

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE AFRICAINE AHMED DRAIA ADRAR  
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES



**Mémoire de Magister**

**Option : Modélisations et Simulation en Energétique**

**Présenté par : Djelloul Benatallah**

**THEME**

*Etude et simulation de flux solaire avec intégration d'un système  
d'information géographique (S.I.G) pour la wilaya d'Adrar*

**Devant le jury :**

<b>Président</b>	<b>M<sup>r</sup> A.BENATIALLAH</b>	<b>Professeur à U. Adrar</b>
<b>Promoteur</b>	<b>M<sup>r</sup> M.HAMOUDA</b>	<b>Professeur à U. Adrar</b>
<b>Examineur</b>	<b>M<sup>r</sup> M.SELLAM</b>	<b>Professeur à U. Béchar</b>
<b>Examineur</b>	<b>M<sup>r</sup> S.BENTOUBA</b>	<b>MC.A à U. Adrar</b>
<b>Co-Promoteur</b>	<b>M<sup>r</sup> K.BOUCOUICHA</b>	<b>Attaché de recherche à URER.MS Adrar</b>

**Année Universitaire 2013 / 2014**

## **REMERCIEMENTS**

Avant tout, Je remercie notre Dieu le tout puissant de m'avoir donnée la force d'atteindre mon but et d'accomplir mon travail.

Que mes remerciements les plus sincères s'adressent à mon directeur de mémoire Monsieur **M. HAMOUDA**, professeur à l'université d'Adrar et directeur de l'URER.MS, je lui exprime toute ma reconnaissance pour sa confiance en mon travail, sa patience et les nombreux conseils qu'il m'a prodigués.

Mes remerciements vont également à Mr. **A.BENATIALLAH** Professeur à l'université d'Adrar, a bien voulu présider ce jury de thèse

Mes remerciements vont également à Mr. **M.SELLAM** Professeur à l'université Bechar, Mr. **Said BENTOUBA** maître de conférences à l'université d'Adrar, qui m'ont fait l'honneur de faire partie de ce jury.

Mes remerciements vont également à Mr. **Kada BOUCHOUICHA** attaché de Recherches à l'unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien d'Adrar URER.MS pour ces conseils scientifiques et de sa disponibilité sans limite

Mes remerciements vont également tous les personnes qui n'est pas citées et qui ont de près ou de loin participé à la réalisation de ce travail.

# **DEDICACES**

*Je dédie ce modeste travail*

*A mes très chers parents.*

*A mes sœurs.*

*A tous mes amis.*

*A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la  
réalisation de ce travail.*

# SOMMAIRE

Résumé

Nomenclature

Introduction générale.....1

## **Chapitre I** : Gisement solaire

Introduction.....3

I.1 Le soleil.....3

I.1.1 Mouvement de la Terre autour du Soleil.....4

I.1.2 Spectre du rayonnement solaire .....5

I.1.3 Facteur de correction de la distance terre-soleil .....6

I.2 Rayonnement solaire à la traversée de l'atmosphère .....7

I.2.1 L'atmosphère .....7

I.2.2 Atténuation du rayonnement solaire .....8

I.2.3 Les nuages .....10

I.3 L'énergie solaire .....11

I.4 Position du soleil par rapport à la terre .....13

I.4.1 Repérage d'un site à la surface de la terre (coordonnées géographiques).....13

I.4.2 La trajectoire apparente du soleil.....14

I.5 Le temps .....17

I.6 Principales mesures du rayonnement solaire.....20

I.6.1 Rayonnement solaire direct .....20

I.6.2 Rayonnement diffus.....20

I.6.3 Rayonnement global.....21

I.6.4 L'albédo du sol .....21

I.6.5 La durée d'insolation.....21

I.7 Le réseau météorologique Algérien .....22

I.8 Le gisement solaire en Algérie .....23

Conclusion.....26

Références bibliographiques

## **Chapitre II** : Système d'information géographique (S.I.G)

Introduction.....	27
II.1 Définitions .....	28
II.2 Bref historique des SIG .....	29
II-3 La vocation d'un SIG.....	29
II.4 Quelques domaines d'application des SIG .....	32
II.5 Les avantages des SIG.....	32
II.6 Les contraintes des SIG.....	33
II.7 Les principales composantes d'un SIG .....	33
II.8 Usage des SIG en énergies renouvelable.....	34
II.9 Classification des outils SIG.....	34
II.10 Avancés, axes de recherches et nouveautés .....	36
II.11 S.I.G idéal .....	38
II.12 Mise en place d'un SIG.....	38
Conclusion.....	39
Références bibliographiques	

## **Chapitre III** : Modélisation du flux solaire

Introduction .....	40
III.1 Composantes du rayonnement solaire.....	40
III.1.1 Rayonnement direct.....	41
III.1.2 Rayonnement diffus.....	41
III.1.3 Rayonnement global.....	41
III.1.4 Albédo.....	42
III-2 Orientation d'un Plan .....	44
III.3 Angle d'incidence sur un Plan .....	44
III.4 Modélisation du rayonnement solaire sur un plan horizontal par ciel clair.....	45
III.4.1 Rayonnement hors atmosphère .....	45
III.4.2 Calcul de l'irradiation globale reçue sur un plan .....	45
III.5 Modèle de calcul du rayonnement solaire .....	45
III.5.1 Présentation du modèle de Capderou .....	46
III.5.1.1 Masse Atmosphérique.....	47
III.5.1.2 Epaisseur Optique de l'Atmosphère.....	47
III.5.1.3 Irradiation globale reçue sur un plan horizontal.....	47

III.5.1.4 Irradiation globale reçue sur un plan incliné .....	48
III.5.2 Modèle R. Sun .....	50
III.5.2.1 Facteur de trouble de Linke.....	50
III.5.2.2 Eclairage direct sur un plan horizontal par ciel clair.....	51
III.5.2.3 Eclairage diffus incident sur un plan horizontal par ciel clair.....	52
III.5.2.4 Eclairage direct incident sur un plan incliné par ciel clair.....	53
III.5.2.5 Eclairage diffus incident sur un plan incliné par ciel clair.....	54
III.5.3 Modèle de Bird & Hulstrom .....	56
III.5.3.1 Calcul du rayonnement direct .....	56
III.5.3.2 Calcul du rayonnement diffus .....	58
III.5.3.3 Calcul du rayonnement global .....	59
Conclusion.....	59
Références bibliographiques	

#### **Chapitre IV** : Simulation du flux solaire pour Adrar

Introduction.....	60
IV.1 Données expérimentales .....	60
IV.2 Algorithme de calcul de composante directe et diffusé de l'irradiation reçue sur un plan horizontale.....	61
IV.3 Tableaux et Courbes des résultats de calculs.....	62
IV.4. Résultats et interprétations.....	63
IV.4.1 Résultats obtenus .....	63
IV.4.1.1 Résultats obtenus pour la journée du 21 Mars .....	64
IV.4.1.2 Résultats obtenus pour la journée du 19 Juin.....	66
IV.4.1.3 Résultats obtenus pour la journée du 13 Juillet .....	68
IV.4.1.4 Résultats obtenus pour la journée du 16 Septembre.....	70
IV.4.1.5 Résultats obtenus pour la journée du 21 Décembre .....	72
IV.4.2 Etude comparative et analyse critique.....	74
Conclusion .....	76

#### **Chapitre V** : Intégration avec SIG pour Adrar

Introduction .....	77
V-1 Objectif .....	77
V.2 Bibliographie des logiciels de gisement solaire.....	78
V.3 Description du logiciel GISOL.....	79

V.3.1 Ouvrir un fichier carte .....	80
V.3.2 L'interface générale du logiciel GISOL .....	81
V.3.3 Base de données des sites de la wilaya d'Adrar .....	82
V.3.4 Consultation et modification information de site .....	83
V.3.5 Modélisation de flux solaire.....	84
V.3.6 Calcul des paramètres astronomique du site.....	85
V.3.7 Impression rapport des paramètres astronomique et données du site.....	86
V-3.8 Déclinaison annuel.....	87
V.3.9 Graphe de variation mensuel de l'éclairement solaire du site Adrar.....	88
V.3.10 Carte thématique d'éclairement solaire de la région d'Adrar.....	89
Conclusion générale .....	90
Références bibliographiques	

Annexe

## Liste des figures

Fig. I.1 : Le soleil

Fig. I.2: Mouvement de la terre autour du soleil

Fig. I.3 Distribution spectrale du rayonnement solaire

Fig. I.4 : Variations de la distance du terre-soleil pendant l'année

Fig. I.5 : Couches de l'atmosphère

Fig. I.6 : Processus de transmission, d'absorption, de diffusion et de réflexion dans  
l'atmosphère

Fig I.7 : Constante solaire

Fig. I.8: Masse d'air

Fig. I.9 : Coordonnées terrestres

Fig. I.10 : Déclinaison

Fig. I.11 : Angle horaire  $\omega$  du soleil

Fig. I.12 : Coordonnées solaires selon le repère horizontal

Fig. I.13 : Variations annuelles de l'équation du temps

Fig. I.14 : l'instrument pyrhéliomètre

Fig. I.15 : l'instrument qui mesure le rayonnement diffus

Fig.I.16 : le pyranomètre

Fig.I.17 : l'Albédomètre

Fig. I.18 : l'héliographe

Fig. I.19 : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel

Fig. I.20 : Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné

Fig I.21: Moyenne annuelle de l'irradiation reçue sur une surface horizontale

Fig I.22: Moyenne annuelle de la durée d'insolation mesurée - Période 1992-2002

Fig II-1 : Vocation d'un SIG

Fig II-2: Limite administratives W.ADRAR



Fig II-3 : Principales composantes d'un SIG

Fig III.1 : Les différents composants du rayonnement solaire

Fig. III-2 : Transmission du rayonnement solaire à la terre

Fig.III.3 : Composants au Sol du Rayonnement Solaire

Fig III.4 : Variation horaire de l'énergie solaire

Fig. IV.1 : Graphe hauteur de soleil

Fig. IV. 2: Eclairage Direct 21 mars

Fig. IV.3 : Eclairage Diffus

Fig. IV.4 : Eclairage Global

Fig. IV.5 : Erreur relative instantanée correspondante

Fig. IV.6 : Eclairage direct 19 juin

Fig. IV.7 : Eclairage diffus

Fig. IV.8 : Eclairage global

Fig. IV.9 : Erreur relative instantanée correspondante

Fig. IV.10 : Eclairage direct 13 juillet

Fig. IV.11 : Eclairage diffus

Fig. IV.12 : Eclairage global

Fig. IV.13 : Erreur relative instantanée correspondante

Fig. IV.14 : Eclairage direct 16 Septembre

Fig. IV.15 : Eclairage diffus

Fig. IV.16 : Eclairage global

Fig. IV.17 : Erreur relative instantanée correspondante

Fig. IV.18 : Eclairage direct 21 decembre

Fig. IV.19 : Eclairage diffus

Fig. IV.20 : Eclairage global

Fig. IV.21 : Erreur relative instantanée correspondante

Fig. V.1: Boite de dialogue pour ouvrir un fichier carte

Fig. V-2: L'interface du logiciel

Fig. V.3: Liste des sites de la wilaya d'Adrar

Fig. V.4: Caractéristique de site Adrar

Fig. V.5: Modélisation de l'éclairage du site Adrar

Fig.V.6 :Paramètre astronomique du site

Fig.V.7 :Impression des paramètres astronomique et données du site

Fig.V.8 : Déclinaison annuel du site Adrar

Fig.V. 9: Graphe de variation mensuel de l'éclairage solaire de la site Adrar

Fig. V-10: L'interface de MapInfo

## **Liste des tableaux**

Tableau 1.1 : Classification des nuages selon l'altitude

Tableau I.2 : Calcul du jour de l'année : cas d'une année normale

Tableau I.3 : Calcul du j de l'année : cas d'une année Bissextile

Tableau I.4 : Les stations automatiques qui mesurent le rayonnement

Tableau I.5 : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques

Tableau II-1 : Population de la wilaya d'Adrar

Tableau II.2 : Quelques domaines d'application des SIG

Tableau III.1 : Albédo pour différents types de sols

Tableau III.2 : Liste des jours types par mois proposés par Klein

Tableau IV.1 : Résultats des calculs

Tableau IV-2: Résultats de calcul des erreurs relatives du rayonnement solaire horizontal

Tableau V.1 : Quelques logiciels de gisement solaire

## ***NOMENCLATURE***

<i><b>Symbole</b></i>	<i><b>Désignation</b></i>
S.I.G	Système d'Information Géographique
U.V	Ultraviolet
I.R	Infrarouge
AM	Air masse
$\theta$	Latitude (°)
$\varphi$	Longitude (°)
h	Altitude (m)
$\delta$	Déclinaison (°)
$\omega$	Angle horaire ah (°)
$\gamma$	Angle de la hauteur solaire hs (°)
$\xi$	hauteur du plan (°)
$\Psi$	Azimut (°)
z	Distance zénithale (°)
$C_{t-s}$	Correction de la terre-soleil (m)
$\delta_{exp}$	Angle entre le soleil et surface incliné (°)
$\beta$	Inclinaison du capteur (°)
i	Angle d'incidence sur un plan (°)
$\alpha$	Azimut de plan (°)
$\rho$	Albédo
$\lambda$	Longueur d'onde ( $\mu$ )
$I_0$	Constante solaire ( $w/m^2$ )
I	Rayonnement direct ( $w/m^2$ )
D	Rayonnement diffus ( $w/m^2$ )
G	Rayonnement global ( $w/m^2$ )
TSV	Temps solaire vrai
TL	Temps local
DE	Décalage horaire
ET	Equation du temps
MapInfo	Logiciel spécialisé en cartographe
Delphi	Langage de programmation orienté objet
Mapbasic	Langage de programmation
CDER	Centre de développements énergie renouvelable
UTM	Universal Transverse Mercator

# **INTRODUCTION GENERALE**

## Introduction Générale

L'épuisement des ressources fossiles, à plus ou moins long terme, et la flambée des cours de pétrole, le réchauffement climatique qui est la conséquence de l'exploitation massive des hydrocarbures qui produisent de grandes quantités de gaz à effet de serre, à cet effet et pour mieux préserver l'avenir de l'humanité, il est de rigueur de consommer rationnellement les énergies conventionnelles et d'utiliser et développer les énergies renouvelables qui sont inépuisables et propres.

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme mais aussi dans certains cas de l'humanité (solaire par exemple). Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie solaire mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse...), la Lune (énergie marémotrice, certains courants : énergie hydrolienne...) et la Terre (géothermique profonde...).

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables connues un développement très important dans le monde avec une croissance importante de potentiel et d'utilisation qui dépasse 100 GW.

L'Algérie a lancé des programmes très importants pour l'utilisation d'énergie solaire pour divers secteurs comme les villages éloignés (Projet SONELGAZ.....etc), ainsi par le renforcement des centres et laboratoires de recherche sur cette thématique.

Estimer le rayonnement solaire sur un point géographique terrestre est d'une extrême importance, d'une part pour choisir le site approprié où placer les installations solaires (centrales solaires pour production d'électricité par exemple) et d'autre part pour le dimensionnement et l'analyse des performances de tout système utilisant l'énergie solaire.

En outre, les mesures solarimétriques sont limitées à quelques zones seulement dans l'Algérie. Ainsi, on a recours à des approches théoriques pour évaluer le rayonnement solaire sur un lieu donné.

La région d'Adrar est l'un des sites les plus favorables à l'utilisation de cette énergie avec un flux moyen qui dépasse le 7 KWh/m<sup>2</sup>/j et d'ensoleillement de plus des 3500 heures par an.

Dans cet objectif notre travail s'intéresse à l'étude et modélisation du flux solaire pour la région d'Adrar, nous cherchons à évaluer le flux et les irradiances journalières et mensuelle solaires horizontales sur un site placé dans une localité de la wilaya d'Adrar. Une comparaison des trois modèles les plus utilisés avec des données expérimentales locales complète cette étude.

Ensuite nous avons créé une banque des données informatique permettant le stockage des données et l'estimation du gisement solaire journalière, mensuel et annuel de plusieurs sites de la wilaya d'Adrar, ensuite l'intégration de ces données dans un système d'information géographique (SIG) permettant la facilité de positionner et extraire les données sur un site de la carte géographique, l'aide à l'étude d'installations des stations et centrale solaire et prendre les décisions à travers les localités de la wilaya d'Adrar.

Le présent travail comporte cinq chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à l'étude du gisement solaire avec quelques notions et définitions astronomiques, couramment utilisées dans tout domaine relatif au solaire.

- Des notions théoriques du système d'information géographique SIG, ses différents composants, classifications, domaine d'utilisation et ses différents axes de recherche feront l'objet du deuxième chapitre.

- Dans le troisième chapitre, nous présenterons les différents composants du rayonnement solaire, ainsi on fait la description de quelques modèles mathématiques, les différentes équations pour le calcul des divers flux solaires.

- Les principaux résultats obtenus et leurs interprétations font l'objet du quatrième chapitre.

- Au cinquième chapitre la construction d'une base de données par l'intégration de l'application avec le SIG que nous avons développé.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique et simulation de

# **Chapitre I**

## ***Gisement Solaire***



## **Introduction**

On distingue plusieurs types de sources d'énergies renouvelables: l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Excepté l'énergie géothermique qui provient de la chaleur des profondeurs de la terre, ces sources d'énergie proviennent directement ou indirectement du soleil. Elles sont donc disponibles indéfiniment tant que celui-ci brillera.

L'énergie solaire est la plus jeune des énergies renouvelables, elle a l'avantage d'être non polluante.

Dans ce chapitre nous définirons quelques notions astronomiques et nous étudierons le soleil, son énergie et son rayonnement reçus au niveau de la terre. Nous introduirons quelques données sur le gisement solaire en Algérie.

### **I.1 Le soleil**

Le soleil est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la terre, sa lumière met environ 8 minute à nous atteindre. La deuxième étoile la plus proche est Proxima de Centaure située à 4.23 années lumières du soleil mais la grande distance qui nous sépare de cette étoile fait que le soleil soit la seule étoile qui assure la vie sur terre [1,2].

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 [3].

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tout les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène –hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium; la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement [4].

Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s, sa distribution spectrale de l'atmosphère est présentée un maximum pour une longueur d'onde d'environ  $0.5\mu\text{m}$ , la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ  $5780^\circ\text{k}$  [5] :

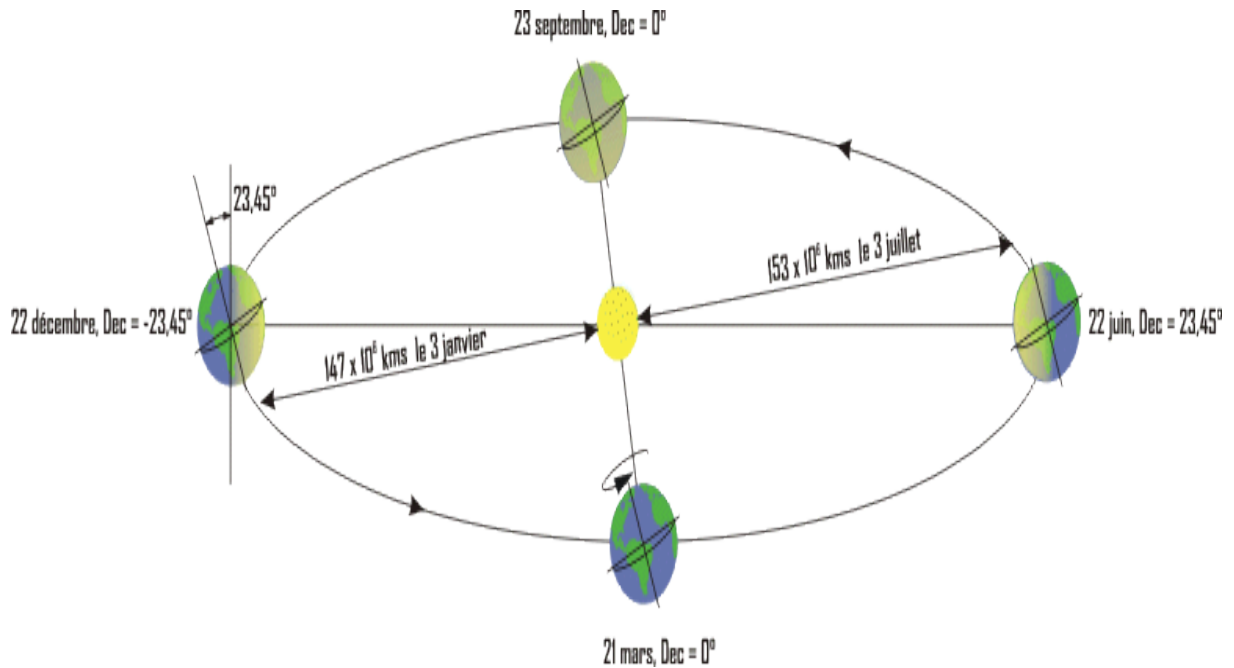
- Diamètre de soleil  $D_s=1.39 \times 10^9$  m
- Diamètre de la terre  $D_t=1.27 \times 10^7$  m
- Distance moyenne soleil\_ terre  $L_{ts}=1.5 \times 10^{11}$  m



**Fig. I.1** : Le soleil

### **I.1.1 Mouvement de la Terre autour du Soleil**

La terre décrit autour du soleil une orbite elliptique quasi-circulaire avec une période de 365,25 jours. Le plan de cette orbite est appelé plan de l'écliptique. C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est le plus près du soleil: 147 millions de Km et au solstice d'été qu'elle en est le plus éloigné: 153 millions de Km, la distance moyenne étant de 149,5 millions de Km. La terre coupe le petit axe de son orbite aux équinoxes de printemps (21 Mars) et d'automne (21 septembre). Elle tourne sur elle même avec une période de 24 heures. Son axe de rotation (l'axe des pôles) à une orientation fixe dans l'espace, il fait un angle avec la normale du plan de l'écliptique [6,7].



**Fig. I.2:** Mouvement de la terre autour du soleil [22]

L'axe de rotation de la Terre sur elle-même est incliné par rapport au plan de l'écliptique céleste. On appelle déclinaison  $\delta$  l'angle formé par l'axe Terre-Soleil avec le plan équatorial. La déclinaison varie de  $+23^\circ 27$  solstice d'été (21 juin), à  $-23^\circ 27$  solstice d'hiver (23 décembre), elle s'annule deux fois par an les 21 mars et 23 septembre (ce sont les quinoxes) et elle est responsable des saisons. Les parties diurnes et nocturnes de la journée ont alors la même durée aux équinoxes la déclinaison passe par  $0^\circ$  ( $-23^\circ 27 < \delta < +23^\circ 27$ ) [8].

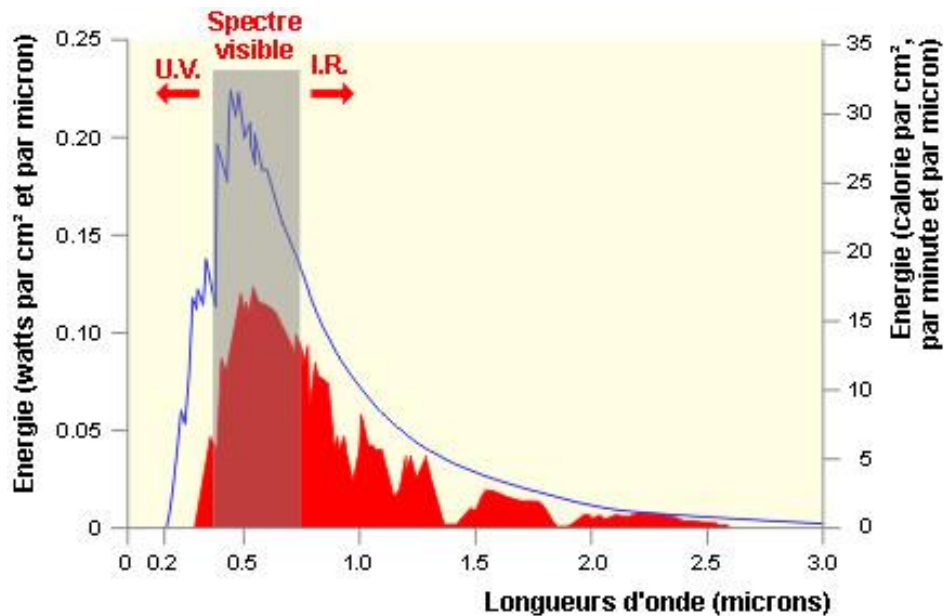
### I.1.2 Spectre du rayonnement solaire

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde  $\lambda$  :

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à  $5800^\circ$  K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AM0. Sa distribution en énergie est répartie en [8]:

- Ultraviolet **UV**  $0.20 < \lambda < 0.38 \text{ mm}$  **6.4%**
- Visible **0.38 < \lambda < 0.78 mm** **48.0%**
- Infrarouge **IR**  $0.78 < \lambda < 10 \text{ mm}$  **45.6%**

Le rayonnement solaire reçu au sommet de l'atmosphère, dans un plan perpendiculaire aux rayons solaires et pour une distance terre-soleil égale à sa valeur moyenne. Lorsque ce rayonnement traverse l'atmosphère pour atteindre la surface terrestre, il est fortement atténué en raison des phénomènes d'absorption et de diffusion par les différents constituants de celle-ci.



**Fig. I.3** Distribution spectrale du rayonnement solaire

### I.1.3 Facteur de correction de la distance terre-soleil

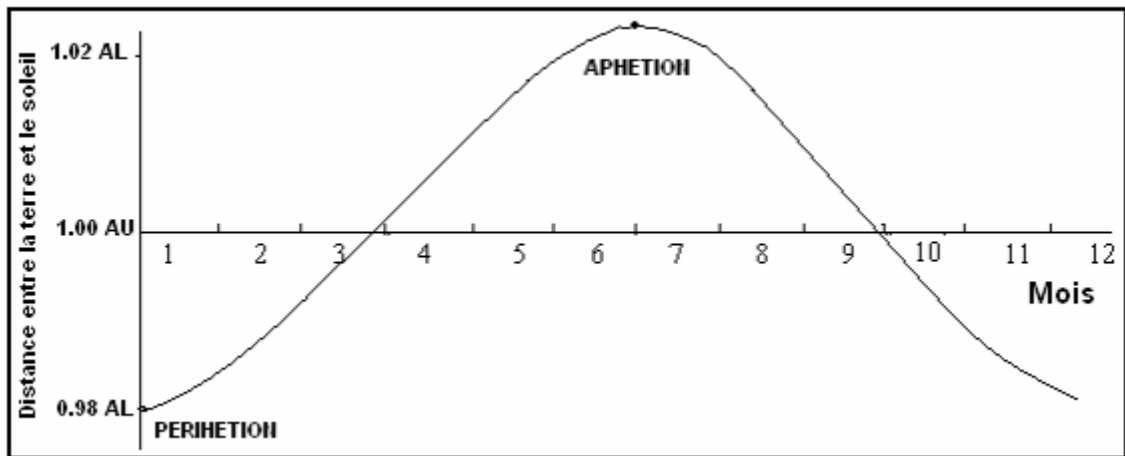
Au cours d'une révolution, la distance entre la terre et le soleil varie sensiblement en raison de la trajectoire elliptique de la terre autour du soleil (voir fig. I.2). Cette distance peut alors atteindre 153 millions de Km au maximum le 3 juillet, et 147 millions de Km au minimum le 3 janvier. Ce facteur dépend du numéro du jour de l'année  $j$ , qui est déterminé en utilisant le tableau I.2 ou I.3 et en connaissant le numéro du jour dans le mois, nous avons calculé le facteur correction de la distance terre-soleil ( $C_{t-s}$ ) correspondant à l'aide de l'équation [28]:

$$C_{t-s} = 1 + 0.034 \cos [0.986(J' - 2)] \quad (I-1)$$

avec :

$$J' = 2 \pi j / 365.25$$

$J$  : Le numéro du jour de l'année à partir du 1<sup>er</sup> Janvier



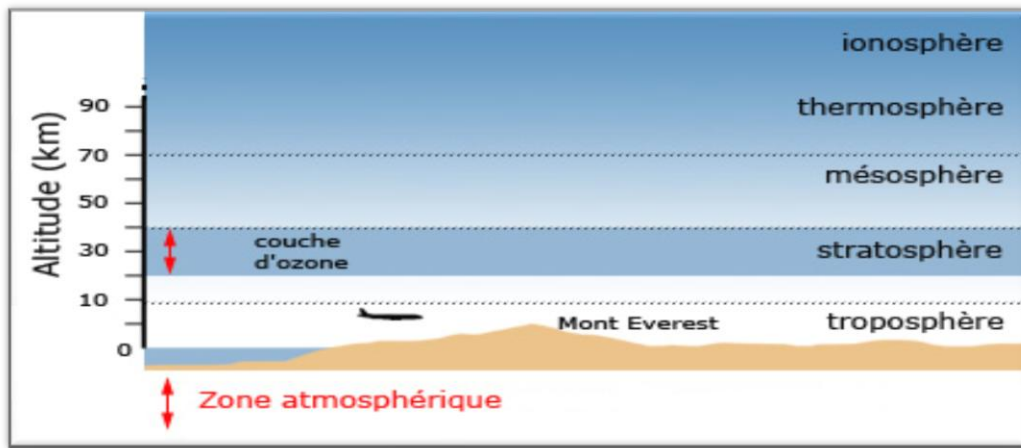
**Fig. I.4 :** Variations de la distance du terre-soleil pendant l'année [23]

## **I.2 Rayonnement solaire à la traversée de l'atmosphère**

### **I.2.1 L'atmosphère**

L'atmosphère est composée de couches superposées les unes sur les autres. Depuis le sol, on distingue la troposphère, la stratosphère, puis la mésosphère, suivi de la thermosphère.

L'air sec est composé de 78% d'azote, de 21% d'oxygène, de 1% d'argon et de 0.033% de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), avec de la vapeur d'eau dans la troposphère et une mince couche d'ozone dans la stratosphère dont le rôle est si important dans l'absorption des rayons ultraviolets les plus durs. On rajoute à cela les aérosols qui sont des particules soit d'origine naturelle, tels que le sable, la suie, les cristaux de glace ou les poussières volcaniques, soit d'origine artificielle telle que celles produites par l'industrie, l'automobile ou le chauffage.



**Fig. I.5 :** Couches de l'atmosphère

## I.2.2 Atténuation du rayonnement solaire

L'atmosphère modifie le spectre du rayonnement solaire à travers les processus d'absorption par les différents gaz, la diffusion par les molécules d'air, les aérosols et les nuages.

### a) L'absorption atmosphérique

L'absorption par les gaz atmosphériques est dite sélective, car elle n'affecte que des radiations de longueurs bien précises. Elle est due essentiellement à la vapeur d'eau ( $H_2O$ ), à l'ozone ( $O_3$ ), à l'oxygène ( $O_2$ ) et au gaz carbonique ( $CO_2$ ).

La vapeur d'eau qui est le constituant le plus important après l'air, présente plusieurs bandes d'absorption situées à des longueurs d'ondes supérieures à  $0,65 \mu m$  [8]. La bande allant de  $2,4$  à  $2,8 \mu m$  est la plus large. De plus, à ce niveau, l'absorption est la plus forte.

L'absorption propre à la vapeur d'eau est d'environ 10% [13].

L'ozone est le principal absorbant dans l'ultraviolet. Il est caractérisé par une forte bande d'absorption à des longueurs d'ondes inférieures à  $0,3 \mu m$  et une faible absorption entre  $0,45$  et  $0,7 \mu m$ .

L'oxygène a deux bandes étroites de faible atténuation dans le visible à  $0,69$  et  $0,76 \mu m$ . Le gaz carbonique absorbe le rayonnement dans cinq bandes se trouvant respectivement à  $1,46$  ;  $1,60$  ;  $2,04$  ;  $2,75$  et  $4,27 \mu m$ .

**b) La diffusion :** La diffusion est une redistribution du rayonnement solaire qui interagit avec les molécules gazeuses, les gouttelettes et les aérosols dans toutes les directions sans changement de longueur d'onde. Selon la taille des particules diffusantes par rapport à la longueur d'onde du rayonnement incident, on distingue deux types de diffusion : la diffusion de Rayleigh et la diffusion de Mie.

La diffusion de Rayleigh affecte surtout les molécules d'air pur et sec comme l'azote et l'oxygène. C'est une diffusion sélective causée par les particules dont le diamètre est très inférieur à la longueur d'onde incidente. En moyenne, en prenant en compte la course du soleil et les différentes longueurs d'onde, environ 13% de rayonnement solaire incident subissent la diffusion de Rayleigh [14]. Le coefficient d'extinction caractérisant ce type de diffusion est donné par la relation suivante :

$$k_r(\lambda) = 0.008735 \lambda^{-4} \quad (\text{I.2})$$

La diffusion de Mie désigne la diffusion par les particules dont la taille est de même ordre de grandeur que les longueurs d'onde, comme pour la vapeur d'eau et les aérosols. Le coefficient d'extinction s'écrit [15] :

$$k_a(\lambda) = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (\text{I.3})$$

Où  $\alpha$  est lié à la taille des particules et varie entre 0 (pour les grosses particules) et 4 (pour les petites particules). La valeur moyenne pour les aérosols étant  $\alpha = 1,3$ .

Et  $\beta$ , le coefficient de trouble atmosphérique établi par Angström. Il représente la quantité d'aérosols présente dans l'atmosphère. Il vaut 0.02 pour un ciel très pur (bleu profond) et 0.2 pour un ciel pollué.

Les phénomènes d'absorption et de diffusion par les nuages réduisent considérablement le rayonnement reçu au sol surtout pour les longueurs d'ondes supérieures à 1  $\mu\text{m}$ . Les nuages sont constitués des particules dont les dimensions sont notablement supérieures aux longueurs d'ondes ultraviolets et visibles. C'est ainsi que dans ce domaine du spectre solaire, la diffusion par les nuages est indépendante de la longueur d'ondes [24]. Le taux d'atténuation par les nuages dépend essentiellement de leur épaisseur, leur nature et leur





l'altitude et des conditions de formation. Les espèces de nuages se rapportent à une ou plusieurs des caractéristiques suivantes [16]: la forme (nuages en banc, en couches, en nappes, en voile...), la dimension (surface des éléments constitutifs, extension verticale...). Les nuages peuvent être classifiés selon l'altitude (voir tableau I.1).

**Tableau 1.1 : Classification des nuages selon l'altitude [16]**

<b>Groupe</b>	<b>Altitude moyenne de la base (m)</b>	<b>Préfixe du nom du nuage</b>
Etage supérieur	6000	Cirr
Etage moyen	2000	Alto
Etage moyen	Du sol à 2000	Stra
A développement verticale	500	Cum

### **I.3 L'énergie solaire**

L'éclairement ou irradiance est défini comme une puissance reçue par une surface. Il s'exprime en  $W/m^2$  (watt par mètre carré). Le S.I. (système international d'unités) recommande d'utiliser le symbole G.

L'irradiation ou rayonnement est l'énergie reçue par une surface. Elle s'exprime en  $J/m^2$  (joule par mètre carré). L'ISES (International Solar Energy Society) recommande le symbole H. D'autres unités plus courantes sont le  $Wh/m^2$  (wattheure par mètre carré) bien que ce dernier ne doive pas être utilisé puisque n'appartenant pas au système international d'unités (SI) [10].

#### **Unités**

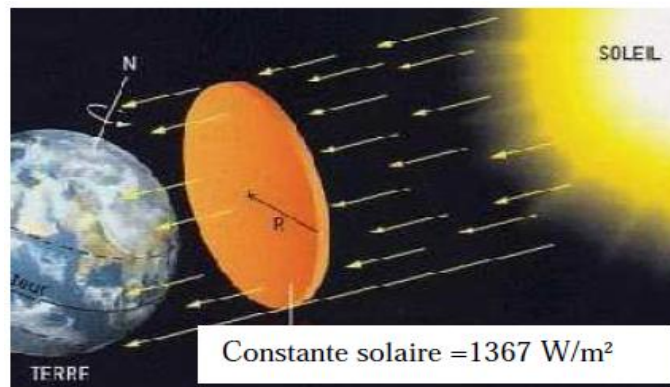
Éclairement ou Irradiance

Rayonnement, irradiation ou énergie incidente

G exprimé en  $W/m^2$

H exprimé en  $Wh/m^2$

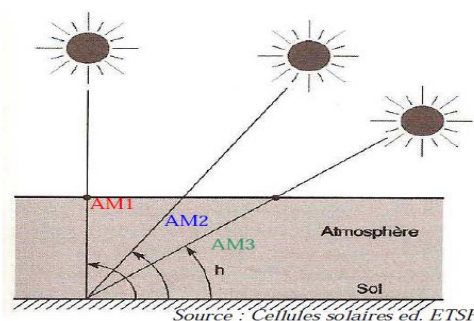
Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 149.5 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à  $1367 W/m^2$ .



**Fig. I.7 : Constante solaire [10]**

La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air AM.

Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de  $1000 \text{ W/m}^2$  il décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à  $1000 \text{ W/m}^2$ .



**Fig. I.8: Masse d'air [10]**

Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil sur la surface de la terre : AM1.5G ou AM1.5D.

Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith (correspondant à une inclinaison du soleil de  $45^\circ$  par rapport au zénith).

Le « G » représente le rayonnement "global" incluant rayonnement direct et rayonnement diffus et la lettre « D » tient compte seulement du rayonnement direct.

**Normalisation** : Les conditions standards de qualification des modules photovoltaïques sont : un spectre AM1.5 sous un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$ .

Les constructeurs de panneaux solaires spécifient les performances de leur matériel dans les conditions normalisées citées ci-dessus (S.T.C. : Standard Test Conditions).

Signalons que, outre l'incidence de l'atmosphère, l'irradiation solaire dépend de:

- l'orientation et l'inclinaison de la surface,
- latitude du lieu et son degré de pollution,
- la saison ou période de l'année,
- l'instant considéré dans la journée,
- nature des couches nuageuses.
- les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité, vent, température).

La combinaison de tous ces paramètres produit la variabilité dans l'espace et le temps de l'irradiation journalière. Des cartes météorologiques sont établies et nous renseignent sur l'irradiation moyenne par jour, mois ou bien sur une année.

## **I.4 Position du soleil par rapport à la terre**

Il est possible de déterminer la position du soleil dans la voûte céleste en fonction du temps et de la position de l'observateur sur la terre.

### **I.4.1 Repérage d'un site à la surface de la terre (coordonnées géographiques)**

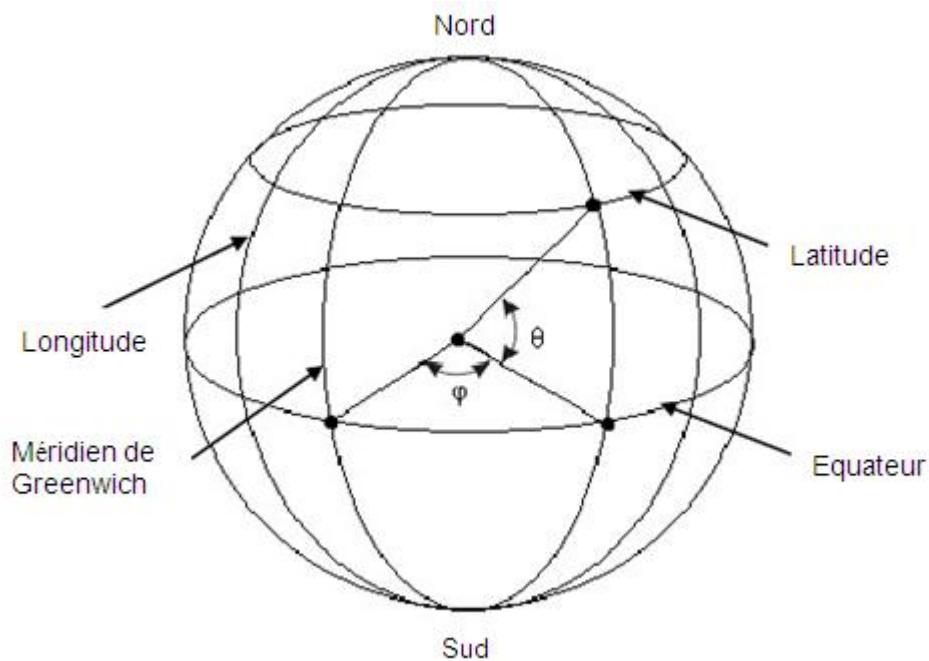
Pour repérer un site donné à la surface terrestre, on définit les grandeurs suivantes :

**a) La latitude  $\theta$**  : C'est l'angle  $\theta$  que fait la verticale du lieu avec le plan équatorial.

Si  $\theta > 0$ , le site se trouve dans l'hémisphère nord, sinon le site est dans l'hémisphère sud.

**b) La longitude  $\varphi$**  : C'est l'angle  $\varphi$  formé par le méridien de Greenwich et le méridien du lieu considéré. La longitude est comprise entre  $-180$  (vers l'ouest) et  $+180$  (vers l'est). Comme la terre met 24 heures pour faire un tour sur elle même ( $360^\circ$ ), chaque heure représente  $15^\circ$  d'écart de longitude et donc, chaque degré de longitude représente 4 minutes.

c) **L'altitude  $h$** : C'est la distance verticale exprimé en mètres, séparant le point considéré du relief terrestre du niveau de la mer, pris comme surface de référence.



**Fig. I.9 : Coordonnées terrestres [22]**

### **I.4.2 La trajectoire apparente du soleil**

La position du soleil dans la voûte céleste est repérée à tout instant de la journée par deux systèmes de coordonnées:

#### **a) Les coordonnées équatoriales**

Les coordonnées équatoriales sont indépendantes de la position de l'observateur sur la terre, mais elles sont liées à l'heure de l'observation. La position du soleil est exprimée par deux angles qui sont :

### • La déclinaison $\delta$

C'est l'angle que forme la direction du soleil et le plan équatorial, elle est définie au paragraphe précédent « Mouvement de la Terre autour du Soleil ».

La déclinaison varie de façon sinusoïdale au cours de l'année. Plusieurs expressions ont été développées pour évaluer la déclinaison, la plus simple est celle utilisée par Cooper [11].

$$\delta = 23.45 \sin \frac{360}{365} (j + 284) \quad (I.4)$$

Où  $j$  est le numéro du jour de l'année.

La figure suivant montre le changement de la déclinaison solaire en fonction du jour de l'année

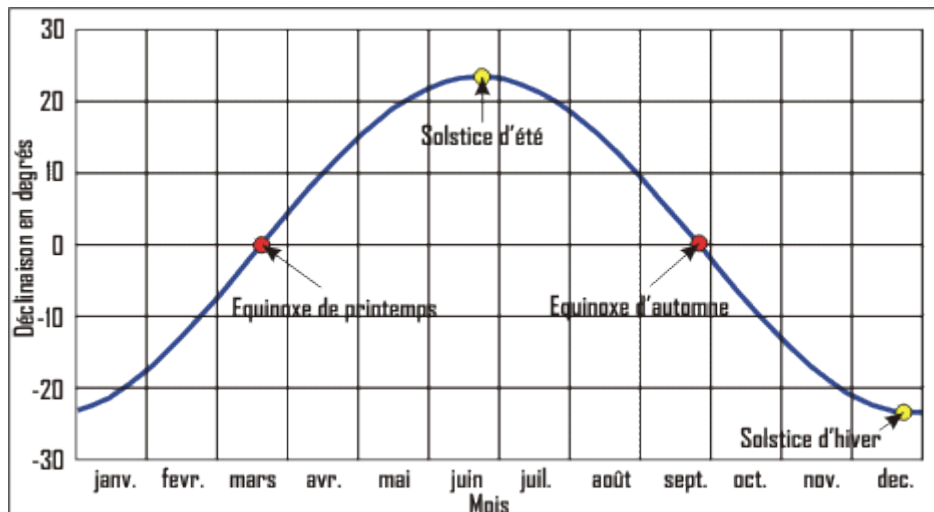


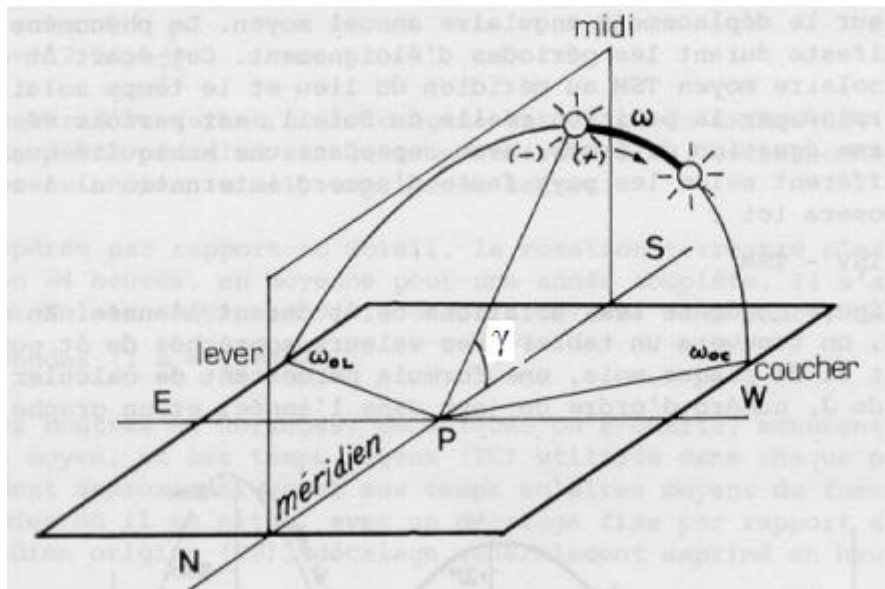
Fig. I.10 : Déclinaison [22]

### • L'angle horaire $\omega$ (ah)

L'angle horaire mesure le mouvement du soleil par rapport à midi qui est l'instant où le soleil passe au plan méridien du lieu zénith. Cet angle est formé entre la projection du soleil sur le plan équatorial à un moment donné et la projection du Soleil sur ce même plan au midi vrai. L'angle horaire est donné par la relation suivante [5] :

$$\omega = 15 (TSV - 12) \quad (I.5)$$

Où TSV est le temps solaire vrai qui sera décrit dans l'équation (I.11).



**Fig. I.11 : Angle horaire  $\omega$  du soleil**

**b) Les coordonnées horizontales**

Le soleil est repéré par les grandeurs suivantes :

**• L'angle de la hauteur solaire  $\gamma$  (hs)**

C'est l'angle compris entre la direction du soleil et le plan horizontal.  $\gamma$  varie de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  vers le zénith et de  $0^\circ$  vers  $-90^\circ$  vers le nadir. L'angle de la hauteur solaire est donné par [12].

$$\sin \gamma = \sin \theta \sin \delta + \cos \theta \cos \delta \cos \omega \quad (I.6)$$

**• l'azimuth  $\psi$**

L'azimut est l'angle entre le plan vertical contenant le rayon solaire et la direction sud.

Il se compte de  $0^\circ$  à  $360^\circ$  à partir du sud dans le sens rétrograde. La relation qui donne

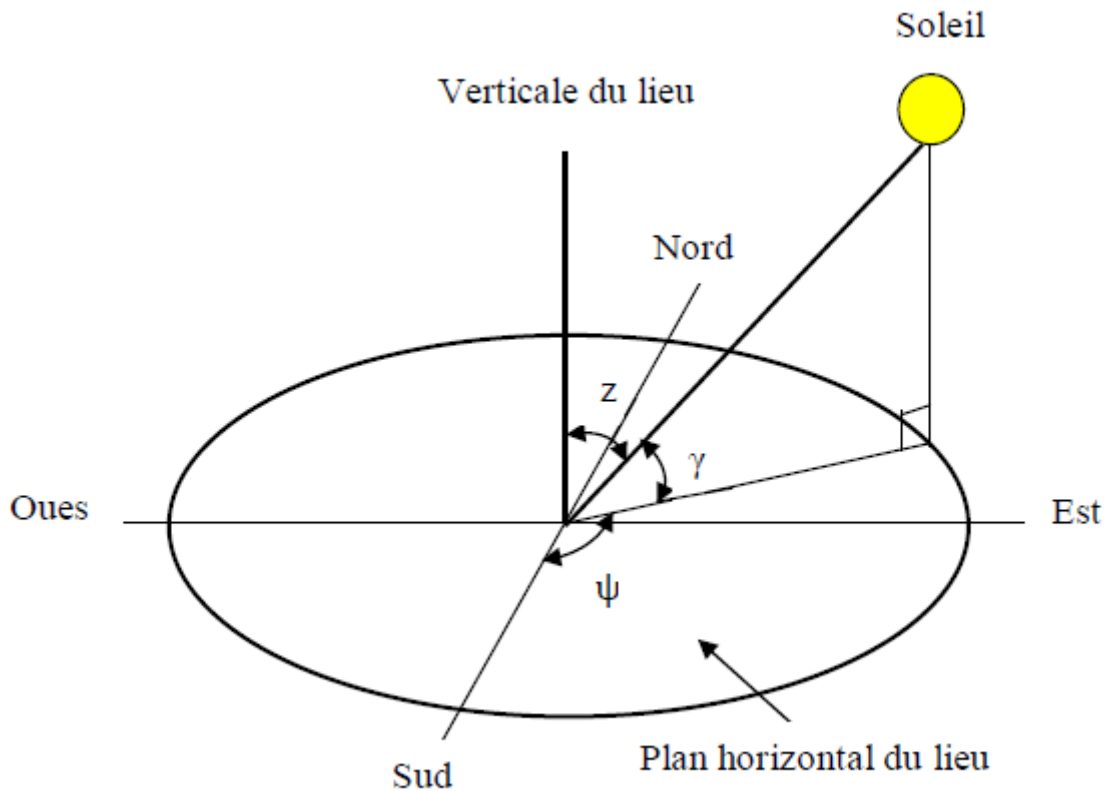
l'azimut est donnée ci-dessous [12]:

$$\cos \psi = (\sin \gamma \sin \theta - \sin \delta) / \cos \gamma \cos \theta \quad (I.7)$$

**• La distance zénithale  $z$**

C'est l'angle entre la direction du soleil et la verticale du lieu (zénith). L'angle  $z$  est complémentaire de  $\gamma$  [12].

$$\cos Z = \sin \delta \sin \theta + \cos \delta \cos \theta \cos \omega \quad (I.8)$$



**Fig. I.12 :** Coordonnées solaires selon le repère horizontal

## I.5 Le temps

La terre subit deux types de déplacement : la rotation de la terre autour de l'axe des pôles et sa révolution autour du soleil. Le mouvement de la terre sur elle-même définit la notion de journée solaire. Une rotation complète s'effectue en 24 heures. Elle amène ainsi la définition du temps, puisque chaque heure correspond à un écart angulaire de  $15^\circ$ . La rotation de la terre autour du soleil définit les saisons et amène à distinguer le temps solaire vrai.

### a) Le temps universel (TU)

C'est le temps solaire moyen du méridien de Greenwich GMT (Greenwich Mean Time) qui est le méridien central du fuseau horaire. Pour en déduire le temps légal ou local (TL), il convient d'ajouter au temps universel le décalage du fuseau horaire.

$$TL = TU + \text{décalage} \quad (I.9)$$

Ce décalage vaut +1 pour l'Algérie donc décalage = +1

**b) Le temps solaire moyen (TSM) :** Il se déduit de l'équation suivante :

$$TSM = TU + \varphi/15 \quad (I.10)$$

Avec TSM en heure.

**Le temps solaire vrai (TSV) :** C'est le temps défini par les coordonnées angulaires vraies du soleil.

$$TSV = TSM + Et \quad (I. 11)$$

Où Et est l'équation du temps.

**d) Equation du temps**

Le temps Et varie de -14,5 minutes (du 10 au 15 Février) à +16,5 minutes (du 25 au 30 Octobre). Une bonne approximation du temps Et est donnée par l'équation suivante :

$$Et = 9.9 \sin[2(0.986 j + 100)] - 7.7 \sin(0.986 j - 2) \quad (I. 12)$$

Où Et est exprimé en minutes et j est le numéro du jour dans l'année à partir du 1<sup>er</sup> Janvier.

**e) Numéro du jour de l'année j**

Le calcul du numéro du jour dans l'année consiste à ajouter le numéro du jour dans le mois (quantième) au numéro caractéristique de chaque mois. j varie de 1 (1er janvier) à 365 (31 décembre) ou 366 pour une année bissextile. Le tableau ci-dessous donne les numéros caractéristiques de chaque mois.

**Tableau I.2 :** Calcul du jour de l'année : cas d'une année normale

J	Ja	F	M	A	M	Ju	J	Ao	Se	O	N	D
our	nv	ev	ars	vril	ai	in	uil	ut	pt	ct	ov	ec
J	J	J	J+	J+	J+	J+	J+	J+	J+	J+	J+	J+
		+31	59	90	120	151	181	212	243	273	304	334



Dans le cas d'une année bissextile, le tableau

**Tableau I.3 :** Calcul du j de l'année : cas d'une année Bissextile

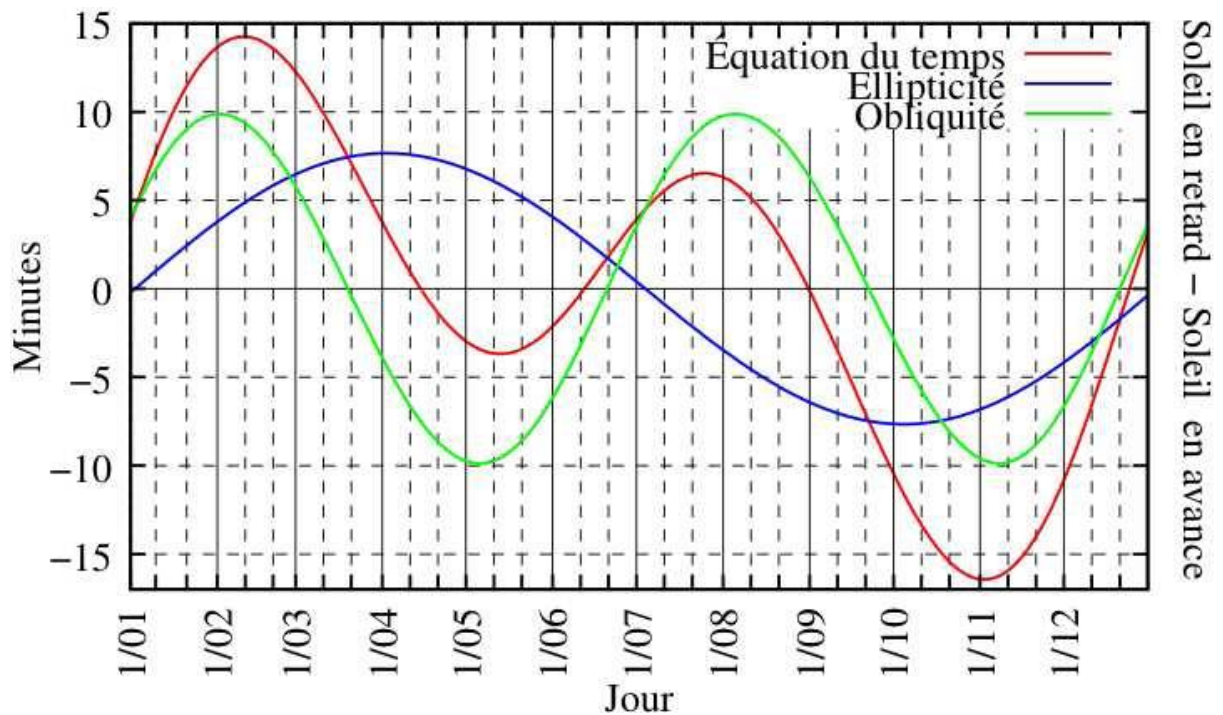
J	Ja	F	M	A	M	Ju	J	Ao	Se	O	N	D
our	nv	ev	ars	vril	ai	in	uil	ut	pt	ct	ov	ec
J	J	J	J+	J+	J+	J+	J+	J+	J+	J+	J+	J+
		+31	60	91	121	152	182	213	244	274	305	335

**f) Lever et coucher du soleil :**

Connaissons la déclinaison  $\delta$  et la latitude  $\theta$  du lieu considéré, on peut donc calculer l'heure solaire vrai du lever et du coucher du soleil : on a les équations suivantes :

$$TSV_{\text{lever}} = 12 - (\arcsin(-\tan(\theta) * \tan(\delta))) / 15 \quad (I. 13)$$

$$TSV_{\text{coucher}} = 12 + (\arcsin(-\tan(\theta) * \tan(\delta))) / 15 \quad (I. 14)$$



**Fig. I.13 :** Variations annuelles de l'équation du temps [22]

## **I.6 Principales mesures du rayonnement solaire**

On distingue principalement selon sa provenance, sa constitution ou la méthode de mesure les paramètres suivant [21]:

### **I.6.1 Rayonnement solaire direct**

On appelle rayonnement solaire direct celui qui arrive au sol sans avoir subi de diffusion. Il se diffère de façon notable du rayonnement atteignant la limite supérieure de l'atmosphère, en particulier du fait de l'absorption par les constituants gazeux de l'atmosphère. Sa mesure s'effectue à l'aide d'un pyrhéliomètre (fig. I.14), appareil dont la surface sensible est toujours disposée perpendiculairement aux rayons solaires.



**Fig. I.14 :** l'instrument pyrhéliomètre

### **I.6.2 Rayonnement diffus**

Le rayonnement diffus est le rayonnement en provenance de la voûte céleste, à l'exception du disque solaire. C'est-à-dire la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Sa mesure est effectuée avec un pyranomètre muni d'une bande pare-soleil (anneau métallique cachant le disque solaire).



**Fig. I.15 :** l'instrument qui mesure le rayonnement diffus

### I.6.3 Rayonnement global

Le rayonnement global est le rayonnement reçu sur une surface horizontale provenant du soleil et de la totalité de la voûte céleste. On le mesure avec un pyranomètre (fig I.16). Il est défini aussi comme la somme du rayonnement direct et diffus suivant la formule



**Fig. I.16** : le pyranomètre

### I.6.4 Albédo du sol

L'albédo pour le rayonnement solaire est défini comme le rapport du rayonnement diffusé ou réfléchi par le sol au rayonnement global. Il est mesuré par un Albédomètre (fig.I.17): deux pyranomètres montés en opposition, l'un regardant vers le sol et l'autre vers le ciel.



**Fig. I.17** : l'Albédomètre

### I.6.5 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. Le relevé est fait au moyen de l'héliographe de Campbell– Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'il brûle en se déplaçant (fig. I.18). Ainsi, seuls les moments où le soleil est bien visible sont

enregistrées ; on parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages.

Au défaut de l'héliographe, il est possible à partir du calcul du mouvement astronomique relatif du soleil et de la terre d'évaluer la durée théorique du jour ; c'est-à-dire, celle qu'il y aurait si les nuages ne cachaient pas le soleil. Cette durée est calculée en fonction de la latitude du site et de la déclinaison apparente qu'elle même dépend de la période de l'année considérée.



**Fig. I.18 : l'héliographe**

## **I.7 Le réseau météorologique Algérien**

La mesure du rayonnement solaire en Algérie est réalisée par l'Office National de la Météorologie (O.N.M) à travers son réseau constitué de quatre vingt et une (81) stations météorologiques mesurant la durée d'insolation. Parmi celles-ci, seules sept (07) stations ont assuré entre les années 1970 et 1989 la mesure des composantes diffuses et globales reçues sur le plan horizontal. De plus, ces séries de mesures comportent des données manquantes causées par des périodes plus ou moins longues de non fonctionnement des appareils de mesure.

Les informations récoltées en 2011 indiquaient que seules trois (03) stations à savoir Oran, Tamanrasset et Ksar Chellala assuraient d'une manière régulière la mesure du rayonnement solaire sur le plan horizontal. Huit autres stations automatiques mesurent le rayonnement depuis 2009 et qui sont : Alger (aéroport), Oran (Sénia), In amenas, Ghardaïa, Annaba, Tamanrasset, Tlemcen et Constantine [25].

**Tableau I.4 :** Les stations automatiques qui mesurent le rayonnement [25]

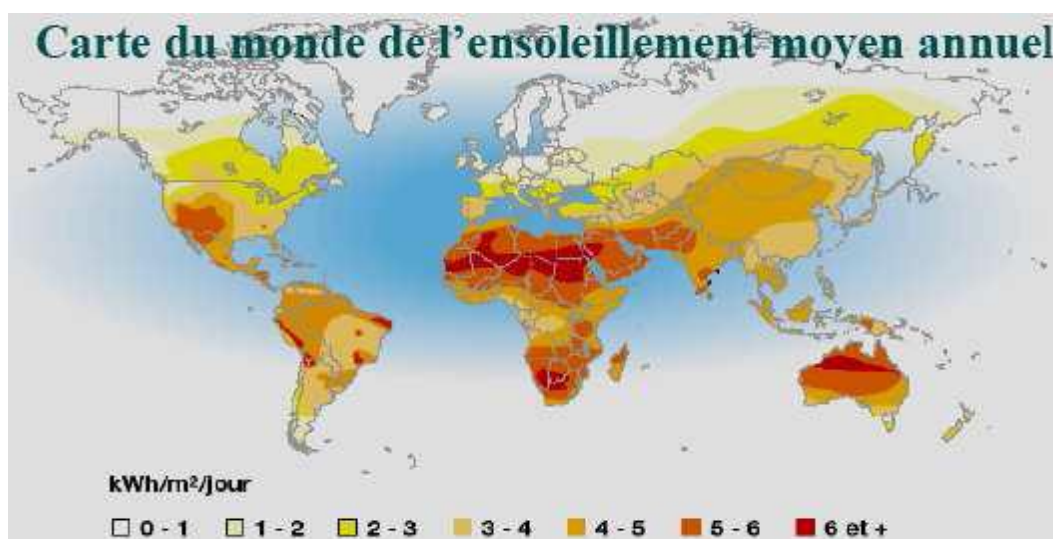
Stations	Lat (degrés minutes)	Lon (degrés minutes)	Alt (m)
Alger (Dar elBeida)	36°43	3°15E	25
Annaba	36°50	7°49E	3
Oran	35°16	00°38W	90
Tlemcen Zenata	35°01	01°27W	249
Ghardaia	32°24	3°48E	468
Tam (aéroport)	22°48	05°27E	1362
Ain Amenas	28°03	09°38E	561
Constantine	36°17	06°37E	694

## I.8 Le gisement solaire en Algérie

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [17].

Il est utilisé dans des domaines aussi variés que l'agriculture, la météorologie, les applications énergétiques et la sécurité publique [20].

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la fig. I.19 :



**Fig. I.19 :** Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [18]

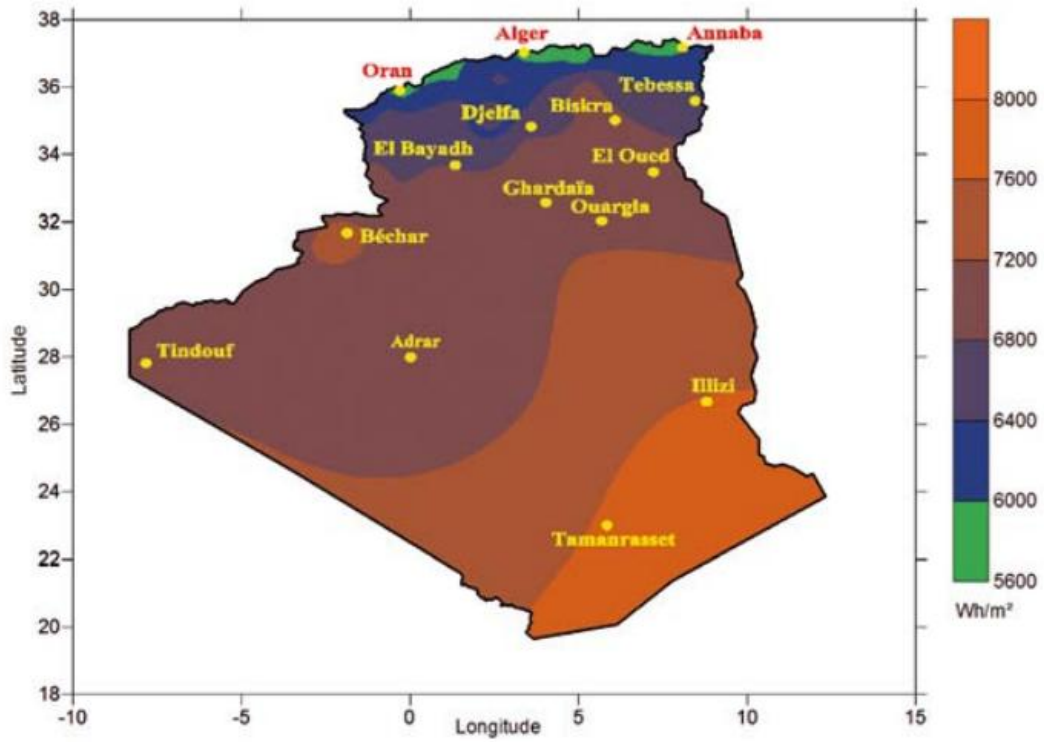
Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau I.5 selon l'ensoleillement reçu annuellement [18]:

**Tableau I.5 : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques [18]**

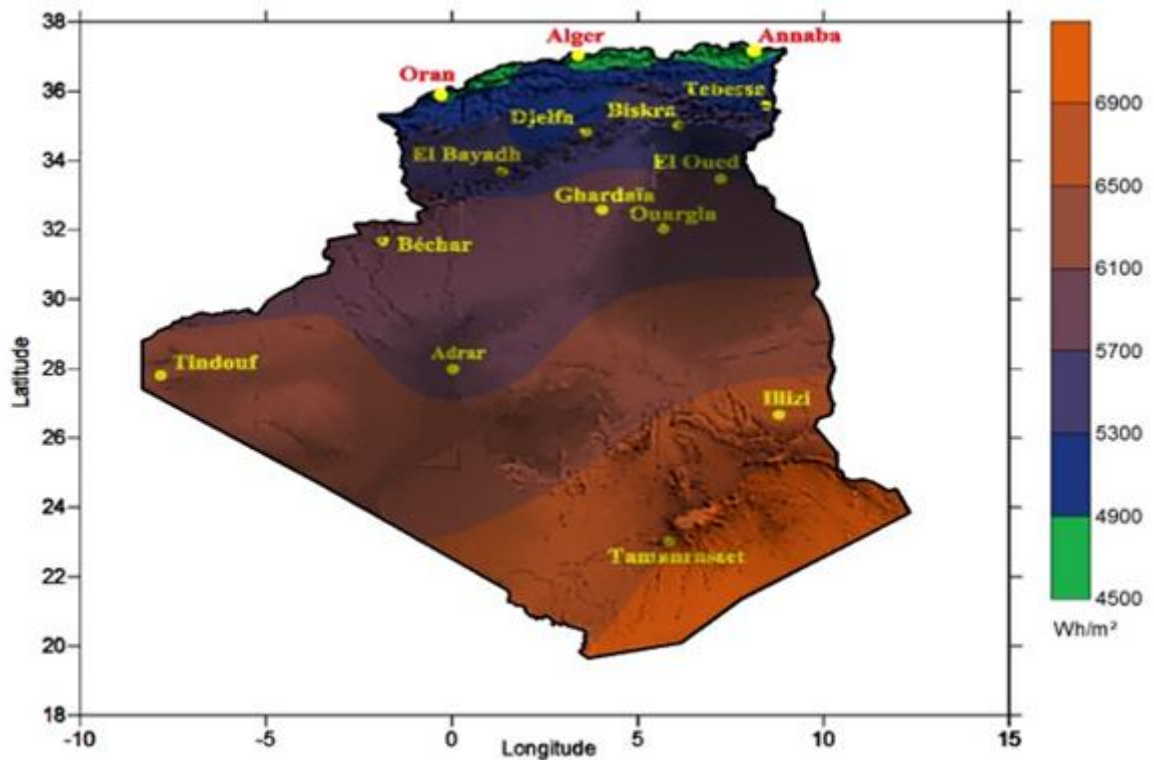
Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500 h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6 h/j en période estivale [18].

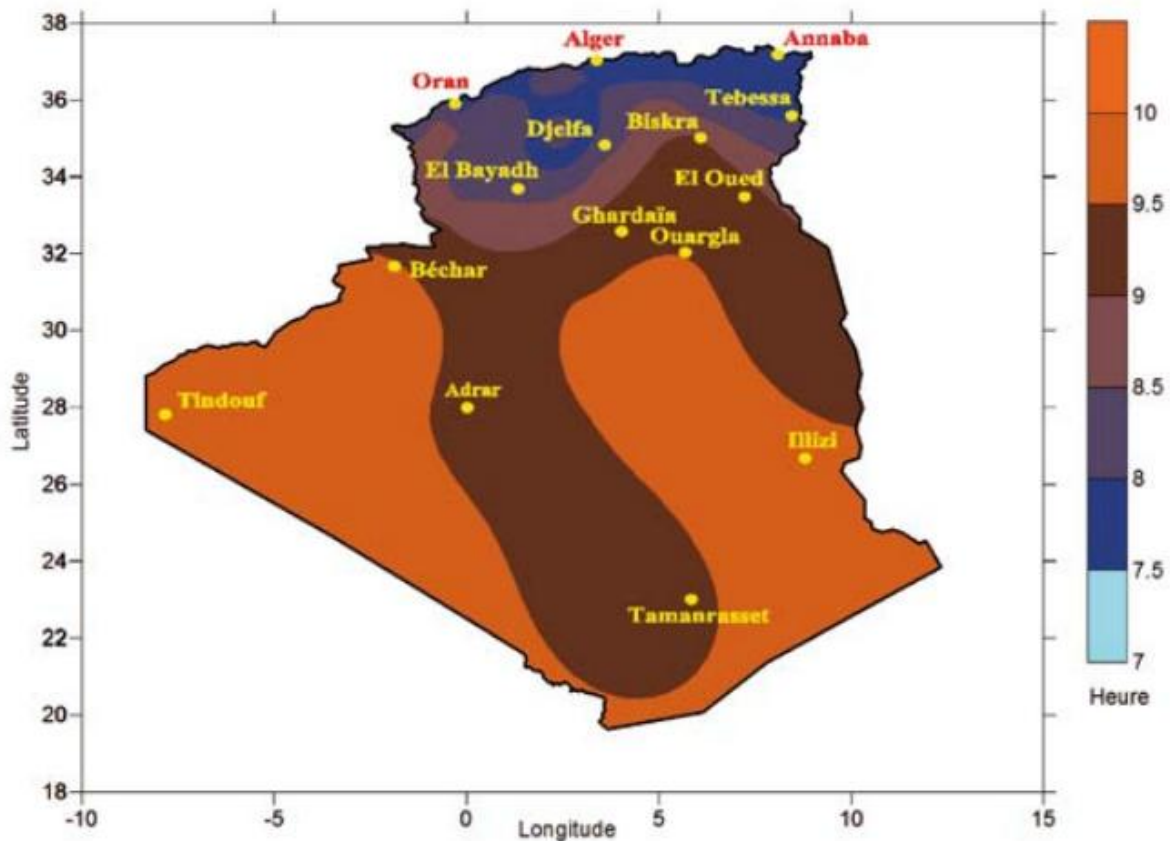
**La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie** (figure I.20, I.22).



**Fig. I.20.** Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu Période 1992-2002 [19]



**Fig. I.21:** Moyenne annuelle de l'irradiation reçue sur une surface horizontale, Période 1992-2002 [19]



**Fig. I.22:** Moyenne annuelle de la duré d’insolation mesuré - Période 1992-2002 [19]

### **Conclusion:**

Nous avons présenté dans ce présent chapitre les différentes notions d’astronomie et de gisement solaire.

Remarquons que la durée d’insolation dans le Sahara algérien est de l’ordre de 3500 h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8 h/j et peut arriver jusqu’à 12h/j pendant l’été.

La région d’Adrar donc est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel solaire de toute l’Algérie.



## BIBLIOGRAPHIE

- [1] J, Bernard. « Energie solaire calculs et optimisation », Ellipse Edition Marketing, 2004 [2] A,H,Khedim. « Energie solaire et son utilisation sous forme thermique et photovoltaïque », Centre de Publication Universitaire, 2003.
- [3] A. Zerga: «Optimisation du rendement d'une cellule solaire à base de silicium monocristallin de type n+p », Thèse de Magistère université Tlemcen, 1998.
- [4] R.P. Mukund, « Wind and solar Power Systems »,Ph.D,P.e U.S merchant Marine Academy,Kings Point, New York, CRC Press LLC, 1999.
- [5] M. Dahbi « Etude et optimisation d'une installation Hybride PV-Eolienne Autonome », Thèse de magister, option physique énergétique, université Bechar 2007.
- [6] A.Ricaud, « Gisement Solaire », Cythelia Sarl, 2009.
- [7] E.Torlaschi, « Phénomènes Radiatifs dans L'atmosphère Terrestre », cours de Physique de L'atmosphère, 2003.
- [8] A.kassewa , Tchapo.Singo : « Système d'alimentation photovoltaïque avec ,stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome.», Thèse de Doctorat de l'Université, Henri. Poincare, Nancy-I, 2006.
- [9] [http://upload.wikimidia.org/wikipedia/commons/thumb/.](http://upload.wikimidia.org/wikipedia/commons/thumb/)
- [10] Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes, 2007
- [11] P. I. Cooper, « The absorption of solar radiation in solar stills », Sol. Energy 12 (3), 333-346, 1969.
- [12] M .IQBAL, « An introduction to solar radiation », Academic press, New York, 1983.
- [13] M.BOULIFA, « Estimation du rayonnement solaire par traitement d'images satellitaires Utilisation de l'équation du transfert radiatif », Thèse de Magister en électronique, Option Télédétection, 2005.
- [14]: A.B. OUMBE NDEFFOTSING, « Exploitation des nouvelles capacités d'observation de la terre pour évaluer le rayonnement solaire incident au sol », Thèse de Doctorat en Energétique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2009.

- [15] A.ANGSTROM, « the parameters of atmospheric turbidity », *Tellus XVI*, 64-75, 1964.
- [16] N.SELAMI et N.BENABADJI, « Etude des structures nuageuses », *JAS09 de l'AUF*, Alger, 2009.
- [17] M, Capderou. « Atlas Solaire de l'Algérie, O.P.U, Alger », 1985
- [18] A, Mefti; M, Y, bouroubi; H, Mimouni. « Evaluation du potentiel énergétique solaire », *Bulletin des Energies Renouvelables*, N°2, p 12, décembre 2002.
- [19] [www.CDER.dz](http://www.CDER.dz), Atlas solaire algérien publiée par le CDER, 2013.
- [20] A. Mefti, M.Y. Bouroubi et A. Khellaf, « Analyse Critique du Modèle de l'Atlas de l'Algérie », *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 2, N°2, pp. 69 - 85, 1999.
- [21] K.Bouchouicha, Rapport interne, Unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien Adrar (URER.MS), 2009
- [22] <http://herve.silve.pagesperso-orange.fr/solaire>
- [23] A. BOUDEN, « Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque », Thèse Magister, Université Constantine, 2008.
- [24] C.PERRIN de BRICHAMBAUT et C.VAUGE, « le gisement solaire : Evaluation de la ressource énergétique », *Technique et Documentation*, Librairie Lavoisier, Paris, 1982
- [25] M. Faiza, « Détermination du gisement solaire par traitement d'images MSG » , Thèse Magister, Université Tiziouzou, 2008.
- [26] L. Miloudi, « Etude de la poursuite de la trajectoire du soleil par un panneau solaire photovoltaïque », Thèse de Magister, Université Boumerdes, 2011.
- [27] A. Draou, « Etude et réalisation d'un logiciel de simulation du flux solaire horizontal », Mémoire Master, Université Adrar, 2013.
- [28] J.Hofierka, M.Suri, The Solar Radiation Model for Open Source GIS: Implementation and Applications, *Proceedings of the Open Source GIS - GRASS Users Conference 2002* - Trento, Italy, 11-13 September 2002.

## **Chapitre II**

***Systeme d'information géographique***

***S.I.G***

## **Introduction :**

Les méthodes d'approches traditionnelles de gestion des données environnemental sont devenues de plus en plus inadaptées vu les rythmes des changements des indicateurs (gisement énergétique solaire, éolienne, biomasse, hydraulique, occupation du sol, ... etc.). Elles sont lourdes à mettre en œuvre et ne peuvent suivre le rythme des études et suivi de gisement de l'énergie solaire ou éolienne, d'où leur relative inefficacité.

Afin de combler cette déficience, l'utilisation des nouveaux outils d'investigation tels que la télédétection, la cartographie numérique et les techniques des systèmes d'information géographiques est nécessaire. Ces dernières sont particulièrement bien adaptées à la description des données des différents gisements d'énergies et la cartographie de leurs champs. Par suite de la complexité de la modélisation des données nécessaires à la gestion du monde réel, il est important de stratifier ce monde afin de garantir une efficacité à sa gestion.

## II.1 Définitions :

Les systèmes d'information géographique tirent leur spécificité des liens qu'ils établissent entre informations caractéristiques des composants d'un territoire et ce territoire.

La définition de chacun des composants, système d'information et information géographique contribue à en préciser le contour :

- **Système d'information** : Ensemble de composants inter reliés qui recueillent de l'information, la traitent, la stockent et la diffusent à fin de soutenir la prise de décision et le contrôle au sein de l'organisation.

- **Information géographique** : L'information est dite géographique lorsqu'elle se rapporte à un ou plusieurs lieux de la surface du globe terrestre. Cette information possède la caractéristique d'être localisée, repérée ou géocodée [1].

Un système d'information géographique a donc comme finalité de renseigner sur un territoire en localisant les informations pour aboutir à un processus de décision [2].

D'autres organismes définissent les SIG comme un système informatique de matériels, de logiciels, et de processus conçu pour permettre, la collecte, la gestion, la manipulation, l'analyse, la modélisation et l'affichage de données à référence spatiale afin de résoudre des problèmes complexes d'aménagement, modélisation et de gestion [3].

A l'heure actuelle, il y a plusieurs, concepts d'information géographique. Dans l'espace francophone, on a en effet préféré se démarquer du terme anglo-saxon GIS (Geographic Information System) en proposant ses propres appellations, relativement équivalentes, pour des raisons techniques ou commerciales :

- Système d'Information Environnementale à Référence Spatiale (SIERS),
- Système d'Information à Référence Spatiale (SIRS),
- Système d'Information et d'Aide à la Décision (SIAD),
- Système d'Aide à la Décision spatiale (SADS),
- Système de géo management,

## **II-2 Bref historique des SIG**

Pendant les années 60 et les années 70, de nouvelles pratique accordèrent une place croissante à l'utilisation des cartes pour la gestion des ressources naturelles, suite à la prise de conscience de l'interrelation entre les différents phénomènes qui se déroulent à la surface de la terre, la nécessité de développer des outils de gestion global et pluridisciplinaire, s'est rapidement imposée.

A la fin des années 70, la technologie de cartographie assistée par ordinateur avait fait néanmoins de grands progrès, avec la disponibilité de plus d'une centaine de système sur le marché. En parallèle, de nouvelles techniques se développaient dans des domaines proches : pédologie, hydrographie, topographie, photogrammétrie et télédétection. Le rythme soutenu du développement de ces nouvelles techniques, ainsi que l'absence de maturité de ce secteur s'est traduit dans un premier temps par la duplication d'efforts, dans les disciplines proches sans une réelle concertation. Mais au fur et à mesure que les systèmes se multipliaient et que l'expérience se gagnait, le potentiel de lien entre les processus différents de traitement des données spatiales émergeait. C'est ainsi que naissait un nouveau domaine : celui des systèmes d'information géographique, universelle utilisé de nos jours.

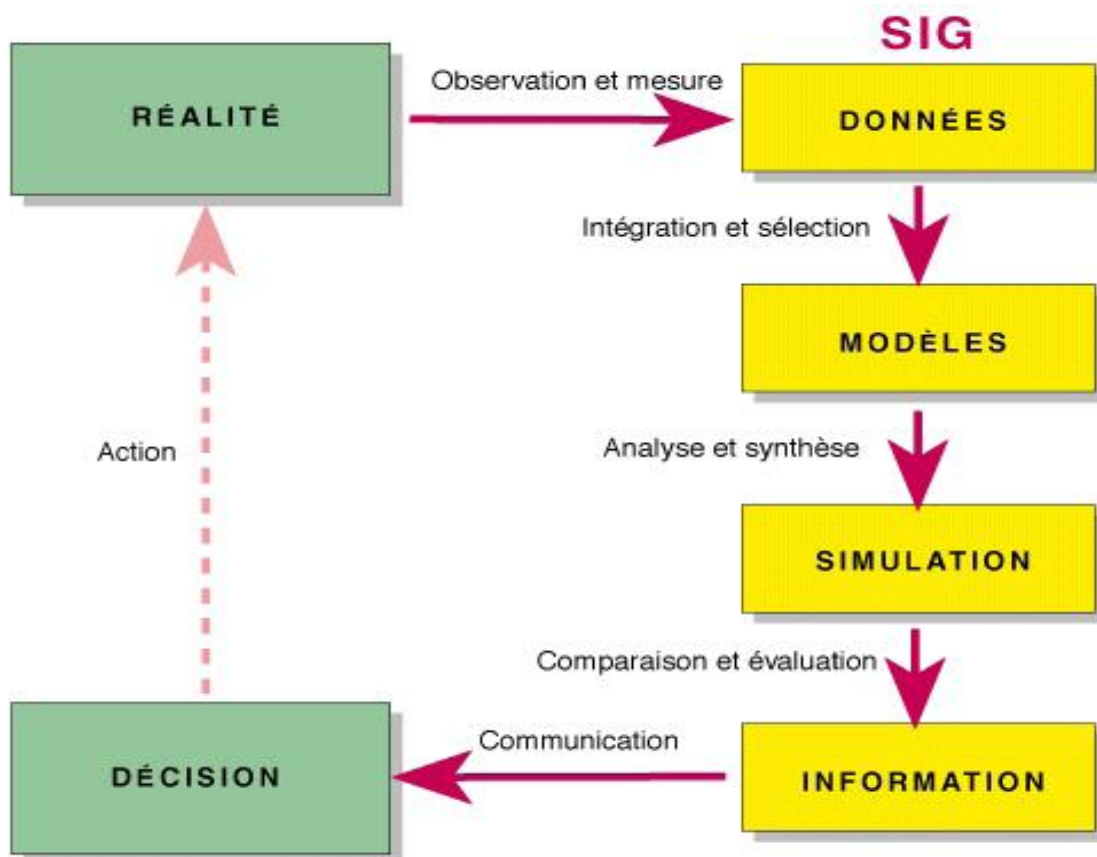
Au début des années 80, alors que l'information devenait à la fois sophistiqué (par la miniaturisation et l'augmentation des capacités de calcul), et plus populaire (par l'apparition des ordinateurs à des prix abordables), les SIG profitaient de cette généralisation des plateformes informatiques. Aujourd'hui, les SIG sont utilisés par tous les acteurs de l'aménagement du territoire et gisement [4].

## **II-3 La vocation d'un SIG**

- Rassembler au sein d'un outil informatique des données divers.
- Localisées dans le même espace géographique, relatives à la terre et à l'homme, à leurs évolutions respectives.
- La finalité d'un SIG est l'aide à la décision
- La complexité du monde réel est si grande que l'on crée des modèles de la réalité qui ne sont que des représentations de cette complexité du monde réel.
- Le contenu d'une base de données (BD) à référence spatiale présente donc une vue partielle du monde (représentation particulière)

Les mesures et les échantillons de la base de données doivent représenter le monde de manière aussi exhaustive et consistante que possible [4].

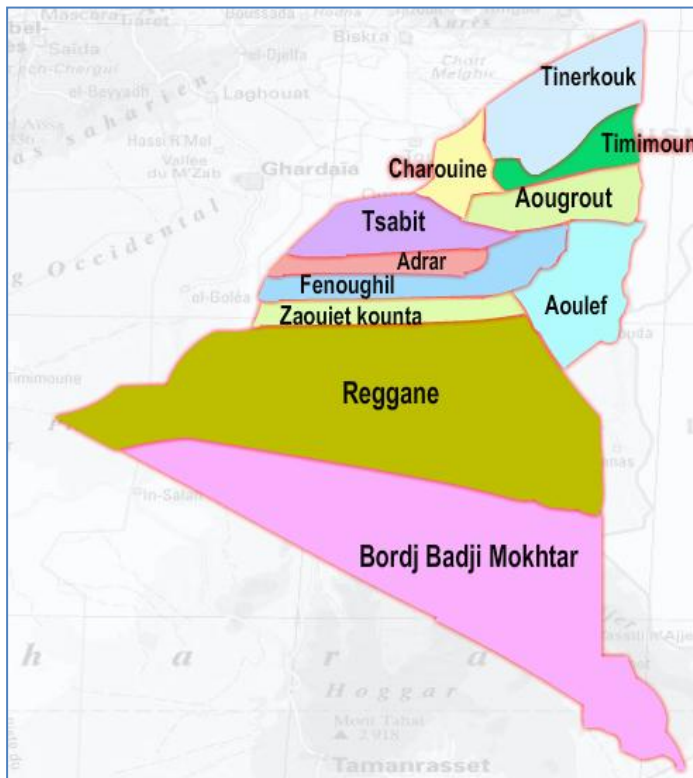
- Un SIG centralise un très grand nombre d'information
- Un SIG facilite l'accès à ces informations.
- Un SIG permet de mieux gérer toutes sortes d'enjeux.



**Fig. II-1** : Vocation d'un SIG

Le SIG comprend deux types de données intimement liées :

**Données géographiques (spatiales)**



Information Graphique

Tab II-1 : Population de la wilaya d'Adrar 2010

Fig. II-2: Limite administratives

**Données d'attribut (descriptives)**

Information Sémantique

**L'aspect sémantique** : donne une description dans différents champs et attributs.

**L'aspect graphique** : qui est le contour de l'objet localisé géographiquement




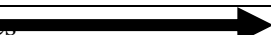

<b>Population 012 :</b>	<b>443.936</b>	
<b>Nombre de daïra :</b>	<b>11</b>	
<b>Nombre de Communes :</b>	<b>28</b>	
	<b>Urbaines :</b>	<b>03</b>
	<b>Rurales :</b>	<b>25</b>
<b>DAIRA</b>	<b>Nombre de Communes</b>	<b>Population</b>
<b>ADRAR</b>	<b>3</b>	<b>98.953</b>
<b>FENOUGHIL</b>	<b>3</b>	<b>32.416</b>
<b>REGGANE</b>	<b>2</b>	<b>37.292</b>
<b>BM</b>	<b>2</b>	<b>24.432</b>
<b>AOULEF</b>	<b>4</b>	<b>59.551</b>
<b>TIMIMOUN</b>	<b>2</b>	<b>46.562</b>
<b>TSABIT</b>	<b>2</b>	<b>19.066</b>
<b>AOUGROUT</b>	<b>3</b>	<b>31.884</b>
<b>TINERKOUK</b>	<b>2</b>	<b>22.924</b>
<b>CHAROUINE</b>	<b>3</b>	<b>34.987</b>
<b>ZAOUIT KOUNTA</b>	<b>2</b>	<b>36.673</b>



## II.4 Quelques domaines d'application des SIG :

Les SIG utilisés pour gérer et étudier une gamme très diversifiée de phénomènes et de réseaux de phénomènes :

**Tableau II.2 :** Quelques domaines d'application des SIG

Gestion des ressources 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ressources en eaux</li> <li>- Aménagement du territoire</li> <li>- Inventaires forestiers</li> </ul>
Gestion et planification des communes 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maitrise de risque et dangers naturels (décharge, inondation, incendies....)</li> </ul>
Gestion cadastrale 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Protection Civile</li> <li>- Cadastres polyvalents</li> <li>- Gestion parcellaire</li> </ul>
Gestion des infrastructures 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réseaux urbains, AEP et électricité</li> </ul>
Démographie et transport 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recensement</li> <li>- Cercles électoraux</li> <li>- Flux et trajets de véhicules</li> <li>- Transport et planification</li> </ul>

## II.5 Les avantages des SIG [1] :

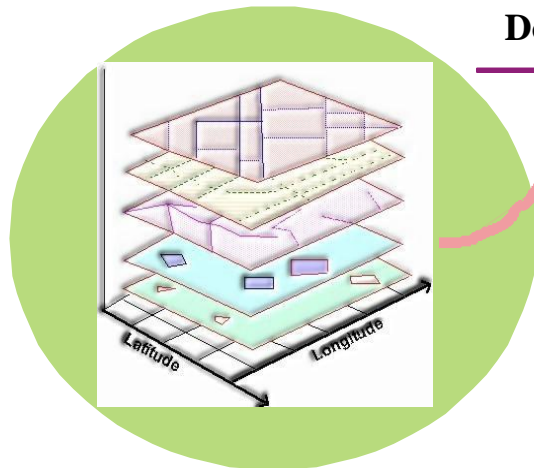
- Capacité et fiabilité de stockage.
- Rapidité de restitution des données (gain de temps).
- Intégration et combinaison de données de sources différentes
- Précision des processus cartographiques.
- Facilité de mise à jour (Outils de suivi).
- Analyse des relations spatiales (Intégration, requête spatiale, Combinaison et superposition de carte)
- Production de carte (bon rapport qualité/ prix).

## II-6 Les contraintes des SIG :

- Le manque de personnel spécialisé et compétant.
- Cout élevé et problèmes techniques pour l'acquisition des données fiables.
- Non standardisation des formats de données.
- Nécessité d'une mobilisation contenue des acteurs.

## II-7 Les principales composantes d'un SIG :

**Données**



**Personnel formé Logiciels**

**(Soft)**



**Matériel informatique**

**(Hard)**



**Fig. II-3** : Principales composantes d'un SIG [5]

Un SIG comporte au moins sept composantes :

- Une base de données à caractère spatiale et thématique
- Un système de représentation cartographique.
- Un système de saisie numérique.
- Un système de la base de données géographique
- Un système d'analyse spatiale.
- Un système de traitement d'images.
- Un système d'analyse statistique

## **1 II.8 Usage des SIG en énergies renouvelable:**

Le domaine énergétique, comme la plupart des domaines, a connu des avancés avec l'apparition des SIG, des avancés tant en termes organisationnel (manière de travail), technique (matériel de travail) et méthodologique (méthode scientifique adoptée).

Etant donné le projet que nous réalisons, à savoir étude et simulation de flux solaire avec intégration d'un système d'information géographique (SIG) pour l'aide à l'étude d'installation des stations et centrale solaire, faire des simulations et prendre les décisions à travers les localités de la wilaya d'Adrar.

## **2 II.9 Classification des outils SIG :**

A l'heure actuelle, le SIG existe sur le marché sous forme de progiciels. Ils proposent des fonctions d'intérêt général, qu'il est nécessaire de compléter selon les besoin spécifiques aux domaines étudiés, par des développements supplémentaires. Ces progiciels se classent en trois grandes familles [1] :

### **II.9.1 SIG généralistes bureautiques**

Ils ont pour vocation essentielle l'import des données externes et leur analyse pour donner des cartes à insérer dans des rapports ou des présentations. Ils permettent bien sur la modification des données géométriques ou descriptives mais ne disposent pas d'outils d'assurance de qualité perfectionnée pour saisir des bases de données complètes. Ils disposent d'outils de développement pour s'adapter à tous type d'application [6].

## II.9.2 SIG généralistes de gestion

Ils disposent des mêmes capacités que les SIG bureautiques, sont fréquemment moins conviviaux, mais disposent d'outils de modélisation beaucoup plus puissants, qui vont mettre des contraintes à la saisie et donc assurer une certaine qualité des données. Ces SIG vont également disposer de capacités client /serveur qui vont permettre à plusieurs personnes de travailler sur la même base de données à partir de postes informatiques distants. Ils disposent d'outils de développement pour s'adapter à tout type d'application [6].

## II.9.3 SIG « métiers »

Ces logiciels sont dès le départ très spécialisés, destinés à des métiers particulières. Leur champ d'application est réduit mais ils sont souvent les seules ou les meilleurs dans leurs domaines. Ce sont néanmoins des SIG car ils possèdent les 5 fonctionnalités Affichage, Acquisition, Abstraction, Analyse et Archivage, Fréquemment, les éditeurs de logiciels commercialisent des modules additionnels qui transforment les SIG généralistes en SIG métiers [6].

La liste qui suit n'a pas la prétention d'être exhaustive. Ces progiciels sont soit payants soit libres, tout dépend de leurs fournisseurs :

*ArcView* est un outil SIG généraliste bureautique, même si l'intégration de données externes est plus délicate. Il est conviviales mais ses possibilités de structurations sont restreintes et nécessitent des compléments pour partager une base de données [2].

*MapInfo* est un SIG généraliste bureautique typique. Il permet de sortir très facilement toutes sortes d'analyses thématiques. Auparavant, le langage de développement était spécial : Mapbasic, mais il a été remplacé par le langage de programmation « Visuel basic » [7].

*GéoConcept* est un progiciel à la frontière entre SIG bureautique et SIG de gestion. Il offre l'ouverture et la convivialité des premiers, et peut comme les seconds travailler client serveur sur de grandes bases de données [8].

*APIC4* est un SIG de gestion, l'intégration de données externes est lourde, en revanche, ce progiciel possède des possibilités de modélisation et de travail en groupe très étendues [7].

Les progiciels libres ou « open source » sont aussi présents sur le marché, nous citons :

**GeoCT** : CT signifie « Collectivités Territoriales », il présente la particularité d'être développé sous licence logiciels libres et d'être orienté vers les collectivités locales [7].

**Grass** : Grass est édité sous la même licence, il présente un niveau de maturité supérieur. Il dispose d'une très grande palette de compatibilité tant avec les formats de fichier raster que vectoriel. Les langages de programmation sont : C++ et dérivé Java, .net, C # [9].

**QGIS** : QuantumGIS est un logiciel SIG Complet open-source, Il s'appuie sur OGR/GDAL (bibliothèques de traitement vectoriel et raster) et existe dans 3 versions : Windows, mac et linux. Son langage est le : C++ [11].

**SagaGIS** : SAGA pour « Système for Automated Geoscientific Analyses ». Nous avons affaire à un logiciel SIG dit « scientifique ». Ce logiciel est riche en modules et vous permet d'en créer de nouveaux. Son langage est le ; C++ [10].

## **II.10 Avancés, axes de recherches et nouveautés :**

Les perspectives de développement dans le domaine des SIG, parallèlement aux évolutions technologiques, économiques et sociales, s'articulent autour de cinq axes :

### **II.10.1 Ouverture sur le monde via le Web**

L'arrivée d'internet, et sa portée au grand public a beaucoup valorisé l'ouverture des SIG au grand public. Les éditeurs des outils SIG explorent actuellement cette voie pour élargir le champ d'application des SIG, donc élargir la clientèle pour en bénéficier. Cependant, cette ouverture nécessitera évidemment de l'interopérabilité entre les SIG et le développement d'outils d'interrogation s'orientant vers les langages naturels pour s'adapter à toutes catégories d'utilisations [11].

## **II.10.2 Meilleure intégration des outils d'aide à la décision**

Le statut des SIG comme véritable système d'information d'une organisation, ne peut être acquis que, dans la mesure où il offre, au delà des tâches de gestion, les outils qui permettent la définition des stratégies pour l'aide à la prise de décision [12].

## **II.10.3 Prise en compte des données de toutes natures**

La richesse d'un SIG repose sur la finesse de la modélisation d'une problématique selon le territoire. La capacité à intégrer des données d'origine de plus en plus large sera une des facteurs des SIG. Ces derniers touchent pratiquement tous les domaines d'où la nécessité de les adapter à tout type de donnée [13].

## **II.10.4 SIG nomade sur terrain**

L'information nomade a changé radicalement la manière d'utiliser le système d'information géographique, en donnant la possibilité d'emmener le SIG sur le terrain et de communiquer directement avec le monde qui nous entoure.

Par le passé, les informations spatiales étaient emmenées sur le terrain en utilisant des cartes papier, souvent sous forme d'un livre de cartes. Les informations recueillies étaient reportées par des notes sur les cartes papier, puis entrées dans le SIG, une fois l'équipe rentrée au bureau.

Le SIG nomade comprend l'intégration d'un certain nombre de technologies [13] : le SIG, les matériels nomades sous la forme « d »appareils légers et de PC de terrain durcis, Le GPS (Global Positioning System), les communications sans fil pour l'accès au SIG par internet et enfin la synchronisation à l'aide de serveurs SIG [12].

## **II.10.5 Géo référencement embarqué en temps réel**

Outre la nécessité d'outils fournissant en temps réel et sous des formats compatibles, les SIG doivent pouvoir traiter les données dans la même échelle de temps. Des échanges en temps réel géo-référencés, ou il est possible de positionner une personne, un véhicule ou tout autre matériel, pour lister les différents événements déclenchés par certains capteurs [14].

## II.11 S.I.G idéal :

Idéalement, un SIG doit atteindre plusieurs objectifs et pour ce faire posséder certaines qualités. Il doit être :

- **Rentable** en fonction du mandat de l'organisme.
- **Pertinent** les résultats plutôt que sur les méthodes de production.
- **Flexible** capable d'évoluer.
- **Sécuritaire** construit de façon modulaire pour minimiser les erreurs et protéger l'information confidentielle.
- **Performant** contrôle de la qualité et efficacité des traitements.
- **Indépendant** du matériel et des logiciels afin d'en assurer l'évolution et la portabilité.
- **Coopératif** bien définir les rôles et les responsabilités des services et des individus impliqués.
- **Motivant** impliquer les utilisateurs à toutes les étapes de la conception et de l'utilisation.
- **Progressif** éviter les achats d'équipements et limiter la saisie initiale des données afin de réduire les risques d'erreur et les coûts.
- **Documenté** rédaction de la documentation parallèlement au développement du système.

### 2.1 II.12 Mise en place d'un SIG

Nous n'allons pas développer la mise en place ou la gestion de projet, mais plutôt les spécificités de ce type de projet en raison de son caractère « géographique ».

La réussite d'un projet SIG dépend, pour une bonne part, de facteurs non techniques tels que l'analyse des besoins, la méthodologie de mise en place, les conditions économiques liées aux investissements et au fonctionnement.

Sa pérennité nécessite :

- Un personnel formé et permanent
- Un fonctionnement quotidien
- Une adaptation à l'organisation des services
- L'élaboration d'un scénario d'évolution.

## **Conclusion:**

Les définitions théoriques présentées précédemment à pour but de faire connaître les spécificités du système d'information géographique, qui relève de la mise en commun de la dernière technologie de l'informatique, de la cartographie et des sciences géographiques.

C'est pourquoi, l'utilisation du SIG est pertinente dans tous les domaines où la connaissance des objets et leurs localisations terrestres permettent d'aboutir à des processus fiables d'aide à la décision.

L'information géographique est avant tout, une information, manipulée au sein d'un système pour apporter une aide à l'utilisateur (aide à la gestion ou à la décision). Cependant, elle possède cette particularité d'être « spatiale », et ceci nécessite un peu plus d'attention dans sa collecte, sa modélisation, sa conception et enfin sa présentation



## **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] Système d'information géographique SIG et télédétection, Institut National de Perfectionnement et l'Equipent K E B : document interne, 2005.
- [2] <http://www.esrifrance.fr>, Site officiel des produits ESRI France
- [3] Mohamed Touate : « Système d'Information Géographique (SIG) et Télédétection au service du métier de l'eau », 2008
- [4] Benachour Houcine : « Initiation au système d'information géographique », 2011
- [5] Luis Berardo Borda : « Apports des systèmes d'information géographique et l'évaluation de la qualité des eaux côtières. Une contribution à la gestion intégrée de la zone côtière Colombienne », thèse Doctorat en sciences techniques Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2003
- [6] <http://www.portalsig.org> Le portail de SIG
- [7] Johann Sorel : « Les outils de développement cartographique », 2007
- [8] <http://www.geoconcept.com> Site officiel de Géoconcept
- [9] <http://www.grass.itc.it> Site officiel des produits Grass
- [10] <http://www.saga-gis.uni-geottingen.de> Site officiel des produits SAGA
- [11] <http://www.e-Carte.com> Revue de cartographie électronique
- [12] <http://www.Lasig.com> Laboratoire de recherche en SIG
- [13] <http://www.Lavoisier.com> Librairie électronique publiant les revues
- [14] <http://www.sig-la-lettre.com> Le mensuel de référence des SIG, 2011

## **Chapitre III**

### ***Modélisation du flux solaire***

## Introduction

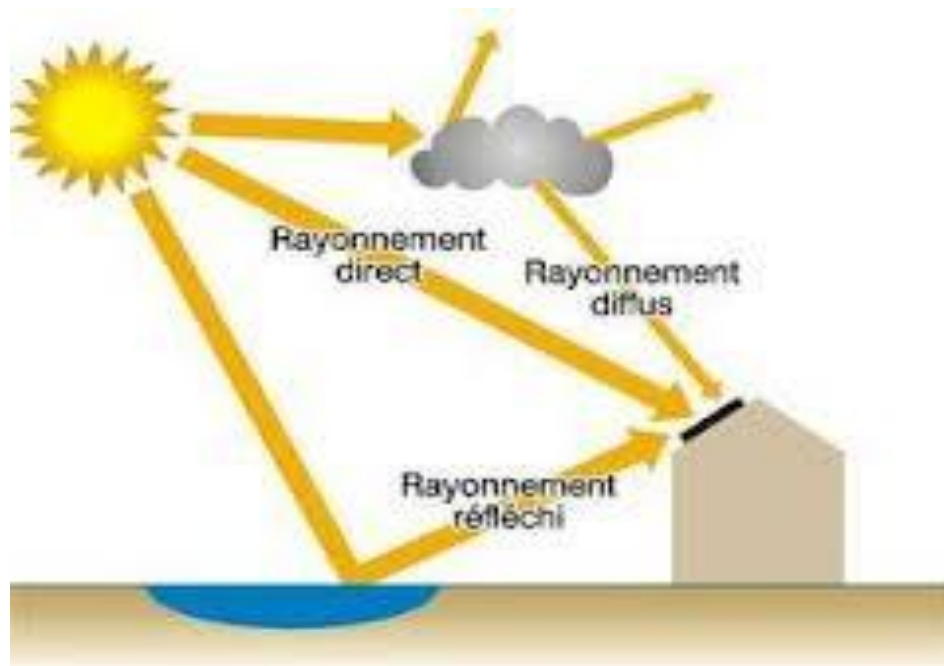
La connaissance du rayonnement solaire et ces composantes sur des surfaces horizontale et inclinées est nécessaire et indispensable pour toute étude ou dimensionnement d'installations solaires. Or généralement, dans les stations météorologiques le rayonnement solaire global est mesuré sur des surfaces horizontales et sur le chef lieu de chaque région.

Bien qu'il soit difficile de connaître la valeur de l'irradiation solaire pour un site précis, sous une orientation et une inclinaison bien déterminées, il existe quelques modèles approximatifs pour le calcul dans le cas où au moins le rayonnement global horizontal est mesuré ou estimé.

Dans ce chapitre nous présenterons les différents composantes du rayonnement solaire, ainsi on fait la description de quelques modèles mathématiques pour le calcul des divers flux solaire.

### III.1 Composantes du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire appelé également rayonnement électromagnétique émis par le soleil est grandement perturbé par l'atmosphère. Ce qui ne permet que la réception au sol des composantes les plus importants et les plus actifs du rayonnement solaire total qui sont le rayonnement direct et le rayonnement diffus, une fois arrivé au sol une partie du rayonnement est réfléchi comme représentés dans la figure suivante [1]:



*Fig. III.1 : Les différents composants du rayonnement solaire [2]*

### III.1.1 Rayonnement direct

Le rayonnement direct est reçu directement du soleil c'est un flux uniforme de rayons parallèles entre eux et de puissance incidente  $I$  ( $W/m^2$ ). C'est le flux des photons qui n'ont pas interagi avec les constituants de l'atmosphère et ont conservé une direction commune et leurs énergies propres.

### III.1.2 Rayonnement diffus

Parmi les photons qui ont interagi avec la couche d'atmosphère, certains ont été absorbés et d'autres ont subi un simple changement de direction (diffusion). Il s'agit donc de la répartition d'un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Pour un élément plan considéré la composante diffuse  $D$  ( $W/m^2$ ) provenant de toutes les directions est la plus difficile des composantes à calculer.

### III.1.3 Rayonnement global

On distingue deux types de données d'ensoleillement :

- Rayonnement instantané : on considère les courbes de l'intensité du rayonnement en fonction de chaque pas de quantité de mesure (minute, heure de la journée).
- Rayonnement cumulé : le cumul du rayonnement global par jour.

Les effets dus à l'atmosphère sont très complexes mais il existe des modèles simplifiés permettant d'approximer assez bien le rayonnement arrivant sur la surface du sol. Le rayonnement global incident arrivant réellement sur terre est la somme des rayonnements direct et diffus (voir Figure III-2) :

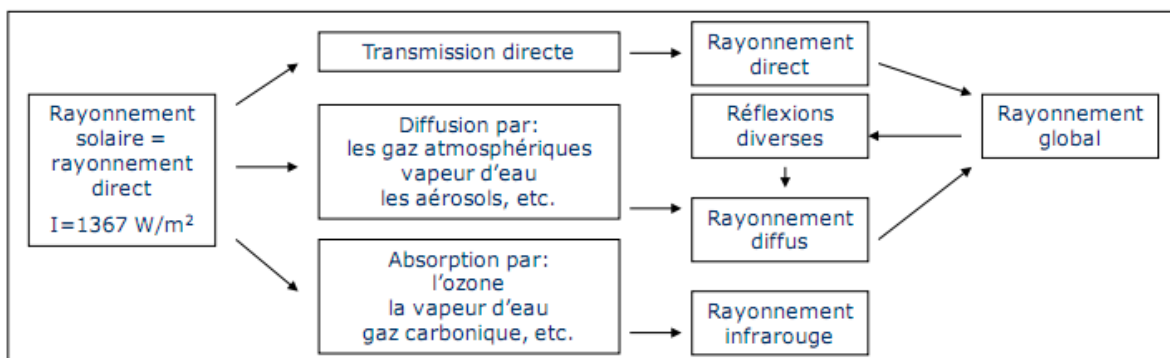
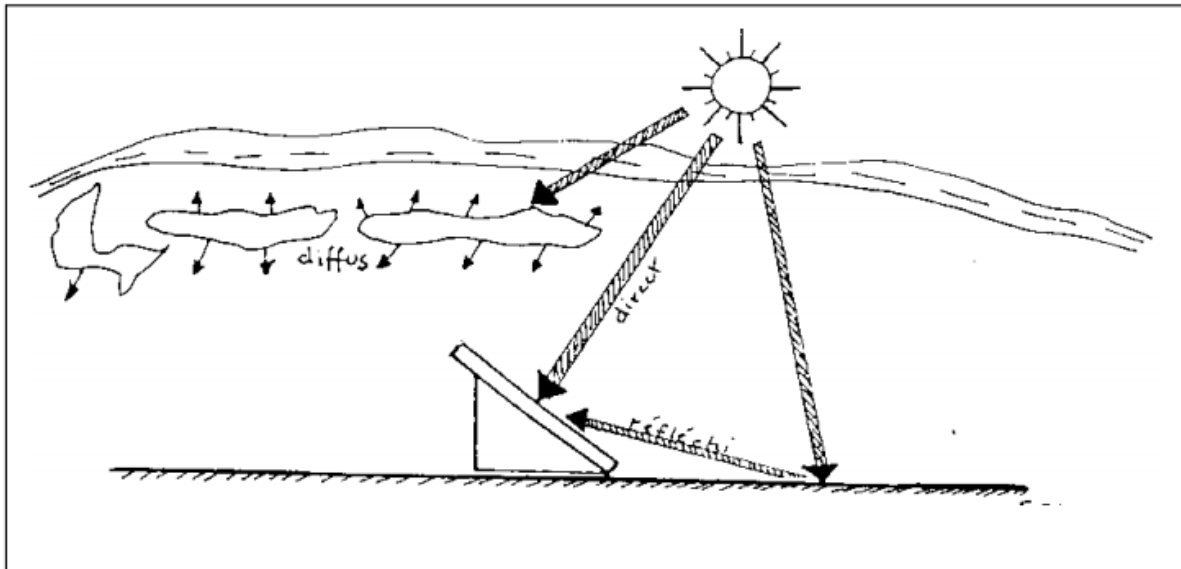


Fig. III-2 : Transmission du rayonnement solaire à la terre [27]

### III.1.4 L'albédo

Parvenant au sol, le rayonnement solaire n'est qu'en partie absorbé. Albédo est la fraction de rayonnement réfléchi par le sol, il dépend directement de la nature du sol (prairie, terre, désert). Le rayonnement réfléchi par le sol n'est évidemment à prendre en considération que pour les surfaces inclinées, comme le montre la figure suivante.



*Fig.III.3 : Composants au Sol du Rayonnement Solaire [3]*

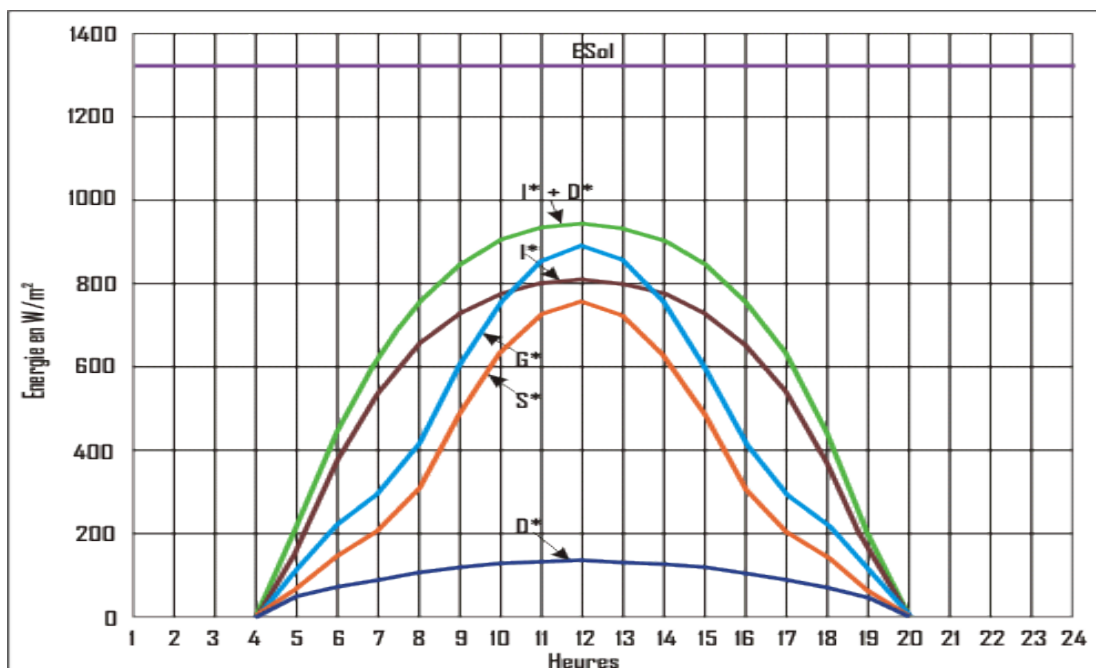
L'albédo est une valeur comprise entre 0 et 1 : la valeur nulle est donnée à un corps noir parfait, qui absorberait toutes les ondes électromagnétiques sans aucune onde réfléchi, tandis qu'un miroir parfait, qui réfléchirait toutes les ondes électromagnétiques sans en absorber une seule, la valeur de son albédo est égale à 1.

Les astronomes ont affiné cette définition en distinguant d'une part l'albédo de Bond, correspondant à la réflectivité globale d'un astre pour toutes les longueurs d'onde et tous angles de phase confondus, et d'autre part l'albédo géométrique, correspondant au rapport entre l'intensité électromagnétique réfléchi par un astre à angle de phase nul et l'intensité électromagnétique réfléchi à angle de phase nul par une surface équivalente à réflectance idéalement lambertienne (c'est-à-dire isotrope quel que soit l'angle de phase) : conséquences de ces définitions, l'albédo de Bond est toujours compris entre 0 et 1, tandis que l'albédo géométrique peut être supérieur à 1. Le tableau III.1 ci-dessous montre les différentes valeurs d'albédo que peuvent prendre le différent type de sol [4,28].

**Tableau III.1 : Albédo pour différents types de sols [4]**

Type de surface	Albédo (0 à 1)
Surface de lac	0,02 à 0,04
Forêt de conifères	0,05 à 0,15
Surface de la mer	0,05 à 0,15
Sol sombre	0,05 à 0,15
Cultures	0,15 à 0,25
Sable léger et sec	0,25 à 0,45
Glace environ	0,60
Neige tassée	0,40 à 0,70
Neige fraîche	0,75 à 0,90
Miroir	1

Prenons l'exemple de la variation de l'énergie solaire en fonction des heures d'ensoleillement : pour un plan fixe la courbe en bleu ( $G^*$ ) et pour un plan mobile (motorisé) la courbe en vert ( $I^*+D^*$ ) [2].



**Fig. III.4 : Variation horaire de l'énergie solaire [27]**

Les stations météorologiques existent depuis longtemps dans la plus part des pays, elles ont été équipées d'appareils de mesure du rayonnement solaire. La mission de ces stations est de fournir des informations sur les conditions climatiques.

Les satellites d'observation de la terre peuvent être équipés d'appareils mesurant le rayonnement diffusé par l'atmosphère dans des bandes de longueurs d'onde choisies. C'est le cas de Météosat, satellite stationnaire, qui observe l'Europe et une grande partie de l'Afrique.

Son objectif est d'observer les grosses masses nuageuses pour améliorer les prévisions météorologiques [5].

### III-2 Orientation d'un Plan

Un plan quelconque est défini par deux angles ( $\alpha$ ,  $\xi$ ) :

$\xi$  : hauteur du plan, c'est l'angle que fait la normale du plan et sa projection sur le plan horizontal.

$\alpha$  : azimut du plan, c'est l'angle que fait la projection de la normale sur le plan horizontal et la direction du sud. L'inclinaison  $\beta$  du plan par rapport au plan horizontal est donnée par :

$$\beta = 90 - \xi \quad (\text{III.1})$$

### III.3 Angle d'incidence sur un Plan

L'angle d'incidence  $i$  est l'angle entre la direction du soleil et la normale du plan.

Cet angle est déterminé par la connaissance des cosinus directeurs du rayon incident et la normale en coordonnées horizontales (de [6] à [9]) :

$$\cos(i) = \sin(\alpha - \Psi) \cos(\xi) \cos(\gamma) - \sin(\xi) \sin(\gamma) \quad (\text{III.2})$$

En coordonnées horaires :

$$\begin{aligned} \cos(i) = & \sin(\alpha) \cos(\xi) \sin(\omega) \cos(\delta) + \cos(\alpha) \cos(\xi) \\ & (\cos(\omega) \cos(\delta) \sin(\theta) - \sin(\delta) \cos(\theta)) \\ & + \sin(\gamma) (\cos(\omega) \cos(\delta) \cos(\theta) + \sin(\delta) \sin(\theta)) \end{aligned} \quad (\text{III.3})$$

### III.4 Modélisation du rayonnement solaire sur un plan horizontal par ciel clair

#### III.4.1 Rayonnement hors atmosphère

Le rayonnement solaire extraterrestre ; fonction de la constante solaire  $I_0$  et de la correction de distance entre la terre et le soleil  $C_{t-s}$  est donné par l'équation suivante [16]:

$$G_0 = I_0 \cdot C_{t-s} \quad (\text{III-4})$$

#### III.4.2 Calcul de l'irradiation globale reçue sur un plan

Avant de passer au modèle de calcul de l'irradiation, il faut définir la notion de jour moyen mensuel.

Le jour type est le jour où la déclinaison est proche de la déclinaison moyenne du mois considéré. A ce jour, l'irradiation globale quotidienne est égale à la moyenne mensuelle quotidienne.

Le jour recommandé pour chaque mois et le numéro du jour correspond de l'année sont données dans le tableau suivant :

**Tableau III.2** : Liste des jours types par mois proposés par Klein [25]

Mois	Jan	Fe v	Ma r	Av r	Ma i	Ju i	Ju l	Ao ut	se p	O ct	No v	D éc
Jour type	17	16	16	15	15	11	17	16	15	1 5	14	10
N° de jour	17	47	75	10 5	135	16 2	19 8	228	25 8	2 88	318	34 4

#### III.5 Modèle de calcul du rayonnement solaire

Le manque de données sur les constituants de l'atmosphère ne permet pas de calculer avec précision le rayonnement au sol. Des modèles et formules empiriques développées par les météorologistes restent des outils commodes pour évaluer le rayonnement au sol, elles ont besoin d'être validées dans certains cas par des mesures expérimentales. Les trois modèles que nous avons retenus, sont : le modèle de Capderou, le modèle R.sun et le modèle de Bird & Hulstrom [1].



### III.5.1 Présentation du modèle de Capderou

Le modèle de Capderou utilise le trouble atmosphérique pour calculer les composantes directe et diffusé de l'irradiation reçue sur un plan. L'absorption et la diffusion causées par les constituants de l'atmosphère peuvent être exprimées par des facteurs des troubles ; à partir de ces facteurs, on peut exprimer les irradiances directes et diffusées par ciel clair. La connaissance de facteur de trouble atmosphérique est nécessaire pour déterminer les irradiances par ciel clair. Ce facteur est le rapport entre l'extinction du rayonnement directe traversant une atmosphère de référence constituée uniquement d'air pur et sec sous la même incidence. Dans ce modèle, le facteur de trouble atmosphérique de Linke  $T_L^*$  par ciel clair est donné par [8]:

$$T_L^* = T_0 + T_1 + T_2 \quad (\text{III-5})$$

$T_0$  est le trouble dû à l'absorption gazeuse tant par les constituants fixes de l'atmosphère que par l'ozone et surtout par la vapeur d'eau. Une modélisation de ce facteur en fonction des seuls paramètres géo – astronomiques a permis à Capderou de proposer l'expression suivante :

$$A_{he} = \sin \left( \left( \frac{360}{365} \right) \cdot (j - 121) \right) \quad (\text{III-6})$$

$$T_0 = 2.4 - 0.9 \sin(\theta) + 0.1 (2 + \sin(\theta)) A_{he} - 0.2h - (1.22 + 0.14A_{he})(1 - \sin(\gamma)) \quad (\text{III-7})$$

$h$  : Altitude du lieu,  $j$  : Numéro du jour dans l'année,  $\theta$  : Latitude du lieu,  $\gamma$  : Hauteur du soleil.

$T_1$  est le trouble correspondant à l'absorption par les gaz de l'atmosphère ( $O_2$ ,  $CO_2$ , et  $O_3$ ) et à la diffusion moléculaire de Rayleigh donné par l'approche :

$$T_1 = 0.89^h \quad (\text{III-8})$$

$T_2$  est le trouble relatif à la diffusion par les aérosols couplées à une légère absorption dépendent à la fois de la nature et de la quantité des aérosols. En fonction du coefficient de trouble d'Angstrom  $\beta$ ,  $T_2$  est donnée par :

$$T_2 = (0.9 + 0.4A_{he}) (0.63)^h \quad (\text{III-9})$$

### III.5.1.1 Masse Atmosphérique

On appelle masse d'air la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversée verticale au niveau de la mer. Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir des transformations. Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, Capderou a utilisé la formule suivante [10] :

$$m_A = \frac{1}{\sin(\gamma) + 9.40 \cdot 10^{-4} [\sin(\gamma) + 0.0678]^{-1.253}} \quad (\text{III.10})$$

### III.5.1.2 Epaisseur Optique de l'Atmosphère

En 1922, Linke définit l'épaisseur optique de Rayleigh  $\delta_R$  comme étant l'épaisseur optique totale d'une atmosphère sans nuages, vapeur d'eau et aérosols [11]. Kasten, en 1980 a utilisé les données spectrales publiées par Feussner et al en 1930 Il a proposé aussi l'expression (III.11) pour  $\delta_R$  connue sous le nom de pyréliométrique de Kasten, dont la diffusion moléculaire et l'absorption de la couche d'ozone stratosphérique sont prises en compte [13,14].

$$\delta_R = 9.4 + (0.9 \cdot m_A) \quad (\text{III.11})$$

Dans cette formule, l'absorption par les gaz atmosphériques permanents tels que :  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{NO}_2$  et le CO n'est pas prise en compte. Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, Capderou a utilisé la formule pyréliométrique de Kasten.

### III.5.1.3 Irradiation globale reçue sur un plan horizontal

$I_0$  représente la constante solaire qui est par définition le flux énergétique reçu par une surface unité, sa valeur est 1367 W/m<sup>2</sup>. L'irradiation directe par ciel clair obtenue sur un plan horizontal est donnée par :

$$I = I_0 C_{t-s} \exp \left[ -T_L^* \left( 0.9 + \frac{9.4}{0.89h} \cdot \sin(\gamma) \right) - 1 \right]^{-1} \quad (\text{III-12})$$

L'irradiation diffuse sur un plan horizontal

$$a = 1.1 \quad \text{(III-13)}$$

$$b = \log ( T_L^* - T_0 ) - 2.8 + 1.02 (1 - \sin(\gamma))^2 \quad \text{(III-14)}$$

$$D = I_0 \cdot \exp(-1 + 1.06 \log(\sin(\gamma))) + a \cdot \sqrt{a^2 + b^2} \quad \text{(III-15)}$$

L'irradiation globale reçue sur un plan horizontal est donnée par :

$$G = I + D \quad \text{(III-16)}$$

### III.5.1.4 Irradiation globale reçue sur un plan incliné

#### 5.1.4.1. Irradiation directe

C'est la projection de la composante normale sur un plan incliné.

$$I = I_n \cos(i) = I_0 C_{t-s} \exp \left[ -T_L^* \left( 0.9 + \frac{9.4}{0.89^h} \cdot \sin(\gamma) \right) - 1 \right]^{-1} \cdot \cos(i) \quad \text{(III-17)}$$

$I_n$  est le rayonnement direct normal et  $i$  l'angle d'incidence.

#### 5.1.4.2 Irradiation diffuse du ciel

Il est composé de trois parties :

##### a. Composante directe ou circumsolaire

Elle provient du voisinage du soleil dans un cône de demi angle au sommet compris entre 3° et 15°, et qui peut être considéré qu'elle provient directement du soleil.

$$b = \log (T_L^* - T_0) 2.8 - 0.5 \log (\sin(\gamma)) \quad \text{et} \quad a = 3.1 - 0.4b \quad \text{(III-18)}$$

$$\delta_d = I_0 \cdot C_{t-s} \exp (-2.48 + (\sin(\gamma) + a - \sqrt{a^2 + b^2})) \quad \text{(III-19)}$$

##### b- Composante isotrope

Elle correspond à un ciel de luminance uniforme.

$$\delta_i = D - \delta_d \sin(\gamma) \quad \text{(III-20)}$$

$D$  est le diffus sur un plan horizontal.

### c- Composante du cercle de l'horizon

Elle provient d'une bande d'horizon d'une hauteur de  $6^\circ$ . Elle semble associée à une accumulation d'aérosols dans les basses couches atmosphériques.

$$b = \exp(0.2 - 1.75 \log(\sin(\gamma))) \quad (\text{III-21})$$

$$a = \log(T_L^* - T_0) - 3.1 - \log(\sin(\gamma)) \quad (\text{III-22})$$

$$\delta_\gamma = I_0 \cdot \frac{-0.02}{a^2 + ab + 1.8} \cdot \exp(\sin(\gamma)) \quad (\text{III-23})$$

#### Le diffus du ciel, le rayonnement diffus incident en provenance du ciel.

$$\xi = 90 - \beta$$

$$d_{\text{ciel}} = \delta_d \cdot \cos(i) + \delta_i \cdot \frac{1 + \sin(\xi)}{2} + \delta_\gamma \cdot \cos(\xi) \quad (\text{III-24})$$

#### 5.1.4.3 Irradiation diffuse du sol

L'albédo du sol  $\rho$  caractérise la réflexion de la lumière incidente. Pour un plan quelconque ( $\alpha$ ,  $\xi$ )

$$d_{\text{sol}} = \delta_a \cdot \frac{1 - \sin(\xi)}{2}, \quad \delta_a = \rho \cdot G \quad (\text{III-25})$$

#### 5.1.4.4 Irradiation diffus rétrodiffusé

L'irradiation diffuse du sol est rétrodiffusée, (diffusé à nouveau par le ciel vers le sol). Selon le raisonnement de Capderou, cette composante a la forme suivante :

$$\delta'_i = 0.9 \cdot (\rho - 0.2) \cdot G \cdot \exp\left(-\frac{4}{\sqrt{T_L^* + T_0}}\right) \quad (\text{III-26})$$

Il est clair que cette composante s'annule pour un albédo égal à 0.2 et par conséquent le diffus rétrodiffusé est nul.

$$D = d_{\text{ciel}} + d_{\text{sol}} + \delta'_i \cdot \frac{1 + \sin(\xi)}{2} \quad (\text{III-27})$$

D'où la puissance du rayonnement global incident, à un instant donné sur un plan ( $\alpha$ ,  $\xi$ ) est :

$$G = I + D \quad (\text{III-28})$$

## III.5.2 Modèle R. Sun

### III.5.2.1 Facteur de trouble de Linke

Le facteur de trouble atmosphérique de linke  $T_L$  représente le nombre d'atmosphères idéales qui, si elles étaient superposées, entraîneraient la même atténuation que l'atmosphère réelle [11,12]. L'avantage du facteur de linke est d'exprimer les divers paramètres, tels que la vapeur d'eau atmosphérique et les aérosols en un seul indice facile à utiliser.

Le rayonnement direct normal est exprimé en fonction du facteur  $T_L$ . Selon la formule suivante [15].

$$I_N = I_0 \cdot \exp(-T_L \cdot m_A \cdot \delta_R) \quad (\text{III.29})$$

La détermination du rayonnement solaire en fonction du facteur de Linke nécessite un modèle mathématique indépendant du rayonnement [15]. La plupart des modèles existants nécessitent la connaissance d'un grand nombre de données relatives au site [17].

Malheureusement, ces données ne sont pas toutes disponibles. Par contre, des tables relatives au facteur de Linke sont très abondantes [11,12]. Pour cela, nous avons choisi d'utiliser les données du projet Soda [16,18] mis en disposition sur un site Web. La méthode adoptée par ce projet fait appel à des données satellitaires d'une part et des données de mesures au sol d'autre part pour calculer le facteur de Linke, la valeur moyenne annuelle de facteur de Linke est  $T_L = 3,35$ .

En 1989, Kasten et al donnent une expression pour  $m_A$  qui est devenue largement utilisée. Le modèle R.sun utilise cette formule avec une légère correction de la hauteur du soleil [11,16].

$$m_A = \frac{p/p_0}{\sin(\gamma^{ref}) + 0.50572(\gamma^{ref} + 6.07995)^{-1.6364}} \quad (\text{III.30})$$

$p/p_0$  : est la correction de l'altitude  $h$  (m) :

$$p/p_0 = \exp(-h/8434.5) \quad (\text{III.31})$$

$\gamma^{ref}$  : est hauteur du soleil corrigée par la composante de la réfraction atmosphérique

$$\gamma^{ref} = \gamma + \Delta \gamma^{ref} \quad (\text{III.32})$$

$$\Delta \gamma^{ref} = 0.061359 (0.1594 + 1.123\gamma + 0.06565\gamma^2) / (1 + 28.944\gamma + 277.397\gamma^2) \quad (\text{III.33})$$

$\gamma$  : est hauteur du soleil donnée par l'équation (III-49)

En 1986, Louche ajouta l'absorption par les constituants permanents de l'atmosphère et proposa un polynôme de 4<sup>ème</sup> ordre pour la masse d'air.

Récemment en 1996, Kasten a ajusté la formule de Louche et proposa une nouvelle expression pour Le modèle R.sun a exploité la formule ajustée de Kasten pour une masse d'air inférieure à 20 et calcule comme suit [11,15] :

Pour  $m_A \leq 20$

$$\delta_R = \frac{1}{6.6296 + (1.7513 \cdot m_A) - (0.1202 \cdot m_A^2) + (0.0065 \cdot m_A^3) - (0.00013 \cdot m_A^4)} \quad (\text{III-34})$$

$m_A > 20$

$$\delta_R = \frac{1}{10.4 + 0.718 \cdot m_A} \quad (\text{III-35})$$

$\delta_R$  (m) : est l'épaisseur optique de Rayleigh.

### III.5.2.2 Eclairage direct sur un plan horizontal par ciel clair

Le rayonnement direct normal  $I_{oc}$  ( $W \cdot m^{-2}$ ) est exprimé en fonction du facteur  $T_L$  selon la formule suivante [22, 23] :

$$I_{oc} = I_o \cdot \exp [-0.8662 T_L \cdot m \cdot \delta_R (m)] \quad (\text{III.36})$$

Le terme  $-0.8662 T_L$  est le deuxième facteur de trouble atmosphérique de Linke par ciel clair (sans dimension) corrigé par Kasten [11,12].

Le rayonnement direct incident sur un plan horizontal par ciel clair  $I_{hc}$  est donné par l'équation suivante.

$$I_{hc} = I_{oc} \cdot \sin \gamma \quad (\text{III.37})$$

### III.5.2.3 Eclairage diffus incident sur un plan horizontal par ciel clair

Puisque le ciel sans nuage devient plus trouble, donc, l'éclairage diffus augmente lorsque l'éclairage direct diminue. L'estimation de la composante diffuse sur un plan horizontal  $D_{hc}$  ( $W m^{-2}$ ) est exécutée en faisant le produit de l'éclairage énergétique  $I$  normal extraterrestre, le facteur de transmission ( $T_n$  est en fonction uniquement du facteur de trouble atmosphérique de Linke corrigé  $T_L$ ) et une fonction du diffus de l'altitude solaire  $F_d$  qui ne dépend que du hauteur de solaire  $\gamma$  [19, 20].

$$D_{hc} = I_o \cdot T_n(T_L) \cdot F_d(\gamma) \quad (III-38)$$

L'estimation du facteur de transmission  $T_n(T_L)$  permet de donner un éclairage diffus théorique sur une surface horizontale. L'expression suivante est sous forme d'une fonction polynomiale de deuxième ordre :

$$T_n(T_L) = -0.051843 + 0.030543 T_L + 0.0003797 T_L^2 \quad (III-39)$$

$F_d$  : est la fonction diffuse angulaire, elle est donnée par l'expression :

$$F_d(\gamma) = A_1 + A_2 \sin \gamma + A_3 \sin^2 \gamma \quad (III-40)$$

$A_i$  : sont des coefficients dépendants uniquement du facteur de trouble  $T_L$  corrigé, défini par les expressions suivantes [13, 14] :

$$A'_1 = 0.26463 - 0.061581 T_L + 0.0031408 T_L^2 \quad (III-41)$$

$$A_I = 0.0022 / T_n(T_L) \quad \text{si } A'_1 T_n(T_L) < 0.0022 \quad (III-42)$$

$$A_I = A'_1 \quad \text{si } A'_1 T_n(T_L) \geq 0.0022 \quad (III-43)$$

$$A_2 = 2.04020 + 0.018945 T_L - 0.011161 T_L^2 \quad (III-44)$$

$$A_3 = -1.3025 + 0.039231 T_L - 0.0085079 T_L^2 \quad (III-45)$$

Subséquentement, l'éclairage global sur une surface horizontale est calculé comme suit :

$$G_{hc} = I_{hc} + D_{hc} \quad (III-46)$$

### III.5.2.4 Eclairage direct incident sur un plan incliné par ciel clair

Le rayonnement direct normal sur un plan incliné  $I_{ic}$  ( $W m^{-2}$ ) est obtenu en utilisant la relation suivante :

$$I_{ic} = I_{oc} \sin \delta_{exp} \quad (III-47)$$

Ou bien

$$I_{ic} = I_{hc} \sin \delta_{exp} / \sin \gamma \quad (III-48)$$

Avec  $\delta_{exp}$  qui est l'angle mesuré entre le soleil et une surface inclinée défini dans l'équation (III.57).

La position du soleil par rapport à une surface horizontale est donnée par les deux coordonnées classiques suivantes :

Auteur solaire  $\gamma$  : un angle entre la trajectoire du soleil et une surface horizontale.

Azimut  $\psi$  : angle horizontal entre le soleil et le méridien mesuré à partir de l'Est [22,14] :

$$\sin \gamma = C_{31} \cos \omega + C_{33} \quad (III-49)$$

$$\cos \psi = (C_{11} \cos \omega + C_{13}) / [(C_{22} \sin \omega)^2 + (C_{11} \cos \omega + C_{13})^2]^{1/2} \quad (III-50)$$

Avec

$$C_{11} = \sin \theta \cos \delta \quad (III-51)$$

$$C_{13} = -\cos \theta \sin \delta \quad (III-52)$$

$$C_{22} = \cos \delta \quad (III-53)$$

$$C_{31} = \cos \theta \sin \delta \quad (III-54)$$

$$C_{33} = \sin \theta \sin \delta \quad (III-55)$$

Dans le modèle R.sun, nous avons mis une déclinaison du soleil (rad) qui correspond à [13, 16] :



$$\delta = \arcsin (0.398 \cdot \sin (j' - 14 + 0.0355 \sin (j' - 0.0489))) \quad (\text{III-56})$$

La position du soleil par rapport à une surface inclinée est définie par l'angle  $\delta_{\text{exp}}$  [7].

Si la surface inclinée est définie par l'angle d'inclinaison  $\beta$  et l'azimut  $\alpha$  (un angle entre la projection de la normale sur la surface horizontale et l'Est) alors :

$$\sin \delta_{\text{exp}} = C'_{31} \cos (\omega - \varphi') + C'_{33} \quad (\text{III-57})$$

où :

$$C'_{31} = \cos \theta' \cos \delta \quad (\text{III-58})$$

$$C'_{33} = \sin \theta' \cos \delta \quad (\text{III-59})$$

et :

$$\sin \theta' = -\cos \theta \sin \beta \cos \alpha + \sin \theta \cos \beta \quad (\text{III-60})$$

$$\tan \varphi' = -(\sin \beta \sin \alpha) / (\sin \theta \sin \beta \cos \alpha + \cos \theta \cos \beta) \quad (\text{III-61})$$

L'angle horaire du lever et du coucher du soleil sur une surface horizontale

$T_{\gamma}^{rs}$  peut être calculé par :

$$\cos T_{\gamma}^{rs} = -C_{33} / C_{31} \quad (\text{III-62})$$

L'angle horaire du temps du lever et du coucher du soleil sur une surface inclinée peut

être calculé par :

$$\cos (T_{\gamma}^{rs} - \varphi') = -C'_{33} / C'_{31} \quad (\text{III-63})$$

### III.5.2.5 Eclairage diffus incident sur un plan incliné par ciel clair

Le modèle d'estimation de l'éclairage diffus par ciel clair sur une surface inclinée est représenté par les équations suivantes [14]:

Si  $\gamma \geq 0.1 \quad \text{rad}$

c'est-à-dire si on considère que

$$\gamma \geq 5.7^{\circ}$$

$$D_{ic} = D_{hc} [F(\beta) (1 - K_b) + K_b \sin \delta_{exp} / \sin \gamma] \quad (\text{III-64})$$

Si

$$\gamma < 0.1 \quad \text{rad}$$

$$D_{ic} = D_{hc} [F(\beta) (1 - K_b) + K_b \sin \beta \cos A_{LN} / (0.1 - 0.008 \gamma)] \quad (\text{III-65})$$

$F(\beta)$  est la fonction du rayonnement diffus du ciel.

$A_{LN}$  est l'azimut du soleil pour une surface inclinée

$$K_b = I_{hc} / G_{oh} \quad (\text{III-66})$$

Où  $G_{oh}$  ( $\text{W.m}^{-2}$ ) est calculé comme suit :

$$G_{oh} = G_o \sin \gamma \quad (\text{III-67})$$

### III.5.3 Modèle de Bird & Hulstrom

#### III.5.3.1 Calcul du rayonnement direct

L'éclairement dû au rayonnement direct sur un plan horizontal est donné par la relation :

$$I = 0.9751 \cdot I_0 \cdot \tau_r \cdot \tau_g \cdot \tau_0 \cdot \tau_w \cdot \tau_a \cdot \cos(z) \quad (\text{III-68})$$

où, le coefficient d'absorption par la couche d'ozone  $\tau_0$  est donné par :

$$\tau_0 = 1 - 0.1611 \cdot U_0 \cdot (1.0 + 139.48 \cdot U_0)^{-0.3035} \\ 0.002715 \cdot U_0 \cdot (1 + 0.044 \cdot U_0 + 0.0003 \cdot U_0^2)^{-1} \quad (\text{III-69})$$

et,  $U_0$  est l'épaisseur de la couche d'ozone corrigée par le trajet optique du rayonnement solaire à travers cette couche et définie par l'équation suivant [24] :

$$U_0 = L \cdot m_r \quad (\text{III-70})$$

où,  $m_r$  est la masse d'air optique relative donnée par l'équation :

$$m_r = [\cos(z) + 0.15(93.885 - z)^{-1.253}]^{-1} \quad (\text{III-71})$$

Et,  $L$  représente la quantité d'ozone à la verticale du lieu (épaisseur de la couche d'ozone réduite (cm)) [19, 22].

$$L = \{235 + [150 + 40 \sin(0.9856(j' - 30)) + 20 \sin(3\phi)] [\sin^2(1.28 \theta)]\} / 1000 \quad (\text{III-72})$$

Le coefficient de transmission après absorption du rayonnement solaire par la vapeur d'eau est donné par :

$$\tau_w = 1 - 2.4959 \cdot U_w \cdot [(1 + 79.03 \cdot U_w)^{0.6828} + 6.385 \cdot U_w]^{-1} \quad (\text{III-73})$$

$U_w$  est l'épaisseur d'eau condensable à la verticale du lieu (cm) donnée par l'équation suivant :

$$U_w = \frac{0.493}{T} \cdot HR \cdot \exp\left(26.23 - \frac{5416}{T}\right) \quad (\text{III-74})$$

$T$ , la température ambiante (K) et  $HR$ , l'humidité relative (%).

Le coefficient de transmission après absorption par les gaz permanents (CO<sub>2</sub> et O<sub>2</sub>) s'exprime en fonction de la masse d'air corrigée à l'aide de l'équation :

$$\tau_g = \exp(-0.0127 \cdot m_a^{0.26}) \quad (\text{III-75})$$

où,  $m_a$  est la masse d'air corrigée exprimée par l'équation suivant :

$$m_a = \frac{p}{p_o} m_r = \frac{\exp(-0.0001184 \cdot h)}{\cos(z) + 0.15(93.885 - z)^{-1.253}} \quad (\text{III-76})$$

Le coefficient de transmission après la diffusion moléculaire s'exprime aussi en fonction de la masse d'air par :

$$\tau_r = \exp[-0.0903 \cdot m_a^{0.84} (1.0 + m_a - m_a^{1.01})] \quad (\text{III-77})$$

Et le coefficient de transmission après la diffusion par les aérosols peut se calculer par :

$$\tau_a = \exp[-k_a^{0.873} \cdot m_a^{0.9108} \cdot (1.0 + k_a - k_a^{0.7088})] \quad (\text{III-78})$$

$$k_a = 0.2758 \cdot k_{a\lambda/\lambda=0.38 \mu\text{m}} + 0.35 \cdot k_{a\lambda/\lambda=0.5 \mu\text{m}} \quad (\text{III-79})$$

$k_{a\lambda/\lambda=0.38 \mu\text{m}}$  et  $k_{a\lambda/\lambda=0.5 \mu\text{m}}$  sont deux coefficients d'atténuation déterminés à partir des mesures expérimentales déduites par l'équation :

$$k_a(\lambda) = \beta \cdot \lambda^{-\alpha} \quad (\text{III-80})$$

où,  $\alpha$  et  $\beta$  sont respectivement le coefficient caractérisant la visibilité du ciel et le coefficient de trouble d'Angstrom. Leur calcul est basé sur la détermination expérimentale de deux coefficients d'atténuation  $k_{a\lambda_1}$  et  $k_{a\lambda_2}$  correspondant aux longueurs d'onde où l'absorption par la vapeur d'eau n'intervient pas ( $\lambda_1 = 380 \text{ nm}$  et  $\lambda_2 = 500 \text{ nm}$  respectivement).

Les mesures utilisées dans ce travail nous ont été fournies par le NCDC (National Climatic Data Center) à Asheville en Caroline du Nord [20,21].

Sachant que les valeurs de  $\alpha$  et  $\beta$  ont été détaillées au chapitre I page (9) au paragraphe « la diffusion ».

Ces valeurs  $\alpha$  et  $\beta$  de nous ont permis de calculer  $k_{a\lambda/\lambda=0.38 \mu\text{m}}$  et  $k_{a\lambda/\lambda=0.5 \mu\text{m}}$ .

### III.5.3.2 Calcul du rayonnement diffus

Dans ce modèle aussi, le rayonnement diffus sur un plan horizontal est la somme des trois composantes diffuses dues aux divers types de diffusion du rayonnement solaire par la pellicule atmosphérique.

$$D = D_r + D_a + D_m \quad (\text{III-81})$$

Le rayonnement diffus issu de la diffusion de Rayleigh est donné par :

$$D_r = 0.79 \cdot I_0 \cdot \cos(z) \cdot \tau_0 \cdot \tau_g \cdot \tau_w \cdot \tau_{aa} \cdot 0.5 \cdot \frac{(1-\tau_r)}{(1-m_a+m_a^{1.02})} \quad (\text{III-82})$$

où,  $\tau_{aa}$  est donnée par l'expression suivante :

$$\tau_{aa} = 1 - (1-\omega_0) \cdot (1 - m_a + m_a^{1.06}) \cdot (1 - \tau_a) \quad (\text{III-83})$$

et,  $\omega_0$  est le coefficient de réflexion unitaire relatif à la diffusion par les aérosols. Dans ce modèle, Bird & Hulstrom recommandèrent  $\omega_0 = 0,90$ .

Le rayonnement diffus après la diffusion par les aérosols est donnée par :

$$D_a = 0.79 \cdot I_0 \cdot \cos(z) \cdot \tau_0 \cdot \tau_g \cdot \tau_w \cdot \tau_{aa} \cdot F_c \cdot \frac{(1-\tau_{as})}{(1-m_a+m_a^{1.02})} \quad (\text{III-84})$$

où,  $F_c$ , est le coefficient de dispersion de l'atmosphère.  $F_c = 0.84$  est la valeur recommandée par ce modèle [23].

$T_{as}$  est donné par la relation suivante :

$$\tau_{as} = \tau_a / \tau_{aa} \quad (\text{III-85})$$

Le diffus dû au phénomène de multi réflexion terre atmosphère est donné par :

$$D_m = \frac{(1 + D_a + D_r) \cdot \rho \cdot \rho'_a}{(1 - \rho \cdot \rho'_a)} \quad (\text{III-86})$$

avec,  $\rho$  est l'albédo terrestre, et  $\rho'_a$  est l'albédo du ciel clair donné par :

$$\rho'_a = 0.0685 + (1 - F_c) \cdot (1 - \tau_{as}) \quad (\text{III-87})$$

### III.5.3.3 Calcul du rayonnement global

Le rayonnement global sur un plan horizontal est la somme des deux composantes solaires directe et diffuse soit :

$$G = D + I \quad (\text{III-88})$$

### Indice de clarté

Le rapport entre le rayonnement au sol et le rayonnement extraterrestre est appelé indice de clarté. Les valeurs de ce dernier varient selon les endroits et les saisons. Cet indice est donné par la formule :

$$K_T = G/G_0 \quad (\text{III-89})$$

Où :  $G$  est l'irradiation solaire reçue sur un plan horizontal,

Cet indice varie généralement entre 0.3 (pour les régions ou des saisons pluvieuses) et 0.8

(pour des saisons ou des climats secs et ensoleillés) [26].

### Conclusion

Dans ce chapitre on a identifié les trois modèles de connaissance relatifs pour la détermination du rayonnement solaire global (modèle de Capderou, R.sun et celui de Bird & Hulstrom), dans le chapitre suivant on va présenter les résultats et discussions des modèles étudiés dans ce chapitre.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] L.MILOUDI, « Etude et simulation de la trajectoire du soleil par un panneau solaire photovoltaïque », Thèse de Magister en automatique, Université Boumerdés, 2011.
- [2] C.DELORME, « le rayonnement solaire utilisable », université d'Avignon publication-France
- [3] Brochure, « Manuel d'installation, d'entretien et de maintenance des systèmes solaires photovoltaïques pour l'éclairage domestique et le pompage d'eau », édition l'UNESCO et l'IEPF Marrakech, 2000.
- [4] F. Draou « Etude et réalisation d'un logiciel de simulation du flux solaire horizontal » mémoire Master, université Adrar, 2013
- [5] Bernard EQUER « Energie solaire photovoltaïque », Volume 1, publié par Ellipses Editions Marketing et l'UNESCO, 1993
- [6] M.HAMDANI « Etude et Effet de l'Orientation de deux Pièces d'un Habitat en Pierre Situé à Ghardaïa » thèse de magister option énergie renouvelable Université Tlmcen, 2011.
- [7] S.M.A. Bekkouche, « Modélisation du Comportement Thermique de Quelques Dispositifs Solaires », Thèse de Doctorat en Physique Electronique, Université de Tlemcen., Mai 2009.
- [8] M.R. Yaïche, S.M.A. Bekkouche, « Conception et Validation d'un Programme sous Excel pour L'estimation du Rayonnement Solaire Incident en Algérie ». Cas d'un Ciel Totalemt Clair, Revue des Energies Renouvelables Vol, 11 N°3, 2008, 423 - 436.
- [9] M.R. Yaïche, S.M.A. Bekkouche, « Conception et Validation d'un Programme Sous Excel Pour L'estimation du Rayonnement Solaire Direct en Algerie » , Revue Internationale D'héliotechnique N° 39, pp. 50-55 , 2009..
- [10] M. Capderou, Atlas Solaire de l'Algérie, Tome1, vol 1 et 2 : Modèles Théoriques et Expérimentaux, Office des Publications Universitaires, Algérie, 1987.
- [11] R. Dogniaux, « L'influence de L'estimation du Facteur Total de Trouble Atmosphérique sur L'évaluation du Rayonnement Solaire Direct par Ciel Clair », Application aux Données Radiométriques de l'IRM à Uccle, Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM), Miscellanea, Serie C, N° 20, 1984.
- [12] J. Remund, L.Wald,M.Lefevre, T. Ranchin and J. Page, in press,Worldwide Linke Turbidity Information,Proceedings of The ISES Solar World Congress 2003, Goeteborg, Sweden, 16-19, 2003.
- [13] E .R. Bird, R.L.Hulstrom, « A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insulation on Horizontal Surfaces », Seri Tr -642-761, 1981.

- [14] J.Hofierka, M.Suri, « The Solar Radiation Model for Open Source GIS: Implementation and Applications », Proceedings of the Open Source GIS - GRASS Users Conference 2002 - Trento, Italy, 11-13, 2002.
- [15] F. Linke, « Transmissions, Koeffizient and Trübungsfaktor, Beiträge Zur Physik Der Atmosphäre », Vol. 10, pp. 91 - 103, 1922.
- [16] F. Yattou, « Etude comparative de deux modèles de calcul du rayonnement solaire par ciel clair en Algérie », Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°2, pp. 331 – 346, 2009.
- [17] L. Diabaté, J. Remund, L. Wald, Linke Turbidity Factors for Several Sites in Africa, Solar Energy, 75, pp. 111-119, 2003.
- [18] B. Gschwind, L. Ménard, M. Albuissou and L. Wald, « Converting a Successful Research Project Into a Sustainable Service, The Case of the Soda Web Service », Environmental Modelling a Software, Vol, 21, N° 11, pp. 1555 - 1561, 2006.
- [19] M. Koussa, A. Malek et M. Haddadi, « Validation de Quelques Modèles de Reconstitution des Eclaircissements dus au Rayonnement Solaire Direct, Diffus et Global par Ciel Clair », Revue des Energies Renouvelables Vol. 9 N°4 pp. 307 – 332, 2006.
- [20] [www.ncdc.noaa.gov](http://www.ncdc.noaa.gov)
- [21] A. Mefti, « Contribution à la Détermination du Gisement Solaire par Traitement de Données Solaires au Sol et d'Images Météosat », Thèse de Doctorat d'Etat, USTHB, Alger, 2007
- [22] T.K. Van Heuklon, « Estimating Atmospheric Ozone for Solar Radiation Models », Solar Energy, Vol. 22, N°1, pp. 63 – 68, 1979.
- [23] D. Saheb-Koussa, M. Koussa et M. Belhamel, « Reconstitution du Rayonnement Solaire par Ciel Clair », Revue des Energies Renouvelables Vol. 9 N°2 pp 91 – 97, 2006.
- [24] M. Mesri-Merad, I. Rougab, A. Cheknane et N.I. Bachari, « Estimation du rayonnement solaire au sol par des modèles semi-empiriques », Revue des Energies Renouvelables Vol. 15 N°3, pp.451 – 463, 2012
- [25] OACI, (Organisation de l'aviation civile Internationale), « Manuel de l'atmosphère type », Doc, 7488/3<sup>ème</sup> édition, 1993
- [26] RETScreen, International Centre d'aide à la décision sur les énergies propres « Analyse de projets d'installation photovoltaïque », Documents, Ministère des ressources Naturelles, Canada, 2001-2004.
- [27] [www://hernes.silve.pges.perso-orange.fr](http://www.hernes.silve.pges.perso-orange.fr)
- [28] [www://fr.wikipedia.org/wiki/Albédo](http://www.fr.wikipedia.org/wiki/Albédo)
- [29] A.Ricaud, Gisement Solaire, Cythelia Sarl, Septembre 2009.



## **Chapitre IV**

***Simulation du flux solaire pour Adrar***

## **Introduction**

Dans ce chapitre nous présentons les résultats obtenus dans le cadre de notre travail qui a été réalisés par le logiciel de programmation «Delphi7» ainsi que leurs interprétations, pour apprécier la précision de notre travail, nous avons fait une étude comparative. L'une consiste à déterminer les trois modèles empiriques étudié (Capderou, R.sun et Bird & Hulstrom) qui vont nous permettre d'estimer les irradiances direct, diffus et globales journalières sur un plan horizontal et ont le comparer par les résultats mesuré dans le site d'Adrar au moment de quatre saisons.

### **IV.1 Données expérimentales**

Les stations de mesures sont rares à travers le territoire national. Pour l'estimation des irradiances solaires, on a recours aux modèles théoriques. Ces modèles sont établis sous forme de corrélation. Pour qu'ils soient applicables aux sites considérés, ces derniers doivent être confrontés aux valeurs réellement mesurées sur le site considéré sur une période qui couvrira les différentes saisons de l'année.

Cependant, une étude comparative a été exécutée sur les éclairages solaires sur un plan horizontal. Pour ce faire, plusieurs journées ont été sélectionnées pour comparer les valeurs calculées par les trois modèles et celles données par la station radiométrique d'Adrar.

Nous avons choisi le site d'Adrar (lat.  $27.88^{\circ}$  N, Long.  $0.18^{\circ}$  W) pour cette étude, le choix de ce site s'est porté sur la disponibilité des données radiométriques recherchées.

En effet, Adrar est une ville saharienne située au milieu du Sahara, cette région connue par des températures diurnes très élevées en été, et des températures basses en hiver.

Les données expérimentale du rayonnement solaire (global, diffus et direct) utilisées de l'année 2011 proviennent de unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien d'Adrar (URER.MS) [1].

## **IV.2 Algorithme de calcul de composante directe, diffusé et globale de l'irradiation reçue sur un plan horizontale:**

L'algorithme de calcul du rayonnement global dont les caractéristiques sont spécifiées dans le tableau (IV.1) est :

Le lieu choisi est le site d'Adrar dont les coordonnées géographiques sont :

Latitude est :  $L = 27.88^\circ$  Nord

Longitude est :  $l = 0.18^\circ$  West

Altitude est (m) : 279

Albédo est : 0.2

### **Début d'algorithme**

- Choix du site (latitude, longitude, altitude et albédo)
- Choix de jour (date du jour de l'année)
- Calculer l'angle de déclinaison ( $\delta$ =delta) par l'équation (I.4)
- Calculer l'équation du temps ET par l'équation (I.12)
- Calculer le temps solaire vrai TSV par l'équation (I.11)
- Calculer l'angle horaire  $\omega$  par l'équation (I.5)

### **Cas étudié : Panneau horizontal**

- Calculer la hauteur  $\gamma$  du soleil par l'équation (I.6)
- Tracer la hauteur  $\gamma$
- Calcul du rayonnement Direct S Modèle capderou par l'équation (III-12)
- Calcul du rayonnement Diffus D Modèle capderou par l'équation (III-15)
- Calcul du rayonnement Global G Modèle capderou par l'équation (III-16)
- Calcul du rayonnement Direct S Modèle R.Sun par l'équation (III-36)
- Calcul du rayonnement Diffus D Modèle R.Sun par l'équation (III-38)
- Calcul du rayonnement Global G Modèle R.Sun par l'équation (III-46)

- Calcul du rayonnement Direct  $S$  Modèle Bird & Hulstrom par l'équation (III-68)
- Calcul du rayonnement Diffus  $D$  Modèle Bird & Hulstrom par l'équation (III-81)
- Calcul du rayonnement Global  $G$  Modèle Bird & Hulstrom par l'équation (III-88)
- Tracer les rayonnements  $S$ ,  $D$  et  $G$  pour les données expérimentales
- **Fin de l'algorithme**

### IV.3 Tableaux et Courbes des résultats de calculs

Nous présentons le premier tableau de calculs qui récapitule pour chaque jour de saison:

Le numéro du jour par rapport aux jours de l'année, la déclinaison de la terre et l'équation du temps.

**Tableau IV.1** : Résultats des calculs

<b>Jour/mois</b>	<b>21 Mars</b>	<b>19 juin</b>	<b>13 Juillet</b>	<b>16 Septembre</b>	<b>21 Décembre</b>
<b>Jour/année</b>	80	169	193	258	355
<b><math>\delta^\circ</math> (dgr)</b>	-0.06	23.40	22.09	3.34	-23.41
<b><math>\delta</math> (rd)</b>	-0.0010	0.0245	0.0230	0.0582	-0.0408
<b>ET (mn)</b>	-7	- 0.58	- 5.40	+ 4	+ 2.15

## IV.4. Résultats et interprétations

### IV.4.1 Résultats obtenus

Pour obtenir une validation du rayonnement solaire, nous allons confronter quelques valeurs; par ciel clair, du rayonnement solaire fournies par la station radiométriques d'Adrar, avec des valeurs, sur plan horizontal, délivrées par le logiciel de calcul Delphi7.

On présentera sur les figures suivantes, des graphes comparatifs relatifs au rayonnement diffus, au rayonnement direct et au rayonnement global, des modèles R.Sun, Capderou et Bird & Hulstrom, avec les données expérimentales de l'année 2011 site d'Adrar. Le graphe d'erreur relative en fonction du temps (TSV) est également donné pour le rayonnement global.

L'expression de l'erreur relative moyenne en (%) est donnée par l'équation suivante:

$$Er_r = \frac{|G_{mesuré} - G_{calculé}|}{G_{mesuré}} \quad (IV-1)$$

G : éclairement solaire (w/m2)

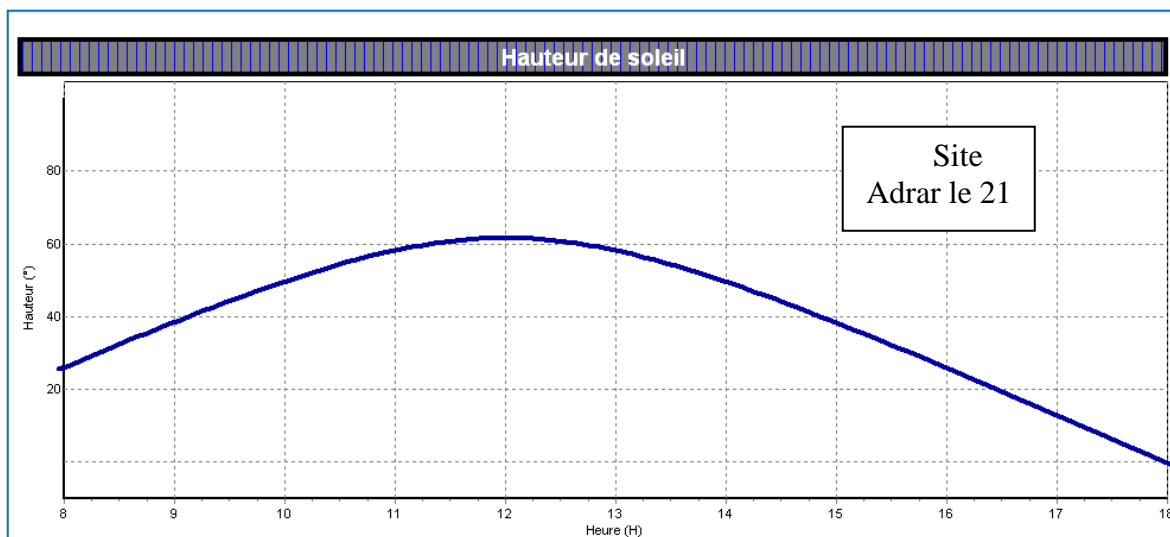


Fig. IV.1 : Graphe hauteur de soleil

#### IV.4.1.1 Résultats obtenus pour la journée du 21 Mars

Les données expérimentales relatives aux composantes du rayonnement solaire, à savoir : global, diffus et direct sur plan horizontal, et par ciel clair et pour une journée hivernale sur la ville d'Adrar sont présentées sur les figures en dessous sous forme de graphes, et en les comparants aux données issues des trois modèles étudiés.

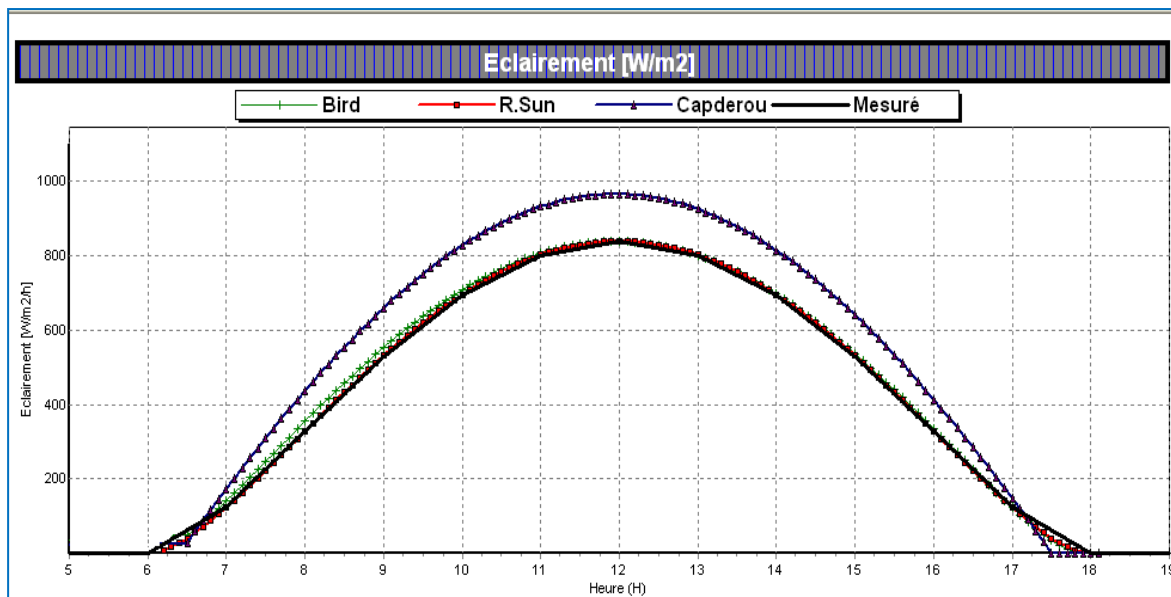


Fig. IV. 2: Eclairement Direct

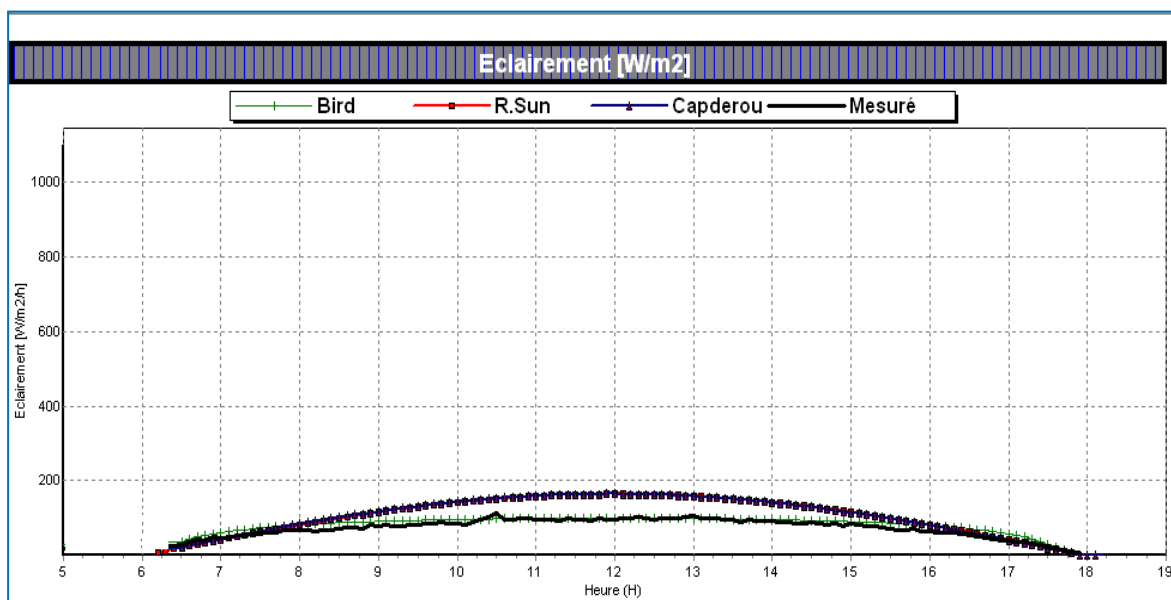
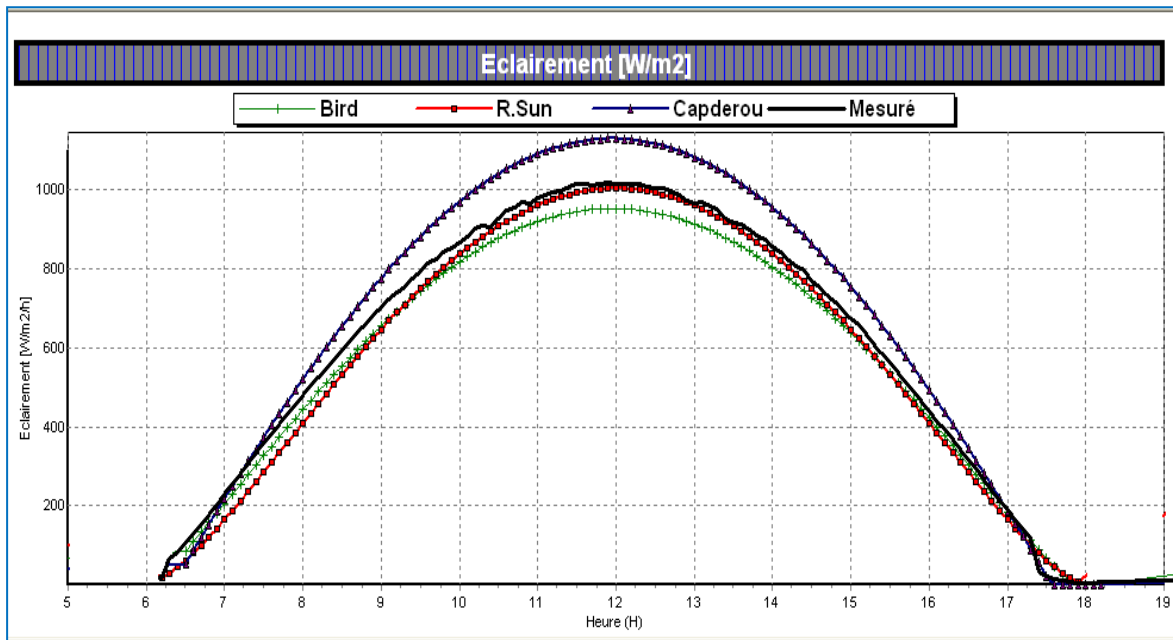
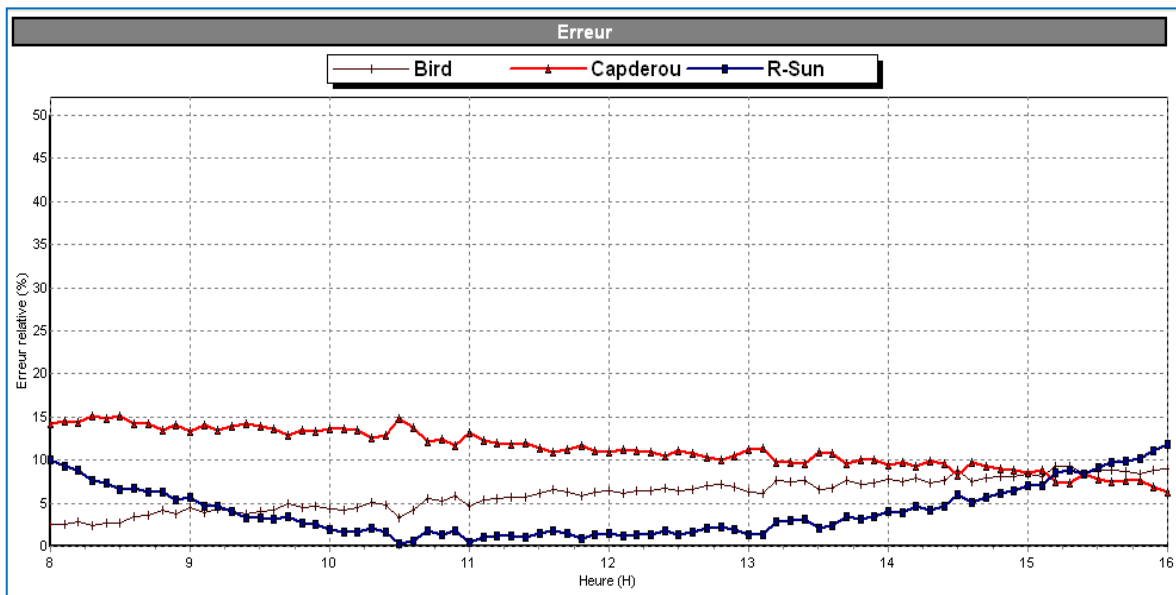


Fig. IV.3 : Eclairement Diffus



**Fig. IV.4 : Eclairement Global**



**Fig. IV.5 : Erreur relative instantanée correspondante**

#### IV.4.1.2 Résultats obtenus pour la journée du 19 Juin

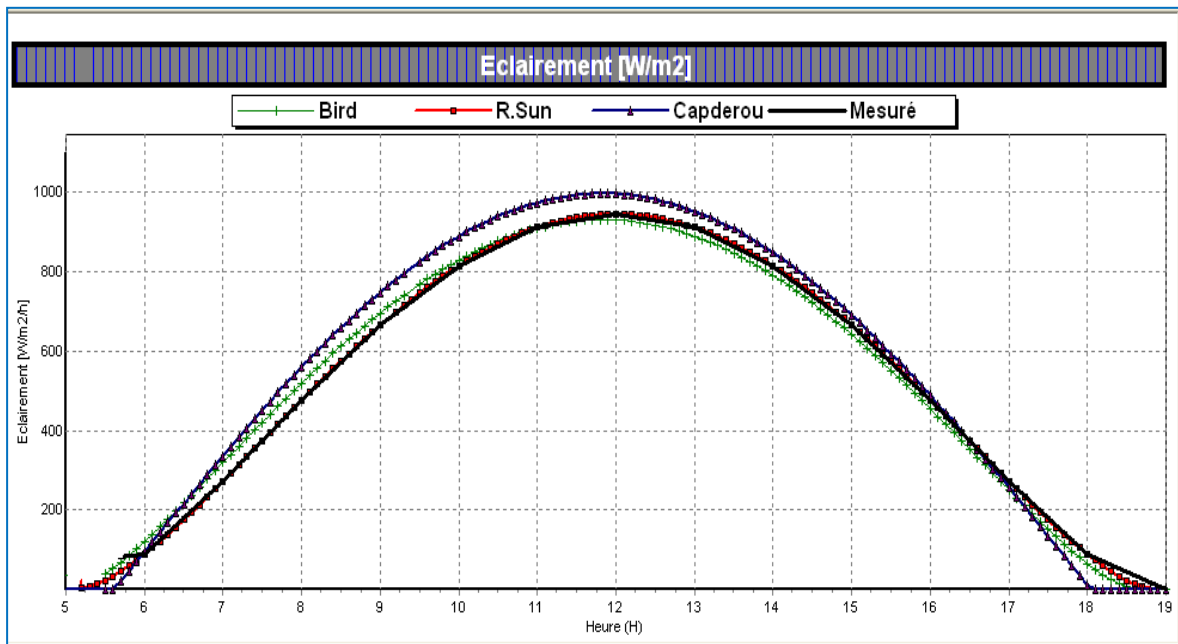


Fig. IV.6 : Eclairage direct

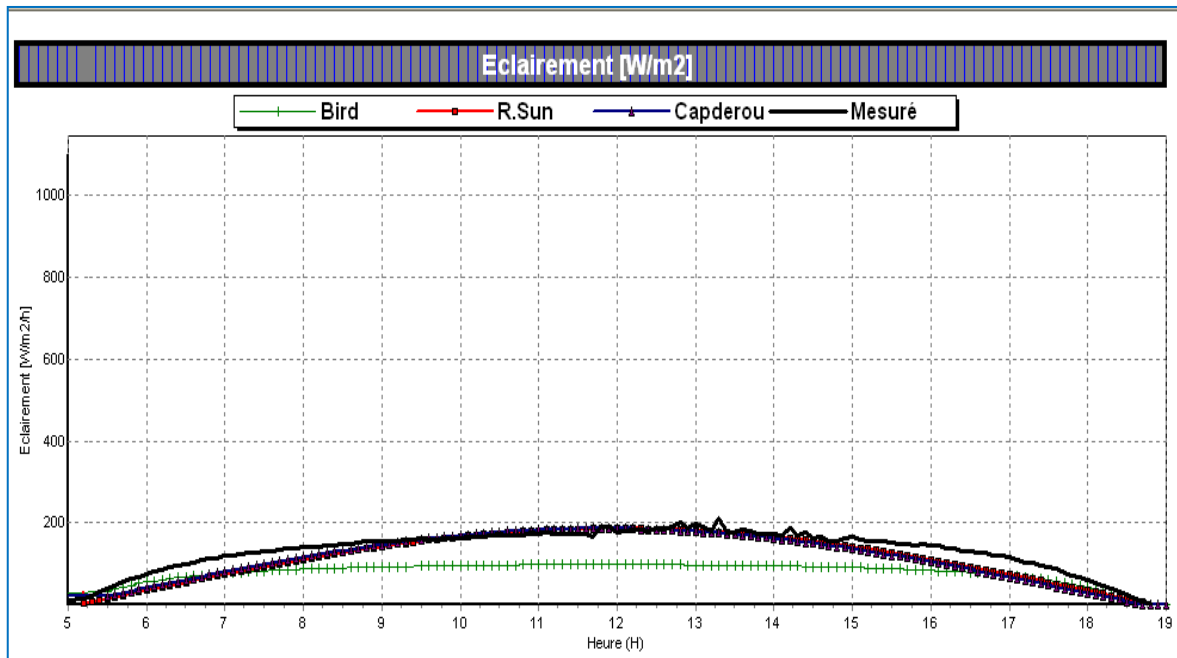


Fig. IV.7 : Eclairage diffus



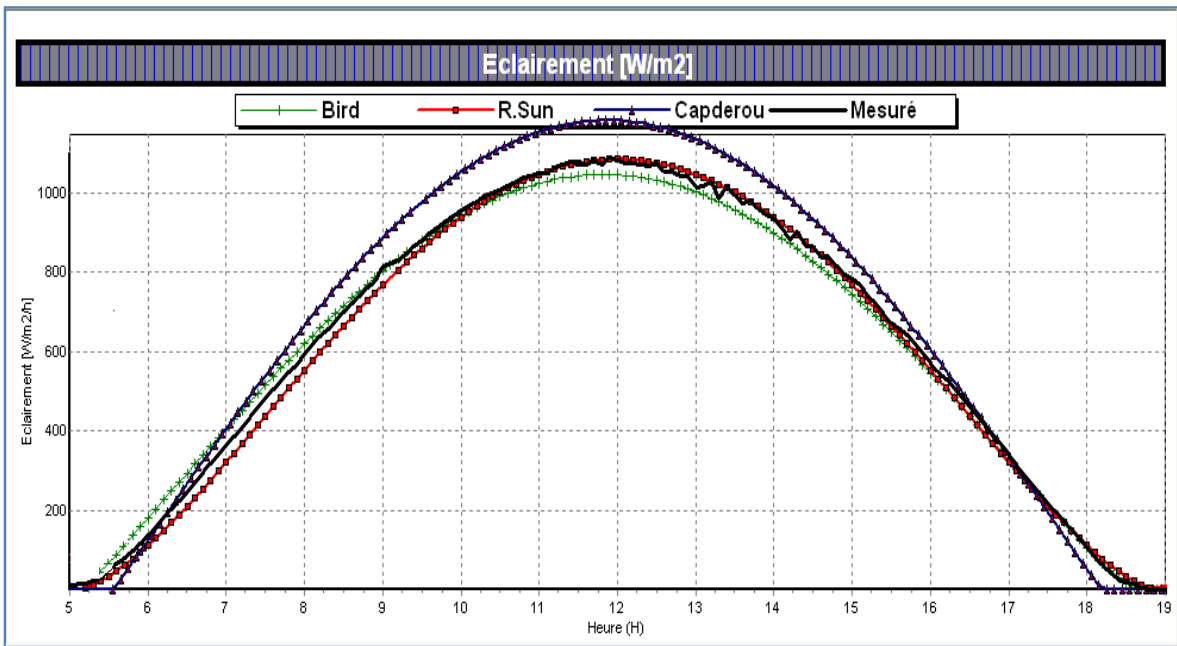


Fig. IV.8 : Eclairement global

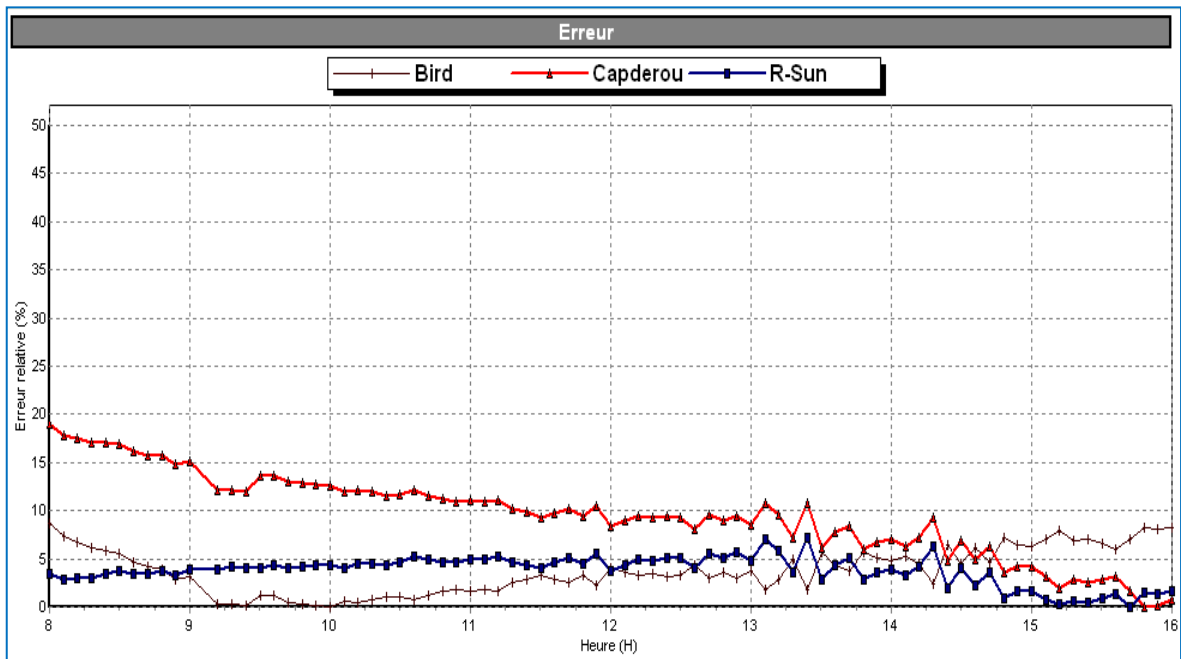


Fig. IV.9 : Erreur relative instantanée correspondante

### IV.4.1.3 Résultats obtenus pour la journée du 13 Juillet

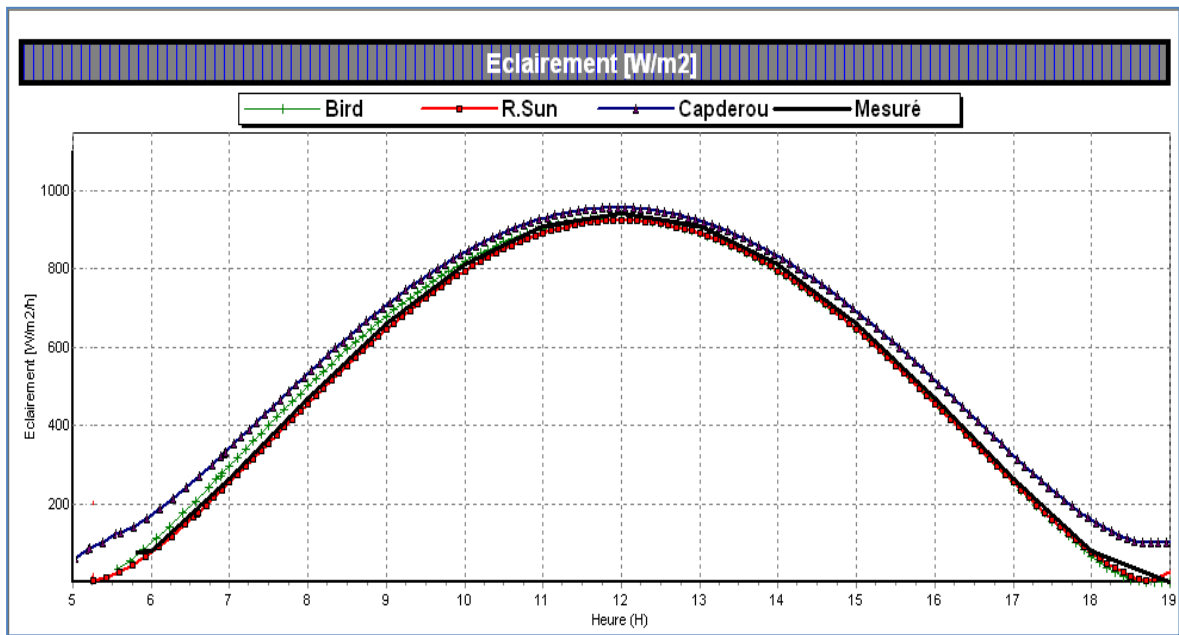


Fig. IV.10 : Eclairement direct

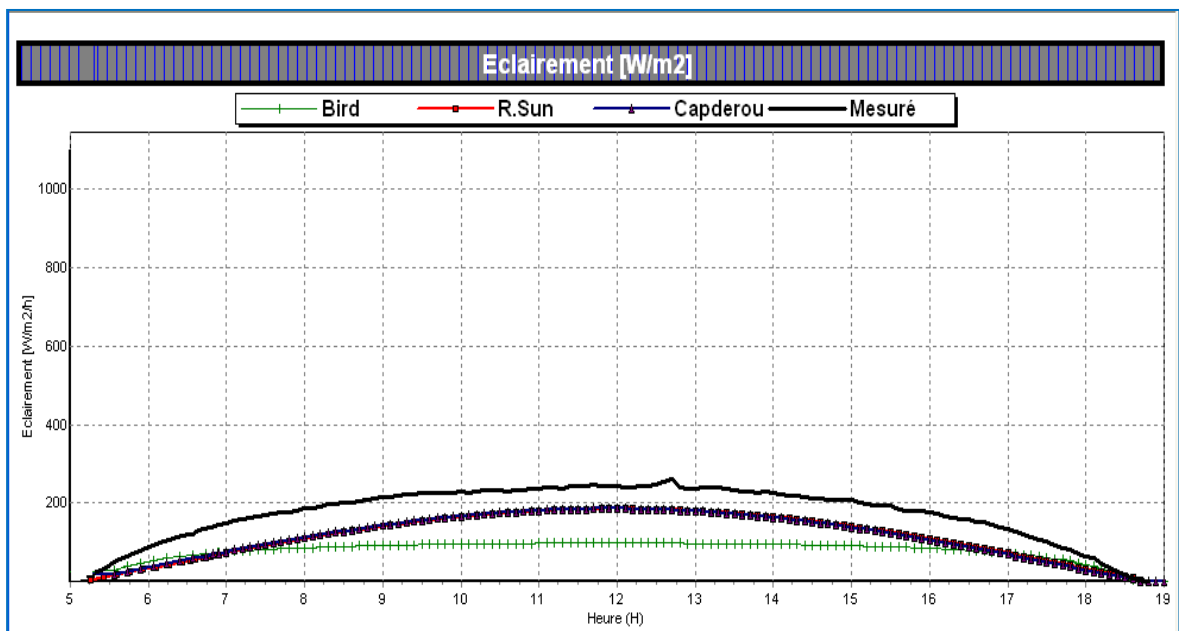
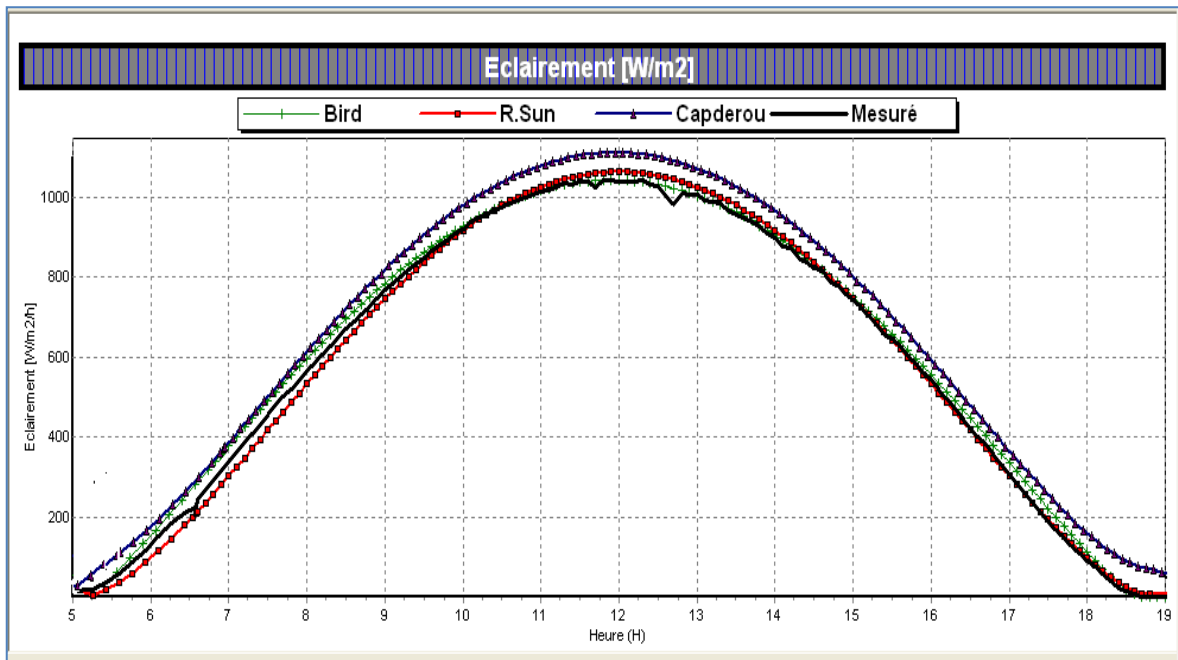
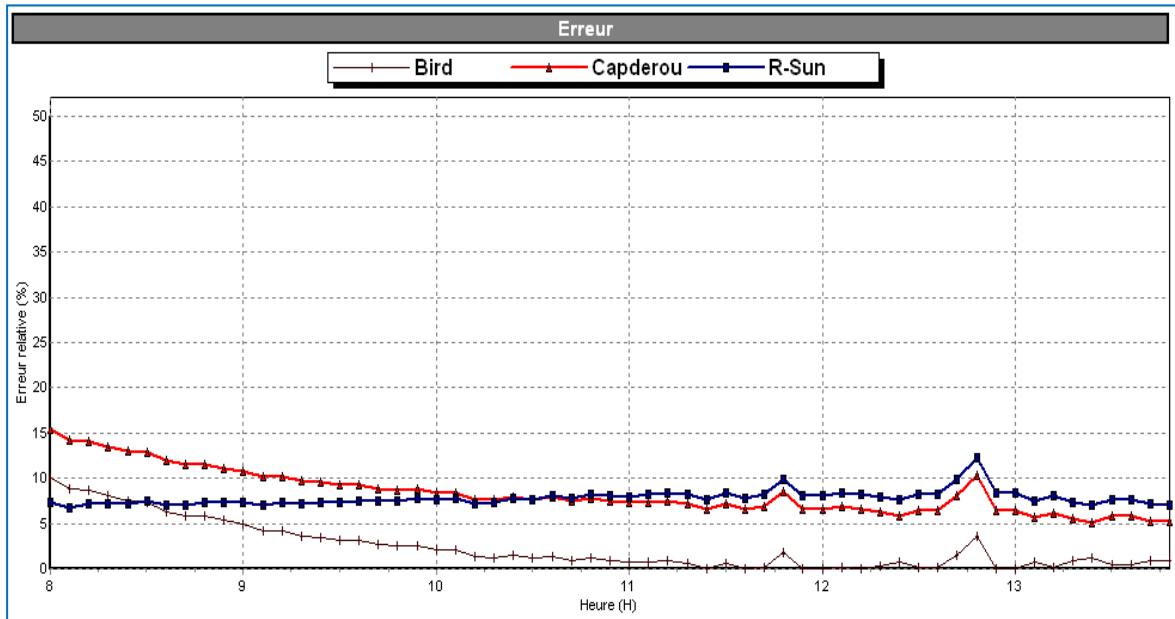


Fig. IV.11 : Eclairement diffus



**Fig. IV.12** : Eclairement global



**Fig. IV.13** : Erreur relative instantanée correspondante

#### IV.4.1.4 Résultats obtenus pour la journée du 16 Septembre

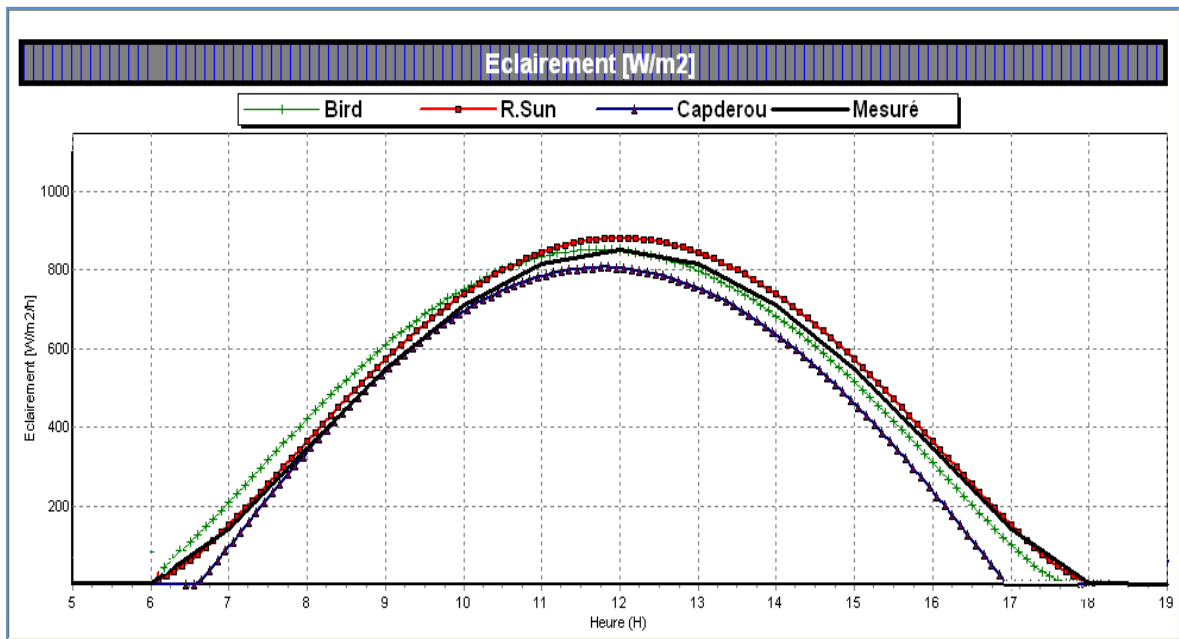


Fig. IV.14 : Eclairement direct

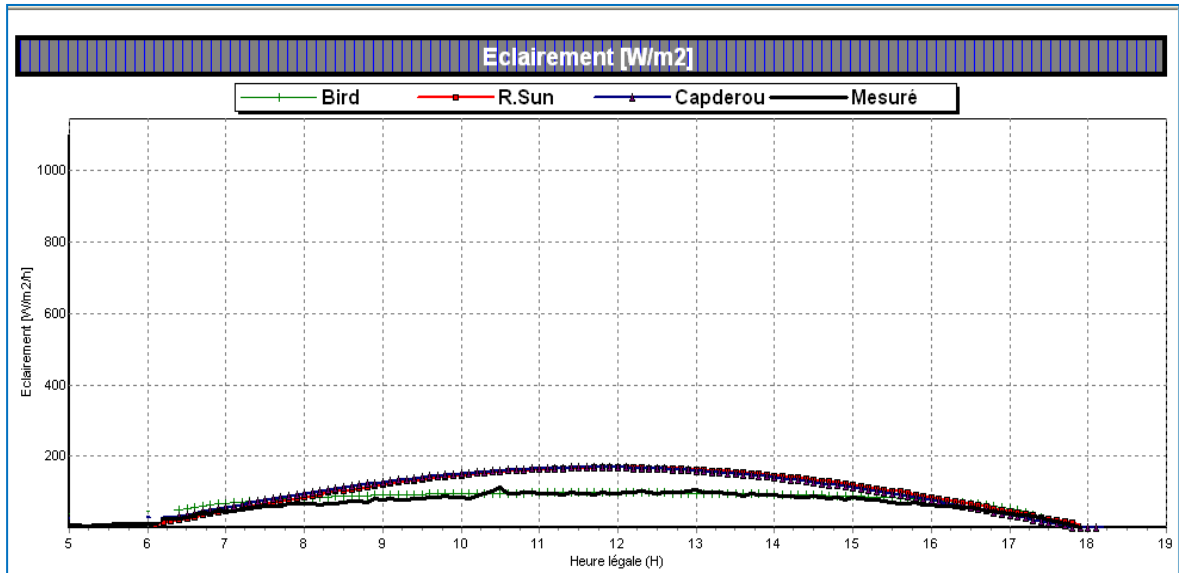
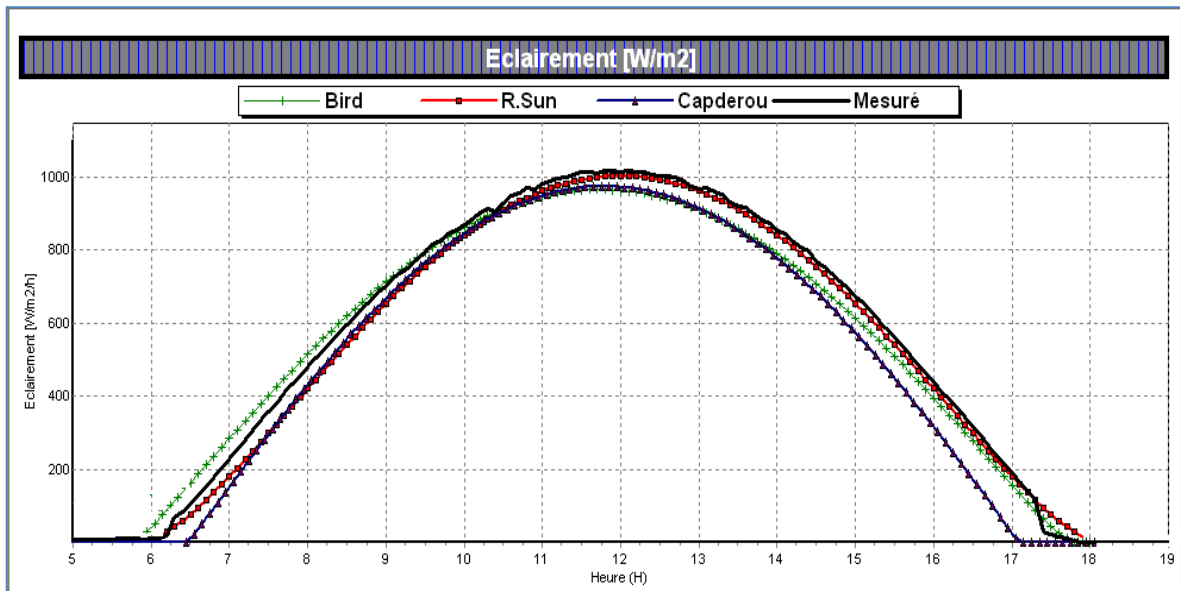
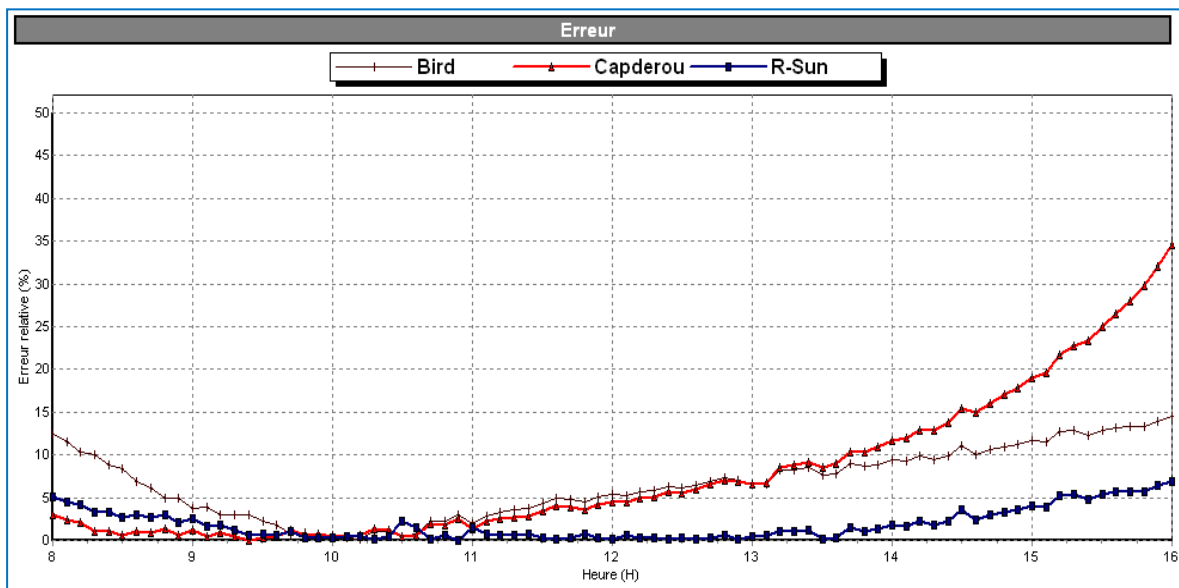


Fig. IV.15 : Eclairement diffus



**Fig. IV.16 :** Eclairement global



**Fig. IV.17 :** Erreur relative instantanée correspondante

#### IV.4.1.5 Résultats obtenus pour la journée du 21 Décembre :

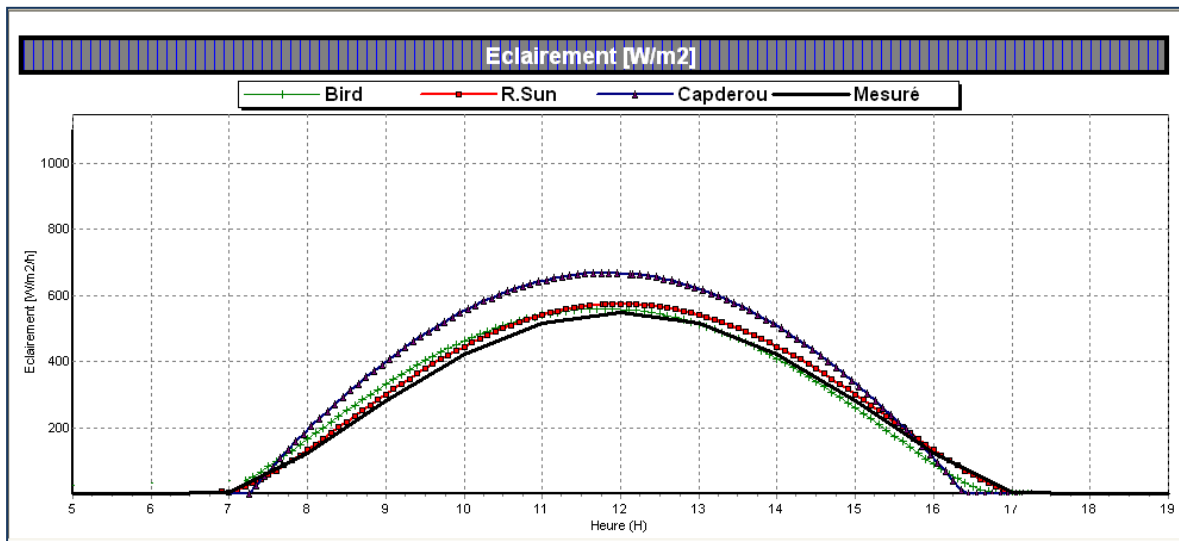


Fig. IV.18 : Eclairement direct

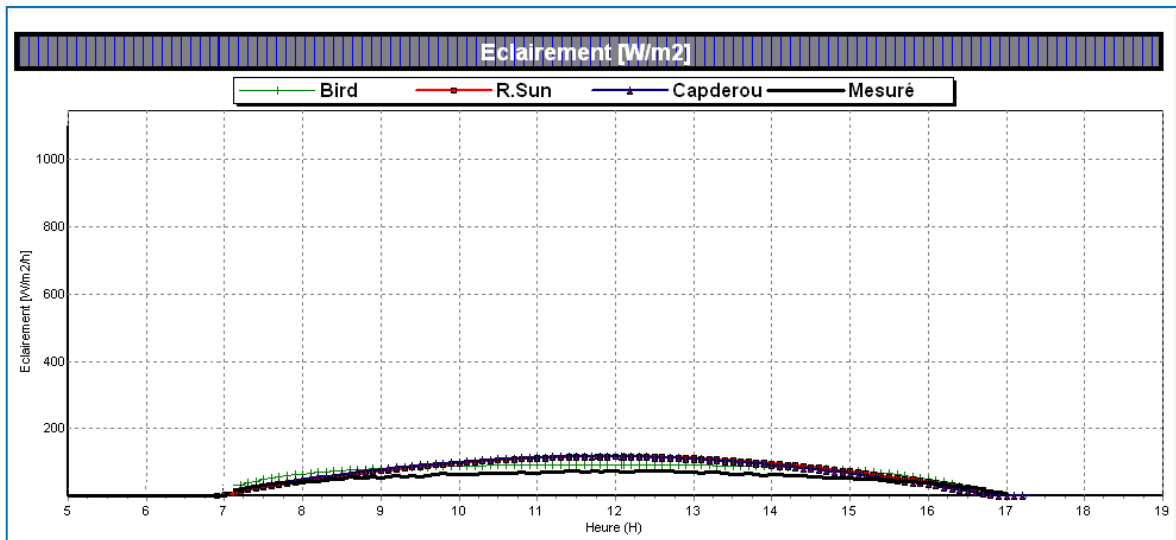


Fig. IV.19 : Eclairement diffus

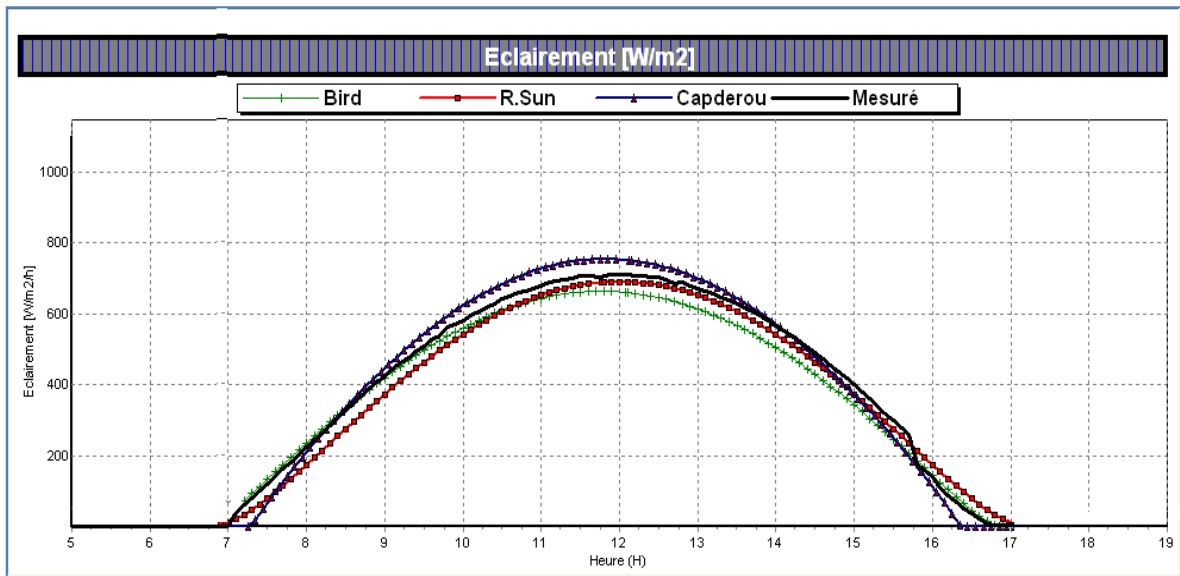


Fig. IV.20 : Eclairement global

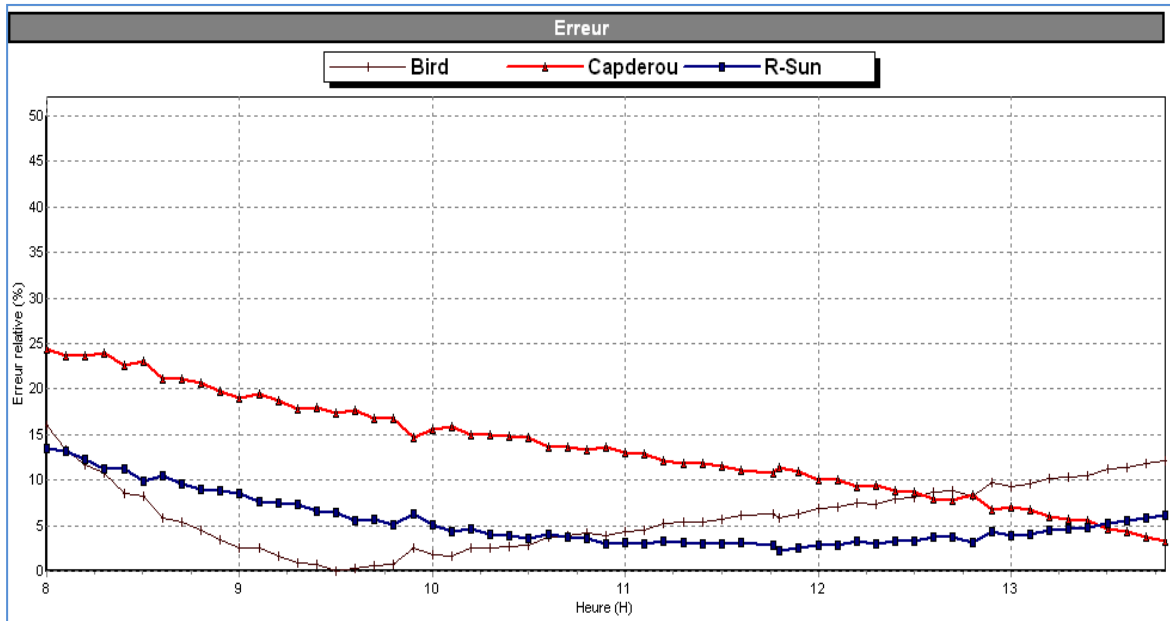


Fig. IV.21 : Erreur relative instantanée correspondante

#### IV.4.2 Etude comparative et analyse critique

Afin de réaliser une analyse critique des résultats obtenus, il a été effectué une comparaison des données expérimentales avec celles issues des trois modèles. Il a été donc également calculé l'erreur relative du rayonnement global sur le site d'Adrar.

Les résultats obtenus sont regroupés dans le Tableau IV-2 ci-après.

L'erreur relative moyenne journalière étant donnée par la relation suivante :

$$E_m (\%) = \sum_i \frac{E_i (\%)}{i} \quad (\text{IV-2})$$

**Tableau IV-2:** Résultats de calcul des erreurs relatives du rayonnement solaire horizontal pour quelques jours clairs, sur le site.

Jour	Erreur relative moyenne journalière (%)		
	Par Modèle		
	Bird H.	Capderou	R.Sun
21-03-2011	6.12	11.45	4.16
19-06-2011	3.84	9.63	3.82
13-07-2011	1.95	7.32	1.58
16-09-2011	6.81	7.94	1.90
21-12-2011	12.40	14.53	10.65



En analysant les résultats représentés dans les figures (V.2 jusqu'au V.21) on déduit ce qui suit:

- Le rayonnement solaire global augmente avec la croissance du temps jusqu'à atteindre une valeur maximal aux environs de 12:00h puis commence à diminuer jusqu'à atteindre zéro (coucher de soleil).
- Nous avons remarqué que le flux solaire varie autour de 1000 (W/m<sup>2</sup>), avec une augmentation aux mois de juin et août, une légère baisse durant les mois de septembre et mars et une baisse considérable au mois de décembre. Cette variation est due essentiellement à l'angle de déclinaison et au changement de température.
- Le modèle de R.Sun est généralement le plus favorable pour l'estimation de l'éclairement solaire sur un capteur horizontal, même s'il ne présente qu'un peu d'avantage par rapport à celui de Bird. Par contre, le modèle Capderou donne parfois des résultats qui divergent radicalement par rapport aux valeurs mesurées au niveau de site.
- Pour les modèles de R.Sun et de Bird & Hulstrom, on remarque que pour la plupart des situations, les valeurs de la composante globale estimée sont très proches des valeurs mesurées. L'erreur relative moyenne est très faible et parfois même négligeable. Un exemple typique apparaît le 19 juin et 13 juillet où les deux courbes simulées par les deux modèles sont en très bonne concordance avec la courbes des valeurs mesurées, si bien que l'erreur relative est très faible (l'erreur ne dépasse pas 4% et 2% pour les deux jours respectivement).
- Nous avons constaté aussi que le modèle R.Sun est le plus avantageux pendant toutes les saisons de l'année (l'erreur ne dépasse pas 4.5 %) uniquement pour la saison d'hiver (erreur= 10.65%) .
- Le modèle r.sun est incontournable pour l'estimation du rayonnement solaire horizontale (Tableau IV-2), ce qui est intéressant pour effectuer le dimensionnement des systèmes thermiques (chauffe-eau) et des installations photovoltaïques, plus particulièrement en Algérie. Car il est utilisé le plus souvent le rayonnement solaire horizontal dans le dimensionnement des systèmes solaires.
- Mais d'une manière générale, on peut dire que le modèle Capderou donne une estimation assez bonne du rayonnement solaire global pour les mois d'hiver (erreur >10%) par rapport aux mois d'été où le facteur de Linke a augmenté remarquablement ces dernières années, principalement à cause des changements climatiques

## Conclusion

Dans ce chapitre, une modélisation du rayonnement solaire par les modèles Capderou, R.sun et Bird & Hulstrom est présentée et réalisée. Chacun des modèles a utilisé des équations propres pour calculé les paramètres atmosphériques (masse, épaisseur optique de l'atmosphère et facteur de trouble), et pour calculé l'éclairement directe, diffus et globale.

Les transmittances nécessaires pour le calcul des composantes du rayonnement solaire par ciel clair, incident sur un plan horizontal ont été programmées avec Delphi7.

Ce travail nous a permis de confronter des valeurs mesurées et celles estimées par les trois modèles paramétrés. Nous avons constaté que les modèles R.sun et Bird & Hulstrom donne une bonne estimation du rayonnement solaire. Les résultats obtenus pour le site se rapprochent avec une grande précision des données réelles.

Par ailleurs, l'utilisation du modèle Capderou peut conduire à des valeurs qui divergent, ce qui influe considérablement sur le dimensionnement des systèmes énergétiques solaires.

Pour ce site, ce modèle s'avère donner des valeurs estimées inférieures ou supérieures à celles mesurées.

## *Chapitre V*

*Intégration avec SIG pour Adrar*

## **Introduction**

Ce chapitre est consacré à l'intégration de l'application avec le SIG que nous avons développé, la méthodologie nécessite la construction d'une base de données contenant les informations géographiques liées à la région d'Adrar.

Ces informations seront intégrées dans le SIG afin de faire une modélisation des flux solaire pour les sites de la wilaya d'Adrar par les modèles empiriques et simuler le potentiel sur la région en fonction du temps, ensuite en va stocker les informations (flux mensuelle, annuelle, direct, diffus et global). Pour cela, nous allons aborder progressivement la connaissance des potentiels énergétiques renouvelables sur le site de l'étude, le développement d'une base de données pour gisements solaire.

### **V.1 Objectif**

L'objectif consiste à élaborer un SIG de gisement solaire de la wilaya. En s'exprimant en langage naturel, il faut que l'utilisateur puisse déterminer rapidement et de manière adéquate les références aux objets unique qui fournissent les coordonnées requises afin de positionner les lieux sur une carte de SIG. Le but ultime du système consiste à accroître la qualité des localisations en termes de précision et d'exactitude.

## V.2 Bibliographie des logiciels de gisement solaire:

Il y a beaucoup logiciels de gisement et dimensionnement solaire permet eux en à [1] :

**Tableau V.1 : Quelques logiciels de gisement solaire**

<b>Logiciel</b>	<b>Description</b>
<b>METEONORM 5.0 (CH)</b>	Logiciel (de Meteotest) de données climatiques et irradiation solaire, calcule suivant l'orientation et l'inclinaison. Logiciel téléchargeable fonctionnant en mode démonstration durant 10 jours.
<b>SoDa (F)</b>	Service web (de l'Ecole des Mines de Paris) pour les professionnels en énergie solaire. Base de données climatiques et irradiation solaire sur la planète avec différentes applications.
<b>CalSol (INES)</b>	Ce logiciel conçu par l'INES, accessible gratuitement sur Internet, permet d'apprécier le potentiel en énergie solaire pour une quinzaine de villes en France suivant l'inclinaison et l'orientation et d'effectuer une pré étude énergétique, économique et environnementale pour une installation PV connectée au réseau électrique (à venir : PV en site isolé, eau chaude sanitaire solaire, chauffage solaire et solaire passif).
<b>PVSOL (GE)</b>	Logiciel de la société Valentin, programme de simulation d'installations photovoltaïques.  Possibilité de télécharger une version de démonstration ainsi que le manuel d'utilisation
<b>RETScreen (CAN)</b>	Logiciels téléchargeables gratuits sur les données solaires, simulation de systèmes photovoltaïques, thermiques, passifs et sur l'émission GES
<b>PVGIS</b>	L'application en ligne gratuite PVGIS est un excellent outil de simulation qui permet de calculer gratuitement la production de systèmes photovoltaïques connectés au réseau en Europe et en Afrique (et également pour site isolés en Afrique seulement).  A l'aide de son interface Google Maps intégré, il est très facile d'obtenir les données de production d'un système PV à partir des données d'ensoleillement précises du site (intégrant notamment les masques lointains liés au relief, collines, montagnes).

### **V.3 Description du logiciel GISOL (Système d'Information Géographique SOLaire) :**

Le logiciel qui a été réalisé a pour but de donner pour un site choisi sur la carte les différents paramètres astronomiques parmi ces en cite numéro du jour, déclinaison, l'équation du temps ET, lever et coucher de soleil...etc, calcule le flux solaire direct, diffus et global par jour, mois, année par différent modèle Bird, R.Sun et Capderou.

Le SIG développé permet d'effectuer certaines fonctionnalités courantes telles que la sélection des données désirées, la création des cartes thématiques et en plus la fonctionnalité standard assurée par n'importe quelle SIG tel que Zoom Avant- Arrière, le contrôle de la carte (déplacement), menu contextuelle, l'affichage par couche, mise à jour des données sites, impression rapport, graphe de statistique et autres.

Puisque on a utilisé le MapInfo version 10 pour le traitement des cartes, on a également choisi pour l'affichage de nos cartes dans notre application et ceci grâce à une connexion entre lui et le Delphi version 7, en effet notre logiciel en Delphi7 repose sur des appels aux procédures et des fonctions proposées en MapBasic (annexe).

Ce logiciel appelé **GISOL** possède une interface simple d'utilisation, il est composé de plusieurs fenêtres chacune traite une partie bien définie. On trouve ces fenêtres comme suit :

### V.3.1 Ouvrir un fichier carte :

Il suffit de cliquer sur le bouton 'ouvrir' voir figure

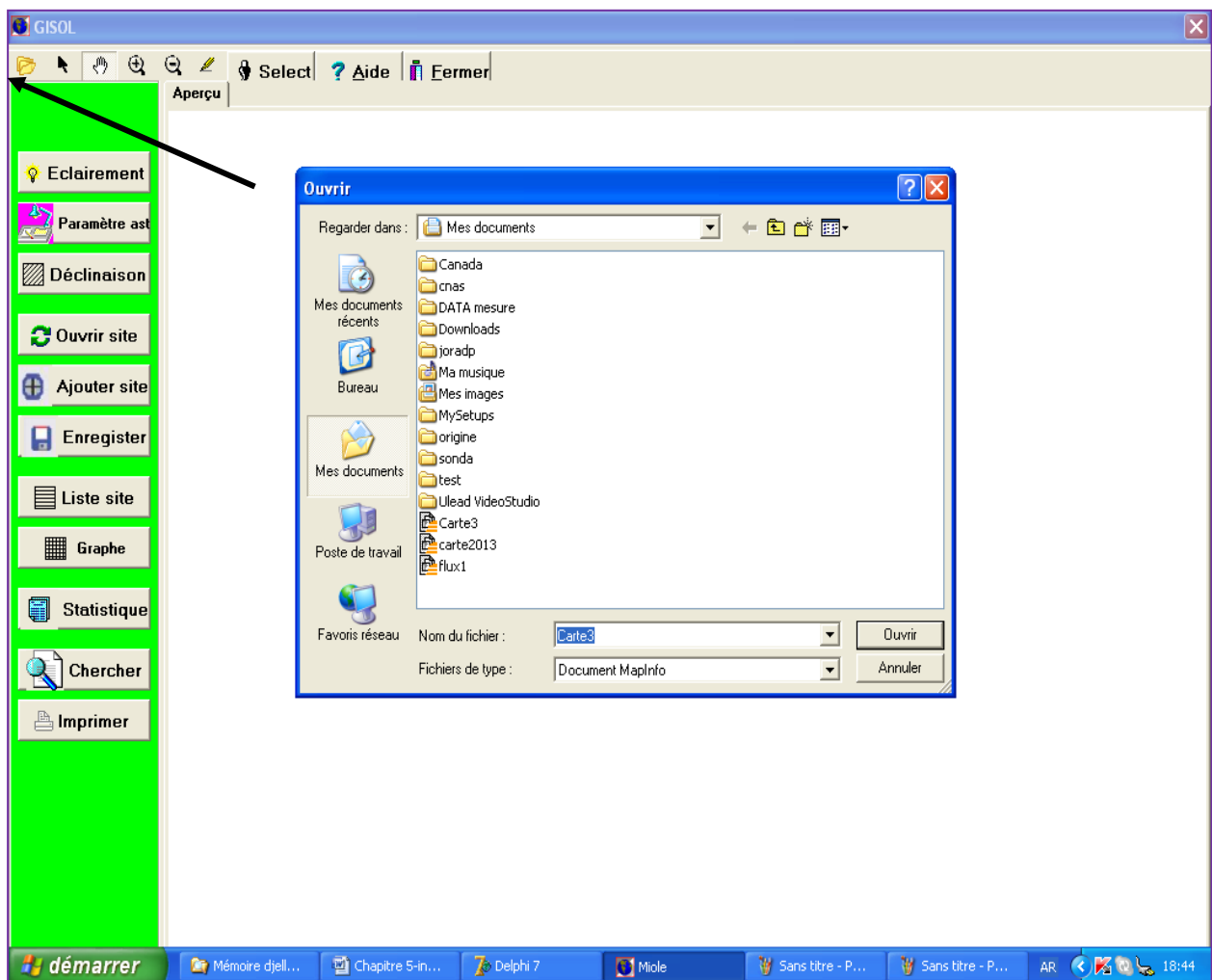


Fig. V.1: Boite de dialogue pour ouvrir un fichier carte

### V.3.2 L'interface générale du logiciel GISOL

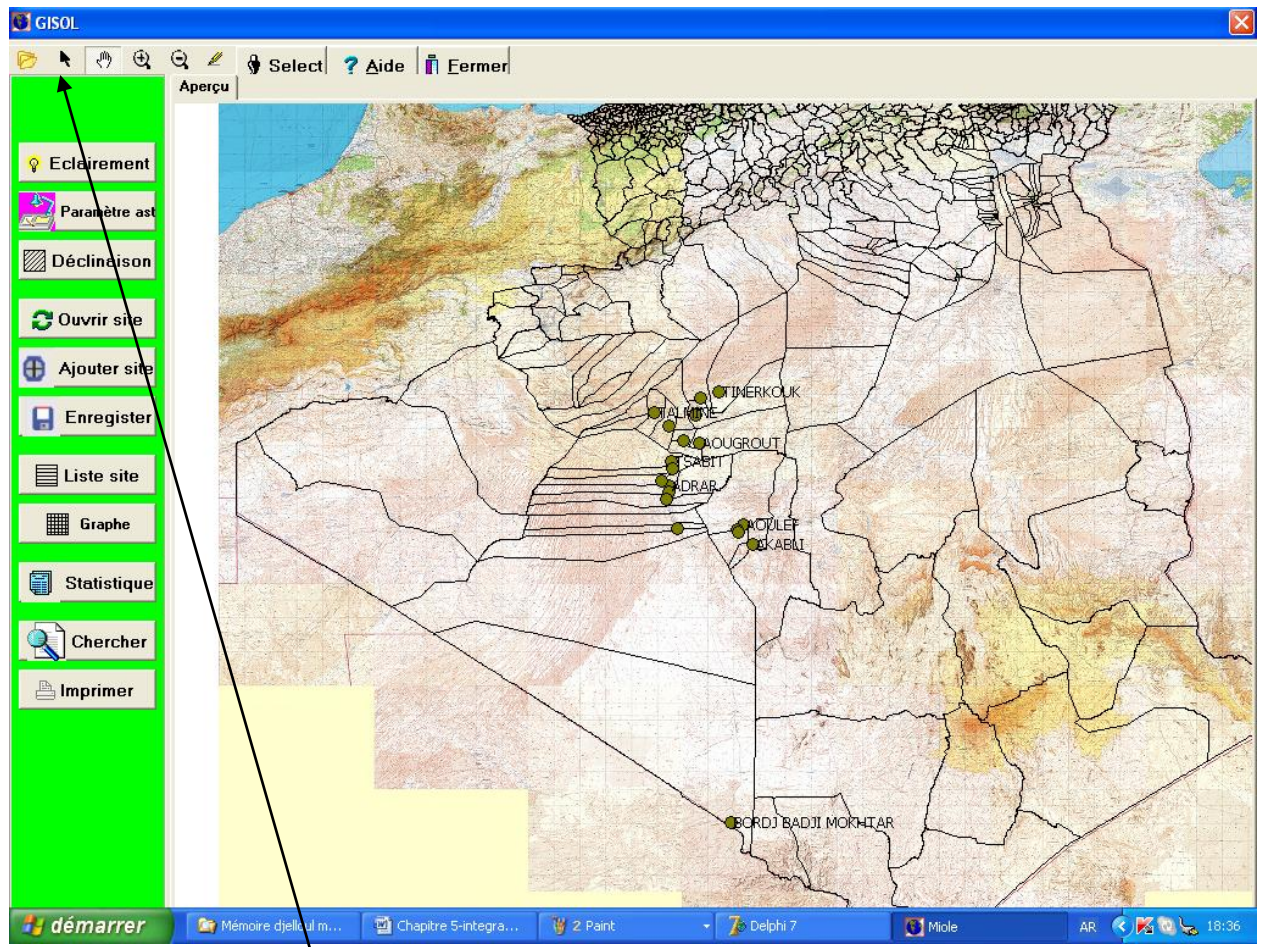
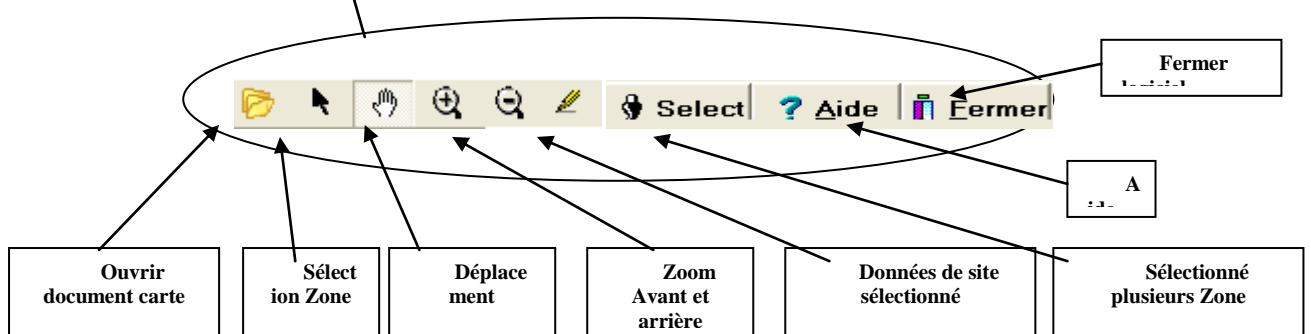


Fig. V-2: L'interface du logiciel GISOL





### V.3.3 Base de données des sites de la wilaya d'Adrar :

GISOL a une base de données qui contient vingt (20) sites (chefs lieux de commune) sur la wilaya d'Adrar, afficher les données pour chaque site (numéro de site, latitude, longitude, l'altitude...etc), on peut ajouter d'autres sites par « Ajouter site ».

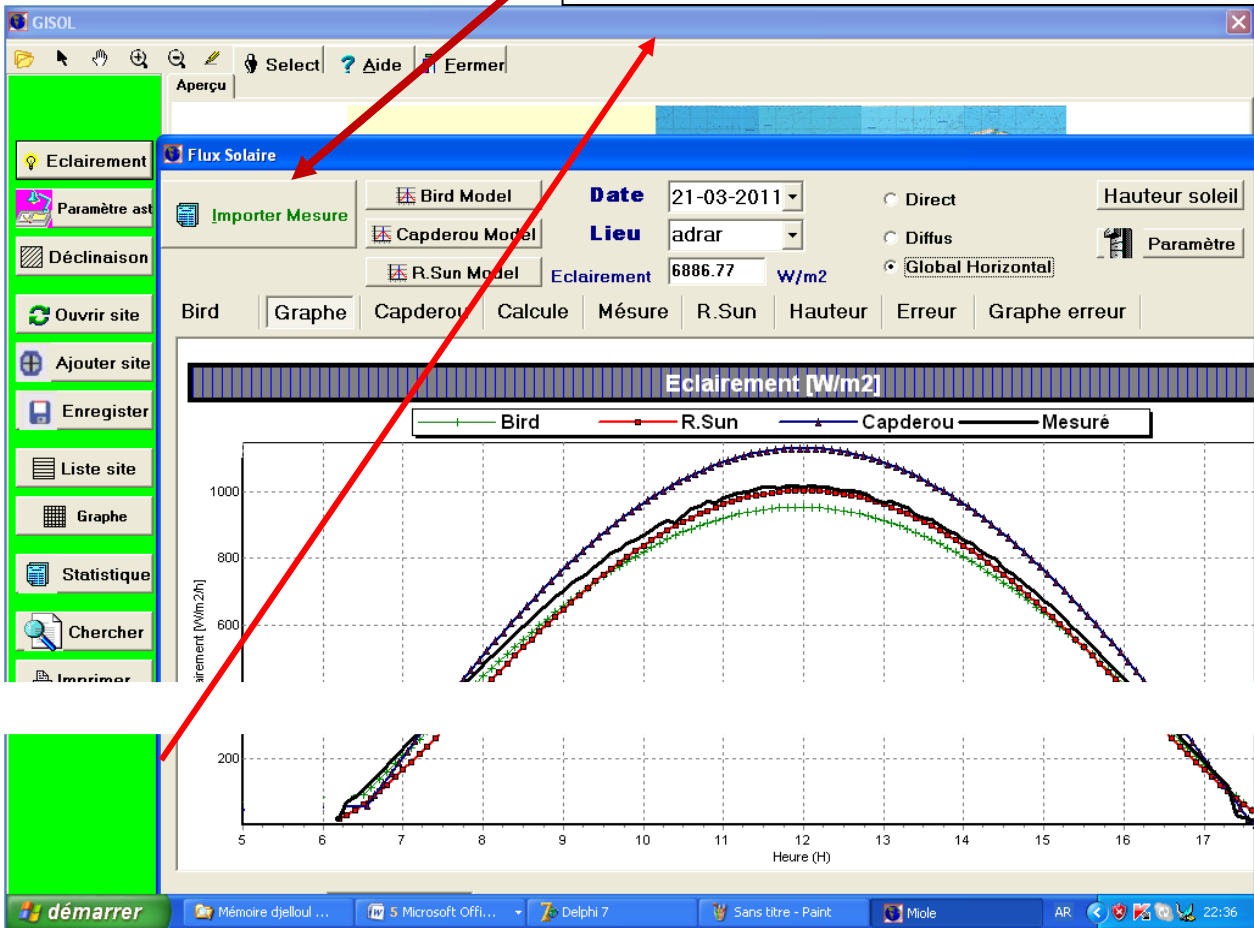
N	Localité	Site	Nom wil	Latitude	Longitude	Altitude	Albedo
01	tsabit	tsabit	adrar	28 21 11	00 12 56	276	0.2
02	adrar	adrar	adrar	27 52 50	00 10 48	279	0.2
03	timimoun	timimoun	adrar	29 14 41	00 15 58	275	0.2
04	aoulef	aoulef	adrar	27 06 53	01 12 12	263	0.3
05	BBM	BBM	adrar	21 19 23	00 57 35	275	0.3
06	Bouda	Bouda	adrar	27 57 31	00 24 18	279	0.2
07	tinikouk	tinikouk	adrar	29 42 21	00 43 47	367	0.2
08	fenoughil	fenoughil	adrar	27 37 24	00 18 04	275	0.2
09	ksar kadou	ksar kadour	adrar	29 34 58	00 22 29	278	0.2
10	charouine	charouine	adrar	29 02 13	00 14 59	278	0.2
11	talmine	talmine	adrar	29 18 15	00 31 56	275	0.2
12	deldoul	deldoul	adrar	28 45 27	00 02 20	279	0.2
13	aougrouit	aougrouit	adrar	28 42 30	00 20 27	276	0.2
13	tamentit	tamentit	adrar	27 45 25	00 15 42	278	0.2
14	sbaa	sbaa	adrar	28 12 45	00 10 21	278	0.2
15	inzaghmir	inzaghmir	adrar	27 02 16	00 04 39	279	0.2
16	akabli	akabli	adrar	26 43 37	01 22 32	278	0.2
17	timokten	timokten	adrar	27 00 57	01 04 35	263	0.3

Fig. V.3: Liste des sites de la wilaya d'Adrar

### V.3.4 Modélisation de flux solaire

On peut faire une modélisation de l'éclairement direct, diffus et global horizontal sur n'importe quelle site, pour n'importe quelle date de l'année par les trois (03) modèle étudié Bird, Capderou et R.Sun ses données de l'éclairement mensuel et annuel calculer seront intégrés sur les sites de carte géographique.

Pour importer les données expérimentation du fichier



**Lieu** adrar

- adrar
- timimoun
- aoulef
- BBM
- Bouda
- tinrkouk
- fenoughil
- ksar kadour

**Date** 21-03-2011

مارس، 2011						
السبت	الأحد	الاثنين	الثلاثاء	الأربعاء	الخميس	الجمعة
26	27	28	1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	31	1
2	3	4	5	6	7	8
اليوم: 2014-05-27						

Fig. V.4: Modélisation de l'éclairement du site Adrar

Il permet à l'utilisateur d'introduire la date, le mois, lieu de site et le choix de composant de rayonnement solaire qui correspond, le graphe à souhaité d'affiche. Le programme calcul le numéro de jour afin de déterminer la position de la terre par rapport au soleil, la déclinaison, l'équation du temps et l'éclairement.

### V.3.5 Consultation et modification information du site

Pour voir les informations et caractéristique (cordonné site, flux mensuel et annuel, ...etc) du site il suffit de cliquer sur le bouton 'information', puis on clique sur le point du site, une boîte de dialogue contient les informations du site sélectionné, on peut aussi modifier une caractéristique ou plus et on sauvegarde voir figure :

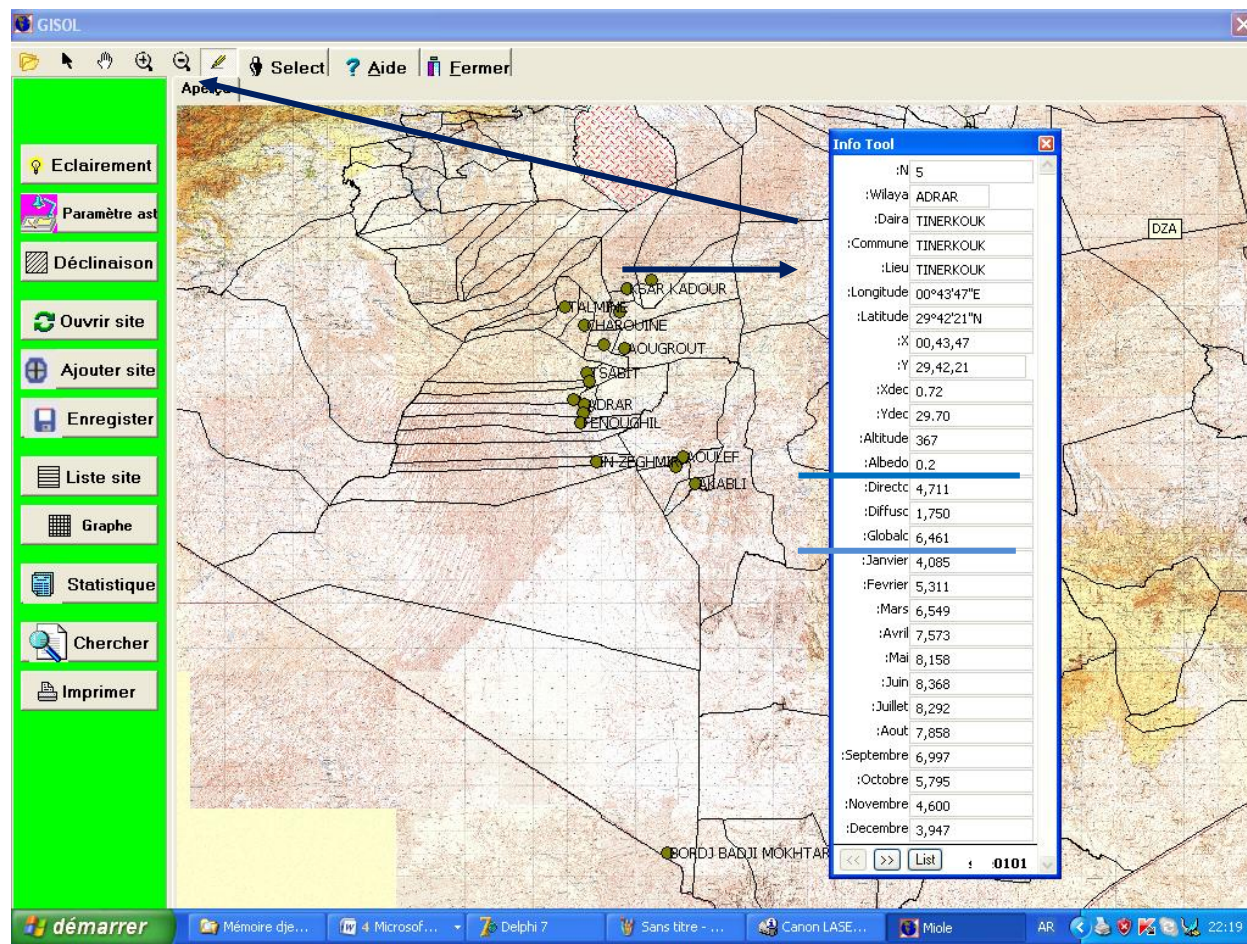


Fig. V.5: Informations du site Tinerkouk

### V.3.6 Calcul des paramètres astronomique du site

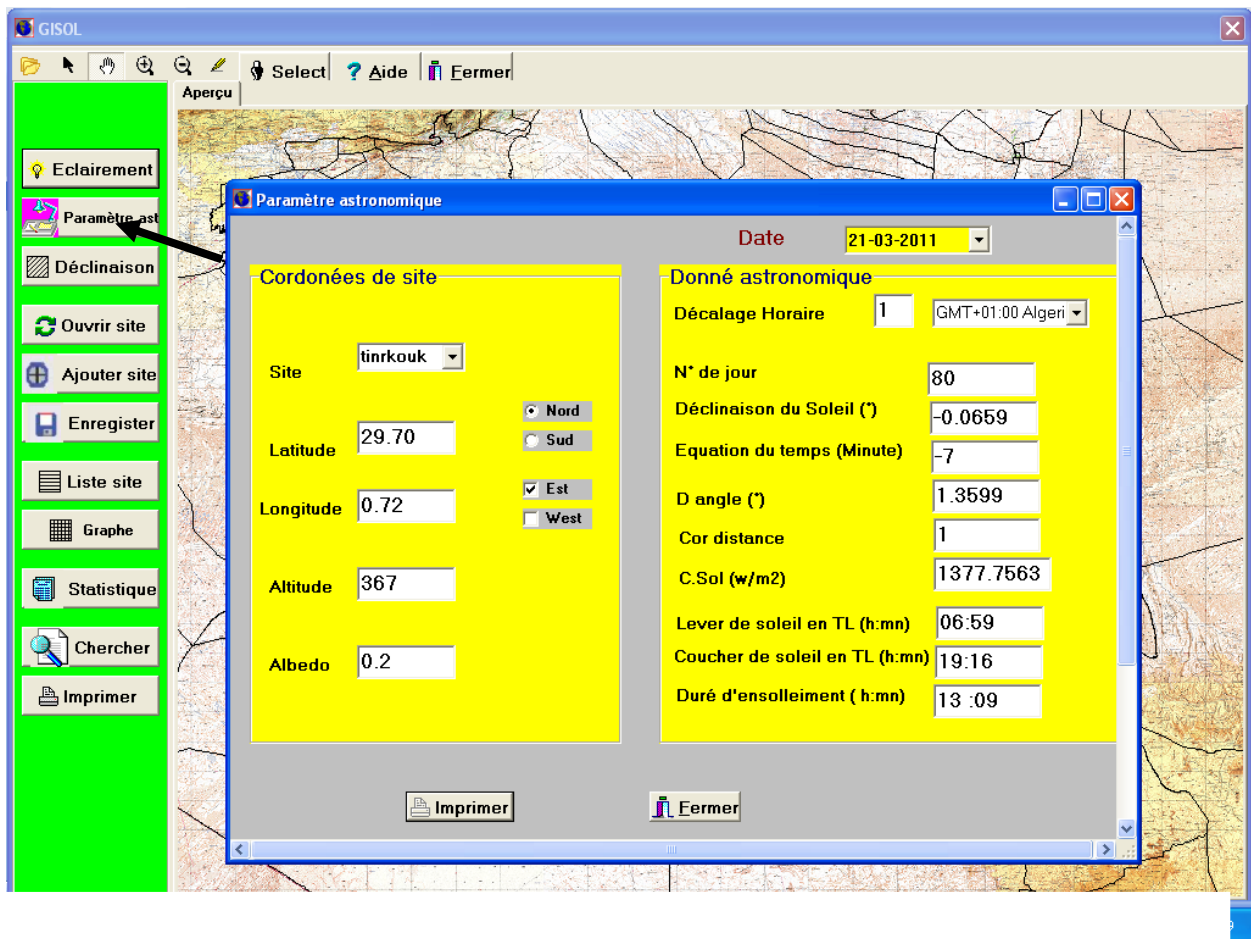


Fig.V.6 : Paramètre astronomique du site (exemple : site Tinerkouk)

### V.3.7 Impression du rapport paramètres astronomique et données du site

Le rapport (Fig. V.7) est une feuille de format A4, qui représente les paramètres d'entrées et les résultats du calcul obtenus, ainsi que les graphes de variation mensuel de l'éclairement solaire

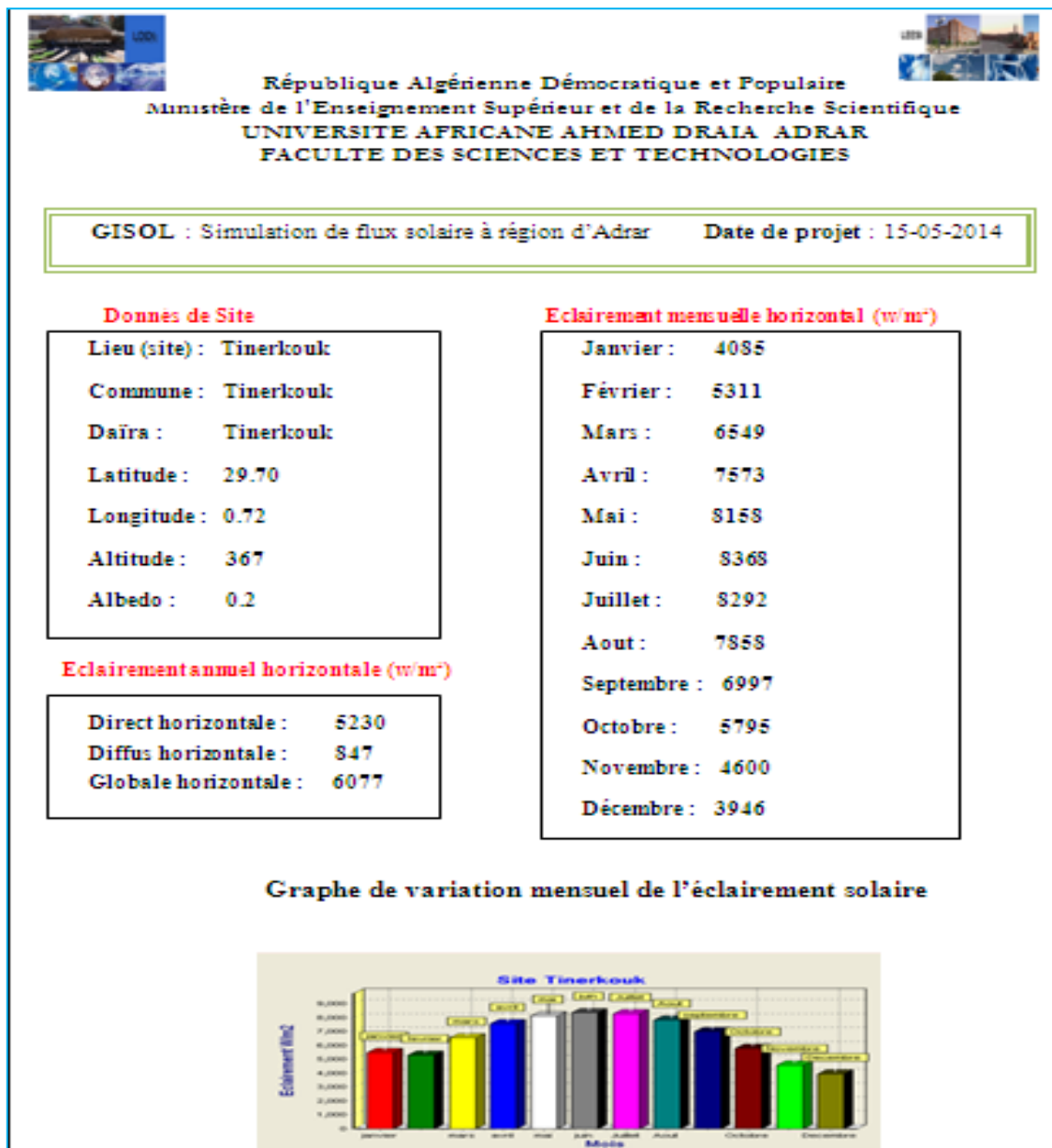


Fig.V.7 : Impression du rapport global du logiciel 'GISOL'(exemple : site Tinerkouk)

### V.3.8 Déclinaison annuel

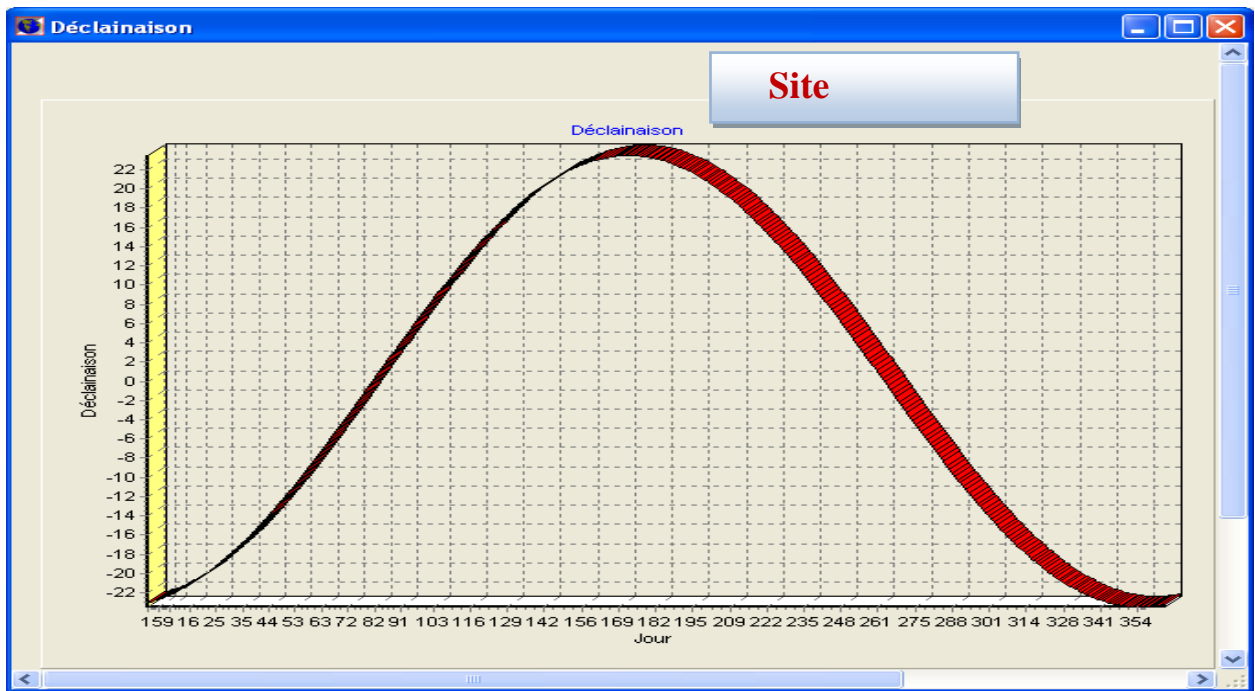


Fig.V.8 : Déclinaison annuel (exemple : Site Tinerkook)

### V.3.9 Graphe de variation mensuel de l'éclairement solaire

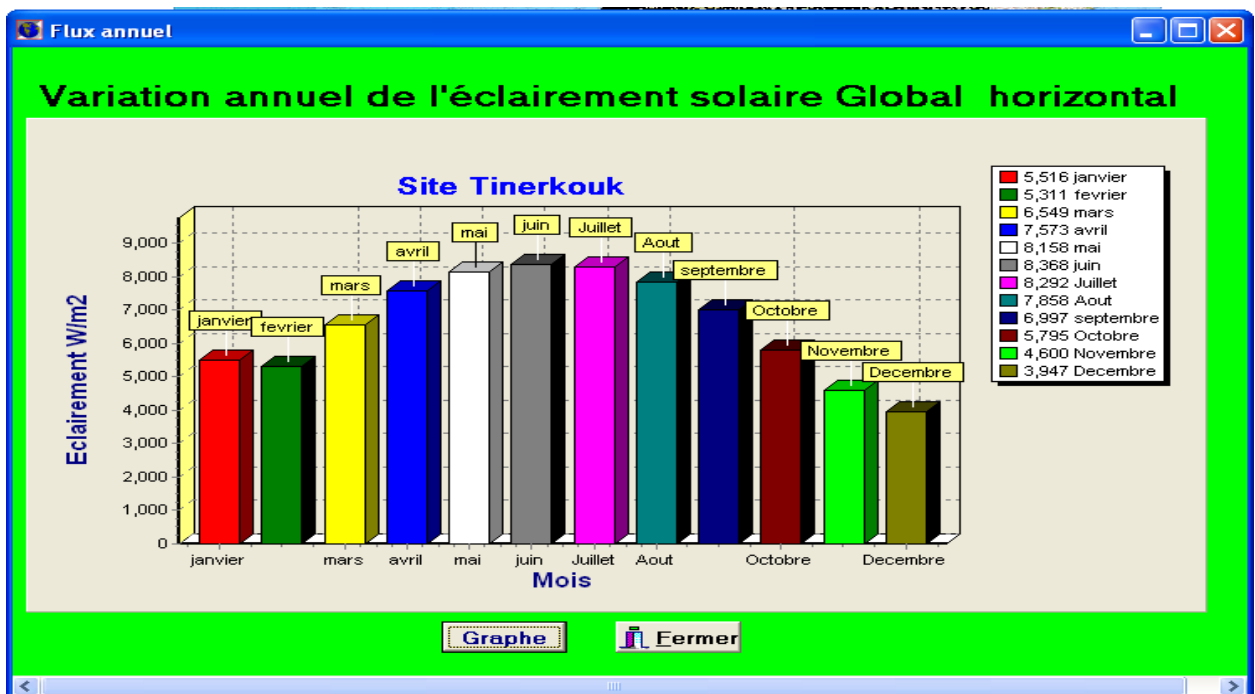
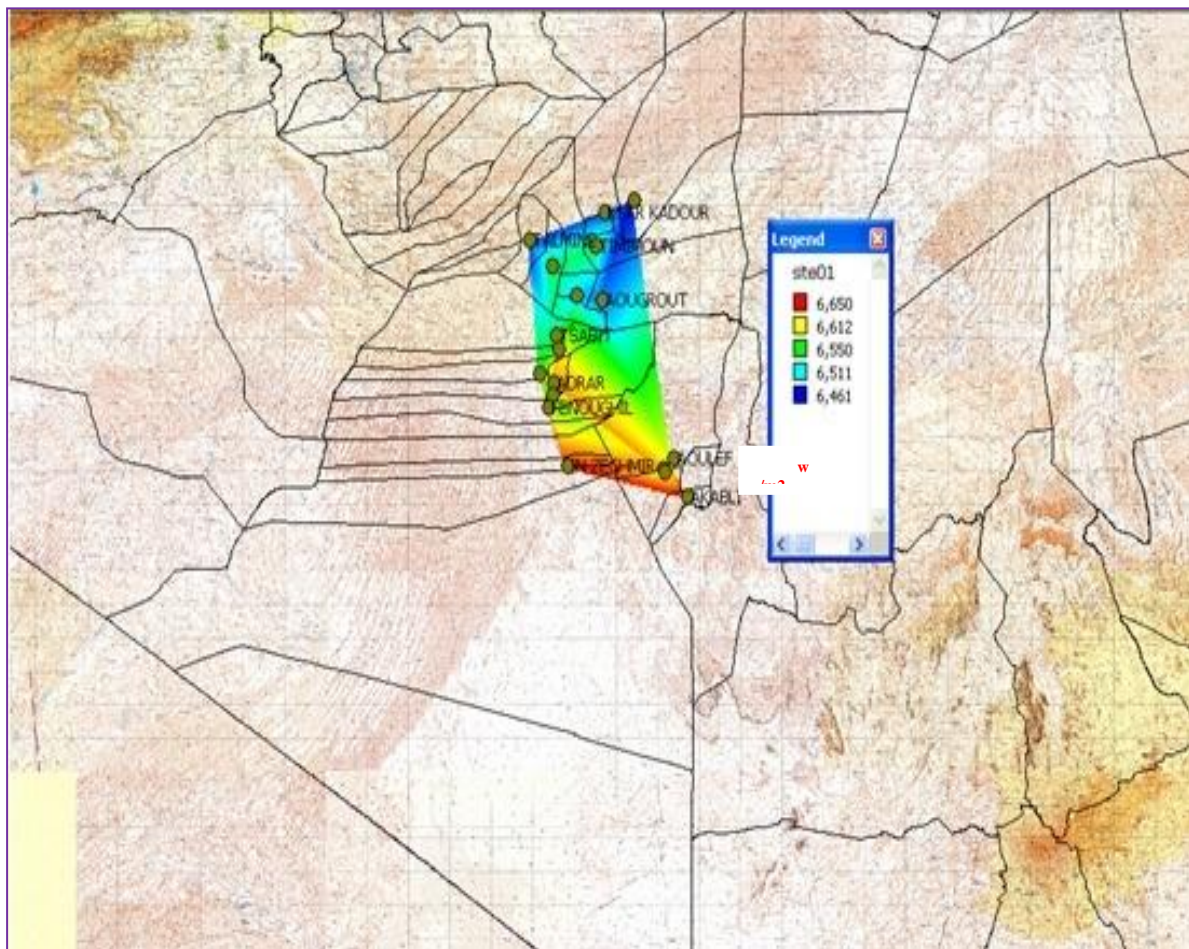


Fig.V. 9: Graphe de variation mensuel de l'éclairement solaire (exemple : Site Tinerkook)

### V.3.10 Carte thématique d'éclairement solaire de la région d'Adrar



**Fig.V.10:** Carte thématique d'éclairement solaire de la région d'Adrar

# **CONCLUSION GENERALE**



## Conclusion générale

L'utilisation d'énergie solaire est actuellement une réalité mondiale et l'Algérie donne une grande importance à son développement, Adrar dispose naturellement d'un potentiel solaire important, le nombre d'heure d'ensoleillement dépasse 3500 h/an. Ce constat qualitatif favorise l'exploitation et l'épanouissement de cette ressource énergétique.

Cependant, l'utilisation de cette énergie exige la connaissance du potentiel de l'irradiation solaire sur le site. Malheureusement, la station de mesure se trouve uniquement au chef lieu de quelque wilaya.

Le travail effectué dans ce mémoire a pour objectif d'une part la modélisation du rayonnement solaire par une approche semi empirique qui a été présentée et simulée par la description des trois modèles de connaissance relatifs pour la détermination du rayonnement solaire direct, diffus et global par ciel clair (modèle de R.Sun, Bird & Hulstrom et celui de Capderou), chacun des modèles proposés dans l'étude utilise des équations propres pour le calcul du rayonnement solaire, cet outil de simulation nous a permis de confronter des valeurs mesurées et celles estimées par les trois modèles paramétrés, d'autre part à la construction et développement d'une banque des données sous forme d'un système d'information géographique (SIG) de gisement solaire pour la wilaya d'Adrar.

Suivant la simulation nous avons constaté que le modèle R.Sun et celui de Bird & Hulstrom donnent une bonne estimation du rayonnement solaire. Les résultats obtenus pour le site par les deux modèles précédents se rapprochent avec une grande précision des données réelles et sont acceptable (l'erreur annuelle est au tour de 5%), l'utilisation du modèle Capderou conduit à des valeurs qui divergent des données expérimentales, ce qui influe considérablement sur l'estimation du flux solaire et aussi le dimensionnement des systèmes énergétiques solaires (l'erreur annuelle dépasse 10%).

Le développement d'un système d'information géographique GISOL, un projet qui permet la création d'une base de données dynamique pour une gestion durable des ressources naturelles renouvelables dans un milieu saharien. Présente essentiellement une météorologie pour évaluer les ressources d'énergies renouvelables géographiquement d'une manière rapide et efficace sur n'importe quelle localité de la wilaya, et permet pour les utilisateurs et chercheurs de voir une idée simple et rapide sur le flux solaire de la région.

Ajoutons cependant que cette étude nous a permis de franchir un pas franc et sûr dans la modélisation du rayonnement solaire pour affirmer qu'il n'existe pas de technique théorique universelle épousant les résultats expérimentaux

Pour poursuivre ce modeste travail nous proposons les perspectives suivantes :

- ✚ Ajouter à la simulation de flux solaire d'autre étude de flux solaire sur le plan incliné.
- ✚ Ajouter les informations énergétique liées à la région considérée (les ressources énergétiques : vent, biomasse, géothermie, centrale électrique).
- ✚ Extension et extrapolation du logiciel GISOL pour toutes les localités de n'importe quels points sur la carte de l'Algérie.

Nous souhaitons que ce travail puisse contribuer à lancé la recherche et les études de gisement solaire et le potentiel à d'autre source d'énergie renouvelable, éolienne, biomasse, géothermie.

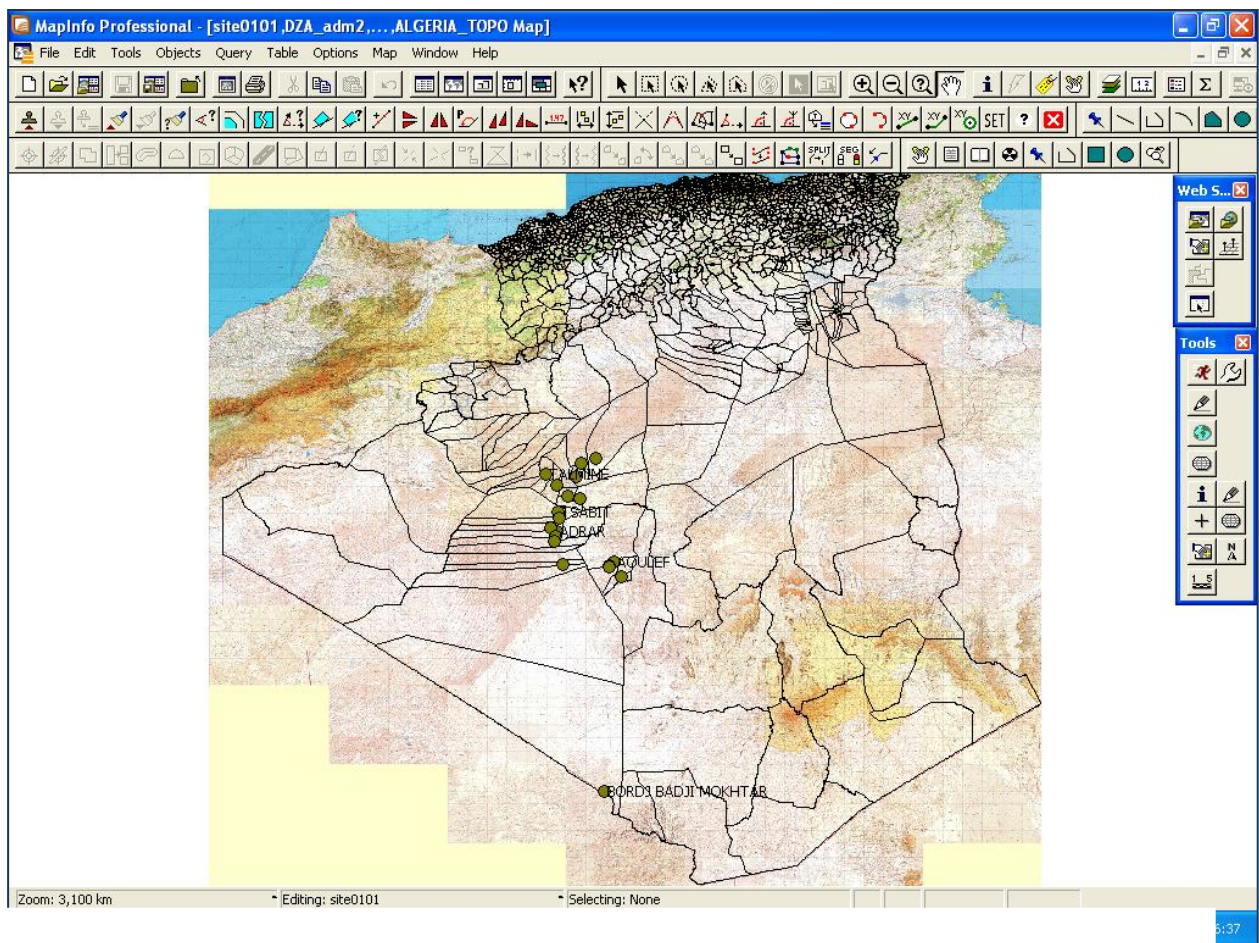
# **ANNEXE**

## 1. Le logiciel SIG MapInfo:

Il y a beaucoup de logiciel SIG (ou systèmes d'information géographiques bureautiques), nous citons à titre exemple ceux que nous avons pu avoir celui utilisé dans notre projet le logiciel MapInfo.

MapInfo est un logiciel modulaire, ce logiciel peut aussi bien être fourni en version mono poste que multi utilisateurs accessible par réseau.

C'est un outil de type systèmes d'information géographique bureautique qui sert à créer de l'information géographique, à traiter de l'information et à la cartographier.



**Figure 1:** L'interface de MapInfo

## **2. Langage de programmation Delphi7 :**

Delphi7 est un environnement de programmation visuel orienté objet pour le développement rapide d'applications (RAD). En utilisant Delphi7, vous pouvez, avec un minimum de codage manuel, créer de performantes applications Windows, Delphi fournit tous les outils qui sont nécessaires pour développer, tester et déployer des applications, incluant une importante bibliothèque de composants réutilisables, un ensemble d'outils de conception, des modèles d'applications et de fiches et des experts de programmation.

# **RESUME**

## ملخص:

يشهد استغلال الطاقة الشمسية تطور مهم ملحوظ جدا في العالم مع نمو بنسبة 20 ٪ ، واستخدام جهد أكثر من 100 جيغاواط. أطلقت الجزائر برنامج مهم جدا لاستخدام الطاقة الشمسية في مختلف الميادين مثل القرى النائية (مشروع سونلغاز ..... ) وتكثيف مراكز ومختبرات البحث حول هذه الطاقة الآن.

منطقة أدرار هي واحدة من الأكثر ملائمة لاستخدام هذه الطاقة بمتوسط تدفق أكثر من 7 كلواط/ساعة/اليوم و الإضاءة أكثر من 3500 ساعة في السنة .

الهدف في عملنا هذا يركز على دراسة و نمذجة تدفق الطاقة الشمسية لمنطقة أدرار مع إنشاء بنك معلومات للبيانات، إيداع الطاقة في المنطقة تدفقات للفترة من السنة و يوم من الشهر ومن ثم دمج هذه البيانات في نظام المعلومات الجغرافية لتقدير تدفق الطاقة الشمسية المشحونة و البيانات في الغلاف الجوي من الموقع المحدد في الخريطة الجغرافية.

**الكلمات الرئيسية:** تدفق، نظام المعلومات الجغرافية، الحقل، جهد

## Résumé :

L'énergie solaire connu un développement très important dans le monde avec une croissance 20%, l'utilisation de potentiel dépasse 100 GW. L'Algérie à lancé des programme très important pour l'utilisation cette énergie pour divers secteur comme les villages éloigné (Projet SONELGAZ.....etc) ainsi par le renforcement des centres et laboratoires de recherche sur cette thématique.

La région d'Adrar est l'un des sites les plus favorables à l'utilisation de cette énergie avec un flux moyenne qui dépasse 7 KWh/m<sup>2</sup>/j et d'ensellement de plus de 3500 h par ans.

Dans cette objectif notre travail s'intéresse à l'étude et modélisation du flux solaire pour la région d'Adrar avec création d'un banque de donné informatique pour les données du gisement énergétique de la région de la période de l'année et jour du mois ensuite l'intégration de ces données dans un système d'information géographique (S.I.G) permettant l'estimation du flux solaire sur la carte géographique.

**Mots clé :** flux, SIG, gisement, potentiel

## Abstract :

Solar energy had a very important development in the world with a 20% growth , potential 100 GW. Algeria has launched a very important program for energy use with solar flux village ( SONELGAZ Project ..... ) and thus centers the lab and research on this topic.

The Adrar region is one of the most favorable to the use of this energy with an average flow 7 KWh/m<sup>2</sup>/j and saddle over 3500 hours per year sites.

Ca objective in our work focuses on the study and modeling of solar flux for the Adrar region with the creation of a bank of computer given to the data, the energy deposit in the region flows for the period of year and day of the month and then the integration of these data into a geographic information system ( GIS) to estimate the charged solar flux and atmospheric data from the site.

**Keywords:** flow , GIS, field , potential