

N° d'ordre : 3529

THESE

En vue de l'obtention du : **DOCTORAT**

Centre de Recherche : Centre de Recherche en Energie

Structure de Recherche : Equipe d'Energie Solaire et d'Environnement

Discipline : physique

Spécialité : Energétique, Energie Renouvelable et environnement

Présentée et soutenue le 09 / 10 / 2021 par :

Mohammed BENCHRIFA

Elaboration d'une base de données solaires pour les sites marocains

JURY

Mohamed BOUKALOUCHE	PES, Université Mohammed V- Rabat, Faculté des Sciences	Président
Morad ELBAZ	PES, Université Mohammed V- Rabat, Faculté des Sciences	Rapporteur/ Examineur
Abdellah MECHAQRANE	PES, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah – Fès, Faculté des Sciences et Techniques	Rapporteur/ Examineur
Hassan NFAOUI	PES, Université Mohammed V- Rabat, Faculté des Sciences	Rapporteur
Mohammed Najib BARGACH	PES, Université Mohammed V- Rabat, Faculté des Sciences	Expert/Examineur
Khadija KABIDI	Dr, Direction Régionale de la Météorologie Nationale - Rabat	Invitée
Rachid TADILI	PES, Université Mohammed V- Rabat, Faculté des Sciences	Directeur de thèse

Année Universitaire : 2020/2021

Dédicace

Je dédie ce rapport à tous ceux que j'aime.

Mes premières pensées vont tout particulièrement à ma grand-mère et mes Parents à qui je dois ce succès et pour qui le sens du sacrifice, au cours de ces longues années d'étude, ne s'est jamais tari et a été le plus précieux de leurs cadeaux. Grâce à leur soutien et à leurs encouragements subtilement dosés, ils m'ont permis de vivre mes années de scolarité avec sérénité et efficacité.

A tous ceux que j'aime.

A tous mes amis qui m'ont soutenu lorsque j'avais besoin d'eux.

À tous mes amis.

REMERCIEMENT

*Le travail que j'ai l'honneur de vous présenter, a été réalisé dans le Laboratoire d'énergie solaire et environnement de la faculté des sciences de Rabat, sous la direction de Monsieur **Rachid TADILI**.*

*Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à monsieur **Rachid TADILI**, Professeur d'enseignement supérieur à faculté des sciences de Rabat, pour m'avoir accueilli au sein de son équipe ainsi que pour sa disponibilité malgré un emploi du temps parfois surchargé, mais aussi pour son expérience et ses conseils scientifiques qu'il m'a prodigué tout au long de ce travail.*

*J'exprime mes sincères remerciements à monsieur **Mohamed BOUKALOUCHE**, professeur d'enseignement supérieur à la faculté des sciences de Rabat, qui s'est intéressé à mon travail et de m'avoir honoré en acceptant de présider le jury.*

*Je voudrais également remercier monsieur **Morad EL BAZ**, professeur d'enseignement supérieur à la faculté des sciences de Rabat, d'avoir accepté d'être rapporteur de cette thèse.*

*Je voudrais aussi remercier monsieur **Abdellah MECHAQRANE**, professeur d'enseignement supérieur à la faculté des sciences et techniques de Fès, pour sa collaboration permanente avec notre laboratoire, d'avoir participé à l'installation du réseau des stations de mesures et en particulier la station installé à Fès, pour le suivi exemplaire qu'il a assuré pour mettre à notre disposition des données fiables et d'avoir accepté d'être rapporteur de cette thèse.*

*J'exprime mes remerciements à Monsieur **Hassan NFAOUI**, professeur d'enseignement supérieur à la faculté des sciences de Rabat, d'avoir accepté d'être rapporteur de cette thèse.*

*Mes remerciements vont également à monsieur **Mohammed Najib BARGACH**, professeur d'enseignement supérieur à la faculté des sciences de Rabat et ex-directeur du laboratoire, d'avoir participé et contribuer à l'installation du réseau des stations de mesures et d'avoir accepté d'examiner cette thèse.*

*Mes remerciements s'adressent à madame **Khadija KABIDI**, docteure en charge de la Direction Régionale de la Météorologie Nationale – Région Nord et membre associé de notre laboratoire, d'avoir accepté de faire partie du jury.*

*Je tiens à remercier monsieur **Hassan ELMOURJANI**, ainsi que toute l'équipe du LESE pour les échanges scientifiques et techniques et l'atmosphère conviviale qui s'est bien entretenue sans oublier une pensée à l'honneur du défunt **Hamid ALIOUATE**. J'espère rencontrer encore dans ma carrière une telle atmosphère de travail.*

Enfin, mes remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce projet.

Résumé

Toutes les études sur les systèmes solaires thermiques ou photovoltaïques nécessitent la connaissance des flux solaires relatifs aux différentes composantes de l'irradiation solaire. Or dans la majorité des cas, les mesures de ces flux ne sont pas disponibles.

L'objectif de ce travail est de réaliser une banque de données comportant toutes les composantes du rayonnement solaire, énergétique ou spectral, à l'échelle horaire et journalière. Cette banque de données a été constituée, d'une part, par les mesures réalisées en plusieurs sites marocains et, d'autre part, des estimations issues des modèles qu'on a établis. L'ensemble des données constituant cette banque soit environ 17 millions de valeurs, a été soumis à des tests de vérification et à des tests statistiques de validation.

Cette banque de données permettra donc de quantifier le potentiel solaire pour chaque type de rayonnement solaire et pour tous les sites marocains ce qui permettra le dimensionnement de tous les types des systèmes solaires. Elle constituera un support fondamental pour les ingénieurs, les bureaux d'études, et tous les organismes qui s'intéressent à développer l'utilisation des systèmes solaires dans les différentes régions marocaines. Elle constituera également un outil de base important pour les chercheurs dans leurs travaux de modélisation et de simulation des nouveaux systèmes.

Mots-clés : Énergie solaire ; Rayonnement solaire global ; Rayonnement solaire diffus ; Corrélation ; Prévision ; Estimation.



Abstract

All studies of solar systems need solar fluxes values related to the different components of solar radiation. However, for most sites, measurements are not available.

The main objective of this work is to create an updated database that includes all components of solar radiation, either energetic or spectral, on a daily and hourly scale. This data bank was constituted, firstly, by the measurements carried out in several Moroccan sites and secondly, by the estimated data resulting from the models that we established. All data constituting this bank, approximately 17 million values, were subjected to verification and statistical validation tests. This work will lead us to quantify the Moroccan solar potential and to determine the dimensions of all types of solar thermal and photovoltaic systems. Consequently, the obtained database will be a fundamental support for engineers, designers, and all organizations interested in developing solar systems, in different regions throughout Morocco. It will also be a basic tool for researchers in modeling and simulating the new solar systems.

Key Words: Solar energy ; Global solar radiation ; Diffuse solar radiation ; correlation ; Prediction ; Estimation.

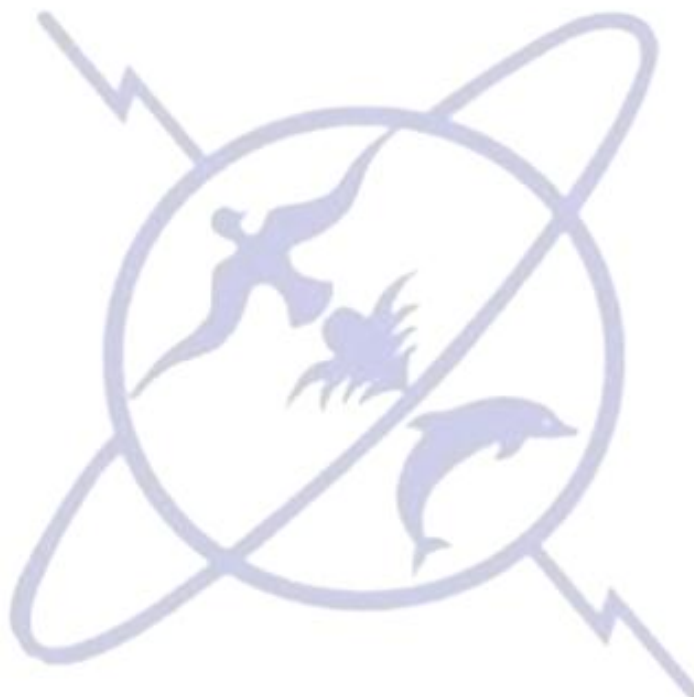


Table des Matières

Liste des figures.....	I
Liste des Tableaux.....	V
Nomenclature.....	VII

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Rayonnement solaire : Mesures, traitement et méthodes d'estimation

Introduction.....	4
I. Rayonnement solaire hors atmosphère.....	4
I.1 Constante solaire.....	4
I.2 Rayonnement solaire d'une surface horizontale.....	4
I.2.1 Éclairement instantané	4
I.2.2 Irradiation horaire.....	5
I.2.3 Irradiation journalière.....	5
I.3 Rayonnement solaire d'une surface inclinée.....	5
I.3.1 Éclairement instantané.....	5
I.3.2 Irradiation quotidienne.....	6
II. Rayonnement solaire au voisinage du sol.....	7
II.1 Éclairement énergétique direct.....	7
II.2 Éclairement énergétique diffus.....	7
II.3 Éclairement énergétique réfléchi.....	7
II.4 Éclairement énergétique global.....	8
III. Paramètres utilisés pour caractériser le rayonnement solaire en fonction de l'état du ciel et de l'atmosphère.....	8
III. 1 La fraction d'insolation.....	8
III. 2 L'indice de clarté.....	9
III. 3 Le facteur de nébulosité.....	9
IV. Mesures du rayonnement solaire.....	9
IV.1 Instruments de mesures.....	9
IV.1.1 Héliographe.....	9
IV.1.2 Pyrhéliomètre.....	10
IV.1.3 Pyranomètre.....	10
IV.1.4 Pyranomètre avec bande pare-soleil (diffusomètre).....	11
IV.1.5 Albédomètre	11
IV.1.6 Pyrgéomètre (Radiomètre PIR)	11
IV.1.7 Radiomètre TUVR.....	12
IV.2 Étalonnage des instruments de mesure.....	12
IV.3 Description du réseau de station de mesure implanté par le LESE.....	13
IV.3.1 Description du climat des sites appartenant au réseau de station.....	13
IV.3.1.1 Le climat de Fès.....	13
IV.3.1.2 Le climat de Marrakech.....	13
IV.3.1.3 Le climat de Tanger.....	13
IV.3.1.4 Le climat de Rabat.....	13
IV.3.2 Description des instruments de mesure implanté par le LESE dans le réseau de station de mesure.....	14
IV.3.3 Stockage des données.....	15
V. Collecte des données brutes et banque de données.....	18
V.1 Collecte par le réseau météo.....	18

V.2 Collecte des données par Satellites.....	18
V.3 Banque de données.....	18
VI. Bibliographie des Modèles d'estimation du rayonnement solaire.....	19
VI.1 Estimation des valeurs journalières du rayonnement solaire.....	19
VI.1.1 Irradiation Globale.....	19
VI.1.1.1 Extrapolation de l'irradiation Globale.....	19
VI.1.1.2 Modèle d'estimation de l'irradiation globale à partir des variables climatiques.....	21
VI.1.2 Corrélation de l'irradiation diffuse.....	22
VI.1.3 Corrélation de l'irradiation directe.....	24
VI.1.4 Estimation de l'irradiation solaire globale d'un plan incliné.....	25
VI.1.4.1 Modèles isotropes.....	27
VI.1.4.2 Modèles anisotropes.....	27
VI.1.5 Estimation des composantes spectrales du rayonnement solaire.....	29
VI.1.5.1 Corrélation du rayonnement Ultra-violet.....	29
VI.1.5.2 Corrélation du rayonnement photo-synthétiquement active.....	30
VI.1.5.3 Corrélation du rayonnement Infra-rouge.....	31
VI.2 Estimation des valeurs horaires du rayonnement solaire.....	31
VI.2.1 Méthodes d'estimation de l'irradiation globale.....	31
VI.2.1.1 La méthode de collares et Pereira.....	31
VI.2.2 Méthode d'estimation de l'irradiation diffuse.....	32
VI.2.2.1 Méthode de Hay.....	32
VI.2.2.2 Corrélation de Orgill et Hollande pour l'estimation du diffus.....	33
VI.2.2.3 Erbs et al corrélation pour l'estimation du diffus.....	33
VI.2.2.4 Corrélation de A. De Miguel et al. pour l'estimation du diffus.....	33
VI.2.3 Méthode d'estimation de l'irradiation directe.....	33
VI.2.3.1 La méthode de Liu et Jordan pour l'estimation du rayonnement direct.....	34
VI.2.4 Estimation de l'irradiation globale inclinée.....	34
VI.2.5 Estimation des composantes spectrales.....	35
VI.2.5.1 Le modèle d'Escobedo.....	35
VI.2.5.2 Le modèle de Hamatti et al.....	35
Conclusion.....	36

Chapitre II : élaboration, comparaison et validation des modèles d'estimation des irradiances solaires

Introduction.....	38
I. Elaboration des modèles d'estimation des composantes solaires journalières...39	39
I.1 Extrapolation de l'Irradiation solaire globale journalière.....	39
I.2 Estimation de l'irradiation solaire diffuse journalière.....	41
I.3 Estimation de l'irradiation solaire globale journalière d'un plan incliné.....	43
I.4 Estimation des composantes spectrales du rayonnement solaire.....	44
II. Elaboration des modèles d'estimation des composantes solaires horaires.....48	48
II.1 Estimation des valeurs horaires de l'irradiation globale I_h	48
II.2 Estimation de l'irradiation solaire diffuse horaire.....	52
II.3 Estimation de l'irradiation solaire globale horaire d'un plan incliné.....	54
II.4 Estimation des composantes spectrales du rayonnement solaire horaire.....	55
III. Sélection des modèles d'estimation appropriés pour le Maroc.....	59
III.1 Modèles d'estimation des Composantes horaires	59
III.1.1 Irradiation globale.....	59
III.1.1.1 Moyenne mensuelle des valeurs horaires.....	59
III.1.1.2 Valeurs horaires.....	60
III.1.2 Irradiation diffuse.....	61

III.2 Modèles d'estimation des valeurs journalières.....	62
III.2.1 Irradiation globale.....	62
III.2.2 Irradiation diffuse.....	64
Conclusion.....	66
IV. Validation des modèles sélectionnés.....	66
VI.1 Validation des modèles d'estimation des valeurs horaires.....	66
VI.1.1 Validation du modèle d'estimation de I_h	66
VI.1.2 Validation du modèle d'estimation de I_d (De Miguel et al).....	68
VI.2 Validation des modèles d'estimation des valeurs journalière.....	70
VI.2.1 Validation du modèle d'estimation de H_h	70
VI.2.2 Validation du modèle d'estimation de H_d	72
VI.3 Validation des composantes solaires spectrales.....	74
VI.3.1 Validation des composantes solaires spectrales horaires.....	74
VI.3.1.1 Composante solaire infrarouge.....	74
VI.3.1.2 Composante solaire photo-synthétiquement active	75
VI.3.1.3 Composante solaire ultraviolet	75
VI.3.2 Validation des composantes solaires spectrales journalières.....	76
VI.3.2.1 Composante solaire infrarouge.....	76
VI.3.2.2 Composante solaire photo-synthétiquement active.....	77
VI.3.2.3 Composante solaire ultraviolet.....	77
Conclusion.....	79

Chapitre III : Réalisation d'une banque de données des irradiations solaires pour les sites marocains.

Introduction.....	81
I. Année représentative.....	81
II. Réalisation d'une base de données des irradiations solaires journalières.....	82
II.1 Présentation de la méthode d'élaboration d'une base de données journalière.....	82
II.2 Résultats.....	84
II.2.1 Cartes des valeurs journalières du rayonnement global sur plan horizontal...85	
II.2.2 Cartes des valeurs journalières du rayonnement direct sur plan horizontal...86	
II.2.3 Cartes des valeurs journalières du rayonnement diffus sur plan horizontal...87	
II.2.4 Cartes des valeurs journalières du Rayonnement global d'un plan incliné avec $s =$ latitude du lieu.....88	
II.2.5 Cartes du cumul annuel des irradiations énergétiques journalières.....89	
II.2.6 Cartes des valeurs journalières du Rayonnement photo-synthétiquement active.....90	
II.2.7 Cartes des valeurs journalières du Rayonnement Ultra-violets.....91	
II.2.8 Cartes des valeurs journalières du Rayonnement Infrarouge.....92	
II.2.9 Cartes du cumul annuel des irradiations spectrales journalières.....93	
II.2.10 Tableaux des valeurs journalières maximales, minimales et moyennes des valeurs journalières pour chaque mois de l'année représentative.....94	
III. Réalisation d'une base de données des irradiations solaires horaires.....	96
III.1 Présentation de la méthode d'élaboration d'une banque de données horaires.....	96
III.2 Résultats.....	98
III.2.1 Présentation graphique de l'évolution horaire des irradiations solaires pour la ville de Fès.....	99
III.2.2 Présentation graphique de l'évolution horaire des irradiations solaires pour la ville de Laâyoune.....	101
III.2.3 Présentation graphique de l'évolution horaire des irradiations solaires pour la ville de Marrakech.....	103

III.2.4 Présentation graphique de l'évolution horaire des irradiances solaires pour la ville de Rabat.....	105
III.2.5 Présentation graphique de l'évolution horaire des irradiances solaires pour la ville de Tanger.....	107
Conclusion.....	109
Conclusion générale.....	110
Références Bibliographiques.....	112

Annexe I : Les tests statistiques

I. Ecart moyen.....	117
II. Ecart absolu moyen.....	117
III. Erreur relative.....	117
VI. Le pourcentage de l'erreur absolue moyenne.....	117
V. Erreur quadratique moyenne.....	117
IV. Le coefficient de corrélation.....	118

Annexe II : Coordonnées astronomiques et phénomènes atmosphériques

I. Données astronomiques.....	119
I.1 Repérage d'un point à la surface de la Terre.....	119
I.1.1 Latitude φ	119
I.1.2 Longitude L.....	119
I.2 Mouvement de la terre autour du soleil.....	120
I.3 Sphère céleste (repérage du soleil par rapport à la terre).....	120
I.4 Les coordonnées horizontales (azimut et la hauteur).....	121
I.4.1 Azimut a.....	121
I.4.2 Hauteur h.....	121
I.4.3 Angle zénithal θ_z	121
I.5 Les coordonnées horaires (angle horaire et la déclinaison).....	122
I.5.1 Déclinaison δ	122
I.5.2 Angle horaire ω	122
I.5.3 Durée astronomique du jour.....	123
I.6 Définitions des temps.....	123
I.6.1 Le temps universel (TU).....	123
I.6.2 Le temps solaire moyen (TSM).....	124
I.6.3 Le temps solaire vrai (TSV).....	124
I.6.4 Le temps officiel ou le temps légal).....	125
I.7 Course du soleil dans le ciel. Abaques d'ensoleillement).....	125
I.7.1 Le mouvement journalier.....	125
I.7.2 La trajectoire du Soleil au fil des saisons.....	126
II. Phénomènes atmosphériques.....	128
II.1 Spectre du rayonnement émis par le soleil.....	128
II.2 L'atmosphère terrestre.....	128
II.3 Atténuation du rayonnement solaire par l'atmosphère.....	129
II.3.1 Diffusion moléculaire ou diffusion de Rayleigh.....	129
II.3.2 Absorption par les gaz atmosphériques.....	129
II.3.2.1 Absorption par l'ozone.....	129
II.3.2.2 Absorption par la vapeur d'eau.....	129
II.3.3 Extinction par les aérosols.....	130
II.4 Notion de masse d'air optique m.....	131
II.5 Bilan énergétique relatif à un rayonnement incident.....	131
Conclusion.....	131

LISTE DES FIGURES

- Figure I. 1** : Composantes de l'éclairement solaire d'une surface inclinée.
- Figure I. 2** : Héliographe.
- Figure I. 3** : Pyrhéliomètre.
- Figure I. 4** : Diffusomètre
- Figure I. 5** : Pyrgéomètre
- Figure I. 6** : Radiomètre TUVR
- Figure I. 7** : Schéma du protocole expérimental de prises des mesures
- Figure I. 8** : Schéma de disposition des instruments de mesures de la station du laboratoire d'Energie Solaire et d'Environnement
- Figure I. 9** : Station solaire du laboratoire d'Energie solaire et d'Environnement. Annexe des Orangers, Faculté des Sciences.
- Figure I. 10** : Station météorologique de Tanger.
- Figure II. 1** : Irradiation solaire globale journalière d'Agadir (a), El-Jadida (b), Tétouan (c), Marrakech (d) en fonction de l'irradiation solaire globale de Fès.
- Figure II. 2** : Nuage de points des valeurs de K_d en fonction de K_t pour des sites représentatifs du climat marocains.
- Figure II. 3** : Variations des valeurs journalières des composantes spectrales H_{UV} , H_{PAR} , H_{IR} et l'irradiation globale d'un plan horizontal H_h .
- Figure II. 4** : Nuage de points des valeurs journalières des composantes H_{UV} , H_{PAR} , H_{IR} en fonction du rayonnement solaire global H_h , tenant compte de l'état météorologique.
- Figure II. 5** : Comparaison des valeurs estimées par le modèle C-P-R aux valeurs mesurées des irradiances solaires globales horaires pour le site de Rabat.
- Figure II. 6** : Présentations graphiques de a et b en fonction de $\sin(\overline{\omega_c} - 70^\circ)$ pour le site de Marrakech.
- Figure II. 7** : Représentation graphique de k_d en fonction de k_t utilisant les mesures des sites représentatives.
- Figure II. 8** : Variations de I_{UV} , I_{PAR} , I_{IR} et I_h pendant une journée
- Figure II. 9** : Nuage de points des valeurs horaires des composantes I_{UV} , I_{PAR} et I_{IR} en fonction du rayonnement solaire global I_h , tenant compte de l'état météorologique pour les villes de Rabat et Fès.

- Figure II. 10** : Représentation graphique des valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées pour différents modèles d'estimation de T_h . Comparaison entre le modèle de Collares - Pereira et Rabl (a) et notre modèle T_h (b).
- Figure II. 11** : Représentation graphique des valeurs estimées par notre modèle en fonction des valeurs mesurées.
- Figure II. 12** : Représentation graphique des valeurs horaires estimées en fonction des valeurs mesurées pour les différents modèles d'estimation du diffus I_d . (a) Modèle d'Orgill et Hollands, (b) Modèle de De Miguel et al, (c) Modèle d'Erbs et al, (d) Notre modèle de I_d
- Figure II. 13** : Représentation graphique des valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées pour différents modèles d'estimation du rayonnement solaire global journalier. (a) Notre modèle de H_h . (b) Le modèle de Nfaoui. (c) Le modèle de Benkaddour (d) Le modèle de Lemmini (e) Le modèle de J. Fan et al.
- Figure II. 14** : Représentation graphique des valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées pour différents modèles d'estimation de H_d . (a) modèle de Nfaoui (b) Notre modèle de H_d . (c) Modèle de L. Wang et al. (d) Modèle de Benkaddour
- Figure II. 15** : Représentation graphique des valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées pour le rayonnement global horaire à Rabat (a), Tanger (b), Fès (c) et Marrakech (d).
- Figure II. 16** : Représentation graphique des valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées pour le rayonnement diffus à Rabat (a), Tanger (b), Fès (c) et Marrakech (d).
- Figure II. 17** : Représentation graphique des valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées pour le rayonnement global journalier de Marrakech (a), Rabat (b) et Tanger (c).
- Figure II. 18** : Représentation graphique des valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées pour le rayonnement diffus de Rabat (a), Tanger (b), Fès (c) et Marrakech (d).
- Figure II. 19** : Représentation graphique des valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées pour le rayonnement I_{IR} de Rabat (a), Fès (b).
- Figure II. 20** : Représentation graphique des valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées pour le rayonnement I_{PAR} de Rabat (a), Fès (b).
- Figure II. 21** : Représentation graphique des valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées pour le rayonnement I_{UV} à Fès (a) et à Rabat (b).

- Figure II. 22** : Représentation graphique des valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées pour le rayonnement H_{IR} à Rabat (a) et à Fès (b).
- Figure II. 23** : Représentation graphique des valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées pour le rayonnement H_{PAR} à Rabat (a) et à Fès (b).
- Figure II. 24** : Représentation graphique des valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées pour le rayonnement H_{UV} à Rabat (a) et à Fès (b).
- Figure III. 1** : Schéma des étapes de réalisation de la banque de données solaires journalières pour le Maroc.
- Figure III. 2** : Cartes des valeurs journalières des irradiances globales sur plan horizontal pour les sites marocains.
- Figure III. 3** : Cartes des valeurs journalières des irradiances directes sur plan horizontal pour les sites marocains
- Figure III. 4** : Cartes des valeurs journalières des irradiances diffuses sur plan horizontal pour les sites marocains
- Figure III. 5** : Cartes des valeurs journalières des irradiances globales sur plan incliné (S =latitude du lieu) pour les sites marocains
- Figure III. 6** : Carte du cumul annuel des irradiances solaires journalières pour les sites marocains
- Figure III. 7** : Cartes des valeurs journalières des irradiances photo-synthétiquement actives pour les sites marocains.
- Figure III. 8** : Cartes des valeurs journalières des irradiances Ultra-violetes pour les sites marocains
- Figure III. 9** : Cartes des valeurs journalières des irradiances infrarouges pour les sites marocains.
- Figure III. 10** : Cartes du cumul annuel des irradiances journalières des composantes spectrales sur plan horizontal pour les sites marocains
- Figure III. 11** : Schéma des étapes de réalisation de la banque de données solaires horaires pour le Maroc.
- Figure III. 12** : Présentation graphique de l'évolution horaire des irradiances solaires durant l'année représentative pour la ville Fès. (a) Irradiation globale, (b) Irradiation diffuse, (c) Irradiation direct, (d) Irradiation inclinée, (e) Irradiation photosynthétiquement active, (e) Irradiation infrarouge, (f) Irradiation ultra-violet.
- Figure III. 13** : Présentation graphique de l'évolution horaire des irradiances solaires durant l'année représentative pour la ville de Laâyoune. (a) Irradiation globale, (b) Irradiation diffuse, (c) Irradiation direct, (d) Irradiation inclinée,

(e) Irradiation photo-synthétiquement active, (f) Irradiation infrarouge,
(g) Irradiation ultra-violet.

Figure III. 14 : Présentation graphique de l'évolution horaire des irradiances solaires durant l'année représentative pour la ville de Marrakech. (a) Irradiation globale, (b) Irradiation diffuse, (c) Irradiation direct, (d) Irradiation inclinée, (e) Irradiation photo-synthétiquement active, (f) Irradiation infrarouge, (g) Irradiation ultra-violet.

Figure III. 15 : Présentation graphique de l'évolution horaire des irradiances solaires durant l'année représentative pour la ville de Rabat. (a) Irradiation globale, (b) Irradiation diffuse, (c) Irradiation direct, (d) Irradiation inclinée, (e) Irradiation photo-synthétiquement active, (f) Irradiation infrarouge, (g) Irradiation ultra-violet.

Figure III. 16 : Présentation graphique de l'évolution horaire des irradiances solaires durant l'année représentative pour la ville de Tanger. (a) Irradiation globale, (b) Irradiation diffuse, (c) Irradiation direct, (d) Irradiation inclinée, (e) Irradiation photo-synthétiquement active, (f) Irradiation infrarouge, (g) Irradiation ultra-violet.

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Exemples des modèles linéaires pour prédire le rayonnement solaire journalier.

Tableau I.2 : Exemples des modèles quadratiques et cubiques pour prédire le rayonnement solaire journalier.

Tableau I.3 : Equations de corrélations établies par Escobedo et al. des valeurs horaires des composantes spectrales du rayonnement solaire H_{UV} , H_{PAR} et H_{IR} (Wh/m^2) en fonction du rayonnement solaire global H_h (Wh/m^2) pour les trois conditions du ciel.

Tableau I.4 : Equations de corrélations, établies par Hamatti et al., des valeurs horaires des composantes spectrales du rayonnement solaire H_{UV} , H_{PAR} et H_{IR} (Wh/m^2) en fonction du rayonnement solaire global H_h (Wh/m^2) pour les trois conditions du ciel.

Table II.1 : Les valeurs des coefficients des équations d'extrapolation du rayonnement globale pour tous les sites marocains.

Tableau II.2 : Équations de corrélation pour les valeurs quotidiennes des composantes spectrales du rayonnement solaire (Wh / m^2) en fonction du rayonnement solaire global H_h (Wh / m^2) pour les trois conditions du ciel.

Tableau II.3: Indicateurs statistiques calculés à partir des valeurs estimées par le modèle de Collares-Pereira et Rabl et des valeurs mesurées sur le site de Rabat.

Tableau II. 4: les valeurs des coefficients a et b calculé à partir des mesures des sites représentatifs.

Tableau II.5 : Les valeurs des facteurs a', a'', b' et b'' calculés à différents sites

Tableau II. 6 : Équations d'estimation des valeurs horaires des composantes spectrales du rayonnement solaire en fonction du rayonnement solaire global I_h pour les trois conditions du ciel.

Tableau II. 7: comparaison des modèles d'estimation de \bar{I}_h .

Tableau II. 8: Vérification de la validité de notre modèle de I_h .

Tableau II. 9 : comparaison des modèles d'estimation de I_d .

Tableau II. 10 : Comparaison des modèles d'estimation de H_h

Tableau II. 11: Comparaison des modèles d'estimation de H_d .

Tableau II. 12 : Les performances du modèle utilisé pour prédire I_h .

- Tableau II. 13** : Performances du modèle utilisé pour la prédiction de I_d .
- Tableau II. 14**: Performances du modèle utilisé pour la prédiction de H_h .
- Tableau II. 15** : Performances du modèle utilisé pour la prédiction de H_d
- Tableau II. 16** : Performances du modèle utilisé pour la prédiction de I_{IR}
- Tableau II. 17** : Performances du modèle utilisé pour la prédiction de I_{PAR}
- Tableau II. 18** : Performances du modèle utilisé pour la prédiction de I_{UV}
- Tableau II. 19** : Performances du modèle utilisé pour la prédiction de H_{IR}
- Tableau II. 20** : Performances du modèle utilisé pour la prédiction de H_{PAR}
- Tableau II. 21** : Performances du modèle utilisé pour la prédiction de H_{UV}
- Tableau III.1** : Comparaison entre les moyennes annuelles et la moyenne de 10 ans de l'irradiation globale à Fès.
- Tableau III.2** : Extrait d'un fichier de données des composantes solaires (Wh/m^2) de l'année représentative pour le site de Rabat
- Tableau III. 3** : Moyennes mensuelles des valeurs journalières de l'année représentative des différentes composantes du rayonnement solaire en (Wh/m^2). (Site de Rabat)
- Tableau III. 4** : Valeurs maximales des irradiations solaires pour l'année représentative en (Wh/m^2). (Site de Rabat).
- Tableau III. 5** : les valeurs minimales des irradiations solaires journalières de l'année représentative en (Wh/m^2). (Site de Rabat)
- Tableau III. 6** : un exemple de données obtenues après les différentes estimations.

Nomenclature

Majuscules

H : irradiation journalière

I : irradiation horaire

Indices pour H ou I

b : direct (beam)

d : diffus

r : réfléchi

c : ciel clair

o : hors atmosphère

n : sur plan normal

s : sur plan incliné

H_{oh} : irradiation globale journalière hors atmosphère d'un plan horizontal

H_b : irradiation directe journalière d'un plan horizontal

H_d : irradiation diffuse journalière d'un plan horizontal

I_h : irradiation globale horaire d'un plan horizontal

I_b : irradiation direct horaire d'un plan horizontal

I_d : irradiation diffuse horaire d'un plan horizontal

I_{oh} : irradiation globale horaire hors atmosphère d'un plan horizontal

I_{bn} : irradiation direct d'un plan normal

I_{on} : irradiation horaire hors atmosphère d'un plan normal

I_λ : irradiation monochromatique au sol

K_d : coefficient de nébulosité H_d / H

K_t : coefficient de clarté H / H_{oh}

L : longitude

N : durée maximale d'insolation

Minuscules :

a : azimut du soleil

h : hauteur du soleil

l : angle d'incidence du rayon solaire sur un plan incliné
 j : jour de l'année compté à partir du 1^{er} Janvier
 m : masse atmosphérique
 n : durée d'insolation
 t : temps
 t_c : heure du lever du soleil
 t_i : heure du lever du soleil
 s : angle sur plan incliné avec l'horizontale
 z : altitude

Lettres grecques :

γ : orientation du capteur par rapport au Sud
 δ : déclinaison du soleil
 φ : latitude
 ρ : albédo du sol
 σ : fraction d'insolation n/N
 ω_i : angle horaire au milieu de l'heure
 ω_c : angle horaire du coucher

Introduction générale

Depuis quelques années, le monde a connu une augmentation exponentielle de la demande en énergie, ce qui a incité les scientifiques à chercher des moyens innovants pour exploiter la puissance du soleil. Or les technologies d'énergie solaire utilisent l'énergie et la lumière du soleil pour fournir du chauffage, de l'éclairage, de l'eau chaude, de l'électricité et même du refroidissement, pour les maisons, les entreprises et les industries. Par conséquent, les données du rayonnement solaire au niveau du sol sont importantes pour ces applications et bien d'autres telles que la météorologie, l'ingénierie et l'agronomie (notamment en physique des sols, hydrologie agricole, modélisation et estimation de l'évapotranspiration des cultures) ainsi que dans le secteur de la santé et de la recherche dans de nombreux domaines des sciences naturelles.

Le rayonnement solaire atteignant la haute atmosphère terrestre est à une quantité plutôt constante dans le temps. Mais, le rayonnement atteignant un certain point sur la surface de la Terre est de nature aléatoire, en raison des gaz, des nuages et de la poussière dans l'atmosphère, qui absorbent et / ou diffusent le rayonnement à différentes longueurs d'ondes. Pour cette raison, l'obtention des données de rayonnement fiables au niveau du sol nécessite des mesures systématiques. Cependant, dans la plupart des pays, la densité spatiale des stations radiométriques est insuffisante. Cette situation a poussé les chercheurs à élaborer des méthodes de calcul pour fournir des estimations du rayonnement pour les endroits où les mesures ne sont pas effectuées et pour les endroits où il y a des lacunes dans les enregistrements de mesure.

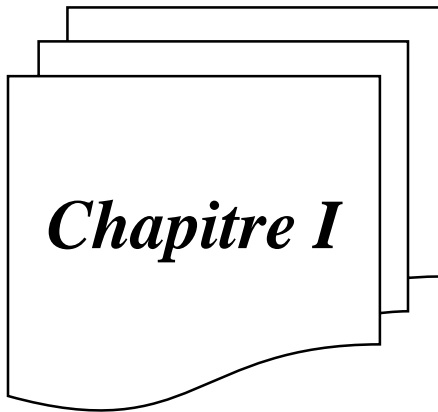
Dans notre cas, pour remédier au problème de manque de données solaire pour le Maroc, il été opté à la réalisation d'une banque de données qui comporte toutes les composantes du rayonnement solaire, énergétique et spectral, à l'échelle horaire et journalière. Cette banque de données permettra donc de quantifier le potentiel solaire pour chaque type de rayonnement solaire et pour tous les sites marocains, ce qui permettra le dimensionnement de tous types de système solaire thermique ou photovoltaïque. La base de données constituera un support fondamental pour les ingénieurs, les bureaux d'études, et tous les organismes qui s'intéressent à développer l'utilisation des systèmes solaires dans les différentes régions marocaines. Elle constituera également un outil de base important pour les chercheurs dans leurs travaux de modélisation et de simulation de nouveaux systèmes.

En effet pour atteindre notre objectif, on va subdiviser notre travail en trois chapitres comme suit :

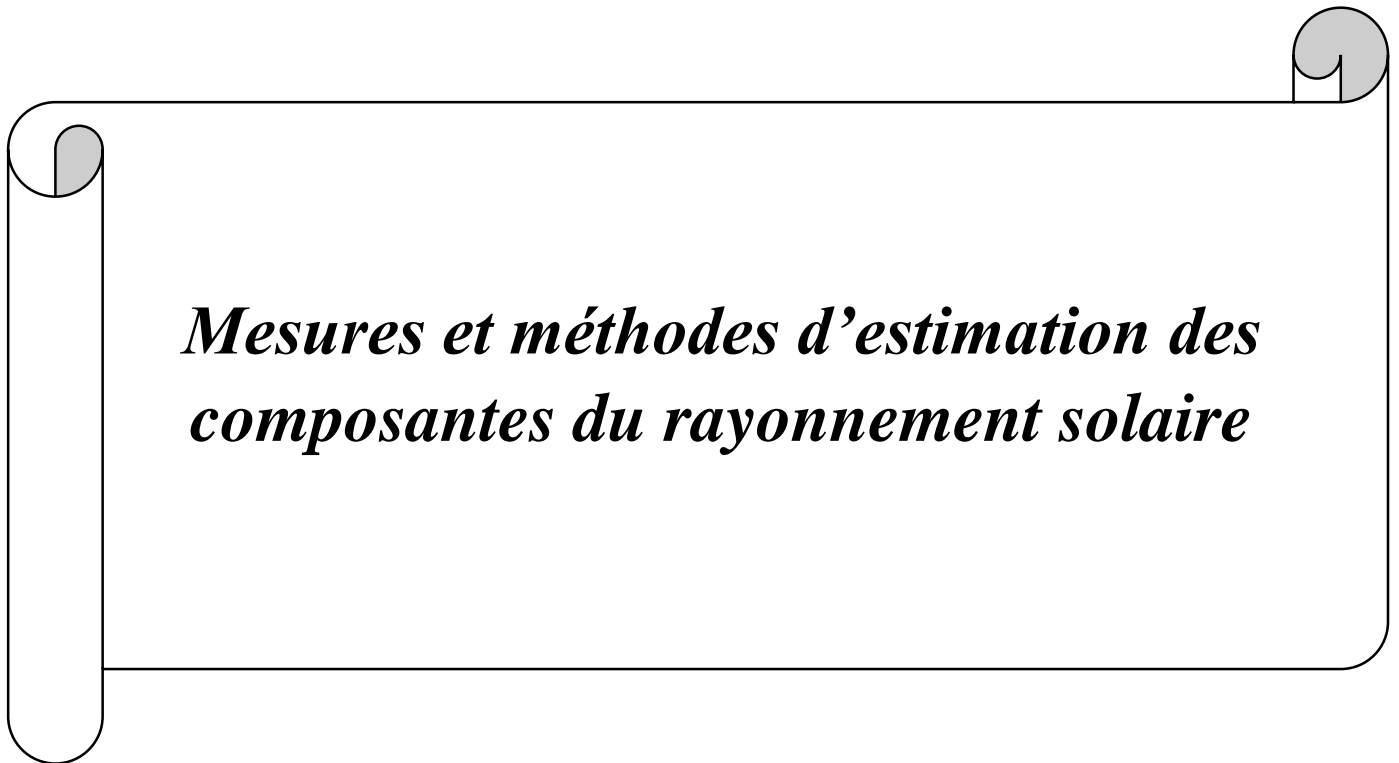
- Dans le premier chapitre, on va évoquer les différentes généralités sur le rayonnement solaire ainsi que les instruments de mesure en plus d'un rappel de quelques modèles d'estimation du rayonnement solaire.

- Dans le deuxième chapitre, on va élaborer nos propres modèles d'estimation. Ces modèles seront par la suite objet d'une étude de validité et de comparaison avec d'autres modèles antérieurs, pour choisir les mieux adaptés aux sites marocains.

- Finalement pour le dernier chapitre, on réalisera notre propre base de données solaire dont on représentera des exemples des résultats dans des cartes qui s'étalent sur tout le Maroc et des figures en 3D, sans oublier des tableaux qui regroupent l'ensemble des irradiations horaires et journalières.



Chapitre I



Mesures et méthodes d'estimation des composantes du rayonnement solaire

Chapitre I : Mesures et méthodes d'estimation des composantes du rayonnement solaire

Introduction

L'étude des systèmes de conversion de l'énergie solaire nécessite la connaissance des mesures des différentes composantes du rayonnement solaires. Dans la plupart des cas, ces mesures ne sont pas disponibles, d'où l'intérêt de développer des méthodes d'estimation de ces irradiances. La technique communément utilisée consiste à définir des paramètres adimensionnels tels que le coefficient de clarté, le coefficient de nébulosité, la fraction d'insolation, et à chercher les corrélations qui les relient avec les composantes solaires. Ces corrélations sont généralement de type polynomial, une forme qui a l'avantage d'être simple à utiliser.

Dans ce chapitre, nous allons passer en revue les différentes composantes du rayonnement solaire, les techniques permettant leurs mesures, ainsi que les différentes méthodes d'estimation.

I. Rayonnement solaire hors atmosphère

I.1 Constante solaire

La constante solaire correspond à l'éclairement énergétique d'une surface normale aux rayons solaires, située à la limite de l'atmosphère. Sa valeur correspondant à la distance moyenne Terre - Soleil $d_{T-S} = 149,6 \cdot 10^6$ km est : $I_0 = (1367 \pm 6) \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Cette valeur moyenne de I_0 a été obtenue grâce à des mesures radiométriques effectuées à bord de satellites américains et européen. I_0 est maximale en hiver, minimale en été, sa variation annuelle est pratiquement sinusoïdale. Elle peut être calculée par la formule empirique [1]:

$$I_0 = 1367 * [1 + 0.034 \cos (0.986 (j - 3))] \quad (1.1)$$

j étant le numéro du jour dans l'année.

I_0 est maximale en hiver, minimale en été. Elle varie $I_0 \propto \frac{1}{d^2}$.

I.2 Rayonnement solaire d'une surface horizontale

I.2.1 Éclairement instantané

L'éclairement solaire d'une surface horizontale placée à la limite de l'atmosphère est lié à la constante solaire par la relation :

$$I_{0h} = I_0 \sin (h) \quad (1.2)$$

Où h est la hauteur du soleil.

I.2.2 Irradiation horaire

L'irradiation horaire s'obtient en intégrant la relation (I.2) sur un intervalle d'une heure

$$H_{oh} = I_0 * (\sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega_i)) \quad (I.3)$$

$\omega_i = (\omega_1 + \omega_2)/2$: L'angle horaire au milieu de l'heure considérée.

φ : La latitude du lieu.

δ : La déclinaison.

I.2.3 Irradiation journalière

C'est la somme sur toute la journée de l'éclairement énergétique. Après intégration, on obtient :

$$H_{oh} = I_0 * (\omega_0 \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega_0)) \quad (I.4)$$

$\omega_0 = \omega_c = -\omega_1$ exprimée en radians et H_{oh} en Wh/m^2 par jour.

I.3 Rayonnement solaire d'une surface inclinée

Considérons une surface d'inclinaison s par rapport à l'horizontale et considérons le cas simple ou la surface est orientée face au sud.

I.3.1 Éclairement instantané

L'éclairement énergétique d'une surface inclinée d'un angle s par rapport à l'horizontale placé à la limite de l'atmosphère est :

$$I_0(s, \gamma) = I_0 \cos(i) \quad (I.5)$$

i étant l'angle d'incidence des rayons solaires sur la surface inclinée, il est donné par :

$$\cos(i) = \cos(h) \sin(s) \cos(a - \gamma) + \sin(h) \cos(s) \quad (I.6)$$

Avec

s : L'angle d'inclinaison du plan récepteur.

$a_r = a - \gamma$: Azimut relative.

h : la hauteur du soleil.

I.3.2 Irradiation quotidienne

L'intégration de l'éclairement instantané d'une surface inclinée placée à la limite de l'atmosphère entre le lever et le coucher du soleil permet d'obtenir l'irradiation journalière :

$$H_0(s, \gamma) = \int_{t_l}^{t_c} I_0(s, \gamma) dt = \frac{12}{\pi} \int_{\omega_l}^{\omega_c} \cos(i) d\omega$$

$$H_0(s, \gamma) = \left(\frac{12}{\pi}\right) * I_0 (-X(\cos(\omega'_l) - \cos(\omega'_c)) + Y(\sin(\omega'_l) - \sin(\omega'_c)) + Z(\omega'_l - \omega'_c)) \quad (1.7)$$

Avec

$$X = \sin(s) \sin(\gamma) \cos(\delta)$$

$$Y = [\sin(s) \sin(\varphi) \cos(\gamma) + \cos(s) \cos(\varphi)] \cos(\delta)$$

$$Z = [\sin(\varphi) \cos(s) - \cos(\varphi) \sin(s) \cos(\gamma)] \sin(\delta)$$

ω'_l et ω'_c sont solution de l'équation $\cos(i) = X \sin(\omega) + Y \cos(\omega) + Z = 0$

Selon l'orientation de la surface on obtient :

Si $\gamma > 0$:

$$\omega'_c = \min(\omega_c, \omega_1)$$

$$\omega'_l = -\min(\omega_c, \omega_2)$$

Si $\gamma < 0$:

$$\omega'_c = \min(\omega_c, \omega_2)$$

$$\omega'_l = -\min(\omega_c, \omega_1)$$

avec

$$\omega_1 = \arccos((-a \cdot b - f)/(a^2 + 1))$$

$$\omega_2 = \arccos((-a \cdot b + f)/(a^2 + 1))$$

$$a = (\cos(\varphi)/\sin(\gamma) * \tan(s)) + (\sin(\varphi)/\tan(\gamma))$$

$$b = (\tan(\delta) \sin(\varphi))/\sin(\gamma)\tan(s) - (\tan(\delta) \cos(\varphi)/\tan(\gamma))$$

$$f = \sqrt{a^2 - b^2 + 1}$$

Pour une surface orientée face au sud, cette expression se réduit à :

$$H_{0s} = I_0 (24/\pi) \cos(\varphi - s) \cos(\delta) (\sin(\omega'_c - (\pi/180)\omega'_c \cos \omega'_c) \quad (1.8)$$

ω'_c est l'angle horaire de coucher sur la surface inclinée.

II. Rayonnement solaire au voisinage du sol

En traversant les différentes couches atmosphériques, le rayonnement solaire subit différents phénomènes de diffusion et d'absorption. Le flux solaire arrivant au sol est alors constitué d'une composante directe en provenance du disque solaire et d'une composante diffuse en provenance de la voûte céleste. Pour une surface inclinée s'ajoute une composante réfléchi par le sol avoisinant la surface.

II.1 Éclairement énergétique direct

C'est la partie du flux solaire du rayonnement transmis à travers les différentes couches atmosphériques, reçu directement du soleil (sans diffusion) par un récepteur plan disposé normalement aux rayons incidents I_{bn} .

Le rayonnement direct sur un plan horizontal :

$$I_b = I_{bn} \sin(h) \quad (I.9)$$

Le rayonnement direct sur un plan incliné, caractérisé par son inclinaison s , son orientation γ par rapport au sud et par l'angle d'incidence i du rayon solaire :

$$I_b(s, \gamma) = I_{bn} \cos(i) \quad (I.10)$$

II.2 Éclairement énergétique diffus

C'est la partie du rayonnement solaire qui a été diffusée par les constituants atmosphériques dans toutes les directions et renvoyée au sol par toute la voûte céleste. Pour un plan horizontal, cet éclairement est noté I_d .

Pour un plan incliné d'un angle s par rapport à l'horizontale, l'évaluation de l'éclairement diffus est basée sur l'hypothèse de l'isotropie du rayonnement solaire diffus. Elle est donnée par :

$$I_{ds} = I_d(1 + \cos(s))/2 \quad (I.11)$$

II.3 Éclairement énergétique réfléchi

Selon la nature du sol (revêtement, couleur...) une partie du rayonnement solaire incidente est réfléchi vers le ciel (figure I.1) avec un facteur de proportionnalité qu'on appelle réflectance ρ ou albédo du sol. Ce rayonnement est aussi calculé avec le modèle de Liu et Jordan [2], dans la plupart des cas, cette composante est la plus faible des trois.

$$I_{rs} = \rho I(1 - \cos(s))/2 \quad (I.12)$$

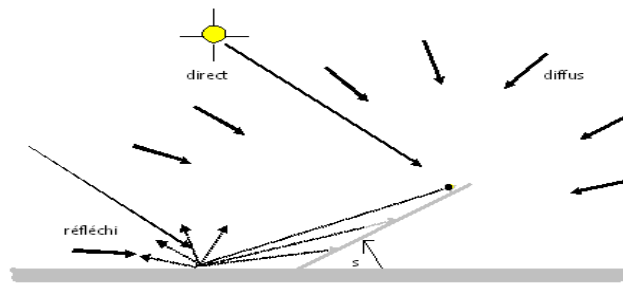


Figure I.1 : Composantes de l'éclairement solaire d'une surface inclinée.

II.4 Éclairement énergétique global

C'est la somme des trois composantes précédentes, il est donné par la relation :

$$I(s, \gamma) = I_{bs} + I_{ds} + I_{rs}$$

$$I(s, \gamma) = I_{bn} \cdot \cos(i) + I_d \cdot ((1 + \cos(s)))/2 + \rho \cdot I \cdot ((1 - \cos(s)))/2 \quad (I.13)$$

III. Paramètres utilisés pour caractériser le rayonnement solaire en fonction de l'état du ciel et de l'atmosphère

Le rayonnement solaire dépend de la position du soleil dans le ciel et du climat du site. La fraction d'insolation, l'indice de clarté et le facteur de nébulosité sont des paramètres descriptifs du climat du site et constituent des données importantes pour l'évaluation de l'énergie disponible.

III. 1 La fraction d'insolation

La fraction d'insolation est le rapport entre la durée d'insolation n mesurée pendant un jour donné et la durée d'insolation maximale N de ce même jour : $\sigma = n / N$.

Elle permet de comparer la durée d'insolation mesurée au sol n par l'Héliographe, à la durée astronomique du jour N .

Pour un ciel clair toute la journée : $n=N$ et $\sigma = 1$

Pour un ciel totalement couvert : $n=0$ et $\sigma = 0$

σ est le paramètre le mieux connu expérimentalement, c'est pourquoi, on l'utilise souvent pour les corrélations entre composantes du rayonnement solaire.

III. 2 L'indice de clarté

L'indice de clarté est le rapport entre l'irradiation solaire globale quotidienne H_h reçue par une surface horizontale au sol et l'irradiation solaire quotidienne H_{oh} reçue hors atmosphère par une surface horizontale.

$$K_t = H_h/H_{oh} \quad (I.14)$$

Il caractérise la transparence de l'atmosphère, puisqu'il donne la proportion du flux solaire incident qui atteint le sol.

III. 3 Le facteur de nébulosité

Le facteur de nébulosité est le rapport entre l'irradiation solaire diffuse quotidienne H_d d'une surface horizontale au sol et l'irradiation globale quotidienne H_h de la même surface.

$$K_d = H_d/H_h \quad (I.15)$$

Pour une journée totalement couverte, H_d est maximum, H_h est minimum, K_d est alors maximum ($H_d \sim H_h$ et $K_d \sim 1$).

Pour une journée claire, H_d est minimum, H_h est maximum et alors K_d est minimum.

IV. Mesures du rayonnement solaire

IV.1 Instruments de mesures

IV.1.1 Héliographe

C'est un appareil qui mesure la durée d'insolation, il est constitué essentiellement d'une sphère de verre, l'axe de la sphère est incliné de la latitude du lieu et l'instrument est orienté sud [3]. Cette sphère concentre les rayons du soleil pour brûler le papier qui est positionné sur le support concave placé derrière la sphère. Ce papier est gradué en échelle temporelle (voir figure I.2). À la fin de la journée, on mesure, en unité de temps, la partie brûlée du papier déterminant ainsi la durée de l'ensoleillement.



Figure I.2 : Héliographe [3].

IV.1.2 Pyrhéliomètre

Le Pyrhéliomètre est un instrument qui permet de mesurer le rayonnement solaire direct. Il est constitué d'un tube long, monté sur un système de poursuite pour que l'axe du tube reste constamment orienté vers le soleil [4] (voir figure I.3). La longueur du tube permet d'éliminer les rayons provenant de la voute céleste, ainsi la thermopile qui se trouve au fond du tube, ne reçoit que le direct. Cette thermopile est constituée d'une série de thermocouples permettant de mesurer le gradient de température entre la soudure chaude et la soudure froide. La réponse est une f.e.m, proportionnelle au gradient de température, elle est mesurée par un voltmètre, un enregistreur ou par un système d'acquisition de données piloté par un ordinateur.

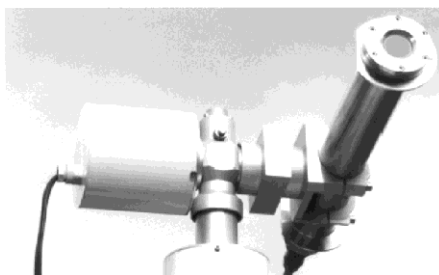


Figure I.3 : Pyrhéliomètre [4].

IV.1.3 Pyranomètre

Le pyranomètre est un instrument qui permet de mesurer le rayonnement solaire global [5]. Il existe deux types de pyranomètre :

-Le pyranomètre à photodiode, c'est une diode de silicium qui est utilisée pour mesurer le flux énergétique du rayonnement global, la gamme spectrale va de 300 à 1100 nm [3].

-Le second appelé pyranomètre à thermopile [6], qui utilise des thermocouples en série mesurant la différence de température entre la soudure chaude et froide générant ainsi une tension proportionnelle au flux intercepté. La gamme spectrale varie de 300 à 2800 nm.

IV.1.4 Pyranomètre avec bande pare-soleil (diffusomètre)

C'est un pyranomètre qui mesure le rayonnement solaire provenant de la voûte céleste excepté le disque solaire (voir figure I.4). Pour cela il est doté d'un système qui occulte le direct qui est soit un disque pare-soleil en poursuite du soleil ou une bande pare-soleil [7].



Figure I.4 : Diffusomètre [7].

IV.1.5 Albédomètre

C'est un pyranomètre tourné vers le sol qui mesure les rayons solaires réfléchis par le sol dans l'intervalle : $0.3 < \lambda < 2.8 \mu\text{m}$, on peut alors calculer l'albédo ρ du sol (coefficient de réflexion du sol) par la relation : $\rho = I_r / I_n$ [8]. Ce coefficient dépend de la nature du sol.

IV.1.6 Pyrgéomètre (Radiomètre PIR)

Le pyrgéomètre permet de mesurer le rayonnement infrarouge émis par la terre où provenant du ciel selon sa direction [10]. Il est doté d'un petit dôme en verre situé au sommet de l'instrument est recouvert d'un filtre qui ne laisse passer que le rayonnement infrarouge (voir figure I.5). La mesure se fait par une thermopile qui génère une tension proportionnelle au niveau de la lumière.



Figure I.5 : *Pyrgéomètre*[10].

IV.1.7 Radiomètre TUVR

Le radiomètre ultraviolet total Eppley (TUVR) est un détecteur permettant de mesurer le rayonnement solaire UVA (0,295 à 0,385 μm) [10]. L'instrument utilise une cellule couche-barrière en sélénium, hermétiquement scellée et protégée par une fenêtre en quartz (voir figure I.6). Un diffuseur en téflon spécialement conçu qui permet de respecter étroitement la loi de Lambert. Un filtre passe-bande étroit (interférence) encapsulé limite la réponse spectrale de la cellule photoélectrique à l'intervalle de longueur d'onde de 0,295 à 0,385 μm .



Figure I.6 : *Radiomètre TUVR* [10].

IV.2 Étalonnage des instruments de mesure

Une exposition prolongée d'un instrument affecte sa sensibilité. Pour corriger le coefficient de sensibilité de l'instrument, on doit le comparer à un instrument étalon (instrument de mesure). Cette opération d'étalonnage doit être effectuée une fois par année.

La technique d'étalonnage consiste à placer l'instrument à étalonner et l'instrument étalon au même endroit pendant une journée ensoleillée complète. Les mesures relevées par les deux instruments permettent de calculer un rapport moyen, qui est utilisé pour corriger la sensibilité de l'instrument à étalonner.

IV.3 Description du réseau de station de mesure implanté par le LESE

IV.3.1 Description du climat des sites appartenant au réseau de station

Au Maroc, le climat est méditerranéen sur les côtes, alors qu'il est continental à l'intérieur des terres tandis qu'il est désertique au sud. Ainsi, le Maroc est divisé en plusieurs régions climatiques, qui peuvent être représentées par les sites suivants :

IV.3.1.1 Le climat de Fès

La situation géographique de Fès à l'intérieur des terres lui confère un climat continental. L'hiver y est froid et l'été chaud. La température moyenne en été est de 35 °C. Les précipitations moyennes sont de 536 mm par an.

IV.3.1.2 Le climat de Marrakech

À Marrakech, le climat est semi-désertique, avec des hivers doux et des étés très chauds. La température moyenne en été est de 36 °C. Le vent peut soulever le sable et la poussière du désert, réduisant ainsi la visibilité. Les précipitations sont rares puisqu'elles s'élèvent à 240 millimètres par an.

IV.3.1.3 Le climat de Tanger

Tanger a un climat méditerranéen avec des hivers doux et des étés peu chauds. La température maximale moyenne en été ne dépasse pas 26 °C. Les précipitations moyennes sont de 800mm par an.

IV.3.1.4 Le climat de Rabat

Rabat se situe à 75m au-dessus du niveau de la mer. Le climat de Rabat est tempéré. Les pluies à Rabat tombent principalement en hiver et relativement peu en été. La température moyenne annuelle à Rabat est de 17,9 °C. Les précipitations annuelles sont de 523 mm par an.

IV.3.2 Description des instruments de mesure implantés par le LESE dans le réseau de station de mesure

Le Laboratoire d'Energie Solaire et d'Environnement de la Faculté des Sciences de Rabat, avait procédé en 2008 à l'installation d'un réseau de stations de mesures en cinq villes marocaines : Rabat, Fès, Tanger Marrakech et Tétouan. A l'aide de convention de coopération, ces stations ont été placées sur les terrasses des Facultés des villes concernées.

Pour chaque station, les mesures des différentes composantes du rayonnement solaire ont été effectuées par les instruments suivants [10,11]:

- Pyranomètre SP-Lite de marque Kipp & Zonen pour les mesures du rayonnement solaire global (précision 2 %). Le même type d'instrument a été utilisé pour mesurer le diffus, mais doté d'une bande pare-soleil pour occulter le direct.
- Pyréliomètre de type Eppley monté sur un suiveur pour mesurer le rayonnement solaire direct (précision 0.5 %).
- Radiomètre Total Ultraviolet Model TUVB, de type Eppley pour mesurer le rayonnement solaire ultra-violet totale (précision 2%).
- Radiomètre de type eppley pour la mesure de rayonnement infra-rouge (précision 0.5%).
- Quantum sensor SKP215, de type campbell scientifique pour la mesure du rayonnement photo-synthétiquement active PAR (précision 0.5%).
- Anémomètre équipé d'une girouette Model wind monitor 05103, de type campbell scientifique pour la mesure de la vitesse et la direction du vent (précision 0.25%).
- Sonde de température et d'humidité relative HMP45C fabriquée pour Campbell Scientific par Vaisala (température précision 0.2%, humidité précision 1%).
- Pluviomètre ARG100, fabriqué par Environmental Measurements pour Campbell scientifique, pour la mesure de la pluviométrie (précision 4%).

IV.3.3 Stockage des données

L'ensemble des instruments est relié à une centrale d'acquisition de donnée (CR10X) dotée d'un module de stockage. À l'aide d'un programme informatique, on commande le pas des mesures à 5 secondes et intègre les mesures sur une heure. Les valeurs horaires obtenues sont stockées dans des fichiers de données brutes.

Les fichiers de données brutes sont ensuite traités et soumis à des tests de validité pour détecter et éliminer les valeurs erronées et remplacer certaines valeurs manquantes. Enfin les valeurs horaires sont intégrées sur toute la journée pour obtenir les valeurs journalières.

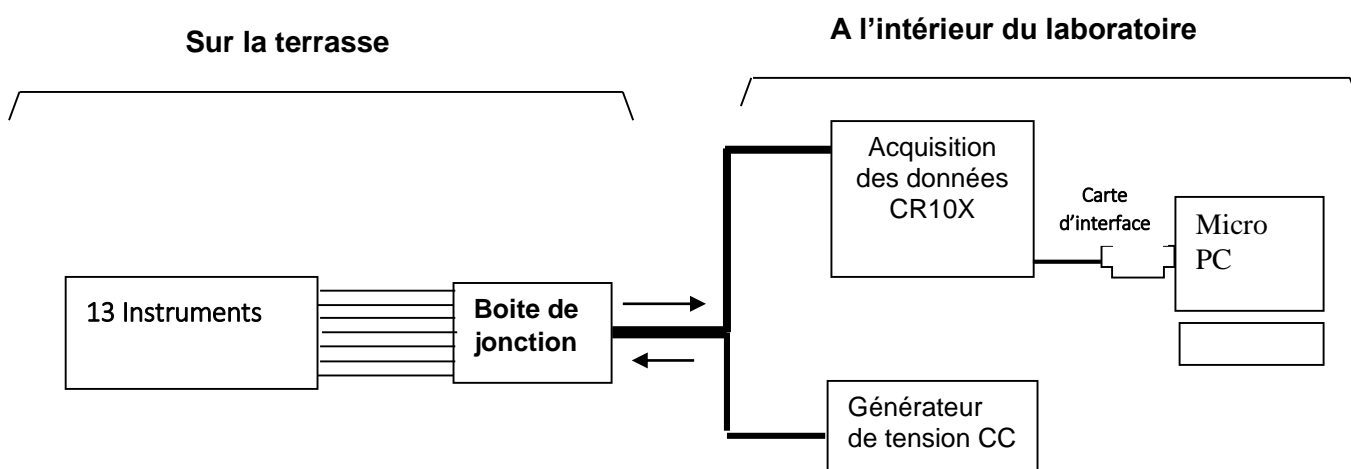


Figure I.7: Schéma du protocole expérimental de prises des mesures.

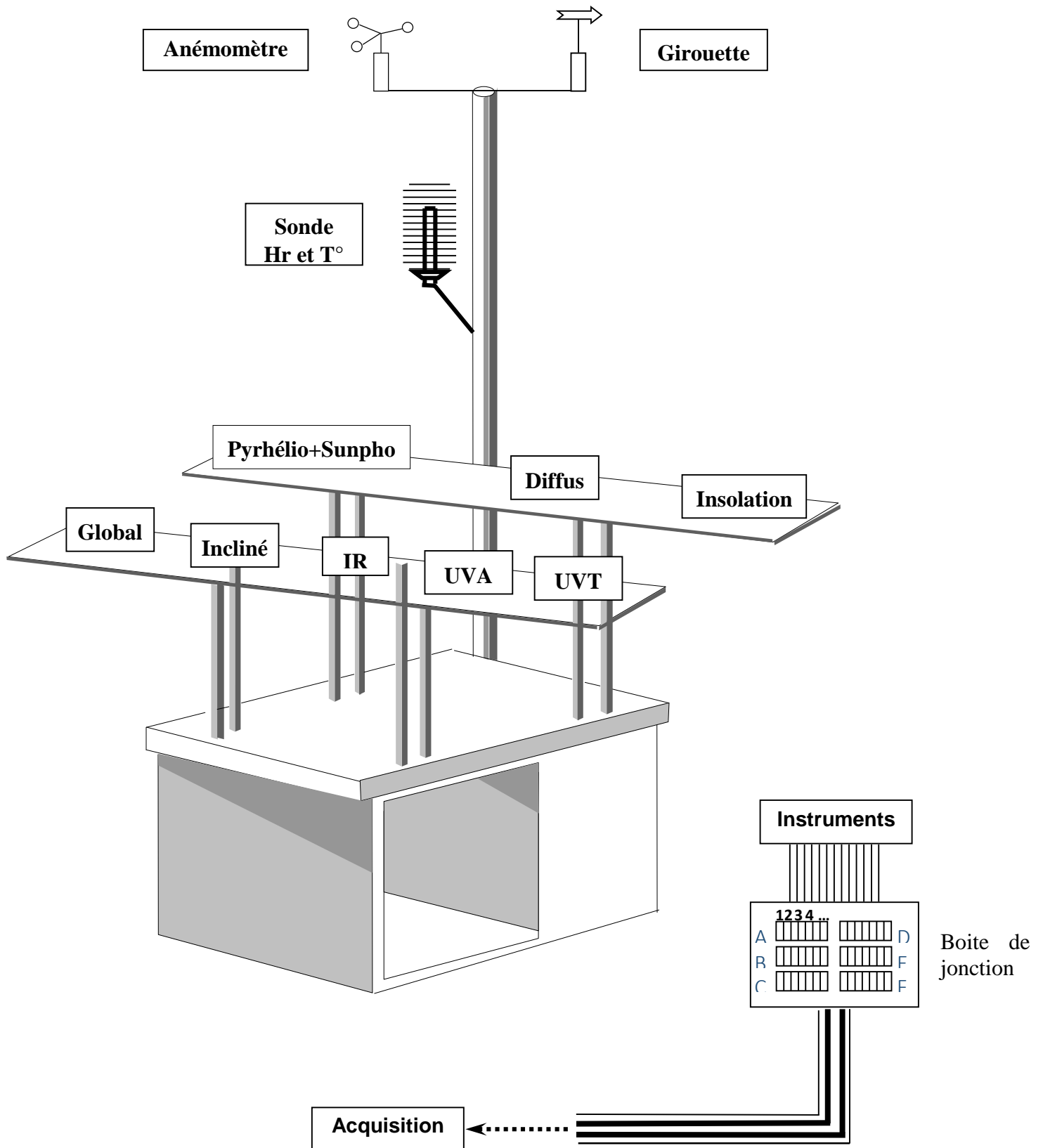


Figure I.8 : Schéma de disposition des instruments de mesures de la station du laboratoire d'Energie Solaire et d'Environnement.



Figure I.9: Station solaire du laboratoire d'Energie solaire et d'Environnement
Annexe des Orangers, Faculté des Sciences.



Figure I.10: Station météorologique de Tanger.

V. Collecte des données brutes et banque de données

V.1 Collecte par le réseau météo

Le principal réseau de mesures au Maroc est celui de la Météorologie Nationale qui comporte plus de 33 stations. Ces stations mesurent les variables climatiques : température, humidité relative, vitesse du vent, précipitation et durée d'insolation.

V.2 Collecte des données par Satellites

Les mesures des variables climatiques et des composantes solaires peuvent être effectuées par un satellite. Les satellites adaptés aux mesures du rayonnement solaire sont les satellites géostationnaires, satellites se trouvant à 36000 km d'altitude et ayant la même vitesse de rotation que la terre.

En météorologie les satellites sont équipés de détecteurs qui sont généralement des éléments sensibles aux rayonnements électromagnétiques :

- Détecteur visible : pour mesurer le rayonnement solaire.
- Détecteur canal vapeur d'eau : qui permet de visualiser les mouvements verticaux atmosphériques.

Le détecteur reçoit le rayonnement qui provient du système sol-atmosphère. L'image fournie est formée de petits éléments appelés pixels. Chaque pixel couvre 3 x 3 km².

La couleur du pixel sombre ou claire donne le coefficient de nébulosité à partir duquel on déduit la durée d'insolation (un pixel brillant veut dire beaucoup de nuages) [12].

V.3 Banque de données

Une banque de données solaires est constituée de l'ensemble des composantes solaires et des variables climatiques en un site. Pour qu'elle soit représentative du site, elle doit contenir de longues séries de mesures (de 3 à 10 ans).

Une banque (ou base) de données est constituée par :

- Les grandeurs mesurées directement ;
- Les grandeurs déduites des mesures ;
- Les grandeurs estimées à partir des relations empiriques.

Après la collecte des données, la mise au point de la banque de données nécessite :

- Le contrôle des mesures ;
- L'élimination des valeurs erronées ;
- Le remplacement des données manquantes.

VI. Bibliographie des Modèles d'estimation du rayonnement solaire

VI.1 Estimation des valeurs journalières du rayonnement solaire

VI.1.1 Irradiation Globale

VI.1.1.1 Extrapolation de l'irradiation Globale

L'extrapolation consiste à estimer la valeur du rayonnement solaire en un site en fonction du rayonnement solaire d'un autre site choisi comme origine. Ainsi, on établit des corrélations entre l'irradiation solaire globale sur un plan horizontal d'un site origine et l'irradiation solaire globale d'un autre site. Ces corrélations s'expriment sous la forme [13]:

$$H_v = a_v H_o + b_v \quad (I.16)$$

Où H_v et H_o , sont respectivement, le rayonnement global de la ville V et le rayonnement global à l'origine.

Dans le but d'avoir une équation générale valable pour toutes les villes, on peut :

- Corréler les coefficients a_v et b_v en fonction des distances D_{r-v} entre la ville V et le site d'origine.
- Corréler les coefficients a_v et b_v en fonction des longitudes des villes en question.
- Corréler les coefficients a_v et b_v avec la latitude.

Corrélation du rayonnement solaire global d'un site origine et celui d'une autre ville

La corrélation entre le rayonnement global sur plan horizontal d'une ville V (H_v) et le rayonnement global de l'origine (H_o), se fait en examinant le nuage de points $H_v = f(H_o)$. En général, cette représentation a tendance d'être linéaire, les paramètres de la droite, la pente et l'ordonné à l'origine, sont respectivement les coefficients de l'équation de corrélation :

$$H_v = a_v H_o + b_v$$

Expression de l'équation d'extrapolation entre deux villes $H_{v'} = f(H_v)$

Si tous les H_v sont corrélables avec H_o , on peut prévoir les corrélations entre les villes deux à deux.

On a : $H_v = a_v H_o + b_v$ pour une ville V quelconque.

On a aussi : $H_{v'} = a_{v'} H_o + b_{v'}$ pour une autre ville V' .

En substituant H_o calculé en fonction de H_v à partir de la première équation, dans la deuxième équation on aura :

$$H_{v'} = \frac{a_{v'}}{a_v} H_v - \frac{a_{v'} b_v - a_v b_{v'}}{a_v} \quad (1.17)$$

Les quantités, $\frac{a_{v'}}{a_v}$ et $\frac{a_{v'} b_v - a_v b_{v'}}{a_v}$ sont doublement indicées, elles représentent les éléments des matrices notés respectivement $A_{vv'}$ et $B_{vv'}$.

Expression de l'équation d'extrapolation entre deux villes marocaines en fonction de la distance

Afin d'élaborer une équation d'extrapolation générale et valable pour différentes stations en fonction de la distance qui les séparent, il faut tout d'abord, représenter les différentes pentes des droites de régression en fonction des distances entre les stations. A partir du nuage des points on tire une équation qui lie la pente de régression avec la distance entre stations qui est de la forme :

$$a_v = k_1 D_{v-o} + k_2 \quad (1.18)$$

De la même manière, on trace les ordonnées à l'origine des droites de régression en fonction des distances entre stations et on tire une équation de la forme :

$$b_v = k_3 D_{v-o} + k_4 \quad (1.20)$$

Les deux équations précédentes sont injectées dans (1.16), donnant ainsi une fonction d'extrapolation générale, qui permet d'estimer les valeurs du rayonnement global sur plan horizontal en un site quelconque connaissant seulement la distance qui le sépare de l'origine.

Remarque

En procédant de manière analogue à celle du paragraphe précédent, on peut extrapoler le rayonnement global par la longitude ou la latitude. Le seul changement à faire est de remplacer D_{v-o} en abscisse par la longitude ou la latitude.

VI.1.1.2 Modèle d'estimation de l'irradiation globale à partir des variables climatiques

Le modèle le plus simple pour l'estimation du rayonnement solaire est le modèle linéaire élaboré par Angstrom[14] puis modifié par Black et al. [22], ensuite révisé par Prescott [15] et Page [16]. Ce modèle donne une relation directe entre le rayonnement solaire global et la fraction d'insolation et il s'exprime de la manière suivante :

$$K_t = a + b \sigma \quad (I.21)$$

On se basant sur le modèle linéaire plusieurs travaux ont été réalisés pour prédire le rayonnement solaire global. On peut citer les modèles suivants :

Auteurs des modèles	Equation	R	Régions
Méthode de Lemmini[17]	$K_t = 0.25 + 0.49 \sigma$	0.92	Beni-Mellal (1978-1982)
Méthode de Bargach[18]	$K_t = 0.27 + 0.5 \sigma$	0.9	Rabat, Maroc (1982-1983)
Méthode de Nfaoui[19]	$K_t = 0.26 + 0.52 \sigma$	0.93	Rabat, Maroc (1982-1985)
Méthode de J. Fan et al[20]	$K_t = 0.208 + 0.559 \sigma$	0.91	Tengchong, Chine

Tableau I.1 : Exemples des modèles linéaires pour prédire le rayonnement solaire journalier.

D'autres modèles ont été élaborés comme le modèle quadratique, cubique, etc,. On peut citer les modèles suivants :

Auteurs des modèles	Equation	R	Régions
Méthode de Benkadour [21]	$K_t = 0.18 + 0.83 \sigma - 0.31 \sigma^2$	0.93	Casablanca, Maroc
Méthode de J. Fan et al.[20]	$K_t = 0.185 + 0.587 \sigma + 0.037 \sigma^2 - 0.032 \sigma^3$	0.93	Aletai, Chine

Tableau I.2 : Exemples des modèles quadratiques et cubiques pour prédire le rayonnement solaire journalier.

VI.1.2 Corrélation de l'irradiation diffuse

Plusieurs modèles théoriques ont été développés pour calculer l'irradiation diffuse, en fonction des différents paramètres atmosphériques locaux tels que la nébulosité, la vapeur d'eau condensable, le trouble atmosphérique, ...etc. Comme chacun de ces modèles requiert des méthodes de calcul souvent compliquées, certains auteurs ont proposé des relations liant l'irradiation diffuse H_d aux variables usuellement mesurées tel que l'irradiation globale d'un plan horizontal H_h , la durée d'ensoleillement n , l'irradiation globale hors atmosphère H_{oh} et la fraction d'insolation σ . Ainsi, des corrélations entre les irradiances quotidiennes moyennes globales et diffuses ont été développées, à partir de l'équation suivante [3]:

$$H_d/H_h = a + b K_t \quad (1.22)$$

Où $K_t = H_h/H_{oh}$ est le coefficient de clarté moyen.

a et b sont des coefficients de l'équation de corrélation établis pour chaque site.

Collares-Pereira et Rabl [35] ont proposé une autre relation linéaire en fonction de K_t dans laquelle ils introduisent l'angle horaire du coucher ω_c :

$$H_d/H_h = 0,775 + 0,347 (\omega_c - (\pi/2)) - (0,505 + 0,261 (\omega_c - (\pi/2))).\cos(2(K_t - 0,9)) \quad (1.23)$$

Liu et Jordan [30] ont développé une relation basée sur une corrélation statistique non linéaire, entre le rapport H_d/H_h et le coefficient de clarté K_t . Ils ont ensuite testé les résultats obtenus avec les mesures effectuées sur une période de 18 années, en quatre stations différentes. Cette relation a été par la suite corrigée par Klein [23] ce qui a donné la forme suivante :

$$K_d = 1,39 - 4,027 K_t + 5,531 K_t^2 - 3,108 K_t^3 \quad (1.24)$$

On se basant sur la même variable (K_t), d'autres travaux ont été développés comme :

la méthode de Benkadour [21], Casablanca :

$$K_d = 0.961 + 0.456 K_t - 3.344 K_t^2 + 1.67 K_t^3 \quad (1.25)$$

la méthode de Nfaoui[19], Rabat :

$$K_d = \begin{cases} 0.98 & , K_t < 0.1 \\ -1.48 K_t^2 + 0.15 K_t + 0.98, & K_t \geq 0.1 \end{cases} \quad R = 0.93 \quad (1.26)$$

La méthode de L. Wang et al. à Injinagui en Chine[24] :

$$K_d = 14.7924 K_t^4 - 23.95 K_t^3 + 11.1612 K_t^2 - 2.4767 K_t + 1.1665; \quad R=0.77 \quad (1.27)$$

Notons enfin qu'un autre type de corrélations liant le rapport H_d/H_h à la fraction d'insolation σ peut se présenter sous la forme :

$$K_d = a' + b'\sigma \quad (1.28)$$

Ou encore

$$K_d = a + b\sigma + c\sqrt{\sigma} \quad (1.29)$$

Lorsque la valeur de H_h n'est pas connue en un site donné, l'équation (1.28) peut s'écrire :

$$K_d = (H_d / H_{oh}) \cdot (H_{oh} / H_h) = a' + b'\sigma$$

C'est à dire :

$$H_d / H_{oh} = (H_h / H_{oh}) \cdot (a' + b'\sigma)$$

Or d'après la relation (1.21)

La relation précédente devient alors :

$$H_d / H_{oh} = a_0 + a_1 \sigma + a_2 \sigma^2 \quad (1.30)$$

Les coefficients a_0 , a_1 , a_2 dépendent du site et doivent être vérifiés expérimentalement afin d'obtenir un bon accord avec la théorie. Parmi ces corrélations on peut citer pour le site de Rabat :

Le modèle de lhssane [25] :

$$H_d / H_h = 0.99 - 0.77 \sigma \quad R = 0.92 \quad (1.31)$$

Le modèle de Bargach [18] :

$$H_d / H_h = 0.97 - 0.71 \sigma \quad R = 0.9 \quad (1.32)$$

Le modèle de Bahraoui-Buret [26] :

$$H_d / H_h = 1 - 0.77 \sigma \quad R = 0.92 \quad (1.33)$$

VI.1.3 Corrélation de l'irradiation directe

La variation du flux direct au cours de la journée est étroitement liée à la variation de la nébulosité et seul un traitement statistique permet de le déterminer. Dans ce sens, très peu de travaux ont été effectués, cependant, Ch. Perrin de Brichambaut et R.G.Flocchini ont établi respectivement des relations empiriques liant l'irradiation directe d'une surface horizontale à la fraction d'insolation σ

Relation de Ch. Perrin de Brichambaut [27] :

$$H_b = H_{hc} (0,6 \sigma + 0,2 \sigma^2) \quad (I.34)$$

Cette relation est valable pour toutes les saisons et tous les lieux de France et permet d'estimer H_b à moins de 20% d'erreur.

Relation de R.G.Flocchini :

$$H_b = H_{oh} (a + b \sigma) \quad (I.35)$$

Les coefficients a et b, déterminés à partir des mesures faites à Davis (Californie) en 1979, sont variables d'un mois à l'autre :

$$-0,09 < a < -0,02$$

$$0,54 < b < 1,41$$

Les coefficients de corrélation trouvés sont de très bonne qualité.

Comme on peut citer d'autres travaux tel que :

Le modèle de Ihssane [25] :

$$H_b / H_{oh} = 0,26 \sigma + 0,34 \sigma^2 \quad R = 0.92 \quad (I.36)$$

Le modèle de Bargach [18]:

$$H_b / H_{oh} = -0.07 + 0.59 \sigma \quad R = 0.89 \quad (I.37)$$

Le modèle de Bahraoui-buret [26]:

$$H_b / H_{oh} = -0.08 + 0.52 \sigma \quad R = 0.91 \quad (I.38)$$

Notons dès à présent que la détermination du flux direct I_b d'une surface horizontale nécessite la connaissance du flux direct I_{bn} , couramment mesuré par les stations équipées d'un pyréliomètre et qui correspond au flux intercepté à chaque instant par un plan normal aux rayons du soleil. En effet, les deux composantes I_b et I_{bn} sont reliées par l'expression suivante :

$$I_b = I_{bn} \cdot \sin(h)$$

Une intégration sur toute la journée de cette relation permet d'avoir l'irradiation quotidienne directe H_b de la surface horizontale :

$$H_b = \int_{\text{lever}}^{\text{coucher}} I_{bn} \cdot \sin(h) dt \quad (1.39)$$

Toutefois, le caractère irrégulier et très aléatoire de la variation de la couverture nuageuse pose un problème lors de l'intégration. Une méthode généralement utilisée pour remédier à ce problème, consiste à diviser l'intervalle quotidien d'intégration en plusieurs petits intervalles successifs, afin de tenir compte de cette variation et par conséquent, obtenir une meilleure approche de l'irradiation quotidienne directe H_b .

Ainsi, la relation (1.39) peut s'écrire :

$$H_b = \int_{\text{lever}}^{\text{coucher}} I_{bn} \cdot \sin(h) dt = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t=t_1} (I_{bn} \cdot \sin(h) dt)_0 + \dots + \int_{t_{k-1}}^{t_k} (I_{bn} \cdot \sin(h) dt)_{k-1}$$

Ou encore :

$$\int_{\text{lever}}^{\text{coucher}} I_{bn} \cdot \sin(h) dt = \sum_{i=0}^{k-1} \int_{t_i}^{t_{i+1}} (I_{bn} \cdot \sin(h) dt)_i$$

Le choix judicieux de l'intervalle $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ augmente la précision de calcul de l'irradiation H_b . Par ailleurs, il est évident que plus cet intervalle est petit plus la valeur de H_b ainsi calculée est précise.

VI.1.4 Estimation de l'irradiation solaire globale d'un plan incliné

Dans la littérature, le rayonnement solaire global incident sur un plan incliné de l'angle (s) est la somme des trois composants [28,29] :

La composante directe, la composante diffuse et La composante réfléchie.

$$H_s = H_{bs} + H_{ds} + H_{rs} \quad (1.40)$$

Or La composante directe se calcul par simple transposition géométrique de l'irradiation directe d'un plan horizontal H_b :

$$H_{bs} = R_b * H_b \quad (1.41)$$

Où R_b est le facteur de transposition du rayonnement direct d'un plan horizontal à un plan incliné calculé, à partir de la relation [30] :

$$R_b = \{ \cos(s) \sin(\delta) \sin(\varphi) |\omega'_c - \omega'_l| - \sin(\delta) \cos(\varphi) \sin(s) \cos(\gamma) |\omega'_c - \omega'_l| \\ + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(s) |\sin(\omega'_c) - \sin(\omega'_l)| + \cos(\delta) \cos(\gamma) \sin(\varphi) \sin(s) |\sin(\omega'_c) \\ - \omega'_l| + \cos(\delta) \sin(s) \sin(\gamma) |\cos(\omega'_c) - \cos(\omega'_l)| \} / 2 \{ \cos(\delta) \cos(\varphi) \sin(\omega_c) \\ + \omega_c \sin(\delta) \sin(\varphi) \} \quad (1.42)$$

Pour une surface orientée face au sud ($\gamma=0^\circ$), le facteur de transposition s'écrit [3]:

$$R_b = \frac{\cos(\delta) \cos(\varphi - s) \sin(\omega'_c) + \omega'_c \sin(\delta) \sin(\varphi - s)}{\cos(\delta) \cos(\varphi) \sin(\omega_c) + \omega_c \sin(\delta) \sin(\varphi)}$$

s : Angle d'inclinaison (degrés).

δ : Déclination (degrés).

φ : Latitude (degrés).

$\omega'_c = \min\{ \arccos(-\tan(\delta) \tan(\varphi)), \arccos(-\tan(\delta) \tan(\varphi - s)) \}$ est l'angle horaire du coucher du soleil sur le plan incliné de (s).

La composante réfléchie dépend directement de l'albédo du sol ρ et elle s'écrit sous la forme :

$$H_{rs} = \rho * H_h \frac{1 - \cos(s)}{2} \quad (1.43)$$

Tandis que la détermination de la composante diffuse s'avère délicate puisque ce type de rayonnement doit son origine à différents phénomènes physiques, tels que la diffusion de Rayleigh et la diffusion de Mie [30]. Sur ceci, on peut subdiviser les modèles utilisés pour prédire la composante diffuse sur plans incliné en deux catégories : les modèles isotropes à une composante et les modèles anisotropes à deux et à trois composantes.

VI.1.4.1 Modèles isotropes

Le modèle du ciel isotrope est le modèle le plus courant et le plus simple. Il suppose une distribution uniforme de l'irradiation solaire diffuse sur la voûte céleste. En effet, plusieurs modèles ont été proposés pour l'estimation du rayonnement diffus en respectant cette supposition dont on peut citer les travaux suivant :

Modèle de Badescu

La relation de Badescu pour calculer le rayonnement global sur un plan incliné d'angle (s) est donnée comme suit [31,32]:

$$H_{ds} = H_d(3 + \cos(2s))/4 \quad (1.44)$$

Modèle de Korokanis

Le modèle proposé par Korokanis [33] a changé le modèle de Liu et Jordan comme suit :

$$H_{ds} = H_d(2 + \cos(s))/3 \quad (1.45)$$

Modèle de Liu et Jordan

Ce modèle suppose que le rayonnement diffus du ciel est isotrope, ce modèle est proposé par Liu et Jordan [34]

$$H_{ds} = H_d(1 + \cos(s))/2 \quad (1.46)$$

IV.2.3.2 Modèles anisotropes

Ce modèle suppose que le rayonnement diffus du ciel est composé de deux composantes, isotropes et circumsolaire (ciel près du disque solaire) ; Ou de trois composantes, isotrope, circumsolaire et brillance de l'horizon. L'objectif de ce type de modèle est de calculer une valeur plus précise de H_d . Pour cette raison, nous avons sélectionné les modèles les plus largement utilisés.

Modèle de Muneer

Le modèle de Muneer [35] estime l'intensité du rayonnement diffus comme suit:

$$H_{ds} = H_d (F_M R_b + (1 - F_M) T_M) \quad (1.47)$$

Où F_M est une fonction de clarté composite selon les conditions particulières du ciel et de l'azimut. Pour les surfaces ombragées et les surfaces orientées vers le soleil dans des conditions de ciel couvert, F_M est nul, le facteur d'inclinaison est donné par la relation :

$$T_M = \frac{(1 + \cos(s))}{2} + \frac{2b}{\pi(3 + 2b)} \left(\sin(s) - s \cos(s) - \pi \sin^2\left(\frac{s}{2}\right) \right) \quad (1.48)$$

Modèle de Ma-Iqbal

Ma-Iqbal [36] a proposé un modèle divisant le rayonnement diffus en rayonnement émis par la région circumsolaire et le rayonnement émis par le reste du ciel. La nébulosité est déterminée sur la base de l'indice de clarté de l'atmosphère K_t .

$$H_{ds} = K_t r_b + (1 - K_t) \left(\frac{1 - \cos(s)}{2} \right) \quad (1.49)$$

K_t : est l'indice de clarté.

R_b : est le facteur de transposition du rayonnement direct.

Modèle de Perez

Le modèle proposé par Perez et al [37] représente une analyse plus détaillée du rayonnement diffus isotrope, circumsolaire et brillance de l'horizon en utilisant des coefficients dérivés empiriquement. Selon ce modèle :

$$H_{ds} = F_1 \frac{a}{b} + (1 - F_1) \left(\frac{1 + \cos(s)}{2} \right) + F_2 \sin(s) \quad (1.50)$$

Où, F_1 et F_2 sont respectivement les coefficients de brillance du ciel pour la région circumsolaire et la région au-dessus de la ligne d'horizon. Notez que si $F_1=F_2=0$, il se réduit au modèle Liu-Jordan. Les coefficients a et b prennent en compte l'angle d'incidence du soleil sur la surface inclinée. Plus spécifiquement, la position angulaire de la région circumsolaire est déterminée par le rapport a / b . ces coefficients sont calculés à partir des équations de la géométrie solaire :

$$a = \max(0 ; \cos i) ; b = \max(\cos 85 ; \sin \theta) \quad (1.51)$$

VI.1.5 Estimation des composantes spectrales du rayonnement solaire

Certaines applications de l'énergie solaire nécessitent la connaissance des composantes spectrales du rayonnement solaire : la composante ultraviolette intervient dans l'étude de l'atmosphère et les variations de l'épaisseur de la couche d'ozone, la composante photosynthétiquement active notée PAR (Photosynthetically Active Radiation) intervient dans le processus de photosynthèse et de développement des plantes, sa connaissance en divers sites permet le choix adéquat des cultures adaptées. La composante infrarouge IR est utilisée, par des techniques satellitaires, pour déterminer la colonne atmosphérique totale de la vapeur d'eau utilisée par la météorologie pour la prédiction du climat.

VI.1.5.1 Corrélations du rayonnement Ultra-violet

Depuis plusieurs années, diverses études concernant les paramètres environnementaux, comme le taux d'ultraviolets, ont été réalisées. Des modèles d'estimation du rayonnement UV ont été alors proposés. Nous citons ci-dessous quelques un de ces modèles.

Modèle d'estimation des H_{UV} utilisant le rayonnement diffus

Ce modèle prend en compte l'état du ciel en l'occurrence le rayonnement diffus. D'autres variantes du modèle ont été développées en introduisant la masse d'air et la quantité d'eau condensable [38].

$$H_{UV} = \frac{(-0.0405 * ma^3 + 0.5272 * ma^2 - 2.4176 * ma + 5.3945) * H_d}{-0.1494 * w + 0.2623 + 1} \quad (1.52)$$

Modèle d'estimation des H_{UV} utilisant le rayonnement direct

Ce modèle prend en compte le rayonnement direct. Il a été développé en introduisant la quantité d'eau condensable [38].

$$H_{UV} = (0.000263 * w + 0.00226) * (H_{UV} * \sin(h))^2 + (0.3007 * w + 0.1385) * (H_{bn} * \sin(h)) \quad (1.53)$$

Avec: w est la quantité d'eau condensable.

Modèle d'estimation des H_{UV} utilisant la durée d'insolation

La corrélation avec la durée d'insolation fournit un autre modèle de calcul. En gardant la même forme de l'équation reliant le rayonnement global à la durée d'insolation, ce modèle s'écrit [39] :

$$H_{UV}/H_{UV0} = a + b(S/S_0) \quad (1.54)$$

Avec : a et b sont des constantes empiriques.

S est la durée d'insolation moyenne sur un mois.

S_0 est la durée d'insolation moyenne extra-terrestre sur un mois.

Modèle d'estimation des H_{UV} utilisant le rayonnement globale

Parmi les modèles qui estiment les valeurs journalières de H_{UV} à partir de l'irradiation globale, on trouve le modèle d'Escobedo qui s'écrit sous la forme suivante [40] :

$$H_{uv} = \begin{cases} 0.048 H_h, & K_t < 0.35, & R = 0.96 \\ 0.042 H_h, & 0.35 < K_t < 0.65, & R = 0.96 \\ 0.041 H_h, & K_t > 0.35, & R = 0.98 \end{cases} \quad (1.55)$$

VI.1.5.2 Corrélation du rayonnement photo-synthétiquement active

Modèle d'Escobedo

En se basant sur les valeurs mesurées pendant 4ans (2001-2005) au Brésil, Escobedo et al ont mis au point un modèle d'estimation de H_{PAR} . Les équations de corrélation liant l'irradiation globale avec cette composante spectrale sont présentées par les équations suivantes [40]:

$$H_{PAR} = \begin{cases} 0.512 H_h, & K_t < 0.35, & R = 0.99 \\ 0.49 H_h, & 0.35 < K_t < 0.65, & R = 0.99 \\ 0.485 H_h, & K_t > 0.35, & R = 0.99 \end{cases} \quad (1.56)$$

Modèle de M.Hamatti

A partir des mesures des composantes spectrales du rayonnement solaire de deux années 2009 et 2010 réalisées à Rabat, M.Hamatti et al. ont réalisé un modèle d'estimation de H_{PAR} . Cette corrélation s'écrit sous la forme suivante [41]:

$$H_{PAR} = \begin{cases} 0.488 H_h, & K_t < 0.35, & R = 0.99 \\ 0.484 H_h, & 0.35 < K_t < 0.65, & R = 0.99 \\ 0.478 H_h, & K_t > 0.35, & R = 0.99 \end{cases} \quad (1.57)$$

VI.1.5.3 Corrélation du rayonnement Infra-rouge

Modèle d'Escobedo

En se basant sur les mesures de la même période utilisé pour la réalisation du modèle d'estimation de H_{PAR} , Escobedo et al ont mis au point un modèle d'estimation de H_{IR} qui se traduit par les équations ci-dessous [40]:

$$H_{IR} = \begin{cases} 0.44 H_h, & K_t < 0.35, & R = 0.99 \\ 0.46 H_h, & 0.35 < K_t < 0.65, & R = 0.99 \\ 0.475 H_h, & K_t > 0.35, & R = 0.99 \end{cases} \quad (1.58)$$

Modèle de M.hamatti

En plus du rayonnement photo-synthétiquement actif, M.Hamatti et al ont mis un modèle pour l'estimation du rayonnement Infrarouge. Les équations qui régissent sur ce modèle s'écrivent comme suivant [41]:

$$H_{IR} = \begin{cases} 0.46 H_h, & K_t < 0.35, & R = 0.99 \\ 0.471 H_h, & 0.35 < K_t < 0.65, & R = 0.99 \\ 0.478 H_h, & K_t > 0.35, & R = 0.99 \end{cases} \quad (1.59)$$

VI.2 Estimation des valeurs horaires du rayonnement solaire

Les valeurs journalières de l'irradiation solaire globale sont en général disponibles dans les stations météorologiques. Or, dans plusieurs applications solaires, on a plutôt besoin des valeurs horaires qui sont rarement disponibles. Ainsi il est nécessaire de chercher des méthodes d'estimation des valeurs horaire des différentes composantes du rayonnement solaires.

VI.2.1 Méthodes d'estimation de l'irradiation globale

La méthode de collares et Pereira

Puisque les valeurs journalières du rayonnement solaire sont souvent disponibles dans les stations météorologiques, Collares et Pereira ont adopté une approche purement empirique pour mettre en évidence une relation entre le rapport $\overline{I_h}/\overline{H_h}$ et $\overline{I_{oh}}/\overline{H_{oh}}$ en l'exprimant en fonction de deux variables [42] :

L'angle horaire ω_i au milieu de l'heure considérée, caractérisant l'heure.

L'angle horaire de couché ω_c caractérisant le mois.

$$\frac{\frac{\bar{I}_h}{\bar{H}_h}}{\frac{\bar{I}_{oh}}{\bar{H}_{oh}}} = a + b \cos \omega_i \quad (1.60)$$

Avec $a = 0.49 + 0.5016 \sin (\bar{\omega} - 60^\circ)$

$b = 0.6609 + 0.4767 \sin (\bar{\omega} - 60^\circ)$

Les coefficients a et b ont été calculés par la méthode des moindres carrés.

VI.2.2 Méthode d'estimation de l'irradiation diffuse

VI.2.2.1 Méthode de Hay

Dans cette méthode, Hay a pris en considération les valeurs des irradiations arrivantes au sol avant et après les multiples réflexions entre le sol, les nuages et les autres constituants de l'atmosphère. Les équations ainsi établies sont [43]:

$$\bar{I} - \bar{I}' = \bar{I} \rho \left[\rho_a \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}_j} + \rho_c \left(1 - \frac{\bar{n}}{\bar{N}_j} \right) \right) \right] \quad (1.61)$$

$$\bar{I}_d - \bar{I}_d' = \bar{I} \rho \left[\rho_a \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}_j} + \rho_c \left(1 - \frac{\bar{n}}{\bar{N}_j} \right) \right) \right]$$

ρ : albédo du sol.

ρ_a : albédo d'un ciel sans nuages.

ρ_c : albédo des nuages.

\bar{N}_j : durée maximale d'insolation corrigée.

\bar{I}' et \bar{I}_d' sont les irradiations horaires globale et diffuse avant les multiples réflexions entre le sol et le ciel.

La corrélation ainsi obtenue entre les composantes \bar{I}' et \bar{I}_d' est donc :

$$\begin{aligned} \frac{\bar{I}_d'}{\bar{I}'} &= 0.9702 + 1.668(\bar{I}'/\bar{I}_{oh}) - 21.303 (\bar{I}'/\bar{I}_{oh})^2 + 51.288 (\bar{I}'/\bar{I}_{oh})^3 - 50.081(\bar{I}'/\bar{I}_{oh})^4 \\ &+ 17.551(\bar{I}'/\bar{I}_{oh})^5 \end{aligned} \quad (1.62)$$

La méthode de Hay nécessite la connaissance de la moyenne mensuelle de l'irradiation horaire globale qui n'est pas disponible en général, ainsi que l'albédo des nuages qui varie avec le type, l'épaisseur et le nombre de couches des nuages, et enfin l'albédo d'un ciel sans nuages qui dépend d'une façon marquée des aérosols présents dans l'atmosphère.

VI.2.2.2 Corrélation de Orgill et Hollande pour l'estimation du diffus

Cette méthode représente la première corrélation de ce type. Elle a été établie sur quatre années de mesure au Canada (43°48N), et suivant l'état du ciel caractérisé par son coefficient de clarté. Elle comprend trois équations selon l'intervalle de variations de k_t [44].

$$\frac{I_d}{I_h} = \begin{cases} 1 - 0.249 K_t & K_t \leq 0.35 \\ 1.557 - 1.84 K_t & 0.35 < K_t \leq 0.75 \\ 0.177 & K_t > 0.75 \end{cases} \quad (1.63)$$

VI.2.2.3 Erbs et al corrélation pour l'estimation du diffus

En se basant sur le travail de Orgil et Hollands, Erbs et al ont réalisé une nouvelle corrélation du diffus en utilisant les données de 5 stations de mesure qui se trouvent au Etats-Unis avec une latitude qui varie de 31° à 42° N. La durée de la base de données utilisée pour la réalisation de cette corrélation varie de 1 à 4 ans. Les équations obtenues s'écrivent sous la forme suivante [45]:

$$\frac{I_d}{I_h} = \begin{cases} 1 - 0.09 K_t & , & K_t \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.164K_t + 4.388 K_t^2 - 16.638 K_t^3 + 12.336K_t^4, & 0.22 < K_t \leq 0.8 \\ 0.16 & , & K_t > 0.8 \end{cases} \quad (1.64)$$

VI.2.2.4 Corrélation de A. De Miguel et al. pour l'estimation du diffus

Le but de cette corrélation est de trouver une relation entre le rayonnement diffus et le coefficient de clarté K_t . Ainsi Miguel et al ont utilisé les données de huit stations de mesure situées en Portugal, en Espagne, en France, et en Grèce, dont la latitude varie de 37° à 44° pour obtenir les équations suivantes[46] :

$$\frac{I_d}{I_h} = \begin{cases} 0.995 - 0.08 K_t & , & K_t \leq 0.21 \\ 0.724 + 2.738K_t - 8.32 K_t^2 + 4.96 K_t^3, & 0.21 < K_t \leq 0.76 \\ 0.18 & , & K_t > 0.76 \end{cases} \quad (1.65)$$

VI.2.3 Méthode d'estimation de l'irradiation directe

L'estimation de l'irradiation directe se fait soit par la méthode directe en Connaissant l'irradiation solaire globale et diffuse, on peut déduire l'irradiation directe :

$$I_b = I - I_d$$

Soit par l'estimation à partir des différentes variables tel que la durée d'insolation ou le coefficient de clarté comme le montre les modèles suivants :

VI.2.3.1 La méthode de Liu et Jordan pour l'estimation du rayonnement direct

Le premier travail de ce type a été réalisé par Whillier [47], puis repris par Liu et Jordan [34], qui ont établi une relation donnant le rapport de la moyenne mensuelle des valeurs horaires et celle des valeurs journalières du rayonnement direct :

$$\frac{\bar{I}_b}{\bar{H}_b} = \frac{\int^{1\text{heure}} \bar{\tau}_b(\omega) I_{on} \cos \theta d\omega}{\int^{1\text{jour}} \bar{\tau}_b(\omega) I_{on} \cos \theta d\omega} \quad (1.66)$$

Où $\bar{\tau}_b(\omega)$ est la moyenne mensuelle de la transmittance atmosphérique pour le rayonnement direct

En supposant que le coefficient $\bar{\tau}_b(\omega)$ est constant pendant la journée, ils ont identifié les rapports \bar{I}_b/\bar{H}_b et $\bar{I}_{oh}/\bar{H}_{oh}$.

$$\frac{\bar{I}_b}{\bar{H}_b} = \frac{\bar{I}_{oh}}{\bar{H}_{oh}} = \frac{\pi}{24} \frac{\cos \omega_i - \cos \omega_c}{\sin \omega_i - \frac{\pi}{180} \omega_c \cos \omega_c} \quad (1.67)$$

Cependant, plusieurs études ont montré que le coefficient de transmission n'est pas constant pendant la journée surtout pour les jours partiellement couverts [3].

VI.2.4 Estimation de l'irradiation globale inclinée

Le calcul de l'irradiation globale d'un plan incliné I_s à l'échelle horaire est relativement plus simple que son calcul à l'échelle journalière puisque le facteur de transposition de la composante directe est calculé à l'aide des angles d'incidences des rayons solaires sur le plan incliné et sur le plan horizontal sa valeur est donnée par le rapport $(\cos(i) / \cos(\theta))$. Tandis que la partie diffuse à l'échelle horaire I_{ds} se calcule par les mêmes modèles que ceux utilisés pour les valeurs journalières. Ces modèles sont présentés dans le paragraphe VI.1.4

Par conséquent, l'équation générale de l'estimation de la composante globale sur plan incliné s'écrit de la manière suivante :

$$I_s = I_b \left(\frac{\cos(i)}{\cos(\theta)} \right) + I_{ds} + \rho I \frac{1 - \cos(s)}{2} \quad (1.68)$$

Où i et θ sont respectivement les angles d'incidences des rayons solaires sur le plan incliné et sur le plan horizontal. Le facteur de transposition de la composante directe est calculé au milieu de l'heure considérée.

VI.2.5 Estimation des composantes spectrales

Les diverses applications de l'énergie solaire développées ces dernières années ont augmenté le besoin de connaître les valeurs des composantes spectrales du rayonnement solaire. Comme les mesures du PAR, UV et IR ne sont pas souvent disponibles plusieurs travaux ont été réalisés pour remplir ce manque. Parmi ces travaux on peut citer :

VI.2.5.1 Le modèle d'Escobedo et al

En se basant sur la même période de mesure déjà utilisée pour l'élaboration des corrélations journalières au Brésil, Escobedo et al ont élaboré de nouveaux modèles pour l'estimation des composantes spectrales à l'échelle horaire. Les résultats de cette étude sont projetés dans le tableau suivant [40] :

Intervalles de l'indice de clarté	Equations de corrélations	R
$K_t \leq 0.35$	$I_{uv} = 0.049 I_h$	0.98
	$I_{PAR} = 0.51 I_h$	0.99
	$I_{IR} = 0.41 I_h$	0.99
$0.35 < K_t \leq 0.65$	$I_{uv} = 0.045 I_h$	0.96
	$I_{PAR} = 0.49 I_h$	0.99
	$I_{IR} = 0.46 I_h$	0.99
$K_t > 0.65$	$I_{uv} = 0.041 I_h$	0.98
	$I_{PAR} = 0.489 I_h$	0.99
	$I_{IR} = 0.470 I_h$	0.99

Tableau I.3 : Equations de corrélations établies par Escobedo et al. des valeurs horaires des composantes spectrales du rayonnement solaire H_{UV} , H_{PAR} et H_{IR} (Wh/m^2) en fonction du rayonnement solaire global H_h (Wh/m^2) pour les trois conditions du ciel.

VI.2.5.2 Le modèle de Hamatti et al

Après la réalisation des modèles d'estimation des composantes spectrale à l'échelle journalières, Hamatti et al ont développé un ensemble d'équations pour prédire les irradiances spectrales à l'échelle horaire à Rabat [41].

Intervalles de l'indice de clarté	Equations de corrélations	R
$K_t \leq 0.35$	$I_{uv} = 0.048 I_h$	0.98
	$I_{PAR} = 0.489 I_h$	0.99
	$I_{IR} = 0.461 I_h$	0.99
$0.35 < K_t \leq 0.65$	$I_{uv} = 0.044 I_h$	0.96
	$I_{PAR} = 0.485 I_h$	0.99
	$I_{IR} = 0.469 I_h$	0.99
$K_t > 0.65$	$I_{uv} = 0.041 I_h$	0.98
	$I_{PAR} = 0.479 I_h$	0.99
	$I_{IR} = 0.477 I_h$	0.99

Tableau I.4 : Equations de corrélations, établies par Hamatti et al., des valeurs horaires des composantes spectrales du rayonnement solaire H_{UV} , H_{PAR} et H_{IR} (Wh/m^2) en fonction du rayonnement solaire global H_h (Wh/m^2) pour les trois conditions du ciel.

Conclusion

L'étude bibliographique des corrélations existant entre les différentes composantes du rayonnement solaire, nous a fourni un ensemble de formules permettant l'estimation de ces composantes, à partir d'une seule mesure, soit la durée d'insolation n ou l'irradiation globale horaire ou journalière. Or, ces estimations sont valables seulement pour les sites où ils sont réalisés.

Cependant, notre objectif est de mettre au point des corrélations simples et pratiques valables pour tout le Maroc et qui génèrent des valeurs horaires et journalières. Ces équations doivent couvrir les différentes zones climatiques du Maroc, sachant qu'il y a une grande disparité d'une zone à l'autre. Cette étude sera l'objet du chapitre suivant.



Chapitre II



Elaboration, comparaison et validation des modèles d'estimation des irradiances solaires

Chapitre II : Elaboration, comparaison et validation des modèles d'estimation des irradiances solaires

Introduction

Les diverses applications de l'énergie solaire développées ces dernières années, ont augmenté le besoin des données solaires, or dans la plupart des cas on ne possède pas de stations de mesure couvrant tout le territoire d'un pays et les stations existantes, pour la plupart d'entre elles, ne mesurent pas toutes les composantes énergétiques et spectrales du rayonnement solaire.

Pour remédier à ce problème, plusieurs travaux utilisant différentes méthodes de prédiction ont été élaborés pour estimer ces composantes solaires. Parmi ces modèles, nous pouvons citer les modèles physiques, les modèles empiriques [48-50], les modèles de réseaux de neurones artificiels [51-56], les modèles hybrides utilisant une combinaison de plusieurs méthodes [57,58] et les modèles basés sur les données d'images satellites [59,60]. Par exemple, les modèles physiques sont basés sur des paramètres physiques, qui estiment le rayonnement global à partir de la durée d'insolation [61,62], des composantes météorologiques [63,64], des variables spatiales [65] dans différentes conditions de ciel [66,67]. De même, ce type de modèle prédit le rayonnement solaire diffus [68] à partir du rayonnement global [69], de la durée d'insolation [70] ou de l'indice de clarté [71,72] dans différentes zones climatiques [70] et dans différentes conditions de ciel [73]. Cependant, les mêmes paramètres ont été utilisés pour prédire le rayonnement solaire direct [74] et incliné [75].

L'objectif de ce chapitre est d'établir des équations qui estiment les différentes composantes du rayonnement solaire soit énergétiques (global, diffus, direct et global sur plan incliné) ou spectrales (Ultra-violet UV, Infrarouge IR et le rayonnement photosynthétiquement actif PAR) pour des sites marocains à l'échelle horaire et journalière.

Pour réaliser ce but, nous avons procédé selon trois étapes :

- Dans la première étape, on a établi les équations d'extrapolation de la composante globale journalière du rayonnement solaire et à l'aide de cette composante on a déduit les équations de corrélations entre le global et les autres composantes solaires à l'échelle journalière.

- Dans la deuxième étape, on a développé les équations d'estimation des différentes composantes de l'irradiation solaire à l'échelle horaire.
- Dans la troisième étape, on a effectué une étude statistique de validation et de comparaison des résultats issus des différentes estimations avec les résultats des modèles réalisés par d'autres auteurs.

I. Elaboration des modèles d'estimation des composantes solaires journalières

I.1 Extrapolation de l'Irradiation solaire globale journalière

L'estimation du rayonnement solaire global peut se faire par l'utilisation de plusieurs types de modèles tel que le modèle empirique, le modèle ANN, l'imagerie satellitaire.... . Or, l'utilisation de ces modèles nécessite la connaissance de plusieurs variables et la disponibilité préalable d'une base de données qui s'étale sur plusieurs années. Puisque les bases de données ne sont pas souvent disponibles surtout pour des sites isolés, l'extrapolation s'avère la solution la plus adaptée pour résoudre ce problème.

L'extrapolation consiste à estimer le rayonnement global en un site à partir du rayonnement global mesuré en un autre site. Dans le cas d'extrapolation à plusieurs sites, un site est fixé comme site de référence pour l'ensemble des autres sites.

Dans le cadre de notre étude, on dispose d'une année des données journalières du rayonnement solaire pour les sites marocains. Une étude préliminaire de comparaison basée sur les variables climatiques et les intensités du rayonnement global des sites marocains nous a permis de choisir le site de Fès comme site de référence. Ainsi, afin d'établir les équations d'extrapolations, nous avons représenté les nuages de point du rayonnement solaire global de chaque site noté H_v en fonction du rayonnement global du site de référence noté H_f . Ce nuage de point nous a orientés vers le type de corrélation adapté.

La figure II.1, dont les axes des abscisses portent les valeurs de l'irradiation solaire globale sur un plan horizontal à Fès et les axes des ordonnées portent les valeurs de l'irradiation globale aux sites considérés, donne des exemples des nuages de point obtenus. L'unité sur les deux axes et le Wh/m².

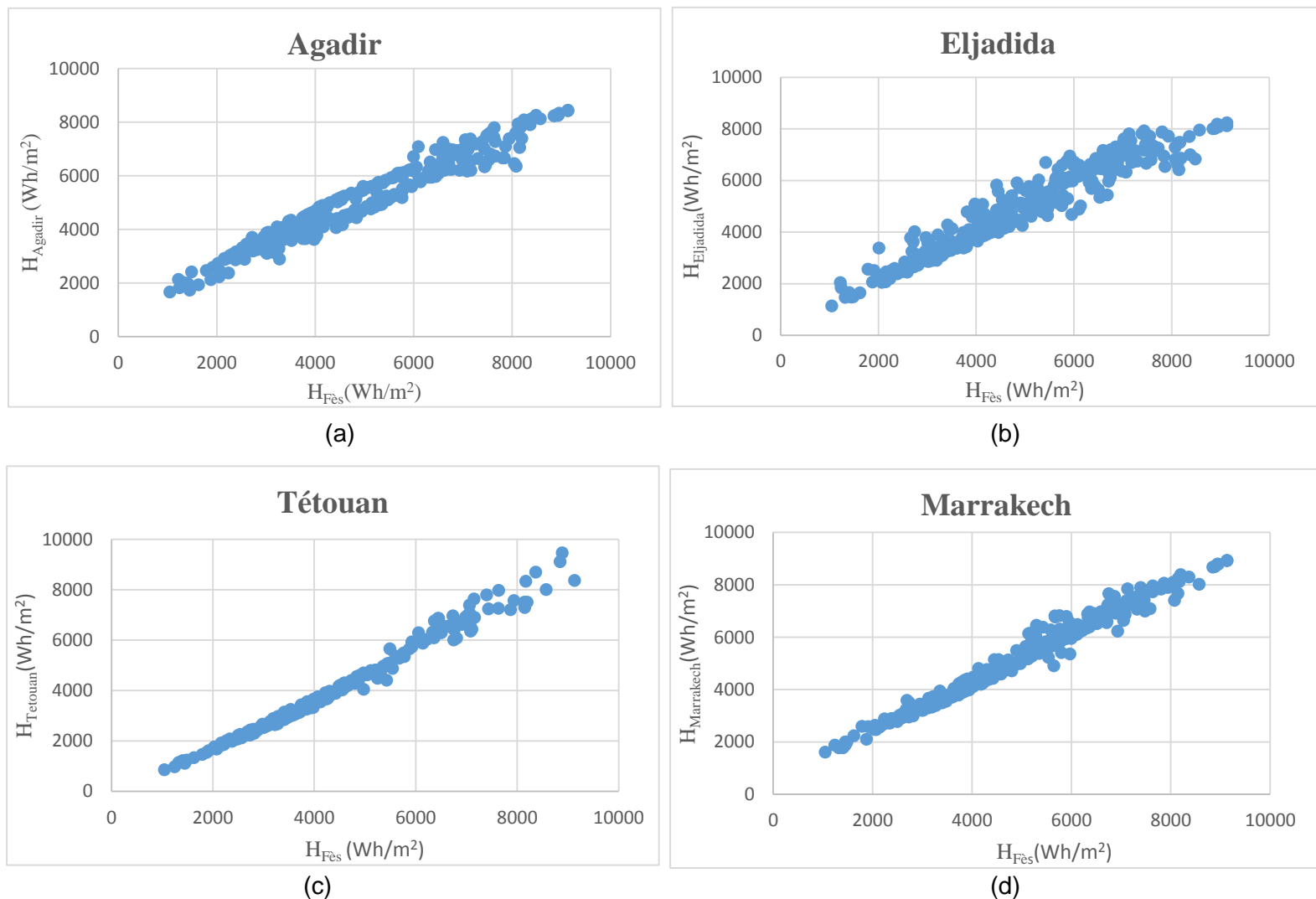


Figure II.1 : Irradiation solaire globale journalière d'Agadir (a), El-Jadida (b), Tétouan (c), Marrakech (d) en fonction de l'irradiation solaire globale de Fès.

On constate que tous les nuages de points obtenus présentent une tendance linéaire. L'équation de la droite de régression de H_v en fonction de H_f est alors de la forme :

$$H_v = a_v H_f + b_v \tag{II.1}$$

Les coefficients a_v et b_v sont calculés par la méthode des moindres carrés. Le tableau suivant rassemble les valeurs obtenues de ces coefficients pour tous les sites marocains.

Site	a_v	b_v	R	Site	a_v	b_v	R
Agadir	0.79	994.1	0.94	Midelt	0.85	740	0.81
AlHoceima	0.94	-180.97	0.92	Nador	0,95	-214	0.92
Beni Mellal	0.94	409	0.89	Nousar	0,95	92	0.93
Bouarfa	0.81	780	0.89	Ouarzazate	0,85	1151	0.91
Casa	0.91	322	0.91	Oujda	0,96	-81	0.89
Dakhla	0.7	1907	0.92	Errachidia	0,76	1372	0.88
El-Jadida	0.95	50	0.93	Safi	0,96	214	0.88
Essaouira	0.89	539	0.91	Sidi-Ifni	0,63	1341	0.88
Ifran	0.97	-52	0.91	Sidislman	0,96	-75	0.92
Kenitra	0.97	-15	0.91	Tanger	0,97	-114	0.90
Laayoun	0.8	1285	0.92	Tantan	0,65	1534	0.88
Larache	1.01	-383	0.93	Taza	0,94	-29	0.92
Marrakech	0.9	672	0.97	Tétouan	1	429	0.96
Meknès	0.95	-14	0.85	Rabat	1,03	-317	0.91

Tableau II.1 : Les valeurs des coefficients des équations d'extrapolation du rayonnement globale pour tous les sites marocains.

Dans ce tableau, on remarque que le rayonnement solaire global de la ville de Marrakech est le plus corrélable avec celui de Fès, puisqu'il présente un coefficient de corrélation égale à 0.97, cela est dû principalement au climat presque similaire des deux villes qui est sec en été et humide en hiver. Pour les autres villes, on remarque que leur rayonnement solaire global est corrélable avec celui de Fès puisque les coefficients de corrélation obtenus sont assez élevés. Cependant on ne peut attribuer la variation de ce coefficient de corrélation d'une ville à l'autre seulement aux facteurs météorologiques, puisque les coefficients des équations d'extrapolation dépendent d'autres variables telles que les distances séparant les villes, la variation de la latitude, de la longitude de l'altitude et pour certaines villes du microclimat qui y règne.

I.2 Estimation de l'irradiation solaire diffuse journalière

Le rayonnement diffus est lié étroitement à l'état atmosphérique du ciel, et particulièrement à la couverture nuageuse et la nébulosité du ciel. Bien que son estimation soit relativement délicate, la connaissance de l'irradiation diffuse constitue une information importante puisqu'elle permet de déduire le rayonnement solaire direct à partir du rayonnement global.

Puisque notre étude vise à l'élaboration d'une équation d'estimation du diffus valable pour l'ensemble des sites marocains, nous avons rassemblé les mesures relevées par des stations placées en des sites représentatifs du climat marocain. Ces mesures concernent les composantes solaires globale et diffuse. A partir de ces mesures, on a calculé le facteur de nébulosité $K_d = H_d/H$ et le coefficient de clarté $K_t = H/H_{oh}$ et par la suite, on a porté les valeurs de K_d en fonction de K_t . La figure 2 représente le nuage de point obtenu.

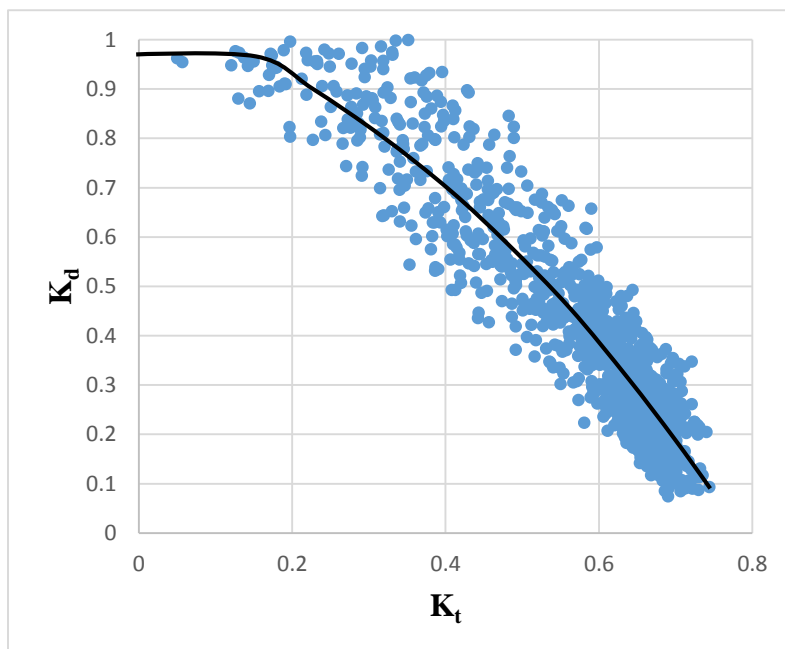


Figure II.2 : Nuage de points des valeurs de K_d en fonction de K_t pour des sites représentatifs du climat marocains.

Le nuage de point de la figure II.2 montre la présence de deux zones : une première zone caractérisée par une forte dispersion des points, qui s'explique par la non homogénéité de l'atmosphère contenant des nuages, des aérosols de plusieurs types et de plusieurs dimensions, ce qui engendre une superposition de plusieurs phénomènes de diffusion. La deuxième zone se caractérise par une concentration des points, qui s'explique par la clarté du ciel où les phénomènes de diffusion et d'atténuation sont relativement réduits.

De plus, le facteur de nébulosité K_d varie en fonction de l'état du ciel et sa valeur est presque égale à l'unité pour un ciel totalement couvert lorsque $K_t < 0.17$, en revanche le nuage de point suggère un ajustement d'une fonction quadratique lorsque K_t est compris entre 0.17 et 0.75. Ainsi l'équation qui régit ce nuage de point est de la forme suivante :

$$H_d/H_h = \begin{cases} 0.99 & , K_t < 0.17 \\ -1.19 K_t^2 - 0.41 K_t + 1.06, & 0.17 \leq K_t \leq 0.75 \end{cases} \quad R = -0.94 \quad (II.2)$$

En comparaison avec les résultats antérieurs trouvés pour les sites marocains [18-19],[21],[25], on remarque une légère différence au niveau des coefficients et une nette amélioration du coefficient de corrélation.

I.3 Estimation de l'irradiation solaire globale journalière d'un plan incliné

Le flux solaire reçu par un plan incliné est constitué de trois composantes : une composante directe provenant du disque solaire, une composante diffuse en provenance de toute la voûte céleste, et une composante réfléchie par le sol environnant. L'estimation de la composante directe se fait par simple transposition géométrique de l'irradiation directe d'un plan horizontal H_b , par contre pour la composante diffuse, plusieurs modèles ont été proposés pour son estimation. Une étude antérieure a montré que le modèle isotrope de Liu et Jordan est le plus valable pour nos sites [28,29]. La composante réfléchie est, dans la majorité des cas, la plus faible des trois composantes et elle est généralement supposée isotrope.

L'expression générale de l'irradiation solaire globale journalière d'un plan incliné d'un angle s est donnée alors par l'équation (I.40).

$$H_s = R_b * H_b + H_d \frac{1 + \cos(s)}{2} + \rho * H_h \frac{1 - \cos(s)}{2} \quad (II.3)$$

Direct Diffus Réfléchi

où R_b est le facteur de transposition du rayonnement direct d'un plan horizontal à un plan incliné calculé, pour un plan orienté sud, à partir de la relation (I.41) [3] :

$$R_b = \frac{\cos(\delta) \cos(\varphi - s) \sin(\omega'_c) + \omega'_c \sin(\delta) \sin(\varphi - s)}{\cos(\delta) \cos(\varphi) \sin(\omega_c) + \omega_c \sin(\delta) \sin(\varphi)}$$

s : Angle d'inclinaison (degrés).

δ : Déclinaison (degrés).

φ : Latitude (degrés).

$\omega'_c = \min\{\arccos(-\tan(\delta) \tan(\varphi)), \arccos(-\tan(\delta) \tan(\varphi - s))\}$ est l'angle horaire du coucher du soleil sur le plan incliné de s .

A partir de l'estimation de l'irradiation globale et diffuse, on a déduit la composante directe. Ces composantes sont ensuite utilisées pour calculer l'irradiation solaire journalière d'un plan incliné H_s .

Dans nos calculs, on a choisi pour l'angle d'inclinaison s les valeurs correspondant aux inclinaisons optimales des capteurs solaires. Pour une position fixe toute l'année, l'angle d'inclinaison optimale correspond à la latitude du lieu : $s = \varphi$. Si l'on peut changer la position du capteur deux fois dans l'année, les inclinaisons recommandées sont $s = \varphi + 20$ en hiver et $s = \varphi - 20$ en été. Les façades verticales sont particulièrement intéressantes pour le secteur de l'habitat, on envisagera également le calcul pour l'inclinaison $s = 90$.

I.4 Estimation des composantes spectrales du rayonnement solaire

Dans le but d'établir des équations d'estimation des composantes spectrales en fonction d'une variable facilement mesurable, on a cherché l'allure de l'évolution de ces composantes par rapport à l'irradiation solaire globale puisqu'elle est la composante solaire la plus facile à mesurer.

Ainsi lorsqu'on a porté les valeurs des composantes spectrales et de l'irradiation globale sur le même graphe, on a remarqué qu'elles ont toutes la même allure de variation c'est à dire qu'il y'a une proportionnalité entre ces composantes d'une part et l'irradiation globale d'autre part comme la figure suivante :

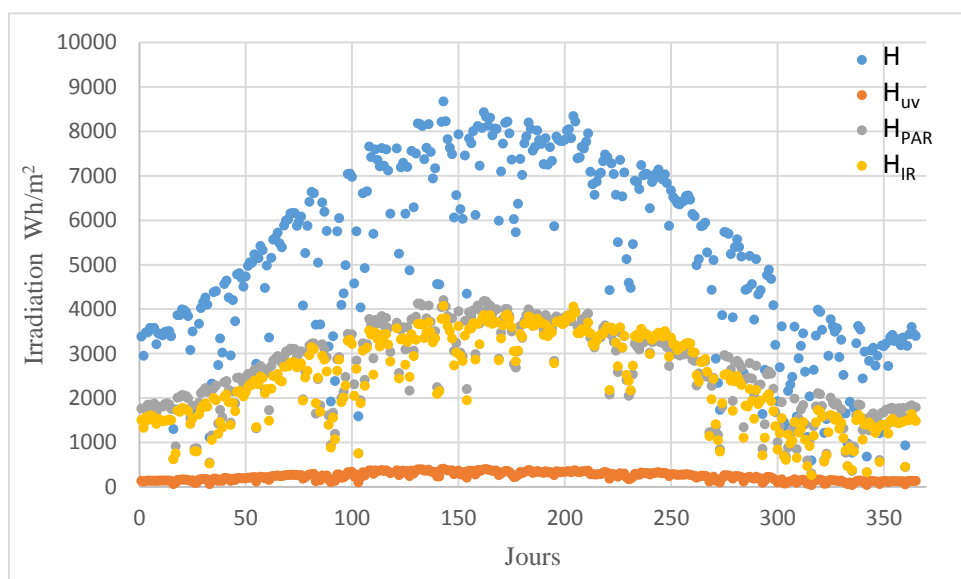


Figure II.3 : Variations des valeurs journalières de H_{uv} , H_{PAR} , H_{IR} et H_h en fonction du temps.

Suite à ces résultats et afin d'obtenir des modèles d'estimation des irradiances spectrales valables pour les sites marocains, on a utilisé les données de deux années de mesure des irradiances solaires globales et des irradiances solaires spectrales collectées en des sites de climats différents.

Ainsi, on a tracé les composantes spectrales en fonction des irradiances globales journalières, les nuages des points présentés dans la figure II.4 nous ont conduits à des équations linéaires. Afin d'améliorer les coefficients de corrélation, on a considéré trois intervalles selon l'état météorologique de la journée caractérisé par son coefficient de transparence K_t . Les intervalles choisis sont définis selon l'état météorologique de la journée :

- $K_t < 0.35$: Dans cet intervalle, l'irradiation solaire directe est pratiquement nulle. Par conséquent, la valeur de l'irradiation solaire diffuse tend vers celle du global et l'état du ciel est défini comme totalement couvert.

- $0.35 < K_t < 0.65$: Dans cet intervalle les rayonnements direct et diffus coexistent, dans ce cas, l'état du ciel est défini comme partiellement nuageux.

- $K_t > 0.65$: Dans cet intervalle, le rayonnement solaire global est composé essentiellement du direct. Dans ce cas la nébulosité est minimale et l'état du ciel est clair.

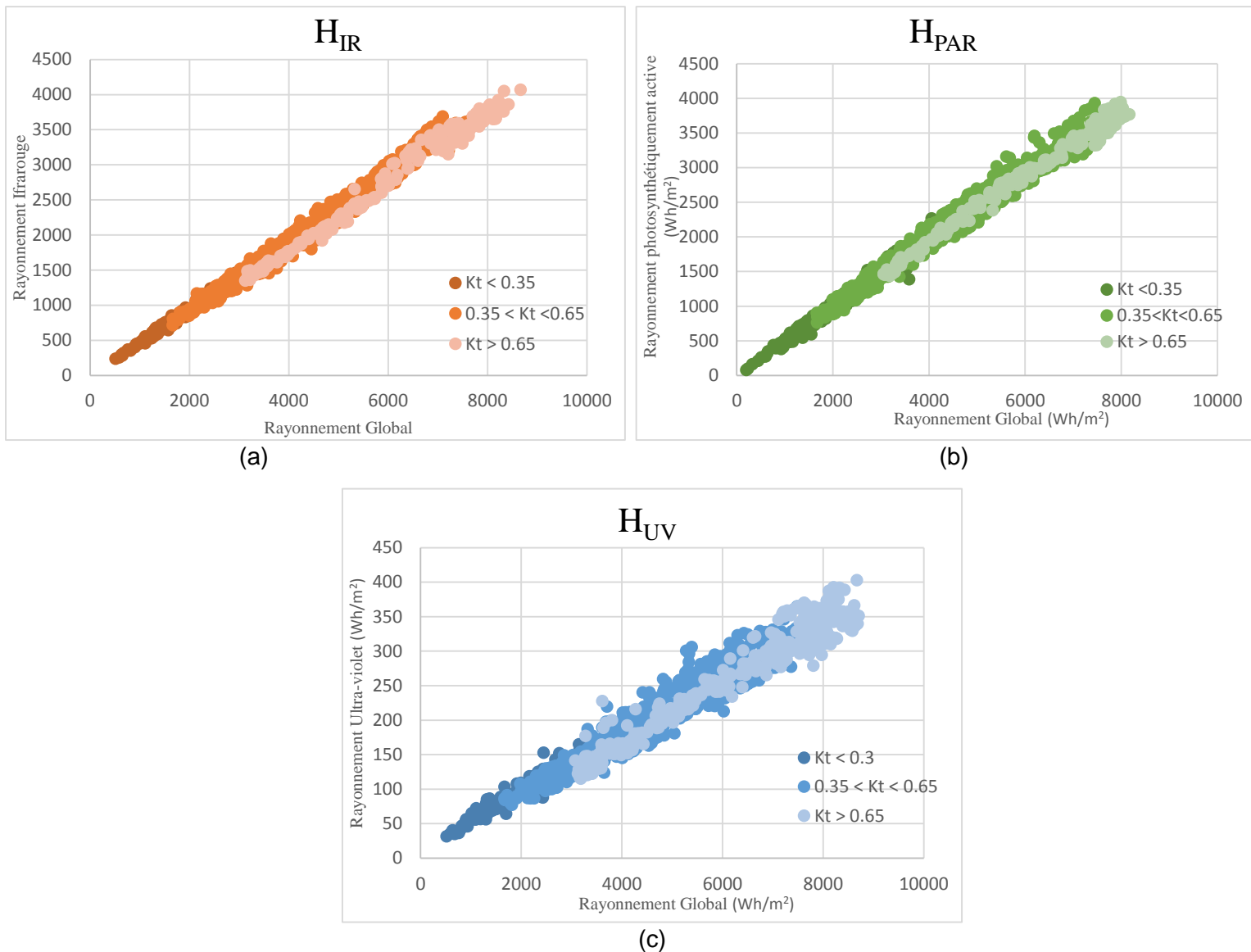


Figure II.4 : Nuage de points des valeurs journalières des composantes H_{uv} , H_{PAR} , H_{IR} en fonction du rayonnement solaire global H_h , tenant compte de l'état météorologique.

Pour déterminer les équations qui régissent les nuages de points présentés dans la figure 4, on a utilisé la méthode des moindres carrés, les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau suivant :

Intervalles de l'indice de clarté	Equations de corrélations	R
$K_t \leq 0.35$	$H_{UV} = 0.0485 H_h$	0.97
	$H_{PAR} = 0.487 H_h$	0.99
	$H_{IR} = 0.468 H_h$	0.99
$0.35 < K_t \leq 0.65$	$H_{UV} = 0.0442 H_h$	0.97
	$H_{PAR} = 0.484 H_h$	0.99
	$H_{IR} = 0.47 H_h$	0.99
$K_t > 0.65$	$H_{UV} = 0.0412 H_h$	0.98
	$H_{PAR} = 0.478 H_h$	0.99
	$H_{IR} = 0.472 H_h$	0.99
$0 \leq K_t \leq 1$	$H_{UV} = 0.044 H_h$	0.97
	$H_{PAR} = 0.48 H_h$	0.99
	$H_{IR} = 0.471 H_h$	0.99

Tableau II.2 : *Équations de corrélation pour les valeurs quotidiennes des composantes spectrales du rayonnement solaire (Wh / m^2) en fonction du rayonnement solaire global H_h (Wh / m^2) pour les trois conditions du ciel.*

D'après le tableau II.2 on remarque que les coefficients de corrélations R pour tous les équations d'estimations sont proche de 1, ce qui prouve la bonne qualité des corrélations et la linéarité des composantes spectrales en fonction rayonnement globale. De plus, on constate une légère diminution des pentes des équations de corrélation $P_{UV} = H_{UV} / H_h$ et $P_{PAR} = H_{PAR} / H_h$ contre une augmentation du $P_{IR} = H_{IR} / H_h$ en passant d'un ciel couvert à un ciel clair. Cela s'explique par la variation de la proportion du rayonnement photosynthétiquement actif par rapport au rayonnement solaire global H_{PAR} / H_h qui passe de 47.8 % pour un ciel clair à 48.7 % pour un ciel couvert, tandis que la proportion du rayonnement ultraviolet par rapport au rayonnement global H_{UV} / H_h varie de 4.1 % pour un ciel clair à 4.85 % pour un ciel couvert. En revanche la proportion du rayonnement infrarouge par rapport au rayonnement solaire global H_{IR} / H_h passe de 47.2 % pour un ciel clair à 46.8 % pour un ciel couvert.

Ainsi, pour les jours couverts caractérisés par la présence des nuages il y a une légère augmentation des fractions H_{UV} / H_h et H_{PAR} / H_h alors qu'il y a une diminution de la fraction H_{IR} / H_h .

Cet effet provient du fait que les nuages sont associés à des teneurs élevées de la vapeur d'eau, la vapeur d'eau est parmi les gaz atmosphériques qui absorbent dans l'infrarouge. Donc, pour les jours couverts, il y a atténuation du rayonnement infrarouge, alors que les parts de H_{PAR} et H_{UV} ne sont pas affectés. L'atténuation de H_{IR} entraîne une légère diminution du global ce qui entraîne une légère augmentation des fractions H_{UV}/H_h et H_{PAR}/H_h . Ces interprétations sont conformes aux résultats obtenus à Rabat [34] et à d'autres sites [3].

II. Elaboration des modèles d'estimation des composantes solaires horaires

Les valeurs journalières des irradiances solaires sont utilisées généralement, lors des études d'avant-projet, pour des estimations et des dimensionnements en vue de voir la faisabilité et la viabilité d'un projet solaire. Cependant pour des études plus fines, en particulier pour la détermination des performances des systèmes solaires on a souvent besoin des valeurs horaires qui sont rarement disponibles, d'où la nécessité à chercher des méthodes d'estimation des composantes solaires à l'échelle horaire.

II.1 Estimation des valeurs horaires de l'irradiation globale I_h

La variation du rayonnement solaire, au cours d'une journée est due, d'une part à des causes astronomiques (variation de la hauteur du soleil...) et d'autre part à l'état de l'atmosphère (nébulosité et trouble atmosphérique) dont les fluctuations sont aléatoires. Si on étudie des journées consécutives, les profils de la variation horaire quotidienne du rayonnement solaire sont différents d'une journée à l'autre et pour certains ne présentent pas de symétrie, parcontre lorsqu'on étudie le profil moyen pour un mois ou pour une année l'allure est régulière et symétrique par rapport à midi TSV.

Tenant compte de ce fait, la majorité des études réalisées pour estimer l'irradiation globale horaire se sont focalisées sur l'estimation des moyennes mensuelles horaires au lieu de l'estimation des valeurs horaires. Parmi ces études, on peut citer par exemple le modèle Collares-Pereira et Rabl qui ont établi une relation empirique entre le rapport $(\overline{I_h}/\overline{H_h})/(\overline{I_{oh}}/\overline{H_{oh}})$, ω_i et $\overline{\omega_c}$ présenté dans le chapitre I, équation (I.50).

$$(\overline{I_h}/\overline{H_h})/(\overline{I_{oh}}/\overline{H_{oh}}) = a + b \cos \omega_i$$

Avec $a = 0.49 + 0.5016 \sin (\overline{\omega} - 60^\circ)$

$$b = 0.6609 + 0.4767 \sin (\overline{\omega} - 60^\circ)$$

Afin d'examiner la possibilité de l'utilisation du modèle de Collares-Pereira et Rabl aux sites marocains, nous l'avons appliqué pour le site de Rabat.

L'étude de validité a été effectuée en comparant les données des irradiances solaires horaires mesurées à Rabat aux valeurs estimées par le modèle C-P-R, ce qui a fait l'objet du tableau II.3 et la figure II.5.

Estimation \bar{I}_h	RMBE %	Ecart moyen (Wh/m ²)	MAE (Wh/m ²)	MAPE (%)	RMSE (%)
Le modèle Collares-Pereira and Rabl	7.7	28.5	40.1	12.8	11.7

Tableau II.3: Indicateurs statistiques calculés à partir des valeurs estimées par le modèle de Collares-Pereira et Rabl et des valeurs mesurées sur le site de Rabat.

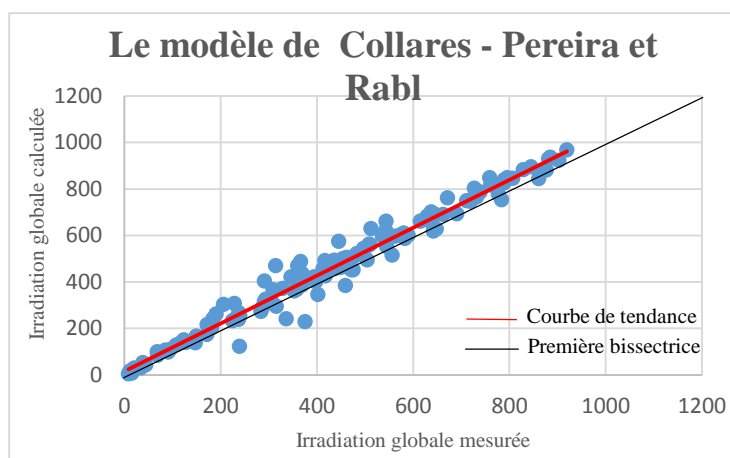


Figure II.5: Comparaison des valeurs estimées par le modèle C-P-R aux valeurs mesurées des irradiances solaires globales horaires pour le site de Rabat.

D'après le tableau II.3, on constate que la moyenne annuelle de l'erreur relative est égale à 7.7 % ce qui s'interprète par une surestimation des valeurs estimées par rapport aux données mesurées. Cette remarque est approuvée par la figure II.5 où on aperçoit que la courbe de tendance des nuages de point est au-dessus de la première bissectrice.

Dans le but d'améliorer la réponse du modèle, nous avons cherché une relation empirique adaptée à l'ensemble des sites marocains. Pour cela, on a recalculé les coefficients a et b de l'équation (I.50) à partir d'une année des mesures effectuées aux stations de Rabat, Fès, Marrakech et Tanger (sites représentatifs des différents climats marocains). ce qui nous a conduits à trouver une nouvelle relation entre le rapport $(\overline{I_h} / \overline{H_h}) / (\overline{I_{oh}} / \overline{H_{oh}})$, ω_i et $\overline{\omega_c}$.

Pour obtenir les nouvelles expressions des coefficients a et b on a procédé de la manière suivante :

- Dans la première étape, à l'aide des données mesurées, nous avons calculé les moyennes mensuelles de l'irradiation solaire globale quotidienne ainsi que les moyennes mensuelles de l'irradiation solaire horaire, puis pour chaque mois, nous avons calculé par la méthode des moindres carrés les valeurs des coefficients a et b, ce qui nous a donné 12 valeurs pour chaque coefficient. L'ensemble des coefficients sont présentés dans le tableau II.4

	Fès		Marrakech		Rabat		Tanger	
	a	b	a	B	a	b	a	B
Janvier	0.43	0.65	0.48	0.608	0.32	0.757	0.367	0.735
Février	0.516	0.578	0.4	0.7	0.464	0.64	0.546	0.548
Mars	0.6	0.381	0.518	0.602	0.653	0.426	0.784	0.274
Avril	0.552	0.569	0.606	0.5147	0.648	0.482	0.681	0.404
Mai	0.755	0.333	0.7063	0.399	0.664	0.451	0.779	0.3
Juin	0.699	0.404	0.681	0.435	0.663	0.471	0.756	0.335
Juillet	0.652	0.465	0.683	0.431	0.604	0.554	0.765	0.318
Août	0.62	0.499	0.702	0.398	0.601	0.526	0.712	0.379
Septembre	0.503	0.599	0.541	0.582	0.546	0.555	0.684	0.399
Octobre	0.413	0.689	0.529	0.601	0.573	0.541	0.701	0.358
Novembre	0.32	0.83	0.412	0.699	0.575	0.5	0.434	0.670
Décembre	0.449	0.628	0.349	0.755	0.386	0.721	0.552	0.517

Tableau II. 4 : les valeurs des coefficients a et b calculé à partir des mesures des sites représentatifs.

- Dans la deuxième étape, nous avons tracé, séparément et pour chaque site, les valeurs de a et b en fonction de $\sin(\overline{\omega_c} - 70^\circ)$. La figure II.6 donne un exemple des présentations graphiques obtenues.

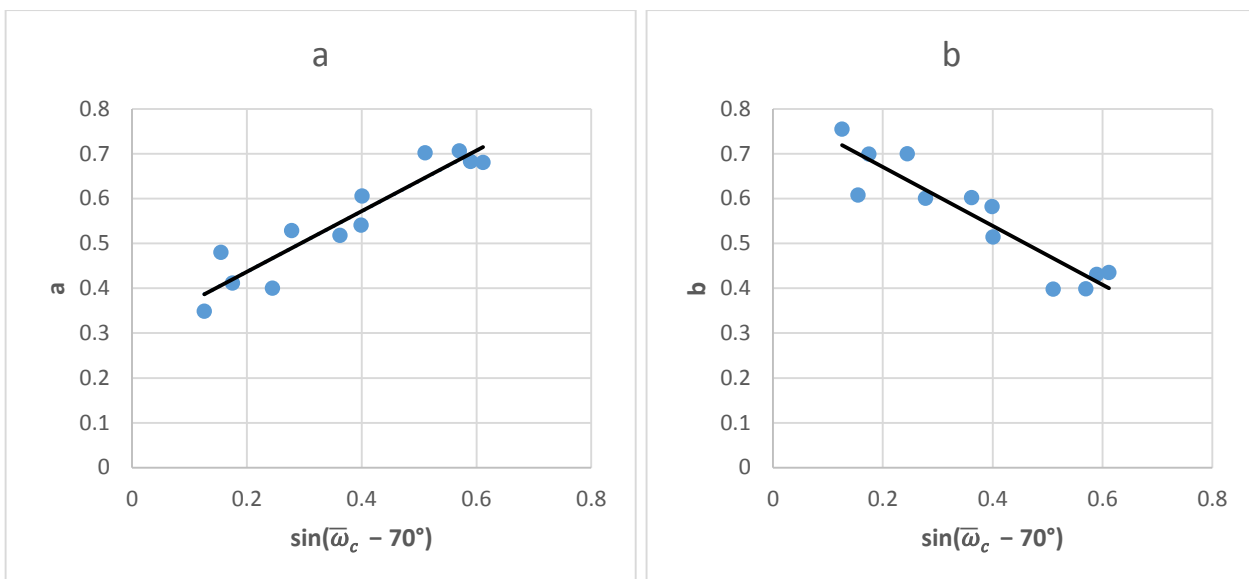


Figure II.6 : Présentations graphiques de a et b en fonction de $\sin(\overline{\omega}_c - 70^\circ)$ pour le site de Marrakech.

La forme des nuages de point nous ont conduits à choisir des équations linéaires de la forme suivante :

$$\begin{cases} a = a' + b' \sin(\overline{\omega}_c - 70^\circ) \\ b = a'' + b'' \sin(\overline{\omega}_c - 70^\circ) \end{cases} \quad (II.4)$$

Avec 70° est la valeur minimale de l'angle horaire de couché

Les coefficients a' , a'' , b' et b'' sont calculé à partir du tableau II.4 en utilisant la méthode des moindres carrés. Les valeurs obtenues pour chaque site sont présentées dans le tableau II.5

Coefficient	a'	b'	R	Coefficient	a''	b''	R
a				b			
Rabat	0.406	0.450	0.9	Rabat	0.672	-0.354	0.89
Fès	0.350	0.589	0.88	Fès	0.735	-0.548	0.85
Marrakech	0.324	0.678	0.94	Marrakech	0.788	-0.673	0.93
Tanger	0.4406	0.5374	0.91	Tanger	0.677	-0.6	0.9

Tableau II.5 : Les valeurs des facteurs a' , a'' , b' et b'' calculés à différents sites.

Afin de généraliser le modèle et obtenir une relation valable pour tous les sites marocains, nous avons calculé la moyenne des facteurs qui déterminent les coefficients a et b pour les quatre sites, ainsi on a obtenu l'équation suivante :

$$\begin{cases} a = 0.38 + 0.564 \sin(\overline{\omega_c} - 70^\circ); \\ b = 0.72 - 0.54 \sin(\overline{\omega_c} - 70^\circ); \end{cases} \quad (II.5)$$

Finalement en utilisant l'équation ci-dessous, on pourra facilement estimer les moyennes mensuelles des irradiances globales horaires pour tout le Maroc.

$$\frac{\frac{\overline{I_h}}{\overline{H_h}}}{\frac{\overline{I_{oh}}}{\overline{H_{oh}}}} = (0.38 + 0.564 \sin(\overline{\omega_c} - 70^\circ)) + (0.72 - 0.54 \sin(\overline{\omega_c} - 70^\circ)) \cos \omega_i \quad (II.6)$$

Le comportement d'un système solaire varie en fonction de l'évolution du rayonnement solaire au cours de la journée. Cette variation est aléatoire et dépend de plusieurs variables. Cependant l'utilisation des moyennes mensuelles peut erroner les résultats des études de rendement ou de simulation. Pour remédier à ce problème, nous avons adapté l'équation (II.6) pour qu'elle génère des valeurs horaires à la place des moyennes mensuelles des valeurs horaires.

Afin d'atteindre cet objectif, on a changé les moyennes mensuelles des variables $\overline{I_{oh}}$, $\overline{H_{oh}}$, $\overline{H_h}$, et $\overline{\omega_c}$ par les valeurs horaires de I_{oh} et journalières de H_h , ω_c , et H_{oh} et en gardant les mêmes coefficients que l'équation (II.6) on a obtenu l'équation suivante:

$$\frac{\frac{I_h}{H_h}}{\frac{I_{oh}}{H_{oh}}} = (0.38 + 0.564 \sin(\omega_c - 70^\circ)) + (0.72 - 0.54 \sin(\omega_c - 70^\circ)) \cos \omega_i \quad (II.7)$$

Pour étudier l'impact des changements apporté à l'équation (II.6) et vérifier la validité de l'équation (II.7), nous avons comparé les données estimées avec les mesures collectées en différents sites.

II.2 Estimation de l'irradiation solaire diffuse horaire

Similairement à l'irradiation globale, la quantité de la fraction diffuse horaire constitue une information de très haute importance dans la réalisation des systèmes solaires ainsi qu'une évaluation précise du potentiel énergétique et thermique utilisé dans plusieurs applications d'ingénierie. En revanche, les mesures de cette variable sont quasiment inexistantes dans la majorité des stations météo.

Par conséquent, il est nécessaire de trouver un modèle, corrélant le rayonnement diffus au rayonnement global, qui est habituellement disponible. De nombreux modèles sont réalisés pour estimer l'irradiation diffuse horaire sur un plan horizontal. Mais, ils nécessitent des informations sur le rayonnement global sur une surface horizontale et de plusieurs variables climatiques, y compris la température ambiante et l'humidité relative ce qui n'est pas toujours disponible.

L'objectif principal du présent paragraphe est de développer un nouveau modèle de corrélation pour estimer l'irradiation solaire diffuse qui est à la fois valable pour tout le Maroc et fait intervenir le minimum de variables.

Ainsi, on a rassemblé les mesures collectées aux stations représentatives dans un seul fichier et on a calculé l'indice de clarté horaire k_t comme étant le rapport entre le rayonnement global horaire observé et le rayonnement extraterrestre horaire calculé sur un plan horizontal $k_t = I_h/I_o$, puis la fraction diffuse k_d comme étant le rapport entre le rayonnement diffus horaire observé et le rayonnement horaire global sur plan horizontal $k_d = I_d/I_g$. Ensuite, on a tracé k_d en fonction de k_t ce qui nous a donné la figure suivante :

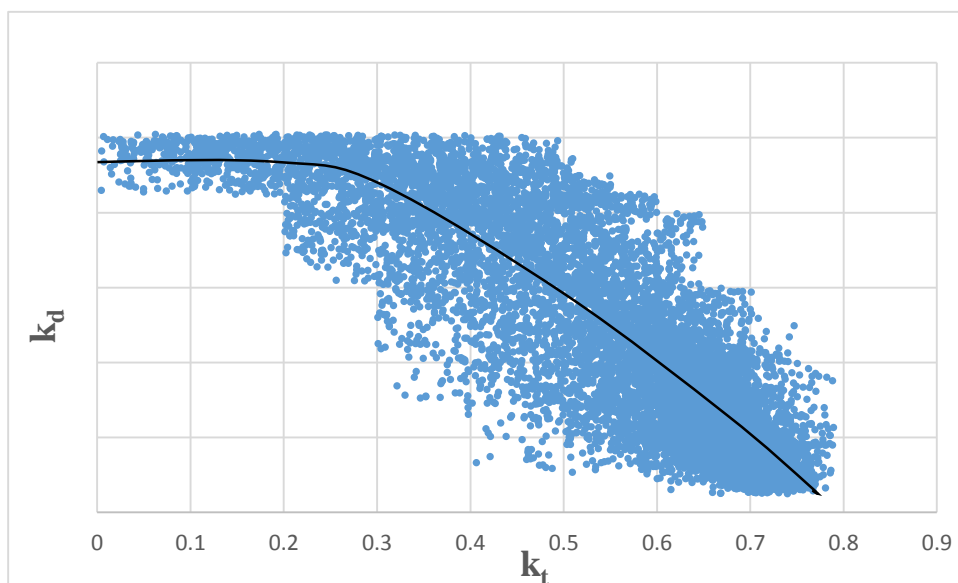


Figure II.7 : Représentation graphique de k_d en fonction de k_t utilisant les mesures des sites représentatives.

D'après la figure II.7, on remarque que le nuage de point a la forme d'une cascade qui se caractérise par une première partie presque horizontale et une deuxième partie inclinée. Afin de trouver une corrélation qui représente l'ensemble des points avec un bon ajustement, on a divisé les valeurs de

k_t en deux intervalles puis par la méthode des moindres carrés, on a établi séparément les équations de corrélations.

$$k_d = \begin{cases} 0.9 & ; k_t < 0.25 \\ -1.5301k_t^2 - 0.0475k_t + 0.9884 & ; 0.25 < k_t < 0.8 \end{cases} ; R=0.88 \quad (II.8)$$

De plus, on constate que le nuage de point présente une dispersion dans l'intervalle de k_t compris entre 0.3 et 0.55. Cela est dû principalement à deux causes, premièrement au volume important des données utilisées qui proviennent de différents sites, et deuxièmement à la fluctuation de la fraction horaire diffuse qui dépend fortement du type et de la distribution des particules et des nuages présents dans le ciel.

En comparant ce résultat avec le travail antérieur de Ihsane [25] réalisé pour le site de Rabat, on remarque une nette amélioration du coefficient de corrélation et une légère différence des coefficients de l'équation de corrélation. Cette différence est due aux données utilisées qui représentent des types de climat différents.

II.3 Estimation de l'irradiation solaire globale horaire d'un plan incliné

La performance des systèmes de conversion d'énergie qu'elle soit photovoltaïque ou thermique dépend fortement de l'orientation et de l'angle d'inclinaison de leurs plans de collecte par rapport à l'horizon. Généralement, pour des considérations techniques et économiques, ces systèmes sont installés dans une direction fixe selon l'emplacement du site considéré pour collecter le maximum d'énergie solaire. Afin d'augmenter l'efficacité énergétique de ces systèmes, au cours d'une période donnée, il est nécessaire, dès le départ, de réaliser une bonne étude qui prend en considération la variation de l'irradiation en fonction de la valeur de l'angle d'inclinaison.

Dans la littérature, le rayonnement solaire global incident sur un plan incliné de l'angle (s) est la somme des trois composantes : La composante directe, la composante diffuse et la composante réfléchie.

D'après les résultats de l'étude réalisée par Pr. Tadili [28], on a conclu que le modèle isotrope et le mieux adapté pour estimer l'irradiation inclinée au Maroc. Ce modèle se présente par l'équation (I.58):

$$I_s = I_b \frac{\cos(i)}{\cos(\theta)} + (I_h - I_b) \frac{(1 + \cos(s))}{2} + \rho \cdot I_h \left(\frac{1 - \cos(s)}{2} \right)$$

Où i et θ sont respectivement les angles d'incidences des rayons solaires sur le plan incliné et sur le plan horizontal. Le facteur de transposition ($\cos(i)/\cos(\theta)$) de la composante directe est calculé au milieu de l'heure considérée. Comme il est intéressant de connaître l'évolution de l'irradiation horaire globale pour différentes inclinaisons, nous avons choisi de le calculer pour $s = \varphi, \varphi + 20, \varphi - 20, 90$.

II.4 Estimation des composantes spectrales du rayonnement solaire horaire

La connaissance des valeurs horaires des composantes spectrales du rayonnement solaire constitue une donnée très importante, puisque ce type d'irradiation intervient dans plusieurs domaines. Bien que le rayonnement solaire UV ne représente qu'une petite partie du spectre solaire 290–385 nm, cette partie est importante, en raison de ses effets photochimiques et biologiques, elle est présente dans plusieurs disciplines et exploitée par plusieurs applications: chimie troposphérique, recherche sur le cancer, foresterie, agriculture, ophtalmologie et océanographie. En revanche, le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) réside dans la gamme des longueurs d'ondes entre 400–700 nm, il joue un rôle important dans plusieurs applications liées à la physiologie végétale, production de biomasse et l'éclairage naturelle dans les serres agricoles. Tandis que l'irradiation infrarouge (700–3000nm) contribue à environ 47% de l'énergie totale du soleil, elle est donc importante dans l'ensemble des études énergétiques et intervient dans les processus climatiques. Vu le rôle fondamental des irradiances spectrales et la non-disponibilité de leurs mesures, nous sommes dans l'obligation de déterminer des modèles pour estimer ces composantes.

En se basant sur la figure II.8 qui présente l'évolution horaire des composantes spectrales et du rayonnement solaire global pendant une journée, on remarque que la variation des composantes spectrales est liée directement à la variation de l'irradiation globale.

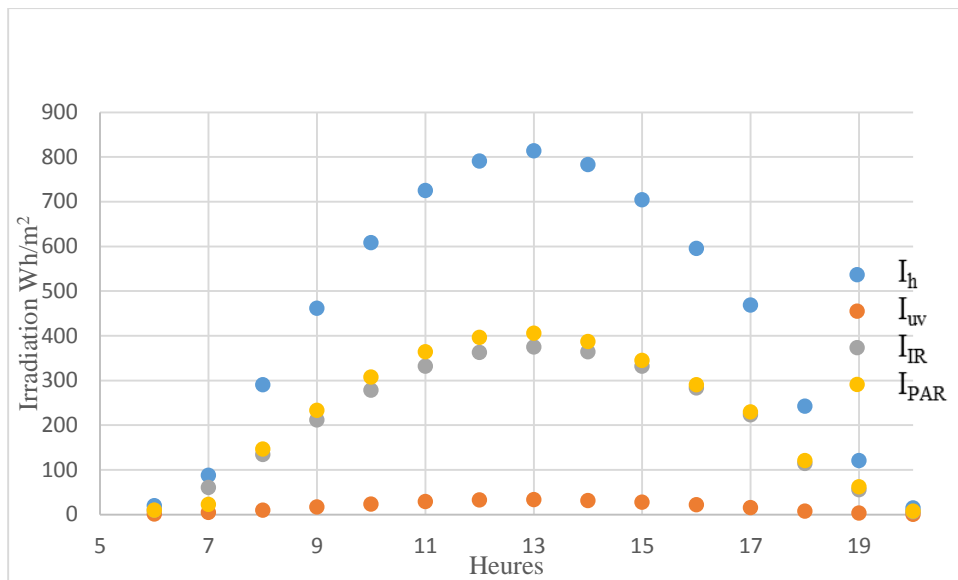


Figure II.8 : Variations de I_{UV} , I_{PAR} , I_{IR} et I_h pendant une journée.

Pour déterminer cette relation, nous avons rassemblé les données des villes de Rabat, Fès pour les années 2010 et 2011 dans un seul fichier, puis on a tracé les composantes spectrales en fonction des irradiances globales horaires. Les nuages de point présentés dans la figure II.9 nous ont conduits à des équations linéaires de la forme $I_{spect} = a * I_h$. Similairement au paragraphe I-4 du deuxième chapitre, on a considéré trois intervalles dans l'élaboration des équations selon l'état météorologique du ciel caractérisé par son coefficient de transparence k_t . Les intervalles choisis sont définis comme suite :

- $k_t < 0.35$: ciel couvert,
- $0.35 < k_t < 0.65$: ciel partiellement couvert,
- $k_t > 0.65$: ciel clair.

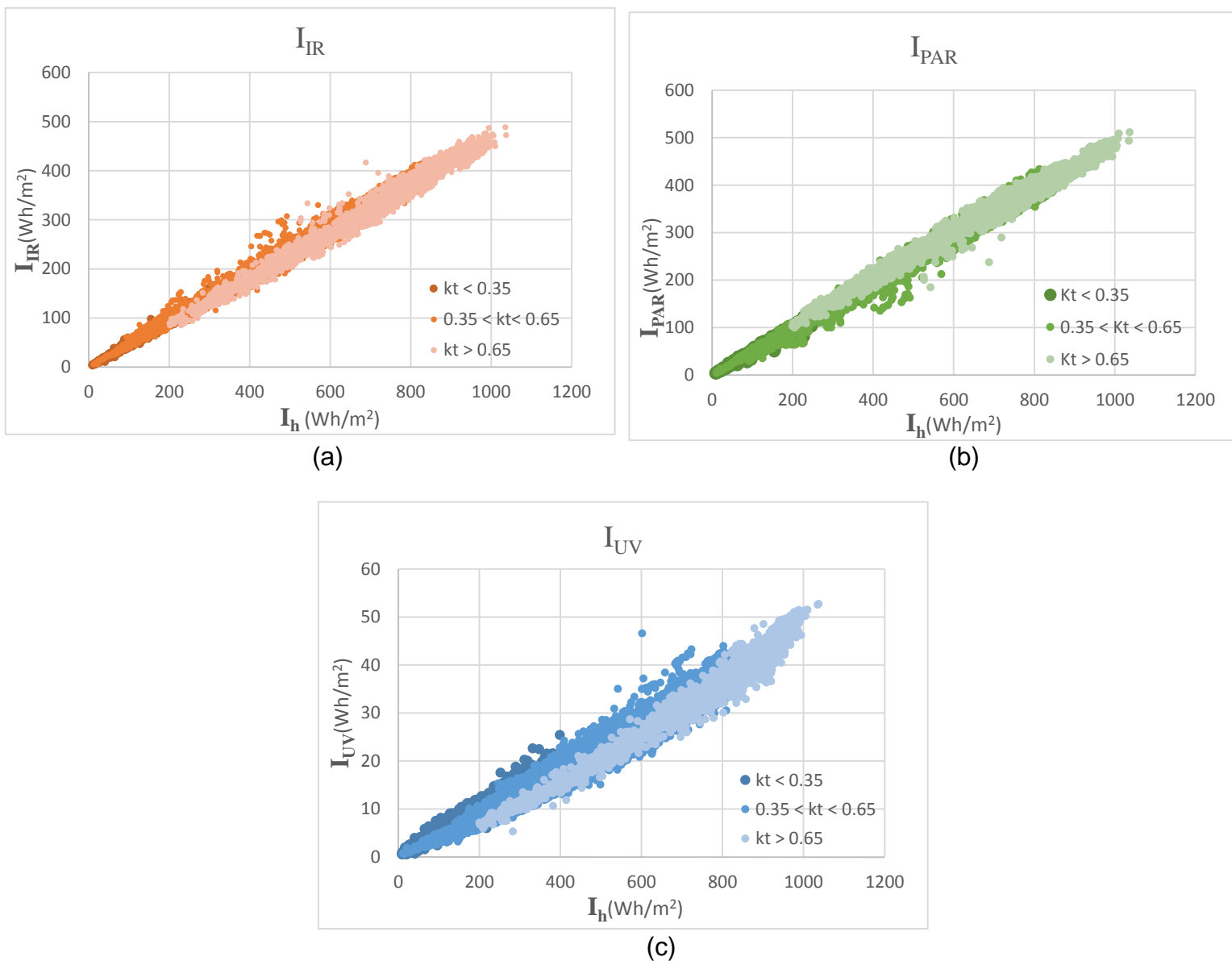


Figure II.9 : Nuage de points des valeurs horaires des composantes I_{UV} , I_{PAR} et I_{IR} en fonction du rayonnement solaire global I_h , tenant compte de l'état météorologique pour les villes de Rabat et Fès.

Intervalles de l'indice de clarté	Equations de corrélations	R
$k_t \leq 0.35$	$I_{UV} = 0.05 I_h$	0.97
	$I_{PAR} = 0.49 I_h$	0.99
	$I_{IR} = 0.462 I_h$	0.99
$0.35 < k_t \leq 0.65$	$I_{UV} = 0.0448 I_h$	0.97
	$I_{PAR} = 0.484 I_h$	0.99
	$I_{IR} = 0.469 I_h$	0.98
$k_t > 0.65$	$I_{UV} = 0.0446 I_h$	0.98
	$I_{PAR} = 0.48 I_h$	0.99
	$I_{IR} = 0.472 I_h$	0.99
$0 \leq k_t \leq 1$	$I_{UV} = 0.047 I_h$	0.98
	$I_{PAR} = 0.488 I_h$	0.99
	$I_{IR} = 0.467 I_h$	0.99

Tableau II. 6 : *Équations d'estimation des valeurs horaires des composantes spectrales du rayonnement solaire en fonction du rayonnement solaire global I_h pour les trois conditions du ciel.*

Les résultats obtenus montrent que la proportion du rayonnement ultraviolet par rapport au rayonnement global pour les sites marocains varie de 4.46 % pour un ciel clair à 5 % pour un ciel couvert. Cette variation bien qu'elle soit en accord avec la littérature est sensiblement élevée en comparaison à celles obtenues en certaines localités européennes.

Concernant la proportion du rayonnement photosynthétiquement actif par rapport au rayonnement solaire global, elle varie de 48 % pour un ciel clair à 49 % pour un ciel couvert. Ces résultats sont en accord avec d'autres travaux dans plusieurs localités dans le monde.

D'après le tableau II.6, on remarque que les fractions horaires des composantes UV et PAR du rayonnement solaire global, à savoir (I_{UV} / I_h) et (I_{PAR} / I_h) , augmentent lorsque les conditions du ciel passent de clair à couvert ; en revanche, la fraction (I_{IR} / I_h) diminue lorsque les conditions du ciel passent de clair à couvert. Cet effet inverse est dû à l'absorption de l'infrarouge par la vapeur d'eau présente dans les nuages en jours couverts contrairement au I_{UV} et I_{PAR} qui ne sont pas affectés par cette atténuation. Par ailleurs, les grandes valeurs des coefficients de corrélation présentés dans le tableau II.1, reflètent la qualité des corrélations obtenues. Ces coefficients sont du même ordre que ceux trouvés dans la partie consacrée aux valeurs journalières et aussi à ceux trouvés par d'autres auteurs tels que Escobedo [33] et Hamatti [34].

Signalons enfin que pour les valeurs horaires ou journalières, nous avons obtenu presque les mêmes valeurs des pentes, ceci est valable pour les trois composantes spectrales. Tous ces résultats sont en accord avec d'autres travaux réalisés soit au Maroc soit à travers le monde.

III. Sélection des modèles d'estimation appropriés pour le Maroc.

Pour sélectionner les modèles d'estimation appropriés pour les sites marocains, nous avons comparé les valeurs générées par les différentes équations d'estimation proposées par différents auteurs avec des mesures collectés en 2018 à Rabat en utilisant les cinq indicateurs statistiques et la représentation graphique.

III.1 Modèles d'estimation des Composantes horaires

III.1.1 Irradiation globale

III.1.1.1 Moyenne mensuelle des valeurs horaires

Modèle d'estimation	RMBE %	Ecart moyen (Wh/m ²)	MAE (Wh/m ²)	MAPE (%)	RMSE (%)
Notre modèle de \bar{I}_h	-1.58	-4.6	36.3	11.1	10.6
Le modèle de Collares - Pereira et Rabl	7.7	28.5	40.1	12.8	11.7

Tableau II. 7: comparaison des modèles d'estimation de \bar{I}_h .

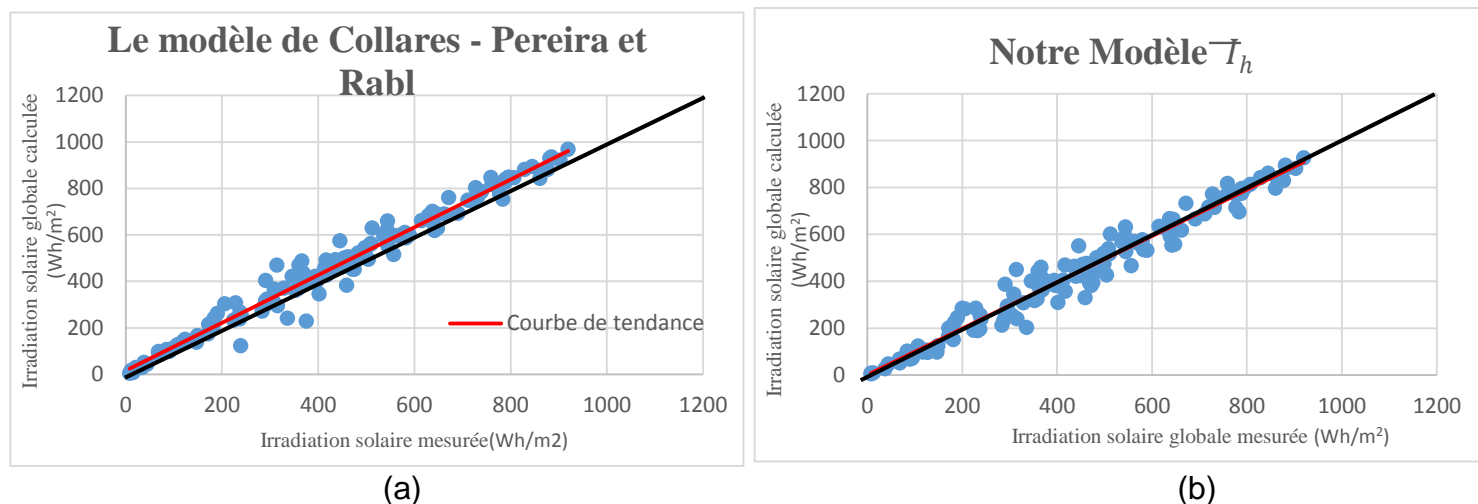


Figure II.10 : Représentation graphique des valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées pour différents modèles d'estimation de T_h . Comparaison entre le modèle de Collares - Pereira et Rabl (a) et notre modèle T_h (b).

D'après le tableau II.7, on remarque que les indicateurs statistiques calculés, à partir des données générées par notre modèle, sont largement inférieurs à ceux obtenus en utilisant le modèle de Collares - Pereira and Rabl. Ce résultat est approuvé par les graphiques de la figure II.10 ou on remarque dans la fig II.10-b que la courbe de tendance est pratiquement confondue avec la première bissectrice. Contrairement à la fig II.10-a où il y a un décalage de la courbe de tendance par rapport à la première bissectrice. Ainsi nous avons constaté que notre modèle est adapté pour prédire les moyennes mensuelles de l'irradiation solaire globale horaire pour les sites marocains.

III.1.1.2 Valeurs horaires

Pour obtenir les valeurs horaires, au lieu des moyennes mensuelles des valeurs horaires, nous avons adapté l'équation (II.6) de telle sorte qu'elle soit valide pour estimer les valeurs horaires. Pour étudier l'impact des changements apportés à l'équation (II.6) et vérifier la validité de l'équation (II.7), nous avons comparé les données estimées avec les mesures, le résultat est présenté dans tableau II. 8 et la figure II.11.

	RMBE %	Ecart moyen (Wh/m ²)	MAE (Wh/m ²)	MAPE (%)	RMSE (%)
Notre modèle de I_h	-0.69	-6.79	62	11	12.67

Tableau II. 8 : Vérification de la validité de notre modèle de I_h .

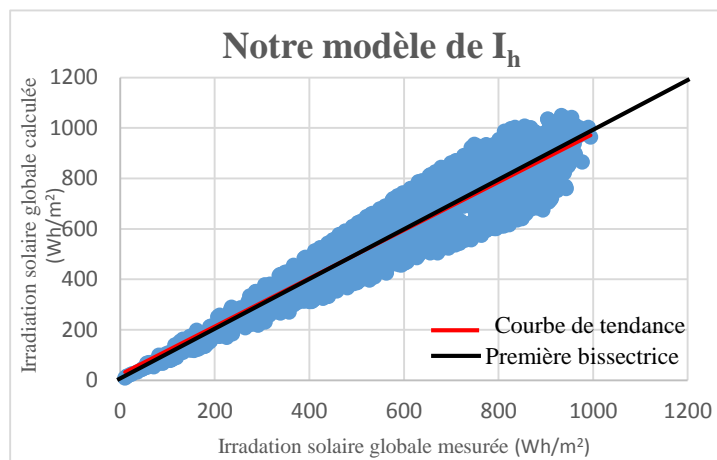


Figure II.11 : Représentation graphique des valeurs estimées par notre modèle en fonction des valeurs mesurées.

La comparaison des valeurs mesurées et des valeurs estimées par notre modèle a montré que l'erreur relative ne dépasse pas -0.69% ce qui est relativement faible, ainsi que la faible dispersion des points de la figure 5 approuvé par l'erreur quadratique moyenne égale à 12.6% et la superposition de la courbe de tendance avec la première bissectrice.

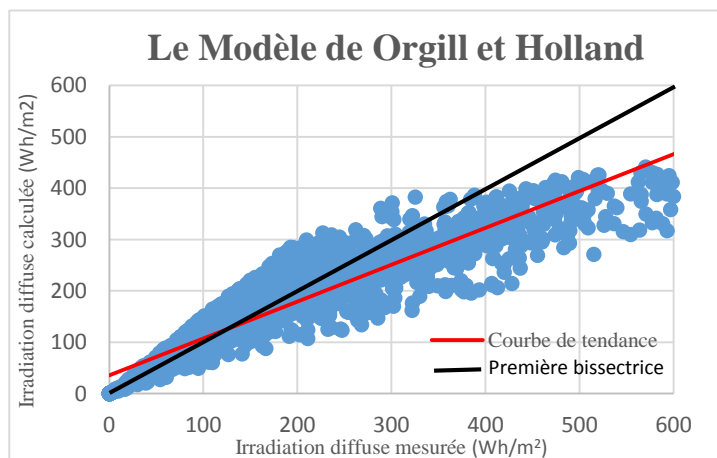
Ces résultats montrent la qualité de l'estimation du rayonnement global I_h par notre modèle et que l'adaptation utilisée pour obtenir l'équation (II.7) est adéquate pour estimer le rayonnement global horaire.

III.1.2 Irradiation diffuse

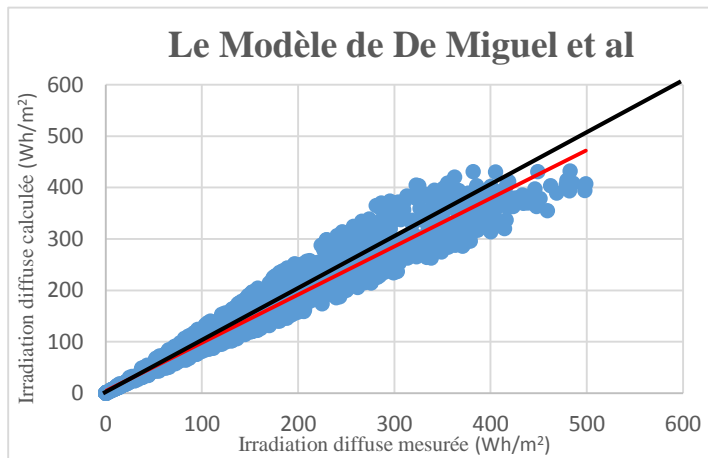
Plusieurs modèles ont été réalisés à travers le monde pour estimer l'irradiation diffuse. Pour choisir le modèle adéquat à l'estimation de cette composante, on a comparé plusieurs modèles. Les résultats de cette étude sont rassemblés dans tableau II.9 et à la figure II.12.

Modèle d'estimation de I_d	RMBE%	Ecart moyen (Wh/m ²)	MAE (Wh/m ²)	MAPE (%)	RMSE (%)
Le modèle de De Miguel et al	-2.6%	-9.48	16.14	9.63	13.8
Le modèle de Erbs et al	-3.6%	-15.6	31.3	15.6	28.2
Le modèle de Orgill and Hollands	-4.05%	-17.9	36.8	18	30
Notre modèle de I_d	-10.5 %	-25.18	35.81	18.67	28.7

Tableau II. 9 : comparaison des modèles d'estimation de I_d .



(a)



(b)

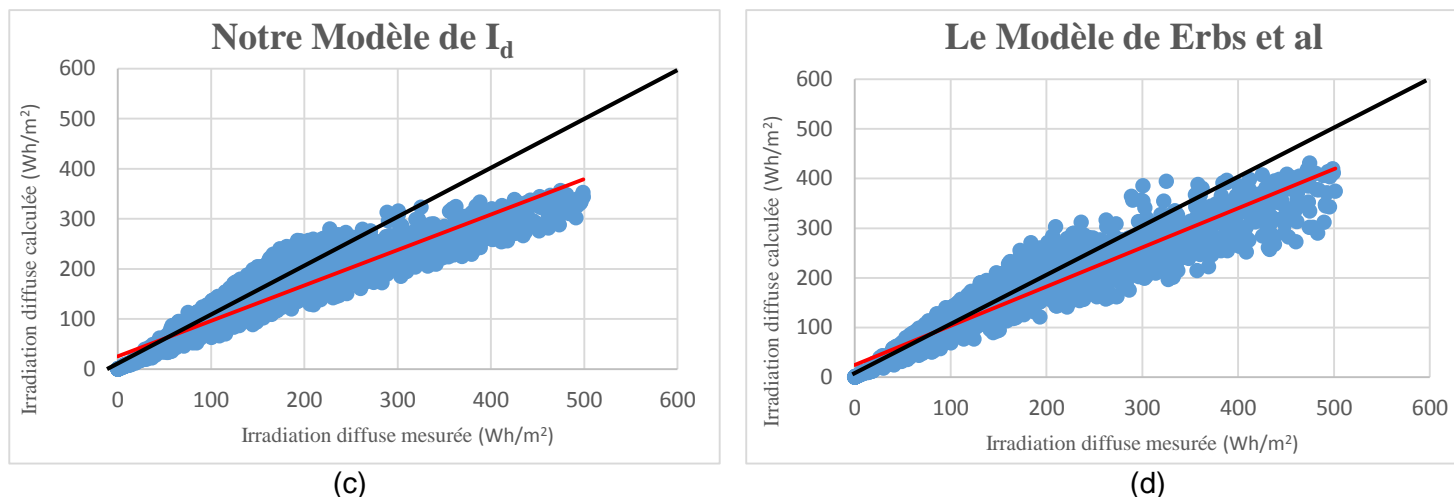


Figure II.12: Représentation graphique des valeurs horaires estimées en fonction des valeurs mesurées pour les différents modèles d'estimation du diffus I_d . (a) Modèle d'Orgill et Hollands, (b) Modèle de De Miguel et al, (c) Modèle d'Erbs et al, (d) Notre modèle de I_d .

Après la comparaison des erreurs relatives issue des différentes estimations, on remarque que la plus faible valeur est enregistrée pour le modèle de De Miguel et al qui ne dépasse pas -2.6% suivi du modèle de Erbs et al dont l'erreur est égale à -3.6% puis le modèle de Orgill and Hollands dont l'erreur est égale à -4.05% et finalement notre modèle de I_d dont l'erreur est égale à -10.5 %. Cet ordre est respectée pour les autres indicateurs statistiques ainsi que la RMSE dont la plus faible valeur est pour le modèle de de Miguel et al et la plus grande valeur est pour le modèle de Orgill and Hollands. D'autre part, la représentation graphique des valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées, a montré une concordance remarquable pour le modèle de De Miguel et al puisque la courbe de tendance et la première bissectrice sont presque confondues avec un léger décalage pour les grandes valeurs de I_d .

III.2 Modèles d'estimation des valeurs journalières

Après le bref résumé présenté dans le premier paragraphe, plusieurs études qui estiment les composantes du rayonnement solaire à l'échelle journalière ont été identifiées. Afin de sélectionner les modèles adéquats, nous avons comparé les données issues des différentes estimations en utilisant la RMBE, Ecart moyen, MAE, MAPE, RMSE et les représentations graphiques.

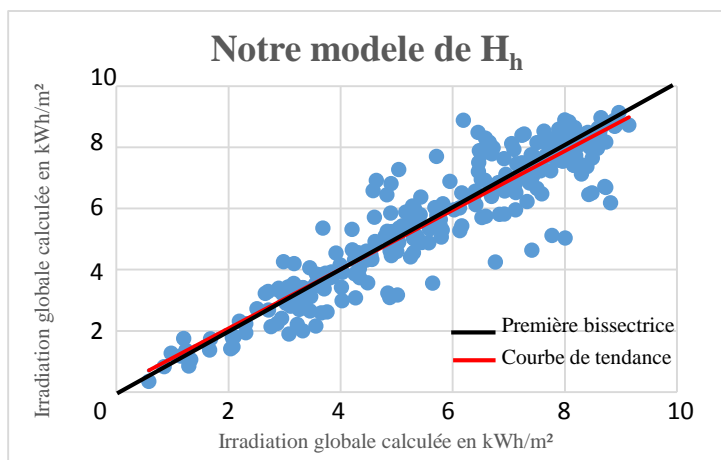
III.2.1 Irradiation globale

Après avoir réalisé notre propre modèle d'extrapolation pour estimer le rayonnement solaire global à l'échelle journalière, on va procéder à sa comparaison avec les modèles déjà cités dans la littérature. Ainsi, nous allons comparer les données générées par les différentes estimations en

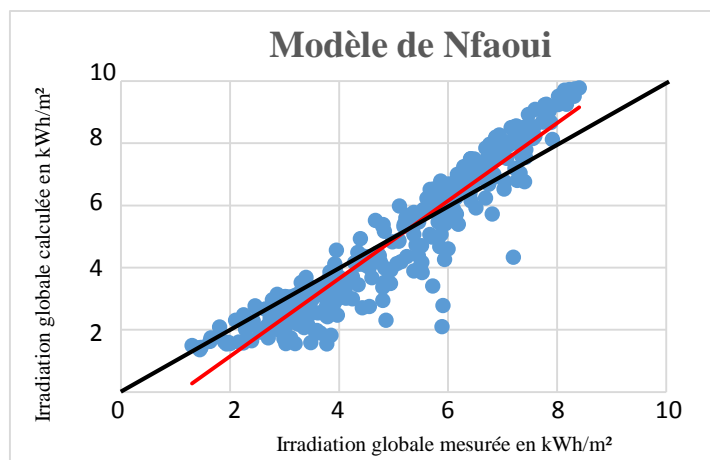
utilisant les cinq indicateurs statistiques. Les résultats de cette étude sont rassemblés dans le tableau II.10 et la figure II.13.

Modèle d'estimation de H_h	RMBE%	Ecart moyen (kWh/m ²)	MAE (kWh/m ²)	MAPE (%)	RMSE (%)
Notre modèle de H_h .	-0.82	0.049	0.531	10.4	13.21
Le modèle de Nfaoui	-5.3	-0.101	0.708	14.7	17.9
Le modèle de Benkaddour	-5.67	-0.162	0.716	15.9	18
Le modèle de Lemmini	-6.61	-0.216	0.700	15.8	17.65
Le modèle de J. Fan et al	-10.58	-0.441	1.186	23.9	27.9

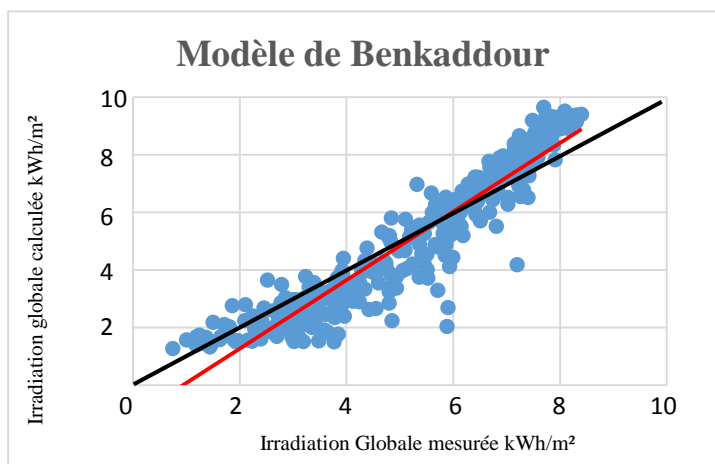
Tableau II. 10 : Comparaison des modèles d'estimation de H_h



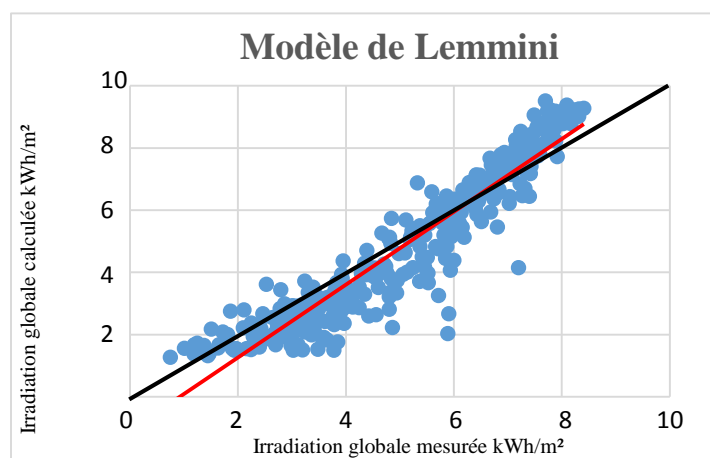
(a)



(b)



(c)



(d)

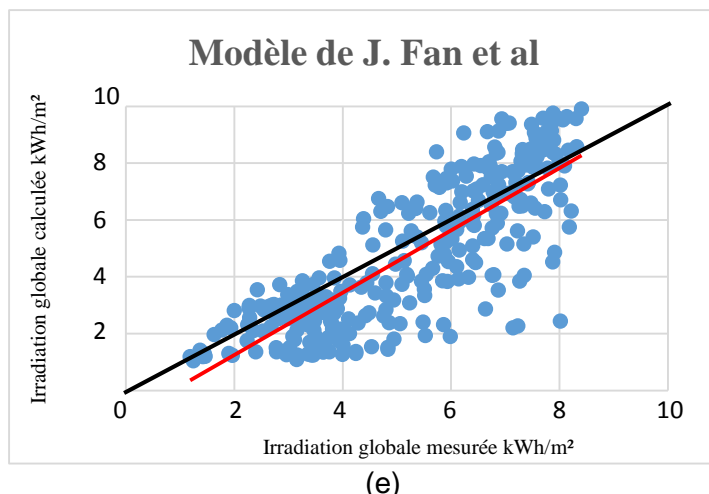


Figure II.13 : Représentation graphique des valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées pour différents modèles d'estimation du rayonnement solaire global journalier. (a) Notre modèle de H_h . (b) Le modèle de Nfaoui. (c) Le modèle de Benkaddour (d) Le modèle de Lemmini (e) Le modèle de J. Fan et al.

Les erreurs relatives calculées, à partir des données générées par les différents modèles est les données mesurées, montrent que notre modèle d'extrapolation présente la plus faible valeur qui est de l'ordre de -0.82% comparé aux autres modèles dont RMBE est égale à -5.3% pour le modèle de Nfaoui, -5.67% pour le modèle de Benkaddour, -6.61% pour le modèle de Lemmini, et -10.58% pour le modèle de J. Fan et al.

Par ailleurs, sur la courbe correspondant à notre modèle, on remarque que la droite de tendance est presque confondue avec la première bissectrice. Par contre pour les modèles de Nfaoui, Lemmini et Benkaddour les deux courbes sont décalées avec une surestimation des valeurs élevées et une sous-estimation des faibles valeurs de H_h , tandis que pour le modèle de J. Fan et al, on remarque une dispersion du nuage de point avec une sous-estimation des valeurs estimées puisque la courbe de tendance se trouve toujours au-dessous de la première bissectrice.

Tous ces résultats nous mènent à conclure que le modèle d'extrapolation qu'on a mis au point est le plus adéquat à l'estimation du rayonnement global solaire. À présent, il nous reste de faire une étude de validité plus approfondie.

III.2.2 Irradiation diffuse

De même pour choisir le modèle adapté à l'estimation du rayonnement diffus, nous avons procédé au calcul des erreurs et à la représentation graphique des valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées. Cela a fait l'objet du tableau II.11 et de la figure II.14.

Modèles d'estimation de H_d	RMSE%	Ecart moyen (kWh/m ²)	MAE (kWh/m ²)	MAPE (%)	RMSE (%)
Notre modèle de H_d	-3.63%	-0.07	0.271	12.7	15
Le modèle de Benkaddour	-5.9%	-0.241	0.434	18.6	29
Le modèle de Nfaoui	6.9%	0.071	0.398	17.3	20.4
Le modèle de L.Wang et al	12.61%	0.281	0.494	19	23

Tableau II. 11: Comparaison des modèles d'estimation de H_d .

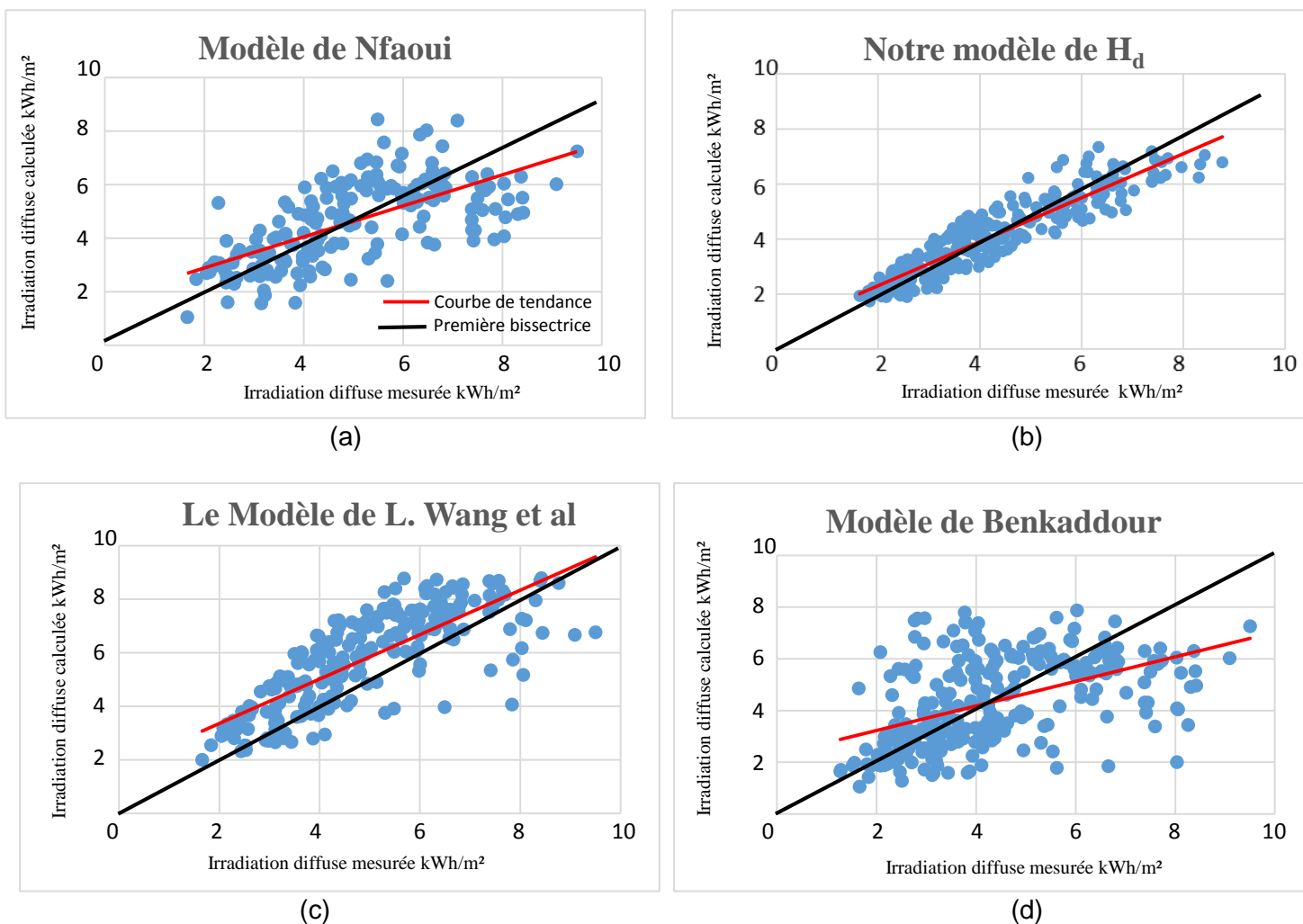


Figure II.14: Représentation graphique des valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées pour différents modèles d'estimation de H_d . (a) modèle de Nfaoui (b) Notre modèle de H_d . (c) Modèle de L. Wang et al. (d) Modèle de Benkaddour.

La comparaison entre les modèles d'estimation du rayonnement diffus montre que notre modèle de H_d représente une erreur de -3.63%, cette erreur est la plus faible comparée aux autres modèles qui estiment la même composante dont la valeur est de 6.9% pour le modèle de Nfaoui, -5.2% pour

modèle de Benkaddour et 12.6% pour modèle de L. Wang et al. Ce résultat est en accord avec la représentation graphique des valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées puisque notre modèle représente un faible écart entre la courbe de tendance et la première bissectrice. En revanche, pour les trois autres modèles, on remarque une dispersion des nuages de points vue les grandes valeurs de RMSE et une divergence de la courbe de tendance par rapport à la première bissectrice.

Conclusion

Après avoir comparé les modèles d'estimations des différentes composantes solaires, on a choisi ceux qui représentent le minimum d'erreur. Ainsi, on a sélectionné les modèles qu'on a réalisés pour prédire le rayonnement global journalier, le rayonnement diffus journalier, les irradiances globales horaires en plus du modèle de De Miguel et al pour prédire les irradiances horaires diffuses. Cependant, il nous reste à faire une étude de validité plus approfondie et détaillée pour examiner la fiabilité des données générées par ces modèles pour différentes zones climatiques.

IV. Validation des modèles sélectionnés

Pour valider les modèles sélectionnés aux sites marocains, nous avons comparé les valeurs estimées avec les mesures de l'année 2012 collectées à Rabat, Fès, Marrakech et Tanger, en utilisant des indicateurs statistiques (RMBE : L'erreur relative moyenne, MAE : Ecart absolu, l'écart moyen, MAPE : Erreur absolue moyenne, RMSE : Erreur quadratique moyenne). Ensuite, nous avons représenté graphiquement les valeurs estimées, en fonction des valeurs mesurées.

IV.1 Validation des modèles d'estimation des valeurs horaires.

IV.1.1 Validation du modèle d'estimation de I_h

Pour approfondir l'étude de validation de notre modèle d'estimation de I_h , nous avons calculé les indicateurs présentés dans le tableau II.12 puis nous avons présenté graphiquement les valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées dans la figure 9.

I_h	RMBE (%)	Ecart moyen (Wh/m ²)	MAE (Wh/m ²)	MAPE (%)	RMSE (%)
Rabat	-2.93	-0.78	43.09	7.8	9.5
Tanger	-3.9	-23.3	42.2	7.66	6.96
Fès	-0.85	-1.17	23.31	7.7	6.32
Marrakech	-2.45	-11.66	34.22	8.2	9.53

Tableau II. 12 : Les performances du modèle utilisé pour prédire I_h .

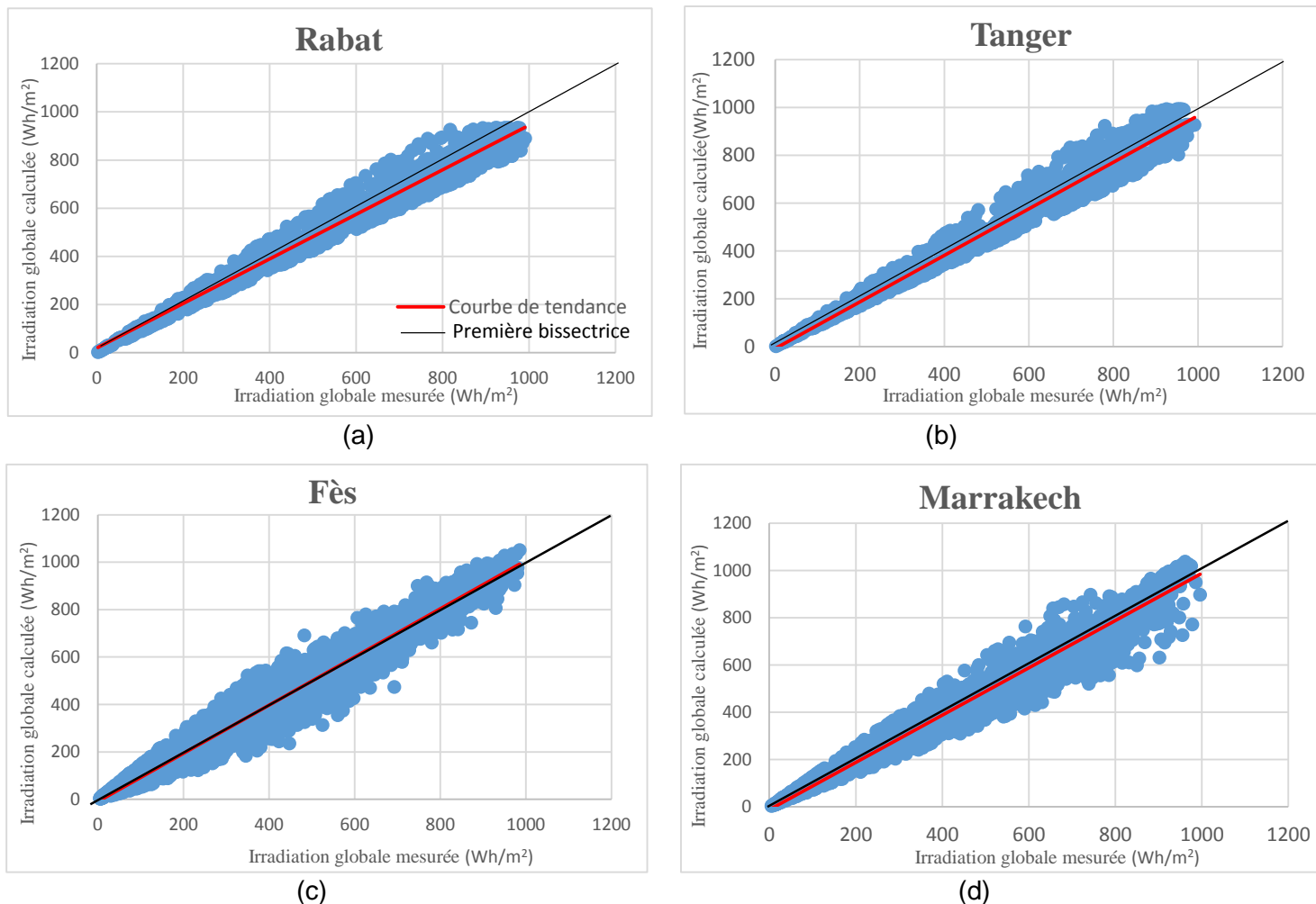


Figure II.15 : Représentation graphique des valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées pour le rayonnement global horaire à Rabat (a), Tanger (b), Fès (c) et Marrakech (d).

Sur la base des résultats obtenus, on peut déduire que les corrélations utilisées sont de très bonne qualité, du fait que :

- La moyenne de l'erreur relative, calculée à partir des valeurs mesurées et estimées, ne dépasse pas – 2.93% à Rabat, -3.9% à Tanger, -2.45% à Marrakech et -0.85% à Fès.
- l'écart moyen entre les valeurs mesurées et les valeurs estimées ne dépasse pas – 0.78 Wh/m² à Rabat, -23.3Wh/m² à Tanger, -11.66Wh/m² à Marrakech et -1.17Wh/m² à Fès.
- l'erreur quadratique moyenne ne dépasse pas 9.5 % à Rabat, 6.96 % à Tanger, 9.53 % à Marrakech et 6.32 % à Fès.

En outre, d'après la figure II.15, nous avons remarqué que la première bissectrice et la courbe de tendance sont presque confondues pour toutes les stations avec une faible sous-estimation des valeurs par rapport aux valeurs mesurées.

Sur la base de ces résultats, on peut conclure que le modèle qu'on a réalisé constitue un outil adéquat pour prédire l'irradiation horaire globale à partir des irradiances globales journalière, de l'angle horaire du coucher ω_c caractérisant la journée, l'angle horaire au milieu de l'heure caractérisant l'heure considérée et le rapport (I_{oh} / H_{oh}) . Le rassemblement de toutes ces variables dans une seule équation et l'utilisation des mesures de différents sites lors de la réalisation du modèle, minimise l'effet des variables climatiques à savoir l'état du ciel et la position géographique tel que la latitude, ce qui rend notre équation valable pour le Maroc tout au long de l'année.

IV.1.2 Validation du modèle d'estimation de I_d (De Miguel et al)

Comme le montre le tableau II.9, le modèle de De Miguel et al est le plus adapté pour prédire le rayonnement solaire diffus à Rabat. Pour étendre la validité de ce modèle à toutes les régions marocaines, nous avons calculé les indicateurs statistiques pour les régions climatiques représentatives. Les résultats de cette étude sont présentés dans le tableau II.13.

I_d	RMBE (%)	Ecart moyen (Wh/m ²)	MAE (Wh/m ²)	MAPE (%)	RMSE (%)
Rabat	-1.09	-1.79	17.78	10.25	13.63
Tanger	-3.08	-15.26	17.94	8.86	12.84
Fès	-0.68	-3.54	17.73	7.45	8.85
Marrakech	-2.49	-5.84	9.76	6.53	9.49

Tableau II. 13 : Performances du modèle utilisé pour la prédiction de I_d .

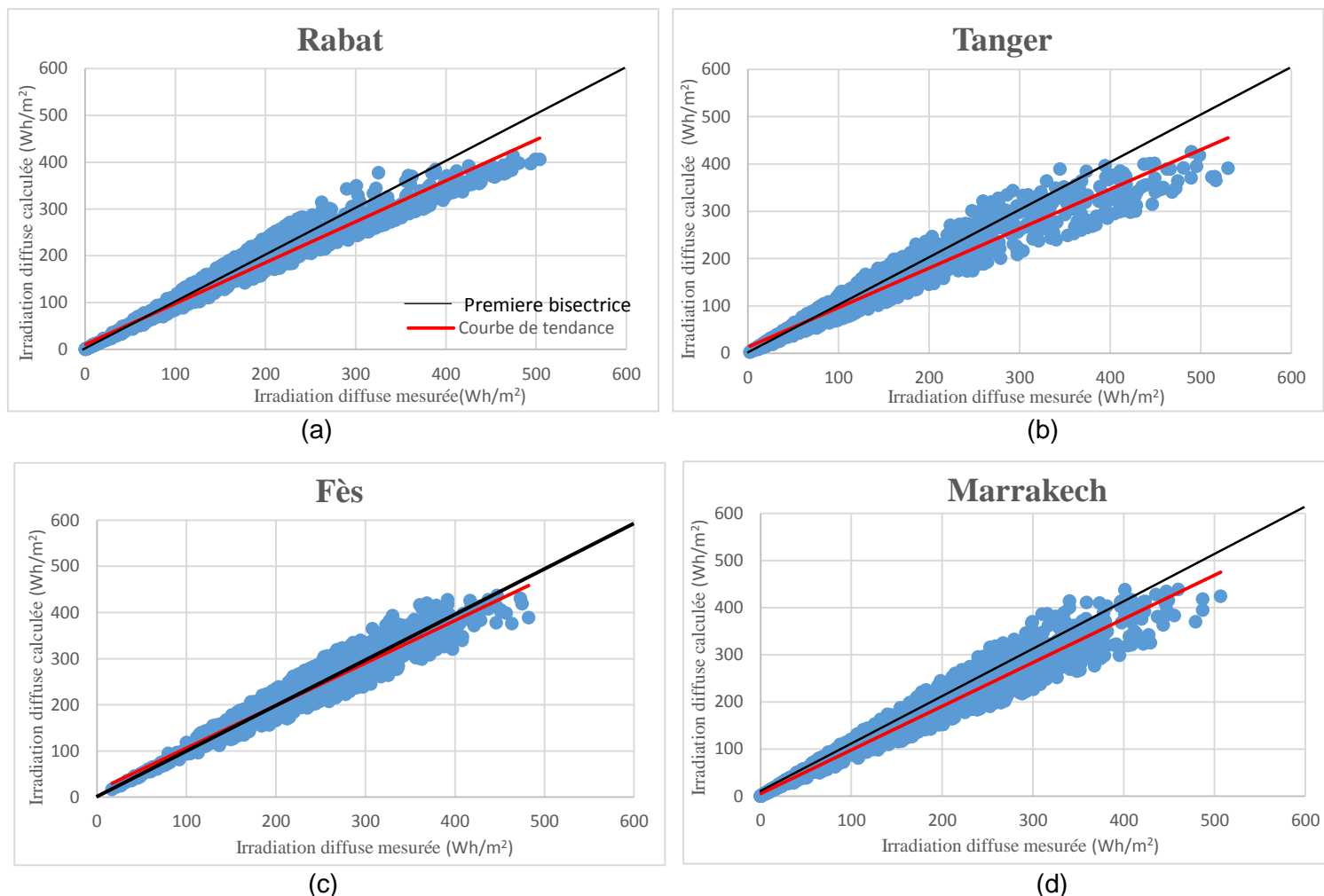


Figure II.16 : Représentation graphique des valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées pour le rayonnement diffus à Rabat (a), Tanger (b), Fès (c) et Marrakech (d).

Le tableau 13 montre que la moyenne annuelle de l'erreur relative ne dépasse pas -1.09 % à Rabat, -0.68 % à Fès, -3.08 % à Tanger et -2.49 % à Marrakech. Ainsi que l'écart moyen entre les valeurs mesurées et estimées ne dépasse pas -1.79 Wh/m² à Rabat, -15.26Wh/m² à Tanger, -5.84 Wh/m² à Marrakech et -3.54 Wh/m² à Fès. En ce qui concerne l'erreur quadratique moyenne on remarque une élévation de cet indicateur puisqu'il varie entre 8.85% et 10.25%.

À partir de la figure 10, nous avons remarqué que les nuages de points générés par la représentation de I_d estimé en fonction de I_d mesuré illustre un rapprochement remarquable de la courbe de tendance avec la première bissectrice ainsi qu'une légère sous-estimation des valeurs estimées et une dispersion plus marquée pour les grandes valeurs de I_d .

Ces constatations sont plus visibles lors du passage des zones continentales au zone côtières puisque RMSE augmente de 8.85% et 9.4% pour Fès et Marrakech jusqu'à 12.8% et 13.6% pour Tanger et Rabat.

Le taux élevé de la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère des villes côtières, explique les valeurs relativement élevées des erreurs, contrairement aux villes continentales où les erreurs sont assez faibles, ce résultat est dû au comportement aléatoire et imprévisible du rayonnement solaire, lors de son incidence sur des gouttelettes d'eau. Cependant, la dispersion du nuage de point, dans l'intervalle des grandes valeurs de I_d , est dû principalement à l'influence de l'état du ciel, soit partiellement ou totalement couvert, sur la propagation du rayonnement solaire dans l'atmosphère, ce qui augmente l'erreur de prédiction du diffus.

Sur la base des résultats mentionnés, nous avons déduit que le modèle de De Miguel et al pour estimer le rayonnement diffus donne une coordination remarquable avec les mesures collectées sur différents sites, alors que ce modèle a été réalisé pour quatre pays situés au nord de la Méditerranée avec des latitudes différentes que celles du Maroc. Toutes ces observations nous amènent à conclure que ce modèle a un aspect régional et peut être utilisé même pour d'autres pays ayant un climat similaire tel que l'Algérie, la Tunisie et l'Italie. Il reste à prouver sa validité pour l'ensemble de la zone méditerranéenne.

IV.2 Validation des modèles d'estimation des valeurs journalière

IV.2.1 Validation du modèle d'estimation de H_h

Pour vérifier la validité de notre modèle d'extrapolation pour l'estimation de H_h sur la totalité du territoire marocain, on a choisi d'appliquer les tests statiques sur les sites représentatifs du climat marocain, ces résultats issus de cette étude sont rassemblés dans le tableau 14 et la figure 11.

H_h	RMBE (%)	Ecart moyen (kWh/m ²)	MAE (kWh/m ²)	MAPE (%)	RMSE (%)
Rabat	3.6	0.229	0.660	15.4	17.2
Tanger	-3.2	-0.284	0.516	10.5	12.3
Marrakech	-0.11	0.021	0.620	12.83	14.7

Tableau II. 14 : Performances du modèle utilisé pour la prédiction de H_h .

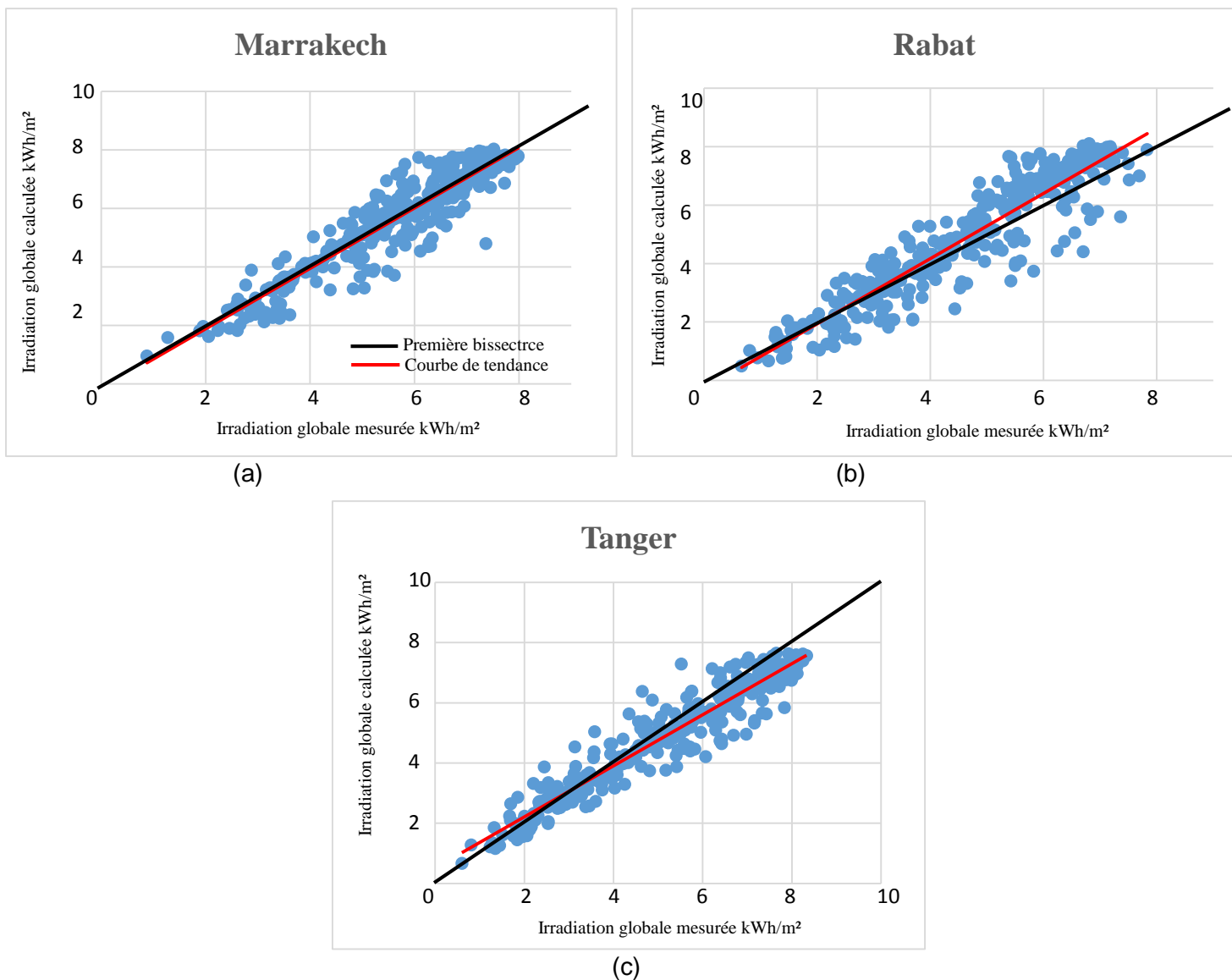


Figure II.17 : Représentation graphique des valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées pour le rayonnement global journalier de Marrakech (a), Rabat (b) et Tanger (c).

D'après le tableau II.14 on constate que la moyenne annuelle de l'erreur relative ne dépasse pas 3.6% à Rabat – 3.2 % à Tanger et -0.11 % à Marrakech. Ainsi que l'écart moyen entre les valeurs mesurées et estimées ne dépasse pas 0.229 kWh/m² à Rabat, -0.284kWh/m² à Tanger, - 0.021kWh/m² à Marrakech.

De plus, d'après la figure II.17, nous avons remarqué que la première bissectrice et la courbe de tendance sont presque confondues pour la station de Marrakech et qu'il y a un faible décalage pour les stations de Rabat et Tanger. Ce rapprochement pour le site de Marrakech est dû principalement à la ressemblance du climat de cette ville et la ville origine de l'extrapolation (Fès), sachant que ses deux villes jouissent d'un climat continental et se positionne à une altitude de presque de même

ordre de grandeur. Cependant, dans notre cas la distance entre les villes et la latitude n'ont pas une influence directe sur la qualité des extrapolations puisque les villes de Fès et Rabat ont presque la même latitude et elles ne sont séparées que de 200 km, mais les erreurs et les écarts sont les plus élevés.

Cela, nous mène à conclure que le type du climat a une influence majeure sur l'extrapolation entre les villes tandis que la latitude joue un rôle moins important dans l'extrapolation pour les villes marocaines, car son intervalle de variation est faible puisqu' il est compris entre 27° à Laâyoune et 35° à Tanger

IV.2.2 Validation du modèle d'estimation de H_d

Après avoir choisi le modèle adéquat pour l'estimation du rayonnement diffus journalier, nous avons procédé à la validité de ce modèle pour les différents sites représentatifs du climat marocain, ce qui nous a conduits à obtenir le tableau II.15 et la figure II.18

H_d	RMBE	Ecart moyen	MAE	MAPE	RMSE
	(%)	(kWh/m²)	(kWh/m²)	(%)	(%)
Rabat	-2.5	-0.09	0.225	11.5	14
Tanger	-3.8	-0.110	0.206	9.56	13.7
Fès	4.7	0.051	0.188	11.9	14.6
Marrakech	-0.63	-0.049	0.230	11	13.59

Tableau II. 15 : Performances du modèle utilisé pour la prédiction de H_d .

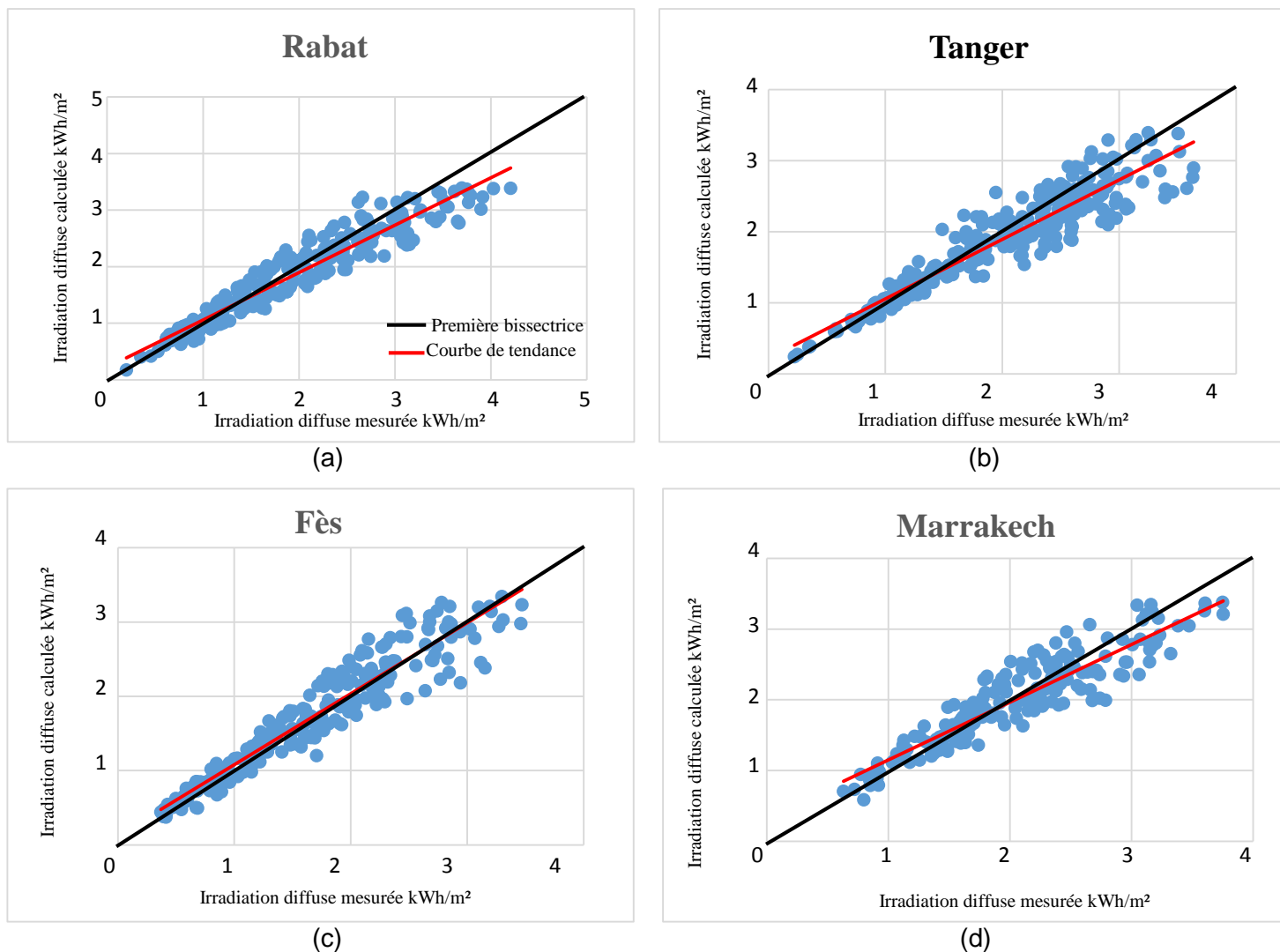


Figure II.18 : Représentation graphique des valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées pour le rayonnement diffus de Rabat (a), Tanger (b), Fès (c) et Marrakech (d).

En comparant les valeurs mesurées avec les données estimées, on a remarqué que l'erreur relative ne dépasse pas -2.5% à Rabat, 4.7% à Fès, -3.8% à Tanger et -0.63% à Marrakech. Ainsi que l'écart moyen entre les valeurs mesurées et estimées ne dépasse pas -91.7 Wh/m^2 à Rabat, -110 Wh/m^2 à Tanger, -49 Wh/m^2 à Marrakech et 51 Wh/m^2 à Fès. La qualité de ces résultats est approuvée par le faible écart entre la première bissectrice et la courbe de tendance des différents nuages de point mentionnés dans la figure II.18.

L'utilisation d'une seule équation pour estimer l'irradiation diffuse valable toute l'année réduit l'effet de la variation saisonnière du rayonnement solaire sachant que le ciel en hiver est plus humide et moins poussiéreux contrairement à l'été où le ciel est moins humide et plus poussiéreux. En outre, la hauteur du soleil qui est faible en hiver avec la présence des nuages diminue la transmittance du

ciel ce qui permet à moins de rayonnement diffus d'arrivé au sol. Ces phénomènes sont aléatoires et rendent l'estimation du diffus assez difficile ce qui explique les valeurs relativement élevées de RMSE. En revanche, les autres indicateurs sont de très bonne qualité ce qui prouve la grande fiabilité de nos estimations.

IV.3 Validation des composantes solaires spectrales

Pour évaluer la précision des valeurs estimées par rapport aux valeurs mesurées, et voir dans quelle limite on peut utiliser ces équations, nous avons calculé pour les sites de Rabat et Fès les différents indicateurs statistiques à l'échelle horaire et journalière pour les différentes composantes spectrales.

IV.3.1 Validation des composantes solaires spectrales horaires

Pour valider les équations d'estimations des composantes spectrales du rayonnement solaire, nous avons calculé les indicateurs statistiques (tableaux II.16, II.17 et II.18) et nous avons tracé les graphiques correspondant (figures II.19, II.20 et II.21).

IV.3.1.1 Composante solaire infrarouge

I_{IR}	RMBE (%)	Ecart moyen (Wh/m ²)	MAE (Wh/m ²)	MAPE (%)	RMSE (%)
Rabat	-1.9	-4.46	9.98	5.68	6.5
Fès	-5.5	-8.29	10.85	7.07	7

Tableau II. 16 : Performances du modèle utilisé pour la prédiction de I_{IR}

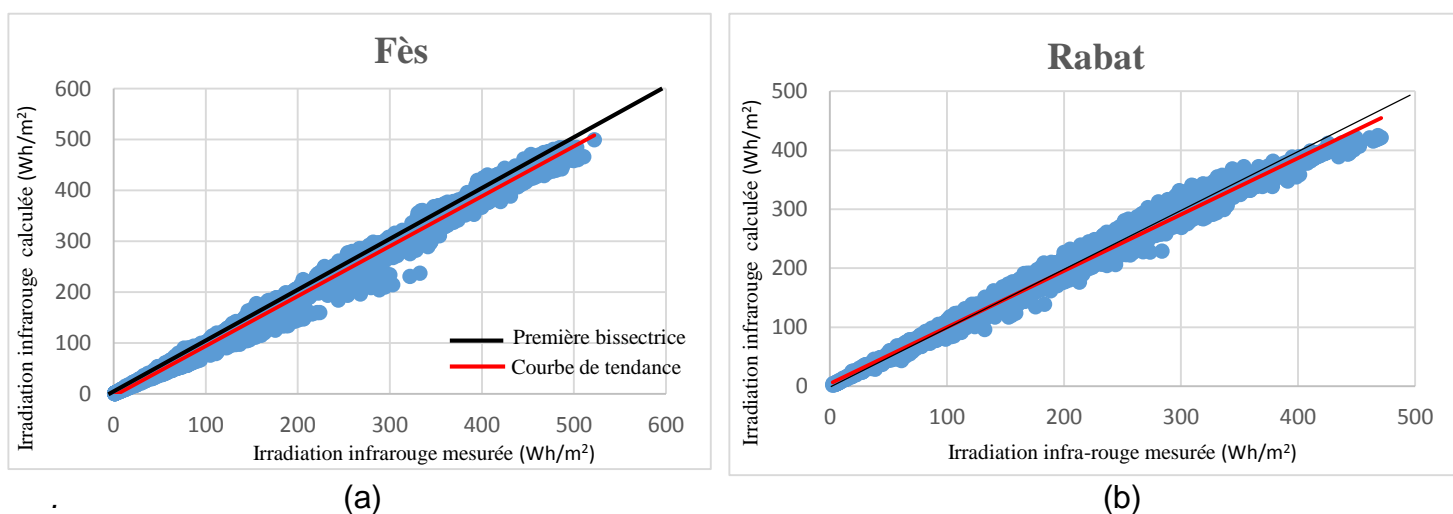


Figure II.19 : Représentation graphique des valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées pour le rayonnement I_{IR} de Rabat (a), Fès (b).

IV.3.1.2 Composante solaire photo-synthétiquement active

I_{PAR}	RMBE (%)	Ecart moyen (Wh/m ²)	MAE (Wh/m ²)	MAPE (%)	RMSE (%)
Rabat	1.7	1.36	8.69	5.32	5.72
Fès	4.4	1.5	9.2	7.8	5.8

Tableau II. 17 : Performances du modèle utilisé pour la prédiction de I_{PAR} .

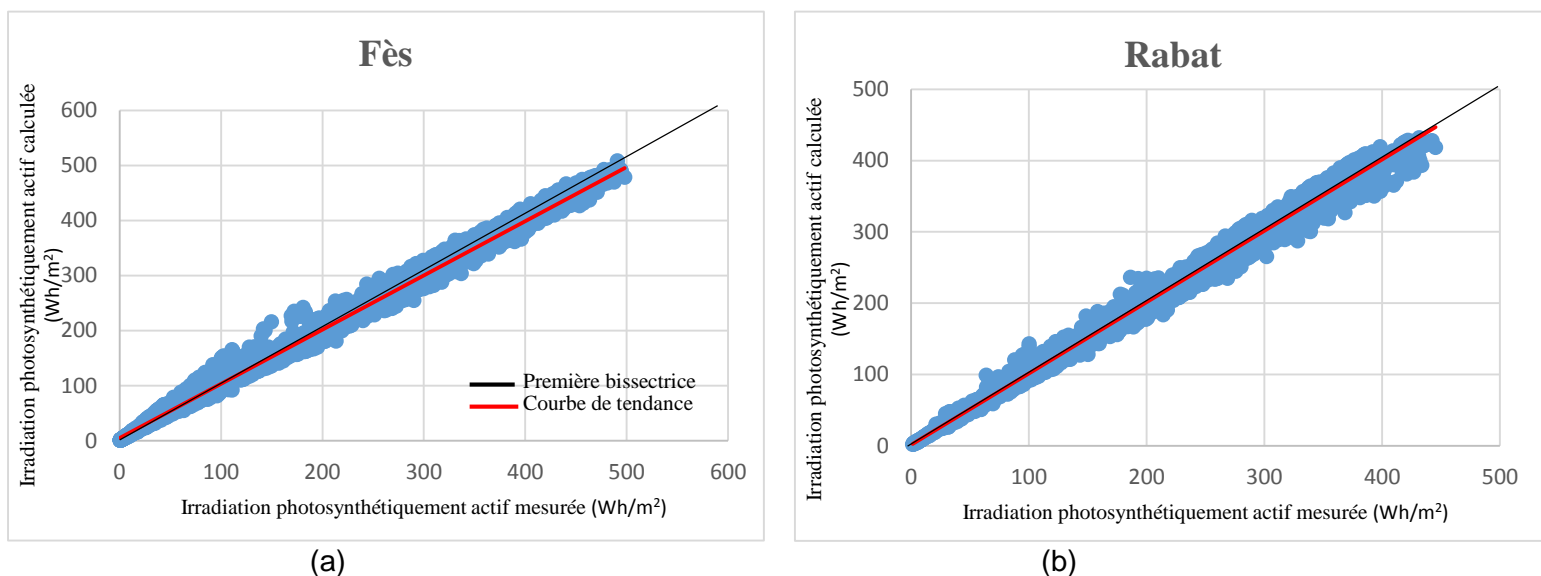


Figure II.20 : Représentation graphique des valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées pour le rayonnement I_{PAR} de Rabat (a), Fès (b).

IV.3.1.3 Composante solaire ultraviolet

I_{UV}	RMBE (%)	Ecart moyen (Wh/m ²)	MAE (Wh/m ²)	MAPE (%)	RMSE (%)
Rabat	5.5	0.7	1.5	11.6	11.26
Fès	4.6	0.36	1.7	11.4	11.12

Tableau II. 18 : Performances du modèle utilisé pour la prédiction de I_{UV}

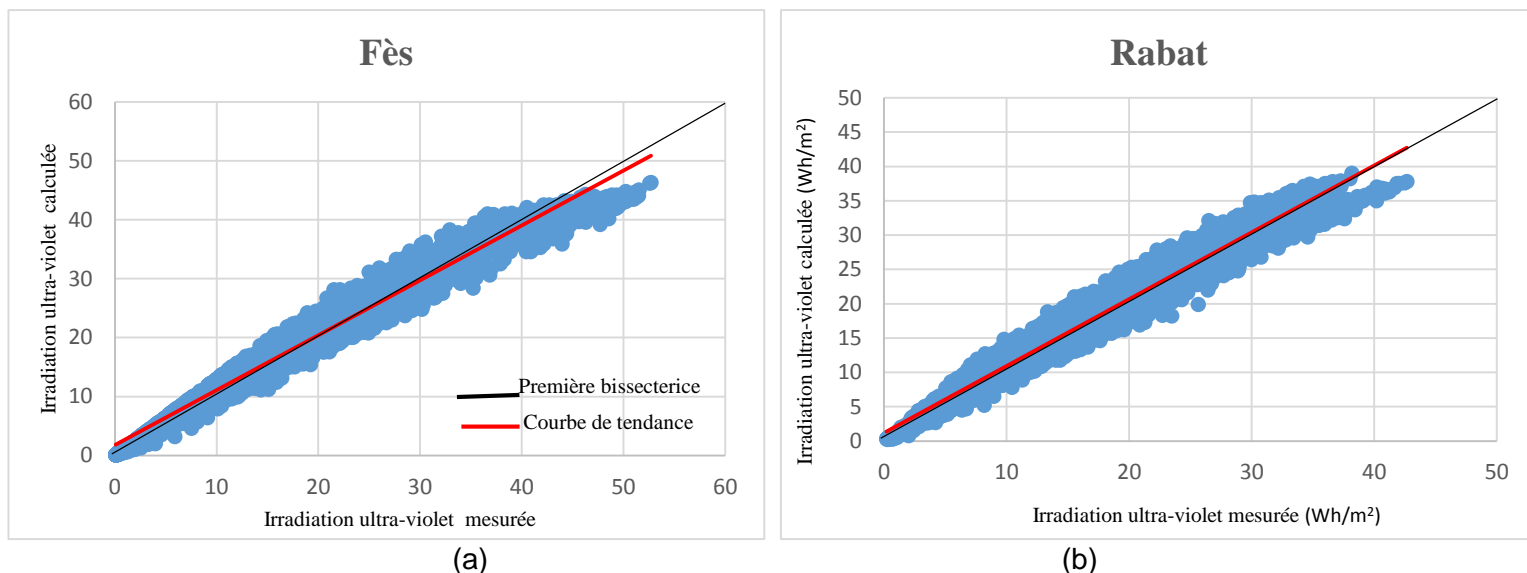


Figure II.21 : Représentation graphique des valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées pour le rayonnement I_{UV} à Fès (a) et à Rabat (b).

IV.3.2 Validation des composantes solaires spectrales journalières

IV.3.2.1 Composante solaire infrarouge

H_{IR}	RMBE (%)	Ecart moyen (kWh/m ²)	MAE (kWh/m ²)	MAPE (%)	RMSE (%)
Rabat	-1.76	-0.050	0.1	4.6	5.9
Fès	-1.94	-0.064	0.084	2.9	3.58

Tableau II. 19 : Performances du modèle utilisé pour la prédiction de H_{IR} .

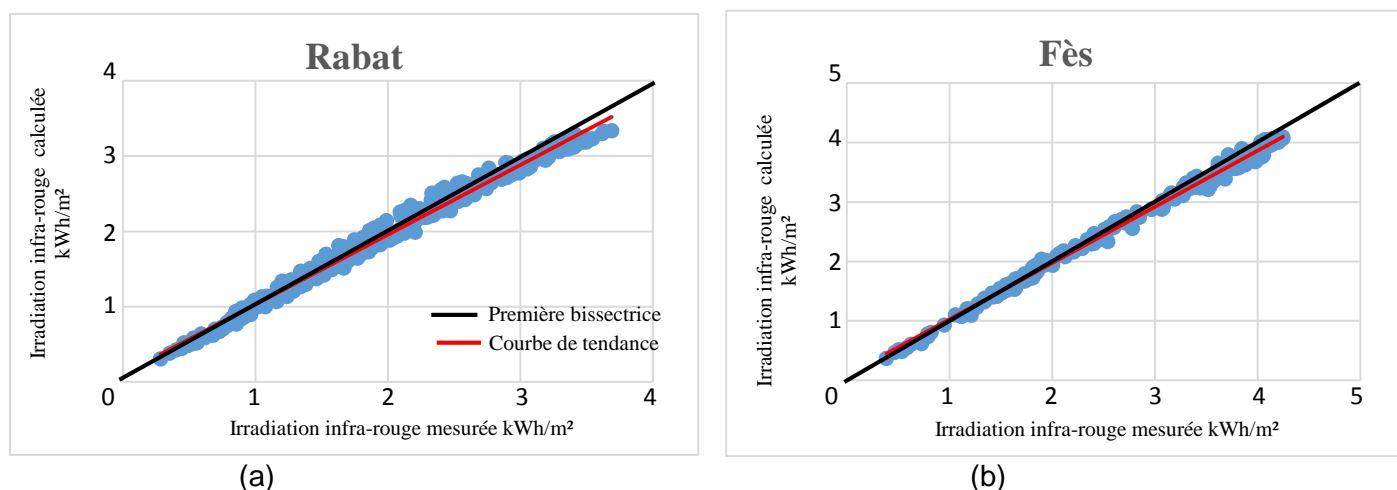


Figure II.22 : Représentation graphique des valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées pour le rayonnement H_{IR} à Rabat (a) et à Fès (b).

IV.3.2.2 Composante solaire photo-synthétiquement active

H_{PAR}	RMBE (%)	Ecart moyen (kWh/m ²)	MAE (kWh/m ²)	MAPE (%)	RMSE (%)
Rabat	1.12	0.025	0.088	4.27	5.1
Fès	1.13	0.036	0.061	2.5	2.7

Tableau II. 20 : Performances du modèle utilisé pour la prédiction de H_{PAR} .

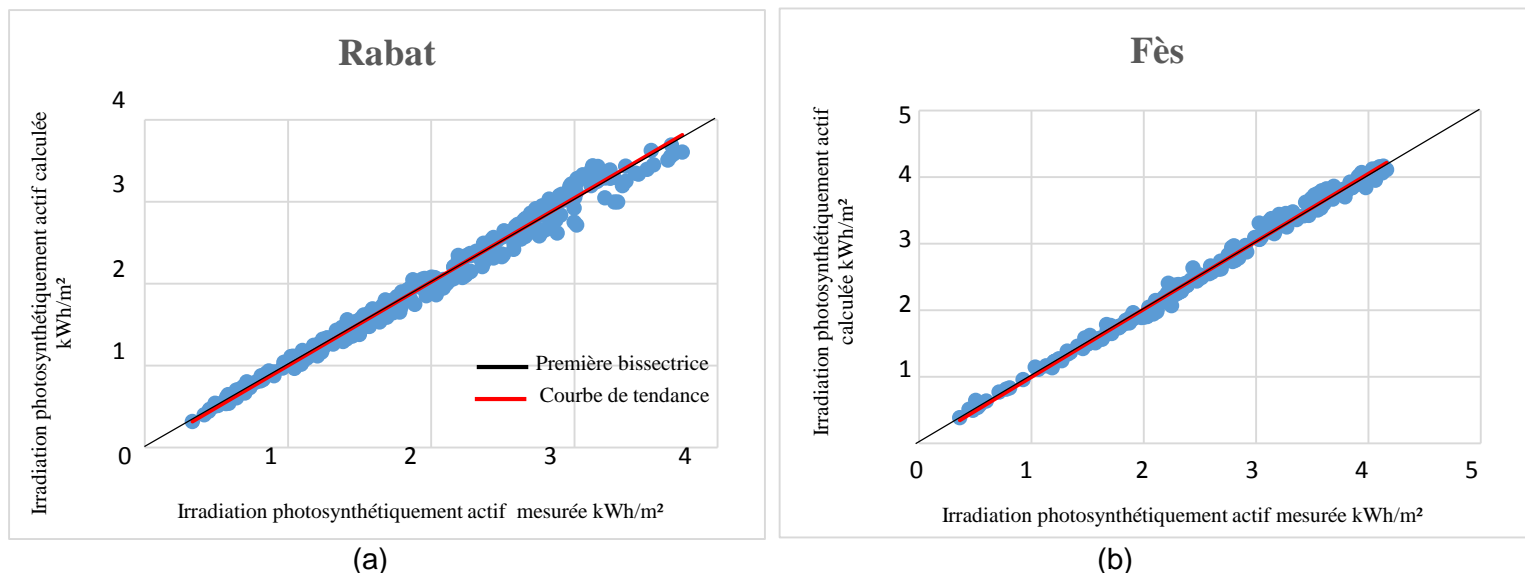


Figure II.23 : Représentation graphique des valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées pour le rayonnement H_{PAR} à Rabat (a) et à Fès (b).

IV.3.2.3 Composante solaire ultraviolet

H_{UV}	RMBE (%)	Ecart moyen (kWh/m ²)	MAE (kWh/m ²)	MAPE (%)	RMSE (%)
Rabat	2.4	0.04	0.0128	7.4	9.5
Fès	-2.7	-3.7	0.0129	6.09	5.9

Tableau II. 21 : Performances du modèle utilisé pour la prédiction de H_{UV} .

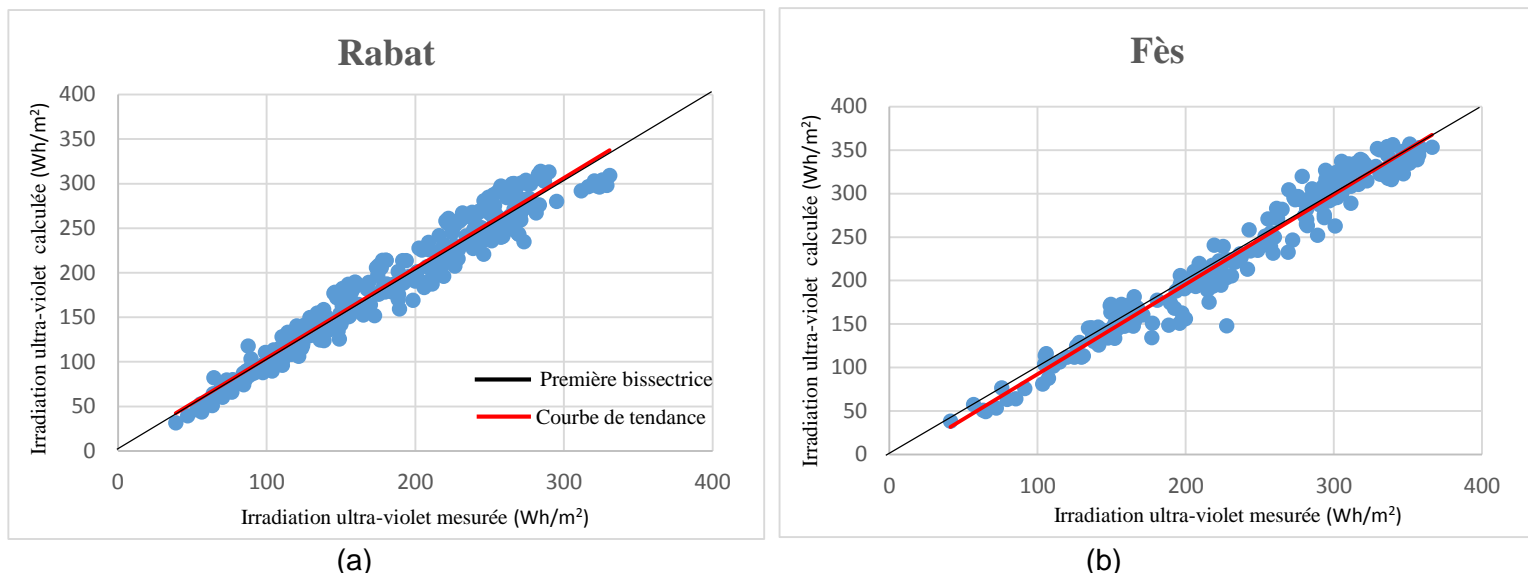


Figure II.24 : Représentation graphique des valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées pour le rayonnement H_{UV} à Rabat (a) et à Fès (b).

La précision des modèles d'estimation des irradiances spectrales est évaluée par les indicateurs statistiques. Ces indicateurs sont calculés pour les valeurs horaires et quotidiennes de H_{UV} , H_{PAR} et H_{IR} . D'après les Tableaux II.16, II.17, II.18, II.19, II.20, II.21 on remarque qu'en général l'erreur relative soit pour les valeurs journalières ou les valeurs horaires est comprise entre $\pm 5.5\%$ et que les plus faibles valeurs sont obtenus pour les valeurs journalières du H_{PAR} à Rabat dont cette erreur ne dépasse pas 1.12%.

L'écart moyen et l'écart absolu moyen représentent à leur tour de très faibles valeurs, surtout pour les valeurs journalières. Finalement l'erreur quadratique présente les mêmes observations et surtout pour Fès dont RMSE journalière ne dépasse pas 2.7% en revanche cette erreur est relativement élevée à l'échelle horaire qui est aux alentours de 11% ; cette élévation est due essentiellement aux faibles valeurs du rayonnement ultra-violet, ce qui augmente l'erreur et à sa nature qui peut être influencé par plusieurs phénomènes ce qui explique la dispersion des points.

Concernant les représentations graphiques des valeurs estimées en fonction des valeurs mesurées, on remarque, pour les figures II.19 jusqu'à II.24, que toutes les courbes de tendance sont pratiquement confondues avec les premières bissectrices ce qui approuve les faibles valeurs des indicateurs statistiques déjà mentionnés et la qualité des corrélations obtenues.

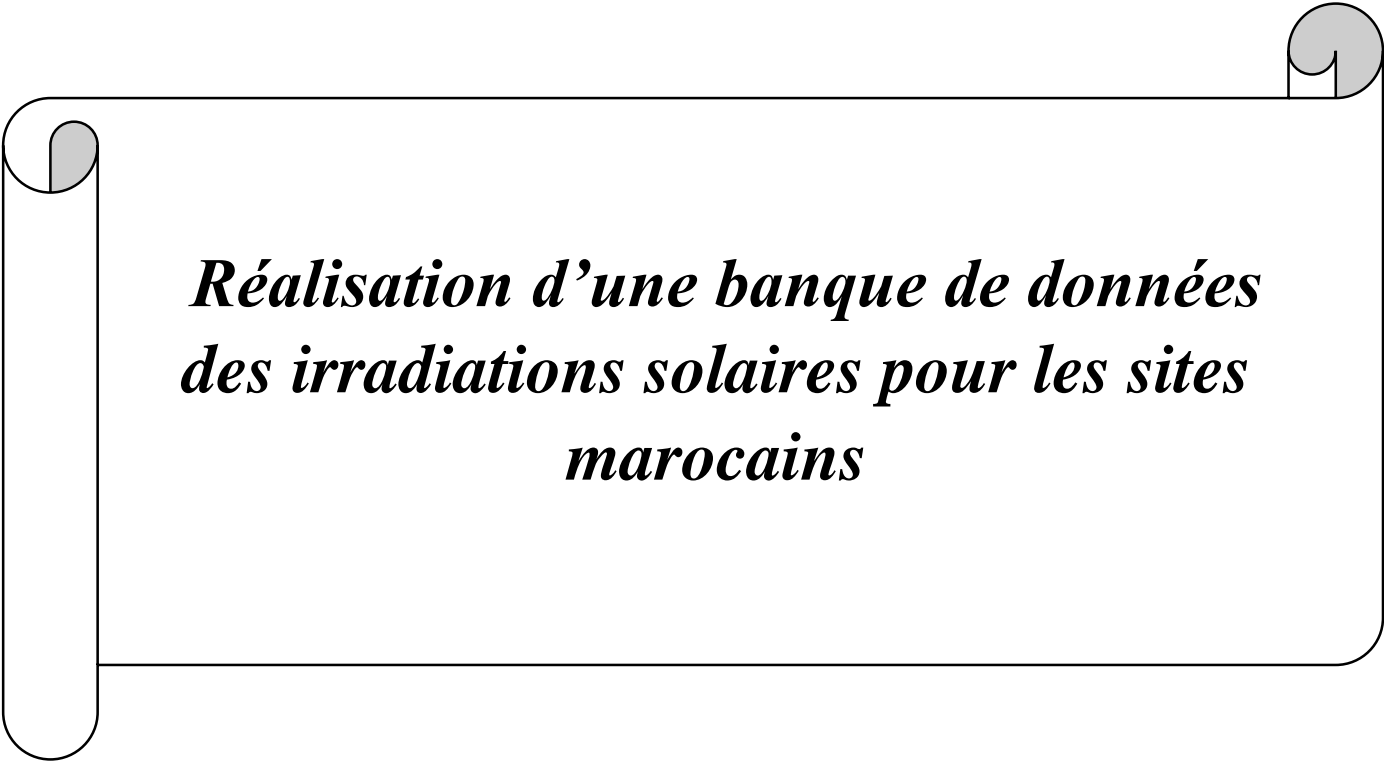
Conclusion

Dans le présent chapitre on a réalisé nos propres modèles d'estimation des irradiances solaires à l'aide des mesures collectées par le réseau de stations installées, par notre laboratoire, en cinq sites marocains. Pour évaluer la qualité de ces nouveaux modèles, on les a comparés avec d'autres modèles déjà existants dans la littérature. Cette étude nous a amené à choisir nos modèles pour l'estimation de H_h , I_h , H_d et le modèle de De Miguel et al pour l'estimation de I_d .

Pour plus de fiabilité, on a fait subir aux méthodes choisies, des tests de validation approfondis qui comportent les mesures sur plusieurs sites. En utilisant ces modèles, on pourra générer les valeurs des différentes composantes du rayonnement solaire et ainsi constitué une base de données solaires. Cela fera l'objet du chapitre suivant.



***Chapitre
III***



***Réalisation d'une banque de données
des irradiations solaires pour les sites
marocains***

Chapitre III : Réalisation d'une banque de données des irradiations solaires pour les sites marocains.

Introduction

Après avoir élaboré, testé, comparé, et choisi les modèles d'estimation des irradiations solaires horaires et journalières, il est temps d'utiliser ces modèles pour réaliser une banque de données solaires qui rassemble les irradiations de tous les sites marocains et de représenter ces résultats dans des formes facilement exploitables

I. Année représentative

Dans les études préliminaires des avants projets visant à dimensionner les systèmes solaires ou à caractériser le potentiel du rayonnement solaire, il est souvent nécessaire d'avoir un minimum de données. Par conséquent, il est essentiel de compacter la base de données.

Après avoir établi, pour chaque site, une base de données pendant dix ans, nous avons été obligés de sélectionner une année représentative de cette base de données pour faciliter son exploitation. Afin de déterminer l'année représentative, nous avons procédé comme suit :

Pour les dix années de mesure, nous avons constitué une année moyenne obtenue par les moyennes sur dix ans. Ensuite, les valeurs de cette année moyenne sont successivement comparées aux données de chacune des dix années. L'année ayant présentée un écart minimal avec l'année moyenne est choisi comme année représentative.

Ce travail a été réalisé pour le site de Fès pris comme origine de l'extrapolation, et nous a conduits à choisir 2012 comme année représentative pour la période 2009 - 2018. Le Tableau ci-dessous présente les résultats de la méthode suivie.

Années	Moyennes annuelles (Wh/m ²)	La moyenne des moyennes annuelles	Ecart
2009	5244		85
2010	4677		-481
2011	5000		-158
2012	5234		75
2013	5788	5159	629
2014	5423		263
2015	5345		186
2016	4955		-204
2017	5061		-98
2018	4862		-296

Tableau III.1 : Comparaison entre les moyennes annuelles et la moyenne de 10 ans de l'irradiation globale à Fès.

II. Réalisation d'une base de données des irradiances solaires journalières

II.1 Présentation de la méthode d'élaboration d'une base de données journalière

Après avoir établi et validé les équations d'extrapolation et de corrélation, nous les avons appliquées pour estimer les différentes composantes du rayonnement solaire pour les sites marocains en suivant la démarche suivante :

- Dans la première étape, à partir de dix ans de mesure de l'irradiation globale journalière de la station de Fès et à travers les équations d'extrapolations mentionnées dans le tableau II.1, nous avons estimé le rayonnement global journalier de toutes les villes marocaines. Par la suite, en utilisant l'irradiation globale ainsi obtenue et le modèle que nous avons établi pour prédire l'irradiation diffuse, on a généré les valeurs de H_d . L'obtention de ces deux composantes nous a permis de déduire l'irradiation directe journalière. Finalement par l'intermédiaire du modèle isotrope, on a pu prédire l'irradiation globale d'un plan inclinée.
- En parallèle par l'introduction de l'irradiation globale dans les équations du tableau II.2 On a généré les différentes composantes spectrales du rayonnement solaire à l'échelle journalier.

Les résultats obtenus constituent une banque de données solaires pour tout le Maroc pendant dix ans. Toutes ces étapes sont schématisées dans la figure suivante :

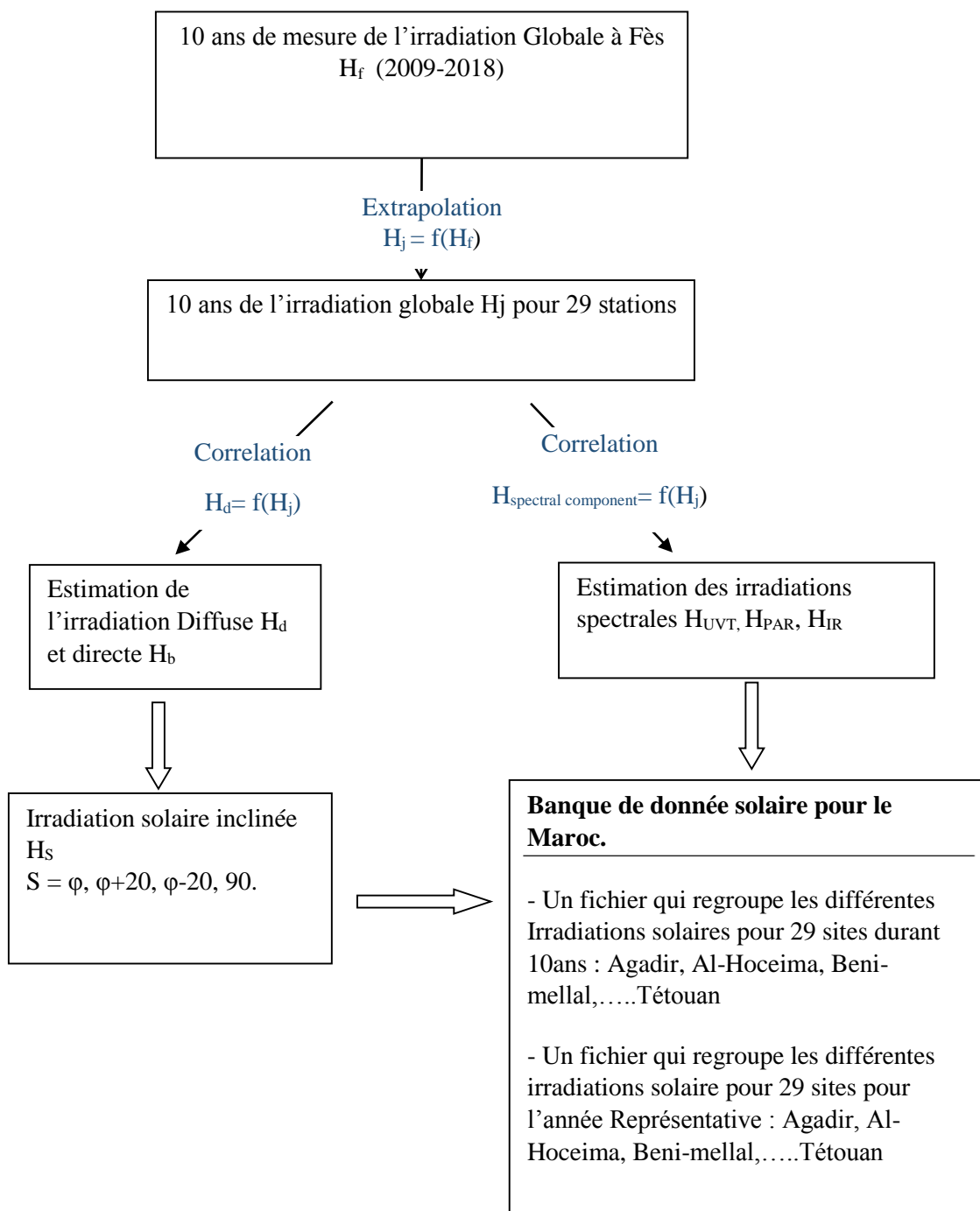


Figure III.1: Schéma des étapes de réalisation de la banque de données solaires journalières pour le Maroc.

Ainsi, pour chaque ville, les résultats obtenus ont été regroupés en deux fichiers facilement utilisables, le premier contient les composantes solaires sur dix ans de 2009 à 2018, et le second contient les composantes solaires de l'année représentative. Toutefois, ce deuxième fichier a

Chapitre III Réalisation d'une banque de données des irradiations solaires pour les sites marocains.

l'avantage de fournir des informations climatiques sur un site avec un minimum de données. Ce type de fichier est souvent sollicité pour les études préliminaires des projets solaires. Le tableau III.2 représente un exemple des données résultant des différentes estimations.

Année	Nj	Global	Diffus	Direct	Incliné ($\phi+20$)	Incliné ($\phi-20$)	Incliné (ϕ)	Incliné (90)	UVT	PAR	IR
2012	1	2808.4	1164.7	1643.7	4683.6	3552.5	4375	4171.9	123.6	1359.3	1322.8
2012	2	2766.6	1202.5	1564.1	4526.3	3470.8	4246.2	4015.1	121.7	1339	1303.1
2012	3	2435.5	1396.1	1039.4	3499.8	2894.4	3383.5	3018.3	107.2	1178.8	1147.1
2012	4	2515.6	1368.7	1146.9	3710.5	3021.7	3565.1	3217.8	110.7	1217.6	1184.8
2012	5	2629.9	1318.1	1311.8	4028	3208.8	3836.5	3520.3	115.7	1272.9	1238.7
2012	6	2844.2	1192.5	1651.7	4669	3574.9	4378.7	4136.5	125.1	1376.6	1339.6
2012	7	2396	1444.7	951.3	3314.2	2805.5	3235.5	2827.6	105.4	1159.7	1128.5
2012	8	2797.1	1250	1547.1	4458.7	3472.3	4209.8	3922.6	123.1	1353.8	1317.4
2012	9	2608.6	1375	1233.6	3860	3139.2	3708	3341.1	114.8	1262.6	1228.7
2012	10	3083.6	1077.5	2006.1	5291.3	3954.6	4918.1	4715.2	135.7	1492.5	1452.4
2012	11	3201.2	1010.7	2190.5	5617.9	4147.9	5198.1	5022.8	128	1530.2	1530.2
2012	12	2695.6	1368.1	1327.5	4022.1	3256.3	3857.7	3480.8	118.6	1304.7	1269.6
2012	13	3228.4	1024.4	2204	5613.5	4167.3	5206	5002.4	129.1	1543.2	1543.2
2012	14	3130.4	1110.8	2019.6	5265.8	3982.2	4918.6	4660.2	137.7	1515.1	1474.4
2012	15	3253.6	1042.2	2211.4	5595.9	4181	5203.6	4967.9	130.1	1555.2	1555.2
2012	16	3160.8	1126.4	2034.4	5264.7	4005	4930	4642.1	139.1	1529.8	1488.7
2012	17	2880.3	1341.1	1539.2	4373.3	3507.7	4181.2	3783.1	126.7	1394.1	1356.6
2012	18	3239.3	1114.8	2124.5	5395.9	4106.4	5055	4748.2	142.5	1567.8	1525.7
2012	19	2272.2	1593.9	678.3	2748	2531.8	2782.5	2248.4	100	1099.7	1070.2
2012	20	3094.1	1268.5	1825.6	4850.4	3821.8	4606.8	4210.1	136.1	1497.5	1457.3

Tableau III.2 : Extrait d'un fichier de données des composantes solaires (Wh/m^2) de l'année représentative pour le site de Rabat.

II.2 Résultats

Pour donner une vue d'ensemble sur ces résultats, nous avons projeté les valeurs des irradiations solaires obtenues à partir des différentes estimations sur la carte du Maroc. Afin de réduire le nombre de figures, nous avons choisi de ne représenter que la journée type du mois de mi-saison de l'année représentative. Ainsi, pour toutes les villes, nous avons obtenu trente-cinq cartes, qui rassemblent les différentes irradiations solaires. Par conséquent, pour chacune des

composantes solaires, nous avons cinq cartes, quatre d'entre elles représentent les valeurs saisonnières et la dernière représente les valeurs cumulatives annuelles.

II.2.1 Cartes des valeurs journalières du rayonnement global sur plan horizontal

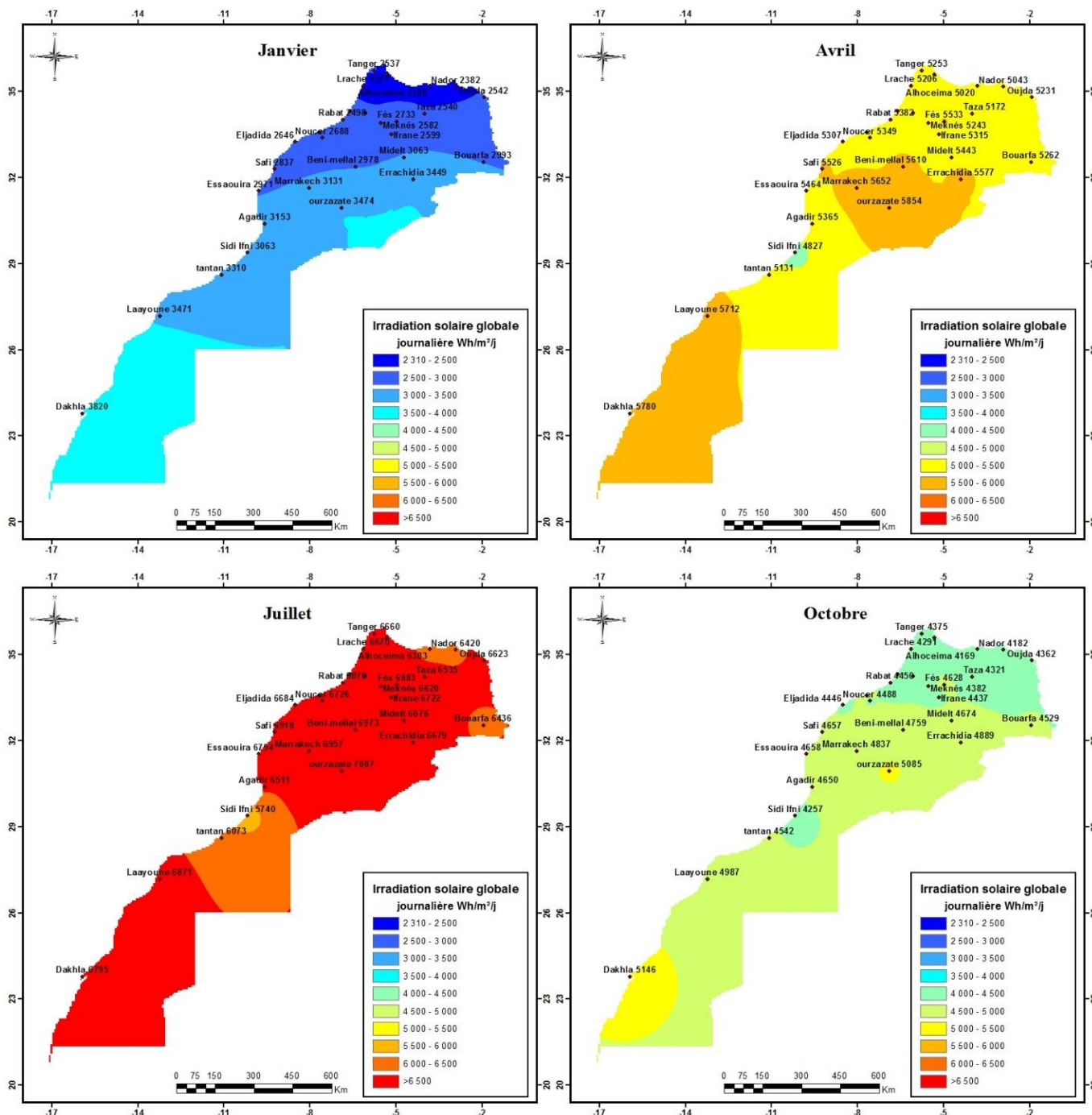


Figure III.2 : Cartes des valeurs journalières des irradiations globales sur plan horizontal, pour les sites marocains.

II.2 Cartes des valeurs journalières du rayonnement direct sur plan horizontal.

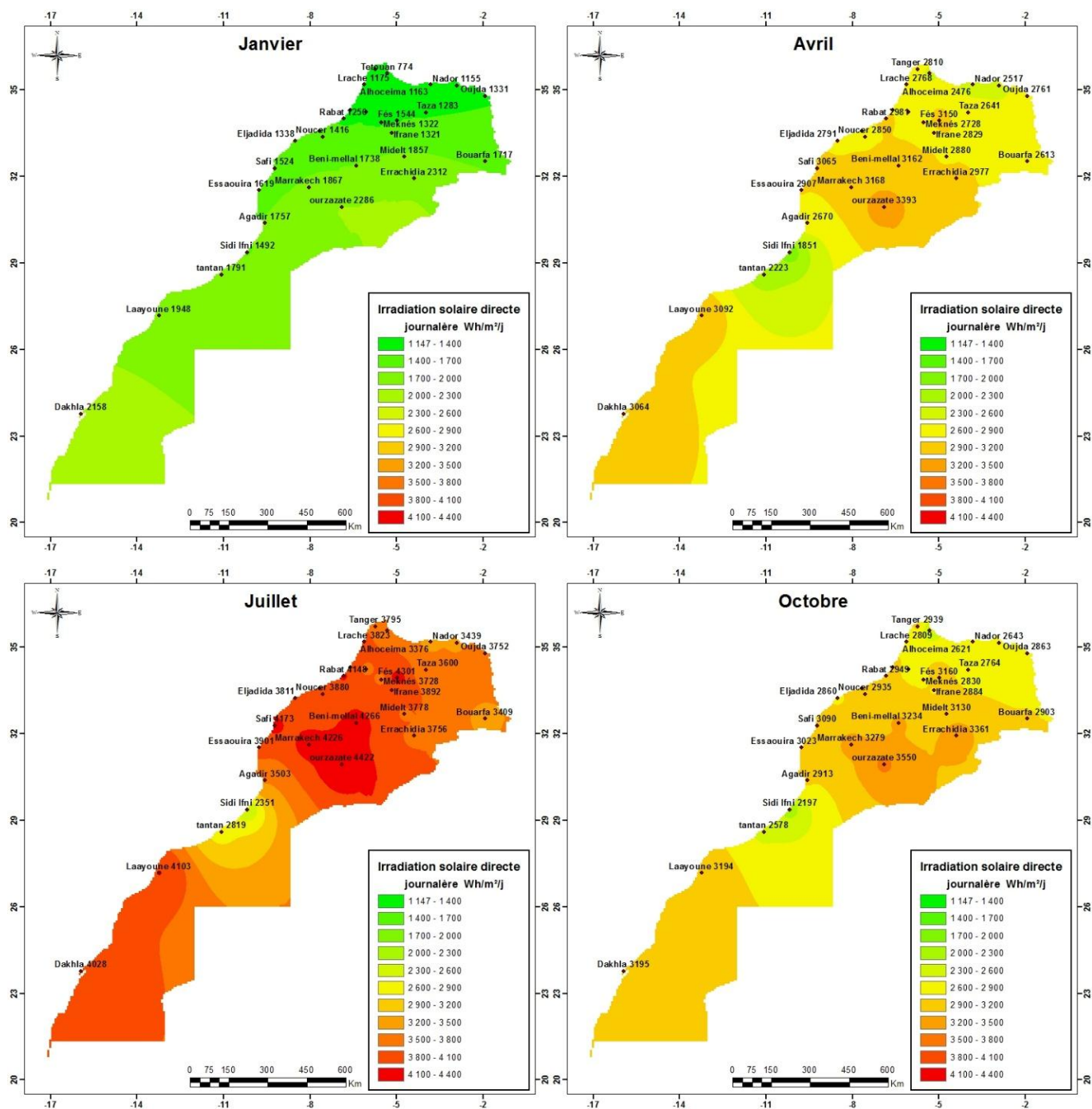


Figure III.3 : Cartes des valeurs journalières des irradiances directes sur plan horizontal pour les sites marocains.

III.2.3 Cartes des valeurs journalières du rayonnement diffus sur plan horizontal

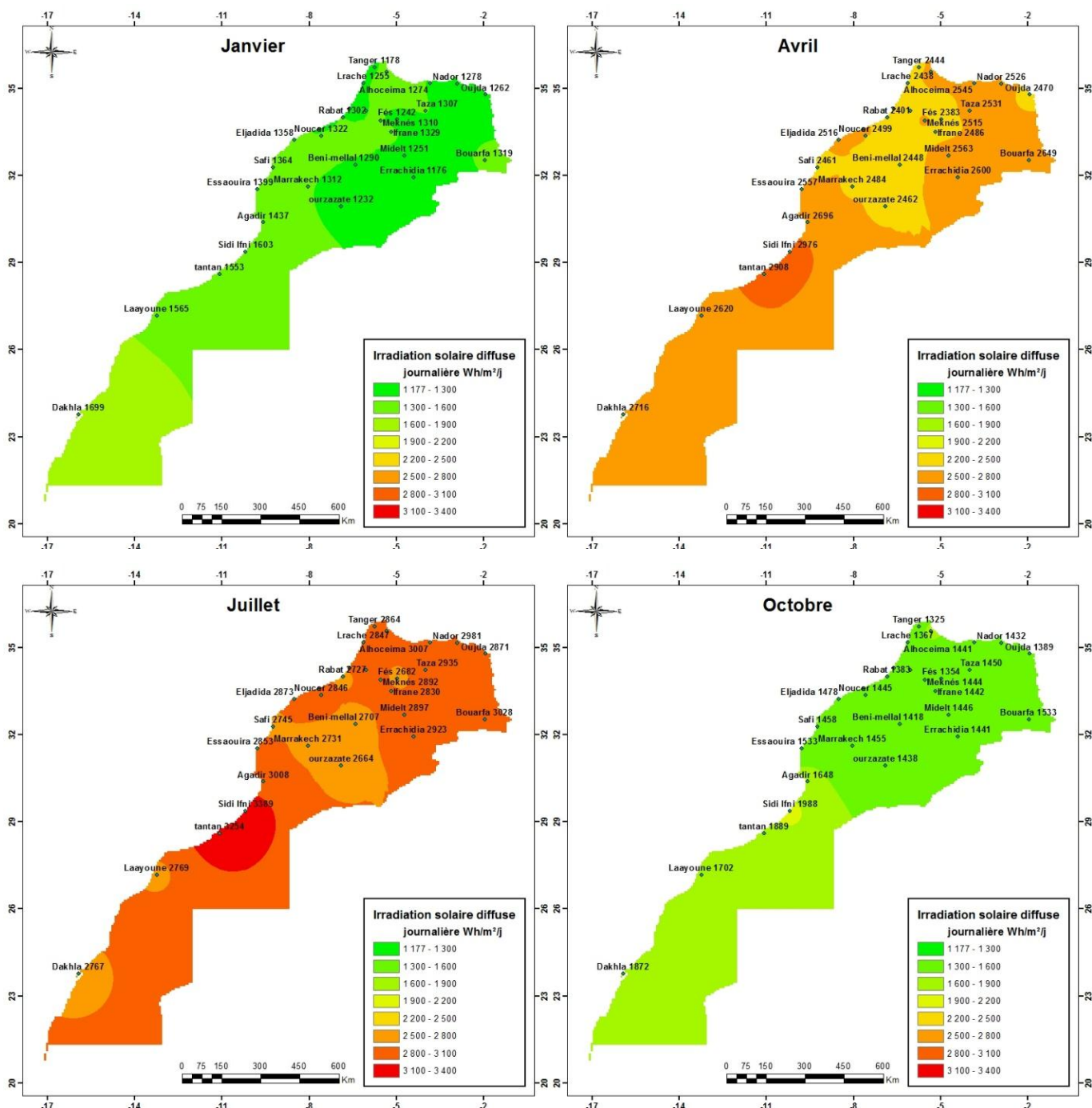


Figure III.4 : Cartes des valeurs journalières des irradiations diffuses sur plan horizontal pour les sites marocains.

II.2.4 Cartes des valeurs journalières du rayonnement global d'un plan incliné avec $s =$ latitude du lieu.

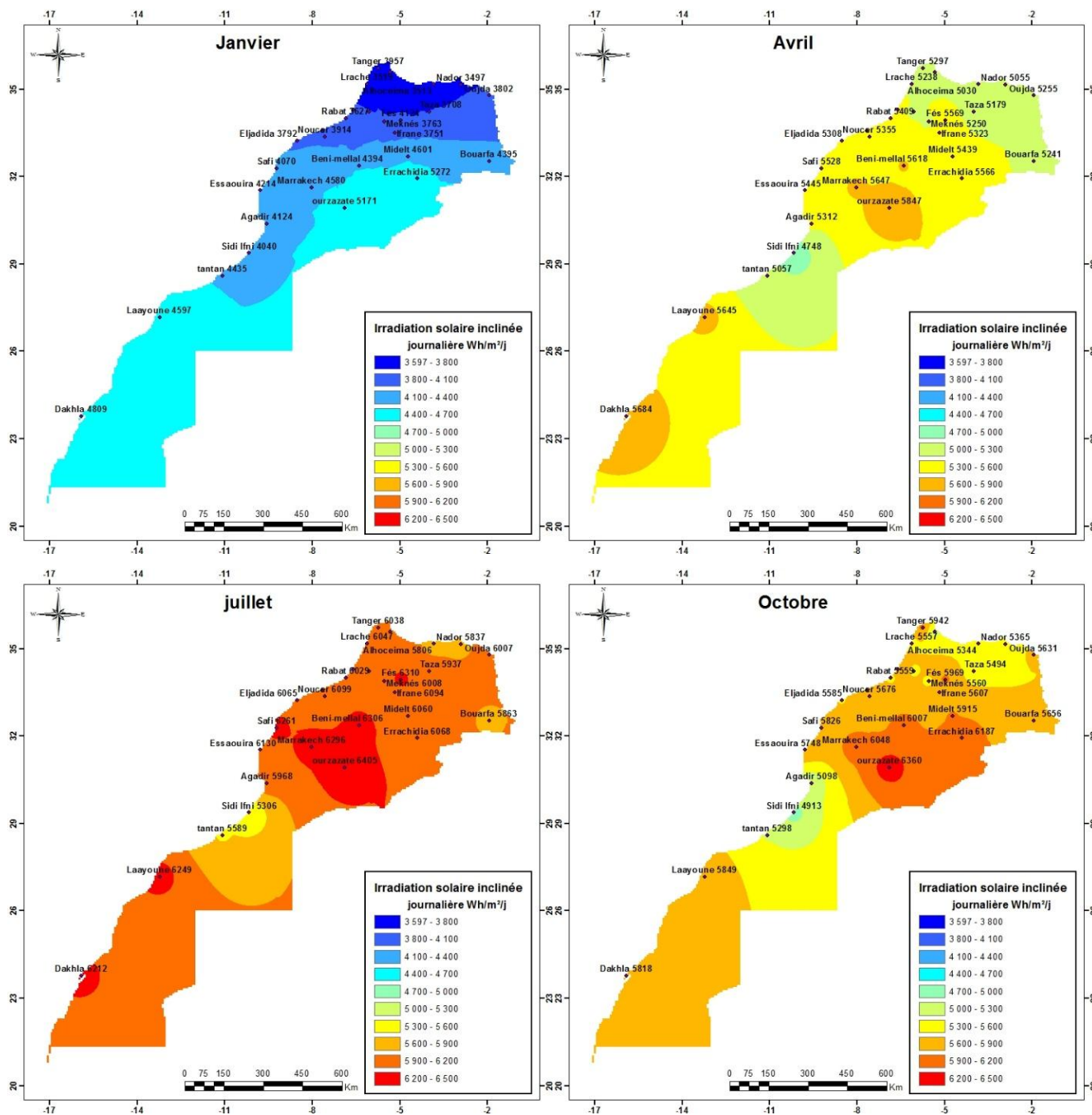


Figure III. 5: Cartes des valeurs journalières des irradiances globales sur plan incliné ($S =$ latitude du lieu) pour les sites marocains.

II.2.5 Cartes du cumul annuel des irradiations énergétiques journalières

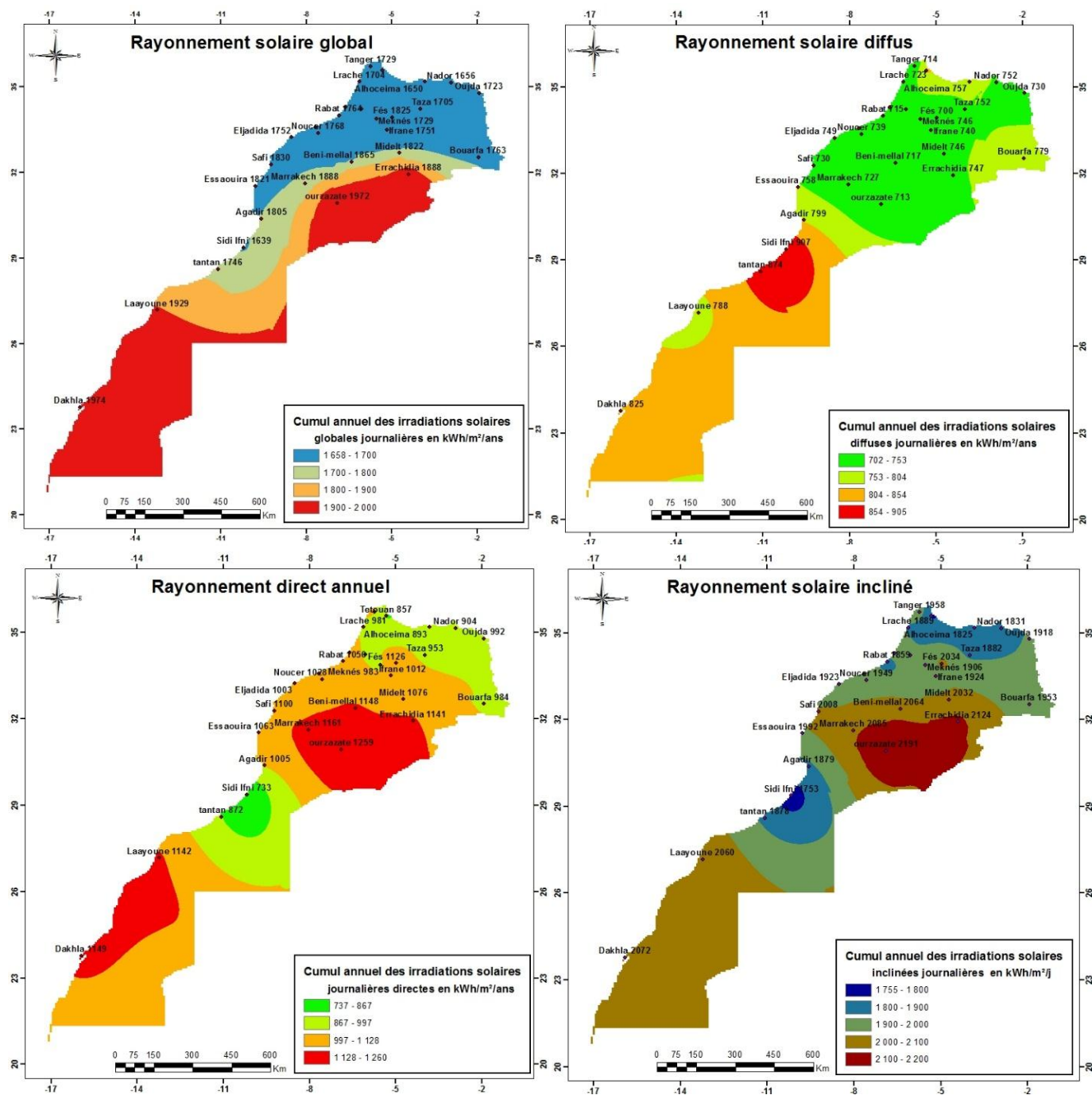


Figure III. 6 : Carte du cumul annuel des irradiations solaires journalières pour les sites marocains.

II.2.6 Cartes des valeurs journalières du rayonnement photo-synthétiquement actif

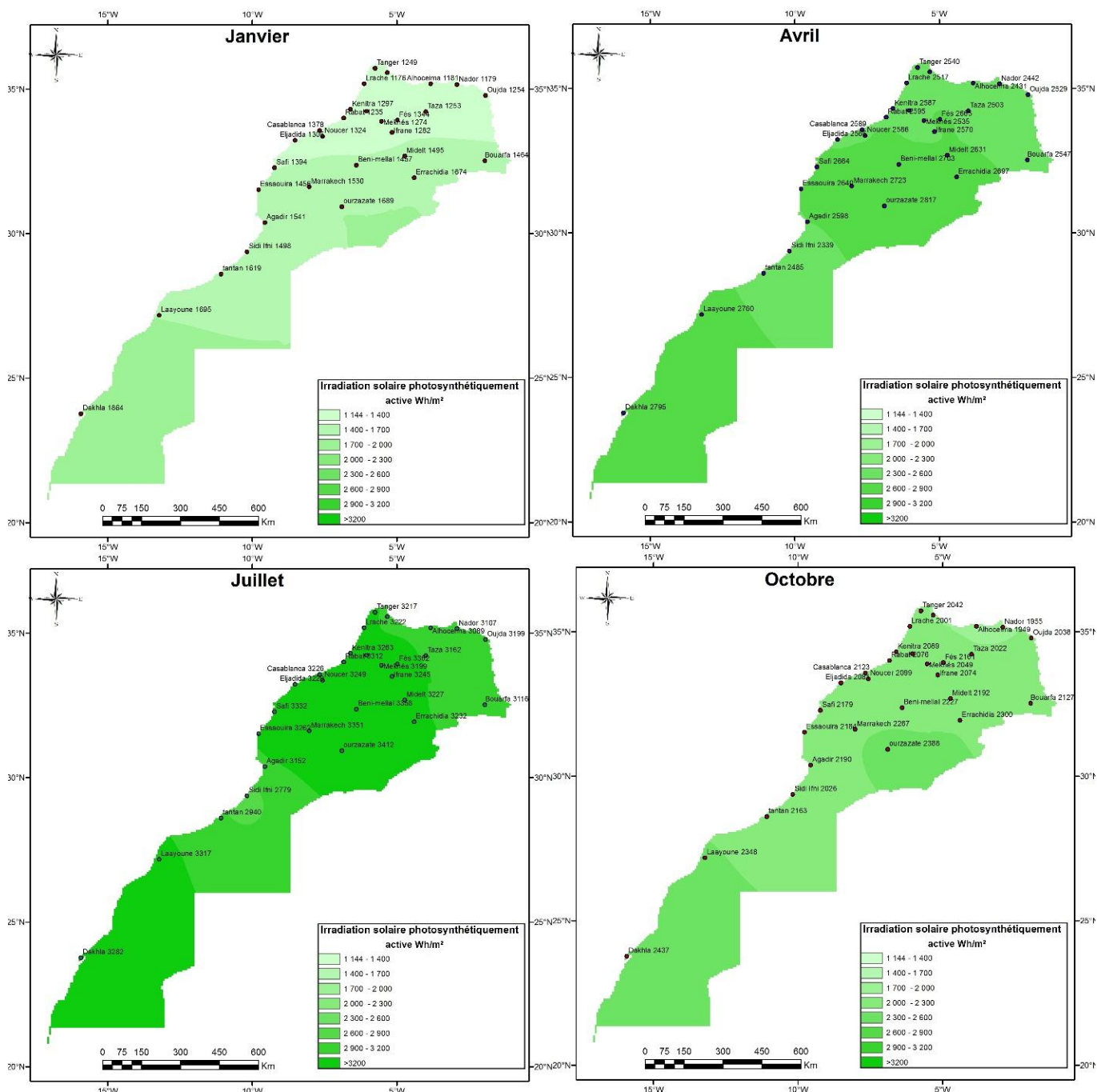


Figure III. 7: Cartes des valeurs journalières des irradiations photo-synthétiquement actives pour les sites marocains.

II.2.7 Cartes des valeurs journalières du rayonnement Ultra-violet

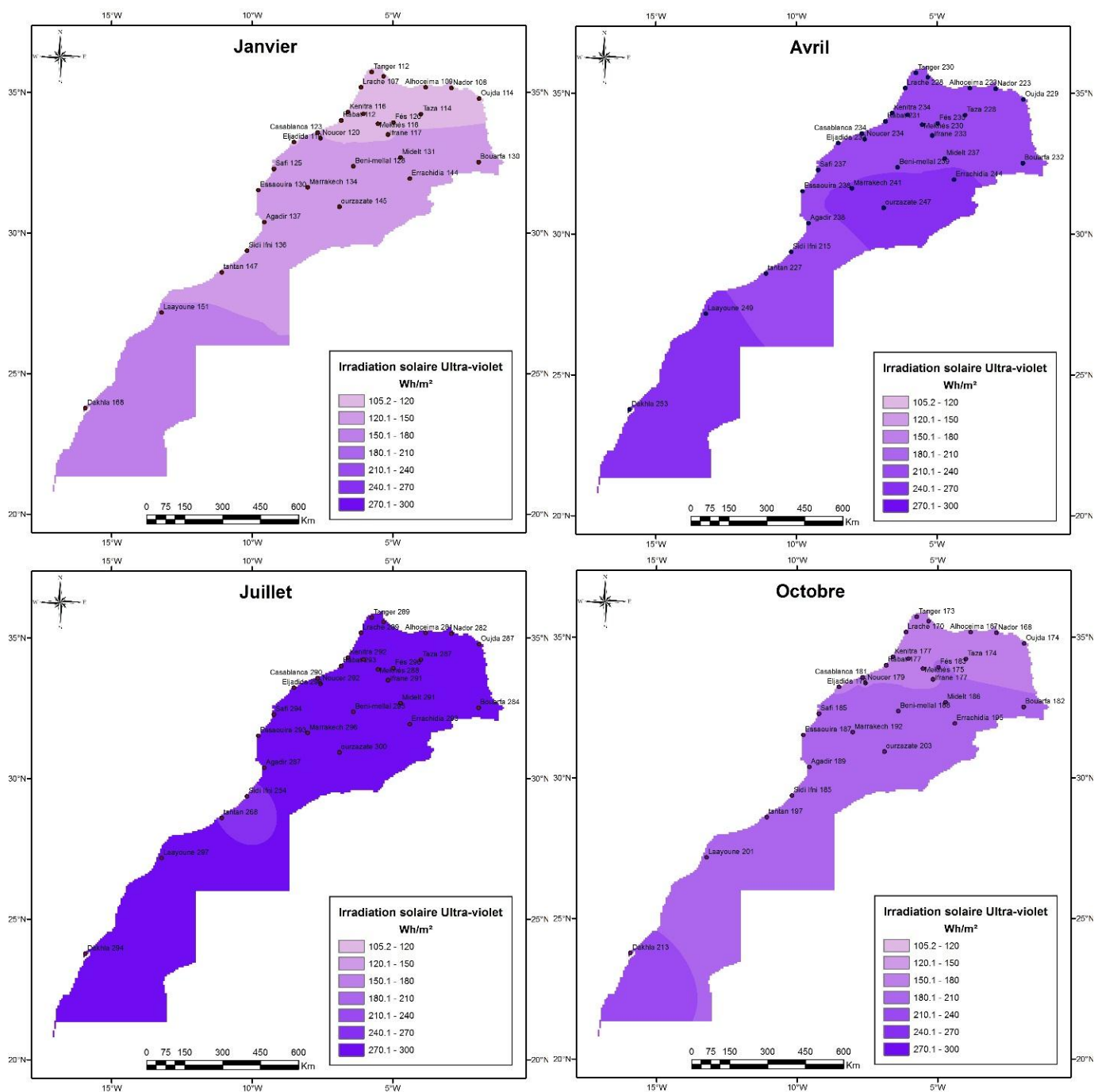


Figure III. 8: Cartes des valeurs journalières des irradiances Ultra-violettes pour les sites marocains.

II.2.8 Cartes des valeurs journalières du Rayonnement Infrarouge

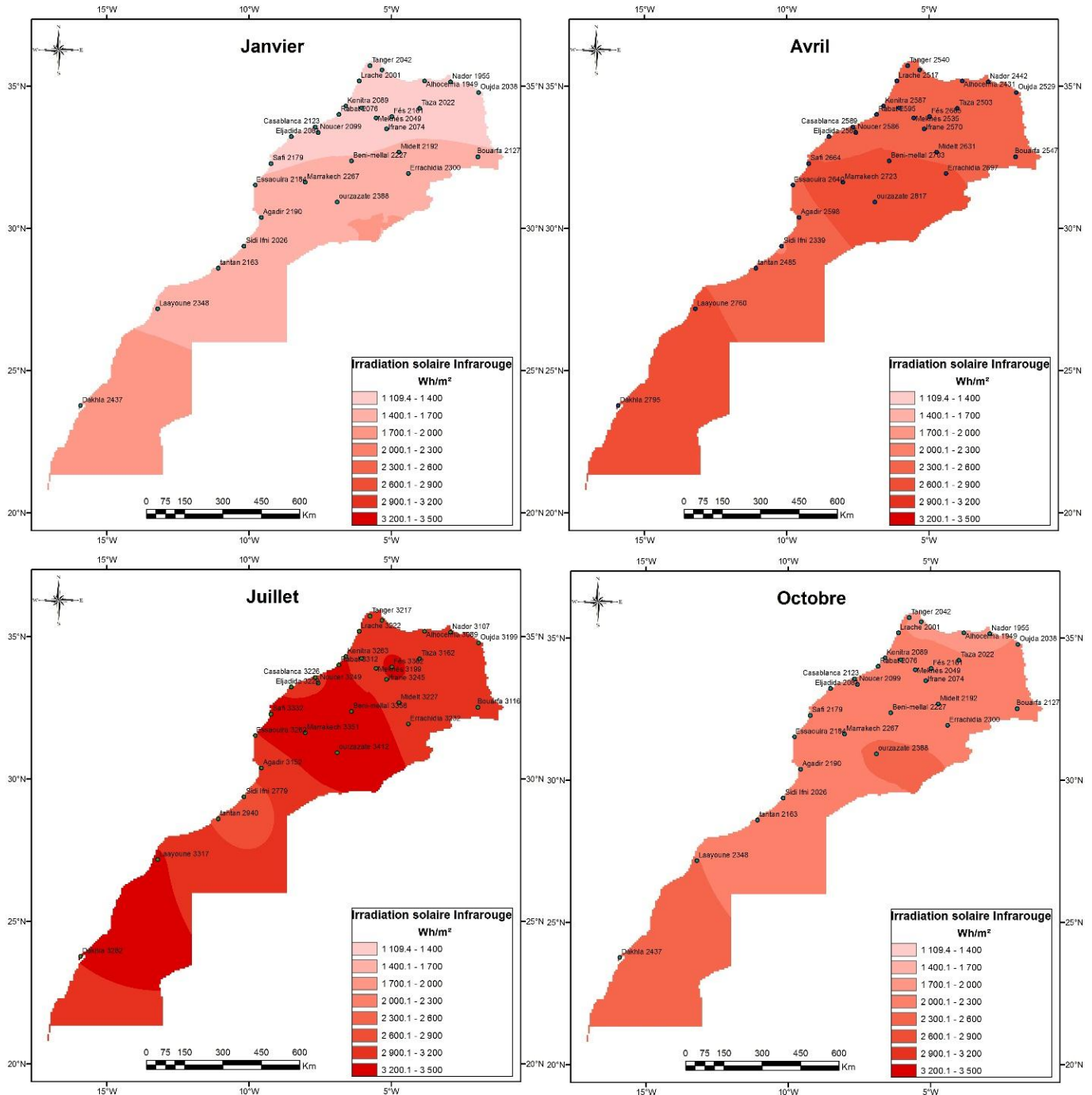


Figure III. 9 : Cartes des valeurs journalières des irradiations infrarouges pour les sites marocains.

II.2.9 Cartes du cumul annuel des irradiances spectrales journalières

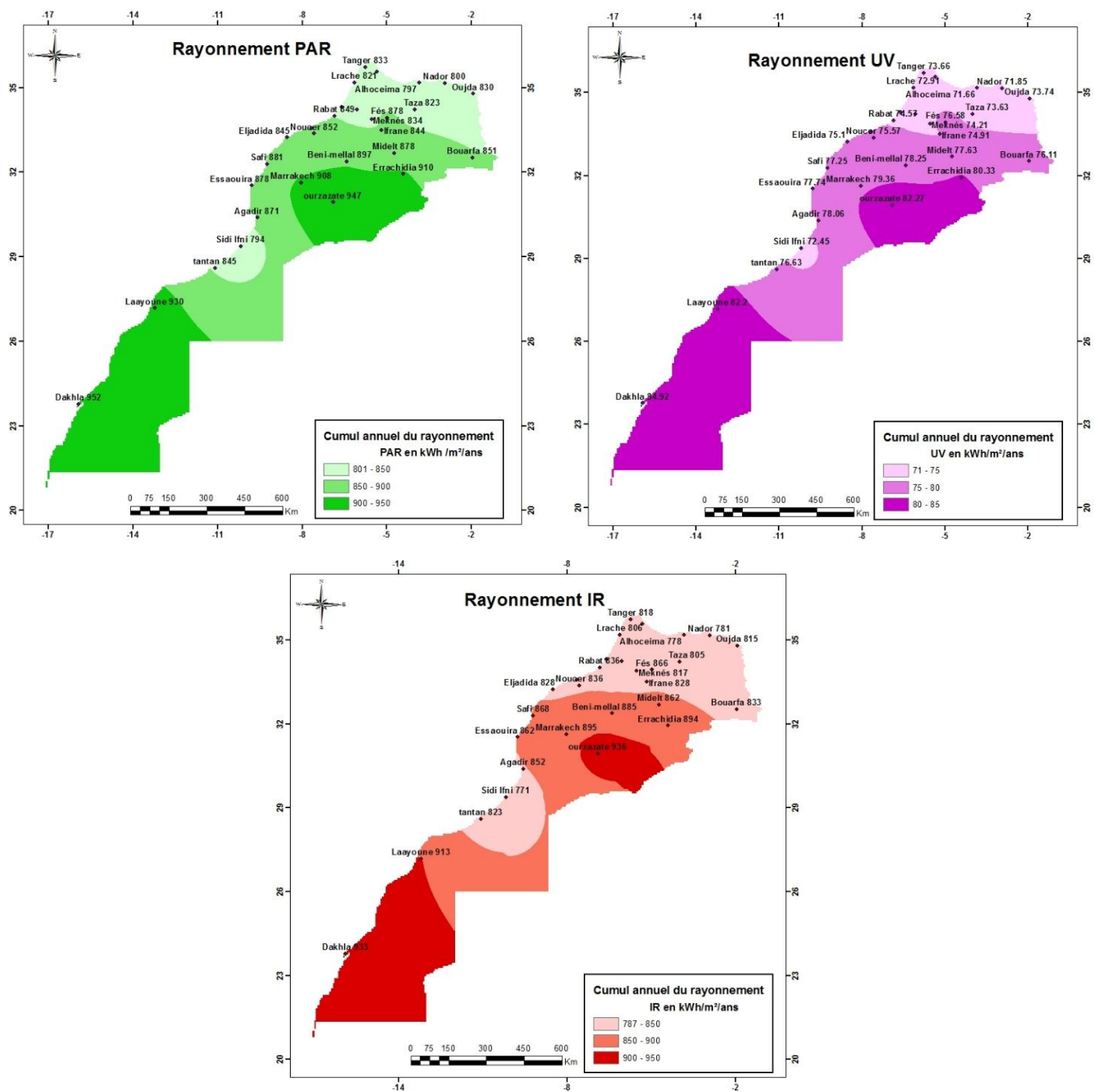


Figure III. 10: Cartes du cumul annuel des irradiances journalières des composantes spectrales sur plan horizontal pour les sites marocains.

II.2.10 Tableaux des valeurs minimales, maximales et moyennes des valeurs journalières pour chaque mois de l'année représentative.

Afin d'évaluer l'amplitude de variation des composantes du rayonnement solaire, nous avons calculé, pour chaque composante solaire, les moyennes mensuelles des valeurs journalières (tableau III.3), les minimales des valeurs journalières (tableau III.4) et les maximales (tableau III.5) pour chaque mois de l'année représentative. En raison du grand nombre de stations, seuls les résultats obtenus dans la station de Rabat sont présentés dans les tableaux suivants :

	H _h	H _d	H _b	H _s (S=φ+20)	H _s (S=φ-20)	H _s (S=φ)	H _s (S=90)	H _{UVT}	H _{PAR}	H _{IR}
Jan	2552	1302	1250	3772	3072	3627	3252	112	1235	1200
Fév	3881	1471	2409	5271	4556	5223	4247	162	1864	1843
Mars	4493	1966	2527	4718	4848	5075	3273	189	2162	2131
Avr	5382	2401	2981	4704	5511	5409	2822	231	2595	2542
Mai	5859	2825	3035	4489	5777	5414	2491	251	2825	2769
Juin	6942	2723	4220	4900	6722	6129	2459	299	3390	3334
Juil	6668	2727	3941	4900	6522	6029	2546	293	3312	3255
Août	5742	2552	3191	4743	5788	5571	2723	273	3077	3020
Sept	5001	1878	3124	5051	5349	5526	3327	227	2655	2638
Oct	4231	1383	2848	5533	4913	5559	4313	177	2076	2064
Nov	2585	1196	1503	3820	3117	3681	3264	116	1312	1290
Déc	2470	1024	1508	4129	3128	3855	3682	119	1374	1358

Tableau III. 3 : Moyennes mensuelles des valeurs journalières de l'année représentative des différentes composantes du rayonnement solaire en (Wh/m²). (Site de Rabat)

Chapitre III Réalisation d'une banque de données des irradiations solaires pour les sites marocains.

Mois	H _h	H _d	H _b	H _s (S=φ+20)	H _s (S=φ-20)	H _s (S=φ)	H _s (S=90)	H _{UVT}	H _{PAR}	H _{IR}
Jan	3322	1635	2211	5618	4191	5206	5023	146	1608	1565
Fév	5050	2044	3759	6730	5919	6743	5481	206	2414	2414
Mars	6463	2786	4797	6837	6940	7249	5021	259	3090	3090
Avr	7253	3273	5212	6370	7360	7257	3695	298	3467	3467
Mai	8140	3570	6084	5837	7962	7312	2922	326	3891	3891
Juin	8192	3575	5999	5556	7895	7115	2684	338	3916	3916
Juil	7832	3652	5563	5522	7612	6944	2887	337	3833	3833
Août	7072	3320	4551	5452	7018	6600	3069	312	3683	3683
Sept	5883	2981	4175	6065	6185	6416	4235	276	3303	3303
Oct	5285	2424	3907	6523	6034	6688	5344	224	2659	2659
Nov	3688	1843	2669	5953	4630	5638	5109	163	1946	1946
Déc	3061	1459	2151	5530	4016	5083	4984	139	1583	1583

Tableau III. 4 : Valeurs maximales des irradiations solaires pour l'année représentative en (Wh/m²). (Site de Rabat).

Mois	H _h	H _d	H _b	H _s (S=φ+20)	H _s (S=φ-20)	H _s (S=φ)	H _s (S=90)	H _{UVT}	H _{PAR}	H _{IR}
Jan	1176	1011	59	1051	1185	1167	776	56	574	541
Fév	1884	1074	179	1712	1911	1893	1258	90	919	867
Mars	1114	1103	11	936	1103	1061	672	54	544	512
Avr	886	877	9	741	876	842	531	43	432	407
Mai	1843	1825	18	1536	1821	1747	1099	89	900	848
Juin	3303	2193	316	2693	3254	3101	1856	159	1612	1519
Juil	4885	2052	2109	3620	4758	4403	2039	138	1407	1327
Août	3996	1815	833	3346	3986	3840	2201	173	1904	1853
Sept	2418	1563	171	2265	2494	2502	1592	89	900	848
Oct	2778	801	823	3052	3003	3189	2371	39	395	372
Nov	931	397	315	734	1049	1003	411	19	196	184
Déc	679	616	1	659	702	712	359	30	304	286

Tableau III. 5 : les valeurs minimales des irradiations solaires journalières de l'année représentative en (Wh/m²). (Site de Rabat)

D'après les résultats des cartes et les tableaux des valeurs maximale et minimale des ressources énergétiques solaires, on remarque que l'ensemble du territoire marocain subit un bon ensoleillement durant toutes les saisons de l'année. En revanche, on constate qu'il y a une

distribution inéquitable des ressources solaires de région en région, cela se reflète par un maximum de rayonnement au sud et au sud-est dans les régions de Ouarzazate, Er-Rachidia et Laâyoune, Dakhla, tandis qu'il est minimum au nord du royaume dans les régions de Tanger, Tétouan et la zone côtière entre Agadir et Tan-Tan où règne un microclimat.

Par ailleurs, Les cartes des composantes spectrales montrent une distribution semblable à celle du rayonnement global, avec des irradiances intenses au sud et au sud-est, et de faibles irradiances au nord et à la zone du microclimat. Ce résultat est dû à l'aspect linéaire des équations d'estimation qui relient les composantes spectrales au rayonnement global.

III. Réalisation d'une base de données des irradiances solaires horaires

III.1 Présentation de la méthode d'élaboration d'une banque de données horaires

Pour constituer une banque de données complète, nous avons procédé à compléter la base de données des irradiances journalières par les données horaires. En effet, les données horaires sont sollicitées pour les études fines de dimensionnement et pour l'évaluation et le suivi des performances des systèmes solaires.

Pour réaliser cet objectif, en premier lieu, on a utilisé les valeurs prédites de l'irradiation globale journalière H_h dans le modèle qu'on a développé pour estimer l'irradiation globale horaire à partir de l'irradiation journalière. Dans la seconde étape, on a utilisé l'irradiation horaire globale qu'on vient de générer, dans le modèle de De Miguel et al pour prédire l'irradiation horaire diffuse. Puis, dans la dernière étape, on a déduit l'irradiation horaire directe à partir des deux irradiances globale et diffuse. L'ensemble de ces résultats est introduit dans l'équation du modèle isotrope pour déduire l'irradiation globale d'un plan incliné. Parallèlement, les composantes horaires des irradiances spectrales ont été générées, à partir de l'irradiation globale horaire, en utilisant les équations de corrélations préétablis. Toute cette démarche est schématisée dans la figure suivante :

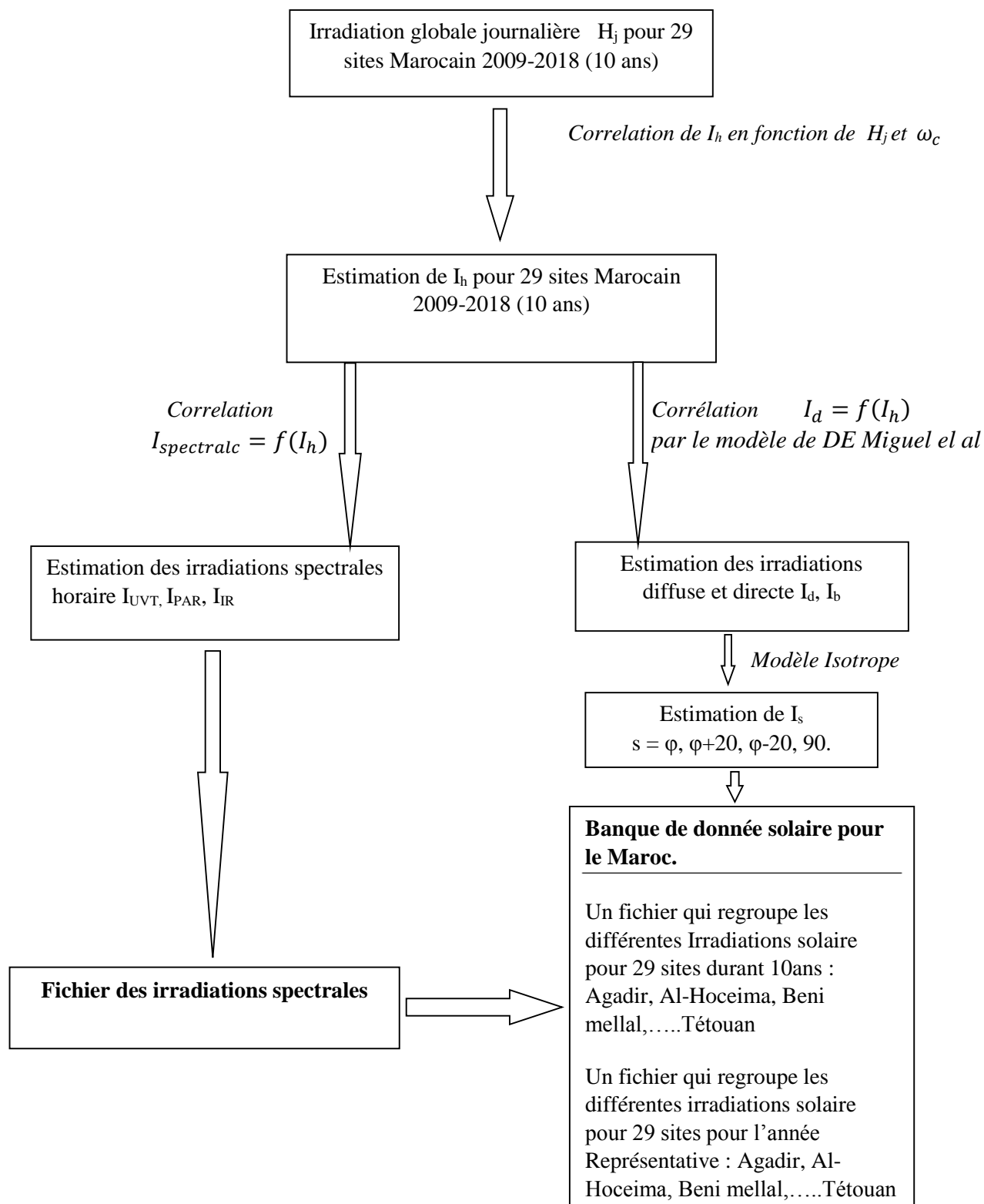


Figure III. 11: Schéma des étapes de réalisation de la banque de données solaires horaires pour le Maroc.

III.2 Résultats

Chapitre III Réalisation d'une banque de données des irradiations solaires pour les sites marocains.

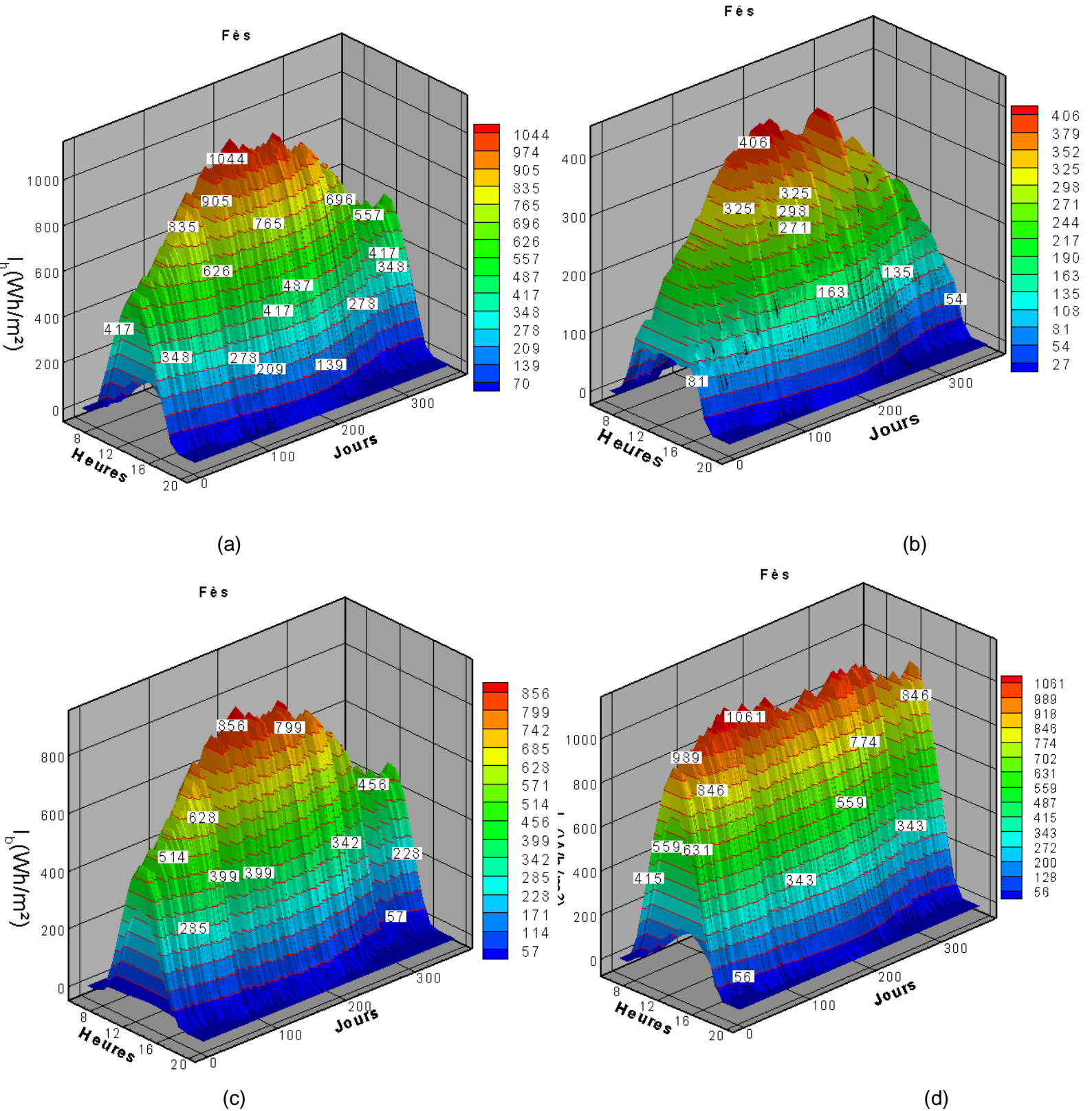
Similairement au paragraphe précédent, les résultats obtenus ont été regroupés en deux fichiers facilement utilisables, le premier contient les composantes des irradiations solaires horaires sur dix ans entre 2009 et 2018, et le second contient les composantes des irradiations solaires horaires de l'année représentative. Le tableau suivant présente un exemple des fichiers obtenus.

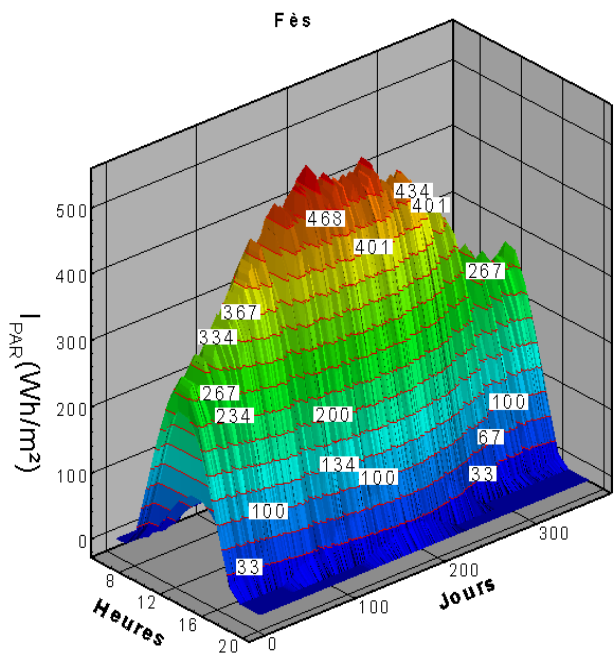
N_j Jour	T_i Heure	Global Wh/m ²	Diffus Wh/m ²	Direct Wh/m ²	Incliné $s = \phi$ Wh/m ²	Incliné $s = \phi + 20$ Wh/m ²	Incliné $s = \phi - 20$ Wh/m ²	Incliné $s = 90$ Wh/m ²	IR Wh/m ²	UVT Wh/m ²	PAR Wh/m ²
1	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	8	42.8	31.5	11.4	86.5	102.9	62.5	108	20.1	1.9	20.7
1	9	183.3	98.6	84.7	290.4	322.2	234	307.2	86	8.2	88.7
1	10	335.8	125.5	210.3	524	574.2	426.4	529.5	157.5	15	162.5
1	11	464.4	124	340.4	724.9	790.2	590.8	715.4	219.2	20.7	222.9
1	12	538.2	117.1	421.2	840.1	913.7	685.3	819.9	254	24	258.3
1	13	539.3	116.9	422.4	841.9	915.6	686.7	821.4	254.6	24.1	258.9
1	14	467.5	123.8	343.7	729.7	795.4	594.8	719.8	220.7	20.9	224.4
1	15	340.1	125.7	214.4	530.8	581.4	431.9	535.8	159.5	15.2	164.6
1	16	187.9	100	87.8	297.2	329.5	239.6	313.8	88.1	8.4	90.9
1	17	46.5	33.9	12.6	91.6	108.4	66.9	113	21.8	2.1	22.5
1	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	8	36.3	30.4	5.9	58.4	66	46.5	66.2	17	1.6	17.6
2	9	156.5	107.6	48.9	215.6	230.2	185.2	212.5	73.4	7	75.8
2	10	287.1	157.4	129.7	398.7	423.7	342.1	381.9	134.6	12.9	139
2	11	397.4	177.7	219.7	560	594.9	477.9	529.2	186.4	17.8	192.4
2	12	461	182.3	278.8	654.8	695.6	557.1	614.8	216.2	20.7	223.1
2	13	462.5	182.3	280.2	657	697.9	559	616.7	216.9	20.7	223.8
2	14	401.4	178.2	223.3	565.9	601.2	482.9	534.5	188.3	18	194.3
2	15	292.6	158.8	133.8	406.7	432.2	348.9	389.3	137.3	13.1	141.6
2	16	162.3	110.5	51.8	223.5	238.5	192.1	219.9	76.1	7.3	78.6
2	17	41.1	34.1	7	64.3	72.1	51.8	71.7	19.3	1.8	19.9
2	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau III. 6 : Un exemple de données obtenues après les différentes estimations.

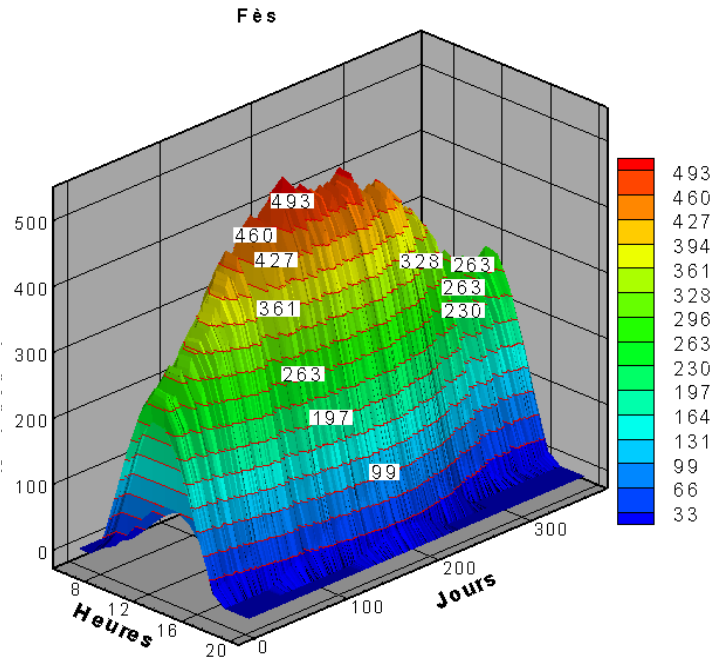
Vu le nombre énorme des valeurs obtenues qui dépassent largement les 17 millions de valeurs, on s'est contenté de ne présenter que les valeurs horaire de 5h à 20h de l'année représentative pour les villes de Rabat, Fès, Marrakech, Tanger et Laâyoune.

III.2.1 Présentation graphique de l'évolution horaire des irradiations solaires pour la ville de Fès.

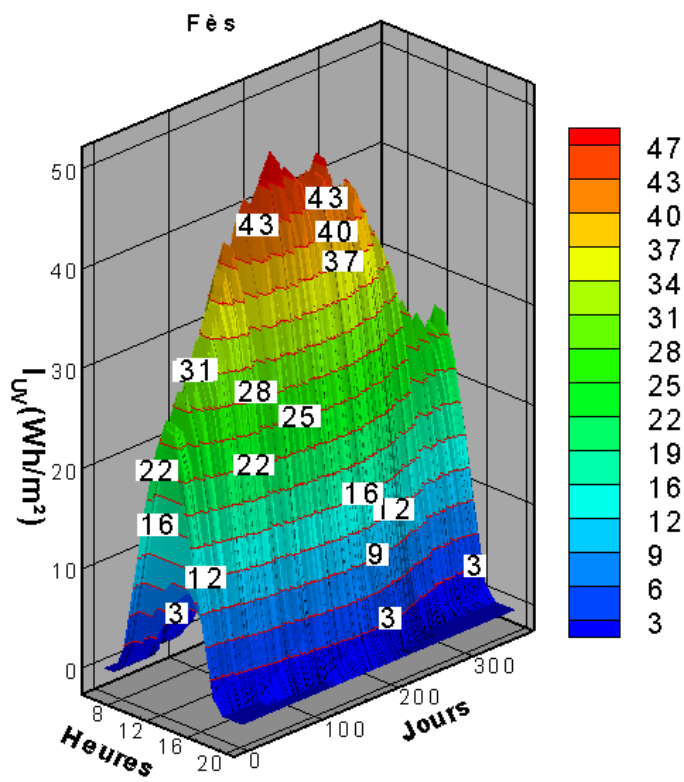




(e)



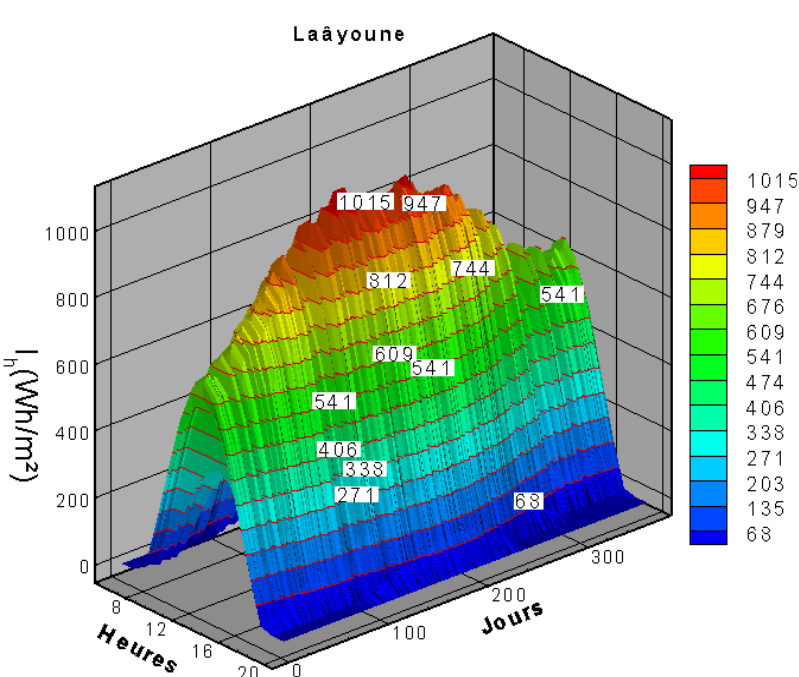
(f)



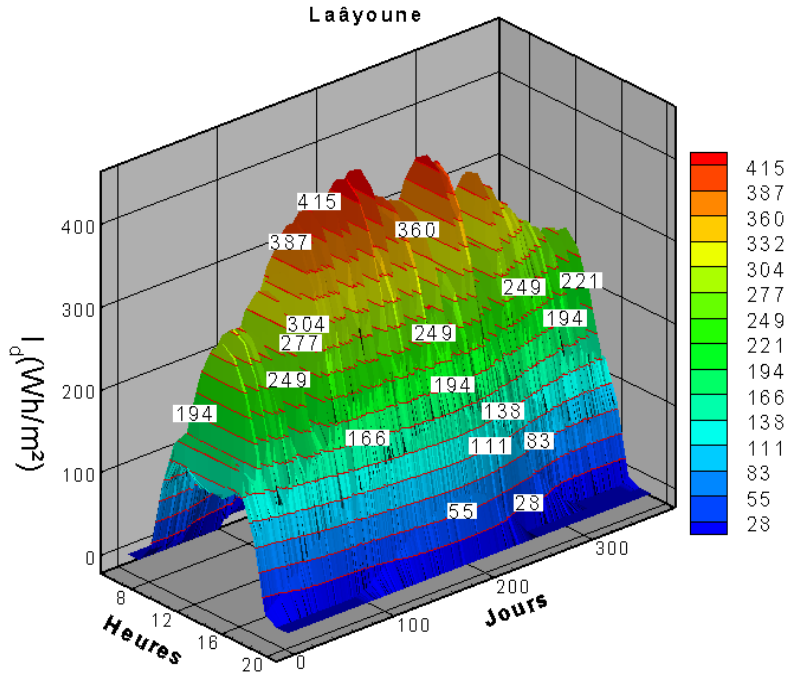
(g)

Figure III.12: Présentation graphique de l'évolution horaire des irradiations solaires durant l'année représentative pour la ville Fès. (a) Irradiation globale, (b) Irradiation diffuse, (c) Irradiation direct, (d) Irradiation inclinée, (e) Irradiation photo-synthétiquement active, (f) Irradiation infrarouge, (g) Irradiation ultra-violet.

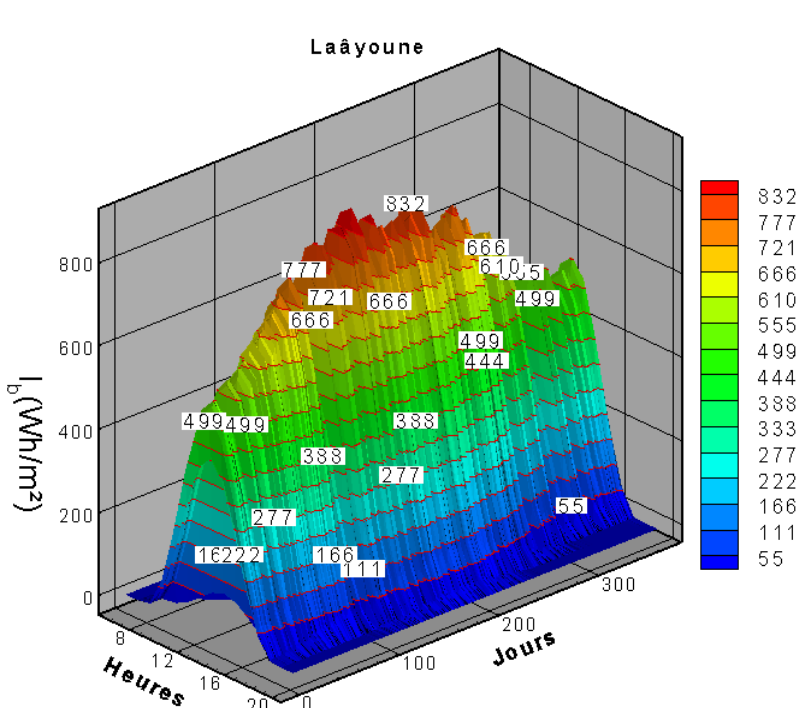
II.2.2 Présentation graphique de l'évolution horaire des irradiations solaires pour la ville de Laâyoune



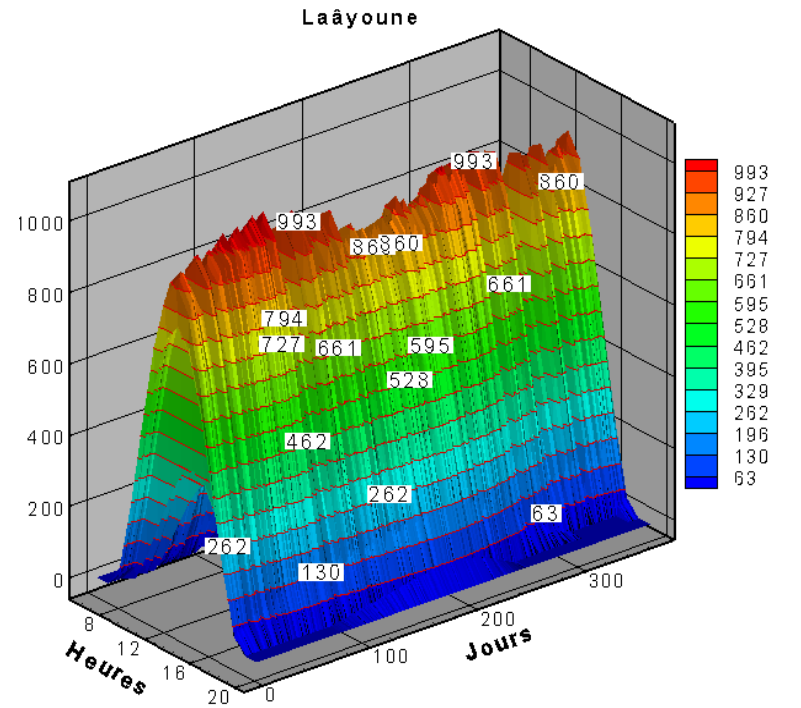
(a)



(b)



(c)



(d)

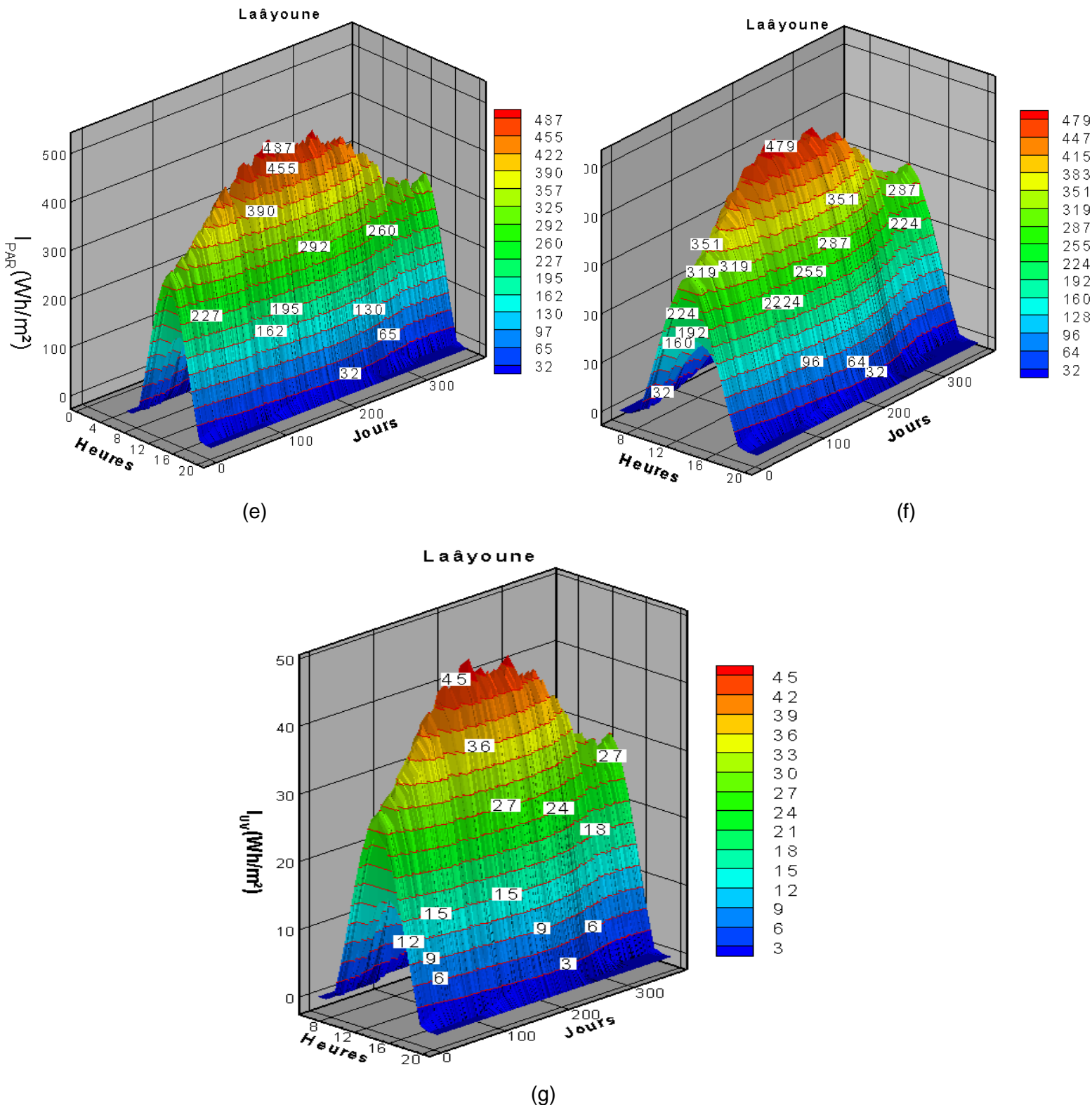
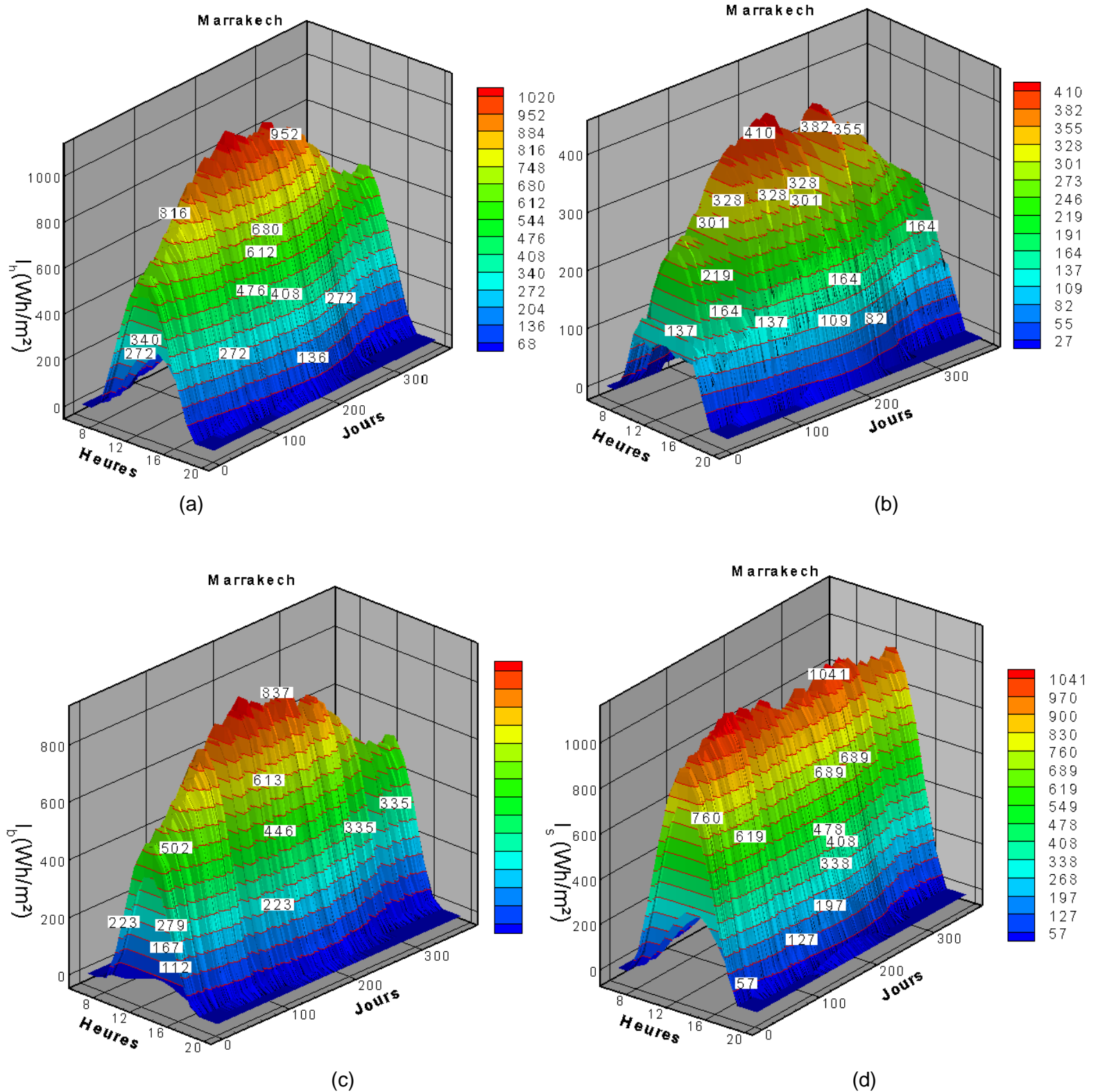


Figure III. 13 : Présentation graphique de l'évolution horaire des irradiations solaires durant l'année représentative pour la ville de Laâyoune. (a) Irradiation globale, (b) Irradiation diffuse, (c) Irradiation direct, (d) Irradiation inclinée, (e) Irradiation photo-synthétiquement active, (f) Irradiation infrarouge, (g) Irradiation ultra-violet.

III.2.3 Présentation graphique de l'évolution horaire des irradiations solaires pour la ville de Marrakech



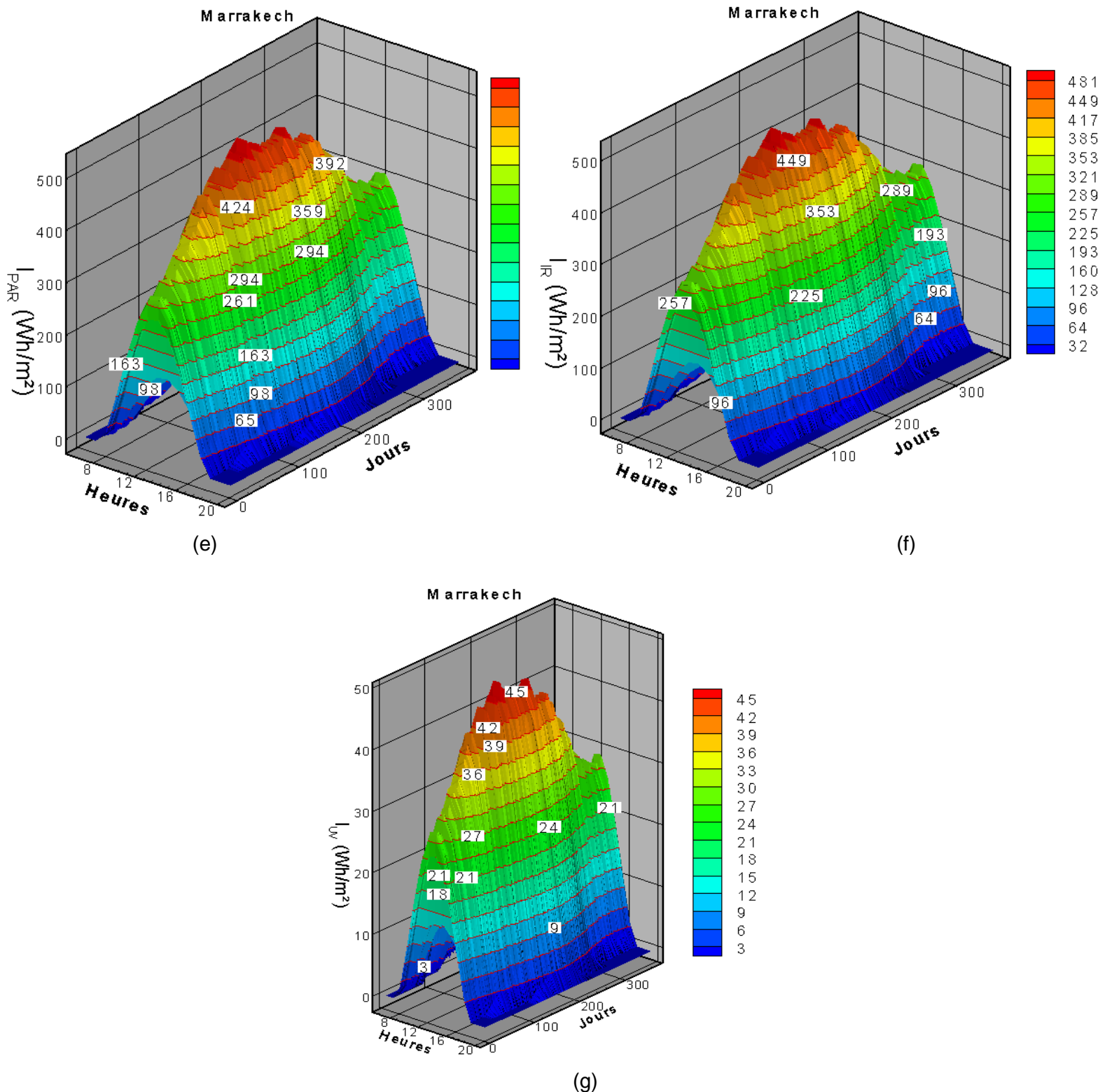
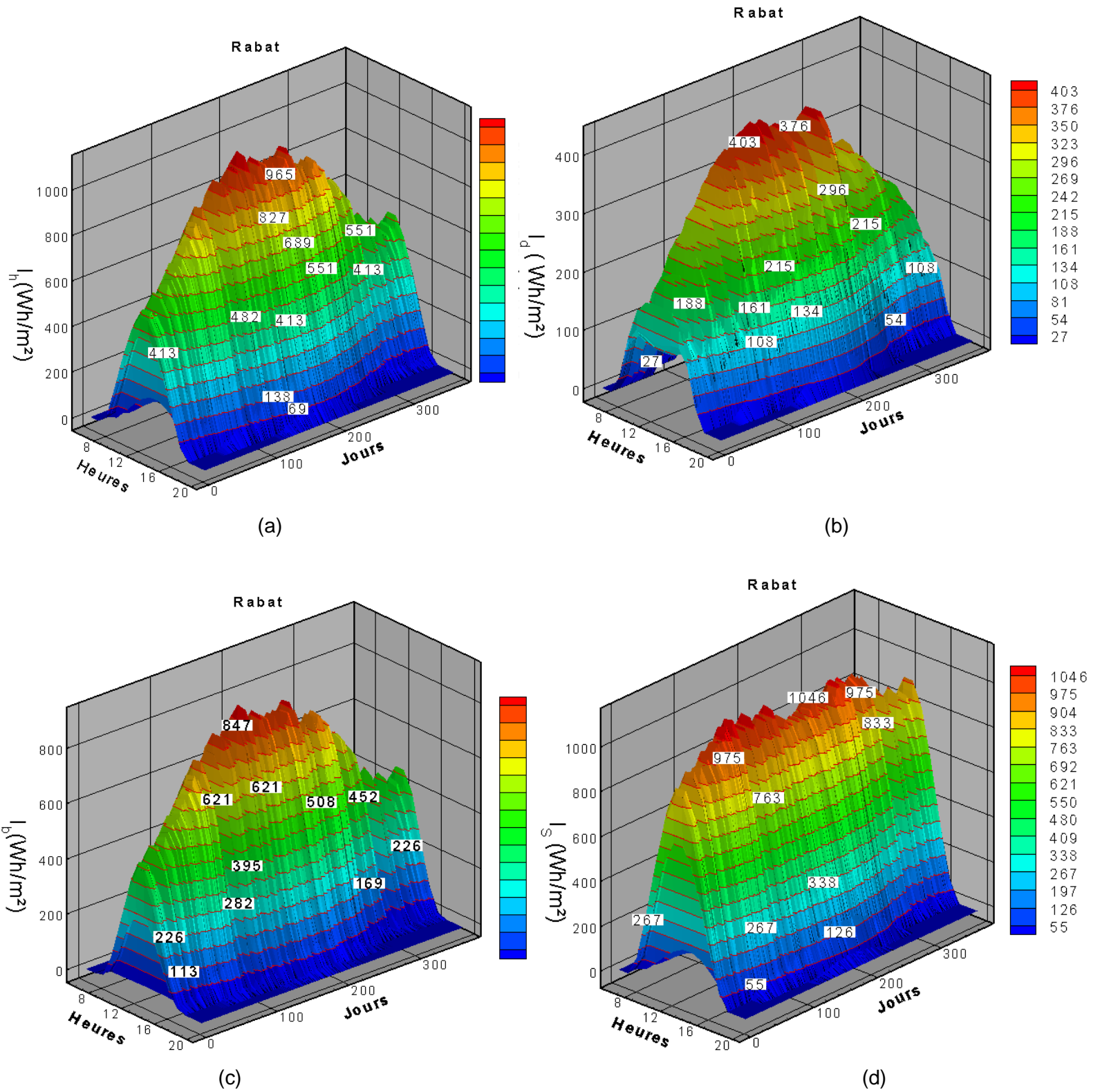


Figure III. 14 : Présentation graphique de l'évolution horaire des irradiations solaires durant l'année représentative pour la ville de Marrakech. (a) Irradiation globale, (b) Irradiation diffuse, (c) Irradiation direct, (d) Irradiation inclinée, (e) Irradiation photo-synthétiquement active, (f) Irradiation infrarouge, (g) Irradiation ultra-violet.

III.2.4 Présentation graphique de l'évolution horaire des irradiations solaires pour la ville de Rabat



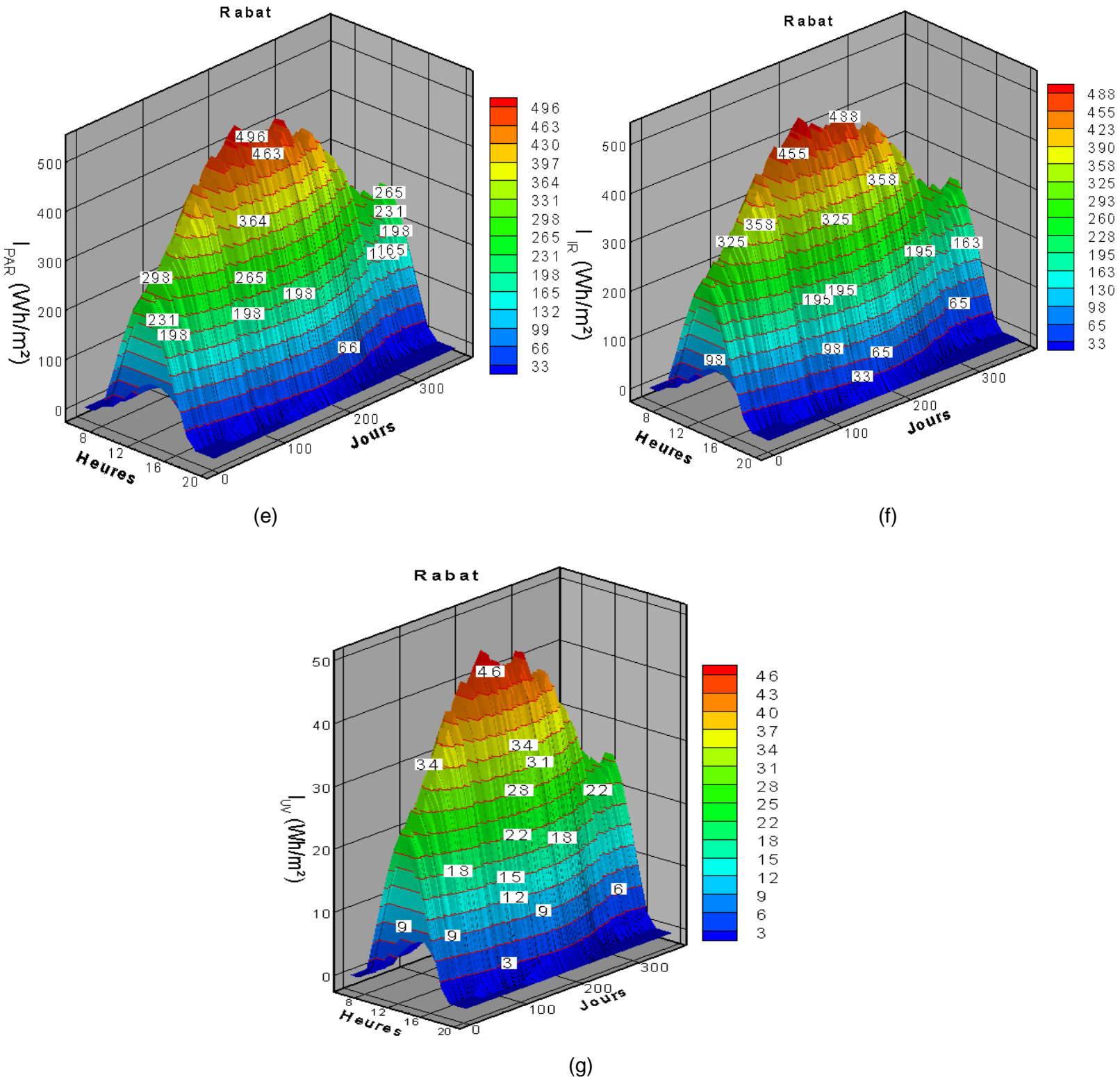
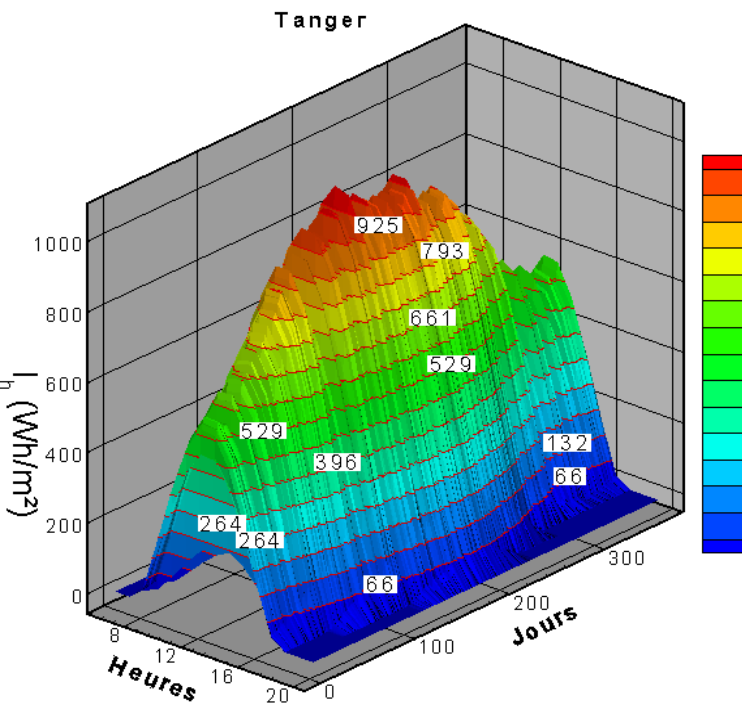
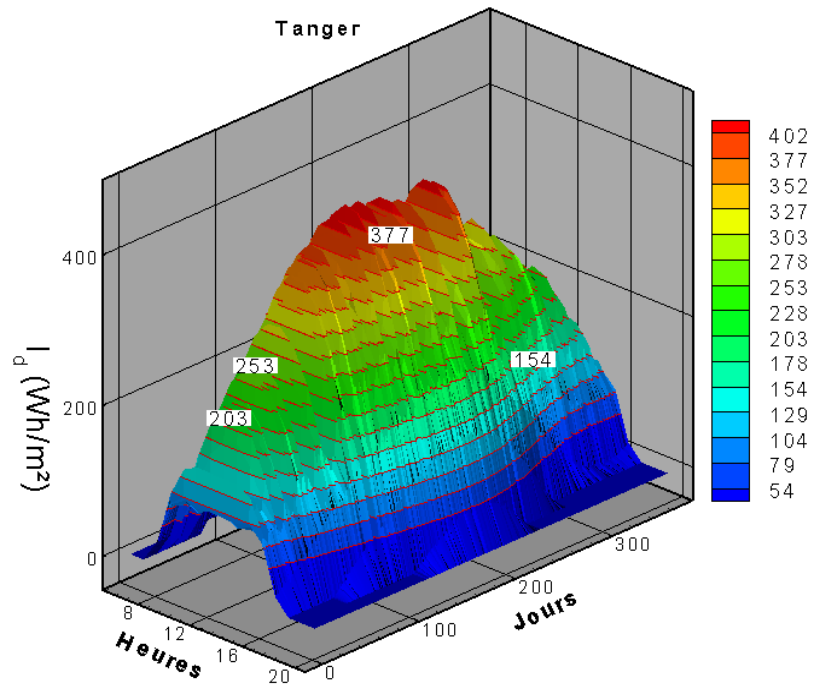


Figure III.15: Présentation graphique de l'évolution horaire des irradiations solaires durant l'année représentative pour la ville de Rabat. (a) Irradiation globale, (b) Irradiation diffuse, (c) Irradiation direct, (d) Irradiation inclinée, (e) Irradiation photo-synthétiquement active, (f) Irradiation infrarouge, (g) Irradiation ultra-violet.

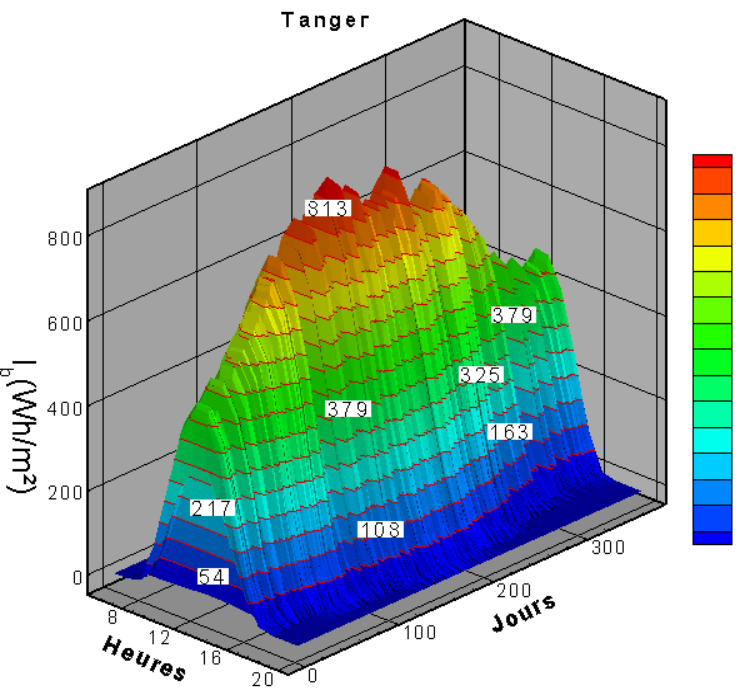
III.2.5 Présentation graphique de l'évolution horaire des irradiations solaire horaire pour la ville de Tanger



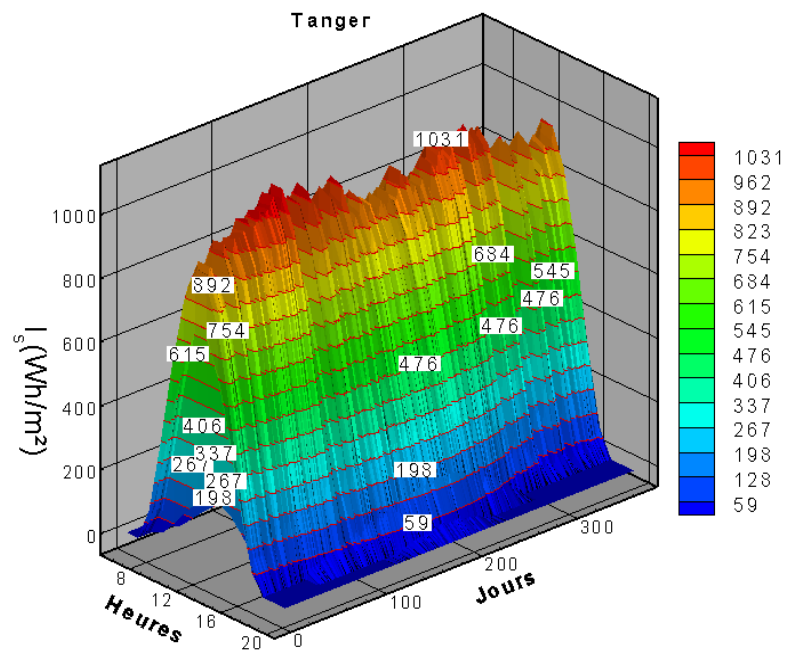
(a)



(b)



(c)



(d)

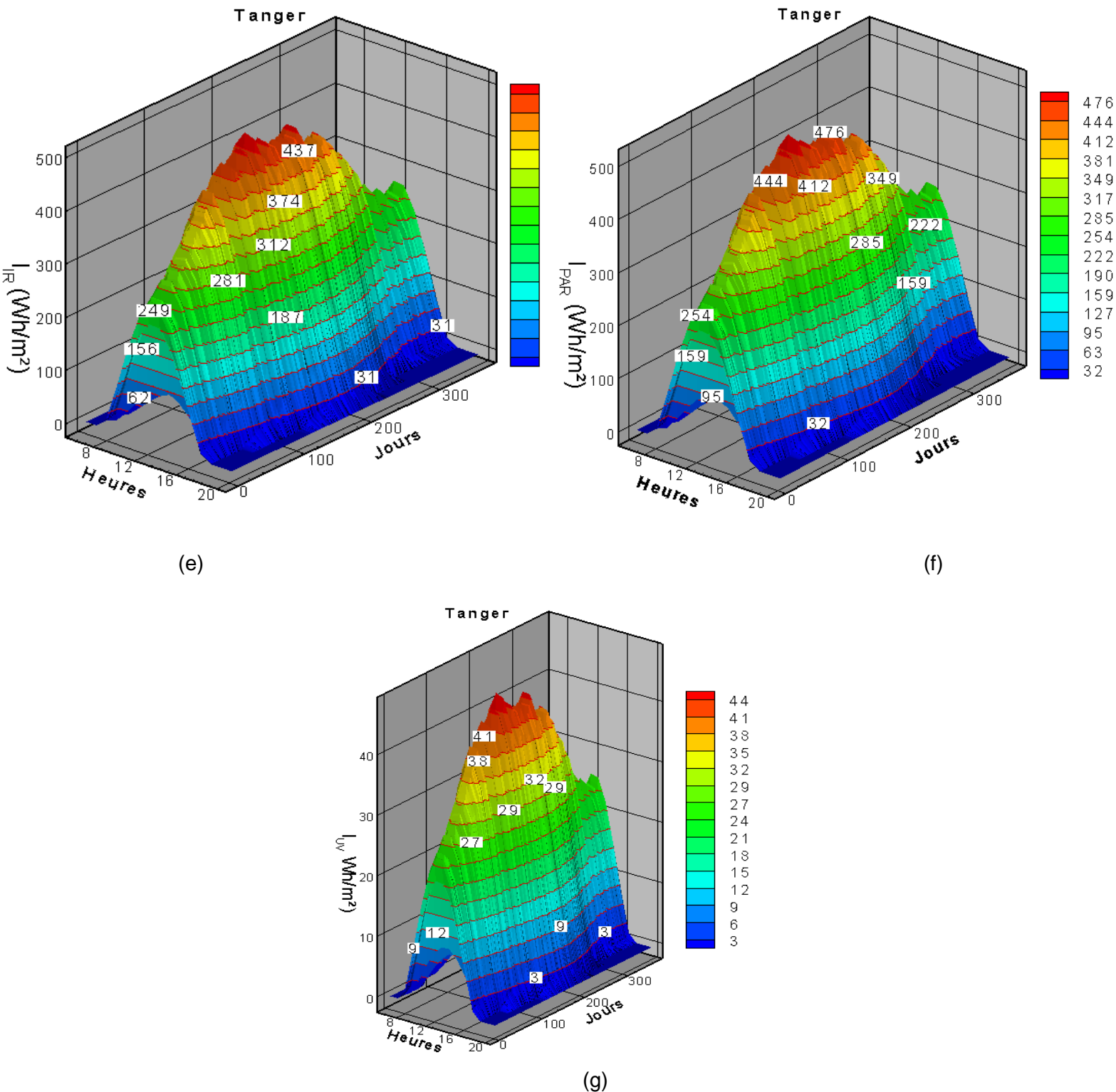


Figure III.16 : Présentation graphique de l'évolution horaire des irradiations solaires durant l'année représentative pour la ville de Tanger. (a) Irradiation globale, (b) Irradiation diffuse, (c) Irradiation direct, (d) Irradiation inclinée, (e) Irradiation photo-synthétiquement active, (e) Irradiation infrarouge, (f) Irradiation ultra-violet.

Conclusion

D'après les figures ci-dessus, on constate que l'irradiation solaire est maximale, la majorité de l'année. En effet la valeur maximale dépasse 900Wh/m^2 pour le rayonnement global, 800Wh/m^2 pour le rayonnement direct, 1000Wh/m^2 pour le rayonnement incliné, 400Wh/m^2 pour le rayonnement diffus, 450Wh/m^2 pour le rayonnement infrarouge, 450Wh/m^2 pour le rayonnement photosynthétiquement actif et 40Wh/m^2 pour le rayonnement ultraviolet. Toutes ces observations sont dues à la clarté du ciel, la hauteur du soleil et la position géographique du Maroc.

Conclusion générale

L'objectif de cette thèse est d'élaborer une banque de données solaires qui regroupe les différentes composantes du rayonnement solaire soit énergétiques (Irradiation globale, diffuse, directe, inclinée) ou spectrales (Irradiation ultra-violet, infrarouge et photo-synthétiquement active) à l'échelle horaire et journalière sur une période de 10 ans comprise entre 2009 et 2018.

Pour ce, nous avons tout d'abord fait un rappel sur des généralités sur le rayonnement solaire et les multiples instruments pour mesurer ses composantes ainsi que les caractéristiques techniques du réseau de mesure du LESE. Puis, nous avons évoqué quelques modèles d'estimation déjà réalisés à des sites marocains et à des sites à travers le monde.

Pour compléter et mettre à jour les études d'estimation déjà réalisés au Maroc, on a élaboré à notre tour, nos propres modèles en utilisant les mesures collectées par le réseau de station du LESE de la période comprise entre 2009 et 2018. Ainsi, on a généré des nouveaux modèles pour l'estimation des différentes composantes du rayonnement solaire.

L'intégralité de ces nouveaux modèles a été comparée avec des modèles antérieurs. Ainsi ceux qui représentent les plus faibles erreurs, définies par nos modèles pour l'estimation de H_h , I_h , I_d , H_{PAR} , H_{IR} , H_{UV} , I_{PAR} , I_{IR} , I_{UV} et le modèle de De Miguel et al pour H_d , ont été choisis pour l'estimation du rayonnement solaire. Ces modèles ont été l'objet d'une étude plus détaillée de validité, en utilisant les mesures collectées dans des sites représentatifs du climat marocain.

La réalisation de la base de données des irradiations solaires pour les sites marocains a été divisée en deux étapes :

- Dans la première étape, on a extrapolé l'irradiation globale pour tous les sites marocains à l'aide des mesures du rayonnement global de la station de Fès, pris comme site d'origine. puis à l'aide des équations de corrélations on a estimé l'irradiation diffuse, directe, inclinée, infrarouge, ultraviolet et photo synthétiquement active.
- Dans la deuxième étape, en utilisant le global journalier obtenu dans la première partie, on a estimé le global horaire puis les autres composantes énergétiques et spectrales.

Les résultats obtenus sont regroupés dans quatre fichiers, les deux premiers représentent séparément les données de l'année représentative à l'échelle horaire et journalière tandis que les deux autres représentent les données horaires et journalières de la période comprise entre 2009 et 2018.

Par la réalisation de cette base de données, on a généré plus que 17 millions valeurs horaires et 1 million valeurs journalière. Ce grand nombre de données est difficile dans l'utilisation et l'interprétation, ce qui nous a conduits de nous contenter de présenter les valeurs journalières dans des cartes qui représentent des données de mi-saison de l'année représentative et de présenter les valeurs horaires dans des figures en 3D qui donnent l'évolution annuelle des irradiances solaires horaires.

Cette banque de données permettra donc de quantifier le potentiel solaire pour chaque type de rayonnement solaire et pour tous les sites marocains, ce qui permettra le dimensionnement de tous les types des systèmes solaires. Elle constituera un support fondamental pour les ingénieurs, les bureaux d'études, et tous les organismes qui s'intéressent à développer l'utilisation des systèmes solaires dans les différentes régions marocaines. Elle constituera également un outil de base important pour les chercheurs dans leurs travaux de modélisation et de simulation des nouveaux systèmes.

Références Bibliographiques

- [1] J. Bahraoui-Buret, M. N. Bargach, M. L. Ben kadour, Le gisement solaire Marocain. Editions SMER (1983)
- [2] Y.H. Benjamin Liu, C.Richard Jordan, The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. Solar Energy, Volume 4, Issue 3, Pages 1-19, (1960). [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(60\)90062-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(60)90062-1).
- [3] M.Iqbal, An introduction to solar radiation. Academic press, Canada.(1983).
- [4] C.G. Abbot, The silver disk pyrhelimeter. Smithsonian Miscellaneous Collections, vol 56 No 19. (1911).
- [5] C.G. Abbot, L.B. Aldrich, The pyranometer: an instrument for measuring sky radiation Smithsonian Miscellaneous Collections, vol 66 No 7. (1916).
- [6] W. J. H. Moll, A thermopile for measuring radiation. proc. Phys. Soc. London, ser.B. 35, 257-260. (1923).
- [7] J.R. Latimer, Radiation measurement. International Field Year for the Great Lakes, Technical Manuel Series, No 2. (1978).
- [8] D. J. Norris, Calibration of pyranometre in inclined and inverted position. Sol. Energy 16, 53-55. (1977).
- [9] Loïc VALLANCE, Synergie des mesures pyranométriques et des images hémisphériques in situ avec des images satellites météorologiques pour la prévision photovoltaïque, thèse de Doctorat, PSL université Paris (2018).
- [10] The Eppley Laboratory INC,12 Sheffield Avenue Newport, RI 02840-1618 USA, www.EppleyLab.com
- [11] Kipp & Zonen B.V. Delft - The Netherlands, <https://www.kippzonen.com>.
- [12] A. Mechaqrane, Contribution à l'étude de l'utilisation des Images du satellite Meteostat pour la détermination du gisement solaire Marocain, thèse de troisième cycle, faculté des sciences de Rabat, (1990).
- [13] M. T. JOUTEY, Etude et validité des méthodes d'extrapolation de rayonnement solaire globale. Mémoire de master en physique énergie et technologie des matériaux, Faculté des sciences de Rabat (2010).
- [14] A. Angstrom, Solar and terrestrial radiation. Q J R Meteorol Soc. 50:121–125. (1924).
- [15] I.K. Page, The estimation of monthly mean values of daily total shortwave radiation in vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitude 40°N – 40°S. In: Proceedings of the UN Conference on new Source of Energy; 378–390; (1961).
- [16] J.A..Prescott, Evaporation from water surface in relation to solar radiation. Trans R Soc Aust;48:114–8, (1940).

- [17] F. Lemmini, Etude du rayonnement Global à Beni-Mellal. Rapport interne. Laboratoire d'énergie solaire, Faculté des sciences de Rabat, (1983).
- [18] M. N. Bargach. Contribution à l'étude du gisement solaire marocain, Application à un générateur photovoltaïque. Thèse de troisième cycle, Faculté des sciences de Rabat, (1983).
- [19] H. Nfaoui, Trois années de mesures d'ensoleillement à Rabat. Etude statistique et présentations des données. Thèse de troisième cycle. Faculté des Sciences de Rabat, (1986).
- [20] J. Fana, L. Wua, F. Zhanga,c, H. Caia, W. Zengd, X. Wange, H.Zoua. Empirical and machine learning models for predicting daily global solar radiation from sunshine duration: A review and case study in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 100, pp.186–212, (2019).
- [21] M. L. Ben Kaddour, Etude du gisement solaire au Maroc en vue de son exploitation dans l'habitat . Travail de fin d'études, Ecole Nationale des travaux publics de l'Etat, vaulx-en-velin, France,(1981).
- [22] J. R Black,. C. W, Bonython and J. A. Prescott, Solar radiation and the duration of sunshine. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 80,231-235. (1954).
- [23] S.A Klein, W.A Beckman, Review of solar radiation utilizability. *J. Solar Energy Eng.* 106, 393–402. (1984).
- [24] L. Wang, O. Kisi, M. Zounemat-Kermani, Z. Zhu, W. Gong, Z. Niu, H. Liua, Z. Liug. Prediction of solar radiation in China using different adaptive neuro-fuzzy methods and M5 model tree. *International Journal of Climatology*, (2016).
- [25] Z. IHSANE, Contribution à l'étude du gisement solaire Marocain : Irradiations journalières et horaires, globale, diffuse, et direct, d'un plan horizontal. Thèse de 3ème cycle. Faculté des sciences de Rabat, (1989).
- [26] J. Bahraoui-Buret, Caractéristiques du gisement solaire marocain, Etude spécifique du site de Rabat. Thèse de doctorat es-sciences physiques, Faculté des Sciences de Rabat (1986).
- [27] CH. Perrin DE Brichambaut, CH. Vauge, Le gisement solaire : évaluation de la ressource énergétique. *Technique et Documentation*. Lavoisier. (1982).
- [28] R. Tadili, Modélisation et optimisation du rayonnement solaire reçu par un plan incliné, thèse de troisième cycle, faculté des sciences de rabat. (1987).
- [29] B. Ihya, A. Mechaqrane, R. Tadili, M. N. Bargach, Optimal tilt angles for solar collectors facing south at Fez city (Morocco). *Journal of Natural Sciences Research*, (2014).
- [30] L. BAHMAD, Caractérisation de l'état de l'atmosphère à Rabat : transmission, extinction, trouble atmosphérique. Thèse de 3ème cycle, Faculté des Sciences de Rabat, (1986).
- [31] V. Badescu, *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface*, Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, (2008).

- [32] V. Badescu, 3D isotropic approximation for solar diffuse irradiance on tilted surfaces, *Renewable Energy*, vol. 26, no. 2, p. 221–233, (2002).
- [33] S. Koronakis Pericles, On the choice of the angle of tilt for south facing solar collectors in the Athens basin area, *Solar Energy*, vol. 36, no. 3, p. 217–225, (1986).
- [34] BYH Liu, RC Jordan. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*; 4:1–19 (1960).
- [35] T. Muneer, Solar radiation model for Europe, *Building Services Engineering Research and Technology*, 11, pp. 153-163(1990).
- [36] C.C.Y. Ma, M. Iqbal, Statistical comparison of models for estimating solar radiation on inclined surfaces, *Solar Energy*, 31 pp. 313-317 (1983).
- [37] R. Perez, et al. A new simplified version of the perez diffuse irradiance model for tilted surfaces, *Solar Energy*, 39, pp. 221-231(1987).
- [38] Damien de Halleux : Modèle dynamique des échanges énergétiques des serres : Etude théorique et expérimentale. Faculté des sciences agronomiques de Gembloux (1986).
- [39] G. W. Sadler : Ultraviolet Radiation at Edmonton, Alberta, Canada. *Solar Energy* vol. 49, No.1, pp 159-162, (1988).
- [40] J. F. Escobedo, E. N. Gomes, A. P. Oliveira, J. Soares, Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil, *Applied Energy*, vol. 86, pp. 299, (2009).
- [41] M. Hamatti, R. Tadili, M. N. Bargach, A. Mechaqrane, B. Ihya, Evaluation des composantes spectrales du rayonnement solaire à rabat (MAROC), *Revue internationale d'héliotechnique*, vol. 44, pp. 1-6. (2012).
- [42] M. Collares-Pereira, A Rabl. The average distribution of solar radiation : correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. *Solar Energy*; 22:155–164. (1979).
- [43] J. Hay. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces, *Solar Energy*.; 23:301-307. (1979). [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(79\)90123-3](https://doi.org/10.1016/0038-092X(79)90123-3).
- [44] D.G. Erbs, S.A. Klein, J.A. Duffie. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar Energy*; 28:293–302. (1982).
- [45] A. DE. Miguel, J. Bilbao, R. Aguiar, H. Kambezidis, E. Negro. Diffuse solar irradiation model evaluation in the north Mediterranean belt area. *Solar Energy*; 70:143–153. (2001).
- [46] A. Whillier. The determination of hourly values of total solar radiation from daily summations. *Archives for Meteorology Geophysics and Bioclimatology*; B8:197–204. (1956).

- [47] J.F. Orgill, K.G.T. Hollands. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. *Solar Energy*; 19:357–359. (1977).
- [48] J. Fana, L. Wua, F. Zhanga,c, H. Caia, W. Zengd, X. Wange, H.Zoua. Empirical and machine learning models for predicting daily global solar radiation from sunshine duration: A review and case study in China, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 100, pp.186–212, (2019).
- [49] L. Fenga, A. Lina, L. Wangb, W. Qinb, W. Gongc. Evaluation of sunshine-based models for predicting diffuse solar radiation in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 94, pp.168–182, (2018).
- [50] L. Zou, L. Wang, L. Xia, A. Lin, B. Hu, H. Zhu. Prediction and comparison of solar radiation using improved empirical models and adaptive neuro-fuzzy inference systems. *Renewable Energy*, vol. 106, pp.343-353. (2017).
- [51] N.S. Chukwujindu, “A comprehensive review of empirical models for estimating global solar radiation in Africa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. vol.78 pp. 955-995, (2017).
- [52] M. Abdel Wahab, K.S.M. Essa, Extrapolation of solar irradiation measurements: case study over Egypt. *Renewable Energy*, vol.14, 229-239, (1998).
- [53] O. Nait Mensour, S. Bouaddi, B. Abnay, B. Hlimi, A. Ihlal. Mapping and estimation of monthly global solar irradiation in different zones in Souss-Massa area, Morocco, Using Artificial Neural Networks. *International Journal of Photoenergy* vol. 4, pp 1-19, (2017).
- [54] L. Zou, A. Lin, L. Wang, X. Xia, W. Gong, H. Zhu, Z. Zhao. Long-term variations of estimated global solar radiation and the influencing factors in Hunan province, China during 1980–2013. *Meteorol Atmos Phys*, vol. 128, pp.155–165, (2016).
- [55] H. LOUTFI, A. BERNATCHOU, R. TADILI "Generation of horizontal hourly global solar radiation from exogenous variables using an artificial neural network in fes (morocco)". *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol n°3, pp.1097-1107, (2017).
- [56] H. LOUTFI, A. BERNATCHOU, Y. RAOUI, R. TADILI, Learning processes to predict the hourly global, direct and diffuse solar irradiance from daily global radiation with artificial neural networks. *International Journal of Photoenergy*, Vol.10, pp.1-13, (2017).
- [57] W. Qina, L. Wang, A. Lina, M. Zhangd, X. Xiac, B. Hue, Z. Niub. Comparison of deterministic and data-driven models for solar radiation estimation in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 579–594, (2018).
- [58] L. Wang, O. Kisi, M. Zounemat-Kermani, Z. Zhu, W. Gong, Z. Niu, H. Liua, Z. Liug. Prediction of solar radiation in China using different adaptive neuro-fuzzy methods and M5 model tree. *International Journal of Climatology*, vol. 37, pp. 1141-1155. (2016).
- [59] JOHN E. HAY, Satellite based estimates of solar irradiance at the earth's surface, Modelling approaches. *Renewable Energy*, vol.3, pp.381-393, (1993).
- [60] A. Mechaqrane, Contribution à l'étude des images du satellite METEOSAT pour la détermination du gisement solaire marocain. Thèse de 3ème cycle, Faculté des Sciences de Rabat, (1990).

- [61] L.E. Akpabio, S.E. Etuk, Relationship between global solar radiation and sunshine duration for Onne, Nigeria. *Turk J Phys*, vol. 27 pp.161-167.(2003).
- [62] E.O. Ogolo. Estimation of global solar radiation in Nigeria using a modified angstrom model and the trend analysis of the allied meteorological components. *Indian journal of radio & space physique*, vol. 43, pp. 213-324, (2014).
- [63] L.Wang, Ozgurkisi, M. Zounemat-Kermani, G.A. Salazar, Z. Zhu, Weigong. Solar radiation prediction using different techniques: model evaluation and comparison. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 384-397, (2016).
- [64] C.M. Dos Santos, J.L. De Souza, R.A. Ferreira Junior, C. Tiba, R.O. De Melo, G.B. Lyra, I. Teodoro, G.B. Lyra, M.A.M Lemes. On modeling global solar irradiation using air temperature for Alagoas State, Northeastern Brazil. *Energy*, pp.1-11, (2014).
- [65] F. Oloo, L. Olang, J. Strobl. Spatial modelling of solar energy potential in Kenya. *International Journal of Sustainable Energy and Management*, vol. 06, 17-30, (2016).
- [66] M.R. Yaïche, S.M.A. Bekkouche, Estimation du rayonnement solaire global en Algérie pour différents types de ciel. *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 13, pp. 683-695, (2010).
- [67] M. Koussa, M. Haddadi, A. MALEK, Reconstitution des irradiations globale et diffuse en fonction de quelques paramètres météorologiques pour un ciel quelconque. *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 10 pp.75-92, (2007).
- [68] T.E. Boukelia, M.S. Mecibah, I.E. Meriche. General models for estimation of the monthly mean daily diffuse solar radiation (Case study: Algeria). *Energy Conversion and Management*, vol. 81, 211-219, (2014).
- [69] JC. Lam, Hwli Danny, Correlation between global solar radiation and its direct and diffuse components. *Building and Environment*, vol. 31, pp. 527-535, (1996).
- [70] B. Jamil, A.T. Siddiqui, Generalized models for estimation of diffuse solar radiation based on clearness index and sunshine duration in India: Applicability under different climatic zones. *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*, vol. 16 pp. 157–158, (2017).
- [71] F. Cao, H. Li, T. Yang, Y. Li, T. Zhu, L. Zhao, Evaluation of diffuse solar radiation models in Northern China: New model establishment and radiation sources comparison. *Renewable Energy* vol.107, pp. 708-720, (2017).
- [72] H.D. Kambezidis, B. E. Psiloglou, D. Karagiannis, U. C. Dumka, D. G. Kaskaoutis. Recent improvements of the meteorological radiation model for solar irradiance estimates under all-sky conditions. *Renewable Energy*, vol. 93 pp. 142-158, (2016).
- [73] C. Renno, F. Petito, A. Gatto, ANN model for predicting the direct normal irradiance and the global radiation for a solar application to a residential building. *Journal of Cleaner Production*.vol. 135,pp. 1298-1316, (2016).
- [74] A.A.El-Sebaii, F.S.Al-Hazmi, A.A.Al-Ghamdi, S.J.Yaghmour. Global, direct and diffuse solar radiation on horizontal and tilted surfaces in Jeddah, Saudi Arabia. *Applied Energy*, Vol. 87, pp. 568-576, (2010).

[75] A. Ibrahim, A. A. El-sebaili, M. R. I. Ramadan, El-broullesy SM. Estimation of solar irradiance on inclined surfaces facing south in Tanta, Egypt. International Journal of Renewable Energy Research, vol. 1 pp. 18-25, (2011).

Annexe I : Les tests statistiques.

La vérification de la validité des modèles de corrélation ou d'extrapolation nécessite une étude statistique pour cela de nombreux indicateurs statistiques sont utilisés tel que l'erreur moyenne, erreur absolue moyenne et l'erreur quadratique moyenne (RMSE), qui sont définies par :

I. Ecart moyen

$$\text{Ecart moyen} = \frac{\sum_{i=0}^n (p_i - m_i)}{N}$$

L'écart moyen est une indication de la différence moyenne entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées.

II. Ecart absolu moyen

$$MAE = \frac{\sum_{i=0}^n |p_i - m_i|}{N}$$

L'écart absolu moyen mesure l'ampleur moyenne des écarts, il est toujours positif

III. Erreur relative

$$RMBE = 100 \frac{\sum_{i=0}^n (p_i - m_i)}{\sum_{i=0}^n m_i}$$

Le RMBE nous indique le pourcentage de déviation, lorsqu'il est positif il nous indique le pourcentage de surestimation du modèle, alors que lorsqu'il est négatif il nous indique le pourcentage de sous-estimation du modèle.

VI. Le pourcentage de l'erreur absolue moyenne

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^n \left| \frac{p_i - m_i}{m_i} * 100 \right|$$

Le pourcentage d'erreur absolue moyenne mesure la taille moyenne des erreurs, il est toujours positif et inférieur ou égal à l'erreur quadratique moyenne

V. Erreur quadratique moyenne

$$RMSE = \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m e_i^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Le RMSE nous renseigne sur l'amplitude des écarts et la dispersion des points autour de la première bissectrice. C'est une grandeur permettant de comparer les modèles entre eux. Lorsqu'on compare les modèles, on considère que le meilleur est celui qui présente l'erreur quadratique moyenne la plus faible.

Remarque

- $e_i = y_{ci} - y_{mi}$
- y_{ci} et y_{mi} sont respectivement les valeurs calculées et mesurées des variables.

- Les valeurs des variables y peuvent être des valeurs simples ou fractionnaires normalisées par H_0 , comme H / H_0 (ces valeurs peuvent également être des valeurs horaires).

IV. Le coefficient de corrélation

La qualité d'un ajustement est définie comme la qualité d'une corrélation obtenue par régression ou par des moyens statistiques utilisant des valeurs mesurées. Elle dépend principalement de la méthode utilisée (par exemple la méthode des moindres carrés). L'indicateur le plus important qui détermine la qualité de l'ajustement est le coefficient de corrélation R^2 défini par :

$$R^2 = 1 - \frac{RMSE^2}{\sigma^2}$$

Où σ est l'écart type.

R^2 peut avoir des valeurs comprises entre 0 et 1. S'il est proche de 1 cela signifie qu'on a un meilleur résultat de la régression.

Annexe II : Coordonnées astronomiques et phénomènes atmosphériques

Introduction

Le rayonnement solaire arrivant au sol dépend essentiellement des effets de l'atmosphère qui interviennent dans le trajet (soleil-terre) que fait le rayonnement à travers l'atmosphère. Pour connaître l'énergie reçue à un site donné, il est nécessaire de repérer ce site sur la surface terrestre, de connaître la position et la trajectoire du soleil dans la voute céleste et les mouvements de la terre autour du soleil.

I. Données astronomiques

I.1 Repérage d'un point à la surface de la Terre

I.1.1 La latitude φ

La latitude permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque par rapport à l'équateur. Elle est comptée positivement de 0 à 90° vers le nord et négativement de 0 à -90° vers le sud.

I.1.2 La longitude L

La longitude est la position angulaire par rapport au méridien de Greenwich, comptée positivement vers l'est et négativement vers l'ouest, comprise entre Est $-180^\circ \leq L \leq 180^\circ$ Ouest

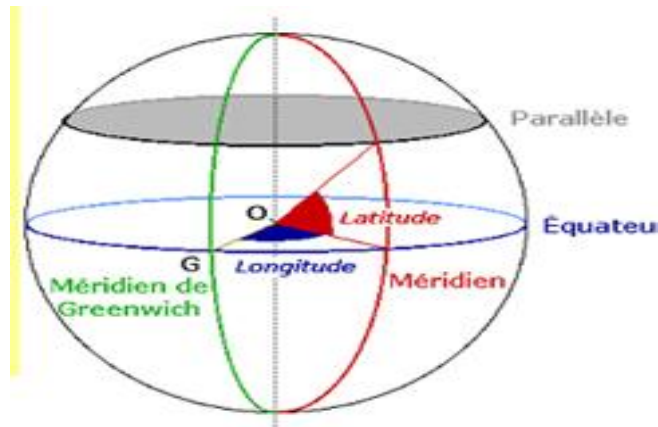


Figure A II-1: Les coordonnées géographiques terrestres (φ , L).

I.2. Mouvement de la terre autour du soleil

La course de la Terre autour du Soleil décrit une ellipse légèrement aplatie, le plan de cette trajectoire est écliptique. La distance Terre-Soleil varie au cours de l'année :

Aux équinoxes : $D = 1,49675 \cdot 10^8$ km

Au solstice d'hiver : $D_{\min} = 0,983 D$

Au solstice d'été : $D_{\max} = 1,017 D$

La Terre effectue un tour complet sur elle-même en 24 heures autour de l'axe des pôles.

I.3. Sphère céleste

Pour repérer les objets célestes, l'homme a imaginé une sphère sur laquelle chaque direction d'étoile est représentée par un point, on l'appelle "sphère céleste". Cette sphère est unique pour tous les habitants de la Terre et son centre qui représente tous les lieux d'observation situés à la surface terrestre peut être confondu, en toute logique, avec le centre de la Terre. L'intersection de cette sphère avec l'axe de rotation de la Terre (appelé aussi axe du monde) sont les deux pôles célestes nord et sud.

Dans le ciel, l'étoile la plus proche du pôle Nord (à une distance apparente d'environ 1 degré) est appelée étoile polaire, elle appartient à la constellation de la Petite Ourse. Le grand cercle de cette sphère, perpendiculaire à l'axe des pôles est appelé équateur céleste. Son plan est le plan équatorial céleste qui est également le plan équatorial de la Terre.

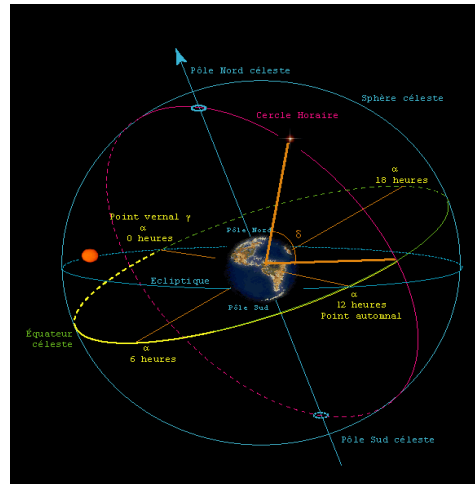


Figure A II-2 : présentation de la sphère céleste.

I.4. Les coordonnées horizontales (l'azimut et la hauteur)

Pour repérer la position du soleil dans le ciel, il est nécessaire d'utiliser deux coordonnées. Ce sont l'azimut et la hauteur

I.4.1 Azimut a

L'azimut solaire est l'angle que fait le plan vertical du soleil avec le plan méridien du lieu. On le mesure à partir du Sud, vers l'Est ou vers l'Ouest (0° pour le Sud, 180° pour le Nord). On peut calculer l'azimut par la formule :

$$\sin(a_z) = \frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\cos(h)}$$

I.4.2 La Hauteur h

La hauteur du soleil est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan horizontal (0° pour le plan horizontal et 90° pour le zénith), calculé par la formule suivante :

$$\sin(h) = \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega)$$

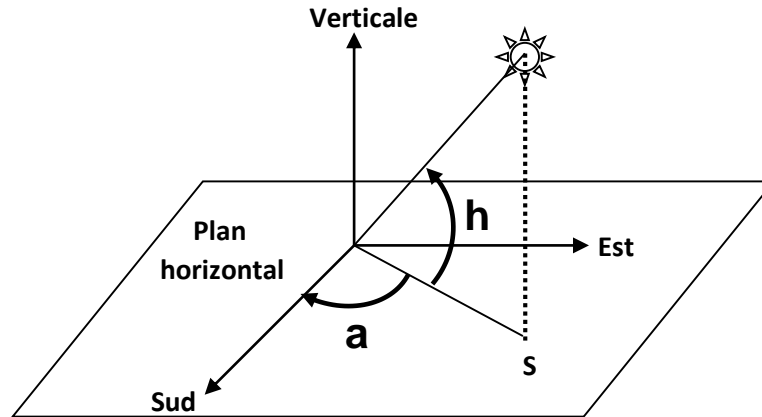


Figure A II-3 : repérage du soleil dans le ciel (la hauteur h et l'azimut a).

I.4.3 Angle zénithal θ_z

Le zénith est la direction perpendiculaire à la surface sur laquelle on se trouve. L'angle solaire zénithal est l'angle que fait la droite qui vous relie au Soleil avec cette direction. Si A=le point où vous vous trouvez sur le sol, Z=un point à la verticale du point A (AZ est la direction du zénith) et B=point représentant la position du Soleil dans le ciel; l'angle solaire zénithal est alors défini par ZAB.

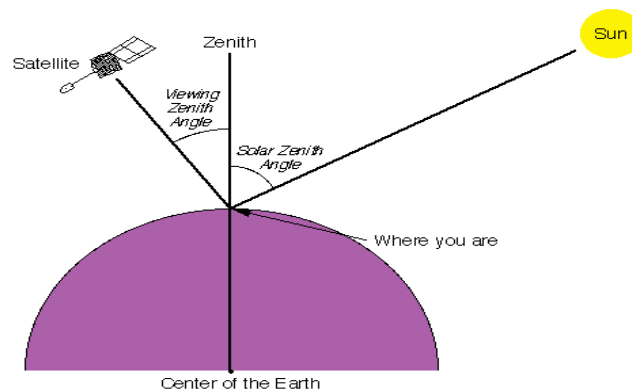


Figure A II-4 : présentation de l'angle zénithal θ_z .

I.5. Les coordonnées horaires (angle horaire et la déclinaison)

I.5.1 La déclinaison δ

La déclinaison δ , correspond à l'angle que forme la direction Terre-Soleil par rapport au plan de l'équateur terrestre. Aux équinoxes de printemps (vers le 20 mars) et d'automne (vers le 22 septembre) la direction Terre-Soleil est incluse dans le plan équatorial terrestre. La déclinaison atteint un maximum au solstice d'été vers le 21 juin et un minimum au solstice d'hiver vers le 21 décembre. Bien que la déclinaison ne suive pas rigoureusement une fonction sinusoïdale du temps, il est tentant de l'approximer très simplement ainsi comme l'a fait Cooper (1969) :

$$\delta = 23.45 \sin (0.986(j+284))$$

$$-23^{\circ} 27' \leq \delta \leq 23^{\circ} 27'$$

Équinoxe de printemps : 20 Mars $\delta = 0$

Solstice d'été : 21 Juin $\delta = + 23^{\circ} 27'$

Équinoxe d'automne : 22 Septembre $\delta = 0$

Solstice d'hiver : 21 Décembre $\delta = - 23^{\circ} 27'$

I.5.2 Angle horaire ω

L'angle horaire, deuxième coordonnée équatoriale du Soleil, défini comme l'angle, compté positivement vers l'Est, entre la position actuelle du plan méridien local et la position de ce même méridien à midi vrai (ou entre le plan méridien local et le plan méridien qui contient le centre du Soleil à l'instant qui nous concerne).

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

$$-180^{\circ} \leq \omega \leq 180^{\circ}$$

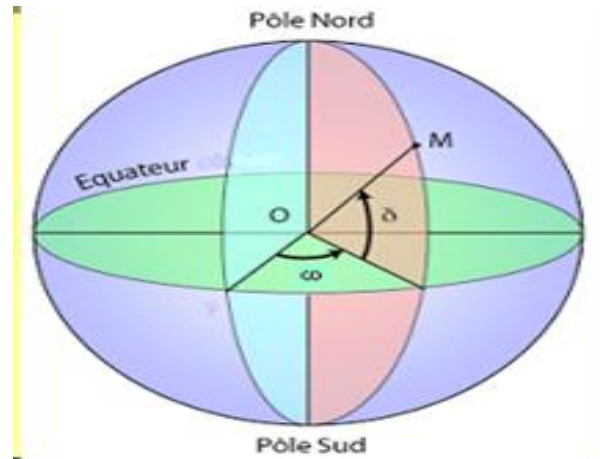


Figure A II-5 : Les coordonnées horaires (δ , w).

I.5.3 Durée astronomique du jour N

La durée astronomique du jour est l'intervalle du temps entre les instants du lever et du coucher du soleil. Sa durée dépend de l'époque de l'année et de la latitude. Sachant que $h = 0$ pour les heures de lever et de coucher du soleil donc l'angle horaire du coucher ω_c et la durée astronomique du jour N s'écrivent respectivement de la forme :

$$\omega_c = \arcsin(-\tan(\delta) \tan(\phi)), \quad N = T_c - T_l = (2/15) \cdot \arcsin(-\tan(\delta) \tan(\phi)).$$

I.6. Définitions des temps

I.6.1 Le temps universel (TU)

La notion de temps se réfère au méridien d'un lieu donné, il faut, lorsqu'on veut comparer des temps en des lieux différents, se reporter à son temps moyen universel. Par convention, le temps universel a été choisi comme étant le temps solaire moyen correspondant au méridien de Greenwich augmenté de 12 heures (pour les usages de la vie civile, le jour commence à minuit et non à midi).

I.6.2 Le temps solaire moyen (TSM)

Au cours de son orbite annuelle autour du soleil, la terre voit sa vitesse s'écarter de sa valeur moyenne. Ces variations de la vitesse de déplacement de la terre sont responsables de faibles écarts entre le temps solaire vrai et le temps solaire moyen, qui correspond à un découpage uniforme du temps. La courbe ci-dessous représente 'l'équation de Temps 'c'est-à-dire l'écart en

minutes entre l'heure solaire vraie et l'heure locale du temps solaire moyen. La partie supérieure de la courbe (+) donne l'avance de l'heure solaire vraie sur l'heure solaire moyenne ; la partie inférieure (-) indique cette fois, le retard de l'heure solaire vraie. Il se compte aussi de 0 à 24 heures à partir de midi.

L'équation du temps E_t : $E_t = TSV - TSM$

" E_t " étant la correction du TSV par rapport au TSM; cette correction varie de 14 minutes (11 février) à -16 minutes (3 novembre)

$$E_t = 9.9 \sin(2(0.986j + 100)) - 7.7 \sin(0.986j - 2).$$

I.6.3 Le temps solaire vrai (TSV)

Sur un diagramme solaire, on repère l'heure solaire par la position du soleil au-dessus de l'horizon à une date donnée, le midi solaire ou midi vrai correspond à la hauteur maximum du soleil lors de son passage au méridien du lieu. Ce temps se compte de 0 à 24 heures à partir de midi. Il est donné par relation :

$$TSV = 12 + \omega / 15$$

$$TSV = 12 \text{ h si } \omega = 0^\circ$$

ω est compté positivement l'après-midi.



Figure A II-6 : variation annuelle de l'équation du temps

I.6.5 Le temps officiel ou le temps légal

Pour bénéficier de la commodité d'une même heure de référence dans une région assez étendue, on a divisé la terre en 24 fuseaux horaires ou secteurs longitudinaux de 15° chacun (soit au total $24 * 15^\circ = 360^\circ$, ou un tour complet), allant d'un pôle à l'autre. L'écart entre les heures normalisées d'un fuseau au suivant est de une heure, soit 24 heures pour un tour complet (1 heure

correspond donc à un écart de 15° en longitude, soit 4 minutes par degré). Donc le temps officiel ou légal diffère du temps universel d'un nombre entier d'heures selon des règles définies par la loi dans chaque pays et qui peuvent changer suivant la saison (heure d'été). Ce nombre entier suit approximativement le système théorique des fuseaux horaires.

$$TSV = TL + (\lambda - \lambda_r) / 15 + Et - C.$$

λ longitude du lieu

λ_r longitude de référence

C correction été/hiver

I.7. Course du soleil dans le ciel. Abaques d'ensoleillement

On sait aujourd'hui que la course du Soleil dans le Ciel est un mouvement apparent, reflet des mouvements réels de la Terre : la rotation propre de notre planète sur elle-même en une journée explique la succession des jours et des nuits et sa révolution autour du Soleil en une année explique la succession des saisons. C'est l'interprétation héliocentrique, défendue la première fois par Nicolas Copernic en 1543.

I.7.1 Le mouvement journalier

Au cours de la journée, le Soleil décrit une trajectoire circulaire dans le Ciel (Figure 7). Il se lève du côté de l'est, monte graduellement jusqu'à un point culminant où il indique la direction du sud, puis redescend pour se coucher du côté de l'ouest. La nuit, c'est au tour des étoiles d'effectuer des mouvements similaires et de tourner dans le Ciel d'est en ouest (Figure 7). Une seule étoile reste immobile : l'étoile Polaire, qui indique la direction du nord. Toutes les autres décrivent des arcs de cercle autour d'elle, d'autant plus grands qu'elles en sont éloignées. Celles qui en sont les plus proches restent constamment au-dessus de l'horizon : elles ne se couchent jamais et restent visibles tant qu'elles ne sont pas noyées dans la lumière solaire ; on les appelle les étoiles circumpolaires.

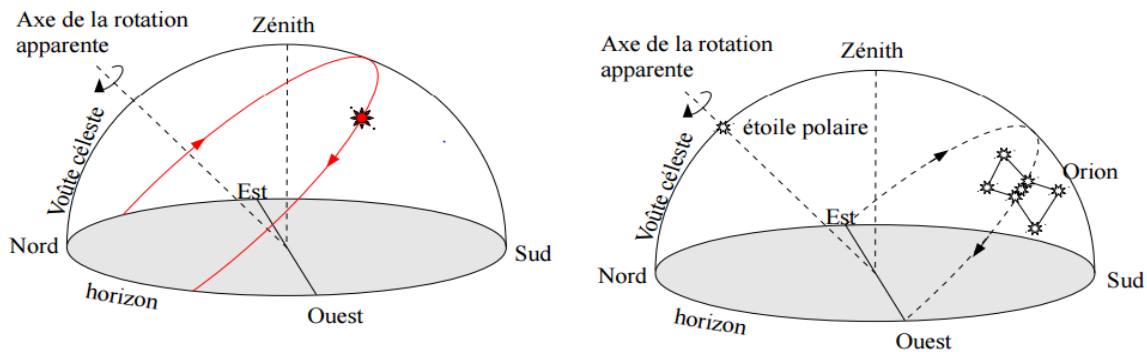


Figure A II-7 : Représentation schématique de la trajectoire du Soleil pendant la journée et des étoiles la nuit sur la voûte céleste. Les astres décrivent des arcs de cercle, tous parallèles entre eux et perpendiculaires à l'axe de la rotation apparente, qui passent approximativement par l'étoile Polaire.

C'est l'observation de ces mouvements circulaires et surtout de la rotation des étoiles circumpolaires qui peut donner l'illusion que le Ciel est comme une voûte sphérique enveloppant la Terre et tournant en bloc autour d'un axe passant (approximativement) par l'étoile Polaire. Cette représentation du Ciel est fautive bien entendu, mais, encore une fois, elle est très commode lorsqu'on se limite à une description de ce que l'on voit.

I.7.2 La trajectoire du Soleil au fil des saisons

Au fil de l'année, la trajectoire que le Soleil effectue chaque jour dans le Ciel évolue : le Soleil monte plus ou moins haut dans le ciel ; il se lève et se couche à des endroits différents et le jour dure plus ou moins longtemps. La trajectoire du Soleil dans le Ciel change donc chaque jour, mais toutes ses trajectoires sont parallèles entre elles et perpendiculaires à l'axe de rotation de la Terre.

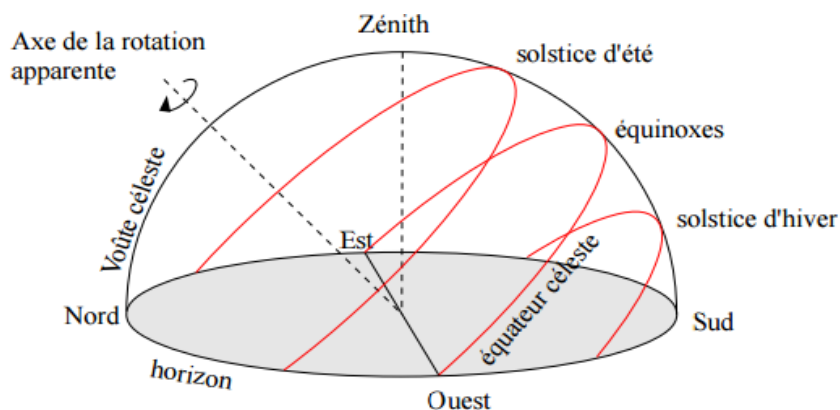


Figure A II-8 : Trajectoires du Soleil au cours de l'année.

Le jour des équinoxes de printemps et d'automne, le soleil décrit l'équateur céleste. Ce sont les seuls deux jours de l'année où le Soleil se lève exactement à l'est et se couche exactement à l'ouest et où le jour et la nuit ont des durées égales de 12 h. Le jour du solstice d'été, le Soleil atteint sa plus grande hauteur dans le ciel ; il se lève au nord-est et se couche au nord-ouest. Le jour du solstice d'hiver, c'est le moment où le Soleil reste le plus bas. Il se lève au sud-est et se couche au sud-ouest. Ce qui change au cours de l'année, c'est donc uniquement la position du Soleil par rapport à l'équateur céleste. De l'équinoxe de printemps à l'équinoxe d'automne en passant par le solstice d'été, le Soleil est au-dessus de l'équateur, le reste de l'année, il est en dessous.

II- Phénomènes atmosphériques

II.1. Spectre solaire

Le rayonnement solaire recouvre une gamme assez large de longueurs d'ondes répartie de la manière suivante :

6.4 % dans les rayonnements ultra-violets ($0 \leq \lambda \leq 0.38 \mu\text{m}$)

48 % dans le rayonnement visible ($0.38 \leq \lambda \leq 0.78 \mu\text{m}$)

45.6 % dans les rayonnements thermiques infrarouges ($\lambda \geq 0.78 \mu\text{m}$)

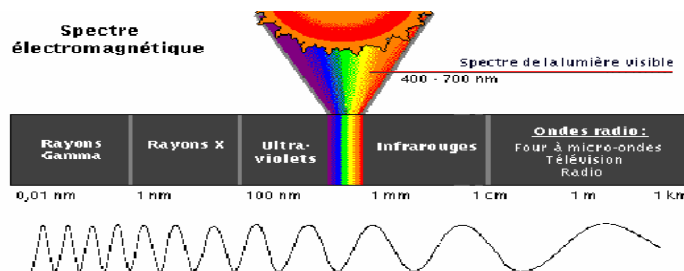


Figure A II-9 : spectre en longueur d'onde du rayonnement solaire

II.2. L'atmosphère terrestre

L'atmosphère est constituée de plusieurs couches de caractéristiques différentes :

La troposphère, entre le sol et 15 Km d'altitude.

La stratosphère entre 15 et 80 Km d'altitude.

L'ionosphère entre 80 et 200 Km d'altitude.

Jusqu'à 80 Km d'altitude, les principaux éléments de l'atmosphère sont :

l'azote 78.09%

l'oxygène 20.95%

l'argon 0.93%

D'autres constitutions mineures :

Le gaz carbonique : engendré par la respiration des vivants et l'action industrielle

L'ozone : concentration faible au sol et maximum vers 18 Km.

La vapeur d'eau : concentration maximum au voisinage du sol

Les aérosols : particules liquides ou solides de dimensions entre 10-3µm et 102µm

II.3. Atténuation du rayonnement solaire par l'atmosphère

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est atténué suite à de multiples phénomènes : Diffusion moléculaire, Absorption par les gaz atmosphériques, Extinction par les aérosols... .

II.3.1 Diffusion moléculaire ou diffusion de Rayleigh

La diffusion moléculaire est une redistribution de rayonnement par des particules rencontrées de taille 10nm, son coefficient d'extinction $a_R(\lambda)$ est donné par la relation de Rayleigh :

$$a_R(\lambda) = 0.00879 \lambda^{-4.09}$$

Le facteur de transmission après diffusion : $\tau_R(\lambda) = e^{-a_R(\lambda)m}$

La Diffusion moléculaire intéresse seulement les faibles longueurs d'ondes du spectre solaire ($\lambda < 1,1\mu\text{m}$) cette diffusion est l'origine de la couleur bleue du ciel.

III.3.2 Absorption par les gaz atmosphériques

Seuls l'ozone et la vapeur d'eau interviennent de façon significative

III.3.1.1 Absorption par l'ozone

Ozone accuse une forte Absorption pour $\lambda \leq 0.3\mu\text{m}$ (U-V) et faible entre 0.5 et 0.7µm (visible) vers altitude de 20Km

Le facteur de transmission après absorption par l'ozone : $\tau_o = \exp(-a_o(\lambda)m)$

Avec : $a_o(\lambda) = e\alpha_o(\lambda)$ Coefficient d'absorption pour 1 cm d'épaisseur d'ozone

e : épaisseur réduite d'ozone en cm

III.3.1.2 Absorption par la vapeur d'eau

Ce type d'absorption est complexe et il s'effectue dans multiples bandes Gates et Harrop [2] définissent deux types de facteurs de transmissions :

-Absorption forte du direct par la vapeur d'eau $\tau_{w_1}(\lambda, m) = \exp(-C_1 \sqrt{mw})$

-Absorption faible du direct par la vapeur d'eau $\tau_{w_2}(\lambda, m) = \exp(-C_2 mw)$

-Absorption attribuée au reste des gaz : $\tau_g(\lambda, m) = 1 - C_3 \sqrt{m}$

w épaisseur d'eau condensable

C1, C2, C3 sont fonction de λ

III.3.1.3 Extinction par les aérosols

Les aérosols atmosphériques sont définis comme des particules liquides ou solides de dimensions comprises entre 10-3 μm et 102 μm en suspension dans l'air, d'origine industrielle, volcanique, océanique...

Angstrom a montré que la diffusion par les aérosols est représentée par un coefficient d'extinction :

$$a_D(\lambda) = \beta \lambda^{-\alpha}$$

α distribution en dimension entre 0(grosses particules) et 4(molécules)

β quantité d'aérosols dans l'atmosphère pour une traversée verticale

Cette atténuation par diffusion affecte surtout les radiations dans le domaine visible. la diminution du flux solaire arrivant au sol peut atteindre 11%.

Remarque

-En se basant sur les coefficients monochromatiques de transmission relatifs à chacun des phénomènes d'extinction cités plus loin, on aboutit à l'expression finale de l'éclairement monochromatique au sol par ciel clair :

$$I_\lambda = I_{o\lambda} \tau_R \tau_a \tau_o \tau_{w_1} \tau_{w_2} \tau_g$$

- Le rayonnement absorbé sélectivement et utilisé par l'atmosphère pour élever sa température ou engendrer des réactions physico – chimiques

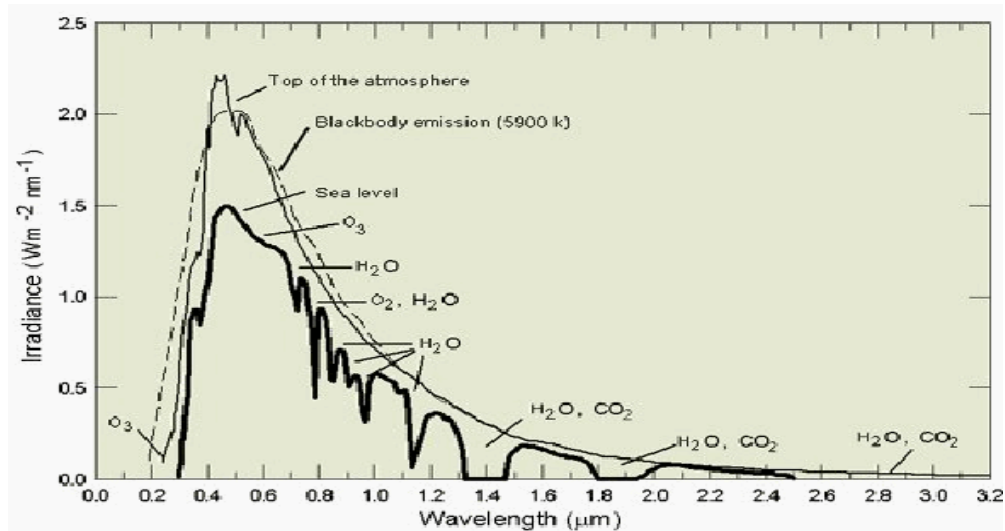


Figure A II-10: Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre

II.4. Notion de masse d'air optique m

Le rayonnement solaire se dirigeant vers la surface de la Terre doit traverser l'atmosphère. À moins que le soleil ne soit au zénith, il doit traverser une masse d'air plus importante que lorsque l'incidence est verticale, ainsi m est donnée par la relation de kasten :

$$m = (1 - 0,1z)[\sinh + 0,15(h + 3,9)^{-1,25}]^{-1}$$

(z en Km et h en degrés)

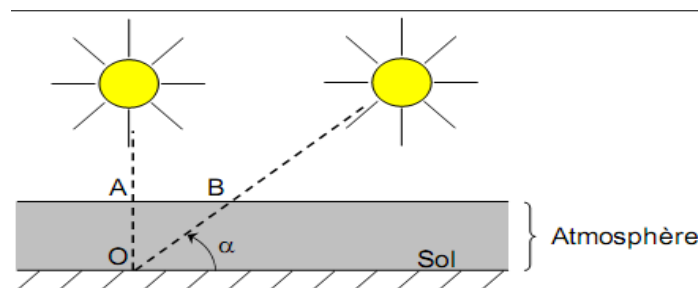


Figure A II-11: Le rayonnement solaire et la masse d'air optique.

II.5. Bilan énergétique relatif à un rayonnement incident

Le rayonnement thermique est un transfert de chaleur sans le support de la matière. Le bilan énergétique relatif à un rayonnement incident peut se représenter de la manière suivante :

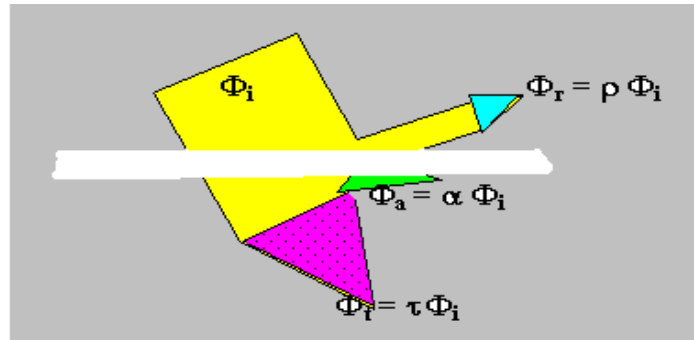


Figure A II-12 : représentation du bilan énergétique d'un rayonnement incident.

Ce qui veut dire: $\Phi_i = \phi_r + \phi_a + \phi_t$

Avec :

Φ_i = Flux énergétique incident ; $\phi_{r,t}$ = Flux énergétique réfléchi et transmis ; ϕ_a = Flux énergétique absorbé

Et $\rho + \alpha + \tau = 1$

Résumé

Toutes les études sur les systèmes solaires thermiques ou photovoltaïques nécessitent la connaissance des flux solaires relatifs aux différentes composantes de l'irradiation solaire. Or dans la majorité des cas, les mesures de ces flux ne sont pas disponibles.

L'objectif de ce travail est de réaliser une banque de données comportant toutes les composantes du rayonnement solaire, énergétique ou spectral, à l'échelle horaire et journalière. Cette banque de données a été constituée, d'une part, par les mesures réalisées en plusieurs sites marocains et, d'autre part, des estimations issues des modèles qu'on a établis. L'ensemble des données constituant cette banque soit environ 17 millions de valeurs, a été soumis à des tests de vérification et à des tests statistiques de validation.

Cette banque de données permettra donc de quantifier le potentiel solaire pour chaque type de rayonnement solaire et pour tous les sites marocains ce qui permettra le dimensionnement de tous les types des systèmes solaires. Elle constituera un support fondamental pour les ingénieurs, les bureaux d'études, et tous les organismes qui s'intéressent à développer l'utilisation des systèmes solaires dans les différentes régions marocaines. Elle constituera également un outil de base important pour les chercheurs dans leurs travaux de modélisation et de simulation des nouveaux systèmes.

Mots-clés : Énergie solaire ; Rayonnement solaire global ; Rayonnement solaire diffus ; Corrélation ; Préviation ; Estimation.

Abstract

All studies of solar systems need solar fluxes values related to the different components of solar radiation. However, for most sites, measurements are not available.

The main objective of this work is to create an updated database that includes all components of solar radiation, either energetic or spectral, on a daily and hourly scale. This data bank was constituted, firstly, by the measurements carried out in several Moroccan sites and secondly, by the estimated data resulting from the models that we established. All data constituting this bank, approximately 17 million values, were subjected to verification and statistical validation tests.

This work will lead us to quantify the Moroccan solar potential and to determine the dimensions of all types of solar thermal and photovoltaic systems. Consequently, the obtained database will be a fundamental support for engineers, designers, and all organizations interested in developing solar systems, in different regions throughout Morocco. It will also be a basic tool for researchers in modeling and simulating the new solar systems.

Key Words: Solar energy ; Global solar radiation ; Diffuse solar radiation ; correlation ; Prediction ; Estimation.