

**UNIVERSITE DE SAAD DAHLEB DE BLIDA**

**Faculté des Sciences de l'ingénieur**

Département d'Électronique

# **MÉMOIRE DE MAGISTER**

Spécialité : Contrôle

Option: Signaux et systèmes

## **CARACTÉRISATION RADIOMÉTRIQUE DES SITES DE BOUZARÉAH ET DE GHARDAÏA**

Par

**MERDAOUI Ziad**

Devant le jury composé de

SALHI Hassen : Maître de conférence, Département d'électronique, UB, Président

BELHAMEL Mayouf : DR , CDER,

Examineur

GUESSOUM Abderrazak : Pr, Département d'électronique, UB,

Examineur

KHELLAF Abedallah : DR, CDER,

Rapporteur

NADJEMI Omar : CC, Département d'électronique, UB,

Co-rapporteur

Blida, Octobre 2007



## RÉSUMÉ

La caractérisation bioclimatique d'un site donné passe nécessairement par une meilleure connaissance du gisement solaire. Pour cela, il est indispensable de disposer de séquences climatiques adaptées, soit à partir d'une base de données météorologiques, soit à partir d'un modèle mathématique permettant de générer des données artificielles pour le site étudié. Ce dernier cas s'avère souvent une nécessité incontournable dans plusieurs régions sur notre territoire.

En s'appuyant sur des statistiques radiométriques issues des données mesurées du rayonnement solaire globale reçu sur un plan horizontal (moyenne journalière), nous proposons une étude expérimentale comparative, sur une période de quelques années, entre deux sites : le site de Bouzaréah et le site de Ghardaïa. Le premier représente un climat plus ou moins tempéré, alors que le second représente un climat désertique.

Cette démarche nous conduit à l'évaluation de quelques modèles mathématiques. Les modèles utilisés indiquent une bonne estimation du rayonnement solaire à partir de la durée d'insolation mesurée.

## **ABSTRACT**

The bioclimatic characterization of a given site passes necessarily by a better knowledge of the solar field. For that, it is essential to have adapted climatic sequences, either from a meteorological database, or from a mathematical model allowing to generate artificial data for the studied site. This last case often proves to be an inevitable necessity in several regions on our territory.

We propose a comparative experimental study, between two sites: the site of Bouzareah and the site of Ghardaia. The first represents a more or less moderate climate, whereas the second represents a desert climate. Few years measured average daily global solar radiation data on horizontal surfaces at Bouzareah and Ghardaia were used for the mathematical model assessment: The used models give good fit through the measured values.

## ملخص

إنّ المميّزة المناخية الحياتية لموقع ما تحدّد أساساً بمعرفة جيدة للمورد الشمسي ولهذا نقترح دراسة تجريبية مقارنة لعدّة سنوات بين موقعين اثنين : موقع بوزريعة وموقع غرداية. يمثل الأول مناخاً معتدلاً بينما الثاني يمثل مناخاً صحراويّاً ممّا أمكننا من تقييم بعض النماذج الرياضية. استخدمت نتائج إحصاء الإشعاع الشمسي الكلي المقاسة على سطح أفقي للمعدّل اليومي في الموقعين الاثنين لإعداد نموذج رياضي.

بيّن هذا البحث أنّ النماذج الرياضية المستعملة أعطت مطابقة جيّدة للقيم المتنبأ بها للإشعاع الشمسي باستخدام القيم المقاسة لمدة الإشماس لكلي الموقعين.

## REMÉRCIEMENTS

Je tiens à remercier Monsieur Abdellah Khellaf , directeur de recherche au CDER qui a dirigé ce mémoire, pour son assistance et son suivi tout au long de cette étude.

Mes plus sincères remerciements s'adressent à Monsieur Maïouf Belhamel, directeur du CDER, pour ses critiques constructives, ses conseils qui m'ont permis d'évoluer dans ma vision de la recherche et dans la façon de la mener, et qui malgré ses responsabilités a bien voulu accepter de faire partie du jury de ce mémoire.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur Omar Nadjemi pour avoir co-encadré ce travail. Merci du temps qu'il a consacré à redonner de la rigueur à mon travail, et d'avoir permis à cette expérience de mémoire d'être diversifiée et enrichissante.

Je remercie Monsieur Hassen Salhi pour avoir accepté de lire ce mémoire et donner son avis. Ses remarques et suggestions intéressantes m'ont été utiles. Je lui adresse toute ma reconnaissance.

Je suis très reconnaissant à Monsieur Abderrazak Guessoum d'avoir accepté de faire partie de mon jury, témoignant ainsi de l'intérêt qu'il porte à mon travail de thèse.

Je suis aussi très reconnaissant envers:

Lakehal Salim, pour les discussions, les coups de main apportés dans la partie expérimentale de ce mémoire, et la documentation personnelle placée à ma disposition,

Yaïche Redha, qui m'a apporté un grand appui dans le traitement des données radiométriques grâce à son logiciel de calcul astronomique et radiométrique qu'il a conçu ;

kedaïd Lalia, pour sa contribution dans la rédaction de ce mémoire ;

Diaf Saïd, pour ses judicieux conseils.

Que Monsieur Azzedine Saci, Directeur du Centre Climatologique National soit remercié pour sa disponibilité et de m'avoir fourni les données indispensables à la réalisation de ce mémoire. Merci également à tous ceux qui ont participé de loin ou de près à ce travail.

Je ne saurais conclure sans dédier ce travail à ma fille Hana et à mon fils Idris.

## TABLE DES MATIERES

RÉSUMÉ

REMÉRCIEMENTS

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	15
1. LE RAYONNEMENT SOLAIRE.....	19
1.1 Introduction.....	19
1.2 Les énergies renouvelables.....	20
1.2.1 Le solaire.....	20
1.2.2 La biomasse.....	20
1.2.3 L'éolien.....	21
1.2.4 La géothermie.....	22
1.3 La nature du rayonnement solaire.....	22
1.3.1 Les statistiques sur le Soleil.....	23
1.3.2 La structure solaire.....	23
1.3.3 Le spectre de la lumière solaire.....	25
1.3.4 Le rayonnement électromagnétique.....	26
1.3.5 Puissance solaire $P_s$ .....	28
1.4 Grandeurs astronomiques.....	28
1.4.1 Mouvement de la terre autour du soleil.....	28
1.4.2 Repérage du soleil.....	31
1.4.2.1 Repère horizontal.....	31
1.4.2.2 Repère équatorial.....	32
1.4.3 Relation entre coordonnées azimutales et équatoriales.....	34

1.5 Irradiation solaire globale.....	35
1.5.1 Constante Solaire $I_0$ .....	35
1.5.2 Spectre solaire hors atmosphère .....	37
1.5.3 Flux radiatif reçu sur un plan horizontal .....	38
1.5.4 Irradiation globale journalière hors atmosphère.....	38
1.5.5 Irradiation globale horaire hors atmosphère.....	38
1.5.6 Variabilité de $H_0(j)$ pour les deux sites de Bouzaréah et de Ghardaïa.....	39
1.6 Insolation.....	40
1.6.1 Insolation potentielle .....	40
1.6.2 La fraction d'insolation.....	41
1.7 Effet de l'atmosphère sur le rayonnement solaire.....	41
1.8 Irradiation solaire au niveau du sol.....	44
1.9 Conclusion.....	44
2. CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE DES SITES.....	45
DE BOUZARÉAH ET DE GHARDAIA	
2.1 Introduction.....	45
2.2 Présentation générale des sites de Bouzaréah et de ghardaia.....	45
2.2.1 Le site de Bouzaréah.....	45
2.2.2 Le site de Ghardaïa.....	49
2.3 Mesure du rayonnement solaire.....	51
2.3.1 Introduction.....	51
2.3.2. Mesure satellitaire.....	51
2.3.3 Mesure du rayonnement solaire global à la surface de la terre.....	53
2.3.3.1 Appareil de mesure.....	53
2.3.3.2 Les erreurs de mesures.....	54
2.3.4 Mesure du rayonnement solaire diffus au sol.....	56
2.3.5 Mesure du rayonnement solaire direct.....	57
2.3.6 Mesure de l'albédo au sol.....	58
2.3.7 Mesure de la durée d'insolation.....	59
2.4 Caractérisation expérimentale météorologique des sites.....	60
de Bouzaréah et de Ghardaia	
2.4.1 Introduction.....	60
2.4.2 Température ambiante ( $T_a$ ).....	61
2.4.3 Humidité relative $R_r$ .....	63



2.5	Caractérisation expérimentale radiométrique des sites de Bouzaréah et de Ghardaia.	66
2.5.1	L'albédo.	66
2.5.2	L'insolation.	66
2.5.3	Analyse de la moyenne mensuelle de l'insolation journalière.	68
2.5.4	Évolution de la moyenne mensuelle de l'insolation.	68
2.5.5	Indice de clarté.	71
2.5.6	Évolution annuelle du rayonnement global mesuré sur un plan horizontal pour les sites de Bouzaréah et Ghardaïa.	72
2.5.7	Évolution du rayonnement global moyen journalier mesuré pour les sites de Bouzaréah et de Ghardaïa.	73
2.6	Conclusion.	76
3.	ESTIMATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE A PARTIR DE LA DURÉE D'INSOLATION	77
3.1	Introduction.	77
3.2	modèles liant l'humidité relative $R_h$ et le rayonnement global.	77
3.3	modèle liant la durée d'insolation $SS$ , l'humidité relative $R_R$ , La température maximale $T_{max}$ et le rayonnement global	78
3.4	Modèle liant la durée d'insolation $SS$ , l'humidité absolue $R_a$ et le rayonnement global	79
3.4.1	Modèle de H.P.Garrg et S.N Garg	79
3.4.2	Modèle de Hussain.	80
3.5	Modèle liant la nébulosité $C_w$ et le rayonnement global $H$ .	80
3.6	Modèles liant la durée d'insolation et le rayonnement global.	81
3.6.1	Modèle de Masson (1966).	81
3.6.2	Modèle de Sabbagh et al. (1973).	81
3.7	Paramètres utilisés dans l'évaluation des modèles estimés.	82
3.8	Calcul des paramètres statistiques.	83
3.9	Procédure utilisée pour l'évaluation du rayonnement solaire.	87
3.10	Conclusion.	92
4.	LES RÉSULTATS DE VALIDATION DES MODÈLES ET DISCUSSION.	93
4.1	Introduction.	93
4.2	Évolution mensuelle de l'irradiation journalière.	93
4.2.1	Modèle basé sur la régression linéaire : (modèle Angstrom- Prescott).	93

4.2.2	Modèle basé sur la régression polynomiale du second degré.....	99
4.2.3	Modèle basé sur la régression logarithmique.....	103
4.2.4	Confrontation des résultats des modèles avec les valeurs..... mesurées (moyennes mensuelles)	107
4.3	Évolution annuelle du rayonnement solaire global journalier.....	109
4.3.1	Modèle linéaire (Angström-Prescott).....	109
4.3.2	Modèle quadratique (modèle Ögelman et al).....	110
4.3.3	Modèle logarithmique (modèle Ampratwum et Dorvlo).....	111
4.3.4	Confrontation des résultats des modèles avec les valeurs..... mesurées (moyennes annuelles).	112
4.4	Conclusion.....	112
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....		114
LISTE DES SYMBOLES ET DES ABRÉVIATIONS.....		116
RECOMMANDATIONS.....		118
APPENDICE A.....		118
APPENDICE B.....		122
RÉFÉRENCES.....		137

## LISTE DES ILLUSTRATIONS GRAPHIQUES ET TABLEAUX

### GRAPHIQUES

Figure 1.1	Vu du soleil entier.....	22
Figure 1.2	Coupe du soleil.....	24
Figure 1.3	Spectre de la lumière solaire.....	25
Figure 1.3.1	Spectre continu.....	25
Figure 1.3.2	Spectre d'émission.....	25
Figure 1.3.3	Spectre d'absorption.....	25
Figure 1.4	Irradiation solaire à travers l'atmosphère.....	26
Figure 1.5	Fenêtre atmosphérique N° 1 ouverte à l'irradiation solaire.....	27
Figure 1.6	Rapports géométriques : soleil-terre.....	29
Figure 1.7	Déclinaison terrestre et les différentes saisons de l'année.....	30
Figure 1.8	Repère horizontal.....	31
Figure 1.9	Repère équatorial.....	32
Figure 1.10	Équation du temps.....	33

Figure 1.11	Évolution annuelle de la constante solaire.....	36
Figure 1.12	Spectre solaire hors atmosphère.....	37
Figure 1.13	Irradiation journalière extraterrestre des deux sites..... de Bouzaréah et de Ghardaïa	39
Figure 1.14	Insolation potentielle des deux sites de Bouzaréah et de Ghardaïa.....	40
Figure 1.15	Répartition spectrale solaire hors atmosphère et au niveau du sol.....	42
Figure 1.16	Schéma de diffusion et d'absorption dans l'atmosphère.....	43
Figure 2.1	Vue satellitaire du site de Bouzaréah.....	46
Figure 2.2	Effectif des personnels chercheurs du CDER.....	46
Figure 2.3	Système expérimental éolien-photovoltaïque couplé au réseau du CDER.....	47
Figure 2.4	Les appareils de mesures radiométriques du CDER.....	48
Figure 2.5	Vue satellitaire du site de Ghardaïa.....	49
Figure 2.6	Appareils récents de mesures radiométriques de l'URAER.....	50
Figure 2.7	Principe de la télédétection spatiale.....	52
Figure 2.8	Pyranomètre Kipp et Zonen - CM 11.....	53
Figure 2.9	Non-linéarité (variation de la sensibilité du capteur par rapport..... au rayonnement solaire du pyranomètre CM11)	55
Figure 2.10	Variation de la sensibilité du capteur par rapport à la température.....	55
Figure 2.11	Pyranomètre CM11 équipé d'une bande pare-soleil..... pour la mesure du rayonnement diffus	56

Figure 2.12	Pyrhéliomètre Eppley.....	57
Figure 2.13	Albédomètre.....	58
Figure 2.14	Héliographe Campbel-Stokes.....	59
Figure 2.15	Courbes des températures moyennes.....	61
Figure 2.16	Distribution des paramètres de la température.....	62
Figure 2.17	Courbe de l'humidité moyenne relative.....	64
Figure 2.18	Courbes de la pression atmosphérique.....	64
Figure 2.19	Présentation des principales variations de l'humidité relative.....	65
Figure 2.20	Courbes des insolation journalières.....	67
Figure 2.21	Distribution de la moyenne mensuelle de l'insolation.....	68
Figure 2.22	Courbes de l'insolation et fraction d'insolation.....	69
Figure 2.23	Distribution journalière de l'indice de clarté pour les sites étudiés.....	71
Figure 2.24	Évolution annuelle du rayonnement global mesuré H.....	72
Figure 2.25	Rayonnement global H mesuré pour le site de Bouzaréah.....	74
Figure 2.26	Rayonnement global H mesuré pour le site de Ghardaïa.....	75
Figure 3.1	(a).graphe pour la corrélation $H = 490.D^{0.357} . R_h^{0.262}$ (b). graphe pour la corrélation $H = 460.e^{0.607(D-R_h)}$ .....	78
Figure 3.2	Régression au sens des moindres carrés pour l'équation (3.21).....	83

Figure 3.3	Organigramme calculant le rayonnement global $H_0$ hors atmosphère.	88
Figure 3.4	Calcul de l'indice de clarté $K_t$ par le modèle linéaire.	89
Figure 3.5	Calcul de l'indice de clarté $K_t$ par le modèle quadratique.	90
Figure 3.6	Calcul de l'indice de clarté $K_t$ par le modèle logarithmique.	91
Figure 4.1	Utilisation du modèle linéaire pour les données journalières, site de Bouzaréah .	96
Figure 4.2	Utilisation du modèle linéaire pour les données journalières, site de Ghardaïa.	98
Figure 4.3	Utilisation du modèle quadratique pour les données journalières, site de Bouzaréah	100
Figure 4.4	Utilisation du modèle quadratique pour les données journalières, site de Ghardaïa	102
Figure 4.5	Utilisation du modèle logarithmique pour les données journalières, site de Bouzaréah.	104
Figure 4.6	Utilisation du modèle logarithmique pour les données journalières, site de Ghardaïa.	106
Figure 4.7	Utilisation du modèle linéaire pour les données annuelles des sites étudiés.	109
Figure 4.8	Utilisation du modèle quadratique pour les données annuelles des sites étudiés.	110
Figure 4.9	Utilisation du modèle logarithmique pour les données annuelles des sites étudiés.	111

Figure 4 10	Algorithme d'association des modèles et génération.....	115
	des données synthétiques.	

## TABLEAUX

Tableau A	Mesures radiométriques effectuées dans les stations de l'O N M	
Tableau 1.1	Représentation de la densité de l'irradiation solaire hors atmosphère classifiée.....	37
	en trois bandes de longueur d'onde (classification standard de la NASA).	
Tableau 1.2	Absorption spectrale des principaux gaz.....	43
Tableau 2.1	Effectif des Personnels de l'URAER.....	49
Tableau 2.2	Précision et performance du pyranomètre CM11.....	54
Tableau 2.3	Spécifications du pyréliomètre Eppley.....	57
Tableau 2.4	Albédo des sites de Bouzaréah et de Ghardaïa.....	66
Tableau 2.5	Durée d'insolation annuelle des sites de Bouzaréah et de Ghardaïa.....	66
Tableau 2.6	Durée de maintien (en jours) des différentes nébulosités pour les sites.....	70
	de Bouzaréah et Ghardaïa	
Tableau 2.7	Présentation de la distribution (en jours) de l'indice de clarté.....	71
Tableau 2.8	Description du rayonnement global en fonction de la saison.....	73
Tableau 3.1	Utilisation du facteur climatique pour différentes plages d'humidité,.....	79
	mois par mois	
Tableau 3.2	Variation de $R^2$ en fonction de RMSE pour une même variance $\sigma^2$ ,.....	86
	site de Bouzaréah	
Tableau 3.3	Variation de $R^2$ en fonction de RMSE pour une même variance $\sigma^2$ ,.....	87
	site de Ghardaïa	

Tableau 4.1	Résultats du modèle Angstrôm-Prescott pour les données journalière mois par mois, site de Bouzaréah.	95
Tableau 4.2	Résultats du modèle Angstrôm-Prescott pour les données journalières mois par mois, site de Ghardaïa	97
Tableau 4.3	Résultats du modèle quadratique pour les données journalières mois par mois, site de Bouzaréah	99
Tableau 4.4	Résultats du modèle quadratique pour les données journalières mois par mois, site de Ghardaïa.	101
Tableau 4.5	Résultats du modèle logarithmique pour les données journalières mois par mois, site de Bouzaréah.	103
Tableau 4.6	Résultats du modèle logarithmique pour les données journalières mois par mois, site de Ghardaïa.	105
Tableau 4.7	Comparaison des valeurs estimées avec les valeurs mesurées pour le site de Bouzaréah.	108
Tableau 4.8	Comparaison des valeurs estimées avec les valeurs mesurées pour le site de Ghardaïa.	108
Tableau 4.9	Régression linéaire pour les sites de Bouzaréah et de Ghardaïa.	109
Tableau 4.10	Régression quadratique pour les sites de Bouzaréah et de Ghardaïa.	110
Tableau 4.11	Régression logarithmique pour les sites de Bouzaréah et de Ghardaïa.	111
Tableau 4.12	Comparaison des valeurs estimées avec les valeurs mesurées pour les deux sites de Bouzaréah et de Ghardaïa	112



# INTRODUCTION GÉNÉRALE

## 1 Introduction

L'homme a toujours été influencé par son environnement climatique. Ses capacités d'adaptation l'ont conduit à utiliser le rayonnement solaire comme source énergétique sous plusieurs formes de conversion (production d'eau chaude solaire, électricité photovoltaïque, séchage agro-alimentaire...). Cette énergie a l'avantage d'être inépuisable à l'échelle humaine et extrêmement abondante (La terre reçoit en une seule année mille fois l'équivalent des réserves mondiales connues de pétrole).

Les caractéristiques géographiques et climatiques de l'Algérie font que cette source présente un intérêt particulier en tant qu'énergie renouvelable.

La quantité de rayonnement solaire global et sa distribution temporelle sont des aspects cruciaux de la conception, le dimensionnement et le fonctionnement des systèmes d'exploitation de l'énergie solaire. La connaissance des paramètres radiométriques est nécessaire pour prévoir l'efficacité d'un tel système pour un site particulier.

## 2 Problématique

Nous savons, qu'en Algérie, seulement une (1) station météorologique sur les soixante-dix-huit que compte le réseau de l'office national de la météorologie (ONM) assure la mesure des différentes composantes du rayonnement solaire, en raison, soit du manque de fiabilité des appareils de mesure, ou bien, du coût élevé d'un tel appareillage, alors que la durée d'ensoleillement est non seulement mesurée dans beaucoup de stations, mais aussi sa mesure est plus facile à mettre en œuvre que la mesure du rayonnement solaire.

La non-disponibilité de stations assurant la mesure du rayonnement solaire à grande échelle, a incité les chercheurs à penser à l'élaboration de modèles [1]. (fonctions de corrélations, modèles stochastiques), dont le but est de générer des séquences artificielles de données radiométriques.

Station	Mesure effectuées	Rayonnement solaire global	Insolation
Adrar			+
Ain sefra			
Ain-bessam			+
Alger port			
Annaba/el mellah			
Aoulef			
Arzew			
Batna			+
Bechar/ouakda			+
Bejaia-port			+
Bejaia/soummam			
Beni abbes			
Beni-saf			
Biskra			+
Bordj bou arreridj			
Bordji b mokhtar			+
Bou-saada			
Boucheougouf			
Bouira			+
Cap carbon			
Cap falcon			
Chlef			+
Constantine/elbey			+
Darelbeida /houari			+
Dellys			
Djanet/tiska			
Djelfa/tlets			+
El bayadh			
El golea			
El kheiter			
El oued/guemer			
El-kala			
Ft flatters/bordj-o			
Ghardaïa			+
Ghazaouet			
Guelma			+
Hassi-messaoud			+
Hassir`mel			+
Ighil izane			
Illizi/illirane			
namenas			
In salah			+
In salah north			
n-guezzam			+
Jijel			+
Khenchella			

Station	Mesures effectuées	Rayonnement solaire global	Insolation
Ksar chellala			
Laghouat			+
Maghnia			
Mascara			
Mascara/ghriss			
Mecheria			
Medea			
Miliana			+
Mostaganem			+
M`sila			
Naama			
Oran port			
Oran tafaraoui			
Oran/es senia			+
Oran/tafaroui			+
Ouargla			+
Oum el bouaghi			
Saida			
Setif/ain-arnat			+
Sidi bel abbes			
Skikda			
Souk ahras			
Tamanrasset		+	+
Tebessa			
Tenes			
Tiaret			
Timimoun			
Tindouf			
Tizi-ouzou			+
Tlemcen/zenata			+
Touggourt			

Tableau A : Mesures radiométriques effectuées dans les stations de l'O N M [2]

Les mesures du rayonnement solaire sont actuellement effectuées seulement sur quatre sites :

- C D E R (site de Bouzareah), au Nord
- U R A E R (site de Ghardaia), au nord Sahara
- Tamanrasset (ONM), au grand sud
- I N R A, au Nord

Les mesures aux sites précités ne sont pas du tout suffisantes pour quantifier le gisement solaire en Algérie, nous sommes encore très loin du minimum !

Il est donc important de recourir à des moyens indirects. Ces moyens font appel aux facteurs qui influencent le rayonnement solaire. Ces facteurs sont plus particulièrement les conditions atmosphériques à savoir la durée d'insolation, la température, la pression, la nébulosité, l'humidité, etc. Il est à noter que par suite de la facilité de leur mise en œuvre et du besoin exprimé par différents opérateurs (agriculture, navigation aérienne, etc.), le nombre de stations de mesures météorologiques est plus important

Pour toutes ces raisons, nous nous fixons pour la présente étude, comme objectif d'établir dans un premier temps, une caractérisation expérimentale comparative de deux sites : le site de Bouzaréah et le site de Ghardaïa. Le premier représente un climat plus ou moins tempéré, alors que le second représente un climat désertique. Ensuite, nous présenterons quelques modèles mathématiques permettant d'exprimer le rayonnement solaire global en fonction de la durée d'ensoleillement relatif aux deux sites. Pour pouvoir valider ces modèles, nous effectuerons une comparaison des résultats des estimations avec les résultats des mesures de l'indice de clarté  $k_t$ .

### 3. Présentation de l'étude

Dans le chapitre 1, nous présenterons des définitions et généralités utiles à l'étude du rayonnement solaire à savoir les grandeurs astronomiques, le rayonnement extraterrestre et les atténuations qu'il subit en traversant l'atmosphère terrestre. Dans le chapitre 2, nous décrirons les paramètres météorologiques et le rayonnement solaire global caractérisé par l'indice de clarté  $K_t$ , à travers une analyse expérimentale des données mesurées, à différentes échelles temporelles, afin de déterminer une caractérisation physique des deux sites étudiés. Les paramètres mesurés sont collectés au niveau des deux stations météorologiques de l'ONM d'Alger et de Ghardaïa, du CDER de Bouzaréah, de l'URAER de Ghardaïa et de l'INRA d'Alger en s'appuyant sur des statistiques météorologiques issues des données mesurées sur une période s'étalant sur cinq années.

Cette analyse, nécessaire à la caractérisation des sites étudiés, permettra de jeter les bases d'une analyse mathématique qui fera l'objet du chapitre 3, en utilisant des modèles statistiques permettant de déterminer les fonctions de corrélations entre les variables climatiques et le rayonnement solaire global. Le chapitre 4 sera consacré à l'analyse des résultats et à la validation des modèles.

# CHAPITRE 1

## LE RAYONNEMENT SOLAIRE

### 1.1 Introduction

Le rayonnement solaire est la seule source d'énergie externe de notre planète. Le soleil, de par sa température d'environ 6000 °K, rayonne principalement dans le visible et le proche infra rouge (de 300 nm à 1200 nm) avec un maximum aux environs de 500 nm.

Cette énergie est produite par les réactions de fusion dans le soleil et est filtrée par l'atmosphère. Le rayonnement solaire apporte sur terre une énergie de 2000 à 2500 kWh/m<sup>2</sup> par an, ce qui est supérieur à la totalité des ressources fossiles jamais découvertes.

La quantité d'énergie exploitable de ces ressources malheureusement "non renouvelables" ne représente que 0.5 % de ce que nous recevons chaque année par rayonnement solaire [3].

Un recours systématique aux carburants fossiles, comme le pétrole, le charbon et le gaz naturel pour les plus répandus, permet d'avoir des coûts de production faibles, mais conduit à un dégagement massif de gaz polluant. Ainsi, la production électrique à partir de combustible fossile est à l'origine de 40 % des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> [4].

L'énergie de fission nucléaire, qui ne rejette directement pas de gaz carbonique, souffre généralement d'une mauvaise image médiatique. Certes, les risques d'accident lié à leurs exploitations sont très faibles, mais les conséquences d'un accident, même très peu probable, seraient désastreuses. Le traitement des déchets, issu de ce mode de production est très coûteux et, pour une part, leur radioactivité reste élevée durant de nombreuses années.

Enfin, les réserves d'uranium sont, comme celles de pétrole, limitées (moins de 100 ans au rythme actuel de la consommation). Beaucoup plus accessibles et très adaptées à la production décentralisée, les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement. Aujourd'hui, le grand éolien devient compétitif en termes de coûts de production. Il est en train de permettre de contribuer à la réduction des rejets de gaz à effet de serre. L'Algérie de par sa situation géographique privilégiée par rapport à l'équateur, bénéficie d'un ensoleillement exceptionnel sur la quasi-totalité de son territoire.

Cet ensoleillement représente un gisement d'énergie impressionnant [5]. Dans la première partie du présent chapitre, nous allons présenter les énergies faiblement productrices de CO<sub>2</sub> et alternatives aux combustibles fossiles qui sont majoritairement utilisés aujourd'hui : les énergies renouvelables. Ensuite nous allons définir les caractéristiques du rayonnement solaire, les grandeurs astronomiques, le rayonnement hors atmosphère et Le rayonnement solaire au sol.

## 1.2 Les énergies renouvelables

On appelle énergie renouvelable un ensemble de sources d'énergies qui sont inépuisables à l'échelle humaine, largement disponibles, essentiellement gratuites et sont compatibles avec un certain respect environnemental. Elles sont d'origine majoritairement solaire [3].

- Le solaire est une utilisation directe des rayons du soleil pour produire chaleur ou électricité.
- La biomasse regroupe l'ensemble des énergies provenant de la dégradation de la matière organique. C'est de l'énergie solaire transformée par les plantes chlorophylliennes qui sont utilisées soit directement (bois de chauffage) soit après de nouvelles transformations chimiques (biogaz, biocarburant).
- L'éolien utilise l'énergie du vent de manière mécanique.
- La géothermie est l'utilisation directe des gradients de température terrestre ou de sources chaudes.

### 1.2.1 Le solaire

L'énergie solaire est la ressource énergétique la plus abondante sur terre. Elle est à l'origine de la majorité des autres énergies renouvelables, mais elle est très atténuée.

Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité à l'aide de semi-conducteurs photovoltaïque, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production électrique [3].

### 1.2.2 La biomasse

Cette source d'énergie, la plus vieille utilisée par l'homme, est d'origine solaire. Il s'agit essentiellement de la transformation du rayonnement reçu par les plantes autotrophes chlorophylliennes pour fabriquer de la matière organique (= énergie chimique récupérable).

La biomasse se décompose en trois catégories distinctes qui sont le bois-énergie, le biogaz et les biocarburants [3].

L'énergie chimique du bois est libérée par combustion sous forme de chaleur et utilisée directement ou pour produire de l'électricité. Le bois comme source de chauffage est utilisé à toute échelle, de la cheminée individuelle (à faible rendement) aux chaudières industrielles de "fortes" puissances en passant par de nombreuses chaufferies collectives.

➤ On appelle biogaz les effluents gazeux, méthane essentiellement, issu de la fermentation des matières organiques contenues dans les décharges et les stations d'épuration. Le méthane est un puissant gaz à effet de serre et sa captation répondait à l'origine à des obligations réglementaires.

Il commence à être considéré comme une ressource énergétique et aujourd'hui le biogaz est devenu un secteur industriel à part entière [3].

➤ Les biocarburants sont composés de deux filières distinctes, biodiesel (+huiles) et éthanol. Ils sont issus de la transformation de différentes cultures : canne à sucre, maïs et colza...

Comme l'indique leur nom les biocarburants sont majoritairement utilisés pour les transports mais aussi parfois pour produire chaleur ou électricité [3].

### 1.2.3 L'éolien

La source d'énergie des éoliennes est le vent qui est essentiellement une manifestation de la chaleur déposée par le rayonnement solaire dans l'atmosphère. Elle crée des écarts de température donc des masses d'air de densités différentes qui se mettent en mouvement pour répondre aux variations de pression atmosphérique. Les spécialistes estiment à 2 % [3] l'énergie solaire incidente déposée sous forme d'énergie éolienne. Les performances des machines dépendent de plusieurs caractéristiques du vent :

- sa distribution en vitesse ;
- sa distribution en direction ;
- sa variation avec la hauteur.

Le développement des technologies éoliennes rend cette énergie beaucoup plus intéressante aujourd'hui et même compétitive sur les sites bien ventés. Le nombre de centrales d'éoliennes est en croissance exponentielle dans les pays voisins. Le gisement éolien national facilement mobilisable est très significatif [3].

### 1.2.4 La géothermie

Littéralement (en grec Gê : terre et thermos : chaud), la géothermie est la chaleur venant de la terre et, par assimilation, c'est l'utilisation de cette énergie qui trouve sa source dans la température de la croûte terrestre. Exploiter l'énergie géothermique nécessite la présence d'eau chaude, pour prélever la chaleur. Selon sa température, on distingue deux types d'exploitations géothermiques :

- entre 20 et 80 °C la chaleur est utilisée directement, c'est la basse énergie ;
- entre 80 à 300 °C, la moyenne et haute énergie permettent la production d'électricité.

La vapeur d'eau est soit utilisée directement pour faire tourner des turbines soit à l'aide d'un fluide secondaire se vaporisant à une température plus basse [3]. Plus de deux cents sources chaudes ont été inventoriées au Nord du pays. Un tiers environ à des températures supérieures à 45°C pour atteindre 98 °C à Hammam Meskhoutine dans la wilaya de Guelma. Le bassin sédimentaire du bas Sahara compte d'importantes réserves d'eau chaude (60 °C à 65 °C).

Il convient également de signaler l'existence de sources à hautes températures pouvant atteindre les 118 °C à Aïn Oulmène et 119 °C à Biskra [5].

### 1.3 La nature du rayonnement solaire

Il est normal de s'intéresser d'abord au soleil dont nous dépendons si nous voulons mieux connaître les processus de production et de transport de l'énergie solaire.

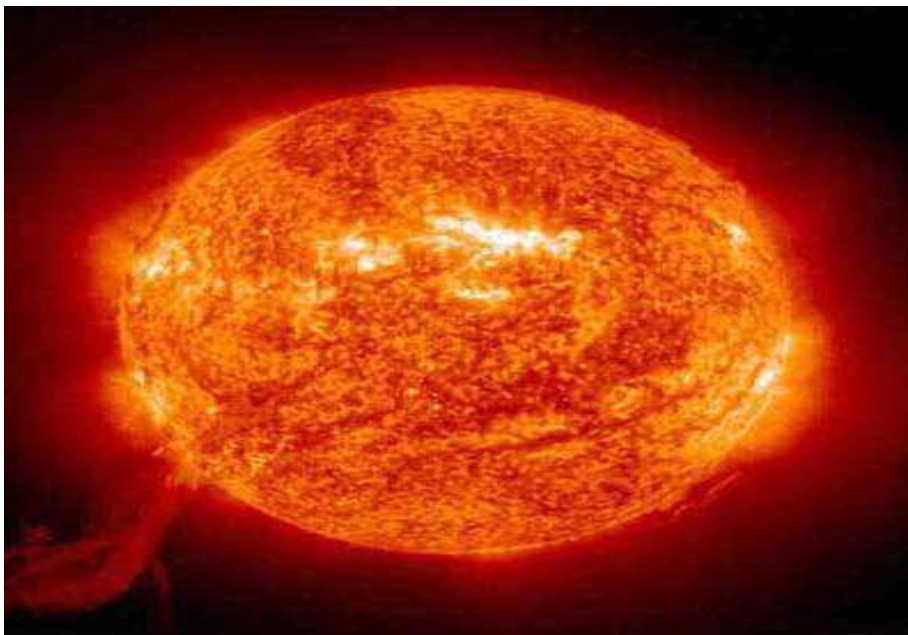


Figure. 1.1: Vu du soleil entier [6].



### 1.3.1 Les statistiques sur le Soleil [7]

Diamètre	1392 000 Km
(environ 109 fois celui de la terre)	
Masse	$2.10^{33}$ g = $2.10^{27}$ t
(environ 330 000 fois la masse de la terre)	
Densité moyenne	1,410 g / cm <sup>3</sup>
Etat	gazeux
Composants	75% Hydrogène 23% Hélium 2% Reste
Gravitation à la surface	28*g ( g = la gravitation terrestre )
Température à la surface	5785 K
Température au noyau	15,106 K
Pression au noyau	1011 bar
Temps de rotation (équateur)	25 jours
Temps de rotation (région polaire)	29 jours

### 1.3.2 La structure solaire [8].

La quantité d'énergie libérée par les réactions thermonucléaires au niveau du noyau est transportée sous forme de rayons Gamma et de rayons X sur une distance correspondant aux deux tiers du rayon du soleil, à partir de là, le transport d'énergie se fait par convection.

La photosphère transmet la lumière. Son épaisseur ne dépasse pas les 300 km. La température moyenne de cette région est environ 5800 °K. Elle émet 99% du rayonnement total, principalement dans le visible, et c'est elle que l'œil humain perçoit. La couche suivante n'est pas visible et porte le nom de chromosphère. Elle est épaisse d'environ 2500 km. Le minimum de la température de l'atmosphère solaire se trouve à la jonction entre la photosphère et la chromosphère (4000 k). À partir de là, la température monte de nouveau et atteint plusieurs centaines de milliers de degrés. La dernière couche solaire est la Couronne. Elle a plusieurs millions de km d'épaisseur (figure 1.2).

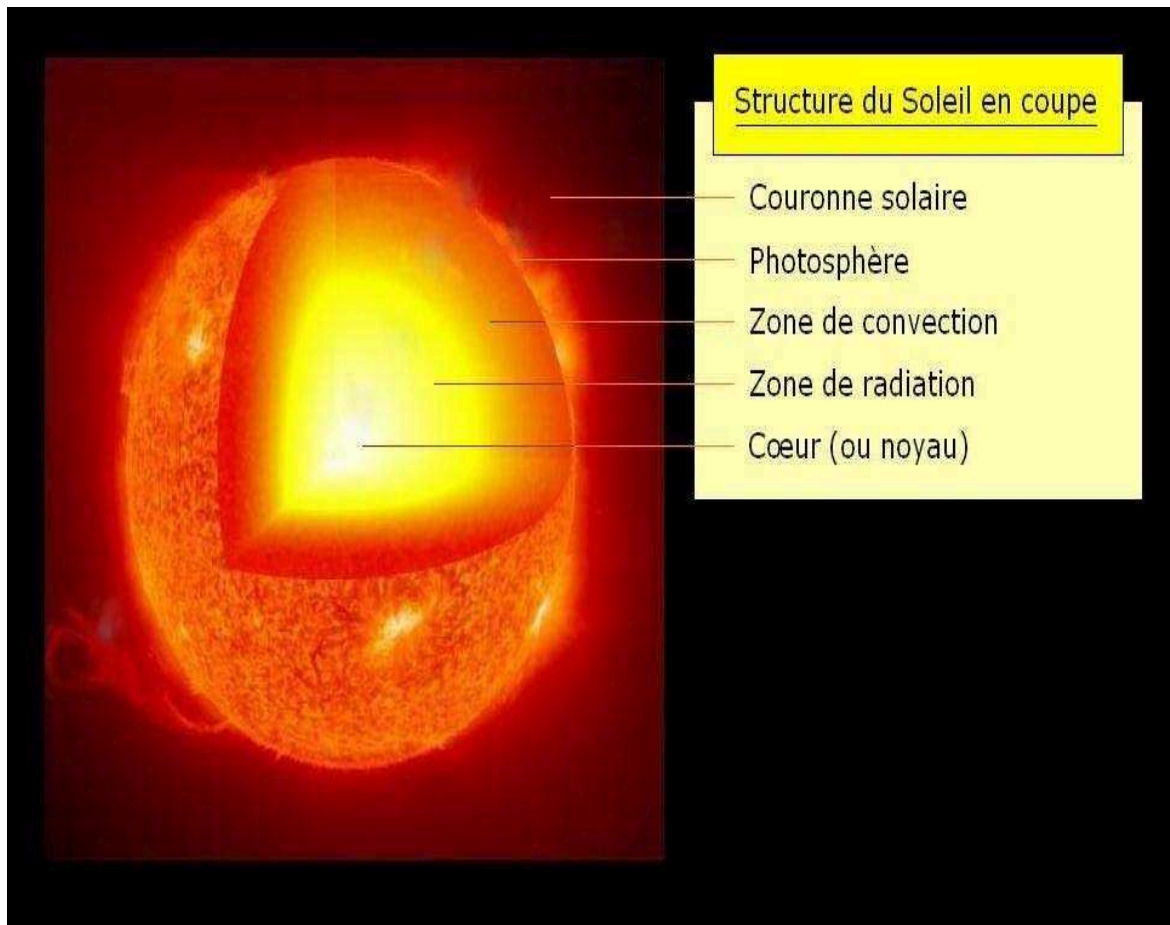


Figure. 1.2: Coupe du soleil [6].

Retenons que le soleil est un réacteur en fusion qui fournit continuellement l'énergie par rayonnement. Il utilise l'hydrogène comme « combustible ». Dans la réaction thermonucléaire, l'hydrogène fusionne en hélium. La différence d'énergie de liaison entre les protons de l'hydrogène et ceux de l'hélium correspond à cette énergie libérée sous forme de rayonnement (Effet de masse), estimée à  $3,7 \cdot 10^{20}$  MW.

### 1.3.3 Le spectre de la lumière solaire

Nous avons trois sortes de spectres [8] :

- le spectre continu, émis par un corps brûlant (solide ou gazeux), (figure 1.3.1).
- le spectre d'émission provenant d'un gaz chaud ayant une densité minimale (figure 1.3.2).
- le spectre d'absorption irradié par un corps brûlant en présence d'un gaz froid (figure 1.3.3)

Figure. 1.3.1: Spectre continu

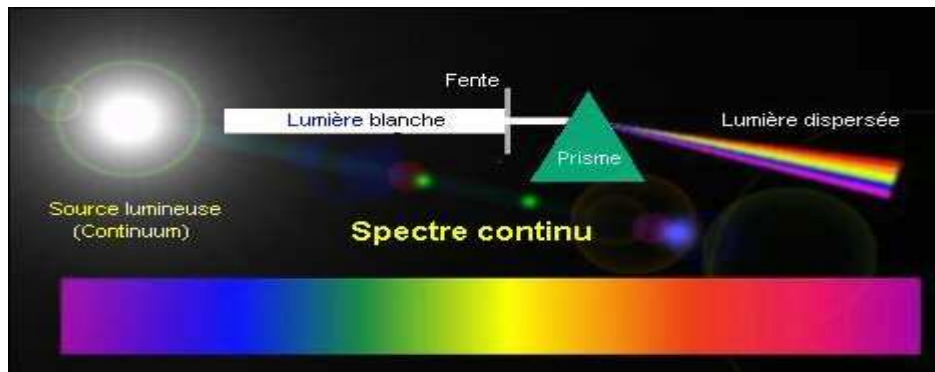


Figure. 1.3.2: Spectre d'émission

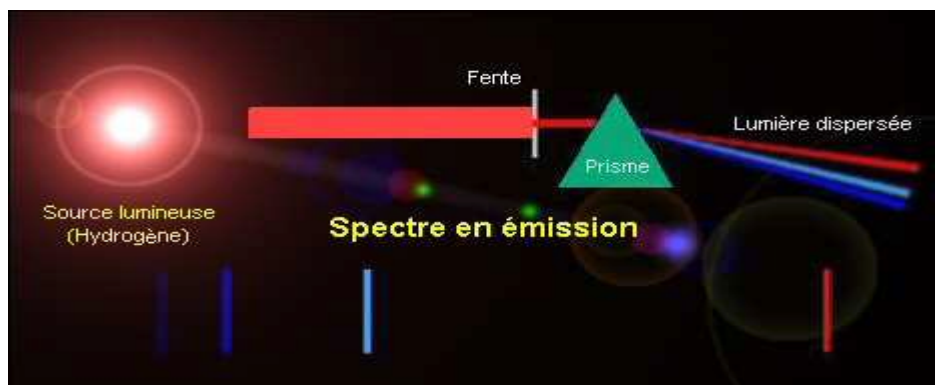


Figure. 1.3.3: Spectre d'absorption

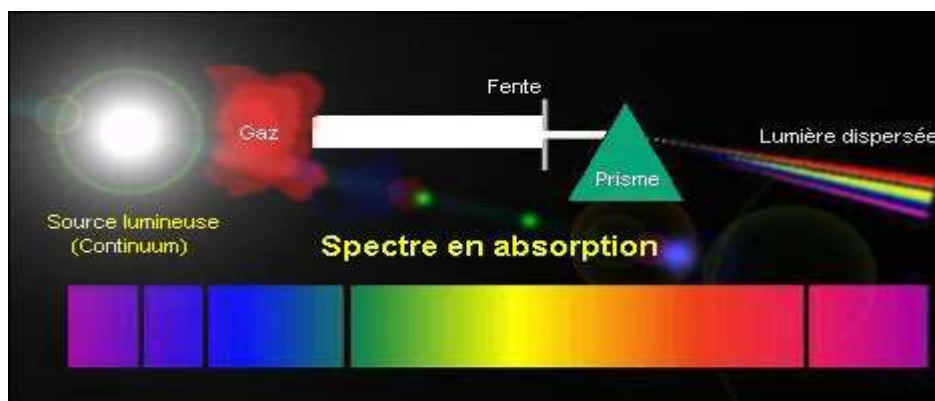


Figure. 1.3 : Spectre de la lumière solaire

### 1.3.4 Le rayonnement électromagnétique

Le spectre solaire s'étend de la région des ondes courtes ( $10^{-20}$ m) avec ses hautes fréquences, et sa richesse en énergie, jusqu'aux ondes longues ( $10^3$ m).

La distance (environ 150 millions km) qui sépare la terre du soleil affaiblit très fortement cette irradiation à son arrivée aux alentours de notre planète [8].

L'atmosphère terrestre est en grande partie très étanche à l'irradiation solaire. Elle ne permet le passage du rayonnement solaire à la surface de la terre que par deux ouvertures limitées par leurs fréquences. Le reste est absorbé [8].

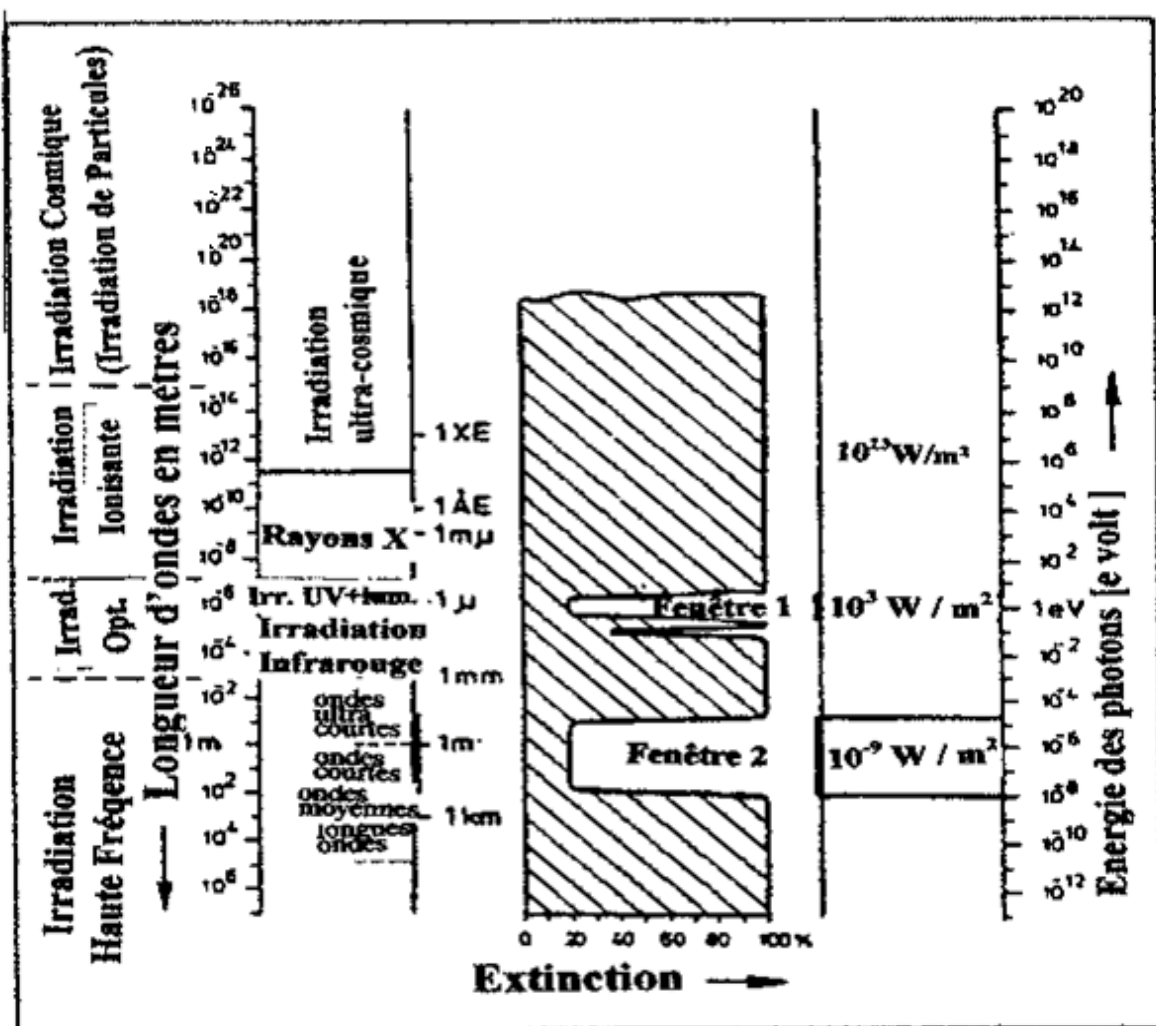


Figure. 1.4: Irradiation solaire à travers l'atmosphère [8].

Comme le montre la figure 1.4, ces fenêtres s'étendent du visible (lumière) aux ondes radio courtes et ultra-courtes.

La comparaison des énergies des deux fenêtres (la bande optique : environ 103 W/m<sup>2</sup> et la bande radio 9~10 W/m<sup>2</sup>) indique que seule la première bande est énergiquement importante. Presque la totalité de l'énergie solaire que nous recevons à la surface de la terre n'a comme accès que par cette fenêtre.

Le rayonnement électromagnétique solaire arrive à la surface de la terre en grande partie sous forme de lumière à travers la fenêtre atmosphérique N°1 (figure 1.5). Son intensité correspond environ à celle d'un corps noir avec une température 5785 °K. A partir de ce critère, on peut calculer son intensité en utilisant la loi de Stefan-Boltzmann :

$$I_s = k \cdot T_s^4, \text{ intensité de l'irradiation solaire W/m}^2 \quad (1.1)$$

$$k = 5,6710^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4, \text{ constante de Stéfan-Boltzmann}$$

$$T_s = 5785 \text{ °K, température à la surface solaire.}$$

$$I_s = 5,6710^{-8} \times 5,785^4 \cdot 10^{12} = \underline{63,5 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2} [8].$$

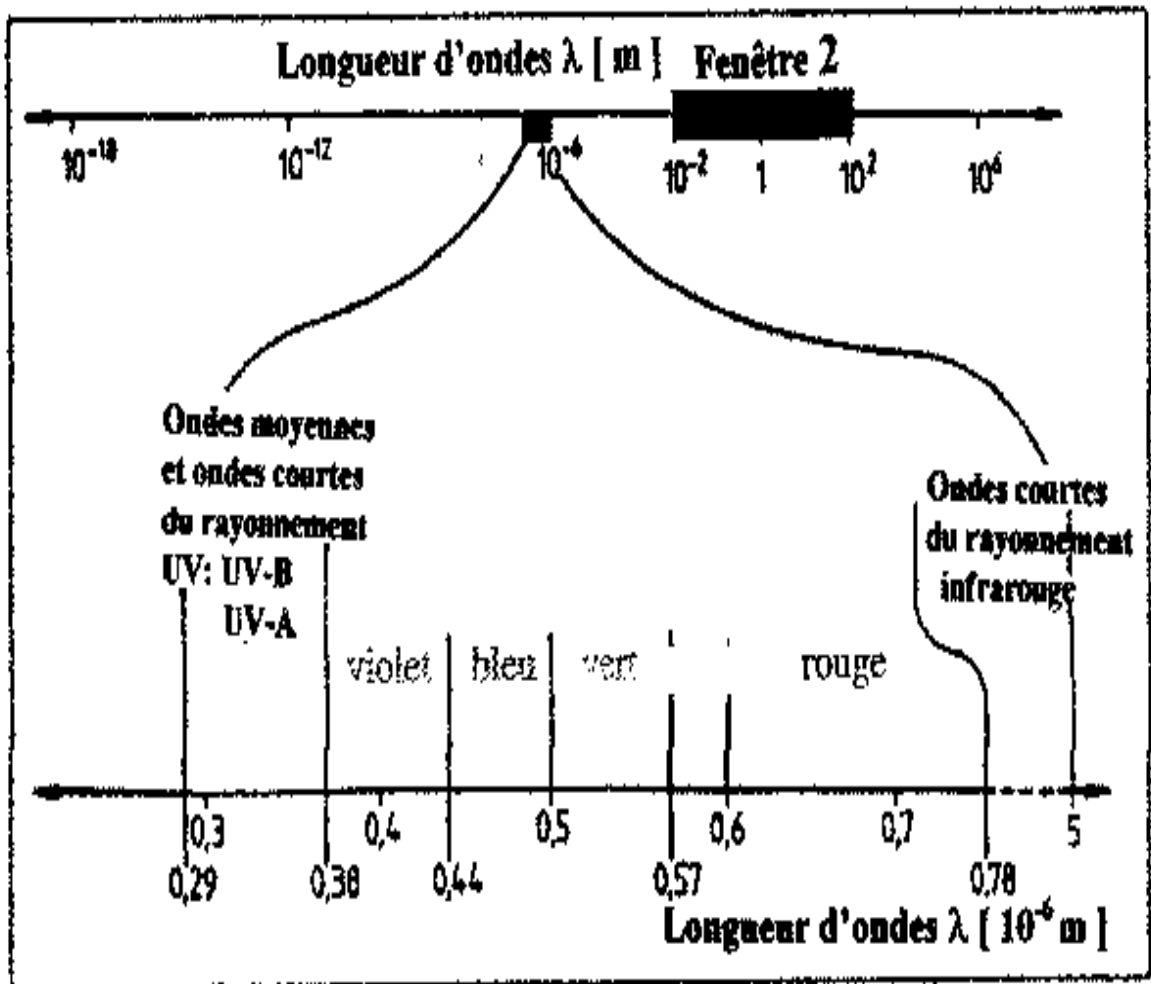


Figure. 1.5: Fenêtre atmosphérique N° 1 ouverte à l'irradiation solaire [8].

### 1.3.5 Puissance solaire Ps [8]

$$P_s = I_s \cdot F_s \quad (1.2)$$

$$I_s = 63,510^6 \text{ W/m}^2$$

$$F_s = \text{surface du soleil} = \pi \cdot D_s^2 \quad (1.3)$$

$$D_s^2 = 1,39 \cdot 10^9 \text{ m} \quad F_s = 6,07 \cdot 10^{18} \text{ m}^2$$

$$P_s = 62,5 \cdot 10^6 \cdot 6,07 \cdot 10^{18}$$

$$P_s = 3,8 \cdot 10^{26} \text{ W} = 3,8 \cdot 10^{20} \text{ MW} .$$

## 1.4 Grandeurs astronomiques

### 1.4.1 Mouvement de la terre autour du soleil

Le soleil est l'astre central de notre système planétaire, la terre est la troisième planète de notre système solaire. Son diamètre à l'équateur est de 12 700 km.

Elle tourne autour du soleil une fois par an (exactement en 365.25 jours) sur une orbite elliptique où le soleil est considéré comme un point fixe au milieu de cette ellipse. On note cependant une variation de distance durant son parcours annuel d'environ 3.3% entre les valeurs suivantes :

Distance maximum	152 millions km
Distance minimum	147 millions km

La distance moyenne de 149,5 millions km porte le nom d'une unité astronomique (1UA). A la vitesse de la lumière, cette distance correspond à 8,32 minutes. Cela signifie que la lumière solaire atteint la terre après 8.32 min. La variation de la distance entre le soleil et la terre influence l'intensité de l'irradiation sur le sol terrestre. Elle est également l'une des causes de la variation des saisons.

Les rapports géométriques entre le soleil et la terre sont représentés par la figure 1.6.

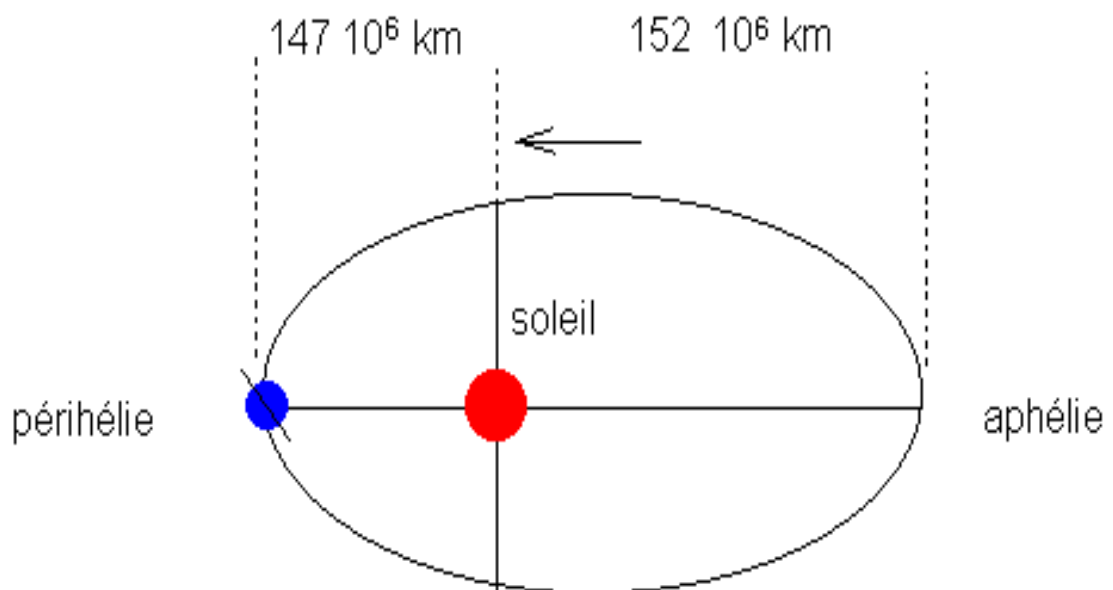
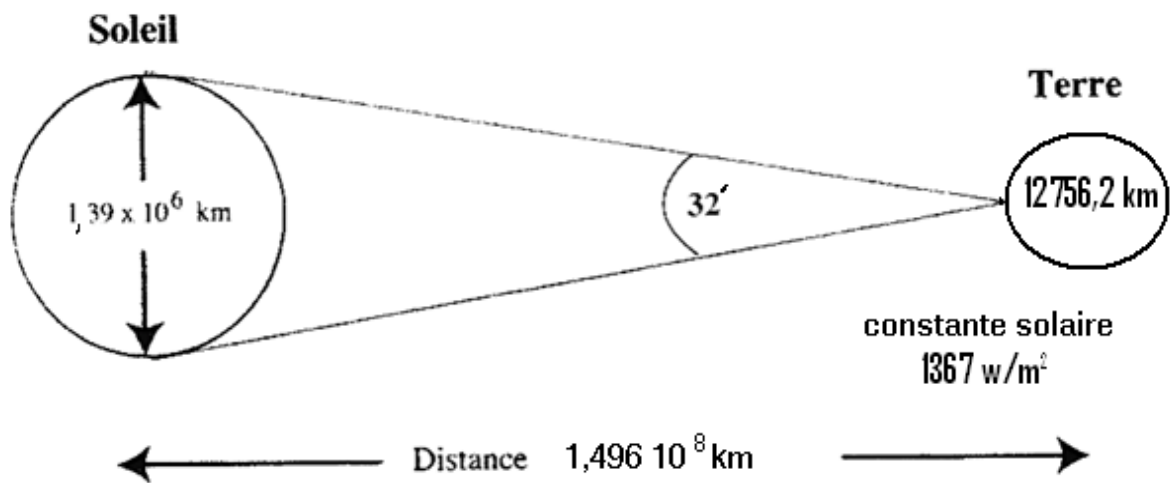


Figure. 1.6: Rapports géométriques : soleil-terre [9]

L'angle formé par le soleil et la terre quand ils sont séparés par cette unité astronomique à une valeur de 32 minutes ce qui signifie que les rayons solaires incidents ne sont pas tout à fait parallèles. Cependant, cette divergence est tellement minime qu'elle est souvent négligée dans les calculs.

Le point de l'orbite terrestre le plus proche du soleil porte le nom de périhélie. Il a une distance de 147 millions de km et tombe le 3 janvier. À cette période de l'année, l'hémisphère nord est en hiver pendant que l'hémisphère sud se trouve en été.

Par contre, le point le plus éloigné du soleil l'aphélie est atteint le 3 juillet avec une distance de 152 millions de km : l'hémisphère nord est en été, l'hémisphère sud est en hiver (figure 1.7)

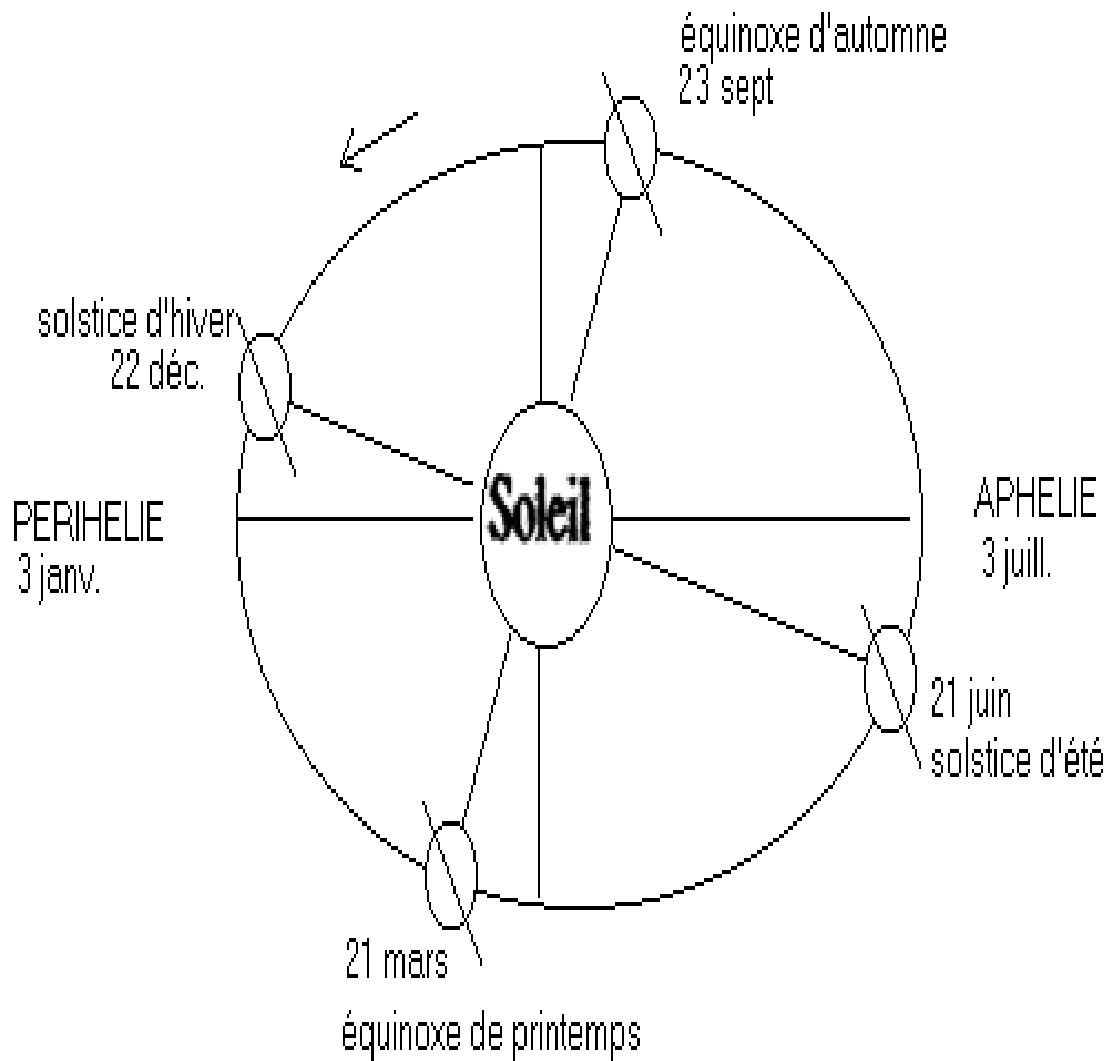


Figure. 1.7: Déclinaison terrestre et les différentes saisons de l'année [10].



## 1.4.2 Repérage du soleil

Deux repères peuvent déterminer la position du soleil : le repère horizontal et le repère équatorial [11].

### 1.4.2.1 Repère horizontal

Le repère horizontal est formé par le plan de l'horizon astronomique et la verticale du lieu. Dans ce repère, les coordonnées sont la hauteur  $\alpha$  et l'azimut  $\psi$ . (figure 1. 8)

➤ Azimut du soleil ( $\psi$ ) [12] :

C'est l'angle compris entre le plan méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil perpendiculaire au plan horizontal.

$$\text{« } \psi \text{ » est donnée par : } \sin(\psi) = \cos(\delta) * \frac{\sin(\omega)}{\cos(\alpha)} \quad [12] \quad (1.4)$$

➤ Hauteur du soleil ( $\alpha$ ) [12] :

C'est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal.

$$\sin \alpha = \sin(\varphi) * \sin(\delta) + \cos(\varphi) * \cos(\delta) * \cos(\omega) \quad [12] \quad (1.5)$$

$\varphi$  : Latitude du lieu

$\delta$  : Déclinaison

$\omega$  : Angle horaire

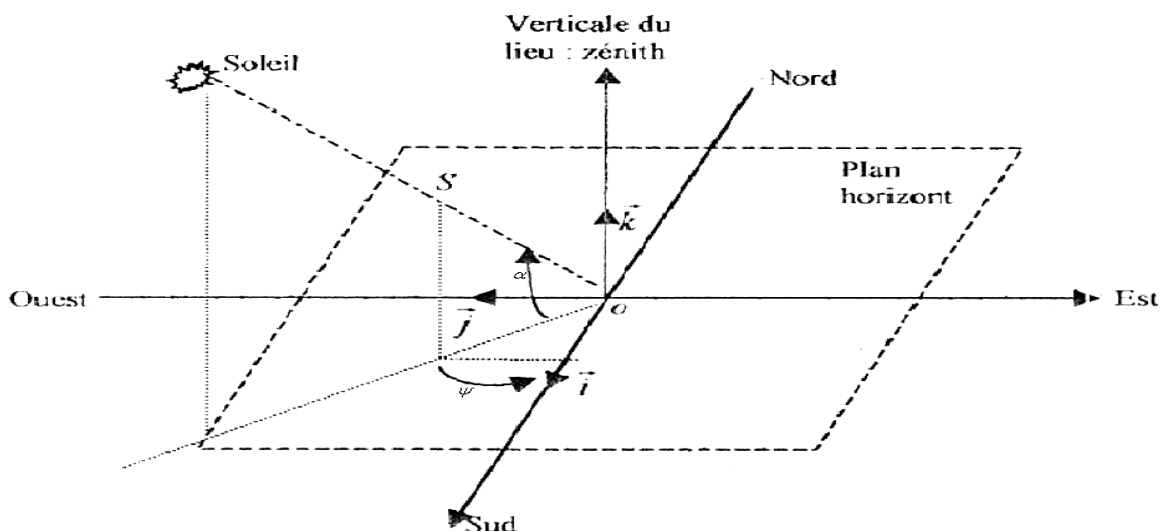


Figure. 1.8: Repère horizontal [12]

### 1.4.2.2 Repère équatorial

Pour déterminer la position du soleil dans le ciel nous utilisons deux grandeurs dans ce repère (figure 1.9) : l'angle horaire ( $\omega$ ) et la déclinaison ( $\delta$ ) . [12]

➤ Angle horaire ( $\omega$ ) : [12].

C'est l'angle formé par le plan méridien du lieu et celui passant par la direction du soleil

$$\omega = 15 * ( \text{TSV} - 12 ) \text{ [12].} \quad (1.6)$$

$\omega = 0$  à 12h TSV, soleil au zénith

$\omega < 0$  le matin

$\omega > 0$  1'après midi

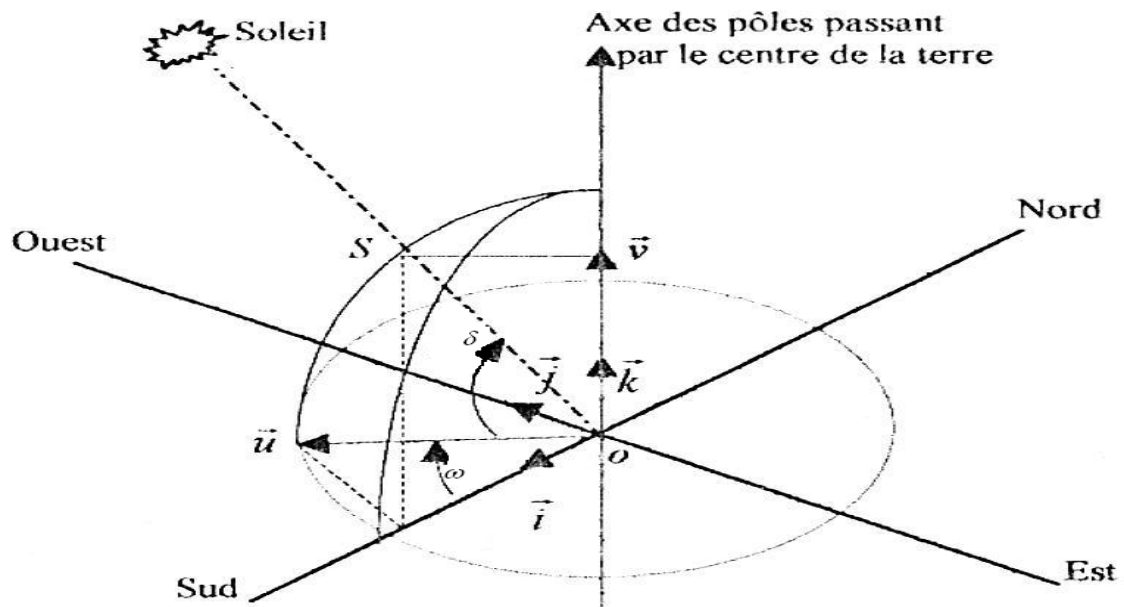


Figure. 1.9: Repère équatorial [12]

✓ Temps solaire vrai T.S.V :

La rotation de la terre sur elle même introduit la notion de journée solaire Moyenne (Temps Solaire Moyen): C'est le temps qui sépare en moyenne deux passages successifs au méridien d'un lieu. Une rotation complète de la terre autour d'elle-même correspond à 24 heures en moyenne. [12]

$15^\circ \longrightarrow 1\text{Heure}$  et  $1^\circ \longrightarrow 4\text{ Minutes}$

Le temps solaire vrai est une conséquence de la loi des aires, les passages du soleil au méridien du lieu ne se succèdent pas à 24 heures d'intervalle (car la trajectoire est elliptique et la vitesse variable).

✓ Equation du temps (ET):

C'est l'écart entre le temps solaire vrai et le temps solaire moyen dû à ses irrégularités.

$$ET = TSV - TSM \quad (1.7.a)$$

Aussi elle est calculée de la manière suivante [13] :

$$ET = 0,0172 + 0,4281 * (\cos(x)) - 7,3515 * (\sin(x)) - 3,3495 * (\cos(2x)) - 9,3619 * (\sin(2x)) \quad (1.7.b)$$

Avec :  $x = \frac{360 * j}{365}$  et j est le numéro du jour dans l'année.

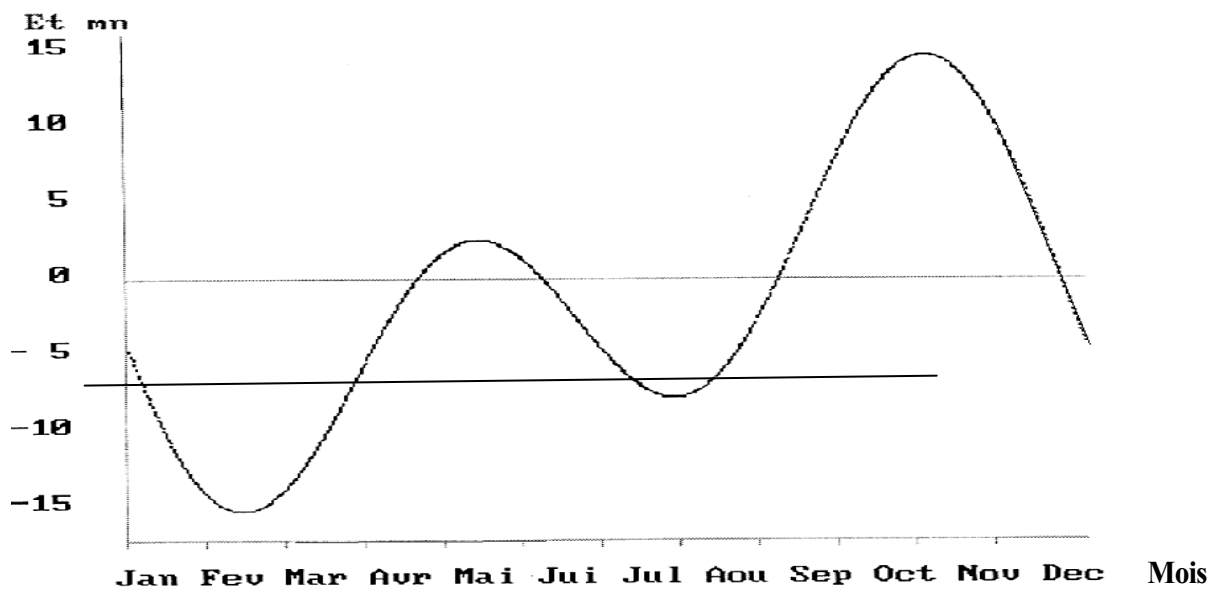


Figure. 1.10: Équation du temps [13]

d'où  $TSV = TSM + ET$  TU : Temps Universel (1.7.c)

$TSM = TU + CL$  CL : Correction de la Longitude (1.7.d)

$TL = TU - 1H$  TL : Temps local (1.7.e)

➤ La déclinaison :

C'est l'angle formé par le plan de l'équateur céleste et la direction du soleil (figure 1.9).

Elle peut être approximée par la relation de Cooper [13] :

$$\delta = 23,45 * \sin\left[\frac{360}{365} * (j + 284)\right] \quad (1.8)$$

$\delta$  est exprimé en degrés.

### 1.4.3 Relation entre coordonnées azimutales et équatoriales [11]

Dans la base  $(\vec{u}, \vec{v})$  du repère équatorial (figure 1.9) nous avons la relation vectorielle suivante :

$$\vec{OS} = \sin(\delta) \vec{v} + \cos(\delta) \vec{u} \quad (1.9)$$

En se référant au repère horizontal lié à la base  $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ , nous avons :

$$\vec{u} = -\cos(\varphi) \vec{i} + \sin(\varphi) \vec{k} \quad (1.9.a)$$

$$\vec{v} = [\cos(\omega) \cdot \sin(\varphi)] \vec{i} \sin(\omega) \vec{j} + [\cos(\omega) \cdot \cos(\varphi)] \vec{k} \quad (1.9.b)$$

Dans le repère horizontal (figure 1.8)  $\vec{OS}$  devient :

$$\vec{OS} = [\cos(\alpha) \cdot \cos(\psi)] \vec{i} + [\cos(\alpha) \cdot \sin(\psi)] \vec{j} + \sin(\alpha) \vec{k} \quad (1.10)$$

Si nous remplaçons  $\vec{u}$  et  $\vec{v}$  par leurs expressions, nous avons :

$$\begin{aligned} \vec{OS} = & [\cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \cos(\varphi) - \sin(\delta) \cdot \cos(\varphi)] \vec{i} + [\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)] \vec{j} \\ & + [\cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \cos(\varphi) + \sin(\delta) \cdot \sin(\varphi)] \vec{k} \end{aligned} \quad (1.11)$$

en identifiant les relations (1.10) et (1.11) on obtient :

$$\cos(\alpha) \cdot \cos(\psi) = \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \cos(\varphi) - \sin(\delta) \cdot \cos(\varphi) \quad (1.12)$$

$$\cos(\alpha) \cdot \sin(\psi) = \cos(\delta) \cdot \sin(\omega) \quad (1.13)$$

$$\sin(\alpha) = \sin(\delta) \cdot \sin(\varphi) + \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(\omega) \quad (1.14)$$

De (1.14) nous déduisons les angles  $\omega_L$  et  $\omega_C$  pour le lever et le coucher du soleil sachant que  $\alpha$  s'annule pour ces deux instants :

$$\omega_C = -\omega_L = \cos^{-1}[-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)] \quad (1.15)$$

L'insolation journalière potentielle est déterminée par :

$$SS_0 = \frac{(\omega_C - \omega_L)}{15} \text{ ( en heure )} \quad (1.16)$$

$$= \frac{2}{15} \cdot \cos^{-1}[-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)] \quad (1.17)$$

## 1.5 Irradiation solaire globale

Le rayonnement solaire s'explique dans un premier temps par la définition du flux solaire parvenant à la limite de l'atmosphère, et dans un second temps, par la définition du flux reçu au sol, en fonction des effets de transmission et de diffusion de l'atmosphère.

### 1.5.1 Constante Solaire $I_0$

La puissance solaire moyenne reçue à la limite de l'atmosphère pour une surface orientée perpendiculairement aux rayons incidents est donnée par la constante solaire  $I_0$ .

Dans notre étude, nous adoptons la valeur retenue par L'O.M.M. :  $I_0 = 1367 \text{ w/m}^2$ .

En fait, la constante solaire varie de  $\pm 3,3 \%$  au cours de l'année ; cette variation est due à l'excentricité de l'orbite terrestre. La correction terre-soleil  $C_{t-s}$  peut être évaluée par la relation suivante [13]:

$$C_{t-s} = 1 + 0,033 * \cos \left( 360 * \frac{j}{365} \right) \quad (1.18.a)$$

$$\text{La constante solaire corrigée est alors: } E = I_0 * C_{t-s} \quad (1.18.b)$$

L'évolution annuelle de E est représentée par la figure 1.11

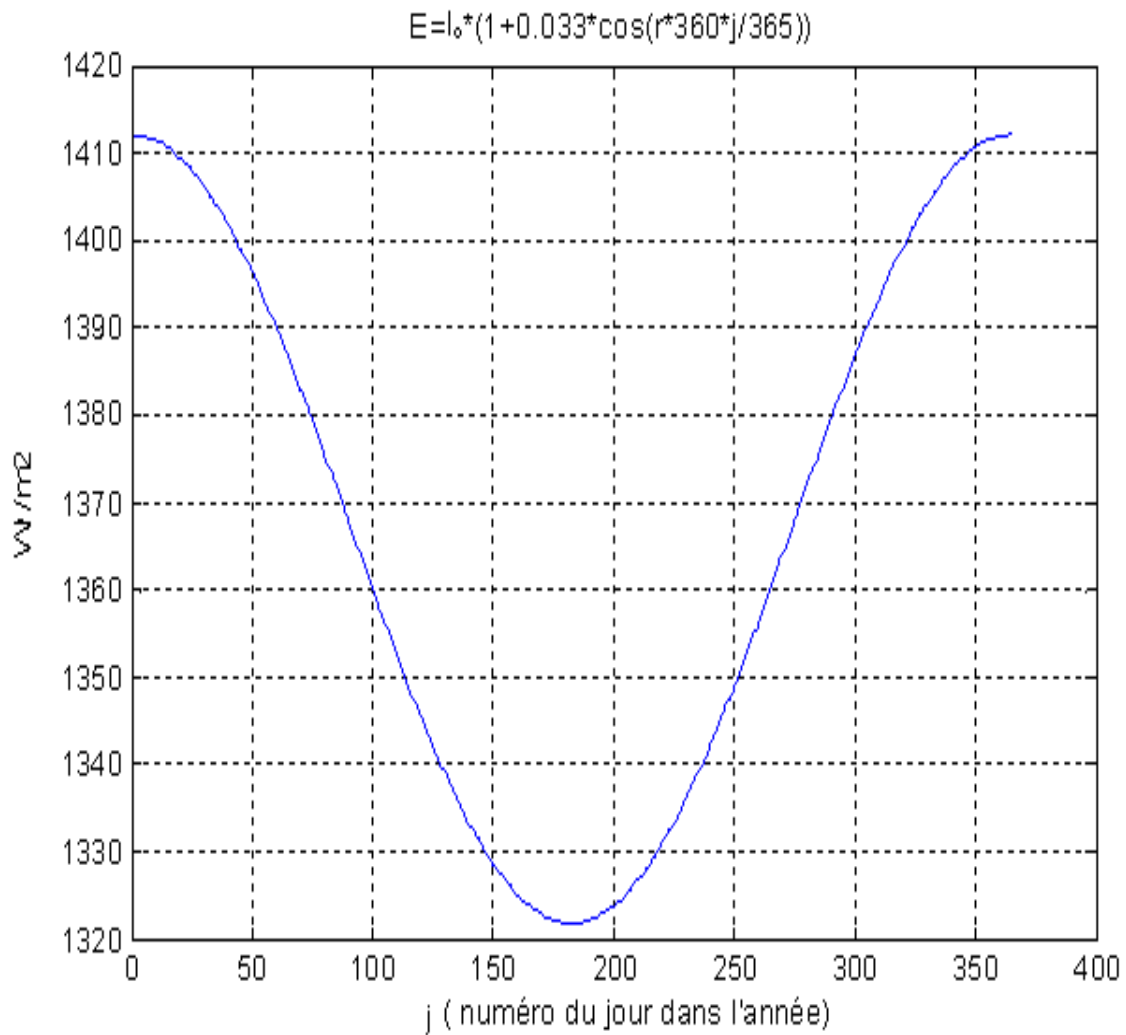


Figure. 1.11: Évolution annuelle de la constante solaire

Nous remarquons que le maximum est obtenu au mois de Janvier avec la valeur 1413 w/m<sup>2</sup>, le minimum au début de Juillet avec la valeur 1320 w/m<sup>2</sup>.

Avec:

j: numéro du jour dans l'année.

j=1 pour le 01 janvier.

j =365 pour le 31decembre.

### 1.5.2 Spectre solaire hors atmosphère [8]

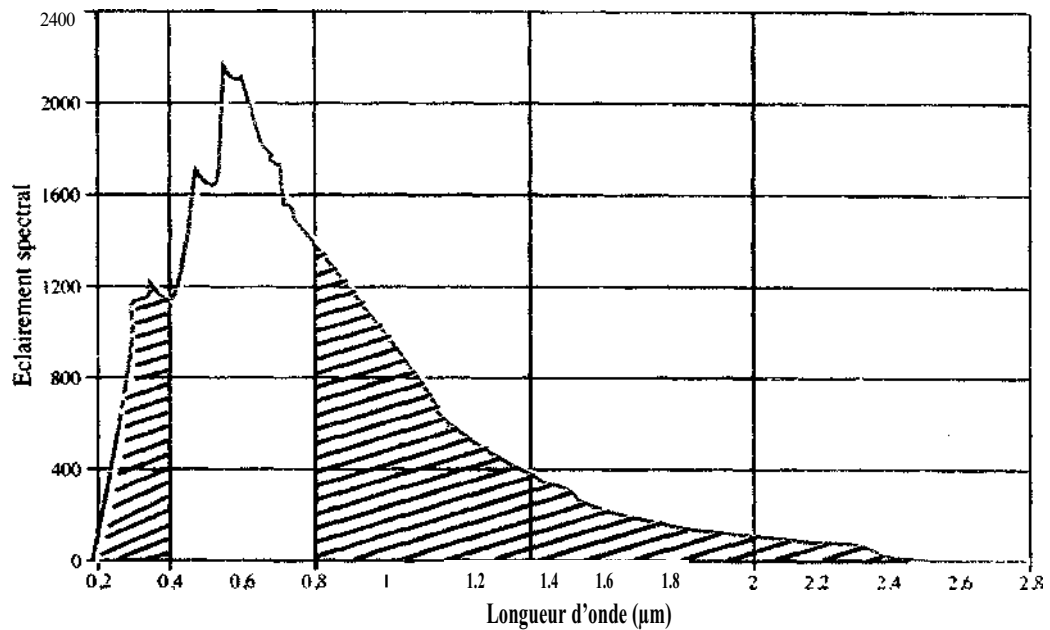


Figure. 1.12: Spectre solaire hors atmosphère

Etendue du spectre	Longueur d'onde [µm]	%
Ultraviolet	0 à 0,38	7
lumière visible	0,38 à 0,78	47,3
infrarouge	0,78 à ∞	45,7

Tableau 1.1 : Représentation de la densité de l'irradiation solaire hors atmosphère classifiée en trois bandes de longueur d'onde (classification standard de la NASA).

### 1.5.3 Flux radiatif reçu sur un plan horizontal

Le flux solaire hors atmosphère reçu sur un plan horizontal pour un site de hauteur  $\alpha$  du soleil est défini comme la projection du flux normal sur ce plan horizontal :

$$I_0 = E \cdot \sin(\alpha) \quad (1.19)$$

Où  $\sin(\alpha)$  est donnée par l'équation (1.14).

### 1.5.4 Irradiation globale journalière extraterrestre

L'irradiation théorique journalière  $H_0(j)$  reçue sur une surface horizontale s'obtient en intégrant la relation (1.19) du lever au coucher du soleil [11]

$$H_0(j) = \int_{\text{lever}}^{\text{coucher}} E \cdot \sin(\alpha) \cdot dt$$

$$H_0(j) = \left(\frac{24}{\pi}\right) \cdot E(j) [\cos(\varphi \cdot r) \cdot \cos(\delta(j) \cdot r) \cdot \sin(\omega_1(j) \cdot r) + \dots + r \cdot \omega_1(j) \cdot \sin(\varphi \cdot r) \cdot \sin(\delta(j) \cdot r)] \cdot 3600 \quad (1.20)$$

$$\text{avec } r = \frac{2\pi}{360}$$

$H_0(j)$  est exprimé en joules / m<sup>2</sup> ;  $\omega_1(j)$  est l'angle de l'heure du lever, exprimé en degrés.

### 1.5.5 Irradiation globale horaire hors atmosphère

L'irradiation  $dI_{0h}$  reçue sur une surface horizontale durant le temps  $dt$  est [11] :

$$dI_{0h} = E \sin(\alpha) dt$$

A partir de (1.9), (1.14) et (1.19) nous pouvons déduire que :

$$dI_{0h} = \left(\frac{12}{\pi}\right) \cdot E [A+B \cos(\omega)] d(\omega) \quad (1.21)$$

$$\text{Avec } A = \sin(\delta) \cdot \sin(\varphi)$$

$$B = \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi)$$

L'intégration de l'équation (1.21) sur une période d'une heure, nous donne le flux radiatif global horaire hors atmosphère  $I_0(h, j)$  :

$$I_0(h, j) = E [A+B \cdot \left(\frac{24}{\pi}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{24}\right) \cdot \cos(\omega_h)] \quad (1.22)$$

$I_0(h, j)$  : flux radiatif global horaire hors atmosphère relatif à l'heure  $h$  et au jour  $j$ .

$\omega_h$  : angle horaire au voisinage de l'heure  $h$ .



### 1.5.6 Variabilité de $H_0(j)$ pour les deux sites de Bouzaréah et de Ghardaïa

La figure 1.13 montre l'évolution de  $H_0(j)$  pour les deux sites de Bouzaréah et de Ghardaïa.

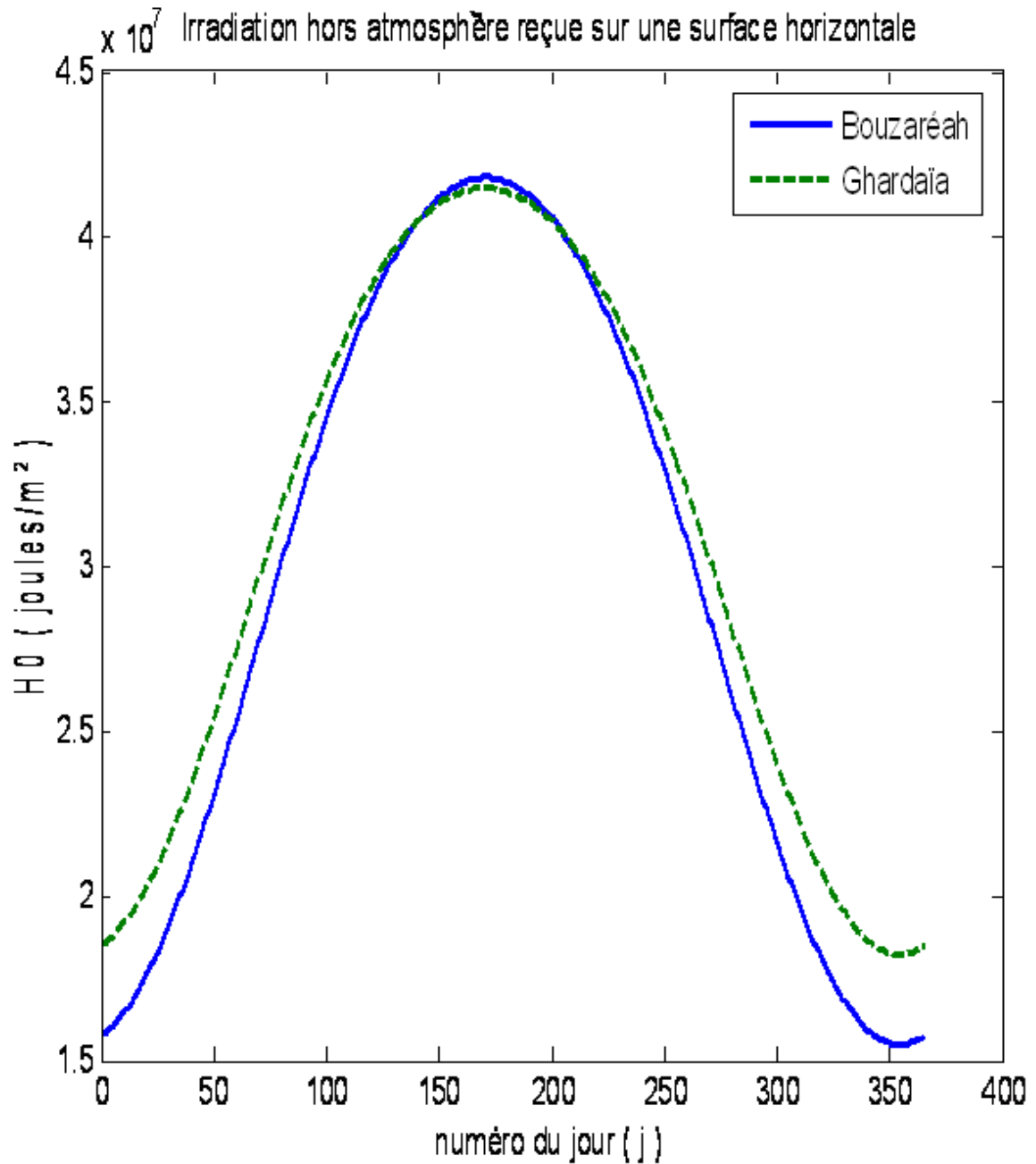


Figure. 1.13: Irradiation journalière extraterrestre des deux sites de Bouzaréah et de Ghardaïa

## 1.6 Insolation

### 1.6.1 Insolation potentielle

En tant que paramètre météorologique, le rayonnement solaire au niveau du sol est caractérisé par l'insolation  $SS$  qui correspond à l'intervalle de temps durant lequel le disque solaire a été visible. A la limite de l'atmosphère, l'insolation journalière est identique à l'insolation théorique  $SS_0(j)$  qui correspond à la durée du jour. Elle dépend uniquement de la latitude du site et de la déclinaison. Elle est donnée par la relation (1.17):

$$SS_0 = \frac{2}{15} * \cos^{-1}[-\tan(\varphi) * \tan(\delta)].$$

La figure 1.14 montre l'évolution de  $SS_0(j)$  pour les deux sites de Bouzaréah et de Ghardaïa

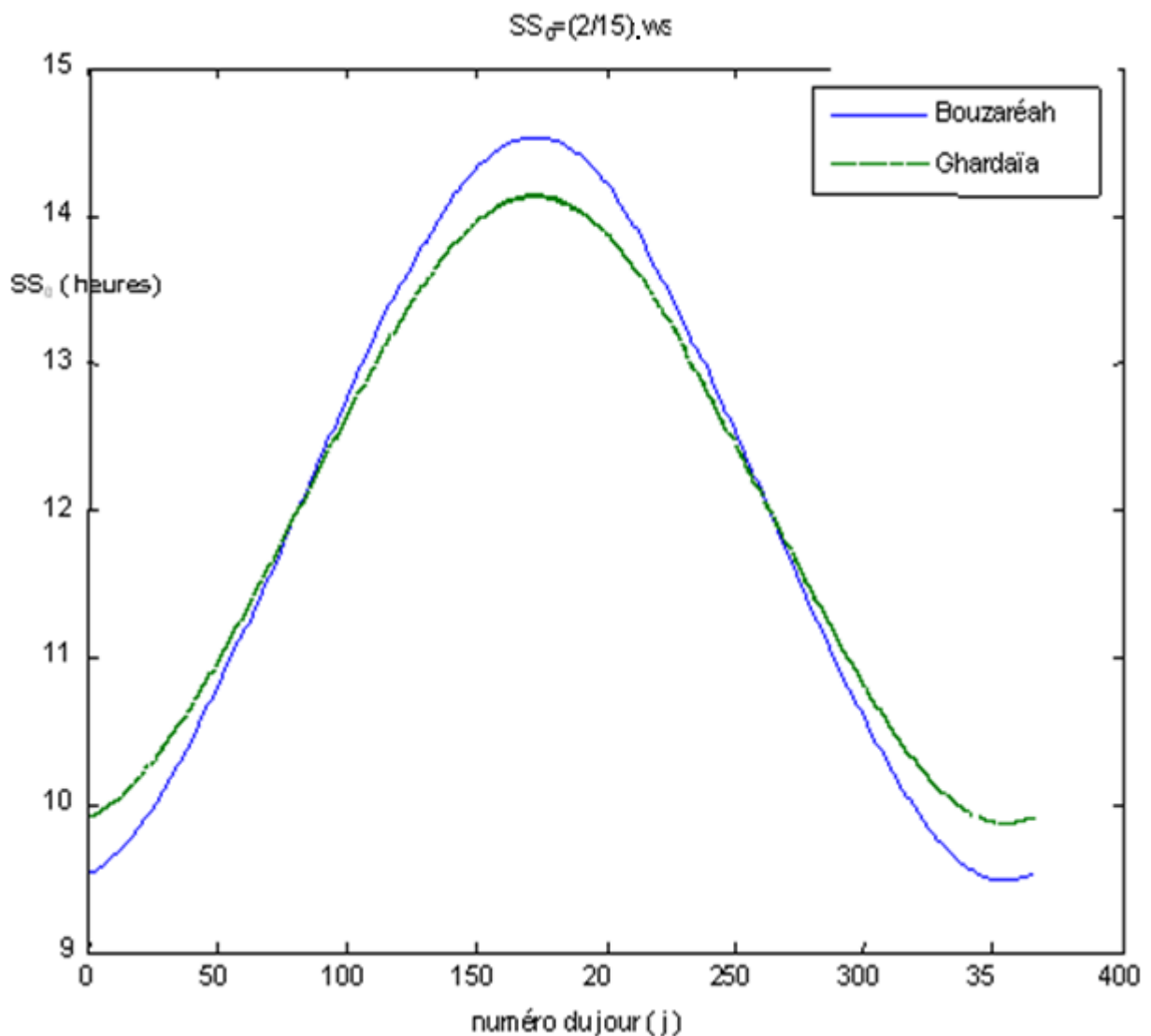


Figure. 1.14: Insolation potentielle des deux sites de Bouzaréah et de Ghardaïa

### 1.6.2 La fraction d'insolation

La fraction d'insolation correspond au rapport entre la durée d'insolation journalière réelle  $SS$  et la durée d'insolation journalière théorique  $SS_0$  :

$$\sigma_j = SS / SS_0 \quad [14] \quad (1.23)$$

### 1.7 Effet de l'atmosphère sur le rayonnement solaire [8]

L'atmosphère terrestre n'est transparente au rayonnement solaire que sur deux fenêtres. Comme nous l'avons déjà vu, la fenêtre la plus importante sur le plan énergétique est la fenêtre optique. L'irradiation solaire par cette fenêtre optique perd de son intensité en traversant l'atmosphère par les effets suivants:

- Diffusion du rayonnement par l'atmosphère et par la surface terrestre.
- Dispersion du rayonnement solaire à travers les composants de l'air.
- Absorption du rayonnement solaire par l'atmosphère.

90 % de l'énergie solaire que reçoit la terre s'étend sur une région spectrale de 0,3 à 1,5 $\mu$ m (figure 1.15).

La capacité terrestre de rejet par réflexion de l'irradiation solaire dans l'atmosphère, au niveau de la surface du sol est appelée Albédo. D'après les mesures récentes, la valeur de l'albédo représente 28% de la constante solaire. La dispersion de l'irradiation solaire par les composants de l'atmosphère, comme les molécules de l'air, les poussières et impuretés (aérosols d'origine marine ou industrielle) affaiblit fortement le rayonnement solaire direct. Une partie de cette lumière dispersée est réfléchiée vers l'espace contribuant à l'augmentation de l'albédo. Le reste arrive à la surface de la terre comme rayonnement diffus.

Le troisième effet qui affaiblit l'irradiation solaire directe est son absorption sélective par certains gaz contenus dans l'atmosphère comme  $H_2O$  ,  $CO_2$  ,  $O_2$  ,  $O_3$ ,  $CH_4$  , les halogènes (Figure. 1.15), (Figure. 1.16).

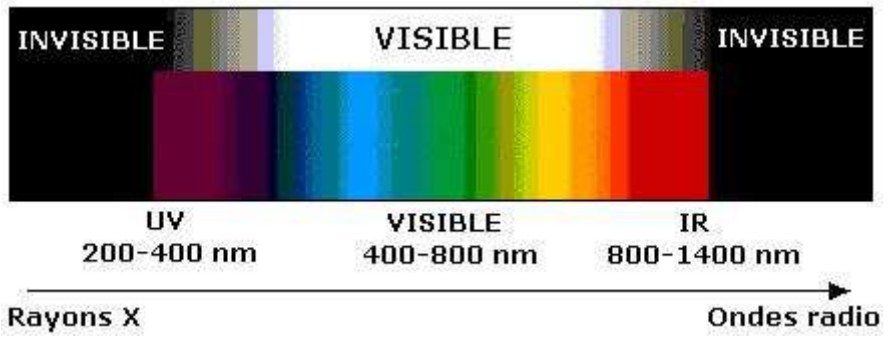
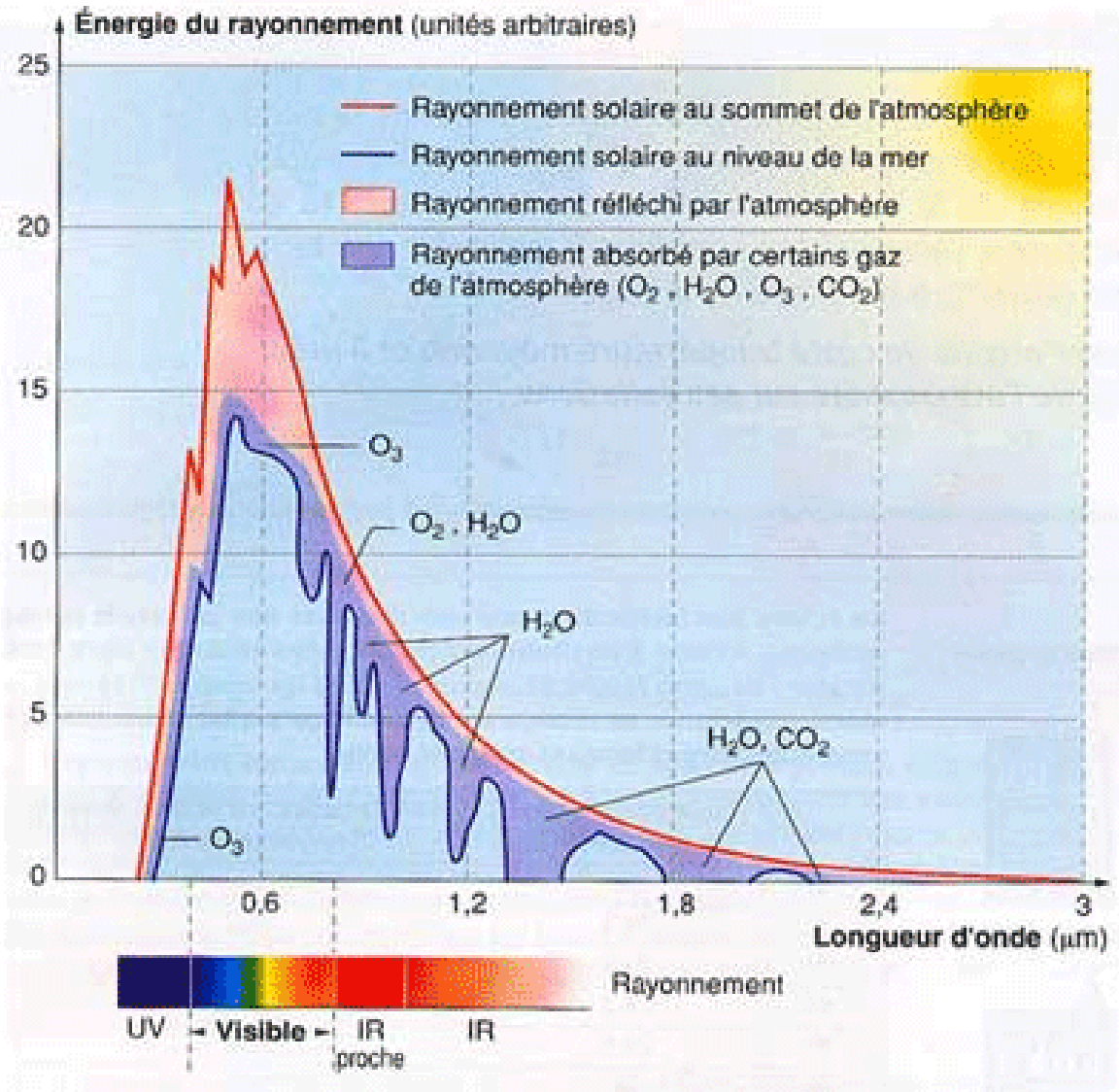


Figure. 1.15: Répartition spectrale solaire hors atmosphère et au niveau du sol [8]

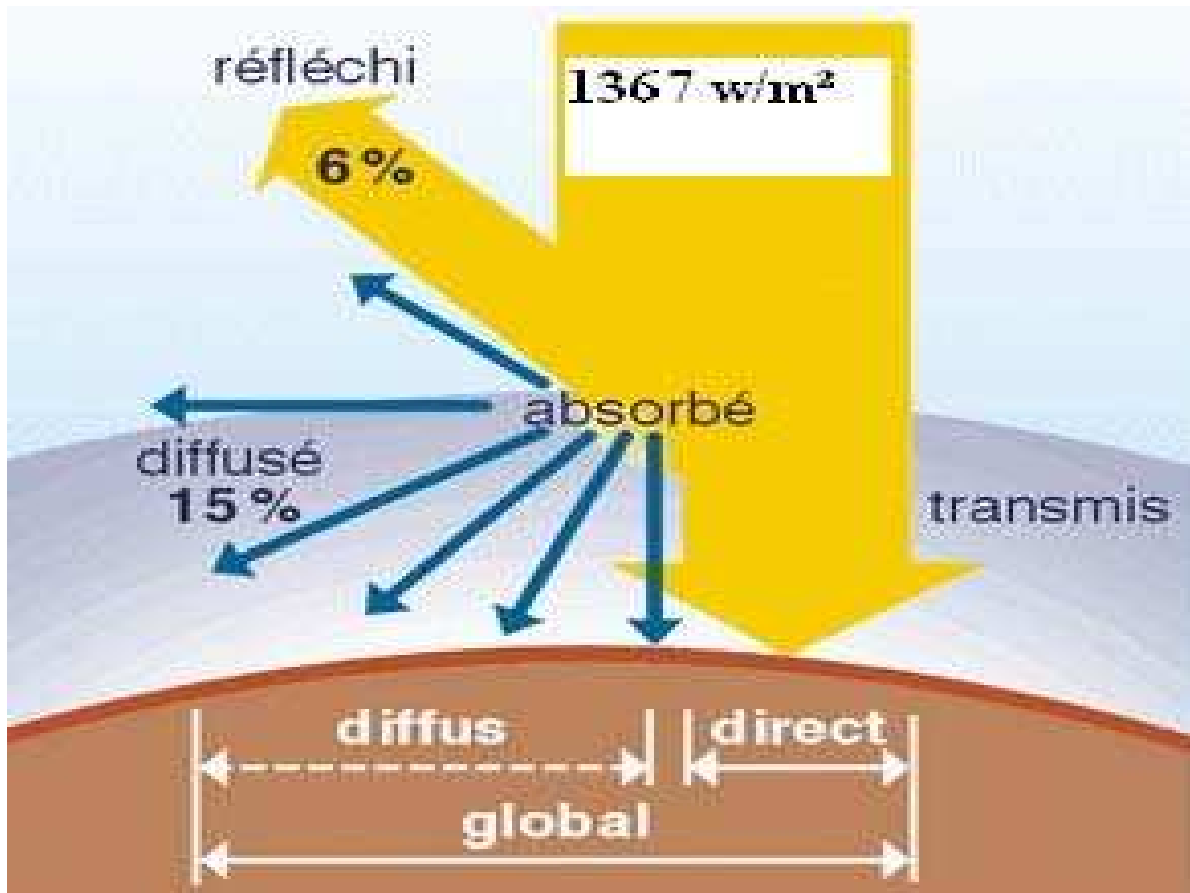


Figure. 1.16: Schéma de diffusion et d'absorption dans l'atmosphère [14].

Le tableau 1.2 permet de montrer les principales longueurs d'ondes absorbées en fonction des différents gaz considérés.

<b>Gaz</b>	<b>Longueurs d'ondes absorbées</b>
<u>Ozone</u>	<u>De 0.2 à 0.3 <math>\mu\text{m}</math></u>
<u>Oxygène</u>	<u>Inférieures à 0.25 <math>\mu\text{m}</math></u>
<u>Gaz carbonique</u>	<u>Principalement de 1.8 à 4 <math>\mu\text{m}</math></u>
<u>Vapeur d'eau</u>	<u>Principalement de 1.8 à 4 <math>\mu\text{m}</math></u>

Tableau 1.2: Absorption spectrale des principaux gaz [8].

## 1.8 Irradiation solaire au niveau du sol

Contrairement à l'irradiation solaire extra-terrestre, le rayonnement à la surface du sol se compose de deux parties:

- Le rayonnement direct I: c'est ce qui reste de l'irradiation hors atmosphère lorsque les pertes dues à la réflexion et à la dispersion du rayonnement solaire à travers les composants de l'air sont soustraites.
- Le rayonnement diffus D: ce rayonnement est dû à la dispersion du rayonnement direct dans l'atmosphère.

Il en résulte donc que le rayonnement global  $H_{\text{reç}}$  à la surface de la Terre est la somme des rayonnements diffus D et direct I. Pour une surface horizontale, on a donc [1]:

$$H_{\text{reç}} = D + I \quad [\text{Joules} / \text{m}^2] \quad (1.24)$$

avec :  $H_{\text{reç}}$  flux radiatif global reçu au sol.

I : flux direct horaire ou journalier.

D : flux radiatif diffus reçu au sol.

## 1.9 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'introduire les notions de base nécessaires pour l'étude du rayonnement solaire. Le chapitre suivant, où nous allons tenir compte de l'irradiation globale  $H_{\text{reç}}$  mesurée au sol, nous permettra de présenter les fonctions de corrélations pour l'évaluation de  $H_{\text{reç}}$  pour les deux sites de Bouzaréah et de Ghardaïa à partir de deux indices principaux :

- L'indice de clarté  $K_t$ , qui est équivalent au rapport entre le rayonnement reçu au sol, et le rayonnement hors atmosphère.
- La fraction d'insolation qui correspond au rapport entre la durée d'insolation journalière réelle  $SS$  et la durée d'insolation journalière théorique  $SS_0$ .

Ces deux indices seront définis à pas de temps mensuel et journalier.

## **CHAPITRE 2**

### **CARACTERISATION EXPERIMENTALE DES SITES DE BOUZAREAH ET DE GHARDAIA**

#### 2.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présenterons une analyse physique des données climatiques nécessaire à la caractérisation expérimentale comparative de deux sites : le site de Bouzaréah et le site de Ghardaïa.

Le but de l'analyse des paramètres collectés est de calculer des moyennes portant sur un nombre conséquent d'années de mesures. Cette approche permet d'assigner une désignation climatique globale à l'environnement géographique des deux sites étudiés. Nous disposerons ainsi d'un volume d'information non négligeable, incluant la connaissance des distributions statistiques des moyennes et des maxima journaliers des principaux paramètres météorologiques et radiométriques.

Dans le cadre des applications énergétiques, les données ainsi obtenues sont utiles à l'étude du fonctionnement et à l'évaluation de rendements et de consommations annuelles et mensuelles de tout dispositif faisant appel au gisement solaire.

#### 2.2 Présentation générale des sites de Bouzaréah et de ghardaia

##### 2.2.1 Le site de Bouzaréah

Le site de Bouzaréah est une entité, appelée Centre de Développement des Énergies Renouvelables – CDER -, situé sur la façade méditerranéenne nord-algérien à 36.8° de latitude Nord; 3,09° de longitude Est ; dans la banlieue algéroise. A 345 mètre d'altitude, le CDER est considérée comme le belvédère d'Alger (Figure 2.1).

Le CDER a assuré depuis l'indépendance la continuité des activités sur les énergies renouvelables et solaires [5].



Figure. 2.1: Vue satellitaire du site de Bouzaréah [16].

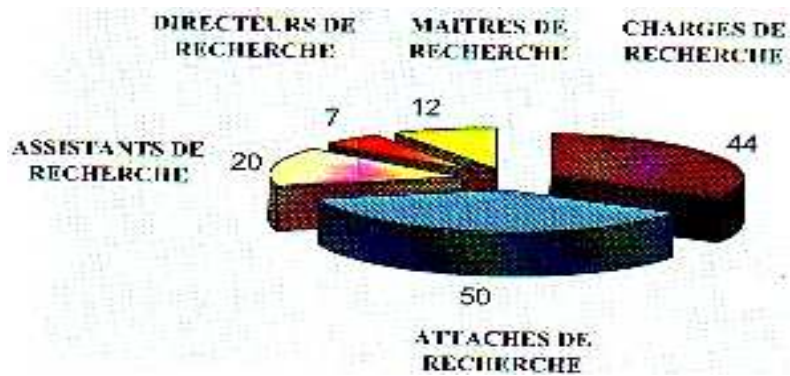


Figure. 2.2: Effectif des personnels chercheurs du CDER [15].





Figure. 2.3: Système expérimental éolien-photovoltaïque couplé au réseau du CDER [15].



Figure. 2.4: Appareils de mesure radiométrique du CDER [17].



## 2.2.2 Le site de Ghardaïa

Le site de Ghardaïa est situé au centre de l'Algérie et distant de 600 km d'Alger à 32.38° de latitude Nord ; 3,81° de longitude Est. ; à l'altitude de 450 mètres. Présentant un climat désertique (Figure 2.5), ce site est limité du côté nord par la Wilaya de Laghouat (200 km) ; à l'est par la Wilaya de Ouargla (200 km) ; au sud-ouest par la Wilaya d'Adrar (400 km) ; à l'ouest par la Wilaya d'El-Bayadh (350 km).

Ce site est une nouvelle structure scientifique qui a été mise en place 2002 par le ministère de l'Enseignement supérieur et la Recherche scientifique à Ghardaïa. Il s'agit de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables – URAER – [5].

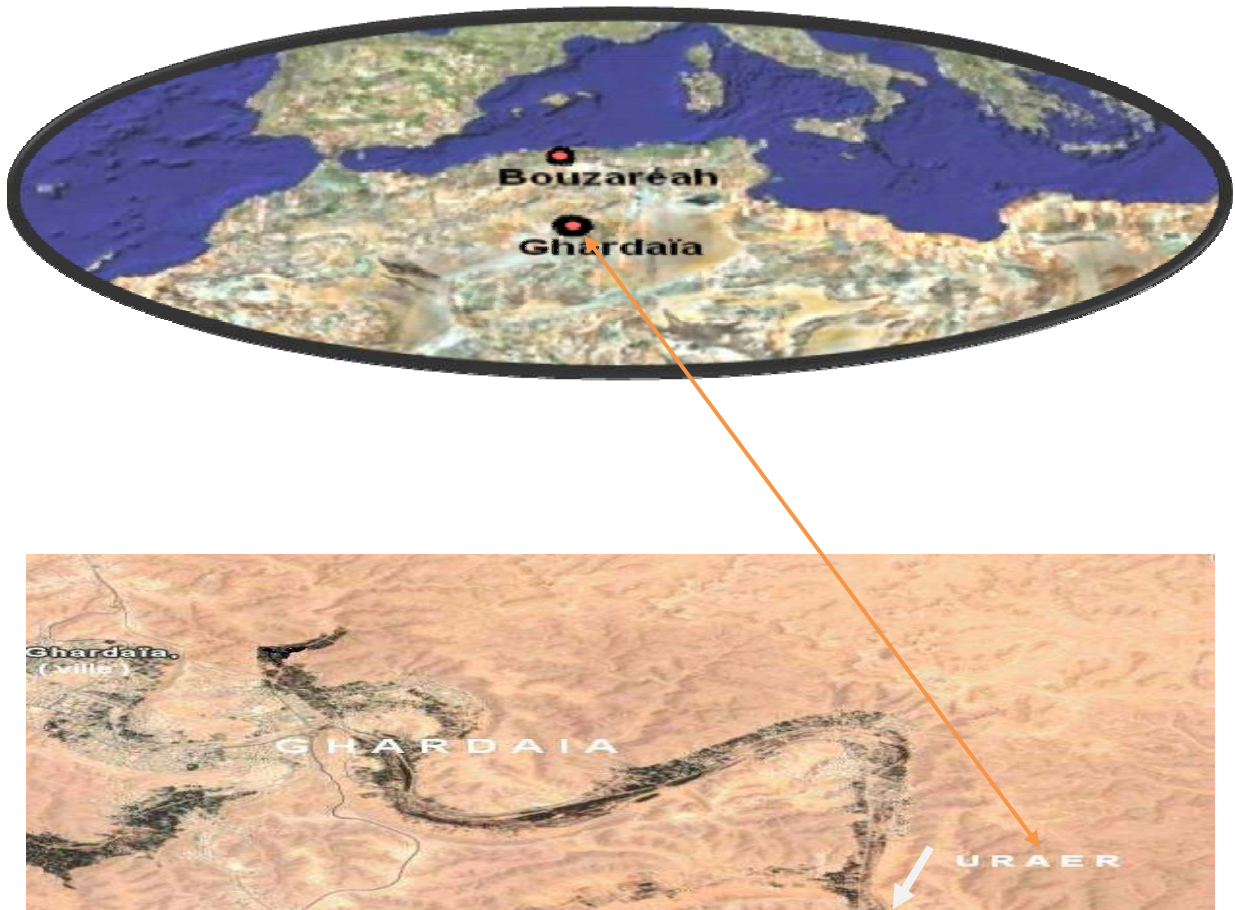


Figure. 2.5: Vue satellitaire du site de Ghardaïa [16].

URAER – Site de Ghardaïa -	
Effectif des Personnels	> 80
Effectif des Chercheurs	> 33

Tableau 2.1 Effectif des Personnels de l'URAER[15].

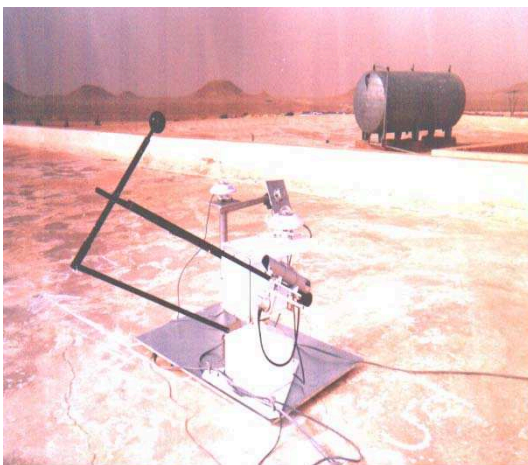
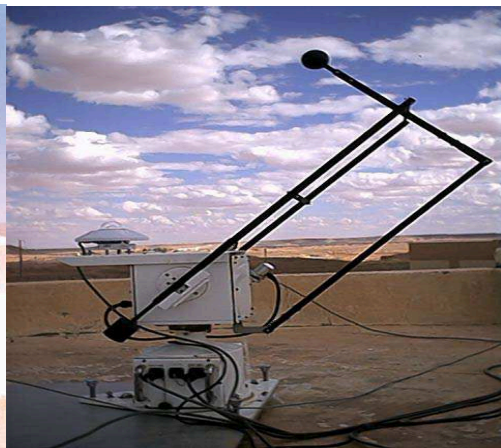
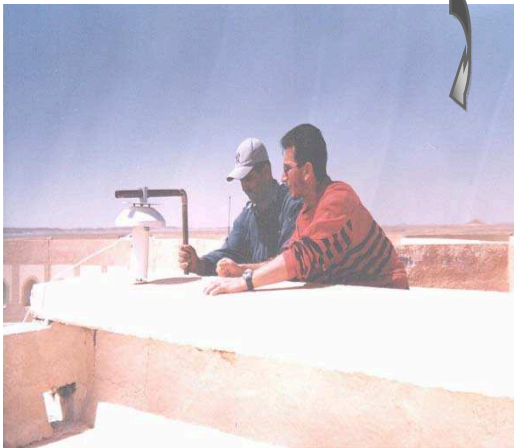


Figure. 2.6: Appareils récents de mesure radiométrique de l'URAER.

## 2.3 Mesure du rayonnement solaire

### 2.3.1 Introduction

Les caractéristiques propres de chaque grandeur physique sont définies en fonction de leur évolution, de leur ordre de grandeur, et enfin des techniques et appareils utilisés pour leur mesure.

Nous avons vu que Le rayonnement solaire est le rayonnement électromagnétique émis par le soleil, et que le rayonnement solaire incident au sommet de l'atmosphère est appelé rayonnement solaire extraterrestre ; 97 % de celui-ci sont compris dans le domaine spectral 0,29  $\mu\text{m}$  à 3,0  $\mu\text{m}$ , et c'est ce qu'on dénomme le rayonnement de courtes longueurs d'onde, et qu'une partie du rayonnement solaire extraterrestre traverse l'atmosphère pour atteindre la surface terrestre, tandis qu'une autre partie est diffusée et/ou absorbée dans l'atmosphère par les molécules gazeuses, les particules d'aérosols, et les gouttelettes d'eau et cristaux de glace présents dans les nuages.

Le rayonnement solaire(ou flux radiatif solaire) reçu au sol est donc défini par ses deux composantes directe et diffuse. Toutefois, le rayonnement global reçu sur un plan horizontal à la surface du sol est plus facilement mesurable.

### 2.3.2. Mesure satellitaire

La télédétection se définit comme la technique d'observation à distance par la mesure et le traitement du rayonnement électromagnétique réfléchi ou émis vers l'espace dans le but d'en tirer des informations concernant sa nature et ses propriétés.

Le capteur radiométrique embarqué sur satellite mesure :

- l'énergie solaire réfléchi par la surface de la terre.
- l'énergie émise par la surface de la terre sous forme de flux infrarouge thermique.
- l'énergie émise par l'atmosphère (rayonnement solaire réfléchi par une couche nuageuse).



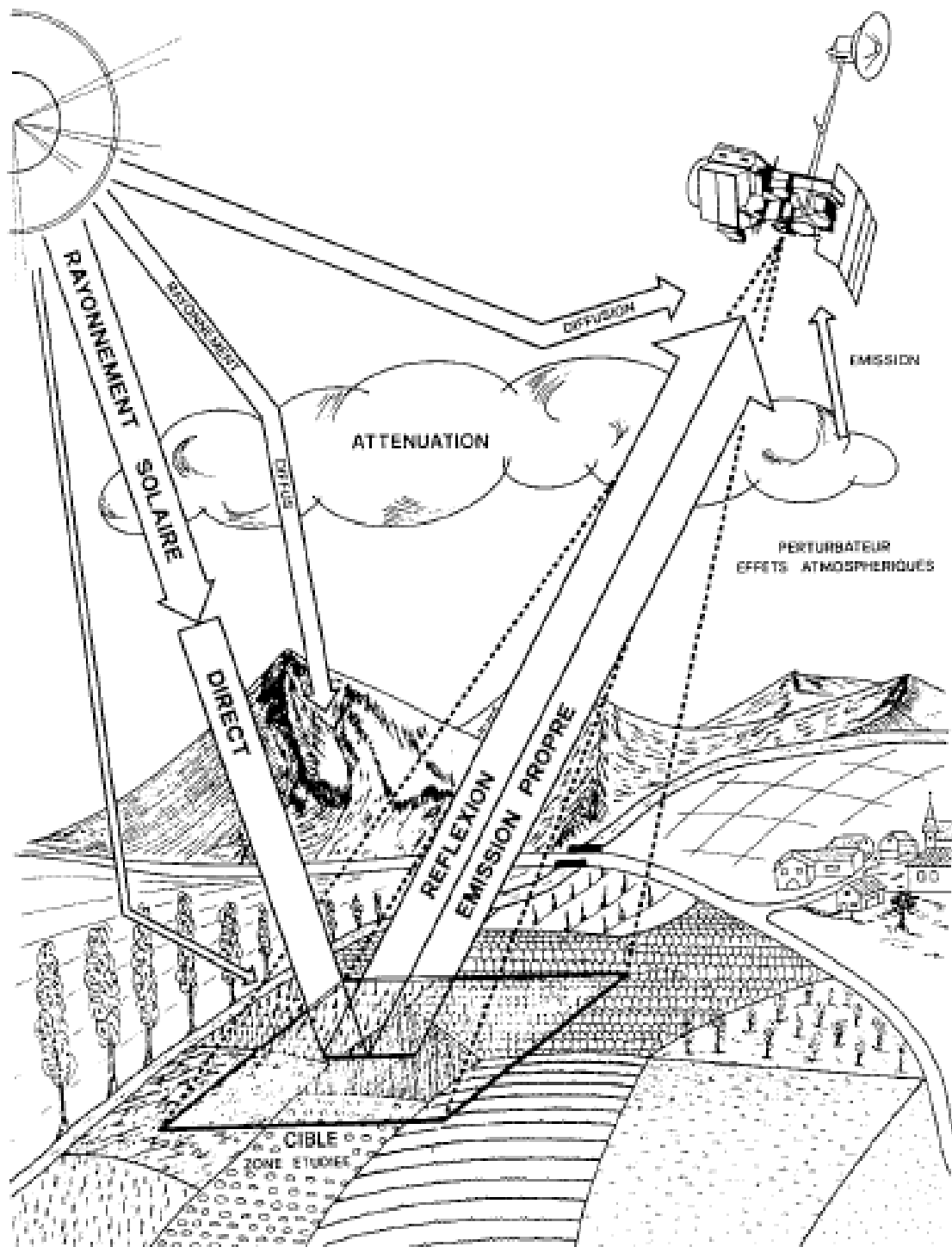


Figure. 2.7 : Principe de la télédétection spatiale [17]

C'est une évidence qu'il convient tout de même de préciser que les systèmes satellitaires ne peuvent en aucun moment remplacer le pyranomètre et le pyréliomètre pour la mesure du rayonnement solaire global et sa composante directe à la surface de la terre.

## 2.3.3 Mesure du rayonnement solaire global à la surface de la terre

### 2.3.3.1 Appareil de mesure

L'instrument utilisé en Algérie pour mesurer le rayonnement solaire global est le pyranomètre CM11 (Figure 2.8) [19].

L'élément sensible du pyranomètre est une thermopile constituée de 100 thermocouples imprimés sur un support de céramique et disposés en étoile. Le rayonnement solaire est absorbé par un disque recouvert d'un enduit noir. Seulement les bords du disque sont en contact thermique avec le corps du pyranomètre (radiateur), le long de ces bords, 100 jonctions froides sont placées,

Les 100 jonctions chaudes sont près du centre dans un arrangement rotationnel et symétrique. La thermopile exposée au rayonnement solaire délivre une différence de potentiel proportionnelle au flux incident. La disposition des thermocouples est circulaire, n'allouant qu'une faible erreur d'azimut. La couche du substrat a une forte conductivité thermique. La différence de température à travers la couche ne dépassera donc jamais plus que 3° C même en présence d'un maximum de rayonnement solaire. Le coefficient de température du récepteur est ajusté par la thermistance; ainsi la sensibilité reste constante de  $\pm 1\%$  pour une température allant de -10 C à 40 C.

Les réchauffements et refroidissements de la boîte du pyranomètre affectent à peine le zéro de l'instrument.

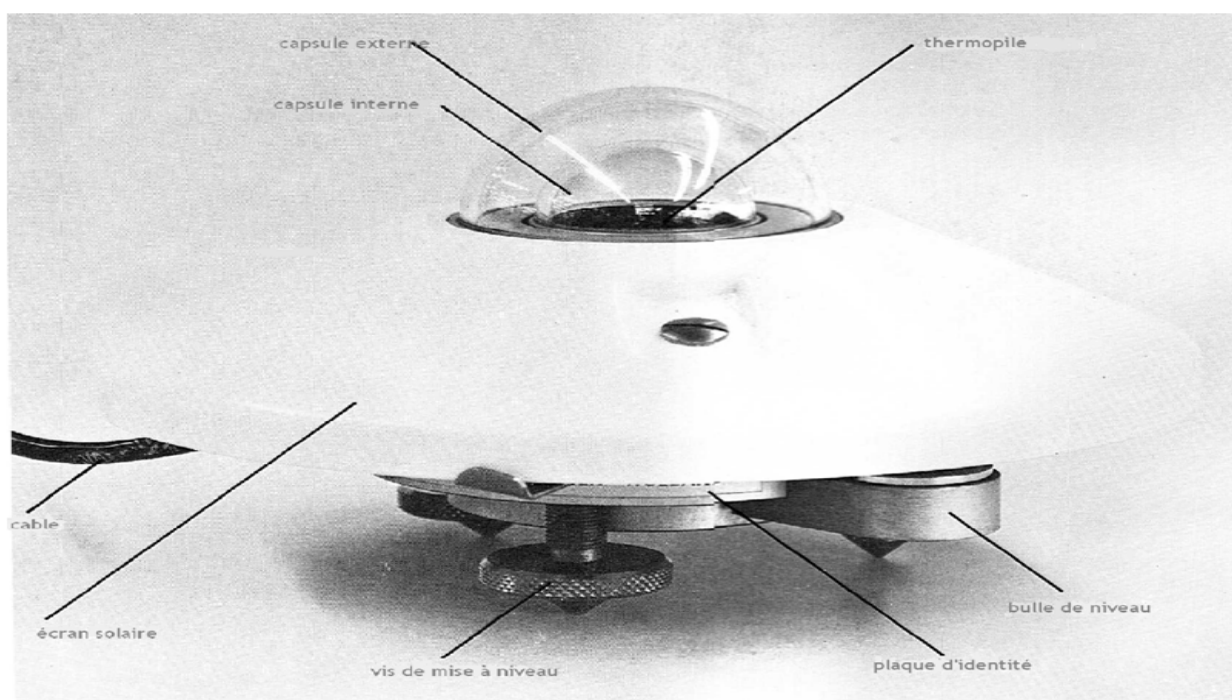


Figure. 2.8 : Pyranomètre Kipp et Zonen - CM 11 [19].

### 2.3.3.2 Les erreurs de mesures

Pour le pyranomètre CM11 utilisé dans la présente étude, le maximum d'erreurs dans les totaux horaires de rayonnement solaire est de 3%. Dans le total quotidien, une erreur de 2 % est observée. Ces erreurs sont réduites en utilisant la sensibilité réelle du pyranomètre dans la conversion de la tension de sortie du capteur (mv) en irradiation solaire ( $w/m^2$ ).

Pour l'erreur de non linéarité, la variation de la sensibilité du capteur par rapport à l'irradiation solaire, est la même pour tous les pyranomètres de type CM 11 [21].

Avant de quitter l'usine, la réponse de cosinus de chaque CM 11 est mesurée avec une grande précision.

Les Réponses en cosinus, en azimut et en température, et la sensibilité spectrale sont mentionnées dans le tableau 2.2

<b>SPÉCIFICATIONS DU PYRANOMETRE CM11</b>	
Sensibilité	4 - 6 $\mu V/W/m^2$
Stabilité (variation /an)	$\pm 0.1\%$
Non-linéarité	$\pm 0.6\%$
Impédance	700 - 1500 ohms
Temps de réponse (99% du signal)	<25s
Domaine spectral	305 - 2800 nm. (50% points de transmission)
Sensibilité spectrale (écarts en pourcent par rapport à l'observation moyenne dans l'intervalle 0.3 à 3 $\mu m$ )	$\pm 2\%$
Réponse en cosinus (pourcentage d'écart par rapport au cas idéal pour une incidence de $10^\circ$ et par ciel clair)	< $\pm 3\%$
Réponse en azimut (pourcentage d'écart par rapport au cas moyen pour une incidence de $10^\circ$ et par ciel clair)	< $\pm 3\%$
Réponse en température (erreur maximale en pourcentage due au changement de la température ambiante dans la gamme de fonctionnement)	$\pm 1\%$
Résolution (plus petite variation détectable en $Wm^2$ )	$\pm 1$

Tableau 2.2 : Précision et performance du pyranomètre CM11 [21].



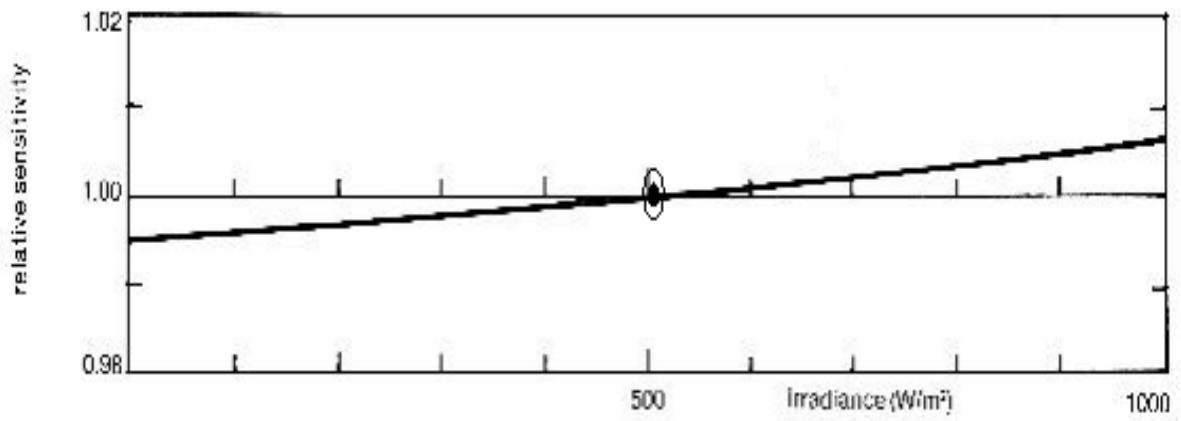


Figure. 2.9 : Non-linéarité (variation de la sensibilité du capteur par rapport au rayonnement solaire) du pyranomètre CM11 de Kipp & Zonen [20].

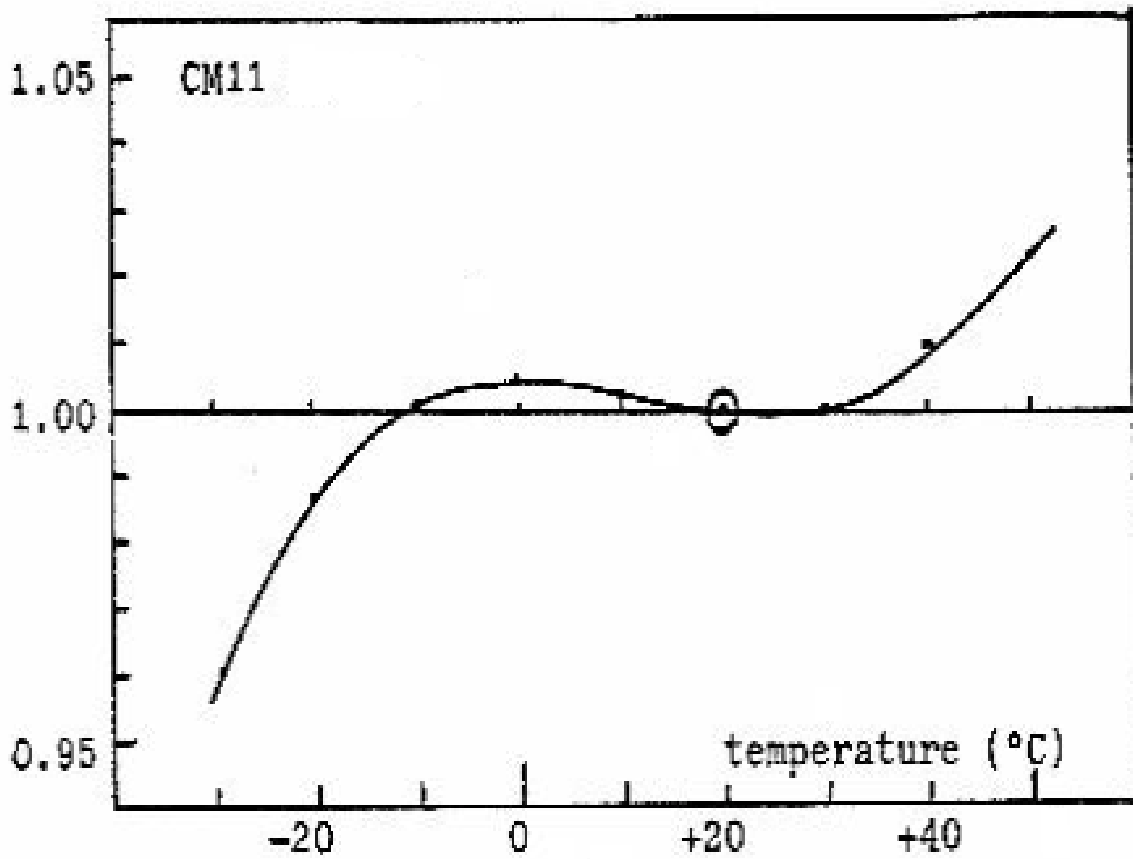


Figure. 2.10 : Variation de la sensibilité du capteur par rapport à la température [21].

⊙ : Condition de calibration

### 2.3.4 Mesure du rayonnement solaire diffus au sol

Dans les stations synoptiques de l'ONM comme au CDER de Bouzaréah et l'URAER de Ghardaïa, les mesures du rayonnement diffus sont effectuées indépendamment en utilisant le pyranomètre CM11 de Kipp et Zonen disposant d'une bande pare soleil ajustée en fonction de la course du soleil pour supprimer l'impact du flux solaire direct (Figure. 2.11). La précision de mesure est de  $\pm 0.6 \%$ .



Figure. 2.11 : Pyranomètre CM11 équipé d'une bande pare-soleil pour la mesure du rayonnement diffus [19].

### 2.3.5 Mesure du rayonnement solaire direct

On utilise le pyréliomètre (figure 2.12) de type Eppley pour la mesure du rayonnement direct, celui-ci arrive sur la surface terrestre sans avoir subi aucune diffusion en traversant l'atmosphère. Le collimateur du pyréliomètre est pointé en permanence vers le soleil. L'appareil est monté sur un bâti équatorial actionné par un système électrique pour les lectures continues (poursuite du soleil). Le point de contact incorpore une thermopile à la base d'un tube. L'intérieur de ce tube en laiton est recouvert d'un enduit noir.

<b>Caractéristiques du pyréliomètre</b>	
Sensibilité approximativement	8 $\mu\text{v}/\text{wm}^{-2}$
Réponse en température (erreur maximale en pourcentage due au changement de la température ambiante -20 à +40°C)	$\pm 1$
Précision de l'appareil	$\pm 0.1\%$
Linéarité $\text{wm}^{-2}$	$\pm 0.5\%$ de 0 à 1400
Impédance	approximativement. 200 ohms
temps de réponse	1 seconde

Tableau 2.3 : Spécifications du pyréliomètre Eppley [19]



Figure. 2.12 : Pyréliomètre Eppley [20].

### 2.3.6 Mesure de l'albédo au sol

L'albédomètre est formé de deux pyranomètres identiques opposés: un dirigé vers le haut (ciel) l'autre vers le bas (terre). Le premier qui est dirigé vers le haut mesure le rayonnement global (direct + diffus) incident sur le sol. Le deuxième qui est dirigé vers le bas mesure le rayonnement global réfléchi par le sol.

L'albédo représente la fraction du rayonnement global réfléchi par le sol par rapport au rayonnement global incident. Il est possible d'obtenir le rayonnement net en calculant la différence entre le rayonnement global incident et le rayonnement global réfléchi.



Figure. 2.13 : Albédomètre [19]

### 2.3.7 Mesure de la durée d'insolation

La durée d'ensoleillement (souvent appelée durée d'insolation), est initialement définie par la durée pendant laquelle le disque solaire reste visible, dessinant ainsi des ombres portées au sol. Il serait par conséquent logique de définir le seuil d'insolation comme étant le seuil d'éclairement à partir duquel le carton commence à cramer.

Cette grandeur est mesurée à l'aide d'un héliographe Campbell-Stokes. Le seuil de sensibilité de l'appareil est de  $120 \text{ w/m}^2$  de rayonnement direct, pour une précision de 36 secondes [14].



Figure. 2.14 : Héliographe Campbell-Stokes [20]

L'héliographe capte le rayonnement solaire et le focalise par l'intermédiaire d'une sphère en verre constituant une lentille convergente qui concentre les rayons du Soleil sur une bande du carton normalisé placé sur un support à l'arrière de la sphère. La brûlure ou la décoloration du carton est mesurée après le coucher du Soleil, la bande du carton est aussitôt remplacée par une neuve pour la mesure du lendemain. La longueur de la brûlure permet d'estimer en heures et en dixièmes d'heure la durée réelle d'insolation.

L'héliographe doit être orienté en fonction du nord géographique et de la latitude du lieu, raison pour laquelle le support repose sur un socle ajustable gradué en degrés de latitude et dispose d'une mise à niveau à quatre points ajustables. Il doit être placé dans un endroit découvert, loin de tout obstacle qui projetterait des ombres sur l'instrument.

La durée d'ensoleillement est un paramètre souvent mieux accessible pour évaluer le rayonnement solaire. En fonction de ces données mesurées, les grandeurs comme les indices de clarté et les fractions d'insolation seront calculées.

## 2.4 Caractérisation expérimentale météorologique des sites de Bouzaréah et de Ghardaïa

### 2.4.1 Introduction

La caractérisation des sites définis se fait à travers l'analyse des paramètres météorologiques et radiométriques. Les plus déterminants sont les précipitations, la température ambiante, l'humidité relative, le vent. Les paramètres mesurés sont collectés au niveau de quatre stations (ONM d'Alger, ONM de Ghardaïa, CDER de Bouzaréah, URÆER de Ghardaïa.) sur une période s'étalant sur cinq années.

Le site de Bouzaréah est soumis à un climat méditerranéen, caractérisé par un climat humide durant toute l'année à l'exception de l'été où le climat devient chaud et sec. Sa façade maritime lui assure une bonne stabilité climatique, notamment en termes de températures et de vents. Les vitesses moyennes annuelles du vent sont de 3 m/s à 4 m/s à 10m du sol. La moyenne de la pluviométrie annuelle varie de 339 à 452 mm, et la température moyenne annuelle est de 17 °C.

Pour le site de Ghardaïa, La pluviométrie est de type saharien avec une moyenne annuelle de 67.37 mm. Le nombre moyen de jours de pluie par an est de 20 à 30. Les vitesses moyennes annuelles du vent sont de 3.1 m/s à 4.4 m/s à 10m du sol.



## 2.4.2 Température ambiante ( $T_a$ )

Les températures moyennes journalières sont évidemment plus élevées pour la saison d'été. Nous observons une différence d'environ 7 °C entre les deux températures  $T_a$  (Bouzaréah) et  $T_a$  (Ghardaïa) au mois de juillet. Elles sont faibles en janvier et décembre. Ce sont les températures maximales diurnes qui différencient les deux sites. Les courbes des températures moyennes sont présentées à la *figure 2.15*.

### ✓ Ghardaïa :

Les températures moyennes maximales mensuelles varient de 14,9 °C en janvier à 43,2 °C en juillet (max. à Ghardaïa : 47 °C). La moyenne annuelle des maxima est de 28,5 °C. Les températures moyennes minimales mensuelles varient de 3,4 °C en janvier à 29,5 °C en Juillet. La moyenne annuelle des minima est de 16,3 °C. Les températures moyennes mensuelles varient de 9 °C en janvier à 36,9 °C en juillet. La température moyenne annuelle est de 22,6 °C.

### ✓ Bouzaréah :

Les températures moyennes maximales mensuelles varient de 14,9 °C en janvier à 32,6 °C en juillet (max. à Bouzaréah : 40,6 °C). La moyenne annuelle des maxima est de 23,7 °C. Les températures moyennes minimales mensuelles varient de 1,6 °C en janvier à 19,2 °C en Juillet. La moyenne annuelle des minima est de 11,2 °C.

Les températures moyennes mensuelles varient de 7,6 °C en janvier à 25,8 °C en juillet. La température moyenne annuelle est de 17,3 °C.

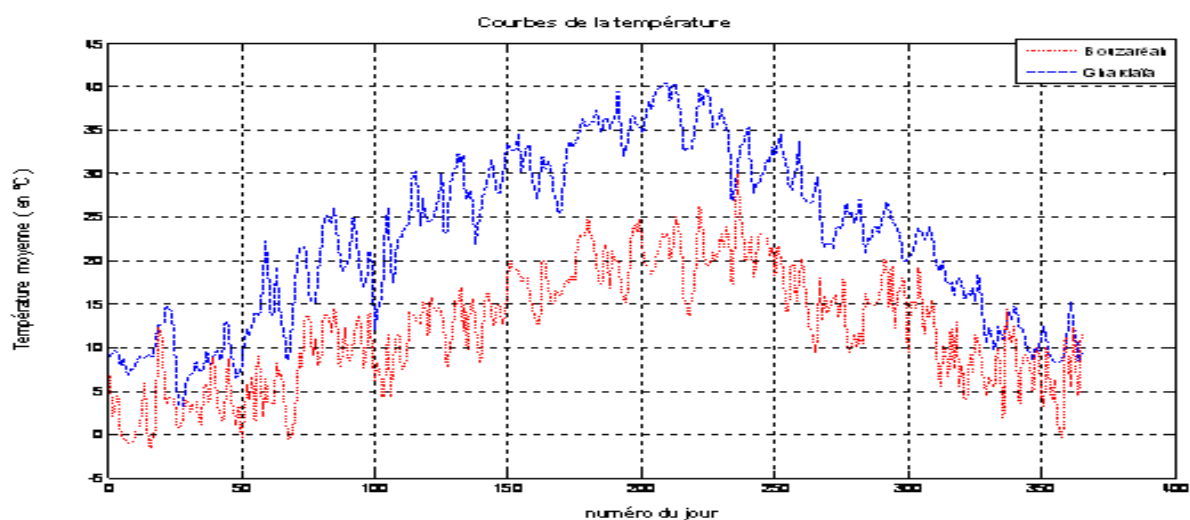


Figure. 2.15: Courbes des températures moyennes

Les évolutions des températures maximales et minimales ( $T_{max_{Bouzaréah}}$ ,  $T_{max_{Ghardaïa}}$ ,  $T_{min_{Bouzaréah}}$ ,  $T_{min_{Ghardaïa}}$ ) sont présentées à la figure 2.16.

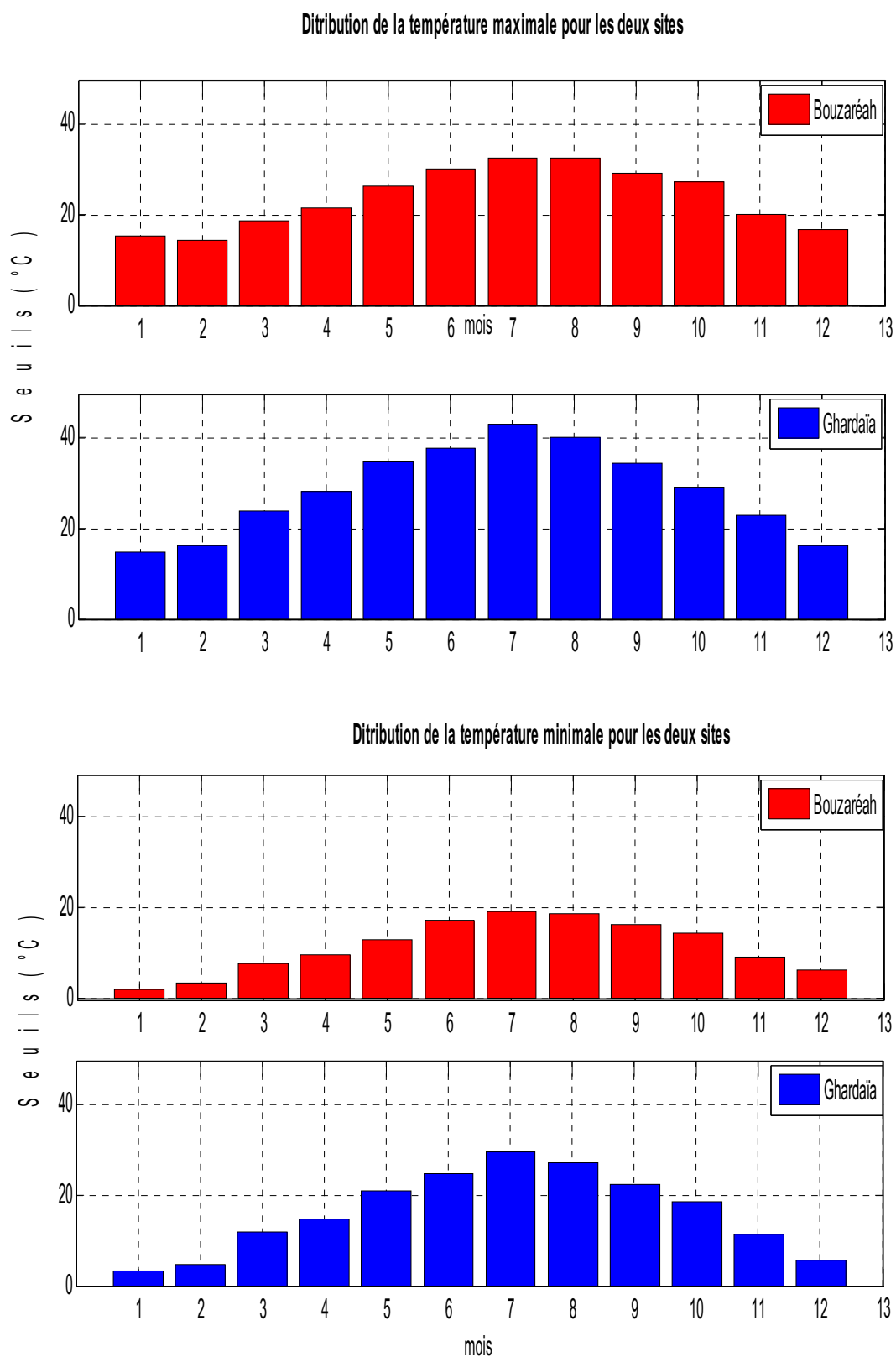


Figure. 2-16: Distribution des paramètres de la température



### 2.4.3 Humidité relative $R_r$ [22]

La vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère est fournie par évaporation au niveau des surfaces aqueuses, ou par évapotranspiration des sols humides et du couvert végétal. Dans le cas de l'air dit saturé, la vapeur d'eau s'est condensée pour donner la couche nuageuse, ou des précipitations. L'humidité de l'air peut s'exprimer de plusieurs manières: pression partielle de vapeur d'eau  $P_v$  (ou tension de vapeur), l'humidité absolue  $R_a$  ou relative  $R_r$ .

A chaque température correspond une pression partielle de vapeur d'eau saturante  $P_{vs}$ , indiquant le point de condensation de l'eau.

L'humidité relative  $R_r$  est définie par rapport à la pression atmosphérique, à la température, à la quantité de vapeur d'eau présente dans l'atmosphère. Elle est exprimée en pourcentage, comme le rapport entre la pression de vapeur ( $P_v$ ), et la pression partielle de vapeur saturante ( $P_{vs}$ ) à la même température ( $T_a$ ):

$$R_r = \frac{100 * P_v(T_a)}{P_{vs}(T_a)} \quad (2.1)$$

L'humidité relative  $R_r$  est donc liée à la température d'air et à la pression atmosphérique. Le taux hygrométrique de l'air oscille, en été entre 3,4 % et 32 % dans la région centrale, et entre 52,8 % et 81,4% dans la région nord. En janvier, il oscille entre 32,8 % et 76,5 % dans la région centrale, et entre 61,6 % et 93,4 % dans la région nord.

L'atmosphère du site de Bouzaréah est presque saturée en permanence (71 à 86 % selon la saison).

L'humidité relative est généralement minimale vers 15 heures et maximale vers 6 heures, au lever du soleil. Les courbes des humidités moyennes relatives et des pressions atmosphériques et leurs principales variations sont présentées à la figure.2.17.et 2.18

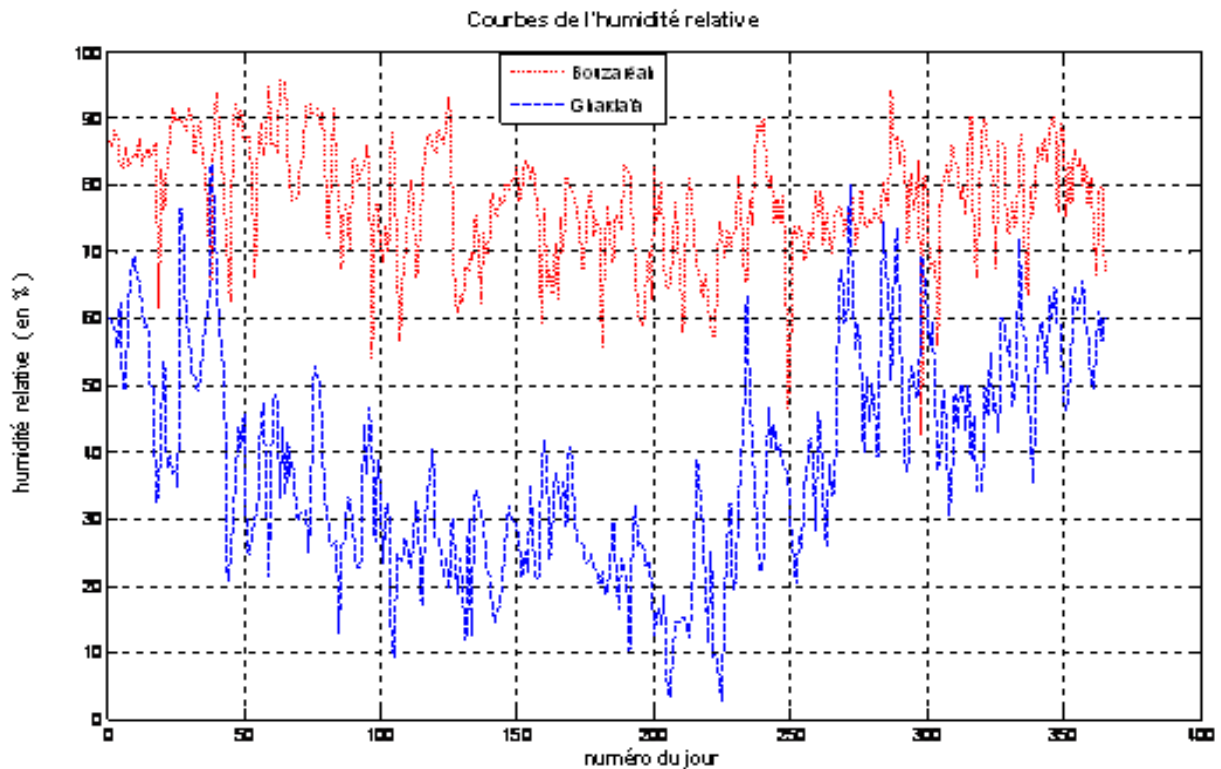


Figure. 2.17: Courbe de l'humidité moyenne relative

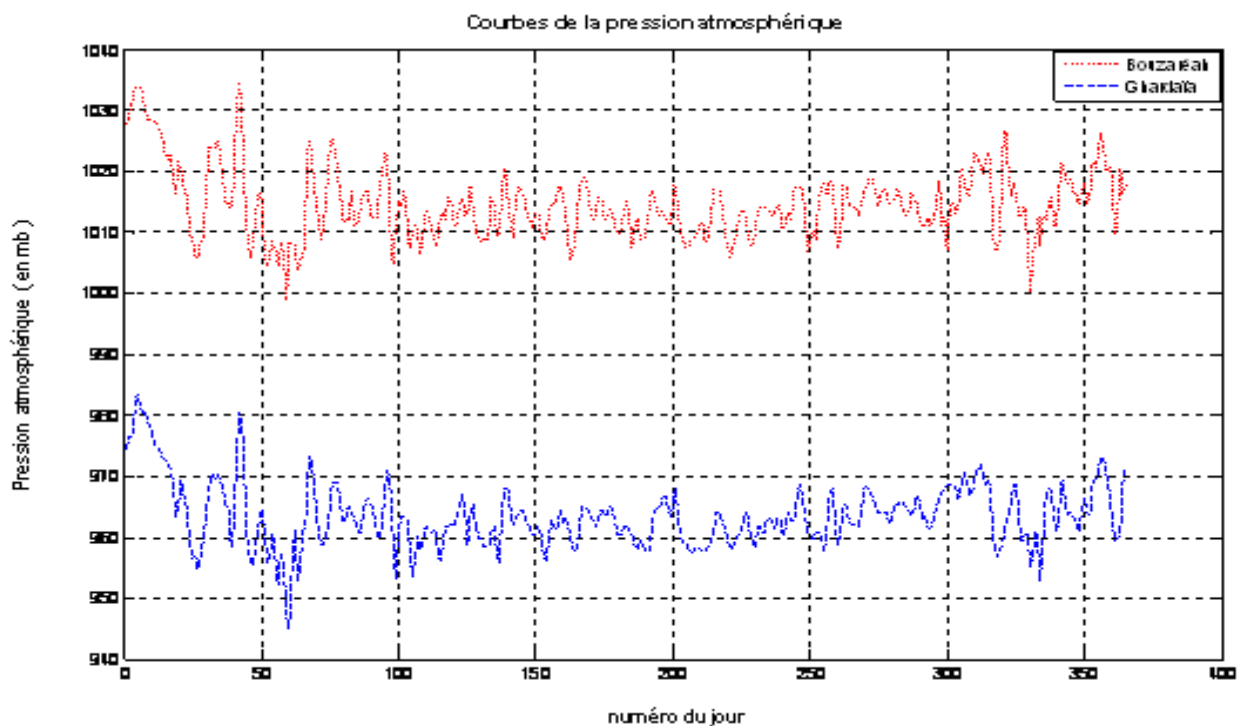


Figure. 2.18: Courbes de la pression atmosphérique

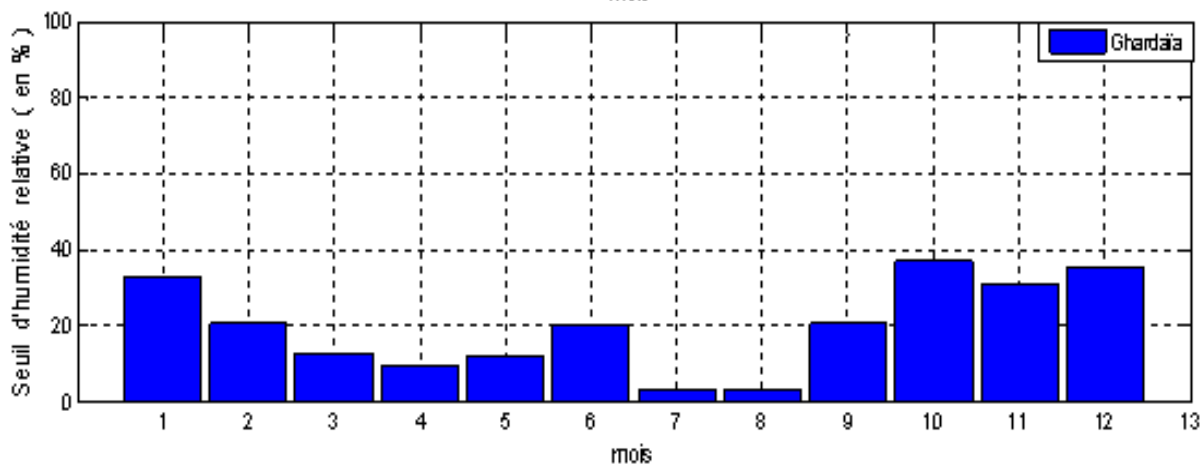
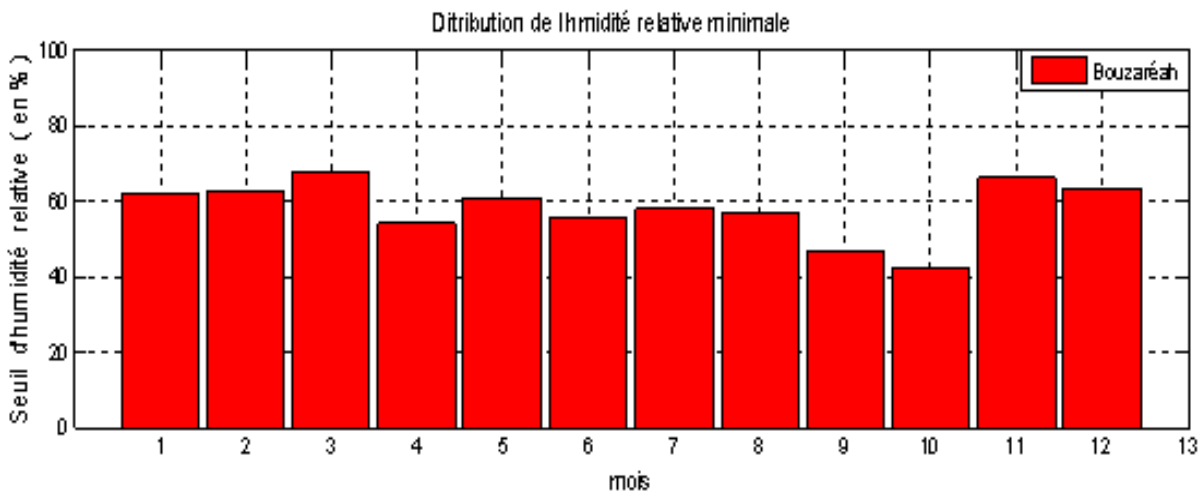
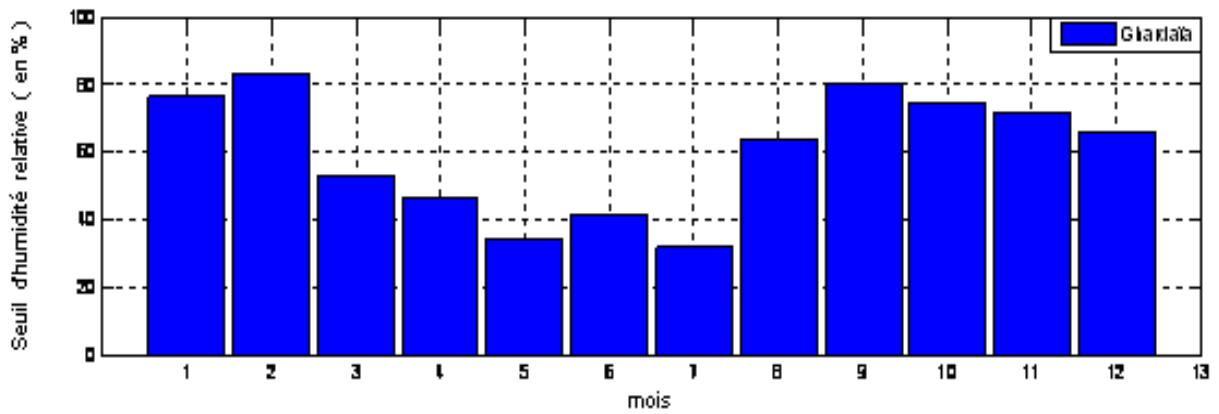
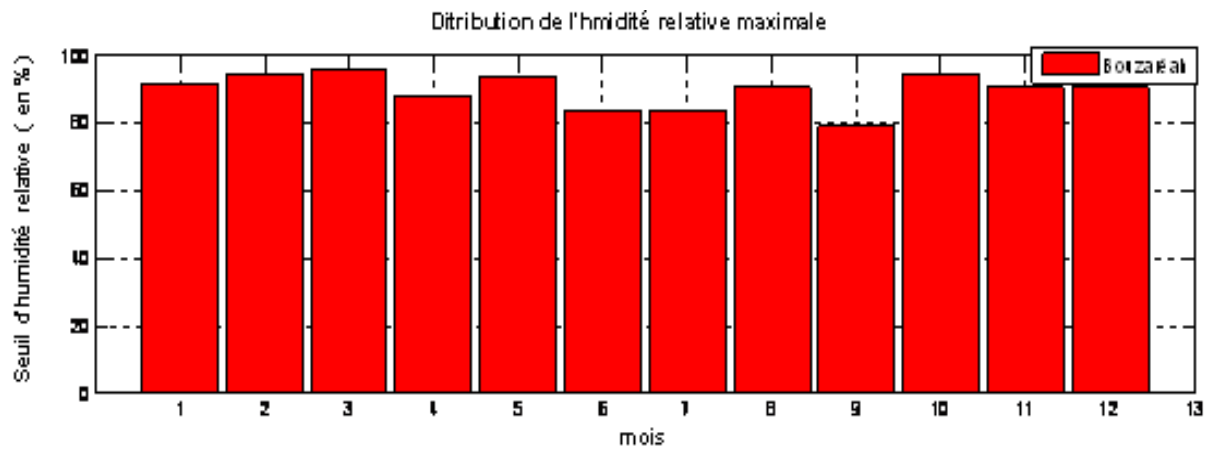


Figure. 2.19: Présentation des principales variations de l'humidité relative

## 2.5 Caractérisation expérimentale radiométrique des sites de Bouzaréah et de Ghardaïa.

### 2.5.1 L'albédo

L'albédo représente la fraction de radiation réfléchi par le sol par rapport à la radiation incidente:

$$\text{ALBÉDO} = \frac{\text{Rayonnement global réfléchi}}{\text{Rayonnement global incident}}$$

Site	Ghardaïa	Bouzaréah
<b>Albédo</b>	> 0,30	0,20

Tableau 2.4 : Albédo des sites de Bouzaréah et de Ghardaïa

### 2.5.2 L'insolation

L'insolation représente la durée d'ensoleillement horaire ou journalière. Ses variations et caractéristiques seront similaires à celles de l'indice de clarté. La durée d'insolation est plus importante dans la région centrale que sur la bande littorale (tableau 2.5)

Site	Ghardaïa	Bouzaréah
<b>durée d'insolation (heure / an)</b>	3296,08	2794,06

Tableau 2.5 : Durée d'insolation annuelle des sites de Bouzaréah et de Ghardaïa

Nous présentons à la figure.2.20 les courbes de la répartition journalière des insulations mesurée SS et potentielle  $SS_0$  pour les sites de Bouzaréah et de Ghardaïa.

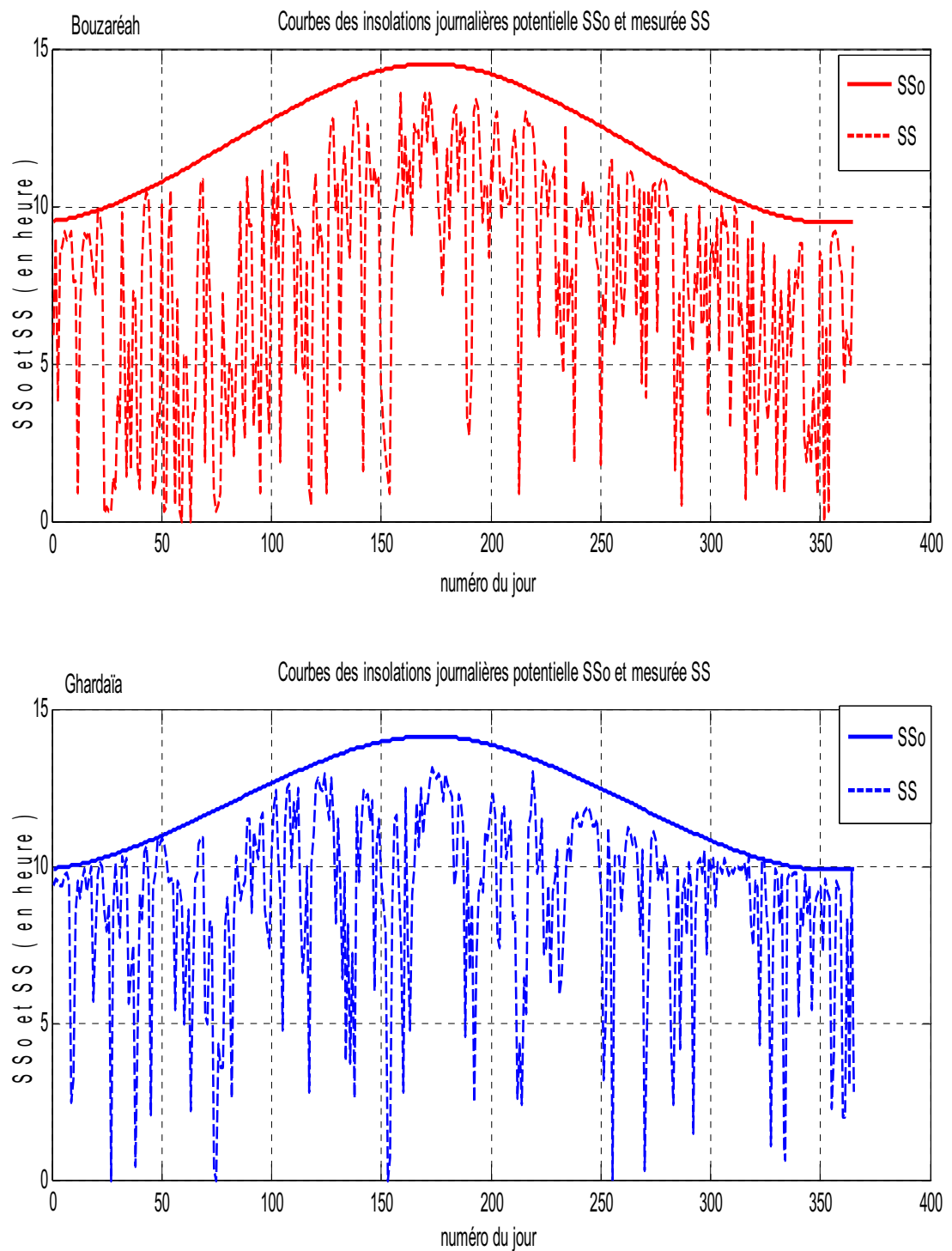


Figure. 2.20 : Courbes des insulations journalières

### 2.5.3 Analyse de la moyenne mensuelle de l'insolation journalière

La mesure du rayonnement solaire mensuelle permet d'évaluer les niveaux d'énergie reçue au sol. Les moyennes mensuelles constituent une base de données importante pour l'étude du gisement solaire sur les sites étudiés.

### 2.5.4 Évolution de la moyenne mensuelle de l'insolation

La figure 2.21 expose les distributions moyennes mensuelles de la durée d'insolation pour les deux sites de Bouzaréah et de Ghardaïa. On remarque que les distributions sont presque similaires pour le site de Ghardaïa, ce qui n'est pas le cas pour le site de Bouzaréah, qui est souvent caractérisé par des journées couvertes (jours nuageux.)

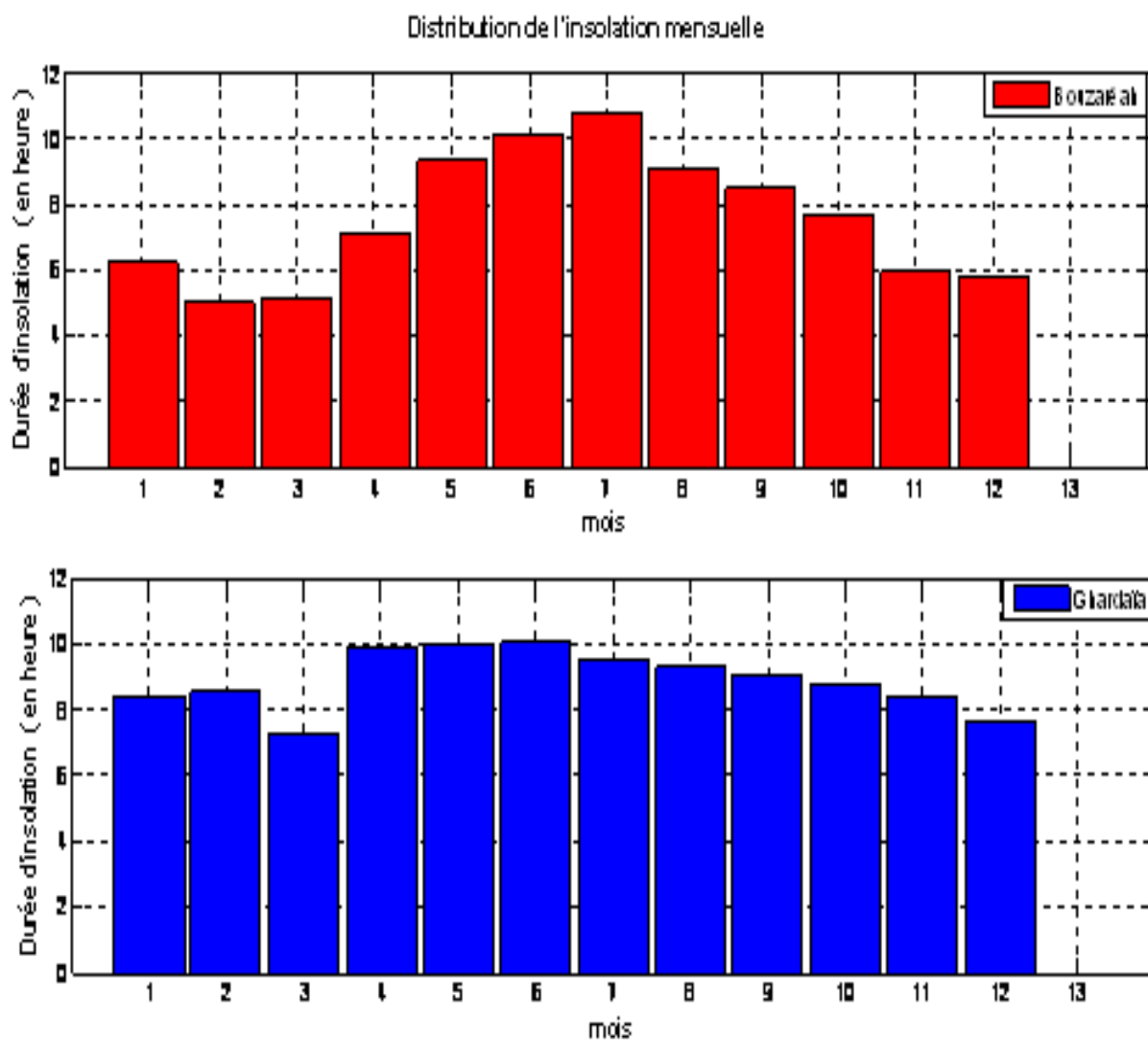


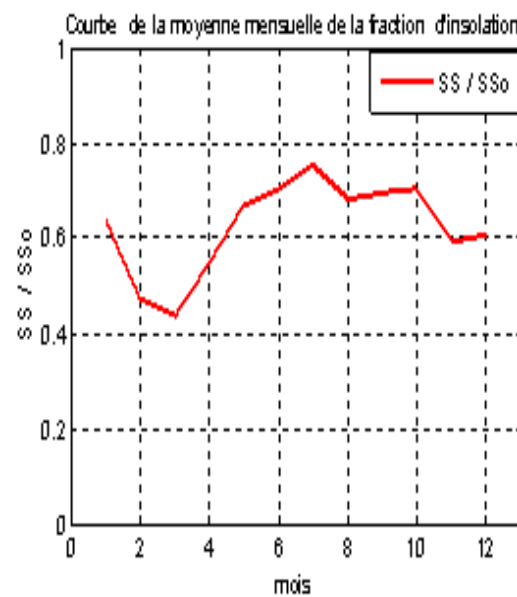
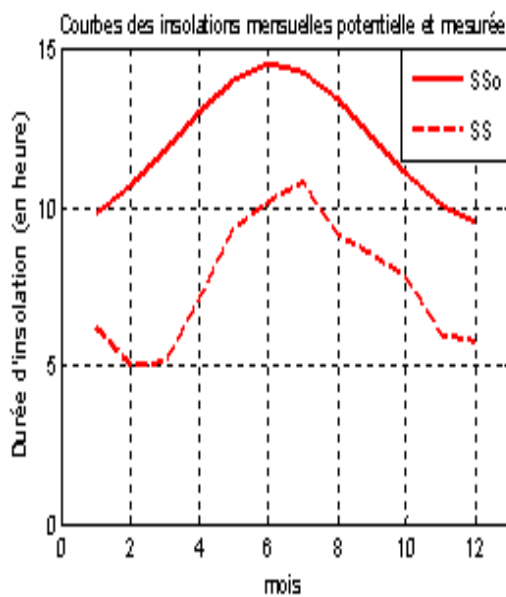
Figure. 2.21: Distribution de la moyenne mensuelle de l'insolation

Pour le site de Ghardaïa, la durée du jour est peu variable (figure 2.21) au cours de l'année. La durée d'insolation est la plus forte.

Les courbes suivantes montrent les insolation potentielles  $SS_0$ , les moyennes mensuelles des insolation mesurées  $SS$ , et la fraction d'insolation  $\sigma$  pour les sites de Bouzaréah et de Ghardaia.

Nous rappelons que la fraction d'insolation correspond au rapport entre la durée d'insolation réelle  $SS$  et la durée d'insolation hors atmosphère  $SS_0$  :  $\sigma = \frac{SS}{SS_0}$

Bouzaréah



Ghardaïa

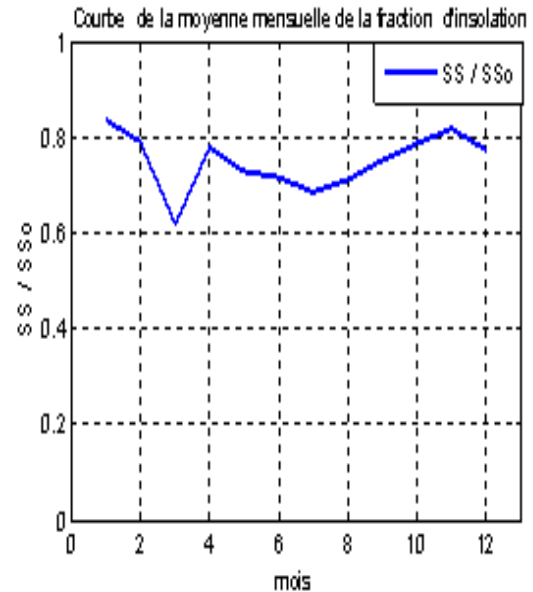
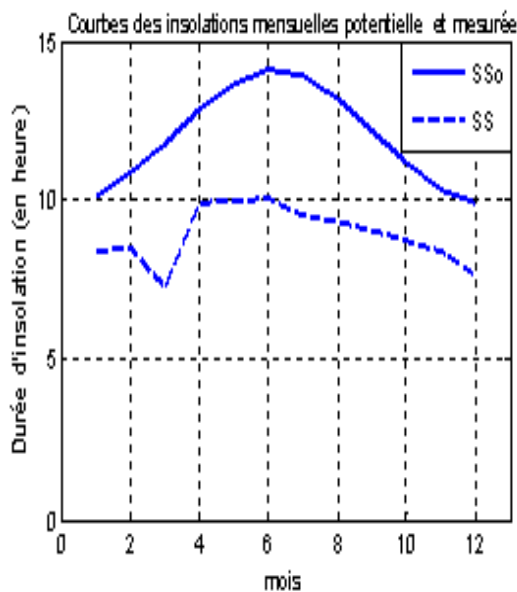


Figure. 2.22: Courbes de l'insolation et fraction d'insolation

Notons que pour la région du nord (site de Bouzaréah), l'insolation SS prend la même allure que l'insolation potentielle SSo. À l'exception du mois de février et le début du mois de mars où SS évolue inversement à SSo. La fraction d'insolation est élevée en été (juin, juillet, août) atteignant 0,75 pour la région nord, et faible en hiver (décembre, janvier et février), elle atteint 0,4.

Pour le site de Ghardaïa, l'insolation mesurée possède des niveaux plus élevés relativement à celle du Nord. La fraction d'insolation prend des valeurs élevées entre 0,7 et 0,8 presque toute l'année. Rappelons que les distributions de la moyenne mensuelle de l'insolation SS sont similaires presque toute l'année pour le site de Ghardaïa et la courbe de la fraction d'insolation présente une allure nettement moins accentuée que celle qui caractérise le site de Bouzaréah.

Dans notre étude, le paramètre Nébulosité n'est pas pris en compte directement, mais au travers de ces effets sur l'insolation SS. Les évolutions de l'insolation et les minima observés dans la période allant de février jusqu'au début de mars sont en relation avec la couverture nuageuse (tableau 2.6)

<b>Site de Bouzaréah</b>			
Mois	Février		Mars(première quinzaine)
Nbre de jours	11	8	9      6
Nébulosité(octas)	5 à 6	7 à 8	5 à 6      7 à 8
<b>Site de Ghardaïa</b>			
Mois	Février		Mars(première quinzaine)
Nombre de jours	1	0	8      0
Nébulosité (octas)	5 à 6	7 à 8	5 à 6      7 à 8

Tableau 2.6 : Durée de maintien (en jours) des différentes nébulosités pour les sites de Bouzaréah et Ghardaïa.

Retenons que pour une nébulosité de :

5 à 6 (octas) : plus de la moitié du ciel est occultée par les nuages.

7 à 8 (octas) : le ciel très nuageux, est entièrement occulté par les nuages.



### 2.5.5 Indice de clarté

Nous allons étudier le rayonnement global des deux sites en calculant l'indice de clarté journalier  $K_t$  qui correspond au rapport de la quantité de rayonnement global reçu par la quantité d'énergie solaire disponible hors atmosphère. Elle est significative du taux d'ensoleillement de la journée.

Intervalles de $K_t$	Nombre de jour :	Site de Bouzaréah	Site de Ghardaïa
0.9 : 1.0		0	0
0.7 : 0.8		21	27
0.5 : 0.6		209	77
0.3 : 0.4		91	12
0 : 0.2		42	2

Tableau 2.7 : Présentation de la distribution (en jours) de l'indice de clarté.

La figure 2.23 expose la distribution journalière de l'indice de clarté pour les sites de Bouzaréah et Ghardaïa.

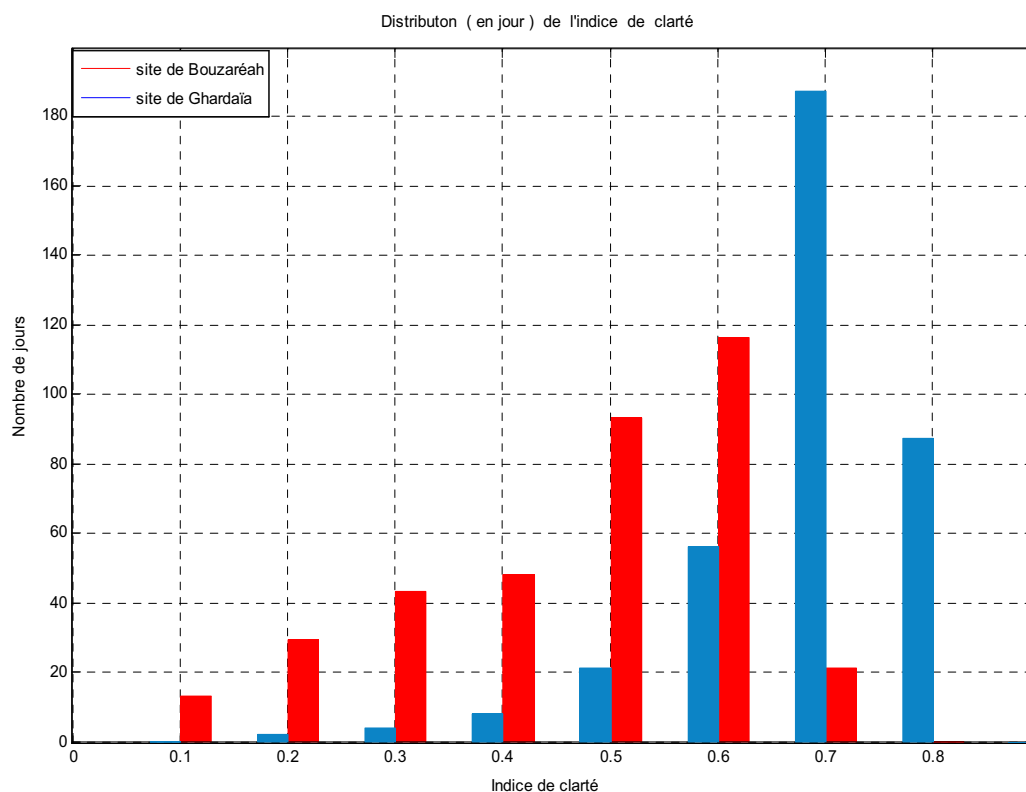


Figure. 2.23: Distribution journalière de l'indice de clarté pour les sites étudiés

La proportion de journées à fort indice de clarté (de 0.7 à 0.8) est plus élevée pour le site de Ghardaïa ; la majorité des périodes est très ensoleillée puisque 75% des journées disposent d'un indice de clarté supérieur à 0.6. Ce qui n'est pas le cas pour le site de Bouzaréah où les journées à ensoleillement moyen (de 0.5 à 0.6) sont majoritaires (57 %).

Pour le site de Ghardaïa, le passage le plus fréquent est d'un type de temps moyennement ensoleillé à un beau temps, ce qui caractérise une amélioration rapide et fréquente du temps (tableau 2-7). Ce qui n'est pas le cas pour le site de Bouzaréah où le passage d'un mauvais temps à un temps moyennement ensoleillé est le plus fréquent, ce qui caractérise une amélioration progressive du temps.

### 2.5.6 Evolution annuelle du rayonnement global mesuré sur un plan horizontal pour les sites de Bouzaréah et Ghardaïa.

La figure 2.24 expose les moyennes mensuelles du rayonnement global mesuré H. On remarque une évolution saisonnière de H avec un maximum en été obtenu au mois de juillet pour le site de Bouzaréah et au mois de juin pour le site de Ghardaïa, et un minimum en hiver obtenu au mois de décembre pour les deux sites.

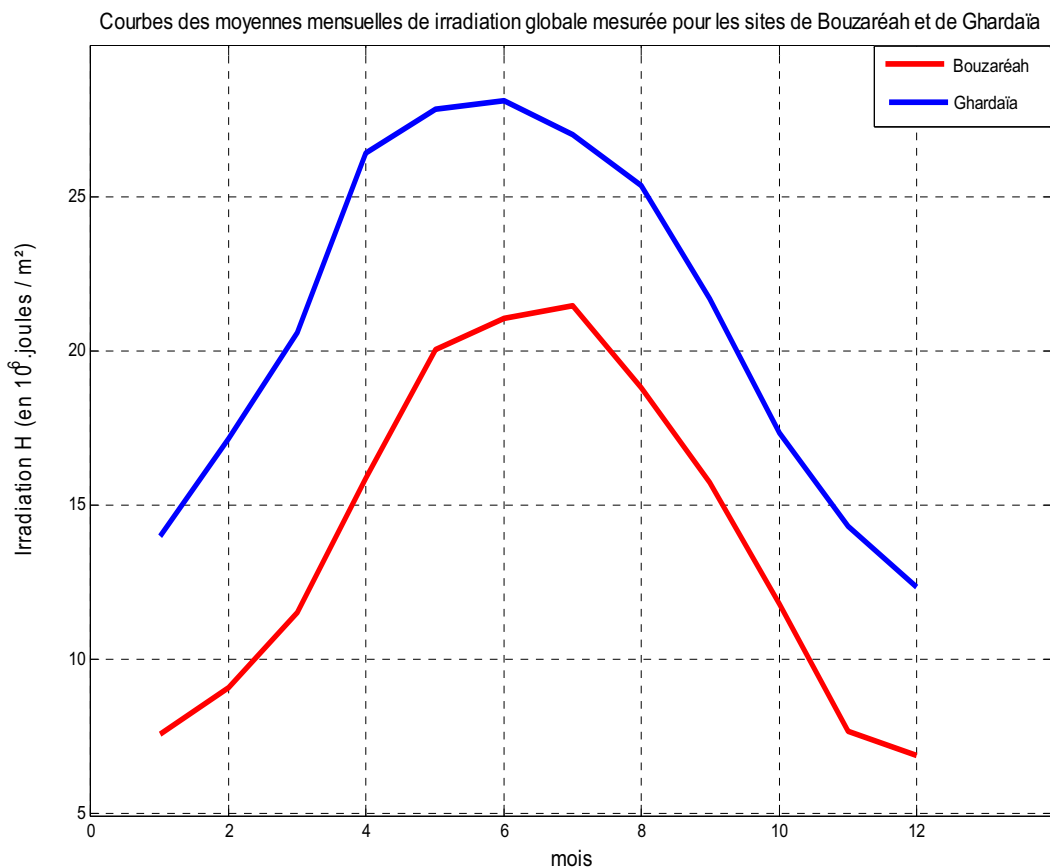


Figure. 2.24:Évolution annuelle du rayonnement global mesuré H.

Nous présentons au tableau 2.8 les valeurs du rayonnement global en fonction de la saison.

Rayonnement solaire global reçu sur un plan horizontal (en MJ/m <sup>2</sup> )			
Saison	Moyenne	Maxi	Mini
Hiver (Bouzaréah)	9,4	20,1	0,5
Hiver (Ghardaïa)	16,7	26,9	5,5
Printemps (Bouzaréah)	19,0	27,1	2,7
Printemps (Ghardaïa)	26,9	31,9	16,8
Été (Bouzaréah)	18,7	27,4	5,2
Été (Ghardaïa)	24,5	30,6	9,9
Automne (Bouzaréah)	8,8	16,8	0,2
Automne(Ghardaïa)	14,5	21,6	5,6

Tableau 2.8 : Description du rayonnement global en fonction de la saison

### 2.5.7 Évolution du rayonnement global moyen journalier mesuré pour les sites de Bouzaréah et de Ghardaïa.

La figure 2.25 présente le cumul journalier du rayonnement global pour le site de Bouzaréah. On remarque la forte proportion de rayonnement fort dans la période qui contient les mois de mai à juillet. Dans la période qui contient les mois de novembre à janvier, on observe une diminution marquée de la quantité de rayonnement global reçue, relative à des journées à forte couverture nuageuse. Le rayonnement solaire global varie très rapidement autour de l'équinoxe de printemps et autour du solstice d'hiver, il varie très peu autour de l'équinoxe d'automne et autour du solstice d'été.

Nous avons ainsi mis en évidence une journée de très fort rayonnement ( $27,4 \text{ MJ/m}^2$ ), le 12 juillet et une journée de rayonnement très faible ( $0,16 \text{ MJ/m}^2$ ), le 18 décembre.

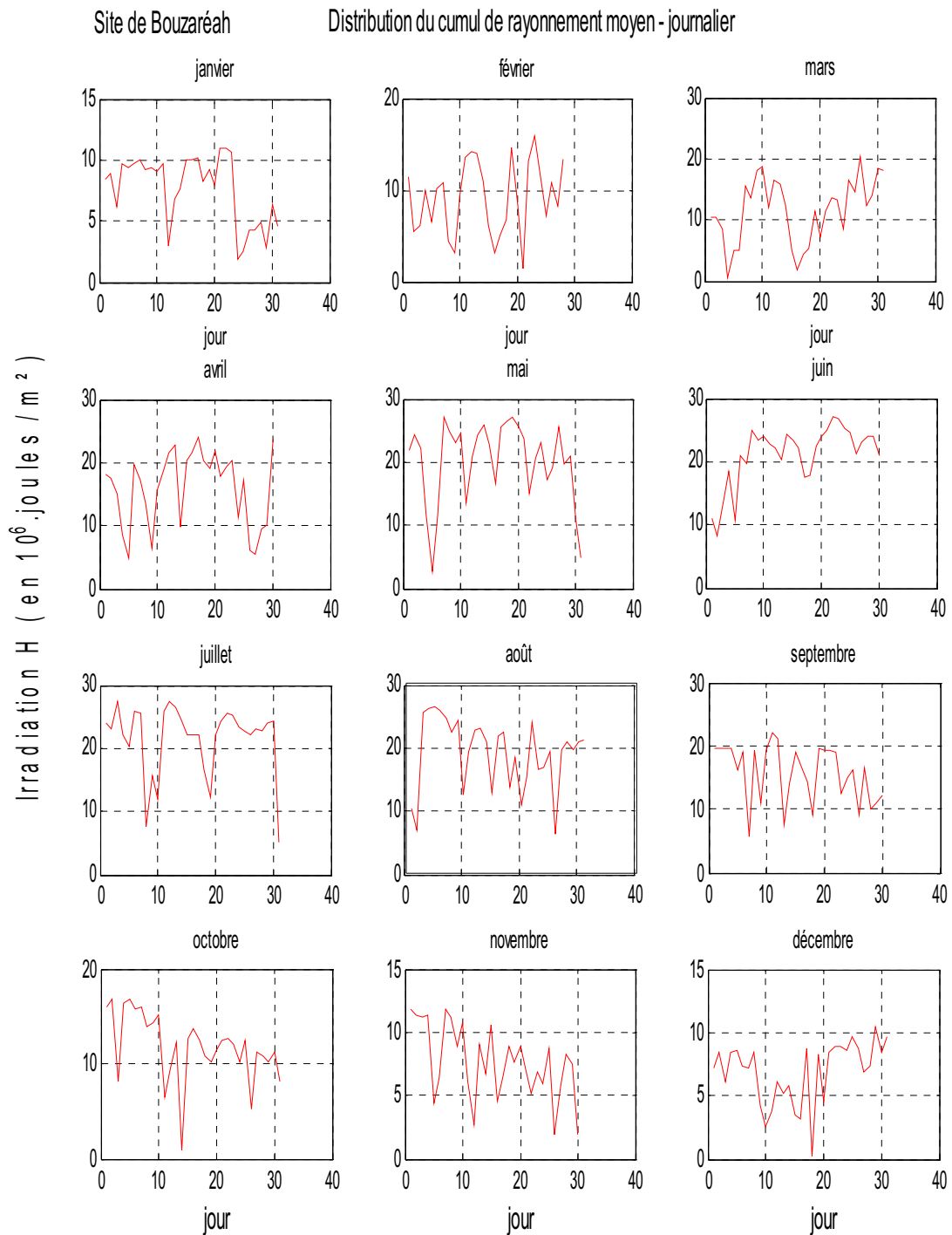


Figure. 2.25: Rayonnement global H mesuré pour le site de Bouzaréah.

La figure 2.26 présente le cumul journalier du rayonnement global pour le site de Ghardaïa. Le rayonnement solaire global varie très rapidement au voisinage de l'équinoxe de printemps et au voisinage du solstice d'hiver, il varie très peu au voisinage de l'équinoxe d'automne et au voisinage du solstice d'été. Nous avons mis en évidence une journée de très fort rayonnement ( $31,9 \text{ MJ/m}^2$ ), le 18 mai et une journée de rayonnement très faible ( $5,5 \text{ MJ/m}^2$ ), le 7 février. Nous observons que le rayonnement global journalier est nettement plus fort pendant la période qui contient les mois d'avril à septembre.

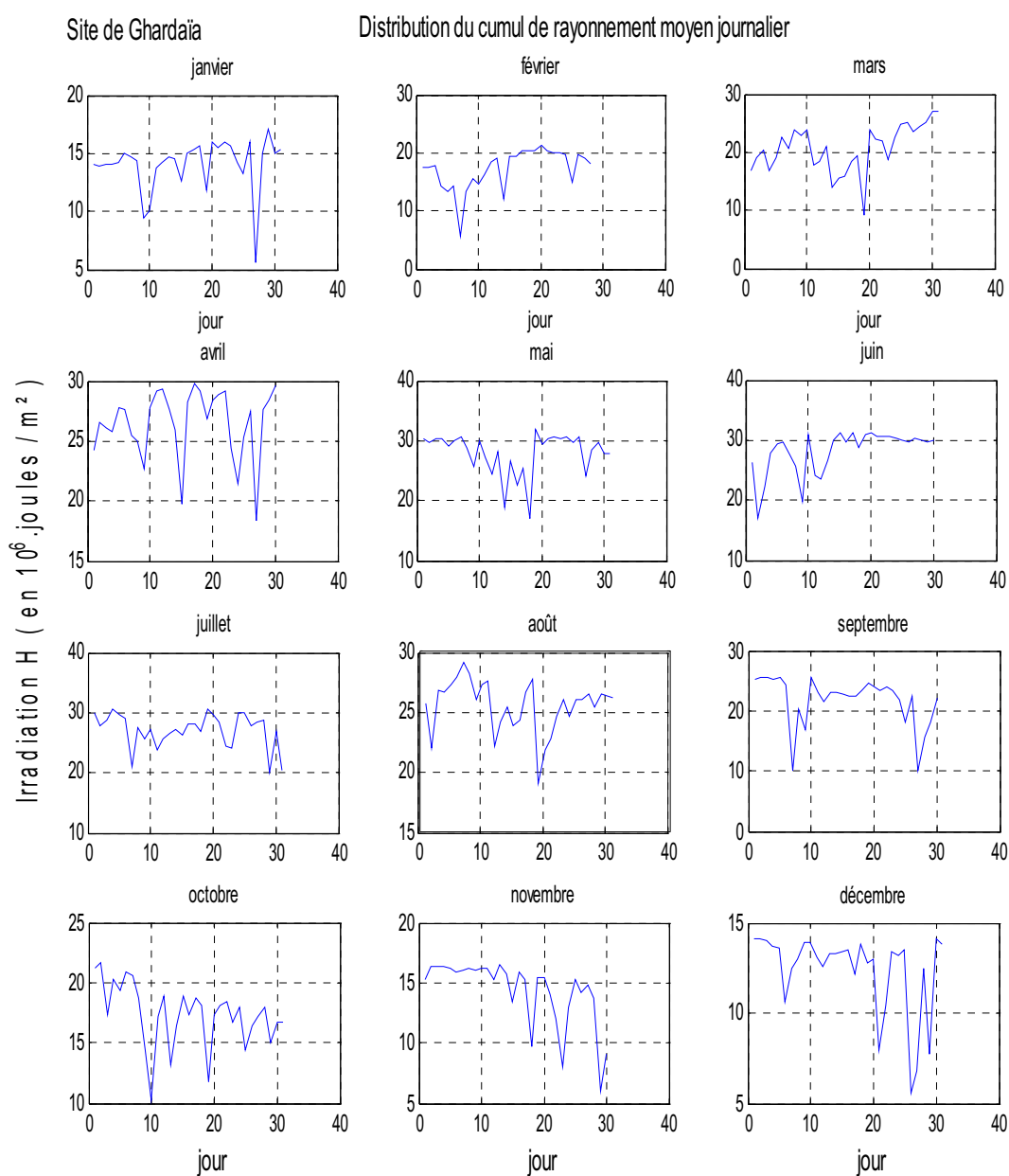


Figure. 2.26: Rayonnement global H mesuré pour le site de Ghardaïa.

## 2.6 Conclusion

Une étude statistique comparative sur les températures, l'évolution du rayonnement solaire global et l'évolution de l'insolation à Bouzaréah (CDER) et à Ghardaïa (URAER) est présentée. Elle nous a permis de constater qu'au site de Bouzaréah, les températures moyennes minimales enregistrent une légère stabilité, sauf pour les mois d'hiver (mois 1 et 2) qui ont une tendance à la chute. Pour le site de Ghardaïa, nous avons constaté, que les températures moyennes maximales se placent nettement au-dessus de 20 °C sauf pour les mois de décembre à février et qu'un écart thermique supérieur ou égal à 7 °C est à envisager en passant de Bouzaréah à Ghardaïa à la saison d'été.

Les résultats de nos mesures montrent, qu'en moyenne, le rayonnement solaire global augmente de 6 % environ quand on passe de Bouzaréah à Ghardaïa.

La proportion du rayonnement global H mesuré est plus faible pour le site Bouzaréah (5 % en hiver et 10 % en été) que pour le site de Ghardaïa (11 % en hiver et 26 % en été).

## CHAPITRE 3

### ESTIMATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE À PARTIR DE LA DURÉE D'INSOLATION

#### 3.1 Introduction :

Ce chapitre est, pour l'essentiel consacré à la modélisation des données météorologiques utiles dans le cadre de la caractérisation des sites étudiés.

Vu l'importance de connaître l'évolution du rayonnement solaire global reçu à la surface de la terre, plusieurs auteurs (Masson, 1966 ; Sabbagh et al., 1973; Swartman et Ogunlade, 1966 ; Angström-Prescott, 1940 ; Worner, 1967 ; etc ), [23] ont établi des modèles pour estimer le rayonnement solaire global à partir des différentes variables météorologiques telles que la température, l'humidité, la nébulosité, la durée d'insolation ...

Dans notre cas, nous présenterons trois modèles permettant d'exprimer le rayonnement solaire global  $H$  en fonction de la durée d'insolation  $SS$  : Le modèle linéaire (modèle Angström-Prescott), le modèle quadratique (modèle Ögelman et al.) et le Modèle logarithmique (modèle Ampratwum et Dorvlo).

#### 3-2 Modèles liant l'humidité relative $R_r$ et le rayonnement global.

Dans ce cas là, Swartman et Ogunlade (1966) ont proposé plusieurs modèles basés sur l'humidité relative  $R_r$ , à savoir [23] :

$$H = 490.D^{0.357} \cdot R_r^{-0.262} \quad (3.1)$$

$$H = 460.e^{0.607(D - R_r)} \quad (3.2)$$

$$H = 464 + 265.D' - 248. R_r \quad (3.3)$$

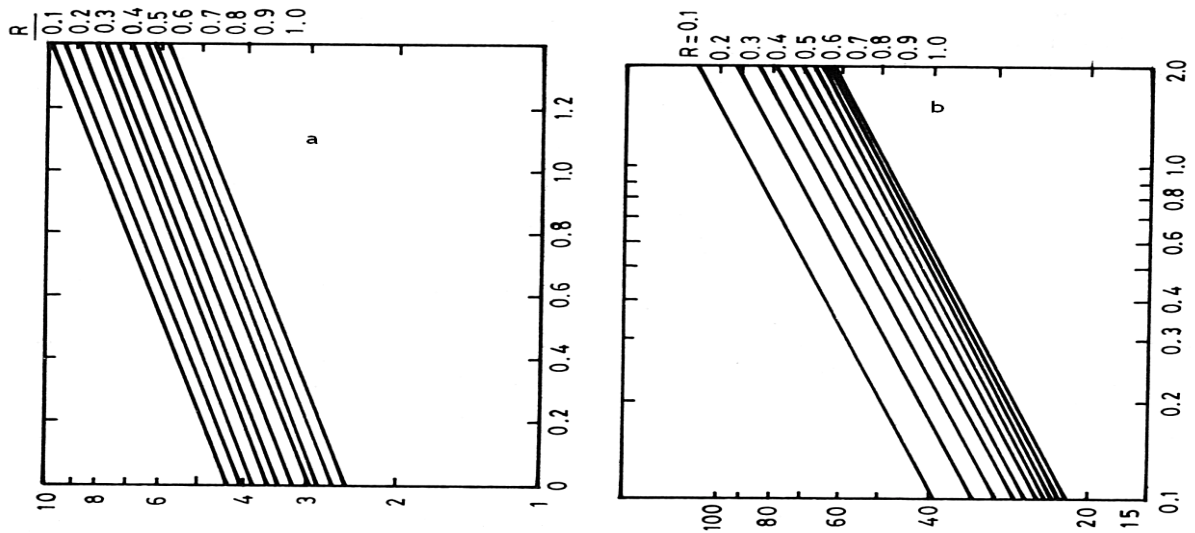


Figure. 3.1 (a).graphe pour la corrélation  $H = 490.D'^{0.357} . R_r^{-0.262}$  (b). graphe pour la corrélation  $H = 460.e^{0.607(D'-R_r)}$  [23].

où  $D'$  est le rapport entre la durée d'insolation actuelle et la durée d'insolation maximale prise égale à 12heures. Swartman et Ogunlade affirment que Eqs. (3.1)-(3.3) donnent une bonne estimation du rayonnement solaire. La figure 3.1 montre les graphes de corrélation pour les Eqs. (3.1) et (3.2). C'est une méthode pratique de connaître la valeur estimée du rayonnement solaire si  $D'$  et  $R_r$  sont connus.

### 3.3 Modèle liant la durée d'insolation $SS$ , l'humidité relative $R_r$ , La température maximale $T_{max}$ et le rayonnement global $H$ .

A.A.M Sayigh propose un modèle qui est basé sur différents paramètres météorologiques (durée d'insolation  $SS$ , humidité relative  $R_r$ , température maximale  $T_{max}$ ). Ce modèle tient compte aussi de la position géographique du site [23].

Il est donné par :

$$H = 11,6 K * N * e^{\frac{SS}{SS_0}} + \frac{R_r}{15} - \frac{1}{T_{max}} \quad (3.4)$$

Avec :

$$N = 1,7 - 0,458 \varphi \quad (3.5)$$

$$K = 100 (n SS_0 + W_{ij} \cos \varphi) \quad (3.6)$$

$$n = \frac{0,2}{(1 + 0,1\varphi)} \quad (3.7)$$



Avec :

$SS_0$  : durée d'insolation hors atmosphère.

$R_r$ : l'humidité relative (%)

$SS$  : durée d'insolation

$\varphi$  : latitude du site exprimée en radians

Le tableau (3.1) expose le facteur climatique  $W_{ij}$  pour les douze mois de l'année et pour les différentes zones climatiques [23].

$i$  : détermine la zone climatique.

- $i = 1$  site à l'intérieur du pays
- $i = 2$  zone côtière
- $i = 3$  zone montagneuse

i/mois Zone	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
W1j	1.28	1.38	1.54	1.77	2.05	2.30	2.48	2.41	2.36	1.73	1.38	1.17
W2j	1.46	1.77	2.05	2.15	2.05	2.05	2.10	2.17	2.14	1.96	1.60	1.43
W3j	1.60	1.81	2.00	2.17	2.25	2.26	2.24	2.20	2.10	1.92	1.70	1.60

Tableau. 3.1 : Utilisation du facteur climatique pour différentes plages *d'humidité, mois par mois* [23].

### 3.4 Modèle liant la durée d'insolation $SS$ , l'humidité absolue $R_a$ , et le rayonnement global $H$ .

#### 3.4.1 Modèle de H.P. Garg et S.N Garg.

H.P. Garg et S.N Garg proposent un modèle qui tient compte de la durée d'insolation et de l'humidité absolue [23].

En utilisant la courbe de saturation de l'air, moyennant une régression au sens des moindres carrés, H.P. Garg et S.N Garg ont mis en évidence la relation qui existe entre l'humidité absolue et l'humidité relative [23]:

$$R_a = R_r (4,7923 + 0,3647 T_a + 0,0055 T_a^2 + 0,0003 T_a^3) \quad (3.8)$$

Ils ont utilisé la relation (3.8) pour établir un modèle qui tient compte de la durée d'insolation, et de l'humidité absolue [23]:

$$H = H_0 (0,414 + 0,400 \left(\frac{SS}{SS_0}\right) - 0,0055 R_a) \quad (3.9)$$

Avec :

$H$  : Irradiation globale journalière

$H_0$  : Irradiation journalière à la limite de l'atmosphère

$T_a$  : Température ambiante

$R_a$  : L'humidité absolue

$R_r$  : L'humidité relative

### 3.4.2 Modèle de Hussain

Hussain a tenu compte du modèle de HP Garg pour développer un modèle basé sur les données moyennes mensuelles journalières de l'humidité absolue  $R_a$  et de la durée d'insolation  $SS$  pour estimer l'irradiation globale [23] :

$$H = H_0 (0,394 - 0,364 \left(\frac{SS}{SS_0}\right) - 0,0035 R_a) \quad (3.10)$$

### 3.5 Modèle liant la nébulosité $C_w$ et le rayonnement global $H$ .

Selon Worner (1967), l'analyse de la nébulosité et du rayonnement global a montré un rapport non linéaire entre les deux variables météorologiques. Worner, Hargreaves *et al.* ont proposé un modèle empirique simple où  $C_w$  est la moyenne journalière de la nébulosité observée (en octa) et  $a$ ,  $b$  et  $c$  sont des constantes empiriques [23] :

$$H = H_0 [a * \sqrt{(T_{max} - T_{min})} + b * \sqrt{1 - \frac{C_w}{8}}] + c \quad (3.11)$$

Avec :

$T_{min}$  : Température minimale

$T_{max}$  : Température maximale

### 3.6 Modèles liant la durée d'insolation et le rayonnement global.

Nous savons que la quantité de rayonnement solaire global est mesurée seulement pour un nombre limité de sites dans le monde, alors que la durée d'insolation est mesurée dans beaucoup de stations. Donc, celle-ci reste le paramètre largement disponible pour les évaluations du rayonnement solaire global. En outre, la mesure de la durée d'insolation SS est plus facile que la mesure du rayonnement globale.

Il est donc probable que l'exactitude de la mesure de la durée d'insolation soit plus forte que celle du rayonnement solaire global.

L'estimation du rayonnement solaire global à partir de la durée d'insolation a été étudiée pour la première fois par Angstrom en 1920 [14].

L'équation d'Angström-Prescott a été largement décrite par des auteurs dans l'étude du rayonnement solaire, depuis que Prescott l'a développé en 1940 [14]. Des modèles alternatifs à l'équation d'Angström-Prescott ont, depuis, été proposés :

#### 3.6.1 Modèle de Masson (1966)

Masson a tracé le rayonnement solaire global journalier H reçu sur un plan horizontal en fonction de l'insolation SS et a adapté un segment hyperbolique au résultat.

Le segment tend à être une ligne droite si la durée d'insolation **est** supérieure ou égale ( $\geq$ ) à 7h. Les résultats étaient exprimés sous les formes mathématiques suivantes[23] :

$$\frac{(SS + 2,64)^2}{(2,64)^2} - \frac{(H - 60)^2}{(99)^2} = 1 \quad (3.12)$$

$$H = 60 + (1406,2 * SS^2 + 7426,6 * SS)^{1/2} \quad (3.13)$$

#### 3.6.2 Modèle de Sabbagh et al. (1973)

Sabbagh et al. ont utilisé la moyenne journalière mensuelle de l'insolation SS avec deux constantes arbitraires (formule 3.14). Dans une autre formule (3.15), ils ont utilisé la moyenne horaire mensuelle de la durée d'insolation Z [23]:

$$H = (A + B * \text{Log } n) * SS \quad (3.14)$$

$$H = (A' + B' * \text{Log } n) * Z \quad (3.15)$$

Où  $A' = 35$ ,  $B' = 11$  et  $A = 42$ ,  $B = 12$ , et  $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 6, 5, 4, 3, 2, 1$  pour les mois 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, respectivement, (mois 1 = janvier, mois 12 = décembre).  
 $Z$  est calculé à partir de l'équation 1.17 (page 34) :

$$Z = \left(\frac{2}{15}\right) * \cos^{-1}(\tan(\varphi) * \tan(\delta))$$

où  $\delta$  est l'angle de déclinaison du lieu et  $\varphi$ , la latitude du lieu.

Dans notre cas nous avons utilisé trois modèles afin de calculer l'indice de clarté à partir de la fraction d'insolation [24]

- Modèle linéaire (modèle Angström-Prescott) :

$$\frac{H_{i,c}}{H_{i,0}} = a + b * \frac{SS_i}{SS_{i,0}} \quad (3.16)$$

- Modèle quadratique (modèle Ögelman et al.) [26] :

$$\frac{H_{i,c}}{H_{i,0}} = a + b * \frac{SS_i}{SS_{i,0}} + c * \left(\frac{SS_i}{SS_{i,0}}\right)^2 \quad (3.17)$$

- Modèle logarithmique (modèle Ampratwum et Dorvlo) [27]

$$\frac{H_{i,c}}{H_{i,0}} = a + b \text{Log}\left(\frac{SS_i}{SS_{i,0}}\right) \quad (3.18)$$

Avec:

$H_{i,c}$ : irradiation globale journalière calculé (estimé) ;

$H_{i,0}$ : irradiation journalière à la limite de l'atmosphère;

$SS_i$ : durée d'insolation mesurée ;

$SS_{i,0}$ : durée maximale d'insolation ;

$a, b, c$  : constantes empiriques.

### 3.7 Paramètres utilisés dans l'évaluation des modèles estimés

Dans la littérature, les auteurs ont étudié la qualité du modèle lui-même ou la qualité de l'estimation du rayonnement solaire global en se basant sur un ensemble de paramètres statistiques comme le coefficient de détermination  $R^2$  et la racine de l'erreur moyenne quadratique (RMSE).

L'étude de la qualité du modèle, exige que les paramètres statistiques devraient être tirés de l'ensemble de données de  $\frac{H}{H_0}$  et de  $\frac{SS}{SS_0}$

où,  $H$  : irradiation globale journalière,

$H_0$  : irradiation journalière hors atmosphère,

$SS$  : durée d'insolation,  $SS_0$  : durée maximale d'insolation.

### 3.8 Calcul des paramètres statistiques

L'analyse de la régression nous aidera à trouver une relation entre les paramètres étudiés telle que la somme des carrés des écarts  $d_1, d_2, \dots$  soit minimale [24] :

$$\sum d_i^2 = \text{minimum} \quad (3.19)$$

$$\text{Soit : } Y = b \cdot X + a \quad \Leftrightarrow \quad y_{i,c} = b \cdot x_i + a \quad (3.20)$$

Avec :  $y_{i,c}$  = indice de clarté calculé ;  $x_i$  = fraction d'insolation mesurée.

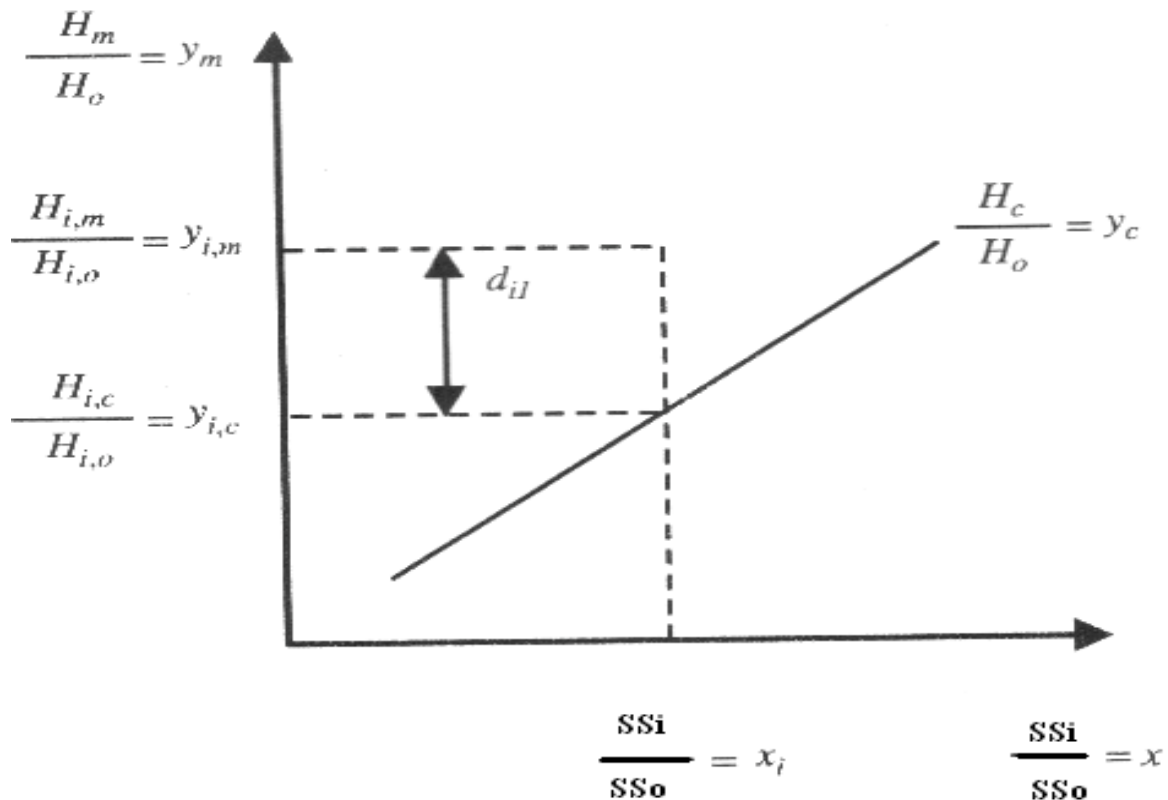


Figure. 3.2 : Régression au sens des moindres carrés pour l'équation (3.21) [24]

Nous appliquons la régression au sens des moindres carrés (figure 3.2)

$$\text{pour l'équation (3.21). } \sum_{i=1}^n d^2_i = \sum_{i=1}^n (y_{i,m} - y_{i,c})^2 = \sum_{i=1}^n (y_{i,m} - (a + bx_i))^2 \quad (3.21)$$

En déterminant les valeurs de a et de b qui réduisent au minimum  $\sum d^2_i$ , une meilleure droite linéaire peut être trouvée.

Nous utilisons la méthode suivante pour déterminer a et b [24]

$$\frac{\partial F}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n (y_{i,m} - (a + bx_i)) = 0 \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial F}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n (y_{i,m} - (a + bx_i))x_i = 0 \quad (3.23)$$

a et b peuvent être alors déduits des équations suivantes :

$$an + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_{i,m} \quad (3.24)$$

$$a \sum_{i=1}^n x_i + b \sum_{i=1}^n x^2_i = \sum_{i=1}^n x_i y_{i,m} \quad (3.25)$$

Finalement, les paramètres a et b sont donnés par les équations suivantes :

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n y_{i,m} - b \sum_{i=1}^n x_i}{n} = \bar{y} - b \bar{x} \quad (3.26)$$

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_{i,m} - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_{i,m}}{n \sum_{i=1}^n x^2_i - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (3.27)$$

Le signe de la pente b donne le sens de la corrélation, mais pas sa qualité.

b > 0 corrélation positive

b < 0 corrélation négative

b = 0 pas de corrélation

Si c'est une régression curviligne que nous utilisons avec les fonctions non-linéaires comme l'équation quadratique ou logarithmique ou encore exponentielle, les paramètres inconnus a, b, c peuvent être calculés de la même façon, formant autant d'équations que le nombre de paramètres inconnus.

Le coefficient de détermination  $R^2$  constitue comme une mesure de la qualité de l'estimation et de la pertinence du modèle. Dans le cas d'une régression linéaire,  $R^2$  est simplement le carré du coefficient de corrélation  $R$  qui est donné par [24]:

$$R = \frac{\sigma_{x,y}}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.28)$$

avec :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \text{ est la moyenne de } x; \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \text{ est la moyenne de } y \quad (3.29)$$

$$\sigma_{x,y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y}) \quad (3.30.1)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{est l'écart type de } x \quad (3.30.2)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{est l'écart type de } y \quad (3.30.3)$$

L'analyse de corrélation mesure la "force" de l'interaction entre la variable  $x_i$  (fraction d'insolation) et la variable  $y_i$  (indice de clarté). Elle se fait au travers du calcul du coefficient de détermination  $R^2$  dont la valeur donne des informations sur le lien entre les deux variables.

Si  $R^2$  est proche de +1, cela signifie que les deux variables sont très fortement corrélées.

Si  $R^2$  est proche de 0, cela signifie qu'il n'existe aucune corrélation entre les deux variables, c'est-à-dire que, les variations de  $x_i$  n'ont pas d'influences sur les variations de  $y_i$ .

Le coefficient de détermination est donné par [24]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{i,m} - y_{i,c})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{i,m} - \bar{y}_m)^2} \quad (3.31)$$

Où :

$y_{i,m}$  est la valeur mesurée et  $y_{i,c}$  est la valeur calculée.

Parmi les différentes possibilités pour définir l'erreur global, nous avons pris la racine de l'erreur moyenne quadratique (RMSE). Le RMSE nous permet de comparer les performances de nos modèle, un RMSE faible, signifie que la qualité explicative du modèle est bonne.

Le RMSE est donnée par [24]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{H_{i,m}}{H_{i,0}} - \frac{H_{i,c}}{H_{i,0}} \right)^2} \quad (3.32)$$

En appliquant (3.31) à la figure (3.2), nous avons la relation suivante [24]

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{H_{i,m}}{H_{i,0}} - \frac{H_{i,c}}{H_{i,0}} \right)^2}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{H_{i,m}}{H_{i,0}} - \left\langle \frac{H_m}{H_0} \right\rangle \right)^2} = 1 - \frac{RMSE^2}{\sigma_y^2} \quad (3.33)$$

Le coefficient de détermination, noté  $R^2$  est une mesure de la proportion (%) de la variation de la variable  $y_{i,c}$  qui s'explique par les variations de la variable  $x_i$ .

Donc, la qualité du modèle s'exprime par la mesure de la proportion  $R^2$ .

L'équation (3.33) nous permet de comprendre les rapports entre les paramètres :

$R^2$  est donné comme une fonction de RMSE et de  $\sigma_y^2$ .

Si nous prenons un ensemble de données mesurées où  $\sigma^2$  demeure constante, nous déduisons que lorsque  $R^2$  augmente, RMSE diminue (tableau 3.2 et 3.3).

Variance $\sigma_y^2$	$R^2$	RMSE	Modèle
0,03	0,735	0,077	Régression quadratique
0,03	0,724	0,081	Régression linéaire
0,03	0,759	0,067	Régression logarithmique
0,05	0,881	0,058	Régression quadratique
0,05	0,872	0,064	Régression linéaire
0,05	0,812	0,072	Régression logarithmique

Tableau 3.2 : Variation de  $R^2$  en fonction de RMSE pour une même variance  $\sigma_y^2$ ,

site de Bouzaréah



Variance $\sigma^2_y$	R <sup>2</sup>	RMSE	Modèle
0,01	0,763	0,036	Régression quadratique
0,01	0,72	0,042	Régression linéaire
0,01	0,614	0,046	Régression logarithmique
0,03	0,750	0,064	Régression quadratique
0,03	0,713	0,076	Régression linéaire
0,03	0,763	0,061	Régression logarithmique

*Tableau 3.3 : Variation de R<sup>2</sup> en fonction de RMSE pour une même variance  $\sigma^2_y$ , site de Ghardaïa*

Les corrélations entre ces deux variables, établies, mettront en évidence les relations entre l'insolation et le rayonnement global. La comparaison entre les modèles, et l'évaluation de leur qualité seront déterminées par R<sup>2</sup> et par le RMSE.

Le meilleur modèle qui sera retenu est celui présentant un bon R<sup>2</sup> et un bon RMSE.

### 3.9 : Procédure utilisée pour l'évaluation du rayonnement solaire.

Pour faciliter le calcul des différents paramètres relatifs au rayonnement solaire et la création des fichiers des séquences journalières de l'indice de clarté  $k_t$  calculé, des programmes Matlab avaient été conçus.

Les diagrammes suivants présentent la procédure utilisée pour atteindre les objectifs ciblés.

La figure 3.3 expose l'organigramme du programme calculant le rayonnement solaire global  $H_0$  reçue sur une surface horizontale à la limite de l'atmosphère.

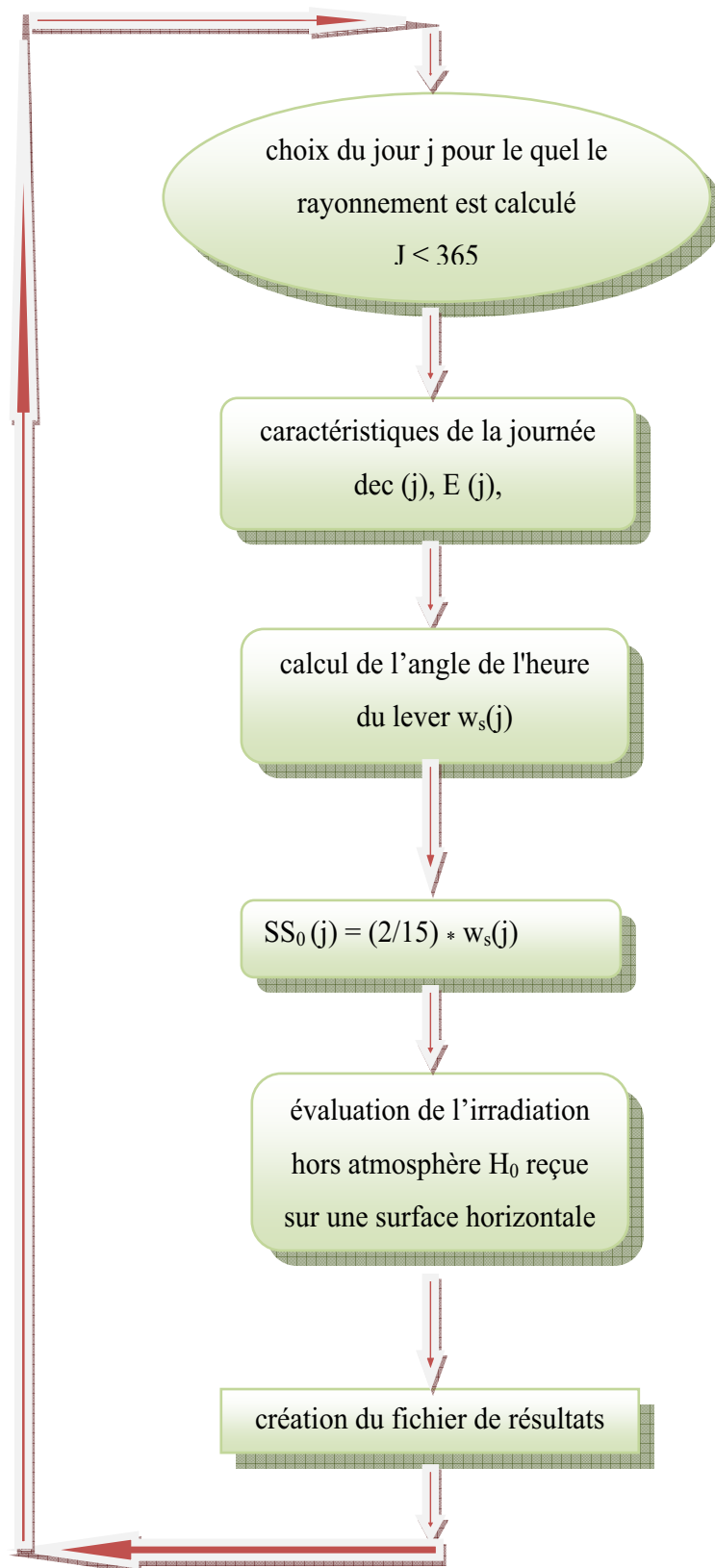


figure 3.3 Organigramme calculant le rayonnement global  $H_0$  hors atmosphère.

Les figures suivantes exposent les organigrammes des programmes calculant l'indice de clarté  $K_{t,c} = \frac{H_c}{H_0}$  pour les trois modèles utilisés, c'est-à-dire: le modèle linéaire (modèle Angström-Prescott), le modèle quadratique (modèle Ögelman et al.) et le modèle logarithmique (modèle Ampratwum et Dorvlo).

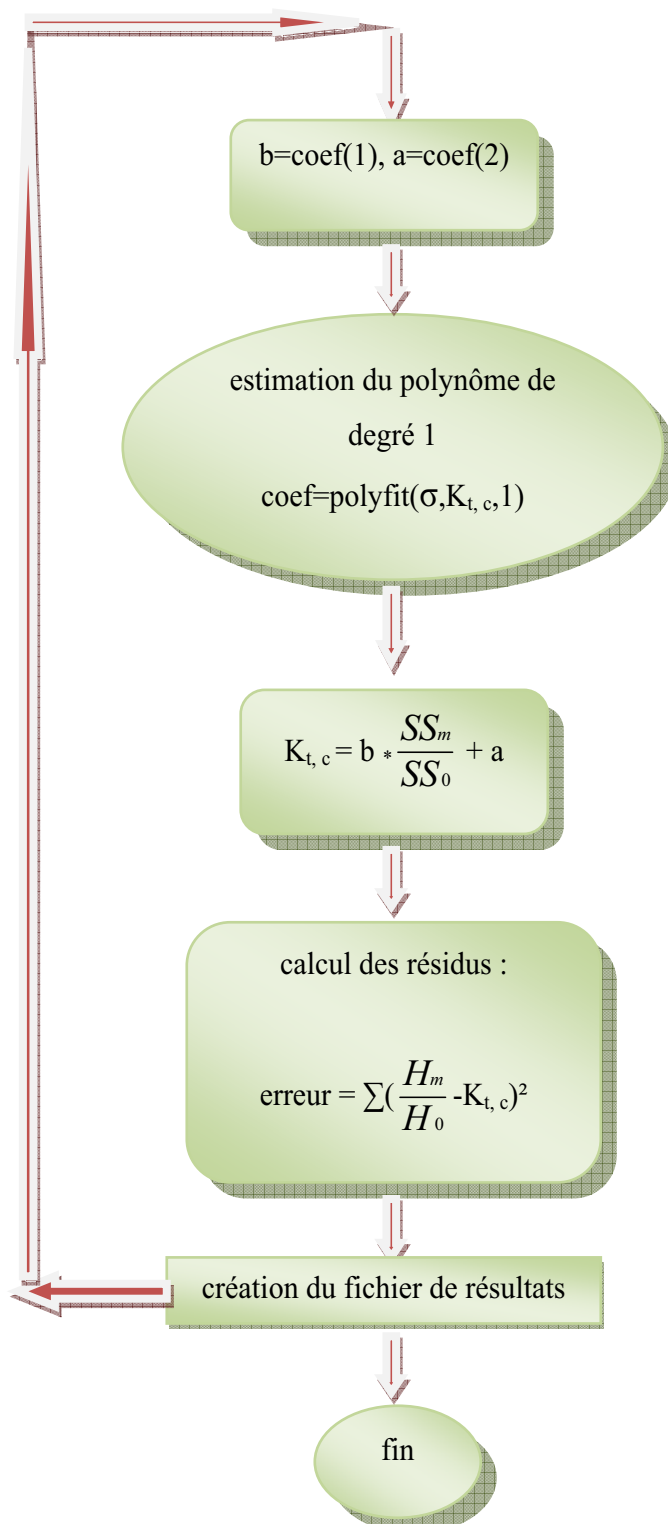


figure 3.4 : Calcul de l'indice de clarté  $K_t$  par le modèle linéaire.

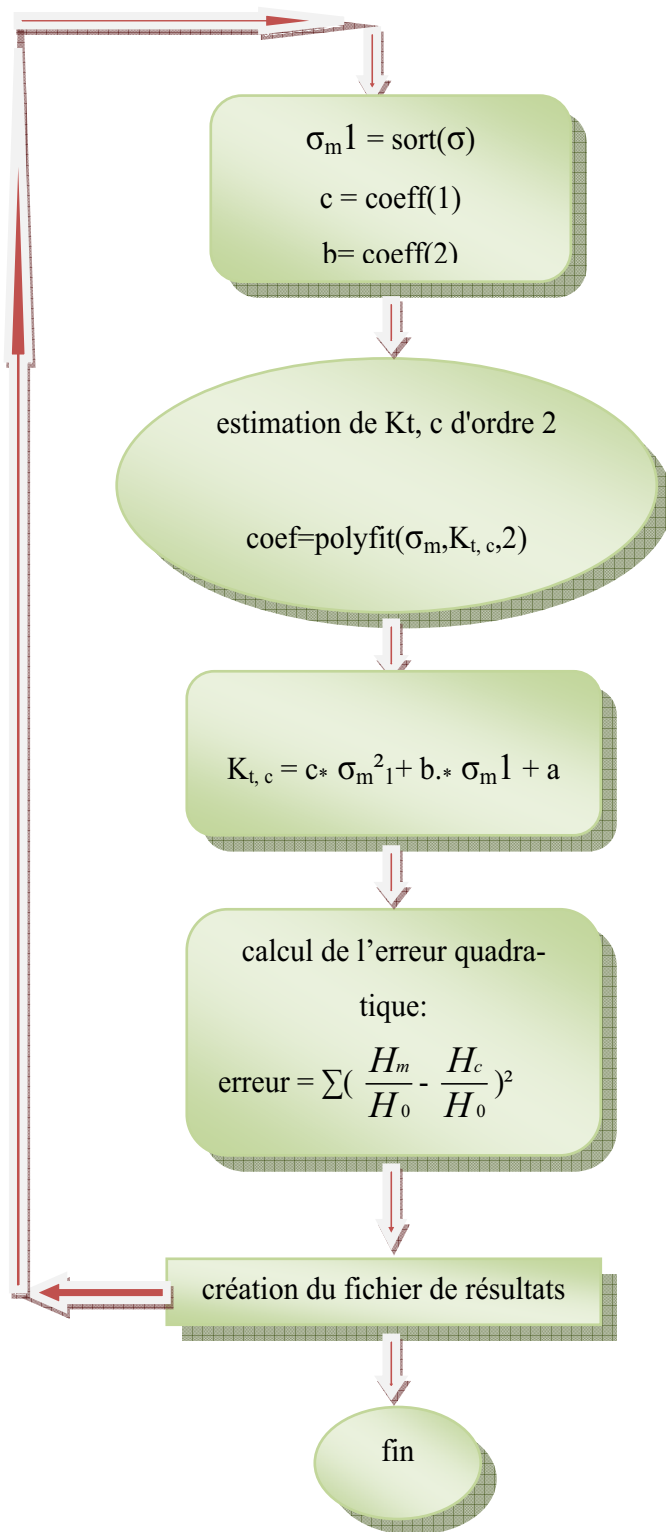


figure 3.5 : Calcul de l'indice de clarté  $K_t$  par le modèle quadratique.

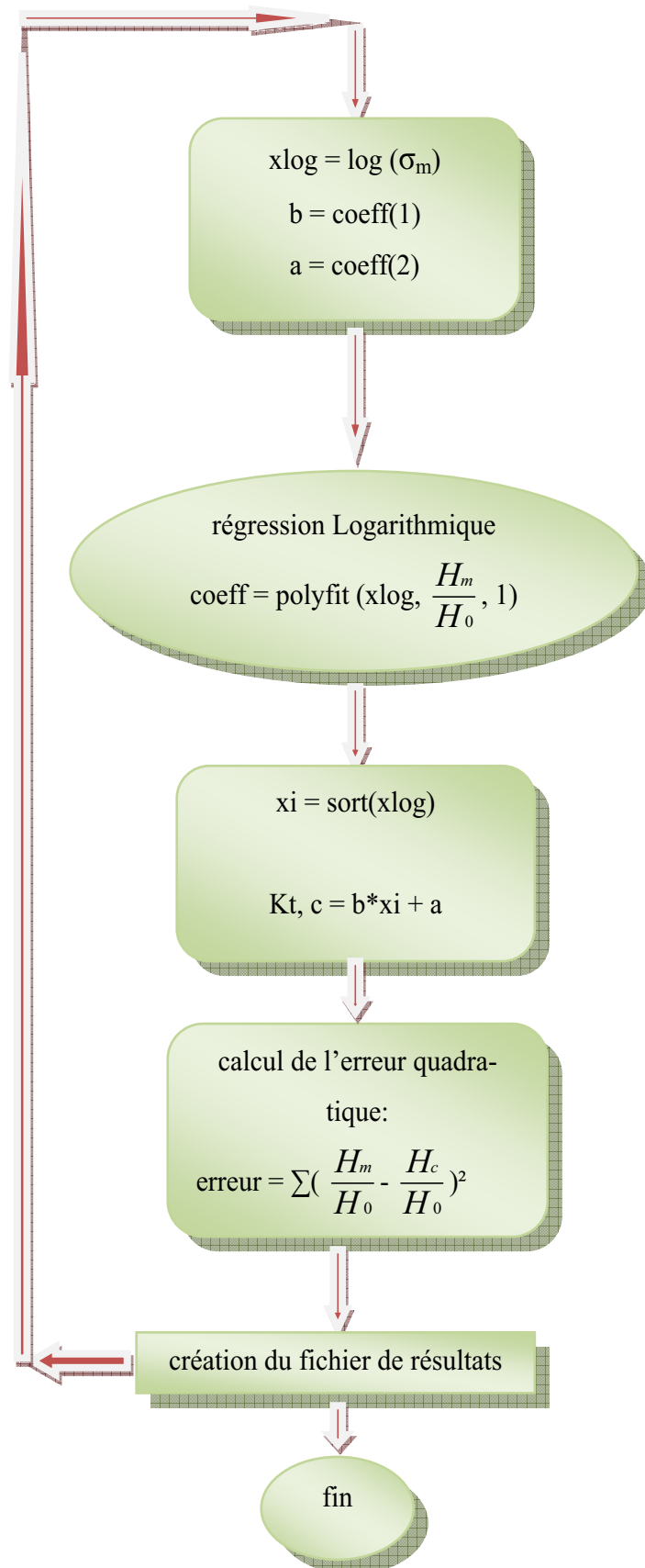


figure 3.6 : Calcul de l'indice de clarté  $K_t$  par le modèle logarithmique.

### 3.10 : Conclusion

Ce chapitre nous a permis de cerner les modèles mathématiques pour simuler le rayonnement solaire en fonction de certaines variables climatiques.

Dans notre cas, nous avons utilisé trois modèles afin de calculer l'indice de clarté  $K_t$  à partir de la fraction d'insolation  $\sigma_m$ : le modèle linéaire d'Angström-Prescott, le modèle quadratique d'Ögelman et al et le modèle logarithmique d'Ampratwum et Dorvlo les paramètres statistiques, comme le coefficient de détermination ( $R^2$ ) et la racine de l'erreur moyenne quadratique (RMSE), nous permettent de vérifier l'adéquation de la fonction de corrélation.

De plus, la condition de variabilité de  $R^2$  par rapport au RMSE est vérifiée, c'est-à-dire, pour une même variance  $\sigma^2$ ,  $R^2$  augmente lorsque RMSE diminue.

## CHAPITRE 4

### LES RÉSULTATS DE VALIDATION DES MODELES ET DISCUSSION

#### 4.1 Introduction

La quantité de rayonnement solaire global et sa distribution temporelle sont des variables nécessaires à l'étude du fonctionnement et à l'évaluation des rendements et des consommations annuelles et mensuelles de tout dispositif faisant appel au gisement solaire. Dans ce chapitre, nous effectuerons une comparaison des trois modèles présentés au chapitre III à savoir : Le modèle linéaire (modèle Angström-Prescott), le modèle quadratique (modèle Ögelman et al.) et le Modèle logarithmique (modèle Ampratwum et Dorvlo), pour estimer le rayonnement solaire global à partir de la durée d'insolation mesurée. Ce chapitre illustre également sous forme de tableaux l'adéquation entre les résultats prévus de  $\frac{H_c}{H_0}$  et les données mesurées de  $\frac{H_m}{H_0}$ .

Enfin, nous discuterons des différents résultats obtenus.

#### 4.2 Evolution mensuelle de l'irradiation journalière

##### 4.2.1 Modèle basé sur la régression linéaire : (modèle Angstrom-Prescott)

Rappelons que Les premiers modèles liant l'insolation et le rayonnement global ont été mis en place par Angstrom dans un premier temps, et ensuite améliorés par Prescott [24], donnant ainsi la relation suivante pour les données journalières:

$$\frac{H_{i,c}}{H_{i,0}} = a + b * \frac{SS_{i,m}}{SS_{i,0}} \quad \Leftrightarrow \quad K_{t,c} = a + b * \sigma_i \quad (4.1)$$

$$\text{Avec: } K_{tc} = \frac{H_{i,c}}{H_{i,0}} : \text{indice de clarté calculé ;} \quad (4.2)$$

$$\sigma_i = \frac{SS_{i,m}}{SS_{i,0}} : \text{fraction d'insolation mesurée.} \quad (4.3)$$

Nous avons utilisé une régression linéaire par la méthode des moindres carrés traditionnels afin de déterminer les coefficients du modèle. Les tableaux 4.1 et 4.2 exposent les résultats du modèle Angström- Prescott appliqué pour des données journalières de chaque mois pour les sites étudiés. Le coefficient de détermination  $R^2$  nous permet de vérifier l'adéquation de la fonction de corrélation, autrement dit, il indique dans quelle mesure la liaison qui existe entre les deux variables  $K_{t,m}$  et  $\sigma_{i,m}$  peut être approchée par une relation affine (droite linéaire), il mesure quantitativement le degré de dépendance des deux variables dont les droites de régressions donnent une explication graphique (figures.4.1 et 4.2).

Notons, que les résidus (erreurs) indiquent l'écart entre les valeurs mesurées et les valeurs estimées de H :

$$d_i = H_{i,m} - H_{i,c} \quad i=1, \dots, n \quad (4.4)$$



Du tableau 4.1, nous constatons que la qualité du modèle est bonne et n'est pas modifiée pour les mois de janvier et septembre, le RMSE varie très peu ( $RMSE \approx 0.06$ ) et les séquences des résidus ne montrent pas de changement important pour ces mêmes périodes. Ce qui est vérifié aussi pour le mois de novembre et décembre où le RMSE ne varie que très peu ( $RMSE \approx 0.07$ ). La précision du modèle reste satisfaisante pour l'ensemble des mois ayant un  $R^2 > 0.7$ .

La qualité de l'estimation est un peu dégradée pour les mois de février et mai, avec :  $0,10 \leq RMSE \leq 0,11$ . Cette dégradation se traduit par des résidus un peu plus élevés.

Le tableau 4.1 expose les résultats du modèle linéaire (modèle AngströmPrescott.) appliqué pour des données journalières de chaque mois pour le site de Bouzaréah.

Mois	b	a	$\sigma^2$	Résidu	$R^2$	RMSE
Janvier	0,42	0,18	0,05	0,10	0,872	0,064
Février	0,37	0,24	0,05	0,272	0,633	0,111
Mars	0,56	0,15	0,05	0,230	0,767	0,095
Avril	0,51	0,20	0,06	0,242	0,771	0,099
Mai	0,52	0,15	0,03	0,255	0,669	0,102
Juin	0,42	0,28	0,02	0,132	0,609	0,074
Juillet	0,58	0,16	0,04	0,090	0,880	0,056
Aout	0,53	0,15	0,03	0,167	0,724	0,081
Septembre	0,44	0,25	0,04	0,091	0,815	0,061
Octobre	0,50	0,13	0,03	0,060	0,873	0,051
Novembre	0,44	0,16	0,03	0,128	0,782	0,073
Décembre	0,35	0,22	0,04	0,132	0,749	0,072

Tableau 4.1 : Résultats du modèle Angström-Prescott pour les données journalières mois par mois (site de Bouzaréah).

Les courbes de régressions suivantes sont un moyen graphique d'évaluer la liaison existante entre les deux variables étudiées (nuage de points formé par ces deux variables).

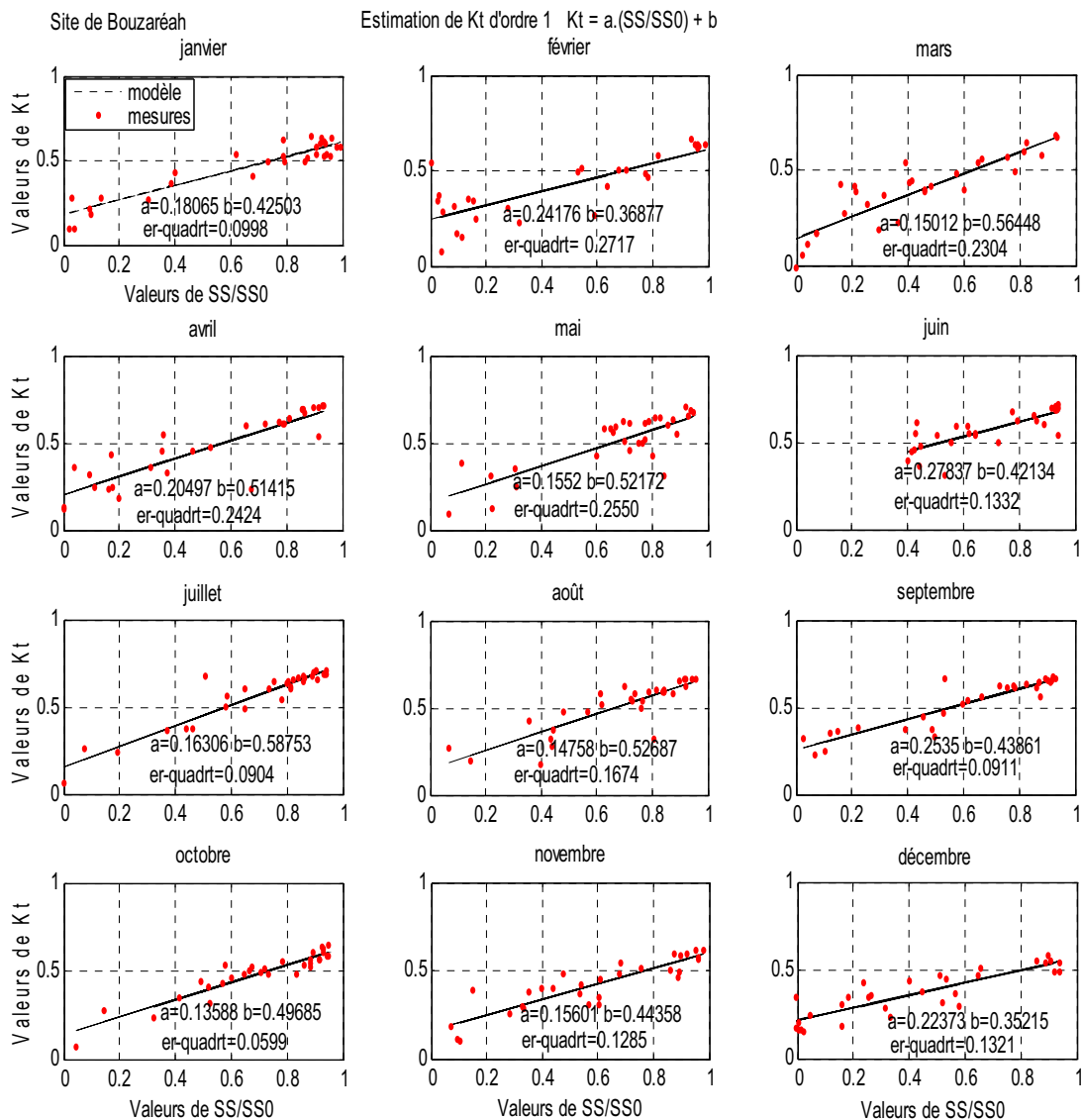


Figure. 4.1 : Utilisation du modèle linéaire pour les données journalières, site de Bouzaréah.

De la figure 4.1, nous voyons clairement que Les droites qui passent au mieux au milieu du nuage de points rendant minimum le RMSE correspondent aux mois de juillet et septembre. Les points présentent une faible dispersion autour de la droite.

La corrélation entre les deux variables ( $K_{t,i}$ ,  $\sigma_i$ ) est positive, de qualité forte puisque  $R^2 > 0,80$ . La corrélation est faible pour les mois et de février et mai, puisque le modèle n'explique qu'un peu plus de la moitié les variations de  $K_{t,i}$  par les variations de  $\sigma_i$

Du tableau 4.2 nous constatons, que pour la même variance  $\sigma^2$  ( $\sigma^2=0.02$ ),  $R^2$  ne peut augmenter que si RMSE décroît ou vice-versa. Le RMSE subit une légère modification pour les mois d'avril ,mai et juin, les séquences des résidus ne montrent qu'un léger changement, la corrélation entre les deux paramètres radiométriques ( $K_{t,i}$  ,  $\sigma_i$ ) est forte.

Le tableau 4.2 expose les résultats du modèle linéaire (modèle AngstrômPrescott.) appliqué pour des données journalières de chaque mois pour le site de Ghardaïa.

Mois	b	a	$\sigma^2$	Résidu	$R^2$	RMSE
Janvier	0,43	0,34	0,02	0,086	0,761	0,068
Février	0,49	0,31	0,03	0,070	0,836	0,063
Mars	0,35	0,45	0,02	0,179	0,589	0,084
Avril	0,40	0,41	0,01	0,017	0,905	0,026
Mai	0,41	0,40	0,02	0,020	0,922	0,029
Juin	0,31	0,45	0,02	0,019	0,902	0,031
Juillet	0,32	0,45	0,01	0,042	0,720	0,042
Aout	0,21	0,52	0,01	0,051	0,507	0,046
Septembre	0,32	0,43	0,02	0,226	0,438	0,103
Octobre	0,40	0,35	0,02	0,032	0,875	0,038
Novembre	0,40	0,37	0,03	0,050	0,863	0,046
Décembre	0,38	0,37	0,03	0,127	0,713	0,076

Tableau 4.2 : Résultats du modèle Angstrôm-Prescott pour les données journalières mois par mois (site de Ghardaïa).

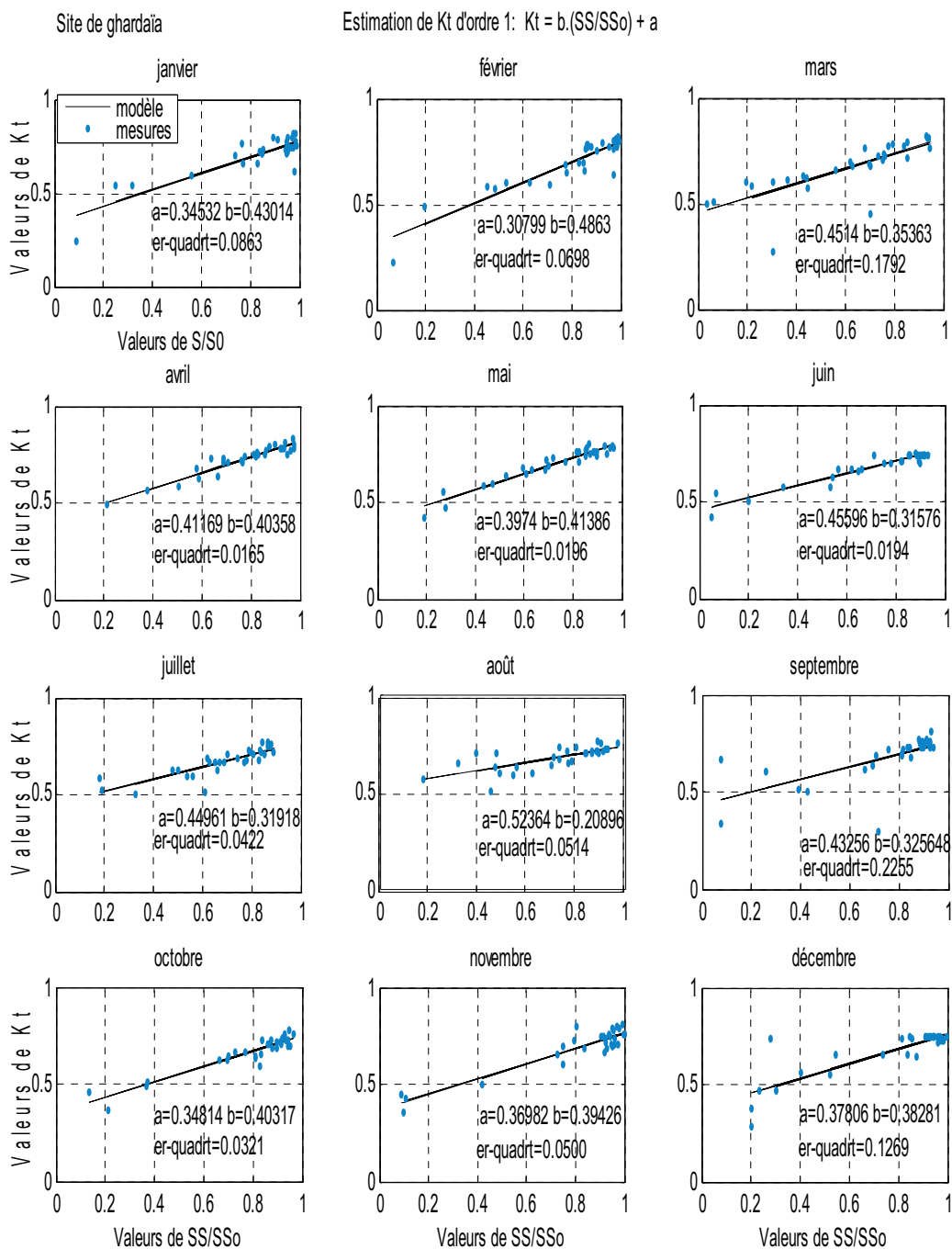


Figure 4.2: Utilisation du modèle linéaire pour les données journalières, site de Ghardaïa.

Pour Ghardaïa, de la figure 4.2 nous constatons une dispersion des points assez faible pour le mois d'octobre et les mois d'avril à juin, le RMSE atteint ces minima, nous avons donc une corrélation assez forte ( $0,86 < R^2 < 0,92$ ) entre les variables étudiées. la qualité du modèle est faible pour les mois de mars, août et septembre.

#### 4.2.2 Model basé sur la régression polynomiale du second degré

La lecture du tableau 4.3 nous permet de constater que la précision obtenue par le modèle est bonne, et que le modèle montre un  $R^2$  assez haut avec un RMSE relativement bas, en particulier, pour le mois de janvier, juillet, septembre et octobre.

Il est clair que pour tout les mois de l'année, la précision obtenue par le modèle quadratique (modèle Ögelman et al.) est meilleure que celle de l'estimation linéaire. Le tableau 4.3 présente les résultats du appliqué pour des données journalières de chaque mois pour le site étudié de Bouzaréah.

Mois	c	b	a	$\sigma^2$	Résidu	$R^2$	RMSE
Janvier	-0,16	0,59	0,16	0,05	0,096	0,881	0,058
Février	0,48	-0,10	0,30	0,05	0,228	0,703	0,096
Mars	-0,30	0,84	0,11	0,04	0,216	0,789	0,088
Avril	0,004	0,51	0,20	0,05	0,242	0,779	0,095
Mai	-0,15	0,68	0,13	0,04	0,253	0,672	0,095
Juin	0,129	0,24	0,33	0,02	0,133	0,623	0,070
Juillet	-0,24	0,84	0,11	0,03	0,082	0,895	0,054
Aout	0,10	0,42	0,17	0,03	0,166	0,735	0,077
Septembre	0,05	0,39	0,26	0,04	0,091	0,845	0,058
Octobre	-0,21	0,74	0,08	0,03	0,054	0,890	0,044
Novembre	-0,07	0,52	0,14	0,03	0,128	0,791	0,069
Décembre	-0,07	0,42	0,21	0,04	0,311	0,761	0,068

Tableau 4.3 : Résultats du modèle quadratique pour les données journalières mois par mois (site de Bouzaréah).

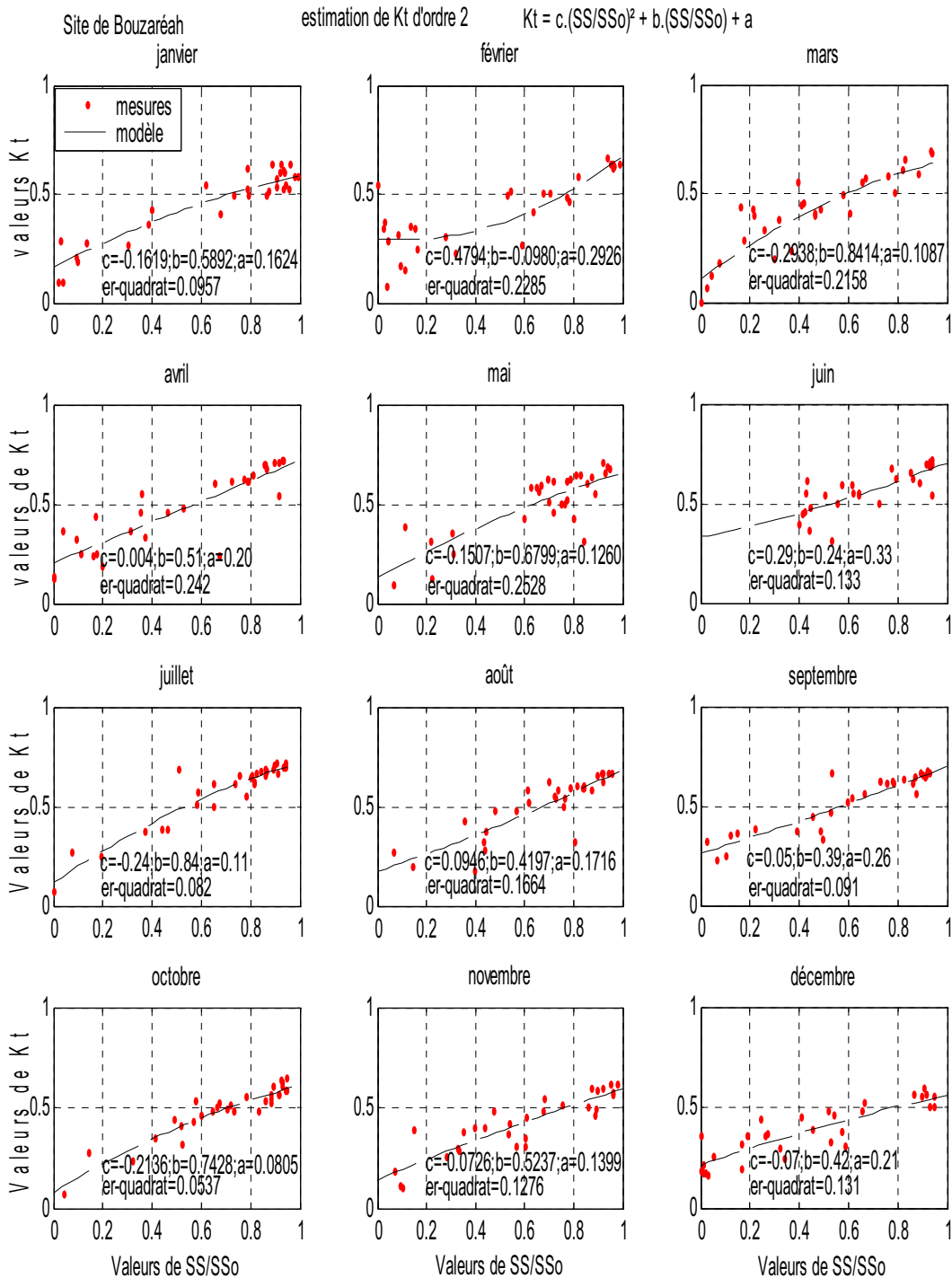


Figure 4.3: Utilisation du modèle quadratique pour les données journalières, site de Bouzaréah.

De la figure 4.3, nous constatons que la corrélation entre les deux variables est bonne, plus particulièrement pour le mois de janvier, juillet, septembre et octobre.

La qualité du modèle est meilleure que celle relevée dans l'estimation linéaire (modèle d'Angström-Prescott).

Le modèle quadratique donne de meilleurs résultats que le modèle linéaire en terme de  $R^2$  (tableau 4.4). Le RMSE, qui mesure la dispersion des valeurs estimées autour de la droite de régression oscille entre 0.02 et 0.04 d'avril à août, octobre et novembre ce qui indique une très faible dispersion (figure 4.4).

Le tableau 4.4 et présente les résultats du modèle quadratique (modèle Ögelman et al.) appliqué pour des données journalières de chaque mois pour le site de Ghardaïa.

Mois	c	b	a	$\sigma^2$	Résidu	$R^2$	RMSE
Janvier	-0,45	0,97	0,23	0,02	0,070	0,814	0,050
Février	-0,21	0,73	0,25	0,03	0,065	0,853	0,051
Mars	0,24	0,10	0,50	0,02	0,171	0,621	0,078
Avril	-0,11	0,55	0,37	0,01	0,016	0,913	0,024
Mai	-0,26	0,74	0,31	0,02	0,015	0,942	0,023
Juin	-0,05	0,37	0,45	0,02	0,373	0,907	0,027
Juillet	0,31	-0,03	0,53	0,01	0,037	0,763	0,036
Aout	0,26	-0,12	0,61	0,01	0,048	0,559	0,041
Septembre	0,61	-0,34	0,55	0,02	0,191	0,540	0,084
Octobre	0,11	0,27	0,38	0,02	0,031	0,882	0,033
Novembre	-0,01	0,40	0,37	0,03	0,050	0,867	0,043
Décembre	-0,45	0,93	0,25	0,03	0,115	0,750	0,064

Tableau 4.4 : Résultats du modèle quadratique pour les données journalières mois par mois (site de Ghardaïa).

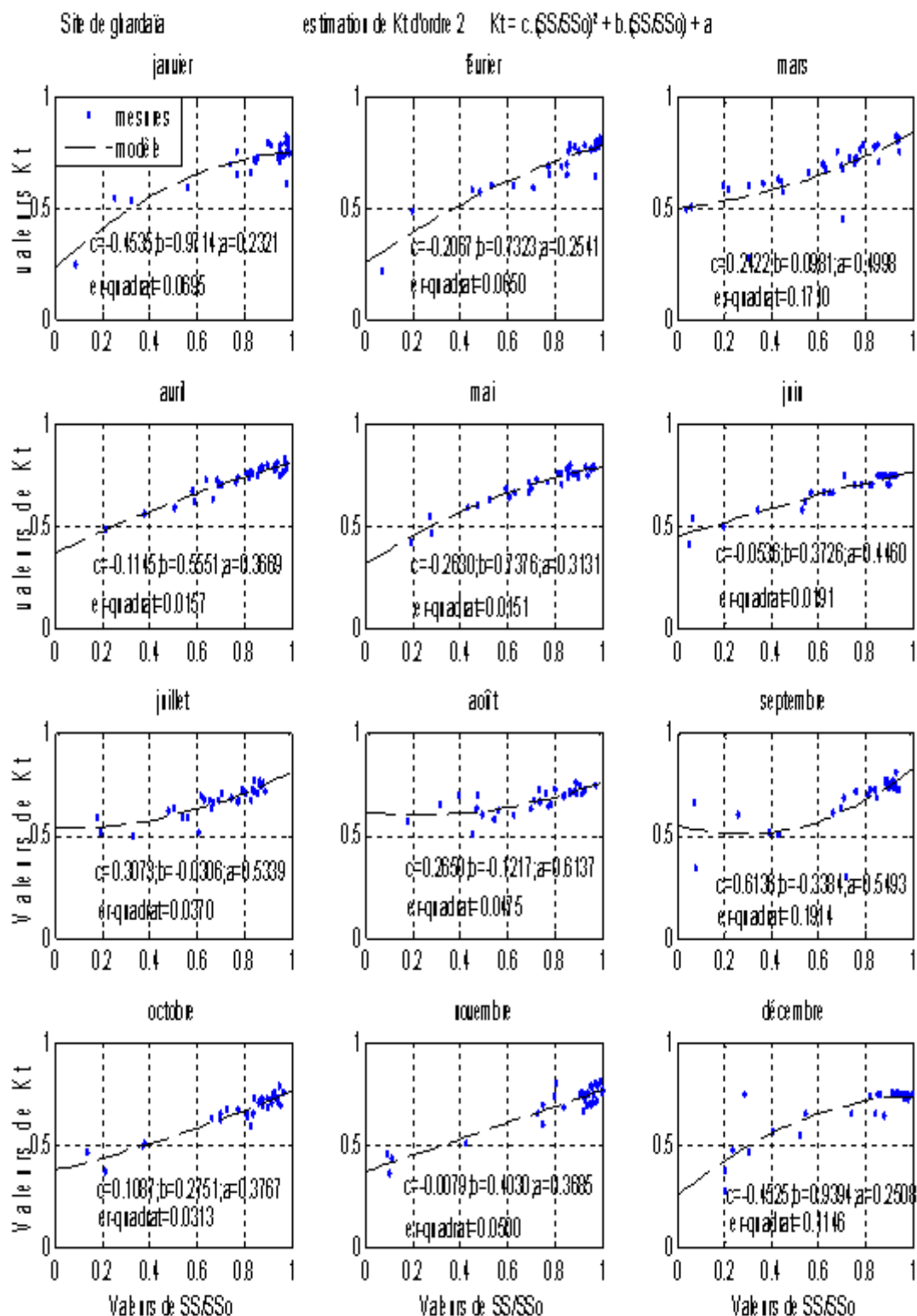


Figure 4.4: Utilisation du modèle quadratique pour les données journalières, site de Ghardaïa.

Tenant compte de la figure 4.4, nous constatons une bonne présentation des données par ce modèle.



### 4.2.3 Modèle basé sur la régression logarithmique

Le modèle logarithmique nous donne de moins bon résultats que le modèle quadratique en montrant un coefficient de détermination faible. ( $R^2 < 07$ ).

Le modèle n'explique qu'un peu plus de la moitié les variations de  $K_t$  par la variable  $\sigma_i$  pour les mois de février à juin, aout, septembre et decembre.

Le tableau 4.5 montre les résultats du modèle logarithmique (modèle Ampratwum et Dorvlo) appliqué pour des données journalières de chaque mois pour le site de Bouzaréah.

Mois	b	a	$\sigma^2$	Résidu	$R^2$	RMSE
Janvier	0,12	0,56	0,05	0,152	0,812	0,072
Février	0,10	0,54	0,05	0,320	0,573	0,111
Mars	0,16	0,60	0,04	0,232	0,717	0,093
Avril	0,16	0,63	0,05	0,345	0,590	0,115
Mai	0,19	0,61	0,04	0,280	0,687	0,097
Juin	0,27	0,68	0,02	0,137	0,611	0,070
Juillet	0,17	0,68	0,03	0,125	0,759	0,067
Aout	0,19	0,60	0,02	0,255	0,691	0,070
Sep- tembre	0,13	0,61	0,04	0,180	0,692	0,080
Octobre	0,18	0,57	0,03	0,084	0,833	0,053
Novembre	0,17	0,54	0,03	0,155	0,736	0,073
Décembre	0,08	0,50	0,04	0,161	0,680	0,077

Tableau 4.5 : Résultats du modèle logarithmique pour les données journalières mois par mois (site de Bouzaréah).

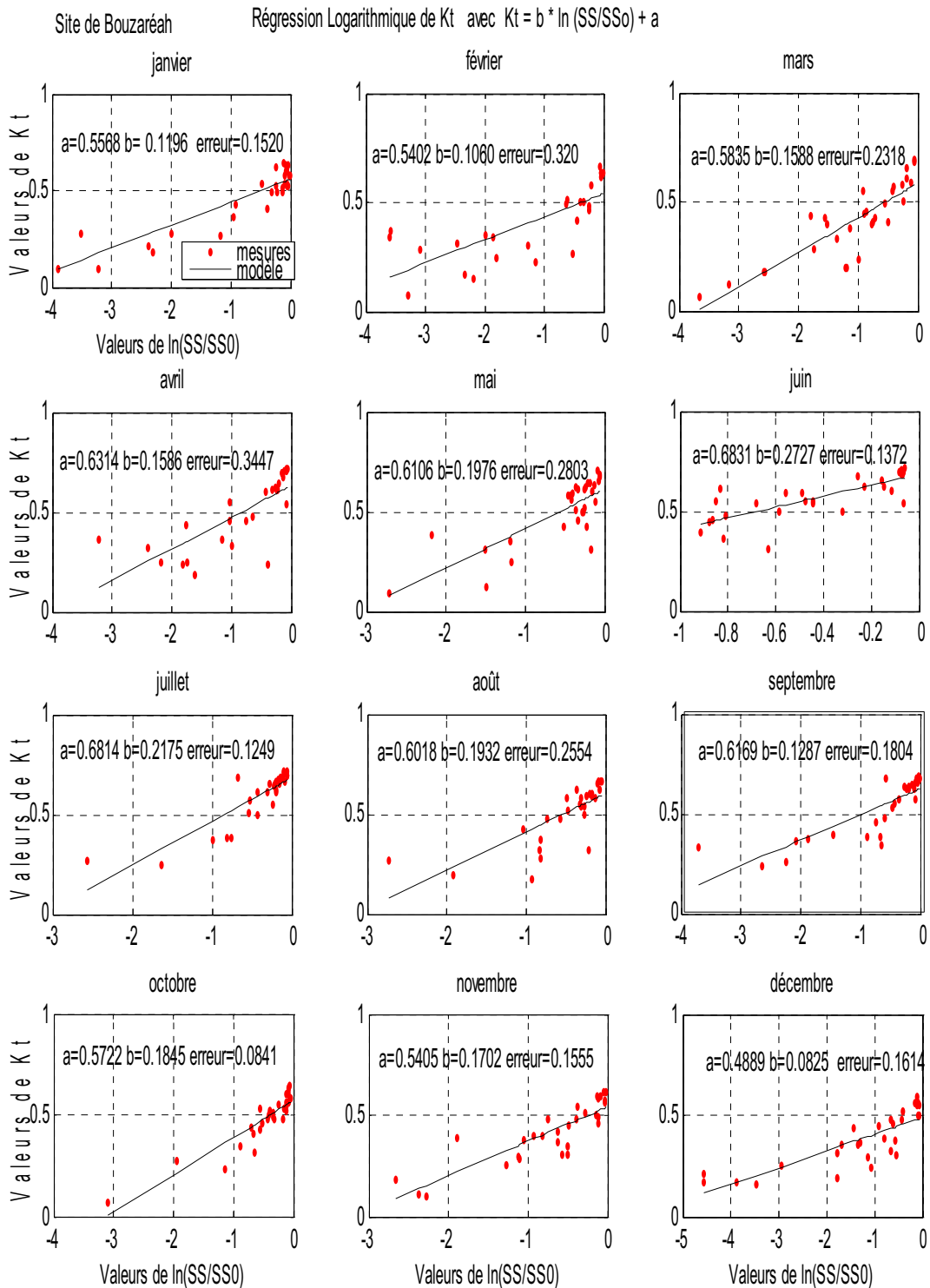


Figure. 4.5: Utilisation du modèle logarithmique pour les données journalières, site de Bouzaréah.

De la figure 4.5, nous constatons que la dispersion des valeurs estimées autour de la droite de régression logarithmique est forte pour huit mois de l'année.

La qualité du modèle est globalement dégradée.

Les résultats présentés dans le tableau 4.6 indique montre que le modèle logarithmique donne de meilleurs résultats que le modèle quadratique en terme de  $R^2$  pour les mois de janvier ( $R^2=084$ ) et décembre ( $R^2=076$ ).

Le modèle est moins valable pour les mois de mars, aout et septembre ( $R^2 < 0,5$ ).

Le tableau 4.6 montre les résultats du modèle logarithmique (modèle Ampratwum et Dorvlo) appliqué pour des données journalières de chaque mois pour le site de Ghardaïa.

Mois	b	a	$\sigma^2$	Résidu	$R^2$	RMSE
Janvier	0,20	0,75	0,02	0,058	0,844	0,045
Février	0,20	0,76	0,03	0,066	0,851	0,050
Mars	0,10	0,74	0,02	0,253	0,438	0,093
Avril	0,23	0,79	0,01	0,022	0,880	0,028
Mai	0,22	0,78	0,02	0,016	0,938	0,024
Juin	0,10	0,73	0,02	0,037	0,821	0,036
Juillet	0,14	0,73	0,01	0,060	0,614	0,046
Aout	0,10	0,71	0,01	0,059	0,451	0,045
Septembre	0,10	0,72	0,02	0,277	0,334	0,099
Octobre	0,18	0,72	0,02	0,052	0,805	0,042
Novembre	0,15	0,74	0,03	0,067	0,822	0,049
Décembre	0,21	0,75	0,03	0,109	0,763	0,061

Tableau 4.6: Résultats du modèle logarithmique pour les données journalières mois par mois, (site de Ghardaïa).

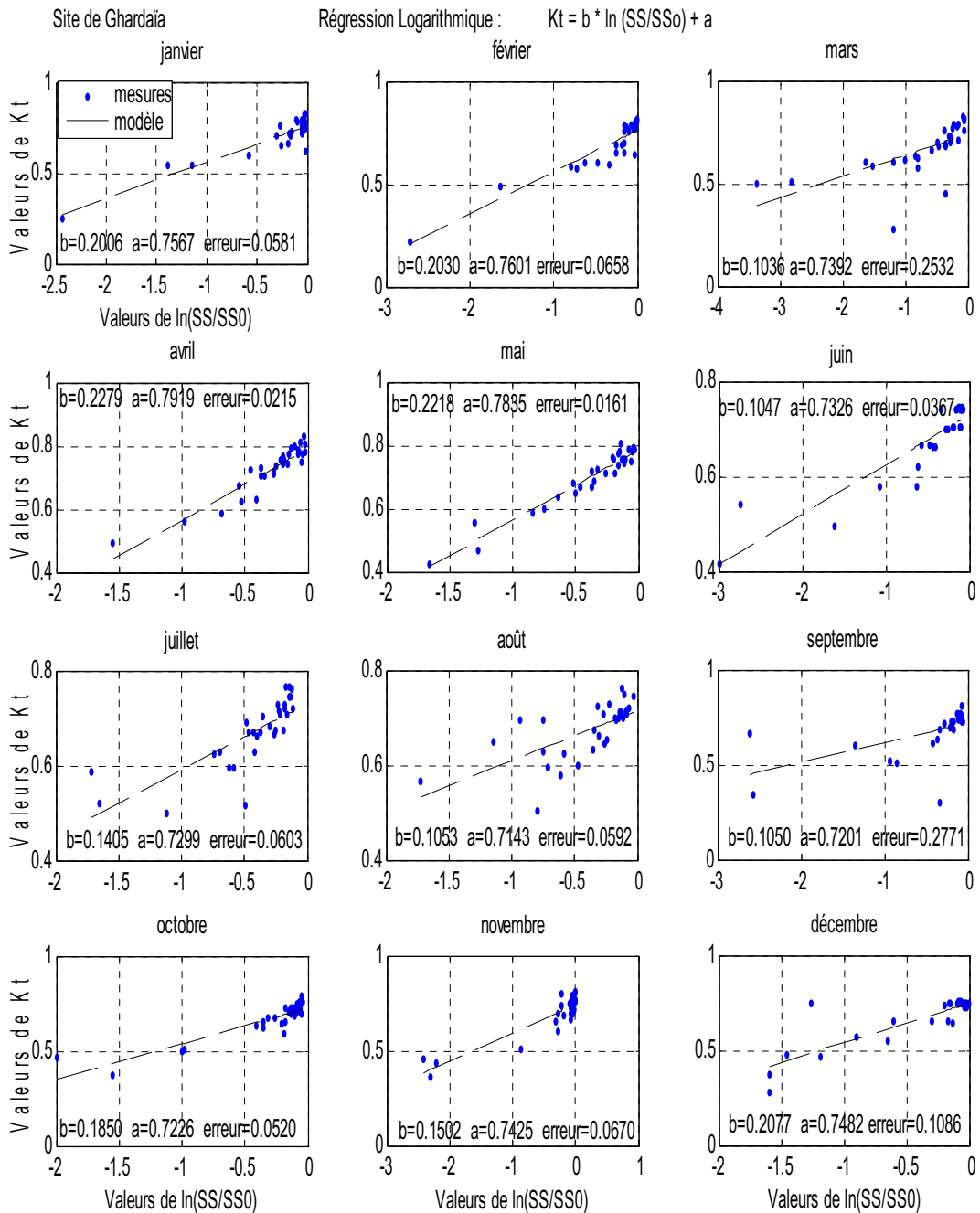


Figure 4.6 : Utilisation du modèle logarithmique pour les données journalières, site de Ghardaïa.

De la figure 4.6, nous constatons que le modèle représente bien la relation entre l'indice de clarté et la fraction d'insolation, particulièrement pour les mois d'avril, mai et juin. Cette représentation est relativement pauvre pour les mois de mars, août et septembre.

#### 4.2.4 Confrontation des résultats des modèles avec les valeurs mesurées (moyennes mensuelles).

La comparaison des valeurs estimées par les différents modèles avec les valeurs mesurées sont résumés dans le tableau 4.7 (site de Bouzaréah) et le tableau 4.8 (site de Ghardaïa). Parmi les trois modèles proposés pour le site de Bouzaréah (tableau 4.7), nous constatons que le modèle quadratique (modèle Ögelman et al.) est assez représentatif du rayonnement global (moyenne mensuelle) en donnant des coefficients de détermination  $R^2$  les plus élevés et des RMSE les plus bas. comparaison avec le modèle d'Angström-Prescott qui est le plus simple parmi

Donc, au point de vue performance, nous constatons que le modèle quadratique est le meilleur. D'après les résultats obtenus, nous pouvons parler à ce stade d'une dépendance annuelle du modèle quadratique pour le site de Bouzaréah.

Du tableau 4.8, nous constatons que les valeurs estimées par les différents modèles sont en bonne corrélation avec les valeurs mesurées pour le site de Ghardaïa. En tenant compte de  $R^2$  et RMSE nous déduisons que :

- Le modèle logarithmique (modèle Ampratwum et Dorvlo) prédit le mieux la variation de l'indice de clarté  $\frac{H}{H_0}$  en fonction de la fraction d'insolation  $\frac{SS}{SS_0}$  pour les mois de janvier et de décembre
- Le modèle quadratique (modèle Ögelman et al.) montre une bonne estimation du rayonnement solaire global pour les mois de février à novembre.

$\frac{H_{i,c}}{H_{i,0}}$ estimé par le modèle				
Mois	linéaire	quadratique	logarithmique	$\frac{H_i}{H_{i,0}}$ mesuré
Janvier	0,44	0,43	0,46	0,40
Février	0,41	0,44	0,39	0,48
Mars	0,40	0,38	0,39	0,37
Avril	0,47	0,47	0,54	0,45
Mai	0,46	0,45	0,41	0,44
Juin	0,56	0,56	0,49	0,54
Juillet	0,51	0,49	0,48	0,49
Aout	0,46	0,47	0,44	0,49
Septembre	0,49	0,50	0,44	0,52
Octobre	0,42	0,41	0,36	0,39
Novembre	0,40	0,40	0,36	0,41
Décembre	0,38	0,38	0,43	0,40

Tableau 4.7 : Comparaison des valeurs estimées avec les valeurs mesurées, site de Bouzaréah.

$\frac{H_{i,c}}{H_{i,0}}$ estimé par le modèle				
Mois	linéaire	quadratique	logarithmique	$\frac{H_{i,m}}{H_{i,0}}$ mesuré
Janvier	0,63	0,65	0,59	0,61
Février	0,62	0,60	0,57	0,59
Mars	0,62	0,63	0,61	0,64
Avril	0,66	0,67	0,65	0,68
Mai	0,67	0,66	0,64	0,65
Juin	0,65	0,65	0,72	0,67
Juillet	0,64	0,66	0,63	0,66
Aout	0,66	0,67	0,64	0,67
Septembre	0,63	0,66	0,62	0,70
Octobre	0,61	0,62	0,59	0,64
Novembre	0,64	0,64	0,62	0,65
Décembre	0,65	0,63	0,63	0,60

Tableau 4.8 : Comparaison des valeurs estimées avec les valeurs mesurées, site de Ghardaïa.

### 4.3 Évolution annuelle du rayonnement solaire global journalier.

#### 4.3.1 Modèle linéaire (Angström-Prescott).

Le tableau 4.9 expose les résultats du modèle linéaire appliqué aux données annuelles pour les sites de Bouzaréah et de Ghardaïa.

Site	b	a	$\sigma^2$	Résidu	R <sup>2</sup>	RMSE
Bouzaréah	0,46	0,19	0,04	2,51	0,74	0.084
Ghardaïa	0,36	0,42	0,02	1,14	0,69	0.057

Tableau 4.9 : Régression linéaire pour les sites de Bouzaréah et de Ghardaïa.

De la figure 4.7, nous voyons que la dispersion du nuage de points autour de la droite est faible, indiquant une bonne corrélation des données, ce qui est vérifié par la faible valeur du RMSE (0.05) reporté au tableau 4.9, pour le site de Ghardaïa.

Ceci n'est pas le cas pour celui de Bouzaréah où, comme le montre la figure 4.7 la dispersion du nuage des points est plus élevée (RMSE=0.08).

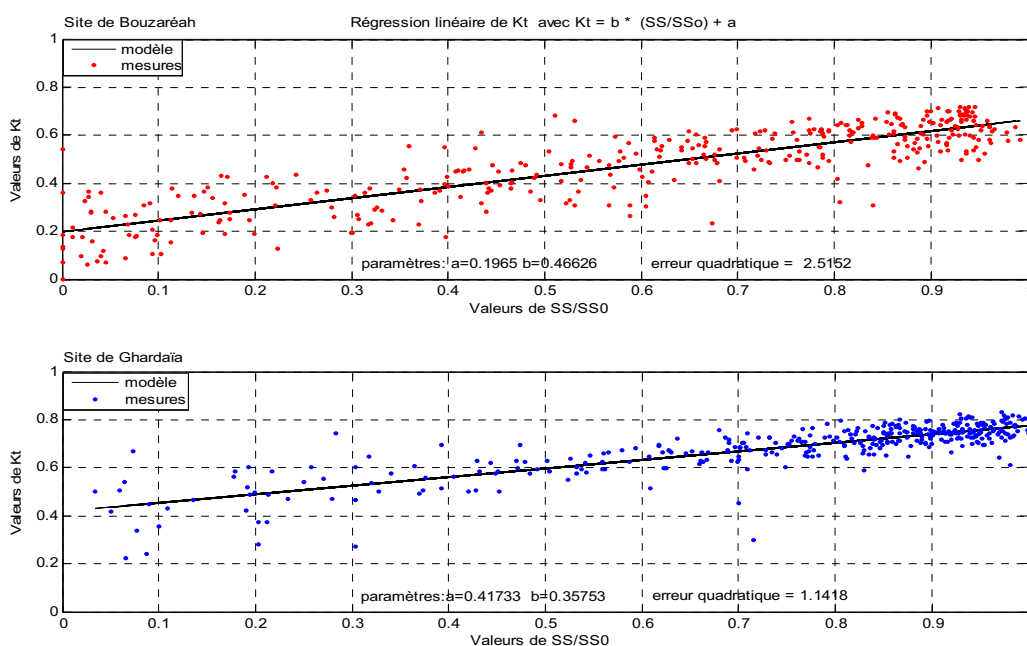


Figure 4.7: Utilisation du modèle linéaire pour les données annuelles des sites étudiés.

### 4.3.2 Modèle quadratique (modèle Ögelman et al)

Le tableau 4.10 expose les résultats du modèle quadratique appliqué aux données annuelles pour les sites de Bouzaréah et de Ghardaïa.

Site	c	b	a	$\sigma^2$	Résidu	R <sup>2</sup>	RMSE
Bouzaréah	-0,05	0,52	0,19	0.04	2,51	0,75	0.083
Ghardaïa	-0,05	0,42	0,40	0.02	1,14	0,70	0.056

Tableau 4.10 : Régression quadratique pour les sites de Bouzaréah et de Ghardaïa

Du tableau 4.10, nous constatons que ce modèle explique mieux les variations de l'indice de clarté, la qualité du modèle est un peu plus améliorée.

De la figure 4.8 nous constatons, une dispersion du nuage de données plus importante pour le site de Bouzaréah.

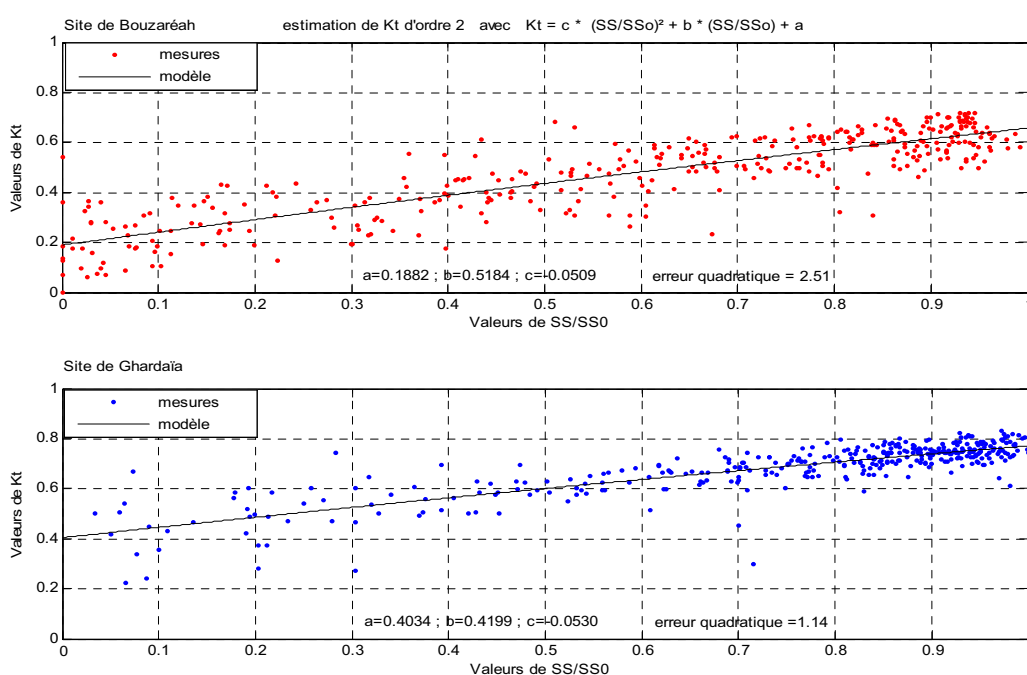


Figure 4.8 : Utilisation du modèle quadratique pour les données annuelles des sites étudiés.



### 4.3.3 Modèle logarithmique (modèle Ampratwum et Dorvlo).

On a reporté au tableau 4.11 les résultats du modèle logarithmique appliqué aux données annuelles pour les sites étudiés de Bouzaréah et de Ghardaïa.

Site	b	a	$\sigma^2$	Résidu	R <sup>2</sup>	RMSE
Bouzaréah	0,14	0,58	0,04	3,28	0,64	0,096
Ghardaïa	0,15	0,74	0,02	1,40	0,63	0.062

Tableau 4.11 : Régression logarithmique pour les sites de Bouzaréah et de Ghardaïa

Les résultats obtenus avec le modèle logarithmique sont moins bons que ceux qui sont obtenus avec les modèles d'Angström-Prescott et Ögelman. Les RMSE présentées dans le tableau 4.11 sont les plus élevées. Le coefficient de détermination R<sup>2</sup> apparaît faible et inférieur à celui des deux autres modèles.

À ce stade-ci, nous pouvons dire que le modèle quadratique est le plus pertinent, puisqu'il permet, en terme de R<sup>2</sup> et RMSE, une meilleure estimation de l'indice de clarté mesuré.

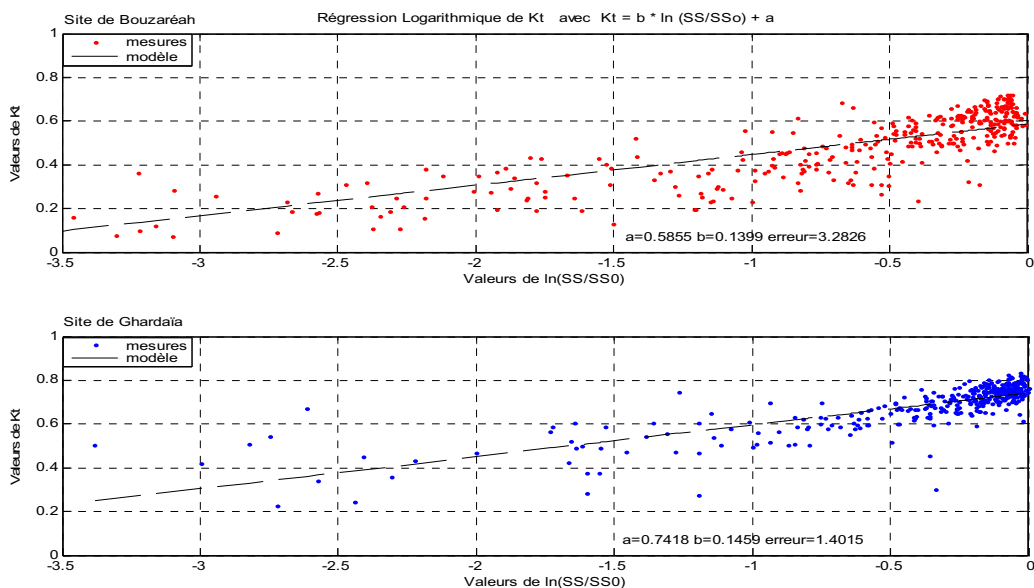


Figure 4.9: Utilisation du modèle logarithmique pour les données annuelles des sites étudiés.

D'après la figure 4.9, nous constatons que la dispersion des nuages de points est plus importante pour ce modèle que pour les deux autres modèles à savoir le modèle linéaire et le modèle quadratique. Ceci est confirmé par les valeurs de  $R^2$  reporté au tableau 4.11.

#### 4.3.4 Confrontation des résultats des modèles avec les valeurs mesurées (moyennes annuelles).

Site	$\frac{H_{t,e}}{H_{t,D}}$ estimé par le modèle			$\frac{H_{t,m}}{H_{t,D}}$ mesuré
	linéaire	quadratique	logarithmique	
Bouzaréah	0,45	0,44	0,35	0,42
Ghardaïa	0,64	0,70	0,57	0,68

Tableau 4.12 : Comparaison des valeurs estimées avec les valeurs mesurées pour les deux sites de Bouzaréah et de Ghardaïa.

Au vu de ces résultats, les valeurs estimées par les différents modèles sont en bonnes corrélations avec les valeurs mesurées. Cependant les meilleurs résultats sont obtenus par le modèle quadratique.

#### 4.4 Conclusion

Le rayonnement solaire global moyen mensuel sur une surface horizontale et sur les sites de Bouzaréah et de Ghardaïa a été estimé en utilisant trois modèles. Il s'agit de la régression linéaire du type Angstrom–Prescott, de la forme quadratique (modèle Ögelman et al) et de la forme logarithmique (modèle Ampratwum et Dorvlo).

Tous les modèles sont basés sur la fraction d'insolation mesurée. Une analyse statistique a été faite en utilisant le coefficient de détermination  $R^2$  et les indicateurs statistiques de précision de la qualité du modèle SE et le RMSE.

Pour les moyennes mensuelles et parmi les trois modèles proposés pour le site de Bouzaréah, le modèle quadratique permet une meilleure estimation du rayonnement solaire global. Pour le site de Ghardaïa, le modèle logarithmique (modèle Ampratwum et Dorvlo) prédit le mieux la variation de l'indice de clarté  $\frac{H}{H_0}$  en fonction de la fraction d'insolation  $\frac{SS}{SS_0}$  pour les mois de janvier et de décembre, alors que le modèle quadratique (modèle Ögelman et al.) montre une bonne estimation du rayonnement solaire global pour les mois de février à novembre. Il est légèrement meilleur que celui d'Angström-Prescott.

Pour les moyennes annuelles, la qualité du modèle quadratique est la plus satisfaisante pour les deux sites étudiés.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La présente étude propose de générer des données synthétiques du rayonnement solaire global reçu sur une surface horizontale à partir de la durée d'insolation mesurée pour l'élaboration de bases de données radiométriques nécessaires à toute étude de système faisant appel au gisement solaire. Il s'agit aussi de mettre en évidence une caractérisation météorologique expérimentale des sites de Bouzaréah et de Ghardaïa, afin de pouvoir extrapoler, et de façon spatiale, les données synthétiques du rayonnement solaire à des sites présentant des conditions climatiques similaires à celles de Bouzaréah ou de Ghardaïa.

Le site de Bouzaréah est soumis à un climat méditerranéen, caractérisé par un climat humide durant toute l'année à l'exception de l'été où le climat devient chaud et sec. Les vitesses moyennes annuelles du vent sont entre 3 m/s à 4 m/s à 10m du sol. La moyenne de la pluviométrie annuelle varie de 339 à 452 mm, et la température moyenne annuelle est de 17 °C.

La fraction d'insolation est élevée en été atteignant 0,75 et faible en hiver atteignant 0,4. Les journées à ensoleillement moyen (de 0,5 à 0,6) sont majoritaires (57 %).

Pour le site de Ghardaïa, La pluviométrie est de type saharien avec une moyenne annuelle de 67,37 mm. Le nombre moyen de jours de pluie par an est de 20 à 30. Les vitesses moyennes annuelles du vent sont de 3,1 m/s à 4,4 m/s à 10m du sol.

La durée d'insolation mesurée est plus élevée relativement à celle du Nord. La fraction d'insolation prend des valeurs élevées entre 0,7 et 0,8 presque toute l'année.

La proportion de journées à fort indice de clarté (de 0,7 à 0,8) est plus élevée pour le site de Ghardaïa, la majorité des périodes est très ensoleillée puisque 75 % des journées disposent d'un indice de clarté supérieur à 0,6.

Une analyse statistique a été faite en utilisant trois modèles mathématiques Il s'agit de l'équation d'Angström-Prescott, (modèle linéaire), d'Ögelman et al. (modèle quadratique) et d'Ampratwum-Dorvlo (modèle logarithmique). Tous les modèles sont basés sur la fraction d'insolation mesurée.

Ainsi, l'objectif que nous nous sommes fixé, c'est-à-dire l'estimation de la moyenne journalière du rayonnement solaire global en fonction de la durée d'insolation a été atteint. Les trois modèles ont montré une bonne estimation du rayonnement solaire global pour les deux sites étudiés. Néanmoins, le modèle quadratique (modèle Ögelman et al.) prédit le mieux la variation de l'indice de clarté  $\frac{H}{H_0}$  en fonction de la fraction d'insolation  $\frac{SS}{SS_0}$ . La bonne adéquation du modèle quadratique (modèle Ögelman et al.) le rend utile dans plusieurs domaines d'application (par exemple, thermique du bâtiment, énergétique solaire, séchage, agriculture et sylviculture).

Des programmes ont été élaborés dans un environnement Matlab permettant de générer des séquences journalières du rayonnement solaire global pour un site Algérien ayant les mêmes conditions climatiques que celles de Bouzaréah ou de Ghardaïa.

Nous avons donc à notre disposition des modèles répondant aux objectifs que nous nous sommes fixés dans ce travail de recherche. Cependant, plusieurs développements pourraient être conduits dans le cadre de notre recherche :

- Développer des modèles hybrides, combinant les approches stochastiques, à des fonctions de corrélations et poursuivre leur intégration pour mettre en œuvre quelques extrapolations spatiales.

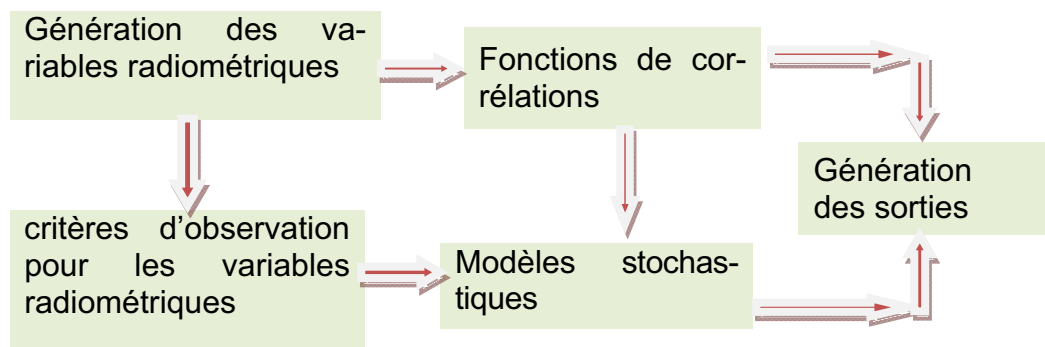


Figure 4 10: Algorithme d'association des modèles et génération des données synthétiques [14].

- Caractérisation radiométrique plus fine d'un site donné en tenant compte des caractéristiques particulières du relief.
- Appliquer la démarche sur d'autres paramètres météorologiques comme la transmittance atmosphérique afin de mettre en évidence d'autres séquences climatiques caractéristiques.

## LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

$H_0$	: Rayonnement solaire global hors atmosphère	MJ/m <sup>2</sup>
$H$	: Rayonnement solaire global reçu au sol	MJ/m <sup>2</sup>
$k_t$	: Indice de clarté, rapport entre le rayonnement global reçu au sol et le rayonnement solaire reçu hors atmosphère.	
$SS$	: Durée d'insolation journalière	
$SS_0$	: Durée d'insolation journalière théorique	
$\sigma$	: Fraction d'insolation journalière, équivalente à	$\frac{SS}{SS_0}$
$T_a$	: Température	
$R_r$	: Humidité relative	
$R_a$	: Humidité absolue	
$P$	: Pression	
$\rho$	: Albédo du sol	
$\delta$	: Déclinaison	
$\varphi$	: Latitude du lieu	
$AH$	: Angle horaire	
$h_s$	: Hauteur du soleil	
$T.S.V$	: Temps solaire vrai	
$ET$	: Equation du temps	
$I_0$	: Constante solaire	
$E$	: Constante solaire corrigée	
$D'$	: Rapport entre la durée d'insolation actuelle et la durée d'insolation maximale prise égale à 12heures	
$W_{ij}$	: Facteur climatique pour les douze mois de l'année et pour les différentes zones climatiques	
$Z$	: Moyenne horaire mensuelle de la durée d'insolation	
$C_w$	: Moyenne journalière de la nébulosité observée (en octa)	
$RMSE$	: Racine carrée moyenne des carrés des erreurs	
$R$	: Coefficient de corrélation	

$R^2$  : Coefficient de détermination  
 $\sigma^2$  : Variance  
j : Jour  
 $W_s$  : Angle de l'heure du lever  
 $d_i$  : Résidus  
C D E R : Centre de Développement des Energies Renouvelables  
URAER : Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables  
O.M.M : Organisation Mondiale de la Météorologie  
O.N.M : Office National de la Météorologie  
I.N.R.A : Institut National de Recherche Agronomique





## APPENDICE B

### Script matlab 1

Programme calculant le rayonnement solaire global  $H_0$  reçu sur une surface horizontale à la limite de l'atmosphère.

Dans tous les programmes suivants nous représentons la fraction d'insolation  $\sigma$  par  $x$  et l'indice de clarté mesuré  $k_t$  par  $y$ . Ainsi, les grandeurs caractéristiques vont être représentées dans ce qui suit :

$\delta$  : dec  $\Rightarrow$  déclinaison

$\varphi$  : lat  $\Rightarrow$  latitude du lieu

$\omega$  :  $w_s$   $\Rightarrow$  angle horaire

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear all; clc; clf;
lat= ; %36.8: pour Bouzaréah
      %32.38 pour Ghardaïa
r=2*pi/360; %deg to rad
a=input('Entrer le premier jour:');
b=input('Entrer le dernier jour:');
j=a:1:b;
  %angle de la déclinaison
dec(j)=23.45*sin((2*pi/365)*(j+284)); %[degs]
subplot(2,2,1); plot(j,dec(j), 'g');grid; ylabel('dec(degs)');
title('dec=23.45*sin((2*pi/365)*(j+284))');
printmat(dec(a:b),'déclinaison')
  %Irradiation hors atmosphère
e=1367; %[W/m2]
E(j)=e*(1+0.033*cos(r*360*j/365)); %[W/m2]
subplot(2,2,2); plot(j,E(j), 'm');grid; ylabel('Wh/m2');
title('E=e*(1+0.033*cos(r*360*j/365))');
  %Angle de l'heure du lever
ws(j)=acos(-tan(lat*r)*tan(dec(j)*r))*180/pi; %[degs]
subplot(2,2,3); plot(j,ws(j), 'r');grid; xlabel('nombre de jours');
ylabel('ws(degs)'); title('ws=acos(-tan(lat*r)*tan(dec*r))*180/pi');
printmat(ws(a:b),'Angle horaire')
  %la durée du jour
subplot(2,2,4)
SS0(j)=(2/15)*ws(j);
plot(j,SS0(j), 'b');grid; xlabel('nombre de jours');ylabel('heures');
title('SS0=(2/15)*ws');
printmat(SS0(a:b),'durée du jour')
  %Irradiation hors atmosphère reçue sur une surface horizontale
H0(j)=(24/pi)*E(j).*(cos(lat*r).*cos(dec(j)*r).*sin(ws(j)*r)+...

r*ws(j).*sin(lat*r).*sin(dec(j)*r))*3600; %[j/m2]

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```



## Script matlab 5

Programme définissant le modèle qui permet une meilleure estimation du rayonnement solaire global

### 1

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Régression linéaire
```

```
coeff = polyfit(x,y,1);  
m = coeff(1);  
b = coeff(2);  
ybest1 = m*x + b;  
sum_sq1 = sum((y-ybest1).^2);  
x1 = sort(x);  
ybest1 = m*x1 + b;  
disp('Resultats de la régression linéaire - y = mx + b');  
fprintf('m = %7.4f \n', m);  
fprintf('b = %7.4f \n', b);  
fprintf('error = %7.4f \n\n', sum_sq1)
```

```
% Estimation quadratique
```

```
coeff = polyfit(x,y,2);  
a = coeff(1);  
b1 = coeff(2);  
c = coeff(3);  
ybest2 = a.*x.^2 + b1.*x + c;  
sum_sq2 = sum((y-ybest2).^2);  
ybest2 = a*x1.^2 + b1.*x1 + c;  
disp('Resultats de la régression quadratique - y = ax^2 + bx + c');  
fprintf('a = %7.4f \n', a);  
fprintf('b = %7.4f \n', b1);  
fprintf('c = %7.4f \n', c);  
fprintf('error = %7.4f \n\n', sum_sq2)
```

```
if round (a*1000) == 0;  
    bestfit = sum_sq1;  
    ybest = ybest1;  
    label = ('Linéaire y = mx + b');  
elseif sum_sq1 > sum_sq2;  
    bestfit = sum_sq2;  
    ybest = ybest2;  
    label = ('Quadratique y = ax^2 + bx + c');
```

```
end
```

```
% Régression Logarithmique
```

```
xlog = log(x);  
coeff = polyfit(xlog, y, 1);  
m1 = coeff(1);  
b1 = coeff(2);  
ybest4 = m1*xlog + b1;  
sum_sq4 = sum((y-ybest4).^2);
```

## 2

```
x1lg = sort(xlog);
ybest4 = m11*x1lg + b11;
disp('Resultats de la régression quadratique - y = a + b * log x');
fprintf('b = %7.4f \n', m11);
fprintf('a = %7.4f \n', b11);
fprintf('error = %7.4f \n\n', sum_sq4)
if sum_sq4 < bestfit;
bestfit = sum_sq4;
ybest=ybest4;
label = ('Logarithmique - y = a + b * log x');
end
if round(m11*1000)/1000==1
bestfit = sum_sq1;
ybest = ybest1;
label = ('Linéaire y = mx + b');
end
if round(m11*1000)/1000==2
bestfit = sum_sq2;
ybest = ybest2;
label = ('Quadratique y = ax^2 + bx + c');
end
plot (x,y,'+',x1,ybest,'--');axis([0 1 0 1]);
title (['Meilleure corrélation', label])
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

## RÉFÉRENCES

1. M. Salmi, M. Chegaar et P. Mialhe, « Modèles d'estimation de l'irradiation solaire globale sur une surface horizontale au sol » *Revue Internationale d'Héliotechnique Énergie - Environnement*- N° 35 ; 2007 ; pp.19-24.
2. [www.tageo.com/index-e-ag-weather-ag.htm](http://www.tageo.com/index-e-ag-weather-ag.htm).
3. Olivier Déruelle, « Mise au point d'un système de spectroscopie pour mesurer des sections efficaces neutroniques applicables à un possible développement du nucléaire comme source d'énergie » Le grade de Docteur en sciences de l'Université de Pris XI ; 2002, pp.9-12.
4. [www.EDF.com](http://www.EDF.com)
5. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, « les énergies renouvelables » Rapport sur l'état et l'avenir de l'environnement 2003, p.257.
6. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Soleil>
7. [www.solarviews.com/french/sun.htm](http://www.solarviews.com/french/sun.htm)
8. Ahmed Habib Khedim, « L'énergie solaire et son utilisation sous sa forme thermique et photovoltaïque » ANEP, 2005, pp.104-125.
9. [www.u.picardie.fr/beauchamp/mbg6/radiatif.htm](http://www.u.picardie.fr/beauchamp/mbg6/radiatif.htm)
10. A.A. Sfeir et G. Guarracino, « Ingénierie des systèmes solaires » Ed.Technique et Documentation, Paris, 1981.
11. M. Capderou, « Atlas solaire de l'Algérie » ; tome I: Aspect théorique, O.P.U, Alger,1985.
12. J. A.Duffie et W.A.Beckman, « solar energie thermal process », ed.John Wiley, 1991
13. M.Iqbal, « Introduction to Solar Radiation » Academic Press 1983
14. Laetitia ADELARD « Caractérisation de bases de données climatiques Proposition d'un générateur de climat Application en thermique de l'habitat » Thèse de Doctorat présentée devant l'Université de la Réunion; spécialité: Genie civil et thermique 1998, pp.30-135
15. Bulletin des Energies Renouvelables ; vol.9 Juin 2006.
16. [earth.google.com](http://earth.google.com)
17. [www.cder.dz](http://www.cder.dz)

18. Régis CALOZ « Notes de cours » ; Section des Sciences et Ingénierie de l'Environnement, 3ème année Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), pp.338
19. EPLAB « the Eppley Laboratory » catalogue 1983
20. Station de mesure radiométrique, CDER, Bouzaréah, Alger, 2007
21. Kipp & Zonen « Instruction manual pyranometer CM11 », pp.12-14
22. OMM « Guide des instruments et des observations météorologiques » ; 4e édition.
23. A.A.M Sayigh « SOLAR ENERGY », ed. by A.A.M. Sayigh.  
Newyork; London; Montréal: academic press, pp.40-48
24. Togrul IT, Onat E. A comparison of estimated and measured values of solar radiation in Elazig, Turkey. Renew Energy 2007

