

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

MEMOIRE

Présenté à la Faculté des Sciences
Département de Physique
Pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER

Option : Energétique et Mécanique des Fluides

Par

NIA Mohamed

Thème :

*Etude comparative des méthodes d'estimation du
rayonnement solaire*

Soutenu le : / /2010

Devant le Jury :

Président :	Dr K. KASSALI	Professeur	UFA SETIF
Rapporteur :	Dr M. CHEGAAR	Professeur	UFA SETIF
Examineur :	Dr Z. OUENNOUGHI	Professeur	UFA SETIF
Examineur :	Dr M. GUELLAL	Maître de conférences «A»	UFA SETIF

Dédicaces

A la mémoire de mon très cher père avec toute ma reconnaissance.

A ma très chère mère

A ma femme

A mes soeurs

A mes enfants

A mes tantes et oncles.

A toute ma famille.

A tous mes amis.

A tous ceux que j'aime

Je dédie ce modeste travail

Nia Mohamed

*Au nom du DIEU le clément et le Miséricordieux
Remerciements*

*LOUANGE A DIEU QUI NOUS A DONNE LA FOI, LE
COURAGE ET LA PATIENCE DE PARVENIR À FINIR CE
MODESTE TRAVAIL.*

Le prophète Mohamed (que Dieu lui accorde grâce et salut) a dit :

« Celui qui emprunte une voie vers la recherche du savoir, Dieu rendra pour lui plus aisée une voie vers le paradis »

En quittant l'université de Constantine en juin 1989, après avoir eu un DES en physique énergétique et après dix huit ans de travail comme PES en sciences physique au lycée Ibn Chabira à Boussaâda, je reviens à l'univers universitaire que j'ai jamais oublié malgré cette longue absence mené de la volante et de la foi d'un homme qui aime la science et ses personnalités.

Toutes ces années de recherche, outre leur aspect scientifique, m'ont permis d'apprécier la grande richesse du métier de chercheur. Ce métier qui ressemble à tous les autres, a cependant une caractéristique peu commune : il offre la possibilité de la remise en question continue ; donc à la critique.

Si ces deux années ont été pour moi, d'un apport considérable, tant sur le plan du savoir, que sur le plan des relations humaines, je le dois à beaucoup de personnes. Je remercie du plus profond de moi-même

Mon encadreur, monsieur Chegaar Mohamed, professeur à la faculté des sciences de l'université de Sétif. Cet homme très aimable qui a accepté la difficile tâche de superviser ce mémoire, ses remarques, ses conseils, ses éclairages et ses jugements scientifiques m'ont été d'un grand secours.

Je remercie Pr K. Kassali professeur à l'université de Sétif, qui me fait l'honneur d'accepter de présider le jury de thèse.

Je tiens à remercier : Pr Z. Ouennoughi professeur à l'université de Sétif et Dr M. Guellél maître de conférence à l'université de Sétif d'avoir répondu aimablement afin de juger ce travail en participant au jury de thèse.

Je remercierai de même :

Monsieur Benoraira Ali maître assistant à l'université de Djelfa pour ses encouragements et son soutien inestimable.

Monsieur Nouri Abdelkader professeur à l'université d'Oumelbouagui pour ses encouragements

Monsieur Salmi Mohamed maître assistant à l'université de M'sila pour ses encouragements

Tous mes collègues en magister, monsieur Adel, Tarek, Abdelbaki, Salaheddine

Toute l'unité éducative et administrative du lycée Ibn Chabira à Boussaâda

Nia Mohamed

Sommaire

Introduction générale.....	2
 <i>Chapitre I: Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire</i> 	
I-1- Introduction.....	5
I-2- Le soleil.....	5
I-3- Origine de énergie solaire.....	5
I-4- Nature du rayonnement solaire.....	6
I-4-1- Répartition spectrale du rayonnement solaire.....	7
I-4-2- La constante solaire.....	8
I-5- Propagation du rayonnement solaire dans l'atmosphère.....	8
I-5-1- Formation de l'atmosphère terrestre.....	8
I-5-2- Régions atmosphérique.....	9
I-5-2-1- La troposphère.....	9
I-5-2-2- La stratosphère.....	10
I-5-2-3- La mésosphère.....	10
I-5-2-4- La thermosphère.....	10
I-5-3- Composition de l'atmosphère terrestre.....	10
I-6- Influence des constituants atmosphériques sur le rayonnement solaire.....	14
I-6-1- Généralité.....	14
I-6-2- Masse atmosphérique.....	16
I-6-3- Absorption atmosphérique.....	18
I-6-3-1- L'absorption dans l'ultraviolet.....	18
I-6-3-2- L'absorption dans le visible.....	18
I-6-3-3- L'absorption dans l'infrarouge.....	18
I-6-4- La diffusion atmosphérique.....	19
I-6-5- Diffusion par les couches supérieures de l'atmosphère.....	20
I-6-6- Réfraction atmosphérique.....	20

I-6-7- Distribution spectrale du rayonnement solaire au sol.....	21
I-7- Conclusion.....	22

Chapitre II: Calcul de l'irradiation solaire globale sur une surface horizontale

II-1- Introduction.....	24
II-2- Rappels d'astronomie.....	24
II-2-1- Mouvement de la terre.....	24
II-2-2- Mouvement apparent du soleil.....	24
II-2-2-1- Définition du jour.....	26
II-2-2-2- Le jour solaire vrai.....	26
II-2-2-3- Jour solaire moyen.....	26
II-2-2-4- Équation du temps.....	27
II-2-2-5- Le jour civil.....	28
II-2-2-6- Le temps universel.....	28
II-3- Géométrie solaire.....	28
II-3-1- L'azimut solaire.....	28
II-3-2- L'hauteur solaire.....	28
II-3-3- Déclinaison.....	29
II-3-4- L'angle horaire.....	30
II-4- Relations de repérage du soleil.....	30
II-5- La durée du jour.....	31
II-6- Calcul de l'irradiation solaire globale sur une surface horizontale.....	32
II-6-1- L'irradiation solaire globale à la limite de l'atmosphère.....	32
II-6-2- La fraction d'insolation et l'humidité relative.....	33
II-6-2-1- La fraction d'insolation.....	33
II-6-2-2- L'humidité relative.....	36
II-7- Estimation de l'irradiation solaire globale sur quelques sites en Algérie.....	39
II-8- Conclusion.....	40

Chapitre III: Présentation des modèles d'estimation de l'irradiation solaire globale

III-1- Introduction.....	42
III-2- Groupe des modèles linaires.....	42
III-2-1- Premier modèle (ou modèle d'Angstrom-Prescott).....	42
III-2-2- Le deuxième modèle.....	42
III-2-3- Le troisième modèle.....	43
III-2-4- Le quatrième modèle.....	43
III-3- Le cinquième modèle (modèle de la logique floue).....	44
III-3-1- Exemples introductifs.....	44
III-3-2- Introduction.....	45
III-3-3- Le concept de la logique floue.....	46
III-3-3-1- Principe de la logique floue.....	46
III-3-3-2- Les fonctions d'appartenance.....	46
III-3-3-3- Les opérateurs de la logique floue.....	47
III-4- Le sixième modèle (modèle des réseaux de neurones artificiels).....	55
III-4-1- Réseaux de neurones artificiels.....	55
III-4-2- Modèle et fonctionnement du neurone artificiel.....	56
III-4-3- Les types de fonction d'activation.....	58
III-4-4- Réseau de neurones monocouche (le perceptron).....	59
III-4-5- Le perceptron multicouches.....	59
III-4-6- L'apprentissage.....	60
III-4-6-1- L'apprentissage par correction d'erreur.....	61
III-4-6-2- L'algorithme du rétro propagation du gradient.....	62
III-5- Évaluation statistique des modèles.....	67
III-6- Conclusion.....	68

Chapitre IV: Résultats et discussions

IV-1- Introduction.....	70
IV-2- Grandeurs utilisées dans l'application des six modèles.....	70
IV-2-1- L'irradiation solaire globale des quatre sites à la limite de l'atmosphère.....	70
IV-2-2- L'irradiation solaire globale des quatre sites.....	71

IV-2-3- La fraction d'insolation.....	71
IV-2-4- Moyenne de l'humidité relative et de la température de l'air.....	72
IV-3- Application des modèles aux différents sites.....	73
IV-3-1- Application du premier modèle.....	73
IV-3-2- Application du second modèle.....	76
IV-3-3- Application du troisième modèle.....	78
IV-3-4- Application du quatrième modèle.....	81
IV-3-5- Application du cinquième modèle.....	83
IV-3-6- Application du sixième modèle.....	86
IV-4-Discussion.....	88
Conclusion.....	90
Conclusion générale.....	92
Bibliographie.....	95

Introduction générale

1. Introduction générale

L'énergie est la colonne vertébrale de l'économie de tout pays partout dans le monde, elle est soit achetée ce qui fait un fardeau supplémentaire sur la balance économique, soit produite ce qui s'implique positivement sur l'économie et la vie des individus.

Depuis l'éternité l'énergie a été le but de toute activité humaine, au début de sa vie sur terre l'homme a compté sur ses propres forces, plusieurs milliers d'années après il a domestiqué des animaux, il s'est en suite adressé aux sources fossiles et aux sources d'énergies renouvelables.

C'est au cour du 21^{eme} siècle que le domaine industriel a connu un développement très rapide ce qui a nécessité une demande croissante d'énergie, cette énergie qui est dans sa plus grande partie fournie par les sources fossiles, et la partie qui reste est assurée par les autres sources, tel que le rayonnement solaire, l'énergie éolienne, l'énergie nucléaire. Ce déséquilibre dans l'exploitation des différentes sources d'énergie a causé d'importants problèmes pour la santé humaine et pour la dégradation de l'environnement due à la pollution. Cette grave situation a forcé l'humanité de s'orienter d'une manière massive vers les sources d'énergie propre tel que l'énergie solaire.

Le rayonnement solaire est une énergie durable à l'échelle humaine, elle est propre et gratuite et facilement convertible en une énergie utilisable par l'intermédiaire des cellules photovoltaïques et des capteurs et distillateurs thermiques.

L'énergie solaire occupe une des places les plus importantes parmi les diverses sources d'énergies possibles. Une connaissance précise de distribution de la radiation solaire à un endroit géographique donné est d'une importance majeure pour le développement des dispositifs d'énergie solaires et pour l'évaluation de leurs performances. Malheureusement, pour beaucoup de pays en voie de développement les mesures des radiations solaires ne sont pas facilement disponibles. Donc, il est important d'élaborer des models d'estimation de la radiation solaire sur la base des données astronomiques et météorologiques.

Au cours des années, beaucoup de modèles ont été proposés pour prévoir la valeur du rayonnement solaire en utilisant plusieurs paramètres. Ces paramètres incluent la radiation solaire extraterrestre, la durée d'insolation, l'humidité relative, le maximum et le minimum de la température, le nombre de jours pluvieux, l'altitude, la latitude, la hauteur d'eau précipitable, l'albédo.

L'Algérie est un pays à grande insolation. Le nombre des heures d'insolation s'élève à presque 3300h/an. Le climat est très favorable pour l'exploitation de l'énergie solaire, mais la distribution de la radiation solaire n'est pas bien connue.

Le but de ce travail est de faire une étude comparative entre plusieurs modèles d'estimation de la radiation solaire globale sur quelques sites algériens et d'en tirer par la suite une conclusion sur les modèles d'estimation les plus adéquats pour tel ou tel site.

Le présent travail est reparti en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre nous donnons quelques connaissances de base sur le soleil, nous examinons la répartition du rayonnement solaire à la limite extérieure de l'atmosphère et nous évaluons les différentes modifications que subisse le rayonnement solaire à la traversée de la couche atmosphérique.

Au second chapitre nous exposons les relations liant la position du soleil, la latitude et l'angle horaire. Nous mettons en évidence les différentes procédures de calcul de la radiation solaire globale sur une surface horizontale hors atmosphère et au sol.

Dans le troisième chapitre nous donnons une présentation des modèles utilisés dans notre étude pour l'estimation de l'irradiation solaire globale.

Le dernier chapitre est réservé aux résultats obtenus par l'application de plusieurs modèles d'estimation et à une étude comparative entre ces modèles.

Chapitre I

Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire

I-1- Introduction

Dans ce chapitre on parlera de certaines notions fondamentales sur notre étoile (le soleil), ses dimensions, ses couches, l'origine de l'énergie qu'elle rayonne, la nature de cette énergie et sa répartition à la limite extérieure de l'atmosphère terrestre, ainsi on verra l'histoire de formation de notre globe (la terre). Son atmosphère, sa composition, ses zones, son effet sur le rayonnement solaire et les phénomènes optiques qui en résultent ainsi que la distribution de ce rayonnement au sol.

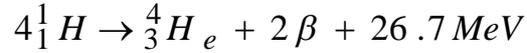
I-2- Le soleil

Le soleil est une étoile autour de laquelle gravite la terre. Son énergie provient des réactions thermonucléaires de fusion de l'hydrogène en hélium. Sa température superficielle moyenne est estimée à 5800K. La surface lumineuse habituellement visible, ou photosphère, est d'environ 100 km d'épaisseur. La chromosphère est la couche inférieure de l'atmosphère solaire, entre la photosphère et la couronne. Les taches solaires sont des taches sombres sur la surface de la photosphère qui correspondent à des zones plus froides, elles ont une très grande diversité de forme et d'étendue. Les observateurs comme Galilée, ont vu que les taches se déplaçaient au fil du temps, toujours dans le même sens, ainsi montrant la rotation du soleil. Le globe solaire limité par la photosphère à un rayon égal à 696000km, soit environ 109 fois le rayon équatorial de la terre. Sa densité moyenne n'est que de 1,41 de sorte que sa masse est seulement 333.000 fois celle de la terre, pour un volume 1300000 fois plus important. La distance moyenne de la terre au soleil est voisine de 150 millions de km. Le rayonnement solaire met environ 8 minutes pour nous parvenir [1].

I-3- Origine de l'énergie solaire

Le soleil tire son énergie des réactions thermonucléaires se produisant en permanence dans son noyau, dont la température atteint 15 millions de degrés. Compte tenu des températures et des pressions énormes qui y règnent, toute la matière se trouve à l'état gazeux ou sous forme de plasma. La couche externe du soleil, le photosphère, celle qui est visible de la terre, a une température considérablement plus faible qui décroît vers l'extérieur, jusqu'à environ 5 800°K.

Les réactions thermonucléaires qui se produisent dans le noyau du soleil transforment chaque seconde, 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium selon l'équation suivante.



L'hydrogène qui représente 71 % de la masse dans la photosphère n'est plus présent qu'à 34 % dans la partie centrale du soleil, du fait de cette transformation permanente engagée Il y a 4,5 milliards d'années. Et les 4 millions de tonnes manquantes volatilisées désintégrées dans de gigantesques explosions nucléaires, Le processus mis en jeu est bien compris depuis la célèbre relation d'Albert Einstein ($E = mc^2$) qui montre que toute disparition de masse (m) entraîne une production d'énergie égale au produit de cette masse par le carré de la vitesse de la lumière. La perte de masse du soleil par unité de temps vaut $4,28.10^9$ kg /s ; et l'énergie émise par seconde par le soleil est donc d'environ $3,85.10^{20}$ MW. Sur le plan énergétique un réacteur de centrale nucléaire produit typiquement 1000MW. Le Soleil fournit donc une puissance équivalente à celle de 4.10^{17} réacteurs nucléaires, un chiffre véritablement astronomique. Cependant, seule une petite partie de cette puissance est reçue par la terre du fait du faible angle solide sous lequel est vue notre planète à partir du soleil, environ deux milliards de fois moins, ce qui donne un chiffre qui reste fort respectable (environ $1,9.10^{11}$ MW). Le système terre atmosphère réfléchit environ 30 % de l'énergie solaire interceptée et absorbe les 70 % restants qui sont presque intégralement transformés en chaleur [2, 16, 28].

I-4- Nature du rayonnement solaire

L'énergie émise par le soleil nous parvient sous forme de rayonnements électromagnétiques se propageant à la vitesse de la lumière et dont l'ensemble forme le rayonnement solaire, qui constitue la seule source externe notable d'énergie pour l'atmosphère. La théorie corpusculaire de Max Planck prévoit que tout rayonnement de fréquence (ν) peut être considéré comme un flux de photons dont l'énergie élémentaire (E) est directement proportionnel à cette fréquence.

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Où

h : est la constante de Planck.

c : la vitesse de la lumière.

λ : La longueur d'onde.

De ce fait, ce sont les rayonnements de courte longueur d'onde (ou de haute fréquence) qui sont les plus énergétiques; la plus grande partie de l'énergie solaire est cependant rayonnée dans les domaines ultraviolet, visible et proche infrarouge. 99,2 % de l'énergie solaire hors atmosphère se trouve entre 200 nm et 4 μm . Au sol, par suite de l'absorption du rayonnement solaire par la vapeur d'eau, le spectre est limité à 2,5 μm environ [2, 16].

I-4-1- Répartition spectrale du rayonnement solaire

Les photons ne sont pas émis en même quantité par le soleil quelle que soit la longueur d'onde. Si l'on mesure l'énergie associée à chaque gamme de longueurs d'onde dans le rayonnement solaire, on observe que celle-ci est très faible pour des longueurs d'onde inférieures à 0,2 μm et pour des longueurs d'onde supérieures à 4 μm , mais aussi qu'elle passe par un maximum autour de 0,5 μm correspondant au jaune (qui est bien la couleur dominante de l'astre solaire) (figure I.1).

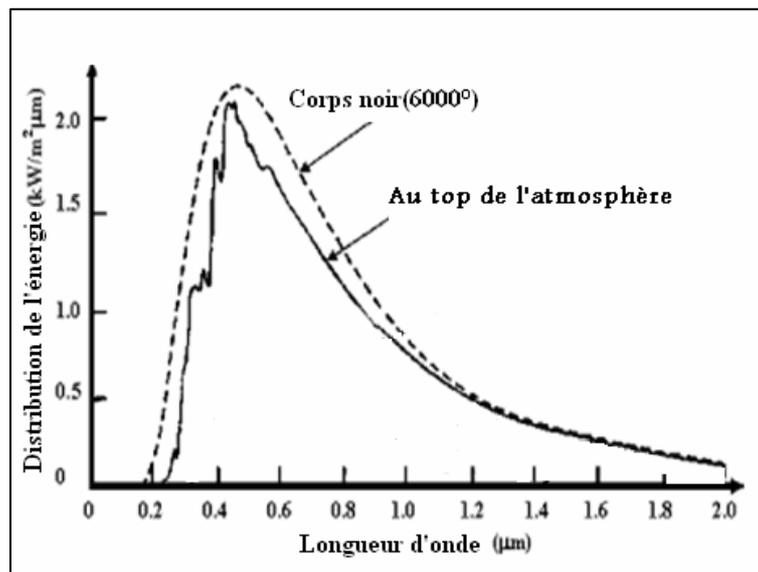


Figure I-1 : Le spectre solaire [16]

Il est intéressant de remarquer que, sur le plan d'émission du rayonnement, le soleil se comporte de façon similaire à un corps noir à une température de presque de 6000°K. La terre et son atmosphère jouent un rôle de transformateurs de l'énergie solaire, qu'elles reçoivent principalement sous forme de rayonnement de courtes longueurs d'ondes et qu'elles réémettent vers l'espace essentiellement sous forme de rayonnement infrarouge [2, 16].

I-4-2- La constante solaire

La terre reçoit pratiquement toute son énergie du soleil, sous la forme d'un rayonnement électromagnétique. Son contenu total de chaleur ne change significativement pas avec le temps, indiquant en général un équilibre entre le rayonnement solaire absorbé et le flux de rayonnement diffus émis par la planète. À l'extérieur de l'atmosphère terrestre il n'y a pas de composante diffuse du rayonnement solaire mais seulement la composante directe. Pour une distance moyenne entre la terre et le soleil. L'irradiation émise par le soleil à la terre aboutit à une intensité presque fixe dite constante solaire qui est de 1360w/m^2 (Monteith 1962) [16].

La constante solaire est l'énergie solaire reçue par unité de temps et par unité de surface d'une superficie perpendiculaire à la direction de propagation du rayonnement solaire. Les mesures faites avec une variété d'instruments ont donné la valeur 1353w/m^2 estimée avec une erreur de $\pm 1.5\%$. La commission des instruments et des méthodes d'observation (CIMO) de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) a adopté en octobre 1981 la valeur 1367w/m^2 avec une incertitude de 1%. À présent la meilleure valeur disponible de la constante solaire est 1360w/m^2 (Frochlich et 1981 Werhli) [16].

I-5- Propagation du rayonnement solaire dans l'atmosphère

I-5-1- Formation de l'atmosphère terrestre

Durant le processus de refroidissement de la terre d'énormes quantités, de méthane, d'ammoniac de gaz carbonique, et d'eau furent rejetées du noyau de la terre vers l'extérieur ; Ainsi c'est formé la première atmosphère. En agissant comme une serre cette atmosphère a réduit la perte de chaleur de la terre vers l'espace et notre planète demeura ainsi assez chaude pour que puisse naître la vie.

Après environs 4.5 milliards d'années la vapeur d'eau s'est condensée donnant naissance à la

formation des océans. Le gaz carbonique se combina à des minéraux et fut absorbé par les océans et fut utilisé par les premiers êtres vivants. L'azote est resté dans l'atmosphère à cause de sa faible réaction avec les autres constituants. Il y a 3 milliards d'années l'atmosphère contenait peu d'oxygène, c'est par des réactions chimiques compliquées entre le méthane, l'ammoniac, l'eau, et le rayonnement solaire que s'est formée une couche d'ozone, cette couche joue un rôle important dans l'évolution de la vie sur terre puisqu'elle empêche les rayons solaires nuisibles à la vie d'atteindre la terre. Les premières plantes apparurent il y a 2 milliards d'années et transformèrent une grande partie du gaz carbonique en oxygène. Ce processus se poursuit toujours et l'atmosphère d'aujourd'hui contient environ 78% d'azote et 21% d'oxygène. L'atmosphère actuelle est composée d'un mélange de gaz et de particules, elle est très mince de sorte qu'on peut représenter son épaisseur relativement à la terre comme la pelure d'une pomme relativement à l'ensemble du fruit. C'est la force d'attraction qui retient l'atmosphère autour du globe [5].

I-5-2- Régions atmosphérique

La terre est entourée d'une mince couche gazeuse : l'atmosphère. L'atmosphère joue le rôle de bouclier protecteur pour toutes les espèces vivantes qui habitent à la surface du globe. En outre, elle les isole de l'espace glacé et menaçant et les protège des rayons ultraviolets. L'organisation mondiale de la météorologie (OMM) définit quatre zones successives pour l'atmosphère à savoir la troposphère, la stratosphère, la mésosphère et la thermosphère. Ce sont les variations verticales de la température de l'air qui définissent la division de l'atmosphère en ces quatre grandes régions [5].

I-5-2-1- La troposphère

C'est la couche atmosphérique la plus proche du sol, dans laquelle nous vivons. Son épaisseur varie de 7 kilomètres de hauteur au-dessus des pôles, 18 kilomètres au-dessus de l'équateur et environ 13 kilomètres selon les saisons, dans la zone tempérée. La température diminue à mesure qu'on s'élève dans la troposphère, c'est-à-dire à mesure qu'on s'éloigne du sol, atteignant 56°C à la tropopause (zone séparant la troposphère de la stratosphère); l'air près du sol est plus chaud qu'en altitude car la surface le réchauffe.

I-5-2-2- La stratosphère

C'est la couche atmosphérique au-dessus de la troposphère, dans la stratosphère on trouve la couche d'ozone. Sa formation il y a 3 milliards d'années, a permis le développement de la vie sur notre planète. Car elle filtre une partie des rayons ultraviolets du soleil qui sont extrêmement nocifs pour tout être vivant. Cette absorption provoque un dégagement d'énergie sous forme de chaleur. C'est pourquoi la température augmente lorsqu'on s'élève dans la stratosphère. Les équations chimiques suivantes décrivent la formation de la molécule d'ozone.

I-5-2-3- La mésosphère

Elle se trouve juste au-dessus de la stratosphère. Dans cette couche, la température recommence à décroître avec l'altitude pour atteindre un minimum de -80 degrés Celsius à une altitude d'environ 80 kilomètres. Les poussières et particules qui proviennent de l'espace (les météores) s'enflamment lorsqu'elles entrent dans la mésosphère à cause de la friction de l'air. Ce phénomène nous apparaît sous la forme « d'étoiles filantes ».

I-5-2-4- La thermosphère

C'est la couche la plus haute. Dans cette couche, la température augmente avec l'altitude et peut atteindre environ 100 degrés Celsius. La thermosphère atteint des milliers de kilomètres d'altitude et disparaît graduellement dans l'espace. La partie inférieure de la thermosphère réfléchit les ondes courtes (ondes radio), elle s'appelle l'ionosphère.

I-5-3- Composition de l'atmosphère terrestre

Pour caractériser la composition de l'atmosphère trois régions sont ainsi définies : l'homosphère (qui comprend la troposphère, la stratosphère et la mésosphère) dans laquelle la composition de l'air est uniforme et invariable en première approximation, l'hétérosphère dans laquelle la composition de l'air a une variation verticale et la protosphère formée exclusivement de protons et d'électrons libres, seule l'homosphère intervient dans les phénomènes de propagation du rayonnement solaire car elle contient les principaux éléments qui modifient la composition spectrales de la lumière, à savoir, l'air sec, la quasi-totalité de l'eau atmosphérique et les aérosols.

Ce découpage en trois groupes n'est pas hasardeux, les radiations solaires pénétrants dans l'atmosphère sont affectés par chacun de ces groupes, en outre la composition en eau et en aérosols varie fortement en fonction du temps et du lieu tandis que la présence des constituants de l'air sec est moins aléatoire. À ces trois ensembles on ajoute un quatrième, défini par la couverture nuageuse composée principalement d'eau sous divers états, les nuages modifient le rayonnement solaire de façon notable et particulière.

Pour donner un exemple global de la composition de l'atmosphère on retient le tableau I-2 déterminé en 1976 aux Etats-Unis par le US Standard Atmosphere, il détaille les quantités d'éléments présents dans l'atmosphère en distinguant les constituants permanents de ceux dont la composition varie largement, remarquant que l'azote et l'oxygène et l'argon représentent 99.9% des gaz permanents. Le gaz carbonique est classé parmi les gaz permanents alors que sa composition varie selon les activités naturelles et industrielles [4, 16].

composition de l'atmosphère			
Constituants permanents		Constituants variables	
Constituants	%volume	Constituants	% volume
Azote (N ₂)	78,084	Vapeur d'eau (H ₂ O)	0-0,04
Oxygène (O ₂)	20,948	Ozone (O ₃)	0-12. 10 ⁻⁴
Argon (Ar)	0,934	Dioxyde de soufre (SO ₂)*	0,001.10 ⁻⁴
Dioxyde de carbone (CO ₂)	0,033	Dioxyde d'azote (NO ₂)	0,001.10 ⁻⁴
Néon(Ne)	18,18.10 ⁻⁴	Ammoniac (NH ₃)*	0,004.10 ⁻⁴
Hélium (He)	5,24.10 ⁻⁴	Monoxyde d'azote (NO)*	0,0005.10 ⁻⁴
Krypton (Kr)	1,14.10 ⁻⁴	Sulfate d'hydrogène (H ₂ S)*	0,00005.10 ⁻⁴
Xénon (Xe)	0,089.10 ⁻⁴	Vapeur d'acide nitrique (HNO ₃)	traces
Hydrogène (H ₂)	0,5 .10 ⁻⁴	chlorofluorocarbones	traces
Méthane (CH ₄)	1,5 .10 ⁻⁴		
Protoxyde d'azote (N ₂ O)	0,27.10 ⁻⁴		
Monoxyde de carbone (CO)	0,19.10 ⁻⁴		
* concentrations près de la surface, données d'après U.S Standard Atmosphere, 1976			

Tableau I-1 : Composition de l'atmosphère près de la surface [4]

- **L'air sec atmosphérique**

Il se compose essentiellement de quatre éléments : l'azote, l'oxygène, l'argon et le dioxyde de carbone, appelés gaz permanents, dont la concentration varie en fonction de la latitude, du vent, du site (plus au mois urbain) ainsi que de la saison. Malgré sa faible concentration, l'ozone est un autre constituant de l'air sec qu'il faut prendre en considération dans les phénomènes d'absorption spectrale, en effet la plus grande partie des radiations ultraviolettes sont absorbées par cet élément, protégeant ainsi la terre de ces radiations à grande énergie. La teneur en ozone dépend de la latitude et de la saison. Elle est notable dans une couche atmosphérique comprise entre 15 et 45 km d'altitude. On détermine l'épaisseur optique globale de l'ozone (la masse d'ozone contenue dans un cylindre vertical de section unité) par spectroscopie au sol cette grandeur est souvent exprimée en hauteur équivalente d'ozone normal et dénommée épaisseur réduite d'ozone (ozone pur dans les conditions normales de température et de pression). La hauteur moyenne d'ozone varie au cours de l'année et elle est d'environ 2.4 mm à l'équateur et augmente avec la latitude pour atteindre des valeurs proches de 4.5 cm aux pôles.

- **L'eau**

L'eau présente dans l'atmosphère est principalement localisée dans les 10 kilomètres inférieures de l'atmosphère. Elle provient de l'évaporation de l'eau à la surface de la terre, des océans, des mers principalement, mais aussi de la couverture végétale, sa concentration varie largement géographiquement et temporellement. On trouve l'eau atmosphérique à l'état de gaz mélangé à l'air (vapeur) mais également sous forme liquide et solide dans les nuages, son influence sur le rayonnement solaire est importante et il convient de déterminer sa teneur dans l'atmosphère. Pour cela on s'intéresse à l'épaisseur optique totale de vapeur d'eau sur le site concerné, c'est-à-dire la masse totale de vapeur d'eau contenue dans un cylindre de section unité. On l'exprime en hauteur d'eau équivalente sous le nom d'hauteur d'eau précipitable avec la convention que 1 cm d'eau précipitable représente 1 g/cm^2 . La hauteur d'eau précipitable dépend de la capacité de l'air à contenir de la vapeur d'eau, donc de son humidité relative et de sa température, plusieurs formulations sont proposées pour le calcul de la hauteur d'eau précipitable dont on cite celle de Lekner [4].

$$W = 0.00493 \frac{R}{273+T} \exp\left(26.23 - \frac{5416}{273+T}\right) \quad (\text{I.1})$$

W : Hauteur d'eau précipitable (cm)

R : Humidité relative de l'air (%)

T : Température de l'air (°C)

La hauteur d'eau précipitable est très variable, de 0.1 à 1cm aux pôles et dans le désert ou l'air est sec, de 2 à 5cm en climat tempéré et supérieurs à 5cm en climat tropical.

- **Les aérosols**

Les aérosols sont toutes les particules en suspension dans l'air provenant des activités industrielles et naturelles variées: les pollens, cristaux de sels marins, sable apporté par le vent, les éruptions volcaniques, les poussières de météorites, etc. Les dimensions des aérosols varient de quelques nanomètres à la centaine de micromètres elles sont sensiblement supérieures aux molécules d'air sec et comparables aux longueurs d'ondes du rayonnements lumineux. Ces aérosols sont repartis dans deux couches l'une troposphérique de 1 à 3 km d'altitude affectée essentiellement par les tempêtes de poussières naturelles et les productions humaines, l'autre stratosphérique de 15km à 25km d'altitude affectée par les éruptions volcaniques et les sources cosmiques.

En 1906 Angstrom propose une formulation du coefficient d'atténuation tenant compte de la taille des particules et de leur quantité; elle s'applique aux aérosols, qu'ils soient secs ou bien humides [4].

$$\tau_{\lambda} = \beta \cdot \lambda^{-\alpha}$$

α : caractérise la taille moyenne des particules atmosphériques. Il décroît avec leur diamètre de 4 (particules très fines comme les molécules de l'air sec) à 0 (pour les très larges particules).

β : représente la quantité de particules présentes dans une colonne verticale: il est appelé le facteur de trouble d'Angstrom sa valeur varient entre 0 et 0.5.

- **Les nuages**

Les nuages modifient radicalement le comportement du rayonnement solaire, alors il est important de les distinguer du reste de l'atmosphère. Les nuages sont des formations d'amas de

vapeur, de gouttes, de corps solides à base d'eau, ils sont créés par refroidissement des masses d'air en altitude par condensation d'air ascendant.

La quantité de vapeur contenue dans l'air dépend de sa température, plus elle est élevée plus l'air peut contenir de la vapeur, à chaque température correspond un certain "seuil de saturation" au-delà duquel cette vapeur passe à l'état liquide c'est le processus de condensation.

La taille des amas d'eau est variable de quelques micromètres (vapeur d'eau fine d'un brouillard) à quelques centaines de micromètres (grosses gouttelettes), voire plusieurs millimètres pour les gouttes et grain de glace. Outre la diversité des particules, c'est d'avantage leur concentration qui diffère du reste de l'atmosphère sans nuages c'est également ce qui les distingue des aérosols. Pour caractériser la couverture nuageuse, on se réfère à deux paramètres ; d'une part leur type et d'autre part leur quantité.

Les variétés des nuages sont définies par une classification internationale qui catégorise les types de nuages d'après leur aspect leur dimension et leur altitude. C'est une classification en genres, espèces, et variétés correspondant respectivement à leurs formes, leurs structures internes, et à leurs particularités. À l'exception de quelques nuages spéciaux (nuages nacrés, nuages nocturnes lumineux) les nuages sont généralement situés dans la troposphère.

La quantité de nuages couvrant la voûte céleste est caractérisée par la nébulosité (N), qui est par définition la fraction de ciel occupé par une couverture nuageuse visible, elle est exprimée en "huitième de ciel effectivement visible", son unité est appelée "octas", autrement dit la nébulosité est l'angle solide dessiné par la couverture nuageuse en prenant comme unité le huitième d'angle solide du ciel visible ($2\pi / 8 = 0.78sr$ pour un site parfaitement dégagé) la nébulosité varie de N=0 (pas de nuages), à N=8 (ciel totalement couvert), la valeur N=9 peut être définie pour le cas de brouillard empêchant toute observation. Pratiquement la nébulosité est déterminée soit par observation réelle du ciel, soit par l'étude d'une photo couvrant la totalité du ciel.

I-6- Influence des constituants atmosphériques sur le rayonnement solaire

I-6-1- Généralité

Après son voyage dans l'espace le rayonnement solaire atteint l'atmosphère, une certaine quantité de ce rayonnement est absorbée par l'atmosphère, les nuages et les particules en suspension dans l'atmosphère, une autre partie est réfléchiée dans l'espace et une certaine quantité est absorbée par

la surface de la terre. La surface de la terre renvoie aussi une certaine partie sous forme d'un rayonnement de différentes longueurs d'ondes en raison de la température superficielle de la terre. Environ 70% du rayonnement solaire total reste dans la surface de la terre et dans l'atmosphère. La rotation de la terre autour de son axe produit des variations horaires dans l'intensité du rayonnement reçue par un emplacement donné pendant le jour et aboutit même à l'extinction complète pendant la nuit.

En passant par l'atmosphère, le rayonnement solaire est partiellement dispersé dans toutes les directions, partiellement absorbé et partiellement réfléchi, par les gaz atmosphériques, les aérosols et les gouttelettes de nuage. Le rayonnement dispersée atteignant la surface de la terre constitue ce qu'on appelle le rayonnement diffus. À nouveau, une partie de ce rayonnement diffus revient en arrière dans l'espace, alors qu'une partie atteinte la surface de la terre sous forme d'un rayonnement, direct, diffus et réfléchi [16], (figure I-2).

Le rayonnement direct comme son nom l'indique est le rayonnement solaire reçu à n'importe quel point sur terre directement du soleil sans aucune perturbation.

Le rayonnement réfléchi est principalement renvoyé par la surface réceptrice, cette composante est plus importante dans des régions montagneuses.

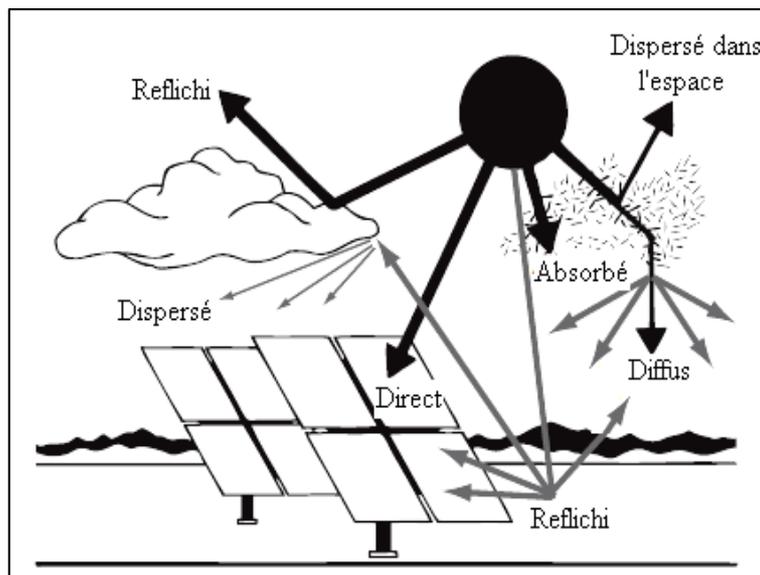


Figure I-2: Composantes du rayonnement solaire [27]

La quantité de rayonnement solaire atteignant n'importe quel point de la surface de la terre dépend de la position de ce point, du moment de l'année, de la diffusion atmosphérique, de la couche des nuages et de la forme et la réflectivité de la surface réceptrice.

I-6-2- Masse atmosphérique

L'intensité d'absorption et de diffusion que subit le rayonnement solaire à la traversée de l'atmosphère est liée à la quantité de molécules rencontrées par ce rayonnement, la loi de transmission est donnée par la relation suivante.

$$\phi = \phi_0 \cdot \exp(-Kl) \quad (I.2)$$

Tel que

ϕ : Flux énergétique sortant après un parcours de longueur (l) dans l'atmosphère

ϕ_0 : Flux énergétique incident

K : coefficient d'extinction caractérisant l'absorption et la diffusion

La masse atmosphérique ou (masse d'air noté AM) est l'épaisseur verticale de l'atmosphère moyen au niveau de la mer (figure I-3), dans les conditions normales de température et de pression la masse atmosphérique est définie par l'expression suivante [5].

$$AM = \frac{p}{1013} \cdot \frac{1}{\sin(h)} \exp\left(-\frac{y}{7.8}\right) \quad (I.3)$$

Où

p: pression de l'air (N/m²)

h: hauteur solaire, sur l'horizon (h=90° au zénith)

y: altitude en (km)

Dans les conditions normales (p=1013 N/m²) et au niveau de la mer (y=0), l'expression de la masse atmosphérique est simplifiée à.

$$AM = \frac{1}{\sin(h)}$$

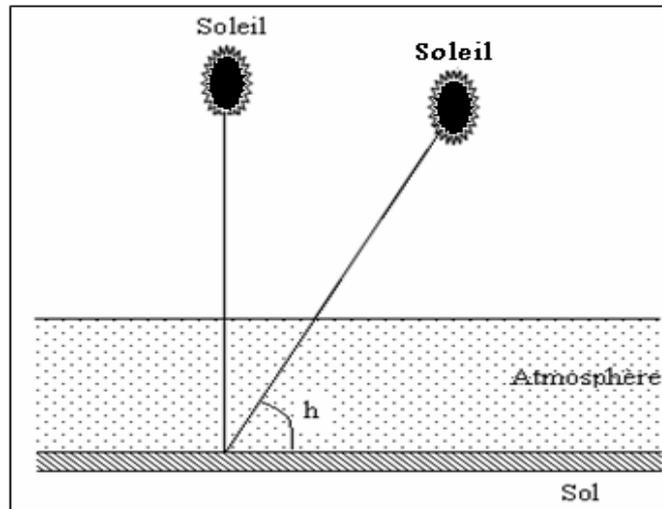


Figure I-3: Définition de la masse d'air

Ainsi lorsque le soleil est au zénith on a AM1, avec un soleil à 30° sur l'horizon on aura AM2 et pour le soleil à 48° le AM est de 1.5 ; par convention AM0 désigne le rayonnement solaire hors atmosphère, le tableau (I.2) donne la constante solaire (I_0) en fonction du nombre d'air masse.

AM	0	1	1.5	2	3	4	5
I_0 (W/M^2)	1353	931	834	755	610	530	430

Tableau I-2 : La constante solaire en fonction du nombre d'air masse pour une atmosphère de type méditerranéen [5]

I-6-3- Absorption atmosphérique

Le phénomène d'absorption, résulte d'une perte d'énergie par une molécule pour passer d'un état énergétique à un autre, ce processus n'affecte que les rayons d'une longueur d'onde spécifique ce qui génère une absorption sélective [4, 16].

I-6-3-1- Absorption dans l'ultraviolet

Cette absorption est causée principalement par l'ozone arrêtant ainsi la quasi-totalité des longueurs d'onde comprises entre 210 et 290nm. Les gaz monoatomiques d'oxygène et d'azote absorbent les rayonnements de longueur d'onde entre 85nm et celle des rayons x, comme ces gaz se situent dans la couche la plus haute de l'atmosphère (produits par dissociation des molécules biatomiques) alors ils constituent un véritable bouclier aux faibles longueurs d'ondes. Les gaz biatomiques d'oxygène et d'azote absorbent les rayonnements de bandes spectrales inférieures à 200nm. L'ozone à une bande de forte absorption entre 200 et 300nm et quelques unes moins importantes entre 300 et 350nm.

I-6-3-2- Absorption dans le visible

C'est l'ozone et l'oxygène diatomique qui sont les principaux responsables de la diminution énergétique du rayonnement solaire. L'ozone est très absorbant dans le domaine qui s'étend de 450 à 770nm, alors que les molécules d'oxygène filtrent le rayonnement visible dans trois bandes centrées sur 630; 690 et 760nm. L'eau possède une légère bande autour de 720nm.

I-6-3-3- Absorption dans l'infrarouge

L'absorption dans l'infrarouge provient essentiellement de la vapeur d'eau et du dioxyde de carbone de sorte qu'au niveau bas de l'atmosphère 14% du rayonnement solaire est absorbée par la vapeur d'eau principalement dans la région du proche infrarouge; alors que l'absorption par le dioxyde de carbone est légère et se manifeste dans l'infrarouge lointain (supérieur à 2000nm).

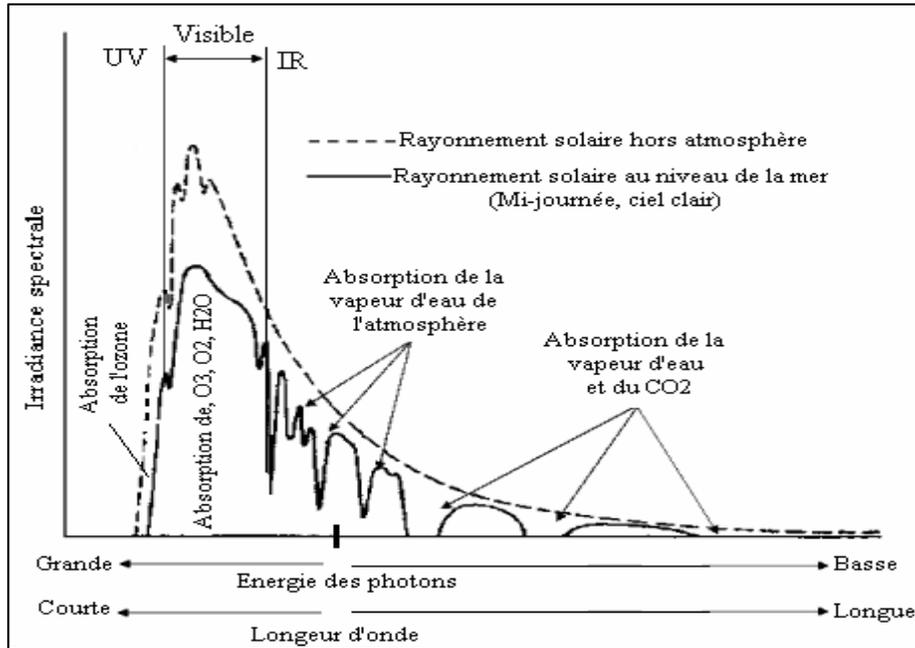


Figure I-4 : Spectre d'absorption du rayonnement solaire au niveau de la mer [16]

I-6-4- La diffusion atmosphérique

Contrairement à l'absorption sélective, le phénomène de la diffusion est une fonction continue des longueurs d'ondes, lorsqu'une onde électromagnétique percute une molécule une partie de l'énergie incidente est déviée dans toute les directions et définit le rayonnement diffus. Cette diffusion est exprimée par l'équation de diffusion de Maxwell qui a une solution simple pour les molécules de dimensions bien inférieures à celle des longueurs d'ondes incidentes, il s'agit de la diffusion de Rayleigh (intensité proportionnelle à λ^{-4}). Cette diffusion est beaucoup plus importante lorsque la longueur d'onde du rayonnement est petite et l'air est humide et pollué. Ce phénomène explique pourquoi le ciel est bleu dans la journée et rouge orangé le matin et le soir lorsque le soleil est bas sur l'horizon. En effet, à midi, le trajet des rayons lumineux est relativement court, le rayonnement de courte longueur d'onde est plus diffusé par les molécules de l'atmosphère que le rayonnement de grande longueur d'onde. La lumière bleu est, donc plus diffusée que la lumière rouge et le ciel nous parait bleu. À l'aurore, au crépuscule, le trajet de la lumière est beaucoup plus longue, les longueurs d'ondes bleues sont diffusées mais aussi absorbées par les constituants de l'atmosphère et ne reste que les grandes longueurs d'ondes

(rouges). La diffusion par les aérosols se produit quand la taille des particules diffusantes est peu différente de la longueur d'onde, elle est inversement proportionnelle à celle-ci, et se manifeste dans tout le spectre solaire, mais à une très faible influence dans l'infrarouge.

La diffusion non sélective se produit quand la taille des particules est plus grande que la longueur d'onde, ce rayonnement est surtout dévié par les gros aérosols (poussière); grosses gouttes d'eau. La diffusion non sélective affecte toutes les longueurs d'onde, cela explique la couleur blanche des nuages (tout est diffusé, la diffusion est indépendante de la longueur d'onde) [4, 16].

I-6-5- Diffusion par les couches supérieures de l'atmosphère

En l'absence de l'atmosphère c'est l'obscurité parfaite qui règne dès que le soleil disparaît sous l'horizon. La lumière solaire diffusée par les couches supérieures de l'atmosphère encore éclairée par le soleil, entraîne un passage graduel du jour à la nuit ou de la nuit au jour. Ce phénomène s'appelle le crépuscule. Le crépuscule est généralement divisé en deux parties : l'une qui suit le coucher du soleil, l'autre qui précède son lever, séparées par la nuit. La durée du crépuscule dépend de la latitude du lieu, dans les régions arctiques et antarctiques, il peut durer plusieurs heures ou ne pas être présent du tout, tandis qu'à l'équateur, il peut disparaître en moins de 20 minutes. Aux latitudes moyennes, le crépuscule est au plus court à l'approche des équinoxes, plus long vers le solstice d'hiver et d'été. Au delà des cercles polaires, le soleil ne se couche pas à l'époque du solstice d'été. Aux latitudes élevées, en delà de ces cercles, le soleil descend sous l'horizon mais le crépuscule se poursuit de son coucher à son lever, un phénomène connu sous le nom de jour polaire [5].

I-6-6- Réfraction atmosphérique

La masse volumique de l'air diminue avec l'altitude, cette diminution entraîne une variation de l'indice de réfraction de l'air, qui engendre à son tour une déviation progressive des rayons lumineux qui suivent par la suite une trajectoire à concavité tournée vers le bas. C'est à cause de cette réfraction que la hauteur apparente du soleil est supérieure à sa hauteur réelle (figure I-4). La durée du jour est influencée par les deux phénomènes de crépuscule et de réfraction atmosphérique [9].

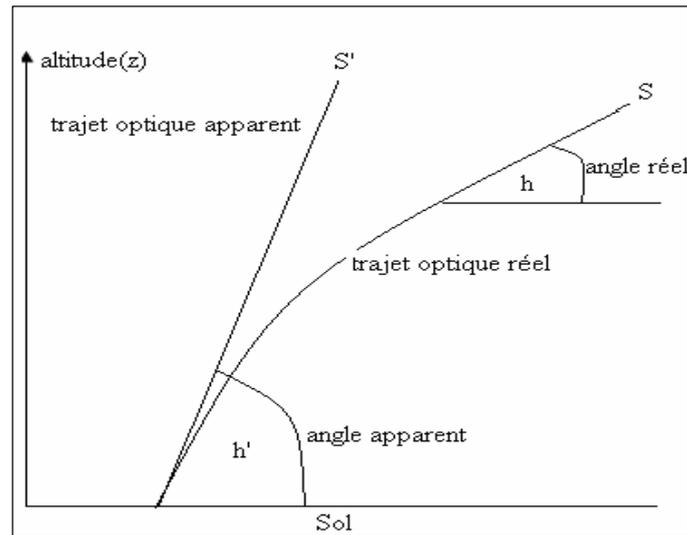


Figure I-5 : Réfraction atmosphérique

I-6-7- Distribution spectrale du rayonnement solaire au sol

Au sol le rayonnement solaire peut être décomposé en deux parties.

1. le rayonnement direct, on notera par (D') la puissance reçue par unité de surface normale aux rayons provenant au sol.
2. le rayonnement diffus provenant de toute la voûte céleste, on notera par (D) la puissance reçue par unité de surface

La puissance globale du rayonnement solaire reçu au sol s'exprime comme étant la somme de la puissance diffuse et de la puissance directe pondérée par le cosinus de l'angle zénithal du soleil. On a alors [27].

$$G = D + D' \cos(z) \quad (\text{I.4})$$

z : l'angle zénithal (complément de la hauteur solaire)

Remarque

La surface du sol renvoie vers l'espace une fraction du rayonnement solaire global appelée albédo (a), qui dépend de sa nature et de son état. Si le rayonnement réfléchi est égal à R . Le flux absorbé par le sol est $(1-a).R$. Le tableau I-4 donne l'albédo typique de quelques surfaces.

Surfaces	Albédo
Neige fraîche	0,8 à 0,9
Neige ancienne	0,5 à 0,7
Sol rocheux	0,15 à 0,25
Sol cultivé	0,07 à 0,14
Forêt	0,06 à 0,20
Étendue d'eau	0,05

Tableau I-3 : L'albédo typique de différentes surfaces [2].

I-7- Conclusion

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

Chapitre II

Calcul de l'irradiation solaire globale sur une surface horizontale

II-1- Introduction

Dans ce chapitre on examinera, le mouvement apparent de la terre et son influence sur la définition du jour et du temps, la géométrie nécessaire pour le repérage de la position du soleil et les relations liant cette position à la latitude et à l'angle horaire, les instruments de mesure de quelques grandeurs qui sont en relation avec l'évaluation de l'irradiation solaire; en fin du chapitre on donnera la procédure de calcul de l'irradiation solaire globale sur une surface horizontale hors atmosphère et au sol pour quelques sites algériens.

II-2- Rappels d'astronomie

II-2-1- Mouvement de la terre

La trajectoire de la terre autour du soleil est légèrement elliptique, ayant le soleil pour foyer et dont le rayon moyen est de $149,6.10^6$ km avec une variation de presque 1,7% au cours de l'année du fait de la légère excentricité de l'orbite terrestre, l'axe de rotation de la terre sur elle-même est inclinée de $23^{\circ}27'$ par rapport au plan de l'écliptique (plan de l'orbite terrestre) [5].

II-2-2- Mouvement apparent du soleil

Pour un observateur terrestre, le soleil décrit un cercle autour de l'axe de rotation de la terre, aux équinoxes le soleil s'élève à l'est, passe par la verticale à midi et se couche à l'ouest. Entre le 21 mars et le 21 septembre le soleil passe au nord de la verticale et pendant la deuxième moitié au solstices il passe au sud de la verticale, l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale au midi solaire est respectivement $\pm 23^{\circ}27'$.

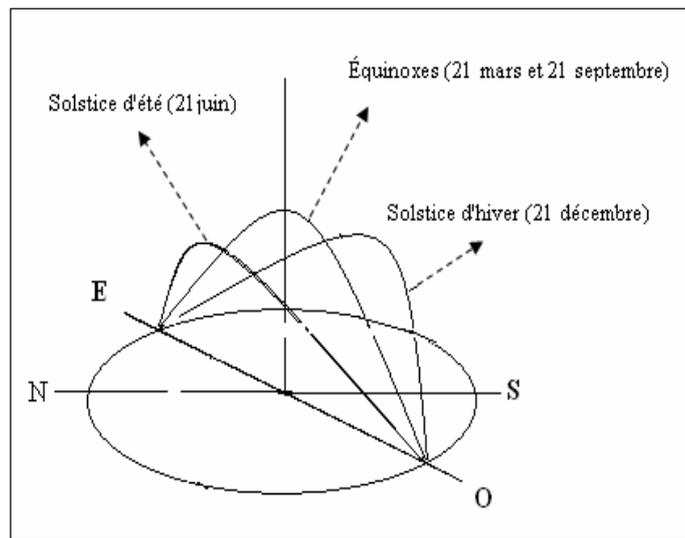


Figure II.1 : Mouvement apparent du soleil en un point de l'équateur

Remarque

Il est à noter qu'aux équinoxes le soleil décrit un cercle de 180° dans la voûte céleste à raison de 15° par heure ce qui implique des jours de 12 heures, à midi solaire l'angle que fait la direction du soleil avec l'axe verticale est égal à la latitude du lieu (L).

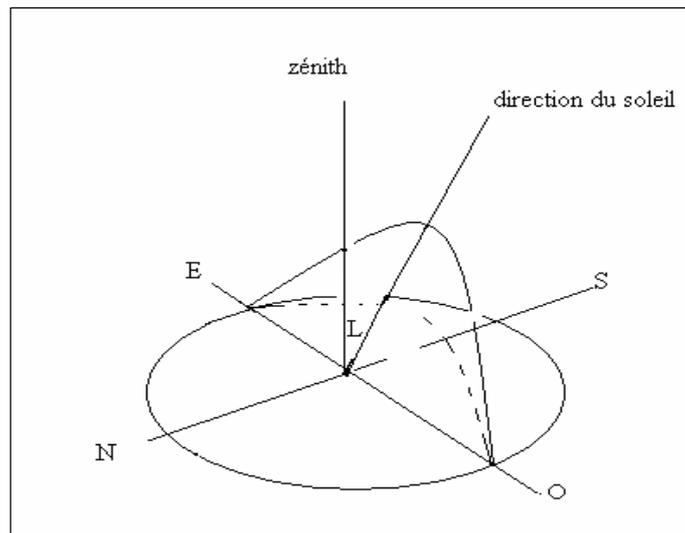


Figure II.2 : Mouvement apparent du soleil aux équinoxes

Le mouvement apparent du soleil (de même pour la terre) n'est pas uniforme (pas la même trajectoire, pas la même vitesse) et cela donne plusieurs définitions du jour et du temps [5].

II-2-2-1- Définition du jour

Si on considère une direction fixe dans l'espace, il faudra 23h 56m 4s à un observateur pour la retrouver dans la même direction après un tour complet de la terre autour de son axe. Mais ce n'est pas cette durée qui est perceptible. On aura beaucoup plus l'impression que la terre a accompli un tour si c'est le soleil qui revient à la même position. C'est ce retour du soleil dans la même direction qui définit le jour moyen qui dure en moyenne, 24 heures. Nous définissons donc le jour comme la durée qui sépare deux passages consécutifs du soleil par le méridien du lieu. Mais une telle durée est variable ; parce que l'orbite apparente du soleil autour de la terre (en fait, l'orbite réelle de la terre autour du soleil) n'est pas un cercle mais une ellipse, ainsi la vitesse apparente du soleil sur la sphère céleste varie selon sa position sur sa trajectoire. Le soleil passera donc au méridien soit en avance quand il va plus vite, soit en retard quand il ralentit, par rapport à une position moyenne [8,11].

II-2-2-2- Le jour solaire vrai

Le jour solaire vrai est l'intervalle de temps compris entre deux passages consécutifs du soleil au même méridien. Il est très variable ; d'une part, parce que la vitesse du soleil sur l'écliptique est variable, diminuant du périhélie à l'aphélie pour augmenter, au contraire, de l'aphélie, au périhélie; d'autre part, du fait de l'obliquité de l'écliptique [8, 11].

II-2-2-3- Jour solaire moyen

Le jour solaire moyen est la moyenne d'un très grand nombre de jours solaires vrais. Le temps moyen a été imaginé pour remédier à l'inégalité des jours solaires vrais. Il est réglé sur l'hypothèse de deux soleils fictifs; le premier, parcourant l'écliptique d'un mouvement uniforme, ce qui corrige l'inégalité de vitesse du soleil vrai, et passant en même temps que ce dernier au périhélie et à l'aphélie; le second, le soleil moyen, parcourant l'équateur avec la même vitesse que le premier parcourant l'écliptique, ce qui corrige l'obliquité de celle-ci, et passant en même temps que lui à l'équinoxe. Le mouvement du soleil moyen et, du fait que le soleil moyen parcourt l'équateur avec une vitesse constante, l'intervalle entre deux passages consécutifs de ce soleil au

méridien d'un même lieu est appelé jour solaire moyen (également appelé jour moyen) est aussi constant [8, 11].

II-2-2-4- Équation du temps

La différence entre l'heure moyenne, telle qu'elle se trouve déterminée par le temps moyen, et l'heure vraie, telle qu'elle résulte du temps solaire, s'appelle l'équation du temps.

$$\text{Équation du temps} = \text{Temps solaire moyen} - \text{Temps solaire vrai}$$

L'équation du temps est la résultante de deux effets :

- a) l'équation du centre due à l'excentricité de l'orbite terrestre (la trajectoire de la terre est une ellipse que l'on veut ramener à un cercle sur la sphère céleste).
 - b) la réduction à l'équateur due à l'obliquité de l'écliptique (la terre ne tourne pas dans son plan équatorial autour du soleil) puisque l'on mesure le passage du soleil au méridien du lieu par rapport au plan équatorial terrestre dans lequel il faut donc le ramener.
- Ainsi, l'équation du temps donne le nombre de minutes après le midi moyen pour que l'on soit au midi vrai, par exemple: si l'équation du temps est égale à +8 minutes, alors il sera midi vrai à 12h 8m du temps moyen [8,11].

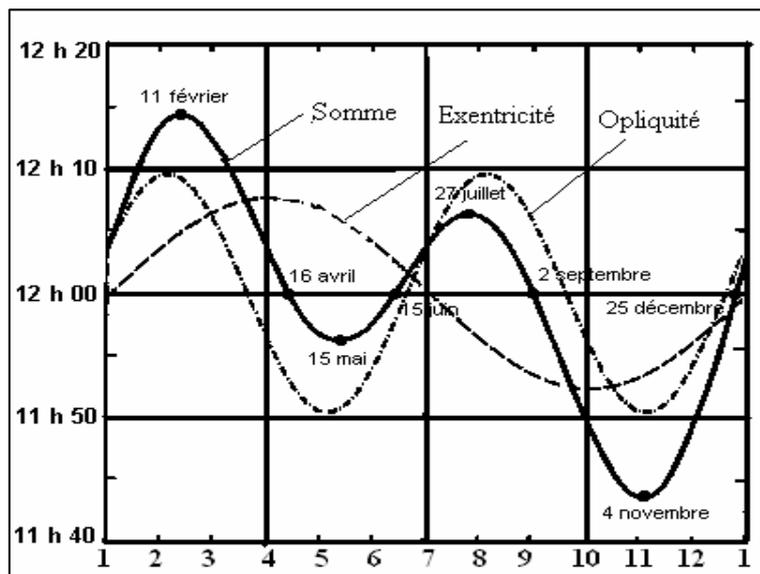


Figure II.3 : Evolution de l'équation du temps au cours de l'année [11]
 -L'excentricité (équation du centre)
 -L'obliquité (réduction à l'équateur)

II-2-2-5- Le jour civil

C'est l'intervalle de temps que la terre doit mettre pour faire un tour complet sur elle-même, lorsque l'on suppose qu'elle est animée d'une vitesse moyenne invariable, et qu'elle exécute 365,2425 révolutions dans une année moyenne du calendrier grégorien [11].

II-2-2-6- Le temps universel

C'est le temps civil de Greenwich, qui joue un rôle particulier, du fait que les longitudes sont comptées à partir du méridien de Greenwich [11].

II-3- Géométrie solaire

Le repérage de la position du soleil dans le ciel nécessite la connaissance de deux angles qui sont [1].

-La hauteur solaire (h)

-L'azimut solaire (a)

II-3-1- L'azimut solaire

L'azimut (a) est l'angle entre la direction sud et la projection sur le plan horizontal local de la droite reliant la terre au soleil. L'angle est mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord et dans le sens contraire dans l'hémisphère sud (Figure II.4) [1, 27].

II-3-2- L'hauteur solaire

L'hauteur solaire (h) est l'angle entre la droite joignant le centre du disque solaire au point d'observation et le plan horizontal passant par le point d'observation (Figure II.4). Le complément de (h) ou l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale est appelé l'angle zénithal. Le zénith est le point le plus élevé de l'hémisphère céleste, se trouvant directement à la verticale de l'observateur [1, 27].

Remarque

L'azimut solaire est négatif le matin (direction est), nul ou égal à 180° à midi et positif l'après-midi (direction ouest), sur tout le globe.

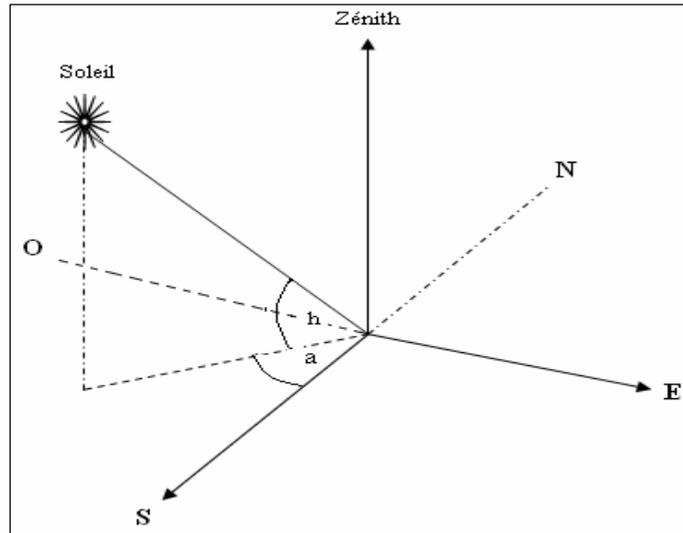


Figure II.4 : Repérage du soleil

II-3-3- Déclinaison

La déclinaison est l'angle que fait le soleil au maximum de sa course (midi solaire) par rapport au plan équatorial. La déclinaison est nulle aux équinoxes et elle varie entre $-23,45^\circ$ le 21 décembre et $+23,45^\circ$ le 21 juin. Sa valeur en degrés, est donnée par l'équation de Cooper [1, 9, 16,27].

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(2\pi \frac{284 + n}{365}\right) \quad (\text{II.1})$$

Où

n : est le jour de l'année (c.-à-d. $n = 1$ pour le 1^{er} janvier, $n = 32$ pour le 1^{er} février, etc.).

Cette expression estime la déclinaison avec une erreur maximale de (3') ; et pour plus d'exactitude on utilise un développement en série de Fourier qui donne la déclinaison en radian [16].

$$\delta = (0.006918 - 0.399912 \cos \Gamma + 0.070257 \sin \Gamma - 0.006758 \cos 2\Gamma + 0.000907 \sin 2\Gamma - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.00148 \sin 3\Gamma) \quad (\text{II.2})$$

Avec:

$$\Gamma = \frac{2\pi(n-1)}{365} \quad (\text{II.3})$$

II-3-4- L'angle horaire

L'angle horaire du soleil qu'on note (w) est le déplacement angulaire du soleil autour de l'axe polaire, dans sa course de l'est à ouest, par rapport au méridien local. La valeur de l'angle horaire est nulle à midi solaire, négative le matin, positive en après-midi et augmente de 15° par heure (un tour de 360° en 24 heures) [1, 16,27].

Remarque

Les équinoxes sont les deux dates de l'année où le soleil traverse le plan équatorial, sa déclinaison est alors nulle et les durées du jour et de la nuit sont égales; l'équinoxe d'automne intervient vers le 21 septembre et l'équinoxe de printemps vers le 21 mars. Le solstice d'été (vers le 21 juin) est la période au cours de laquelle la durée qui sépare le lever et le coucher du soleil cesse de croître (maximum 16 h 8 mn). Le solstice d'hiver (vers le 21 décembre) est la période au cours de laquelle cette durée cesse de décroître (minimum 8h 12mn) (Figure II.5).

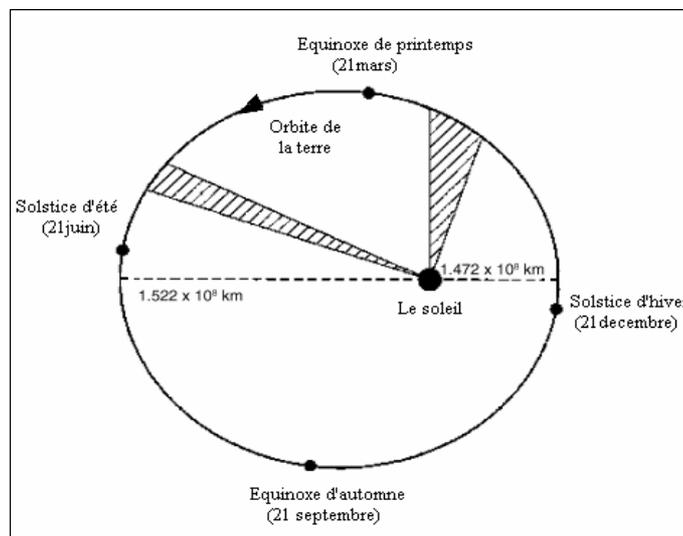


Figure II.5 : Equinoxes et solstices

II-4- Relations de repérage du soleil

La position du soleil peut être déterminée à l'aide de deux expressions, dans lesquelles intervient la déclinaison, la latitude et l'angle horaire [9].

$$\sin(h) = \sin(L) \cdot \sin(\delta) + \cos(L) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(w) \quad (\text{II.4})$$

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \cdot \cos(w)}{\cos(h)} \quad (\text{II.5})$$

Tel que

L : la latitude du lieu

δ : la déclinaison du soleil

w : l'angle horaire

h : la hauteur du soleil

a : l'azimut du soleil

II-5- La durée du jour

C'est l'intervalle de temps au cours duquel le soleil se trouve au dessus de l'horizon, si on néglige le phénomène de la réfraction atmosphérique cette intervalle s'obtient à partir des heures de lever et du coucher du soleil [9, 27].

La hauteur du soleil est nulle au coucher (h=0) donc.

$$\sin(h) = \sin(L) \cdot \sin(\delta) + \cos(L) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(w_c) = 0 \quad (\text{II.6})$$

Où w_c est l'angle horaire du soleil au coucher.

Donc.

$$\cos(w_c) = -\text{tg}(L) \cdot \text{tg}(\delta) \quad (\text{II.7})$$

Et l'heure solaire au coucher est donc.

$$TS_c = 12 + \frac{w_c}{15} \quad (\text{II.8})$$

Pour le lever du soleil on pose ($w_l = -w_c$) et l'heure solaire au lever est.

$$TS_l = 12 + \frac{w_l}{15} \Rightarrow TS_l = 12 - \frac{w_c}{15} \quad (\text{II.9})$$

La durée du jour (S_0) est l'intervalle de temps entre l'heure du coucher et l'heure du lever du soleil.

$$S_0 = TS_c - TS_l \quad (\text{II.10})$$

Alors

$$S_0 = \frac{2}{15} w_c = -\frac{2}{15} \cos^{-1}[\text{tg}(L).\text{tg}(\delta)] \quad (\text{II.11})$$

Remarque

Ce qui vient d'être dit pour la durée du jour reste vrai dans le cas où l'horizon à une hauteur nulle, dans les régions montagneuses (h) est l'angle sous lequel on voit l'horizon au lever du jour.

II-6- Calcul de l'irradiation solaire globale sur une surface horizontale

II-6-1- L'irradiation solaire globale à la limite de l'atmosphère

En dehors de l'atmosphère le rayonnement solaire incident se réduit à sa composante directe. Pour un lieu donné le flux reçu par une surface horizontale est donné par.

$$I_{oh} = I_{cs} \cdot \sin(h) \quad (\text{II.12})$$

I_{oh} : Flux sur une surface horizontale et pour une hauteur (h)

I_{cs} : La constante solaire

Pour avoir l'irradiation solaire globale (G_0 : MJ/m².jour) sur une surface horizontale à la limite supérieure de l'atmosphère on intègre l'expression précédente sur l'intervalle d'un jour (du lever au coucher du soleil) [15,27], ce qui donne le résultat suivant.

$$G_0 = \frac{24I_{cs}}{\pi} \left[1 + 0.0033 \cdot \cos\left(\frac{360.n}{365}\right) \right] \cdot Z \quad (\text{II.13})$$

n : est le jour de l'année (c.-à-d. $n=1$ pour le 1^{er} janvier)

Le paramètre (Z) est donné par.

$$Z = \left(\cos(L) \cos(\delta) \sin(w) + \frac{\pi}{180} \cdot w \cdot \sin(L) \sin(\delta) \right) \quad (\text{II.14})$$

On remarque que l'irradiation solaire globale (G_0) sur une surface horizontale en dehors de

l'atmosphère dépend de la constante solaire (I_{cs}), de la latitude du lieu considéré (L), de la déclinaison (δ) et de l'angle horaire (w).

II-6-2- La fraction d'insolation et l'humidité relative

On juge important de connaître les instruments et les procédures de mesure de la fraction d'insolation, de l'irradiation solaire globale au sol et de l'humidité relative moyenne de l'air puisque ces paramètres vont être utilisés dans les modèles d'estimation de l'irradiation solaire globale.

II-6-2-1- La fraction d'insolation

On dit qu'il y a insolation lorsque le disque solaire est bien visible sur le fond diffus du ciel, la durée d'insolation d'une journée est la durée pendant laquelle l'éclairement énergétique du rayonnement solaire direct dépasse un seuil fixé par convention à 120 w.m^{-2} . En l'absence de nuage la durée d'insolation est pratiquement égale à la durée du jour ; les durées d'insolation mensuelle et annuelle sont un simple cumul des durées d'insolation des diverses journées. L'instrument de mesure de la durée d'insolation s'appelle l'héliographe.

Soit (S) la durée d'insolation mesurée et (S_0) la durée du jour (le temps entre l'heure du coucher et l'heure du lever du soleil.), on définit la fraction d'insolation (σ) comme suit [16].

$$\sigma = \frac{S}{S_0} \quad (\text{II.15})$$

Avec:

$$S_0 = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan(L) \cdot \tan(\delta)) \quad (\text{II.16})$$

a) L'héliographe

La durée d'insolation est mesurée à l'aide d'héliographes en dixièmes d'heures. On distingue les héliographes classiques et automatiques.

• L'héliographe Campbell Stokes

Il se compose essentiellement d'une sphère de verre de 0,10m de diamètre fixée concentriquement sur un support de forme circulaire. Celui-ci est muni de trois paires de rainures

dans lesquelles une bande de carton spécial peut être passée (Figure II.6). Elles permettent d'installer la bande de carton à différents niveaux en fonction de la saison. Lorsque le soleil brille, son image se forme sur la bande de carton qui est carbonisée à cet emplacement. Comme la terre tourne, il n'y a pas besoin de mécanique; la lumière qui passe par une fente se déplace régulièrement et quand il n'y a pas de soleil, la feuille reste vierge. Les bandes sont graduées en heures et le dépouillement des données consiste à mesurer la longueur des traces et à les convertir en temps. Ce type de mesure est relativement imprécis car la combustion du carton est possible à différents degrés et loin d'être toujours évidente à discerner.

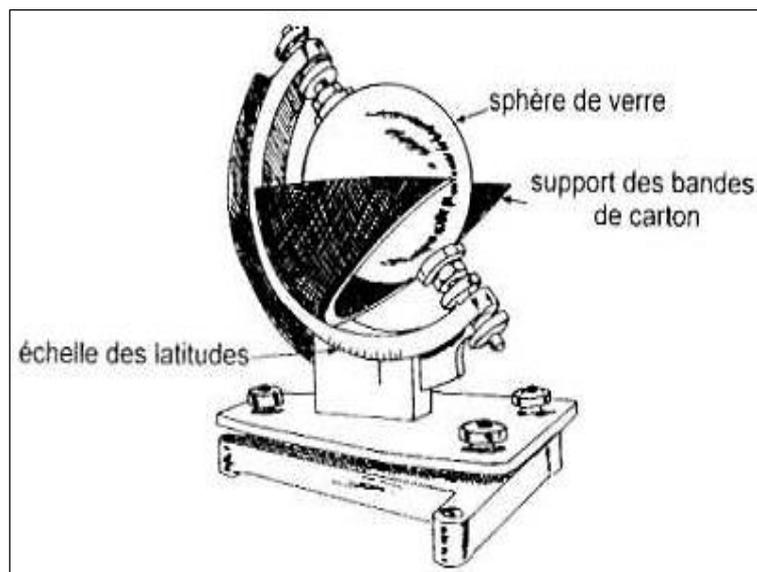


Figure II.6: Schéma d'un héliographe (Source : Guyot, 1997)

• L'héliographe automatique

Il permet l'enregistrement de la durée d'insolation dans les stations météorologique automatiques. Il existe deux types d'héliographes automatiques

- Les instruments statiques

Ils comportent deux cellules photovoltaïques dont l'une reçoit le rayonnement solaire global et l'autre uniquement le rayonnement diffus grâce à un écran. Lorsque le soleil est présent, l'ensemble des deux cellules délivre un signal de déséquilibre à partir d'un seuil donné.

- Les héliographes dynamiques

Ils possèdent un élément tournant qui permet d'analyser le contraste existant entre la luminance du ciel et celle du soleil. Les solarigraphes utilisent les couples thermo électriques formés par la superposition de thermocouples montés en série pour produire un courant électrique proportionnel au rayonnement reçu.

b) Le pyranomètre

Les pyranomètres sont des instruments permettant de mesurer le rayonnement d'origine solaire qui parvient sur une surface horizontale pour un domaine spectral allant de 0.3 à 3 μm à l'aide de thermopiles. Il existe deux grands types de thermopiles utilisées dans ces pyranomètres.

• Les thermopiles à échanges thermiques "verticaux"

Qui mesurent l'écart thermique entre une surface réceptrice noire et le boîtier du pyranomètre.

• Les thermopiles à échanges thermiques "horizontaux"

Qui mesurent l'écart thermique entre une surface noire et une surface blanche situées dans le même plan et exposées au soleil.

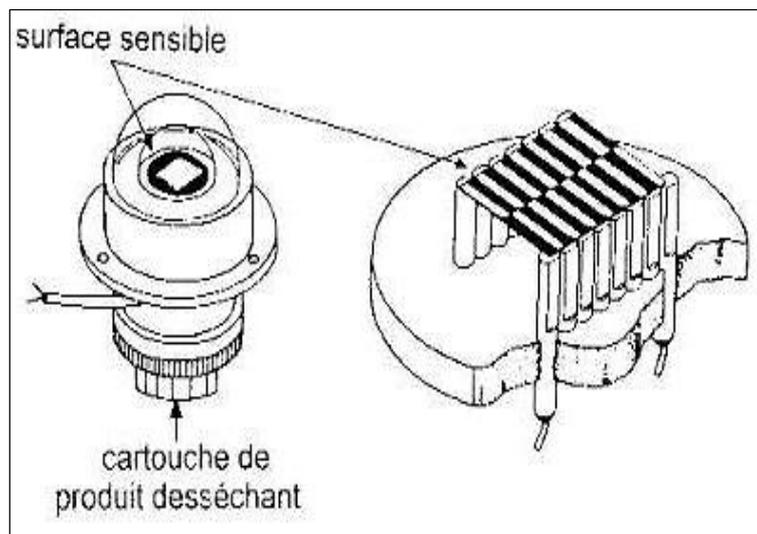


Figure II.7: Représentation schématique d'une thermopile et du pyranomètre Kipp – Zonen (Source : Guyot, 1997)

Dans le premier cas, lorsque la pile reçoit un flux de rayonnement, un gradient thermique apparaît à sa surface entre soudures paires et impaires car ces dernières sont prévues pour ne pas pouvoir évacuer la chaleur qu'elles captent autrement que vers les soudures paires. De ce fait, Elles sont systématiquement plus chaudes que celles-ci et une force électromagnétique proportionnelle au flux énergétique reçu apparaît aux bornes de la thermopile. Les pyranomètres à thermopiles à échanges "horizontaux" sont constitués par une thermopile plane de type "noir et blanc". Lorsque le capteur est éclairé, un écart thermique apparaît entre parties blanches et parties noires. Un pont thermique permet d'évacuer la chaleur captée par les surfaces noires vers le boîtier et d'obtenir en sortie une force électromagnétique proportionnelle au flux reçu.

II-6-2-2- L'humidité relative

L'humidité relative moyenne de l'air notée (R) ou degré d'hydrométrie est le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau contenue dans l'air (P_{vap}) et la pression de vapeur saturante ou tension de vapeur d'eau à la même température (P_{sat}). Elle est souvent exprimée en pourcentage [27].

$$R = \frac{P_{vap}}{P_{sat}} \times 100 \% \quad (\text{II.17})$$

Lorsque la saturation est atteinte (R=100%) des gouttelettes d'eau apparaissent dans l'air et l'humidité relative ne varie plus. On a création d'un brouillard, l'humidité relative est mesurée à l'aide d'un hygromètre.

• L'hygromètre

- Hygromètres à capteur organique

Un certain nombre de matières organiques comportant de longues chaînes moléculaires ont la propriété d'absorber des molécules d'eau et de s'allonger ou de se rétracter avec l'humidité de l'air. C'est le cas des cheveux humains dont la longueur augmente de 2 à 2,5% lorsque l'humidité relative de l'air passe de 0 à 100%. Un hygromètre classique fonctionne sur le principe d'une double mèche de cheveux tendue verticalement. L'allongement du capteur est amplifié par un double jeu de leviers. Le signal reçu est enregistré graphiquement sur le papier recouvrant le tambour. L'allongement des cheveux n'est pas linéaire mais peut être ajusté par une courbe

logarithmique. D'autres matières peuvent être utilisées comme le Nylon, le coton ou le péritoine de bœuf ou de porc. Les hygromètres à capteur organique présentent de nombreux inconvénients du point de vue métrologique et leur utilisation tient surtout à leur simplicité et leur faible coût. Leur précision est limitée ($\pm 5\%$) et l'étalonnage doit être répété fréquemment.

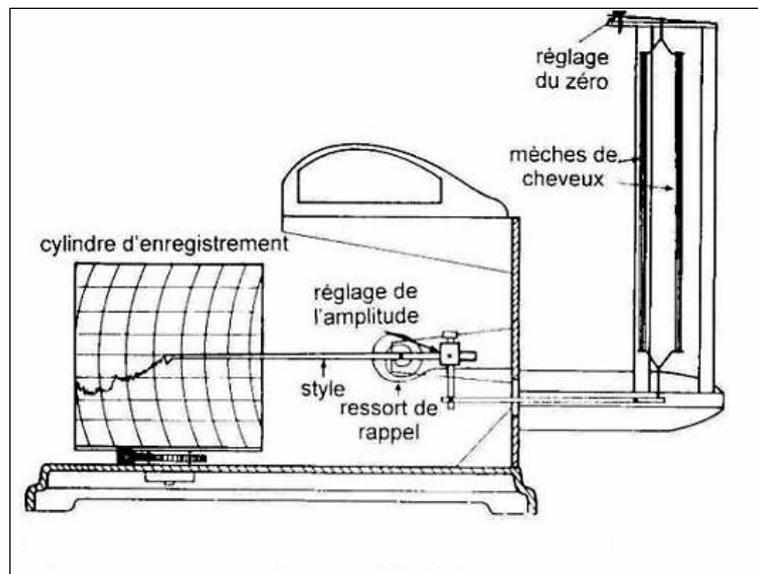


Figure II.8: Représentation schématique d'un hydrographe à cheveux (Source : Guyot, p394)

- Hygromètres capacitifs

Dans son principe, un hygromètre capacitif est constitué par une lame de polymère constituant un condensateur. Lorsque le polymère adsorbe les molécules d'eau, son volume augmente ainsi que la distance entre les électrodes, ce qui se traduit par une variation de capacité du condensateur. Le signal mesuré correspond aux variations de fréquence du capteur. Ces hygromètres ont une réponse linéaire à $\pm 1\%$ entre 0% et 80% d'humidité relative. Au-delà; la linéarité est moins bonne et l'écart peut atteindre $\pm 3\%$ au voisinage de la saturation.

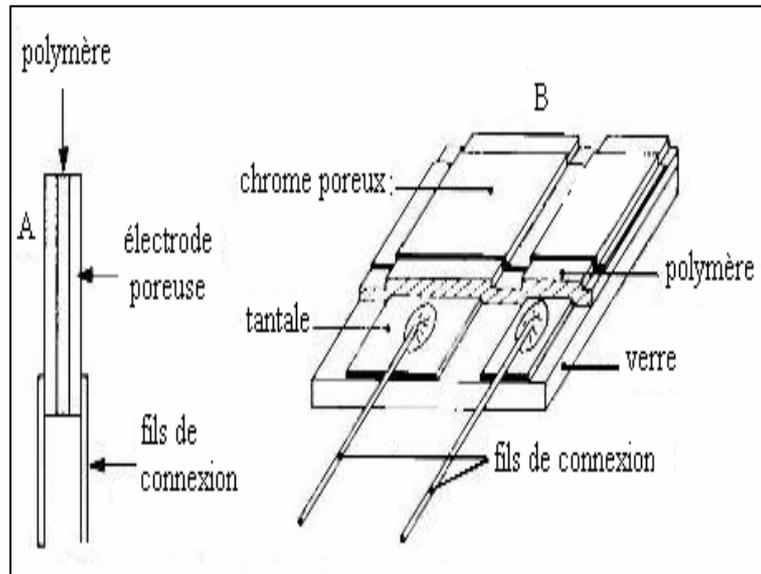


Figure II.9: Schéma de principe d'un hygromètre capacitif (A) et réalisation pratique du capteur (B) (Source : Guyot, 1997)

- Hygromètres à condensation

La mesure de la température de rosée permet de connaître l'humidité absolue de l'air. Pour atteindre ce point de rosée, il suffit de refroidir progressivement une surface plane et lisse jusqu'à ce qu'un film d'eau se condense. La température de surface est alors très proche de celle du point de rosée. Un hygromètre à condensation comporte un petit miroir refroidi. Il est éclairé par une diode électroluminescente et lorsqu'il n'est pas recouvert de buée, le faisceau de lumière incident est réfléchi vers le boîtier de l'hygromètre. Lorsque de la buée apparaît, le miroir diffuse la lumière qui impressionne alors un détecteur (phototransistor). Ce détecteur est relié au circuit de régulation de la température et commande alors le réchauffement du miroir. La rosée disparaît et entraîne de nouveau la commande de refroidissement et ainsi de suite. Grâce à un système de régulation approprié, il est possible de maintenir un dépôt constant de condensation sur le miroir et il suffit alors d'enregistrer sa température à l'aide d'un microcapteur thermique, délivrant un signal électrique. Ces hygromètres fonctionnent généralement pour une gamme de température allant de -80°C à $+100^{\circ}\text{C}$ avec une incertitude qui peut être réduite à $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$. Les seuls inconvénients de l'instrument sont son prix élevé et sa complexité.

II-7-Estimation de l'irradiation solaire globale sur quelques sites en Algérie

A long terme les valeurs moyennes instantanées (horaires, journalières, mensuelles) de l'irradiation solaire globale ou diffuse sur une surface horizontale sont demandées dans plusieurs applications de l'énergie solaire, tel que l'agronomie, l'écologie et les systèmes photovoltaïque et thermique. Les valeurs mesurées de ces grandeurs sont disponibles pour peu de sites, dans d'autres il n'existe aucune mesure, c'est là qu'intervient l'idée d'estimer ces grandeurs à partir de modèles théoriques ou empiriques développés sur la base des valeurs mesurées. l'estimation de l'irradiation solaire à partir de la durée d'insolation constitue un des problèmes techniques fondamentaux dans les applications de l'énergie solaire, la relation générale incluant la radiation solaire extraterrestre et des facteurs astronomiques et météorologiques peut être écrite sous la forme explicite suivante [16].

$$G / G_0 = a + b.\sigma + c.T + d.R + e.h + f.\delta + g.L \quad (\text{II.18})$$

Avec

- a, b, c, d, e, f, g : les paramètres du modèle.
- h : l'élévation du soleil.
- T, R : les paramètres météorologiques de la température et de l'humidité relative.
- δ et L : les paramètres astronomiques de la déclinaison et de la latitude.

Cependant, on trouve dans la littérature de l'énergie solaire d'autres modèles à base de la fraction d'insolation seule, tel que le modèle quadratique, le modèle cubique, le modèle logarithmique et le modèle exponentiel. Ainsi que les modèles de la logique floue et des réseaux de neurones.

•Procédures de calcul

Dans le présent travail six modèles d'estimation sont utilisés pour évaluer la radiation solaire globale sur quatre sites en Algérie à savoir, Alger, Oran, Bechar et Tamanrasset en exploitant comme données disponibles la fraction d'insolation, la température moyenne de l'air, l'humidité relative moyenne, ainsi que les coordonnées géographiques des quatre sites (TableauII.1).

Site	Latitude (°) N	Altitude (m)	Longitude (°)
Alger	36.43	25	3.15 E
Oran	35.38	99	0.37 W
Bechar	31.38	806	2.15 W
Tamanrasset	22.47	1378	5.31 E

Tableau II.1 : Coordonnées des quatre sites [9]

II-8-Conclusion

L'irradiation solaire globale pour un site donné est fonction de plusieurs facteurs; astronomiques et météorologiques. Dans ce chapitre on a parlé de ces facteurs astronomiques et de leurs définitions, comme on a présenté les instruments de mesure et les définitions de quelques facteurs météorologiques.

Chapitre III

Présentation des modèles d'estimation de l'irradiation solaire globale

III-1- Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les six modèles utilisés dans notre étude pour l'estimation de l'irradiation solaire globale à savoir, le groupe des modèles linaires (quatre modèles), le modèle de la logique floue et le modèle des réseaux de neurones. En fin on évaluera les paramètres statistiques sur lesquels on s'appuie pour faire une comparaison entre les résultats donnés par ces différents modèles.

III-2- Groupe des modèles non linaires

III-2-1- Premier modèle (modèle d'Angstrom-Prescott) [16]

L'irradiation solaire et la durée d'insolation dépendent des effets combinés d'événements astronomiques et météorologiques. La première relation est arrivée dans la forme d'une expression linéaire (cas particulier) comme suggérée par Angstrom (1924). Sa formule a été employée dans des applications pratiques pendant plusieurs années pour estimer l'irradiation solaire globale quotidienne, mensuelle, et annuelle à partir des mesures de la durée d'insolation, selon l'expression suivante.

$$\frac{G}{G_0} = a + b \cdot \sigma \quad (\text{III.1})$$

Tel que

a et b : sont les paramètres du modèle qui vont être déterminés par la méthode des moindres carrés à partir d'une base de données.

G_0 : étant l'irradiation solaire globale mensuelle hors atmosphère ($\text{MJ/m}^2 \cdot \text{jour}$).

G: l'irradiation solaire globale mensuelle au sol ($G: \text{MJ/m}^2 \cdot \text{jour}$).

σ : La fraction d'insolation.

III-2-2- Le deuxième modèle [43]

Dans ce modèle on utilise la fraction d'insolation et un paramètre climatique à savoir la température moyenne de l'air son expression est la suivante.

$$\frac{G}{G_0} = a + b.\sigma + c.T_n \quad (\text{III.2})$$

a, b, c: sont les paramètres de ce modèle qui vont être déterminés par la méthode des moindres carrés et (T_n) la moyenne mensuelle de la température de l'air normalisée (T/T_{\max})

III-2-3- Le troisième modèle [43]

Dans ce modèle on utilise la fraction d'insolation et un paramètre climatique, qui est l'humidité relative moyenne de l'air, il est donné par l'expression suivante.

$$\frac{G}{G_0} = a + b.\sigma + c.R \quad (\text{III.3})$$

a, b, c: sont les paramètres de ce modèle qui vont être déterminés par la méthode des moindres carrés.

R: L'humidité relative moyenne de l'air

III-2-4- Le quatrième modèle [43]

Dans ce modèle on exploite les trois paramètres climatiques, la fraction d'insolation, la température moyenne de l'air et l'humidité relative moyenne. Son expression est la suivante.

$$\frac{G}{G_0} = a + b.\sigma + c.T_n + d.R \quad (\text{III.4})$$

a, b, c,d: sont les paramètres de ce modèle qui vont être déterminés par la méthode des moindres carrés.

T_n, R : étant respectivement, la moyenne mensuelle de la température de l'air normalisée et l'humidité relative moyenne de l'air.

III-3- Le cinquième modèle (modèle de la logique floue) [16,27].

III-3-1- Exemples introductifs

Pour mettre en évidence le principe fondamentale de la logique floue, on présente un exemple simple, celui de la classification des personnes en trois ensembles «jeune», «entre deux âges » et «âgé». Selon la logique classique (logique binaire), qui n'admet pour les variables que les deux valeurs 0 et 1, une telle classification pourrait se faire comme dans la figure (III.1) Toutes les personnes âgées de moins de 25 ans sont alors considérées des jeunes et toutes les personnes âgées de plus de 50 ans comme des vieux.

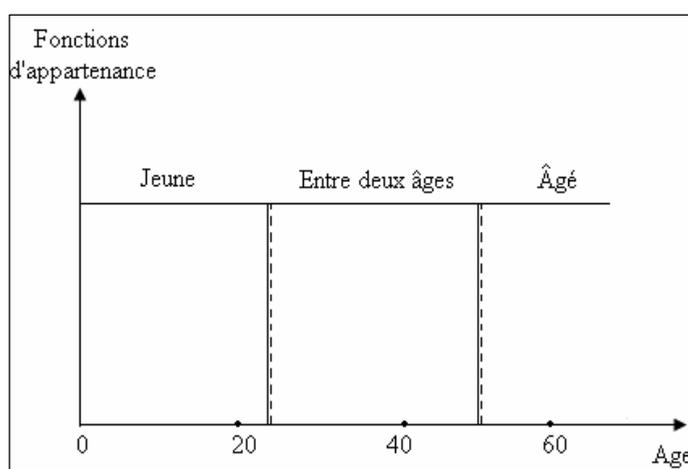


Figure III.1 : Classification des personnes en trois ensembles selon la logique classique [19]

Cependant, une telle logique de classification n'est même pas logique. Pourquoi une personne, lorsqu'elle a eu 50 ans, doit-elle être considéré comme appartenant à l'ensemble âgés ? En réalité, un tel passage se fait progressivement. La logique floue, dont les variables peuvent prendre des valeurs entre 0 et 1, permet de tenir compte de cette réalité. Les limites ne varient pas soudainement, mais progressivement. La figure III.2 montre une classification possible pour l'exemple précédent, cette fois-ci à l'aide de la logique floue. Ainsi une personne de 25 ans appartient à l'ensemble «jeune» avec une valeur $\mu=0.75$ de la fonction d'appartenance et à l'ensemble «entre deux âges» avec une valeur $\mu=0.25$. Par contre une personne âgée de 65 ans appartient avec une valeur $\mu=1$ de la fonction d'appartenance à l'ensemble «âgé» [19].

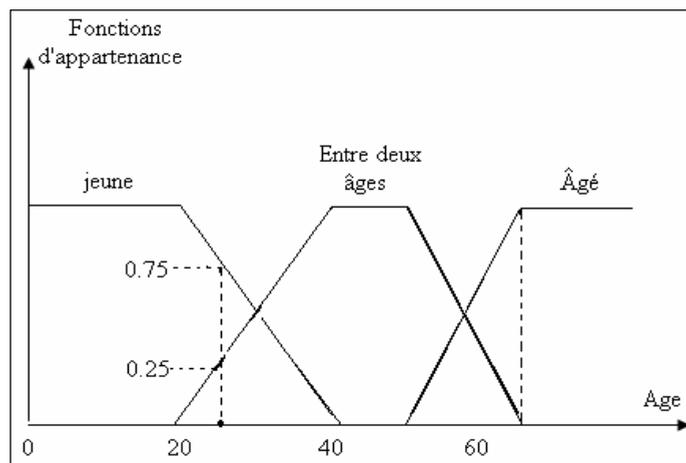


Figure III.2 : Classification des personnes en trois ensembles [19]

III-3-2- Introduction

La logique floue sert à représenter des connaissances incertaines et imprécises. La commande floue sert à prendre une décision même si l'on ne peut pas estimer les entrées/sorties qu'à partir de prédicats vagues ou lorsque ses entrée/sorties sont entachées d'erreurs que l'on ne peut évaluer que grossièrement. On comprend l'intérêt de faire entrer l'approche floue dans la régulation des processus industriels, pour lesquels les informations disponibles sont souvent imprécises et incertaines. Le savoir faire de l'opérateur, constitué de règles simples, lui permet de conduire chaque machine plus correctement parfois qu'un algorithme classique. C'est en 1965, que le concept de sous ensemble floue a été proposé par L. A. Zadeh, automaticien de réputation internationale, professeur à l'université de Berkeley en Californie, qui a contribué à la modélisation de phénomène sous forme floue. En 1974, M. Mamdani expérimentait la théorie énoncée par Zadeh sur une chaudière à vapeur, matériel dont on connaît la complexité, en introduisant ainsi la commande floue dans la régulation d'un processus industriel. Plusieurs applications ont alors vu le jour en Europe, pour des systèmes parfois très complexes. La logique floue était introduite au Japon dès 1985 grâce au chercheur japonais M. Sugeno [19, 21,29].

III-3-3- Le concept de la logique floue [16, 19, 21, 27,29]

III-3-3-1- Principe de la logique floue

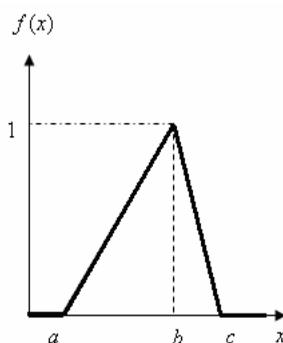
Le principe du raisonnement par logique floue s'approche de la démarche humaine c'est-à-dire que les variables ne sont pas des variables logiques (logique binaire) mais des variables linguistiques, proches du langage humain, ce qui permet de considérer les objets en classes (ensembles) par l'introduction d'une fonction caractéristique (fonctions d'appartenances des objets à la classe) et qui prend des valeurs entre 0 et 1, de plus ces variables linguistiques sont traitées à l'aide de règles qui font références à une certaine connaissance du comportement du problème traité.

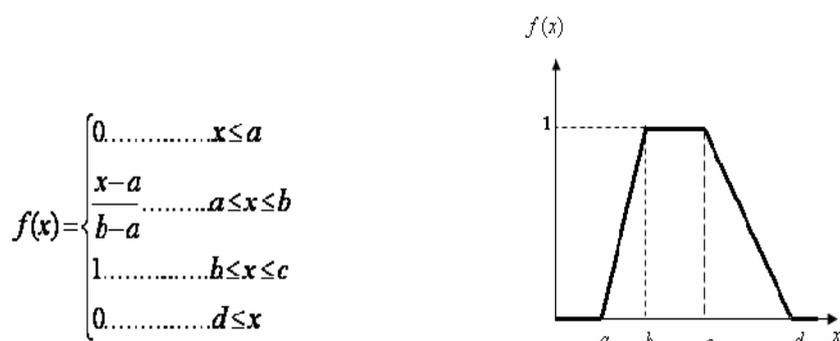
III-3-3-2- Les fonctions d'appartenance

Nous avons vu précédemment que l'on peut donner un coefficient de confiance à l'affirmation « (x) appartient à un ensemble (A) », par exemple: le coefficient d'appréciation de «une personne à 25 ans est jeune» vaut 0.75, alors on peut pour toute âge, donc pour tout (x) , définir ce coefficient directement à (x) . Cette propriété se présente facilement par une fonction dite d'appartenance $\mu_A(x)$ à valeurs dans $[0,1]$, l'argument (x) se rattache à la variable linguistique et l'indice (A) désigne l'ensemble concerné. De la même manière, une variable (y) appartiendra à un ensemble (B) avec une fonction d'appartenance notée $\mu_B(y)$. Il existe différentes formes de fonctions d'appartenances, les formes trapézoïdales et triangulaires sont les plus utilisées.

- Triangulaire

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \dots\dots\dots x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \dots\dots\dots a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & \dots\dots\dots b \leq x \leq c \\ 0 & \dots\dots\dots c \leq x \end{cases}$$



- Trapézoïdale**III-3-3-3- Les opérateurs de la logique floue**

Il est important de savoir composer entre les divers prédicats et leurs fonctions d'appartenance comme dans l'exemple, «l'air est froid **et** le vent est fort» ou dans «si l'air est froid **ou** si le vent est fort» il faut fermer la porte. Il apparaît deux types de composition (ET) et (OU) auxquels il faut ajouter la négation. Notons (x) et (y) les variables linguistiques caractérisant la température de l'air et la force du vent et $\mu_A(x)$, $\mu_B(y)$, $\mu_C(z)$, $\mu_D(z)$, $\mu_E(z)$, avec $z = \{x, y\}$, les fonctions d'appartenance associées aux propriétés respectives «l'air est froid», «le vent est fort», «l'air n'est pas froid», «l'air est froid et le vent est fort», «l'air est froid ou le vent est fort».

III-3-3-3-1- L'opérateur NON

L'opérateur (NON) appelé aussi «négation», ou «complément», caractérise la négation d'une propriété. La fonction d'appartenance de «l'air est froid» étant $\mu_A(x)$ alors la propriété «l'air n'est pas froid» peut être donnée par la fonction d'appartenance suivante.

$$\mu_C(z) = 1 - \mu_A(x)$$

La figure III.3 illustre cette relation.

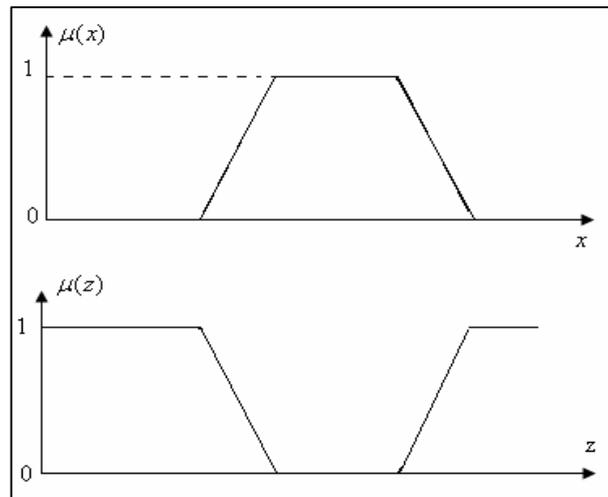


Figure III.3 : L'opérateur NON

III-3-3-3-2- L'opérateur ET

L'opérateur (ET), appelée aussi «intersection» permet de caractériser la satisfaction simultanée de deux propriétés, pour cela on pose.

$$\mu_D(z) = \mu_{A \text{ et } B}(z) = \mu_{A \cap B}(z) = \min \{ \mu_A(x), \mu_B(y) \}$$

On parle alors d'opérateur minimum. Cette opération est représentée sur la figure III.4

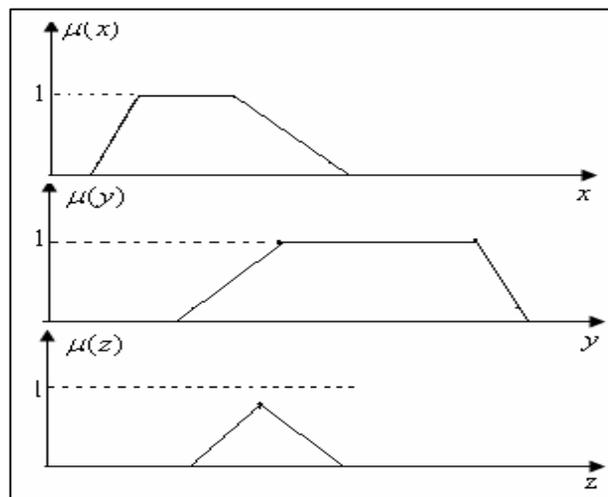
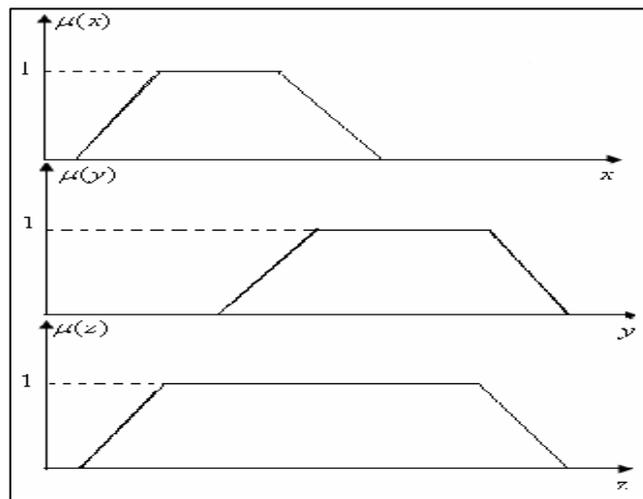


Figure III.4 : L'opérateur ET**III-3-3-3-3- L'opérateur OU**

L'opérateur (OU), appelée aussi «union», se réalise par l'utilisation du maximum appliquée aux fonctions d'appartenance $\mu_A(x)$ et $\mu_B(y)$ des deux ensembles A et B comme :

$$\mu_E(z) = \mu_{A \cup B}(z) = \mu_{A \cup B}(z) = \max \{ \mu_A(x), \mu_B(y) \}$$

La figure III.5 montre cette opération.

**Figure III.5** : L'opérateur OU**III-3-3-3-4- Univers de discours et classes d'appartenance**

On pourra décrire la variable «température» par un certain nombre de mots: par exemple «chaud», «froid», «tiède», «très chaud», «assez chaud», «assez froid», «très froid». Pour chacun de ces prédicats, on pourra donner une fonction d'appartenance. L'univers de discours d'une variable couvrira l'ensemble des valeurs prises par cette variable (figure III.6).

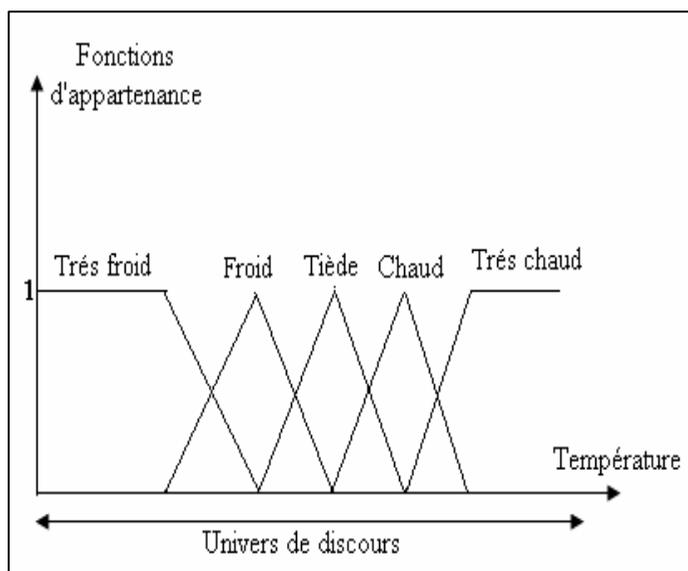


Figure III.6 : Univers de discours de la température

III-3-3-3-5- Schéma d'une commande floue

La mise en oeuvre d'une commande floue fait apparaître trois étapes.

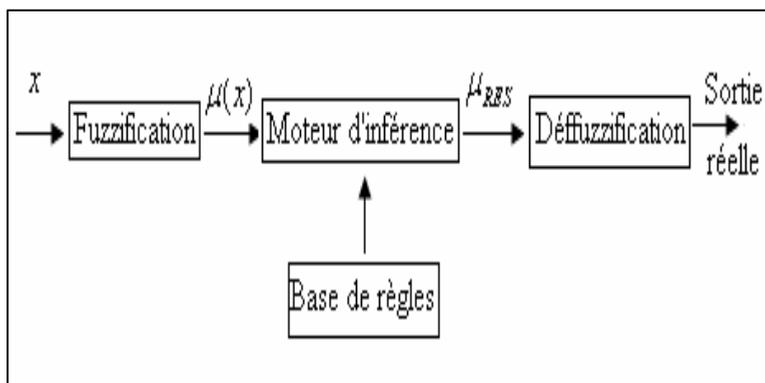


Figure III.7 : Schéma de la commande floue

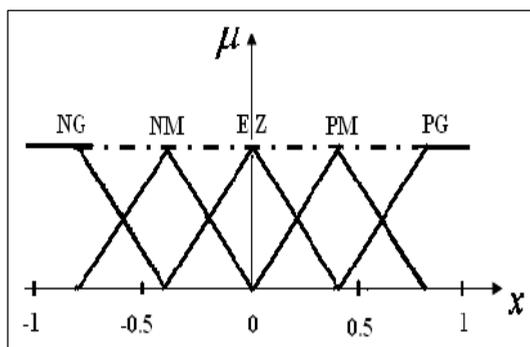
III-3-3-3-5-1- La fuzzification

Dans la fuzzification on définit tout d'abord un univers de discours, qui sera partitionner en classes pour chaque entrée, puis on attribut une fonction d'appartenance pour chacune de ces entrées, la fuzzification consiste alors à attribuer à la valeur réelle de chaque entrée, sa fonction

d'appartenance à chacune des classes préalablement définies, donc à transformer l'entrée réelle en un sous ensemble flou.

Exemple

Soit une grandeur (x) dans $[-1, 1]$ définie par cinq sous-ensembles flous NG (négatif grand), NM (négatif moyen), EZ (environ zéro), PM (positif moyen) et PG (positif grand).



Donc à chaque variable réelle d'entrée (x), on fait correspondre une variable linguistique (Négatif Grand, Négatif Moyen, ...).

III-3-3-3-5-2- Inférence ou base de règles

Cette étape est constituée d'une base de règles et d'un moteur d'inférence qui permet le calcul. Une règle est une combinaison entre variables linguistiques (d'entrées et de sortie), combinaison qui utilise les opérateurs "flous", tel que le "ET" et le "OU" (**min** et **max**). Le moteur d'inférence est le véritable cerveau du contrôleur "flou". Il effectue simplement une correspondance entre les fonctions d'appartenance des entrées et celles des sorties.

Exemple

Soit deux entrées (x_1) et (x_2) et une sortie (x_R), définies par les cinq sous-ensembles de l'exemple précédent. Une base de règles possible est comme suit :

Si (x_1 NG **et** x_2 EZ), **alors** x_R PG **ou**

Si (x_1 NG **et** x_2 PM), **alors** x_R PM **ou**

Si (x_1 NM **et** x_2 EZ), **alors** x_R PM **ou**

Si (x_1 NM et x_2 PM), alors x_R EZ ou

Si (x_1 NM et x_2 PG), alors x_R NM ou

.

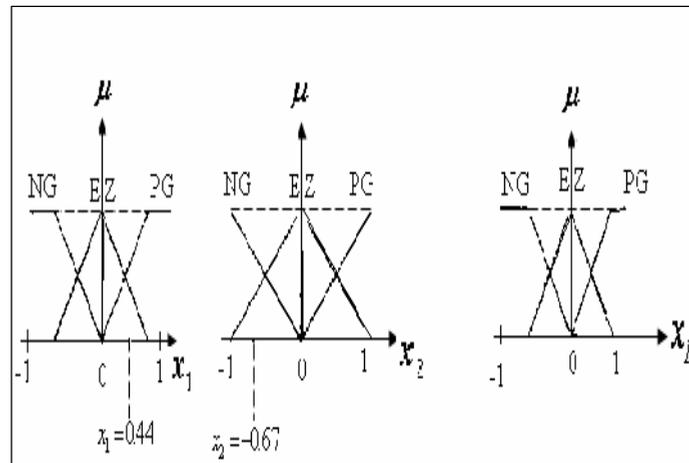
Si (x_1 PG et x_2 EZ), alors x_R NG.

Il est à remarqué qu'on n'est pas obligé de donner toutes les règles possibles; les règles sont élaborées sur la base des connaissances du problème, si on estime qu'il n'est pas nécessaire de donner toutes les règles c'est qu'on sait que les cas non considérés n'ont aucune influence.

III-3-3-5-3- Les différentes méthodes d'inférence

Exemple

Supposons que l'on ait deux entrées (x_1) et (x_2) et une sortie (x_R), toutes les trois définies par les sous-ensembles de la figure suivante.



Supposons que $x_1 = 0.44$, $x_2 = -0.67$ et que dans l'inférence, les deux règles suivantes aient été activées :

Si (x_1 PG et x_2 EZ), alors x_R EZ ou

Si (x_1 EZ ou x_2 NG), alors x_R NG.

L'étape suivante consiste à traduire les opérateurs (**et**, **ou**); plusieurs approches sont proposées pour la combinaison de ces différentes fonctions à savoir:

-Méthode d'inférence Max Min (Mamdani).

-Méthode d'inférence Max produit (Larsen).

-Méthode d'inférence somme- produit (Sugeno).

Le choix de la méthode dépend de l'utilisateur et du cas à traiter. Dans notre cas on a adopté pour la méthode d'inférence Max Min (méthode de Mamdani).

-Méthode max-min

Au niveau de la condition : **ET** est représenté par la fonction **Min**

OU est représenté par la fonction **Max**

Au niveau de la conclusion : **OU** est représenté par la fonction **Max**

Alors est représenté par la fonction **Min**

Ces opérations sont illustrées dans la figure III.8

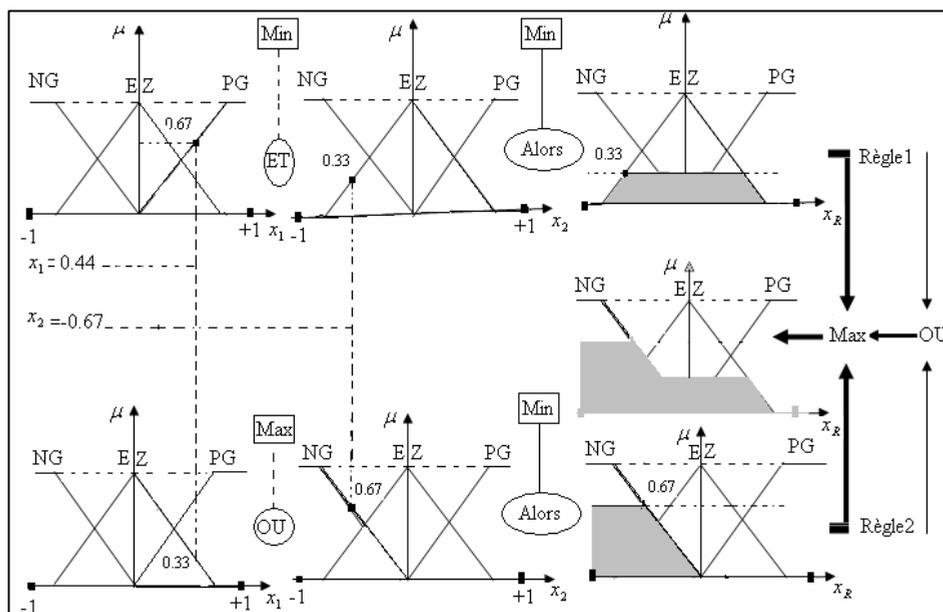


Figure III.8 : Méthode d'inférence max-min pour deux variables d'entrées et deux règles

La première règle donne.

1. $x_1 = 0,44$ est PG avec un degré de 0,67 et $x_2 = -0,67$ est EZ avec un degré de 0,33
2. $(x_1 \text{ PG ET } x_2 \text{ EZ})$ équivaut à $\min(0,67; 0,33)$ ce qui donne 0,33
3. Alors = min équivaut à tronquer la fonction d'appartenance de x_R est EZ par 0,33

La deuxième règle donne.

1. $x_1 = 0,44$ est PG avec un degré de $0,67$ et $x_2 = -0,67$ est EZ avec un degré de $0,33$
2. (x_1 EZ OU x_2 NG) équivaut à $\max(0,67 ; 0,33)$ ce qui donne $0,67$
3. Alors = min équivaut à tronquer la fonction d'appartenance de x_R est NG par $0,67$

Résultat

Le résultat des deux règles est une fonction d'appartenance résultante donnée par la surface pleine (qui sera traitée lors de la défuzzification).

III-3-3-5-4- La défuzzification

Les méthodes d'inférences fournissent une fonction d'appartenance résultante $\mu_{RES}(x)$ pour la variable de sortie (x_R), il s'agit donc d'une information floue. Il convient de la transformer en une grandeur réelle (information non floue): c'est le but de défuzzification. Les méthodes les plus utilisées sont.

- La méthode de centre de gravité
- La méthode de maximum
- La méthode des surfaces

La méthode de défuzzification la plus utilisée est celle de la détermination du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante (la surface pleine). Dans ce contexte, il suffit de calculer l'abscisse (x_G^*) du centre de gravité de cette surface (figure III.9).

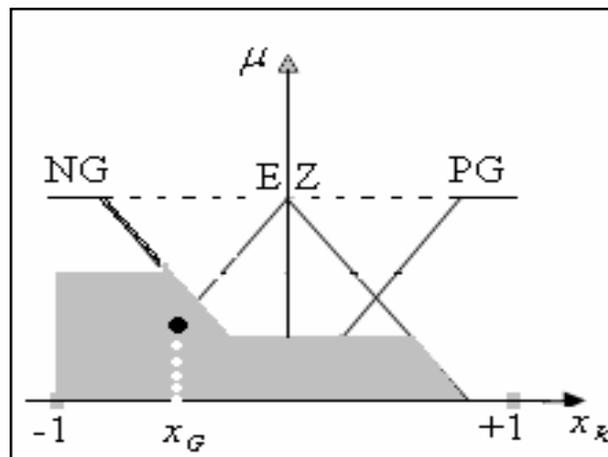


Figure III.9 : Défuzzification par centre de gravité

L'abscisse de centre de gravité peut être déterminé à l'aide de la relation générale.

$$x_G^* = \frac{\int_{-1}^1 x_R \times \mu_{RES}(x_R) \cdot dx_R}{\int_{-1}^1 \mu_{RES}(x_R) dx_R} \quad (\text{III.5})$$

III-4- Le sixième modèle (modèle des réseaux de neurones artificiels)

III-4-1- Réseaux de neurones artificiels

Le neurone biologique est une cellule vivante qui traite les signaux électriques; les neurones sont reliés entre eux par des liaisons appelées axones; ces axones vont eux mêmes jouer un rôle important dans le comportement logique de l'ensemble; ces axones conduisent les signaux électriques de la sortie d'un neurone vers l'entrée (synapse) d'un autre neurone. Les neurones font une sommation des signaux reçus en entrée et en fonction du résultat obtenu vont fournir un courant en sortie (Figure III.10).

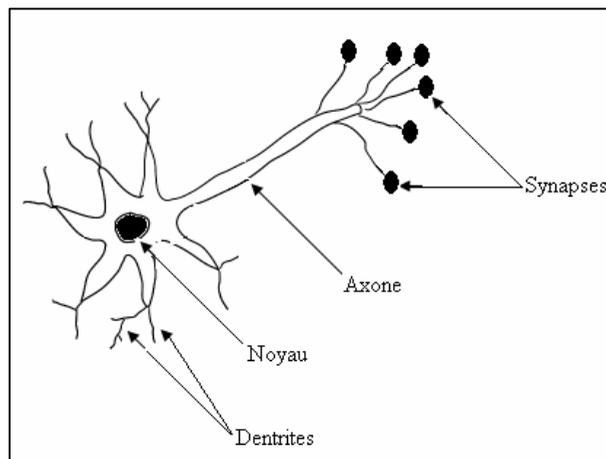


Figure III.10 : Modèle du neurone biologique

Le neurone artificiel est un processeur (unité de calcul) élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones appartenant à un niveau situé en amont (arrière); à chacune des entrées est associé un poids (w) représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie en suite pour alimenter un nombre variable de neurones appartenant à un niveau situé en aval (avant); à chaque connexion est associée un poids.

III-4-2- Modèles et fonctionnement du neurone artificiel

Le neurone est une unité de traitement de l'information. La figure III.11 montre le modèle de neurone qui forme la base des réseaux de neurones artificiels [30].

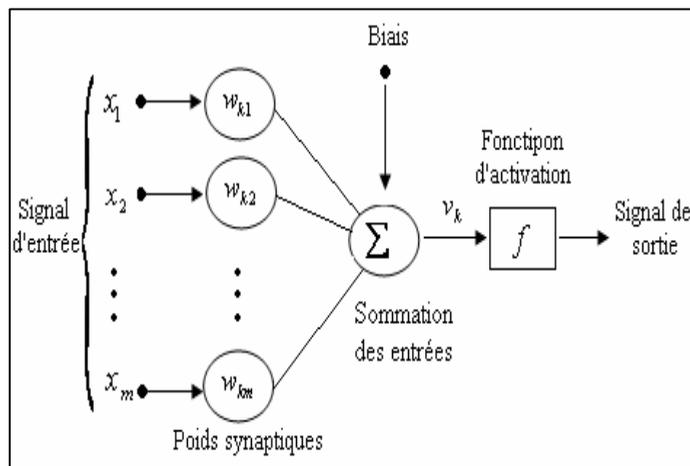


Figure III.11: Modèle du neurone artificiel

On définit trois éléments de base pour le modèle du neurone [30].

- un ensemble de synapses ou liaisons, chacune est caractérisée par un poids, un signal x_j à l'entrée du synapse (j) du neurone (k) est multiplié par le poids synaptique w_{kj} ; les poids synaptiques doivent inclure les valeurs négatives aussi bien que les valeurs positives.
- une sommation des signaux d'entrés pondérés respectivement par les poids synaptiques.
- une fonction d'activation mentionnée comme une fonction de limitation qui limite l'amplitude de la sortie dans la gamme des valeurs finies, typiquement la gamme d'amplitudes normalisées est $[0,1]$ ou alternativement $[-1,1]$.

Le modèle de neurone de la figure III.11 comprend aussi un biais (déplacement) extérieurement appliqué noté b_k ; selon qu'il est positif ou négatif il a pour effet d'augmenter ou de baisser l'entrée de la fonction d'activation. Mathématiquement on décrit un neurone (k) par les deux équations suivantes [30].

$$u_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} \cdot x_j \quad (\text{III.6})$$

$$y_k = f(u_k + b_k) \quad (\text{III.7})$$

Où

x_j ($j = 1; 2; 3; \dots m$) : est le signal d'entrée.

w_{kj} : sont les poids synaptiques du neurone (k).

u_k : est la sortie après sommation dans le neurone (k).

b_k : est le biais du neurone (k).

f : est la fonction d'activation.

y_k : désigne le signal de sortie du neurone (k).

L'utilisation du biais a pour effet d'appliquer une transformation affine à la sortie (u_k) après sommation ; ce qui donne le potentiel d'activation v_k .

$$v_k = u_k + b_k \quad (\text{III.8})$$

En combinant les équations (III.6) et (III.7) on obtient.

$$v_k = \sum_{j=0}^m w_{kj} \cdot x_j \quad (\text{III.9})$$

$$y_k = f(v_k) \quad (\text{III.10})$$

Dans l'équation (III.9) on a ajouté une synapse qui correspond à une entrée fixe $x_0 = +1$ et qui a pour poids $w_{k0} = b_k$.

On formule le modèle d'un neurone (k) comme dans la figure (III.12), dans laquelle la présence de biais a pour effet de faire deux choses.

- elle ajoute une nouvelle entrée fixée à +1.

- elle ajoute un nouveau poids égal au biais associé à cette nouvelle entrée.

Bien que les modèles de la figure (III.11) et de la figure (III.12) paraissent différents ils sont mathématiquement équivalents.

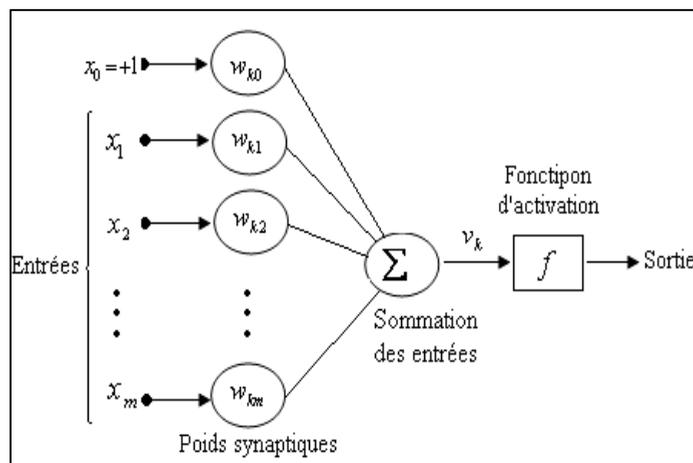


Figure III.12 : Modélisation du neurone artificiel

III-4-3- Les types de fonction d'activation

La fonction d'activation ou fonction de transfert qu'on note par (f) est une fonction qui donne un réel proche de (1) quand le neurone est activé et un réel proche de (0) quand le neurone est inactif, le réel en question est la sortie du neurone.

Remarque

On dit que le neurone est actif lorsque $v_k \geq 0$, et inactif lorsque $v_k \leq 0$, il existe plusieurs fonctions d'activations mais dans la pratique deux sont principalement utilisées à savoir.

-La fonction de Heaviside

$$f(x) = \begin{cases} 1 \rightarrow x \geq 0 \\ 0 \rightarrow x < 0 \end{cases}$$

-La fonction sigmoïde

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

La fonction sigmoïde présente l'avantage d'être dérivable ainsi qu'elle donne un réel dans [0 1] alors que la fonction de Heaviside donne soit (0) soit (1). Toutefois, les deux fonctions possèdent un seuil. Celui de la fonction de Heaviside est en ($x = 0$) et vaut (1) alors que celui de la fonction

sigmoïde est en (0) également mais vaut (1/2). Dans tous les cas le seuil est atteint quand (v_k) vaut (0) alors.

$$v_k = \sum_{j=0}^m w_{kj} \cdot x_j = 0 \Rightarrow \sum_{j=1}^m w_{kj} \cdot x_j = -b_k$$

C'est là qu'intervient le coefficient de biais. Nous voyons donc que l'on atteint le seuil de la fonction d'activation lorsque la somme pondérée des informations d'entrée vaut l'opposé du coefficient de biais.

III-4-4- Réseau de neurones monocouche (le perceptron)

Un réseau de neurones monocouche, ou perceptron, est caractérisé de la manière suivante [27,30].

- Il possède (n) informations en entrée.
- Il est composé de (p) neurones.
- Chacun des p neurones est connecté aux (n) informations d'entrée.

Le réseau de neurones possède ainsi (n) informations en entrée et (p) sorties, chaque neurone renvoyant sa sortie.

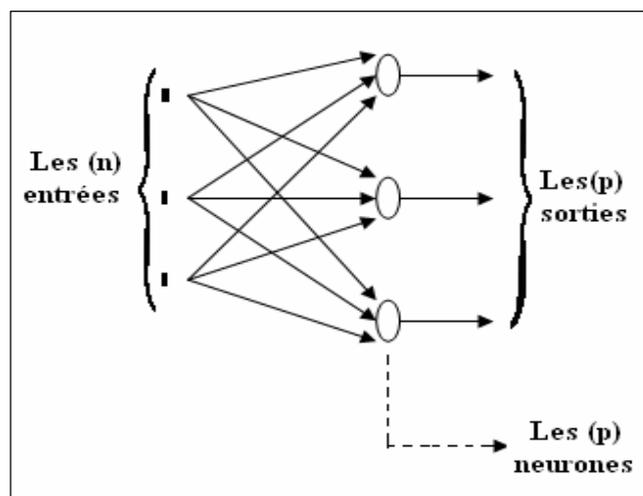


Figure III.13 : Réseau de neurone monocouche (perceptron)

III-4-5- Le perceptron multicouches

En généralisant le perceptron [30]; on peut ainsi disposer les neurones en plusieurs couches. Ainsi les informations en entrée sont connectées à tous les neurones de la première couche, tous

les neurones de la première couche sont connectés à tous les neurones de la seconde couche, et ainsi de suite jusqu'à la dernière couche, appelée couche de sortie. Toutes les couches exceptée la couche de sortie sont considérées comme "couches cachées", on a toujours le choix de la fonction d'activation mais pour la couche de sortie, une fonction linéaire est d'habitude préférée puisque le résultat du réseau doit être mesuré à la gamme de la sortie désirables [27].

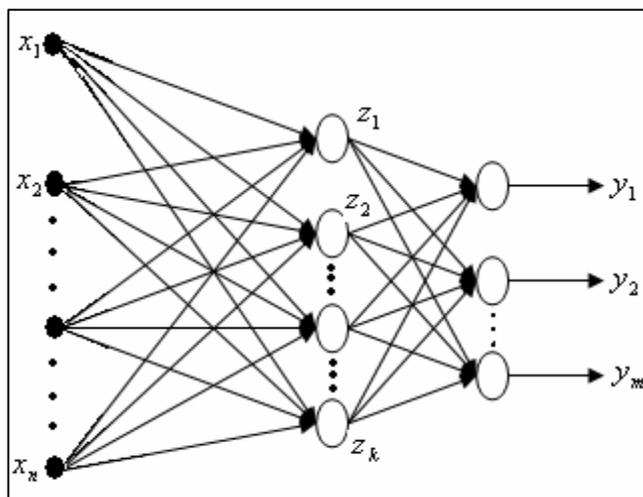


Figure III.14 : Perceptron multicouche

Il existe 2 types de perceptrons :

- les perceptrons feedforward: dans lesquels l'information se propage de couche en couche sans retour en arrière.
- les perceptrons récurrents: sont ceux qui alimentent leurs entrées avec leurs sorties.

Il n'existe aucune règle qui permettrait de déterminer le nombre de neurones à placer dans la couche cachée pour avoir un réseau de neurones optimal. La méthode pour s'en rapprocher est d'essayer "au hasard" plusieurs nombres de neurones en couche cachée jusqu'à avoir des résultats les plus convaincants possibles après l'apprentissage.

III-4-6- L'apprentissage

Nous définissons l'apprentissage dans le contexte des réseaux de neurones comme suit.

L'apprentissage est un processus itératif de stimulation par l'environnement par lequel les paramètres (les poids) d'un réseau de neurones sont adaptés. Le type d'apprentissage est déterminé par la façon dans laquelle les changements des paramètres ont lieu.

Cette définition du processus d'apprentissage implique l'ordre d'événements suivant.

- le réseau de neurones est stimulé par un environnement.
- le réseau de neurones subit des changements suite à cette stimulation.
- le réseau de neurones répond d'une nouvelle façon à l'environnement, à cause des changements qui sont arrivés dans sa structure interne.

Notant par $w_{kj}(n)$ les poids synaptiques à l'itération (n), à cette itération un ajustement $\Delta w_{kj}(n)$ est appliquée au poids synaptiques $w_{kj}(n)$ donnant ainsi la nouvelle valeur de ces poids tel que.

$$w_{kj}(n+1) = w_{kj}(n) + \Delta w_{kj}(n) \quad (\text{III.11})$$

Un ensemble de règles bien définies pour la solution du problème d'apprentissage est appelé algorithme d'apprentissage. Bien entendu, il y en a une variété d'algorithmes d'apprentissages. Ces algorithmes diffèrent par la façon dans laquelle l'ajustement des poids synaptiques est formulé. Dans notre travail on se limite à un seul algorithme d'apprentissage, qui est l'apprentissage par correction d'erreur.

III-4-6-1-L'apprentissage par correction d'erreur

Considérant un seul neurone (k) dans la couche de sortie d'un réseau de neurone feedforward le neurone est alimenté par un signal $x(n)$ produit par une ou plusieurs couches cachées de neurones qui sont à leurs tours alimentées par un signal d'entrée (appliqué à la couche d'entrée), (n) désigne le pas du temps d'un processus itératif impliqué dans l'ajustement des poids synaptiques, la sortie du neurone (k), $y_k(n)$ qui représente la sortie de ce neurone est comparée à une sortie désirée notée $d_k(n)$, par conséquent une erreur $e_k(n)$ est produite [30], tel que .

$$e_k(n) = d_k(n) - y_k(n) \quad (\text{III.12})$$

Le signal de l'erreur fait agir un mécanisme de contrôle qui a pour but d'appliquer une séquence d'ajustement correctif des poids synaptiques, cet ajustement est conçu pour faire de tel sorte que la sortie du réseau de neurone soit très proche de la sortie désirée, cet objectif est réalisé par la minimisation de l'erreur quadratique $\xi(n)$.

$$\xi(n) = \frac{1}{2} e_k^2(n) \quad (\text{III.13})$$

L'ajustement des poids synaptiques du neurone (k) se poursuit par un processus itératif jusqu'à ce que le système atteigne un critère d'arrêt, par exemple l'erreur quadratique tombe au-dessus d'une certaine valeur, les poids synaptiques se stabilisent et le processus d'apprentissage est terminé.

La minimisation de l'erreur quadratique mène à une règle d'apprentissage connue sous le nom de la "règle delta" de Windrow-Hoff du nom des deux scientifiques qui ont élaboré cette technique en 1960.

Notant par $w_{kj}(n)$ les poids synaptiques du neurone (k) excité par un élément $x_j(n)$ du vecteur signal $x(n)$ au pas du temps (n), selon la règle delta, l'ajustement appliqué au poids synaptiques au pas du temps (n) est défini par.

$$\Delta w_{kj}(n) = \eta \cdot e_k(n) \cdot x_j(n) \quad (\text{III.14})$$

Où (η) est une constante positive qui détermine le taux de l'apprentissage.

Ayant calculé l'ajustement $\Delta w_{kj}(n)$, les valeurs adaptées des poids synaptiques sont déterminées par.

$$w_{kj}(n+1) = w_{kj}(n) + \Delta w_{kj}(n) \quad (\text{III.15})$$

Où $w_{kj}(n)$ et $w_{kj}(n+1)$ sont respectivement les anciennes et les nouvelles valeurs des poids synaptiques.

Le paramètre d'intérêt particulier est bien le taux d'apprentissage (η), qu'il faut choisir soigneusement pour réaliser la stabilité ou la convergence du processus itératif d'apprentissage, ce paramètre joue un rôle clé dans la détermination de la performance lors de la correction de l'erreur.

III-4-6-2- L'algorithme de la rétropropagation du gradient

Le perceptron multicouche a été appliqué avec succès pour résoudre des problèmes difficiles en les formant dans une façon supervisée avec un algorithme connu sous le nom d'algorithme de rétropropagation de l'erreur; cet algorithme se base sur l'apprentissage par correction d'erreur.

Soit $x_j(n)$ l'entrée du neurone (j), $v_j(n)$ la sortie de ce neurone après sommation, $y_j(n)$ la

sortie finale du neurone (j), $d_j(n)$ la réponse désirée par le neurone (j) et en fin $e_j(n)$ l'erreur commise, Tel que.

$$\begin{cases} v_j(n) = \sum_1^m w_{ji}(n) \cdot x_i \\ y_j(n) = f(v_j(n)) \\ e_j(n) = d_j(n) - y_j(n) \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

Dans ce cas l'erreur quadratique produite est.

$$\xi(n) = \frac{1}{2} e_j^2(n)$$

L'algorithme de la rétropropagation du gradient applique une correction $\Delta w_{ji}(n)$ au poids synaptiques proportionnelle à la dérivée partielle de la fonction de performance $\xi(n)$, ce gradient qui s'exprime par.

$$\frac{\partial \xi(n)}{\partial w_{ji}(n)} = \frac{\partial \xi(n)}{\partial e_j(n)} \cdot \frac{\partial e_j(n)}{\partial y_j(n)} \cdot \frac{\partial y_j(n)}{\partial v_j(n)} \cdot \frac{\partial v_j(n)}{\partial w_{ji}(n)} \quad (\text{III.17})$$

Après dérivation on a le résultat suivant.

$$\frac{\partial \xi(n)}{\partial w_{ji}(n)} = -e_j(n) \cdot f'(v_j(n)) \cdot x_i(n) \quad (\text{III.18})$$

La correction des poids synaptiques est définie par la règle suivante (dite règle delta).

$$\Delta w_{ji}(n) = -\eta \frac{\partial \xi(n)}{\partial w_{ji}(n)} \quad (\text{III.19})$$

Où (η) est le taux d'apprentissage, le signe moins est introduit pour que les poids synaptiques changent dans la direction qui réduit la fonction de performance $\xi(n)$ c'est-à-dire dans la direction opposée au gradient de cette fonction, alors.

$$\Delta w_{ji}(n) = \eta \cdot \delta_j(n) \cdot x_i(n) \quad (\text{III.20})$$

Où $\delta_j(n)$ est le gradient local défini par.

$$\delta_j(n) = -\frac{\partial \xi(n)}{\partial v_j(n)} = e_j(n) \cdot f'(v_j(n)) \quad (\text{III.21})$$

Si le neurone (j) est un neurone d'une couche cachée alors.

$$\delta_j(n) = -\frac{\partial \xi(n)}{\partial y_j(n)} \cdot \frac{\partial y_j(n)}{\partial v_j(n)} = -\frac{\partial \xi(n)}{\partial y_j(n)} f'(v_j(n)) \quad (\text{III.22})$$

Or nous avons pour tous les neurones de sortie :

$$\xi(n) = \frac{1}{2} \sum_k e_k(n) \quad (\text{III.23})$$

Tel que

$$e_k(n) = d_k(n) - y_k(n) = d_k(n) - f(v_k(n)) \quad (\text{III.24})$$

Alors:

$$\frac{\partial \xi(n)}{\partial y_j(n)} = \sum_k e_k \frac{\partial e_k(n)}{\partial y_j(n)} = \sum_k e_k \frac{\partial e_k(n)}{\partial v_k(n)} \cdot \frac{\partial v_k(n)}{\partial y_j(n)} \quad (\text{III.25})$$

Après dérivation.

$$\frac{\partial e_k(n)}{\partial v_k(n)} = -f'(v_k(n)) \quad (\text{III.26})$$

Pour le neurone de sortie (k) nous avons

$$v_k(n) = \sum w_{kj}(n) \cdot y_j(n) \Rightarrow \frac{\partial v_k(n)}{\partial y_j(n)} = w_{kj}(n) \quad (\text{III.27})$$

Par conséquent

$$\frac{\partial \xi(n)}{\partial y_j(n)} = -\sum e_k(n) \cdot f'(v_k(n)) \cdot w_{kj}(n) \quad (\text{III.28})$$

Cette dernière expression s'écrit

$$\frac{\partial \xi(n)}{\partial y_j(n)} = -\sum \delta_k(n) \cdot w_{kj}(n) \quad (\text{III.29})$$

Où $\delta_k(n)$ est le gradient local défini avant.

Donc pour le neurone (j) de la couche cachée on a.

$$\delta_j(n) = f'(v_j(n)) \cdot \sum_{k=1}^m \delta_k(n) \cdot w_{kj}(n) \quad (\text{III.30})$$

Où:

m : nombre total des neurones de la couche qui vient juste après la couche cachée.

Le facteur $f'(v_k(n))$ dépend seulement de la fonction d'activation associée au neurone (j) de la couche de sortie, le facteur de sommation dépend de deux termes le premier est $\delta_k(n)$ qui exige la connaissance de l'erreur $e_k(n)$ pour tous les neurones de la couche qui vient juste après la couche à laquelle appartient le neurone (j), le second terme concerne les poids synaptiques $w_{kj}(n)$ qui sont associés aux connections entre les neurones de la couche cachée et ceux de la couche qui vient juste après.

En résumé, les relations dérivées de l'algorithme de la rétropropagation sont en premier lieu, la correction appliquée au poids synaptiques $\Delta w_{ji}(n)$ reliant le neurone (i) au neurone (j) est définie par.

$$\Delta w_{ji}(n) = \eta \cdot \delta_j(n) \cdot x_i(n)$$

En second lieu, le gradient local $\delta_j(n)$ qui dépend de l'emplacement du neurone (j), s'il s'agit d'un neurone de sortie ou d'un neurone caché.

- si le neurone (j) est un neurone de sortie: $\delta_j(n) = e_j(n) \cdot f'(v_j(n))$

- si le neurone (j) est un neurone caché: $\delta_j(n) = f'(v_j(n)) \cdot \sum_{k=1}^m \delta_k(n) \cdot w_{kj}(n)$

Remarque

Le calcul du gradient local pour chaque neurone du réseau multicouche exige la connaissance de la dérivée de la fonction de transfert (f) associée à ce neurone, pour que cette dérivée existe la fonction (f) doit être continue; en terme de base la seule exigence que doit satisfaire la fonction d'activation est qu'elle soit différentiable. Un exemple de telle fonction est la fonction sigmoïde généralement utilisée dans les perceptrons multicouches. Pour cette fonction on a.

$$f'(v_k(n)) = y_j(n)(1 - y_j(n)) \quad (\text{III.31})$$

Le gradient local pour un neurone dans la couche de sortie s'écrit.

$$\delta_j(n) = (d_j(n) - y_j(n))y_j(n)(1 - y_j(n)) \quad (\text{III.32})$$

Et pour un neurone dans la couche cachée il s'écrit.

$$\delta_j(n) = y_j(n).(1 - y_j(n)) \sum_k \delta_k(n).w_{kj}(n) \quad (\text{III.33})$$

•Les deux passages de calcul

Dans l'application de l'algorithme de la rétropropagation deux passages de calcul sont distingués le premiers passage ou passage en avant, et le second passage ou passage en arrière.

- dans le passage en avant les poids synaptiques restent inchangés partout dans le réseau et les signaux sont calculés à la base de neurone en neurone, la sortie finale et ainsi comparée à la sortie désirée, on obtient alors l'erreur de la $j^{\text{ème}}$ sortie du réseau, ainsi la phase de calcul du passage en avant commence à la première couche cachée par la présentation du vecteur d'entrée $x_i(n)$ et termine à la couche de sortie par le calcul de l'erreur pour chaque neurone de cette couche.
- le passage en arrière commence à la couche de sortie en faisant passer le signal d'erreur à gauche (en arrière) dans le réseau couche à couche en calculant récursivement le gradient local $\delta_j(n)$ pour chaque neurone, ce passage récursif fait subir au poids synaptiques des changements selon la règle delta; pour un neurone de la couche de sortie, $\delta_j(n)$ est simplement le produit de l'erreur de ce neurone par la première dérivée de la fonction d'activation; en suite on calcul les changements des poids synaptiques de cette couche, puis on calcul le gradient local de tous les neurones de la couche cachée et par la suite les changements des poids synaptiques de toutes les connections alimentant cette couche; ce calcul récursif se continue couche à couche par propagation des changements de tous les poids synaptiques dans le réseau. Le passage en arrière se termine lorsque en atteint un critère prédéterminé, par exemple la valeur désirée de l'erreur quadratique moyenne.

III-5-Évaluation statistique des modèles

Pour comparer les résultats des différents modèles une étude statistique a été faite en évaluant, l'écart relatif moyen algébrique (MBE) qui renseigne sur la tendance du modèle à surestimer les valeurs observées ($MBE > 0$) ou à les sous-estimer ($MBE < 0$); (MAE) l'écart moyen absolu qui correspond à la moyenne des erreurs relatives absolues, plus cette valeur est proche de zéro plus le modèle a une erreur moyenne faible; l'écart relatif quadratique moyen (RMSE) qui renseigne sur l'erreur moyenne commise en valeur absolue entre les valeurs mesurées et celles estimées par le modèle, plus cette erreur est faible plus les valeurs simulées par le modèle sont proches des valeurs mesurées; ainsi que le coefficient de détermination R^2 .

Soit une grandeur (Y) dont les valeurs mesurées sont (Y_{im}); et les valeurs estimées par un modèle mathématique donné sont (Y_{ie}), L'écart relatif entre les valeurs mesurées et celles estimées est donné par la relation suivante [16].

$$e_i = (Y_{im} - Y_{ie}) \times 100 / Y_{im} \quad (\text{III.34})$$

Les paramètres statistiques MBE; MAE et RMSE en pourcentage (%) sont donnés par les relations ci-dessous.

$$\begin{aligned} MBE &= \frac{1}{m} \sum_1^m e_i \\ MAE &= \frac{1}{m} \sum_1^m |e_i| \\ RMSE &= \left[\frac{1}{m} \sum_1^m e_i^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ R^2 &= 1 - \frac{\sum_1^m e_i^2}{\sum_1^m (Y_{im} - \bar{Y})^2} \end{aligned} \quad (\text{III.35})$$

Avec

$$\bar{Y} = \frac{1}{m} \sum_1^m Y_{im}$$

Application de la logique floue

Pour estimer l'irradiation solaire globale par la logique floue on utilise comme entrées **la fraction d'insolation et la saison** alors que la sortie est **l'irradiation solaire globale**.

- a) on divise l'intervalle de variation de l'insolation; de la saison et celle l'irradiation solaire globale en sous ensembles floues par l'attribution d'une fonction d'appartenance à chacun d'eux.
- b) on élabore une base de règles en employant les opérateurs floue et en utilisant les déclarations **SI-ALORS**. Parmi une multitude de propositions, on donne les trois suivantes.
 - SI l'insolation est « longue » **ET** la saison est l'été **ALORS** l'irradiation solaire globale est grande.
 - SI l'insolation est « longue » **OU** la saison est l'été **ALORS** l'irradiation solaire globale est grande.
 - SI l'insolation est « courte » **ET** la saison est l'automne **ALORS** l'irradiation solaire globale est petite.

Ces étapes sont implantées dans le « **fis editor** » de Matlab. Pour avoir la valeur de l'irradiation solaire globale pour chaque site on injecte les entrées correspondantes.

Application des réseaux de neurones artificiels

Pour les réseaux de neurones artificiels on a choisi un réseau feedforward comportant une couche d'entrée, une couche cachée et une couche de sortie pour estimer **l'irradiation solaire globale** équivalente à une entrée qui est **la fraction d'insolation** ; la méthode d'adaptation des poids utilisée est l'algorithme de la rétropropagation du gradient basée sur l'apprentissage par correction d'erreur. Le critère d'arrêt est une valeur choisie de l'erreur quadratique moyenne. L'exécution de ce programme se fait par l'utilisation d'une commande insérée dans Matlab.

III-6-Conclusion

L'avantage principal du modèle de la logique floue est sa capacité de décrire la connaissance dans un langage descriptif humain sous la forme de règles logiques simples employant des variables linguistiques. Le modèle d'Angstrom Prescott ou tout autre type d'équations de régression est remplacé par un ensemble de bases de règle floue. Pour les réseaux de neurones artificiels les approches de modélisation employées sont caractérisées par une grande variété de modèles employant une multitude d'architectures et une diversité dans les paramètres d'entrée et de sortie.

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV-1-Introduction

Dans ce chapitre une application des six modèles déjà présentés dans le chapitre précédent pour l'estimation de l'irradiation solaire globale est faite pour les quatre sites algériens, par la suite une présentation des résultats obtenus est donnée et on finira par faire une comparaison entre ces résultats.

IV-2-Grandeurs utilisées dans l'application des six modèles

Dans l'application des six modèles on a intérêt à calculer les valeurs des moyennes mensuelles de quelques grandeurs à savoir, l'irradiation solaire globale à la limite de l'atmosphère, l'irradiation solaire globale pour chacun des sites, la fraction d'insolation, l'humidité relative moyenne de l'air, et la température moyenne de l'air.

IV-2-1- L'irradiation solaire globale des quatre sites à la limite de l'atmosphère

Le calcul de l'irradiation solaire globale (G_0) au top de l'atmosphère pour les quatre sites Algériens se fait on utilisant l'équation (II.13), les résultats obtenus figurent dans le tableau IV.1.

Mois	Alger	Tamanrasset	Oran	Bechar
1	4845.24	7113.64	5022.49	5690.13
2	6193.80	8167.59	6354.50	6950.09
3	8055.29	9449.35	8177.70	8618.85
4	9868.08	10476.44	9933.69	10154.66
5	11084.08	10984.97	11095.63	11111.88
6	11558.74	11113.14	11542.97	11457.10
7	11295.35	11012.63	11292.39	11254.47
8	10289.92	10614.56	10333.95	10473.00
9	8654.70	9763.48	8756.71	9118.40
10	6731.06	8518.81	6879.64	7426.01
11	5137.17	7330.06	5310.18	5959.34
12	4429.14	6762.42	4609.25	5291.04

Tableau IV.1 : Irradiation solaire globale à la limite de l'atmosphère (wh/m² jour)

IV-2-2- L'irradiation solaire globale des quatre sites

Les mesurées des moyennes mensuelles journalière de l'irradiation solaire globale sur les quatre sites ont été effectuées par les pyranomètres de Robitzsh et Kip-Zonen, la période d'enregistrement est d'au moins de 10 ans [9]. Ces moyennes mensuelles sont dans le tableau IV.2.

Mois	Alger	Tamanrasset	Oran	Bechar
1	2190	5070	2600	4020
2	2970	6140	3480	4760
3	4130	6290	5140	6110
4	4910	7830	5900	6830
5	6010	7200	6410	7230
6	6170	7260	7500	7850
7	7050	7320	7390	7440
8	6360	7210	6710	6810
9	5120	6670	5710	6130
10	3530	6130	3890	5130
11	2720	5190	2760	4050
12	2060	4480	2230	3860

Tableau IV.2 : Moyennes mensuelles de l'irradiation solaire globale (wh/m^2 jour)

IV-2-3- La fraction d'insolation

Les héliographes de Camblèll-Stokes sont utilisés pour la mesure de la durée d'insolation ce qui permet le calcul de la fraction d'insolation. La période d'enregistrement est de 25 ans [9] et les résultats sont comme suit.

Mois	Alger	Tamanrasset	Oran	Bechar
1	0.48	0.78	0.53	0.78
2	0.56	0.81	0.53	0.80
3	0.60	0.84	0.64	0.84
4	0.61	0.77	0.63	0.84
5	0.71	0.76	0.69	0.82
6	0.71	0.69	0.69	0.83
7	0.78	0.75	0.80	0.84
8	0.80	0.77	0.79	0.83
9	0.74	0.73	0.72	0.82
10	0.62	0.77	0.66	0.80
11	0.51	0.81	0.53	0.77
12	0.49	0.79	0.53	0.76

Tableau IV.3 : Moyennes mensuelle de la fraction d'insolation

IV-2-4- Moyenne de l'humidité relative et de la température de l'air

Les valeurs des moyennes mensuelles de la température de l'air et de l'humidité relative moyenne de l'air sont dans les deux tableaux suivants [9].

Mois	Alger	Tamanrasset	Oran	Bechar
1	16,6	19,88	16,6	15,53
2	17,6	22,06	17,65	18,53
3	18,8	25,12	19,56	21,83
4	20,7	29,78	21,3	25,71
5	23,7	33,39	24,24	30,4
6	27,7	35,8	27,34	36,17
7	31,2	35,42	30,31	39,61
8	32,1	34,97	31,58	39,07
9	29,6	33,31	28,3	34,1
10	25,7	29,75	24,47	27,28
11	21,3	24,8	20,36	20,93
12	17,7	21,13	17,43	16,56

Tableau IV. 4 : Moyenne mensuelle de la température de l'air

Mois	Alger	Tamanrasset	Oran	Bechar
1	0,7644	0,2458	0,78	0,4794
2	0,7794	0,205	0,7722	0,4
3	0,7633	0,205	0,7394	0,3266
4	0,7466	0,1658	0,6911	0,2594
5	0,7438	0,1641	0,6844	0,2211
6	0,7	0,1658	0,6661	0,165
7	0,6855	0,1758	0,6716	0,1155
8	0,6888	0,2133	0,6627	0,1411
9	0,7005	0,215	0,7005	0,2294
10	0,725	0,2275	0,7194	0,3511
11	0,7477	0,2383	0,745	0,4555
12	0,7711	0,2533	0,7872	0,51

Tableau IV.5 : Moyenne mensuelle de l'humidité relative de l'air

IV-3- Application des modèles aux différents sites

Pour tout ce qui suit on ne tien pas compte du phénomène du crépuscule et on prend pour durée du jour la définition du coucher et du lever quand le centre du disque solaire est à l'horizon ($h_0=0$). Les résultats de tous les modèles ont été obtenus en exploitant le logiciel matlab version 6.5.

IV-3-1- Application du premier modèle

Pour les quatre sites; le tableau ci-dessous présente, les coefficients de corrélation de ce modèle (a_i et b_i) déterminés par la méthode des moindres carrés, les paramètres statistiques MBE, MAE, RMSE, et le coefficient de détermination R^2 .

$G/G_0 = a + b.\sigma$						
	a_i	b_i	MBE	MAE	RMSE	R^2
Alger	0.2445	0.4515	-0.18	3.33	4.34	0.99
Oran	0.2392	0.5387	-0.24	4.18	4.75	0.98
Bechar	1.0679	-0.4751	-0.08	2.20	2.75	0.99
Taman	0.4574	0.3036	-0.20	3.83	4.47	0.91

Tableau IV.6 : Coefficients de corrélation et paramètres statistiques pour le premier modèle

Dans les figures suivantes on trouve le graphe de l'irradiation solaire globale mesurée et celui de l'irradiation solaire globale estimée par le modèle d'Angstrom-Prescott pour les quatre sites.

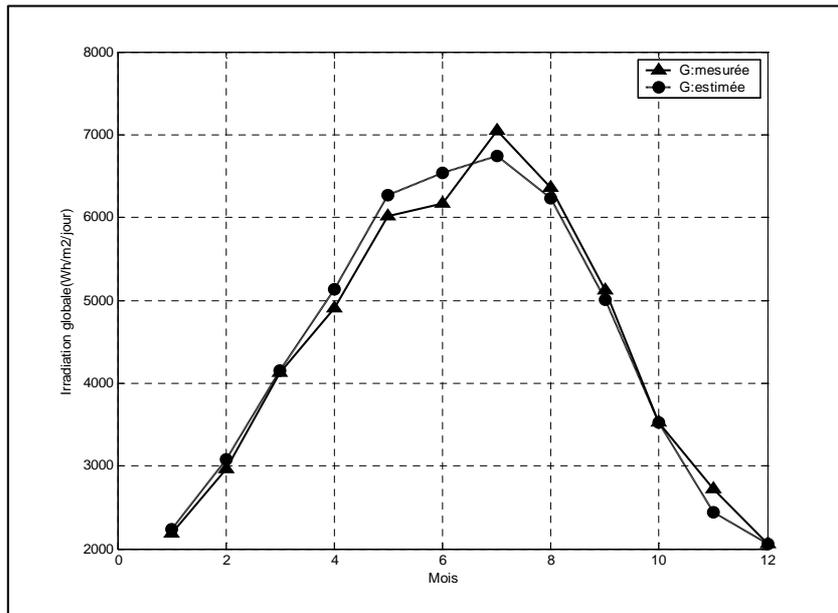


Figure IV.1 :L'irradiation solaire globale mesurée et estimée par le modèle d'Angstrom-Prescott pour le site d'Alger

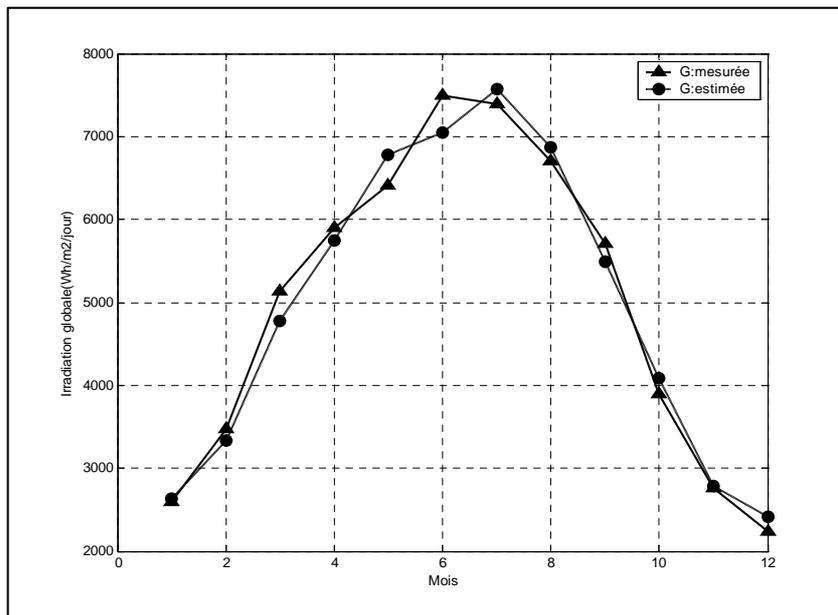


Figure IV.2 :L'irradiation solaire globale mesurée et estimée par le modèle d'Angstrom-Prescott pour le site d'Oran

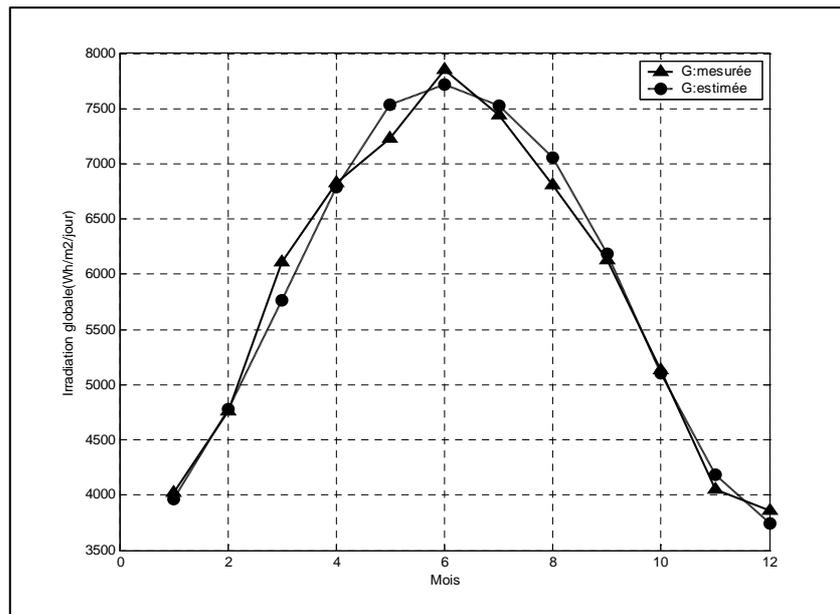


Figure IV.3 : L'irradiation solaire globale mesurée et estimée par le modèle d'Angstrom-Prescott pour le site de Bechar

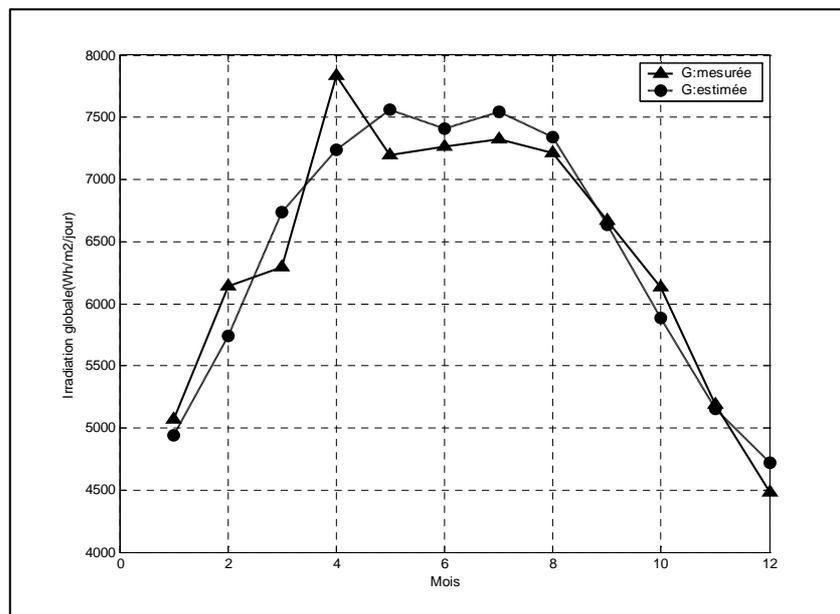


Figure IV.4 : L'irradiation solaire globale mesurée et estimée par le modèle d'Angstrom-Prescott pour le site de Tamanrasset

IV-3-2- Application du second modèle

Après normalisations de la température; le calcul des coefficients de corrélation de ce modèle par la méthode des moindres carrés ainsi que les paramètres statistiques pour les quatre sites sont présentés dans le tableau suivant.

$G/G_0 = a + b.\sigma + c.T_n$							
	a_i	b_i	c_i	MBE	MAE	RMSE	R^2
Alger	0.2827	0.1277	0.2279	-0.10	2.56	3.30	0.99
Oran	0.2256	0.6149	-0.0483	-0.23	4.11	4.73	0.98
Bechar	0.7886	-0.0668	-0.0755	-0.05	1.89	2.21	0.99
Taman	0.7135	0.0568	-0.0814	-0.19	3.36	4.29	0.92

Tableau IV.7 : Coefficient de corrélation et paramètres statistiques pour le second modèle

Les variations de l'irradiation solaire globale mesurée et celles de l'irradiation solaire globale estimée par le second modèle sont comme dans les figures suivantes.

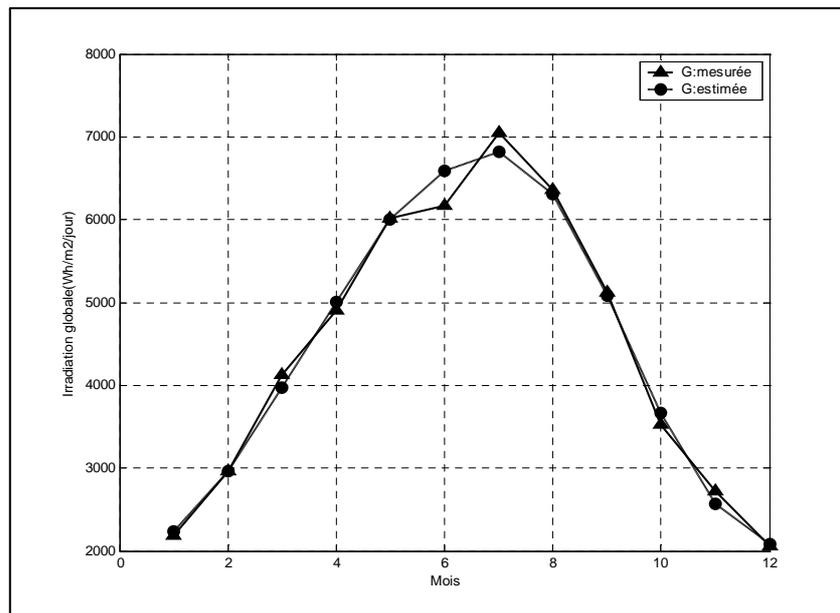


Figure IV.5 : L'irradiation solaire globale mesurée et estimée par le second modèle pour le site d'Alger

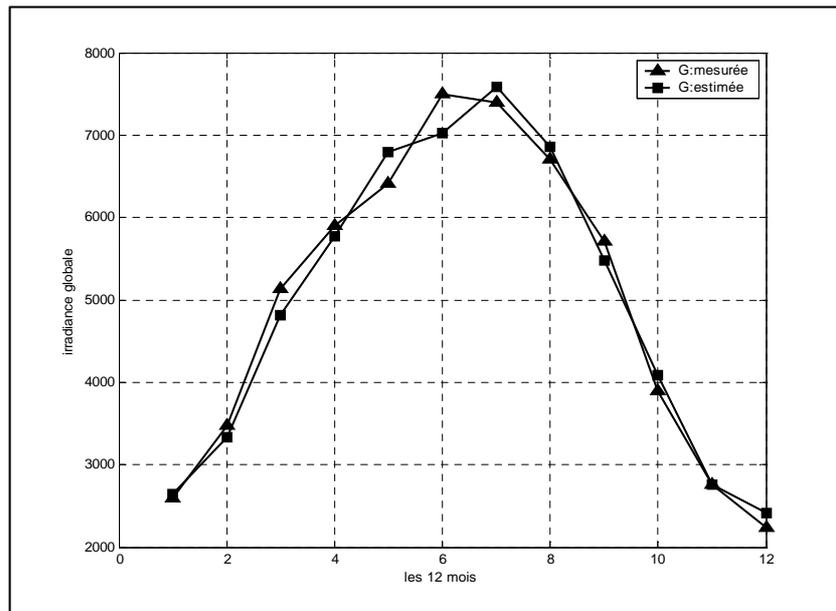


Figure IV.6 : L'irradiation solaire globale mesurée et estimée par le second modèle pour le site d'Oran

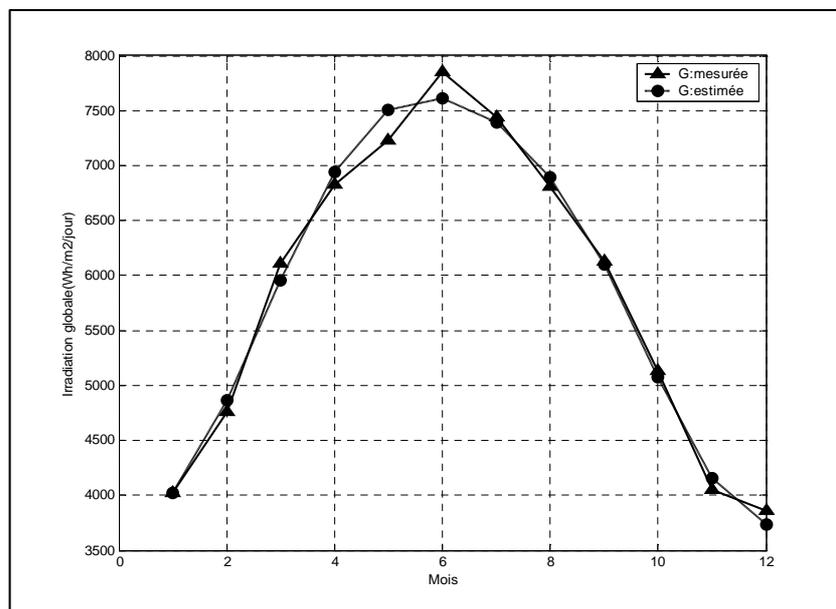


Figure IV.7 : L'irradiation solaire globale mesurée et estimée par le second modèle pour le site de Bechar

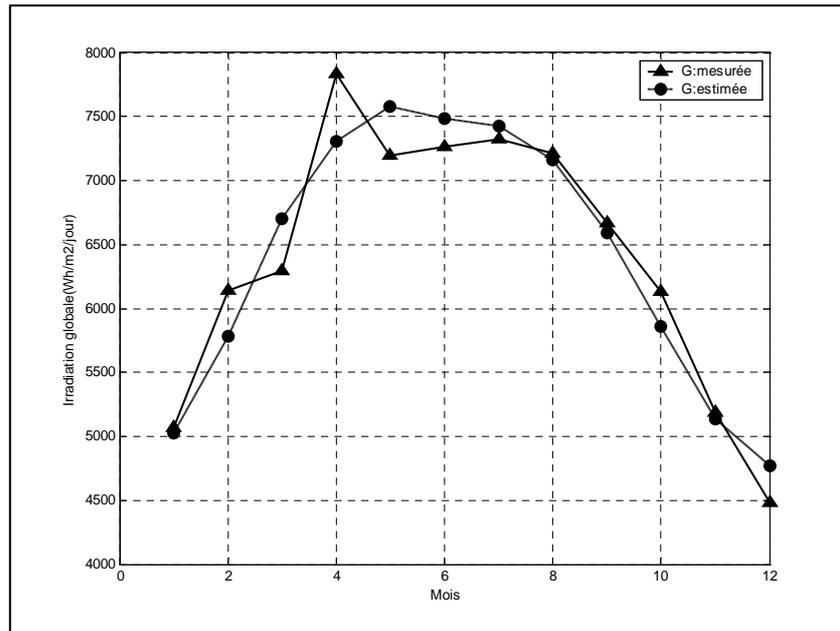


Figure IV.8 : L'irradiation solaire globale mesurée et estimée par le second modèle pour le site de Tamanrasset

IV-3-3- Application du troisième modèle

Le calcul des coefficients de corrélation de ce modèle par la méthode des moindres carrés et les paramètres statistiques sont présentés dans le tableau suivant.

$G/G_0 = a + b.\sigma + c.R$							
	a_i	b_i	c_i	MBE	MAE	RMSE	R^2
Alger	0.9168	0.2567	-0.7469	-0.14	2.84	3.79	0.99
Oran	0.5461	0.4103	-0.3120	-0.22	3.93	4.59	0.98
Bechar	0.3430	0.3449	0.1971	-0.04	1.67	2.03	0.99
Taman	0.4582	0.3003	0.0087	-0.20	3.82	4.47	0.91

Tableau IV.8 : Coefficients de corrélation et paramètres statistiques pour le troisième modèle

Les figures suivantes montrent les variations de l'irradiation solaire globale mesurée et celles de l'irradiation solaire globale estimée par le troisième modèle.

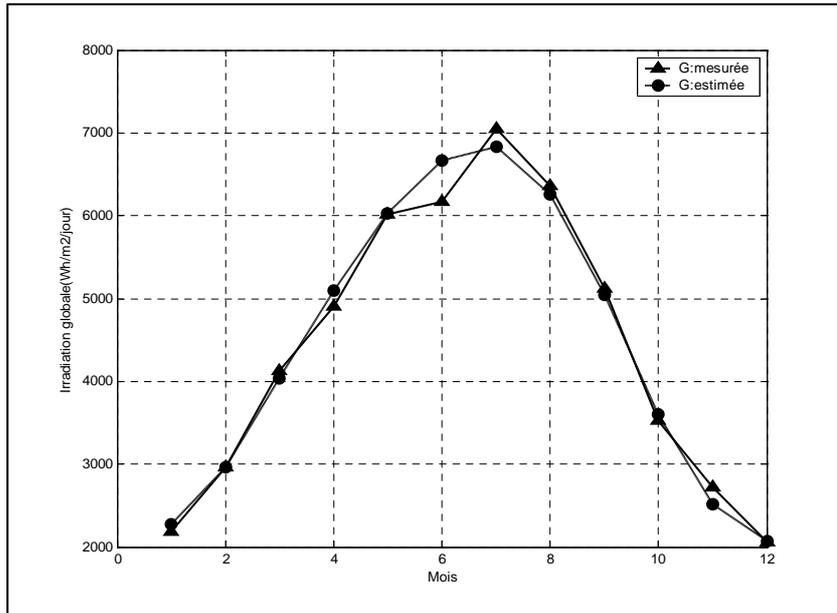


Figure IV.9 : L'irradiation solaire globale mesurée et estimée par le troisième modèle pour le site d'Alger

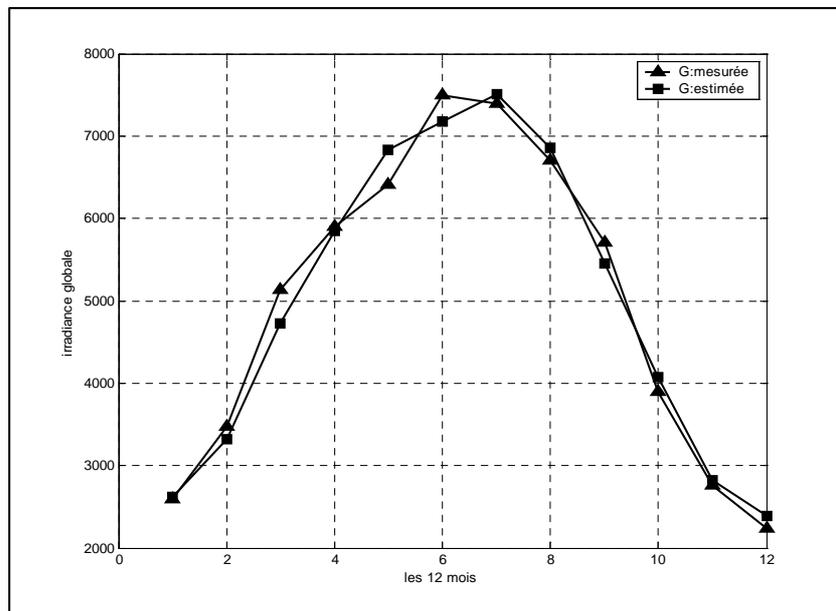


Figure IV.10 : L'irradiation solaire globale mesurée et estimée par le troisième modèle pour le site d'Oran

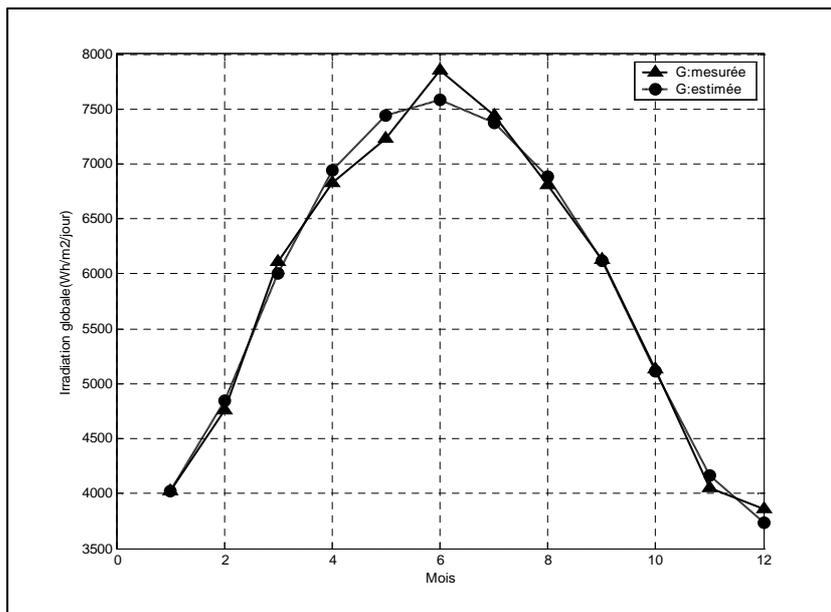


Figure IV.11 : L'irradiation solaire globale mesurée et estimée par le troisième modèle pour le site de Bechar

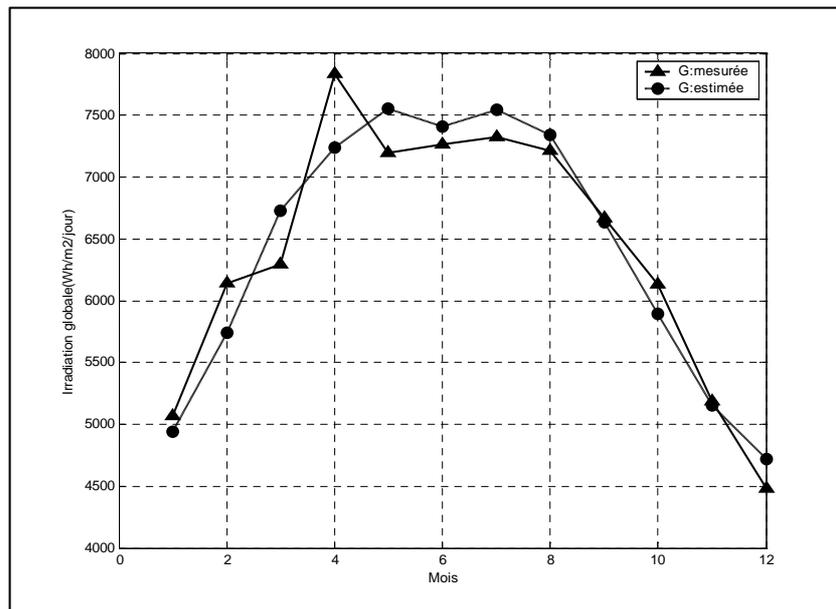


Figure IV.12 : L'irradiation solaire globale mesurée et estimée Par le troisième modèle pour le site de Tamanrasset

IV-3-4- Application du quatrième modèle

Le calcul des coefficients de corrélation de ce modèle par la méthode des moindres carrés et des paramètres statistiques donne les résultats suivants.

$G / G_0 = a + b.\sigma + c.T_n + d.R$								
	a_i	b_i	c_i	d_i	MBE	MAE	RMSE	R^2
Alger	-0.5264	0.0826	0.4316	0.9367	-0.09	2.43	3.10	0.99
Oran	0.6064	0.5323	-0.1008	-0.4020	-0.21	3.77	4.51	0.98
Bechar	-0.2161	0.8274	0.1226	0.4725	-0.04	1.57	1.91	0.99
Taman	0.8137	0.0407	-0.1205	-0.2728	-0.18	3.65	4.25	0.92

Tableau IV.9 : Coefficients de corrélation et paramètres statistiques pour le quatrième modèle

Les figures ci-dessous illustrent les variations de l'irradiation solaire globale mesurée et celles de l'irradiation solaire globale estimée par le quatrième modèle.

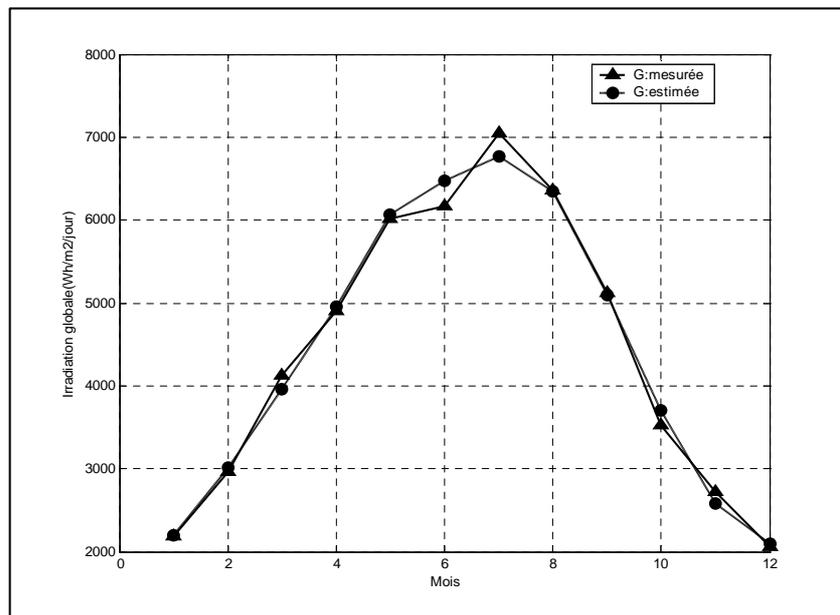


Figure IV.13 : L'irradiation solaire globale mesurée et estimée par le quatrième modèle pour le site d'Alger

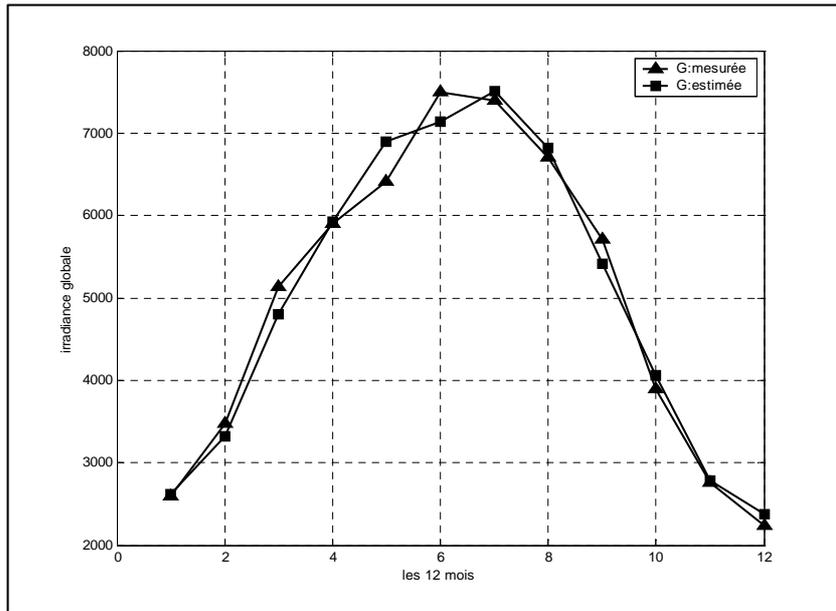


Figure IV.14 : L'irradiation solaire globale mesurée et estimée par le quatrième modèle pour le site d'Oran

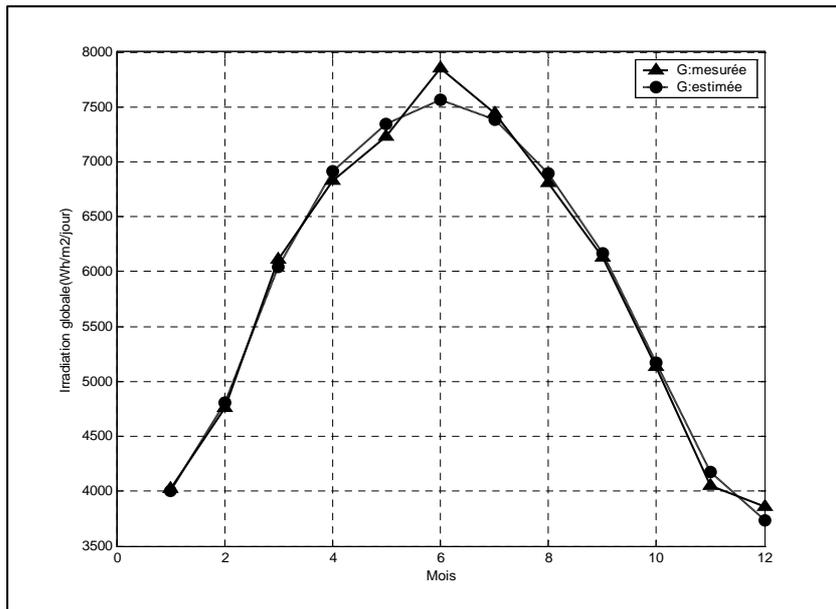


Figure IV.15: L'irradiation solaire globale mesurée et estimée par le quatrième modèle pour le site de Bechar

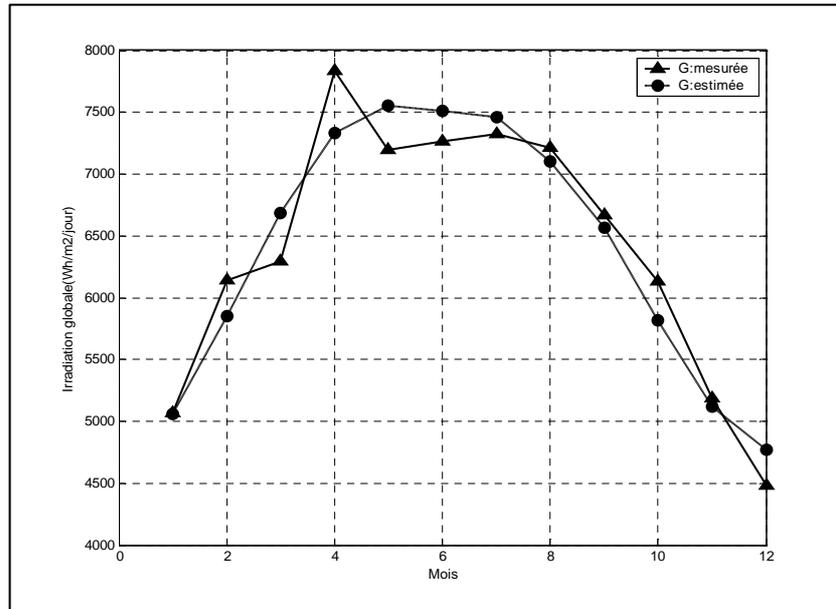


Figure IV.16 : L'irradiation solaire globale mesurée et estimée par le quatrième modèle pour le site de Tamanrasset

IV-3-5- Application du cinquième modèle

Le calcul des paramètres statistiques par le modèle de la logique floue implanté sur le "fis editor" de matlab 6.5 donne les résultats suivants.

	Logique floue			
	MBE	MAE	RMSE	R^2
Alger	-0.21	3.92	4.61	0.99
Oran	-0.21	3.98	4.65	0.98
Bechar	-0.06	3.60	4.18	0.97
Taman	-0.04	3.23	4.18	0.93

Tableau IV.10 : Paramètres statistiques pour le cinquième modèle

Les variations de l'irradiation solaire globale mesurée et celles de l'irradiation solaire globale estimée par le modèle de la logique floue sont présentées ci-dessous.

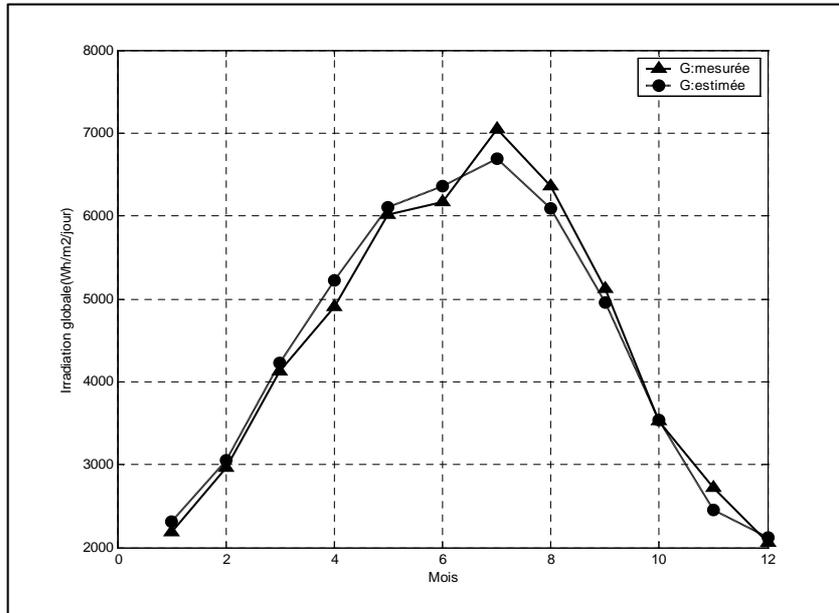


Figure IV.17 : L'irradiation solaire globale mesurée et estimée par le cinquième modèle pour le site d'Alger

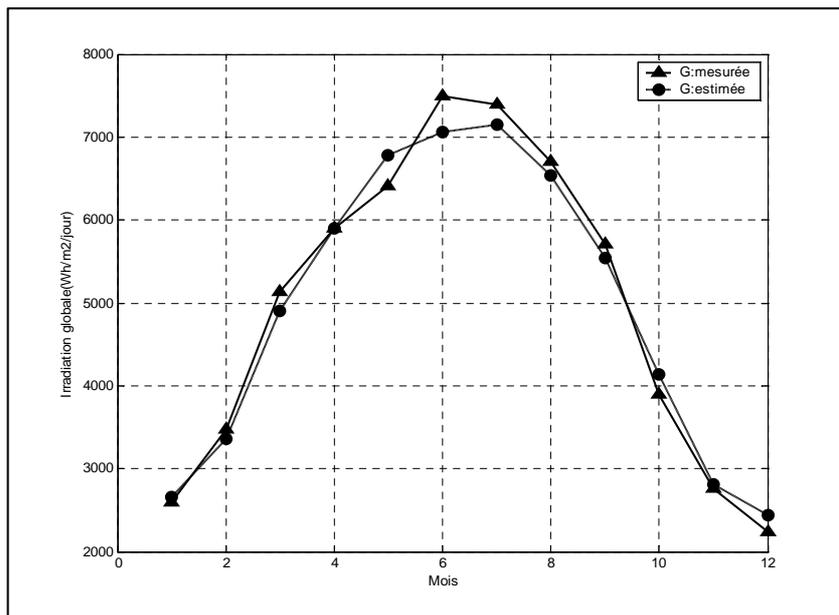


Figure IV.18 : L'irradiation solaire globale mesurée et estimée par le cinquième modèle pour le site d'Oran

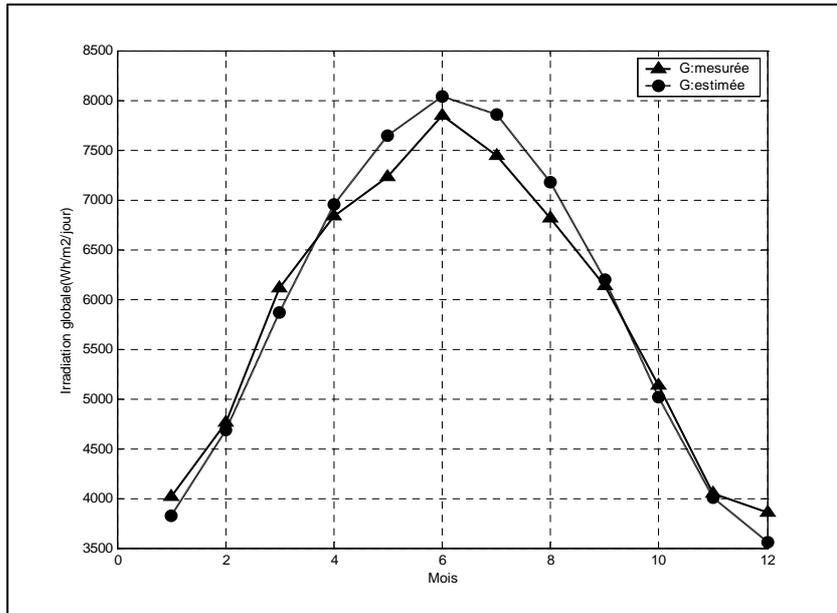


Figure IV.19 : L'irradiation solaire globale mesurée et estimée par le cinquième modèle pour le site de Bechar

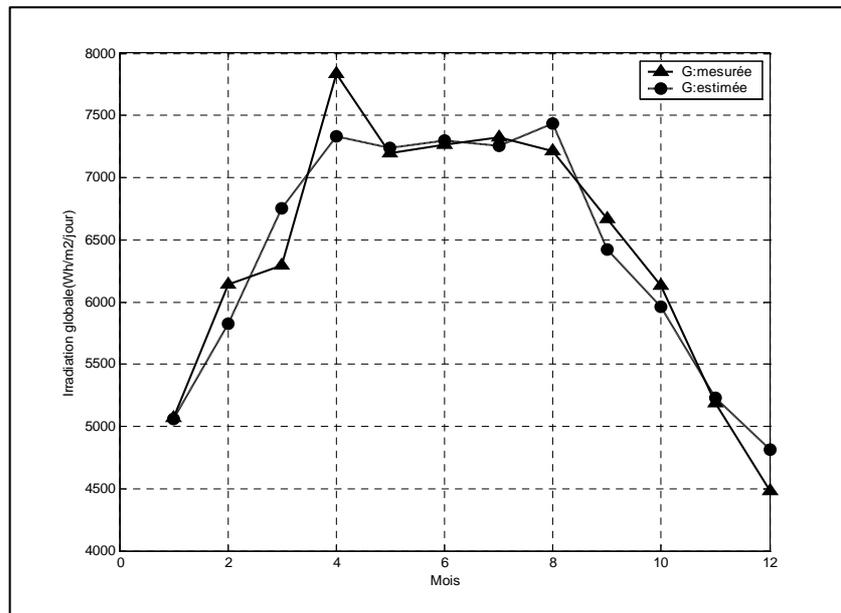


Figure IV.20 : L'irradiation solaire globale mesurée et estimée par le cinquième modèle pour le site de Tamanrasset

IV-3-6- Application du sixième modèle

En exploitant le logiciel matlab 6.5; le calcul des paramètres statistiques par le modèle des réseaux de neurones artificiels mène aux résultats suivants.

Réseaux de neurones artificiels				
	MBE	MAE	RMSE	R^2
Alger	-0.04	1.05	2.11	1.00
Oran	-0.12	2.07	3.52	0.99
Bechar	-0.06	2.07	2.43	0.99
Taman	-0.06	1.84	2.54	0.97

Tableau IV.11 : Paramètres statistiques pour le sixième modèle

Les variations de l'irradiation solaire globale mesurée et celles de l'irradiation solaire globale estimée par le modèle des réseaux de neurones artificiels sont présentées ci-dessous.

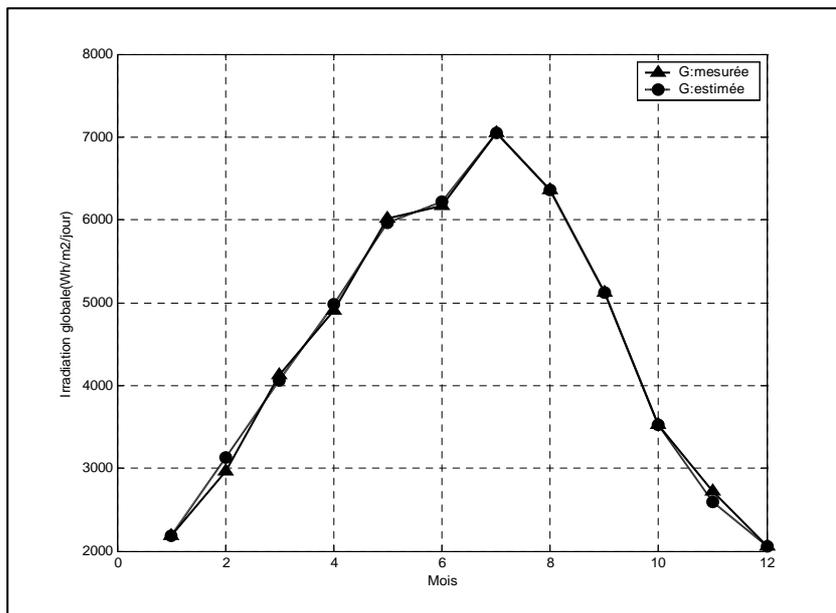


Figure IV.21 : L'irradiation solaire globale mesurée et estimée par le sixième modèle pour le site d'Alger

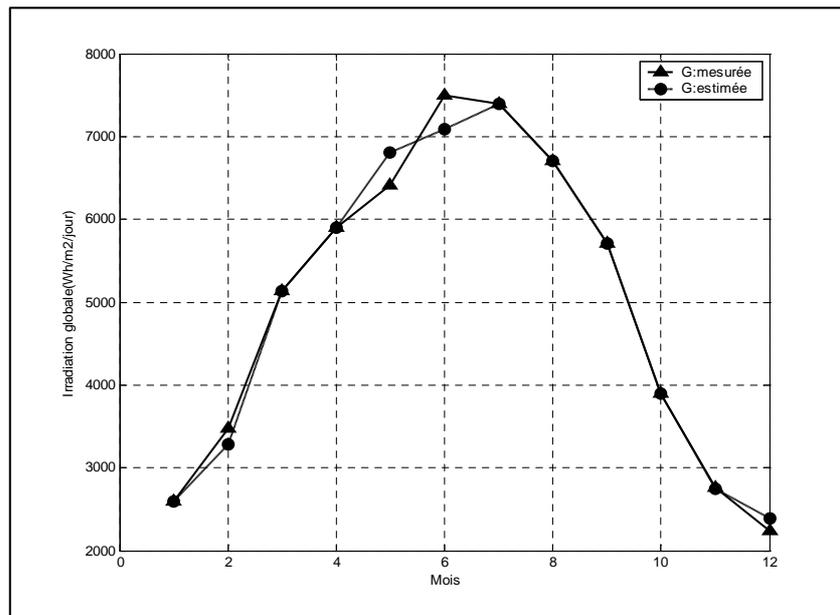


Figure IV.22 : L'irradiation solaire globale mesurée et estimée par le sixième modèle pour le site d'Oran

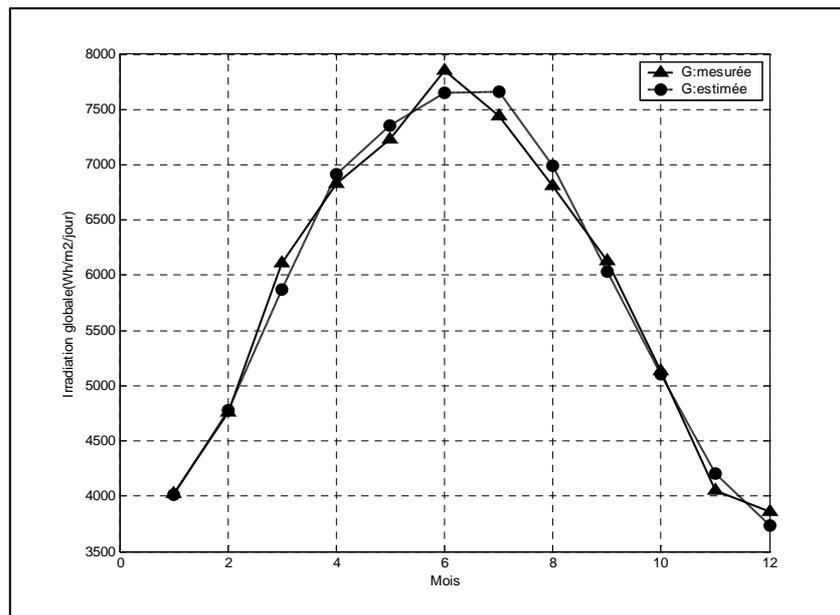


Figure IV.23 : L'irradiation solaire globale mesurée et estimée par le sixième modèle pour le site de Bechar

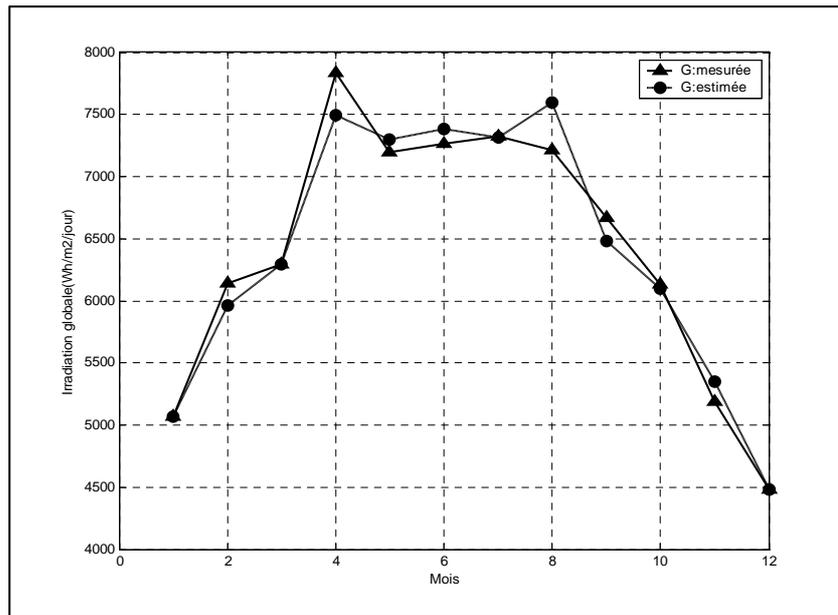


Figure IV. 24 : L'irradiation solaire globale mesurée et estimée par le sixième modèle pour le site de Tamarrasset

IV-4-Discussion

La récapitulation des paramètres statistiques obtenus par l'application des six modèles aux quatre sites est présentée dans les tableaux suivants

Alger			
Modèles/paramètres	MBE	MAE	RMSE
Premier	-0.18	3.33	4.34
Second	-0.10	2.56	3.30
Troisième	-0.14	2.84	3.79
Quatrième	-0.09	2.43	3.10
Cinquième	-0.21	3.92	4.61
Sixième	-0.04	1.05	2.11

Bechar			
Modèles/paramètres	MBE	MAE	RMSE
Premier	-0.08	2.20	2.75
Second	-0.05	1.89	2.21
Troisième	-0.04	1.67	2.03
Quatrième	-0.04	1.57	1.91
Cinquième	-0.06	3.60	4.18
Sixième	-0.06	2.07	2.43

Oran			
Modèles/paramètres	MBE	MAE	RMSE
Premier	-0.24	4.18	4.75
Second	-0.23	4.11	4.73
Troisième	-0.22	3.93	4.59
Quatrième	-0.21	3.77	4.51
Cinquième	-0.21	3.98	4.65
Sixième	-0.12	2.07	3.52

Tamanrasset			
Modèles/paramètres	MBE	MAE	RMSE
Premier	-0.20	3.83	4.47
Second	-0.19	3.36	4.29
Troisième	-0.20	3.82	4.47
Quatrième	-0.18	3.65	4.25
Cinquième	-0.04	3.23	4.18
Sixième	-0.06	1.84	2.54

Il est à noter que les valeurs estimées par les différents modèles sont en bonnes concordances avec les valeurs mesurées, cependant les meilleurs résultats sont obtenus par le modèle des réseaux de neurones artificiels avec un couple (RMSE, MBE) de (2.43%, -0.06%) pour Bechar, de (2.54%, -0.06%) pour Tamanrasset, de (3.52%, -0.12%) pour Oran et de (2.11%, -0.04%) pour le site d'Alger. il est à mentionner aussi que le modèle qui utilise la fraction d'insolation, la température moyenne et l'humidité relative moyenne en une régression multiple (quatrième modèle) donne des résultats extrêmement meilleurs avec un couple (RMSE, MBE) de (1.91%, -0.04%,) pour Bechar, de (4.25%, -0.18%) pour Tamanrasset, de (4.51%, -0.21%,) pour Oran, et de (3.10%, -0.09%) pour le site d'Alger, juste après vient le modèle qui utilise la fraction d'insolation et la température moyenne (second modèle) alors qu'en troisième position on trouve le modèle qui utilise la fraction d'insolation et l'humidité relative moyenne. Le modèle de la logique floue donne de bons résultats mais ces résultats sont très influencés par les choix de l'utilisateur (choix des fonctions d'appartenances, choix des partitions, bonne élaboration des règles d'inférences). Toutefois les résultats obtenus par le modèle d'Angstrom-Prescott restent très proches de ceux obtenus par les autres modèles et parfois ils coïncident avec.

Conclusion

La moyenne mensuelle de l'irradiation solaire globale sur une surface horizontale pour les quatre sites d'Alger, Oran, Bechar et Tamanrasset a été estimée en utilisant plusieurs modèles, dans ces modèles plusieurs grandeurs ont été utilisées à savoir la fraction d'insolation, la température moyenne de l'air, l'humidité relative moyenne de l'air et la saison (pour la logique floue). En fin une analyse statistique est faite en employant l'écart relatif moyen algébrique, absolu et quadratique. Alors une bonne concordance entre les valeurs mesurées et celles estimées par les différents modèles est très remarquable, ce qui nous mène donc à dire, que ces modèles peuvent être utilisés pour estimer l'irradiation solaire globale pour des endroits dont les climats sont similaires à ceux des quatre sites.

Conclusion générale

L'énergie solaire est l'une des plus importantes parmi les diverses sources d'énergies possibles. Une connaissance précise de distribution de la radiation solaire à un endroit géographique donné est d'une importance majeure pour le développement des dispositifs d'énergie solaires et pour l'évaluation de leurs performances. Hélas, pour beaucoup de pays en voie de développement les mesures de l'irradiation solaire ne sont pas facilement disponibles. Il est donc, important d'élaborer des modèles d'estimation de l'irradiation solaire sur la base des données astronomiques et météorologiques.

L'Algérie est un pays de soleil par excellence. Le nombre des heures d'insolation s'élève à presque 3300h/an. Le climat est très favorable pour l'exploitation de l'énergie solaire dans différents domaines, mais la distribution de l'irradiation solaire n'est pas bien connue.

Le but de ce travail est d'appliquer différents modèles à différents sites algériens pour estimer l'irradiation solaire globale et de faire une étude comparative entre les résultats obtenus.

Le présent travail est réparti en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre nous avons exposé quelques connaissances de base sur le soleil, nous avons la répartition du rayonnement solaire à la limite extérieure de l'atmosphère et évalué les différentes modifications que subisse le rayonnement solaire à sa traversée de la couche atmosphérique.

Au second chapitre nous avons exposé les relations liant la position du soleil, la latitude et l'angle horaire. Nous avons mis en évidence les différentes procédures de calcul de l'irradiation solaire globale sur une surface horizontale hors atmosphère et au sol.

Dans le troisième chapitre nous avons présenté différents modèles afin d'estimer l'irradiation solaire globale en utilisant différents paramètres climatiques.

Le dernier chapitre est réservé aux résultats obtenus par l'application de ces modèles et à une étude comparative entre les résultats obtenus.

La moyenne mensuelle de l'irradiation solaire globale sur une surface horizontale pour les quatre sites d'Alger, Oran, Bechar et Tamanrasset a été estimée en utilisant plusieurs modèles, dans ces modèles plusieurs grandeurs ont été utilisées à savoir la fraction d'insolation, la température moyenne de l'air, l'humidité relative moyenne de l'air et la saison (pour la logique floue). En fin une analyse statistique est faite en employant l'écart relatif moyen algébrique, absolu et quadratique. Alors une bonne concordance entre les valeurs mesurées et celles estimées par les différents modèles est très remarquable, ce qui nous mène donc à dire, que

ces modèles peuvent être utilisés pour estimer l'irradiation solaire globale pour des endroits dont les climats sont similaires à ceux des quatre sites cependant les meilleurs résultats sont obtenus par le modèle des réseaux de neurones artificiels.

Bibliographie

-
- [1] Géométrie solaire sur site Internet.http://www.outilssolaires.com/Glossaire/spin_geometrie.htm (consulté le 22/05/2009).
- [2] P. Bessemoulin, J. Oliviéri. Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette. La météorologie 8e série n° 31 septembre (2000), 42-59
- [3] M. Salmi, M. Chegaar, P. Mialhe. Modèles d'estimation de l'irradiation solaire globale sur une surface horizontale au sol. Revue internationale d'héliotechnique, énergie environnement n° 35 (2007), 19-24
- [4] Site Internet.http://docinsa.insa-Lyon.fr/these/2004/chain/05_chapitre_1(Consulté le 21/06/2009).
- [5] Yassine Sahnoune. Modélisation du rayonnement solaire sur quelques sites algériens. Mémoire de magister (2007), université de Sétif
- [6] M. Chegaar, A. Chibani. A simple method for computing global solar radiation. Rev. Energ. Ren. Chemss (2000), 111-115.
- [7] M. Drif, M. Chikh. Estimation de l'irradiation solaire par la logique floue, Rev. Energ. Ren. Chemss (2000), 105-110.
- [8] Site Internet. <http://www.imcee.fr/ephemerides/astronomie/premenade/page3/325.html>(Consulté le 21/06/2009).
- [9] Capderou M. Atlas solaire de l'Algérie. Office des publications universitaires, T1-3, 1988.
- [10] A. A. El-Sebaai; A. A. Trabea. Estimation of global solar radiation on horizontal surfaces over Egypt. Egypt. J. Solids, vol. 28, n°1 (2005),163-175
- [11] Le jour solaire vrai et Jour solaire moyen sur site Internet. <http://www.cosmovisions.com>. (Consulté le 18/06/2009).
- [12] F. Ahmad, I. Ulfat. Empirical models for the correlation of monthly average daily global solar radiation with hours of sunshine on a horizontal surface at Karachi, Pakistan. Turk J Phys 28 (2004), 301-307
- [13] K. Kaygusuz, T. Ayhan. Analysis of solar radiation data for Trabzon, Turkey. Energy Conversion and Management 40 (1999), 545-556
- [14] Kevin K.W. Wan; H.L. Tang Liu Yang Joseph C. Lam. An analysis of thermal and solar zone radiation models using an Angstrom–Prescott equation and artificial neural networks. Energy 33 (2008), 1115–1127
- [15] M. Chegaar, A. Chibani. Global solar radiation estimation in Algeria. Energy conversion and management 42 (2001), 967-973
- [16] Zekai ,Sen. Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques, Springer 2008
- [17] Joseph C. Lam, Kevin K.W. Wan, Chris C.S. Lau, Liu Yang. Climatic influences on solar modelling in China. Renewable Energy 33 (2008), 1591–1604

- [18] B C Cuamba, M L Chenene, G Mahumane, D Z Quissico, J Lovseth, P O'Keefe. A solar energy resources assessment in Mozambique. *Journal of Energy in Southern Africa* vol 17 n° 4 November (2006),76-85
- [19] www.tn.refer.org/hebergement/cours/logique_floue/intro.html-12k(consulté le 23/05/2009)
- [20] Howard Demuth, Mark Beale. *Neural network toolbox for use with MATLAB*. MathWorks 2001
- [21] Laamayad Tahar. *Commande optimale d'une machine asynchrone apport de la logique Floue*. Mémoire de magister (2008), universités de Batna
- [22] http://ace.montefiore.ulg.ac.be/elap/documents/fuzzy/Figure2/la_commande_floue.htm 2^{ème}Partie (Consulté le 20/07/2009)
- [23] M. Mokhtari, A. Mesbah. *Apprendre et maîtriser matlab*, Springer 1997
- [24] Zekai Sen. Fuzzy algorithm for estimation of solar irradiation from sunshine duration. *Solar Energy* Vol. 63, n°1 (1998), 39–49,
- [25] J. Mubiru, E.J.K.B. Banda. Estimation of monthly average daily global solar irradiation using artificial neural networks. *Solar Energy* 82 (2008), 181–187
- [26] *Réseaux de neurones – Méthodologie et applications*. Sous la direction de Gérard Dreyfus, Ed. Eyrolles, 2004
- [27] Viorel Badescu. *Modeling solar radiation at the earth's surface*, Springer 2008
- [28] Bent Sørensen. *Renewable energy its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects*. (3rd ed), Elsevier 2004
- [29] F. Chevré; F. Guély. *La logique floue*. Cahier technique, Schneider n° 191; édition Mars 1998; 2-29
- [30] Haykin S. *Neural networks – A comprehensive Foundation* (2nd ed.), Prentice Hall 1999
- [31] Alexander I. Galushkin. *Neural Networks Theory*, Springer- 2007
- [32] M.S. AI-Ayed, A.M. AI-Dhafiri, M.Bin Mahfoodh. Global, direct and diffuse solar irradiance in Riyadh, Saudi Arabia. *Renewable Energy*, Vol. 14, Nos.1-4 (1998), 249-254,
- [33] José Leonardo De Souza, Rosilene Mendonc, Nica'cio, Marcos Antonio Lima Moura. Global solar radiation measurements in Maceio, Brazil, *Renewable Energy* 30, (2005) 1203–1220
- [34] Zhou Jin, Wu Yezheng, Yan Gang. Estimation of daily diffuse solar radiate in China. *Renewable Energy* 29 (2004) 1537–1548
- [35] Zekai Sen, Elcin Tan. Simple models of solar radiation data for northwestern part of Turkey. *Energy Conversion and Management* 42 (2001) 587-598

-
- [36] M. TIRIS, C. TIRIS. Analysis of solar radiation data for Gebze, Turkey. *Energy Conversion and Management* Vol. 38, n° 2 (1997), 179-186,
- [37] K. Gairaa, S. Benkaciali. Modélisation numérique des irradiations globale et diffuse au site de Ghardaïa. *Revue des Energies Renouvelables* Vol.11 n°1 (2008), 129 – 136
- [38] E. Tulcan-Paulescu, M. Paulescu. Fuzzy modelling of solar irradiation using air temperature data. *Theor. Appl. Climatol.* 91 (2008), 181–192
- [39] Can Ertekin, Osman Yaldiz. Comparison of some existing models for estimating global solar radiation for Antalya (Turkey). *Energy Conversion and Management* 41 (2000), 311-330
- [40] S.M. Robaa. Validation of the existing models for estimating global solar radiation over Egypt. *Energy Conversion and Management* 50 (2009), 184–193
- [41] NA Elagib, SH Alvi, MG Mansell. Correlations between clearness index and relative sunshine duration for Sudan. *Renewable Energy* 17 (1999) 473-498
- [42] Zekai Sen. Simple nonlinear solar irradiation estimation model. *Renewable energy* 32 (2007) 342–350
- [43] Falayi E. O, Adepitan J. O, Rabiou A. B. Empirical models for the correlation of global solar radiation with meteorological data for Iseyin, Nigeria. *International Journal of Physical Sciences* Vol. 3 (9), pp. 210-216, September 2008
- [44] Augustine C, Nnabuchi M. N. Relationship between global solar radiation and sunshine hours for Calabar, Port Harcourt and Enugu, Nigeria. *International Journal of Physical Sciences* Vol. 4 (4), pp. 182-188, April, 2009

Abstract:

In this dissertation, a comparative study of different models to estimate global solar radiation on a horizontal surface is dealt with. These models use various parameters such as relative sunshine duration, maximum air temperature and relative air humidity. In the first four models, these parameters have been considered in various linear regressions (considering the relative sunshine duration, relative sunshine duration and maximal temperature, relative sunshine duration and relative humidity and all parameters). The fifth model (fuzzy logic) uses the relative sunshine duration and the season as inputs, while for the sixth model (artificial neural networks) the relative sunshine duration is considered as input.

The results show that the different models are recommended for the estimation of global solar radiation in Algeria; however the best results were obtained using the last model.

Key words: Solar radiation, horizontal surface, relative sunshine duration, maximal temperature, relative humidity.

Résumé:

Dans ce mémoire, une étude comparative de différents modèles pour estimer l'irradiation solaire globale sur une surface horizontale a été considérée. Ces modèles utilisent différents paramètres, à savoir la fraction d'insolation, la température maximale de l'air et l'humidité relative de l'air. Dans les quatre premiers modèles, ces différents paramètres ont été considérés dans une variété de régressions linéaires (fraction d'insolation, fraction d'insolation et température maximale, fraction d'insolation et humidité relative en fin en considérant tous les paramètres). Dans le cinquième modèle (la logique floue) on a utilisé la fraction d'insolation et la saison comme entrées, alors que pour le sixième modèle (réseaux de neurones artificiels), on a utilisé en entrée, la fraction d'insolation.

Les résultats obtenus montrent que ces modèles sont recommandés pour l'estimation de l'irradiation solaire globale sur le territoire algérien, cependant les meilleurs résultats ont été obtenus par l'application du dernier modèle.

Mots clés: Irradiation solaire, surface horizontale, fraction d'insolation, température maximale, humidité relative.