de pompage PV - Angle d'inclinaison - Générateur photovoltaïque - Rendement.

## 1. INTRODUCTION

La disponibilité de l'eau et la capacité d'y accéder sont les questions clés se posant à la population vivante dans les régions sahariennes. Malgré la faible densité de la population (Fig. 1), ces régions doivent avoir à leur disposition un minimum de commodités afin d'éviter ou de limiter l'exode vers les grands centres urbains, plus particulièrement les chefs-lieux de wilaya.

Cependant, avec cette sédentarisation recherchée, les besoins en eau domestique, l'irrigation des récoltes et l'abreuvement des animaux augmentent en fonction de la croissance de la population. En l'absence des eaux de surface, les eaux souterraines localisées dans les couches aquifères semblent être la seule alternative à ce dilemme, mais difficile pour le pompage manuel et animal. Les eaux souterraines constituent donc une source importante pour l'approvisionnement en eau potable et l'irrigation dans ces régions sahariennes.

La préservation des écosystèmes dans ces régions sahariennes ne peut être obtenue qu'avec la fixation de la population dans leurs régions par les moyens de l'amélioration et le développement de leur niveau de vie. Ce développement socio-économique de ces régions est très lié à deux facteurs principaux qui sont la présence de l'eau et la disponibilité de l'énergie [1].

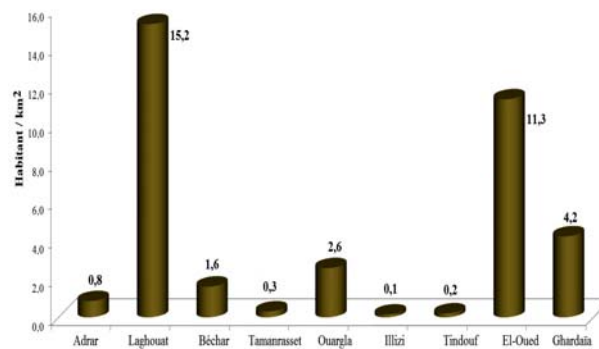


Fig. 1: Densité de la population de certaines régions sahariennes [2]

Le pompage d'eau mécanisé devient la seule alternative fiable pour soulever l'eau à une certaine profondeur. En l'absence du réseau conventionnel, les groupes électrogènes diesel ont été traditionnellement utilisés pour satisfaire les besoins électriques de la population notamment le pompage de l'eau. En outre, leur fonctionnement nécessite un volume important de carburant lorsqu'il est disponible et la plupart du temps ramené à de grandes distances. Leur maintenance, entretien ainsi que leur réparation exigent des techniciens compétents, disponibles et disposant de pièces de rechange. Ce qui n'est pas toujours le cas, notamment dans les régions isolées.

D'un autre côté, l'utilisation de ce type de système cause les rejets de gaz à effet de serre dans l'atmosphère accroissant ainsi le niveau de la pollution et de nuisance pour l'environnement en plus de la pollution des eaux souterraines et du sol par le carburant et les lubrifiants. Par contre, les énergies renouvelables, peuvent constituer des énergies

de substitution tout à fait réalistes de par leur fiabilité et leur faible impact sur l'environnement.

En l'absence des moyens d'exhaure fiables, les énergies renouvelables plus particulièrement l'énergie solaire photovoltaïque (PV), constitue la solution la plus appropriée pour satisfaire les besoins énergétiques de la population. Les performances des systèmes d'énergie solaire photovoltaïques dépendent essentiellement des conditions météorologiques, du générateur PV, du système de conditionnement de puissance, du sous-système de pompage (groupe motopompe) et du réservoir de stockage.

## 2. POTENTIEL ENERGETIQUE DE LA REGION D'ADRAR

Située dans le Sud-ouest de l'Algérie (27°52' N, 0°17' O), Adrar occupe une superficie de 427 368 km<sup>2</sup>, une population de 422 331 habitants, [2] et une très faible densité de la population estimée à 0.98 habitant/km<sup>2</sup> [2]. L'agriculture, l'artisanat traditionnel, ainsi que l'activité de troc avec les pays voisins (Mali, Niger), constituent la base de l'économie de la région. En raison du niveau de vie très faible, la majorité de la population pratique une culture de subsistance. Le reste de la production agricole est commercialisé au niveau des marchés locaux.

Les cours d'eau qui descendent vers l'Atlas Saharien font partie de la plus grande réserve d'eau au monde. Ils forment une nappe phréatique dite la nappe de l'albien, qui constitue selon certaines estimations la plus grande réserve d'eau douce au monde, elle est enfouie sous le sable du désert algérien sur une superficie totale estimée à 900 000 km<sup>2</sup> [3, 4] (Fig. 2).

La région d'Adrar a par ailleurs de grandes réserves hydriques constituées de la nappe du continental intercalaire, font que l'agriculture pourra être développée à grande échelle avec des puissances électriques modérées. Donc les atouts de la région d'Adrar sont liés pour l'essentiel à une vocation agricole, avec un potentiel en sols irrigables très importants, un énorme potentiel d'énergie solaire, et enfin un aquifère considérable de la nappe du continental intercalaire.

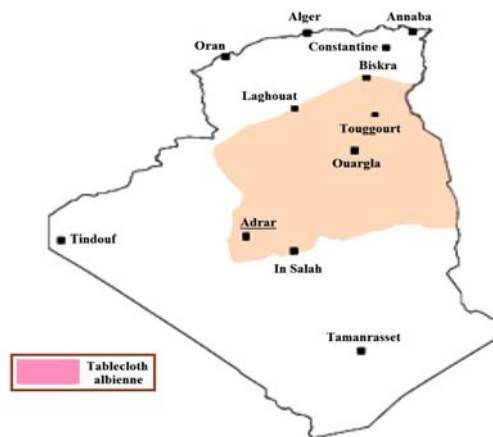


Fig. 2: Extension du bassin aquifère de l'albien [3]

La région d'Adrar dispose d'un gisement solaire très appréciable. L'exploitation de cette ressource énergétique inépuisable peut satisfaire les besoins en énergie de la population. La majorité des villages ou Ksars constituant la wilaya d'Adrar, pourraient être considérée comme des sites isolés en raison de l'immense superficie et leur éloignement les uns aux autres en plus des conditions climatologiques extrêmement difficiles.

En nous basant sur les données de l'irradiation globale horaire sur une surface horizontale, nous pouvons voir sur la figure 3 que la région d'Adrar présente une moyenne annuelle journalière supérieure à 5.7 kWh/m<sup>2</sup>/j.

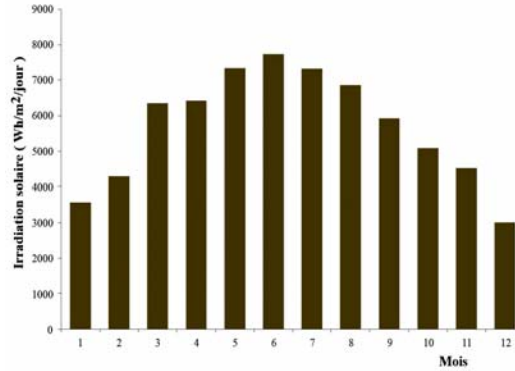


Fig. 3: Irradiation moyenne journalière mensuelle dans la région d'Adrar [5]

La figure 3, montre que la période hivernale présente moins de potentiel solaire dont l'irradiation globale moyenne mensuelle journalière varie entre 3 kWh/m<sup>2</sup>/j et 4 kWh/m<sup>2</sup>/j. L'irradiation solaire devient très importante entre les mois de mars et octobre où l'irradiation globale moyenne mensuelle journalière varie de 5.5 kWh/m<sup>2</sup>/j à 7.5 kWh/m<sup>2</sup>/j.

L'énergie produite par le générateur PV dépend du rayonnement solaire incident sur le plan des modules PV. Le rayonnement solaire global horaire sur un plan incliné sera estimé en se basant sur les données du rayonnement global horaire sur un plan horizontal. Comme un ajustement de l'angle d'inclinaison du générateur PV puisse avoir un apport énergétique très important, une estimation du rayonnement global pour différents angles d'inclinaison est effectuée en utilisant des variations mensuelle et trimestrielle.

Dans cette étude, le rayonnement diffus est considéré comme isotrope, le rayonnement arrivant sur une surface inclinée se décompose alors en trois parties: le rayonnement diffus de la voûte céleste, le rayonnement direct, et l'albédo. Le pas de temps pour le calcul de tous les paramètres est l'heure.

## 2.1 Détermination des différents types de rayonnement sur une surface horizontale

Le rayonnement extraterrestre à la limite supérieure hors atmosphère, sur une surface horizontale, est calculé à partir de la constante solaire  $G_{sc}$  et du facteur de correction de la distance [5].

$$G_0 = G_{sc} \times \left( 1 + 0.033 \times \cos \frac{2\pi \times n}{365} \right) \times \cos \theta_z \quad (1)$$

Avec,

$$\cos \theta_z = \cos \varphi \times \cos \delta \times \cos \omega + \sin \varphi \times \sin \delta$$

$\delta$  étant la déclinaison solaire, sa valeur en degré est donnée par l'équation de Cooper (1969) [6].

$$\delta = 23.45 \sin \left( 2\pi \times \frac{284 + n}{365} \right) \quad (2)$$

Pour la suite des calculs (détermination des rayonnements diffus et direct sur un plan horizontal), il est nécessaire de faire intervenir les données réelles d'ensoleillement en  $\text{Wh/m}^2$  sur un plan horizontal (irradiation globale horaire sur un plan horizontal).

Le rayonnement global horaire  $G_{g,h}(0)$  sur un plan horizontal peut être divisé en une composante diffuse  $G_{df,h}(0)$  et une composante directe  $G_{d,h}(0)$ . La composante diffuse du rayonnement global sur un plan horizontal se calcule à partir de la corrélation existante entre la fraction diffuse,  $K_d$  et l'indice de clarté de l'atmosphère,  $K_t$  [7] (Fig. 4).

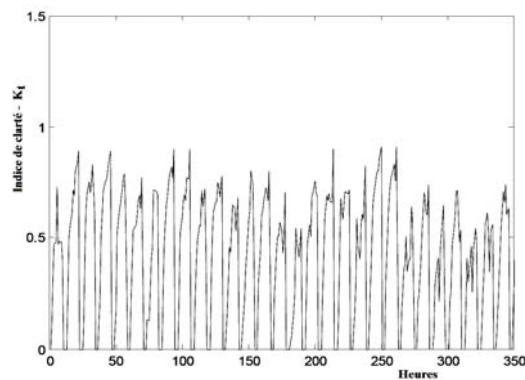


Fig. 4: Indice de clarté, au mois de Janvier – Adrar

La fraction diffuse et l'indice de clarté sont définis respectivement par les relations suivantes.

$$K_d = \frac{G_{df,h}(0)}{G_{g,h}(0)} \quad (3)$$

$$K_t = \frac{G_{g,h}(0)}{G_{0,h}(0)} \quad (4)$$

Au vu des conclusions de l'étude effectuée par Hamidat [7], le modèle de Macagnan [8] a été adopté pour déterminer en fonction de l'indice de clarté, la fraction diffuse et donc le rayonnement diffus sur un plan horizontal.

La corrélation est donnée comme suit:

$$\begin{aligned}
 K_t < 0.18 & \rightarrow K_d = 0.942 \\
 0.18 \leq K_t \leq 0.79 & \rightarrow K_d = 0.974 + 0.326 \times K_t - 3.896 \times K_t^2 + 2.66 \times K_t^3 \\
 K_t > 0.79 & \rightarrow K_d = 0.115
 \end{aligned}$$

(5)

Une fois la composante diffuse déterminée, la composante directe est déduite de la relation suivante:

$$G_{d,h}(0) = G_{g,h}(0) - G_{df,h}(0) \quad (6)$$

## 2.2 Détermination des différents types de rayonnement sur un plan incliné (plan du générateur photovoltaïque)

Afin de calculer le rayonnement global reçu par les modules du générateur incliné avec un angle d'inclinaison  $\beta$  par rapport à l'horizontal, la relation de Duffie *et al.*, (1991) [5] a été utilisée.

$$G_{g,h} = G_{d,h} + G_{df,h} + G_{r,h} \quad (7)$$

Le rayonnement direct sur un plan incliné est égal:

$$G_{g,h} = G_{d,h}(0) \times \left( \frac{\cos(\varphi - \beta) \times \cos \delta \times \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \times \sin \delta}{\cos \varphi \times \cos \delta \times \cos \omega + \sin \varphi \times \sin \delta} \right) \quad (8)$$

Le rayonnement diffus sur un plan incliné est égal:

$$G_{df,h} = G_{df,h}(0) \times \frac{(1 + \cos \beta)}{2} \quad (9)$$

Le rayonnement réfléchi est égal:

$$G_{r,h} = G_{g,h}(0) \times \rho_b \times \frac{(1 - \cos \beta)}{2} \quad (10)$$

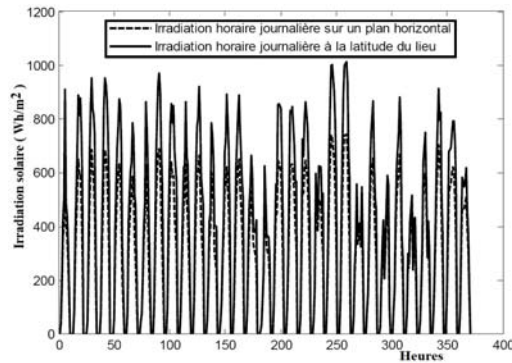


Fig. 5: Irradiation horaire globale sur un plan horizontal et sur le plan du générateur (inclinaison égale à la latitude du lieu) – Janvier - Adrar

Les figures 5 et 6 montrent respectivement l'importance de l'irradiation globale horaire sur le plan du générateur photovoltaïque (angle d'inclinaison égal à la latitude du site) et avec un angle d'inclinaison optimal ( $55^\circ$  pour le mois de Janvier) par rapport

à l'irradiation globale horaire reçue par le générateur photovoltaïque avec un angle d'inclinaison égal à la latitude du lieu ( $27^\circ$ ) sur le plan horizontal.

Nous pouvons remarquer que certaines valeurs de l'irradiation dépassent  $1000 \text{ Wh/m}^2$  pour le mois de Janvier, considéré comme le mois le plus défavorable.

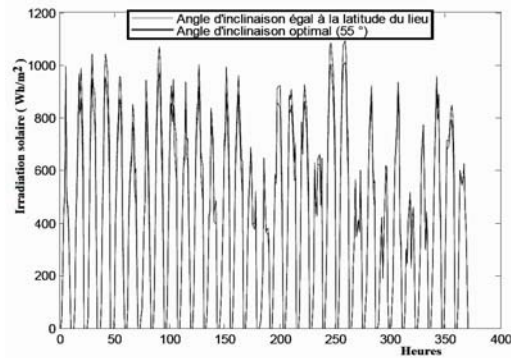


Fig. 6: Irradiations globales horaires sur les plans du générateur PV ( $\beta$  égal à la latitude du lieu) et (angle d'inclinaison optimal) – Janvier – Adrar

La figure 7 montre l'effet de la variation de l'angle d'inclinaison du générateur photovoltaïque sur l'irradiation reçue. Nous pouvons remarquer qu'une inclinaison mensuelle permet d'avoir une quantité d'irradiation reçue par le générateur PV supérieure à celle reçue par un générateur PV dont l'angle d'inclinaison est constant et égal à la latitude du lieu.

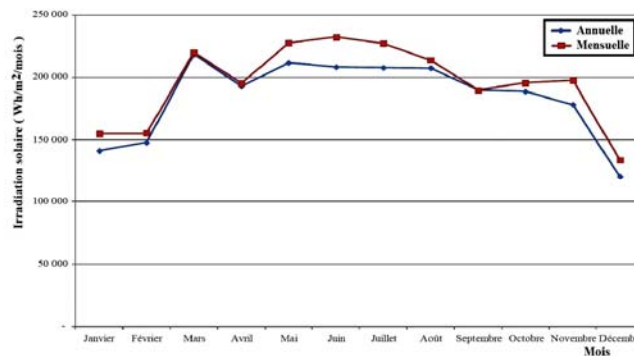


Fig. 7: Effet de la variation de l'angle d'inclinaison du générateur PV

Le **Tableau 1**, ci-après donne les angles d'inclinaison permettant d'avoir une meilleure quantité d'irradiation reçue sur le plan du générateur PV.

### 3. APPLICATION A UN SYSTEME DE POMPAGE D'EAU

Les systèmes photovoltaïques de pompage de l'eau sont utilisés principalement dans deux types d'application: l'approvisionnement en eau des villageois et l'irrigation de petits périmètres. La majorité des systèmes installés tombent dans la première catégorie, bien qu'une nette tendance soit perceptible vers l'implantation de systèmes appartenant

à la seconde catégorie. De nombreuses installations produisent de l'eau qui est utilisée pour ces deux fins.

Afin de satisfaire les besoins en eau des consommateurs des régions isolées, le système photovoltaïque de pompage, similaire à celui de la figure 8 est proposé [9].

**Tableau 1:** Mois et angle d'inclinaison optimal correspondant

Mois	Angle (°)	Mois	Angle (°)
Janvier	55	Juillet	0
Février	45	Août	10
Mars	35	Septembre	25
Avril	15	Octobre	45
Mai	0	Novembre	55
Juin	0	Décembre	55

Il se compose d'un champ de modules photovoltaïques, dont l'angle d'inclinaison est ajusté manuellement, un bloc onduleur PWM (avec MPPT inclus) transforme chaque point de fonctionnement de la charge ( $I_1, V_1$ ), au point de fonctionnement approprié du générateur photovoltaïque ( $I_{mp}, V_{mp}$ ) et convertit la tension continue en une tension triphasée pour alimenter correctement le groupe motopompe. Le groupe motopompe du type submersible est défini selon les exigences du débit et de la hauteur manométrique totale. Et enfin le réservoir de stockage dont la capacité nominale dépend des besoins journaliers et de la fiabilité du système.

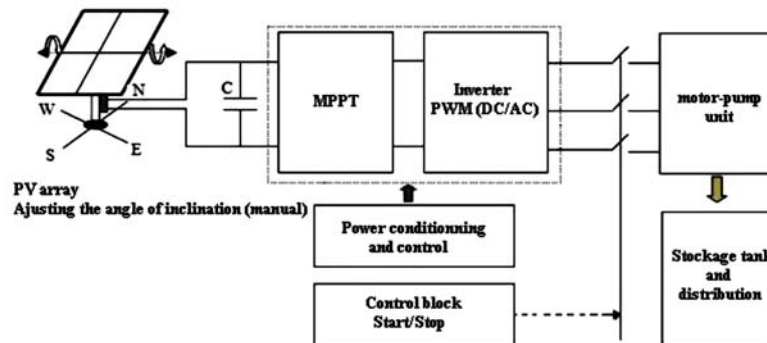


Fig. 8: Schéma synoptique d'un système photovoltaïque de pompage d'eau proposé

Après avoir calculé, le dimensionnement optimal du système photovoltaïque pour satisfaire un besoin journalier de la population de  $60 \text{ m}^3/\text{j}$  et une hauteur de pompage de 45 m, nous représentons dans ce qui suit la quantité d'eau que pourrait produire le système. Le groupe motopompe est sélectionné sur la base du besoin et des caractéristiques de la source d'eau. La figure 9 montre la quantité d'eau pouvant être produite par le système PV de pompage.

Sur cette figure, nous remarquons que la variation mensuelle de l'angle produit une quantité plus importante que les variations trimestrielle et annuelle (angle d'inclinaison égale à la latitude du lieu).

Le **Tableau 2** présente les quantités d'eau produites pour les différentes variations de l'angle d'inclinaison. Avec une variation mensuelle, le système produit 06 % de plus



qu'avec un angle d'inclinaison constante durant toute l'année et égal à la latitude du lieu.

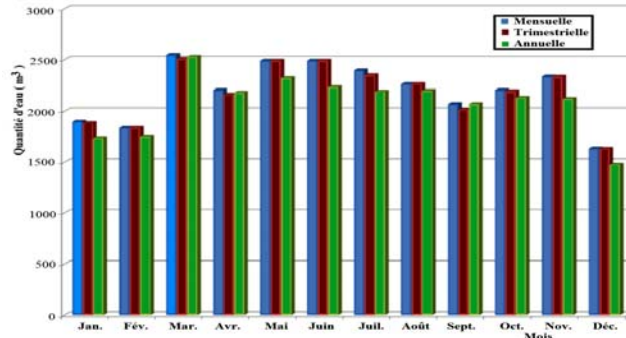


Fig. 9: Quantité d'eau produite par le système

Tableau 2: Quantités d'eau produites

Variation	Mensuelle	Trimestrielle	Annuelle
Quantité (m³/an)	26380	26161	24935

La figure 10 montre un organigramme simplifié pour l'estimation de l'irradiation horaire globale sur le plan du générateur, ainsi que le volume d'eau produit par le système de pompage [9].

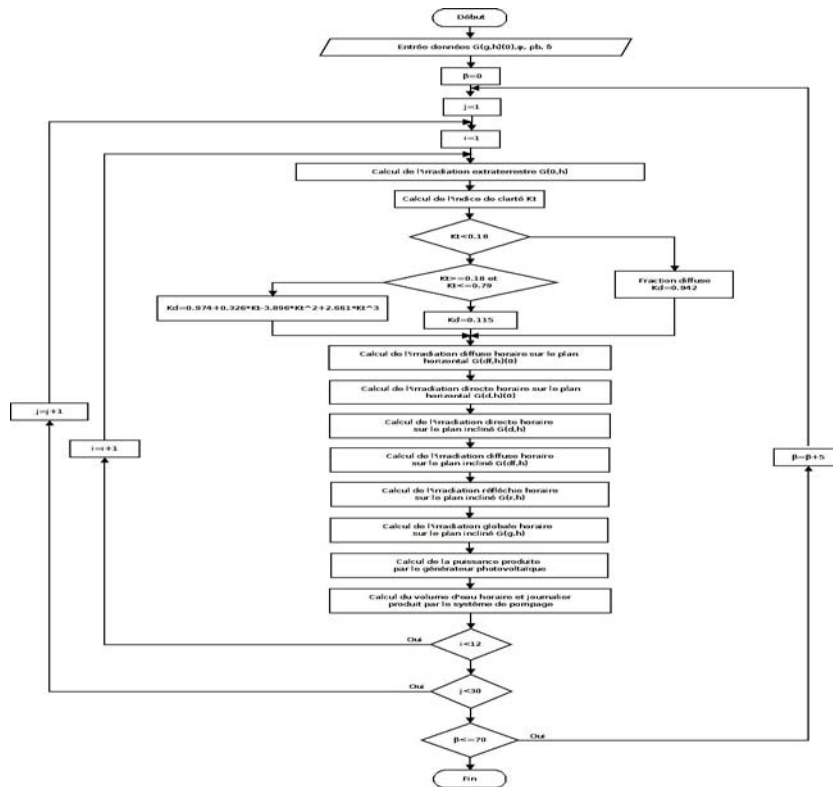


Fig. 10: Organigramme simplifié pour l'estimation de l'irradiation horaire globale sur le plan du GPV et de la quantité d'eau produite

#### 4. CONCLUSION

Les régions sahariennes d'Algérie occupent plus de 80 % de la superficie totale du pays et dans lesquelles une population considérée importante y vit, malheureusement confrontée à un problème majeur: la disponibilité de l'eau et la capacité de lui accéder. Le paradoxe est que ces régions ont un climat très approprié à l'utilisation des systèmes d'énergie solaire photovoltaïque et plus particulièrement les systèmes de pompage d'eau; faible demande, caractéristique de la source d'eau convenable, très bon ensoleillement.

A cet effet, les systèmes de pompage par énergie solaire photovoltaïque pourront d'une manière effective améliorer les conditions de vie de la population dans ces régions désertiques par la satisfaction des différents besoins en eau pour la consommation domestique et la valorisation des terres agricoles et de ce fait, lutter contre la désertification et le chômage.

D'autre part, améliorer le rendement des systèmes de pompage d'eau reste l'objectif majeur des travaux de recherche menés à ce jour. Si pour certains équipements leur amélioration semble difficile tellement leur développement a atteint un stade très avancé. Par contre, il existe d'autres moyens pour optimiser tant soit peu la production de ces systèmes entre autres, l'inclinaison du générateur PV, paramètre important dans la conception des systèmes.

#### NOMENCLATURE

---

$\beta$ : Angle d'inclinaison du générateur ( $^{\circ}$ )	$n$ : Numéro du jour de l'année
$\varphi$ : Latitude du lieu ( $^{\circ}$ )	$G_{sc}$ : Constante solaire ( $1367 \text{ W/m}^2$ )
$K_d$ : Fraction diffuse	$K_t$ : Indice de clarté
$\omega$ : Angle horaire ( $^{\circ}$ )	$\rho_b$ : Albédo du lieu d'installation
$G_{df,h}(0)$ : Rayonnement diffus horaire sur un plan horizontal, ( $\text{Wh/m}^2$ )	
$G_{g,h}(0)$ : Rayonnement global horaire sur un plan horizontal, ( $\text{Wh/m}^2$ )	
$G_{0,h}(0)$ : Rayonnement horaire extraterrestre, ( $\text{Wh/m}^2$ )	

---

#### REFERENCES

- [1] R. Maouedj, 'Application de l'Energie Photovoltaïque au Pompage Hydraulique sur les Sites de Tlemcen et de Bouzaréah', Mémoire de Magister, Université Abou Bakr Belkaïd, Tlemcen, Algérie, Décembre 2005.
- [2] <http://www.ons.dz>
- [3] F.Z. Kédaid, 'Les Perspectives d'Utilisation de l'Energie Géothermique au Sud de l'Algérie', Bulletin des Energies Renouvelables, N°5, Juin 2004.
- [4] A. Fekraoui and F.Z. Kédaid, 'Geothermal Resources and Uses in Algeria: A Country Update Report', Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24-29 April 2005

- [5] J.A. Duffie and W.A. Beckman, '*Solar Engineering of Thermal Processes*', 2<sup>nd</sup> Edition, New York, USA: John Wiley & Sons, Inc, 1991.
- [6] M. Capderou, '*Atlas Solaire de l'Algérie*', Office des Publications Universitaires, Tome 1 et 2 – Algérie 1986.
- [7] A. Hamidat, '*Simulation des Systèmes de Pompage Photovoltaïques Destinés pour l'Alimentation en Eau Potable et pour la Petite Irrigation*', Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, Algérie, 2004.
- [8] M.H. Macagnan, '*Caracterización de la Radiación Solar por Aplicaciones Fotovoltaicas en el Caso de Madrid*', Tesis Doctoral, E.T.S.I de Telecommunication. Universidad Politécnica de Madrid, pp. 194, 1993.
- [9] B. Bouzidi, '*Contribution à l'Amélioration du Pompage d'Eau par les Energies Renouvelables*', Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, Décembre 2010