

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



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies
Département d'Automatique et Electromécanique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Energies Renouvelables

Spécialité : Energies Renouvelables en Electrotechnique

Par : BHAZ SafaetAL SID CHIKHK Zoubir

Thème

**Détermination du trouble atmosphérique de
Linke à partir des mesures expérimentales
d'éclairement solaire**

Soutenu publiquement le :22/10/2020

Devant le jury :

SEBA HADJ Yahia	Maître de Conférences B	Univ. Ghardaïa	Président
KHATTARA Abedlouahab	Maître de Conférences B	Univ. Ghardaïa	Examineur
YETTOU Fatiha	Maître de Recherche A	URAER. Ghardaïa	Encadreur
BOUARAOUR Kamel	Maître de Conférences A	Univ. Ghardaïa	Co-encadreur

Année Universitaire :2019 / 2020

REMERCIEMENTS

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

*« Avant de présenter ce travail, nous tenons à remercier **Allah** le tout puissant pour nous avoir donné beaucoup de patience et de courage pour réaliser ce travail »*

*« En premier lieu, nous remercierons Dr **YETTOU Fatiha**, Maître de Recherche A à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa, en tant qu'encadreur de notre mémoire, d'avoir proposé un sujet très intéressant et pour ses conseils, sa disponibilité et pour nous avoir fait profiter de sa connaissances et de sa qualité tant professionnelle qu'humaine »*

*« On tient à remercier Dr **BOUAROUR Kamel** et Dr **GAMA Amor** pour l'aide qu'ils ont fournis et les connaissances qu'ils ont su nous transmettre. Nous les remercierons également pour leur disponibilité et la qualité de leur conseils »*

DÉDICACE

À MA CHÈRE MÈRE

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

À MON TRÈS CHER PÈRE

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager.

Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

À MON ÉPOUX

À MA PETITE FILLE

À MES TRÈS CHERS FRÈRES ET SŒURS

À MES AMIES

Puisse ALLAH vous donne santé, bonheur, courage et surtout réussite.

SAFA



Dédicace

Je dédie ce mémoire

A mes chers parents ma mère et mon père

*Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs
encouragements.*

A mes frères.

A mes amies et mes camarades.

*Sans oublier tout les professeurs que ce soit du
primaire, du moyen, du secondaire ou de
l'enseignement supérieur.*

Zoubir

RESUME

L'évaluation à long terme des performances des systèmes de conversion de l'énergie solaire s'établit par l'intermédiaire de programmes de simulation numérique, qui nécessitent la connaissance des paramètres météorologiques et radiométriques, tels que la température ambiante, la vitesse de vent et l'éclairement solaire. L'utilisation des modèles d'estimation du rayonnement solaire reste pratiquement l'un des seuls moyens pour pallier au problème des données radiométriques à cause de la rareté des stations radiométriques sur le territoire national. Le modèle Capderou, présentant une erreur non négligeable causée par le paramètre des troubles ; reste le plus utilisé en Algérie. Dans ce contexte, une détermination du facteur de trouble de linke à partir des données expérimentales de deux sites Ghardaïa et Bouzaréah est effectuée dans le but d'une modification et d'une amélioration des performances (optimisation) du modèle Capderou. Par ailleurs, une estimation du rayonnement solaire global par ciel clair au niveau du sol par le modèle semi-empirique (Modèle de Capderou) utilisant Matlab est développée à cet effet. Une validation des résultats obtenus par comparaison des valeurs calculées avec les valeurs radiométriques mesurées sur les deux sites est envisagée.

Mots clés : Energie solaire, Estimation du rayonnement solaire, Modèle Capderou, Facteur de trouble de Linke.

ABSTRACT

The long-term performance evaluation of solar energy conversion systems is established through digital simulation programs, which require knowledge of meteorological and radiometric parameters, such as ambient temperature, wind speed and solar illumination. The use of solar radiation estimation models remains practically one of the only means to overcome the problem of radiometric data due to the scarcity of radiometric stations on the national territory. The Capderou model, presenting a non-negligible error caused by the turbidity parameters; remains the most used in Algeria. In this context, a determination of the Linke turbidity factor using experimental data from two sites Ghardaïa and Bouzaréah is carried out with the aim of modifying and improving the performance (optimization) of the Capderou model. Moreover, an estimation of the global solar radiation by clear sky at ground level by the semi-empirical model (Capderou model) using Matlab is developed for this purpose. A validation of the results obtained by comparing the calculated values with the radiometric values measured at the two sites is envisaged.

Keywords: Solar energy, Estimation of solar radiation, Capderou model, Linketurbidity factor

ملخص

يتم إنشاء تقييم الأداء طويل الأجل لأنظمة تحويل الطاقة الشمسية من خلال برامج المحاكاة الرقمية ، والتي تتطلب معرفة معلمات الأرصاد الجوية والإشعاعية ، مثل درجة الحرارة المحيطة وسرعة الرياح والإضاءة الشمسية. يظل استخدام نماذج تقدير الإشعاع الشمسي عملياً أحد الوسائل الوحيدة للتغلب على مشكلة البيانات الراديومترية بسبب ندرة محطات القياس الإشعاعي على الأراضي الوطنية. نموذج كابديرو ، الذي يقدم خطأ غير مهم بسبب معلمات التعكر ؛ لا يزال الأكثر استخداماً في الجزائر. في هذا السياق ، يتم تحديد عامل تعكر الوصلة باستخدام البيانات التجريبية من موقعين غرداية وبوزريعة بهدف تعديل وتحسين أداء (التحسين) لنموذج كابديرو. علاوة على ذلك ، تم تطوير تقدير للإشعاع الشمسي العالمي عن طريق السماء الصافية على مستوى الأرض بواسطة النموذج شبه التجريبي نموذج كابديرو باستخدام برنامج ماتلاب لهذا الغرض. يُتوخى التحقق من النتائج التي تم الحصول عليها من خلال مقارنة القيم المحسوبة مع القيم الإشعاعية المقاسة في الموقعين

الكلمات المفتاحية: الطاقة الشمسية ، تقدير الإشعاع الشمسي ، نموذج كابديرو ، عامل تعكر لينك

LISTE DES FIGURES

Figure I.1	Image de l'étoile soleil du système solaire.	11
Figure I.2	Schématisation des mouvements de la terre autour du soleil.	13
Figure I.3	Les ressources solaires dans les pays méditerranéens.	14
Figure I.4	Le potentiel de l'Algérie en énergie solaire.	15
Figure I.5	Carte du monde de l'irradiation moyenne annuelle en kWh/m ² /jour sur un plan horizontal	16
Figure I.6	Répartition spectrale du rayonnement solaire.	16
Figure I.7	Composantes du rayonnement incident sur un capteur.	17
Figure I.8	Le Pyrhéliomètre (direct)	19
Figure I.9	le Pyranomètre (diffus).	20
Figure I.10	Albédo mètre (réfléchi).	21
Figure I.11	Pyranomètre (direct+diffus+albédo).	21
Figure I.12	héliographe (durée d'insolation).	22
Figure II.1	Les coordonnées terrestre	24
Figure II.2	La sphère céleste équatoriale.	26
Figure II.3	Variation de la déclinaison solaire en fonction du jour.	27
Figure II.4	Position du soleil par rapport à un point fixe de la terre (hauteur et azimut du soleil).	27
Figure II.5	Variation de la hauteur du soleil en fonction du jour.	28
Figure II.6	Variation de l'azimut solaire en fonction du temps.	29
Figure II.7	Variation de masse d'air en fonction de hauteur soleil.	30
Figure II.8	Variation de l'épaisseur optique de l'atmosphère en fonction de la masse d'air.	31
Figure II.9	Variation de l'angle d'incidence en fonction de l'angle horaire.	33
Figure II.10	Éclairement solaire hors atmosphère.	34
Figure II.11	Variation de l'éclairement solaire extraterrestre en fonction du jour.	34
Figure II.12	Variation du coucher et du lever du soleil (a) et de la durée du jour (b) en fonction du jour.	39
Figure II.13	Variations de l'énergie solaire globale reçue par un plan horizontal.	41
Figure II.14		41
Figure II.15	Variations de l'énergie solaire globale reçue par un plan horizontal (a) et incliné (b). Énergie solaire journalière reçue par un capteur plan horizontal (a) et incliné (b).	42
Figure II.16	Effet de l'inclinaison du plan sur l'énergie solaire reçue par celui-ci.	43
Figure III.1.	Comparaison des résultats obtenus pour le calcul du facteur de Linke par différentes méthodes à Ghardaïa et Bouzaréah.	46
Figure III.2.	Valeurs mensuelles moyennes du coefficient τ_a pour les deux sites.	49
Figure III.3.	Comparatif des résultats obtenus pour les valeurs mensuelles moyennes du facteur de trouble de Linke et du coefficient d'Angstrom pour les deux sites. Relation entre le facteur de trouble de Linke et le coefficient d'Angstrom calculée pour les deux sites.	49
Figure III.4.		51
Figure III.5.	Variations de la transmittance directe et du rayonnement direct normal.	53
Figure III.6.	Variation mensuelle des valeurs moyennes, maximales et minimales du facteur de trouble de Linke calculées à Ghardaïa et Bouzaréah.	55
Figure III.7.	Rayonnement incident sur un plan horizontal.	56
Figure III.8.	Rayonnement incident sur un plan incliné à la latitude.	57

BIBLIOGRAPHIE

Figure III.9 .	Rayonnement incident sur un plan orienté vers le Sud et incliné de 90° .	57
Figure III.10	Rayonnement incident sur un plan orienté SudOuest (a) et Sud Est (b).	58
Figure III.11	Comparaison des résultats obtenus par le modèle Capderou avec les données expérimentales relatives au rayonnement solaire global horizontal sur les sites de Bouzaréah et Ghardaïa pour un jour d'hiver et d'été clair, respectivement.	59
Figure III.12	Comparaison des résultats obtenus par le modèle Capderou avec les données expérimentales relatives au rayonnement solaire global incliné sur les sites de Bouzaréah et Ghardaïa pour un jour d'automne et du printemps, respectivement.	60
Figure III.13	Comparaison des résultats obtenus par le modèle Capderou avec les données expérimentales relatives à l'énergie solaire directe sur les sites de Bouzaréah et Ghardaïa durant l'année.	61
Figure III.14	du facteur de Linke pour le mois de Janvier (a), et le mois de Juillet (b).	61

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1	l'ensoleillement reçu annuellement en Algérie par région climatique	7
Tableau I.2	Valeurs d'albédo selon différents types de sol	18
Tableau II.1	Jour type standard du mois.	42
Tableau III.1	Résultats obtenus pour les valeurs mensuelles du facteur de trouble de Linke et du coefficient d'Angstrom pour les sites de Ghardaïa et Bouzaréah.	50

NOMENCLATURE

Symbole	Description	Unité
φ	Latitude du lieu	Degrés
λ	Longitude du lieu	Degrés
TSV	Temps solaire vrai	Heure
TSM	Temps solaire moyen	Heure
t	Temps local	min
ET	Equation de temps	min
N	Angle journalier	Degrés
N	Numéro du jour	[-]
TU	Temps universel	Heure
DE	Décalage horaire	Heure
L	Point de latitude	min
TL	Temps légal	Heure
C_1	Décalage horaire par rapport au Greenwich	Heure
C_2	l'heure d'été et d'hiver	Heure
ω_l	Angle horaire du lever du soleil	Degrés
ω_c	Angle horaire du coucher du soleil	Degrés
	L'heure solaire au lever du Soleil= h_l	Heure
	l'heure solaire au coucher du Soleil= h_c	Heure
δ	Déclinaison solaire	Degrés
d_j	Durée du jour	Heure
α	Angle horaire	Degrés
ID	Rayonnement diffus	W/m ²
IB	Rayonnement direct	W/m ²
IG	Rayonnement global	W/m ²
γ_s	Hauteur du soleil	Degrés
χ_s	Azimut du soleil	Degrés
θ_z	Angle zénithal	Degrés
β	Inclinaison du plan	Degrés
α	L'orientation du plan	Degrés
m_A	Masse d'air	[-]
Alt	Altitude du lieu	km
δ_R	Epaisseur totale optique de Rayleigh	[-]
T_L	Facteur de trouble total de Linke	[-]
T_0	Trouble du à l'absorption par la vapeur d'eau	[-]
T_1	Trouble du à la diffusion moléculaire	[-]
T_2	Trouble relatif à la diffusion par les aérosols	[-]
A_{he}	Alternance hiver été	[-]

BIBLIOGRAPHIE

	G Eclairage solaire extraterrestre	W/m ²
	ε Correction de distance terre soleil	[-]
	I_0 Constante solaire	W/m ²
IB_h	Eclairage direct incident sur un plan horizontal par Capderou	W/m ²
T_L'	Facteur de trouble diffusif	[-]
	l'Azimut de la normal du plan	W/m ²
	I(Eclairage global incident sur un plan horizontal par Capderou	W/m ²
	Eclairage direct normal incident sur un plan horizontal	W/m ²
δ^h	Composante du cercle de l'horizon donnée par Capderou	[-]
δ^a	Composante due à l'albédo donnée par Capderou	[-]
	ρ Albédo du sol	[-]
δ^d	Composante directe donnée par Capderou	[-]
δ^i	Composante isotrope du ciel donnée par Capderou	[-]
$\delta^{i'}$	Composante due à la rétrodiffusion donnée par Capderou	[-]
ID_i^a	Composante du diffus isotrope du sol donnée par Capderou	W/m ²
ID_i^i	Composante du diffus isotrope du ciel donnée par Capderou	W/m ²
ID_h	Eclairage diffus incident sur un plan horizontal	W/m ²
ID_i^d	Composante diffus directionnelle donnée par Capderou	W/m ²
ID_i^h	Composante du diffus du cercle de l'horizon donnée par Capderou	W/m ²
ID_i^{ciel}	Composante du diffus du ciel donnée par Capderou	W/m ²
ID_i	Eclairage diffus incident sur un plan quelconque par Capderou	W/m ²
	Eclairage global incident sur un plan quelconque par Capderou	W/m ²
IB_i	Eclairage direct incident sur un plan quelconque par Capderou	W/m ²
	Hauteur de la normal du plan	Degrés

TABLE DES MATIERES

RESUME (Arabe, Français, Anglais)
LISTE DES FIGURES
LISTE DES TABLEAUX
NOMENCLATURE

INTRODUCTION GENERALE **01**

CHAPITRE I :ENERGIE ET ECLAIREMENT SOLAIRE

I.1.	Introduction	03
I.2.	Energies non renouvelables	03
I.2.1.	Energies fossiles	03
I.2.1.1.	Pétrole	04
I.2.1.2.	Gaz naturel	04
I.2.1.3.	Charbon	04
I.2.2.	Inconvénients des énergies fossiles	05
I.2.3.	Réchauffement climatique et l'effet de serre	05
I.3.	Généralités sur les énergies renouvelables	06
I.3.1.	Définition des énergies renouvelables	06
I.3.2.	Sources des énergies renouvelables	07
I.3.2.1.	Energie solaire photovoltaïque	07
I.3.2.2.	Energie solaire thermique	07
I.3.2.3.	Energie solaire thermodynamique	08
I.3.2.4.	Energie éolienne	09
I.3.2.5.	Energie hydraulique	09
I.3.2.6.	Energie biomasse	09
I.3.2.7.	Energie de la géothermie	09
I.3.4.	Avantages des énergies renouvelables	09
I.3.4.1.	Sur le plan environnemental	10
I.3.4.2.	Sur le plan social	10
I.3.4.3.	Sur le plan économique	10
I.4.	Système terre-soleil	11
I.4.1.	Soleil	11
I.4.2.	Couple terre-soleil	11
I.4.3.	Mouvement orbital de la terre autour du soleil	12
I.5.	Energie et potentiel solaire	13
I.5.1.	Les ressources solaires en pays méditerranéens	13
I.5.2.	Potentiel solaire de l'Algérie	14
I.6	Eclairement solaire	15
I.6.1.	Eclairement ou irradiation	15
I.6.2.	Répartition spectrale de L'éclairement solaire	16
I.6.3.	Types de l'éclairement solaire	17
I.6.3.1.	Eclairement global	17

BIBLIOGRAPHIE

I.6.3.2.	Eclairement direct	17
I.6.3.3.	Eclairement diffus et réfléchi	18
I.6.4.	Appareils de mesure de l'éclairement solaire	19
I.6.4.1.	Mesure de l'éclairement direct (le Pyrhéliomètre)	19
I.6.4.2.	Mesure de l'éclairement diffus (le Pyranomètre)	20
I.6.4.3.	Mesure de l'éclairement solaire réfléchi (Albédo mètre)	20
I.6.4.4.	Mesure de l'éclairement global (Pyranomètre)	21
I.6.4.5.	Mesure de la durée d'insolation (l'Héliographe)	22
I.7.	Conclusion	22

CHAPITRE II :MODELISATION DE L'ECLAIREMENT SOLAIRE

II.1.	Introduction	23
II.2.	Paramètres géométriques	23
II.2.1.	Coordonnées géographiques terrestres	23
II.2.1.1.	Latitude et longitude	24
II.2.1.2.	Altitude d'un lieu donné	24
II.2.2.	Coordonnées horaires	25
II.2.2.1.	Angle horaire	25
II.2.2.2.	Déclinaison solaire	26
II.2.3.	Coordonnées de position	27
II.2.3.1.	Hauteur du soleil	28
II.2.3.2.	Azimut du soleil	28
II.3.	Paramètres atmosphériques	29
II.3.1.	Masse atmosphérique	29
II.3.2.	Epaisseur de Rayleigh	30
II.4.	Angles d'un plan quelconque	31
II.4.1.	Orientation d'un plan	31
II.4.2.	Inclinaison du plan	32
II.4.3.	Azimut du plan ou déviation azimutale	32
II.4.4.	Angle d'incidence	32
II.5.	Modélisation de l'éclairement solaire par le modèle de Capderou	33
II.5.1.	Eclairement extra-terrestre	33
II.5.1.1.	Constante solaire	34
II.5.1.2.	Correction de la distance terre-soleil	35
II.5.2.	Eclairement incident sur un plan horizontal par ciel clair	35
II.5.2.1.	Eclairement global incident sur un plan horizontal	35
II.5.2.2.	Eclairement direct incident sur un plan horizontal	35
II.5.2.3.	Eclairement diffus incident sur un plan horizontal	36
II.5.3.	Eclairement incident sur un plan quelconque par ciel clair	36
II.5.3.1.	Eclairement direct incident sur un plan quelconque	36
II.5.3.2.	Eclairement diffus incident sur un plan quelconque	36
II.6.	Modélisation de l'énergie solaire reçue par un capteur plan	38
II.6.1.	Coucher, lever du soleil et durée du jour	38
II.6.1.1.	Par rapport à un plan horizontal	38
II.6.1.2.	Par rapport à un plan incliné	39
II.6.2.	Calcul de l'énergie solaire reçue par un capteur plan	40
II.6.3.	Optimisation de l'inclinaison des capteurs plans	41
II.7.	Conclusion	43

CHAPITRE III :DETERMINATION DU FACTEUR DE TROUBLE, RESULTATS ET DISCUSSION

III.1.	Introduction	44
III.2.	Détermination du facteur de trouble atmosphérique de linke par ciel clair	44
III.2.1.	Détermination du facteur de Linke à partir des formules empiriques	44
III.2.1.1.	Modèle de Dogniaux	45
III.2.1.2.	Modèle de Capderou	45
III.2.1.3.	Résultats obtenus à partir des formules empiriques	45
III.2.2.	Détermination du facteur de Linke à partir du facteur d'Angstrom	47
III.2.2.1.	Modèle expérimental du facteur d'Angstrom	47
III.2.2.2.	Analyse des résultats obtenus à partir du facteur d'Angstrom	48
III.2.2.3.	Relation entre le facteur de linke et d'Angstrom	50
III.2.3.	Détermination du facteur de Linke à partir de tables publiées	51
III.2.4.	Détermination expérimentale du facteur de Linke	52
III.2.4.1.	Eclairement direct normal incident sur un plan	52
III.2.4.2.	Données expérimentales	53
III.2.4.3.	Modèle expérimental du facteur de Linke	54
III.2.4.4.	Résultats obtenus à partir des données expérimentales	55
III.3.	Résultats et discussions	56
III.3.1.	Résultats obtenus par le modèle Capderou sur les deux sites	56
III.3.2.	Validation des résultats	58
III.3.2.1.	Rayonnement solaire incident	58
III.3.2.2.	Energie solaire incidente	60
III.3.3.	Cartes du facteur de trouble de linke	61
III.4.	Conclusion	62
	CONCLUSION GENERALE	63

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le soleil, une énergie renouvelable énorme et inépuisable, rayonne sur la terre avec une puissance de 16×10^{15} KWh/m² par an dans toutes les longueurs d'ondes du spectre de la lumière visible. Cette énergie renouvelable est une préoccupation mondiale et d'actualité surtout si elle est exploitée dans la conversion de l'énergie solaire en électricité, qui est l'un des enjeux de la politique énergétique de notre siècle [1].

L'Algérie dispose d'un gisement solaire important compte tenu des valeurs de la durée d'insolation enregistrées sur la quasi-totalité du territoire national dépassant les 2000 heures annuellement et pouvant atteindre même les 3900 heures sur les hauts plateaux et le Sahara. Par conséquent, la quantité d'énergie reçue au sol quotidiennement est de 5KWh/m² [2], soit près de 700KWh/m² par an au nord et de 2263kwh/m² au sud, ce qui favorise l'utilisation de l'énergie solaire dans différents domaines tel que la production de l'électricité, le séchage agroalimentaire, etc. La connaissance de ce gisement est d'un intérêt majeur pour concevoir et dimensionner les systèmes énergétiques solaires.

L'énergie solaire, qui se caractérise par une absence de pollution, par sa disponibilité fait l'objet d'un grand intérêt ces dernières années. En effet, les systèmes d'exploitation qui utilisent cette forme d'énergie demandent une légère maintenance et présentent une bonne fiabilité de fonctionnement, une autonomie de plus en plus accrue, une résistance extrême aux conditions naturelles (température, humidité, vent, corrosion, etc.), et donc une grande longévité. Il apparaît dès lors que l'énergie solaire peut apporter de réelles solutions aux divers problèmes qui se posent actuellement concernant les changements climatiques, les crises énergétiques [3].

Lorsque le rayonnement solaire direct traverse l'atmosphère terrestre, il subit une atténuation due à la diffusion par les molécules d'air et les aérosols et à l'absorption par diverses composantes atmosphériques, notamment l'ozone, la vapeur d'eau, l'oxygène et le dioxyde de carbone [3]. L'extinction de la radiation dépend fortement de l'état du ciel (nuageux ou clair), de la pureté de l'atmosphère et de la quantité de gaz absorbants. Quelques atténuateurs de la radiation solaire sont permanents et presque constants dans l'atmosphère, d'autres changent d'un lieu à un autre ou varient en fonction du temps [3].

L'atténuation est causée par les deux mécanismes : l'absorption par la vapeur d'eau et la diffusion par les aérosols est connue comme une turbidité atmosphérique représentée par les coefficients de trouble d'Angström (β) ou par le facteur de trouble de Linke T_L . Ce dernier permet

de comparer une atmosphère réelle à une atmosphère idéale sèche où n'existe que la diffusion par les molécules d'azote, d'oxygène, et l'absorption par l'ozone [3].

Beaucoup de travaux ont été effectués ces dernières décennies pour déterminer le facteur de trouble de Linke notamment en Amérique du Nord [4, 5] et en Europe [6, 7, 8]. Par contre peu de travaux ont été enregistrés pour L'Afrique (Maroc [9], Tunisie [10, 11] et Egypte [12, 13]), et plus particulièrement pour l'Algérie, aucune vraie étude n'a été faite dans ce domaine acceptée la table publiée en 2003 pour le site de Tamanrasset [14, 15], ceci est du probablement à la non disponibilité des données du rayonnement solaire sur la majorité du territoire national, et même si sur certains sites ont peut collectées ces données, l'erreur reste inévitable à cause du vieillissement des appareils de mesures.

Ce travail de fin d'étude est présenté comme suite :

Le premier chapitre est consacré à la présentation des différentes formes et sources d'énergies, notamment les énergies nouvelles et renouvelables et leurs importances dans notre vie quotidienne. Dans le deuxième chapitre nous avons abordé la description des aspects géométriques de l'éclairement solaire ainsi que les aspects énergétiques de ce dernier, puis on explique les différents éléments qui affectent l'absorption de l'éclairement solaire. Une modélisation du rayonnement solaire par le modèle Capderou [16] est présentée et programmé par Matlab 6.5 [17].

Dans le troisième chapitre, une détermination expérimentale du facteur de Linke est réalisée pour les deux sites : Ghardaïa et Bouzaréah, du fait que le modèle Capderou fait appel à la détermination de ce facteur. Une analyse des modèles théoriques est étudiée et une formule facilitant la détermination de ce facteur à partir du coefficient d'Angstrom est proposée pour l'Algérie.

Finalement on termine ce travail par une conclusion générale qui regroupe les différents résultats obtenus.

CHAPITRE I

Energie et éclairement solaire

I.1. Introduction

L'énergie est essentielle pour améliorer la qualité de la vie et ouvrir des perspectives dans les pays développés et en développement, c'est pourquoi nos pays et l'humanité tout entière doivent relever le défi qui consiste à garantir un approvisionnement énergétique suffisant, fiable et respectueux de l'environnement à un prix reflétant les paramètres fondamentaux du marché. L'économie et la société consomment de l'énergie sous différentes formes, dont l'intensité et la qualité dépendent de l'usage des différents vecteurs énergétiques primaires ou secondaires, l'énergie est donc un facteur essentiel du développement de l'activité humaine, et sa disponibilité revêt un caractère stratégique [18]. Fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux, les énergies renouvelables n'engendrent pas ou peu de déchets ou d'émissions polluantes. Elles participent à la lutte contre l'effet de serre et les rejets de CO₂ dans l'atmosphère, facilitent la gestion raisonnée des ressources locales, génèrent des emplois.

Dans ce premier chapitre, nous consacrons notre étude à l'énergie et ses ressources, elle sera divisée en deux parties : La première partie est une présentation des différentes sources notamment renouvelables et leur importance dans notre vie et la deuxième partie sera consacrée à l'éclairage solaire et ses appareils de mesure.

I.2. Energies non renouvelables

Une énergie non-renouvelable est une source d'énergie qui n'est pas inépuisable (pour l'homme), et qui ne se renouvelle pas ou qui se renouvelle mais pas en quantité suffisante. Les énergies non-renouvelables peuvent être divisées en deux catégories : les énergies fossiles et l'énergie nucléaire [18].

I.2.1. Energies fossiles

L'énergie fossile se renouvelle très lentement et est très consommée. Elle est composée principalement de pétrole, gaz naturel et le charbon.

I.2.1.1. Pétrole

Le pétrole est la première source d'énergie mondiale. Formé à partir du plancton qui s'est déposé au fond des mers, le pétrole fournit près de la moitié de la demande totale en énergie primaire. Pourtant, jusqu'au début des années 1950, le pétrole n'occupait qu'une place limitée dans le paysage énergétique mondial (sauf aux Etats-Unis). Produit facile à manipuler,

transporter ou stocker, le pétrole va rapidement supplanter le charbon. Les années 60 marquent véritablement le début de l'ère du pétrole du fait de la croissance continue des besoins énergétiques, de la découverte d'importants gisements, notamment au Proche-Orient, et de coûts de production très faibles. Après les chocs pétroliers des années 70, la demande connaît une forte baisse, mais un contre-choc, en 1983, provoque une réduction de moitié des prix du pétrole et la demande repart à la hausse (+ 2.4% de 1986 à 1989). Aujourd'hui, le pétrole représente près de 39% de la consommation mondiale d'énergie primaire dans le monde [18].

I.2.1.2. Gaz naturel

Le constituant principal des gisements de gaz naturel est le méthane. Le méthane est un hydrocarbure composé d'un atome de carbone et de quatre atomes d'hydrogène. Pour être utilisable, le gaz naturel peut nécessiter un adoucissement (retrait de la majeure partie des composants acides, gaz carbonique et sulfure d'hydrogène essentiellement) et un dégasolinage (retrait des fractions lourdes du gaz). Il doit dans tous les cas être déshydraté. Toutes ces opérations visent à éliminer les impuretés présentes avec le gaz en sortie de puits.[18].

I.2.1.3. Charbon

Le charbon est la source d'énergie fossile la plus abondante et la mieux répartie dans le monde. Le charbon s'est formé il y a plus de 280 millions d'années à partir de végétaux engloutis par les eaux lors de bouleversements géologiques importants. Moteur essentiel du développement économique au XIX^{ème} siècle, le charbon a marqué la première révolution industrielle. Ainsi, entre 1800 et 1900, la consommation mondiale de charbon a connu une progression annuelle moyenne de +4.3%.

Il existe différents types de charbon (l'antracite, la houille, le lignite, la tourbe) qui n'ont pas tous le même pouvoir énergétique. Au début du XX^{ème} siècle, le charbon était l'énergie fossile dominante ; aujourd'hui il a été supplanté par le pétrole mais reste très présent puisque le charbon représente près de 26% de la consommation mondiale d'énergie primaire dans le monde.[18].

I.2.2. Inconvénients des énergies fossiles

Voilà une question qu'il est judicieux de se poser afin de bien appréhender la question de l'intérêt éventuel des énergies renouvelables. Nous pouvons ainsi discerner quatre problèmes majeurs découlant directement de l'utilisation des énergies fossiles :

- L'épuisement des réserves :
- Les conflits autour de ces réserves :
- Les fluctuations des cours des combustibles fossiles en bourse :
- La combustion des combustibles fossiles contribue à l'effet de serre.

I.2.3. Réchauffement climatique et l'effet de serre

Le réchauffement climatique fait partie des défis environnementaux, sociaux et économiques les plus importants que l'humanité doit affronter. L'effet de serre est un phénomène naturel important pour la survie de la planète. Il permet d'avoir une température moyenne sur terre de 15° C contre -18°C si cet effet n'existait pas.

Cependant les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre ont augmenté depuis l'époque préindustrielle en raison des activités humaines, principalement la combustion des combustibles fossiles et les changements d'affectation des terres et de la couverture terrestre. Des mesures d'adaptation aux changements climatiques doivent être adoptées pour promouvoir la conservation et l'utilisation durable de la diversité biologique et diminuer les incidences des changements climatiques et des extrêmes climatiques sur la diversité biologique [19].

Au cours de ces dernières décennies, différents symptômes du changement climatique ont déjà été observés [20] :

- Le recul généralisé des glaciers dans le monde ;
- La montée régulière du niveau des mers ;
- La multiplication des épisodes de canicule et de sécheresse ;
- Les cyclones et pluies torrentielles ;
- La perte très marquée de biodiversité dans le monde.

On compare souvent l'effet de serre à une voiture aux fenêtres fermées au beau milieu d'une après-midi d'été ensoleillée. Les fenêtres laissent passer le rayonnement solaire, mais le verre reste quasiment opaque au rayonnement émis par l'intérieur de la voiture. La chaleur reste donc piégée. Par analogie, les gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère jouent le même rôle que le verre : ils laissent passer la lumière visible mais restent plutôt opaques aux infrarouges. S'ils existent en trop grandes quantités, la terre se réchauffe progressivement. Tout est donc une question de degré. Car sans la présence de gaz à effet de serre dans

l'atmosphère, la température moyenne de la terre serait de -19°C . A l'inverse, la surface de vénus dont l'atmosphère est riche en CO_2 atteint 460°C , ce qui grillerait tout ce qui existe sur terre [18].

I.3. Généralités sur les énergies renouvelables

I.3.1. Définition des énergies renouvelables

Une énergie renouvelable est une source d'énergie se renouvelant assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humain [21]. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique).

Soulignons que le caractère renouvelable d'une énergie dépend non seulement de la vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée. Le comportement des consommateurs d'énergie est donc un facteur à prendre en compte dans cette définition. Les énergies renouvelables sont également plus 'propres' (moins d'émissions de CO_2 , moins de pollution) que les énergies issues de sources fossiles.

I.3.2. Sources des énergies renouvelables

Les sources d'énergies renouvelables sont disponibles en quantité illimitée, leur exploitation est un moyen de répondre aux besoins en énergie tout en préservant l'environnement. Les principales énergies renouvelables sont :

- L'énergie hydraulique ;
- L'énergie solaire ;
- L'énergie éolienne ;
- La géothermie ;
- L'énergie de biomasse ;

I.3.2.1. Energie solaire photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique pour créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. L'énergie photovoltaïque est captée par des cellules photovoltaïques, plusieurs cellules peuvent être reliées pour former un module photovoltaïque ou un panneau photovoltaïque. Une installation photovoltaïque se compose généralement de plusieurs panneaux qui forment un générateur photovoltaïque.

Il existe plusieurs technologies de modules solaires photovoltaïques [22]:

- les modules solaires monocristallins
- les modules solaires polycristallins
- les modules solaires amorphes

I.3.2.2. Energie solaire thermique

Le rayonnement solaire augmente la température d'un corps en entrant en contact avec ce dernier, c'est le principe de l'énergie solaire thermique. Cette source d'énergie est utilisée par exemple, pour chauffer ou sécher des objets en les exposant au soleil. L'énergie thermique peut être utilisée directement ou indirectement [22]:

- Directement pour chauffer des locaux ou de l'eau sanitaire (serres, architecture bioclimatique, panneaux solaires chauffants et chauffe-eau solaire) ou des aliments (cuisseurs solaires).
- Indirectement pour la production de vapeur d'un fluide caloporteur pour entraîner des turbines et ainsi, obtenir une énergie électrique (énergie solaire thermodynamique : les centrales à tour, les systèmes à réflecteur parabolique, le système à réflecteur cylindro-parabolique, les systèmes à miroirs de Fresnel).

I.3.2.3. Energie solaire thermodynamique

On désigne par "solaire thermodynamique" l'ensemble des techniques visant à transformer l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur à température élevée, puis celle-ci en énergie mécanique à travers un cycle thermodynamique. La concentration du rayonnement Solaire permet de diminuer la surface de réception et donc de minimiser l'influence des pertes Thermiques du récepteur, ainsi la température atteinte après transformation en chaleur est plus élevée que pour des dispositifs à capteurs sans concentration [23].

a. Les centrales à tour

Une centrale à tour, utilise un certain nombre de grands miroirs plats qui suivent le mouvement du soleil et qui concentrent la lumière sur un grand absorbeur situé au sommet d'une Tour. Le système pompe un fluide, soit une huile synthétique à haute Température ou du sel fondu, dans l'absorbeur où il est chauffé jusqu'à (550°C) et ensuite utilisé pour produire de l'électricité [24].

b. Les centrales cylindro-parabolique

Comme son nom l'indique, ce système utilise une série de longs réflecteurs cylindrique en forme de parabole. La parabole concentre la lumière sur un tube récepteur situé le long de la ligne focale du réflecteur. Les températures du récepteur peuvent atteindre 4000°C et peuvent produire de la vapeur afin de fournir de l'électricité [24].

c. Les centrales paraboliques

Un système à réflecteur parabolique, utilise des miroirs paraboliques pour concentrer le rayonnement solaire sur un récepteur situé au foyer du réflecteur. Le récepteur contient un fluide qui, lorsque les rayons du soleil le frappent, atteint une température de 750 à 1000°C.

Ce fluide très chaud est ensuite utilisé pour produire de l'électricité dans un petit moteur fixé au récepteur [25].

I.3.2.4. Energie éolienne

Entraînés par le vent, les aérogénérateurs produisent des dizaines de millions de mégawatt heures. Cette électricité éolienne permet d'alimenter des sites isolés et aussi les grands réseaux de distribution. Les éoliennes mécaniques servent à pomper de l'eau dans de nombreux pays.[22].

I.3.2.5. Energie hydraulique

La force motrice des chutes d'eau est utilisée par des turbines installées sur les rivières et les fleuves pour générer de l'électricité. Les centrales dans les grands barrages et les usines marémotrices forment la filière hydraulique, qui est la deuxième source d'énergie renouvelable dans le monde.[22].

I.3.2.6. Energie biomasse

La biomasse regroupe le bois, la paille, les rafles de maïs, le biogaz et les biocarburants. Le bois issu des déchets de la forêt ou des industries du bois est brûlé pour produire de la chaleur. Il représente 14% de la consommation énergétique mondiale. Le biogaz est issu de la fermentation des déchets organiques. Sa combustion produit de la chaleur, mais également de l'électricité par cogénération. Les biocarburants proviennent de plantes cultivées (tournesol, betterave, colza...etc) : les plus courants sont le biodiesel (ou ester méthylique d'huile végétale, EMHV), l'éthanol, et son dérivé, l'éthyl-tertio-butyl-ether, ou encore l'ETBE.[23].

I.3.2.7. Energie de la géothermie

Cette énergie utilisant la chaleur du sous-sol, la géothermie peut permettre de chauffer des locaux (avec une température moyenne ou faible), ou de produire de l'électricité par vapeur interposée (avec une température élevée).[22].

I.3.4. Avantages des énergies renouvelables

I.3.4.1. Sur le plan environnemental

Les énergies renouvelables :

- Contribuent à la réduction des émissions des gaz à effet de serre ;
- Réduisent la pollution de l'air, de l'eau, du sol et de la biosphère (pas d'émission de gaz de combustion, CO₂, SO₂, NO_x,...) ;
- Ne nécessitent pas d'extraction ni de transport de combustibles et limitent ainsi les risques d'accident (marées noires, explosions ...) ;
- Ne génèrent pas de déchets dangereux ;
- Préservent les stocks de ressources naturelles et énergétiques.

Cependant elles peuvent avoir des impacts environnementaux locaux spécifiques à chaque installation (occupation du sol, paysage, bruit, modification de l'écosystème). Dans la plupart des cas cependant, une évaluation des incidences environnementales locales permet de mettre en œuvre des solutions adaptées aux particularités locales.

I.3.4.2. Sur le plan social

Les installations utilisant les énergies renouvelables induisent généralement la création d'emplois durables et difficilement délocalisables. Leur caractère diffus et décentralisé permet par ailleurs aux populations locales de maîtriser la production d'énergie nécessaire à leurs besoins, tout en permettant une réorientation de l'activité économique. Ainsi par exemple, la production de biomasse-énergie constitue une possibilité de diversification assurant par là des revenus complémentaires pour les secteurs agricole et sylvicole [26].

Localement, l'implication de la population dans les énergies renouvelables est également une excellente entrée en matière d'éducation à une utilisation rationnelle de l'énergie. En outre, au niveau international, l'autonomie énergétique des régions réduit les tensions géopolitiques, limite ainsi les risques de conflit et permet la solidarité entre les peuples.

I.3.4.3. Sur le plan économique

Les énergies renouvelables permettent de mieux stabiliser les prix de l'énergie, en rendant le marché de l'énergie nettement moins sensible aux fluctuations des combustibles fossiles, et diminuent la dépendance énergétique. Par ailleurs, elles contribuent à l'activité économique locale via les entreprises actives dans le secteur (fabricants, installateurs, équipementiers, ou encore entreprises chargées de l'exploitation, l'entretien ou la maintenance des installations).

I.4. Système terre-soleil

I.4.1. Soleil

Le soleil exerce sur notre planète une action vitale, véritable source de vie, bien qu'il soit le centre du système qui porte son nom (système solaire auquel la terre appartient), le soleil n'est qu'une étoile (Fig I.1) parmi tant d'autres dans notre galaxie [27]. Le soleil est à l'origine de toute source d'énergie sur terre. Ceci étant vrai autant pour les énergies non renouvelables d'origine fossile, comme les hydrocarbures qui sont le résultat de la photosynthèse ; que pour les énergies renouvelables, comme l'énergie solaire, l'énergie géothermique...etc. [28, 29].

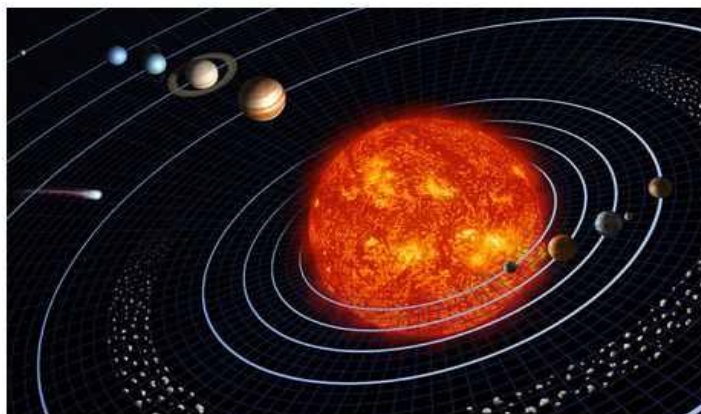


Figure I.1 : Image de l'étoile soleil du système solaire.

I.4.2. Couple terre-soleil

Le soleil et la terre sont liés par des liens étroits, de nature biologique, sociologique, physique et technique. Commençons par le fait que sans le soleil, la vie sur terre ne serait pas ce qu'elle est.

La majeure partie de ce qui vit sur terre doit son existence à la lumière solaire. En effet, les rayonnements ultraviolets qu'elle contient permettent aux plantes vertes de pratiquer la

photosynthèse, c'est-à-dire de fabriquer les matières organiques nécessaires à leur croissance et à leur vie à partir du gaz carbonique atmosphérique, de l'eau, et des sels minéraux puisés dans la terre. Ces plantes vertes sont indispensables à la survie de la plupart des espèces animales, d'une part en tant que productrices d'Oxygène, et d'autre part en tant que point de départ des chaînes alimentaires. [30]

La plupart des formes d'énergies exploitées sur terre ont pour origine l'énergie du soleil, de manière plus ou moins directe. Les combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) proviennent de la lente décomposition sous pression de couches détritiques végétales datant de plusieurs millions d'années. Or, ces végétaux doivent leur existence à la lumière solaire. C'est en effet elle qui a permis par photosynthèse, la réduction du carbone présent sous forme oxydée dans le dioxyde de carbone atmosphérique. Ce carbone, présent dans les combustibles fossiles, nous restitue de l'énergie lorsque nous l'oxydons à nouveau par combustion.

I.4.3. Mouvement orbital de la terre autour du soleil

La terre décrit une ellipse dans son mouvement autour du soleil (Fig I.2). La révolution complète d'effectue en une période de 365.25 jours. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique.

La terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Cette rotation s'effectue en une journée. L'axe des pôles et l'écliptique font entre eux un angle appelé déclinaison, il est égal à $23^{\circ}27'$.

C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est la plus proche du soleil : 147 millions de km. Au 21 juin la distance terre-soleil est de 152 millions de km, c'est le jour ou la terre est la plus éloignée, c'est le solstice d'été. Le 21 mars et le 21 septembre sont appelés respectivement équinoxes de printemps et équinoxes d'automne. Aux équinoxes le jour et la nuit sont égaux.

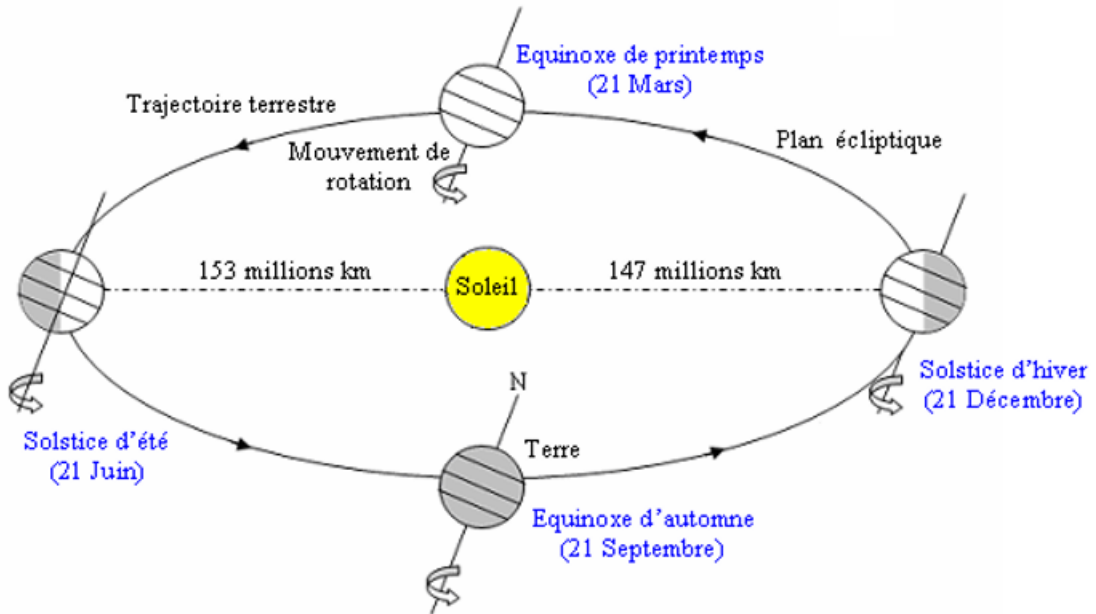


Figure I.2 : Schématisation des mouvements de la terre autour du soleil.

I.5. Energie et potentiel solaire

I.5.1. Les ressources solaires en pays méditerranéens

Les sources d'énergie renouvelable dans les pays bord de la méditerranée seulement peuvent faire face à la demande énergétique mondiale croissante. En effet la ressource d'énergie la plus importante dans les ces pays est l'irradiation solaire, avec un potentiel qui peut satisfaire la demande en l'électricité du monde entier (Fig I.3) [31]. Cette ressource peut être employée dans les systèmes photovoltaïques comme dans les systèmes thermiques.

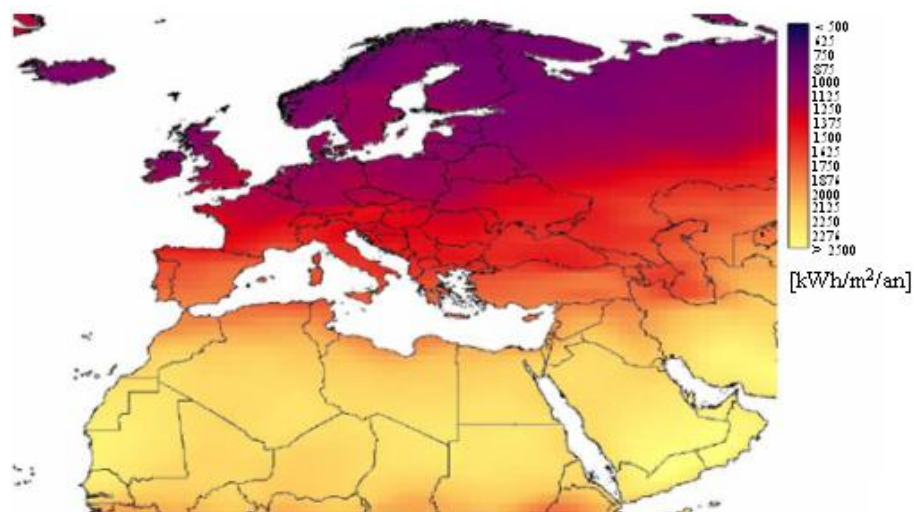


Figure I.3 : Les ressources solaires dans les pays méditerranéens. [32]

I.5.2. Potentiel solaire de l'Algérie

Avec 2381741 km² de surface, l'Algérie est le pays le plus vaste du méditerranéen, selon une étude de l'agence aérospatiale allemande, l'Algérie offre de plus grandes possibilités intéressantes; à long terme, pour investir dans les centrales thermiques solaires. En effet l'Algérie est l'un des pays de la méditerrané qui dispose d'un potentiel solaire énorme, selon les données d'ensoleillement (Fig I.4), l'Algérie est comptée parmi les meilleurs pays ensoleillé au monde [33]. La durée d'insolation sur la quasi totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara, l'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au Sud du pays, le potentiel des ressources solaires de notre payé est donc optimal pour l'exécution des projets solaires. [34]

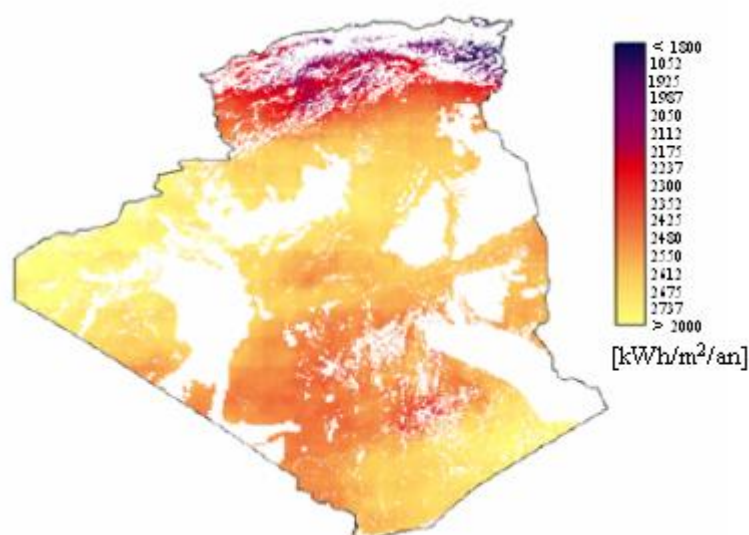


Figure I.4 : Le potentiel de l'Algérie en énergie solaire. [32]

I.6. Eclairage solaire

I.6.1. Eclairage ou irradiation

L'éclairage est défini comme la puissance reçue par une surface. Elle est exprimée en W/m² (watt par mètre carré). Le S.I. (Système international d'unités) recommande l'utilisation du symbole **G** [35]. La terre reçoit chaque année une valeur moyenne de l'éclairage 1.36 TWh/m² (Fig I.5).

Il est à noter qu'en plus de l'impact de l'atmosphère, l'irradiation solaire en dépend:

- l'orientation et l'inclinaison de la surface

- la latitude du lieu et son degré de pollution,
- la période de l'année et l'heure considérée
- la nature des couches nuageuses.

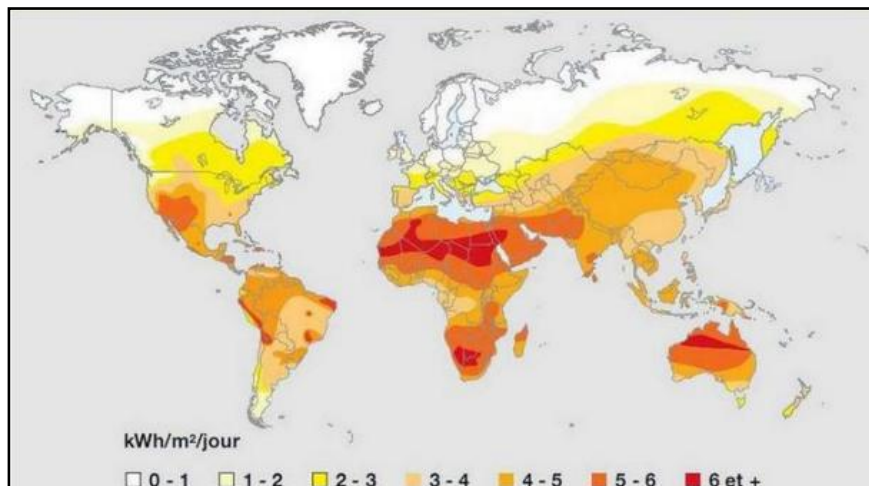


Figure I.5 : Carte du monde de l'irradiation moyenne annuelle en kWh/m²/jour sur un plan horizontal [36]

I.6.2. Répartition spectrale de L'éclairage solaire

Le soleil nous envoie de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde variant de 0.22μm à 10μm, la figure I.6 représente la variation de la répartition spectrale de ce rayonnement. Sur ce graphe on constate que pour $\lambda \leq 0.3\mu\text{m}$ le rayonnement est négligeable alors que pour la partie visible du rayonnement, pour des valeurs entre 0.3 et 0.7μm l'absorption par l'atmosphère est faible. [37]

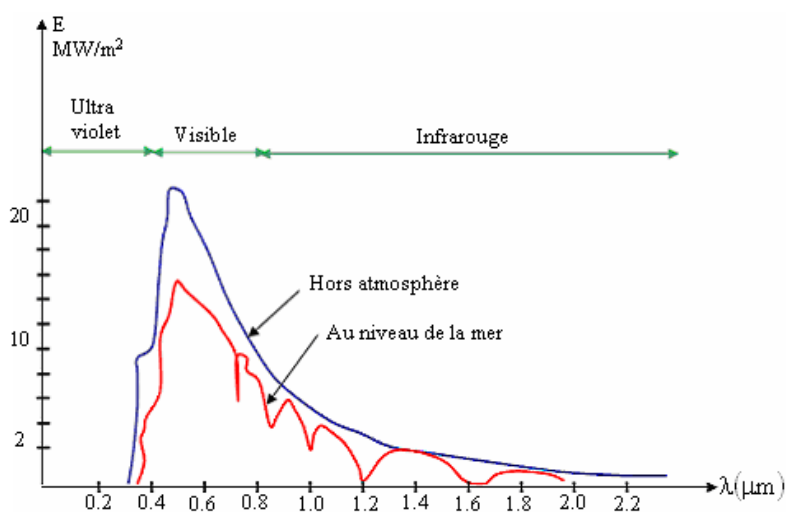


Figure I.6 : Répartition spectrale du rayonnement solaire. [38]

On décompose le rayonnement global (total) terrestre en rayonnement direct (rayonnement provenant directement du soleil) et en rayonnement diffus (rayonnement provenant de l'atmosphère); Un capteur incliné d'un angle donné sur l'horizontale subit une autre composante du rayonnement : la part renvoyée vers l'atmosphère après réflexion diffuse par le sol ; (Fig I.7)

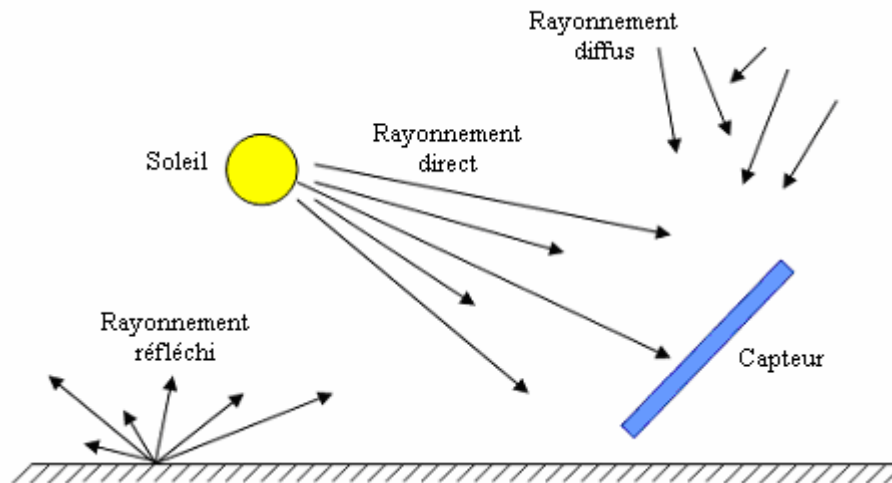


Figure I.7 : Composantes du rayonnement incident sur un capteur.

I.6.3. Types de l'éclairage solaire

I.6.3.1. Eclairage global

- Rayonnement Global sur une surface horizontale (IG_h) : est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus.
- Le rayonnement Global sur une surface inclinée (IG_i): est la somme des composantes directe, diffuse et réfléchi par le sol du rayonnement solaire [39].

I.6.3.2. Eclairage direct

L'éclairage direct est l'éclairage qui a fait un trajet dans l'atmosphère sans déviation géométrique, et correspond donc à la portion du rayonnement incident dans la direction d'éclairage du Soleil. [40].

I.6.3.3. Eclairage diffus et réfléchi

L'éclairage diffus est l'éclairage qui résulte des diffractions du rayonnement direct par les nuages et les particules atmosphériques. [41].

Le rayonnement réfléchi est à prendre en compte seulement dans le cas d'une surface inclinée.

Il est directement proportionnel au rayonnement global. Le sol réfléchit une partie de l'éclairage qu'il reçoit en fonction de sa nature.

- Sol cultivé 10 à 25%,
- Neige 60 à 90%,
- Sable 30 à 40%.

Albédo : c'est le rapport du rayonnement incident diffusé ou réfléchi sur le rayonnement incident.

Ce terme étant généralement réservé au sol ou aux nuages, c'est une valeur moyenne de leur réflectance pour le rayonnement considéré et pour tous les angles d'incidences possibles. Par définition, le corps noir possède un albédo nul [42].

Une simple formule représentant l'albédo du sol peut être défini comme suit :

$$\text{Albédo } (\rho) = \frac{\text{Energie réfléchie}}{\text{Energie reçue}} \quad (\text{I.20})$$

Sur le tableau I.2 on donne quelques valeurs de l'albédo suivant la surface du sol :

Tableau I.2 Valeurs d'albédo selon différents types de sol. [42]

Surfaces du sol	Albédo
Surface d'eau	0.01 à 0.1
Forêt	0.05 à 0.2
Sol cultivé	0.07 à 0.14
Pierres et rochers	0.15 à 0.25
Champs et prairies	0.1 à 0.3
Sol nul	0.15 à 0.4
Neige ancienne	0.5 à 0.7
Neige fraîche	0.8 à 0.95

I.6.4. Appareils de mesure de l'éclairage solaire

L'ensoleillement (G) correspond à l'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan à un moment donné. Il s'exprime habituellement en watts par mètre carré (W/m^2). L'ensoleillement varie de zéro, au lever du Soleil, à sa valeur maximale, typiquement au midi solaire il existe quatre types de rayonnement [43] .

I.6.4.1. Mesure de l'éclairage direct (le Pyrhéliomètre)

Le pyrhéliomètre mesure le rayonnement direct (Fig I.8). Il comporte une ouverture réduite et une surface réceptrice qui doit être maintenue normale au rayonnement par un système de poursuite automatique. La surface sensible est un disque d'argent noirci placé à la base d'un tube muni d'un obturateur et d'un diaphragme limitant l'angle d'ouverture à 5.7° (le diamètre apparent du soleil est de 0.5°). Le tube est fixé sur une monture équatoriale [44].



Figure I.8 : Le Pyrhéliomètre (direct) [45].

I.6.4.2. Mesure de l'éclairage diffus (le Pyranomètre)

C'est le rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un pyranomètre (Fig I.9). avec un pare-soleil (bande métallique circulaire) qui protège le pyranomètre du rayonnement solaire direct. [46]



Figure I.9 : le Pyranomètre (diffus).

I.6.4.3. Mesure de l'éclairage solaire réfléchi (Albédo mètre)

C'est le rapport de l'énergie solaire réfléchie par une surface à l'énergie solaire incidente. Sa valeur est comprise entre 0 et 1. Plus une surface est réfléchissante, plus son albédo est élevé. éléments qui contribuent le plus à l'albédo de la Terre sont : les nuages, les surfaces de neige et de glace. Par exemple, l'albédo de la neige fraîche est de 0,87, ce qui signifie que 87 % de l'énergie solaire est réfléchie par ce type de neige. Il peut être mesuré par un Albédo mètre (Fig I.10). [46].



Figure I.10 : Albédo mètre (réfléchi).

I.6.4.4. Mesure de l'éclairage global (Pyranomètre)

On mesure la puissance du rayonnement solaire globale sur une surface horizontale grâce à un pyranomètre (Fig I.11) qui comprend une double coupelle de verre, un thermophile (série de thermocouples) et un système d'enregistrement de la force électromotrice produite par ce thermophile sous l'action d'un rayonnement. Quand l'instrument est exposé à la radiation solaire, une différence de température est créée entre les secteurs noirs et les secteurs blancs.

Cette différence de température est détectée par la thermophile qui convertie l'énergie thermique en énergie électrique. Ce courant peut être mesuré et amplifié et le signal de millivolt est converti par un facteur de calibrage en un flux en watt par mètre carré. Il représente la somme de tous les rayonnements reçus (direct+diffus+albédo)[46].



Figure I.11 : Pyranomètre (direct+diffus+albédo).

I.6.4.5. Mesure de la durée d'insolation (l'Héliographe)

L'insolation est définie comme l'intervalle de temps durant lequel le disque solaire a été visible ou durant lequel on a pu observer des ombres portées sur le sol. Elle est également définie comme la durée pendant laquelle le rayonnement direct est demeuré supérieur à une valeur internationalement admise : 120 W/m^2 .

Mesure effectuée par un Héliographe (Fig I.12) : enregistrement de l'insolation en centième d'heure, la durée d'insolation est mesurée à l'aide d'héliographes en dixièmes d'heures. On distingue les héliographes classiques et automatiques [47].



Figure I.12 : héliographe (durée d'insolation).

I.7. Conclusion

Les énergies fossiles représentent la source principale des gaz à effet de serre et disparaîtront dans les années futures, il est donc indispensable d'utiliser de nouvelles énergies dès aujourd'hui comme les énergies renouvelables. Nous avons entamés dans ce chapitre une étude détaillée sur les énergies renouvelables, une étude qui nous a permis de bien comprendre les types de ses énergies ainsi que ces processus de conversion.

Le rayonnement solaire (éclairage solaire) est l'élément de base dans la conversion d'énergie rayonnée en énergie thermique ou photovoltaïque, la mesure de ce paramètre se fait avec des éléments très développés et précis, les plus connus sont le pyranomètre et pyréliomètre que nous avons présenté dans ce chapitre, une étude détaillée sur la modélisation du rayonnement solaire fera l'objet du second chapitre.

CHAPITRE II

Modélisation de l'éclairement solaire

II.1. Introduction

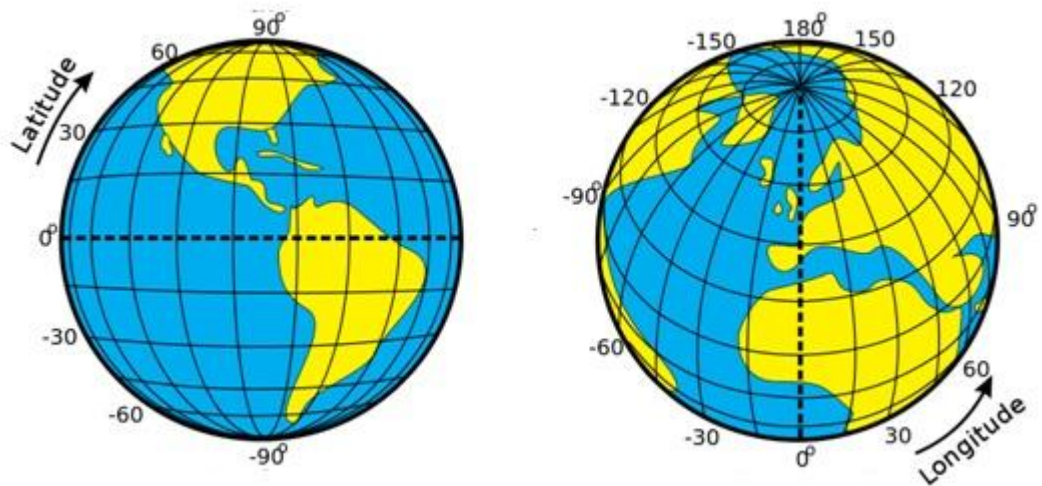
Par analogie avec d'autres sources d'énergie, l'éclairement solaire peut être considéré comme un gisement ou une ressource. Plusieurs voies de conversion énergétique sont possibles pour l'exploiter : la conversion directe en énergie électrique par cellule photovoltaïque, la conversion directe en énergie thermique par capteur solaire thermique, la conversion thermodynamique en énergie électrique associant capteur solaire thermique, turbine ou moteur thermique et générateur électrique, et la conversion en énergie chimique par voie photochimique (production d'hydrogène par photolyse de l'eau).

Dans ce chapitre, on commence par une description des aspects géométriques de l'éclairement solaire ainsi que les aspects énergétiques de ce dernier. Dans une deuxième partie, nous découvrirons les différents éléments qui affectent l'absorption de l'éclairement solaire (Orientation d'un plan (α, γ) , L'inclinaison du plan β , L'azimut du plan α , Angle d'incidence). Ensuite, nous présenterons le modèle d'estimation d'éclairement solaire (modèle de Capderou) ; reste le plus utilisé en Algérie, pour différentes positions du plan (plan horizontal, plan quelconque) avec une programmation des différentes équations sous environnement Matlab. Enfin, nous aborderons la modélisation du facteur de trouble de Linke et les différentes méthodes utilisés.

II.2. Paramètres géométriques

II.2.1. Coordonnées géographiques terrestres

Tout point de la surface terrestre est repéré par ses coordonnées géographiques : La longitude, la latitude, ainsi que par son altitude (voir fig II.1).Antarctique



le pole nord

Figure II. 1 : Les coordonnées terrestre

II.2.1.1. Latitude et longitude

La latitude(φ) permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque par rapport à l'équateur. Elle varie de 0° à l'équateur à 90° au pôle Nord. L'angle de latitude est l'angle entre une ligne tracée d'un point sur la surface de la Terre avec le centre de cette dernière, et le cercle équatorial de la terre. L'intersection du Cercle équatorial avec la surface de la terre forme l'équateur et est indiquée en tant que Latitude de 0° , le pôle nord par la latitude $+90^\circ$ et le pôle sud par la latitude -90° . Cette convention de signe affecte le signe (+) à tous les lieux de l'hémisphère nord et le signe (-) tous les lieux de l'hémisphère sud. La latitude sera désignée ici par lettre (φ), et peut ainsi être composée entre -90° et $+90^\circ$.

La longitude c'est l'angle (λ) formé par le méridien de Greenwich et le méridien du lieu considéré. La longitude est comprise entre -180 (vers l'ouest) et $+180$ (vers l'est). Comme la terre met 24 heures pour faire un tour sur elle-même (360°), chaque heure représente 15° d'écart de longitude et donc, chaque degré de longitude représente 4 Minutes [48].

II.2.1.2. Altitude d'un lieu donné

L'altitude(h) d'un point correspond à la distance verticale en mètre entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer) [48].

II.2.2. Coordonnées horaires

Les coordonnées équatoriales est un repère qui prend comme origine le centre de la terre et comme plan de référence le plan de l'équateur. Dans ce repère, la position du soleil dans le ciel est déterminée par deux coordonnées, la déclinaison (δ) et l'angle horaire (ω).

II.2.2.1. Angle horaire

L'angle horaire (ω) étant l'angle formé par le plan méridien passant par le centre du soleil et le plan vertical du lieu (méridien) figure (II.2) définit le temps solaire vrai TSV [48], l'angle horaire s'exprime parfois en heures. Au midi solaire on a $\omega = 0$, ensuite chaque heure correspond à une variation de 15° , car la terre effectue un tour complet sur elle-même en 24h. (ω) sera compté

négativement le matin lorsque le soleil est vers l'est et positivement le soir [49]. L'angle horaire est donné par l'équation suivante :

$$\omega = 0.261799 \cdot (t - 12) \quad (1)$$

Pour calculer l'angle horaire, Capderou dans l'ASA, a utilisé la formule suivante :

$$\omega = 15 \cdot (\text{TSV} - 12) \quad (2)$$

Le temps solaire vrai TSV est donné par l'équation (3), avec DE_{est} le décalage horaire, il est égal à 1 pour l'Algérie.

$$\text{TSV} = t - DE + (ET + 4 \cdot \lambda) / 60 \quad (3)$$

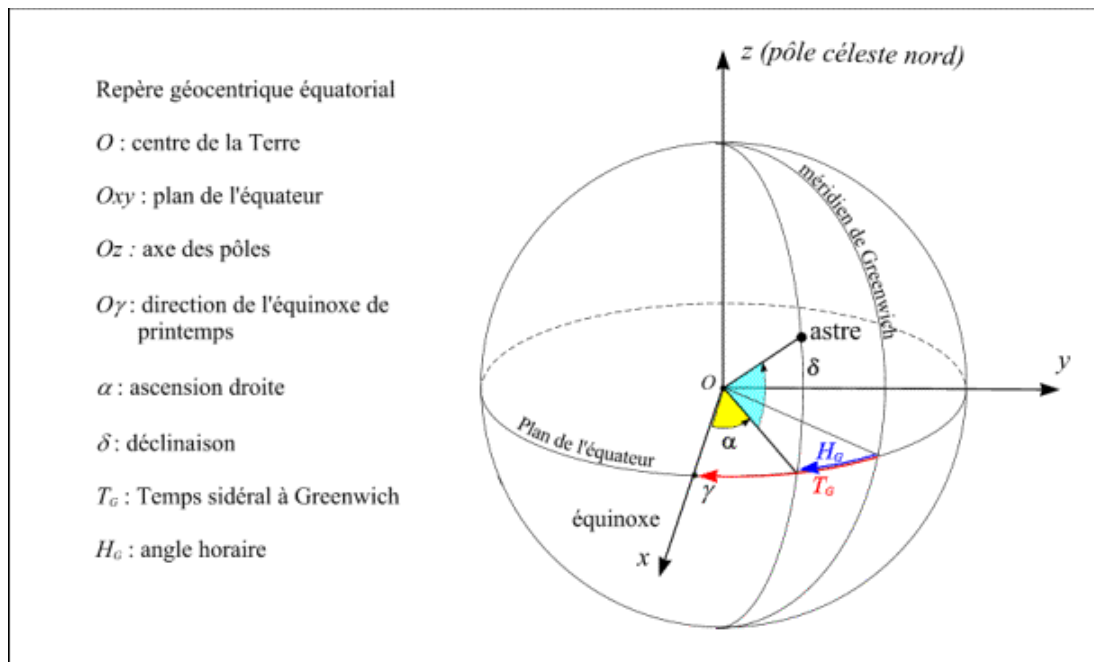


Figure II. 2 : La sphère céleste équatoriale.

II.2.2.2. Déclinaison solaire

La déclinaison du soleil δ est l'angle que fait, la direction du soleil avec le plan équatorial de la terre [50]. La déclinaison varie de $-23^\circ 27'$ au solstice d'hiver à $+23^\circ 27'$ au solstice d'été et elle est nulle aux équinoxes [51]. La déclinaison solaire est bien représentée par la formule suivante :

$$\sin(\delta) = 0.3978 \cdot \sin \left[N_p - 1.4 + 0.0355 \cdot \sin(N_p - 0.0489) \right] \quad (4)$$

Avec :
$$N_p = 2\pi \cdot N / 365.25 \tag{5}$$

Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, Capderou a utilisé l'expression (6) pour le calcul de la déclinaison, et qui donnerait le même résultat que l'expression précédente (4) :

$$\sin(\delta) = 0.398 \cdot \sin \left\{ \frac{360}{365} \cdot (N - 82) + 2 \cdot \sin \left[\frac{360}{365} \cdot (N - 2) \right] \right\} \tag{6}$$

N est le jour Julian variant de 1 du premier Janvier à 365 (366) au 31 Décembre. La variation de la déclinaison en fonction du jour de l'année est décrite sur la figure (II.3) :

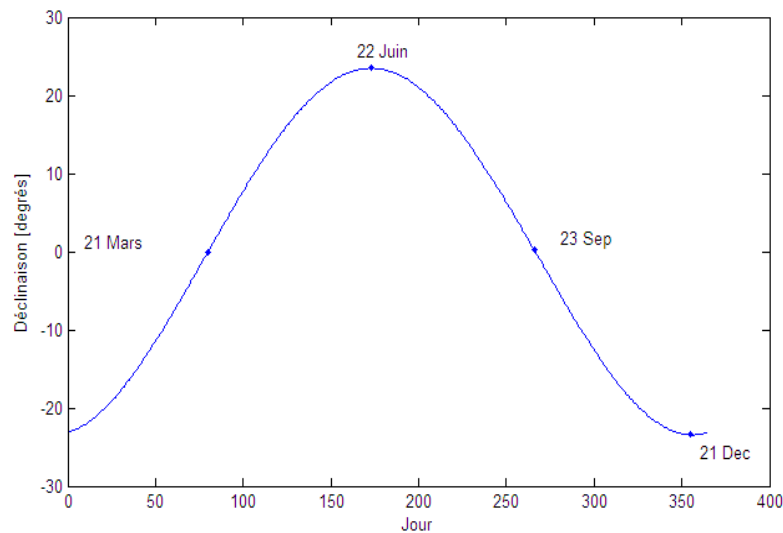


Figure II. 3 : Variation de la déclinaison solaire en fonction du jour.

II.2.3. Coordonnées de position

Pour poursuivre la position de soleil il faut détermine les deux angles (la hauteur et l'azimut solaire) chacun des deux angles sont utilisés pour la commande du système de poursuite solaire d'un héliostat (voir fig II.4). [52]

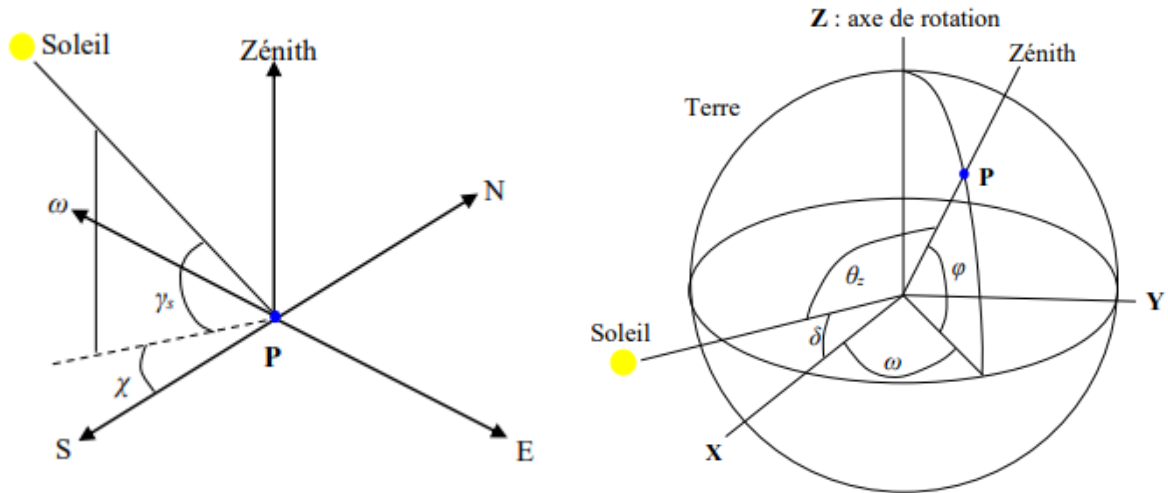


Figure II. 4 : Position du soleil par rapport à un point fixe de la terre (hauteur et azimut du soleil).

II.2.3.1. Hauteur du soleil

La hauteur du soleil γ_s est l'angle que fait, le plan horizontal avec la direction du soleil, la valeur $\gamma_s = 0$ correspond au lever et au coucher du soleil, la hauteur du soleil varie entre $+90^\circ$ (zénith) et -90° (nadir). La hauteur du soleil est bien représentée par une formule bien connue, qui avait été également adoptée par Capderou (voir fig II.5).

$$\sin(\gamma_s) = \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) \quad (7)$$

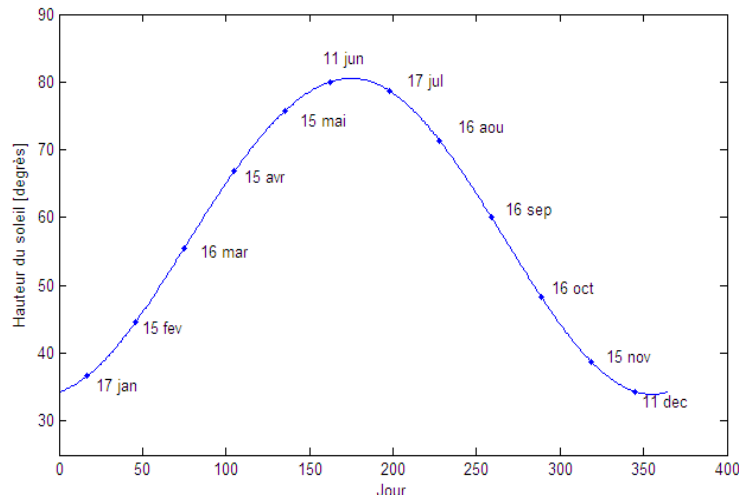


Figure II. 5 : Variation de la hauteur du soleil en fonction du jour.

II.2.3.2. Azimut du soleil

L'azimut du soleil χ est l'angle que fait, sur le plan horizontal, la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. L'azimut est compris entre $-180 \leq \chi \leq 180^\circ$ [51]. L'azimut du soleil

est représenté en fonction de la déclinaison solaire δ , latitude du lieu ϕ , et de l'angle horaire ω de la manière suivante :

$$\cos(\chi) = \frac{\sin(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) - \cos(\phi) \cdot \sin(\delta)}{\left\{ [\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)]^2 + [\sin(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) - \cos(\phi) \cdot \sin(\delta)]^2 \right\}^{0.5}} \quad (8)$$

Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, Capderou a utilisé la formule (9) pour calculer l'azimut du soleil (voir fig II.6):

$$\cos(\chi) = \frac{\cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \sin(\phi) - \sin(\delta) \cdot \cos(\phi)}{\cos(\gamma_s)} \quad (9)$$

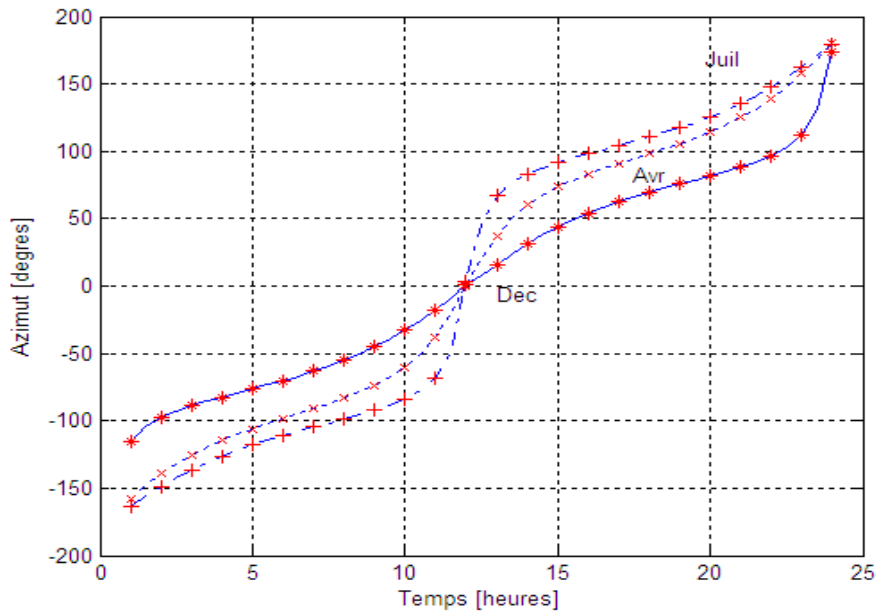


Figure II. 6 : Variation de l'azimut solaire en fonction du temps.

II.3. Paramètres atmosphériques

II.3.1. Masse atmosphérique

On appelle masse d'air m_A la masse d'atmosphère traversée par l'éclairement direct pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversée verticale au niveau de la mer [53]. Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir des transformations. La masse atmosphérique relative est donnée par la relation [54] :

$$m_A = \frac{1}{\text{Sin}(\gamma_s)} \quad (10)$$

Dans l'atlas solaire de l'Algérie. Capderou a utilisé la formule suivante :

$$m_A = \frac{1}{\text{Sin}(\gamma_s) + 9.40 \cdot 10^{-4} \cdot [\text{Sin}(\gamma_s) + 0.0678]^{-1.253}} \quad (11)$$

La variation de la masse d'air en fonction de l'angle soleil est donnée sur la figure II.7 suivantes

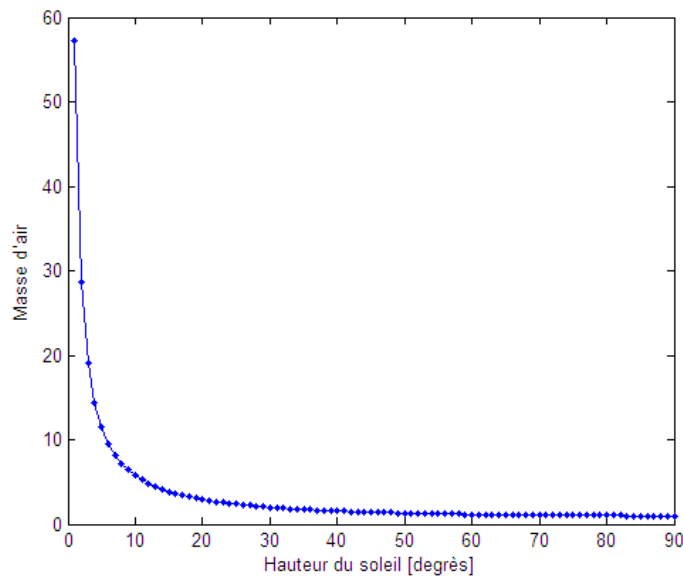


Figure II. 7 : Variation de masse d'air en fonction de hauteur soleil.

II.3.2. Epaisseur de Rayleigh

En 1922, Linke [55] définit l'épaisseur optique de Rayleigh δ_R comme étant l'épaisseur optique totale d'une atmosphère sans nuages, vapeur d'eau et aérosols. Kasten, en 1980 [56] utilisa les données spectrales publiées par Feussner et al., en 1930 [57] et proposa l'expression (12) pour δ_R , connue sous le nom de formule pyrhéliométrique de Kasten, où la diffusion moléculaire et l'absorption de la couche d'ozone stratosphérique sont prises en compte.

$$(\delta_R)^{-1} = 9.4 + (0.9 \cdot m_A) \quad (12)$$

Dans cette formule utilisée depuis fort longtemps, l'absorption par les gaz atmosphériques permanents tels que : CO₂, O₂, NO₂ et le CO n'est pas prise en compte. Capderou dans l'Atlas

Solaire de l'Algérie, 'A.S.A', utilise la formule pyréliométrique de Kasten pour calculer l'éclairement direct incident sur un plan par ciel clair, En 1986, Louche [58] ajouta l'absorption par les constituants permanents de l'atmosphère et proposa un polynôme de 4ième ordre pour la masse d'air. Récemment en 1996, Kasten a ajusté la formule de Louche et proposa une nouvelle expression pour δR [59] (voir fig II.8).

$$(\delta_R)^{-1} = 6.5567 + (1.7513 \cdot m_A) - (0.1202 \cdot m_A^2) + (0.0065 \cdot m_A^3) - (0.00013 \cdot m_A^4) \quad (13)$$

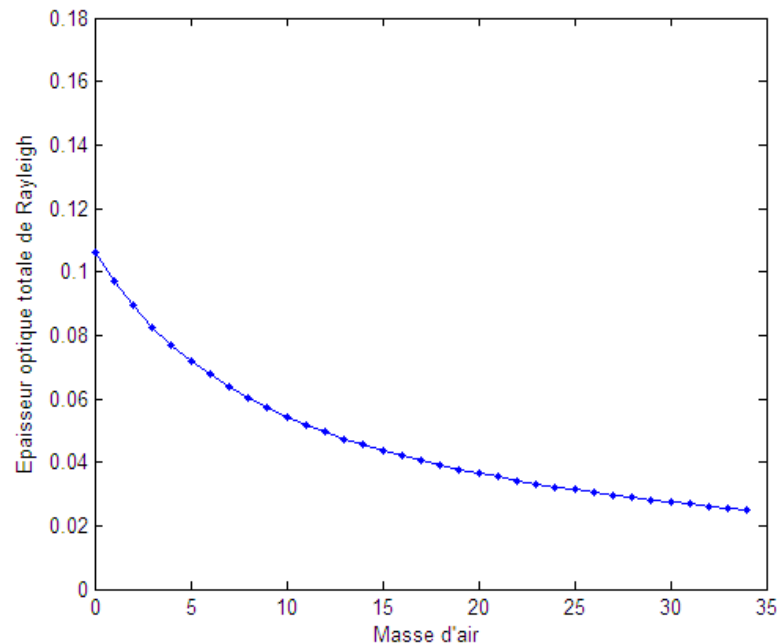


Figure II. 8 : Variation de l'épaisseur optique de l'atmosphère en fonction de la masse d'air.

II.4. Angles d'un plan quelconque

II.4.1. Orientation d'un plan

Un plan quelconque est défini par deux angles (α, γ)

α : azimut du plan, c'est l'angle que fait la projection de la normale sur le plan horizontal et la direction du sud.

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

Sa valeur peut être calculée par l'équation : $\gamma = 90^\circ - \beta'$

β' : inclinaison du plan, c'est l'angle entre le plan et sa projection sur le plan horizontal.

Pour un plan horizontal : $\beta' = 0$ et $\gamma = 90^\circ$ [54].

II.4.2. Inclinaison du plan

Correspond à l'angle que fait le plan du capteur avec l'horizontale. Le calcul de l'angle d'inclinaison se fait en déduisant la déclinaison du soleil de la latitude géographique du lieu de l'emplacement du capteur. En général, il correspond à la latitude de l'emplacement plus ou moins 10 à 15°. Il est recommandé d'employer un angle d'inclinaison plus élevé à la latitude de 10 à 15 degrés durant les mois d'hiver lorsque la trajectoire du soleil est basse dans le ciel (position hivernale). Par contre, en été (position estivale), lorsque la trajectoire du soleil est plus haute dans le ciel, il faut employer un angle d'inclinaison moins élevé à la latitude de moins 10 à 15 degrés. [60]

II.4.3. Azimut du plan ou déviation azimutale

Il est défini par l'angle que fait la projection de la normale du plan sur le plan horizontal et la direction du sud. Idéalement, les dispositifs solaires sont orientés plein sud ($\alpha = 0$) pour être exposés au maximum à la lumière solaire [60].

II.4.4. Angle d'incidence

L'angle d'incidence δ^i est l'angle que font les rayons du soleil avec la normale du plan considéré, elle est définie par l'inclinaison du plan β et l'azimut de la normale du plan α (orientation du plan), α est compté dans le sens rétrograde ($\alpha < 0$ vers l'est, $\alpha > 0$ vers l'ouest)

M. Capderou utilise la hauteur de la normale du plan γ pour calculer $\cos(\delta^{inc})$ de l'angle d'incidence, γ est positive pour les plans tournés vers le haut et négative pour les plans tournés vers le bas, donc c'est les angles α et γ qui déterminent la position du plan. L'angle d'incidence sur un plan quelconque est donné par Capderou par les formules suivantes [61]:

$$\cos(\delta^i) = a' \cdot \sin(\omega) + b' \cdot \cos(\omega) + c' \quad (14)$$

Avec
$$a' = \cos(\delta) \cdot [\sin(\alpha_z) \cdot \cos(\gamma)] \quad (15)$$

$$b' = \cos(\delta) \cdot [\cos(\alpha_z) \cdot \cos(\gamma) \cdot \sin(\varphi) + \sin(\gamma) \cdot \cos(\varphi)] \quad (16)$$

$$c' = \sin(\delta) \cdot [-\cos(\alpha_z) \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(\varphi) + \sin(\gamma) \cdot \sin(\varphi)] \quad (17)$$

Ou
$$\beta = 90 - \gamma \quad (18)$$

Les variations de l'angle d'incidence en fonction de l'angle horaire pour une déclinaison de 20° a un lieu de latitude 30° . Pour différentes valeurs de hauteur du plan γ sont représentées sur la figure II.9 :

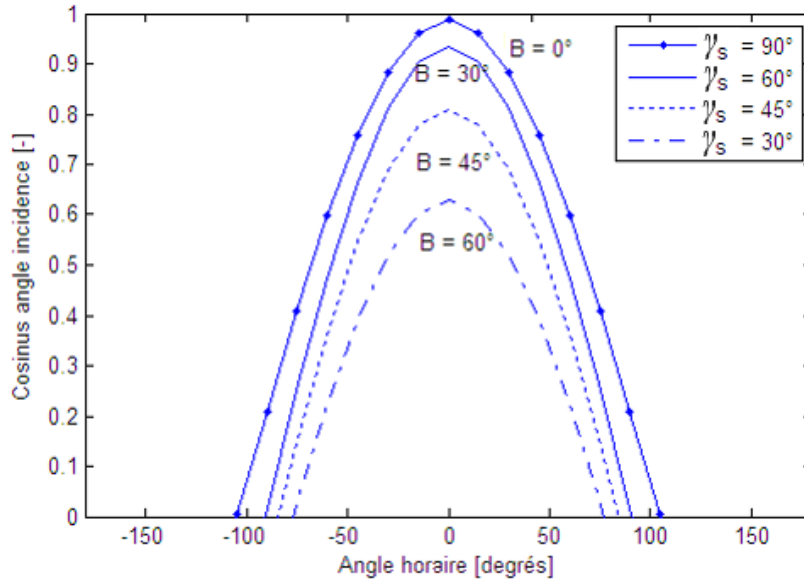


Figure II. 9 : Variation de l'angle d'incidence en fonction de l'angle horaire.

II.5. Modélisation de l'éclairement solaire par le modèle de Capderou

II.5.1. Eclairement extra-terrestre

En dehors de l'atmosphère l'éclairement solaire est d'intensité $I_0=1367 \text{ W/m}^2$. Une surface exposée au soleil ne peut recevoir cette valeur d'intensité que si elle est placée perpendiculairement à la direction de l'éclairement, n'importe quel écartement à cette orientation conduit à une réduction de l'éclairement incident. Dans le cas d'un plan horizontal situé en dehors de l'atmosphère, l'éclairement est décrit comme : éclairement solaire extraterrestre (voir fig II.10).

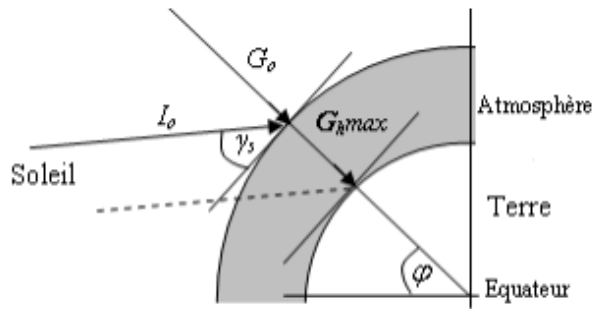


Figure II. 20 : Éclairement solaire hors atmosphère.

L'éclairement solaire extraterrestre G_o ; fonction de la constante solaire et de la correction de distance entre la terre et le soleil, est donné par l'équation (19) [62] (voir fig II.11).

$$G_o = I_o \cdot \varepsilon \quad (19)$$

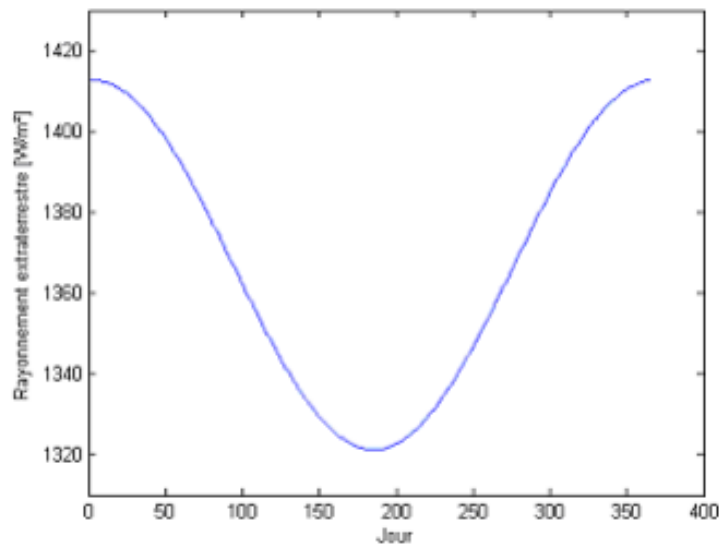


Figure II. 31 : Variation de l'éclairement solaire extraterrestre en fonction du jour.

II.5.1.1. Constante solaire

L'énergie solaire reçue par unité de temps à la limite supérieure de l'atmosphère, sur une surface unité perpendiculaire aux rayons solaires et pour une distance terre-soleil égale à sa valeur moyenne, est appelée 'la constante solaire'. La constante solaire a été estimée à $I_o=1367 \text{ W/m}^2$ par Claus Fröhlich et Christoph Wehrli du Centre radiométrique mondial de Davos (Suisse), essentiellement d'après des résultats de mesures faites entre 1969 et 1980 [63].

II.5.1.1. Correction de la distance terre-soleil

La correction de distance terre soleil ε est donnée par M. Capderou par l'équation :

$$\varepsilon = 1 + 0.034 \cdot \cos \left[\frac{360}{365} \cdot (N - 2) \right] \quad (20)$$

II.5.2. Eclairement incident sur un plan horizontal par ciel clair

Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie (A.S.A) [64], Capderou selon la préface de C. Perrin de Brichambaut, donna un modèle mathématique pour calculer l'éclairement direct et diffus incident sur un plan horizontal. Il reste le modèle le plus utilisé en Algérie.

II.5.2.1. Eclairement global incident sur un plan horizontal

L'éclairement global modélisé par Capderou est la somme de l'éclairement direct et diffus

II.5.2.2. Eclairement direct incident sur un plan horizontal

Pour l'éclairement direct, Capderou utilisa la formule (11) pour la masse d'air m_A et la formule (12) pour l'épaisseur totale de l'atmosphère δ_R et donna l'équation (21) qui permet de calculer l'éclairement direct incident sur un plan horizontal, $IB^h(\gamma_s, T_L)$ en fonction de la hauteur du soleil γ_s et du facteur de trouble total de Linke T_L :

$$IB^h(\gamma_s, T_L) = G_O \cdot \sin(\gamma_s) \cdot \exp \left(\frac{-T_L}{0.9 + \frac{9.4}{(0.89)^z} \cdot \sin(\gamma_s)} \right) \quad (21)$$

II.5.2.3. Eclairement diffus incident sur un plan horizontal

Pour calculer l'éclairement diffus, Capderou utilisa le facteur de trouble diffusif T'_L et donna, en 1987, l'expression (22) fonction de la hauteur du soleil γ_s :

$$ID^h(\gamma_s, T_L) = G_O \cdot \exp \left\{ -1 + 1.06 \cdot \log[\sin(\gamma_s)] + a - \sqrt{b^2 + a^2} \right\} \quad (22)$$

Avec : $a = 1.1$ (23)

$$b = \log(T_L') - 2.80 + 1.02 \cdot [1 - \sin(\gamma_s)]^2$$
 (24)

II.5.3. Eclairement incident sur un plan quelconque par ciel clair

M. Capderou dans l'ASA, proposa un modèle pour calculer le rayonnement solaire incident sur un plan (α_z, γ) , le rayonnement global est la somme des deux composantes directe et diffuse.

II.5.3.1. Eclairement direct incident sur un plan quelconque

Capderou utilisa l'angle d'incidence donné par l'équation (25) pour calculer l'éclairement direct à l'aide de l'équation suivante :

$$IB^i(\gamma_s, T_L) = IN(\gamma_s, T_L) \cdot \cos(\delta')$$
 (25)

II.5.3.2. Eclairement diffus incident sur un plan quelconque

L'éclairement diffus est lui-même décomposé en deux parties : celle provenant du ciel et celle provenant du sol :

• Composante diffuse du sol

La composante du diffus isotrope du sol est donnée par l'équation (26) en fonction de δ_a qui est la composante due à l'albédo :

$$ID_a^i(\gamma_s, T_L) = \delta_a \cdot \frac{1 - \sin(\chi)}{2}$$
 (26)

Avec : $\delta_a = \rho_g \cdot IB^h(\gamma_s, T_L)$ (27)

• Composante diffuse du ciel

Pour un plan (α_z, χ) , le rayonnement diffus incident en provenance du ciel est décomposé en trois parties: le diffus isotrope du ciel, le diffus directionnel et le diffus du cercle de l'horizon.

Le diffus isotrope du ciel est donné par la formule suivante :

$$ID_i^i(\gamma_s, T_L) = (\delta_i + \delta_{i'}) \cdot \frac{1 + \sin(\chi)}{2}$$
 (28)

Avec :
$$\delta_i = \text{ID}^h(\gamma_s, T_L) - \delta_d \cdot \text{Sin}(\gamma_s) \quad (29)$$

δ_i est la composante isotrope, elle correspond à un ciel de luminance uniforme.

Puisque le diffus du sol est rétrodiffusé, c'est-à-dire qu'une partie est diffusée à nouveau par le ciel vers le sol, Capderou a ajouté une composante $\delta_{i'}$:

Avec :
$$\delta_{i'} = 0.9 \cdot (\rho_g - 0.2) \cdot \text{IB}^h(\gamma_s, T_L) \cdot \exp\left(-\frac{4}{\sqrt{T_L}}\right) \quad (30)$$

Le diffus directionnel est donné en fonction de δ_d par la formule suivante :

$$\text{ID}_d^i(\gamma_s, T_L) = \delta_d \cdot \text{Cos}(\delta') \quad (31)$$

δ_d est la composante directe ou circumsolaire, elle provient du voisinage du soleil, dans un cône de demi angle. La formule donnant la composante du diffus directionnelle est représentée par l'équation suivante :

$$\delta_d = G_O \cdot \exp\left[-2.48 - \text{Sin}(\gamma_s) + a_1 - \sqrt{4 \cdot b_1^2 + a_1^2}\right] \quad (32)$$

Avec :
$$b_1 = \log(T_L') - 2.28 - 0.5 \cdot \log[\text{Sin}(\gamma_s)] \quad (33)$$

$$a_1 = 3.1 - 0.4 \cdot b_1 \quad (34)$$

Le diffus du cercle de l'horizon est donné par la formule suivante :

$$\text{ID}_h^i(\gamma_s, T_L) = \delta_h \cdot \text{Cos}(\chi) \quad (35)$$

δ_h : composante du cercle de l'horizon, elle provient du cercle de l'horizon d'une hauteur de 6°, elle semble associée à une accumulation d'aérosols dans les basses couches atmosphériques. La formule donnant la composante δ_h est représentée par l'équation suivante :

$$\delta_h = G_O \cdot \frac{-0.02 \cdot a_2}{a_2^2 + a_2 \cdot b_2 + 1.8} \cdot \exp[\text{Sin}(\gamma_s)] \quad (36)$$

Avec :
$$b_2 = \exp\{0.2 + 1.75 \cdot \log[\text{Sin}(\gamma_s)]\} \quad (37)$$

$$a_2 = \log(T_L') - 3.1 - \log[\text{Sin}(\gamma_s)] \quad (38)$$

Donc le diffus du ciel est exprimé d'une manière générale par la l'équation suivante :

$$ID_{ciel}^i(\gamma_s, T_L) = (\delta_i + \delta_i') \cdot \frac{1 + \sin(\chi)}{2} + \delta_d \cdot \cos(\delta^i) + \delta_h \cdot \cos(\chi) \quad (39)$$

Finalement, le rayonnement diffus total s'écrit sous la forme de quatre composantes :

$$ID^i(\gamma_s, T_L) = ID_i^i(\gamma_s, T_L) + ID_d^i(\gamma_s, T_L) + ID_h^i(\gamma_s, T_L) + ID_a^i(\gamma_s, T_L) \quad (40)$$

II.6. Modélisation de l'énergie solaire reçue par un capteur plan

II.6.1. Coucher, lever du soleil et durée du jour

II.6.1.1. Par rapport à un plan horizontal

L'angle horaire détermine l'heure du lever t_{rs} et du coucher t_{ss} du soleil ; on s'intéresse ici à deux instants particuliers de la journée qui sont ceux pour lesquels la hauteur du soleil est nulle, le lever et le coucher du soleil par rapport à un plan horizontal. Ces instants sont déterminés par le modèle Capderou de la manière suivante :

$$\cos(\omega_{sr}^h) = \frac{-\sin(\varphi) \cdot \sin(\delta)}{\cos(\varphi) \cdot \cos(\delta)} \quad (41)$$

$$\omega_{ss}^h = -\omega_{sr}^h \quad (42)$$

On peut ainsi déterminer la longueur du jour (en heures), qui est par définition :

$$DI = \frac{\omega_{ss} - \omega_{sr}}{15} = 2 \cdot \frac{\omega_{ss}}{15} \quad (43)$$

La figure (II.12) représente pour un site de latitude 30° la variation du coucher et du lever du soleil ainsi que la durée du jour durant l'année.

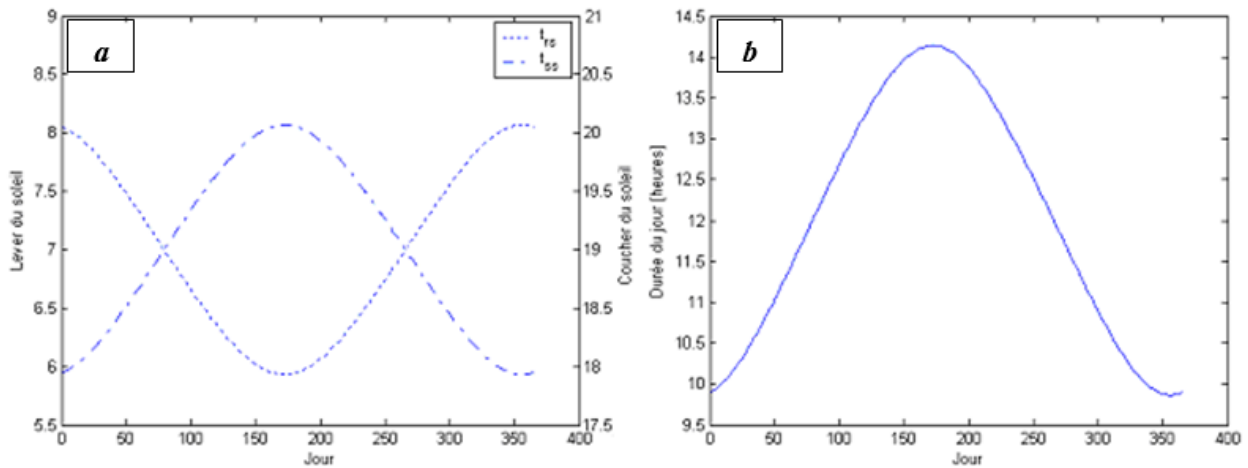


Figure II. 42 : Variation du coucher et du lever du soleil (a) et de la durée du jour (b) en fonction du jour.

II.6.1.2. Par rapport à un plan incliné

M. Capderou dans l'ASA, proposa les équations ci-après pour calculer le lever et le coucher effectif du soleil pour un plan quelconque :

$$\omega_{sr}^i = f(\alpha) \cdot \text{ArcCos}\left(\frac{B'}{D'}\right) - \text{ArcCos}\left(-\frac{C'}{D'} \cdot \text{tg}(\delta)\right) \quad (44)$$

$$\omega_{ss}^i = f(\alpha) \cdot \text{ArcCos}\left(\frac{B'}{D'}\right) + \text{ArcCos}\left(-\frac{C'}{D'} \cdot \text{tg}(\delta)\right) \quad (45)$$

Avec :

$$A' = \text{Sin}(\alpha) \cdot \text{Cos}(\gamma) \quad (46)$$

$$B' = \text{Cos}(\alpha) \cdot \text{Cos}(\gamma) \cdot \text{Sin}(\varphi) + \text{Sin}(\gamma) \cdot \text{Cos}(\varphi) \quad (47)$$

$$C' = -\text{Cos}(\alpha) \cdot \text{Cos}(\gamma) \cdot \text{Cos}(\varphi) + \text{Sin}(\gamma) \cdot \text{Sin}(\varphi) \quad (48)$$

$$D' = \sqrt{A'^2 + B'^2} \quad (49)$$

Où $f(\alpha)$ est la fonction signe, elle renvoie le signe d'un réel quelconque, elle est définie par les relations suivantes :

▪ Si $\alpha < 0$ $f(\alpha) = -1$ (50)

▪ Si $\alpha = 0$ $f(\alpha) = 0$ (51)

▪ Si $\alpha > 0$ $f(\alpha) = 1$ (52)

Le modèle Capderou donna l'équation (53), pour calculer le lever et le coucher effectif du soleil :

$$\text{Cos}(\omega_{sr}^i - \lambda') = \frac{-\text{Sin}(\varphi') \cdot \text{Sin}(\delta)}{\text{Cos}(\varphi') \cdot \text{Cos}(\delta)} \quad (53)$$

$\text{Sin}(\varphi')$ et $\text{tg}(\lambda')$ sont données par les équations (2.63), (2.64) précédentes.

II.6.2. Calcul de l'énergie solaire reçue par un capteur plan

Par intégration numérique des puissances, entre le lever et le coucher effectif du soleil, on peut calculer pour un plan quelconque, les valeurs des énergies directes, diffuses et globales reçues sur un plan:

$$EG^i(\omega_{sr}, \omega_{ss}) = \int_{\omega_{sr}}^{\omega_{ss}} IG^i(\gamma_s, T_L) \cdot d\omega \quad (54)$$

L'énergie solaire globale peut être calculée aussi par la sommation de l'énergie directe et diffuse :

$$EG^i(\omega_{sr}, \omega_{ss}) = EB^i(\omega_{sr}, \omega_{ss}) + ED^i(\omega_{sr}, \omega_{ss}) \quad (55)$$

L'énergie journalière globale pour différentes latitudes (30° et 60°) et pour différentes valeurs du trouble est représentée sur la figure (II.13) :

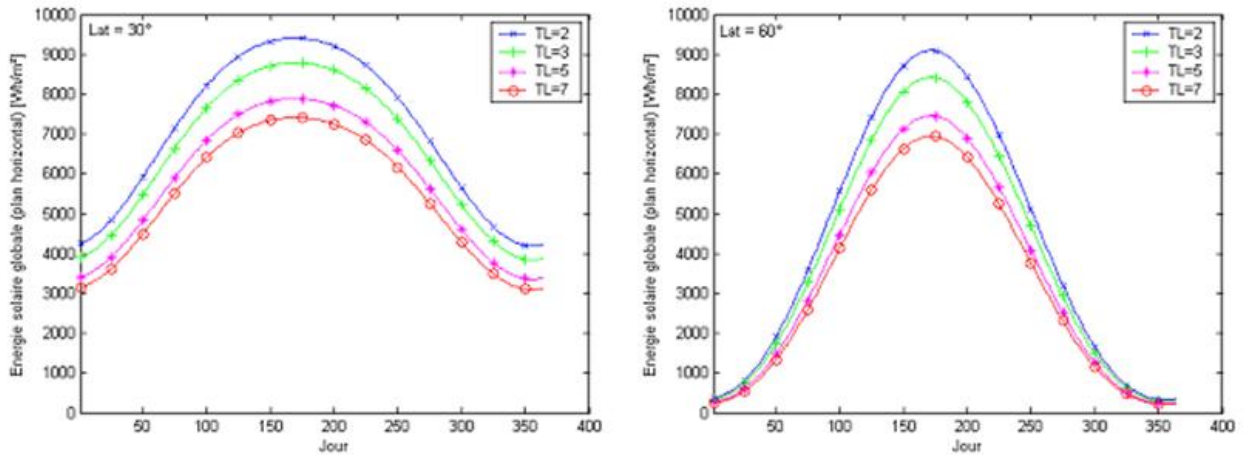


Figure II. 53 : Variations de l'énergie solaire globale reçue par un plan horizontal.

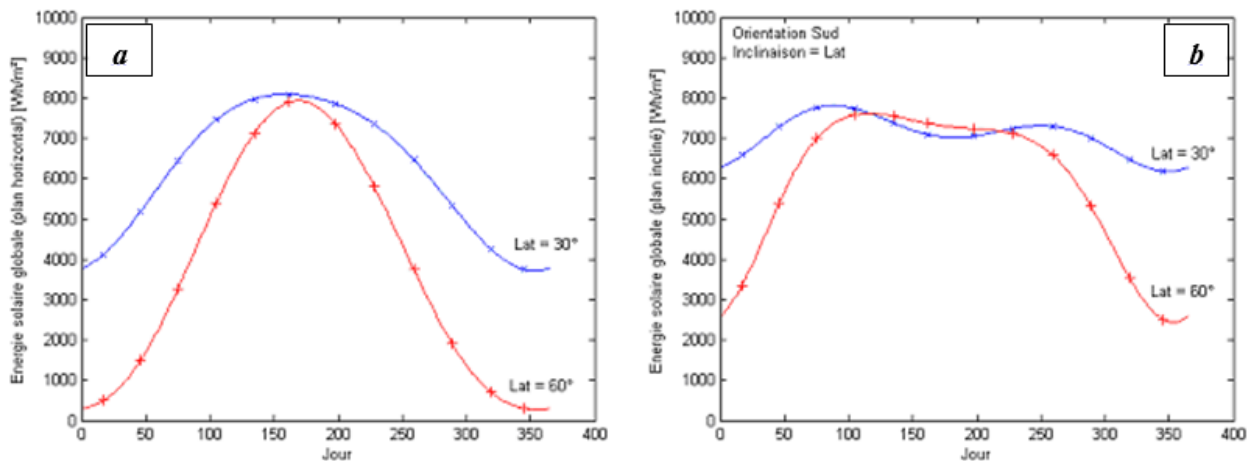


Figure II. 64 : Variations de l'énergie solaire globale reçue par un plan horizontal (a) et incliné (b).

La figure (II.14a) représente l'énergie journalière globale reçue par un plan horizontal $EG^h(\omega_{sr}, \omega_{ss})$ pour différentes latitudes (30° et 60°), la figure (II.14b) représente l'énergie journalière globale reçue par un plan incliné à la latitude $EG^i(\omega_{sr}, \omega_{ss})$ en fonction du jour pour le modèle Capderou.

II.6.3. Optimisation de l'inclinaison des capteurs plans

Il est possible d'augmenter l'énergie solaire reçue durant les mois les plus déficitaires en inclinant davantage l'ensemble des capteurs plans afin que ces derniers puissent absorber le maximum d'énergie au voisinage de midi, là où la hauteur du soleil est au zénith et les valeurs de l'éclairement du au rayonnement solaire sont maximales, ceci permettra de diminuer le nombre requis de capteurs plans du point de vue dimensionnement.

La figure (II.15) est une représentation de l'énergie solaire journalière reçue par un plan horizontal (gauche) et un plan incliné à une latitude 30° (droite). On remarque bien que le plan incliné reçoit beaucoup plus d'énergie en période d'hiver (6000 contre 4000 Wh/m²), là où les besoins en eau chaude augmentent.

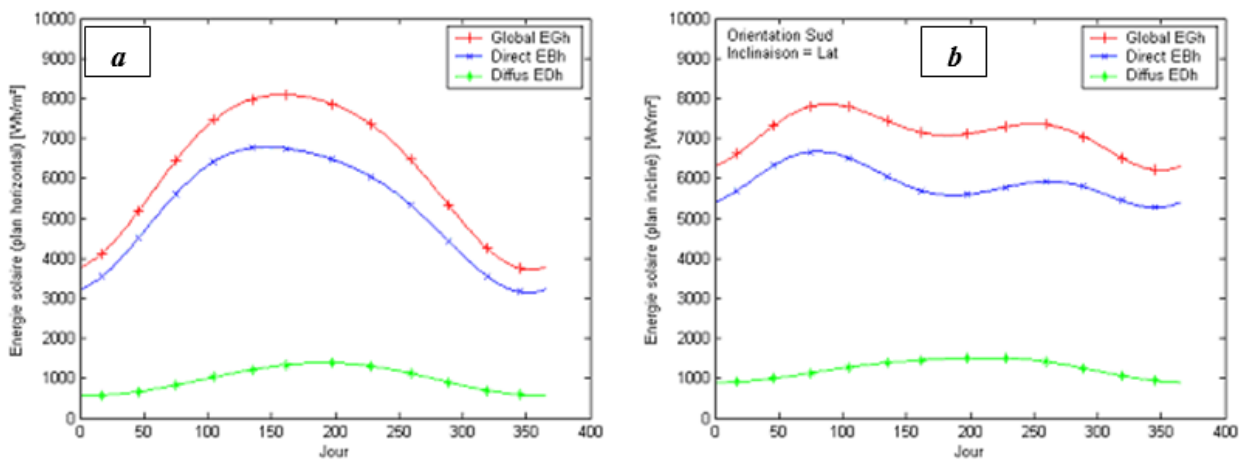


Figure II. 75 : Energie solaire journalière reçue par un capteur plan horizontal (a) et incliné (b).

Les points marqués dans les graphes correspondent aux jours types du mois dont indiqués par le tableau 3.01 suivant :

Tableau II.1: Jour type standard du mois.

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
NT	17	15	16	15	15	11	17	16	16	16	15	11
N°	17	46	75	105	135	162	198	228	259	289	319	345

Pour trouver la meilleure inclinaison à donner à un capteur, en un lieu donné et pour une utilisation donnée, il convient d'évaluer l'énergie utile qui serait reçue et absorbée par le capteur pour diverses inclinaisons de son plan par rapport au plan horizontal. Dans la littérature, l'angle optimum d'inclinaison est fonction de la situation géographique du site considéré par rapport à l'équateur. La figure (II.16) représente une comparaison de l'énergie solaire reçue par un capteur plan pour les sites de Ghardaïa et Bouzaréah à différentes inclinaisons.

D'après les résultats obtenus, on peut dire que, pour les deux sites, il serait intéressant d'incliner les capteurs avec un angle $\beta = \varphi + 10^\circ$ et de les orienter plein sud, cela permet de

recupérer en moyenne 30 à 40 % d'énergie supplémentaire par rapport au plan horizontal, en période hivernale là où la hauteur du soleil est faible. Si on désire obtenir un supplément d'énergie pendant les premières et les dernières heures de la journée ou pour répondre à des besoins énergétiques spécifiques, il faudra se servir d'un système de poursuite solaire par exemple. En été, il est préférable d'incliner les capteurs avec un angle $\beta = \varphi - 10^\circ$ ou encore mieux avec $\beta = 0$ (horizontal), si on veut toujours avoir le max d'énergie pour des applications de refroidissement par exemple.

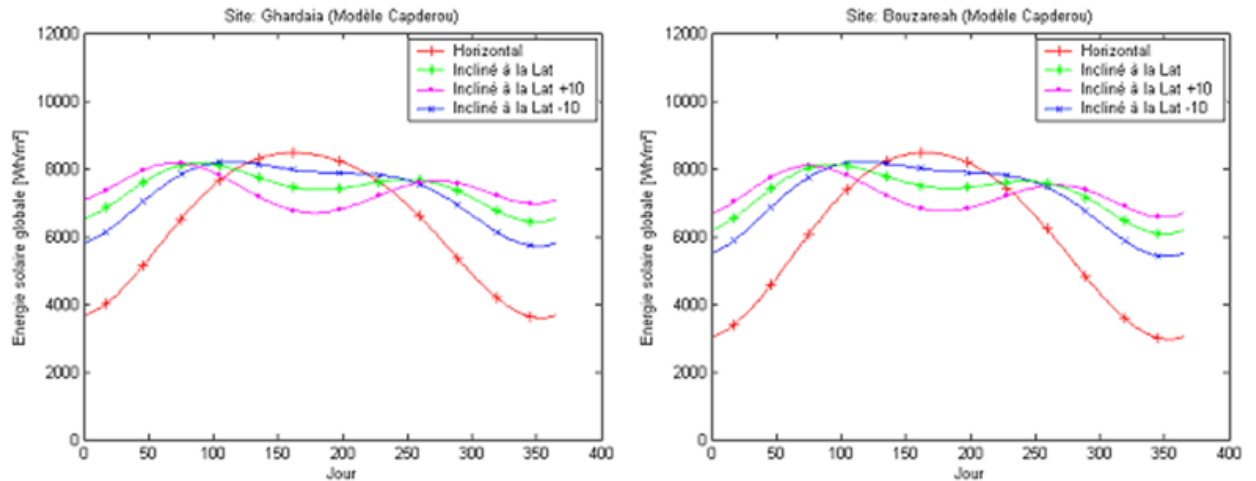


Figure II. 86 : Effet de l'inclinaison du plan sur l'énergie solaire reçue par celui-ci.

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu la modélisation du modèle Capderou ainsi que les équations utilisées pour réaliser cette modélisation. Le modèle capderou utilise des équations propres pour déterminer les paramètres géométriques (déclinaison solaire, angle horaire, hauteur du soleil, azimut et angle d'incidence) et les paramètres atmosphériques (masse, épaisseur optique de l'atmosphère et facteur de trouble). Ces équations sont nécessaires pour le calcul des composantes d'éclairement solaire par ciel clair, incident sur un plan horizontal et incliné pour chaque modèle. Les paramètres du modèle ont été programmés et illustrés graphiquement à l'aide de Matlab.

CHAPITRE III

Détermination du facteur de trouble, résultats et discussion

III.1. Introduction

L'évaluation à long terme des performances des systèmes de conversion de l'énergie solaire s'établit par l'intermédiaire de programmes de simulation numérique. Le rayonnement solaire arrivant à la surface de la terre n'est pas complètement celui émis par le soleil, à cause des différents phénomènes d'absorption, de diffusion et de filtrage au niveau des différentes couches atmosphériques, Ainsi, le rayonnement solaire varie à la fois périodiquement au rythme des saisons et aléatoirement causée par les troubles atmosphériques. Dans ce chapitre une étude expérimentale du facteur de trouble de Linke; sur deux sites algériens, sera réalisée et confrontée à des valeurs estimées par des modèles théoriques proposés dans la littérature par divers scientifiques qui ont prouvés leur validité. Il s'agit des sites de Ghardaïa et de Bouzaréah sur lesquels on collecte continuellement des données météorologiques et radiométriques. Les résultats expérimentaux obtenus du facteur de Linke seront ensuite insérés dans le modèle Capderou afin de l'améliorer et de se rapprocher le plus des données expérimentales.

III.2. Détermination du facteur de trouble atmosphérique de linke par ciel clair

Le rayonnement solaire est atténué en traversant l'atmosphère terrestre par la diffusion des aérosols, les nuages et l'absorption par les différents composants atmosphériques, tel que: l'ozone, la vapeur d'eau, l'oxygène...etc., il est connu qu'en jour clair les aérosols sont la principale cause de l'extinction de l'irradiation solaire. Ces dernières années la plupart des scientifiques et chercheurs ont prouvés que les activités humaines jouent un rôle très important dans l'augmentation des aérosols. La quantité des aérosols dans l'atmosphère peut être représentée par les coefficients de troubles, la détermination de troubles atmosphérique à une grande importance dans la modélisation du rayonnement solaire utilisé dans le dimensionnement des systèmes énergétiques solaire. En effet la plupart des modèles de rayonnement solaire font appel à la détermination de ces facteurs tel que le facteur de Linke.

III.2.1. Détermination du facteur de Linke à partir des formules empiriques

La méthodologie adoptée par la plus part des modèles calculant le rayonnement solaire est basée sur l'utilisation du trouble atmosphérique pour la détermination des composantes directe et diffuse de l'irradiation solaire d'un site, ceci nécessite un modèle mathématique du trouble atmosphérique indépendant du rayonnement. Dans cette partie nous allons faire une étude

comparative entre les résultats trouvés précédemment en utilisant l'équation (21) et les résultats obtenus de deux modèles; bien connus, calculant le facteur de Linke.

III.2.1.1. Modèle de Dogniaux

Dogniaux (1974), comme il a été mentionné par Page, à proposé une formule, qui est devenu très utilisée pour le calcul du facteur de Linke en absence des données du rayonnement solaire, cette équation est fonction de la hauteur du soleil (en degrés), de la hauteur d'eau condensable et du coefficient d'Angstrom.

$$T_L = \left[\frac{\gamma_s + 85}{39.5 \cdot \exp(-W_v) + 47.4} + 0.1 \right] + (16 + 0.22 \cdot W_v) \cdot B_A \quad (1)$$

III.2.1.2. Modèle de Capderou

En 1987 Capderou; dans l'Atlas Solaire (A.S.A.), proposa un modèle pour calculer le facteur de Linke en Algérie par ciel clair. Le coefficient de trouble atmosphérique total a été décomposé en trois facteurs de trouble auxiliaires: le trouble du à l'absorption par la vapeur d'eau T_0 , le trouble du à la diffusion moléculaire de Rayleigh T_1 et le trouble relatif à la diffusion par les aérosols T_2 avec :

$$T_0 = (2.4 - 0.9 \cdot \sin \varphi) + 0.1 \cdot (2 + \sin \varphi) - (0.2 \cdot z) - (1.22 + 0.14 \cdot A_{he}) \cdot (1 - \sin \gamma_s) \quad (2)$$

$$T_1 = (0.89)^z \quad (3)$$

$$T_2 = [0.9 + (0.4 \cdot A_{he})] \cdot (0.63)^z \quad (4)$$

z est l'altitude en km et A_{he} est l'alternance hiver été donnée par :

$$A_{he} = \sin \left[\frac{360}{365} \cdot (N - 121) \right] \quad (5)$$

III.2.1.3. Résultats obtenus à partir des formules empiriques

La figure III.1 représente une comparaison entre les résultats trouvés par les deux modèles choisis et les résultats obtenus en appliquant l'équation (21) pour deux sites choisis (Ghardaia et Bouzaréah). Pour réaliser ces graphiques nous avons utilisé l'équation (1) pour le modèle de Dogniaux, où nous avons calculer la hauteur du soleil γ_s et introduit les valeurs expérimentales du coefficient B_A obtenus en appliquant la méthode de Louche à Ghardaïa et, pour le modèle de Capderou nous avons calculer le facteur T_L pour un jour clair en utilisant les équations (2-5).

La présentation de la variation journalière du facteur de Linke montre que le modèle Dogniaux; qui reste très utilisé, donne une bonne estimation du facteur de Linke avec une erreur plus ou moins négligeable, le modèle de Capderou; proposé et adapté pour l'Algérie, présente une légère surestimation ou sous-estimation du facteur T_L par rapport à l'équation (21), pour les sites étudiés, ceci se répercutera sur l'estimation du rayonnement direct par ciel clair.

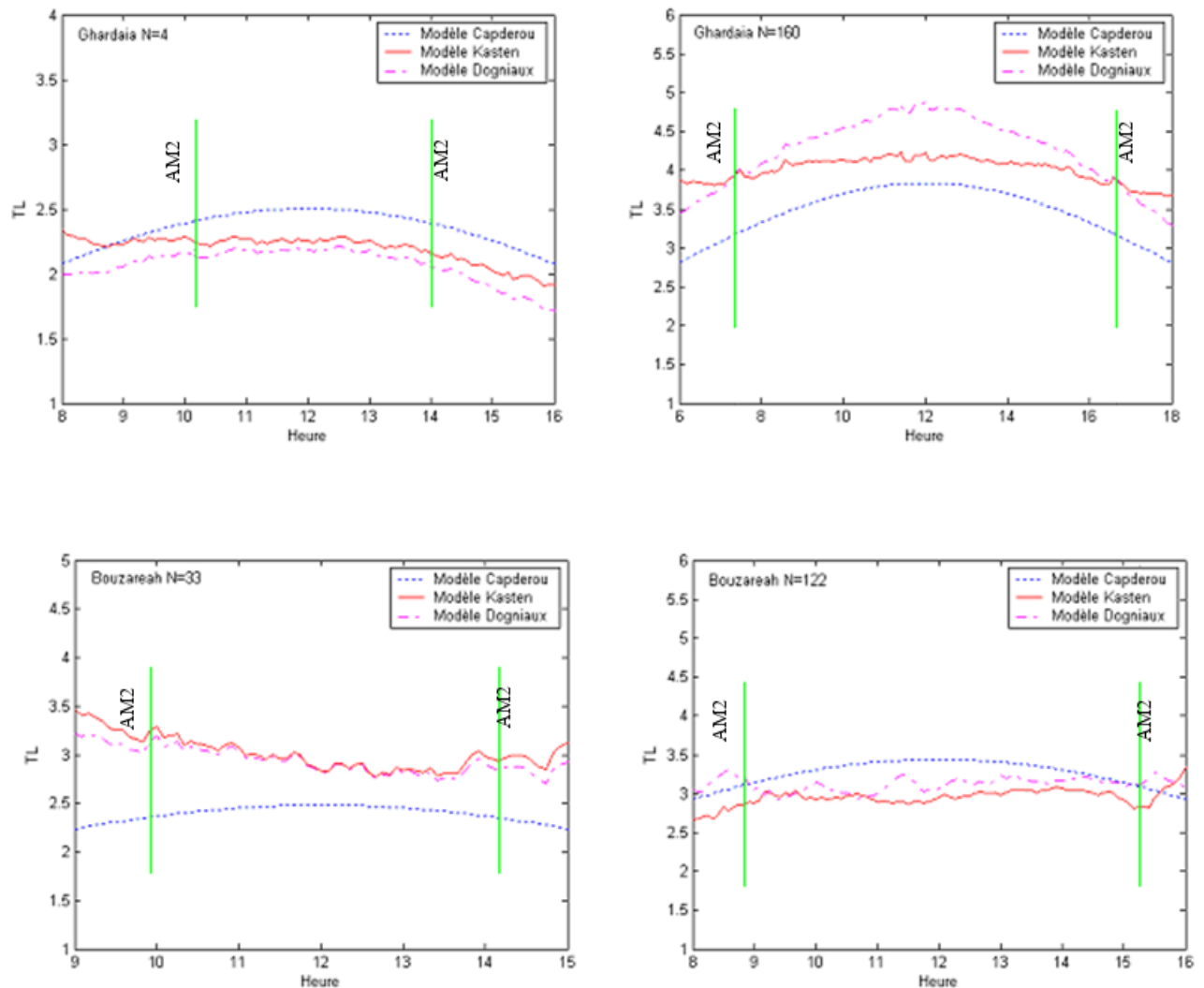


Fig III.1: Comparaison des résultats obtenus pour le calcul du facteur de Linke par différentes méthodes à Ghardaïa et Bouzaréah.

III.2.2. Détermination du facteur de Linke à partir du facteur d'Angstrom

III.2.2.1. Modèle expérimental du facteur d'Angstrom

Le facteur de linke est lié d'une manière directe au facteur de trouble d'Angstrom B_A la majorité des formules empiriques calculant le facteur T_L font appel au coefficient d'Angstrom, parfois; sur un site quelconque, les données du coefficient d'Angstrom sont disponibles et n'ont pas ceux du facteur de Linke, on y ramener de ce fait à déterminer le facteur T_L à partir du coefficient B_A .

Plusieurs chercheurs ont essayés de calculer B_A à partir des tables de T_L en utilisant des formules empiriques (Cucumo et al., 1999; Dogniaux, 1974; Grenier et al., 1994; Jacovides et al., 1994). Toutefois ces relations; avec des erreurs supérieur à 50 %, ne donne pas une bonne estimation du coefficient B_A .

Dans cette partie d'étude on s'est proposé de faire la détermination expérimentale du coefficient d'Angstrom pour les deux sites afin de trouver une formule reliant les deux paramètres. Pour la détermination du coefficient d'Angstrom on s'est basé sur la méthode de Louche qui est elle-même basée sur le modèle C d'Iqbal et qui utilise le rayonnement incident direct normal et le coefficient de transmission après la diffusion par les aérosols τ_a , l'expression de τ_a est la suivante :

$$\tau_a = (0.12445 \cdot \alpha_A - 0.0162) + (1.003 - 0.125 \cdot \alpha_A) \cdot \exp[-B_A \cdot m(1.089 \cdot \alpha_A + 0.5123)] \quad (6)$$

α_A est l'exposant de la longueur d'onde il est égal à 1.3.

Le coefficient B_A est un nombre qui représente la quantité des aérosols dans l'atmosphère, ce coefficient est calculé en modifiant la formule de Louche et al. (1987) et Machler (1983) :

$$B_A = -\frac{I}{m_A \cdot D} \cdot \ln\left(\frac{\tau_a - B}{C}\right) \quad (7)$$

$$\text{Avec} \quad C = 1.003 - 0.125 \cdot \alpha_A, \quad D = 1.089 \cdot \alpha_A + 0.5123, \quad B = 0.1244 \cdot \alpha_A - 0.0162.$$

En utilisant la méthode de Louche, le coefficient de transmission après la diffusion par les aérosols est exprimé en fonction du rayonnement direct normal de la manière suivante :

$$\tau_a = I_N / k \cdot I_0 \cdot \varepsilon \cdot \tau_g \cdot \tau_o \cdot \tau_r \cdot \tau_w \quad (8)$$

k est un facteur dépendant du spectre du rayonnement solaire, dans notre cas il est égale à 0.9712. τ_r , τ_w , τ_o et τ_g sont les coefficients de transmission après la diffusion moléculaire de Rayleigh, l'absorption par la vapeur d'eau, l'absorption par l'ozone et l'absorption par différents autres gazes; respectivement.

Pour obtenir B_A les formules des différentes coefficients de transmission τ_r , τ_g , τ_o , et τ_w sont nécessaires :

$$\tau_r = \exp[-0.0903 \cdot m_A^{0.84} (1 + m_A - m_A^{1.01})] \quad (9)$$

$$\tau_g = \exp[-0.0127 \cdot m_A^{0.26}] \quad (10)$$

$$\tau_o = 1 - \left[0.1611 \cdot U_3 (1 + 139.48 \cdot U_3)^{0.3035} - 0.002715 \cdot U_3 (1 + 0.044 \cdot U_3 + 0.0003 \cdot U_3^2)^{-1} \right] \quad (11)$$

$$\text{Avec} \quad U_3 = m_r \cdot O_3 \quad (12)$$

O_3 est l'épaisseur de la couche d'ozone (in cm), m_r est la masse d'air en condition standard.

$$\tau_w = 1 - 2.4959 \cdot U_w \left[(1 + 79.034 \cdot U_w)^{0.6828} + 6.385 \cdot U_w \right]^I \quad (13)$$

Avec :

$$U_w = m_r \cdot W_v \quad (14)$$

Et W_v est la hauteur d'eau condensable (in cm), pour obtenir W_v , la formule de Leckner est utilisée :

$$W_v = 0.493 \cdot (H_r / T_a) \cdot \exp(26.23 - 5416 / T_a) \quad (15)$$

Avec: H_r est l'humidité relative (en fractions d'1), T_a est la température ambiante ($^{\circ}K$).

III.2.2.2. Analyse des résultats obtenus à partir du facteur d'Angstrom

La figure III.2 représente les valeurs mensuelles moyennes du coefficient de transmission après la diffusion par les aérosols τ_a obtenus en utilisant l'équation (8) pour les deux sites. On peut remarquer que pour le site de Ghardaïa la valeur de τ_a est élevée pendant la saison du printemps (de Mars à Mai), ceci est expliqué par les grandes quantités des aérosols présentent dans l'atmosphère dus aux vents de sables caractérisant la région durant cette saison, par contre pour Bouzaréah, la valeur de τ_a est relativement élevée en été et petite en hiver par rapport à Ghardaïa, ceci est en relation direct avec sa situation géographique de ce site. Une fois le coefficient de transmission après la diffusion par les aérosols τ_a est déterminé, on peut calculer les valeurs instantanées du coefficient B_A en utilisant l'équation (7).

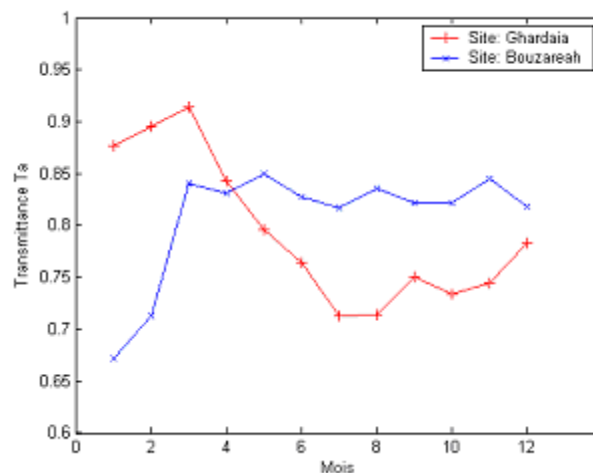


Fig III.2: Valeurs mensuelles moyennes du coefficient τ_a pour les deux sites.

Les résultats obtenus pour les valeurs mensuelles moyennes du facteur de trouble de Linke et du coefficient d'Angstrom sont représentés sur un même graphe (Fig III.3). Sur ce graphique on peut noter la similarité des quatre courbes sur l'ensemble des mois de l'année: les deux paramètres ont une même allure pour chaque site.

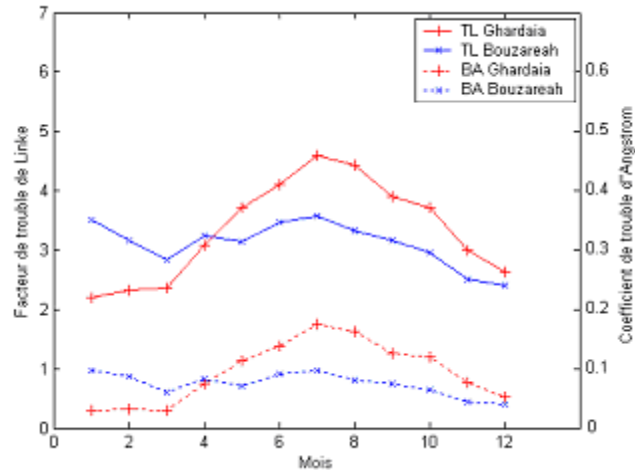


Fig III.3: Comparatif des résultats obtenus pour les valeurs mensuelles moyennes du facteur de trouble de Linke et du coefficient d'Angstrom pour les deux sites.

Les valeurs mensuelles moyennes de T_L et de B_A à Ghardaïa sont remarquablement élevées par rapport à ceux de Bouzaréah pendant la saison d'été, par contre les valeurs des deux paramètres sont plus élevées à Bouzaréah qu'à Ghardaïa durant la saison d'hiver, où la sélection des jours clairs est plus difficile qu'en été. Les plus petites valeurs de T_L et B_A sont enregistrées en Janvier à Ghardaïa (2.2 et 0.03 respectivement), et en Décembre à Bouzaréah (2.4 et 0.04 respectivement). Les valeurs les plus grandes sont mesurées en Juillet pour les deux sites: (4.6 et 0.17) pour Ghardaïa et (3.6 et 0.10) pour Bouzaréah. Ces résultats sont en parfaite accord avec ceux trouvés par Chaâbane (2008) pour la Tunisie, Zakey et al. (2004) pour l'Égypte et Cucumo et al. (1999) pour l'Italie, à travers plusieurs sites qui ont des caractéristiques climatiques et géographiques différentes.

III.2.2.3. Relation entre le facteur de linke et d'Angstrom

Comme le coefficient d'Angstrom B_A représente le trouble causé par uniquement les aérosols et le facteur de Linke se réfère aux troubles causés par les aérosols et la vapeur d'eau, la variation de B_A en fonction de T_L dépend probablement de la vapeur d'eau. Dans cette partie nous avons décidé de déterminer la relation entre $T_{L\ AM2}$ et leurs valeurs correspondantes B_A , les valeurs $T_{L\ AM2}$ sont les valeurs T_L calculés à la masse d'air 2 standardisés par Grenier et al. 1994. Les valeurs mensuelles moyennes de $T_{L\ AM2}$ et B_A déterminées à la masse d'air 2 obtenus pour les deux sites sont résumées sur le tableau 3.1 :

Site	Location	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
Ghardaïa	φ = 32.43°N λ = 3.8°E z = 468m	2.2	2.3	2.1	2.7	3.1	3.9	4.4	4.4	4.2	3.7	3.1	2.4	T_L
		0.03	0.03	0.02	0.06	0.08	0.13	0.16	0.16	0.15	0.12	0.08	0.04	B_A
Bouzaréah	φ = 36.8°N λ = 3.17°E z = 345m	2.9	2.9	2.5	3.2	3.1	3.3	3.5	3.1	3.2	2.8	2.7	2.4	T_L
		0.07	0.07	0.05	0.09	0.08	0.09	0.11	0.07	0.08	0.06	0.05	0.04	B_A

Tableau 3.1: Résultats obtenus pour les valeurs mensuelles du facteur de trouble de Linke et du coefficient d'Angstrom pour les sites de Ghardaïa et Bouzaréah.

En appliquant la méthode des moindres carrés (Fig III.4), les valeurs illustrées sur le tableau 3.1 sont utilisées pour trouver une formule reliant le facteur T_L et le coefficient B_A à la masse d'air 2. Les formules (2.16) et (2.17) sont obtenues pour les deux sites Ghardaïa et Bouzaréah; respectivement, l'équation (18) est déduite pour le cas général.

- Pour le site de Ghardaïa :
$$B_A = -0.112 + (0.063 \cdot T_L) \quad (16)$$

- Pour le site de Bouzaréah :
$$B_A = -0.107 + (0.060 \cdot T_L) \quad (17)$$

- Pour l'Algérie :
$$B_A = -0.11 + (0.06 \cdot T_L) \quad (18)$$

Ces formules peuvent être utilisées pour déterminer les coefficients de troubles en déduisant l'un de l'autre, en effet en sachant B_A on peut déterminer T_L ou l'inverse.

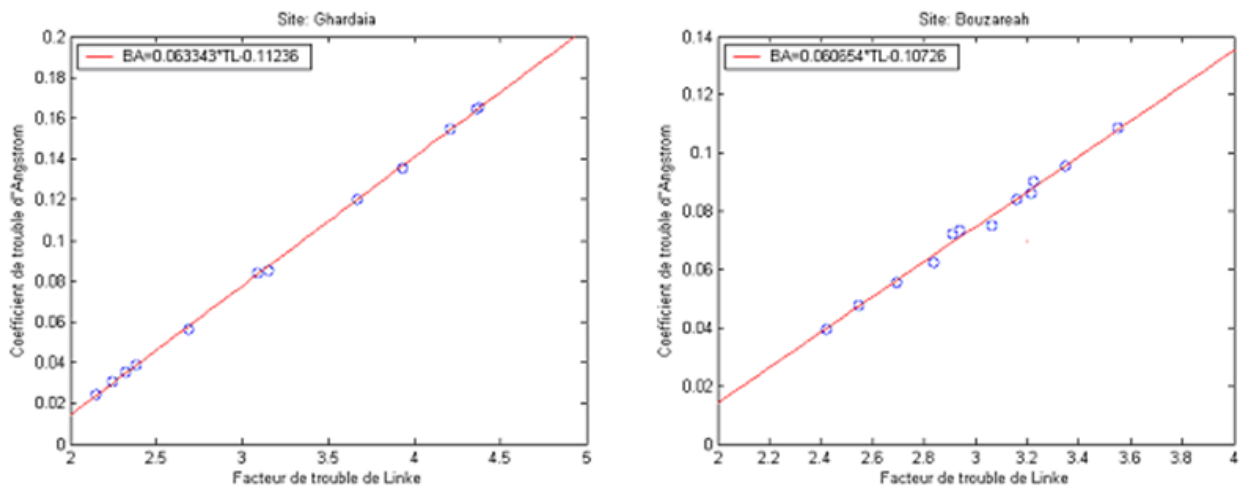


Fig III.4: Relation entre le facteur de trouble de Linke et le coefficient d'Angstrom calculée pour les deux sites.

III.2.3. Détermination du facteur de Linke à partir de tables publiées

Durant cette étude nous avons vu que une détermination du facteur de trouble de Linke à partir du rayonnement direct est possible en utilisant les modèles empiriques par exemple, par contre la détermination du rayonnement solaire en fonction du facteur de Linke nécessite un modèle mathématique indépendant du rayonnement. La plus part des modèles existants nécessitent la connaissance d'un grand nombre de données relatives au site (température ambiante, humidité relative, coefficient d'Angstrom, quantité de la vapeur d'eau, quantité d'ozone...etc.). Malheureusement; dans la plus part des cas, ces données ne sont pas toutes disponibles, par contre des tables relatives au facteur de Linke sont très abondantes.

Pour cela nous avons également choisi de calculer le rayonnement solaire en utilisant les valeurs du facteur de Linke publiées sur le Web, après une étude comparatives des résultats trouvés pour les deux sites Ghardaïa et Bouzaréah et les tables publiées, nous avons choisi d'utiliser les données du projet SoDa mis en disposition sur un site Web, la méthode adoptée par ce projet fait appel à des données satellitaires d'une part et des données de mesures au sol d'autre part pour calculer le facteur de Linke. Ce site a été utilisé pour le modèle de l'Atlas Solaire de l'Europe (ESRA) dans sa nouvelle édition (2nd édition), les données de ce site ont été également adoptées par MeteoNorm dans sa dernière version (Version 6.0). Pour notre cas nous avons décidé d'établir; à partir de ce site, une base de donnée du facteur de trouble de Linke pour chaque combinaison (Latitude, Longitude et Altitude) de l'Algérie.

III.2.4. Détermination expérimentale du facteur de Linke

III.2.4.1. Eclairage direct normal incident sur un plan

Soit la formule donnée par l'équation (19) :

$$T_{rb}(\gamma_s, T_L) = \exp(-0.8662 \cdot T_L \cdot m_A \cdot \delta_R) \quad (19)$$

La quantité $\exp(-0.8662 \cdot T_L \cdot m_A \cdot \delta_R)$ représente la transmittance directe du rayonnement par ciel clair $T_{rb}(\gamma_s, T_L)$, elle est fonction de la hauteur du soleil γ_s et du facteur de trouble T_L à masse d'air 2, la figure (III.5) illustre la variation de la transmittance directe $T_{rb}(\gamma_s, T_L)$. Par conséquent le rayonnement direct normal incident sur un plan horizontal $IN(\gamma_s, T_L)$ par ciel clair est donné par :

$$IN(\gamma_s, T_L) = G_O \cdot T_{rb} = G_O \cdot \exp(-0.8662 \cdot T_L \cdot m_A \cdot \delta_R) \quad (20)$$

Les variations au niveau de la mer du rayonnement direct normal pour en fonction de la hauteur du soleil γ_s et pour différentes valeurs du facteur de linke sont représentées sur la figure (III.5) :

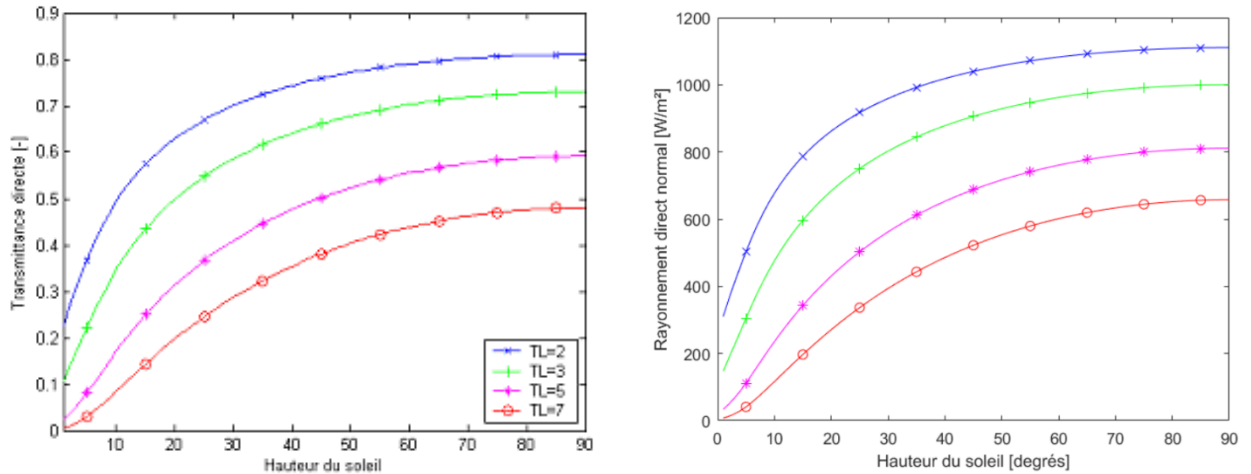


Fig III.5: Variations de la transmittance directe et du rayonnement direct normal.

III.2.4.2. Données expérimentales

Actuellement; en Algérie, la mesure des données du rayonnement solaire est effectuée d'une manière instantanée et sur certains sites seulement de l'Algérie. Nous avons choisi les sites de Ghardaïa (Lat. 32.43°N) et de Bouzaréah sur les hauteurs d'Alger (Lat. 36.8°N) pour cette étude. Le choix de ces sites s'est porté sur la disponibilité des données radiométriques recherchées et sur la différence de climat existant entre eux. En effet, les deux sites ont des conditions climatiques différentes; Bouzaréah est un grand arrondissement d'Alger, ville côtière, et Ghardaïa est une ville saharienne située au Nord du Sahara. Les données du rayonnement solaire (global, diffus et direct normal) utilisés provient de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa, 'URAER' d'une part et du Centre de Développement des Energies Renouvelables de Bouzaréah, 'CDER' d'autre part.

Deux type de données du rayonnement solaire sont utilisés pour déterminer les troubles atmosphériques: les données du rayonnement direct normal I_N et les données du rayonnement global I_G et diffus I_D . La mesure du rayonnement direct normal est obtenue directement à l'aide d'un pyréliomètre (cas de Ghardaïa), malheureusement ce type de mesures n'est pas disponible à Bouzaréah. Comme alternative nous avons utilisé les données globales et diffuses du rayonnement solaire issues d'un pyranomètre pour calculer le rayonnement direct normal à partir de la différence de I_G et I_D (rayonnement direct), la formule utilisée est comme suit :

$$I_N = \frac{(I_G - I_D)}{\sin(\gamma_s)} \quad (21)$$

Pour déterminer le facteur de trouble de Linke T_L il est important de choisir les données du rayonnement solaire relatives aux jours clairs pour cela il faut d'abord trier les données, notre choix est basé sur les conditions de sélection suivantes adopté par Karayel et al. :

- Le rayonnement direct normal doit être supérieur à 200 W/m^2 ;
- La fraction du rayonnement diffus par rapport au rayonnement global doit être inférieure à $1/3$.

III.2.4.3. Modèle expérimental du facteur de Linke

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

Le rayonnement direct normal est exprimé en fonction du facteur T_L , selon la formule suivante :

$$I_N = I_O \cdot \varepsilon \cdot \exp(-T_L \cdot m_A \cdot \delta_R) \quad (22)$$

ε est le facteur d'excentricité, $I_0=1367 \text{ Wm}^{-2}$. δ_R est l'épaisseur optique de Rayleigh et m_A est la masse d'air optique relative qui dépend de la hauteur du soleil et de la pression atmosphérique du site.

Pour calculer l'épaisseur optique de Rayleigh la formule de Louche et al. corrigée par Kasten est utilisée pour cette étude :

$$(\delta_R)^{-1} = 6.62960 + (1.75130 \cdot m_A) - (0.12020 \cdot m_A^2) + (0.00650 \cdot m_A^3) - (0.00013 \cdot m_A^4) \quad (23)$$

Et pour le calcul de la masse d'air optique relative l'expression suivante est utilisée:

$$m_A = \frac{p/p_0}{\sin(\gamma_s) + 0.50572 \cdot (\gamma_s + 6.07995)^{-1.6364}} \quad (24)$$

En ce référent à l'équation (22), le facteur de trouble de Linke est déduit des mesures expérimentales issues du pyréliomètre en utilisant la formule suivante :

$$T_L = \frac{I}{(m_A \cdot \delta_R)} \cdot \ln\left(\frac{I_O \cdot \varepsilon}{I_N}\right) \quad (25)$$

Théoriquement, on peut dire que la plus petite valeur du facteur de linke est 1, elle est obtenue quand le ciel est vraiment bleu clair, la plus grande valeur est obtenus quand le ciel est très pollué, elle est égale à 7.

III.2.4.4. Résultats obtenus à partir des données expérimentales

L'équation (25) est utilisée pour la détermination des valeurs mensuelle moyennes du facteur de trouble atmosphérique de Linke T_L à Ghardaïa et à Bouzaréah en utilisant les données du rayonnement solaire mesurées.

L'étude de la variation mensuelle du facteur de trouble de Linke calculé pour les deux sites montre que les valeurs de T_L sont relativement élevées en période d'été (Juin, Juillet et Août) comme le montre la figure (III.6). Pour le site de Ghardaïa ce phénomène est expliqué par l'effet de serre causé par la présence permanente des quantités de nuages dans le ciel empêchant les rayons du soleil de se réfléchir hors atmosphère, en plus des températures moyennes élevées pendant la saison d'été.

L'augmentation est justifiée; pour le site de Bouzaréah, par la grande quantité de la vapeur d'eau cumulée dans l'atmosphère causée par l'évaporation de la mer méditerranéenne due à la situation géographique du site. En hiver les valeurs de T_L sont plus élevées à Bouzaréah et ceci est expliqué par les précipitations importantes dans cette région durant cette période de l'année. Les graphiques illustrent également la variation maximale et minimale du facteur de trouble T_L .

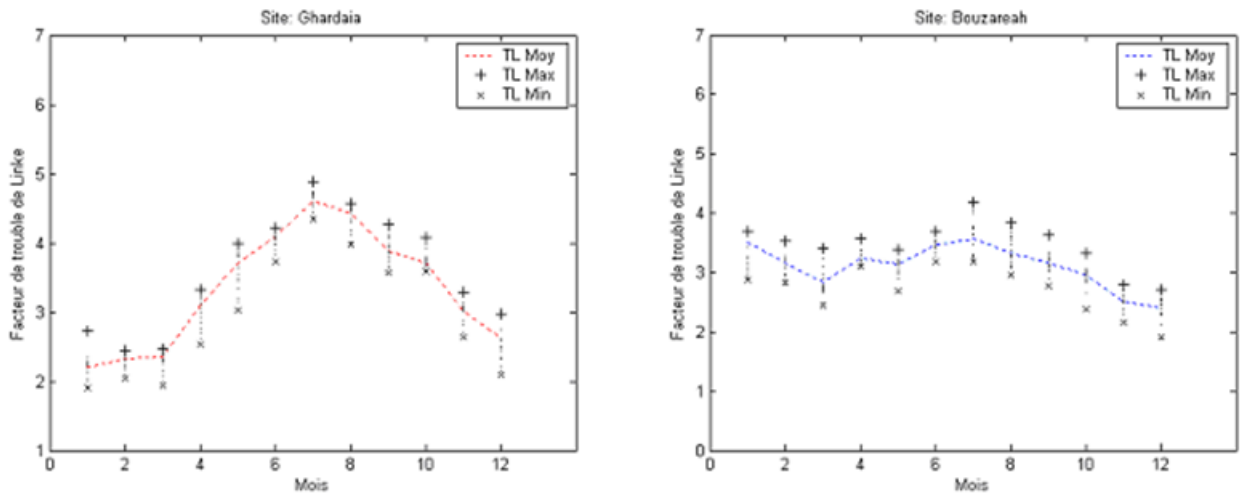


Fig III.6: Variation mensuelle des valeurs moyennes, maximales et minimales du facteur de trouble de Linke calculées à Ghardaïa et Bouzaréah.

I.3. Résultats et discussions

III.3.1. Résultats obtenus par le modèle Capderou sur les deux sites

Dans cette partie nous donnons quelques graphes relatifs aux deux sites de Ghardaïa (Lat: 32.48°) et Bouzaréah (Lat: 36.78°) obtenus par application du modèle Capderou selon différentes valeurs d'orientation α et d'inclinaison β du plan, les combinaison (α, β) sont choisîtes pour les plans remarquables, très utilisés en pratique (le numéro du jour est 91, la simulation est réalisée avec le logiciel Matlab 6.5).

- Plan horizontal : $(\alpha, \gamma, \beta) = (0, 90^\circ, 0)$

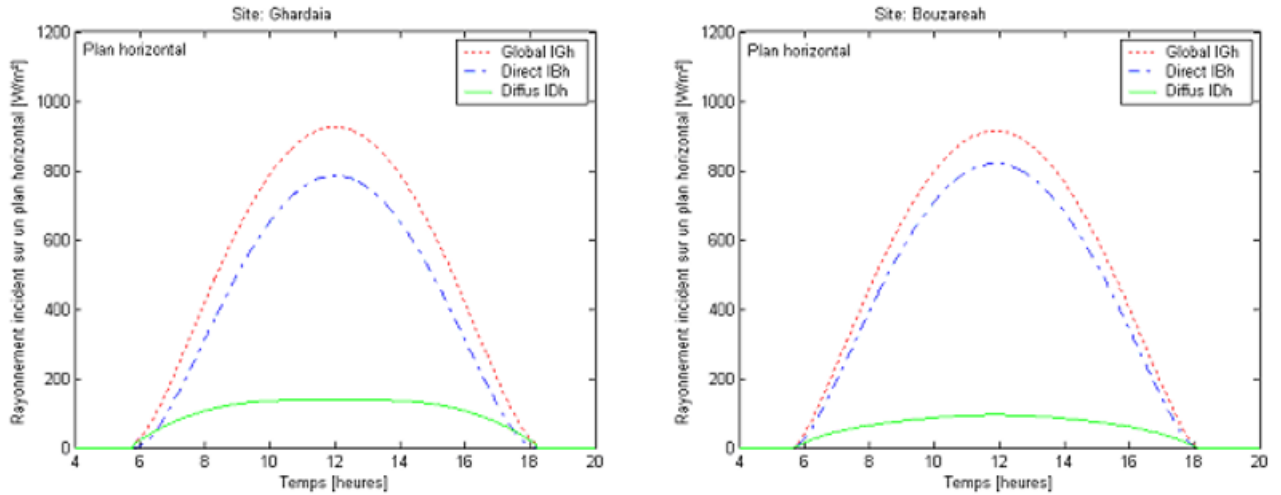


Fig III.7: Rayonnement incident sur un plan horizontal.

- Plan sud d'inclinaison = Lat : $(\alpha, \gamma, \beta) = (0, 90-\varphi, \varphi)$

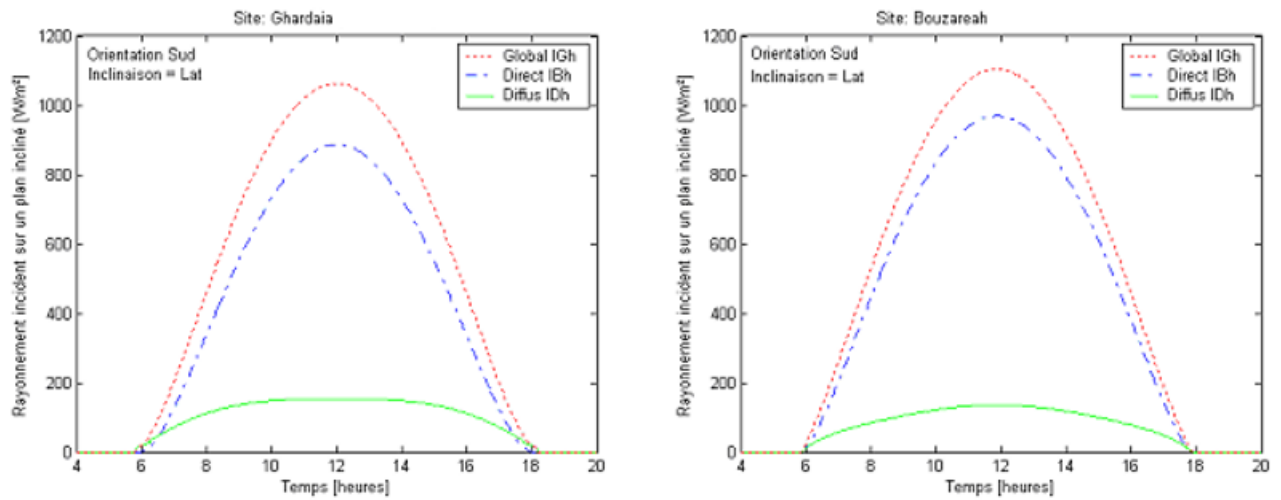


Fig III.8: Rayonnement incident sur un plan incliné à la latitude.

- Plan Vertical Sud : $(\alpha, \gamma, \beta) = (0, 0, 90^\circ)$

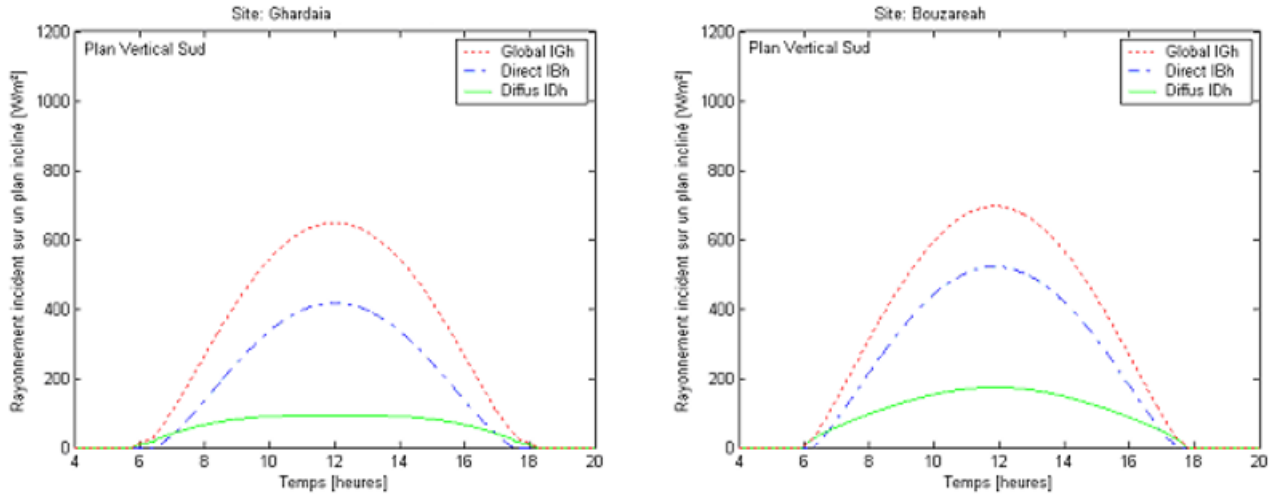


Fig III.9: Rayonnement incident sur un plan orienté vers le Sud et incliné de 90° .

- Plan Sud Ouest : $(\alpha, \gamma, \beta) = (45, 0, 90^\circ)$ et Plan Sud Est : $(\alpha, \gamma, \beta) = (-45, 0, 90^\circ)$

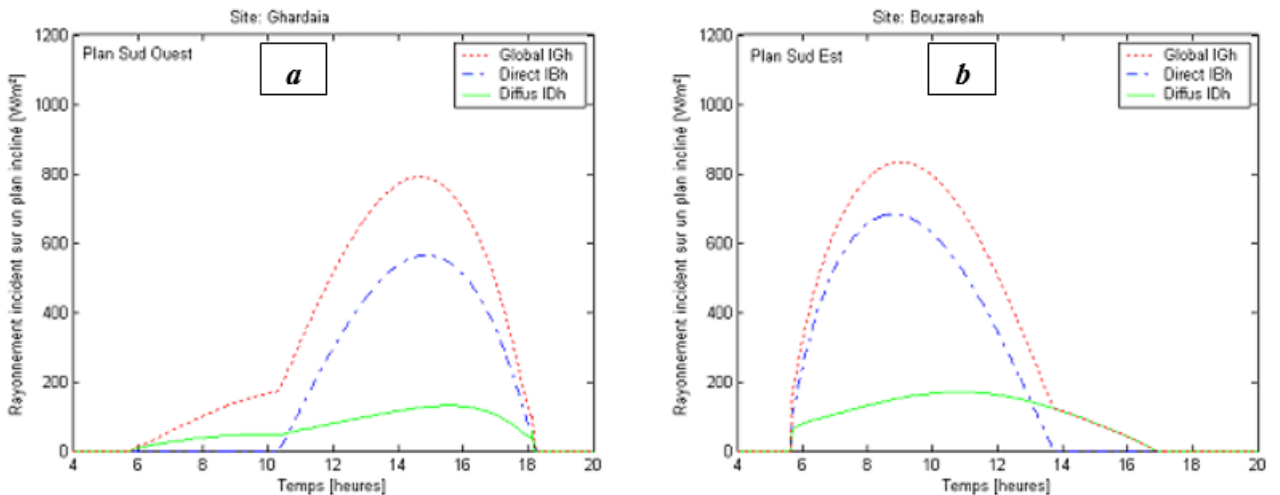


Fig III.10: Rayonnement incident sur un plan orienté Sud Ouest (a) et Sud Est (b).

III.3.2. Validation des résultats

III.3.2.1. Rayonnement solaire incident

Pour obtenir une validation du rayonnement solaire, nous allons confronter quelques valeurs par ciel clair, du rayonnement solaire fournies par les deux stations radiométriques de Ghardaïa et Bouzaréah, avec des valeurs, sur plan horizontal et sur plan incliné, délivrées par le logiciel de calcul, Matlab.

- Rayonnement incident sur un plan horizontal (Site de Bouzaréah et Ghardaïa)

Les données expérimentales relatives au rayonnement solaire global sur plan horizontal par ciel clair, et pour une journée hivernale et estivale sur les sites de Bouzaréah et Ghardaïa sont représentées sur la figure (III.11) sous forme de graphes, et en les comparants aux données issues du modèle Capderou étudié.

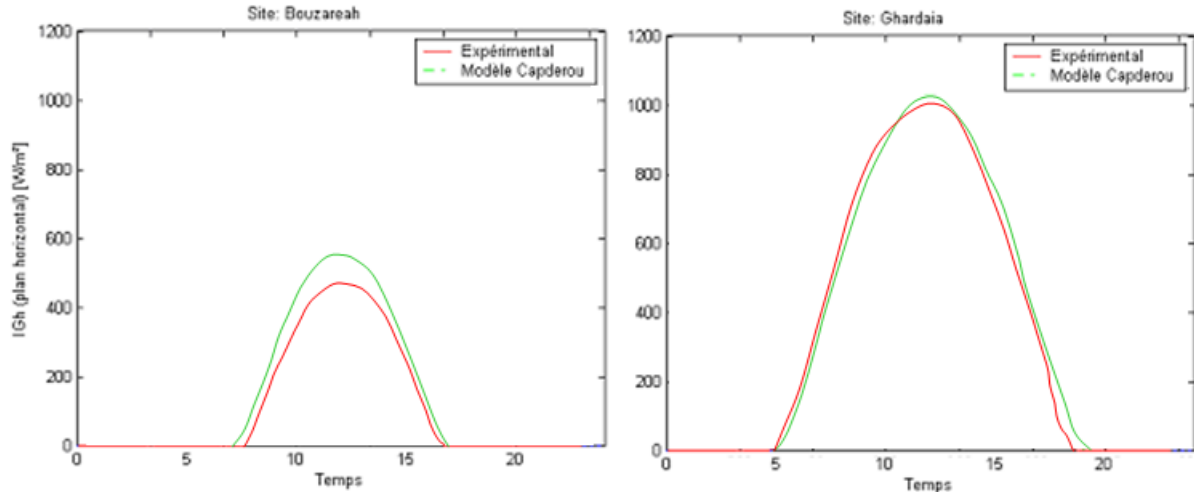


Fig III.11: Comparaison des résultats obtenus par le modèle Capderou avec les données expérimentales relatives au rayonnement solaire global horizontal sur les sites de Bouzaréah et Ghardaïa pour un jour d'hiver et d'été clair, respectivement.

▪ Rayonnement incident sur un plan incliné (Site de Bouzaréah et Ghardaïa)

Les données expérimentales relatives au rayonnement solaire global sur plan incliné (inclinaison = Lat) par ciel clair, et pour une journée d'automne et du printemps des sites de Bouzaréah et Ghardaïa sont représentées sur la figure (III.12) sous forme de graphes, et en les comparants aux données issues du modèle Capderou étudié.

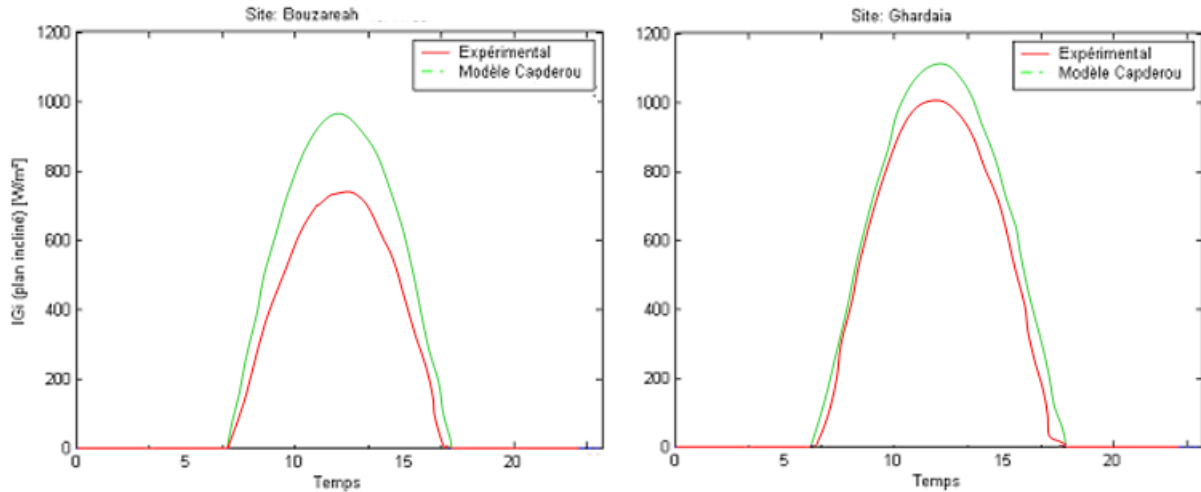


Fig III.12: Comparaison des résultats obtenus par le modèle Capderou avec les données expérimentales relatives au rayonnement solaire global incliné sur les sites de Bouzaréah et Ghardaïa pour un jour d’automne et du printemps, respectivement.

Le traitement des données du rayonnement solaire provenant des deux stations montre d’une manière générale que les données du site de Bouzaréah sont assez perturbées par rapport à celles de Ghardaïa, sur l’ensemble de l’année et plus particulièrement en hiver. Autrement dit, la sélection des jours clairs, à des traitements, paraît difficile.

III.3.2.2. Energie solaire incidente

- Energie incidente sur un plan horizontal (Site de Bouzaréah et Ghardaïa)

L’énergie reçue sur un plan considéré est toujours l’image du rayonnement incident sur le même plan, à partir de cette idée on retrouve les mêmes remarques précédentes qui reviennent (Fig III.13). Pour le site de Ghardaïa il se rapproche plus de l’expérimental au mois d’hivers et pour le site de bouzaréah c’est en été qui est le plus proche.

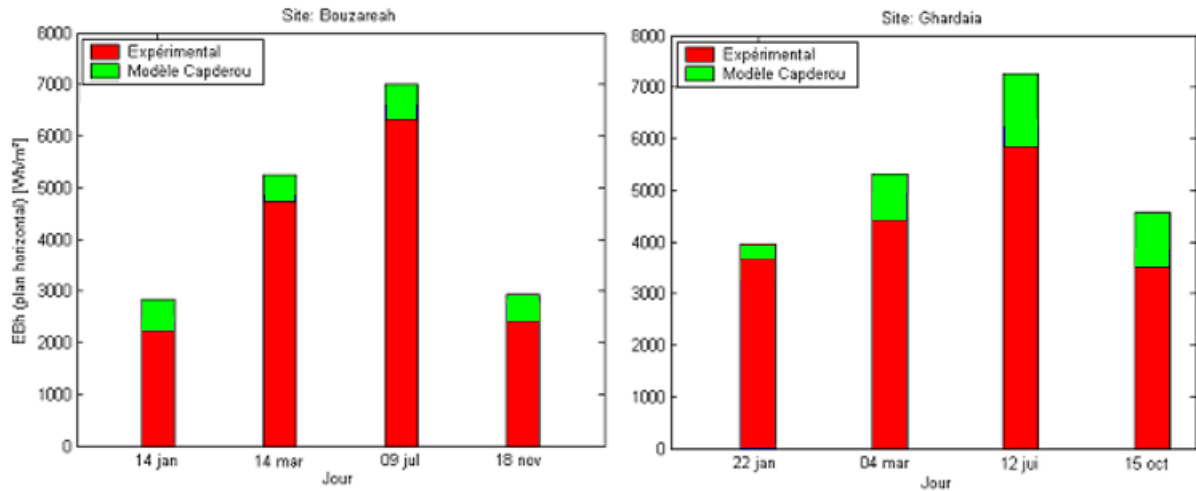


Fig III.13: Comparaison des résultats obtenus par le modèle Capderou avec les données expérimentales relatives à l'énergie solaire directe sur les sites de Bouzaréah et Ghardaïa durant l'année.

III.3.3. Cartes du facteur de trouble de linke

Pour conclure cette partie du rayonnement solaire nous vous proposons la carte du facteur de trouble de Linke de l'Algérie pour le mois de Janvier (Fig III.14a), et le mois de Juillet (Fig III.14b) suivantes :

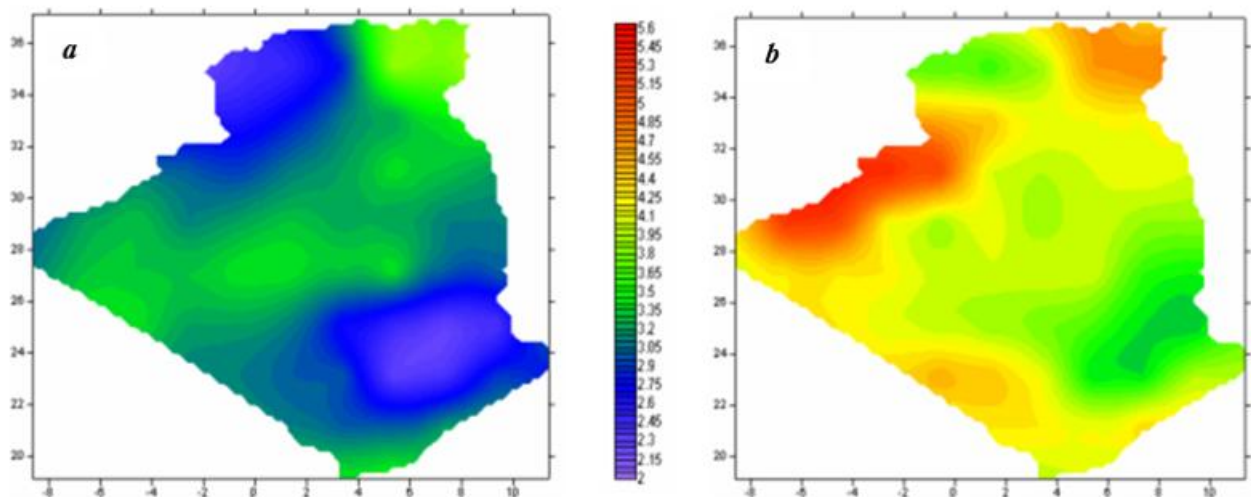


Fig III.14: Cartographie du facteur de Linke pour le mois de Janvier (a), et le mois de Juillet (b).

I.4. Conclusion

Lorsque le rayonnement solaire direct traverse l'atmosphère terrestre, il subit une atténuation due à la diffusion par les molécules d'air et les aérosols et à l'absorption par

diverses composantes atmosphériques, notamment l'ozone, la vapeur d'eau, l'oxygène et le dioxyde de carbone. L'atténuation est causée par les deux mécanismes : l'absorption par la vapeur d'eau et la diffusion par les aérosols est connue comme une turbidité atmosphérique représentée par les coefficients de trouble d'Angström (β) ou par le facteur de trouble de Linke T_L . Ce dernier permet de comparer une atmosphère réelle à une atmosphère idéale sèche où n'existe que la diffusion par les molécules d'azote, d'oxygène, et l'absorption par l'ozone.

Dans ce chapitre une étude expérimentale du facteur de trouble de Linke; sur deux sites algériens, est réalisée et confrontée à des valeurs estimées par des modèles théoriques proposés dans la littérature par divers scientifique. Il s'agit des sites de Ghardaïa et de Bouzaréah sur lesquels on collecte continuellement des données météorologiques et radiométriques.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La protection de l'environnement est devenue une préoccupation majeure ces dernières années. De nombreuses voies de recherche sont donc orientées vers l'utilisation des énergies renouvelables, dont l'énergie solaire. L'énergie solaire et, par conséquent, l'éclairage solaire résultent du processus de fusion nucléaire qui se déroule au Soleil. Cette énergie est la principale source d'énergie et, par conséquent, le moteur qui déplace notre environnement. L'énergie solaire que nous recevons par l'éclairage solaire est directement ou indirectement responsable d'aspects aussi importants pour la vie que la photosynthèse, en maintenant une température sur la planète compatible avec la vie, le vent, etc. L'énergie solaire qui atteint la surface de la Terre est 10 000 fois plus grande que l'énergie actuellement consommée par toute l'humanité.

Dans ce travail, nous avons représenté une étude sur le trouble atmosphérique, en se focalisant sur le facteur de trouble de Linke. Une modélisation du rayonnement solaire par le modèle Capderou, pour la détermination des paramètres géométriques (déclinaison solaire, angle horaire, hauteur du soleil, azimut et angle d'incidence) et des paramètres atmosphériques (masse et épaisseur optique de l'atmosphère) est présentée. Les transmittances nécessaires pour le calcul des composantes du rayonnement solaire par ciel clair, incident sur un plan horizontal et incliné ont été programmées avec Matlab.

Ce travail nous a permis de confronter des valeurs mesurées du rayonnement solaire à celles estimées par le modèle Capderou. La présentation de la variation journalière du facteur de Linke montre que le modèle Capderou, qui reste le plus utilisé, donne une estimation du facteur de Linke assez correcte avec une erreur plus ou moins négligeable dépendant des saisons.

Nous avons vu aussi que la détermination du rayonnement solaire en fonction du facteur de Linke nécessite un modèle mathématique indépendant du rayonnement. La plus part des modèles existants nécessitent la connaissance d'un grand nombre de données relatives au site (température ambiante, humidité relative, coefficient d'Angstrom, quantité de la vapeur d'eau, quantité d'ozone...etc.). D'autre part, la détermination du facteur de trouble de Linke à partir du rayonnement direct est possible en utilisant les modèles empiriques par exemple ou à partir des données expérimentales.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] MEZIANI .F, mémoire de magister. Détermination du gisement solaire par traitement d'images MSG, UMMTO, 2012, page 01.
- [2] www.asal-dz.org, 'Apport de la Télédétection pour la Production d'un Atlas du Gisement Solaire.
- [3] F. Yettou et al, 'Etude comparative de deux modèles de calcul du rayonnement solaire par ciel clair en Algérie', *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 12 N°2 (2009) 331 – 346
- [4] C. Gueymard and F. Vignola, 'Determination of atmospheric turbidity from the diffuse-beam broadband irradiance ratio', *Solar Energy*, Vol. 63, N°3, pp. 135 – 146, 1998.
- [5] C.A. Gueymard and JD. Garrison, 'Critical evaluation of precipitable water and atmospheric turbidity in Canada using measured hourly solar irradiance', *Solar Energy*, Vol. 62, N°4, pp. 291 – 307, 1998.
- [6] M. Cucumo, D. Kaliakatsos and V. Marinelli, 'A calculation method for the estimation of the Linke turbidity factor', *Renewable Energy*, Vol. 19, N°1–2, pp. 249 – 258, 2000.
- [7] R. Pedros, J.A Utrillas, J.A Martinez-Lozano and F. Tena, 'Values of Broad Band Turbidity Coefficients in a Mediterranean Coastal Site', *Solar Energy*. Vol. 66, N°1, pp. 11 – 20, 1999.
- [8] A.S. Rapti, 'Atmospheric transparency, atmospheric turbidity and climatic parameters', *Solar Energy*, Vol. 69, N°2, pp. 99 – 111, 2000.
- [9] M. Diouri, L. El Amraoui, R. Jaenicke and L. Schutz, 'Atmospheric turbidity over the Angad area of Morocco', *Journal of Aerosol Science*, Vol. 31, N°1, pp. 279 – 280, 2000.
- [10] M. Chaâbane, 'Analysis of the atmospheric turbidity levels at two Tunisian sites', *Atmospheric Research*, Vol. 87, pp. 136 – 146, 2008.
- [11] M. Chaâbane, M. Masmoudi and F. Elleuch, 'Determination of Linke turbidity factor from solar radiation measurement in Northern Tunisia', *Renewable Energy*, Vol. 29, pp. 2065 – 2076, 2004.
- [12] El-Hussainy and Omran, 'Analysis and trends of atmospheric turbidity parameters over Cairo', *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol. 66, N°1–2, pp. 113 – 121, 1998.
- [13] A.S. Zakey, M.M. Abdelwahab and P.A. Makar, 'Atmospheric turbidity over Egypt', *Atmospheric Environment*, Vol. 38, pp. 1579 – 591, 2004.
- [14] L. Diabaté, J. Remund and L. Wald, 'Linke Turbidity Factors for Several Sites in Africa', *Solar Energy*. Vol. 75, N°2, pp. 111 – 119, 2003.

- [15] J. Remund, L. Wald, M. Lefevre, T. Ranchin and J. Page, In press. 'Worldwide Linke turbidity information', In: Proceedings of the ISES Solar World Congress 2003, Goeteborg, Sweden, 16–19 June 2003.
- [16] M. Capderou, 'Atlas solaire de l'Algérie', Modèles théoriques et expérimentaux, Vol. 1, T1, Office des Publications Universitaires, EPAU, Algérie, 375 p., 1987.
- [17] 'Matlab/Simulink Tutorial', School of Electrical, Electronic and Computer Engineering, Release 13, Version 6.5, 2nd Edition, 2003.
- [18] Chabanizeyneb; "La part des énergies renouvelables dans le bilan énergétique national à l'horizon 2030", Mémoire de magister; Université M'Hamed Bougara-Boumerdes; 2014.
- [19] GitayHabiba, Suarez Avelino, Dokken David Jon, T. Watson Robert: Les changements climatiques et la biodiversité, avril 2002.
- [20] Rojey Alexandre : Energie et climat, Réussir la transition énergétique, Edition Technip 2008.
- [21] Robert Jerome, Fabas Laurent : Guide de la maison économe, Edition Eyrolle, paris 2008.
- [22] Yettou F. Application et Eclairage Solaire. Cours, Université de Ghardaïa, Algérie,(2019).
- [23] B. Rivoire, Le solaire thermodynamique, CNRS, France, Avril 2002.
- [24] K.Ogilvie, L'abc des technologies de l'énergie de l'énergie renouvelable, pollution probe, canada, septembre 2003.
- [25] M. Geyer, Report on the solar PLACES, START Mission to Algeria, IEA Solar PLACES, USA, 2003.
- [26] Schenkel Y., Temmerman M., Marchal D., Schaar C : Une analyse comparative de l'impact sur l'emploi d'une installation de chauffage au bois. Biotechnol. agron. soc. environ, 2005.
- [27] : R.Bernard, G. Menguy et M. Schwartz, 'Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications', technique & documentation, Ed. Lavoisier, France, 250 p., 1983.
- [28] : J. Bernard. Energie solaire calculs et optimisation, ellipse Edition marketing. (2004).
- [29] : Z. Sen. Solar energy fundamentals and modeling techniques, Springer. (2008).
- [30] J.P. Rivet, 'Introduction à l'Astronomie', France, 205 p., 2005.
- [31] : J.M. Chasseriau, 'Conversion thermique du rayonnement solaire', Ed. Dunod, France., 1984.
- [32] : R.Bernard, G. Menguy et M. Schwartz, 'Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications', technique & documentation, Ed. Lavoisier, France, 250 p., 1983.
- [33] : A. Labouret, 'Energie solaire photovoltaïque', Ed. Dunod, France, 302 p., 2003.
- [34] : M. Capderou. Atlas solaire de l'Algérie, tome 1, vol. 1 et 2 ; OPU, 1987.

- [35] : Arafa KADDOURI, 'CONCEPTION ET REALISATION D'UN SUIVEUR SOLAIRE A DEUX AXES', l'obtention du diplôme Ingénieur d'Etat, électroniques & télécommunications, département génie électrique, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, 2015.
- [36] : Bouziane MAHMAH, Maïouf BELHAMEL, Samira CHADER, Abdelhamid M'RAOUI, Farid HAROUADI, Claude ETIEVANT, Stève LECHEVALIER, Abdel-Nasser CHERIGUI. Projet Maghreb – Europe : Production d'Hydrogène Solaire Phase I : Etude d'Opportunité et de Faisabilité du Projet. « 20th World EnergyCongress – Rome, November 11th – 15th, 2007».
- [37] : CHENNI. Rachid, Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire, Université Mantouri de constantine, 2007.
- [38] : J.M Chassériau, 'Conversion thermique du rayonnement solaire' ; Dunod, 1984.
- [39] Samira MouhousChaouchi. Etude statistique du rayonnement solaire sur un plan incliné. Université Abou BekrBelkaid. 2012
- [40] Anil Kalyanpur, Marc-Etienne Mercadier, Philippe Blanc . Gisement solaire en France caractérisation de la ressource énergétique. Profil de répartition et volatilité. Environnement et Technique. 2013.
- [41] MouhousChaouchi . Etude statistique du rayonnement solaire sur un plan incliné. Université Abou BekrBelkaidTlemcen . URMER .2012.
- [42] Baroud Hinde ,DjekaouaHabiba. Estimation de l'ensoleillement par deux modèles semi-empiriques dans la région de Ghardaïa. Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master. Université De Ghardaïa 2017.
- [43] Benjamin Dessus , François Pharabod . l'énergie solaire . presses universitaires de France. Paris.1996
- [44] Hadja Guedaouria . Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour alimenter le laboratoire LPDS au sien de l'université de Béchar. Université Bechar. Faculté des sciences exactes.2017.
- [45] Site Web : <https://www.blet-mesure.fr/premiere-classe/pyrheliometre-pyhh0-1tcp.html>, 09/03/2019.
- [46] BenkhelifaAbdelaziz . Modélisation et expérimentation d'un capteur solaire plan à eau Influence de l'intensité de l'éclairement solaire et de l'inclinaison du capteur solaire sur le rendement du capteur. Mémoire Présenté pour l'obtention du diplôme de master. Université KasdiMerbah Ouargla.2012.
- [47] Belhadj Mohammed. Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome .thèse de magister. Université de Béchar. 2007-2008.
- [48] R.Bernard, G. Menguy et M. Schwartz, 'Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications', technique & documentation, Ed. Lavoisier, France, 250 p., 1983.

- [49] J.M. Chasseriau, 'Conversion thermique du rayonnement solaire', Ed. Dunod, France., 1984.
- [50] Bouchouicha. k. Modélisation multi spectrale des images satellitaire, application : quantification du bilan d'énergie sol-atmosphère. Thèse de Doctorat en science. Université Mohammed Boudiaf, Oran 2017.
- [51] 'Matlab/Simulink Tutorial', School of Electrical, Electronic and Computer Engineering, Release 13, Version 6.5, 2nd Edition, 2003.
- [52] Fatiha, Y., optimisation d'un système solaire de production de l'eau chaude Décembre 2009., Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi, El-Harrach, ALGER.
- [53] A. Labouret, 'Energie Solaire Photovoltaïque', Ed. Dunod, France, 302 p., 2003.
- [54] (simpleDocteurMerad née MesriMokhtaria& Professeur Cheknane Ali « Introduction au gisement Solaire algérien Th) :
- [55] F. Linke, 'Transmissions - Koeffizient und Trübungsfaktor', Beiträge zur Physik der Atmosphäre, Vol. 10, pp. 91 – 103, 1922.
- [56] F. Kasten, 'A Simple Parameterization of Two Pyrheliometric formulae for determining the Linke Turbidity Factor', Meteorology Rdsch, Vol. 33, pp. 124 - 127, 1980.
- [57] K. Feussner and P. Dubois, 'Trübungsfaktor, Precipitable Water', Staub. GerlandsBeitr., Geophysical, Vol. 27, pp. 132 - 175, 1930.
- [58] A. Louche, G. Peri and M. Iqbal, 'An analysis of Linke Turbidity Factor', Solar Energy, Vol.37, N°6, pp. 393 – 396, 1986.
- [59] F. Kasten, 'The Linke Turbidity Factor Based on Improved Values of the Integral Rayleigh Optical Thickness', Solar Energy, Vol. 56, N°3, pp. 239 – 244, 1996.
- [60] Magister BAISSI Mohamed Tahar Etude théorique et expérimentale des paramètres de fonctionnement d'un capteur solaire plan Université Mohamed Khider – Biskra 28/06/2012
- [61] Fatiha Yettou, Malek Ali, Mourad Haddadi, Amor Gama, Etude comparative de deux modèles de calcul du rayonnement solaire par ciel clair en Algérie, January 2009.
- [62] J. Hofierka and M. Sári, 'The Solar Radiation Model for Open Source GIS: Implementation and Applications', Proceedings of the Open source GIS - GRASS users conference, Trento, Italy, 11-13 September 2002.
- [63] P. Bessemoulin and J. Olivieri, 'Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette', Document Meteo-france (Service central d'exploitation de la meteorology and centre radiometrique de carpentras), 2000.
- [64] M. Capderou, 'Atlas Solaire de l'Algérie', Modèles Théoriques et Expérimentaux, Vol. 1, T1, Office des Publications Universitaires, EPAU, Algérie, 375 p., 1987.