

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : **Électrotechnique**
Spécialité : **Énergie et environnement**

Présenté par :
Hadj boussada Mouloud
Moad Mohammed El Mahdi

Thème

**Etude de l'influence des paramètres
physiques sur les caractéristiques
électriques d'un panneau photovoltaïque**

Soutenu publiquement, le 01/ 10 / 2020 , devant le jury composé de :

| | | | |
|----------------------|------------|---------------|----------------------|
| Mr. F. Boukli-Hacène | MCA | ESSA. Tlemcen | Président |
| Mr. M. Mebrouki | MCA | ESSA Tlemcen | Directeur de mémoire |
| Mr. A. Tahour | Professeur | ESSA Tlemcen | Examinateur |
| Mr. L. Merad | MCA | Univ. Tlemcen | Examinateur |
| Mr. A. Kerboua | MCB | ESSA Tlemcen | Invité |

Année universitaire : 2019 /2020



Abréviations

TSV : Temps solaire vrai en heure
TU : Temps universel du méridien de Greenwich (GMT)
UV : Ultra-violet
IR : Infra-rouge
PV : Photovoltaïque
IET : Insolation extraterrestre
STC : Standard Test Condition
 I_0 : Constante solaire.
 K_T : Indice de clarté.
 H_{tm} : Rayonnement solaire au sol (mesuré)
 H_0 : Rayonnement extraterrestre.
 S_0 : Durée du jour
I : Irradiation directe
D : Irradiation diffuse
 E_p : Énergie produite
 E_c : Énergie consommée
K : Coefficient d'incertitude météorologique
 P_c : Puissance consommée
 I_r : Irradiation
 N_m : Nombre de panneaux.
 E_u : Énergie utile.
 E_m : Énergie du module.
 N_{ms} : Nombre de modules en série
 T_{fr} : Tension de régulateur utilisé
 V_{max} : Tension max du module.
 N_{Bp} : Nombre de banches en parallèle.
 N_M : Nombre totale des modules.
 N_{ms} : Nombre totale des modules en série.
 C_{ap} : Capacité totale des batteries.
 Aut : Autonomie du système.
 C_{Bat} : Capacité d'une batterie.

I_e : courant d'entrée.

I_{module} : Courant d'un module.

I_s : Courant de sortie.

P_c : Puissance des récepteurs.

U_{charge} : Tension d'alimentation.

DC : Direct courant.

ω_{sr} : Angle horaire au lever du soleil en radian.

H_{tc} : Insolation solaire calculée.

Résumé

Ce mémoire a pour objectif de présenter un modèle d'estimation de l'insolation solaire sur un plan horizontal au niveau de la mer, pour différents sites en Algérie. L'estimation de l'insolation solaire peut être exploitée dans une étude de dimensionnement basée sur des données réelles mesurées sur six sites du pays (Alger Constantine, Oran, Djelfa, Mascara, et Tamanrasset). Un modèle d'estimation sur Matlab est présenté en fin de ce mémoire, avec une comparaison entre les résultats obtenus par celui-ci et ceux obtenus par d'autres modèles ; ce qui nous permet d'évaluer ses performances (rapidité, résultats, données nécessaires... etc)

Abstract

In this dissertation we present an estimation model of solar insolation on a flat plane at the sea level for six sites in Algeria land. The goal is to achieve a sizing study based on real data extracted from those sites (Alger Constantine, Oran, Djelfa, Mascara, et Tamanrasset), which are used to develop a model on Matlab. At the end, we present our model along with results and comparisaons with other methods in order to evaluate its performance (rapidity, accuracy, data,etc).

Dédicaces

Je dédie ce travail aux personnes les plus chères à mon cœur :

À mes très chers parents

Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être

Ma mère

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre prière, bénédiction m'accompagne toujours. Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez. Je vous dédie ce travail en témoignage de mon profond amour, puisse Dieu, le très haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive. Sans oublié mon autre amour, mon héro la raison que je suis là, mon très cher papa j'aurais tant aimé que vous soyez présente. Que Dieu ait votre âme dans sa sainte miséricorde.

À mon très cher frère Nouredine

En témoignage de l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour toi, je te dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite dans ta vie.

À mes très chères sœurs Saida, Fatima

Veillez trouver dans ce travail un modeste témoignage de mon admiration et toute ma gratitude, de mon affection la plus sincère et de mon attachement le plus profond. Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite. Je vous aime fort.

À mes grands pères et mes oncles et à toute la famille de Moad et Kafi.

A toute ma famille et mes amis de l'école ESSAT.

À cheikh Mohammed Abdelatif Belkaid et à toute la famille de Belkaid.

Je remercie également tous ceux qui ont contribué à ce travail de près ou de loin.

Moad Mohammed El Mahdi

Je dédie ce modeste travail à :

A mes parents

Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler.
Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

A mes frères, Yacine, Sofiane et ma sœur Souhila

A ceux que j'aime et m'aiment.

A tous mes amis, Kadirou, Riyadh, Nabil et son frère Nassime.

A toute ma famille et mes amis de l'école ESSAT et ESGEE.

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.

Hadj Boussada Mouloud

Remerciements

Avant tout, nous remercions ALLAH de nous avoir donné la force et le courage. Ce mémoire n'aurait pas été possible sans l'intervention, consciente, d'un grand nombre de personnes. Nous souhaitons les remercier. Nous remercions très chaleureusement Mr. M. Mebrouki et A. Kerboua qui nous ont permis de bénéficier de leur assistance. Les conseils et la patience qu'ils nous ont prodigués, ont été déterminants dans la réalisation de ce travail. Nous adressons aussi nos vifs remerciements aux membres de jury pour avoir bien voulu examiner et juger ce travail. Nous exprimons toutes nos reconnaissances et gratitude à l'administration et à l'ensemble du corps enseignant de notre école d'ingénieurs, ESSA-Tlemcen, pour leurs efforts à nous garantir la continuité et l'aboutissement de ce programme de Master. Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| Abréviations | iii |
| Résumé | v |
| Abstract | vi |
| Dédicaces | vii |
| Remerciements | ix |
| Table des matières | xi |
| Liste des figures | xiii |
| Introduction | 1 |
| 1 Généralités sur le rayonnement solaire | 3 |
| 1 Introduction | 3 |
| 2 Rayonnement solaire : | 3 |
| 2.1 Le soleil : | 3 |
| 2.2 Rayonnement extraterrestre et constante solaire | 3 |
| 2.3 Irradiation solaire | 4 |
| 2.4 Indice de clarté | 4 |
| 2.5 Durée d'insolation | 4 |
| 3 Mouvement de la terre autour du soleil | 5 |
| 3.1 Déclinaison du soleil δ | 5 |
| 3.2 Succession des saisons | 5 |
| 3.3 Angle horaire du soleil ω | 6 |
| 3.4 Coordonnées géographiques terrestres | 7 |
| 3.5 Coordonnées horizontales | 7 |
| 3.6 Diagramme solaire | 8 |
| 3.7 Durée d'un jour T_j | 9 |
| 4 Atmosphère terrestre | 10 |
| 4.1 La composition chimique de l'atmosphère terrestre : | 11 |
| 4.2 Formation de l'atmosphère | 12 |
| 4.3 Transmission du rayonnement solaire à travers l'atmosphère | 12 |
| 5 Conclusion | 15 |
| Bibliographie | 17 |
| 2 Dimensionnement d'une installation photovoltaïque | 19 |
| 1 Introduction : | 19 |
| 2 Dimensionnement d'un système photovoltaïque | 20 |
| 2.1 Les différents éléments d'un système photovoltaïque : | 20 |
| 3 Méthode de calcul des éléments de dimensionnement | 23 |
| 3.1 Détermination du nombre de panneaux photovoltaïques | 23 |

| | | |
|---|--|-----------|
| 3.2 | Détermination du nombre de batteries | 24 |
| 3.3 | Détermination du régulateur de charges | 25 |
| 3.4 | Détermination de la puissance de l'onduleur | 25 |
| 4 | Paramètres d'ensoleillement | 26 |
| 4.1 | La nébulosité | 26 |
| 4.2 | Durée d'ensoleillement | 26 |
| 4.3 | Taux d'ensoleillement | 26 |
| 5 | Méthodes d'estimation du rayonnement solaire | 27 |
| 5.1 | Méthodes atmosphériques | 27 |
| 5.2 | Méthodes utilisant les photos satellitaires | 28 |
| 5.3 | Méthodes expérimentales et statistiques | 28 |
| 5.4 | Modèles appliqués | 29 |
| 6 | Conclusion | 30 |
| Bibliographie | | 31 |
| 3 Méthode de calcul de l'insolation solaire sur un plan horizontal en présence des effets atmosphériques | | 33 |
| 1 | Introduction | 33 |
| 2 | Estimation du rayonnement solaire global sur un plan horizontal sur différents sites algériens | 33 |
| 2.1 | Sites étudiés | 33 |
| 2.2 | Données examinées | 34 |
| 3 | Présentation du modèle | 34 |
| 4 | Processus de modélisation | 36 |
| 5 | Modèle pour l'Algérie | 39 |
| 5.1 | Développement du Modèle sur Matlab | 41 |
| 6 | Résultats et discussion | 42 |
| 7 | Comparaison entre ce modèle et les méthodes citées dans le chapitre précédent . | 44 |
| 8 | Conclusion | 46 |
| Bibliographie | | 47 |
| Conclusion générale et perspectives | | 49 |

Liste des figures

- Figure (1.1) Position de la terre par rapport au soleil au cours de l'année
- Figure (1.2) Latitude et longitude d'un point M sur la surface de la terre.
- Figure (1.3) Azimut et hauteur du soleil par rapport à un observateur situé sur le plan horizontal.
- Figure (1.4) Le soleil dans son mouvement apparent (vu de la terre) change de trajectoire au cours de l'année : Il se lève et se couche chaque jour en des points différents de l'horizon mais suit des trajectoires parallèles entre elles.
- Figure (1.5) Exemple de traee d'un diagramme solaire.
- Figure (1.6) Diagramme solaire donnant l'évolution de la hauteur et de l'azimut du soleil pendant une journée.
- Figure (1.7) Durées du jour et de la nuit due à l'inclinaison de l'axe de rotation.
- Figure (1.8) Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire.
- Figure (1.9) Décomposition du rayonnement solaire en traversant l'atmosphère.
- Figure (2.1) : Système photovoltaïque.
- Figure (2.2) : Onduleur et son schéma de fonctionnement.
- Figure (2.3) : Types de batteries solaires.
- Figure (2.4) : Fonctionnement d'un régulateur de charge.
- Figure (2.5) : Caractéristiques d'un panneau PV.
- Figure (3.1) : Rayonnement mesuré et calculé à Alger et Constantine.
- Figure (3.2) : Rayonnement mesuré et calculé à Mascara et Djelfa.
- Figure (3.3) : Rayonnement mesuré et calculé à Oran et Tamanrasset.
- Figure (3.5) : Les insolation H_0 , H_{tc} et H_{tm} à Alger durant une année.
- Figure (3.6) : Les insolation H_0 , H_{tc} et H_{tm} à Constantine durant une année.
- Figure (3.7) : Les insolation H_0 , H_{tc} et H_{tm} à Djelfa durant une année.
- Figure (3.8) : Les insolation H_0 , H_{tc} et H_{tm} à Mascara durant une année.
- Figure (3.9) : Les insolation H_0 , H_{tc} et H_{tm} à Oran durant une année.
- Figure (3.10) : Les insolation H_0 , H_{tc} et H_{tm} à Tamanrasset durant une année.
- Figure (3.11) : Les insolation H_0 , H_{tc} et H_{tm} à Ainbessem durant une année.

Introduction

L'énergie est l'un des moteurs de développement des civilisations ; elle est le pilier de l'économie moderne. Dans ces dernières années, tous les pays du monde s'emploient à diversifier ses sources, dans le but de satisfaire les besoins continus de leurs populations dans tous les secteurs économiques [1].

Le choix des sources d'énergies renouvelables et non polluantes est donc d'actualité. Parmi les sources d'énergies renouvelables, on compte le vent, les flux marins et océaniques, la géothermie, le solaire (cellules photovoltaïques), etc. Ce dernier est la source d'énergie la plus puissante. En effet, la puissance du rayonnement solaire au niveau du sol peut atteindre $950 \text{ Watt}/\text{m}^2$. La conception et l'évaluation des performances des systèmes qui utilisent le rayonnement solaire comme source d'énergie, nécessitent la connaissance de la répartition du rayonnement solaire au sol. Hélas, les mesures du rayonnement solaire ne sont pas facilement disponibles pour plusieurs pays en voie de développement. Il est, cependant, important de développer des méthodes d'estimation du rayonnement solaire en utilisant le minimum de données météorologiques disponibles.

L'Algérie, terre de soleil par excellence, dispose d'un nombre d'heures d'ensoleillement de 2000 heures chaque année et qui peut aller jusqu'à 3900 heures sur les hauts plateaux et le Sahara, ce qui représente une moyenne élevée par rapport aux pays du monde. Son climat est donc très favorable pour l'utilisation de l'énergie solaire. C'est ce qui nous a amené à la nécessité d'entreprendre l'étude d'estimation du rayonnement solaire sur n'importe quel site dans ce territoire géographique vaste, en exploitant un minimum de données météorologiques disponibles dans le but d'assurer des études de dimensionnement fiables des installations photovoltaïques (PV).

Ce travail a pour but d'estimer le rayonnement solaire d'un site quelconque en Algérie à l'aide d'un modèle développé sur Matlab. Le présent mémoire se répartit en trois chapitres. Dans le premier chapitre, on passe en revue les notions liées aux différents phénomènes en relation avec l'évolution de la terre par rapport au soleil.

Le deuxième chapitre est consacré au dimensionnement des différents composants d'une installation photovoltaïque et à quelques méthodes d'estimation de l'insolation (ensoleillement) sur un plan horizontal surface de la mer. Le dernier chapitre est consacré à la présentation du modèle d'estimation de l'insolation solaire sur un plan horizontal d'un site quelconque en Algérie, développé sur Matlab, et aux comparaisons entre les résultats obtenus par ce modèle et ceux des méthodes cités dans le deuxième chapitre.

Chapitre 1

Généralités sur le rayonnement solaire

1 Introduction

L'exploitation de l'énergie solaire et l'optimisation de sa collecte par les systèmes photovoltaïques nécessitent une connaissance exacte de la distribution de l'irradiation solaire, qui est fonction de plusieurs paramètres géographiques, météorologiques et astronomiques, sur le lieu d'implantation de ce système. Ainsi, nous avons consacré ce chapitre pour donner des rappels sur l'énergie solaire, les différents paramètres qui influent sur l'intensité du flux solaire reçu au niveau du sol. Nous parlerons de certaines notions fondamentales concernant notre étoile (le soleil), l'origine de l'énergie qu'elle rayonne, la nature de cette énergie, ainsi que son atmosphère, ses zones, son effet sur le rayonnement solaire et la distribution de ce rayonnement au sol [1, 2].

2 Rayonnement solaire :

2.1 Le soleil :

Le soleil est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la terre. Sur le plan humain, le soleil a une importance primordiale car il est à l'origine de la vie sur terre, en lui fournissant d'énormes quantités d'énergie, qui permet la présence de l'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux. Le rayonnement solaire est aussi responsable du climat et des phénomènes météorologiques. Le soleil émet en permanence, dans toutes les directions de l'espace, des rayonnements électromagnétiques composés de « grains » de lumière appelés photons. Ces rayonnements (lumière) se propagent dans le vide à une vitesse $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$; il lui faut donc, en moyenne, 499 secondes, soit 8 minutes et 19 secondes, pour atteindre notre atmosphère [3].

2.2 Rayonnement extraterrestre et constante solaire

Le rayonnement solaire extraterrestre couvre un très large domaine de longueur d'ondes. Il ne dépend d'aucun paramètre météorologique, mais il est en fonction de quelques paramètres astronomiques et géographique tels que la déclinaison solaire et l'angle horaire au lever du soleil [4]. La valeur moyenne du flux solaire reçu par un plan perpendiculaire d'un mètre carré de surface et placé à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre est appelée constante solaire, notée I_0 . Cette valeur est déterminée à partir des mesures réalisées à l'aide de ballons, de fusées ou des satellites. La valeur moyenne annuelle est $I_0 = 1353 \text{ W/m}^2$ [5]. Cette valeur dépend de la distance Terre - Soleil, qui varie quelque peu au cours de l'année. Le tableau (1.1) indique

| Date du 1er | Flux solaire (W/m^2) | Écart relatif (%) |
|-------------|--------------------------|-------------------|
| Janvier | 1399 | +3.40 |
| Février | 1394 | +3.03 |
| Mars | 1379 | +1.92 |
| Avril | 1354 | +0.07 |
| Mai | 1333 | -1.48 |
| Juin | 1312 | -3.03 |
| Juillet | 1308 | -3.33 |
| Aout | 1329 | -1.77 |
| Septembre | 1312 | -3.03 |
| Octobre | 1350 | +0.22 |
| Novembre | 1373 | +1.48 |
| Décembre | 1392 | +2.88 |

TABLE 1.1 – Variation de la constante solaire selon les mois de l’année.

les valeurs de la constante solaire pour le premier jour de chaque mois, et l’écart relatif du flux solaire par rapport à la constante solaire [5].

2.3 Irradiation solaire

L’irradiation solaire exprime la quantité d’énergie reçue, au niveau du sol, par unité de surface. Ses unités usuelles sont le J/m^2 (J :Joule), J/cm^2 , Wh/m^2 (Wh : Watt-heure), ou encore kWh/m^2 . Elle dépend de nombreux facteurs, dont principalement la couverture nuageuse, la durée du jour, l’instant considéré dans la journée, l’orientation et l’inclinaison de la surface, la latitude du lieu, et son degré de pollution. La combinaison de tous ces paramètres produit la variabilité dans l’espace et dans le temps de l’irradiation solaire [4].

2.4 Indice de clarté

Le rapport entre le rayonnement solaire capté au sol et le rayonnement extraterrestre est appelé indice de clarté, défini par :

$$K_T = \frac{H_{tm}}{H_0} \quad (1.1)$$

où H_{tm} est le rayonnement solaire au sol (mesuré en présence de l’atmosphère) et H_0 le rayonnement extraterrestre (mesuré en absence de l’atmosphère). La moyenne mensuelle de l’indice de clarté K_T change selon les endroits et les saisons et varie généralement entre 0.3 (pour des régions ou des saisons pluvieuses) et 0.8 (pour des saisons ou des climats secs et ensoleillés) [6].

2.5 Durée d’insolation

La durée d’insolation correspond au nombre d’heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Ainsi, seuls les moments où le soleil est bien visible sont enregistrés. On parle alors de durée d’insolation réelle ou effective qui dépend du fait que le soleil levé soit visible d’un point d’observation ou caché par les nuages. En absence permanente de nuages, la durée d’insolation est pratiquement égale à la durée du jour.

3 Mouvement de la terre autour du soleil

Tournant sur elle-même une fois par jour, la terre met une année pour effectuer sa révolution autour du soleil (dont elle se situe à la distance moyenne de 150 millions de kilomètres), selon une trajectoire elliptique très proche d'un cercle (voir figure (1.1)). Le plan de cette trajectoire s'appelle plan de l'écliptique. Si l'axe de rotation de la terre était perpendiculaire au plan de l'écliptique, la durée du jour serait égale à celle de la nuit toute l'année en tout point de la surface de la terre. Mais l'axe terrestre est incliné d'environ 23 degrés par rapport à la perpendiculaire au plan de l'écliptique (cet angle s'appelle l'obliquité). À de très petites variations près, cette inclinaison de l'axe terrestre peut être considérée constante au cours de la révolution de la terre autour du soleil [7].

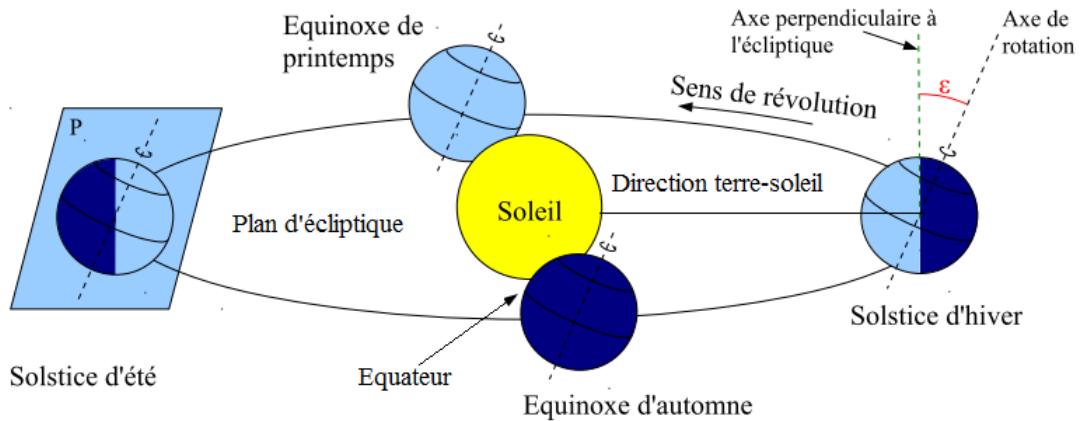


FIGURE 1.1 – Position de la terre par rapport au soleil au cours de l'année [8].

3.1 Déclinaison du soleil δ

On définit l'angle de déclinaison δ du soleil comme l'angle entre la direction du terre-soleil (droite reliant les centres des deux astres) et le plan équatorial (voir figure (1.1)). Cette déclinaison du soleil (exprimée en degrés($^{\circ}$)) évolue au cours de l'année en fonction de la position de la terre sur son orbite [5]. Elle traduit l'inclinaison du plan équatorial par rapport au plan écliptique.

En considérant la déclinaison δ comme constante sur une journée, l'équation de Kopernic fournit la relation qui relie ces deux grandeurs [6] :

$$\delta = 23,45 \left[\sin \left(\frac{2\pi(284 + n)}{365} \right) \right] \quad (1.2)$$

où n est le numéro du jour de l'année à partir du premier janvier.

La déclinaison solaire δ varie entre $-23^{\circ}27'$ au solstice d'hiver et $+23^{\circ}27'$ au solstice d'été et elle est nulle aux équinoxes [6]. Cette variation entraîne un changement de la position apparente du soleil pour un même site. En juin, l'hémisphère nord se trouve rapproché du soleil ; le soleil est plus haut sur l'horizon pour une même heure et la durée du jour est plus grande. L'irradiation journalière est ainsi automatiquement augmentée par rapport au solstice d'hiver, en décembre.

3.2 Succession des saisons

Au cours de sa révolution au tour du soleil, la terre change d'orientation par rapport à celui-ci, ce qui fait varier la position du soleil par rapport au plan de l'équateur. Considérons

le plan P sur la figure (1.1) qui contient l'axe de rotation de la terre et qui est perpendiculaire au plan de l'écliptique. Il existe 4 positions remarquables, en fonction de la position du soleil par rapport au plan P :

1. **Au solstice d'été 21 Juin** : La direction terre-soleil est contenue dans le plan P. Le soleil étant au-dessus de l'équateur, il a sa déclinaison maximale : $\delta = +\varepsilon = +23.26j$. En plus, le soleil est au zénith (90 de latitude) à midi à l'équateur. De même, le soleil est à la verticale du tropique du Cancer (23.5 latitude nord) (voir figure (1.1)).
2. **À l'équinoxe d'automne 21 septembre** : La direction terre-soleil est perpendiculaire au plan P. Le soleil est exactement dans le plan de l'équateur, sa déclinaison est nulle : $\delta = 0$.
3. **Au solstice d'hiver 21 décembre** : La direction terre-soleil est contenue dans le plan P. Le soleil étant en-dessous de l'équateur, il a sa déclinaison minimale : $\delta = -\varepsilon = 23.26j$. En plus, le soleil est au zénith (90 de latitude) à midi à l'équateur. De même, le soleil est à la verticale du tropique du Capricorne (23.5° latitude sud) (voir figure (1.1)).
4. **À l'équinoxe de printemps 21 mars** : La direction terre-soleil est perpendiculaire au plan P. Le soleil est exactement dans le plan de l'équateur, sa déclinaison est nulle : $\delta = 0$.

3.3 Angle horaire du soleil ω

L'angle horaire étant l'angle ou l'arc compté sur l'équateur dans le sens rétrograde à partir du plan vertical du lieu passant par le sud jusqu'au plan méridien passant par le centre du soleil. Il mesure la course du soleil dans le ciel. L'angle horaire définit le temps solaire vrai (TSV) (midi en TSV correspond à $\omega = 0$) [6]. Exprimée en degrés d'angle, sa valeur est nulle à midi solaire, négative le matin, positive en après-midi et augmente de 15° par heure (un tour de 360° en 24 heures). L'angle horaire ω (°) est donné par la formule suivante [6] :

$$\omega = 15(TSV - 12) \quad (1.3)$$

où TSV est le temps solaire vrai en heure, qui se calcule par l'équation suivante :

$$TSV = H_l - \Delta H_l + \Delta H_g - E \quad (1.4)$$

où H_l est l'heure locale (administrative), ΔH_l l'écart de l'heure locale par rapport à l'heure du méridien référence (Greenwich), ΔH_g le décalage horaire "géographique" dû à l'écart de longitude entre le méridien local et le méridien central du fuseau (avance de 4 minutes par degré de décalage de longitude vers l'est, et retard de 4 minutes par degré vers l'ouest) et E l'écart (en minutes) entre le temps moyen et le temps vrai de révolution en fonction du jour de l'année donné par une fonction

$$E = 9.87 \sin(2B) - 5.53 \cos(B) - 1.5 \sin(B) \quad (1.5)$$

avec

$$B = \frac{2\pi(284 + n)}{365} \quad (1.6)$$

La déclinaison δ et l'angle horaire du soleil ω sont appelés coordonnées horaires, lesquelles sont liées à l'heure de l'observation, et n'ont aucune relation avec la position d'un observateur sur la terre.

3.4 Coordonnées géographiques terrestres

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point M sur la surface de la terre [6], comme cela est représenté sur la figure (1.2). On cite :

Latitude φ

La latitude permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque à l'équateur. Elle varie de 0° à 90° dans l'hémisphère nord et de 0° à $\sim 90^\circ$ dans l'hémisphère sud.

Longitude λ

Elle est comptée positivement vers l'est et négativement vers l'ouest, à partir du méridien Greenwich.

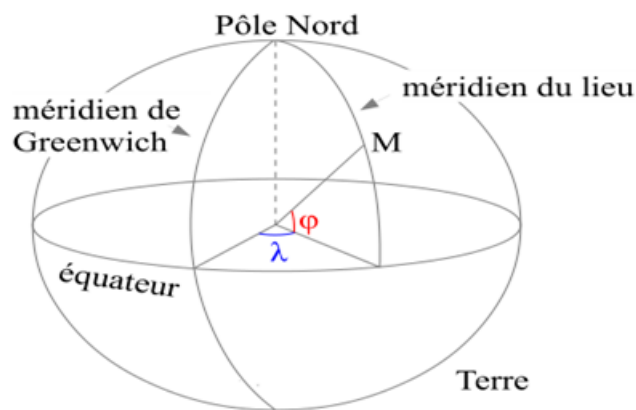


FIGURE 1.2 – Latitude et longitude d'un point M sur la surface de la terre [8].

3.5 Coordonnées horizontales

Pour repérer la position apparente du soleil dans le ciel, il est d'usage d'utiliser un système de coordonnées azimutales, défini en un point de la surface terrestre [11]. C'est un trièdre inverse dont les axes sont définis par :

- Ox vers le sud
- Oy vers l'ouest
- Oz vers le haut

Il est commode d'utiliser une sphère de rayon arbitraire en O et appelée sphère céleste. L'axe (Oz) coupe cette sphère en deux points : Le zénith (z positif) et le nadir (z négatif). La direction entre un manipulateur au centre de la sphère et un point sur la surface de la sphère (position apparente du soleil) est repérée grâce à deux angles :

Azimut a

L'azimut solaire a est l'angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre entre le point cardinal Sud (dans l'hémisphère nord) ou Nord (dans l'hémisphère sud) et la projection sur le plan horizontal local de la droite reliant la terre au soleil (voir figure (1.3)).

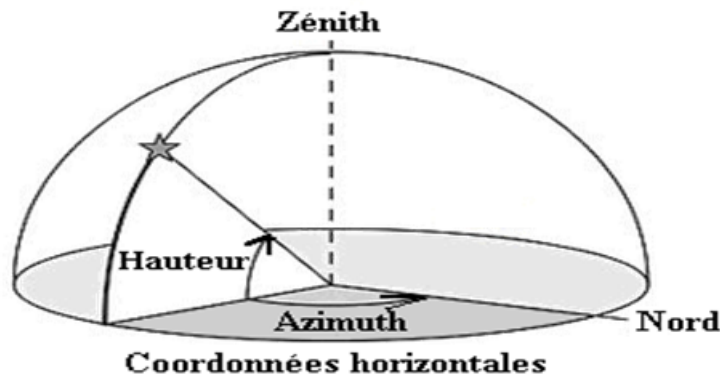


FIGURE 1.3 – Azimut et hauteur du soleil par rapport à un observateur situé sur le plan horizontal [8].

Hauteur h

La hauteur angulaire du soleil, communément appelée hauteur du soleil ou élévation du soleil, est l'angle h compris entre la direction apparente du soleil avec sa projection sur le plan horizontal du lieu considéré (voir figure (1.3)). Sa valeur est nulle au lever ou au coucher du soleil. La hauteur h varie au cours de la journée en fonction de la déclinaison δ , de l'angle horaire ω , et de la latitude du lieu φ , telle que :

$$\sin h = \cos \delta \cdot \cos \omega \cos \varphi + \sin \delta \sin \varphi \quad (1.7)$$

Il s'agit de la formule fondamentale, permettant de connaître la hauteur du soleil sur l'horizon pour un jour, une heure et un lieu donnés. La hauteur maximale du soleil (à midi solaire) pour un jour donné n et pour une latitude φ :

$$h_{\max} = \frac{\pi}{2} - \varphi + \delta(n) \quad (1.8)$$

3.6 Diagramme solaire

La connaissance détaillée de la position à tout instant du soleil dans le ciel quel que soit le point de vue situé sur la terre permet de bien comprendre et utiliser le positionnement d'un capteur solaire (ex. panneau solaire) pour une meilleure conversion du rayonnement solaire. Pour cela on utilise une représentation graphique de la course apparente du soleil (voir figure (1.4)) appelée diagramme solaire, qui n'est autre qu'une vue terrestre du mouvement du soleil à travers la voûte céleste.

Afin de réaliser le tracé du diagramme solaire, on doit relever toutes les hauteurs et tous les azimuts du soleil lors de ces trajectoires journalières sur une année à partir d'un même point d'observation. Ces mesures seront reportées sur un système de deux axes : les hauteurs sur l'axe verticale en allant de 0° (pour l'horizon) vers 90° (pour le zénith) et les azimuts sur l'axe horizontal (voir figure (1.5)). Par conséquent, la position du soleil à un moment donné dans le ciel est représentée par un point qui est l'intersection de deux droites, l'une verticale représentant la hauteur du soleil et l'autre horizontale représentant son azimut. En joignant les différentes localisations du soleil à divers moments de la journée, on obtient le tracé de la course du soleil.

Sur la figure (1.6) est présenté un diagramme solaire tracé à partir d'un point de latitude $\varphi = 43$ Nord.

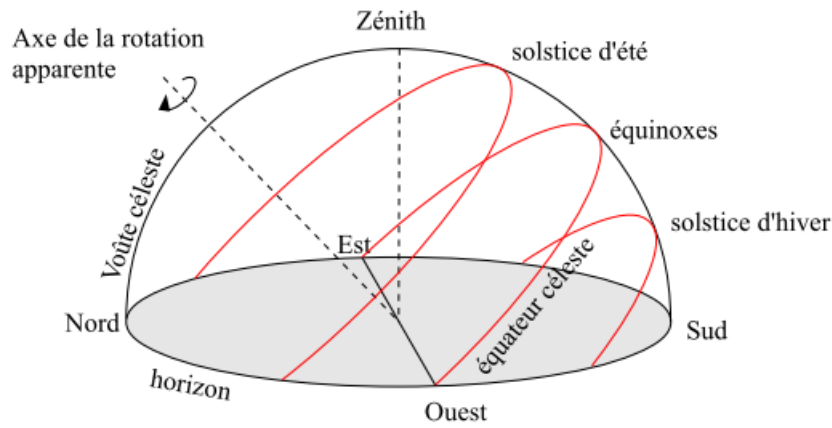


FIGURE 1.4 – Le soleil dans son mouvement apparent (vu de la terre) change de trajectoire au cours de l’année : Il se lève et se couche chaque jour en des points différents de l’horizon mais suit des trajectoires parallèles entre elles [8].

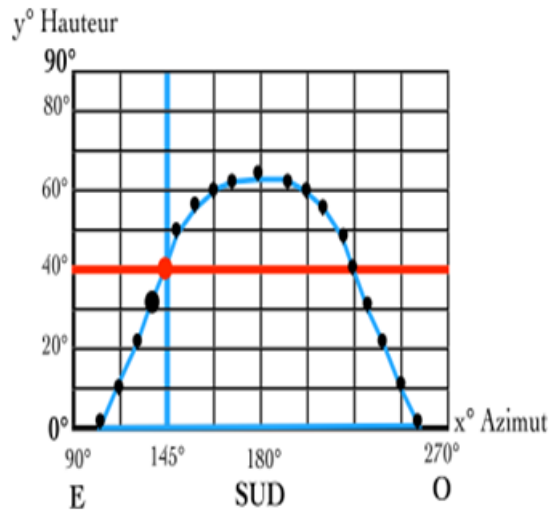


FIGURE 1.5 – Exemple de traçage d’un diagramme solaire [8].

3.7 Durée d’un jour T_j

La durée d’un jour j de l’année est par définition le temps pendant lequel le centre du disque solaire est apparent depuis un lieu situé sur un terrain plat à perte de vue (pas de masque à l’horizon, comme en mer). Le fait que l’axe terrestre soit incliné d’environ 23 degrés par rapport à la perpendiculaire au plan de l’écliptique rend la durée du jour dépendante du lieu et de la position de la terre sur son orbite (phénomène des saisons) (voir figure (1.7)).

Ainsi, de mars à septembre, la partie nord du globe voit le soleil plus haut à midi dans le ciel que la partie sud. Le soleil se lève plus tôt, se couche plus tard, et les jours sont de fait plus longs dans l’hémisphère nord que dans l’hémisphère sud où les rayons du soleil, plus inclinés, éclairent une plus grande surface, distribuant donc moins de chaleur par unité de surface. Ces effets sont d’autant plus prononcés que la latitude de l’observateur est grande. À l’équateur, l’effet est faible, et la durée du jour et de la nuit ne varie presque pas. Aux pôles, l’effet est extrême, si bien que le jour et la nuit y durent six mois chacun.

Pour une planète sphérique sans diffusion atmosphérique, on donne l’expression de la durée

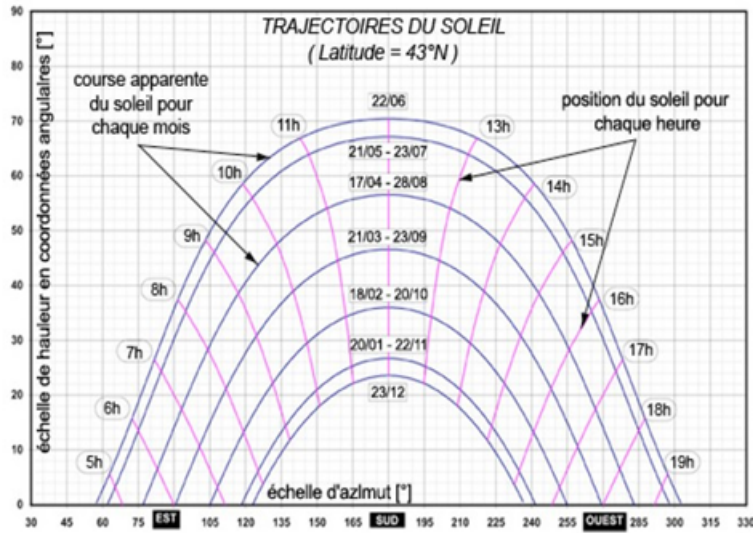


FIGURE 1.6 – Diagramme solaire donnant l'évolution de la hauteur et de l'azimut du soleil pendant une journée [8].

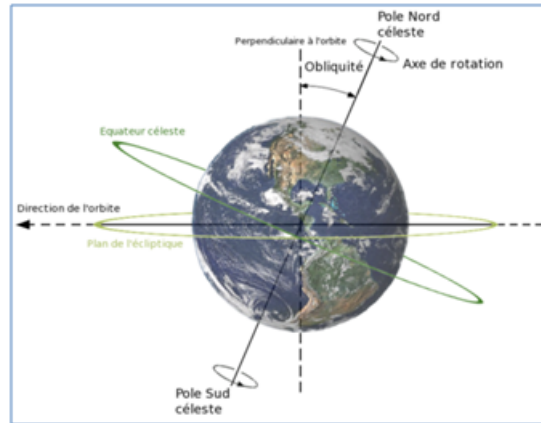


FIGURE 1.7 – Durées du jour et de la nuit due à l'inclinaison de l'axe de rotation [8].

du jour T_j pour une journée j de l'année comme (en heures)

$$T_j = 24 \left[1 - \frac{\arccos(\tan \delta \tan \lambda)}{\pi} \right] \quad (1.9)$$

où λ est la latitude du lieu considéré et δ la déclinaison du jour considéré. La valeur de la fonction \arccos doit être exprimée en radian. Aussi, la durée du jour j (d'insolation) peut être donnée par [4] :

$$T_j = 2 \frac{\omega_{srj}}{15} \quad (1.10)$$

où ω_{srj} est l'angle horaire au lever de soleil (sunrise) mesuré en degré(°) le jour j .

4 Atmosphère terrestre

L'atmosphère terrestre est l'enveloppe gazeuse entourant la terre que l'on appelle air. L'air sec se compose de 78,087% de di-azote, 20,95% de di-oxygène, 0,93% d'argon, 0,041% de

dioxyde de carbone et des traces d'autres gaz. L'atmosphère protège la vie sur terre en filtrant le rayonnement solaire ultraviolet, en réchauffant la surface par la rétention de chaleur (effet de serre) et en réduisant partiellement les écarts de température entre le jour et la nuit.

Les nuages qui sont liquides, parfois solides, ne sont pas considérés comme des constituants de l'atmosphère. En revanche la vapeur d'eau contenue dans l'air humide représente en moyenne 0,25% de la masse totale de l'atmosphère [3]. La vapeur d'eau possède la particularité notable d'être le seul fluide de l'atmosphère terrestre susceptible de changer rapidement de phase (glace, eau, vapeur), essentiellement en fonction de la température, et dont la concentration est très variable dans le temps et dans l'espace. La chaleur a tendance à faire monter l'air et son humidité, alors que la pression atmosphérique et la température diminuent avec l'altitude.

On a mis en évidence, dans l'atmosphère, un certain nombre de couches caractérisées par leur profil thermique vertical.

4.1 La composition chimique de l'atmosphère terrestre :

L'eau

Elle ne représente que 0,25% de la masse totale de l'atmosphère, ce qui en fait un constituant assez minoritaire. L'eau se rencontre essentiellement dans les premiers kilomètres de l'atmosphère. On la trouve sous forme de vapeur, et aussi sous forme liquide (dans les nuages, brouillards, etc) et solide (dans certains nuages) [4].

Gaz sec

On constate sur le tableau (1.2) [6], que l'atmosphère est constituée de trois gaz, l'azote, le di-oxygène et l'argon, qui représentent presque 100% du total; les autres gaz ne représentent chimiquement que des traces [4].

| Gaz constituants de l'air sec | Pourcentages en volume (%) |
|-------------------------------|----------------------------|
| Azote (N_2) | 78.09 |
| Di-oxygène (O_2) | 20.95 |
| Argon (Ar) | 0.93 |
| Dioxyde de carbone (CO_2) | 0.035 |
| Néon (Ne) | 1.8×10^{-3} |
| Hélium (He) | 5.24×10^{-4} |
| Krypton (Kr) | 1.0×10^{-4} |
| Hydrogène (H_2) | 5.0×10^{-5} |
| Xénon (Xe) | 8.0×10^{-6} |
| Ozone (O_3) | 1.0×10^{-6} |
| Radon (Rn) | 6.0×10^{-18} |

TABLE 1.2 – Constituants gazeux de l'atmosphère terrestre.

Aérosols

Ce sont des particules solides ou liquides (à l'exclusion des gouttelettes ou des cristaux d'eau) en suspension dans l'air. Certains aérosols sont d'origine naturelle, comme les cendres volcaniques, le pollen des fleurs, les spores de plantes ou les cristaux de sel marin; d'autres sont produits par l'activité humaine (rejets industriels).

La présence de ces aérosols dans l'atmosphère n'est pas anodine du tout : en effet, certains d'entre eux ont la propriété de faciliter la formation des gouttelettes d'eau ou des cristaux de glace qui forment les nuages.

4.2 Formation de l'atmosphère

L'atmosphère est constituée de trois grandes couches de caractéristiques différentes [4], et dont l'influence sur l'absorption des rayonnements solaires sur terre est donnée sur la figure 1.8.

1. La troposphère est comprise entre le sol et 16 km d'altitude ; dans cet intervalle la température et la pression décroît. La masse de la troposphère représente les trois quarts de la masse totale de l'atmosphère qui est de 5.1015 Tonne. L'air de la troposphère renferme de la vapeur d'eau, du gaz carbonique, des poussières et des cristaux de sel. C'est le siège des nuages, des pluies et des orages.
2. La stratosphère est la zone entre 16 et 65 km d'altitude. A sa limite supérieure, la stratopause, la pression n'est plus que de 1mbar. La stratosphère comprend des couches à différentes températures dont l'une, particulièrement riche en ozone, présente une température voisine de 0°C. Ce réchauffement est vraisemblablement dû à l'absorption partielle du rayonnement ultraviolet émis par le Soleil.
3. La mésosphère est comprise entre 55 et 80 km d'altitude. La pression n'est plus que de 10 – 2mbar à sa limite supérieure, appelée mésopause.
4. La thermosphère est la couche la plus haute. Dans cette couche, la température augmente avec l'altitude et peut atteindre environ 100°C. La thermosphère atteint des milliers de kilomètres d'altitude et disparaît graduellement dans l'espace.

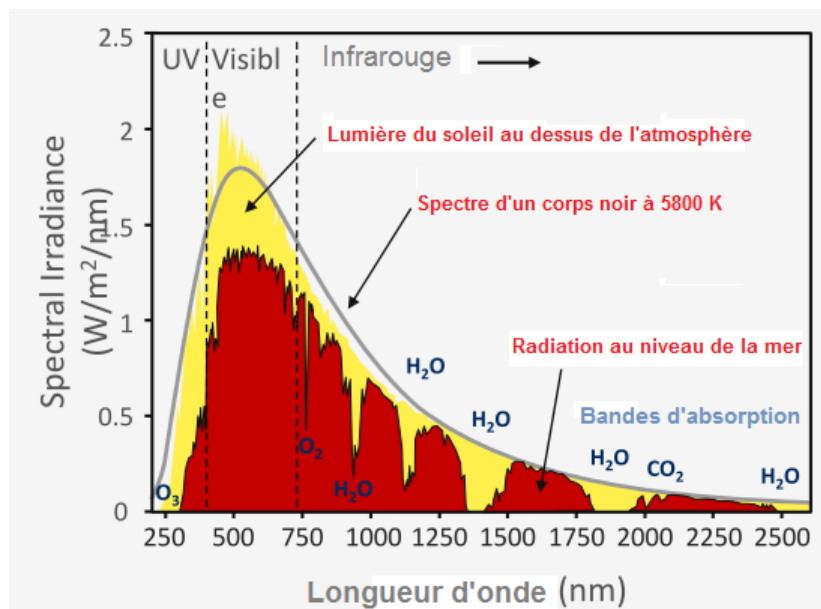


FIGURE 1.8 – Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire [8].

4.3 Transmission du rayonnement solaire à travers l'atmosphère

Au cours de la traversée de l'atmosphère [9], le rayonnement solaire, comme présenté dans la figure (1.8), peut être soit :

1. absorbé de façon sélective essentiellement par les gaz. Ce phénomène est particulièrement marqué dans :
 - a. l'ultraviolet en raison de la présence de l'ozone.
 - b. l'infrarouge ou existent de fortes bandes d'absorption par H_2O mais aussi O_2 , CO_2 , CO .

Les poussières et les aérosols sont également absorbants mais de façon moins sélective.

2. Diffusé : c'est l'effet le plus important dans la partie visible du spectre solaire. Deux cas doivent être envisagés selon la taille relative de la particule diffusante L , et de la longueur d'onde incidente λ :
 - a. Pour $L \ll \lambda$, le coefficient d'extinction est proportionnel à $\lambda/4$.
 - b. Pour $L \gg \lambda$, le coefficient d'extinction est donné par des formules beaucoup plus complexes.

Le rayonnement solaire provenant au sol peut se décomposer donc en deux parties :

1. Le rayonnement direct provenant directement du soleil.
2. Le rayonnement diffus, diffusé par les molécules, les poussières et les aérosols

On appelle I la puissance reçue en rayonnement direct par unité de surface normale aux rayons. L'éclairement dû au rayonnement diffus sur une surface horizontale est D . L'éclairement global H reçu par une surface horizontale est donné par [9] :

$$H = D + Ih = D + I \sin h \quad (1.11)$$

Les quantités I et D sont appelées irradiances directe et diffuse et h la hauteur du soleil.

Absorption de l'irradiation solaire

L'absorption du rayonnement solaire est sélective et dépend principalement de quatre éléments qui sont :

1. Ozone (O_3) : Il absorbe des bandes fortes entre 0.2 et 0.3 μm , des bandes faibles de 0.45 à 0.7 μm et deux bandes IR (infrarouge) à 10 et 14 μm . Il forme aussi un écran qui arrête les UV (ultraviolet).
2. Oxygène (O_2) : Il absorbe des bandes étroites du spectre visible (vers 0.69 et 0.76 μm).
3. Gaz carbonique (CO_2) : Il absorbe une partie de l'infrarouge lointain ($\lambda > 2\mu m$).
4. Vapeur d'eau qui entraîne des bandes d'absorption multiples surtout dans l'infrarouge. On ne la rencontre pratiquement qu'au niveau du sol ($z < 5 km$)

Phénomène de diffusion du rayonnement solaire

On distingue dans l'atmosphère deux types de diffusion : la diffusion de Rayleigh par les particules de diamètre inférieur à la longueur d'onde incidente [6, 10] et la diffusion de Mie [6, 11] par les corpuscules de grand diamètre (aérosols). Un rayon diffusé peut lui-même subir une diffusion selon la densité et le volume de la matière traversée ; c'est la diffusion multiple dont il faut aussi tenir compte. Les directions d'une diffusion moléculaire vers l'avant et vers l'arrière sont privilégiées par rapport à la direction latérale. Par contre, dans le cas d'une diffusion de grosses particules, la plupart des photons seront diffusés vers l'avant dans un angle de 10 degrés autour de la direction incidente [11].

L'absorption de Rayleigh explique pourquoi le ciel est bleu dans la journée et rouge - orange le matin et le soir lorsque le soleil est bas sur l'horizon. En effet, à midi, le trajet des rayons lumineux est relativement court. Compte tenu de la loi de Rayleigh, le rayonnement de courte longueur d'onde est plus diffusé par les molécules de l'atmosphère que le rayonnement de grande longueur d'onde ; il s'ensuit que la lumière bleue ($\lambda = 0.47nm$) est plus diffusée que la lumière rouge ($\lambda = 0.67nm$) et le ciel nous paraît bleu. A l'aurore ou au crépuscule, la même loi s'applique ; mais comme le trajet de la lumière est beaucoup plus long, les longueurs d'onde bleues sont diffusées mais aussi absorbées et il ne reste, fortement atténuées, que les grandes longueurs d'onde. La rétine de l'observateur qui fixe le soleil enregistre alors un disque rouge.

Le phénomène de diffusion du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire atteignant la surface de la terre se répartit à ce niveau en 3 formes : direct, diffus et réfléchi (voir figure(1.9)) :

1. Le rayonnement direct : c'est le rayonnement reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Il varie en fonction de la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon.
2. Le rayonnement diffus : est le rayonnement provenant de l'ensemble de l'atmosphère et qui dépend de sa composition.
3. Le rayonnement réfléchi : il dépend de l'inclinaison du rayonnement, il est réfléchi par le sol.

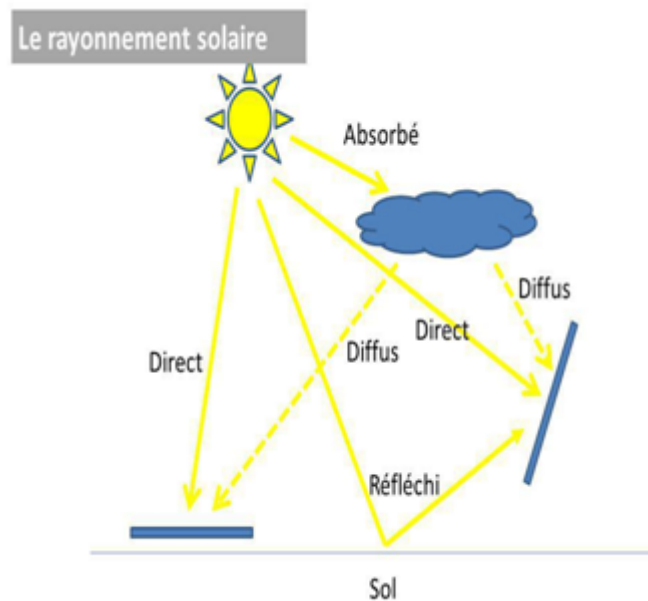


FIGURE 1.9 – Décomposition du rayonnement solaire en traversant l'atmosphère [8].

L'albédo

L'albédo est par définition le pourcentage d'énergie solaire réfléchi vers l'espace par la terre et l'atmosphère par rapport à la quantité d'énergie solaire reçue par la terre. L'atmosphère réfléchit $87 W/m^2$ et la surface terrestre réfléchit vers l'espace $21 W/m^2$ ce qui représente un total de $108 W/m^2$ soit 31% de l'énergie reçue. L'albédo terrestre est donc pris à 0.3. Cependant tous les corps n'ont pas le même pouvoir réflecteur. En effet, les corps noirs (qui sont des corps

capables d'absorber toutes les ondes incidentes à leur surface), la neige, les nuages, les sols dépourvus de végétation sont les meilleurs réflecteurs.

| Surface | Albédo |
|----------------------------|------------|
| Neige fraîche, soleil haut | 0.80-0.85 |
| Neige fraîche, soleil bas | 0.90-0.95 |
| Vieille neige | 0.50-0.50 |
| Sable | 0.20-0.30 |
| Herbe | 0.20-0.25 |
| Terre humide | 0.10 |
| Terre sèche | 0.15-0.25 |
| Forêt | 0.05- 0.10 |
| Eau, Soleil horizontal | 0.50-0.80 |
| Eau, Soleil au zénith | 0.03-0.05 |
| Nuage épais | 0.70-0.80 |
| Nuage mince | 0.25-0.50 |

TABLE 1.3 – L'albédo typique de différentes surfaces.

5 Conclusion

L'irradiation solaire est influencée par deux principaux paramètres, en premier lieu on trouve les constituants de l'atmosphère, qu'ils soient permanents ou ceux dont la composition varie largement avec les activités de l'homme, et en second c'est le mouvement de la terre, alors il est important de faire une étude préliminaire du climat pour un site donné avant tout projet d'exploitation de l'énergie solaire

Bibliographie

- [1] k. Amara, « Contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) inter-connectée au réseau de distribution électrique moyenne tension ». Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU (2015).
- [2] M. Capderou, « Atlas Solaire de l'Algérie, modèles théoriques et expérimentaux », Vol. 1, T1, Office des Publications Universitaires, Algérie, 1987.
- [3] Yingni Jiang, « Computation of monthly mean daily global solar radiation in China using artificial neural networks and comparison with other empirical models », Energy 34, 1276–1283, 2009
- [4] H. Abdelhakim et H. Ammadou Souhil « Etude de corrélation entre l'irradiation solaire et les facteurs météorologiques ». Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira de Bejaïa (2013)
- [5] Document, RETScreen International Centre d'aide à la décision sur les énergies propres, « Analyse de projets d'installation photovoltaïque », Ministère de Ressources Naturelles, Canada 2001-2004
- [6] S. Mohamed « Contribution à la quantification de l'irradiation solaire globale en Algérie et applications aux générateurs photovoltaïques ». Thèse de Doctorat. Université Ferhat abbas de Sétif.(2012)
- [7] Les mathématiques de l'enseignement scientifique le rayonnement solaire. Site <https://cache.media.eduscol.education.fr> consulté (juillet 2020)
- [8] Solar energy : The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems, A. Smets et al, UIT Cambridge, England
- [9] M.R Yaïche et S.M.A Bekkouche, 'Conception et Validation d'un Logiciel sous Excel pour la Modélisation d'une station radio-métrique en Algérie : Cas d'un ciel totalement clair ', Revue des Énergies Renouvelables, Vol. 12, N4, pp. 677 – 688, 2009.
- [10] V. Etienne, Physique de l'atmosphère ; Phénomènes d'absorption et de diffusion dans l'atmosphère. Gautier Villard, Tome 3, Paris (1966)
- [11] C. Bowden, Photovoltaics : Devices, Systems and Applications. Sydney (Aus). Univ. of New South Wales (1999)

Chapitre 2

Dimensionnement d'une installation photovoltaïque

1 Introduction :

Le temps représente l'état de l'atmosphère d'un lieu précis, à un moment donné. Il varie d'un instant à l'autre, et d'un lieu à l'autre. Le climat est la « moyenne » des divers types de temps. Lorsqu'on étudie le climat d'une région, on effectue généralement des moyennes sur certaines périodes fixées (ex : de 10 à 30 ans) de certaines variables météorologiques, à savoir la température de l'air, l'humidité de l'air, les précipitations, la force et la direction des vents, l'insolation et l'intensité du rayonnement solaire...etc. Les études climatologiques se basent sur l'observation à chaque endroit du globe et à chaque instant de l'un de ces variables météorologiques. La connaissance du rayonnement solaire est essentielle au calcul de diverses performances des systèmes liés au solaire, tels que les chauffe-eau solaires, les modules photovoltaïques. Lors de la traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire est réduit, par diffusion moléculaire, par diffusion par les aérosols et par absorption par les molécules de gaz. Des chercheurs ont estimé à environ 10% à midi en été l'atténuation due à la diffusion moléculaire [1]. Selon la même référence, l'atténuation due aux aérosols est beaucoup plus variable, typiquement entre 5 et 60%, selon la hauteur du Soleil et la transparence de l'atmosphère.

La présence de nuages modifie sensiblement l'importance respective des rayonnements diffus et direct, les nuages jouant un rôle de milieu diffusant additionnel. L'albédo des nuages varie, typiquement de 0.4 à 0.9 selon leur nature, leur épaisseur, la hauteur du soleil, etc. Les nuages absorbent en outre une fraction du rayonnement solaire, mais celle-ci reste assez faible et ne dépasse pas 10% de l'énergie incidente pour les nuages les plus épais [1].

Dans ces situations, le rayonnement solaire étant mesuré sur un nombre limité de sites à travers le monde, les données relatives à cette énergie ne sont pas toujours disponibles. L'utilisation de modèles et programmes de simulation est pratiquement le seul moyen de pallier à ce problème [2]. Au-delà, la connaissance de l'état de ciel et de la position du soleil à tout instant et en tout lieu est nécessaire pour le calcul et l'étude de l'énergie interceptée.

Sur l'ensemble du territoire national, les stations météorologiques collectent différents types de données selon l'importance du site considéré, mais la plupart de ces stations mesure les paramètres météorologiques et quelques données radio-métriques seulement. Dans la plupart de ces stations, les mesures de la durée d'insolation se font en permanence, depuis de nombreuses années, et qui fait partie des paramètres qui déterminent d'une manière primordiale le climat en un lieu. Notre travail dans ce chapitre a pour but d'estimer la quantité d'énergie reçue par une surface horizontale de $1m^2$ d'un module photovoltaïque pendant une année en introduisant une partie de dimensionnement d'un système photovoltaïque et ainsi la notion de la nébulosité.

2 Dimensionnement d'un système photovoltaïque

La figure (2.1) montre le schéma de principe d'une alimentation électrique autonome utilisant l'énergie solaire [10]. Le flux de l'énergie est donné par les flèches. Les éléments composant un tel système seront tout d'abord présentés.

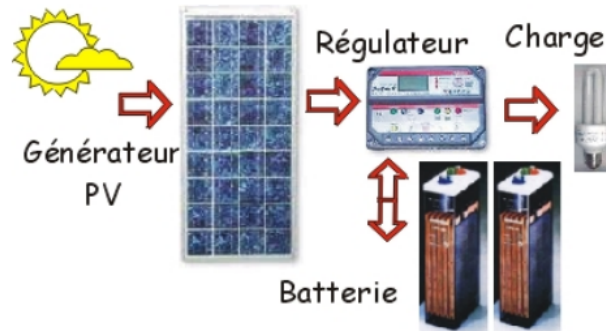


FIGURE 2.1 – Système photovoltaïque [10].

2.1 Les différents éléments d'un système photovoltaïque :

Utilisateur

Un utilisateur de charges électriques peut être une maison, un établissement, une entreprise, etc. Il se caractérise par un certain profil de consommation par exemple : un réfrigérateur, un lave-linge, l'éclairage, ordinateur, etc. En addition, il ajoute une évaluation des besoins énergétiques.

Charges électriques

Elles présentent l'ensemble des appareils et matériels utilisés pour une consommation. On doit connaître pour chaque appareil l'énergie électrique consommée et la compatibilité avec l'énergie solaire par exemple :

1. Lampe : pour minimiser l'énergie électrique consommée, la lampe retenue est une lampe fluorescente compacte (type STECA ESL11), alimentée en 12 V, consommant 11W électrique et fournissant 550 lumens -équivalente à une lampe de 60 W à incandescence-,
2. Réfrigérateur : pour une application solaire, le choix d'une classe A s'impose. Peu commercialisés, dans la même gamme, les réfrigérateurs alimentés en DC sont deux à cinq fois plus chers à l'achat que les réfrigérateurs 230V AC classique [3].

Onduleur

Il sert à transformer une source de tension continue vers une source de tension aléatoire (voir figure(2.2)). Les caractéristiques principales d'un onduleur autonome sont les suivantes :

1. une tension d'entrée (12V, 24V ou 48 V),
2. une tension de sortie 230V AC à 50 Hz (parfois la forme d'onde est sinusoïdale, plus souvent carrée ou pseudo sinusoïdale ce qui se traduit par une augmentation des pertes quand la charge est un moteur),

3. une puissance nominale et une puissance en pointe (typiquement 50% de plus que la valeur nominale),
4. un rendement (généralement supérieur à 90% mais donné en fonctionnement nominal, et donc beaucoup plus mauvais pour une puissance inférieure),
5. une consommation en mode veille (2 ou 3% de la puissance nominale [4]),
6. des protections (court-circuit charge, chute de tension côté batterie).

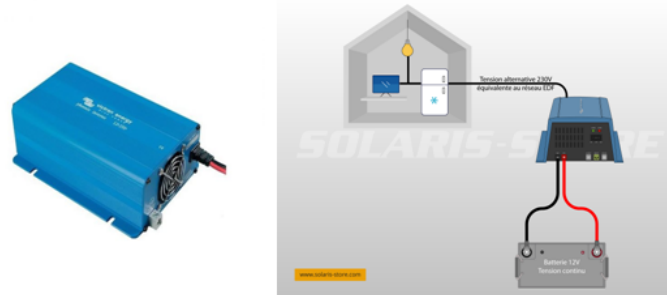


FIGURE 2.2 – Onduleur et son schéma de fonctionnement [4].

Batteries

On appelle capacité (C en Ampère Heure -Ah-), la quantité d'électricité qu'un accumulateur peut fournir. On parle de C_{10} ou C_{100} selon que le courant de charge ou de décharge est égal au $1/10$ ou au $1/100$ de la capacité ($I = C/10$ ou $I = C/100$). Plus une batterie est chargée ou déchargée avec un courant faible, plus sa capacité est importante. Ainsi, une batterie solaire "OPzSSolar 190" a une capacité C_{240} de 200 Ah, C_{120} de 190 Ah et C_{10} de 128 Ah. Il faudra donc tenir compte du courant de décharge lors du dimensionnement.

Une période de charge et décharge est appelée cycle. Les performances d'une batterie s'évaluent aussi en fonction du nombre de cycles que la batterie peut fournir à une profondeur de décharge déterminée. Moins les décharges seront profondes, plus le nombre de cycles possibles sera élevé. Le taux de décharge (DOD , depth of discharge) est le ratio d'ampère heure déchargé sur la pleine capacité de la batterie. Par exemple, si une batterie de 100 Ah (pleine capacité) voit sa capacité diminuer de 25 Ah, alors son taux de décharge est 25% et son taux de charge (SOC , state of charge) est 75%.

D'autre part, il faudra tenir compte de l'intensité maximum en charge qui, sur des batteries stationnaires au plomb, doit être limitée à 10% de la capacité en C_{10} .

Pour les applications solaires supérieures à quelques watts, le coût du stockage impose une technologie au plomb préférentiellement aux technologies $NiCd$ ou NiH . De préférence, les batteries choisies seront de types :

1. des batteries "fermées" (Valve Regulated Lead Acid) dans lesquelles l'électrolyte est stabilisé par un gel ou un matériau AGM (Absorbent Glass Mat) (1500 cycles à 100% de profondeur de décharge (DOD), 7 ans d'espérance de vie avec un maximum de DOD égal à 80%)
2. des batteries à plaques tubulaires dites batteries "stationnaires", (1500 cycles à 100%, 12 ans d'espérance de vie avec un DOD maximum égal à 40%).

Les batteries de voiture sont moins chères mais n'acceptent pas de décharge profonde (50% maximum) du fait de la minceur des plaques et présentent une auto-décharge importante. Leur durée de vie est aussi plus faible (5 ans maximum avec un DOD maximum égal à 15%).

L'investissement initial est moindre avec ce type de batterie mais sur le long terme, ce choix se révèle plus coûteux. Comme exemple, des chercheurs ont montré que sur 20 ans il est possible d'avoir un coût de 0.6 Euro/*kWh* contre 0.14 Euro/*kWh* avec des batteries tubulaires [5].

Pour les systèmes de petite puissance, une tension de 12 V est préférée, les récepteurs alimentés en 12 V étant plus fréquents. Mais au-delà de 2.5 *kWh* stocké, on passera en 24 V ou plus pour limiter les pertes ohmiques en gardant des sections de câble raisonnables. Les batteries sont commercialisées en cellules de 2 V, de 200 Ah à 3000 Ah ou en ensemble 12 V jusqu'à 400 Ah [4]. On évitera si possible de mettre en parallèle des batteries. La figure (2.3) montre quelques types de batteries utilisés dans les systèmes photovoltaïques.



FIGURE 2.3 – Types de batteries solaires.

Régulateur de charges

On retrouve sur la figure (2.4) les principaux éléments d'un chargeur de batterie utilisant l'énergie solaire. Le régulateur doit assurer des fonctions de protection [4] :

1. pour éviter une décharge de la batterie dans le panneau (diode by-pass),
2. pour éviter une surcharge ou une décharge profonde de la batterie,
3. en cas de court-circuit côté charge

Son rôle est aussi de contrôler le transfert d'énergie entre le générateur photovoltaïque, la batterie et la charge en fonction [6] :

1. de la disponibilité de la ressource et de l'état de charge de la batterie (classiquement trois phases de charge : $C/10$ ou I_{max} , flottage, gazage),
2. du caractère prioritaire ou non de la charge. Des fonctions d'affichage sont aussi généralement disponibles.

Générateurs photovoltaïques

La figure (2.5) montre un exemple de caractéristiques $I - V$ typiques d'un panneau photovoltaïque en silicium polycristallin de paramètres suivants : $S = 0.93 m^2$ $P_{max} = 125 W_c$ pour $V_m = 17.4 V$ et $I_m = 7.2 A$, avec un courant de court-circuit $I_{cc} = 8.0 A$ et une tension à circuit ouvert $V_{co} = 21.7 V$.

Le maximum de puissance disponible est proportionnel à l'irradiation (ensoleillement exprimé en W/m^2) et augmente lorsque la température diminue. Pour utiliser au mieux le panneau



FIGURE 2.4 – Fonctionnement d'un régulateur de charge [4].

on cherchera à le faire fonctionner au maximum de puissance disponible ; pour cela le régulateur, s'il inclut une fonction dite "MPPT" (maximum power point tracking), jouera le rôle d'adaptateur d'impédance entre le panneau et la charge [4].

Dans le cas d'une installation avec plusieurs panneaux, on rajoutera les protections adéquates (diodes) [6]. Le prix "grand public" des panneaux est d'environ 6 Euro le watt-crête. Un panneau prévu pour fonctionner sur 12 V, fournissant 80 W_c est disponible au prix de 489 Euro TTC [7].

Après avoir présenté les différents éléments composant un système photovoltaïque, il reste à le dimensionner au mieux en fonction du cahier des charges.

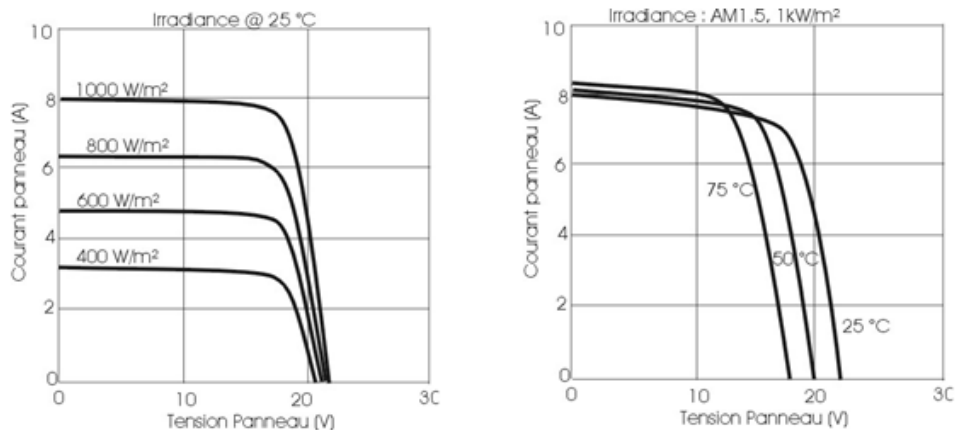


FIGURE 2.5 – Caractéristiques d'un panneau photovoltaïque [7].

3 Méthode de calcul des éléments de dimensionnement

3.1 Détermination du nombre de panneaux photovoltaïques

Un panneau solaire produit de l'électricité de manière intermittente à cause des variations d'éclairement du soleil. La puissance électrique qu'il fournit, exprimée en watts, varie donc suivant les heures de la journée et des saisons. Pour pouvoir comparer la puissance entre panneaux, on utilise le Watt crête (W_c), une mesure qui correspond à la puissance maximale que pourra débiter le panneau dans les conditions d'éclairement optimal STC (Standard Test Condition) : $AM = 1.5$, $1000 W/m^2$, $T_c = 25 °C$.

Pour déterminer le nombre de panneaux, on s'intéressera d'abord à deux paramètres : la consommation moyenne journalière et l'irradiation incidente moyenne journalière reçue [7]. On effectue le calcul sur la période la plus défavorable avec une inclinaison raisonnable des modules ou panneaux. La consommation d'énergie de chaque établissement scolaire connue, il faut aussi tenir compte des pertes d'énergies. Il convient alors de produire d'avantage d'énergie pour avoir une consommation suffisante. Cette énergie notée E_p (tient compte des pertes) s'écrit :

$$E_p = \frac{E_c}{k} \quad (2.1)$$

E_p est l'énergie produite, E_c l'énergie consommée et k le coefficient de l'incertitude météorologique. Ce coefficient k prend en compte l'incertitude météorologique, l'inclinaison non corrigée des modules, la non optimalité du point de fonctionnement des modules (vieillesse, poussières, etc.), le rendement de charge et de décharge des batteries, le rendement du régulateur et de l'onduleur, et des pertes dans les câbles et les connexions. Le paramètre k est en général compris entre 0.55 et 0.65. Au cours de cette étude, nous fixons la valeur de k à 0.55. La puissance correspondante à cette énergie E_p est déterminée en fonction de l'irradiation de la région où est située l'installation, telle que :

$$P_c = 1000 \frac{E_p}{I_r} \quad (2.2)$$

où P_c est la puissance consommée, E_p l'énergie produite et I_r représente l'irradiation. Le nombre N_m de panneaux est alors donné par la relation suivante :

$$N_m = 1000 \frac{E_u}{E_m} \quad (2.3)$$

avec E_u représentant l'énergie utile ou nécessaire et E_m l'énergie d'un module.

Ce calcul sera effectué sur trois modèles de modules. Une fois le nombre de modules connu, on s'intéressera à l'architecture du générateur photovoltaïque (GPV). On obtient le nombre de modules en série N_{MS} grâce à la relation suivante :

$$N_{MS} = 1000 \frac{V_R}{V_{\max}} \quad (2.4)$$

où V_R est la tension du régulateur utilisé et V_{\max} la tension maximale du module. Le nombre de branches en parallèle N_{BP} est déterminé comme suit :

$$N_{BP} = \frac{N_M}{N_{MS}} \quad (2.5)$$

où N_M est le nombre total de modules et N_{MS} le nombre de modules en série.

3.2 Détermination du nombre de batteries

Les batteries restent les éléments les plus fragiles du système et la qualité de leur contrôle et de leur entretien, influent grandement sur leur durée de vie. Pour déterminer leur nombre nécessaire, il faut d'abord connaître la consommation journalière de l'installation, la tension et la capacité des batteries [4]. Ensuite on détermine l'autonomie que l'on souhaiterait avoir, puis on évalue les pertes et leur profondeur maximale de décharge. La capacité totale que devra accumulée les batteries est donnée par la formule suivante :

$$C_{ap} = \frac{E_c \times Aut}{D \times U} \quad (2.6)$$

où E_c est l'énergie consommée, Aut l'autonomie du système, D la profondeur de décharge et U la différence de potentiel aux bornes des batteries.

L'autonomie (Aut) varie généralement entre 3 à 15 jours. La profondeur de décharge D est fixée à 0.5. Cette capacité totale ayant été obtenue, on fait le rapport de celle-ci par la capacité de la batterie pour en obtenir le nombre total N .

$$N = \frac{C_{ap}}{C_{bat}} \quad (2.7)$$

où C_{bat} la capacité d'une batterie.

3.3 Détermination du régulateur de charges

Le contrôleur de charge est l'élément central d'un système photovoltaïque autonome. Il contrôle les flux d'énergie. Les panneaux solaires n'envoient pas à tout moment de la journée un flux continu d'électricité. Le contrôleur de charge régule donc le flux afin d'alimenter les batteries avec régularité et les protéger. Par ailleurs, lorsque le ciel est très couvert, et que les panneaux ne délivrent plus d'énergie, il peut arriver que l'utilisateur ait besoin d'énergie. Ce qui occasionnerait une importante décharge des batteries. Le régulateur intervient alors pour prévenir d'une trop profonde décharge qui endommagerait les batteries. Le contrôleur de charge assure à la fois les fonctions de surveillance et de protection. En entrée : on doit s'assurer que le régulateur ait une intensité du courant plus grande ou égale à celle produite par des panneaux [4]. On considère que les modules sont tous mis en parallèles. Cela nous permet de déterminer l'intensité maximale produite par les modules photovoltaïques. En sortie : on doit s'assurer que le régulateur ait une intensité plus grande ou égale à l'intensité traversant les charges (c'est-à-dire les appareils à alimenter).

On considère la puissance utilisée par nos générateurs car c'est la puissance demandée par ces charges [7]. À l'entrée, le dimensionnement de la régulation de charge dépend de la puissance du générateur. L'intensité d'entrée du régulateur doit être supérieure à la valeur maximale de l'intensité produite par le générateur c'est-à-dire l'ensemble de ces panneaux ou modules. L'intensité d'entrée est donnée par la relation [7] :

$$I_e = 1.5N_{\text{module}}I_{\text{module}} \quad (2.8)$$

avec N_{module} est le nombre de module et I_{module} l'intensité d'un module.

À la sortie, le dimensionnement de la régulation de charge dépend de la puissance totale des récepteurs (ou utilisations). L'intensité admissible du courant de sortie du régulateur doit être supérieure à la valeur maximale appelée par les récepteurs. On applique la relation [7] :

$$I_s = 1.5 \frac{P_{\text{charge}}}{U_{\text{charge}}} \quad (2.9)$$

où I_s est l'intensité de sortie, P_{charge} la puissance des récepteurs requise pour la charge et U_{charge} la tension des récepteurs de la charge.

Par conséquent, il sera installé des régulateurs de tension d'entrée admissible supérieure à l'intensité totale des panneaux et d'intensité de sortie admissible supérieure à l'intensité des récepteurs.

3.4 Détermination de la puissance de l'onduleur

Un onduleur a pour principe de transformer une tension continue en une tension alternative. Un onduleur n'a pas de rendement fixe. Il est plus efficace au trois-quarts de sa puissance

maximale et moins efficace à faible puissance. Pour dimensionner un onduleur, on serait tenté de choisir un onduleur de puissance égale à la puissance totale des panneaux photovoltaïques mais, ce serait oublier les pertes, dû à l'appareil lui-même, à la température ambiante et à la saison. Pour ce faire, on fixe la puissance nominale de l'onduleur en faisant les estimations suivantes :

1. la charge maximale probable pendant une durée doit être supérieure à 20 minutes.
2. la charge maximale instantanée doit être généralement quatre (4) fois la puissance du moteur le plus puissant que l'onduleur devra démarrer [8].

L'onduleur choisi dépend de la capacité des panneaux utilisés. L'onduleur doit avoir une puissance d'entrée (côté DC) d'environ 90% de la puissance crête des panneaux. Les installations photovoltaïques fonctionnent souvent sous une faible tension (12 à 48 V) et avec un courant élevé, pourtant les pertes en lignes sont de l'ordre RI^2 (R : résistance du câble considéré) [8]. Il faut déterminer la section de câbles nécessaires de façon à limiter les pertes en lignes. Il faudra qu'elle soit faible par rapport à la puissance transmise par la ligne (inférieure à 4 ou 5%). Un surdimensionnement de l'onduleur ou un sous-dimensionnement ne porte pas de préjudice à notre système photovoltaïque.

4 Paramètres d'ensoleillement

4.1 La nébulosité

La nébulosité est un terme souvent employé en météorologie. La nébulosité, ou couverture nuageuse, est l'obscurcissement du ciel par les nuages ou bien la fraction du ciel couverte par les nuages (fonction du genre, de l'espèce, de la variété) au-dessus d'une région. La nébulosité devient donc une notion essentielle dans la prévision du temps, ainsi que sa variation. La nébulosité ' N ' se mesure en **Octa**. L'octa permet d'évaluer la couverture nuageuse du ciel, et correspond à une fraction de 1/8 de la voûte céleste. Les conditions nuageuses ont été mesurées en utilisant le facteur 'Cloud Attenuation Factor', défini par Kasten and al, 1980 [9].

4.2 Durée d'ensoleillement

Selon les conditions atmosphériques, le ciel peut être plus ou moins couvert de nuages au cours d'une journée. Ceux-ci occultent le soleil, totalement ou partiellement, empêchant ainsi le rayonnement d'atteindre directement le sol. On dit que la nébulosité est plus ou moins importante selon qu'il y a beaucoup ou peu de nuages [10]. On appelle durée effective d'ensoleillement ou insolation S , le temps pendant lequel, au cours d'une journée, le rayonnement solaire direct a atteint le sol du lieu considéré. On appelle rayonnement direct le rayonnement qui atteint la surface terrestre sans avoir subi de déviation depuis son émission par le soleil.

4.3 Taux d'ensoleillement

Par ciel clair sans nuages, le sol reçoit le rayonnement solaire direct pendant toute la durée du jour, ou plus précisément pendant la durée maximale d'ensoleillement S_0 . On appelle taux d'ensoleillement ou taux d'insolation le rapport entre la durée effective et la durée maximale d'ensoleillement S_0 [11] :

$$\sigma = \frac{S}{S_0} \quad (2.10)$$

5 Méthodes d'estimation du rayonnement solaire

Dans cette partie nous présentons la méthodologie d'estimation du rayonnement solaire global atteignant un plan horizontal, et nous procédons à la réalisation des modèles adéquats pour le territoire algérien afin d'évaluer la quantité du rayonnement solaire mensuel. Plusieurs travaux de recherche ont été faits pour modéliser l'estimation du rayonnement solaire, parmi eux on peut citer :

5.1 Méthodes atmosphériques

Ce sont des ensembles de relations théoriques utilisées pour le calcul de l'irradiation solaire totale H (mesurée en Wh/m^2) ainsi que ses composantes en tenant compte des différents constituants de l'atmosphère [12]. Ces méthodes appelés les modèles atmosphériques, on peut les résumer comme suit :

1. Modèle 1 : Ce modèle considère que l'atmosphère est répartie en un nombre de couches horizontales, il calcule les deux composantes directe et diffusée dans chaque couche [13].
2. Modèle 2 : Ce modèle consiste en un ensemble de programmes pour déterminer les composantes du rayonnement solaire des différentes couches de l'atmosphère pour le cas où les nuages n'existent pas. Ces programmes se basent sur des lois physiques (diffusions Rayleigh et de Mie) [17].
3. Modèle 3 : C'est un modèle simple qui utilise les transmittances spectrales dues à la diffusion de Rayleigh [14].
4. Modèle 4 : Ce modèle analytique se base, dans le calcul du rayonnement, sur les deux composantes directes et diffusée, et qui utilise comme point de départ la relation :

$$H = I \sin(h) + D \quad (2.11)$$

5. Modèle synthétique : Ce modèle donne les composantes du rayonnement pour un beau temps en fonction d'un seul paramètre, par exemple, le temps local (T_L) [12], et parmi les modèles considérés par l'organisation mondiale de la météo (OMM), nous trouvons les relations suivantes :

- (a) Éclairement global sur plan horizontal [15].

$$H = (1300 - 57 T_L)(\sin(h))(36 + T_L)/33 \quad (2.12)$$

- (b) Éclairement direct - normal

$$I = (1390 - 31 T_L)e^{[-T_L/(12.6 \sin(h+2))]} \quad (2.13)$$

- (c) Éclairement diffus sur plan horizontal [16].

$$D = 380.e^{(-4/T_L)}(\sin(h))(T_L + 5.7)/30 \quad (2.14)$$

À une heure donnée et pour le lieu considéré, on calcule la hauteur angulaire solaire h , exprimée en degrés, et en choisissant le temps local T_L .

5.2 Méthodes utilisant les photos satellitaires

Ce sont des approximations récentes qui utilisent les images acquises par des satellites, parmi les premiers qui ont utilisés ces méthodes d'exploitation satellitaire on trouve Ellis et al [7] qui ont travaillé avec des images de satellites à défilement. Puis, avec la mise en service du satellite géostationnaire GOES au-dessus de l'Amérique du Nord, les véritables initiateurs de cette méthodologie sont Tarpley et Gautier et al [12]. Le premier a estimé à l'aide de méthodes statistiques, les irradiations horaires et journalières par le traitement de 7 à 10 images quotidiennes du canal visible du satellite GOES de la région des Grands Lacs des États-Unis, est basée sur les phénomènes d'absorption, de diffusion Rayleigh et de diffusion par l'eau. Par contre le second et son équipe ont développé, toujours avec les mêmes types d'images, un modèle physique " universel " d'estimation des irradiations globales horaires et journalières basé sur les échanges radiatifs. Les paramètres utilisés sont principalement les points de rosée, les coefficients de diffusions de Rayleigh, l'absorbance aux sommets de nuages. Ainsi, avec l'avènement d'autres satellites météorologiques tels que METEOSAT, GMS ou NOAA, plusieurs travaux d'équipes diverses ont utilisé des données de ces satellites.

5.3 Méthodes expérimentales et statistiques

Ce type de méthodes est utilisé dans la mise au point des modèles de l'estimation du rayonnement solaire en Algérie. Celles-ci utilisent des relations statistiques reliant le rayonnement et l'insolation. Nous présentons les modèles essentiels utilisés.

1. **Les relations linéaires :** Les relations linéaires entre le rayonnement solaire journalier ou mensuel et l'insolation sont considérées comme les plus simples et les meilleurs modèles pour l'estimation du rayonnement solaire sur un plan horizontal dans les sites où les stations de mesure sont disponibles, on peut les appliquer dans les sites ayant le même climat et les valeurs mesurées sont indisponibles.

Les constantes de ces relations mathématiques sont des coefficients qui se basent sur le climat de la zone étudiée, elles sont bien représentées par le modèle d'Angström [12], qui est donné par la relation suivante :

$$\frac{H}{H_0} = a + b \left(\frac{S}{S_0} \right) \quad (2.15)$$

Généralement, c'est la relation d'Angström qui est préférée car la valeur de (H_0) est liée seulement au numéro du jour et la latitude.

2. **Méthodes expérimentales :** On compte surtout sur les méthodes expérimentales pour l'estimation du rayonnement horaire, et dans ce cadre nous trouvons les travaux de Liu et Jordan [17] qui sont considérés comme référence pour de nombreux chercheurs, ces travaux utilisent une relation expérimentale entre les rapports horaires K_d et K_c :

$$K_c = \frac{H}{H_0} \quad \text{et} \quad K_d = \frac{D}{H} \quad (2.16)$$

où H_0 et l'irradiation horaire globale hors atmosphère sur un plan horizontal, H l'irradiation horaire globale mesurée sur un plan horizontal et D l'irradiation horaire diffuse sur un plan horizontal.

La méthode s'applique à des valeurs horaires moyennes mensuelles et son intérêt est d'estimer la distribution des radiations au cours d'une journée moyenne mensuelle. C'est le cas des travaux de Supit et al [12, 18] et Suehrcke [12, 8].

5.4 Modèles appliqués

Pour l'évaluation de l'irradiation solaire globale sur les sites choisis dans notre travail, plusieurs modèles ont été testés.

Modèle d'Angström-Prescott

Ce modèle utilise la relation [12] :

$$\frac{H}{H_0} = a + b \left(\frac{S}{S_0} \right) \quad (2.17)$$

Une forme logarithmique

Ce modèle utilise une formule logarithmique [12] :

$$\frac{H}{H_0} = a + b \log \left(\frac{S}{S_0} \right) \quad (2.18)$$

Une forme exponentielle

Ce modèle utilise une formule exponentielle [12] :

$$\frac{H}{H_0} = a + b e^{\left(\frac{S}{S_0} \right)} \quad (2.19)$$

où H est le rayonnement global moyen mensuel mesuré sur un plan horizontal ($MJ.m^{-2}/jour$) et H_0 le rayonnement global moyen mensuel hors atmosphère sur un plan horizontal ($MJ.m^{-2}/jour$), calculé par l'équation :

$$H_0 = \frac{24}{\pi} I_0 \left(1 + 0.033 \cos \frac{300n}{365} \right) \left(\cos \lambda \cos \delta \sin \omega + \frac{2\pi}{360} \omega \sin \lambda \sin \delta \right) \quad (2.20)$$

où I_0 est la constante solaire, égale à $1367W/m^2$, λ la latitude du lieu, ω l'angle horaire donné par

$$\omega = \cos^{-1}(-\tan \lambda \tan \delta) \quad (2.21)$$

et δ la déclinaison donné par :

$$\delta = 23.45 \left[\sin \frac{360(284 + n)}{365} \right] \quad (2.22)$$

où n est le numéro du jour de l'année à partir du premier janvier. Aussi, S est la durée de l'ensoleillement effective et S_0 la durée maximale d'ensoleillement ou durée du jour j , donnée par son expression :

$$S_0 = \frac{2}{15} \omega_{sr} \quad (2.23)$$

où ω_{sr} est l'angle horaire au lever de soleil (sunrise) mesuré en degré($^{\circ}$).

Pour déterminer les constantes a et b des équations (2.17), (2.18) et (2.19), les taux $\frac{H}{H_0}$ et $\frac{S}{S_0}$ pour chaque jour et chaque mois pour les différents sites sont calculés.

6 Conclusion

Dans ce chapitre on a passé en revue les différents composants d'une installation photovoltaïque ainsi que les méthodes de dimensionnement de chacun d'eux. Aussi, nous avons présenté quelques méthodes d'estimation du rayonnement solaire sur un plan horizontal et leurs résultats. L'examen des résultats obtenus nous a permis de conclure que les méthodes expérimentales sont souvent peu applicables lorsque les données du site étudié ne sont pas disponibles, d'où l'obligation d'utiliser un modèle qui nécessite peu de données disponibles.

Bibliographie

- [1] P. Bessemoulin, J. Olivieri, Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette, La Météorologie 8e série, n 3, Septembre 2000
- [2] M.R Yaïche, 'Logiciel de calcul des paramètres astronomiques à l'usage des installations solaires, Revue des Énergies Renouvelables, 'ICRES-07', Tlemcen, Algérie, pp. 343 – 348, 2007.
- [3] G. Notton, N. Muselli, Utilisation rationnelle de l'énergie et énergies renouvelables, des alliés incontestables : application à une production décentralisée d'électricité photovoltaïque, Université de Corse - Centre de Recherches 'Énergie et Systèmes.
- [4] V.Boitier, C. Alonso. Dimensionnement d'un Système Photovoltaïque, Cetsis'2005, nancy, 25-27 octobre 2005.
- [5] M.Villoz, Batteries au plomb : choisir la bonne technologie" Document Énergies Renouvelables / SSES, No 3/2004, mai 2004,
- [6] Anne Labouret, Michel Villoz, Énergie solaire photovoltaïque, le manuel du professionnel, Ed. Dunod, 2003
- [7] D. SORO, M. H. C. YAPI, B. FOFANA et N. A. YAO, Dimensionnement d'une installation solaire pour la réalisation de travaux pratiques Dans les lycées et collèges en zone isolée, École Normale Supérieure (ENS) d'Abidjan ,Afrique SCIENCE, (2018)
- [8] B. Fleche, D. Delagnes, Énergie solaire photovoltaïque , STI ELT, énergie solaire, (2007)
- [9] Les mathématiques de l'enseignement scientifique le rayonnement solaire. Site <https://cache.media.eduscol.education.fr>. consulté (juillet 2020)
- [10] G.Deguy. L. Mabeya, Étude et conception d'un système de climatisation utilisant le rayonnement solaire, Université de Lubumbashi, Mémoire en ligne, 2004
- [11] J.Eva, S. Victor, V. Amandine. Durée des saisons et mouvement du Soleil, Lycée Jean Monnet – Annemasse.Olympiades de physique 2012/13
- [12] S. Mohamed « Contribution à la quantification de l'irradiation solaire globale en Algérie et applications aux générateurs photovoltaïques ». Thèse de Doctorat. Université Ferhat abbas de Sétif(2012)
- [13] N. Braslau, J. V. Dave, J. Appl. Meteor 12, 601 (1973)
- [14] R. E. Bird, Solar Energy 32, 461 (1984)
- [15] F. Linke, Handbluchder geophysik, Borntrager Ed, Berlin 8, 239 (1929)
- [16] B. Bendib, Techniques conventionnelles et avancées de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïques : étude comparative. Thèse, Université Ferhat Abbes-Sétif (2017)
- [17] G. Ferran, Modélisation physique d'images de télédétection optique. Thèse de doctorat, Centre d'Études Spatiales de la Biosphère, Toulouse (2001)
- [18] B. Liu, C. Jordan, Solar Energy 4, 19 (1960)
- [19] I. Supit, R. R. A. Van , Solar Energy 63, 147 (1998)

Chapitre 3

Méthode de calcul de l'insolation solaire sur un plan horizontal en présence des effets atmosphériques

1 Introduction

La source d'énergie de tout système photovoltaïque (PV) autonome est le rayonnement solaire disponible sur le lieu de l'installation. Nous présenterons, dans ce chapitre, le modèle proposé pour l'estimation de l'insolation reçue sur un plan horizontal pour un site donné (installation photovoltaïque) en présence de l'atmosphère, en vue de réaliser une étude de dimensionnement basés sur des données réelles.

2 Estimation du rayonnement solaire global sur un plan horizontal sur différents sites algériens

La quantité du rayonnement solaire reçue sur l'ensemble du territoire algérien dépasse les 2000 heures par an ce qui représente une moyenne élevée comparée aux pays du monde. Pour exploiter cette énergie pour systèmes photovoltaïques ou photo-thermiques, il faut connaître la quantité du rayonnement solaire reçue par les différentes régions du territoire algérien, et les meilleures sources de ces renseignements sont les données mesurées à l'aide d'un pyranomètre.

Le manque des moyens de mesure, la non disponibilité des stations météorologiques dans tous les endroits et l'ampleur des régions étudiées représentent des difficultés qui ont obligé les chercheurs dans les différents pays du monde à penser à mettre au point des modèles dont le but d'estimer le rayonnement solaire global sur n'importe quel site. Nous présentons dans la première partie de ce chapitre les irradiances (rayonnement solaire global) mesurés sur sept sites choisis en Algérie ainsi que les irradiances calculées par les modèles cités dans le chapitre précédent.

2.1 Sites étudiés

Pour cette étude nous avons choisi sept sites : Alger, Ain-Bessem, Constantine Oran, Djelfa, Mascara, et Tamanrasset et cela vu la disponibilité des données mesurées du rayonnement globale. Les valeurs mesurées du rayonnement solaire ont été fourni par les services de l'office nationale de la météorologie (ONM), en plus qu'elles couvrent une surface considérable du territoire algérien, en rappelant que

- Alger représentant le nord,
- Constantine représentant l'est,
- Oran et Mascara sont des sites de l'ouest algérien,
- Djelfa et Ain-Bessem représente sud d'Alger
- Tamanrasset représente le sud.

Le tableau (3.1) représente les coordonnées géographiques de ces sites [1].

| Station | Latitude (°) (N) | Altitude (m) | Longitude (°) |
|-------------|------------------|--------------|---------------|
| Oran | 35.38 | 99 | 0.37W |
| Djelfa | 34.68 | 1126 | 3.25E |
| Ain Bessem | 36.31 | 629 | 3.67E |
| Tamanrasset | 22.47 | 1378 | 5.31E |
| Alger | 36,43 | 450 | 2.83E |
| Constantine | 36.17 | 687 | 6.37E |
| Mascara | 35,26 | 518 | 0.06E |

TABLE 3.1 – Coordonnées géographiques de sept (07) sites en Algérie.

2.2 Données examinées

Nous utilisons les données complètes des valeurs mesurées du rayonnement solaire pour une période de six années (2000-2005). Après l'obtention de ces données sous forme de valeurs horaires, nous avons commencé à les traiter suivant les étapes suivantes :

- . calcul de la moyenne des valeurs du rayonnement pour chaque jour,
- . calcul de la moyenne des valeurs du rayonnement pour chaque mois,
- . calcul de la moyenne des valeurs du rayonnement pour chaque année,
- . calcul de la moyenne des six années.

Le tableau (3.2) donne les valeurs de la moyenne mensuelle des valeurs mesurées du rayonnement solaire global [1].

Les figures (3.1), (3.2) et (3.3) représentent les valeurs mesurées et celles calculées de l'irradiation solaire par les différents modèles cités précédemment. Nous observons bien que les différentes méthodes fournissent de bonnes estimations du rayonnement global, mais, malgré ces bons résultats, ces modèles nécessitent des données de chaque site pour faire l'estimation de son irradiation solaire. Cependant, ce type de données ne sont pas souvent disponibles ce qui rend ces méthodes inexploitable. C'est pour cette raison qu'on est dans l'obligation d'utiliser une méthode qui nécessite peu de données disponibles pour assurer une estimation de n'importe quel site voulu.

3 Présentation du modèle

Les performances d'un système photovoltaïque autonome sont directement affectées par la valeur d'insolation dont il dispose. Cette insolation varie de temps en temps à cause des changements diurnes et saisonniers de la position du soleil par rapport à la terre d'un côté, et aux changements météorologiques de l'autre côté.

CHAPITRE 3. MÉTHODE DE CALCUL DE L'INSOLATION SOLAIRE SUR UN PLAN HORIZONTAL EN PRÉSENCE DES EFFETS ATMOSPHÉRIQUES

| Mois | Alger | Ain Bessem | Constantine | Djelfa | Mascara | Oran | Tamanrasset |
|-----------|-------|------------|-------------|--------|---------|-------|-------------|
| Janvier | 7,64 | 8,50 | 9,39 | 10,96 | 9,42 | 10,37 | 18,12 |
| Février | 10,88 | 10,77 | 12,85 | 15,51 | 12,90 | 12,83 | 22,22 |
| Mars | 13,60 | 14,91 | 15,55 | 20,79 | 15,55 | 16,69 | 25,54 |
| Avril | 18,76 | 18,91 | 22,59 | 24,26 | 22,72 | 21,32 | 26,29 |
| Mai | 21,48 | 22,77 | 21,70 | 28,60 | 21,75 | 24,85 | 26,65 |
| Juin | 23,24 | 25,11 | 25,84 | 30,80 | 25,84 | 27,35 | 26,35 |
| Juillet | 22,96 | 23,76 | 25,54 | 28,58 | 25,40 | 26,18 | 27,77 |
| Août | 21,08 | 21,19 | 21,99 | 24,90 | 22,33 | 23,95 | 25,17 |
| Septembre | 16,52 | 17,70 | 18,43 | 21,72 | 18,50 | 20,21 | 23,28 |
| Octobre | 11,56 | 13,32 | 13,38 | 15,84 | 13,41 | 14,07 | 21,08 |
| Novembre | 8,44 | 9,02 | 9,01 | 11,72 | 8,87 | 11,04 | 17,49 |
| Décembre | 6,80 | 7,40 | 7,42 | 9,74 | 7,56 | 9,33 | 16,45 |

TABLE 3.2 – Rayonnement solaire mesuré en unité de (M.J/m²/j.

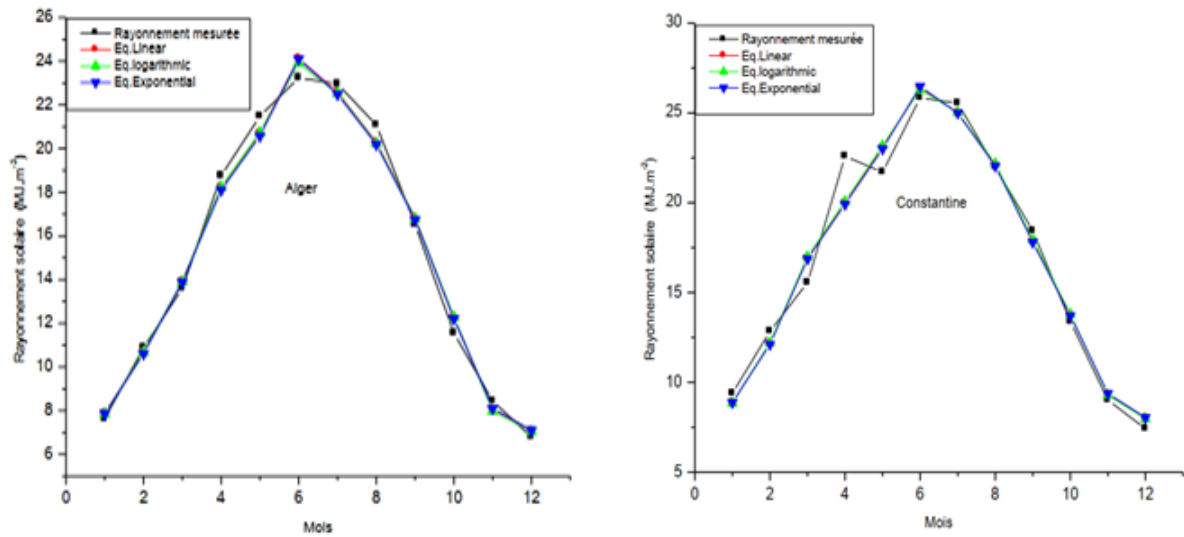


FIGURE 3.1 – Rayonnement mesuré et calculé à Alger et Constantine [1].

Les variations de l'insolation causées par la position du soleil peuvent être déterminées en utilisant des relations géométriques. Cependant, la dépendance des conditions météorologiques ne peut pas être précisément déterminée. Par conséquent, il est nécessaire d'acquérir des données météorologiques à long terme [2, 3].

La collecte de données sur l'insolation est très cruciale et indispensable à la conception des systèmes photovoltaïques, et l'acquisition de données sur l'ensoleillement se fait soit en effectuant des mesures directes sur le rayonnement solaire à cet endroit tout au long de l'année et sur plusieurs années ou, par l'achat des données auprès du service météorologique [3, 4].

Au fil des années, plusieurs modèles ont été proposés. Certains d'entre eux sont purement statistiques, alors que d'autres sont basés sur les paramètres météorologiques, tels que [3] :

1. Pression du site.
2. Eau précipitée dans la colonne verticale.
3. Réduction de la quantité d'ozone dans la colonne verticale.
4. Quantité réduite de dioxyde d'azote dans la colonne verticale dans le stratosphère

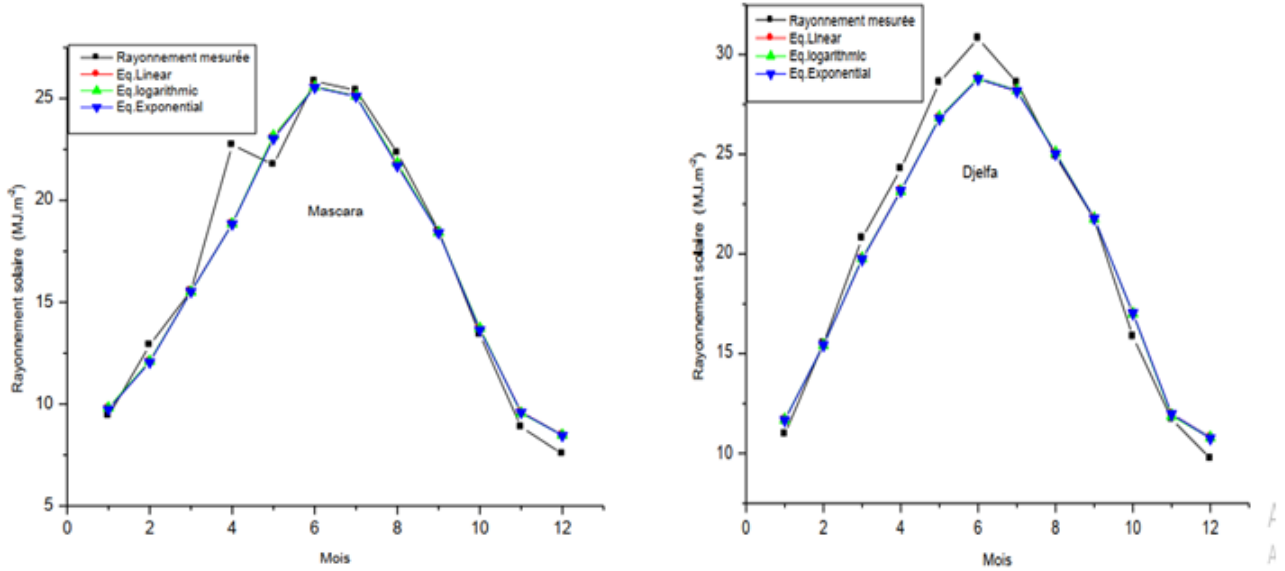


FIGURE 3.2 – Rayonnement mesuré et calculé à mascara et djelfa [1].

5. Réduction de la quantité de dioxyde d'azote dans la colonne verticale de la troposphère.
6. Coefficient de turbidité spectrale d'Angstrom.
7. Exposant de la longueur d'onde d'Angstrom.
8. Coefficient de turbidité à large bande d'Unsworth-Monteith.

Tous les paramètres ne contribuent pas de manière égale au calcul de l'indice de clarté. Certains sont plus dominants que les autres, et la mesure de certains de ces paramètres météorologiques nécessite des équipements rendant l'ensemble du processus coûteux. Pour une conception préliminaire d'un système photovoltaïque autonome, dépenser des sommes énormes pour obtenir des données météorologiques n'est pas justifié.

4 Processus de modélisation

Les moyennes mensuelles des données quotidiennes d'insolation solaire globale sont normalement disponibles pour plusieurs endroits dans une région. Les données doivent être telles qu'elles couvrent un plus large éventail de latitudes [3]. Ces données sont ensuite réduites à la moyenne mensuelle de l'indice de clarté quotidien (K_T) en prenant le rapport de l'insolation solaire globale mesurée sur l'insolation horizontale extra-terrestre calculée. L'insolation horizontale extra-terrestre par jour à un endroit donné est l'insolation sur une surface horizontale à l'endroit sans les effets atmosphériques. Il s'agit de calculer à partir de l'expression suivante [3, 5] :

$$H_0 = \frac{24I_0}{\pi} [\cos \varphi \cos \delta \sin \bar{\omega}_{sr} + \bar{\omega}_{sr} \sin \varphi \sin \delta] \quad (kWh/m^2) \quad (3.1)$$

avec

1. H_0 Insolation horizontale extra-terrestre en $kWh/m^2/jour$
2. I_0 Irradiation extra-terrestre en $kW/m^2/jour$ donnée par :

$$I_0 = I_{cs} \left[1 + 0.33 \left(\frac{300N}{365} \right) \right] \quad (3.2)$$

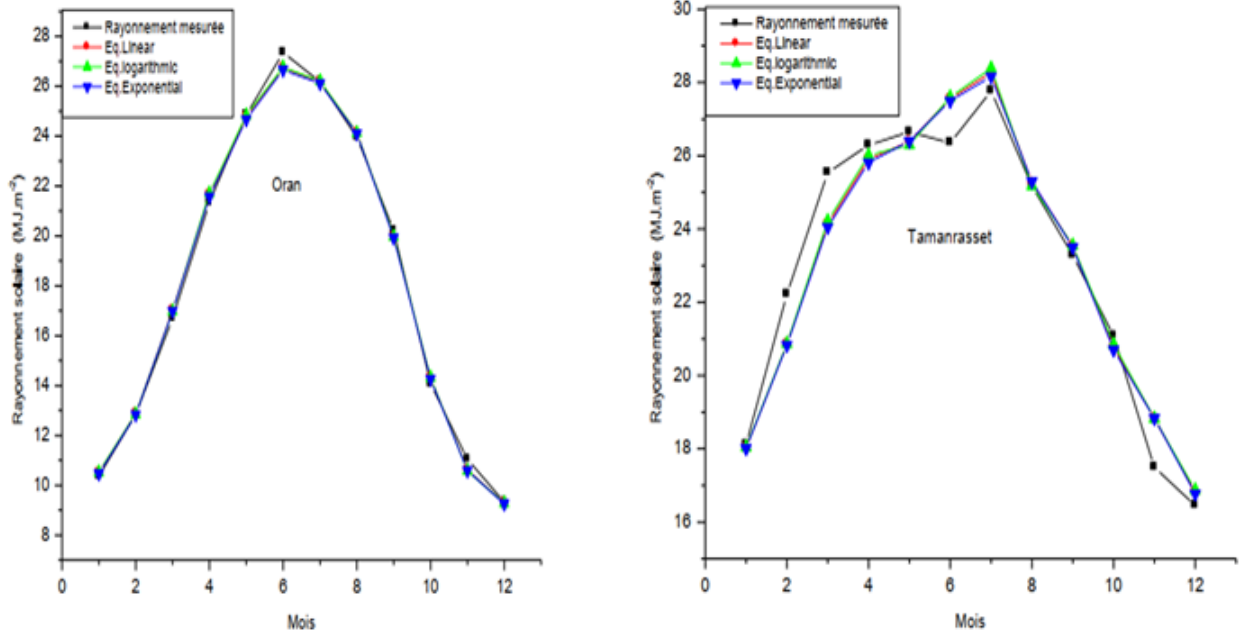


FIGURE 3.3 – Rayonnement mesuré et calculé à Oran et Tamanrasset [1].

où $I_{cs} = 1,367kW/m^2$ est la constante solaire [4], N le jour de l'année ($N=1$ le premier janvier et $N=365$ le 31 décembre, le 29 février est ignoré).

3. φ latitude du lieu en degrés
4. δ angle de déclinaison en degrés [6]

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{\pi(N - 80)}{365} \right] \quad (3.3)$$

5. $\bar{\omega}_{sr}$ angle horaire au lever du soleil en radians

$$\bar{\omega}_{sr} = \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (3.4)$$

Il est clair, d'après les expressions ci-dessus, que l'insolation horizontale extra-terrestre est une fonction de la latitude et du jour de l'année uniquement. Elle peut donc être calculée pour n'importe quel lieu et pour n'importe quel jour. Cependant, l'insolation calculée ne tient pas compte des effets atmosphériques.

L'indice de clarté, K_T , donne une mesure des effets atmosphériques à un endroit sur l'insolation. Cependant, l'indice de clarté est un paramètre stochastique, qui est fonction de la période de l'année, de la saison, des conditions climatiques et de la situation géographique. Par conséquent, pour inclure les effets de l'atmosphère sur l'insolation à un endroit donné, un modèle d'indice de clarté est essentiel. Pour développer le modèle de l'indice de clarté, l'insolation sur une surface horizontale pour quelques endroits est mesurée sur une période de temps englobant toutes les saisons et les conditions climatiques.

En utilisant l'équation (3.1), l'insolation horizontale extra-terrestre est calculée pour différents endroits pour lesquels l'insolation globale mesurée est disponible. Les valeurs calculées sont sans aucun effet atmosphérique. Sur la base des valeurs calculées de l'insolation horizontale extraterrestre pour les lieux et de l'insolation globale mesurée sur une surface horizontale pour les mêmes lieux, on calcule le K_T pour ces lieux. Un graphique de K_T en fonction du jour de l'année indique que la variation de K_T sur une période d'un an est une fonction périodique

de période égale à un an. Par conséquent, les séries de Fourier sont considérées comme une technique appropriée d'ajustement des courbes pour modéliser l'indice de clarté, K_T [3].

Représentons K_T par la série de Fourier suivante :

$$K_T = f(x, w, t) + e \quad (3.5)$$

avec e est une erreur (différence entre la valeur théorique $f(x, w, t)$ et la valeur mesurée de l'indice de clarté).

La fonction de l'indice de clarté proposée s'écrit comme :

$$f(x, w, t) = A_1 + A_2 \sin t + A_3 \sin 2t + A_4 \sin 3t + A_5 \cos t + \cos 2t + A_6 \cos 3t \quad (3.6)$$

où l'argument des termes trigonométriques (t) est une fonction du nombre de jour de l'année (N), telle que [6] :

$$t = \frac{2\pi(N - 80)}{365} \quad (3.7)$$

et les coefficients de Fourier A_1, A_2, \dots, A_7 sont fonctions de la latitude φ ($x = \varphi - 35^\circ$) et de la vapeur d'eau précipitée totale dans l'atmosphère (w) mesurée en g/cm^2 .

La variable x est proposée sur la base de la meilleure adéquation aux données disponibles [3]. Cela impliquerait une certaine itération pour déterminer la fonction appropriée pour x . Ici, toutes les données collectées concernent l'Algérie. Nous constatons qu'une valeur de décalage de 35 degrés de latitude donne le meilleur ajustement pour cette région.

Les coefficients de Fourier sont calculés à partir de l'expression suivante :

$$A_i = a_{i1} + a_{i2}x + a_{i3}x^2 + a_{i4}w + a_{i5}w^2 \quad (3.8)$$

En remplaçant les coefficients A_i dans l'expression de $f(x, w, t)$, on obtient :

$$\begin{aligned} f(x, w, t) = & a_{11} + a_{12}x + a_{13}x^2 + a_{14}w + a_{15}w^2 + \\ & (a_{21} + a_{22}x + a_{23}x^2 + a_{24}w + a_{25}w^2) \sin t + \\ & (a_{31} + a_{32}x + a_{33}x^2 + a_{34}w + a_{35}w^2) \sin 2t + \\ & (a_{41} + a_{42}x + a_{43}x^2 + a_{44}w + a_{45}w^2) \sin 3t + \\ & (a_{51} + a_{52}x + a_{53}x^2 + a_{54}w + a_{55}w^2) \cos t + \\ & (a_{61} + a_{62}x + a_{63}x^2 + a_{64}w + a_{65}w^2) \cos 2t + \\ & (a_{71} + a_{72}x + a_{73}x^2 + a_{74}w + a_{75}w^2) \cos 3t \end{aligned}$$

L'erreur est donnée par :

$$e = K_T - f(x, w, t) \quad (3.9)$$

La représentation de la série de Fourier devient valable si ce terme d'erreur est égal à zéro ou, au mieux, à un minimum. Le terme d'erreur peut être minimisé par la technique des moindres carrés [3]. La somme des carrés de l'erreur E est donnée par :

$$E = \sum [K_T - f(x, w, t)]^2 \quad (3.10)$$

En effectuant une dérivation partielle par rapport aux paramètres $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{75}$ et en l'assimilant à zéro, on obtient ce qui suit :

$$\frac{\partial E}{\partial a_{11}} = 2 \sum [K_T - (a_{11} + a_{12}x + a_{13}x^2 + \dots + a_{74}w \cos 3t + a_{75}w^2 \cos 3t)] = 0 \quad (3.11)$$

Cela donne l'expression suivante

$$\begin{aligned} & \sum (a_{11} + a_{12}x + a_{13}x^2 + a_{14}w + a_{15}w^2) + \\ & \sum (a_{21} + a_{22}x + a_{23}x^2 + a_{24}w + a_{25}w^2) \sin t + \\ & \sum (a_{31} + a_{32}x + a_{33}x^2 + a_{34}w + a_{35}w^2) \sin 2t + \\ & \sum (a_{41} + a_{42}x + a_{43}x^2 + a_{44}w + a_{45}w^2) \sin 3t + \\ & \sum (a_{51} + a_{52}x + a_{53}x^2 + a_{54}w + a_{55}w^2) \cos t + \\ & \sum (a_{61} + a_{62}x + a_{63}x^2 + a_{64}w + a_{65}w^2) \cos 2t + \\ & \sum (a_{71} + a_{72}x + a_{73}x^2 + a_{74}w + a_{75}w^2) \cos 3t = \sum_i^{max} K_{Ti} \end{aligned}$$

En effectuant des dérivations partielles similaires $\frac{\partial E}{\partial a_{12}}, \frac{\partial E}{\partial a_{13}}, \dots, \frac{\partial E}{\partial a_{74}}, \frac{\partial E}{\partial a_{75}}$, en les disposant sous forme matricielle et en les résolvant, on obtient les coefficients $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{75}$. Ces coefficients sont utilisés pour obtenir les coefficients de Fourier A_1, A_2, \dots, A_7 . Cela conduit au modèle suivant pour K_T :

$$K_T = A_1 + A_2 \sin t + A_3 \sin 2t + A_4 \sin 3t + A_5 \cos t + A_6 \cos 2t + A_7 \cos 3t \quad (3.12)$$

L'indice de clarté, K_T , pour tout lieu et pour tout jour de l'année peut maintenant être calculé en utilisant l'équation (3.12). À partir de l'équation (3.1) l'insolation horizontale extra-terrestre H_0 est calculée. L'insolation solaire globale H_{tm} en présence des effets atmosphériques sur un plan horizontal s'obtient à partir de l'expression suivante :

$$H_{tm} = K_T H_0 \quad (3.13)$$

5 Modèle pour l'Algérie

La validation du modèle se fait en deux étapes. Dans la première étape, les valeurs médianes quotidiennes des données d'insolation globale pour chaque mois pour 7 sites à travers l'Algérie sont prises. La gamme des latitudes couvertes est comprise entre $22.47 N$ et $36.43 N$ couvrant la majeure partie du pays. Les données ont été recueillies sur de longues périodes. La moyenne des données est calculée sur une période de 6 ans.

Sur la base du modèle, les insulations globales théoriques pour chaque lieu sont calculées et comparées aux données mesurées pour sa validité. Dans une deuxième étape, l'insolation globale théorique calculée à partir du modèle proposé pour toute station telle que Alger, dont la latitude se situe dans la gamme des latitudes considérées sont comparées aux valeurs mesurées de l'insolation globale médiane quotidienne pour Alger. Les courbes d'insolation calculées et mesurées sont étudiées pour illustrer la validité du modèle proposé. Le tableau (3.3) donne les valeurs médianes mesurées de l'insolation solaire globale quotidiennes H_{tm} en présence de l'atmosphère en $kWh/m^2/jour$ [1] et la vapeur d'eau totale précipité dans l'atmosphère, w en g/cm^2 pour les six stations mentionnées plus haut [7]. Il s'agit des données médianes quotidiennes pour chaque mois d'une année.

La première étape consiste à calculer l'insolation extra-terrestre sur une surface horizontale sans aucun effet atmosphérique. Ceci est fonction du jour de l'année. En divisant la valeur mesurée de l'insolation globale pour ce jour de l'année par la valeur d'insolation, les données

CHAPITRE 3. MÉTHODE DE CALCUL DE L'INSOLATION SOLAIRE SUR UN PLAN HORIZONTAL EN PRÉSENCE DES EFFETS ATMOSPHÉRIQUES

| | Param. | Alger | Constantine | Djelfa | Mascara | Oran | Tamanst. |
|-----------|----------|--------|-------------|--------|---------|--------|----------|
| Janvier | H_{tm} | 2,1222 | 2,6083 | 3,0444 | 2,6167 | 2,8805 | 5,0333 |
| | w | 0.2072 | 0.3202 | 0.0777 | 0.0750 | 0.1150 | 0 |
| Février | H_{tm} | 3,0222 | 3,5694 | 4,3083 | 3,5833 | 3,5639 | 6,1722 |
| | w | 0.1361 | 0.1506 | 0.0439 | 0.1311 | 0.145 | 0.008 |
| Mars | H_{tm} | 3,7778 | 4.3200 | 5,7750 | 4,3194 | 4,6361 | 7,0944 |
| | w | 0.0550 | 0.1007 | 0.0332 | 0.0667 | 0.0588 | 0.0180 |
| Avril | H_{tm} | 5,2111 | 6,2750 | 6,7389 | 6,3111 | 5,9222 | 7,3028 |
| | w | 0.0516 | 0.2081 | 0.0122 | 0.0822 | 0.0844 | 0 |
| Mai | H_{tm} | 5,9667 | 6.0200 | 7,9444 | 6,0417 | 6,9028 | 7,4028 |
| | w | 0.0161 | 0.1483 | 0.0857 | 0.1630 | 0.1215 | 0.0011 |
| Juin | H_{tm} | 6,4555 | 7,1778 | 8,5556 | 7,1778 | 7,5972 | 7,3194 |
| | w | 0.0038 | 0.0697 | 0.0272 | 0.0288 | 0.0066 | 0.0556 |
| Juillet | H_{tm} | 6,3778 | 7,0944 | 7,9389 | 7,0556 | 7,2722 | 7,7139 |
| | w | 0.0013 | 0.0149 | 0.0680 | 0.0011 | 0.0005 | 0.0116 |
| Aout | H_{tm} | 5,8555 | 6,1083 | 6,9167 | 6,2028 | 6,6528 | 6,9917 |
| | w | 0.0361 | 0.1145 | 0.0641 | 0.0200 | 0.0010 | 0.0408 |
| Septembre | H_{tm} | 4,5889 | 5,1195 | 6,0334 | 5,1389 | 5,6139 | 6,4667 |
| | w | 0.1027 | 0.0135 | 0.1746 | 0.1144 | 0.0382 | 0.0125 |
| Octobre | H_{tm} | 3,2111 | 3,7167 | 4,4000 | 3,7250 | 3,9084 | 5,8555 |
| | w | 0.0920 | 0.1250 | 0.1665 | 0.0983 | 0.1007 | 0.0583 |
| Novembre | H_{tm} | 2,3444 | 2,5028 | 3,2556 | 2,4639 | 3,0667 | 4,8583 |
| | w | 0.1927 | 0.2143 | 0.0965 | 0.1950 | 0.3512 | 0.0161 |
| Décembre | H_{tm} | 1,8889 | 2,0611 | 2,7056 | 2,1000 | 2,5917 | 4,5694 |
| | w | 0.2650 | 0.3105 | 0.1138 | 0.1180 | 0.1440 | 0 |

TABLE 3.3 – Données de précipitations w (mesurée en g/cm^2) et d'insolation mesurée en présence de l'atmosphère H_{tm} (mesurée en $KWh/m^2/jour$) des 6 sites étudiés [12, 8].

de l'indice de clarté pour ce jour sont obtenues. Le processus est effectué pour tous les six lieux pour tous les mois de l'année, aux valeurs médianes du mois.

Les valeurs "N" pour chaque mois sont 15, 45, 75, 105, 135, 165, 195, 225, 255, 285, 315 et 345 pour les mois de janvier à décembre, respectivement. Sur la base de ces valeurs calculées de K_T , les coefficients $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{75}$ de l'équation (3.12) sont calculés. Ils sont énumérés comme suit sur le tableau (3.4) :

| | | | | | | | | | |
|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
| a_{11} | 0.6428 | a_{12} | -0.0630 | a_{13} | -0.0047 | a_{14} | -0.5167 | a_{15} | 1.7145 |
| a_{21} | 0.0344 | a_{22} | 0.0024 | a_{23} | -0.0002 | a_{24} | 0.7994 | a_{25} | -5.1247 |
| a_{31} | -0.0164 | a_{32} | -0.0016 | a_{33} | -0.0002 | a_{34} | 0.4079 | a_{35} | -3.0071 |
| a_{41} | -0.0069 | a_{42} | 0.0036 | a_{43} | 0.0003 | a_{44} | -0.1348 | a_{45} | 1.6959 |
| a_{51} | 0.0283 | a_{52} | -0.0120 | a_{53} | -0.0009 | a_{54} | -0.3783 | a_{55} | 1.8412 |
| a_{61} | 0.0216 | a_{62} | 0.0000 | a_{63} | 0.0001 | a_{64} | -0.9903 | a_{65} | 7.5607 |
| a_{71} | -0.0067 | a_{72} | -0.0005 | a_{73} | 0.0001 | a_{74} | -0.2929 | a_{75} | 2.5910 |

TABLE 3.4 – Coefficients a_{ij} calculés.

5.1 Développement du Modèle sur Matlab

Les calculs du modèle proposé sont effectués sur Matlab suivant les étapes illustrées sur la figure (3.4) et expliquées ci-après.

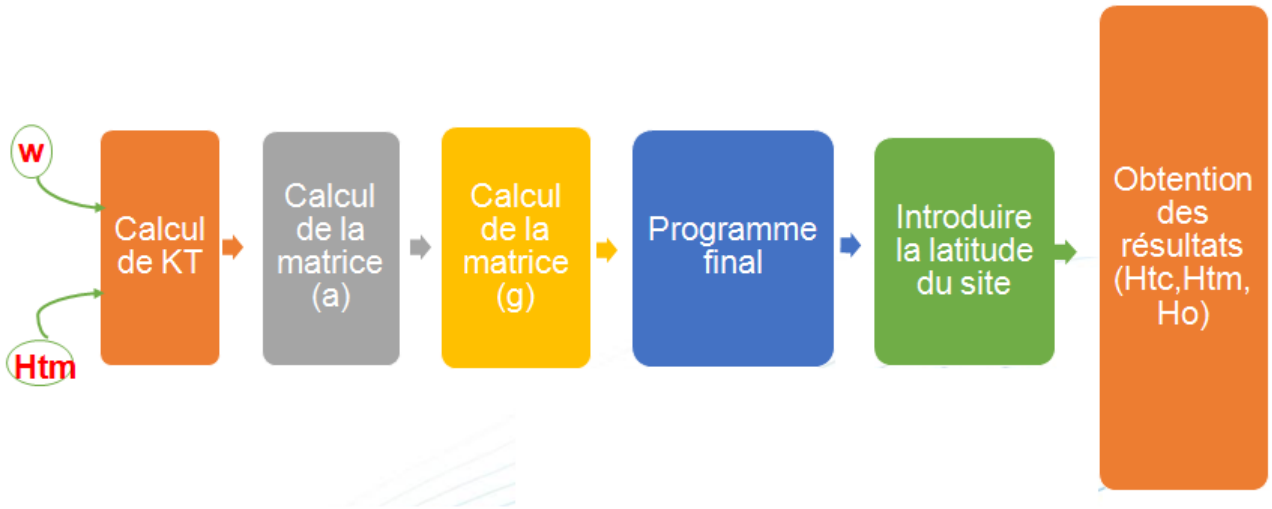


FIGURE 3.4 – Procédure d'obtention par la méthode des moindres carrés de l'indice de clarté $K_T(x, \omega, t)$ en fonction de la latitude x et la précipitation d'eau ω du lieu pour un jour t .

1. Détermination de l'insolation extraterrestre H_0
 - (a) Donner la latitude du site en degré
 - (b) Donner le nombre de jour N de l'année à partir du 1 Janvier
 - (c) Calcul de la déclinaison δ soleil
 - (d) Calcul du facteur de l'insolation extraterrestre k
 - (e) Calcul de l'angle horaire du soleil (lever du soleil) ω_{sr}
 - (f) Calcul de l'insolation Extraterrestre du jour $H_0(N)$
2. Calcul de l'indice de clarté K_T expérimental
 - (a) Donner les valeurs de H_{tm} correspondantes (insolation au sol mesurée (tableau 3.3))
 - (b) Diviser ces valeurs de $H_{tm}(N)$ par $H_0(N)$ pour obtenir le K_T mesuré de chaque site.
3. Calcul de l'indice de clarté K_T selon le modèle proposé
 - (a) Donner les valeurs de précipitation d'eau (chaque ligne pour un site)
 - (b) Donner la valeur du coefficient de réflexion
 - (c) Exécuter le programme sur Matlab afin d'obtenir la matrice des coefficients $(a_{11}, a_{12}, \dots, a_{74}, a_{75})$
 - (d) Exécuter le programme sur Matlab afin d'obtenir la matrice des coefficients $(g_{11}, g_{12}, \dots, g_{72}, g_{73})$ de la série de Fourier proposée pour la précipitation d'eau w .
 - (e) Utiliser les deux matrices a et g pour calculer le facteur de clarté K_T théorique.
 - (f) Utiliser la méthode des moindres carrés pour minimiser l'erreur entre les valeurs théoriques et expérimentales de l'indice de clarté K_T

6 Résultats et discussion

Dans le tableau (3.5), les valeurs mesurées H_{tm} , et calculées H_{tc} de l'insolation journalière en unité $kWh/m^2/jour$ sont reportées pour les six sites en Algérie. Aussi, les diagrammes d'insolation globale pour ces six stations sont donnés dans les figures (3.5-3.10). Les diagrammes indiquent à la fois les valeurs mesurées de l'insolation H_{tm} (en bleu) et les valeurs calculées de l'insolation H_{tc} (rouge), ainsi que la valeur de l'insolation extra-terrestre calculée H_0 (jaune) pour la comparaison. L'erreur maximale constatée dans les graphiques se situe dans une fourchette de 14%, ce qui est bon pour une conception préliminaire d'un système photovoltaïque.

| | Param. | Alger | Constantine | Djelfa | Mascara | Oran | Tamanst. |
|-----------|----------|--------|-------------|--------|---------|--------|----------|
| Janvier | H_{tm} | 2,1222 | 2,6083 | 3,0444 | 2,6166 | 2,8805 | 5,0333 |
| | H_{tc} | 2.3100 | 2.3642 | 3.0845 | 2.7317 | 2.6691 | 5.0392 |
| Février | H_{tm} | 3,0222 | 3,5694 | 4,3083 | 3,5833 | 3,5639 | 6,1722 |
| | H_{tc} | 3.0681 | 3.1611 | 4.0846 | 3.6576 | 3.5788 | 6.1415 |
| Mars | H_{tm} | 3,7778 | 4.3200 | 5,7750 | 4,3194 | 4,6361 | 7,0944 |
| | H_{tc} | 3.9393 | 4.1122 | 5.2714 | 4.7932 | 4.6978 | 7.2820 |
| Avril | H_{tm} | 5,2111 | 6,2750 | 6,7389 | 6,3111 | 5,9222 | 7,3028 |
| | H_{tc} | 5.2127 | 5.4134 | 6.5716 | 6.1227 | 6.0291 | 7.4601 |
| Mai | H_{tm} | 5,9667 | 6.0200 | 7,9444 | 6,0417 | 6,9028 | 7,4028 |
| | H_{tc} | 5.8559 | 6.5744 | 7.8159 | 7.3655 | 7.2671 | 7.2645 |
| Juin | H_{tm} | 6,4555 | 7,1778 | 8,5556 | 7,1778 | 7,5972 | 7,3194 |
| | H_{tc} | 6.8362 | 7.1288 | 8.4051 | 7.9821 | 7.8081 | 7.4660 |
| Juillet | H_{tm} | 6,3778 | 7,0945 | 7,9389 | 7,0556 | 7,2722 | 7,7139 |
| | H_{tc} | 6.5721 | 6.7047 | 7.7599 | 7.3788 | 7.2952 | 7.4837 |
| Aout | H_{tm} | 5,8556 | 6,1083 | 6,9167 | 6,2028 | 6,6528 | 6,9917 |
| | H_{tc} | 5.8489 | 6.0106 | 6.8433 | 6.5382 | 6.4721 | 7.2340 |
| Septembre | H_{tm} | 4,5889 | 5,1195 | 6,0333 | 5,1389 | 5,6139 | 6,4667 |
| | H_{tc} | 4.7600 | 4.8932 | 5.6958 | 5.3775 | 5.3121 | 6.5316 |
| Octobre | H_{tm} | 3,2111 | 3,7167 | 4,4000 | 3,7250 | 3,9083 | 5,8555 |
| | H_{tc} | 3.3845 | 3.5128 | 4.2963 | 3.9856 | 3.9218 | 5.6643 |
| Novembre | H_{tm} | 2,3444 | 2,5028 | 3,2556 | 2,4639 | 3,0667 | 4,8583 |
| | H_{tc} | 2.6506 | 2.4369 | 3.0723 | 2.8289 | 2.7779 | 4.9173 |
| Décembre | H_{tm} | 1,8889 | 2,0611 | 2,7056 | 2,1000 | 2,5917 | 4,5695 |
| | H_{tc} | 1.9428 | 2.0213 | 2.6194 | 2.3606 | 2.318 | 4.5454 |

TABLE 3.5 – Valeurs mesurées H_{tm} et calculées H_{tc} des insolutions journalières en unité $KWh/m^2/jour$ de six sites en Algérie.

Nous pouvons voir clairement d'après les graphiques que les valeurs d'insolation calculées suivent les valeurs mesurées, comme on peut voir aussi que le nord de l'Algérie reçoit entre 43% dans les jours les plus nuageux et 63% dans les jours les plus clair, de l'insolation extraterrestre, par contre ce pourcentage varie entre 55% et 71% dans les mêmes périodes aux régions du sud, par conséquence, un gisement solaire plus grand au sud algérien qu'au nord.

Les valeurs obtenues sont très proches pour la plupart des lieux. Ces résultats valident le modèle. Cependant, puisque le modèle lui-même est basé sur les données de ces six sites la proximité des résultats ci-dessus doit être validée davantage. Pour ce faire, il convient de prendre en considération les valeurs mesurées et les valeurs calculées de l'ensoleillement pour un lieu

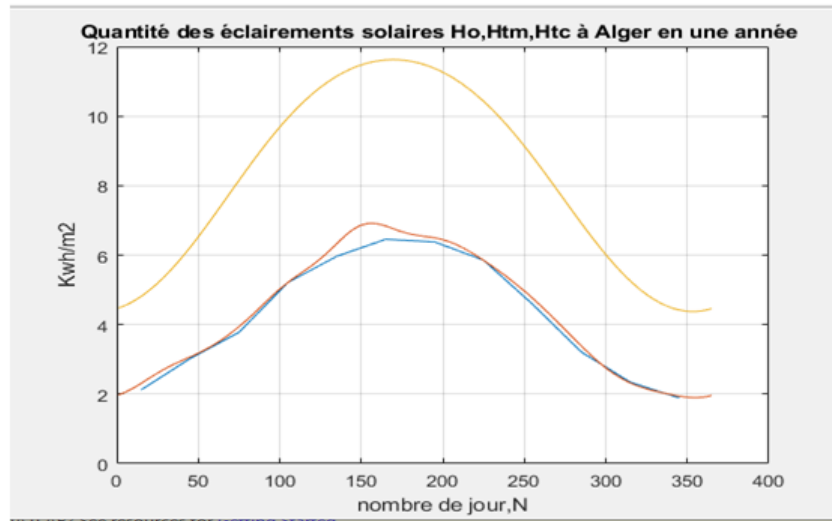


FIGURE 3.5 – Les insolationes H_0 , H_{tc} et H_{tm} à Alger durant une année.

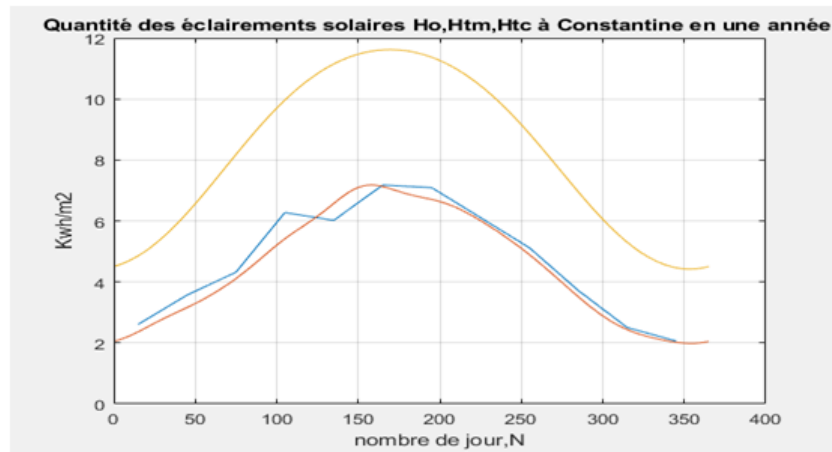


FIGURE 3.6 – Les insolationes H_0 , H_{tc} et H_{tm} à Constantine durant une année.

dont les données n'ont pas été utilisées pour développer le modèle et comparer la proximité de ces valeurs.

Ain Bessem est l'un de ces lieux dont la latitude se situe dans la fourchette des latitudes du modèle et dont les données mesurées ne sont pas utilisées dans le bâtiment modèle. Les données mesurées et calculées d'insolation pour Ain bessem pour une année sont données dans le tableau (3.6) et la figure (3.11).

| | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Jun |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| H_{tm} | 2.361 | 2.9916 | 4.1416 | 5.2527 | 6.325 | 6.975 |
| H_{tc} | 2.3319 | 3.1080 | 4.0177 | 5.3051 | 6.4436 | 6.9742 |
| | Jul | Aou | Sep | Oct | Nov | Déc |
| H_{tm} | 6.6 | 5.8861 | 4.916 | 3.7 | 2.505 | 2.055 |
| H_{tc} | 6.5927 | 5.9241 | 4.8222 | 3.4432 | 2.3757 | 1.9779 |

TABLE 3.6 – Insolation mesurées et calculées pour le site de Ain-bessam, Algérie.

Il ressort également du tableau (3.6) que les valeurs mesurées et les valeurs calculées sont très proches les unes des autres et leurs graphes dans la figure (3.11) sont presque superposés

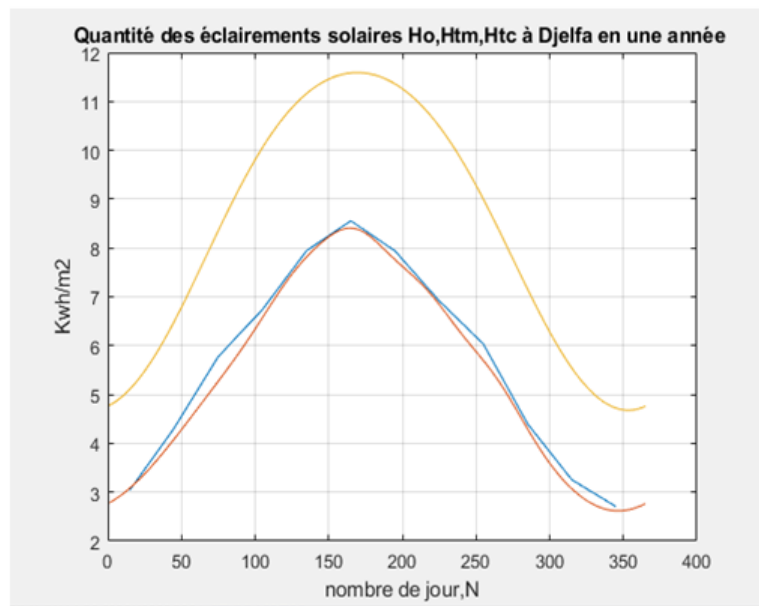


FIGURE 3.7 – Les insulations H_0 , H_{tc} et H_{tm} à Djelfa durant une année.

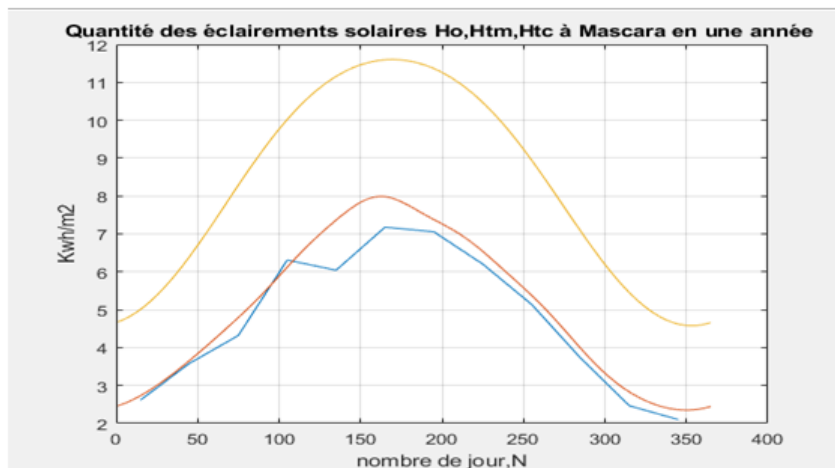


FIGURE 3.8 – Les insulations H_0 , H_{tc} et H_{tm} à Mascara durant une année.

sur toute les périodes de l'année, ce qui valide définitivement non seulement le modèle mais aussi la méthodologie de la modélisation.

7 Comparaison entre ce modèle et les méthodes citées dans le chapitre précédent

En comparant le modèle présenté dans ce chapitre avec les méthodes citées dans ce mémoire nous pouvons conclure que ce modèle utilisé est plus pratique et toujours applicable puisqu'il nécessite un minimum de données météorologiques disponibles (pas forcément les données du site à étudier) pour estimer l'insolation solaire horizontale de n'importe quelle région sur terre. Il suffit donc d'introduire les coordonnées géographiques et un nombre restreint de données météorologiques sur une région pour trouver l'insolation sur n'importe que autre site dans cette même région. En plus, ce modèle assure des résultats aussi bons et fiables que les autres méthodes.

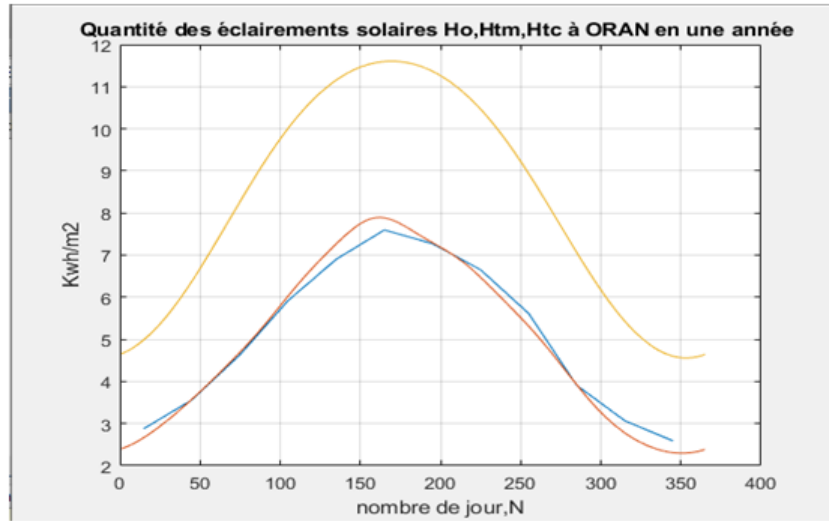


FIGURE 3.9 – Les insolationes H_0 , H_{tc} et H_{tm} à Oran durant une année.

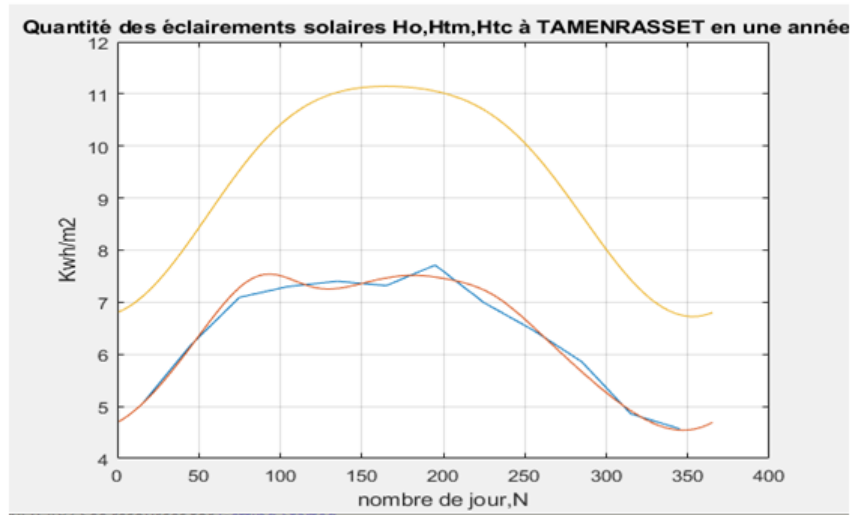


FIGURE 3.10 – Les insolationes H_0 , H_{tc} et H_{tm} à Tamanrasset durant une année.

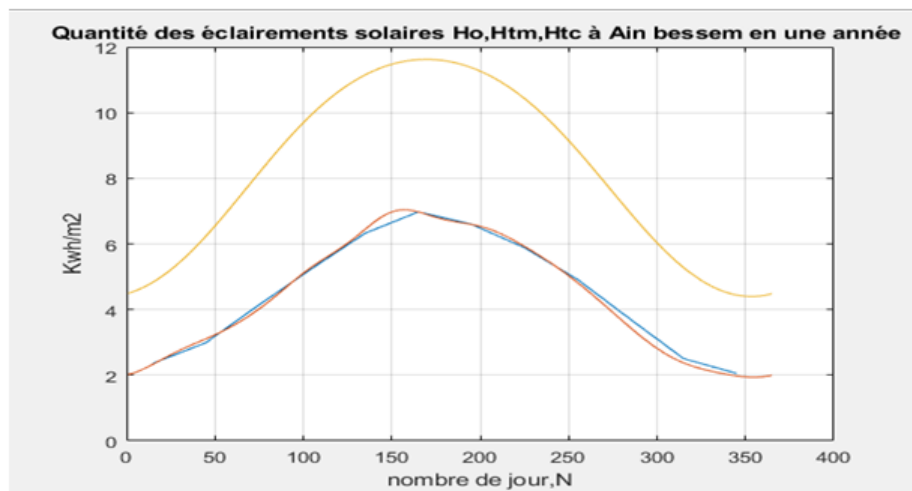


FIGURE 3.11 – Les insolationes H_0 , H_{tc} et H_{tm} à Ain-bessem durant une année.

8 Conclusion

Une méthode générique de développement d'un modèle d'insolation solaire pour une région spécifique a été expliquée. L'approche de modélisation a été faite pour l'Algérie, puis validée pour vérifier le modèle et la méthodologie. Il ressort des résultats que les erreurs dans les valeurs d'insolation calculées sont inférieures de 14 % aux valeurs mesurées, et vu la fiabilité, la rapidité, et le besoin de peu de données, la méthodologie proposée pour la construction d'un modèle peut être utilisée non seulement pour l'Algérie mais aussi pour n'importe quelle région du monde. Pour que le modèle soit plus précis, les données devraient être disponibles pour les lieux bien répartis dans la région couvrant de grandes gammes des latitudes. En outre, les données disponibles doivent être aussi précises que possible pour obtenir un modèle à faible erreur qui peut être utilisé pour calculer l'insolation solaire globale pour n'importe quel endroit et jour donné. Aujourd'hui, à l'aide de satellites, les données sur une région spécifique peuvent être mesurées avec une bonne précision par les services météorologiques. Avec ces données, des modèles avec des coefficients de Fourier plus précis peuvent être construits et peuvent être utilisés pour estimer l'insolation solaire globale dans une région en utilisant des paramètres facilement mesurables.

Bibliographie

- [1] S. Mohamed « Contribution à la quantification de l'irradiation solaire globale en Algérie et applications aux générateurs photovoltaïques ». Thèse de Doctorat. Université Ferhat abbas de Sétif.(2012)
- [2] H. Suehrcke, On the relationship between duration of sunshine and solar radiation on the earth's surface : Angstrom's equation revisited, J solar energy, 2000
- [3] R. Kumar, L. Umanand . "Estimation of solar radiation using clearness index for sizing photovoltaic system.centre of electronic design and technology.Indian institu of science.Bangalor". India.available on line 8 April 2005
- [4] C, Gueymard, Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part I : detailedtheoretical performance assessment, J Solar Energy, 2003
- [5] Liu YH, Jordan RC. "Daily insolation on surfaces tilted toward the equator". Transactions ASHRAE (1962)
- [6] Exell RHB. "A mathematical model for solar radiation in Southeast Asia (Thailand)".J Solar Energy (1981)
- [7] données de précipitations en Algérie. Site : <https://www.infoclimat.fr/climatologie/globale/mois/60419.html> (consulté en juillet 2020)
- [8] I. Supit, R. R. A. Van , Solar Energy 63, 147 (1998)

Conclusion générale et perspectives

L'énergie solaire est renouvelable, inépuisable, propre, dispensée, et suffisamment disponible en Algérie pour des applications rentables. Toutes ces propriétés exigent l'estimation performante de l'irradiation solaire, afin réaliser une étude de dimensionnement fiable basées sur des données réelles. Pour cette raison, nous avons réalisé une étude d'estimation de cette énergie en quelques sites en Algérie en utilisant un modèle rapide et fiable développé sur Matlab, qui répond è nos besoins(résultats bons et fiable) et qui dépasse les obstacles (raretés de données) par l'utilisation de peu de données météorologiques mesurables afin, d'assurer aux études de dimensionnement des installations PV, la quantité du gisements solaire existant réellement sur le site . La modélisation du rayonnement solaire de quelques sites algériens (Alger, Ain-Bessam, Constantine, Djelfa, Mascara, Oran et Tamanrasset) a été faite en utilisant les données mesurées du rayonnement solaire et de l'insolation d'une période de six années (2000-2005), et a donnée des résultats impressionnants comme elle peut le donner pour n'importe quel site en Algérie en quelques secondes seulement en introduisant que les données géographiques de ce dernier dans le modèle. Ce travail réalisé ne se limite pas ici, mais il ouvre de nombreuses perspectives qui sont les suivantes :

- Faire des mises à jour du modèle chaque année en utilisant les données de cette dernières.
- Rendre les calculs de développement de ce modèle plus simples et automatisés.
- Développer un modèle pour chaque région (nord, sud, est, ouest) et wilaya.
- Construire une base de données pour stocker les résultats obtenus chaque année afin de pouvoir étudier le changement de l'énergie solaire sur une bonne période et les mettre aux services des études de dimensionnement des stations PV.