



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies
Département d'automatique et électromécanique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : *Sciences et Technologie*

Filière : *Energies Renouvelables*

Spécialité : *Energies Renouvelables en Electrotechnique*

Par : RADJEM Abelhaithem et BOUHAMIDA Oussama

Thème

**Etude comparative de plusieurs modèles
d'estimation de l'éclairement solaire par ciel
clair en Algérie**

Soutenu publiquement le : 30/09/2020

Devant le jury :

BAHRI Ahmed	MAA	Université	Président
FERKOUS Khaled	MAA	Université	Examineur
MEDOUKALI Hemza	MCB	Université	Examineur
YETTOU Fatiha	MRA	URAER. Ghardaïa	Encadreur
GAMA Amor	MRA	URAER. Ghardaïa	Co-encadreur

Année universitaire 2019/2020

المخلص

في السنوات الأخيرة، استفادت العديد من البلدان من الطاقة المتجددة. شهد استغلال الطاقة الشمسية تطوراً ملحوظاً للغاية في العالم، بنمو قدره 02٪ واستخدام أكثر من 220 جيجاوات من الطاقة. الطاقة الشمسية هي الطاقة الواعدة والمتاحة على نطاق واسع في الجزائر. يتكون الإشعاع الشمسي على مستوى الأرض بشكل أساسي من الأشعة المباشرة والأشعة المنتشرة. الأشعة المباشرة هي الأشعة التي تصل مباشرة إلى سطح الأرض من الشمس. بينما تنتج الأشعة الشمسية المبعثرة عن انعراج الضوء بالسحب والجزيئات المختلفة المعلقة في الغلاف الجوي وانكسارها عن طريق الأرض. بسبب التأثيرات الجوية، يكون الإشعاع الشمسي على مستوى الأرض عشوائياً. كلهم يشكلون الأشعة الكلية.

الهدف من هذه الأطروحة هو محاكاة ومقارنة تدفقات الأشعة الشمسية المختلفة في السماء الصافية على مستوى الأرض من خلال عدة نماذج لتقدير الإشعاع الشمسي (نموذج Capderou، نموذج Kasten، نموذج r.sun ; Perrin)، باستخدام برنامج (Matlab) لبرمجة هذه النماذج.

من خلال تطبيق هذه النماذج الأربعة، يجعل من الممكن تقدير المكونات المباشرة والمنتشرة للإشعاع الشمسي الساقط على المستوى الأفقي أو المائل باتجاهات مختلفة. ومن ثم، فإن النتائج التي تم الحصول عليها من خلال مقارنة القيم المحسوبة مع القيم الإشعاعية المقاسة في منطقة غرداية تظهر توافقاً جيداً بين البيانات المقطرة والبيانات التجريبية.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الشمسية، تقدير الإشعاع الشمسي، نموذج Capderou، نموذج Kasten، نموذج

r.sun، نموذج Perrin.

RESUME

Ces dernières années, de nombreux pays ont fait un bon usage des énergies renouvelables. L'exploitation de l'énergie solaire a connu un développement très remarquable dans le monde, avec une croissance de 02% et l'utilisation de plus de 220 gigawatts de puissance. L'énergie solaire est l'énergie la plus prometteuse, largement disponible en Algérie. L'éclairement solaire au niveau du sol est principalement composé d'éclairement direct et d'éclairement diffus. L'éclairement direct est l'éclairement atteignant directement la surface terrestre depuis le soleil. Alors que l'éclairement solaire diffusé résulte de la diffraction de la lumière par les nuages et les molécules diverses en suspension dans l'atmosphère, et de sa réfraction par le sol. En raison des effets atmosphériques, l'éclairement solaire au niveau du sol est aléatoire. Tous constituent l'éclairement global.

L'objectif de cette mémoire est de simuler et comparées les différents flux d'éclairement solaire dans le ciel clair au niveau du sol par plusieurs modèles d'estimation de l'éclairement solaire (modèle Capderou, modèle Kasten, modèle r.sun et modèle Perrin), utilisant le programme (Matlab) pour la programmation de ces modèles.

Ce qui, en appliquant ces quatre modèles, permet d'estimer les composantes directes et diffuse de l'éclairement solaire incident sur le plan horizontal ou incliné avec des directions différentes. Par-là, les résultats obtenus en comparant les valeurs calculées avec les valeurs radiométriques mesurées au niveau de la région de Ghardaïa montrent une bonne concordance entre les données estimées et les données expérimentales.

Mots clés : Energie solaire, Estimation d'éclairement solaire, Modèle Capderou, Modèle Kasten, modèle r.sun, modèle Perrin.

ABSTRACT

In recent years, many countries have made good use of renewable energy. The exploitation of solar energy has experienced a very remarkable development in the world, with a growth of 02% and the use of more than 220 gigawatts of power. Solar energy is the most promising energy, widely available in Algeria. Solar radiation at ground level consists mainly of direct and diffuse rays. Direct rays are the rays that directly reach the earth's surface from the sun. While the scattered solar rays result from the diffraction of light by clouds and various suspended particles in the atmosphere and their refraction by the earth. Due to atmospheric influences, the solar radiation at ground level is random. All of them make up the global rays.

The objective of this thesis is to simulate and compare the different solar irradiance fluxes in the clear sky at ground level by several solar irradiance estimation models (Capderou model, Kasten model, r.sun model and model Perrin), using the program (Matlab) for programming these models.

This, by applying these four models, makes it possible to estimate the direct and diffuse components of incident solar irradiance on the horizontal or inclined plane with different directions. Hence, the results obtained by comparing the calculated values with the radiometric values measured in the region of Ghardaïa show a good agreement between the estimated data and the experimental data.

Keywords: Solar energy, Estimation of solar irradiance, Capderou model, Kasten model, r.sun model, Perrin model.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, Je tiens à remercier le bon Dieu qui m'a doté de la volonté, du courage et surtout de la patience pour produire ce travail et qui m'a aidé à faire face à toutes les difficultés rencontrées.

Mes sincères remerciements vont en premier lieu, à mes encadreurs :

D^r. YETTOU Fatiha et **D^r. GAMA Amor**, pour leurs encadrements tout le long de ce projet et pour leurs aides, orientations et conseils très efficaces pour l'élaboration de ce travail de recherche.

Nous remercierons également le Directeur de l'Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables (URAER, Ghardaïa), **D^r DJAFER Djelloul** ; qui nous a permis de réaliser ce travail au sein de l'URAER ainsi que pour son bon accueil.

Mes gratitudee sont aussi destinées à tous ce qui ont contribués de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Enfin, je tiens de remercier le personnel pédagogique du département des Sciences et Technologie de Université de Ghardaïa, pour leur aide précieuse et leur large disponibilité.

À tout je suis très reconnaissant.

Dédicace

Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donnée le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

A mes parents Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études. Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma Je prie le bon Dieu considération et mes profonds sentiments envers eux. de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.

A vous mes frères et sœurs qui n'ont pas cessée de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que Dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.

A la famille RADJEM et KHENNANE.

A tous mes professeurs.

A tous mes amis et mes collègues :

A tous les étudiants de master 2 énergies renouvelables

Sans oublier mon binôme BOUHAMIDA OUSSAMA pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet

Merci !

Radjem Abelhaithem

Dédicace

Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donnée le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

A mes parents Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études. Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux. Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.

A vous mes frères et sœurs qui n'ont pas cessée de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que Dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.

A la famille BOUHAMIDA et NAILI.

A tous mes professeurs.

A tous mes amis et mes collègues :

A tous les étudiants de master 2 énergies renouvelables

Sans oublier mon binôme RADJEM ABELHAITHEM pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet

Merci !

BOUHAMIDA OUSSAMA

Chapitre I

Figure I. 1 : Les sources d'énergies fossiles.	5
Figure I. 2 : Les sources d'énergies renouvelables.	9
Figure I. 3 : Principe d'une cellule photovoltaïque.	11
Figure I. 4 : Principe général des technologies solaires thermodynamiques.	12
Figure I. 5 : Mouvement orbital de la terre autour du soleil.	15
Figure I. 6 : Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontal aux mois de Juillet et Décembre.	17
Figure I. 7 : Les trois composantes du rayonnement solaire incident sur un plan incliné.	17
Figure I. 8 : Héliographe pour la mesure de l'insolation.	18
Figure I. 9 : Pyranomètre pour la mesure du rayonnement global et diffus.	19
Figure I. 10 : Pyrhéliomètre pour la mesure de l'éclairement direct normal.	19

Chapitre II

Figure II. 1 : Les coordonnées terrestre.	23
Figure II. 2 : Les coordonnées horaire.	24
Figure II. 3 : La sphère céleste équatoriale.	25
Figure II. 4 : Variation de la déclinaison solaire en fonction du jour.	26
Figure II. 5 : Position du soleil par rapport à un point fixe de la terre (hauteur et azimut du soleil).	27
Figure II. 6 : Variation de la hauteur du soleil en fonction du jour.	28
Figure II. 7 : Variation de l'azimut solaire en fonction du temps.	29
Figure II. 8 : Variation de masse d'air en fonction de hauteur soleil.	30
Figure II. 9 : Variation de l'épaisseur optique de l'atmosphère en fonction de la masse d'air.	31
Figure II. 10 : Variation de l'angle d'incidence en fonction de l'angle horaire.	34
Figure II. 11 : Éclairement solaire hors atmosphère.	34
Figure II. 12 : Variation de l'éclairement solaire extraterrestre en fonction du jour.	35
Figure II. 13 : Position du soleil relative aux surfaces inclinées.	45
Figure II. 14 : Définition des angles pour un plan incliné.	45

Chapitre III

Figure III. 1 : Station radiométrique de l'URAER (Ghardaïa).	52
Figure III. 2 : Variations de l'éclairement direct et diffus horizontal (Modèle Capderou).	55
Figure III. 3 : Variations de l'éclairement direct et diffus incident sur un plan incliné de 32° (Modèle Capderou).	55
Figure III. 4 : Variations de l'éclairement direct et diffus horizontal (Modèle Kasten).	56
Figure III. 5 : Variations de l'éclairement direct et diffus incident sur un plan incliné de 32° (Modèle Kasten).	56
Figure III. 6 : Variations de l'éclairement direct et diffus horizontal (Modèle r.sun).	57
Figure III. 7 : Variations de l'éclairement direct et diffus incident sur un plan incliné de 30° (Modèle r.sun).	57

Figure III. 8 : Eclairement incident sur un plan horizontal et un plan incliné à la Latitude (32°) pour un jour type du mois de Décembre.....	58
Figure III. 9 : Eclairement incident sur un plan horizontal et un plan incliné à la Latitude (32°) pour un jour type du mois de Juin.....	59
Figure III. 10 : Eclairement incident sur un plan horizontal et un plan incliné à la Latitude (32°) pour un jour type du mois de Mars.....	59
Figure III. 11 : Eclairement incident sur un plan horizontal et un plan incliné à la Latitude (32°) pour un jour type du mois de Décembre.....	60
Figure III. 12 : Eclairement incident sur un plan horizontal et un plan incliné à la Latitude (32°) pour un jour type du mois de Juin.	60
Figure III. 13 : Eclairement incident sur un plan horizontal et un plan incliné à la Latitude (32°) pour un jour type du mois de Mars.....	61
Figure III. 14 : Eclairement incident sur un plan horizontal et un plan incliné à la Latitude (32°) pour un jour type du mois de Décembre.....	61
Figure III. 15 : Eclairement incident sur un plan horizontal et un plan incliné à la Latitude (32°) pour un jour type du mois de Juin.	62
Figure III. 16 : Eclairement incident sur un plan horizontal et un plan incliné à la Latitude (32°) pour un jour type du mois de Mars.....	62
Figure III. 17 : Eclairement incident sur un plan horizontal et un plan incliné à la Latitude (32°) pour un jour type du mois de Décembre.....	63
Figure III. 18 : Eclairement incident sur un plan horizontal et un plan incliné à la Latitude (32°) pour un jour type du mois de Juin.	64
Figure III. 19 : Eclairement incident sur un plan horizontal et un plan incliné à la Latitude (32°) pour un jour type du mois de Mars.....	64
Figure III. 20 : Comparaison des résultats obtenus par les trois modèles avec les données expérimentales pour l'éclairement global et direct horizontal pour un jour clair d'hiver.	66
Figure III. 21 : Comparaison des résultats obtenus par les trois modèles avec les données expérimentales pour l'éclairement direct normal et global incliné pour un jour clair d'hiver.	67
Figure III. 22 : Comparaison des résultats obtenus par les trois modèles avec les données expérimentales pour l'éclairement global et direct horizontal pour un jour clair d'été.....	68
Figure III. 23 : Comparaison des résultats obtenus par les trois modèles avec les données expérimentales pour l'éclairement direct normal et global incliné pour un jour clair d'été.....	69
Figure III. 24 : Comparaison des résultats obtenus par les trois modèles avec les données expérimentales pour l'éclairement global horizontal et global incliné pour un jour clair du printemps.	70
Figure III. 25 : Comparaison des résultats obtenus par les trois modèles avec les données expérimentales pour le rayonnement direct normal et direct horizontal pour un jour clair du printemps.	71

Chapitre I

Tableau I. 1 : Potentiel solaire	16
--	----

Chapitre II

Tableau II. 1 : Paramètres pour le calcul du facteur du trouble.....	43
Tableau II. 2 : valeurs des constantes A, B, C	47
Tableau II. 3 : valeurs des coefficients A, B, C, A", B"	48

Chapitre III

Tableau III. 1 : Jour type standard du mois.	52
---	----

NOMENCLATURE

Symbole	Description	Unité
λ	Longitude du lieu	Degrés
φ	Latitude du lieu	Degrés
TSV	Temps solaire vrai	Heure
TSM	Temps solaire moyen	Heure
t	Temps local	Heure
ET	Equation de temps	Heure
N'	Angle journalier	Degrés
N/Np	Numéro du jour	[-]
TU	Temps universel	Heure
DE	Décalage horaire	Heure
L	Point de latitude	Degrés
TL	Temps légal	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
(TSV) _l	L'heure solaire au lever du Soleil= h_l	Heure
(TSV) _c	l'heure solaire au coucher du Soleil= h_c	Heure
δ	Déclinaison solaire	Degrés
d_j	Durée du jour	Heure
ω	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 dû à l'absorption par la vapeur d'eau	[-]
T ₁	Trouble dû à la diffusion moléculaire	[-]
T ₂	Trouble relatif à la diffusion par les aérosols	[-]
A _{he}	Alternance hiver été	[-]
G ₀	Eclairement solaire extraterrestre	W/m ²

ε	Correction de distance terre soleil	[-]
I_0	Constante solaire	W/m ²
T'_L	Facteur de trouble diffusif	[-]
α_z	l'Azimut de la normal du plan	W/m ²
IG^h, IG_h	Eclairement global incident sur un plan horizontal	W/m ²
IN	Eclairement direct normal incident sur un plan horizontal	W/m ²
ρ	Albédo du sol	[-]
ID^h, ID_h	Eclairement diffus incident sur un plan horizontal	W/m ²
ID^i, ID_i	Eclairement diffus incident sur un plan quelconque	W/m ²
IB^h, IB_h	Eclairement direct incident sur un plan horizontal	W/m ²
IG^i, IG_i	Eclairement global incident sur un plan quelconque	W/m ²
IB^i, IB_i	Eclairement direct incident sur un plan quelconque	W/m ²
γ	Hauteur de la normal du plan	Degrés
β_A	Coefficient d'Angstrom	[-]
w_V	Hauteur d'eau condensable	cm

TABLE DES MATIERES

RESUME
NOMENCLATURE
LISTE DES FIGURES
LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERALE **1**

**CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ENERGIES
RENOUVELABLES**

I.1.	Introduction	4
I.2.	Généralité sur les Energies non renouvelables	5
I.2.1.	Sources des énergies non renouvelables	5
I.2.1.1.	Energies fossiles	5
I.2.1.1.1.	Pétrole	5
I.2.1.1.2.	Gaz naturel	6
I.2.1.1.3.	Charbon	6
I.2.1.2.	Les inconvénients des énergies fossiles	6
I.2.1.3.	L'énergie nucléaire	6
I.2.1.4.	Le côté négatif du nucléaire	7
I.2.1.5.	Réchauffement climatique et effet de serre	7
I.3.	Généralités sur les énergies renouvelables	8
I.3.1.	Sources des énergies renouvelables	8
I.3.1.1.	Energie Biomasse	9
I.3.1.2.	Energie géothermique	10
I.3.1.3.	Energie hydraulique	10
I.3.1.4.	Energie éolienne	10
I.3.1.5.	Energie solaire	10
I.3.1.5.1.	Energie solaire passive	10
I.3.1.5.2.	Energie solaire photovoltaïque	10
I.3.1.5.3.	Energie solaire thermique	11
I.3.1.5.4.	Energie solaire thermodynamique	12

I.3.1.6.	les Avantages et les inconvénients de l'énergie solaire	13
I.3.3.	Utilisation rationnelle de l'énergie	13
I.4.	Le Système Terre Soleil :	15
I.4.1	Rotation de la terre :	15
I.4.2	Mouvement orbital de la terre autour du soleil :	15
I.5.	Energie et le potentiel solaire	16
I.5.1.	Potentiel solaire dans le monde	16
I.5.2.	Potentiels solaires en Algérie	16
I.6.	Instruments de mesure du rayonnement solaire	17
I.6.1.	Rayonnement global, direct et diffus	17
I.6.2.	Héliographe	18
I.6.3.	Pyranomètre	18
I.6.4.	Pyrhéliomètre	19
I.7.	Conclusion	20

CHAPITRE II : MODELES SEMI-EMPIRIQUES POUR L'ESTIMATION DE L'ENSOLEILEMENT SOLAIRE

II.1.	Introduction :	22
II.2.	Aspect géométrique de l'éclairement solaire :	22
II.2.1.	Coordonnées géographiques terrestres :	22
II.2.1.1.	Latitude :	23
II.2.1.2.	Longitude :	23
II.2.1.3.	L'altitude :	23
II.2.2.	Coordonnées horaires :	24
II.2.2.1.	Angle horaire :	24
II.2.2.2.	Déclinaison solaire δ :	25
II.2.3.	Coordonnées de position :	26
II.2.3.1.	La Hauteur de soleil (γ_s):	27
II.2.3.2.	Azimut du soleil (χ, A) :	28
II.3.	Aspect énergétique de l'éclairement solaire :	29
II.3.1.	Masse atmosphérique :	29

II.3.2.	Epaisseur de Rayleigh :	30
II.3.3.	Facteur de trouble de Linke :	31
II.4.	Angles relatifs à un plan quelconque	32
II.4.1.	Orientation d'un plan	32
II.4.2.	L'inclinaison du plan β :	32
II.4.3.	L'azimut du plan (déviation azimutale) α :	33
II.4.4.	Angle d'incidence	33
II.5.	Modélisation de l'éclairement solaire par le modèle de Capderou	34
II.5.1.	Eclairement extra-terrestre	34
II.5.1.1.	Constante solaire	35
II.5.1.2.	Correction de la distance terre-soleil	35
II.5.2.	Eclairement incident sur un plan horizontal (modèle Capderou)	35
II.5.2.1.	Eclairement global incident sur un plan horizontal	35
II.5.2.2.	Eclairement direct incident sur un plan horizontal	36
II.5.2.3.	Eclairement diffuse incident sur un plan horizontal	36
II.5.3.	Eclairement incident sur un plan quelconque (modèle Capderou)	36
II.5.3.1.	Eclairement direct incident sur un plan quelconque	36
II.5.3.2.	Eclairement diffus incident sur un plan quelconque	37
II.6.	Modélisation de l'éclairement solaire par le modèle r.sun	37
II.6.1.	Paramètres géométriques et atmosphérique	37
❖	Angle horaire	37
❖	Déclinaison solaire	37
❖	Hauteur du soleil	38
❖	Azimut du soleil	38
❖	Masse atmosphère	38
❖	Epaisseur optique de l'atmosphère	38
❖	Facteur de trouble de linke	39
II.6.2.	Eclairement incident sur un plan horizontal (Modèle r.sun)	40
II.6.2.1.	Eclairement global incident sur un plan horizontal	40
II.6.2.2.	Eclairement direct incident sur un plan horizontal	40
II.6.2.3.	Eclairement diffus incident sur un plan horizontal	40
II.6.3.	Eclairement incident sur un plan quelconque (Modèle r.sun)	41
❖	Angle d'incidence	41
II.6.3.1.	Eclairement direct incident sur un plan quelconque	41

II.6.3.2.	Eclairage diffus incident sur un plan quelconque	41
II.7.	Modélisation de l'éclairage solaire par le modèle de Kasten	42
II.7.1.	Paramètres géométriques et atmosphérique	42
❖	La déclinaison solaire	42
❖	L'angle horaire	42
❖	La hauteur du soleil	42
❖	L'azimut du soleil	42
❖	Masse atmosphérique	42
❖	Le facteur du trouble de Linke	43
II.7.2.	Eclairage incident sur un plan horizontal (Modèle Kasten)	43
❖	L'éclairage global sur plan horizontal	43
❖	L'éclairage direct sur plan horizontal	43
❖	L'éclairage diffus sur plan horizontal	44
II.7.3.	Eclairage incident sur un plan quelconque (Modèle Kasten)	44
❖	L'angle d'incidence	45
❖	L'éclairage global sur plan incliné	46
❖	L'éclairage direct sur plan incliné	46
❖	L'éclairage diffus sur plan incliné	46
II.8.	Modélisation de l'éclairage solaire par le modèle de Perrin	46
II.8.1.	Paramètres géométriques et atmosphérique	46
II.8.2.	Eclairage incident sur un plan horizontal (Modèle Perrin)	46
II.8.3.	Eclairage incident sur un plan quelconque (Modèle Perrin)	47
II.9.	Conclusion :	48

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

III.1.	Introduction	51
III.2.	Lieu et données utilisées	51
III.2.1.	Lieu	51
III.2.2.	Données utilisées	51
III.2.3.	Jours types	52
III.3.	La programmation des modèles sur l'environnement Matlab	52
III.3.1.	Paramètres d'entrées utilisées	53

III.3.2.	Facteur de trouble atmosphérique de Linke	53
III.4.	Résultat de programmation	54
III.4.1.	Estimation de l'éclairement solaire par modelé Capderou	55
III.4.1.1.	L'effet de Facteur de Linke	55
➤	Plan horizontale	55
➤	Plan Incline	55
III.4.2.	Estimation de l'éclairement solaire par modelé Kasten	56
III.4.2.1.	L'effet de Facteur de Linke	56
➤	Plan horizontale	56
➤	Plan Incline	56
III.4.3.	Estimation de l'éclairement solaire par modelé r.sun	57
III.4.3.1.	L'effet de Facteur de Linke	57
➤	Plan horizontale	57
➤	Incline	57
III.5.	Application des modelés au site de Ghardaïa	58
III.5.1.	Incidence sur un plan horizontal et incliné à la latitude	58
III.5.1.1.	Modèle Capderou	58
III.5.1.2.	Modèle Kasten	60
III.5.1.2.	Modèle r.sun	61
III.6.	Valeurs mesurées dans URAER	63
III.7.	Comparaison des valeurs estimées aux valeurs mesurées	65
III.8.	Discussion des résultats	72
III.9.	Conclusion	73

CONCLUSION GENERALE

75

BIBLIOGRAPHIE

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie est aujourd'hui un concept important, mais souvent trop simplifié. Tout le monde en parle, mais l'approche reste souvent liée à l'actualité. Pourtant, l'énergie est le moteur de la vie et du développement technologique. Le niveau de consommation de l'énergie, les ressources valorisées et les technologies utilisées sont liés étroitement à l'histoire de l'humanité et détermine son avenir. L'énergie concerne chacun de nous, vu que chacun est au minimum un consommateur, et il est de notre devoir de mieux la connaître pour mieux la valoriser.

Le monde connaît depuis plus d'un siècle un important développement économique résultant d'une croissance exceptionnelle des besoins énergétiques de l'humanité. Le développement industriel, l'augmentation du parc automobile et la multiplication des équipements domestiques ont provoqué une augmentation importante de la demande énergétique. Malheureusement, cette croissance de la demande a été majoritairement couverte par l'utilisation de sources d'énergies fossiles. D'autres facteurs comme les émissions de CO₂ et le caractère limité de nos réserves fossiles n'ont pas été pris en compte, il s'avère nécessaire de trouver une autre solution pour prendre le relais, la contrainte imposée est d'utiliser d'autres sources d'énergies, tout en tenant compte des notions économiques et environnementales [1].

Depuis 1970, le monde a connu des échecs pétroliers (le choc pétrolier 1973), la croissance rapide de la demande mondiale en énergie a conduit nombreux pays à lancer plusieurs programmes de développement des énergies renouvelables.

L'énergie solaire est en tête de la liste des sources en raison de son abondance, mais aussi en raison de sa distribution dans la nature, plus que tout autre type d'énergie renouvelable. La terre reçoit de l'énergie du soleil équivalente à 5000 fois les besoins mondiaux, c'est donc un fort potentiel et une solution pratique aux défis toujours croissants dans le domaine énergétique et environnemental. Il s'agit là d'un objectif principal, urgent et commun à toute l'humanité afin de préserver un environnement sacré pour les générations futures [2].

Notre région, en particulier le Sud Algérien est caractérisé par un potentiel énergétique important, qui favorise le développement et l'utilisation de l'énergie solaire. Les besoins et la possibilité d'exploitation de cette source d'énergie sont directement liés aux conditions climatiques. L'aspect aléatoire et discontinu de l'énergie solaire ainsi que le déphasage de sa

disponibilité, dans le temps, par rapport aux besoins d'une exploitation énergétique, montre l'importance et la nécessité de connaître le gisement solaire avant de procéder au dimensionnement et à l'installation d'un quelconque système de captation solaire. La meilleure approche pour connaître le gisement solaire sur un site donné est de disposer d'une bonne série de mesures du rayonnement au sol. Donc il est nécessaire de connaître les méthodes de collecte, de traitement et d'analyser des données de ce rayonnement, afin d'évaluer correctement le potentiel d'énergie solaire de la région [3,4,5].

Ces dernières années l'Algérie ont donné une grande importance aux énergies renouvelables, avec un programme prometteur à l'horizon 2023, avec l'installation de 22GWatt, dont 2.6GWatt présente la solaire thermodynamique

L'Algérie est caractérisée par un gisement solaire très important le cinquième dans le monde. D'après des études récentes, le sud de l'Algérie est très favorable pour l'installation des systèmes à concentration solaire, Au point que l'agence spatiale Allemande a confirmé que 1% de désert Algérien peut couvrir le besoin annuel mondial en électricité [6].

Le but de ce travail est de faire une étude comparative entre Quatre modèles semi empiriques d'estimation des composantes du rayonnement solaire au sol pour en tirer à la fin le meilleur model d'estimation.

Ce document qui décrit notre travail est réparti en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à des notions générales sur l'énergie et ces utilisations, applications, les sources de l'énergie renouvelables et leurs différents types et plus particulièrement l'énergie solaire. Est on a consacré le gisement solaire Avec mentionné Le système terre-soleil et l'Energie et le potentiel solaire et mentionné Instruments de mesure de l'éclairement solaire. Pour le deuxième chapitre une modélisation de l'éclairement solaire par le modèle de Capderou et Kasten et r.sun et Perrin est présentée, les transmittances nécessaires pour le calcul des composantes de l'éclairement solaire par ciel clair, incident sur un plan horizontal et incliné sont programmées avec Matlab 2018a [5] et leurs variations sont illustrées sous formes graphiques. Les formules des paramètres géométriques et atmosphériques nécessaires ont été également programmées et représentées. Le dernier chapitre est dédié à la validation des résultats obtenus à partir des données de mesure du rayonnement solaire au sol. Une confrontation des valeurs estimées par quatre modèles à celle mesurées au niveau du site de Ghardaïa par la baie d'une étude statistique de calcul d'erreur est élaborée. Finalement une conclusion générale contenant les interprétations et les perspectives envisagées terminera ce mémoire.

CHAPITRE I

Généralités sur les énergies renouvelables

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 [7] 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. Le solaire, l'hydraulique, l'éolien, la biomasse, la géothermie sont les différentes formes des énergies [10]

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. Le soleil est la source essentielle de tout rayonnement reçu par la terre, ce dernier lui procure l'énergie, la chaleur et la lumière qui sont nécessaires à toute forme de vie. La connaissance de la trajectoire du soleil et sa position en chaque point du ciel et la distance terre –soleil sont nécessaires quant à la détermination de la quantité du rayonnement extraterrestre et la durée du jour [15].

Dans ce premier chapitre, nous consacrons notre étude à généralité sur les énergies renouvelables et le gisement solaire, elle sera divisée en deux parties : la première partie on a présenté les différentes sources de l'énergie et en mettant l'accent sur l'énergie solaire En mentionnant ses avantages et ses inconvénients, et sera consacré Utilisation rationnelle de l'énergie. Est la deuxième partie En général, nous avons d'abord discuté d'une étude Le système terre-soleil Avec mentionné l'énergie et le potentiel solaire .et en fin, Nous vous avons offert Instruments de mesure du rayonnement solaire.

I.2. Généralité sur les Energies non renouvelables

I.2.1. Sources des énergies non renouvelables

Une énergie non renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle moins vite qu'on ne la consomme et de manière négligeable à l'échelle humaine

I.2.1.1. Energies fossiles

Les énergies fossiles sont des énergies qui s'épuisent avec le temps et qui nécessitent une longue période de temps pour se former.

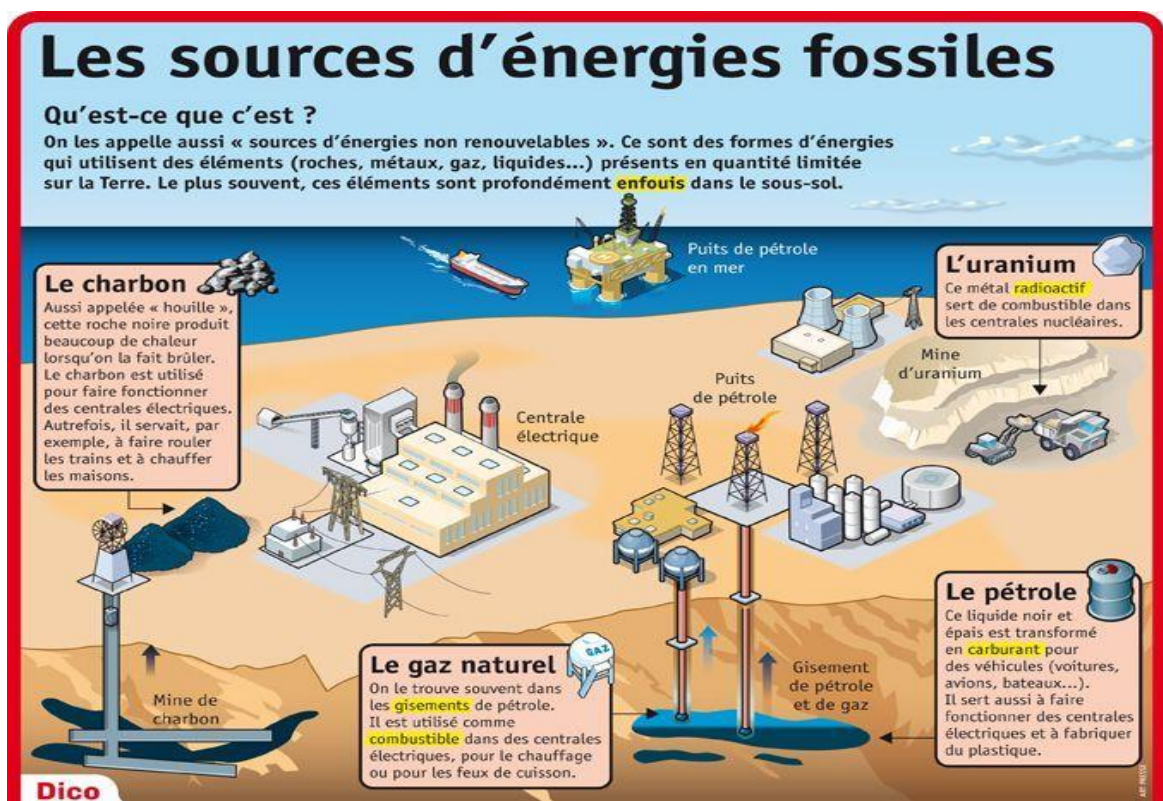


Figure I. 1 : Les sources d'énergies fossiles.[8]

I.2.1.1.1. Pétrole

Le pétrole est la première source d'énergie mondiale [7]. C'est une huile minérale de couleur noire ou très foncée, onctueuse au toucher, douée d'une odeur âcre caractéristique. Il est, essentiellement, composé d'hydrocarbures. Le pétrole est aussi appelé à l'état brut.

Le pétrole brut se trouve à l'état naturel, dans des gisements souterrains, lesquels sont décelés par des techniques de prospection et d'où on l'extrait, par forage de puits, pour servir de matière première aux industries de raffinage et de pétrochimie, parmi les produits et dérivés

ainsi obtenus, à part le pétrole de commerce (pétrole lampant ou kérosène), qui fut jadis le plus recherché, figurent les gaz liquéfiés, les essences, les solvants le gasoil, fuels combustibles, les bitumes, les lubrifiants et les paraffines [9].

I.2.1.1.2 Gaz naturel

Le gaz naturel est un combustible fossile présent naturellement sous forme gazeuse dans les roches poreuses du sous-sol. Utilisé comme source d'énergie, le gaz est composé d'hydrocarbures : principalement du méthane (CH_4) mais aussi du propane (C_3H_8), du butane (C_4H_{10}), de l'éthane (C_2H_6) et du pentane (C_5H_{12}).

I.2.1.1.3 Charbon

Le charbon est la source d'énergie fossile la plus abondante et la mieux répartie dans le monde. Le charbon est une roche stratifiée à partir de restes de végétation c'est une roche organique noire ou brune très foncée, déposée principalement à la période carbonifère les divers charbons ont des teneurs en carbone, de l'hydrogène et de l'oxygène, combinée chimiquement comme dans les produits de la photosynthèse, on y trouve aussi une faible proportion d'azote, de chlore et de soufre, et des traces de plusieurs métaux. Les proportions de carbone, d'hydrogène et d'oxygène varient en fonction du degré d'houillification. Pendant cette houillification, l'eau et le dioxyde de carbone ont été éliminés et il s'y est formé du méthane [9].

I.2.1.2. Les inconvénients des énergies fossiles

Parmi les problèmes majeurs 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 [10].

I.2.1.3. L'énergie nucléaire

Les combustibles fossiles se consomment plus vite que la nature ne les produit. Les gisements connus de ces formes d'énergie sont voués à disparaître plus ou moins rapidement. L'énergie de fission nucléaire est un cas particulier : les gisements exploitables connus seront épuisés dans, suivant les estimations et le développement de la consommation des pays orientaux (notamment en tenant compte des futures centrales qui seront construites en Chine et en Inde), 50 ans à un siècle, ce qui classe cette énergie dans la catégorie 'non renouvelable'.

Les réacteurs actuellement en fonctionnement sont à 81% des réacteurs à eau légère de 2^{ème} génération, Leur approvisionnement en combustible ne pose aucune difficulté, de même que celui des réacteurs de génération III. Les réserves classiques connues d'uranium représentent en effet 70 années de consommation actuelle et les, réserves probables supplémentaires, 100 années de plus, ce qui permettrait d'engager la croissance du parc électronucléaire mondial avec le même type de réacteurs. Le niveau des réserves d'uranium sera en effet porté à plusieurs millénaires avec les réacteurs de 4^{ème} Génération, appelés à prendre, vers 2040 [7].

I.2.1.4. Le côté négatif du nucléaire

- Les déchets radioactifs provenant de centrales nucléaires sont très néfastes pour la santé des hommes, des animaux, des plantes, des eaux et de l'air.
- Des risques d'accidents à conséquences graves sur l'humanité et la planète, comme celui de la centrale nucléaire Tchernobyl (URSS, 1986), les conséquences de cet accident continuent, après vingt ans, de faire des malheureux et des victimes.
- Les rayonnements nucléaires, produit lors de l'explosion de la bombe atomique Hiroshima ; continuent à faire, également, des victimes après plus de soixante années du déroulement de l'incident (1945).
- L'armement nucléaire présente une menace sérieuse sur l'avenir de cette forme d'énergie en raison de l'absence d'une démocratie et d'une sécurité à l'échelle mondiale et des relations internationales de justice et de confiance [10].

I.2.1.5 Réchauffement climatique et effet de serre

*** Le réchauffement climatique**

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 [11]. Au cours de ces dernières décennies, différents symptômes du changement climatique ont déjà été observés [12].

- 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.

* L'effet de serre

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 [7].

I.3. Généralités sur les énergies renouvelables

I.3.1. Sources des énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont des énergies dont la source est illimitée et constamment renouvelée.

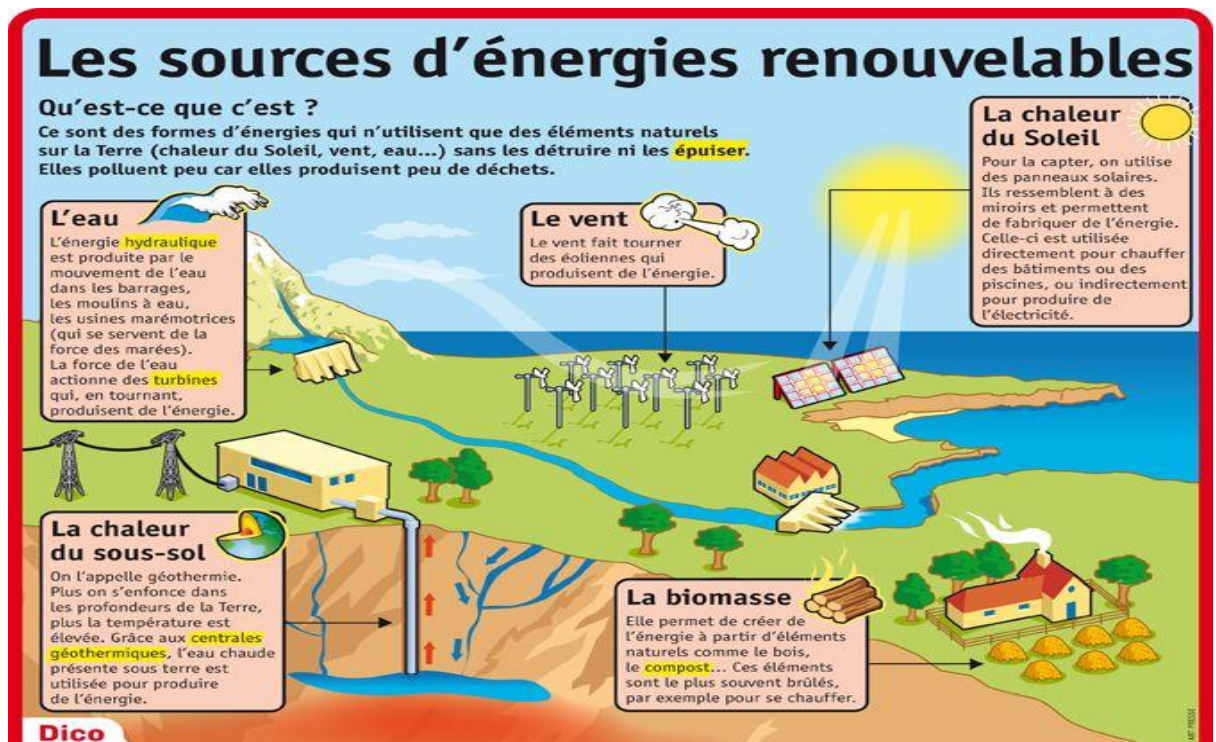


Figure I. 2 : Les sources d'énergies renouvelables.

I.3.1.1 Energie Biomasse

La biomasse est constituée de tous les végétaux qui se développent à la surface de la Terre. Elle représente un potentiel énergétique mondial de 70 milliards de TEP par an (dont 6 % sont utilisés pour la nourriture et pour produire de l'énergie). Elle effectue la capture et le stockage de l'énergie solaire, qu'il est ensuite possible de restituer sous forme de combustibles ou de carburants.

Cette restitution peut se faire par quatre voies :

- La combustion (ou incinération) qui produit essentiellement de la chaleur à un niveau de température limité, autour de 650°C.
- La bio méthanisation : réalisée par la fermentation anaérobie de substances très humides, telles les algues, les déjections animales ou déchets ménagers. On obtient alors un mélange gazeux de méthane (50 à 60 %) et de gaz carbonique (35 à 40 %).
- La fermentation alcoolique : adaptée aux produits saccharifères ou amylacés contenant du sucre ou de l'amidon, telles que les betteraves et les céréales. On obtient alors de l'éthanol.
- La transformation thermo-chimique qui conduit à la gazéification des substances organiques et végétales, cette méthode convient particulièrement bien aux produits lignocellulosiques, comme le bois et la paille [9].

I.3.1.2 Energie géothermique

Est l'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol, soit pour la production d'électricité ou bien pour la production de chaleur.

Les centrales géothermiques utilisent la chaleur de nappes d'eau souterraines qui peuvent atteindre 350 C° dans les zones les plus favorables, cette eau chaude est pompée vers la surface pour passer dans des échangeurs, la vapeur produite est turbinée dans une installation thermique classique [10].

I.3.1.3. Energie hydraulique

L'énergie hydraulique est l'énergie fournie par le mouvement de l'eau, sous toutes ses formes : chutes d'eau, cours d'eau, courants marin, marée, vagues¹. Ce mouvement peut être utilisé directement, par exemple avec un moulin à eau, ou plus couramment être converti, par exemple en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique.

I.3.1.4. Energie éolienne

L'énergie provenant du mouvement et de la vitesse de déplacement du vent permet de faire tourner les pales d'une éolienne. Ce mouvement, grâce à un alternateur, génère de l'énergie électrique. La forte croissance mondiale du marché des grandes installations terrestres s'accompagne chaque année d'une augmentation de la puissance moyenne des éoliennes et en même temps, d'une baisse des coûts de production. En Allemagne, la puissance moyenne des nouvelles machines s'est accrue de 780 KW en 1998 à 935 KW en 1999 [9].

I.3.1.5. Energie solaire

I.3.1.5.1 Energie solaire passive

L'énergie solaire passive, capable de fonctionner seule sans apport d'énergie extérieure, elle utilise l'architecture des bâtiments, l'orientation des murs, toits et fenêtres pour capter les rayons du soleil.

I.3.1.5.2 Energie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque fait l'objet d'un grand intérêt ces dernières années. Elle est basée sur l'effet photoélectrique. Celui-ci permet de créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. Cette ressource a donc l'avantage d'être inépuisable et utilisable en tout point d'un territoire.

Les modules photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable.

Dans un isolant électrique : les électrons de la matière sont liés aux atomes et ne peuvent pas se déplacer. Dans un conducteur électrique (un fil de cuivre par exemple) les électrons sont totalement libres de circuler et permettent le passage d'un courant. Dans un semi-conducteur : la situation est intermédiaire, les électrons contenus dans la matière ne peuvent circuler que si on leur apporte une énergie pour les libérer de leurs atomes. Quand la lumière pénètre dans un semi-conducteur, ces photons apportent une énergie permettant aux électrons de se déplacer, il y a donc courant électrique sous l'exposition à la lumière [13].

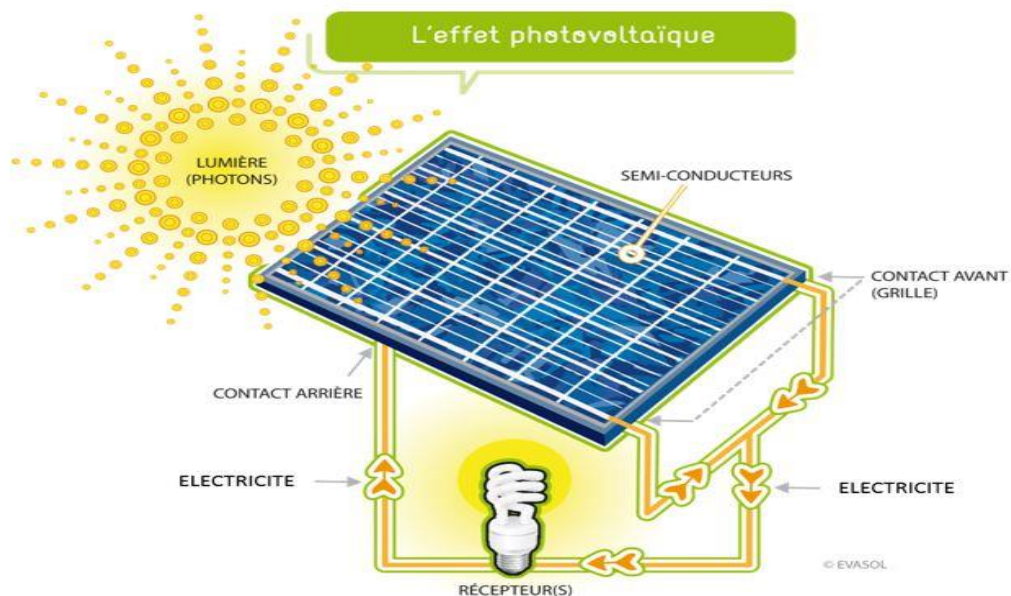


Figure I. 3 : Principe d'une cellule photovoltaïque.

I.3.1.5.3 Energie solaire thermique

Les photons excitent des atomes en leur transmettant une part de leur énergie. Face à ce gain d'énergie, les atomes s'agitent et s'échauffent. Cette chaleur va servir à augmenter la température d'un fluide caloporteur qui pourra être utilisé pour :

- Le chauffage d'un bâtiment,
- La production d'eau chaude.

Pour favoriser le recours au solaire thermique, les chercheurs développent les technologies selon 3 axes.

- Augmentation des performances en développant des traitements de surface pour les capteurs.
- Réduction des coûts à travers le développement des installations urbaines plutôt que seulement domestiques (mutualisation d'équipements)
- Intégration de nouvelles fonctions.

I.3.1.5.4 Energie solaire thermodynamique

La chaleur produite va être convertie en énergie mécanique pour produire de l'électricité, la température beaucoup plus élevée que dans les systèmes thermiques - entre 100 et 1500 °C, contre 20 à 100°C pour la thermique.

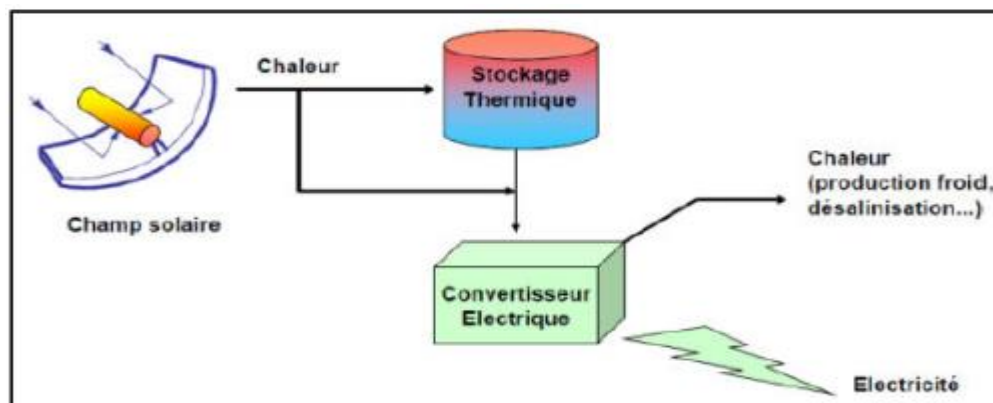


Figure I. 4 : Principe général des technologies solaires thermodynamiques.

Selon la FigureI.4, la production d'électricité via la technologie solaire thermodynamique peut se découper en trois étapes :

- 1 - Concentration du rayonnement sur l'entrée du récepteur et absorption sur les parois du récepteur : transformation de l'énergie en chaleur.
- 2 - Transport et éventuellement stockage de cette chaleur.
- 3 - Transfert à un cycle thermodynamique associé à un alternateur : production d'électricité.

I.3.1.6 Les Avantages et les inconvénients de l'énergie solaire

- Les avantages

- L'énergie solaire a diminué ses coûts, grâce à son soutien public élevé et ses faibles émissions de carbone.
- Combinée au stockage d'énergie et aux solutions logicielles intelligentes, l'énergie solaire devient une source d'énergie fiable et moins coûteuse.
- Une ressource illimitée, contrairement aux combustibles fossiles.
- Les systèmes solaires sont faciles à installer et nécessitent très peu de maintenance.
- Les systèmes de cellules solaires ont une longue durée de vie – environ 25 ans.

- Les inconvénients

- L'énergie solaire est une bataille d'énergie intermittente – la production d'électricité dépend du soleil brillant.
- Elle est encore coûteuse, malgré la diminution de son coût ces dernières années.
- La lumière du soleil varie selon l'endroit et la saison. Les prévisions sont plus incertaines que les combustibles fossiles (mais meilleures que celles du vent).

Combinaison non réglable et faible entre la production et la demande – le soleil produit plus en été, alors que l'électricité est plus nécessaire en hiver [14].

I.3.3. Utilisation rationnelle de l'énergie

Utilisation rationnelle de l'énergie est l'utilisation de l'énergie par les consommateurs de la manière la mieux adaptée à la réalisation des objectifs économiques, compte tenu des contraintes techniques, sociales, politiques, financières et environnementales.

Comportement judicieux

- Faire la chasse au gaspillage
Exemples : extinction des lumières inutiles, suppression d'achats superflus, dimension des équipements selon les besoins
- Adapter le mode de vie et les activités
Exemples : sobriété, consommation au meilleur moment de la journée ou de l'année, transports en commun
- Accroître la durée de vie des biens
Exemples : entretien du matériel, choix d'équipements à longue durée de vie

Equipment efficient

- Technologies qui réduisent les pertes de conversion
Exemples : chaudières à haut rendement, ampoules économiques, électroménagers A++
- Objets et infrastructures qui réduisent les consommations d'énergie associées à leur usage
Exemples : véhicules légers, isolation d'un bâtiment, noyaux d'habitat
- Matériaux et services à moindre énergie incorporée (énergie grise)
Exemples : circuits courts, isolants naturels, produits de saison

Efficacité énergétique

D'une part, l'URE vise à garantir les services énergétiques en consommant moins d'énergie : c'est l'efficacité énergétique, qui produit des « mégawatts » et qui agit essentiellement sur les équipements, comme par exemple, les chaudières à haut rendement, les véhicules plus légers ou les bâtiments bien isolés.

Adaptation de l'étendue des services

D'autre part, la démarche analyse également l'étendue des services par exemple par la sobriété. Nous entrons ici dans une dimension de type comportemental. Elle permet évidemment d'aller bien plus loin en termes de réduction des consommations d'énergie, en diminuant le rythme des services, en les rendant plus flexibles ou en les supprimant purement et simplement avec par exemple, la suppression d'achats superflus, le déplacement des activités selon la disponibilité de l'énergie ou un changement de mode de vie.

Organisation selon disponibilité de l'énergie

En fonction de la disponibilité de l'énergie et la période, une hiérarchisation des services énergétiques peut être organisée en tenant compte d'un degré d'utilité des services demandés. Pensons à l'expérience pilote de la station polaire Princesse Elisabeth qui donne selon l'heure de la journée la priorité aux activités de recherche ou à celles récréatives. Ainsi, dans un système à ressources limitées, le cadre qui régit ces priorités joue un rôle essentiel dans une organisation équitable. Les règles de droit, la fiscalité, la politique de prix et les sciences humaines ont ici un rôle clé à jouer pour nous amener à consommer au meilleur moment

I.4. Le Système Terre Soleil :

I.4.1. Rotation de la terre :

La rotation de la Terre est le mouvement de la Terre sur elle-même autour de l'axe des pôles géographiques qui relie le pôle Nord au pôle Sud. Ce mouvement ne doit pas être confondu avec la révolution de la Terre, mouvement de translation elliptique de la Terre autour du Soleil. La rotation de la Terre autour de son axe est un mouvement complexe dont la composante principale est une rotation effectuée en moyenne en 23 h 56 min 4,1 s. L'axe de rotation est incliné sur l'écliptique en moyenne de $23^{\circ} 26'$; cette inclinaison est la cause des saisons. Si, par la pensée, on regarde la Terre d'un point très éloigné dans la direction du nord, la rotation de la Terre se fait vers l'Est, dans le sens direct, c'est-à-dire dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Du même point de vue, son mouvement de révolution autour du Soleil s'effectue également dans le sens inverse des aiguilles d'une montre [15].

I.4.2 Mouvement orbital de la terre autour du soleil :

La Terre tourne autour d'un axe définissant les pôles nord et sud du globe en 24 heures. Ce phénomène génère ainsi une alternance de jours (l'hémisphère du site considéré est alors éclairé) et de nuit (l'hémisphère est à l'ombre). La trajectoire de la terre autour du soleil constitue une ellipse de très faible excentricité (c'est-à-dire proche d'un cercle), réalisée en environ 365 jours. L'inclinaison de l'axe des pôles terrestres par rapport au plan de l'écliptique est constante et égale à $23^{\circ} 27'$; elle est à l'origine du phénomène de saison que nous connaissons. La distance terre soleil varie entre 153.106 km (le 3 juillet) et 147.106 km (le 3 janvier) ; sa valeur moyenne vaut 150.106 km, ce qui donne un rayon apparent du soleil depuis la Terre égal à $0,27^{\circ}$. Les distances minimale et maximale entre les deux astres valent donc respectivement 0,983 et 1,017 UA (voir Fig. I.2) [16].

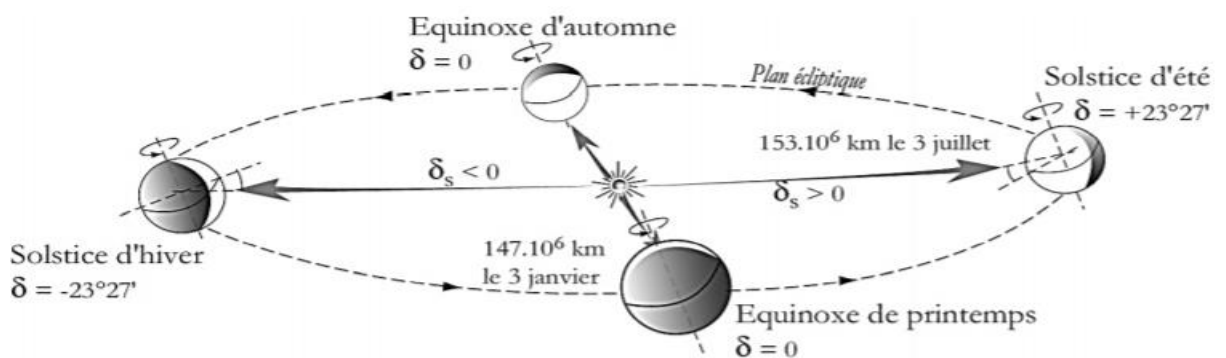


Figure I. 5 : Mouvement orbital de la terre autour du soleil.

I.5. Energie et le potentiel solaire

I.5.1. Potentiel solaire dans le monde

En 2017, au niveau mondial, la production d'électricité solaire photovoltaïque atteignait 443,6 TWh, soit 1,7 % de la production mondiale d'électricité ; en 2018, elle est estimée à 585 TWh ; l'Agence internationale de l'énergie estime qu'avec les installations existantes fin 2018, cette part est passée à 2,6 %, et prévoit qu'elle pourrait atteindre 16 % en 2050. En 2018, quatre pays concentrent plus des deux tiers de la puissance installée photovoltaïque : la Chine (35 %), les États-Unis (12 %), le Japon (11 %) et l'Allemagne (9 %). Il faudrait l'équivalent de la production d'une surface photovoltaïque de 100 000 km² (soit la superficie de l'Islande) pour couvrir la totalité des besoins mondiaux en électricité [17].

I.5.2. Potentiels solaires en Algérie

L'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² 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 tableau I.2 résume le potentiel solaire en Algérie [18].

Tableau I. 1 : Potentiel solaire

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	Superficie (%) 4	Superficie (%) 10	Superficie (%) 86
Durée moyenne d'insolation (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (Kwh/m ² /an)	1700	1900	2650

Une évaluation par satellite, effectuée par l'agence spatiale allemande, a montré que l'Algérie possède le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen.

Il est de 169,440 Tera-Watts.heure/an (TWh/an) pour le solaire thermique et de 713,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque

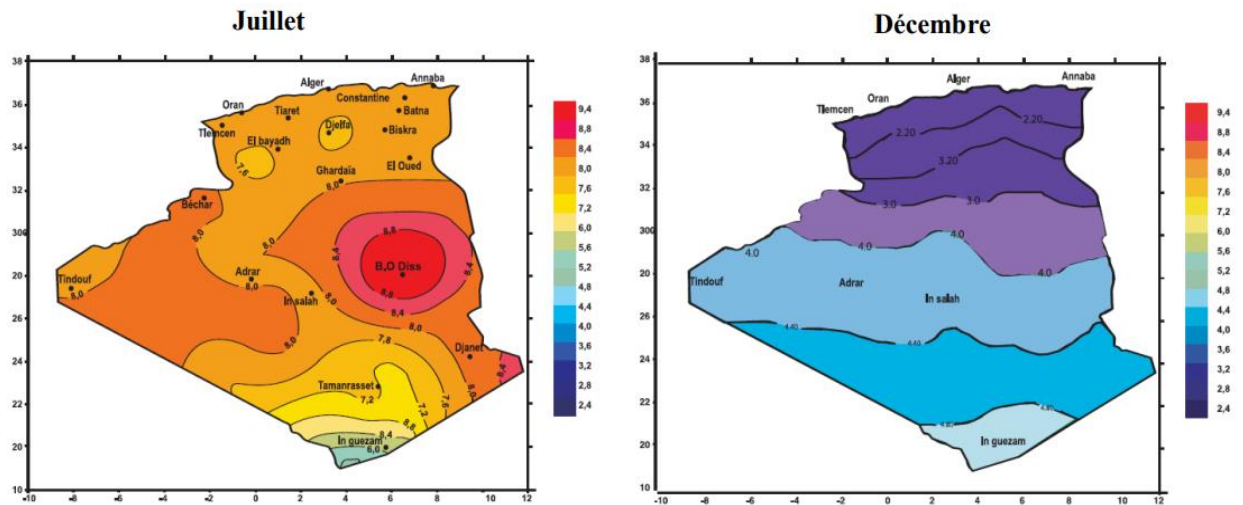


Figure I. 6 : Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontal aux mois de Juillet et Décembre

I.6. Instruments de mesure du rayonnement solaire

Ce sont des appareils de mesure du rayonnement solaire, Les appareils diffèrent selon qu'ils mesurent le rayonnement :

- Le rayonnement direct (Pyrhéliomètre),
- Le rayonnement global (Pyranomètre)
- Le rayonnement réfléchi (Pyranomètre réfléchi)
- Un héliographe

I.6.1. Rayonnement global, direct et diffus

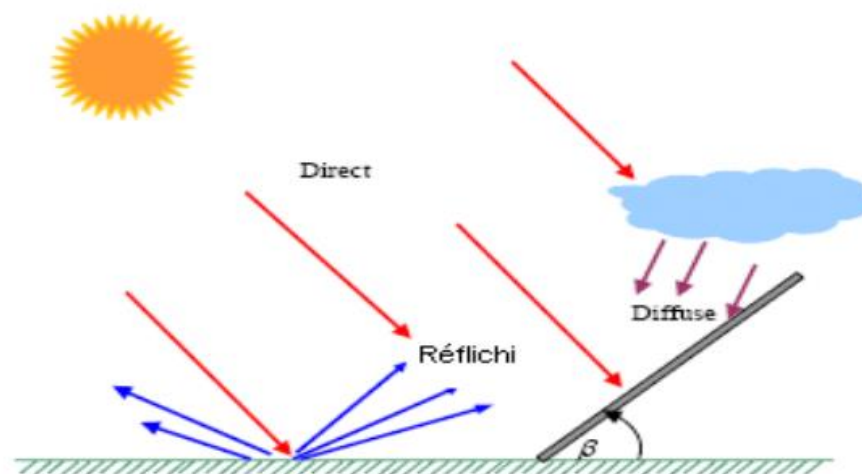


Figure I. 7 : Les trois composantes du rayonnement solaire incident sur un plan incliné.

- **Rayonnement global :** Le rayonnement global est l'énergie rayonnante totale du soleil, qui atteint une surface horizontale à la surface de la Terre au cours d'une unité de temps précise. Il est d'environ 1.000 W/m^2 pour un rayonnement solaire vertical.
- **Rayonnement direct :** Le rayonnement direct est le rayonnement solaire atteignant directement la surface terrestre depuis le soleil. Il dépend de l'épaisseur de l'atmosphère que la radiation solaire doit traverser et de l'inclinaison des rayons par rapport au sol soleil.
- **Rayonnement diffus :** Le rayonnement diffus se manifeste lorsque le rayonnement solaire direct se disperse dans les nuages et les particules atmosphériques. Le rayonnement diffus résulte de la diffraction de la lumière par les nuages et les molécules diverses en suspension dans l'atmosphère, et de sa réfraction par le sol. Il s'agit donc d'un rayonnement qui ne suit pas une direction définie par le soleil en direction du point d'observation à la surface de la Terre.

I.6.2. Héliographe

L'héliographe est un instrument qui permet de mesurer la durée de l'ensoleillement sur un point de la surface de la planète. Plus précisément, il enregistre la durée pendant laquelle le rayonnement solaire est d'une intensité suffisante pour produire des ombres distinctes.



Figure I. 8 : Héliographe pour la mesure de l'insolation.

I.6.3. Pyranomètre

Un pyranomètre est un capteur de flux thermique utilisé pour la mesure de la quantité d'énergie solaire en lumière naturelle et est notamment utilisé en météorologie. Il permet la

mesure de la puissance du rayonnement solaire total en watts par mètre carré. Il est sensible dans un domaine spectral de 300 à 2500 nanomètres.



Figure I. 9 : pyranomètre pour la mesure du rayonnement global et diffuse.

I.6.4. Pyrhéliomètre

Un pyrhéliomètre est un instrument destiné à mesurer l'irradiance solaire directe. Il est généralement constitué par une thermopile peinte en noir, donc très absorbante, montée sur un système de suivi pointé vers le Soleil. Ainsi cet instrument ne mesure que le rayonnement directement issu du soleil, à l'exclusion de celui issu du ciel ou de la Terre.

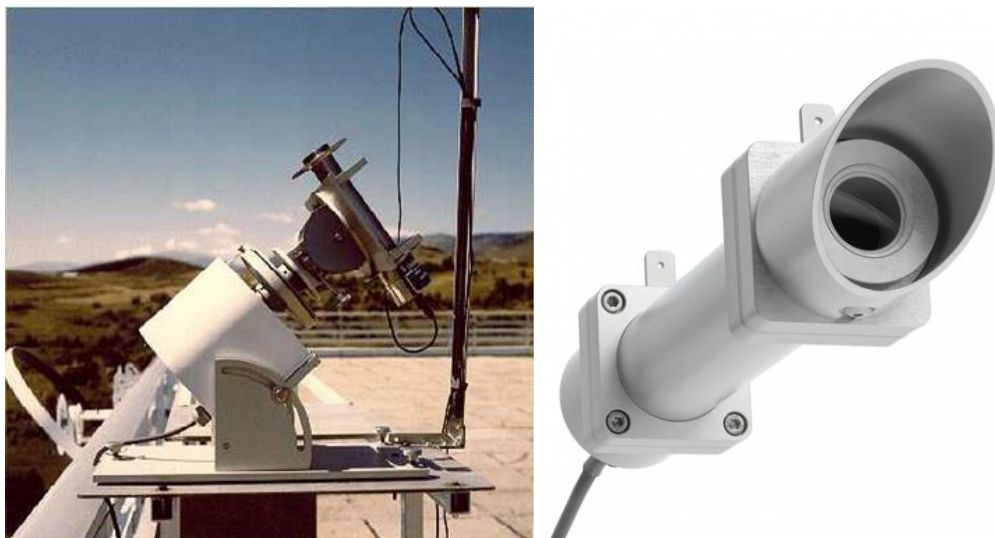


Figure I. 10 : Pyrhéliomètre pour la mesure de l'éclairement direct normal.

I.7. Conclusion

Nous avons vu à travers ce chapitre les différentes sources des énergies renouvelables, comme nous l'avons mentionné tous les types d'énergie. Nous avons concentré notre étude en particulier sur l'énergie solaire avec mentionné l'utilisation rationnelle de l'énergie. Ensuite, nous avons défini quelques données pour le système terre-soleil. Et à partir de là, nous avons mentionné le potentiel solaire dans le monde et de l'Algérie. Et à la fin nous avons vu les instruments de mesure du rayonnement solaire.

Le développement des énergies renouvelables ne répond pas seulement à un enjeu environnemental, mais correspond à un besoin de diversification de nos sources d'énergies. Cependant, si leurs atouts économiques et écologiques sont indéniables, leur puissance énergétique ne permettra pas de les substituer complètement aux énergies fossiles, compte-tenu de nos modes de consommations actuels. Même en exploitant toutes les sources d'énergie possibles, le passage aux énergies renouvelables implique des transformations majeures dans les modes de production, de transports ...etc. Nous pensons que seul un mode d'organisation nouveau, fondé sur l'efficacité énergétique semble réaliste dès lors que les énergies fossiles s'épuiseront ou que les changements climatiques l'imposeront.

Le rayonnement solaire est l'élément de base dans la conversion d'énergie rayonnée en énergie thermique, 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 présentés dans ce chapitre.

Nous allons présenter dans le prochain chapitre, une étude détaillée sur la modélisation du Rayonnement solaire

CHAPITRE II

Modèles Semi-empiriques pour l'Estimation de l'Eclairement 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 (par exemple, pour la production d'eau chaude sanitaire) ; 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 géométrique de l'éclairement solaire ainsi que les aspects énergétiques de ce dernier.

Dans une partie spécifique de ce chapitre, nous couvrirons les différents éléments qui affectent l'absorption d'éclairement solaire (Orientation d'un plan (α, γ) , L'inclinaison du plan β , L'azimut du plan α , Angle d'incidence).

Enfin, nous verrons différents modèles d'estimation d'éclairement solaire (Capderou, r.sun, Kasten, Perrin) pour différentes positions du plan (plan horizontal, plan quelconque) avec la Programmation de ces derniers sous environnement Matlab, le modèle Capderou [33], qui sert de référence aux concepteurs de systèmes énergétiques solaires, reste le plus utilisé en Algérie et les modèles : r.sun, Kasten, Perrin ont été choisis parmi d'autres.

II.2. Aspect géométrique de l'éclairement solaire :

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 figII.1).

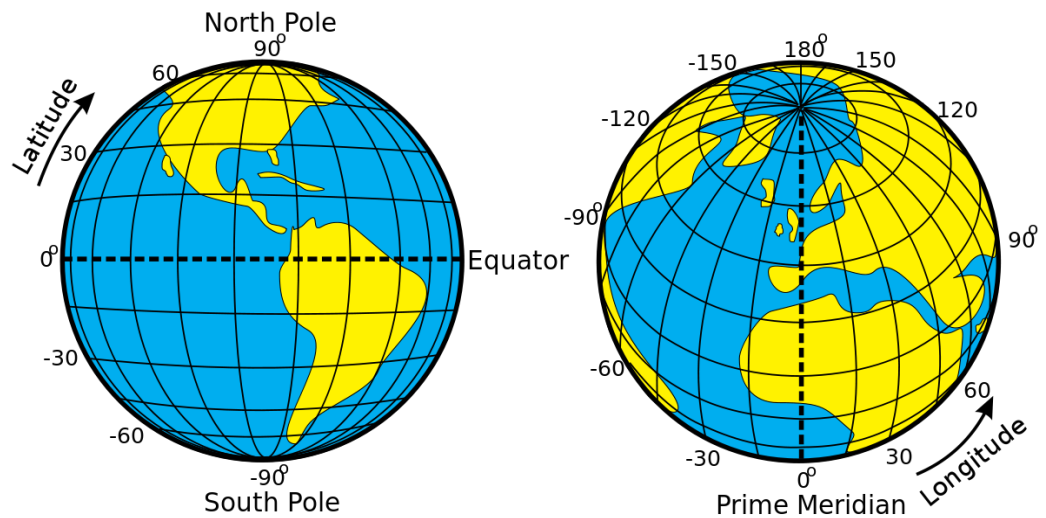


Figure II. 1 : Les coordonnées terrestre

II.2.1.1. Latitude :

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 compose entre -90° et $+90^\circ$.

II.2.1.2. Longitude :

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 [19].

II.2.1.3. L'altitude :

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) [20].

II.2.2. Coordonnées horaires :

Ou coordonnées équatorial 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).

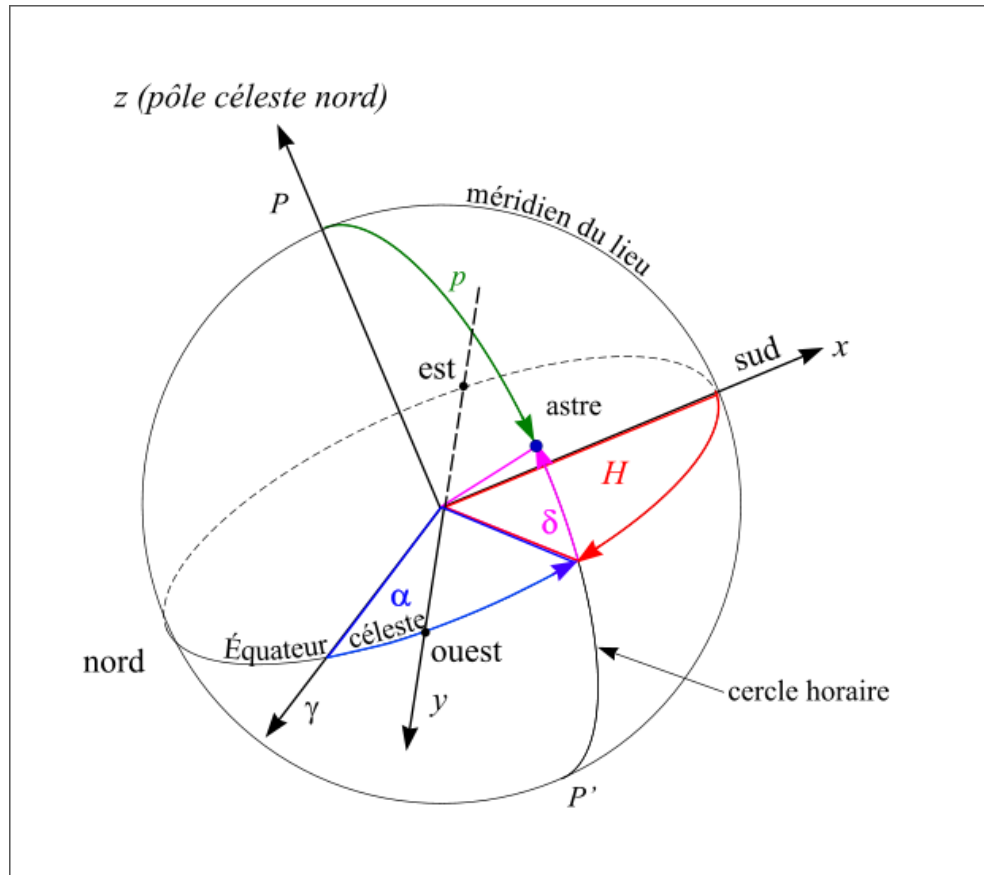


Figure II. 2 : Les coordonnés horaire.

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) définit le temps solaire vrai TSV [23], 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 [22]. L'angle horaire est donné par l'équation suivante :

$$\omega = 0.261799 \cdot (t - 12) \quad (\text{II.1})$$

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

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

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.

$$TSV = t - DE + (ET + 4 \cdot Long) / 60 \quad (II.3)$$

ET : l'équation de temps elle est donnée par :

$$ET = (9.87 \cdot \sin(2 \cdot NPP)) - (7.53 \cdot \cos(NPP)) - (1.5 \cdot \sin(NPP))$$

$$NPP = (360/365) \cdot (N - 81)$$

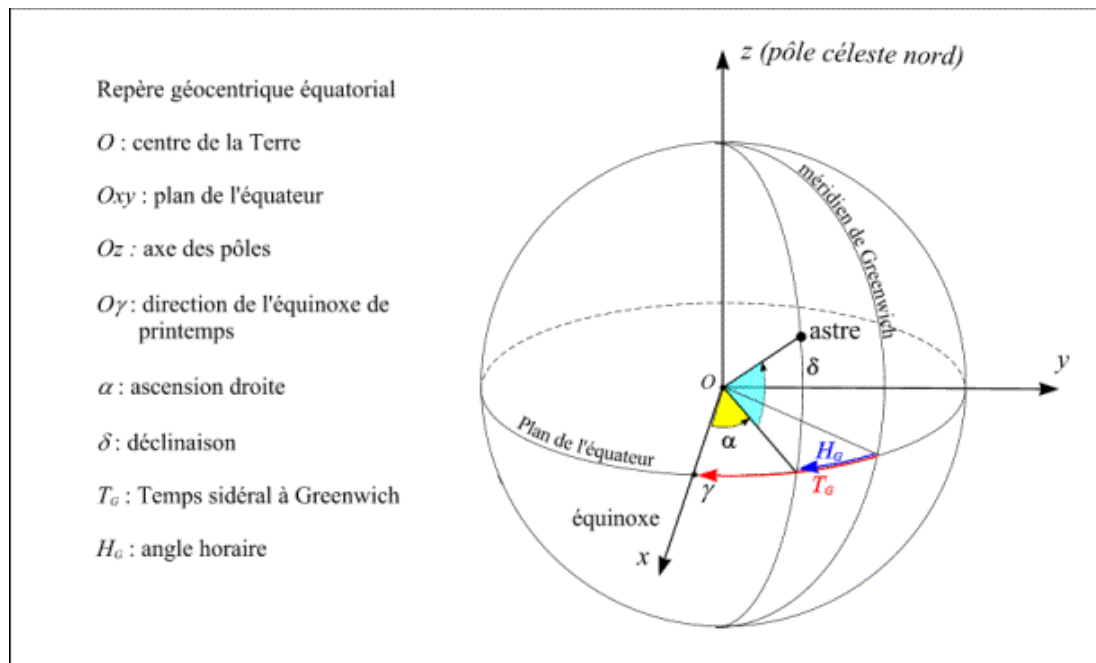


Figure II. 3 : La sphère céleste équatoriale.

II.2.2.2. Déclinaison solaire δ :

La déclinaison du soleil δ est l'angle que fait, la direction du soleil avec le plan équatorial de la terre [5]. 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 [24]. La déclinaison solaire est bien représentée par la formule suivante :

$$\sin(\delta) = 0.3978 * \sin [Np - 1.4 + 0.0355 * \sin (Np - 0.0489)] \quad (II.4)$$

Avec :

$$Np = 2\pi * N / 365.25 \quad (II.5)$$

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) :

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

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.4) :

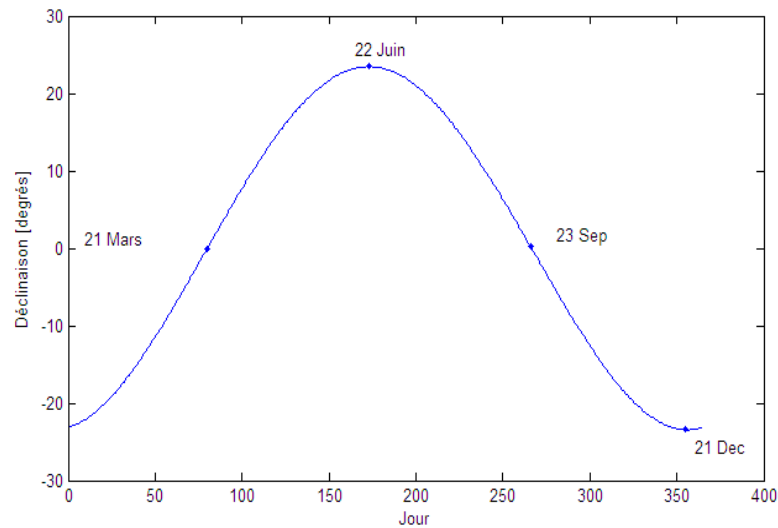


Figure II. 4 : Variation de la déclinaison solaire en fonction du jour.

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 [4].

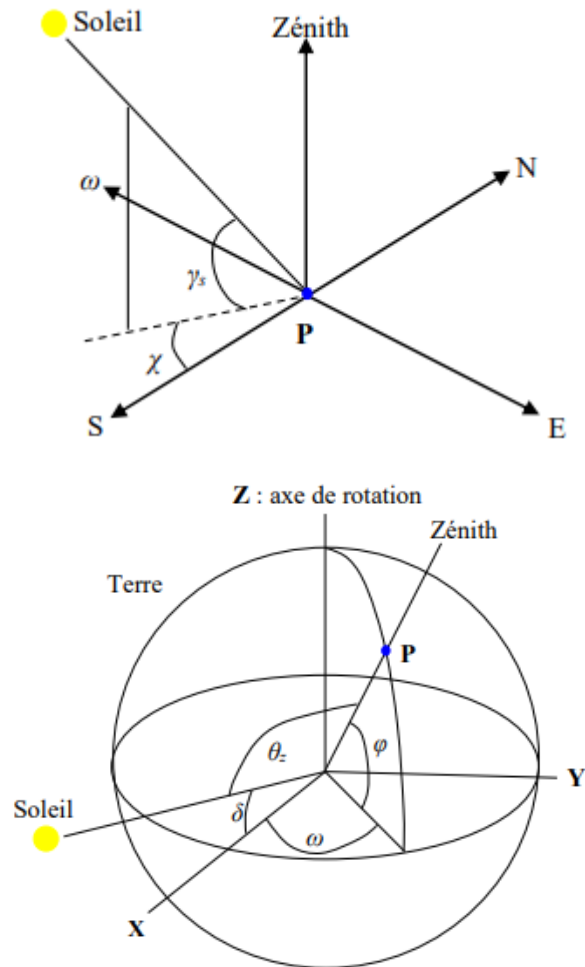


Figure II. 5 : Position du soleil par rapport à un point fixe de la terre (hauteur et azimut du soleil).

II.2.3.1. La Hauteur de soleil (γ_s):

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.

$$\sin(\gamma) = \cos(\varphi) * \cos(\delta) * \cos(w) + \sin(\varphi) * \sin(\delta) \quad (\text{II.7})$$

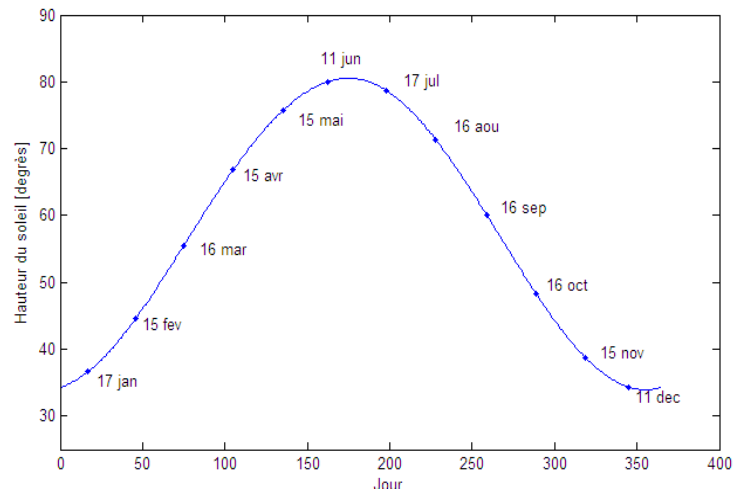


Figure II. 6 : Variation de la hauteur du soleil en fonction du jour.

II.2.3.2. Azimut du soleil (χ , A) :

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 $-180 \leq \chi \leq 180^\circ$ [24]. 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 :

$$\cos(\chi) = \frac{\sin(\phi) * \cos(\delta) * \cos(\omega) - \cos(\phi) * \sin(\delta)}{\{[\cos(\delta) * \sin(\omega)]^2 + [\sin(\phi) * \cos(\delta) * \cos(\omega) - \cos(\phi) * \sin(\delta)]^2\}^{0.5}} \quad (\text{II.8})$$

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

$$\text{Cos}(\chi_s) = \frac{[\text{Cos}(\delta) \cdot \text{Cos}(\omega) \cdot \text{Sin}(\phi)] - [\text{Sin}(\delta) \cdot \text{Cos}(\phi)]}{\text{Cos}(\gamma_s)} \quad (\text{II.9})$$

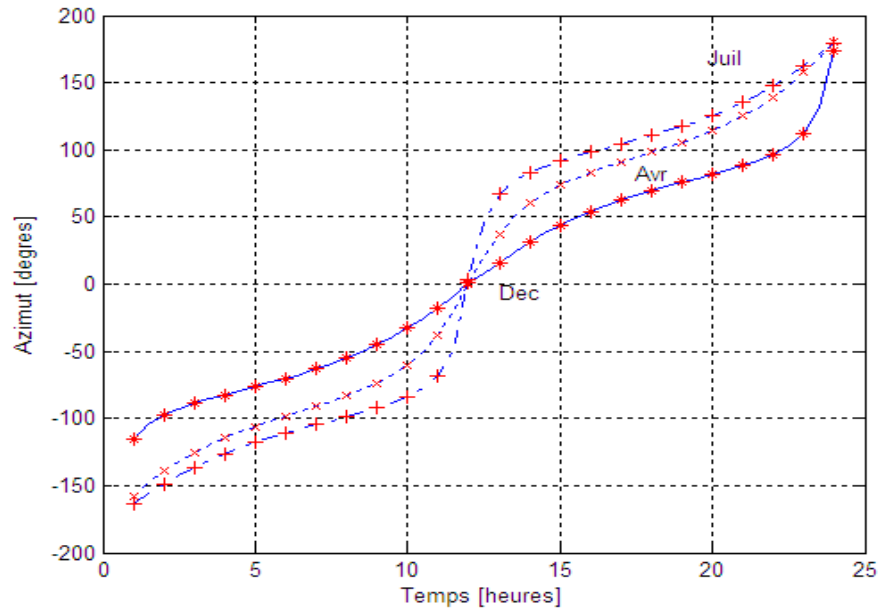


Figure II. 7 : Variation de l'azimut solaire en fonction du temps.

II.3. Aspect énergétique de l'éclairement solaire :

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 [25]. 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 [26] :

$$m_A = 1/\sin(\gamma_s) \quad (\text{II.10})$$

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

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

La variation de la masse d'air en fonction de l'angle soleil est donnée sur la figure II.8 suivantes

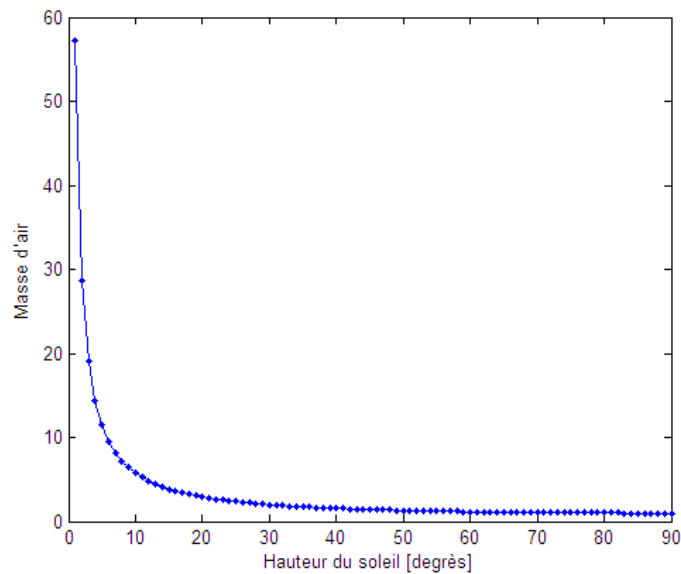


Figure II. 8 : Variation de masse d'air en fonction de hauteur soleil.

II.3.2. Epaisseur de Rayleigh :

En 1922, Linke [38] définit l'épaisseur optique de Rayleigh δR comme étant l'épaisseur optique totale d'une atmosphère sans nuages, vapeur d'eau et aérosols. Kasten, en 1980 [39] utilisa les données spectrales publiées par Feussner et al., en 1930 [40] et proposa l'expression (II.12) pour δR , connue sous le nom de formule pyréliométrique de Kasten, où la diffusion moléculaire et l'absorption de la couche d'ozone stratosphérique sont prises en compte.

$$(\delta R)^{-1} = 9.4 + (0.9 * m_A) \quad (\text{II.12})$$

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', utilisa la formule pyréliométrique de Kasten pour calculer l'éclairement direct incident sur un plan par ciel clair, En 1986, Louche [41] 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 [42].

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

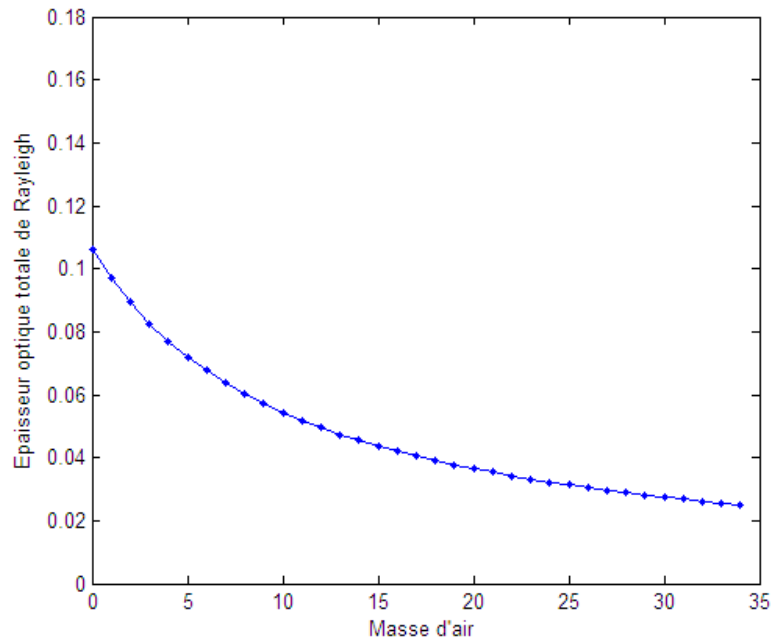


Figure II. 9 : Variation de l'épaisseur optique de l'atmosphère en fonction de la masse d'air.

II.3.3. Facteur de trouble de Linke :

L'éclairement 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 [27, 28]. 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 de l'éclairement solaire utilisé dans le dimensionnement des systèmes énergétiques solaire. En effet la plupart des modèles d'éclairement solaire font appel à la détermination de ces facteurs tels que le facteur de Linke (T_L) [29].

Le facteur de trouble de Linke [30] est défini comme le nombre d'atmosphère pures et sèches (sans aérosols, ni vapeur d'eau, ni nuages) (par ciel clair) a été décomposé en trois facteurs de trouble auxiliaires :

$$T = T_1 + T_2 + T_3$$

Avec : T_1, T_2, T_3 sont donnés par les expressions suivantes en tenant compte de l'altitude :

T_1 : Correspond à l'absorption par la vapeur d'eau.

T2 : Correspond à la diffusion moléculaire, à l'origine du bleu foncé du ciel.

T3 : Correspond à la diffusion (et une légère absorption) par les aérosols, rendant le ciel plus ou moins blanchâtre.

Et on a :

$$T_1 = \{2.4 - 0.9 \cdot \sin(\phi)\} + 0.1 \cdot \{2 + \sin(\phi)\} - (0.2 \cdot z) - [(1.22 + 0.14 \cdot A_{he}) \cdot \{1 - \sin(\gamma_s)\}] \quad (\text{II.14})$$

$$T_2 = (0.89)^z \quad (\text{II.15})$$

$$T_3 = [0.9 + (0.4 \cdot A_{he})] \cdot (0.63)^z \quad (\text{II.16})$$

Avec : A_{he} est l'alternance hiver été donnée par :

$$A_{he} = \sin \left[\frac{360}{365} \cdot (N - 121) \right] \quad (\text{II.17})$$

Z est l'altitude en km.

II.4. Angles relatifs à 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 $\gamma = 90^\circ$ [26].

II.4.2. L'inclinaison du plan β :

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 [30].

II.4.3. L'azimut du plan (déviatiion azimutale) α :

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 [30].

II.4.4. Angle d'incidence

L'angle d'incidence δ^{inc} 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 ce sont 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 [3]:

$$\cos(\delta^{inc}) = [a' * \sin(\omega)] + [b' * \cos(\omega)] + c' \quad (II.18)$$

Avec

$$a' = \cos(\delta) * [\sin(\alpha) * \cos(\gamma)] \quad (II.19)$$

$$b' = \cos(\delta) * [\{\cos(\alpha) * \cos(\gamma) * \sin(\varphi)\} + \{\sin(\gamma) * \cos(\varphi)\}] \quad (II.20)$$

$$c' = \sin(\delta) * [\{-\cos(\alpha) * \cos(\gamma) * \cos(\varphi)\} + \{\sin(\gamma) * \sin(\varphi)\}] \quad (II.21)$$

Où $\beta = 90 - \gamma$

Les variations de l'angle d'incidence en fonction de l'angle horaire pour une déclinaison de 20° à un lieu de latitude 30° . Pour différentes valeurs de hauteur du plan γ sont représentées sur la figure II.10 :

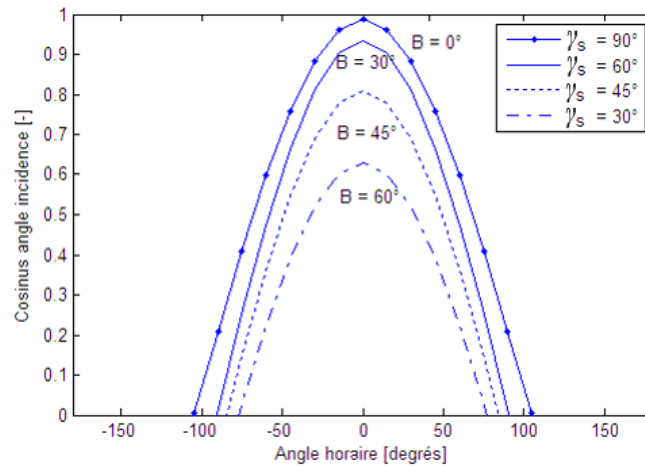


Figure II. 10 : Variation de l'angle d'incidence en fonction de l'angle horaire.

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.

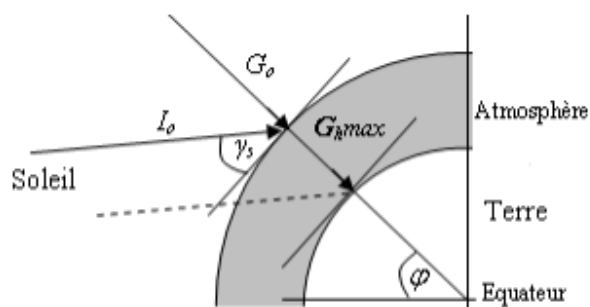


Figure II. 11 : Éclairement solaire hors atmosphère.

L'éclairement solaire extraterrestre G_0 ; fonction de la constante solaire et de la correction de distance entre la terre et le soleil, est donné par l'équation (II.22) [31].

$$G_0 = I_0 \cdot \varepsilon \quad (\text{II.22})$$

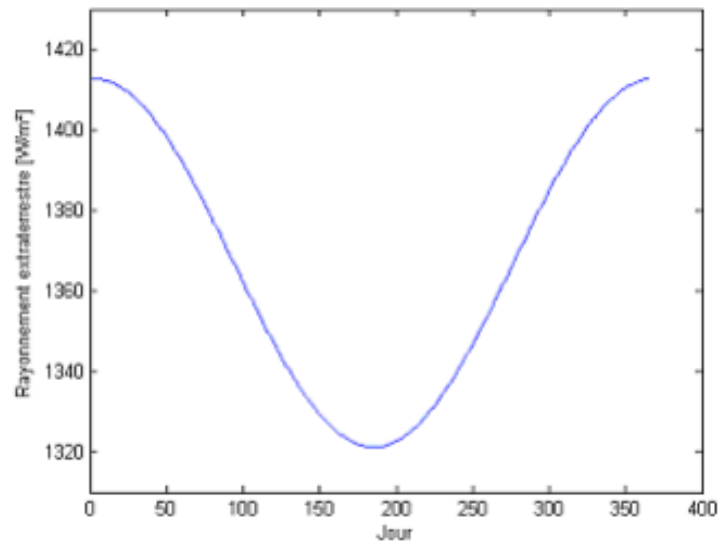


Figure II. 12 : Variation de l'éclairement solaire extraterrestre en fonction du jour.

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 $I_0=1367 \text{ W/m}^2$ 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 [32].

II.5.1.2. Correction de la distance terre-soleil

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

$$\varepsilon = 1 + 0.034 \cdot \cos\left[\frac{360}{365} \cdot (N - 2)\right] \quad (\text{II.23})$$

II.5.2. Eclairement incident sur un plan horizontal (modèle Capderou)

Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie (A.S.A) [33], 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 (II.11) pour la masse d'air m_A et la formule (II.12) pour l'épaisseur totale de l'atmosphère δR et donna l'équation (II.24) 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 :

$$IB^h(\gamma_s, T_L) = G_0 * \sin(\gamma_s) * \exp \left[\frac{-T_L}{0.9 + \frac{9.4}{(0.89)^z} * \sin(\gamma_s)} \right] \quad (II.24)$$

II.5.2.3. Eclairement diffuse 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 (II.25) fonction de la hauteur du soleil γ_s :

$$ID^h(\gamma_s, T_L) = G_0 * \exp \left\{ -1 + 1.06 * \log(\sin(\gamma_s)) + a - \sqrt{b^2 + a^2} \right\} \quad (II.25)$$

Avec :

$$a = 1.1 \quad (II.26)$$

$$b = \log(T'_L) - 2.80 + 1.02 * [1 - \sin(\gamma_s)]^2 \quad (II.27)$$

II.5.3. Eclairement incident sur un plan quelconque (modèle Capderou)

M. Capderou utilise la hauteur de la normale du plan γ pour calculer $\cos(\delta^{inc})$ de l'angle d'incidence, et ce sont les angles α et γ qui déterminent la position du plan. L'angle d'incidence sur un plan quelconque est donné par Capderou par l'expression suivante :

$$\cos(\delta^{inc}) = a' * \sin(\omega) + b' * \cos(\omega) + c' \quad (II.28)$$

$$a' = \cos(\delta) * [\sin(\alpha_z) * \cos(\gamma)] \quad (II.29)$$

$$b' = \cos(\delta) * [\cos(\alpha_z) * \cos(\gamma) * \sin(\varphi) + \sin(\gamma) * \cos(\varphi)] \quad (II.30)$$

$$c' = \sin(\delta) * [-\cos(\alpha_z) * \cos(\gamma) * \cos(\varphi) + \sin(\gamma) * \sin(\varphi)] \quad (II.31)$$

Capderou proposa un modèle pour calculer l'éclairement solaire incident sur un plan (α, γ) , l'éclairement global étant 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 (II.28) pour calculer l'éclairement direct à l'aide de l'équation suivante :

$$IB^i(\gamma_s, T_L) = IN(\gamma_s, T_L) * \cos(\delta') \quad (II.32)$$

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 :

$$ID^i(\gamma_s, T_L) = \delta_a * \frac{1 - \sin(\chi)}{2} + (\delta_i + \delta_{i'}) * \frac{1 + \sin(\chi)}{2} + \delta_d * \cos(\delta^i) + \delta_h * \cos(\chi) \quad (II.33)$$

Les coefficients δ_j sont les modules des différentes composantes du diffus, associés aux facteurs de forme. Ils donnent l'éclairement diffus reçu par le plan incliné considéré.

II.6. Modélisation de l'éclairement solaire par le modèle r.sun

II.6.1. Paramètres géométriques et atmosphérique

❖ 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) définit le temps solaire vrai TSV [34]. L'angle horaire est donné par l'équation suivante :

$$\omega = 0.261799 * (t - 12) \quad (II.34)$$

❖ Déclinaison solaire

La déclinaison du soleil δ est l'angle que fait, la direction du soleil avec le plan équatorial de la terre [35]. 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 [36]. La déclinaison solaire est bien représentée par la formule suivante :

$$\sin(\delta) = 0.3978 * \sin [N_p - 1.4 + 0.0355 * \sin (N_p - 0.0489)] \quad (II.35)$$

Avec :

$$N_p = ((2\pi * N) \div 365.25) \quad (II.36)$$

❖ **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.

$$\sin(\gamma_s) = \cos(\varphi) * \cos(\delta) * \cos(\omega) + \sin(\varphi) * \sin(\delta) \quad (\text{II.37})$$

❖ **Azimet du soleil**

L'azimet 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'azimet est compris entre $-180 \leq \chi \leq 180^\circ$ [36]. L'azimet 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 :

$$\begin{aligned} \cos(\chi) \\ = \frac{\sin(\varphi) * \cos(\delta) * \cos(\omega) - \cos(\varphi) * \sin(\delta)}{\{[\cos(\delta) * \sin(\omega)]^2 + [\sin(\varphi) * \cos(\delta) * \cos(\omega) - \cos(\varphi) * \sin(\delta)]^2\}^{0.5}} \end{aligned} \quad (\text{II.38})$$

❖ **Masse atmosphère**

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 [25]. Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir des transformations.

En 1989, Kasten et al. [37] donnent une expression pour m_A qui est devenue largement utilisée (II.39) Le modèle r.sun utilise cette formule avec une légère correction de la hauteur du soleil.

$$m_A = \frac{P/P_0}{\sin(\gamma_s^{cor}) + 0.50572 * (\gamma_s^{cor} + 6.07995)^{-1.6364}} \quad (\text{II.39})$$

Avec

$$\frac{P}{P_0} = \exp(-z \div 8434,5) \quad (\text{II.40})$$

❖ **Epaisseur optique de l'atmosphère**

Louche démontra que la formule (II.13) conduit à des valeurs grandes par rapport à ceux données par la formule d'origine de Kasten et plus particulièrement pour les petites valeurs de la masse d'air. Récemment en 1996, Kasten a ajusté la formule de Louche et proposa une nouvelle expression pour δR .

Le modèle r.sun a exploité la formule ajustée de Kasten pour une masse d'air inférieure à 20 et calcule δR avec l'expression ajustée de Page, 1996 pour une masse d'air supérieur à 20.

Pour $m_A \leq 20$

$$(\delta R)^{-1} = 6.6296 + (1.7513 * m_A) - (0.1202 * m_A^2) + (0.0065 * m_A^3) - (0.00013 * m_A^4) \quad (II.41)$$

Pour $m_A > 20$

$$(\delta R)^{-1} = 10.4 + (0.718 * m_A) \quad (II.42)$$

❖ **Facteur de trouble de linke**

Le facteur de trouble atmosphérique de linke T_L représente le nombre d'atmosphères idéales qui, si elles étaient superposées, entraîneraient la même atténuation que l'atmosphère réelle. L'avantage du facteur de linke est d'exprimer les divers paramètres, tels que la vapeur d'eau atmosphérique et les aérosols en un seul indice facile à utiliser. L'éclairement direct normal est exprimé en fonction du facteur T_L , selon la formule suivante [41] :

$$IN = I_0 * \varepsilon * \exp (-T_L * m_A * \delta R) \quad (II.43)$$

La détermination de l'éclairement solaire en fonction du facteur de Linke nécessite un modèle mathématique indépendant de l'éclairement [43]. La plupart des modèles existants nécessitent la connaissance d'un grand nombre de données relatives au site [44]. Malheureusement, ces données ne sont pas toutes disponibles, par contre des tables relatives au facteur de Linke sont très abondantes [45-46]. Pour cela, nous avons choisi d'utiliser les données du projet SoDa [47] 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.

II.6.2. Eclairement incident sur un plan horizontal (Modèle r.sun)

II.6.2.1. Eclairement global incident sur un plan horizontal

Pour le modèle r.sun [31], l'éclairement global incident sur un plan horizontal $IG^h(\gamma_s, T_L)$ par ciel clair ; calculé en W/m², est divisé en deux parties : l'éclairement direct $IB^h(\gamma_s, T_L)$ et l'éclairement diffus $ID^h(\gamma_s, T_L)$, chacun étant calculé séparément.

II.6.2.2. Eclairement direct incident sur un plan horizontal

L'éclairement direct est le flux solaire incident directement sur le plan considéré sous un angle représentant la hauteur solaire. Tel que modélisé par Hofierka et al. (2002) [31], l'éclairement direct incident sur un plan horizontal $IB^h(\gamma_s, T_L)$ par ciel clair, est donné par :

$$IB^h(\gamma_s, T_L) = G_0 * \sin(\gamma_s) * \exp(-0.8662 * T_L * m_A * \delta R) \quad (II.44)$$

II.6.2.3. Eclairement diffus incident sur un plan horizontal

L'éclairement diffus est le flux solaire reçu par un plan considéré qui traverse les nuages, provenant de la voûte céleste dans toutes les directions. Pour l'expression de l'éclairement diffus, nous allons prendre la formule publiée par Hofierka et al. Avec une légère correction du facteur T_L , cette correction ayant été adoptée en 2004 par le nouveau Atlas Solaire de l'Europe (ESRA) [48, 49] et également prise en considération dans la version 2007 de MeteoNorm V6 [50].

Posons : $T_{Lc} = (p / p_0) \times T_L$

L'expression de l'éclairement diffus est donnée par :

$$ID^h(\gamma_s, T_L) = G_0 * T_{rd}(T_L) * F_d(\gamma_s, T_L) \quad (II.45)$$

$T_{rd}(T_L)$ Est la fonction de la transmittance diffuse. Elle est fonction uniquement du facteur T_L corrigé, et varie entre 0 et 0.3 (A.S.A). L'expression de $T_{rd}(T_L)$ est réécrite de la manière suivante

$$T_{rd}(T_L) = -1.5843 * 10^{-2} + (3.0543 * 10^{-2} * T_{Lc}) + (3.797 * 10^{-4} * T_{Lc}^2) \quad (II.46)$$

$F_d(\gamma_s, T_L)$: est la fonction diffuse angulaire, fonction de la hauteur du soleil γ_s et du facteur de trouble T_L corrigé. $F_d(\gamma_s, T_L)$: est donnée par l'expression (II.47).

$$F_d(\gamma_s, T_L) = A_0 + A_1 * \sin(\gamma_s) + A_2 * [\sin(\gamma_s)]^2 \quad (II.47)$$

A_i : sont des coefficients dépendants uniquement du facteur de trouble (T_L) corrigé.

II.6.3. Eclairement incident sur un plan quelconque (Modèle r.sun)

❖ Angle d'incidence

L'angle d'incidence est l'angle que font les rayons du soleil avec la normale du plan considéré. Il est défini par l'inclinaison du plan β et l'azimut de la normale du plan α (orientation du plan). L'angle d'incidence est calculé à partir du $\sin(\delta^{inc})$ pour le modèle r.sun de la manière suivante :

$$\sin(\delta^{inc}) = \cos(\varphi') * \cos(\delta) * \cos(\omega - \lambda') + \sin(\varphi') * \sin(\delta) \quad (II.48)$$

$$\sin(\varphi') = -\cos(\varphi) * \sin(\beta) * \cos(\alpha_z) + \sin(\varphi) * \cos(\beta) \quad (II.49)$$

$$\text{tg}(\lambda') = \frac{-\sin(\beta) * \sin(\alpha_z)}{\sin(\varphi) * \sin(\beta) * \cos(\alpha_z) + \cos(\varphi) * \cos(\beta)} \quad (II.50)$$

Pour un plan quelconque (α, γ) , l'éclairement solaire incident $IG^i(\gamma_s, T_L)$ est estimé par la détermination de l'éclairement direct et diffus [24].

II.6.3.1. Eclairement direct incident sur un plan quelconque

L'éclairement direct étant simple à calculer, il est donné en fonction de l'angle d'incidence par la formule suivante :

$$IB^i(\gamma_s, T_L) = IN(\gamma_s, T_L) * \sin(\delta') \quad (II.51)$$

II.6.3.2. Eclairement diffus incident sur un plan quelconque

Pour un plan dont l'incidence du flux solaire est reçue d'une manière directe (sans obstacle), l'éclairement diffus incident sur le plan considéré est donné par les équations (II.52) et (II.53) :

Si $\gamma_s \geq 0.1$ (5.7°)

$$ID^i(\gamma_s, T_L) = ID^h(\gamma_s, T_L) * [F(\beta) * (1 - K_b) + K_b * \frac{\sin(\delta^i)}{\sin(\gamma_s)}] \quad (II.52)$$

Si $\gamma_s < 0.1$ (5.7°)

$$ID^i(\gamma_s, T_L) = ID^h(\gamma_s, T_L) * [F(\beta) * (1 - K_b) + K_b * \frac{\sin(\beta) * \cos(\theta)}{0.1 - 0.008 * \gamma_s}] \quad (II.53)$$

θ est l'azimut du soleil pour une surface inclinée et $F(\beta)$ est la fonction du éclairement diffus du ciel.

II.7. Modélisation de l'éclairement solaire par le modèle de Kasten

II.7.1. Paramètres géométriques et atmosphérique

Dans cette partie nous présentons les équations nécessaires pour la modélisation de l'éclairement solaire incident sur un plan horizontal et incliné utilisées par le modèle de Kasten [51].

❖ La déclinaison solaire

La déclinaison δ solaire est définie, suivant le modèle de Kasten ; par la formule :

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left[\frac{360}{365} \cdot (N - 81)\right] \quad (II.54)$$

❖ L'angle horaire

ω est l'angle horaire, il est calculé avec l'équation suivante :

$$\omega = 15 \cdot (TSV - 12) \quad (II.55)$$

❖ La hauteur du soleil

γ_s est la hauteur angulaire du soleil, il est donne par l'équation suivante :

$$\sin(\gamma_s) = [\sin(\phi) \cdot \sin(\delta)] + [\cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega)] \quad (II.56)$$

❖ L'azimut du soleil

χ_s est l'azimut angulaire du soleil, il est donne par l'équation suivante :

$$\cos(\chi_s) = \frac{[\{\sin(\gamma_s) \cdot \sin(\phi)\} - \sin(\delta)]}{[\cos(\gamma_s) \cdot \cos(\delta)]} \quad (II.57)$$

❖ **Masse atmosphérique**

Le trajet optique atmosphérique m_A , est définie à partir de l'unité d'épaisseur atmosphérique prise verticalement au niveau de la mer, qui est fonction de l'altitude du lieu Alt (Km) et la hauteur du soleil γ_s , est calculé par l'équation suivante :

$$m_A = \frac{1 - 0.1 \cdot Alt}{\sin(\gamma_s) + 0.15 \cdot (\gamma_s + 3.885)^{-1.253}} \quad (II.58)$$

Pour des hauteurs de soleil faibles (inférieures à 10 ou 15°), le deuxième terme du dénominateur peut être considéré comme nul et la formule précédente s'écrit de la manière suivante :

$$m_A = \frac{1 - 0.1 \cdot Alt}{\sin(\gamma_s)} \quad (II.59)$$

❖ **Le facteur du trouble de Linke**

Le facteur du trouble atmosphérique T_L est calculé par l'équation suivante :

$$T_L = 2.5 + 16 \cdot \beta_A + 0.5 \cdot \ln(w_v) \quad (II.60)$$

Où β_A est le coefficient d'Angstrom et w_v est la hauteur d'eau condensable. Les valeurs de ces deux paramètres, qui tiennent compte de la nature du ciel.

Tableau II. 1 : Paramètres pour le calcul du facteur du trouble.

Etat du ciel	β_A [-]	w_v (Cm)
Ciel pur	0.05	1
Ciel moyen	0.1	2
Ciel dégradé	0.2	5

II.7.2. Eclairement incident sur un plan horizontal (Modèle Kasten)

❖ **L'éclairement global sur plan horizontal**

L'éclairement global IG_h que reçoit une surface horizontale est la somme de deux composantes qui sont l'éclairement direct IB_h et l'éclairement diffus ID_h il est donné par l'équation suivante :

$$IG_h = (1270 - 56 \cdot T_L) \cdot \{\sqrt{\sin(\gamma_s)}\}^{kk} \quad (II.61)$$

Avec :

$$kk = (T_L + 36)/33 \quad (\text{II.62})$$

❖ **L'éclairement direct sur plan horizontal**

Les composantes, directe IB_h et diffuse ID_h peuvent être également calculées séparément à l'aide des équations suivantes :

$$IB_h = IN \cdot \text{Sin}(\gamma_s) \quad (\text{II.63})$$

IN est l'éclairement solaire reçu sur terre qui est une fonction de l'éclairement solaire hors atmosphère qui est égale à la constante solaire I_0 multipliée par un facteur correctif qui tient compte de l'ellipticité de la trajectoire de la terre autour du soleil.

$$IN = G_0 \cdot \exp(-m_A \cdot T_L/0.9 + m_A + 9.4) \quad (\text{II.64})$$

G_0 : est la quantité d'énergie totale envoyée par le soleil à la limite de l'atmosphère terrestre sur une surface unité perpendiculaire à l'éclairement solaire, elle est donnée par :

$$G_0 = I_0 \cdot (1 - \text{Sin}(\delta)/11.7) \quad (\text{II.65})$$

$I_0=1353 \text{ W/m}^2$: est la valeur moyenne de la constante solaire actuellement retenue.

❖ **L'éclairement diffus sur plan horizontal**

L'éclairement diffus est calculé à partir de l'équation suivante :

$$ID_h = \frac{G_0}{25} \cdot \sqrt{\text{Sin}(\gamma_s)} \cdot [T_L - 0.5 - \sqrt{\text{Sin}(\gamma_s)}] \quad (\text{II.66})$$

II.7.3. Eclairement incident sur un plan quelconque (Modèle Kasten)

Un plan incliné est caractérisé par son inclinaison β (par rapport à l'horizontale) et son orientation α (ou déviation par rapport à azimut χ_s , le Sud) comme illustré sur les figures (II.13 et II.14), qui représentent, respectivement, La position du soleil relative aux surface incliné et les angles intervenant dans le calcul de l'éclaircment incident sur un plan incliné :

❖ **L'éclairement global sur plan incliné**

Pour un plan d'inclinaison β et d'orientation α , les formules des éclairements, direct IB_i et diffus ID_i prennent les formes suivantes :

❖ **L'éclairement direct sur plan incliné**

$$IB_i = IN \cdot \text{Cos}(\delta^{inc}) \quad (\text{II.68})$$

δ^{inc} est l'angle d'incidence des rayons solaires comme illustré précédemment.

❖ **L'éclairement diffus sur plan incliné**

$$ID_i = \left(\frac{1 + \text{Cos}(\beta)}{2} \right) \cdot ID_h \times \left(\frac{1 - \text{Cos}(\beta)}{2} \right) \cdot \rho \cdot G_0 \quad (\text{II.69})$$

Où ρ est l'albédo du lieu considéré.

Le flux diffus reçu par la surface du capteur, comprend deux composantes : une émise par la voûte céleste qui atteint le capteur (premier terme de l'équation précédente), et l'autre en provenance du sol que reçoit le capteur (deuxième terme).

II.8. Modélisation de l'éclairement solaire par le modèle de Perrin

II.8.1. Paramètres géométriques et atmosphérique

Dans ce modèle les équations nécessaires pour la modélisation de l'éclairement solaire incident sur un plan horizontal et incliné utilisées par le modèle de Perrin sont déjà présenté dans les modèles précédents (déclinaison solaire, angle horaire, hauteur du soleil, azimut et angle d'incidence, masse, épaisseur optique de l'atmosphère et facteur de trouble).

II.8.2. Eclairement incident sur un plan horizontal (Modèle Perrin)

Pour un ciel clair, les éclairements de l'éclairement direct IB_h , diffus ID_h et global IG_h reçus par un capteur sont donnés par les relations suivantes :

$$IG_h = IB_h + ID_h \quad (\text{II.70})$$

$$IB_h = A * \sin(\gamma_s) * \exp\left(\frac{-1}{C * \sin(\gamma_s + 2)}\right) \quad (\text{II.71})$$

$$ID_h = B * \sin(\gamma_s)^{0.4} \quad (II.72)$$

Avec : A, B et C sont donnés par le tableau suivant :

Tableau II. 2 : valeurs des constantes A, B, C

Etat de l'atmosphère	A	B	C
Ciel bleu foncé	1300	87	6
Ciel bleu clair	1230	125	4
Ciel bleu laiteux	1200	187	2.5

II.8.3. Eclairement incident sur un plan quelconque (Modèle Perrin)

Pour un ciel clair, les puissances de l'éclairement direct IB_i , diffus ID_i et global IG_i reçue par un capteur (α, γ) incliné de β par rapport au plan horizontal sont données par les relations suivantes :

$$IB_i = A * \cos(\delta^{inc}) * \exp\left(\frac{-1}{C * \sin(\gamma_s + 2)}\right) \quad (II.73)$$

$$ID_i = \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2}\right) * ID_h + \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2}\right) * \sigma * IG_h \quad (II.74)$$

$$IG_i = IB_i + ID_i \quad (II.75)$$

$$\begin{cases} ID_h = B * (\sin(\gamma_s))^{0.4} \\ IG_h = A'' * (\sin(\gamma_s))^{B''} \end{cases} \quad (II.76)$$

Ou

ID_h : eclairement diffus reçu par une surface horizontale

IG_h : eclairement global reçu par une surface horizontale

σ : l'albedo du sol donnée par :

$$\sigma \begin{cases} 0.9 \text{ a } 0.8 & \text{neige} \\ 0.8 \text{ a } 0.4 & \text{sol clair} \\ 0.4 \text{ a } 0.2 & \text{verdure} \end{cases}$$

A, B, C, A'', B'' : sont des constantes qui dépendent de l'état de l'atmosphère [52].

Tableau II. 3 : valeurs des coefficients A, B, C, A'', B''

Etat de l'atmosphère	A	B	C	A''	B''
Ciel bleu foncé	1300	87	6	1150	1.15
Ciel bleu clair	1230	125	4	1080	1.22
Ciel bleu laiteux	1200	187	2.5	990	1.25

II.9. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons vu la modélisation des modèles : Capderou, r.sun, Kasten et Perrin ainsi les équations utilisées pour réaliser cette modélisation.

Les quatre modèles utilisent 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.

La modélisation des quatre modèles a été programmés et illustrées graphiquement à l'aide du Matlab.

CHAPITRE III

Résultats et discussion

III.1. Introduction

Dans ce chapitre on va réaliser la programmation des modelés situé dans le chapitre précédant sur l'environnement Matlab.

En suit en allons appliquer cette programmation sur le lieu de Ghardaïa qui est notre lieu utilise pour faire cette étude.

A la fin de ce chapitre nous allons voir une comparaison entre différent modelés (Capderou, Kasten, r.sun) avec valeurs mesurées afin d'évalué et interprété les résultats obtenus par les modelés.

III.2. Lieu et données utilises

III.2.1. Lieu

Le site de Ghardaïa est situé au centre de l'Algérie. À 600 km au sud d'Alger, à 190 km au sud de Laghouat, à 270 km d'El Menia et à 190 km à l'ouest de Ouargla [53].

Les coordonnés terrestres de Ghardaïa sont : 32.46° de latitude Nord, de 3.78° de longitude Est, et à l'altitude de 468 mètres au niveau de la mer. Avec un climat désertique, Ghardaïa Contient une structure scientifique, qui a été mise en place en 2002 par le ministère de l'Enseignement Supérieur et la Recherche Scientifique, il s'agit de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER), affiliée au Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) situé à Bouzaréah, Alger.

En ce qui concerne les paramètres météorologiques et radiométriques de lieu de Ghardaïa, la pluviométrie est du type saharien avec une moyenne annuelle de 67.37 mm Le nombre de jours de pluie par an en moyen est de 20 à 30 jours, les vitesses moyennes annuelles du vent sont de 3.1 à 4.4 m/s mesurées à 10m du sol. Les températures moyennes maximales mensuelles varient de 14.9 °C en Janvier à 43.2 °C en Juillet, les températures moyennes minimales mensuelles varient de 3.4 °C en Janvier à 29.5 °C en Juillet. Les températures moyennes mensuelles varient de 9 °C en Janvier à 36.5 °C en Juillet avec une moyenne annuelle de 22.6 °C.

III.2.2. Données utilises

Les données utilise dans cette étude est Lié au lieu (Ghardaïa), car ce lieu dispose d'une Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER).

L'unité contient des Instruments de mesure de l'éclairement solaire, L'éclairement solaire global est mesuré avec un pyranomètre CMP21 de Kipp & Zonen, tandis qu'éclairement solaire direct normal est mesuré avec un pyréliomètre CHP1 de Kipp & Zonen. Les données sont enregistrées par pas de 1 minute et stockées sur disque d'un micro-ordinateur.



Figure III. 1 : Station radiométrique de l'URAER (Ghardaïa)

III.2.3. Jours types

Le tableau suivant démontre les jours types de l'année pour chaque mois avec le nombre N qui correspondent au numéro du jour.

TableauIII.1. Jour type standard du mois

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juill	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

III.3. La programmation des modelés sur l'environnement Matlab

Pour faire la programmation des modelés on a chose logiciel Matlab (MATrix LABoratory), En peut l'utiliser soit en mode en ligne de commande soit en mode programmation,

pour notre cas nous allons utiliser le mode programmation pour programmer les équations et les instructions et les commande des différent modelés (Mentionné dans le chapitre précédent), avec Respecter le langage et les conditions de programmation d'environnement Matlab.

III.3.1. Paramètres d'entrées utilisées

Le programme a besoin de certaines données d'entrées, tels que les données géographiques du lieu considéré (Lat, Lon, Alt), le nombre de jours, le temps ; qui lui permettrons de calculer la position du soleil en coordonnées équatoriales (déclinaison du soleil δ et l'angle horaire ω), le programme calculera ensuite la position du soleil en coordonnées horizontales (la hauteur du soleil γ_s et l'azimut solaire χ_s). Le programme déterminera également le facteur de trouble atmosphérique de Linke T_L à partir des formules appropriées, la masse d'air optique m_A et l'épaisseur optique de Rayleigh δ_R .

Le programme réalisé doit calculer l'éclairement global extraterrestre G_o par la baie de la constance solaire I_o , la composante de l'éclairement direct IB_h est ensuite calculée. Elle n'est autre que l'éclairement direct normal IN (calculé au préalable) multiplié par sinus de la hauteur angulaire du soleil γ_s . L'éclairement global incident sur un plan horizontal IG_h est calculé par la sommation des deux composantes directe IB_h et diffuse ID_h .

Pour une inclinaison du plan d'un angle et d'une orientation (β, α) donnés par l'utilisateur, le programme procèdera d'abord au calcul de cosinus de l'angle d'incidence δ^{inc} des rayons solaires sur le plan, qui sera utilisé pour calculer l'éclairement direct IB_i sur le plan considéré. En fin l'éclairement global IG_i est égal à l'éclairement IB_i plus ID_i , qui l'éclairement diffus sur le plan. Finalement, le programme dessinera les graphs des rayonnements obtenues durant une journée du lever au coucher du soleil pour le jour N choisi.

III.3.2. Facteur de trouble atmosphérique de Linke

L'éclairement solaire est atténué en traversant l'atmosphère terrestre par la diffusion des aérosols, les nuages et l'absorption par les différents composants atmosphériques, il est connu qu'en jour clair les aérosols sont la principale cause de l'extinction de l'irradiation solaire. La quantité des aérosols dans l'atmosphère peut être représentée par les coefficients de troubles. En 1922, Linke a regroupé ces diverses extinctions dans un seul coefficient appelé trouble de Linke

ou trouble atmosphérique T_L [36]. La détermination des troubles atmosphériques à une grande importance dans la modélisation de l'éclairement solaire utilisé dans le dimensionnement et l'évaluation des performances des systèmes énergétiques solaires. Une détermination du facteur de trouble de Linke à partir de l'éclairement direct est possible à partir de l'éclairement direct par exemple, par contre la détermination de l'éclairement solaire en fonction du facteur de Linke nécessite un modèle mathématique indépendant de l'éclairement [3].

Beaucoup de travaux ont été effectués ces dernières décennies pour déterminer expérimentalement le facteur de trouble de Linke [48, 49]. En l'absence de mesures, la valeur de référence relative à un ciel clair pur et sec vaut 2, elle atteint 6 dans le cas d'un ciel pollué (présence d'aérosols) et humide (teneur en vapeur d'eau élevée) [50]. Actuellement, des tables relatives aux valeurs du facteur de Linke T_L sont disponibles sur le Web. Le plus connu est le site (<http://www.soda-is.com>) qui propose des valeurs mensuelles moyennes de ce facteur à partir de la base de données SoDa, avec une erreur quadratique moyenne d'estimation de ce facteur de l'ordre 0.7. La méthode utilisée pour élaborer cette base de données est détaillé sur le site Web HelioClim. Dans notre cas, on utilisera des formules propres à chaque un des modèles, plus ou moins dépendant des paramètres climatiques ; pour la détermination de ce facteur.

III.4. Résultat de programmation

Dans cette partie on va voir les résultats de programmation des modèles d'estimation d'éclairements solaire utilisées dans cette étude.

III.4.1. Estimation de l'éclairement solaire par modelé Capderou

III.4.1.1. L'effet de Facteur de Linke

➤ Plan horizontale

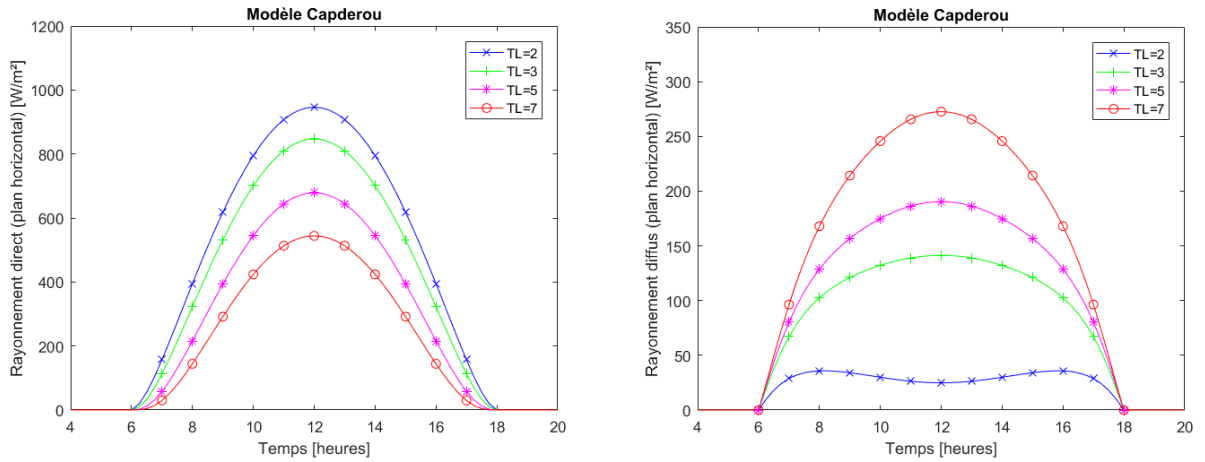


Figure III. 2 : Variations de l'éclairement direct et diffus horizontal (Modèle Capderou).

➤ Plan Incline

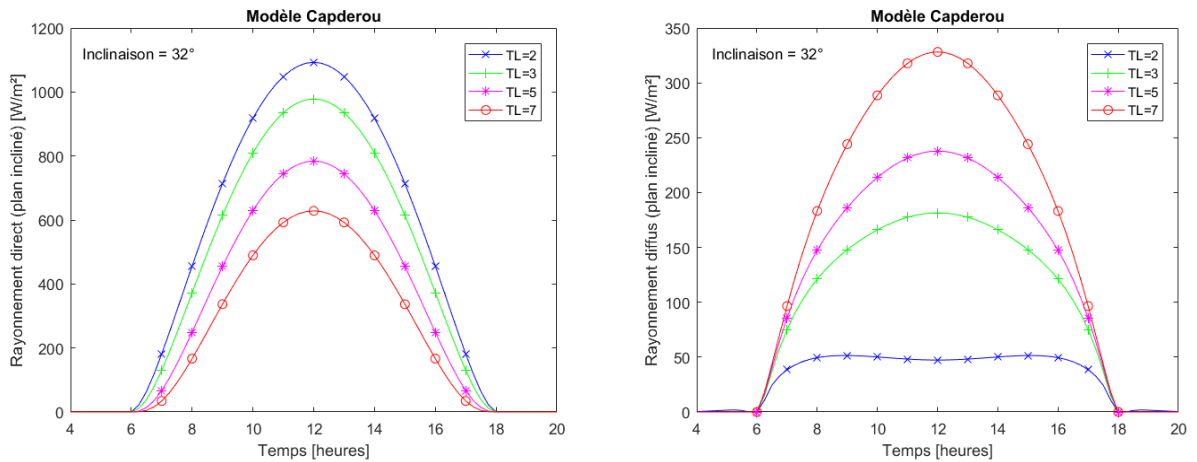


Figure III. 3 : Variations de l'éclairement direct et diffus incident sur un plan incliné de 32° (Modèle Capderou).

III.4.2. Estimation de l'éclairement solaire par modèle Kasten

III.4.2.1. L'effet de Facteur de Linke

➤ Plan horizontale

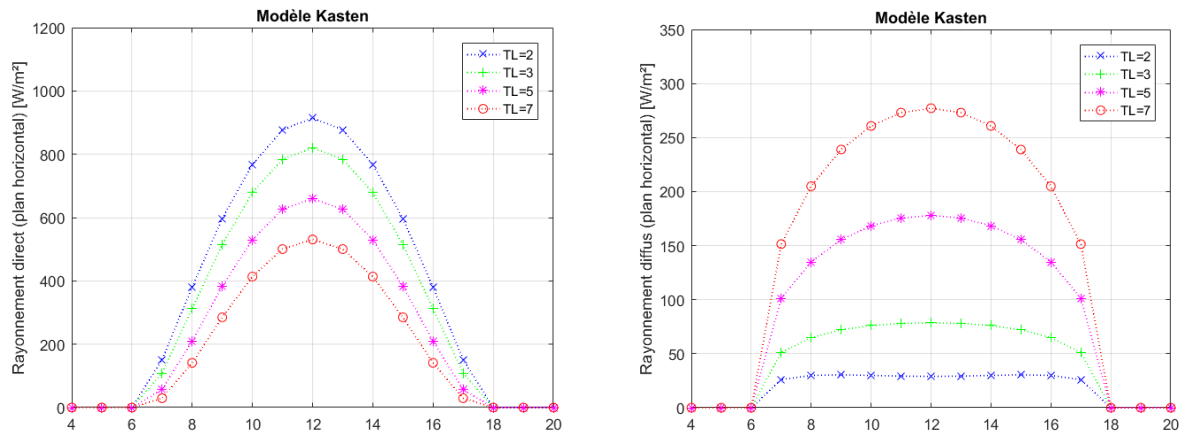


Figure III. 4 : Variations de l'éclairement direct et diffus horizontal (Modèle Kasten).

➤ Plan Incline

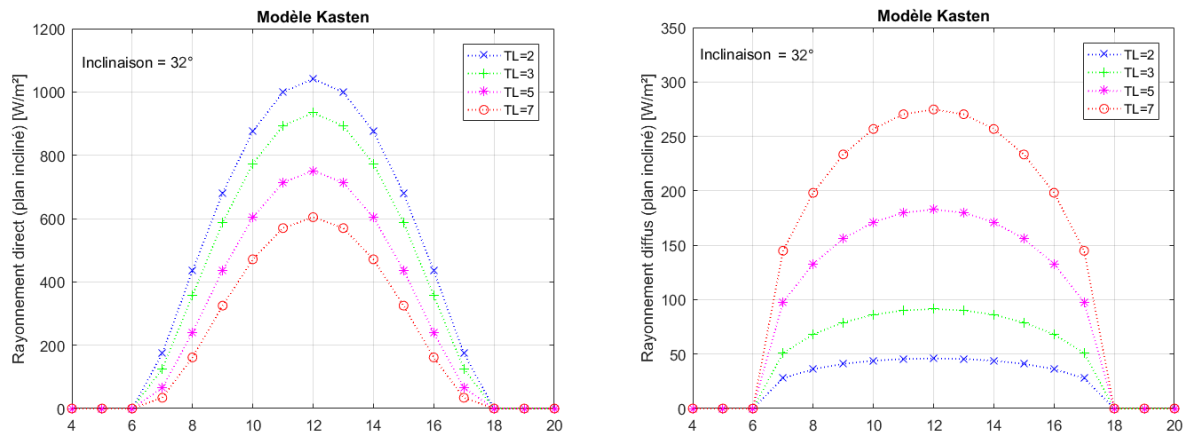


Figure III. 5 : Variations de l'éclairement direct et diffus incident sur un plan incliné de 32° (Modèle Kasten).

III.4.3. Estimation de l'éclairement solaire par modelé r.sun

III.4.3.1. L'effet de Facteur de Linke

➤ Plan horizontale

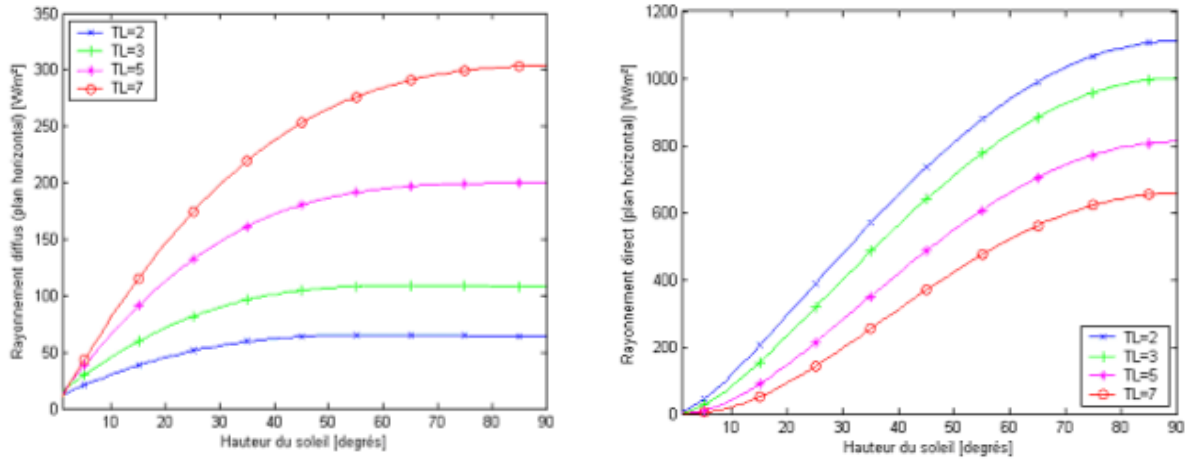


Figure III. 6 : Variations de l'éclairement direct et diffus horizontal (Modèle r.sun).

➤ Incline

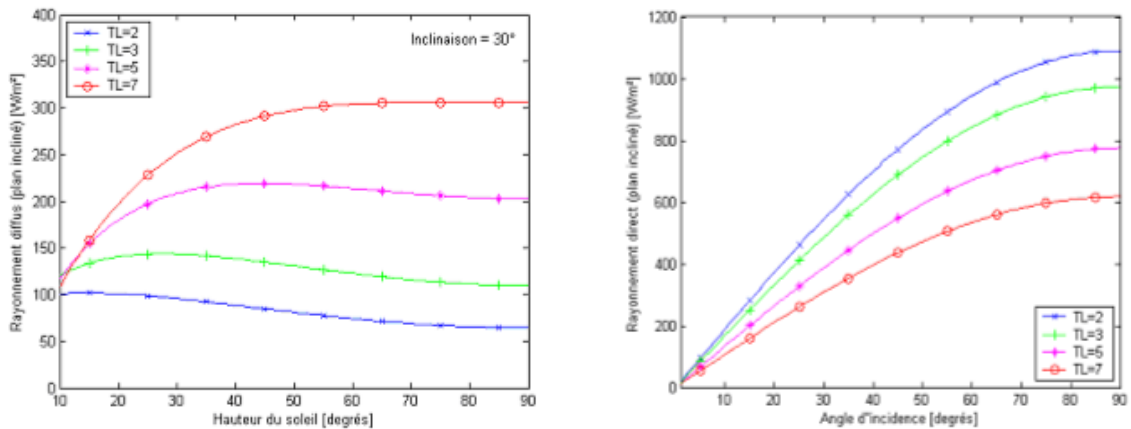


Figure III. 7 : Variations de l'éclairement direct et diffus incident sur un plan incliné de 30° (Modèle r.sun).

III.5. Application des modelés au site de Ghardaïa

Les résultats de la programmation Matlab des deux modèles Capderou et Kasten et r.sun pour l'estimation de l'éclairement solaire, sur le site de Ghardaïa sont présentés comme suit :

III.5.1. Incidence sur un plan horizontal et incliné à la latitude

Pour la validation d'éclairement solaire, nous avons confronté des données par ciel clair de l'éclairement solaire fournies par la station radiométrique de Ghardaïa avec des valeurs estimé par les modèles théoriques sur un plan horizontal et sur un plan incliné obtenus avec Matlab. Nous avons choisi trois jours (le 21 mars, le 22 juin et le 21 décembre). Les figures suivantes illustrent les variations des composantes : directe et diffuse horizontale, de l'éclairement global horizontal et incliné à la latitude du lieu et de l'éclairement direct normal pour différents jours types de l'année (hiver, été et printemps).

III.5.1.1. Modèle Capderou

- Saison d'hiver : Plan horizontal (α, β) = (0, 0) et plan incliné (α, β) = (0, 32)

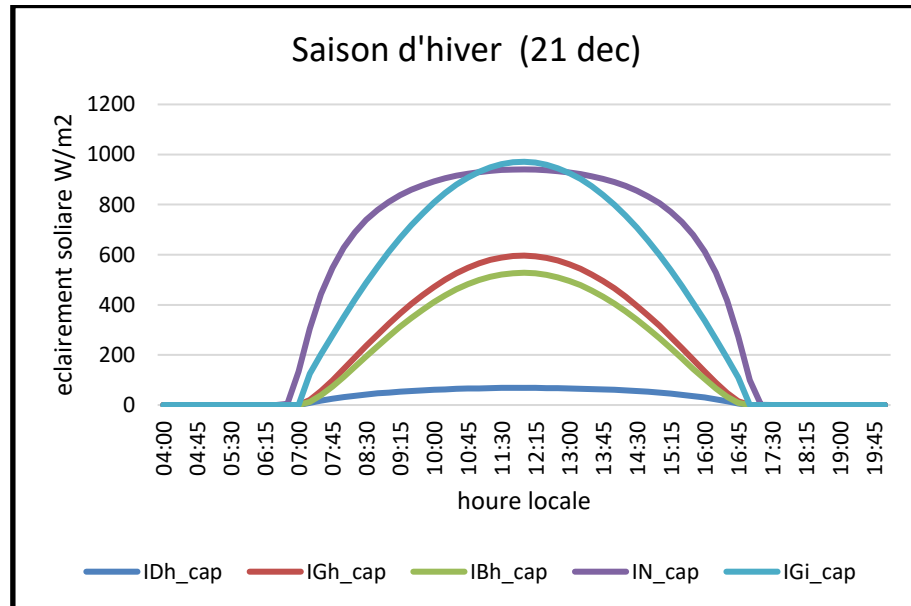


Figure III. 8 : Eclairement incident sur un plan horizontal et un plan incliné à la Latitude (32°) pour un jour type du mois de Décembre.

- Saison d'été : Plan horizontal $(\alpha, \beta) = (0, 0)$ et plan incliné $(\alpha, \beta) = (0, 32)$

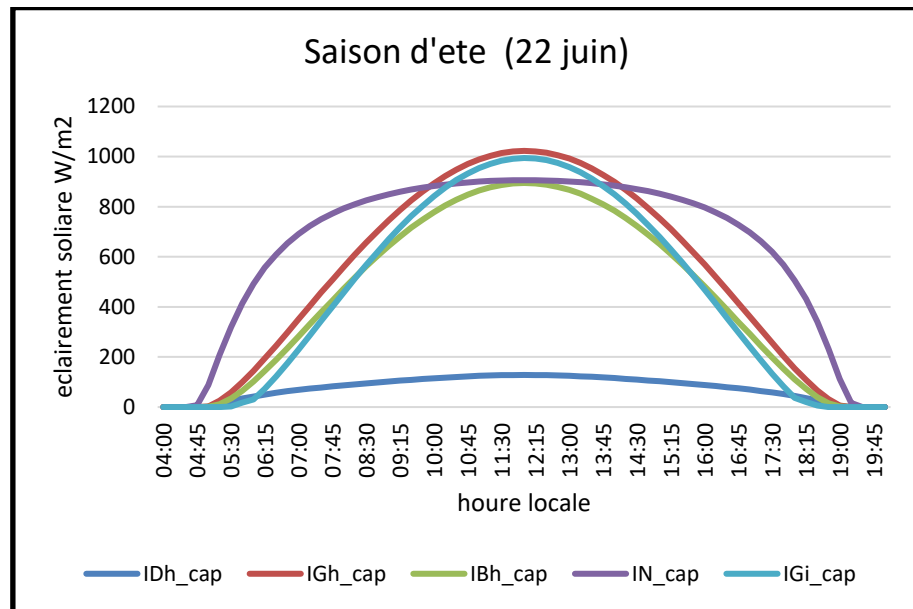


Figure III. 9 : Eclairement incident sur un plan horizontal et un plan incliné à la Latitude (32°) pour un jour type du mois de Juin.

- Saison du printemps : Plan horizontal $(\alpha, \beta) = (0, 0)$ et plan incliné $(\alpha, \beta) = (0, 32)$

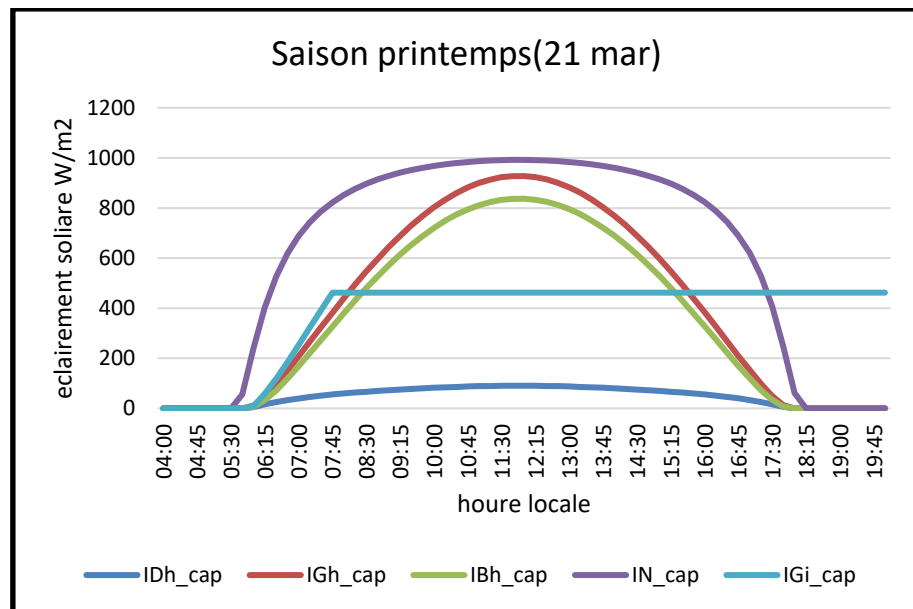


Figure III. 10 : Eclairement incident sur un plan horizontal et un plan incliné à la Latitude (32°) pour un jour type du mois de Mars.

III.5.1.2. Modèle Kasten

- Saison d'hiver : Plan horizontal (α, β) = (0, 0) et plan incliné (α, β) = (0, 32)

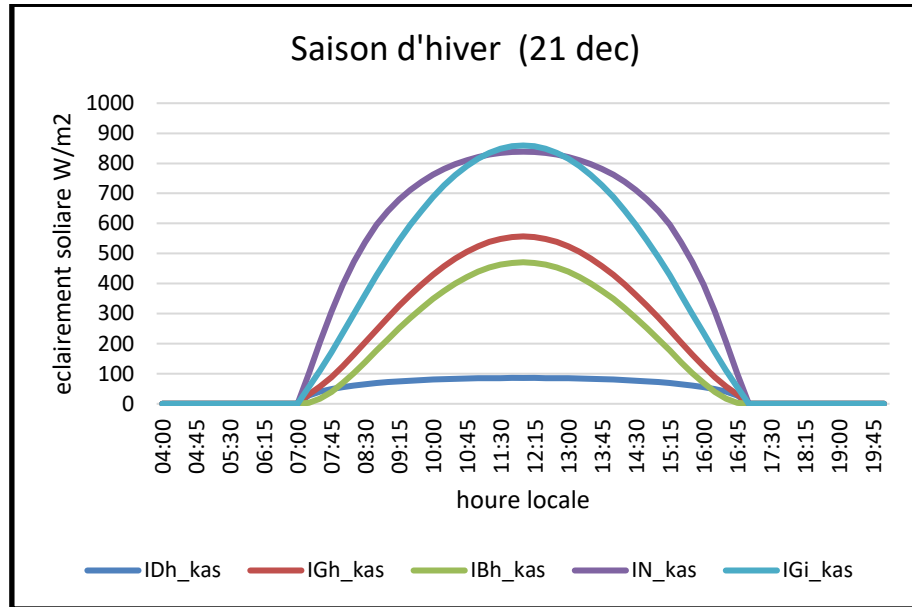


Figure III. 11 : Eclairement incident sur un plan horizontal et un plan incliné à la Latitude (32°) pour un jour type du mois de Décembre.

- Saison d'été : Plan horizontal (α, β) = (0, 0) et plan incliné (α, β) = (0, 32)

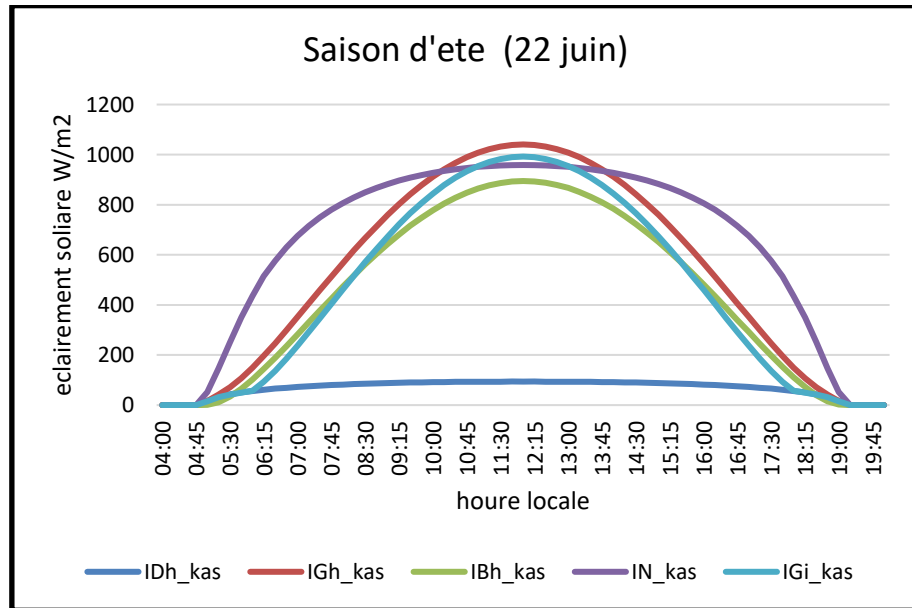


Figure III. 12 : Eclairement incident sur un plan horizontal et un plan incliné à la Latitude (32°) pour un jour type du mois de Juin.

- Saison du printemps : Plan horizontal $(\alpha, \beta) = (0, 0)$ et plan incliné $(\alpha, \beta) = (0, 32)$

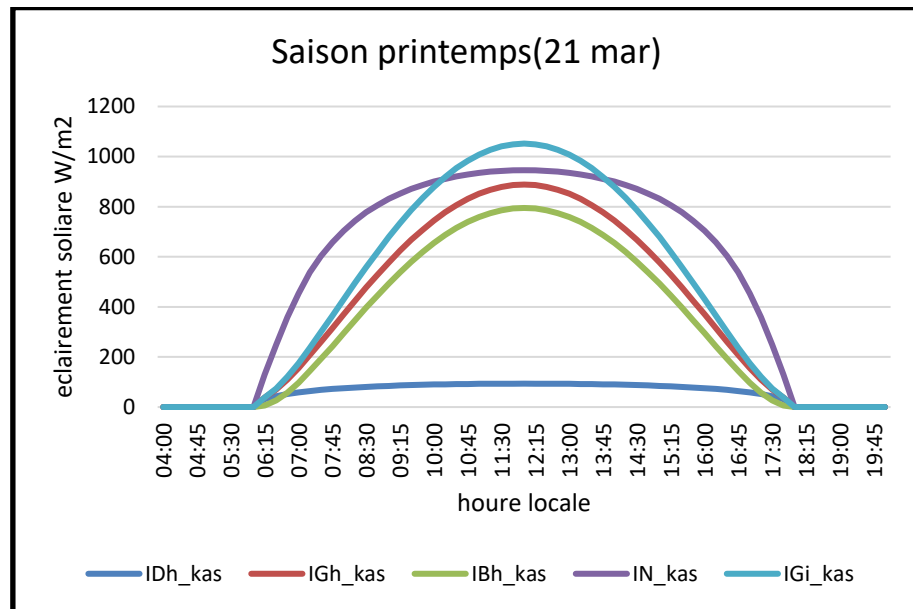


Figure III. 13 : Eclairement incident sur un plan horizontal et un plan incliné à la Latitude (32°) pour un jour type du mois de Mars.

III.5.1.2. Modèle r.sun

- Saison d'hiver : Plan horizontal $(\alpha, \beta) = (0, 0)$ et plan incliné $(\alpha, \beta) = (0, 32)$

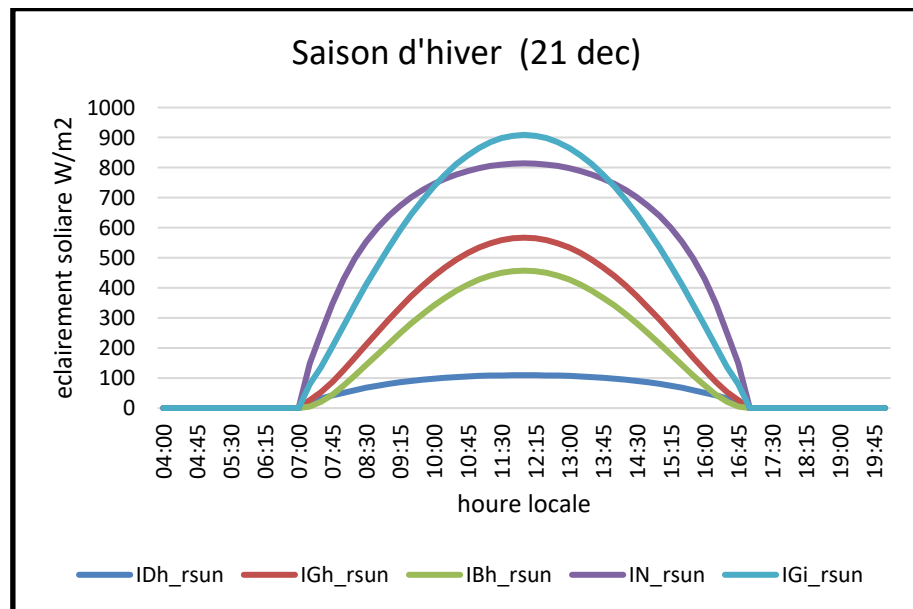


Figure III. 14 : Eclairement incident sur un plan horizontal et un plan incliné à la Latitude (32°) pour un jour type du mois de Décembre.

- Saison d'été : Plan horizontal $(\alpha, \beta) = (0, 0)$ et plan incliné $(\alpha, \beta) = (0, 32)$

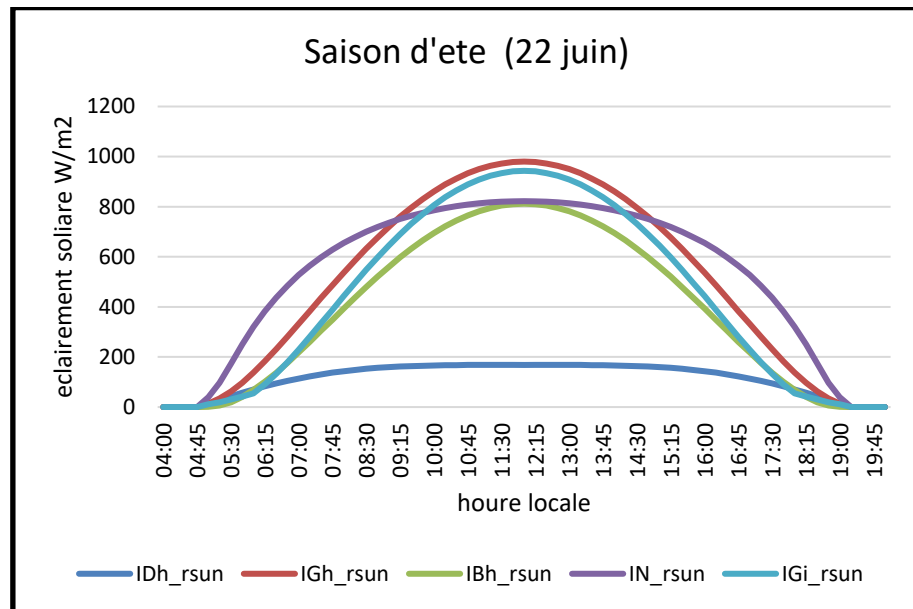


Figure III. 15 : Eclairement incident sur un plan horizontal et un plan incliné à la Latitude (32°) pour un jour type du mois de Juin.

- Saison du printemps : Plan horizontal $(\alpha, \beta) = (0, 0)$ et plan incliné $(\alpha, \beta) = (0, 32)$

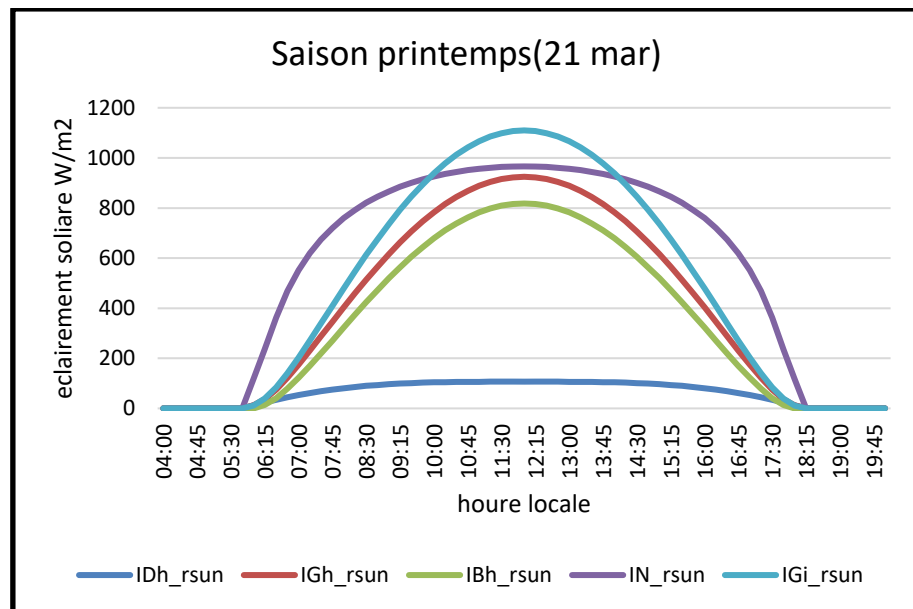


Figure III. 16 : Eclairement incident sur un plan horizontal et un plan incliné à la Latitude (32°) pour un jour type du mois de Mars.

Pour une période hivernale et sur les figures (III.8 ; III.11 ; III.14) on remarque à première vue que les courbes ont une même allure pour les trois modèles avec des valeurs plus élevées pour le modèle Capderou notamment pour l'éclairement direct normal et global horizontale et incliné, et Concernant la saison estivale (Figure III.9 ; III.12 ; III.15), le modèle Kasten à tendance à produire des valeurs plus élevées que le modèle Capderou et le modèle r.sun. Pour la saison du printemps (Figure III.10 ; III.13 ; III.16), les trois modèles se rapprochent avec un léger dépassement du modèle Capderou mais un dépassement élevé pour la courbe de l'éclairement globale incliné pour le modèle r.sun.

III.6. Valeurs mesurées dans URAER

- Saison d'hiver : Plan horizontal (α, β) = (0, 0) et plan incliné (α, β) = (0, 32)

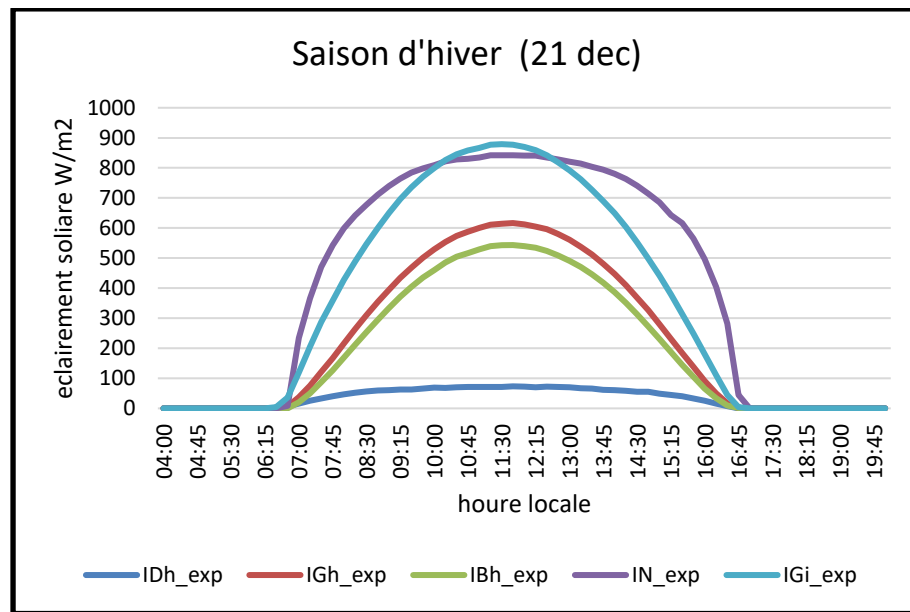


Figure III. 17 : Eclairement incident sur un plan horizontal et un plan incliné à la Latitude (32°) pour un jour type du mois de Décembre.

- Saison d'été : Plan horizontal $(\alpha, \beta) = (0, 0)$ et plan incliné $(\alpha, \beta) = (0, 32)$

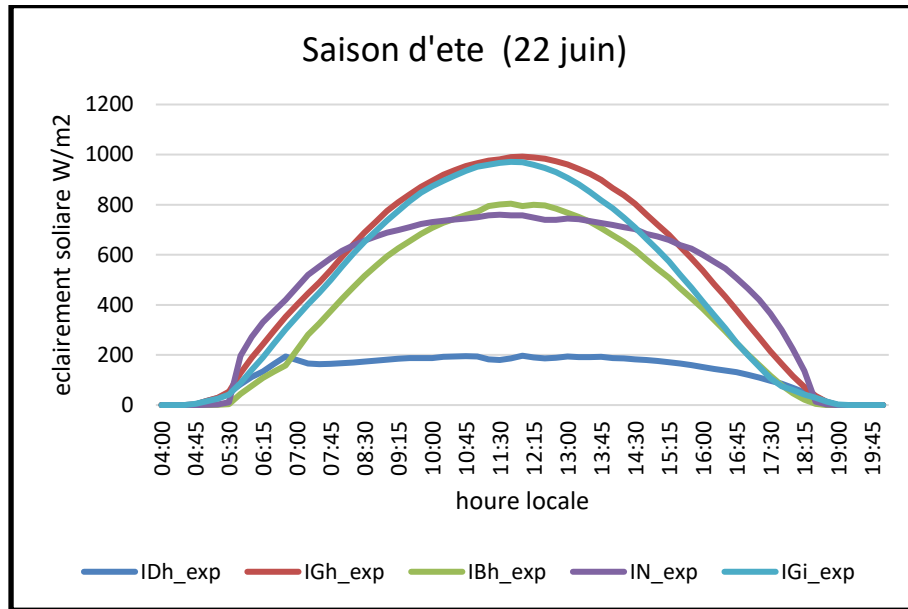


Figure III. 18 : Eclairage incident sur un plan horizontal et un plan incliné à la Latitude (32°) pour un jour type du mois de Juin.

- Saison du printemps : Plan horizontal $(\alpha, \beta) = (0, 0)$ et plan incliné $(\alpha, \beta) = (0, 32)$

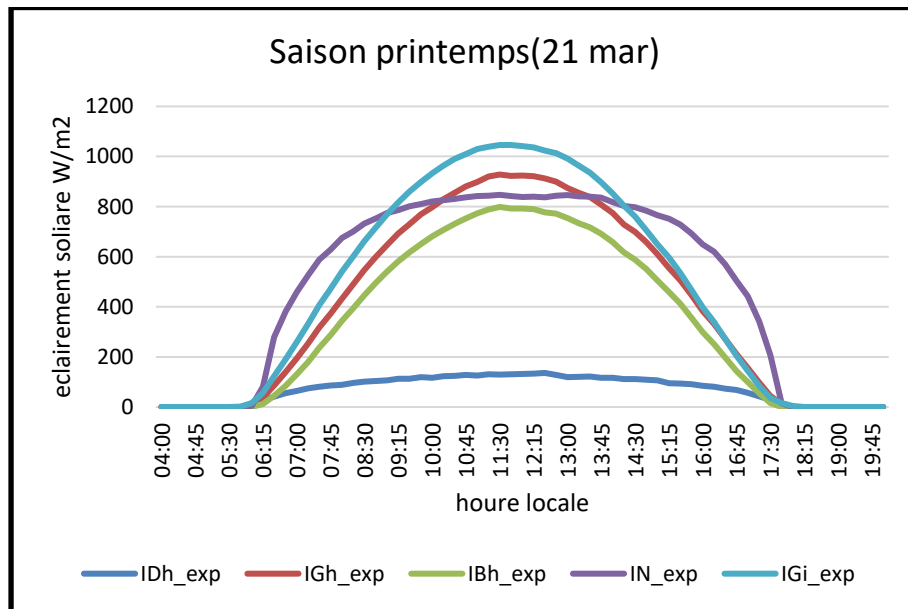


Figure III. 19 : Eclairage incident sur un plan horizontal et un plan incliné à la Latitude (32°) pour un jour type du mois de Mars.

III.7. Comparaison des valeurs estimées aux valeurs mesurées

Dans le but d'évaluer les estimations réalisées par les trois modèles pour l'éclairement solaire par ciel clair, un ensemble de simulations a été exécutées, couvrant des situations des différentes périodes de l'année, afin d'avoir une grande représentativité des résultats. Pour obtenir une validation de l'éclairement solaire, nous allons comparer quelques valeurs de l'éclairement solaire délivrées par les trois modèles avec les valeurs mesurées sur le site de Ghardaïa.

Afin de sélectionner les journées claires, une inspection visuelle a été menée sur une longue série de données durant une année, les jours mi-clairs ou à ciel couvert ont été rejetés. Deux dates sont retenues pour être présentées, une période hivernale du 11 Décembre pour le jour le plus court de l'année et une autre estivale correspondante au 30 Juin pour le jour le plus long de l'année.

Pour la comparaison des résultats mesure aux résultats estime on a eu les figure (III.20 – III.25), qui chaque une présent une Comparaison des résultats obtenus par les trois modèles avec les données expérimentales pour :

- l'éclairement global horizontal
- l'éclairement direct horizontal
- l'éclairement direct normal
- l'éclairement global incliné

Et ces résultats sont pour différent périodes de l'année (la période hivernale ; la période estivale ; la période de printemps)

- Jour d'hiver avec $(\alpha, \beta) = (0, 0)$: Global horizontal (IG_h) et Direct horizontal (IB_h)

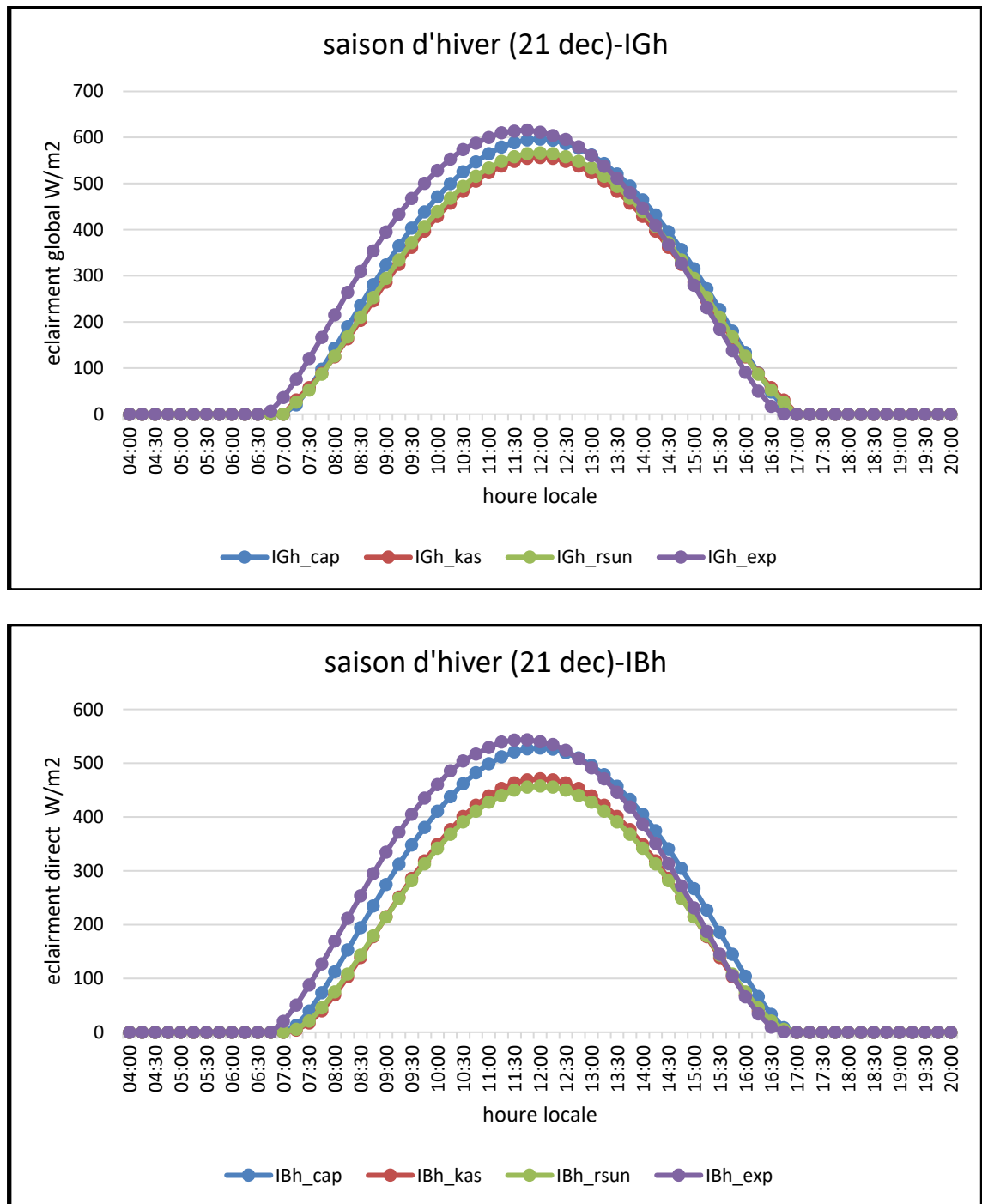


Figure III. 20 : Comparaison des résultats obtenus par les trois modèles avec les données expérimentales pour l'éclairement global et direct horizontal pour un jour clair d'hiver.

- Jour d'hiver : Direct normal (IN) et Global incliné (IGi), $(\alpha, \beta) = (0, 32^\circ)$

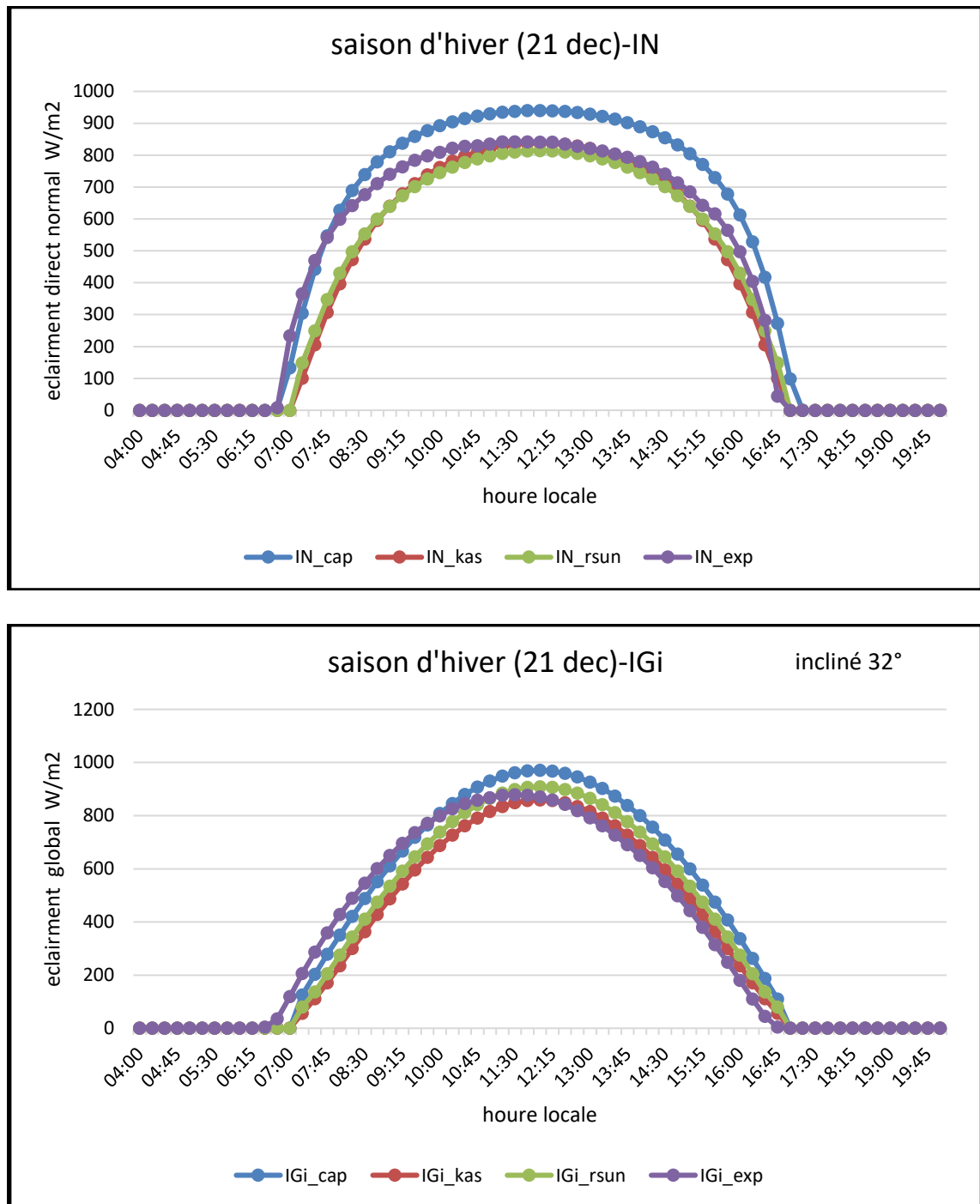


Figure III. 21 : Comparaison des résultats obtenus par les trois modèles avec les données expérimentales pour l'éclairage direct normal et global incliné pour un jour clair d'hiver.

- Jour d'été avec $(\alpha, \beta) = (0, 0)$: Global horizontal (IG_h) et Direct horizontal (IB_h)

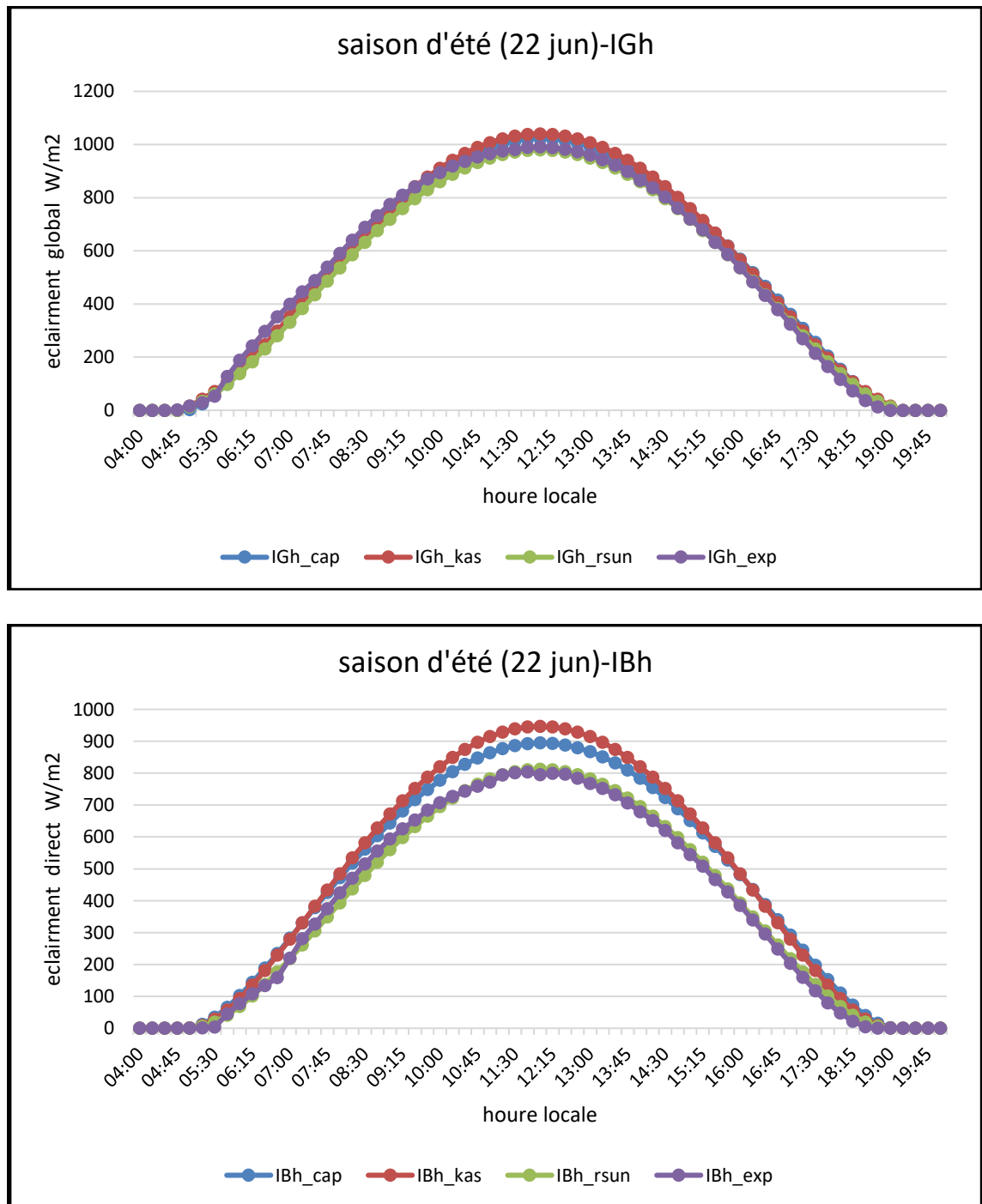


Figure III. 22 : Comparaison des résultats obtenus par les trois modèles avec les données expérimentales pour l'éclairement global et direct horizontal pour un jour clair d'été.

- Jour d'été : Direct normal (IN) et Global incliné (IG_i), (α, β) = (0, 32°)

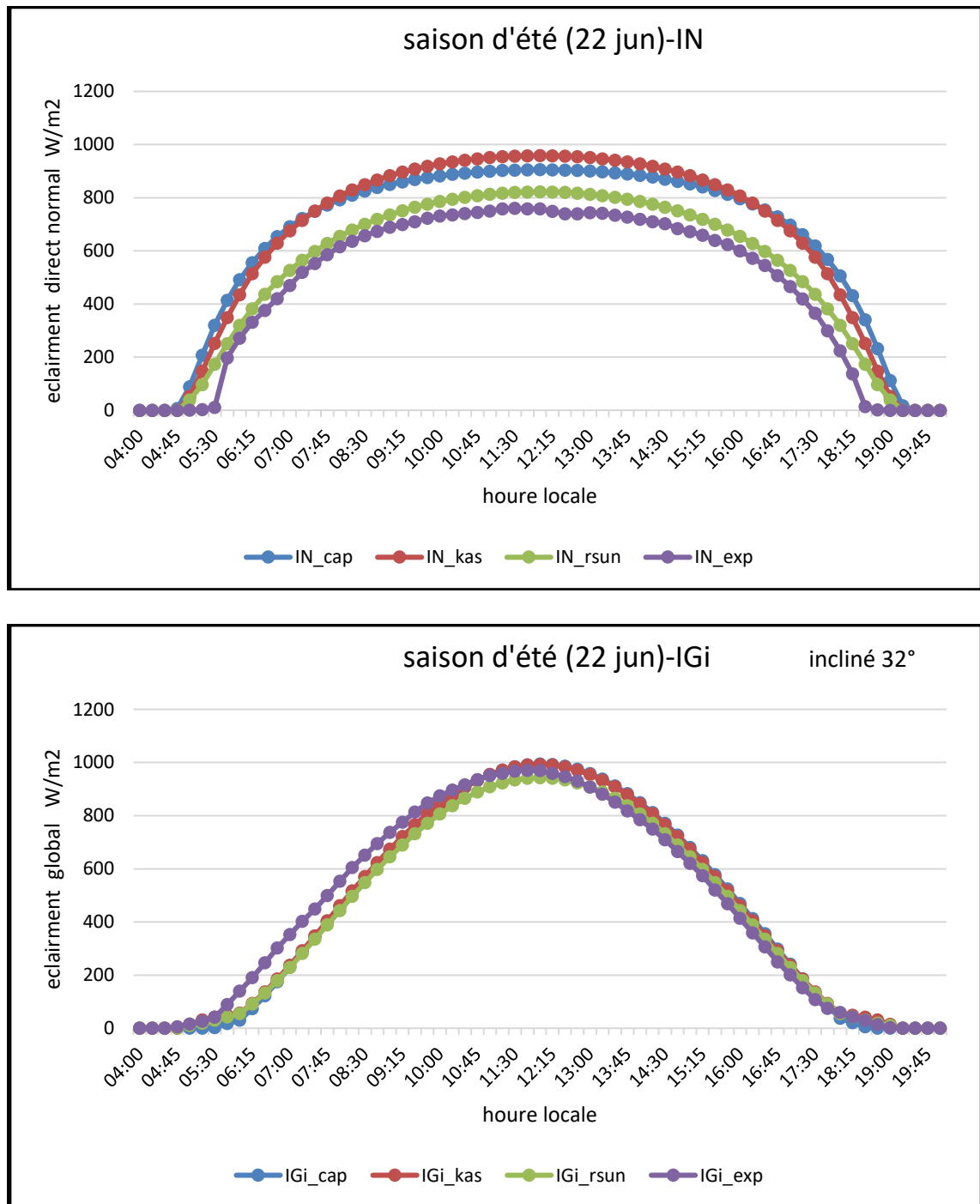


Figure III. 23 : Comparaison des résultats obtenus par les trois modèles avec les données expérimentales pour l'éclairement direct normal et global incliné pour un jour clair d'été.

- Jour du printemps : Global horizontal (IG_h), $(\alpha, \beta) = (0, 0)$ et Global incliné (IG_i), $(\alpha, \beta) = (0, 32^\circ)$

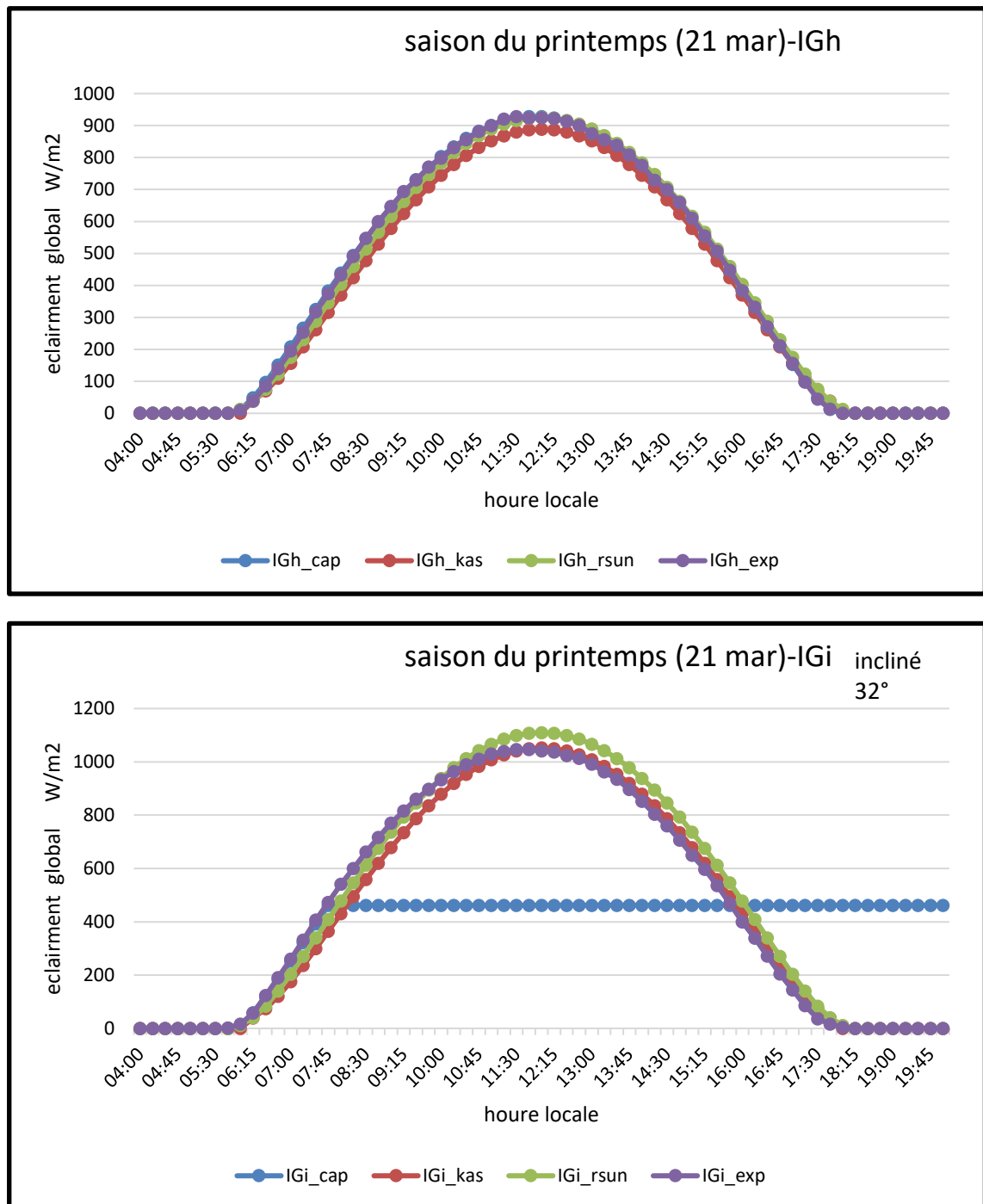


Figure III. 24 : Comparaison des résultats obtenus par les trois modèles avec les données expérimentales pour l'éclairage global horizontal et global incliné pour un jour clair du printemps.

- Jour du printemps : Direct normal (IN) et Direct horizontal (IB_h), $(\alpha, \beta) = (0, 0)$

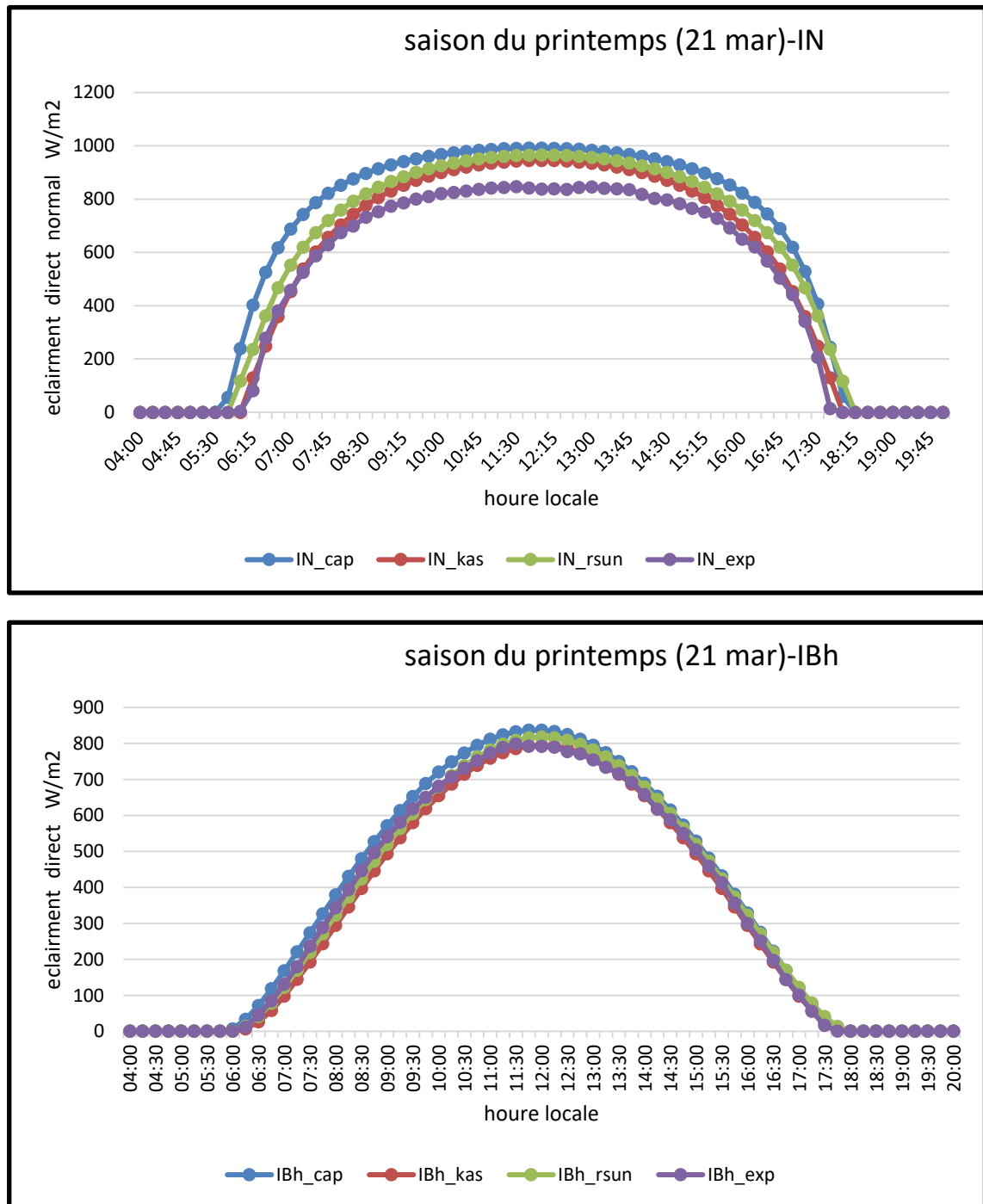


Figure III. 25 : Comparaison des résultats obtenus par les trois modèles avec les données expérimentales pour le rayonnement direct normal et direct horizontal pour un jour clair du printemps.

III.8. Discussion des résultats

Pour la discussion des résultats il existe deux facteurs d'influence importants l'un est le facteur des jours types standards choisie et l'autre est le facteur de la courbe expérimentale (valeurs expérimentales de **URAER**).

D'après les figures précédant, nous remarquons en premier lieu que :

Le rayonnement solaire varie au cours de la journée. Il est faible au voisinage du lever et du coucher du soleil et il atteint le maximum au milieu de la journée puisque le ciel garde le même état pendant une journée (ciel clair). A première vue, nous pouvons constater que, les résultats obtenus (plus précisément en période hivernale) indiquent la présence d'un écart minimal au lever et au coucher et qui devient important au milieu de journée.

-Pour la période hivernale (Figure III.20 ; III.21) :

On remarquera que les trois modèles ont différentes courbes pour leur différente composante d'éclairement solaire, en vois que pour l'éclairement globale horizontale et l'éclairement direct horizontale le modèle Capderou il est le plus proche de la courbe expérimentale avec un écart important qui peut atteindre les 100 W/m^2 entre le modèle Capderou et les modèles Kasten et r.sun, et on voit que le modèle r.sun et Kasten sont presque identique, mais en cas de l'éclairement direct normal et l'éclairement globale incliné on voit que le modèle Capderou présente un très bon rapprochement de valeurs mesurées mais il s'écarte de l'expérimental après certains temps , le modèle Kasten et r.sun présente une légère sous-estimation d'éclairement global incliné et direct normal.

-Pour la période estivale (Figure III.22 ; III.23) :

On remarquera que pour la période estivale le modèle r.sun et le modèle le plus rapproche de la courbe expérimentale pour les différents éclairagements (IGh, IBh, IN, IGi) avec un écart élevé de l'éclairement direct normal IN et l'éclairement direct IBh pour les modèles Capderou et Kasten et la courbe expérimentale.

-Pour la période de printemps (Figure III.24 ; III.25) :

Pour la période de printemps chaque modèle il se rapproche de la courbe expérimentale par différents éclairagement solaire, pour le cas d'éclairement globale horizontale le modèle Capderou donne une bonne estimation avec une légère différence avec le modèle r.sun, pour le cas de l'éclairement globale incliné le modèle r.sun et Kasten sont les plus proches de la courbe expérimentale mais le modèle r.sun s'écart après certain temps de la courbe expérimentale.

Pour le cas d'éclairement direct normal tous les modèles s'écartent d'une valeur élevée de la courbe expérimentale et le modèle Kasten est le modèle le plus proche d'elle, dans le cas d'éclairement direct horizontale tous les courbes se rapprochent de la courbe expérimentale et le modèle Kasten reste le plus proche d'elle.

Le traitement des graphes des figures III.12 - III.15 montre que d'une manière générale, on peut dire que le modèle de Capderou donne une bonne estimation d'éclairement solaire pour la période hivernale par rapport aux autres modèles, et le modèle r.sun donne une bonne estimation d'éclairement solaire pour la période estivale.

III.9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu la programmation des différents modèles d'estimation d'éclairement solaire et on a eu les différentes valeurs d'éclairement solaire pour les trois modèles : modèle Capderou ; modèle r.sun ; modèle Kasten ainsi que les valeurs expérimentales obtenues depuis l'URAER et on a fait la comparaison entre différents composants de l'éclairement (I_{Gh} ; I_{Bh} ; I_N ; I_{Gi}) pour chaque modèle.

A la fin nous avons discuté sur les résultats obtenus et on a fait un traitement des graphes pour 3 différentes périodes (hiver ; été ; printemps)

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

La protection de l'environnement est devenue une préoccupation majeure ces dernières années. De nombreuses voies de recherches se sont donc orientées vers l'utilisation des énergies renouvelables, dont l'énergie solaire.

L'énergie solaire et, par conséquent, l'éclairement solaire résultat 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'éclairement 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, une modélisation et une comparaison d'éclairement solaire par les modèles Capderou et Kasten et R.sun est présentée et réalisée. Et nous avons abordé une étude bibliographique sur le sujet, De là, nous sommes passés à la programmation des modèles à l'aide du programme Matlab. Les valeurs instantanées d'éclairement direct **IBh** et global horizontal **IGh**, direct normal **IN** et global incliné **IGi** ont été estimées en utilisant les trois modèles, dans ces modèles plusieurs grandeurs ont été utilisées à savoir : la déclinaison du soleil δ , l'angle horaire ω , la hauteur du soleil γ_s et l'azimut solaire χ_s , Masse atmosphérique **mA** et l'épaisseur de Rayleigh **δR** et le facteur le plus important qui est le facteur de trouble de Linke **TL**.

Les transmittances nécessaires pour le calcul des composantes d'éclairement solaire par ciel clair, incident sur un plan horizontal et sur un plan quelconque. Ce travail nous a permis de confronter des valeurs mesurées et celles estimées par les trois modèles paramétrés. Et à travers les modèles qui ont été programmés et compare, il a été constaté que les résultats obtenus sont satisfaisants.

Ces travaux nous ont permis de comparer les valeurs mesurées et estimées à travers trois modèles déterminants. Où l'on note que le modèle Capderou donne une bonne estimation de l'incidence sur le plan horizontal et aussi les meilleurs résultats sont obtenus, surtout en saison hivernale. On note également que le modèle r.sun donne les meilleurs résultats en saison

CONCLUSION GENERALE

estivale, d'où l'on constate que le modèle r.sun donne une bonne estimation de l'irradiance solaire et plus précisément de l'incidence sur un plan incliné. On note donc que les résultats obtenus à partir des modèles approchent les données réelles avec une grande précision.

De là, nous concluons que le modèle Capderou est le meilleur et le plus précis pour calculer l'estimation de l'éclairement solaire.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] [Q.Sylvain, Les Centrales Solaires à Concentration, France: Université de Liège, Faculté des sciences appliquées, 2007].
- [2] Samira MOUHOU-CHAOUCHI "Etude statistique du rayonnement solaire sur un plan incliné", MEMOIRE DE MAGISTER, ECOLE DOCTORALE « ENERGIES RENOUVELABLES », UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID, Tlemcen, 2012.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Benjamin Dawid Swart, A Method for Accurate Measurement of Heliostat Mirror Orientation, Thesis presented in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Engineering (Electronic) in the Faculty of Engineering at Stellenbosch University, March 2017.
- [7] Chabani zeyneb; "La part des énergies renouvelables dans le bilan énergétique national à l'horizon 2030", Mémoire de magister; Université M'Hamed Bougara-Boumerdes; 2014.
- [8] M. SLAMA Fateh ; Mémoire de Magister ; Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique ; UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF.
- [9] Amardjia-Adnani Hania « ALGERIE ENERGIE SOLAIRE ET HYDROGENE », livre, office des publications universitaires ; Alger ;905/2007.
- [10] BAROUD Hinde et DJEKAOUA Habiba « Estimation de l'ensoleillement par deux modèles semi-empiriques dans la région de Ghardaïa », Université de Ghardaïa ;2018
- [11] Gitay Habiba, Suarez Avelino, Dokken David Jon, T. Watson Robert : Les changements climatiques et la biodiversité, avril 2002.
- [12] Rojey Alexandre : Energie et climat, Réussir la transition énergétique, Edition Technip 2008.
- [13] Comparatif des différentes technologies ; Agence de l'énergie, juillet 2007.

- [14] Jacques Vernier, Les énergies renouvelables, Paris, Presses universitaires de France, coll. « Que sais-je ? » (no 3240), 2005, 3e éd. (ISBN 2130544495)
- [15] Christian Bizouard, « Constantes utiles » ;Centre d'orientation de la Terre du Service international de la rotation terrestre et des systèmes de référence à l'Observatoire de Paris, mis à jour le 13 février 2014 (consulté le 15 janvier 2016).
- [16] Ben Guehza Mohammed Lakhdar. Impact De L'espace Entre Les Deux Vitrages Sur Le Rendement D'un Capteur Solaire. MEMOIRE Présenté pour l'obtention du diplôme de Magister. Université De Kasdi Merbah Ourgla le : 24 - 2 – 2009.
- [17] Data and statistics - World : Electricity 2017 [archive], Agence internationale de l'énergie, 24 septembre 2019.
- [18] Atlas_solaire_Algerien_CDER
- [19] Thèse de Doctorat BAILEK Nadiem Étude et Modélisation du Flux Solaire globale sur surface inclinée dans la région de Touat Université de SIDI BEL ABBES 2017-2018
- [20] Magister BOUDEN ABDELMALEK Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque Université Mentouri de Constantine 2008
- [22] J.M. Chasseriau, 'Conversion thermique du rayonnement solaire', Ed. Dunod, France., 1984.
- [23] R.Bernard, G. Menguy et M. Schwartz, 'Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications', technique & documentation, Ed. Lavoisier, France, 250 p., 1983.
- [24] 'Matlab/Simulink Tutorial', School of Electrical, Electronic and Computer Engineering, Release 13, Version 6.5, 2nd Edition, 2003.
- [25] A. Labouret, 'Energie Solaire Photovoltaïque', Ed. Dunod, France, 302 p., 2003.
- [26] (simpleDocteur Merad née MesriMokhtaria & Professeur Cheknane Ali « Introduction au gisement Solaire algérien Th) :
- [27] M. Katz, A. Baille and M. Mermier, 'Atmospheric turbidity in a semi rural site i', Solar energy, vol. 28, pp. 323 – 327, 1982.
- [28] M. Katz, A. Baille and M. Mermier, 'Atmospheric turbidity in a semi rural site', Solar Energy, vol. 28, pp. 329 – 334, 1982.
- [29] F. Linke, 'Transmissions - koeffizient und trübungsfaktor', beiträge zur physik der atmosphäre, vol. 10, pp. 91 – 103, 1922.
- [30] Magister BAISSI Mohamed Tahar Etude théorique et expérimentale des paramètres de fonctionnement d'un capteur solaire plan Université Mohamed Khider – Biskra 28/06/2012

- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] M. Capderou, 'Atlas Solaire de l'Algérie', Modèles Théoriques et Expérimentaux, Vol. 1, T1, Office des Publications Universitaires, EPAU, Algérie, 375 p., 1987.
- [34] R. Bernard, G. Menguy et M. Schwartz, 'Le Rayonnement Solaire, Conversion Thermique et applications', Technique & Documentation, Ed. Lavoisier, France, 250 p., 1983.
- [35] A. Khedim, 'L'Energie Solaire, Utilisation Thermique et Photovoltaïque', ANEP, 359 p., 2005.
- [36] J.M. Chasseriau, 'Conversion Thermique du Rayonnement Solaire', Ed. Dunod, France, 273 p., 1984.
- [37] F. Kasten and A.T. Young, 'Revised Optical Air Mass Tables and Approximation Formula', Applied Optics, Vol. 28, N°22, pp. 4735 - 4738, 1989.
- [38] F. Linke, 'Transmissions - Koeffizient und Trübungsfaktor', Beiträge zur Physik der Atmosphäre, Vol. 10, pp. 91 - 103, 1922.
- [39] F. Kasten, 'A Simple Parameterization of Two Pyrheliometric formulae for determining the Linke Turbidity Factor', Meteorology Rdsch, Vol. 33, pp. 124 - 127, 1980.
- [40] K. Feussner and P. Dubois, 'Trübungsfaktor, Precipitable Water', Staub. Gerlands Beitr., Geophysical, Vol. 27, pp. 132 - 175, 1930.
- [41] A. Louche, G. Peri and M. Iqbal, 'An analysis of Linke Turbidity Factor', Solar Energy, Vol.37, N°6, pp. 393 - 396, 1986.
- [42] 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.
- [43] C.P. Jacovides, 'Model Comparison for the Calculation of Linke's Turbidity Factor', International Journal of Climatology, Vol. 17, N°5, pp. 551 - 563, 1997
- [44] R. Dogniaux, 'De l'influence de l'Estimation du Facteur Total de Trouble Atmosphérique Sur l'Evaluation du Rayonnement Solaire Direct par Ciel Clair. Application aux Données Radiométriques de l'IRM à Uccle', Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM), Miscellanea, Serie C, N°20, 1984.
- [45] 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.

- [46] 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.
- [47] B. Gschwind, L. Ménard, M. Albuisson and L. Wald, 'Converting a Successful Research Project into a Sustainable Service: The Case of the SoDa Web Service', Environmental Modelling and Software, Vol. 21, N°11, pp. 1555 – 1561, 2006.
- [48] C. Rigollier, O. Bauer and L. Wald, 'On the Clear Sky Model of the 4th European Solar Radiation Atlas with Respect to the Heliosat Method', Solar Energy, Vol. 68, N°1, pp. 33 – 48, 2000.
- [49] M. Lefèvre, M. Albuisson and L. Wald, 'Description of the software HELIOSAT-II for the conversion of images acquired by METEOSAT satellites in the visible band into maps of solar radiation available at ground level', Rapport, Groupe Télédétection & Modélisation, Centre d'Energétique, Armines, Ecole des Mines de Paris, France, 43 p., 2004.
- [50] METEONORM version 6.0, 'Handbook Part II: Theory', Swiss Federal Office of Energy (SFOE), Technical Documentation, 101 p., 2007.
- [51] J. Bernard. Energie solaire calculs et optimisation, ellipse Edition marketing. (2004).
- [52] S.M.A. Bekkouche, 'Modélisation du Comportement Thermique de Quelques Dispositifs Solaires', thèse de doctorat, université de Tlemcen, 2009.
- [53] Marc Côte, Guide d'Algérie: paysages et patrimoine, Algérie, Média-Plus, 1996, 319 p. (ISBN 9961-922-00-X), p. 240-242