

Résumé

Dans le cadre du présent travail, les irradiances solaires horaires globales I_g , diffuses I_d et ultraviolet B I_{UVB} incidentes sur un plan horizontal, mesurées à la station VAG de Tamanrasset, durant la période allant du 1^{er} janvier 2000 au 31 décembre 2003 ont fait l'objet d'une étude statistique. On a étudié l'évolution des trois paramètres sus cités du rayonnement solaire au cours de différentes périodes temporelles (journée, mois, saison, année) et on en a fait ressortir l'interaction des différents paramètres les uns sur les autres. On a calculé pour chaque période, les indices de clarté horaires k_T relatif à l'irradiation solaire globale et k_{TUVB} relatif à l'irradiation solaire UVB, qui expriment le taux d'atténuation du rayonnement solaire lors de son passage dans l'atmosphère, atténuation due aux aérosols, aux particules d'eau et aux différents composants gazeux de l'atmosphère. Cette étude met en relief l'effet prépondérant de l'angle du zénith sur l'évolution des irradiances solaires au cours d'une journée, de la hauteur du soleil d'un mois à un autre et des conditions atmosphériques relatives aux différentes saisons selon la particularité du climat local. A l'instar de résultats relatifs à des études antérieures menées dans différents endroits, en l'occurrence, Arabie saoudite, Koweït, Palestine, Grèce, Espagne, Corée du sud, on a fait ressortir grâce à cette étude, de multiples corrélations entre les différentes composantes du rayonnement solaires et les indices de clarté qui mettent en évidence l'interrelation entre l'évolution de ces paramètres ainsi que les conditions atmosphériques.

Mots clés: irradiation solaire horaire, irradiation UVB, station VAG Tamanrasset, étude statistique, indice de clarté, conditions atmosphériques, corrélations.

Abstract

The global, diffuse and ultraviolet B hourly solar radiation, respectively, I_g , I_d and I_{UVB} incident on a horizontal plan and measured in Tamanrasset VAG station since the 1st of January 2001 until 31st December 2003 have been the object of this statistic study. We followed the evolution of the three parameters of solar irradiation named above, over different temporal lapses (day, month, season, year) in order to bring out the interaction between all these parameters. For each period, we computed the hourly clearness indexes, k_T for the global irradiation and k_{TUVB} for the UVB irradiation. These indexes express the solar irradiation attenuation rate when it crosses the atmosphere. Attenuation due to aerosols, water particles and different gazes.

This study shows the big impact of the zenithal angle of sun on the solar irradiation evolution over a day, the effect of the solar altitude angle on this evolution from a month to an other and the effect atmospheric conditions according to local climate particularities during each season. As improved by the results of antecedent studies in different places over the world, such in Saudi Arabia, Kuwait, Palestine, Greece, Spain, south Korea, with this study, we brought out many correlations between the different components of solar radiation and clearness indexes which reflect the interrelationship between these parameters and the atmospheric conditions.

Key words: hourly solar irradiation, UVB irradiation, Tamanrasset station VAG, statistical study, clearness index, atmospheric conditions, correlations.

ملخص

في إطار هذا العمل، قمنا بدراسة إحصائية على المركبات الكلية I_g و المنتشرة I_e و ما فوق البنفسجية I_{UVB} للإشعاع الشمسي والتي تم تسجيلها فوق سطح مستوي أفقي انطلاقاً من الفاتح جانفي 2001 إلى غاية 31 ديسمبر 2003 و ذلك بمحطة VAG التابعة للمنظمة الدولية للأرصاد الجوية و المتواجدة بمدينة تمنراست.

لقد تمت دراسة تطور العناصر الثلاثة المذكورة أعلاه على مدى أطوار زمنية مختلفة (يومي، شهري، فصلي و سنوي) واستخراج تأثير أحدها على الآخر. تم حساب معامل صفاء السماء المتعلق بالإشعاع الكلي K_T و K_{TUVB} المتعلق بالمركبة ما فوق البنفسجية والذي يعبر عن نسبة تضائل الإشعاع الشمسي عند عبوره الغلاف الجوي للكثرة الأرضية بسبب الحبيبات و جزيئات الماء العالقة و مختلف المركبات الغازية. تبرز هذه الدراسة الأثر الغالب لزاوية السمات الشمسي على تطور الإشعاعات الشمسية على مدى اليوم و أثر زاوية ارتفاع الشمس على المدى الشهري و أثر الظروف الجوية المرتبطة بالخصائص المناخية المحلية. وعلى غرار نتائج دراسات سابقة تم القيام بها عبر مناطق مختلفة من العالم كالعربية السعودية، الكويت، فلسطين المحتلة، قبرس، إسبانيا و كوريا الجنوبية أبرزنا من خلال هذه الدراسة عدة صلات متبادلة بين مختلف مركبات الإشعاع الشمسي و بين معاملات صفاء السماء و التي تبرز الارتباط الموجود بين هذه العناصر و الظروف الجوية.

Remerciements

- Au couronnement de deux années de travail et d'effort , je tiens avant tout à remercier Monsieur A. Khellaf qui a encadré ce travail, suivi son évolution pas à pas et dirigé dans ses moindres détails . Avec beaucoup de générosité et d'engagement, il m'a accordé son attention, son suivi, orientée avec ses conseils si judicieux et a même mis sa documentation à ma disposition. Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers sa personne qui représente pour moi, qui suis au tout début de mon parcours scientifique, l'exemple du chercheur accompli et engagé.
- Je remercie l'Office National de la Météorologie, son Directeur et tous ses travailleurs pour m'avoir fourni les éléments nécessaires à cette étude et l'assistance de ses techniciens et ingénieurs dans les étapes de ce travail.
- Je tiens aussi à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur Touzi.A pour avoir mis à ma disposition tous les moyens et conditions pour faciliter mon travail.
- Je remercie M. Belhamel et M. Chikhi Rachid qui ont permis et facilité mon accès à la post-graduation.
- Je remercie l'ensemble de mes collègues de l'URER/MS d'Adrar pour m'avoir offert leur assistance continue me permettant ainsi de mener cette étude à son bout.
- Je ne peux omettre mes collègues de la première année post graduation, Hmed, Mohamed, Hamza, abderahmene, Sofiane et Aicha dont l'aide , la gentillesse et l'amitié m'ont miraculeusement replongée dans la belle époque des années de la faculté quand on avait vingt ans.

Dédicaces

Sans l'affection de mon époux, son assistance, sa compréhension et le grand sacrifice qu'il a fait, jamais je ne serais arrivée au bout de ma tâche. Pleine de reconnaissance, je lui dédie ce travail.

Comme à l'époque de ma toute première jeunesse et pour m'aider à réaliser mon rêve de Magister, ma bonne maman m'a accueillie chez elle, réveillée tôt le matin, préparé mes repas, soigné mes affaires éternellement en désordre, gardé avec tant d'amour mon enfant, supporté mon incroyable caractère et prié pour mon succès. Merci Oumi.

Je dédie ce travail à mon père pour tout ce qu'il a fait pour moi. Pour avoir été un exemple de droiture dans ma vie. Il m'a aidée, soutenue, orientée, fait rire, et parfois, empêchée de faire le pire. Merci, infiniment.

A Mouni, la plus belle et la meilleure grand-mère au monde.

A mes rayons de soleil, Souleimène, abdou, mouni et mehmoud, en priant Dieu tout-puissant de les garder et de les protéger.

A Zohra et Imène, pour avoir rejoint notre famille en y apportant amour, bonté et générosité. Pour m'avoir aidée, supportée, soutenue. Merci douces et bonnes belles sœurs.

A Besma la meilleure des amies, Yacine, Toufik, Rafik et Wadia, Imène Hammadi, Fouzia et Lotfi, Mayamo et Houda, Terki Meriem.

A Hamici Fatima, Karima, Samia, Sara et Rayane le petit clown.

A mes collègues, mes bons amis grâce à qui mes journées sont agréables : Abdelwahab, Houcine, Benhammou, Samir, Sofiane, Kamel, Djaafri, Hadri et Tahri.. Pour toute l'aide qu'ils m'ont procurée, milles mercis.

A Lila du CDER, Meriem et Khira de l'Université de Blida; ces femmes dont la bonté est si grande, le cœur si généreux, Dieu le leur rendra, milles mercis.

A Madame Khellaf, pour sa douce voix au bout du fil, toujours bonne et rassurante.

TABLE DES MATIERES

RESUME.....
REMERCIEMENTS
DEDICACES.....
TABLES DES MATIERES.....
LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX.....
INTRODUCTION.....	12
I. GENERALITES SUR LE GISEMENT SOLAIRE	
1.1. Introduction.....	16
1.2. Le soleil	16
1.3. La distribution spectrale de l'irradiation extra-terrestre	17
1.4. Les grandeurs astronomiques	20
1.5. Le rayonnement solaire au niveau du sol	22
1.6. Les appareils et les techniques de mesures du rayonnement solaire.....	32
2. ATTENUATION ATMOSPHERIQUE DE L'IRRADIATION SOLAIRE	
2.1. Introduction.....	42
2.2. Définitions.....	42
2.3. Atténuation du rayonnement solaire direct.....	51
2.3.1. Diffusion du rayonnement solaire direct.....	53
2.3.2. L'absorption de l'irradiation solaire directe par les gaz	59
3. LE RESEAU RADIOMETRIQUE NATIONAL . STATION VAG TAMANRASSET ET DONNEES RADIOMETRIQUES	
3.1. Introduction.....	66
3.2. Les mesures radiométriques en Algérie	66
3.2.1. Réseau National de mesure radiométrique.....	67
3.2.2. La mesures des données radiométriques, chimiques et Météorologiques à Tamanrasset.....	71

3.2.2.1. Particularités géographiques et climatiques de Tamanrasset	71
3.2.2.2. Les mesures radiométriques	71
3.2.2.3. Equipements installés.....	72
3.2.2.4.. Les mesures relatives au rayonnement solaire.....	72
3.2.2.5. Ordres de grandeur	74
3.2.2.6. Mesures relatives à la composition chimique de l'atmosphère	75
3.2.2.7 Mesures météorologiques	76
3.2.2.8. Edition du bulletin de la VAG	77
3.3. La base de données étudiée	77
3.3.1. Plan d'incidence.....	78
3.3.1. Présentations des données	78
3.3.2. Qualité de la base de données	79
3.4. Procédure numérique.....	78
3.4.1. Traitement de la base de données.....	78
3.4.2. Organigramme de calcul de la composante solaire hors atmosphère.....	80
3.4.3. Procédure de corrélation.....	82
4. RESULTATS ET DISCUSSION	
4.1. Introduction	83
4.2. Le rayonnement solaire global.....	83
4.3. Le rayonnement solaire diffus	94
4.4. L'irradiation solaire UVB	104
4.5. Indice de clarté horaire k_T relatif à l'irradiation solaire horaire globale.....	118
4.6. Indice de clarté horaire k_{TUVB} relatif à l'irradiation solaire UVB.....	125
4.7. Corrélations.....	133
CONCLUSION.....	147
REFERENCES	

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

- Figure 1.1 Schéma représentatif de la constitution du soleil
- Figure 1.2 Spectre solaire
- Figure 1.3 Les différents angles relatifs à une surface inclinée
- Figure 1.4 Les composantes du rayonnement solaire
- Figure 1.5 pyramomètre
- Figure 1.6 heliographe
- Figure 1.7 radiomètre SAtlantic OCR-504I de surface
- Figure 1.8 principe du spectroradiomètre à double mono-chromateur (exemple
- Figure 1.9 radiomètre BREWER
- Figure 1.10 radiomètre ELDONET
- Figure 3.1 station de mesure VAG de Tamanrasset ville.
- Figure 3.2 station de mesure VAG de Tamanrasset ville.
- Figure 4.1 Evolution de l'irradiation solaire globale horaire incidente sur un plan horizontal pour le 16 février 2001, 15 mai 2002, 17 juillet 2003 et 14 novembre 2001.
- Figure 4.2 Evolution de l'irradiation solaire globale horaire du 1^{er} au 5 juin 2001.
- Figure 4.3 Evolution annuelle de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire globale horaire pour les années 2001, 2002 et 2003.
- Figure 4.4. Evolution de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire globale pour chaque tranche horaire de la journée, pour l'année 2001.
- Figure 4.5. Evolution de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire globale pour chaque tranche horaire de la journée, pour l'année 2002.
- Figure 4.6. Evolution de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire globale pour chaque tranche horaire de la journée, pour l'année 2003.
- Figure 4.7. Evolution de la moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale pour chaque tranche horaire de la journée
- Figure 4.8 Evolution horaire de l'irradiation solaire diffuse pour les journées du 15 février et 14 novembre 2001, 15 mai 2002 et 17 juillet 2003.
- Figure 4.9 Evolution de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire diffuse

horaire pour l'année 2001, 2002, 2003.

- Figure 4.10 Evolution de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire diffuse pour chaque tranche horaire , pour l'année 2001.
- Figure 4.11 Evolution de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire diffuse pour chaque tranche horaire , pour l'année 2002.
- Figure 4.12 Evolution de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire diffuse pour chaque tranche horaire , pour l'année 2003.
- Figure 4.13 Evolution de la moyenne annuelle de l'irradiation solaire diffuse, calculée pour chaque tranche horaire de la journée séparément, pour l'année 2001, 2002, 2003.
- Figure 4.14 Evolution horaire de l'irradiation solaire UVB pour les journées du 15 février et 14 novembre 2001, 15 mai 2002 et 17 juillet 2003.
- Figure 4.15 Evolution horaire de l'irradiation solaire UVB du 1^{er} au 5 juin 2001
- Figure 4.16 moyenne journalière de I_{UV} du premier trimestre 2001
- Figure 4.17 moyenne journalière de I_{UV} du deuxième trimestre 200
- Figure 4.18 moyenne journalière de I_{UV} du troisième trimestre 2001
- Figure 4.19 moyenne journalière de I_{UV} du quatrième trimestre 2001
- Figure 4.20 moyenne journalière de I_{UVB} du premier trimestre pour trois années
- Figure 4.21 moyenne journalière de I_{UVB} du 2^{ème} trimestre pour trois années .
- Figure 4.22 moyenne journalière de I_{UVB} du troisième trimestre des trois années
- Figure 4.23 moyenne journalière de I_{UVB} du quatrième trimestre des trois années
- Figure 4.24 La moyenne mensuelle de l'irradiation solaire horaire UVB pour les années 2001, 2002 et 2003.
- Figure 4.25 Les moyennes mensuelles de l'irradiation solaire UVB calculées pour chaque tranche horaire de la journée, au cours de l'année 2001.
- Figure 4.26 Les moyennes mensuelles de l'irradiation solaire UVB calculées pour chaque tranche horaire de la journée, au cours de l'année 2002.
- Figure 4.27 Les moyennes mensuelles de l'irradiation solaire UVB calculées pour chaque tranche horaire de la journée, au cours de l'année 2003.
- Figure 4.28 Evolution de la moyenne annuelle de l'irradiation solaire diffuse, calculée pour chaque tranche horaire de la journée séparément
- Figure 4.29 Evolution de la moyenne mensuelle de l'indice de clarté horaire k_T pour chaque tranche horaire, pour l'année 2001.
- Figure 4.30 Evolution de la moyenne mensuelle de l'indice de clarté horaire k_T pour chaque tranche horaire, pour l'année 2002.
- Figure 4.31 Evolution de la moyenne mensuelle de l'indice de clarté horaire k_T pour

chaque tranche horaire, pour l'année 2003.

- Figure 4.32 La moyenne annuelle horaire de l'indice de clarté horaire k_T , calculée séparément pour chaque tranche de la journée,
- Figure 4.33 Evolution de la moyenne mensuelle horaire de l'indice de clarté horaire k_T
- Figure 4.34 Evolution de la moyenne mensuelle de l'indice de clarté horaire k_{TUVB} , calculée pour chaque tranche horaire, pour l'année 2001.
- Figure 4.35 Evolution de la moyenne mensuelle de l'indice de clarté horaire k_T pour chaque tranche horaire, pour l'année 2002.
- Figure 4.36 Evolution de la moyenne mensuelle de l'indice de clarté horaire k_T pour chaque tranche horaire, pour l'année 2003.
- Figure 4.37 La moyenne annuelle horaire de l'indice de clarté horaire k_{TUVB}
- Figure 4.38 Evolution de la moyenne mensuelle horaire de l'indice de clarté horaire k_{TUVB}
- Figure 4.39 corrélation entre I_{UVB} et I_g
- Figure 4.40 corrélation entre I_{UVB} et I_g
- Figure 4.41 diagramme des valeurs horaires dans l'intervalle [9h00, 10h00]
- Figure 4.42 diagramme des valeurs horaires dans l'intervalle [11h00, 12h00]
- Figure 4.43 diagramme des valeurs horaires dans l'intervalle [13h00, 14h00]
- Figure 4.44 diagramme des valeurs horaires dans l'intervalle [15h00, 16h00]
- Figure 4.45: corrélation moyenne mensuelle de k_T et k_{TUVB}
- Figure 4.46: corrélation entre moyennes tri annuelles k_T et k_{TUVB}
- Figure 4.46 corrélation entre les valeurs horaires des k_T et k_{TUVB}
-
- Tableau 1 longueurs d'ondes des couleurs du spectre solaire
- Tableau 2.1 composition de l'air sec
- Tableau 2.2 Les coefficients d'atténuation $k_{g\lambda}$ et $k_{av\lambda}$
- Tableau 2.3 Les coefficients d'atténuation $k_{g\lambda}$ et $k_{av\lambda}$
- Tableau 4.1 Valeurs des moyennes mensuelles et valeurs maximales de l'irradiation solaire globale horaire pour l'année 2001.
- Tableau 4.2 Valeurs moyennes mensuelles et valeurs maximales de l'irradiation solaire globale horaire pour l'année 2002.
- Tableau 4.3 Valeurs moyennes mensuelles et valeurs maximales de l'irradiation solaire globale horaire pour l'année 2003.
- Tableau 4.4 Valeurs moyennes mensuelles et valeurs maximales de l'irradiation diffuse horaire pour l'année 2001.
- Tableau 4.5 Valeurs des moyennes mensuelles et valeurs maximales de

l'irradiation solaire diffuse horaire pour l'année 2002.

- Tableau 4.6 Valeurs des moyennes mensuelles et maximales de l'irradiation solaire diffuse horaire pour l'année 2003.
- Tableau 4.7 Les minimums et les maximums des moyennes journalières de l'irradiation UVB pour l'année 2001, 2002, 2003.
- Tableau 4.8 moyennes des irradiations solaires horaires UVB et globales calculées sur les trois années 2001, 2002 et 2003.
- Tableau 4.9 Les mesures maximales au cours de chaque mois de l'irradiation UVB pour les années 2001, 2002 et 2003.
- Tableau 4.10 La moyenne tri annuelle pour chaque tranche horaire de l'indice de clarté k_T
- Tableau 4.11 moyenne mensuelle horaire de l'indice de clarté horaire k_T relatif à l'irradiation solaire globale, calculée sur l'ensemble des trois années
- Tableau 4.12 La moyenne tri annuelle pour chaque tranche horaire de l'indice de clarté k_{TUVB}
- Tableau 4.13 moyenne mensuelle horaire de l'indice de clarté horaire k_{TUVB} relatif à l'irradiation solaire UVB, calculée sur l'ensemble des trois années
- Tableau 4.14 moyenne mensuelle horaire de I_g et I_{UVB} calculée sur les trois années
- Tableau 4.15 moyenne mensuelle de k_T et K_{TUVB} calculée sur les trois années
- Tableau 4.12 La moyenne tri annuelle pour chaque tranche horaire de l'indice de clarté k_{TUVB}
- Tableau 4.13 moyenne mensuelle horaire de l'indice de clarté horaire k_{TUVB} relatif à l'irradiation solaire UVB, calculée sur l'ensemble des trois années
- Tableau 4.14 moyenne mensuelle horaire de I_g et I_{UVB} calculée sur les trois années
- Tableau 4.15 moyenne mensuelle de k_T et K_{TUVB} calculée sur les trois années
- Tableau 4.16 moyenne triannuelle de k_T et de k_{TUVB} pour chaque tranche horaire
- Tableau 4.17 paramètres de corrélation exponentielle $k_{TUVB} = a \exp(k_T/t)$

INTRODUCTION

Le soleil est l'étoile la plus proche de la terre et son énergie rayonnante est l'unique source d'énergie qui régule les mouvements atmosphériques et les climats terrestres. L'analyse spectrale du rayonnement solaire prouve que les deux éléments constitutifs principaux du soleil sont l'hydrogène et l'hélium. Cette analyse conduit à l'hypothèse d'une origine thermonucléaire de l'énergie solaire. Différentes réactions de fusion ont été suggérées pour expliquer la production de l'énergie rayonnante du soleil. La plus importante et la plus plausible de toutes est celle proposée par le cycle de "Bethe" qui décrit un processus dans lequel l'hydrogène (quatre protons) se combinent pour former l'atome l'hélium. La masse de l'hélium résultant est plus petite que celle des quatre protons. La masse perdue dans la réaction est convertie en énergie. Cette énergie produite à l'intérieur de la sphère solaire est transférée et rayonnée vers l'espace. Le soleil se comporte alors comme un corps noir à la température de 5777 K.

La distribution spectrale de l'irradiation extraterrestre est l'irradiation solaire qui serait reçue au niveau du sol terrestre en l'absence de l'atmosphère. Ce spectre de l'irradiation électromagnétique inclue les rayons γ , les rayons x, le rayonnement ultraviolet, le rayonnement visible (communément appelé lumière), le rayonnement infrarouge, les ondes radio et les ondes radar. Cette classification est basée sur la longueur d'onde propre à chaque irradiation.

L'énergie totale que le soleil envoie à la limite externe de l'atmosphère terrestre sur une surface unitaire placée perpendiculairement au rayonnement est appelée "constante solaire". Bien que ce ne soit pas réellement une constante, elle ne varie que très faiblement; une variation de l'ordre de quelques dixièmes de pourcent sur toute l'année, en fonction de l'activité

solaire. Cela, tant que le rayonnement solaire n'a pas encore franchi la frontière de l'atmosphère terrestre.

En passant à travers l'atmosphère, l'irradiation solaire est atténuée par l'ozone, la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, l'azote, l'oxygène, les aérosols (les particules de poussières etc) et les nuages et ce, soit par absorption soit par diffusion. Aussi, une augmentation de la turbidité ou du contenu de poussière de l'atmosphère ou de la couverture nuageuse augmente le taux de diffusion de l'irradiation solaire.

Les molécules d'air (azote, oxygène et autres constituants) diffusent l'irradiation solaire dans la gamme spectrale de petites longueurs d'onde comparativement à la taille des molécules. Cette diffusion est appelée diffusion de Rayleigh. Les gouttelettes d'eau et les aérosols agissent par diffusion sur les irradianations de longueurs d'onde comparables aux diamètres de ces particules. Dans ce cas, la diffusion est gouvernée par la théorie de Mie.

Les éléments sus cités agissent de manière sélective par rapport aux différentes longueurs d'onde:

- Concentré dans une ceinture située entre 10 et 30 km au dessus de la surface de la terre, l'ozone absorbe fortement l'irradiation solaire dans la bande de l'ultraviolet entre 0.2 - 0.29 μm et relativement fortement dans la gamme 0.29-0.34 μm et absorbe très peu dans la gamme du 0.44 – 0.7 μm .
- La vapeur d'eau dans l'atmosphère absorbe fortement l'irradiation solaire dans la gamme au dessus du 2.3 μm et agit par toujours l'absorption sur différentes bandes la gamme située entre 0.7 et 2.3 μm .
- L'oxygène absorbe l'irradiation solaire située dans la zone du spectre concentrée autour de 0.762 μm .
- Le dioxyde de carbone absorbe fortement dans la gamme supérieure à 2.2 μm et de manière sélective dans la zone du 0.7 jusqu'à 2.2 μm .

En définitive, le rayonnement solaire atteignant la surface de la terre, provenant directement du disque solaire sans avoir subi d'atténuation par les molécules gazeuses et les aérosols présents dans l'atmosphère ainsi que les gouttelettes d'eau et les cristaux de glaces présents dans les nuages éléments sus cités est dit rayonnement solaire direct.

Le reste du rayonnement solaire reçu au niveau du sol, ayant subi une diffusion par tous les éléments sus cités ou encore celui produit par les réflexions simples ou multiples par les nuages et, pour une très faible part, par le sol, est dit rayonnement solaire diffus. Aussi, il est nécessaire de s'intéresser de près à la répartition spectrale du rayonnement solaire atteignant le sol.

Cet intérêt est devenu d'autant plus grandissant qu'une déplétion de la couche d'ozone a été enregistrée, dès le début des années 80, au dessus de l'antarctique, laissant ainsi, le passage libre aux rayonnements UV dont l'effet sur les êtres humains, les plantes et les écosystèmes est très important. Cet intérêt est lié à de nombreux domaines tels que les recherches liées au cancer, aux domaines forestiers, à la chimie troposphérique, à l'agriculture et à l'océanographie.

La composante UV de l'irradiation solaire constitue une petite portion de l'irradiation solaire globale, encore moins l'irradiation solaire UVB qui ne représente que 1.3% de la constante solaire. Et bien que les UVB représentent moins de 10% de l'UV global qui atteint la surface de la terre, leur amplitude est de trois ou quatre fois plus importante que celle des UVA.

Beaucoup de facteurs contribuent à l'atténuation de l'UV au cours du temps. Outre la concentration d'ozone dans l'atmosphère et la présence d'aérosols et de nuages chargés de gouttelettes d'eau et déjà citée plus haut, il y a aussi l'angle du zénith et la hauteur du soleil qui, dans leurs cycles d'évolutions, font varier la distance du parcours traversé par l'irradiation solaire dans l'atmosphère. Plus le parcours est long, plus l'atténuation est importante.

Le taux des gaz et des particules présents dans l'atmosphère terrestre, ayant de l'impact sur la composition spectrale du rayonnement solaire incident est variable. Ce taux est indiqué par une multitude de paramètres mesurables: composition chimique de l'atmosphère, irradiations solaires et paramètres météorologiques. L'existence de toutes ces prises de mesures dans le même site n'est pas à la portée. Particulièrement en Algérie où le parallèle entre la mesure des paramètres radiométriques spectrales et la mesure des paramètres atmosphériques et météorologiques n'existe pas. Pour pallier à ce défaut, nous avons eu recours, dans la présente étude, faites sur les données radiométriques mesurées à la station VAG de Tamanrasset, aux indices de clarté relatifs à l'irradiation globale incidente k_T et à l'irradiation solaire UVB, k_{TUVB} . Ces paramètres établissent le rapport entre l'irradiation solaire mesurée au niveau du sol et celle qui a été envoyée par le soleil à la limite extérieure de l'atmosphère. Ils schématisent globalement l'état du ciel, directement lié aux conditions atmosphériques. En effet, la clarté du ciel liée à la présence de nuages, du brouillard et à la pollution de l'atmosphère par les aérosols et différents polluants est directement indiquée par le rapport entre l'irradiation mesurée au niveau du sol et celle à l'extérieur de l'atmosphère terrestre. Ce rapport est la définition même de l'indice de clarté. La relation qui existe entre cet indice et les différentes composantes de l'irradiation solaire, y compris l'ultraviolet, met directement le doigt sur le lien entre les conditions atmosphériques et l'évolution de ces composantes.

Notre étude s'est précisément penchée sur l'évolution de la composante globale, diffuse et UVB ainsi que les différents indices de clarté. Ceci nous a conduit à la détermination d'un certain nombre de corrélations mathématiques. Ces corrélations mettent en relief le lien existant entre les différentes composantes du rayonnement solaire ainsi que lien entre le rayonnement solaire spectral UVB et l'état de l'atmosphère en admettant comme expliqué précédemment, les indices de clarté synthétisent les conditions atmosphériques globales.

CHAPITRE 1

Généralités sur le gisement solaire

1.1. Introduction

Dans le présent chapitre, on présente une étude bibliographique sur le gisement solaire et ses composantes et sa distribution spectrale ainsi que la définition de certaines grandeurs astronomiques et les appareils de mesure du rayonnement solaire.

1.2. Le soleil

L'analyse spectrale du rayonnement solaire prouve que les deux éléments constitutifs principaux du soleil sont l'hydrogène et l'hélium. Cette analyse conduit à l'hypothèse d'une origine thermonucléaire de l'énergie solaire.

Vu de la terre, le soleil tourne autour de son axe une fois toutes les quatre semaines. Il ne tourne pas comme un corps solide, la rotation complète de l'équateur prend 27 jours, celle des pôles 30 jours [11].

Le soleil est à une température de corps noir effective égale à 5777 K. Cela signifie que c'est la température d'un corps noir qui émet la même quantité d'énergie que le soleil. Le noyau sphérique très dense du soleil est porté à près de 15 millions de degrés. C'est le siège des réactions nucléaires. La fraction la plus importante de l'énergie produite se situe à 0.23 fois le rayon du soleil. A 0.7 fois le rayon, le phénomène de convection devient important. La bande extérieure de la zone convective s'appelle la photosphère, voir figure 1. C'est au sein de cette fine couche de 500 Km qu'à lieu l'émission du rayonnement qui nous parvient.

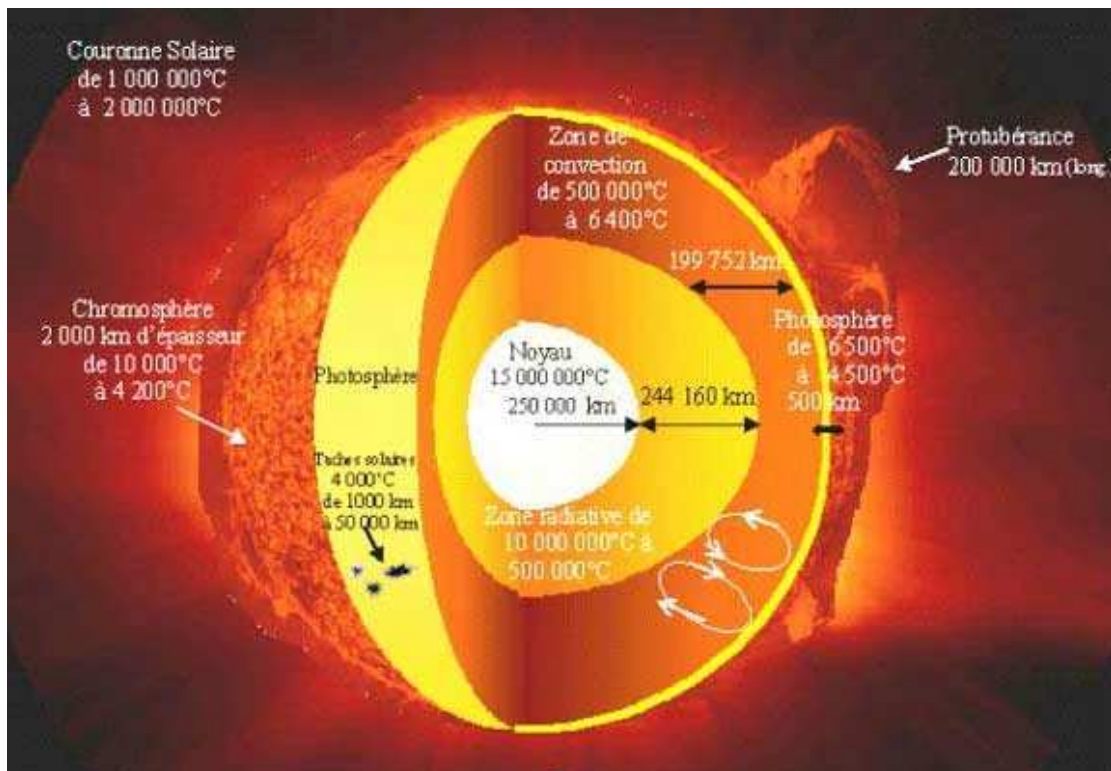


Figure 1.1: Schéma représentatif de la constitution du soleil

Le transfert d'une unité d'énergie arrivant du soleil-étoile vers un récepteur se trouvant sur le sol au niveau de la terre, est régi par un grand nombre de phénomènes physiques. Sa traversée des différentes couches de l'atmosphère de plus en plus dense à la proximité de la terre réduisent cette quantité d'énergie de 20 à 80 % [30].

1.3. La distribution spectrale de l'irradiation extra-terrestre

La distribution spectrale de l'irradiation extraterrestre est l'irradiation solaire reçue au niveau du sol terrestre en l'absence de l'atmosphère. Ce spectre de l'irradiation électromagnétique inclue les rayons γ , les rayons x, l'irradiation ultra-violet, la lumière, la chaleur, les ondes radio et les ondes radar. (figure 2.). Cette classification est basée sur la longueur d'onde propre à chaque irradiation. Parfois, on se réfère aussi à la fréquence ou aux nombre d'ondes. La fréquence présente l'avantage, par rapport aux longueurs d'ondes, de rester constante lors de son passage d'un milieu à un autre. On définit la fréquence ν comme suit [30]:

$$v = c_0 / \lambda_{\text{vid}} = c / \lambda \quad (1)$$

Avec :

c_0 et c représentent les vitesses de propagation de l'onde électromagnétique dans le vide et dans le milieu en question , respectivement. λ étant la longueur d'onde.

Dans le vide, la vitesse de propagation est $c_0 = 2.998 \times 10^8$ m/s. La vitesse c dans un milieu donné est exprimée en termes d'indice de réfraction n , avec:

$$n = c_0 / c \quad (2)$$

Pour les gaz, le n est très proche de l'unité mais plus grand de peu.

Les unités communément utilisées pour mesurer les longueurs d'ondes sont les suivantes:

- Le micromètre, communément appelé micron , μm ; avec $1 \mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$
- Le millimètre: mm avec $1\text{mm} = 10^{-3}\text{m}$;
- Le nanomètre (appelé aussi le millimicron $\text{m}\mu$); avec $1 \text{m}\mu = 10^{-9}\text{m}$;
- L'Angstrom: \AA ; avec $1 \text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$.

Les ondes thermiques comportent les longueurs d'ondes contenues dans l'intervalle $0.2\text{-}1000 \mu\text{m}$. Le spectre visible est contenu dans l'intervalle $0.39\text{-}0.77 \mu\text{m}$. La répartition spectrale des différentes couleurs (basée sur une appréciation approximative) est donnée dans le tableau 1.

Tableau1: longueurs d'ondes des couleurs du spectre solaire

Couleur	Longueur d'onde
Violet	0.390-0.455 μm
Bleu	0.455-0.492 μm
Vert	0.492-0.577 μm
Jaune	0.577-0.597 μm
Orange	0.597-0.622 μm
Rouge	0.622-0.770 μm

Les ondes thermiques émises par l'agitation associée à la température de la matière sont communément appelées chaleur et lumière. Les yeux humains sont des détecteurs sensibles de la lumière mais nos corps détectent très peu la chaleur. La majeure partie de l'irradiation solaire atteignant la surface de la terre est dans le rang des ondes thermiques.

Il existe une autre répartition des ondes thermiques représentée par les petites et grandes longueurs d'ondes. La frontière séparant les deux tranches est quelque peu arbitraire: dans la terminologie de l'énergie solaire, la majeure partie de l'irradiation solaire est considérée être contenue dans la zone des petites longueurs d'ondes, la limite allant de 3 à 4 μm . Les ondes dont la longueur va au delà de 4 μm appartiennent aux grandes longueurs d'ondes. Les grandes longueurs d'ondes émises par la terre et son atmosphère sont souvent appelées ondes terrestres.

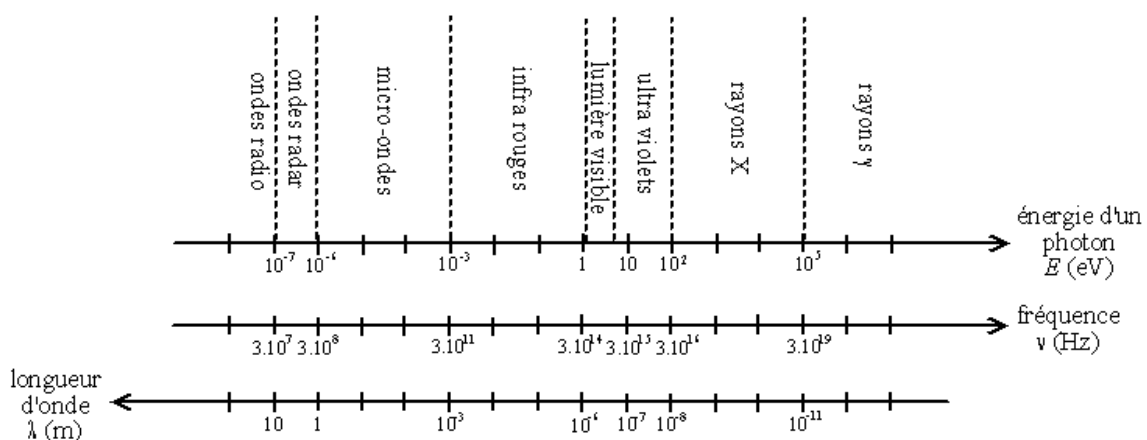


Figure 1.2 : spectre solaire

1.4. Les grandeurs astronomiques [11]

1.4. a. Le temps solaire vrai TSV

Utilisé dans tous les angles solaires apparaissant dans les corrélations, c'est le temps basé sur le mouvement angulaire apparent du soleil à travers le ciel, avec midi solaire le moment de passage du soleil par le méridien de l'observateur.

Pour passer du temps légal au TSV, il y a lieu d'apporter la correction suivante :

$$\text{TSV} - \text{Temps légal} = 4 \left(\phi_{st} - \phi_{loc} \right) + E \quad (3)$$

avec :

ϕ_{st} : le méridien standard pour le temps local de la zone

ϕ_{loc} : le méridien du lieu en question.

Avec E : l'équation du temps donné par [6] :

$$E = 229.2 \left(0.000075 + 0.001868 \cos B - 0.032070 \sin B - 0.014651 \cos 2B - 0.04089 \sin 2B \right) \quad (4)$$

Le terme E traduit en minutes la perturbation dans le taux de rotation de la terre ce qui affecte le temps que prend le soleil à parcourir le méridien de l'observateur avec :

$$B = (n - 1)360/365 \quad (5)$$

n : le numéro du jour de l'année (n = 1 au 1^{er} janvier)

1.4.b. Les coordonnées terrestres

Voici la définition de certains angles astronomiques :

- **La latitude ϕ** : C'est la localisation angulaire d'un point au nord ou au sud de l'équateur. Sa valeur est comprise entre -90° au sud et $+90^\circ$ au nord de l'équateur.

- **La déclinaison δ** : C'est la position angulaire du soleil à midi solaire, lorsque le soleil passe par le méridien local cela, par rapport au plan de l'équateur; positive au nord et négative au sud. La valeur de δ est comprise entre (-23.45°) et $(+23.45^\circ)$, atteignant ces valeurs extrêmes aux solstices d'été $(+ 23.45^\circ, \text{ le } 22 \text{ juin})$ et solstice d'hivers $(-23.45^\circ, \text{ le } 22 \text{ décembre})$ et s'annulant aux deux équinoxes de printemps (21 mars) et d'automne (23 septembre).

La déclinaison étant une fonction continue du temps, sa variation au cours de l'année peut être calculée par l'équation de Cooper :

$$\delta = 23.45 \sin(360(284 + n/365)) \quad (6)$$

n : le numéro du jour de l'année avec $n=1$ au 1^{er} janvier.

- **L'inclinaison β de la surface** : Angle que fait le plan de la surface en question avec l'horizontale.
- **L'azimut de la surface γ** : La déviation de la projection de la normale à la surface sur un plan horizontal par rapport au méridien local. $\gamma = 0$ au sud, négative à l'Est et positive à l'Ouest.
- **L'angle horaire ω** : C'est le déplacement angulaire du soleil à l'est ou à l'Ouest du méridien local, dû à la rotation de la terre autour de son propre axe, à raison de 15° par heure. Négatif avant midi et positif après midi.

D'autres angles supplémentaires sont définis pour déterminer la position du soleil dans le ciel :

- **L'angle du zénith solaire θ_z** : l'angle entre la verticale et la ligne du soleil, i.e l'angle d'incidence d'un rayonnement direct sur une surface horizontale.
- **La hauteur du soleil α** : l'angle entre l'horizontale et la ligne du soleil, i.e l'angle complémentaire de l'angle du zénith.

- **L'azimut solaire γ_s** : le déplacement angulaire à partir du sud, de la projection du rayon direct sur le plan horizontal. Négatif vers l'Est et positif vers l'Ouest. La figure (3) illustre ces différents angles :

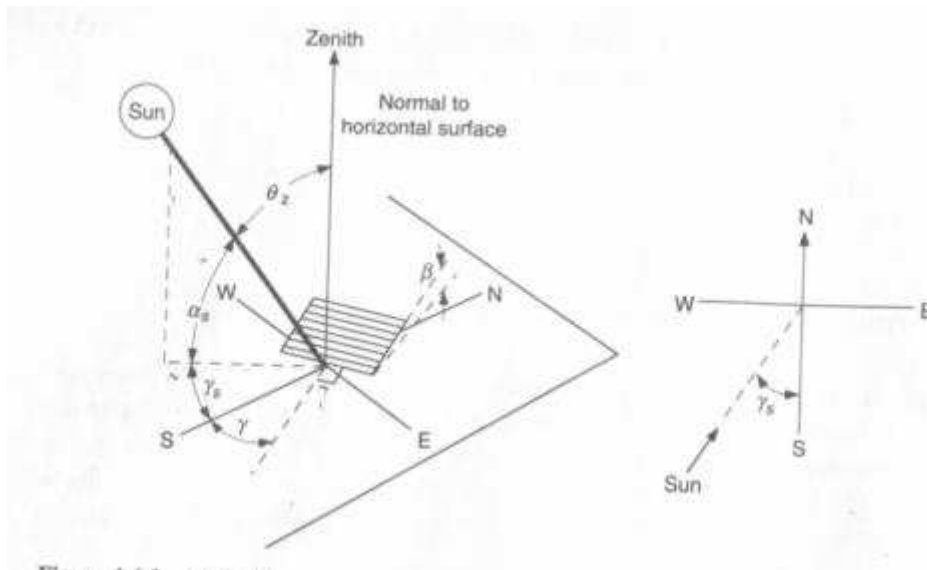


Figure 1. 3 : Les différents angles relatifs à une surface inclinée

1. 5. Le rayonnement solaire au niveau du sol

1.5.1. Définitions

1. 5.1.1. Les grandeurs solaires

Il convient de définir d'abord les grandeurs évoquées dans ce travail. La figure 4 illustre les différentes composantes du rayonnement solaire.

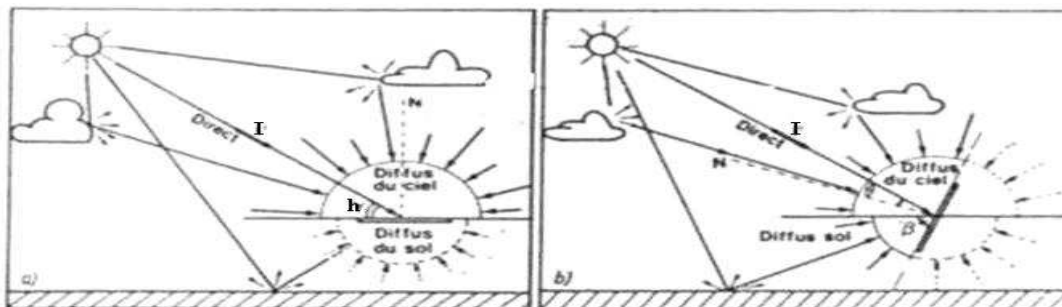


Figure1.4 : Les composantes du rayonnement solaire

a. Le rayonnement solaire direct I_b [11] : C'est le rayonnement solaire provenant de l'angle solide limité au disque solaire et qui n'a pas été diffusé par l'atmosphère.

b. Le rayonnement solaire diffus I_d [11]: C'est le rayonnement solaire dirigé vers le sol reçu sur une surface horizontale, provenant de tout l'hémisphère céleste à l'exception de l'angle solide défini par un cône de 5 degrés d'angle d'ouverture centré sur la direction du soleil. Il est produit par les diffusions simples et multiples du rayonnement solaire par les molécules gazeuses et les aérosols présents dans l'atmosphère ainsi que par les gouttelettes d'eau et les cristaux de glace présents dans les nuages. Il est également produit par les réflexions simples ou multiples du rayonnement solaire par les nuages et, pour une très faible part, par le sol.

c. Le rayonnement solaire global I_g [11] : Le rayonnement solaire global est le rayonnement solaire reçu sur une surface horizontale, parvenant de tout l'hémisphère céleste dans l'angle solide de 2π stéradians. Il est égal à la somme de la composante solaire directe et de la composante solaire diffuse.

d. Le rayonnement solaire I_{UVB} : c'est la partie du rayonnement solaire relative à la bande ultraviolet UVB du spectre solaire.

e. Le flux énergétique [11] : C'est par définition la puissance émise, transportée ou reçue sous forme de rayonnement. L'unité est le Joule (J).

f. L'éclairement énergétique [11] : En un point d'une surface, il représente le quotient du flux énergétique reçu par un élément de cette surface, par l'aire de cet élément. L'unité est le watt par mètre carré (w/m^2).

g. L'irradiation [11] : C'est par définition l'intégrale dans le temps de la fonction éclairement énergétique. Elle exprime la quantité d'énergie reçue en un temps donné. L'unité est le Joule par mètre carré. Les énergéticiens utilisent le watt heure par mètre carré (Wh/m^2) pour l'irradiation.

h. La constante solaire G_{sc} : C'est l'éclairement énergétique arrivant du soleil par unité de temps, reçue par une unité de surface perpendiculaire à la direction de propagation du rayonnement à la mi-distance terre soleil, à l'extérieur de l'atmosphère. Suite à une série de mesures et de corrections, la valeur de G_{sc} a été fixée à 1367 w/m^2 [1].

La variation annuelle de la distance terre soleil, suivant la trajectoire elliptique de la terre dans sa révolution autour du soleil, se traduit par une variation de la valeur de la G_{sc} . Cela impose une correction relative au jour n de l'année comme indiqué par l'équation :

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0.33 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (7)$$

Dans l'équation (7), G_{on} représente le rayonnement extraterrestre mesuré sur une surface normale au rayonnement solaire au $n^{\text{ième}}$ jour de l'année.

i. Angle d'incidence θ du rayonnement direct sur une surface : C'est l'angle que fait la direction du rayonnement solaire direct sur une surface avec la normale à cette surface. Il existe une relation qui lie les différents angles à l'angle d'incidence du rayonnement direct θ sur une surface [11]:

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (8)$$

Pour les surfaces horizontales, l'angle d'incidence est l'angle du zénith solaire θ_z . Dans ce cas, $\beta = 0$ et l'équation (6) devient:

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (9)$$

Minimiser la valeur de l'angle d'incidence revient à maximiser le flux du rayonnement direct sur une surface.

Les surfaces inclinées d'un angle β par rapport à l'horizontale peuvent être assimilées à une surface horizontale à une latitude artificielle de $(\phi - \beta)$. L'équation (9) conduit dans ce cas à :

$$\cos \theta = \cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta \quad (10)$$

Il existe un facteur géométrique R_b qui intervient pour évaluer le rapport entre un rayonnement direct sur un plan incliné et un rayonnement direct sur un plan horizontal :

$$R_b = \cos \theta / \cos \theta_z \quad (11)$$

1.5.1.2. Le rayonnement solaire global incident sur une surface inclinée

Les nombreuses stations à travers le monde, chargées de la collecte de données du gisement solaire, mesurent les différentes composantes du rayonnement solaire incident sur un plan horizontal. Cela nous renvoie au problème général de calcul du rayonnement solaire incident sur une surface inclinée lorsque seul le rayonnement solaire incident sur une surface horizontale est connu. D'où la nécessité de développer des méthodes de calculs appropriées.

1.5.1.2.1. Evaluation du rayonnement solaire global [5,29]:

a. Rayonnement solaire direct I_b : C'est le rayonnement solaire provenant directement du soleil et arrivant au sol après avoir subi, à son passage dans l'atmosphère, plusieurs formes d'atténuations telles que l'absorption, la diffusion, la réflexion...etc.

Il existe des formules empiriques à partir desquelles on peut calculer le rayonnement solaire direct [5,29]:

$$I_b = 1300 \exp\left[\frac{-1}{6 \sin(\alpha_s + 2)}\right]; \text{ ciel très pur} \quad (12)$$

$$I_b = 1230 \exp\left[\frac{-1}{4 \sin(\alpha_s + 2)}\right]; \text{ ciel moyen} \quad (13)$$

$$I_b = 1200 \exp\left[\frac{-1}{2.5 \sin(\alpha_s + 2)}\right]; \text{ ciel pollué} \quad (14)$$

I est exprimé en w/m².

b. Le rayonnement diffus du ciel I_d : C'est la partie du rayonnement solaire diffusée par les molécules, aérosols et nuages, dirigée vers le sol. Il se calcule aisément à l'aide des formules empiriques suivantes[5,29]:

$$I_d = 87(\sin(\alpha_s))^{0.4}; \text{ ciel très pur} \quad (15)$$

$$I_d = 125(\sin(\alpha_s))^{0.4}; \text{ ciel moyen} \quad (16)$$

$$I_d = 187(\sin(\alpha_s))^{0.4}; \text{ ciel pollué} \quad (17)$$

c. La composante normale du rayonnement solaire direct incident sur un plan incliné : La composante normale du rayonnement solaire direct S, à angle d'incidence θ sur un plan incliné d'un angle β par rapport à l'horizontale, est donnée comme suit :

$$S = I_b \cos(\theta) \quad (18)$$

d. Le rayonnement solaire diffus du ciel incident sur un plan incliné : La partie du rayonnement solaire diffus arrivant sur un plan d'inclinaison β , désigné par D^* s'exprime ainsi [5,29]:

$$D^* = \frac{I_d}{1 + \sin(\alpha_s)} \left(\cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right) + \cos(\theta) \right) \quad (19)$$

e. Rayonnement diffus du sol (albédo) : C'est la partie du rayonnement solaire global parvenant au sol, renvoyée vers l'atmosphère par le sol. En toute rigueur, il ne peut atteindre un récepteur horizontal. Il apparaît toutefois que, par

rétrodiffusion dans l'atmosphère, il procure un supplément de rayonnement diffus du ciel d'autant moins négligeable que le trouble du ciel est plus élevé et que l'albédo du sol $\bar{\rho}$ est plus élevé. Ce rayonnement est en fonction de l'albédo du sol $\bar{\rho}$, du rayonnement solaire global au niveau du sol et de l'inclinaison du plan, et dans l'état normal du ciel, est approché par la formule suivante [5,29]:

$$R = \frac{1}{2} \bar{\rho} \cdot I_g \cdot (1 - \cos(\beta)) \quad (20)$$

Avec :

$\bar{\rho}$: Albédo du sol

β : Inclinaison du plan récepteur

I_g : Rayonnement solaire global horizontal au niveau du sol.

f. Le rayonnement solaire global incident sur un plan incliné : Le rayonnement solaire global reçu par un plan d'inclinaison β et d'orientation α est la somme de la composante normale du rayonnement solaire direct et de la partie du rayonnement diffus du ciel augmenté du rayonnement solaire diffus du sol parvenant sur le plan récepteur [5]:

$$G = S + D^* + R \quad (21)$$

N.B : Pour le calcul du rayonnement solaire global sur un plan horizontal, il suffit de mettre $\beta = 0^\circ$ dans les relations précédentes.

1.5.1.3. L'irradiation solaire journalière extraterrestre

L'irradiation solaire journalière incidente sur un plan horizontal en dehors de l'atmosphère terrestre H_0 est obtenue par l'équation (22) [11], calculée sur la période s'étalant entre le lever et le coucher du soleil. Si G_{sc} , la constante solaire est en watt par mètre carré, H_0 est obtenue en joule par mètre carré.

$$H_0 = \frac{24 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360 n}{365} \right) \times \left[\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta \right] \quad (22)$$

Avec G_{sc} : constante solaire et n le numéro du jour de l'année; n=1 au 1^{er} janvier.

ω_s : angle horaire du coucher du soleil, en degrés.

On peut aussi calculer l'irradiation solaire extraterrestre sur une surface horizontale sur une période entre deux angles horaires ω_1 et ω_2 . Il est calculé par l'équation suivante [11] :

$$I_0 = \frac{12 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360 n}{365} \right) \times \left[\cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi (\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \phi \sin \delta \right] \quad (23)$$

1.5.1.4. L'indice de clarté

La quantité de rayonnement solaire incidente sur le sol est en grande partie liée à l'état du ciel. Le taux de clarté de ce dernier est représentatif d'un ensemble de phénomènes physiques qui influent directement sur l'atténuation subie par l'onde électromagnétique, par diffusion et absorption, lors de son parcours dans l'atmosphère terrestre (chapitre 2). En effet, la présence de nuages, le taux de pollution par les aérosols ou les gaz et fumées occasionnent le trouble du ciel auquel, ont fait référence, à l'origine, les travaux de Liu et Jordan, en 1960. La terminologie utilisée pour définir ce paramètre est *l'indice de clarté* [11].

On peut définir un indice de clarté relatif à la moyenne mensuelle. C'est le rapport de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire journalière globale, incidente sur une surface horizontale au niveau du sol à la moyenne

mensuelle de l'irradiation solaire extra-terrestre. On le calcule comme indiqué dans l'équation suivante[11]:

$$\overline{K_T} = \frac{\overline{H}}{H_0} \quad (24)$$

On peut aussi définir un indice de clarté journalier calculé par le rapport entre l'irradiation solaire globale journalière incidente sur un plan horizontal au niveau du sol et l'irradiation solaire journalière extraterrestre. On le calcule comme suit[11]:

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad (25)$$

On définit aussi un indice de clarté horaire qui est le rapport entre l'irradiation solaire globale horaire incidente sur un plan horizontal au niveau du sol et l'irradiation solaire horaire extraterrestre[11].

$$k_T = \frac{I}{I_0} \quad (26)$$

1.5.1.5. Le rayonnement solaire ultraviolet

On a vu plus haut que le rayonnement solaire ultraviolet est l'onde dont la longueur d'onde est située entre les rayons X et la frontière de la lumière visible dans le spectre électromagnétique.

Dans le spectre du rayonnement UV, on distingue généralement :

- les UV-A qui s'étendent de 320 à 400 nm,
- les UV-B, de 280 à 320 nm,
- les UV-C, de longueur d'onde inférieure à 280 nm, qui sont complètement absorbées avant d'atteindre le sol.

Cette classification des trois types du rayonnement UV est basée sur leur activité biologique et le pouvoir de pénétration de la peau. Ils correspondent à trois plages de longueurs d'ondes. Plus le rayonnement UV a une longueur d'onde longue, moins il est nocif (il se rapproche de la lumière visible) mais plus il a un pouvoir de pénétration cutanée. Quand sa longueur d'onde diminue, il possède plus d'énergie, se rapproche des rayons X et donc, est plus destructeur [42]. Dans ce qui suit, nous allons voir en détail les propriétés de chaque zone.

a. Les UV-A ((400- 315 nm) [42]

Les UV-A, dont la longueur d'onde est relativement grande, représentent près de 95% du rayonnement UV qui atteint la surface de la terre. Ils peuvent pénétrer dans les couches profondes de la peau.

Ils sont responsables de l'effet de bronzage immédiat. En outre, ils favorisent également le vieillissement de la peau et l'apparition de rides, en perturbant l'équilibre des synthèses de protéines (en particulier la dégradation du collagène). Dans les cellules, ils sont à l'origine de la production des radicaux libres, très dommageables pour celles-ci. Pendant longtemps, on a pensé que les UVA ne pouvaient être à l'origine de lésions durables. Des études récentes laissent fortement à penser qu'ils pourraient également favoriser le développement de cancers cutanés (ils affectent l'ADN de la cellule causant des mutations chez l'Homme et tout organisme vivant).

En revanche, ils peuvent être bénéfiques pour certains types de pathologies de la peau tels que le psoriasis ou la synthèse de la vitamine D. Antonelli et all (1997), se basant sur des expérimentations de laboratoires, ont démontré que des plantes stimulées à l'UVA ont répondu favorablement en terme de croissance.

b. Les UV-B (315-280 nm) [42]

Les UV-B, de longueur d'onde moyenne, ont une activité biologique importante mais ne pénètrent pas au-delà des couches superficielles de la peau; ils sont relativement absorbés par la couche cornée de l'épiderme (mélanine). Une partie des UV-B sont filtrées par l'atmosphère. Ils sont responsables du bronzage et des brûlures à retardement. Ils sont capables de produire de très fortes quantités de radicaux libres oxygénés dans les cellules de la peau, responsables à court terme des coups de soleil et de l'inflammation. Outre ces effets à court terme, ils favorisent le vieillissement de la peau (en abîmant les fibres de collagène) et l'apparition de cancers cutanés. De fortes intensités d'UV-B sont dangereuses pour les yeux et peuvent causer le "flash du soudeur" ou photokératite.

c. Les UV-C (280-10 nm) [42]

Les UV-C, de courte longueur d'onde, sont les UV les plus nocifs, mais ils sont complètement filtrés par l'atmosphère et n'atteignent pas la surface de la terre.

Toutefois, des lampes UV-C sont utilisées en laboratoires de biologie pour les effets germicides, afin de stériliser des pièces ou des appareils (hotte à flux laminaire par exemple).

La bande spectrale des UV-C est constituée de trois sous- bandes:

- UV-C de 280 à 200 nm,
- V-UV de 200 à 100 nm, c'est-à-dire les UV exploités dans le vide uniquement,
- X-UV de 100 à 10 nm, transitions électromagnétiques entre les UV et les rayons X.

Globalement, l'UV est un rayonnement très énergétique et produit des effets biologiques importants. L'ozone atmosphérique absorbe en partie ce rayonnement protégeant ainsi la biosphère de ses effets néfastes. La

diminution de la couche d'ozone stratosphérique qui a été observée au milieu des années 80 est susceptible d'induire une augmentation de ce rayonnement. Depuis une quinzaine d'années, suite à la découverte de cette déplétion de la couche d'ozone et aux confirmations apportées par de multiples recherches scientifiques concernant l'impact important de l'UV sur la santé humaine, la croissance des plantes, le bien-être des animaux et la dégradation des matériaux, l'étude des UV s'est développée dans de nombreux pays avec la mise en place de réseaux de surveillance et avec des travaux de modélisation du transfert radiatif.

1.6. Les appareils et les techniques de mesures du rayonnement solaire

Dans cette partie, on décrira les principaux appareils utilisés pour effectuer les mesures énergétiques relatives aux composantes du rayonnement solaire ainsi que leurs principes de fonctionnement.

Les premières mesures solarimétriques ont été entreprises par Pouillet en 1837. Entre 1893 et 1932, des progrès considérables sont dus aux travaux de K. Angström et d'abbot. (21)

1.6.1. Définitions [11,36]

Est appelé radiomètre tout appareil destiné à mesurer le rayonnement solaire.

Le Pyrhéliomètre : c'est un instrument utilisant un collimateur détecteur pour mesurer le rayonnement solaire direct arrivant du soleil et une petite portion du ciel située à la circonférence du soleil. L'appareil est orientable de façon que sa surface réceptrice soit normale aux rayons solaires.

Le pyranomètre: c'est un instrument mesurant le rayonnement solaire total de l'hémisphère, direct et diffus dit global, sur une surface plane, usuellement. Lorsque l'appareil est muni d'un dispositif pare-soleil, il peut mesurer le rayonnement solaire diffus.



Figure 1. 5 : pyramomètre

Le pyrاديومتر différentiel : Mesure le bilan du rayonnement total, différence entre le rayonnement total descendant et le rayonnement total ascendant (rayonnements solaire et atmosphérique renvoyés vers l'espace).

L'héliographe: appareil de mesure et d'enregistrement de la durée d'insolation.



Figure 1.6: heliographe

1.6.2. Principe de fonctionnement du radiomètre[11,36]

Dans les instruments étalons absolus, le flux de chaleur radiatif solaire réchauffe une masse déterminée d'un fluide ou d'un solide de capacité calorifique connue. On mesure l'élévation de température du fluide ou du solide en tenant compte des échanges thermiques avec l'extérieur et on associe cette élévation à la différence de potentiel appliquée aux extrémités d'une résistance électrique provoquant la même augmentation de température dans une masse identique du fluide.

Dans les appareils plus courants que les appareils étalons, le flux est reçu sur une thermopile constituée par une série de thermocouples. Sachant qu'un thermocouple est un ensemble de deux conducteurs de nature différente A et B formant un circuit fermé. Si l'un des raccords ou soudures M est maintenue à une température constante T_0 et si l'autre est porté à une température différente T, le circuit est le siège d'une force électromotrice E qui n'est fonction que de T et de la nature des conducteurs et qui, en général, vaut quelques dizaines de microvolts par degré.

1.6.3. Description d'appareils de mesure des rayonnements solaires

a. le pyrhéliomètre à disque d'argent d'Abbot [11,36]

Le récepteur est constitué d'un disque d'argent noirci de 38 mm de diamètre et de 7 mm d'épaisseur, recevant l'irradiation solaire. Le disque est percé d'un trou où s'insère, avec un bon contact thermique, un thermomètre isolé par un manchon en bois. Le disque est placé au fond d'un tube en laiton que l'on peut obturer à l'aide d'un écran mobile, placé à l'autre extrémité. On peut ainsi, pendant un temps déterminé, exposer le disque au rayonnement solaire à mesurer puis l'isoler de façon à provoquer son refroidissement. L'écran est alternativement mis et enlevé tandis que les températures sont lues à des instants bien définis. La mesure des déperditions de chaleur est basée sur l'évolution de la température lorsque l'écran est en place. Cet instrument, conçu en 1902, est à l'origine de l'échelle pyrhéliométrique S.I. 1913.

b. Le Pyrhéliomètre à circulation d'eau d'Abbot [11,36]

Le premier design fait par Abbot en 1905 a été modifié par lui en 1932 pour inclure deux chambres identiques d'un point de vue thermique, constituant des corps noirs sous forme d'un double vase de Dewar dans les quels circule un débit d'eau connu dont on mesure la température d'entrée et le température de sortie. L'une des chambres est chauffée par moyen électrique (effet joule), l'autre par l'irradiation solaire. Lorsque le même échauffement est produit dans les deux chambres, la puissance électrique induite représente une mesure de l'énergie solaire absorbée. Le rôle de chacune des deux chambres est inversé, périodiquement, pour compenser l'effet des dissymétries possibles.

c. le pyrhéliomètre d'Angström (1893) [11,36]

Le récepteur de l'appareil est constitué de deux lamelles de manganine noircies, identiques A et B, situées dans le même plan. Lorsqu'on expose la lamelle A au rayonnement, on laisse B dans l'ombre tout en la faisant parcourir par un courant électrique tel qu'il réalise l'égalité des températures entre les lamelles A et B. à ce moment, l'énergie électrique de la lamelle ombrée est proportionnelle à l'irradiation solaire absorbée par celle exposée. Les rôles des deux lamelles sont alternés pour compenser d'éventuelles différences entre elles telles que les conditions aux limites et le degré d'uniformité de l'échauffement électrique.

Cet appareil sert essentiellement à mesurer le rayonnement solaire direct. Il est construit actuellement par les laboratoires Epply.

d. Le pyranomètre Kipp [11,36]

Ce type d'appareil est destiné à mesurer le rayonnement solaire global. Souvent, se sont des générateurs électriques à surface réceptrice plane, horizontale, débitant une force électromotrice proportionnelle à l'éclairement énergétique reçu. Cette f.é.m. est enregistrée à l'aide de galvanomètre ou de potentiomètre ou intégrée à l'aide d'un dispositif électronique afin d'obtenir

l'irradiation globale ou quantité d'énergie reçue par unité de surface dans un intervalle de temps donné. En Europe, le plus répandu des pyranomètres est construit par les laboratoires Kipp et Zonen. Il est constitué d'une thermopile contenue dans un boîtier métallique fermé à sa partie supérieure par deux hémisphères en verre. Le boîtier est fixé sur un lourd socle métallique et la pile est protégée de la lumière diffusée par le sol par une large couronne blanche horizontale circulaire jouant en même temps le rôle d'écran thermique. Les caractéristiques de la thermopile sont les suivantes:

Résistance interne : 10Ω , sensibilité: 100 à 130 microvolts par mW.cm^2 d'éclairement énergétique.

On étalonne l'appareil par comparaison aux indications d'un pyréliomètre préalablement étalonné.

On adapte au pyranomètre un écran destiné à occulter le rayonnement solaire direct. On peut utiliser un disque mobile mû par un mouvement équatorial dont l'ombre se projette en permanence sur la surface sensible du pyranomètre ou bien adopter une bande pare-soleil que l'on déplace à la main en cours du temps.

d. Le pyradiomètre différentiels ou bilanmètres

Ces appareils servant à mesurer la différence entre les rayonnements dirigés vers le sol et vers l'espace et permettent donc d'établir des bilans radiatifs. Ils possèdent une double surface sensible, l'une tournée vers le haut, l'autre vers le bas.

e. Les héliographes[11,36]

Les héliographes mesurent la durée d'insolation définie comme l'intervalle de temps pendant lequel on voit le disque solaire ou celui pendant lequel on peut observer les ombres portées au sol. Il est convenu, cependant, de la définir par le temps pendant lequel l'éclairement énergétique du récepteur

est supérieur à une valeur admise internationale égale à 120 W/m^2 . L'appareil utilisé dans la météorologie est l'héliographe CAMPBELL-STOKES. Le rayonnement direct est concentré à l'aide d'une lentille boule en verre sur un carton de couleur et de texture bien définie. Il s'ensuit une brûlure, un brunissement ou une décoloration du carton suivant l'intensité du rayonnement direct. La longueur de la trace est proportionnelle à la durée d'insolation.

1.6.4. Les précautions à prendre pour l'usage des pyranomètres [36]

Il faut éviter les dépôts d'eau, de givre et de neige sur la coupelle protectrice, qui diminuent le rayonnement incident sur la thermopile. Les dépôts diffusants ont tendance à accroître le rayonnement global arrivant sur le plan horizontal en redirigeant vers le bas les rayons incidents peu inclinés sur l'horizon. Une quantité d'eau pénétrant à l'intérieur des coupelles peut impliquer une détérioration des soudures mais aussi des tensions fluctuantes à la sortie des pyranomètres. Enfin, la poussière peut diminuer les indications de l'appareil. Il résulte de tout cela la nécessité d'un entretien et d'une surveillance quasi-permanente.

1.6.5. Mesure des irradiations solaires UV [42]

On mesure les UV de deux façons soit, en mesurant directement les UV qui arrivent à la surface de la terre en utilisant des radiomètres terrestres soit, en utilisant des satellites.

1.6.5.1. Mesures directes par des radiomètres terrestres

Il existe trois types de radiomètres qui permettent de mesurer l'intensité du rayonnement UV:

a. Les radiomètres bandes étroites : qui mesurent l'intensité uniquement à certaines fenêtres de longueurs d'ondes.



Figure 1.7: radiomètre SAAtlantic OCR-504I de surface.

Cet appareil permet de faire des mesures à longueurs d'ondes dans l'UV et le visible 305, 325, 340, 380, 413, 443, 480 et 365 nm. La figure 7 représente ce type de radiomètres.

Pour effectuer ce type de mesures bien précises, il est nécessaire d'utiliser un double monochromateur équipé d'une échelle très précise de repérage de la longueur d'onde (figure 8). En effet, les variations du spectre solaire étant très rapides et importantes, particulièrement dans l'UVB, une petite imprécision sur la longueur d'onde va entraîner une grande variation de l'éclairement ce qui aura une répercussion importante lors de la pondération par un spectre d'action.

On s'efforce donc de ramener l'incertitude sur la longueur d'onde à moins de $2 \cdot 10^{-2}$ nm. Pour cela, on assure le contrôle de température, le recalage manuel sur certaines raies caractéristiques du spectre solaire, ainsi que l'étalonnage en laboratoire. Ces opérations restent incontournables mais

difficiles. Globalement, après les avoir effectuées, la précision sur les mesures est de l'ordre de 7%.

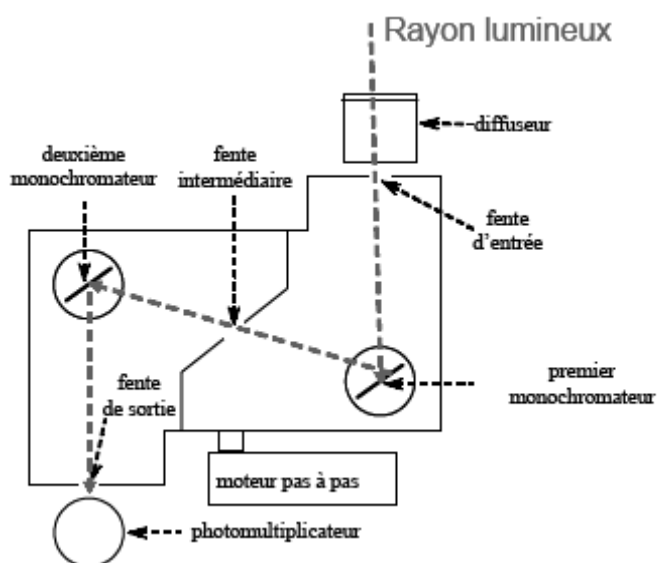


Figure 1.8 : principe du spectroradiomètre à double monochromateur (exemple du SPUV-01 de Jobin et Yvon).

Lors des mesures sur site, le rayonnement est reçu sur une surface horizontale et on effectue un balayage en longueur d'onde dans l'intervalle 280-450 nm avec un pas de 0.5nm.les mesures sont réalisées du lever au coucher du soleil.

b. Les spectroradiomètre: Ce sont des appareils qui mesurent l'intensité sur tout un spectre (par exemple de 300 à 400 nm) avec une résolution de 1 ou 2 nm (figure 9).



Figure 1.9: radiomètre BREWER

c. Les radiomètres larges bandes: ils mesurent l'intensité sur les domaines UV-A, UV-B et le visible (figure 1.10).

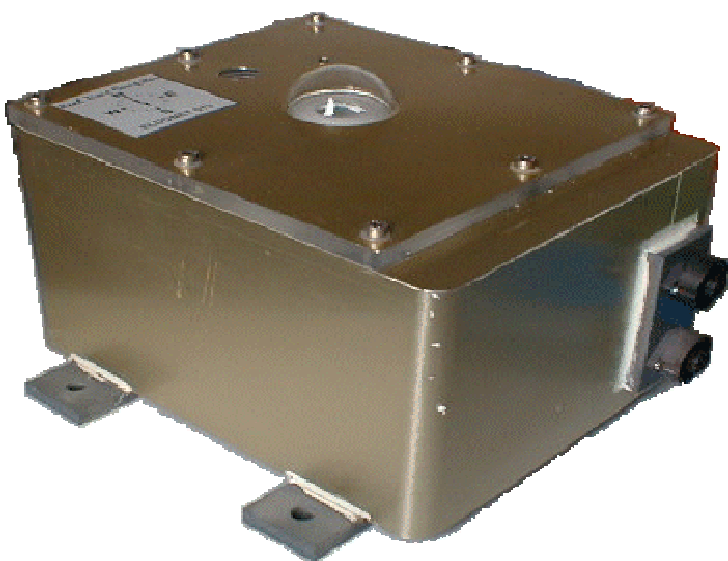


Figure 1.10: radiomètre ELDONET

Ce type d'instrument est équipé d'un filtre sélectionnant les longueurs d'ondes efficaces correspondant à un certain spectre d'action. Il intègre directement le spectre d'éclairement solaire sur la gamme des UV.

1.6.5.2. Mesure du rayonnement UV par satellite

Le satellite capteur Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) de la NASA fournit des mesures qui permettent aux scientifiques d'estimer précisément la quantité d'UVB (290-320 nm) atteignant la surface terrestre. Une image en fausses couleurs qui est une carte de la moyenne mensuelle des données TOMS quotidiennes indiquent la quantité des rayonnements UV atteignant le sol. Les pixels jaunes indiquent les plus forts rayonnements, les teintes rouges et roses des valeurs moyennes, et les blancs signalent aucune ou peu d'exposition UV.

Le capteur TOMS étant sur une orbite polaire qui passe sur l'équateur tous les jours à midi local, permet de mesurer la quantité totale d'ozone présente dans une colonne de l'atmosphère tout comme la couverture nuageuse sur l'ensemble de la planète. L'ozone et les nuages absorbent la majeure partie des UV traversant l'atmosphère. Le capteur TOMS mesure aussi la quantité de rayonnement solaire réfléchi par la partie supérieure de l'atmosphère. La réunion de ces trois mesures permet aux scientifiques d'estimer précisément la quantité de rayonnements UV atteignant la surface de la terre.

CHAPITRE 2

ATTENUATION ATMOSPHERIQUE DE L'IRRADIATION SOLAIRE

2.1. Introduction

Dans ce chapitre, on décrit les différents modes d'atténuation de l'irradiation solaire lors de son passage dans l'atmosphère terrestre. En premier temps, on définit les différents composants de cette atmosphère, puis nous passerons au détail de la diffusion et de l'absorption de l'irradiation.

L'atmosphère de la terre est constituée d'un certain nombre de sphères concentriques, de la surface de la terre vers le haut: troposphère, stratosphère, mésosphère, thermosphère...etc.

Chaque couche possède ses propres propriétés physiques et thermiques. Au niveau de la mer, les valeurs de la pression, de la température et de la densité selon l'U.S. standard atmosphère sont égales à [30]:

- Pression: 1013.25 mbars ou 101.325 kpa,
- Température : 288 k ou 15 °C,
- Densité: 1.225 kg m⁻³.

Allant vers le haut, la pression et la densité augmentent continuellement.

2.2. Définitions [30]

2.2.1. L'air sec propre

Beaucoup de paramètres influencent la composition et les concentrations des composants d'un air sec 'propre' à savoir, la situation géographique du lieu, l'altitude, la saison, les activités industrielles et agricoles de la zone en question, l'environnement de cette dernière et la nature de la

dynamique générale de l'atmosphère. L'US standard atmosphère conçoit la composition d'un air sec propre 'normal' à la proximité de la surface de la terre telle indiquée dans le tableau présenté en 1976 (tableau 2). Cependant, les concentrations de certains gaz peuvent grandement varier, tels que le dioxyde de carbone, l'ozone, le monoxyde de carbone et la méthane et ce, à cause de tous les paramètres sus cités.

Donc, l'atmosphère de la terre est constituée, en grande partie, des molécules de nitrogène et de celles de l'oxygène. Un air propre et sec contient près de 78% de nitrogène, 21% d'oxygène, 1% d'argon et 0.33% de dioxyde de carbone par unité de volume. De plus, l'atmosphère terrestre contient de la vapeur d'eau et des particules de matières dites aérosols telles que les particules de poussières, la suie, les gouttelettes d'eau et les cristaux de glace. Leurs taux dans l'atmosphère varient grandement dans le temps et dans l'espace.

Tableau 2.1: composition de l'air sec (USSA)

Composition de l'air sec		
Nom	Formule	Proportion% vo
Diazote	N ₂	78,084 l
Dioxygène	O ₂	20,948
Argon	Ar	0,934
Dioxyde de carbone	CO ₂	0.333
Néon	Ne	18,18 x10 ⁻⁴
Hélium	He	5,24 x10 ⁻⁴
Monoxyde d'azote	NO	5 x10 ⁻⁴
Krypton	Kr	1,14 x10 ⁻⁴
Méthane	CH ₄	1,5 x10 ⁻⁴
Dihydrogène	H ₂	0,5 x10 ⁻⁴
Protoxyde d'azote	N ₂ O	0,27 x10 ⁻⁴
Xénon	Xe	0,0897 x10 ⁻⁴
Dioxyde d'azote	NO ₂	0,001 x10 ⁻⁴
Ozone	O ₃	0 à 12 x10 ⁻⁴
Radon	Rn	6,0x10 ⁻¹⁴

La prépondérance d'un constituant par rapport aux autres dépend du niveau d'altitude dans l'atmosphère.² Pour le monoxyde d'oxygène O, plus on s'élève dans l'atmosphère, plus sa concentration augmente au détriment du dioxyde d'oxygène O₂ qui, aux environs de 90 km d'élévation dans l'atmosphère, commence à être dissocié par les ultraviolets produisant ainsi de l'oxygène atomique.

Le taux de l'azote atomique N, par contre, demeure faible à tous les niveaux de l'atmosphère puisque le nitrogène moléculaire N₂ est très difficile à dissocier. Au-delà de cette hauteur, davantage de changements dans la

composition de l'atmosphère ont lieu. Au dessus de 600 km, l'hélium devient le constituant majoritaire. Aux environs de 2000 km, se l'hélium ionisé, l'hydrogène ionisé et les électrons qui deviennent prépondérants.

En haut de l'atmosphère, l'ozone O_3 est créée principalement par la composante ultraviolet de l'irradiation solaire. Au niveau du sol, il est formé par la décomposition de l'oxyde de nitrogène généré par les feux de forêts et la fumée..etc. La quantité de l'ozone totale I dans une colonne d'air verticale est exprimée en centimètre atmosphère (atm cm) , Cela correspond à la hauteur de l'ozone gazeux si tout l'ozone dans le sens d'une colonne verticale était ramené aux conditions normales de pression et de température. La distribution verticale de l'ozone varie en fonction de la latitude du lieu et de la saison. Elle est principalement concentrée entre l'altitude allant de 10 à 35 km.

2.2.2. La vapeur d'eau

On rencontre l'eau dans l'atmosphère sous trois états différents:

- état liquide,
- état gazeux: vapeur d'eau,
- sous forme de glace.

2.2.2.1. Le taux de mélange m_r

C'est une des différentes manières qui existent pour définir la quantité d'eau présente dans l'atmosphère. Il s'agit du taux de mélange m_r , qui représente le rapport de la masse de la vapeur d'eau à celle de l'air sec contenus dans un volume unitaire.

2.2.2.2. L'eau précipitable w'

L'eau précipitable w' est la quantité totale de la vapeur d'eau contenue dans la direction du zénith entre les deux limites de la surface de la terre (ou

toute surface à une hauteur donnée) et du sommet de l'atmosphère. Son expression est donnée par l'équation (27)

$$w' = \frac{1}{g} \int_0^{\infty} m_r dz \quad (27)$$

Avec :

z : la hauteur verticale,

g : l'accélération gravitationnelle .

L'eau précipitable est exprimée en unité de masse par unité de surface.. w' égale à 1 mm correspond à une atmosphère extrêmement sèche. Aux environs de 40 mm indique un grand taux d'humidité de l'atmosphère. Sa quantité est très variable d'une saison à une autre. Une bande de mesure des valeurs des moyennes mensuelles de w' à travers les USA démontre que l'eau précipitable durant les mois d'été sont trois fois plus élevées que durant les mois de l'hiver.

2.2.3. Les aérosols

L'aérosol est une petite particule solide ou liquide qui reste suspendue dans l'air et qui suit le mouvement de ce dernier. Naturellement, la neige, la pluie et la grêle ne sont pas des aérosols. Cependant, les molécules de vapeur d'eau coagulées qui suivent le mouvement de l'air sont considérées comme tel. Les aérosols ont la particularité de présenter une grande diversité dans le volume, la taille, la distribution, la forme et la composition.

2.2.3.1. Les origines des aérosols

Les aérosols peuvent avoir deux origines à savoir,

- une origine terrestre : certains aérosols sont d'origine terrestre émanant des fumées industrielles, du pollen, des irrptions volcaniques, des poussières météoriques, des tempêtes de sable, des feu de forêts et de l'agriculture.
- une origine marine : tels que les cristaux marins, les aérosols océaniques et les sels hygroscopiques sur les quels se condense l'eau momentanément.
- La définition des aérosols s'étend aux particules d'eau et de glace suspendues dans le brouillard et les nuages.

Les particules dont le rayon mesure entre 10^{-3} et 10^{-2} μm sont considérées très petites. Celles dont le rayon va de 0.1 à 1 μm sont considérées comme étant de grandes particules. Les particules dans un rayon de 1 à 100 μm sont dite *particules géantes*.

La quantité d'aérosols est indiquée en terme de nombre de particules par centimètre cube. Elle est fonction de plusieurs paramètres. Plus importante au dessus du sol qu'au dessus des surfaces aquatiques, dans l'air tropical et durant les saisons sèches. Cette quantité diminue, cependant, dans l'air polaires ou arctiques froids. Il faut, également, prendre en considération l'apport des installations de chauffage domestique en particules de matières injectées dans l'air. La pluie est l'élément qui nettoie l'air des aérosols. Elle diminue le nombre d'aérosols présent dans l'air, mais augmente la taille de ceux qui y restent suspendues par la suite. Par conséquent, après les précipitations, la turbidité demeure constante. La turbidité, pour rappeler, est la propriété de réduire l'irradiation solaire directe par une atmosphère chargée en aérosols.

La présence des aérosols dans l'atmosphère peut être quantifiée par un des trois paramètres suivants:

- le nombre de particules par centimètre cube,
- la turbidité atmosphérique,
- la visibilité.

2.2.4. La masse optique

2.2.4.1. La masse optique actuelle m_{act}

Le rayon solaire, traversant un milieu, parcourt une certaine distance et heurte un certain nombre de particule qui atténuent, son intensité selon leur type et leur nombre. Cette atténuation dépend de la longueur de cette distance parcourue appelée parcours optique.

Le produit de la densité et de la longueur de la distance parcourue représente la masse d'une substance dans une colonne de section transversale unitaire. On appelle, aussi, cette quantité la masse optique. La masse optique actuelle s'écrit:

$$m_{act} = \int_0^{\infty} \rho ds \quad (28)$$

Avec:

ds : la longueur du parcours géométrique du rayon solaire à partir du soleil,

ρ : la densité de la substance à la distance élémentaire ds .

L'intégration se fait selon le chemin parcouru par l'irradiation directe allant de la limite supérieure de l'atmosphère vers le sol. L'équation (28) s'applique aux irradianations monochromatiques.

2.2.4.2. La masse optique relative m_r

La masse optique relative est le rapport du parcours optique le long d'une trajectoire oblique au parcours vertical dans la direction du zénith. L'équation qui donne évalue cette quantité est la suivante :

$$m_r = \int_0^{\infty} \rho ds / \int_0^{\infty} \rho dz \quad (29)$$

Comme l'atténuation de l'irradiation solaire est due à différents éléments composant l'atmosphère, l'équation (29) devra être résolue pour chacun de ces éléments. En négligeant la courbature de la terre, et en supposant que l'atmosphère est non réfractive et complètement homogène, l'équation (29) devient :

$$m'_r = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (30)$$

Ces hypothèses simplificatrices entraînent une erreur de l'ordre de 0.25 % pour $\theta_z = 60^\circ$ et de 10% pour $\theta_z = 85^\circ$.

2.2.4.2.1. La masse optique relative des différents composants de l'atmosphère

a. La masse optique relative de l'air m_a

La résolution de l'équation (29) peut être écrite sous la forme suivante:

$$m_r = \frac{1}{\rho_0 z_0} \int_0^{\infty} \left[1 - \left(\frac{r_e}{r_e + z_0} \right)^2 \left(\frac{n_0}{n} \right)^2 \sin^2 \theta_{ob} \right]^{-1/2} \rho dz \quad (31)$$

Avec:

ρ_0 : la densité au niveau d u sol,

z_0 : la hauteur d'une atmosphère homogène d'une densité ρ_0 (8.45 km aux conditions normales de température et de pression).

r_0 : le rayon moyen de la terre (6370 km),

n_0 : l'indice de réfraction au niveau d u sol,

n : l'indice de réfraction à la hauteur z ,

θ_{ob} : l'angle du zénith observé.

Appliquée à l'air, avec un indice de réfraction à la longueur d'onde $0.7\mu\text{m}$, l'équation (30) donne la formule établie grâce aux tables de Kasten :

$$m_r = \left[\cos \theta_z + 0.15 (93.885 - \theta_z)^{-1.253} \right]^{-1} \quad (32)$$

L'équation (32) est valable pour la pression standard égale à 1013.25 mbars au niveau de la mer. Pour les conditions locales, l'équation utilisée est la suivante:

$$m_a = m_r (p/1013.25) \quad (33)$$

Avec:

p : la pression locale en millibars.

La pression au dessus du niveau de la mer est obtenue par la relation :

$$p/p_0 = \exp(-0.0001184 z) \quad (34)$$

Avec :

z : est l'altitude du lieu en question, au dessus du niveau de la mer, en mètre.

b. La masse optique relative de la vapeur d'eau m_w

Se basant sur l'équation (29) et prenant en considération les propriétés de la vapeur d'eau dans l'atmosphère, Kasten a développé la formule suivante :

$$m_w = \left[\cos \theta_z + 0.0548 (92.650 - \theta_z)^{-1.452} \right]^{-1} \quad (35)$$

c. La masse optique relative de l'ozone m_o

L'hypothèse est faite que tout l'ozone de l'atmosphère est concentré dans une fine couche centrée autour de la hauteur z_3 . Robinson a démontré la validité de l'équation suivante pour le calcul de m_o :

$$m_0 = \frac{1 + z_3/r_e}{\left[\cos^2 \theta_z + 2(z_3/r_e)\right]^{1/2}} \quad (36)$$

d. La masse optique relative des aérosols

Pour les propriétés déjà citées concernant la grande diversité de la forme, la taille et la distribution des aérosols dans l'atmosphère, il devient très compliqué de déterminer leur masse optique relative. Aussi, d'une manière générale, on a recours dans les calculs à la formule de l'équation (33).

La plus grande partie des irradiances incidentes sur la terre sont reçues sous un ciel clair et sans nuages.

2.3. Atténuation du rayonnement solaire direct

Avant d'atteindre le sol, les irradiances solaires provenant du soleil sont atténuées par l'atmosphère terrestre. Cette dernière est classée en deux types relativement à son degré de clarté:

1. atmosphère sans nuages,
2. atmosphère avec nuages.

L'atténuation du rayonnement solaire à incidence normale reçu à la surface de la terre est due à deux phénomènes :

1. la dispersion atmosphérique du rayonnement solaire par les molécules d'air, d'eau et d'aérosols,
2. l'absorption atmosphérique du rayonnement solaire par l'ozone (O₃), le H₂O et le CO₂.

Ces deux phénomènes atténuent considérablement l'énergie spectrale passant à travers l'atmosphère terrestre.

Soit $I_{0n\lambda}$ la puissance monochromatique mesurée à une distance du soleil égale à la valeur moyenne de la distance terre soleil, entrant dans un milieu homogène, parcourant une distance de longueur m . Selon la loi de Bourguer, la puissance $I_{n\lambda}$ émergeant du milieu est donnée par l'équation (37)

$$I_{n\lambda} = I_{0n\lambda} \exp(-k_{\lambda} m) \quad (37)$$

Avec k_{λ} : Coefficient d'extinction monochromatique,

Cette loi est applicable uniquement aux irradiances monochromatiques. Et comme chaque processus d'atténuation du rayonnement solaire direct agit indépendamment des autres, le coefficient d'extinction global due à tous les processus réunis peut être écrit comme la somme de tous les coefficients individuels:

$$K_{m\lambda} = \sum_{i=1}^{i=j} k_{i\lambda} m_i \quad (38)$$

Avec $k_{i\lambda}$: Coefficient d'extinction monochromatique pour un seul processus. J étant le nombre total des différents processus.

Réellement, la loi de Bourguer n'est pas valide lorsque l'atténuation est due à l'absorption par les gaz. Dans ce cas particulier et à chaque fois que le processus d'atténuation de l'irradiation solaire n'obéit pas à cette loi, on fait recours au coefficient de transmittivité de l'atmosphère. C'est le rapport de l'irradiation émergeant du milieu à celle incidente. La transmittivité monochromatique due à l'irradiation directe est écrite comme suit :

$$\tau_{\lambda} = \frac{I_{n\lambda}}{I_{0n\lambda}} = \prod_{i=1}^{i=j} \tau_{i\lambda} \quad (39)$$

Où $\tau_{i\lambda}$ est la transmittivité due à un seul processus i et τ_{λ} est due à la combinaison de tous les processus.

A présent, une description de chaque processus d'atténuation de l'irradiation monochromatique va être développée. On considérera d'abord la diffusion.

2.3.1. Diffusion du rayonnement solaire direct

La fraction dispersée des irradiances solaires représente *le rayonnement solaire diffus*. Une partie de cette fraction est renvoyée vers l'espace et une autre portion atteint le sol. L'irradiation arrivant du soleil en ligne directe vers le sol constitue *le rayonnement solaire direct*. Pour la plupart des applications de l'engineering, la distribution spectrale du rayonnement solaire peut être considérée, approximativement, la même pour la composante directe que pour la composante diffuse.

Lorsqu'une onde électromagnétique heurte (percute) une particule, une part de l'énergie incidente est diffusée dans toutes les directions. Toutes les particules dans la nature qu'elles soient de la taille d'un électron ou d'une planète diffusent l'irradiation solaire. L'irradiation diffusée par une particule heurte d'autres particules dans le milieu et ce processus, dit diffusion multiple se poursuit dans l'atmosphère.

L'énergie diffusée par les particules sphériques peut être théoriquement quantifiée par la résolution de l'équation de Maxwell pour les ondes électromagnétiques en coordonnées polaires sphériques.

Lorsque la particule est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de l'irradiation solaire, la solution de l'équation de Maxwell est particulière et a été proposée par Gustave Mie, appelée *théorie de Mie* en son honneur. Si par contre, la particule est sphérique et que la longueur d'onde de l'irradiation est nettement plus petite que la particule, une autre solution particulière a été proposée par Lord Rayleigh appelée, en son honneur, *théorie de Rayleigh*. Cette théorie est particulièrement utile dans l'étude de la diffusion des irradiances solaires par les molécules d'air.

Soit n l'indice de réfraction du milieu, D le diamètre de la particule et λ la longueur d'onde électromagnétique en micromètres.

- Si $(\pi D/\lambda) < 0.6/n$, la diffusion est gouvernée par la théorie de Rayleigh;
- Lorsque $(\pi D/\lambda) > 5$, la diffusion devient un processus de réflexion qui arrive rarement dans l'atmosphère de la terre,
- Lorsque $0.6/n < (\pi D/\lambda) < 5$, la diffusion est gouvernée par la théorie de Mie, appliquée aux particules dont la taille est supérieure à 10\AA , telles que les aérosols.

A présent, nous allons passer en vue plus détaillée les différents processus de diffusion et d'absorption de l'irradiation solaire.

2.3.1.1. La diffusion de Rayleigh due aux molécules d'air

Toutes les molécules de l'air réduisent l'énergie solaire par la diffusion, processus qui, dans ce cas, opère à toutes les longueurs d'ondes et qui par conséquent est dit processus continu.

La diffusion par les molécules d'air décrite par *la théorie de Rayleigh* est basée sur l'hypothèse que les particules responsables de la diffusion sont sphériques, que leur diamètre est inférieur à 0.2λ et que chaque particule agit indépendamment de l'autre. Sa formulation mathématique prend en compte des considérations telles que le nombre de particules par unité de volume et l'indice de réfraction de ces particules. L'essentiel de la théorie est que le coefficient d'extinction optique monochromatique varie approximativement en λ^{-4} ; résultat vérifié expérimentalement. Une simple formulation approximée permet d'évaluer le coefficient d'extinction pour la diffusion par l'air sec aux conditions standard:

$$k_{r\lambda} = 0.008735 \lambda^{-4.08} \quad (40)$$

L'expression complète pour la transmittivité dans le cas de la diffusion de Rayleigh:

$$\tau_{r,\lambda} = \exp(-0.008735\lambda^{-4.08}m_a) \quad (41)$$

Avec m_a : masse d'air optique relative à la pression atmosphérique.

L'irradiation solaire directe rencontre, en premier abord, la particule d'air. Elle subit une diffusion dite primaire. En retour, l'irradiation diffuse heurte d'autres particules et molécules et le processus de diffusion devient un processus continu dit diffusion multiple. Cependant, la diffusion primaire prédomine sur la diffusion multiple. Une partie de la totalité de la diffusion primaire et multiple retourne vers l'espace, une partie est absorbée et une autre partie atteint le sol.

La comptabilisation de la contribution de la diffusion multiple nécessite un temps colossal de calcul, de plus, cette contribution est souvent petite et toute forme de solution exacte est contrebalancée par l'incertitude des propriétés optiques de l'atmosphère réelle, particulièrement ceux des aérosols et de la couverture du sol. Pour cette raison, seuls les effets de la diffusion primaire sont présentés.

2.3.1.2. La diffusion de Mie due à la vapeur d'eau et aux particules de poussière

La taille des molécules de la vapeur d'eau est comparable à celle des molécules d'air sec. Cependant, souvent plusieurs molécules de vapeur d'eau coagulent donnant naissance à des particules liquides plusieurs fois plus grandes que ces molécules. De plus, lorsque les conditions d'humidité sont favorables, la taille des petites poussières ou d'autres particules augmente à cause de la condensation d'eau dessus. En conclusion, la présence de la vapeur d'eau dans l'atmosphère a de l'impact sur la taille et le nombre des particules qui la constituent.

Le traitement mathématique de *la théorie de Mie* concernant la diffusion de l'irradiation solaire par les particules de poussière "sèches" ou "humides" est très difficile. Cela, en raison de la diversité de la forme, de la taille et de la nature des particules de poussières dans l'atmosphère et qui de plus, ne sont pas mesurées et reportées régulièrement. Les coefficients présentés sont obtenus expérimentalement et sont considérés suffisamment précis.

Il existe deux manières de procéder pour traiter la diffusion par les particules autres que les molécules d'air sec:

1. deux coefficients d'atténuation séparés pour la vapeur d'eau et pour les particules de poussière, selon la procédure de Moon,
2. un coefficient combiné pour les deux éléments sus cités, procédure développée par Ångström.

▪ Procédure de Moon

Selon cette procédure, le coefficient d'extinction dû à la diffusion de la vapeur d'eau de l'irradiation solaire directe est le suivant:

$$k_{ws\lambda} = 0.008635\lambda^{-2} \quad (42)$$

Cette équation est valable pour $m_f = 1$ et $w = 0.1$ cm d'eau précipitable. Le coefficient d'extinction dû à la diffusion par les particules de poussière est comme suit:

$$k_{d\lambda} = 0.08128\lambda^{-0.75} \quad (43)$$

Ce calcul est valable pour $m_a = 1$ et 800 particules de poussière par cm^3 .

Généralement, on considère qu'une atmosphère contenant 200 particules de poussière par centimètre cube est très propre et 800 particules

par centimètre cube, très polluée. Les coefficients de transmittance relatifs sont comme suit:

$$\tau_{ws\lambda} = \exp\left[-0.008635 \lambda^{-2} w m_r\right] \quad (44)$$

$$\tau_{d\lambda} = \exp\left[-0.08128 \lambda^{-0.75} (d / 800) m_a\right] \quad (45)$$

respectivement.

- **Formule de la turbidité d'Ångström pour tous les aérosols**

Cette procédure traite l'atténuation de l'irradiation solaire par les particules 'humides' et celles 'sèches' en une seule formulation. A l'opposé de Moon qui suppose que le coefficient d'atténuation pour les particules est causé uniquement par la diffusion, la réalité est que la matière particulaire absorbe aussi bien qu'elle diffuse l'onde électromagnétique, bien que la diffusion soit plus importante que l'absorption. De plus, ce phénomène d'absorption est une fonction continue de la longueur d'onde.

En outre, comme l'impact de l'atténuation de l'irradiation directe due à la diffusion est difficile à séparer de celui de l'absorption, Ångström suggère une seule formule pour les deux effets réunis, dite formule de turbidité d'Ångström :

$$k_{a\lambda} = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (46)$$

Avec:

λ : longueur d'onde en micromètres.

β : Coefficient de turbidité d'Ångström, allant de 0.0 jusqu'à 0.5 et parfois plus; indiquant la quantité d'aérosols présents dans l'atmosphère dans la direction verticale.

α : exposant de la longueur d'onde, lié à la distribution de la taille des aérosols. Les grandes valeurs de α indiquent un taux élevé des petites particules par rapport aux grandes. La valeur de α varie de 4 à 0. Généralement, α prend

des valeurs entre 0.5 et 2.5. Une bonne moyenne pour la plupart des atmosphères naturelles est $\alpha = 1.3 \pm 0.5$.

Une variation de la température causant l'évaporation ou la condensation de l'humidité dans l'atmosphère fait varier sensiblement la valeur de β et de α au cours d'une même journée.

$k_{a\lambda}$ inclue l'atténuation due aux particules de poussière "sèches" et "humides", c'est-à-dire tous les aérosols.

En utilisant la formule de turbidité d'Ångström, on peut écrire le coefficient de transmittivité des aérosols comme suit:

$$\tau_{a\lambda} = \exp(-\beta\lambda^{-\alpha}m_a) \quad (47)$$

▪ **La transmittivité directe due à l'atténuation continue**

Il est possible, à présent, de calculer $\tau_{c\lambda}$, la transmittivité monochromatique de l'atmosphère due uniquement à l'atténuation continue comme suit:

$$\tau_{c\lambda} = \exp\{-[k_{r\lambda}m_a + k_{ws\lambda}wm_r + k_{d\lambda}(d/800)m_a]\} \quad (48)$$

Avec :

$k_{ws\lambda}$: coefficient d'atténuation due à la diffusion par l'eau;

$k_{d\lambda}$: Coefficient d'atténuation due à la diffusion et à l'absorption par la poussière.

$k_{ws\lambda}$ et $k_{d\lambda}$ peuvent être remplacé par le coefficient de turbidité d'Ångström et $\tau_{c\lambda}$ devient:

$$\tau_{c\lambda} = \tau_{r\lambda}\tau_{a\lambda} = \exp[-(k_{r\lambda} + k_{a\lambda})m] \quad (49)$$

Les équations (47) et (48) devraient donner des résultats identiques.

2.2.2. L'absorption de l'irradiation solaire directe par les gaz

La diffusion de l'irradiation solaire directe par l'atmosphère ainsi que son absorption par les particules de matière est une fonction continue de la longueur d'onde. Par contre, l'absorption de l'irradiation solaire par les gaz (les molécules d'air sec et la vapeur d'eau) est un processus sélectif.

Le **CO₂**, **O₃**, **N₂O**, **CO**, **O₂**, **CH₄** et **N₂** sont les plus importants absorbeurs parmi les molécules d'air sec. Les oxydes de nitrogène tels que **NO₂**, **N₂O₄**, **N₂O₅** ainsi que les combinaisons hydro carboniques telles que **C₂H₄**, **C₂H₆**, **C₃H₈** et le gaz sulfurique H₂S par contre, absorbent dans une moindre mesure.

La vapeur d'eau et les gaz sus cités sont dits *absorbeurs moléculaires*, principalement actifs au dans la zone des infrarouges proches et lointains. Cette appellation est utilisée pour les distinguer des gaz atomiques tels que l'oxygène atomique **O** et l'azote **N** qui absorbent principalement un maximum d'ultraviolets et les longueurs d'ondes plus courtes.

Le processus d'absorption dépend de l'état d'énergie de la molécule. En effet, l'irradiation solaire est absorbée durant le passage de la molécule d'un état d'énergie vers un autre. Cette absorption a lieu uniquement à des longueurs d'ondes discrètes, raison pour laquelle elle est dite *absorption sélective*. Lorsque l'absorption a lieu pour des longueurs d'ondes très proches les unes des autres, on parle d'une *bande d'absorption*. A l'intérieur d'une même bande, l'absorption n'est pas constante.

2.3.2.1. L'absorption dans l'ultraviolet et le spectre visible

L'oxygène diatomique **O₂**, l'azote **N₂**, l'oxygène atomique **O**, l'azote atomique **N** et l'ozone **O₃** sont les principaux absorbeurs dans la bande de l'ultraviolet et du spectre visible.

L'oxygène atomique et l'azote atomique sont responsables de l'absorption des rayons X et toutes les ondes courtes jusqu'à $0.0850 \mu\text{m}$. Aucune radiation inférieure cette limite ne peut s'infiltrer aux couches inférieures de l'atmosphère vu que ces deux absorbeurs trouvent très haut dans l'atmosphère.

L'oxygène et l'azote diatomiques absorbent l'irradiation solaire sur un certain nombre de bandes d'absorption qui se chevauchent dans une longueur d'onde inférieure à $0.20 \mu\text{m}$.

Comme l'atmosphère supérieure (au dessus de 90 km) et l'atmosphère inférieure sont essentiellement composées de ces quatre gaz (oxygène et nitrogène atomiques et diatomiques), aucune radiation de longueur d'onde inférieure à $0.2 \mu\text{m}$ n'atteint la surface de la terre.

L'oxygène diatomique possède encore trois autres bandes de faible absorption dans le spectre visible centrée autour de 0.63 et 0.69 et $0.76 \mu\text{m}$. Cependant, dans cette région, il y'a un certain chevauchement de l'absorption par les bandes d'ozone. L'ozone présente un certain nombre de bande d'absorption dans la zone inférieure à $0.20 \mu\text{m}$, dans l'ultraviolet, le visible et l'infrarouge proche. Il possède aussi une bande d'importante absorption de 0.2 à $0.3 \mu\text{m}$, une autre plus faible allant de 0.3 à $.35 \mu\text{m}$ puis encore une fois des bandes d'importante absorption dans la zone du visible allant de 0.45 à $0.77 \mu\text{m}$. L'ozone possède aussi une zone d'absorption dans la zone inférieure à $0.2 \mu\text{m}$; mais comme les onde de cette bande sont absorbées par O, N, O_2 , et N_2 bien avant qu'elles n'atteignent la stratosphère où se trouve l'ozone, on néglige ce rang d'absorption tant qu'il s'agit de l'irradiation solaire incidente sur la surface de la terre.

2.3.2.2. L'absorption dans le spectre de l'infrarouge

Les gaz responsables de la plus importante absorption de l'irradiation solaire dans la zone de l'infrarouge sont le H_2O , CO_2 , O_3 , N_2O , CO , O_2 , CH_4 et le N_2 . Les bandes d'importante absorption par vapeur d'eau sont

autour de 0.72, 0.82, 0.94, 1.1., 1.38, 1.87, 2.7, 3.2 et 5.2 μm . Celles de l'oxygène sont autour de 0.69 et 0.76 μm . Et dans la mesure où l'on s'intéresse au spectre solaire dont la longueur d'onde $\lambda < 4.0 \mu\text{m}$, on néglige les bandes d'absorptions relatives au **H2O** et au **CO2** qui se situent à des longueurs d'ondes supérieures à cette valeur ainsi que les bandes d'absorption relatives à d'autres gaz. La concentration de **NO2**, **CO** et **CH4** sont très faibles et leur effet sur l'irradiation solaire atteignant le sol est également minimal.

2.3.2.3. Transmittivité des absorbeurs moléculaires

Contrairement à la diffusion de l'irradiation solaire directe par les molécules qui est une fonction de la longueur d'onde variant en λ^{-4} , l'absorption moléculaire de cette irradiation est nettement plus compliquée. Elle dépend la pression locale, de la température et est une fonction oscillatoire de la longueur d'onde". De plus, pour la comptabiliser, il est nécessaire de connaître la fréquence, la taille et la largeur des lignes spectrales. La loi de Bourguer qui ne prend pas en considération tous ces paramètres est pourtant souvent utilisée en alternative à une toute autre procédure qui nécessiterait un temps de calcul très grand.

Pour déterminer les éléments de calcul de la transmittivité due à l'absorption moléculaire, on s'intéressera séparément à l'ozone d'un côté et au reste de molécules d'air sec telles que le CO_2 , N_2O et CO d'un autre.

2.3.2.4. La transmittivité de l'ozone

La zone d'absorption de l'ozone se situe dans l'ultraviolet, le visible et l'infrarouge. La loi de Vigroux, souvent utilisée, réécrit la loi de Bourguer pour l'ozone présentant des coefficients d'atténuation adéquats:

$$\tau_{o\lambda} = \exp(-k_{o\lambda} l m_r) \quad (50)$$

Avec :

$k_{o\lambda}$: le coefficient d'atténuation due à l'absorption par l'ozone,

l : la hauteur de l'ozone en cm,
 m_r : la masse optique de l'ozone.

2.3.2.5. Les transmittivités du mélange uniforme des gaz et de la vapeur d'eau

Beaucoup de travaux se sont succédés pour affiner la relation de la transmittivité relative à l'absorption de l'irradiation solaire directe par les gaz. Cependant, un algorithme développé par McClatchey et al, simple et suffisamment précis est assez approprié pour des calculs d'ingennering. Il donne la transmittivité spectrale de l'absorption moléculaire due au CO₂, O₂...etc. combinés sous la dénomination générale des 'gaz uniformément mélangés:

$$\tau_{g\lambda} = \exp\left[-1.41 k_{g\lambda} m_a / (1 + 118.93 k_{g\lambda} m_a)^{0.45}\right] \quad (51)$$

La transmittivité spectrale due à l'absorption par la vapeur d'eau est donné par la formule:

$$\tau_{wa\lambda} = \exp\left[-0.2385 k_{wa\lambda} w m_r / (1 + 20.07 k_{wa\lambda} w m_r)^{0.45}\right] \quad (52)$$

Les coefficients d'atténuation $k_{g\lambda}$ et $k_{aw\lambda}$ sont présentés dans les tableaux 2.2. et 2.3

Tableau 2.2: Les coefficients d'atténuation $k_{g\lambda}$ et $k_{aw\lambda}$

$\lambda(\mu m)$	$k_{g\lambda}$	$\lambda(\mu m)$	$k_{g\lambda}$	$\lambda(\mu m)$	$k_{g\lambda}$
0,76	0,300E + 01	1,75	0,100 E -04	2,80	0,150E+ 03
0,77	0,210E+00	1,80	0,100E-04	2,90	0,130E+00
		1,85	0,145E-04	3,00	0,950E-02
1,25	0,730E - 02	1,90	0,710E-02	3,10	0,100E-02
1,30	0,400E - 03	1,95	0,200E+01	3,20	0,800E+00
1,35	0,110E - 03	2,00	0,300E+01	3,30	0,1900E+01
1,40	0,100E - 04	2,10	0,240E+00	3,40	0,130E-01
1,45	0,640E-01	2,20	0,380E-03	3,50	0,750E- 01
1,50	0,630E - 03	2,30	0,110E-02	3,60	0,100E- 01
1,55	0,100E - 01	2,40	0,170E-03	3,70	0,195E- 02
1,60	0,640E - 01	2,50	0,140E-03	3,80	0,400E- 02
1,65	0,145E - 02	2,60	0,660E-03	3,90	0,290E+ 00
1,70	0,100E - 04	2,70	0,100E+03	4,00	0,250E-01

Tableau 2.3: Les coefficients d'atténuation $k_{g\lambda}$ et $k_{aw\lambda}$

$\lambda(\mu m)$	$K_{wa\lambda}(cm^{-1})$	$\lambda(\mu m)$	$K_{wa\lambda}(cm^{-1})$	$\lambda(\mu m)$	$K_{wa\lambda}(cm^{-1})$
0,69	0,100E - 01	0,93	0,2704 + 02	1,85	0,220E + 04
0,70	0,240E - 01	0,94	0,380E + 02	1,90	0,140E + 04
0,71	0,125E - 01	0,95	0,410E + 02	1,95	0,160E + 03
0,72	0,100E +01	0,96	0,260E + 02	2,00	0,290E + 01
0,73	0,870E+00	0,97	0,310E + 01	2,10	0,220E + 00
0,74	0,610E - 01	0,98	0,148E + 01	2,20	0,330E + 00
0,75	0,100E - 02	0,99	0,125E + 00	2,30	0,590E + 00
0,76	0,100E- 04	1,00	0,250E - 02	2,40	0,203E + 02
0,77	0,100E - 04	1,05	0,100E - 04	2,50	0,310E + 03
0,78	0,600E - 03	1,10	0,320E + 01	2,60	0,150E + 05
0,79	0,175E - 01	1,15	0,230E + 02	2,70	0,220E + 05
0,80	0,360E - 01	1,20	0,160E - 01	2,80	0,800E + 04
0,81	0,330E+ 00	1,25	0,180E - 03	2,90	0,650E + 03
0,82	0,153E + 01	1,30	0,290E + 01	3,00	0,240E + 03
0,83	0,660E + 00	1,35	0,200E + 03	3,10	0,230E + 03
0,84	0,155E + 00	1,40	0,110E + 04	3,20	0,100E + 03
0,85	0,300E - 01	1,45	0,150E + 03	3,30	0,120E + 03
0,86	0,100E + 04	1,50	0,150E + 02	3,40	0,105E + 02
0,87	0,100E - 04	1,55	0,170E - 02	3,50	0,360E + 01
0,88	0,260E - 02	1,60	0,100E - 04	3,60	0,310E + 01
0,89	0,630E - 01	1,65	0,100E - 01	3,70	0,250E + 01
0,90	0,210E+ 01	1,70	0,510E + 00	3,80	0,140E + 01
0,91	0,160E+ 01	1,75	0,400E +01	3,90	0,170E + 00
0,92	0,125E+ 01	1,80	0,130E + 03	4,00	0,450E - 02

m_a et m_r sont les masses optiques pour les gaz uniformément mélangés et la vapeur d'eau respectivement. w est la vapeur d'eau précipitable, en centimètres.

La masse optique pour les gaz uniformément mélangés est donnée par l'équation

$$m_a = m_r (p / 1013.25) \quad (53)$$

Avec P : la pression locale en millibars.

La transmittivité spectrale totale due à l'absorption des molécules est donc égale à :

$$\tau_{ma\lambda} = \tau_{o\lambda} \tau_{g\lambda} \tau_{wa\lambda} \quad (54)$$

2.3.2.6. La transmittivité spectrale totale

La transmittivité monochromatique due aux effets combinés de l'atténuation continue et de l'absorption moléculaire est comme suit :

$$\begin{aligned} \tau_{\lambda} &= \tau_{c\lambda} \tau_{ma\lambda} \\ &= \tau_{r\lambda} \tau_{a\lambda} \tau_{o\lambda} \tau_{g\lambda} \tau_{wa\lambda} \end{aligned} \quad (55)$$

Avec, rappelons le,

$\tau_{r\lambda}$: la transmittivité spectrale de l'irradiation solaire directe due à la diffusion moléculaire,

$\tau_{a\lambda}$: la transmittivité spectrale de l'irradiation solaire directe due à la diffusion et à l'absorption par les aérosols, $[\tau_{a\lambda} = \tau_{ws\lambda} \tau_{d\lambda}]$,

$\tau_{o\lambda}$: la transmittivité spectrale de l'irradiation solaire due à l'absorption par la couche d'ozone,

$\tau_{g\lambda}$: la transmittivité spectrale de l'irradiation solaire directe due à l'absorption par les gaz uniformément mélangés tels que le CO₂ et le O₂,

$\tau_{wa\lambda}$: la transmittivité spectrale de l'irradiation solaire directe due à l'absorption par la vapeur d'eau.

- Dans la zone de l'infrarouge, l'absorption est due, principalement, à la vapeur d'eau et aux gaz uniformément mélangés,
- Dans la zone de l'ultraviolet et du spectre visible, l'absorption de l'ozone, la diffusion de Rayleigh et les aérosols contrôlent essentiellement l'atténuation de l'irradiation solaire directe,
- Aux petites longueurs d'ondes, la transmittivité par les aérosols est minimale; elle augmente petit à petit avec l'augmentation de la longueur des ondes.

L'irradiation solaire spectrale à toute longueur d'onde sur une surface normale aux rayonnements solaires à la mi-distance terre soleil est donnée par:

$$I_{n\lambda} = I_{0n\lambda} \tau_{\lambda} \quad (56)$$

Et sur une surface horizontale :

$$I_{b\lambda} = I_{0n\lambda} \cos(\theta_z) \tau_{\lambda} \quad (57)$$

Les différents processus d'atténuation de l'irradiation solaire directe n'ont pas lieu, automatiquement, simultanément. Le processus prédominant dans les petites longueurs d'ondes tel que l'absorption par l'ozone a lieu, en premier, haut dans l'atmosphère. Ensuite, la diffusion de Rayleigh atténue ce qui reste de l'irradiation solaire directe en agissant sur les courtes longueurs d'onde dans les niveaux supérieurs de l'atmosphère. En allant plus bas dans la direction de du sol, l'atténuation est due à la vapeur d'eau, les gaz uniformément mélangés et les aérosols. Tous ces éléments agissent essentiellement près de la surface de la terre.

CHAPITRE 3

RAISEAU RADIOMETRIQUE NATIONAL

STATION VAG TAMANRASSET ET DONNEES RADIOMETRIQUES

3.1.Introduction

Dans le présent chapitre, on introduit l'Office National de Météorologie avec ses différentes stations de mesure en l'occurrence, la station VAG de Tamanrasset. La qualité de la base de données étudiée sera discutée dans ce chapitre.

3.2. Les mesures radiométriques en Algérie [43]

L'Office National de Météorologie crée le 29 Avril 1975, accomplit sa missions de sa mission de veille de l'atmosphère et du temps sous la tutelle du ministère du transport. Cet organisme a mis en place un grand nombre de stations de mesure radiométriques répartie sur la totalité du territoire national et ce, dès le début des années 90. La plupart sont fonctionnelles sauf indication sur le document ci-dessous. Plus particulièrement, celles en rapport avec une activité agronome (indiqué par Agro ci-dessous). Seulement, les données mesurées ne sont pas archivées. Ce document indique la localisation de la station par régions nationales, les instruments utilisés et la date du début de fonctionnement ainsi que la date d'arrêt dans le cas où la station n'est plus fonctionnelle.

3.1.1.Réseau National de mesure Radiométrique [35]

Région SUD

Tamanrasset ville VAG

Paramètre mesuré	instrument	type	période
Ray direct	Epply NIP	94	
Ray Global	Epply PSP	//	
Ray Diffus	//	PSP	//
Ray IR RG8	//	PSP	//
Ray directe (filtres)	//	NIP	//
Ray UV-B bande 0,28 μ -0,32 μ	//	UVB	97
Ray atmosphérique ou de GLO descendant	//	PIR	2000

Tamanrasset Aéroport station

Ray Globale	KIPP Zonen	PSP	2006
Ray Diffus	//	PSP	2006

Région SUD OUEST

BECHAR

Ray Globale	Zonen CC12	1990-1998
-------------	------------	-----------

BENIABBAS

Ray Globale	Brion Leroux	1978-1983
Ray Diffus		

Région Sud EST

IN AMENAS

Pyranomètre/Kipp et Zonen sous test

GARDAIA

//

Région Centre

KSARCHELALA

Ray Globale	Pyranometre CE180	2002
Ray Diffus	// //	//
Ray Réfléchi	// //	//

Ray directe	Pyrhéliomètre	CE183	
Néant			
Durée d'insolation	Héliographe électronique	CE181	2002
Rayonnement IR atmosphérique	Pyrgéomètre	Epply	2003

Dar el Beida Alger

Ray Globale	Station automatique		2005
Ray Diffus j/cm ²	//		//
Ray en heure et dixième	//		//
Durée d'insolation			

(NB : toutes les stations des régions centre effectuent les mesure de Durée d'ensoleillement classique héliographe Campbell).

Région Ouest

ORAN est l'une des stations les plus anciennes, au début l'instrumentation été complète mais ne reste que :

Ray Globale	Pyranomètre		1975
Ray Diffus	//		//

SAIDA

Mesure	CIMEL Agro		2000-2002
--------	------------	--	-----------

MASCARA

Ray Globale et Ray Diffus	CIMEL Agro		2000
---------------------------	------------	--	------

RELIZANE

Mesure	CIMEL Agro		à l'arrêt
--------	------------	--	-----------

SIDI BELABBAS

Mesure	CIMEL Agro		2007
--------	------------	--	------

ORAN SENIA

Ray Globale et Ray Diffus	équipement MFI		2005
---------------------------	----------------	--	------

TLEMCCEN ZENATA

Ray Globale et Ray Diffus	équipement MFI	2005
---------------------------	----------------	------

Région EST**BATNA**

Hors Servis (HS)

Ray Diffus	Kipp Zonen	a fonctionné jusqu'à 1992
Ray Global	Kipp Zonen	a fonctionné jusqu'à 1992

SETIF

Ray Direct	CIMEL	1999
Ray Réfléchi	//	
Ray Global	//	
Bilan	S19	

ANNABA

Ray Direct	CIMEL	2000
Ray Diffus	//	
Ray Global	//	

BISKRA

Ray Direct	CIMEL	2000
Ray Diffus	CIMEL	2000
Ray Global	CIMEL	2000
Ray total	CIMEL	hors service
Bilan mètre	CIMEL	hors service

CONSTANTINE

Ray Directe	CIMEL	2000
Ray Réfléchi	CIMEL	2000
Ray Global	CIMEL	2000
Bilan mètre	CIMEL	hors service

TEBESSA

Ray Directe	CIMEL	2000
Ray Diffus	CIMEL	2000
Ray Global	CIMEL	2000

OUM EL BOUAGHI

Ray Global	CIMEL 411 ENERCO	1998
------------	------------------	------

KHENCHELA

Ray Global	CIMEL 411 ENERCO	1997-2001
------------	------------------	-----------

GUELMA

Ray Diffus	SAB600Pyrano Précis mécanique	1996-2001
Ray Global	// Pyrano Précis mécanique	//
Ray Total	// Pyrhélio Précis mécanique	
//		
Ray Différentiel	// Pyrad Précis mécanique	//
Intégrateur Ray	// Pyrad Précis mécanique	

3.2.2. La mesure des données radiométriques, chimiques et météorologiques de Tamanrasset

3.2.2.1. Particularités géographiques et climatiques de Tamanrasset

La ville de Tamanrasset est caractérisée par les coordonnées suivantes [29]:

- La latitude ϕ : sa valeur est de 22.47 °Nord ;
- La longitude λ : sa valeur est de + 5.31°E ;
- L'altitude est de 1378 m ;

Le site de Tamanrasset est marqué par la particularité du climat de cette région qui est fortement influencé par le régime tropical : temps clair et limpide en période d'hiver et fortement nuageux avec présence des aérosols et orages en période d'été de mai à septembre.

3.2.2.2. Les mesures radiométriques [34]

Les mesures de rayonnement solaire à la station météorologique de Tamanrasset ville ont débuté en septembre 1994 dans le cadre du programme de la Veille de l'Atmosphère Globale (VAG) mené en collaboration avec l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM – Genève) . Ce programme mondial a pour principal objectif la surveillance de la composition chimique de l'atmosphère dont le bilan radiatif au sol est un élément primordial du changement du climat. Les mesures relatives à la surveillance de la composition chimique de l'atmosphère sont réparties entre la station de Tamanrasset ville et le site de l'Assekram située à 50 km au nord de la ville de Tamanrasset, , choisi par les experts de l'ONM en 1992 car il répond bien aux critères de ce type de stations VAG à savoir, l'éloignement de toute source de pollution anthropique, la rareté d'activités humaines aux alentours et l'altitude importante du site.

La station de Tamanrasset fait donc partie d'un réseau mondial d'environ 30 stations réparties à travers la planète. Les mesures du rayonnement solaire permettent aussi de valider les mesures satellitaires obtenues à partir de l'espace et comme paramètres d'entrées dans les modèles numériques.

3.2.2.3. Equipements installés [34]

La station de mesure de rayonnement de Tamanrasset a été entièrement financé par l'OMM à travers le fonds mondial (PNUD) .

L'ensemble des équipements ont été achetés de la compagnie EPPLEY (USA) et mis au point au laboratoire de la NOAA à Boulder (USA) qui a fourni la formation et le soft d'acquisition.

3.2.2.4. Les mesures relatives au rayonnement solaire[34]

Les paramètres solaires mesurées à la station VAG sont le rayonnement solaire direct, global, diffus, proche infrarouge RG8 solaire (0.2 - 4 μm) et atmosphérique descendant de grande longueur d'onde (GLO) (4.0 - 60 μm) . Les mesures de rayonnement s'effectuent de manière continue avec :

- Pyrhéliomètre (NIP) : pour mesures du rayonnement direct, consolidés par un module (tracker) géré par un PC pour suivi du soleil pour la mesure du rayonnement direct.
- Pyranomètres (PSP) : pour mesures du rayonnement global, diffus, infrarouge.

Tout le système est relié à une acquisition automatique d'un pas de temps d'une minute sur un datalogger CR23X puis transférées sur un PC pour traitement et archivage.

Les différents capteurs (pyrhéliomètres et pyranomètres) sont étalonnés à l'aide de l'étalon AHF N°29225 pour déterminer les nouveaux coefficients d'étalonnage.

A compter de mars 2000, la station a été renforcé par l'acquisition d'un nouveau capteur de mesures de rayonnement atmosphérique grande longueur onde (GLO descendant). Ce capteur est dénommé : pyrgéomètre (PIR)

Les données du rayonnement solaire sont donc disponibles uniquement entre le lever et le coucher du soleil par contre les données du rayonnement atmosphérique sont disponibles le jour comme de nuit. Les données sont envoyées une fois par an au centre mondial d'archivage de rayonnement à St Petersburg (Russie) via le laboratoire NREL (Golden- USA) qui est chargé du contrôle de ces données et de leur mise en forme.

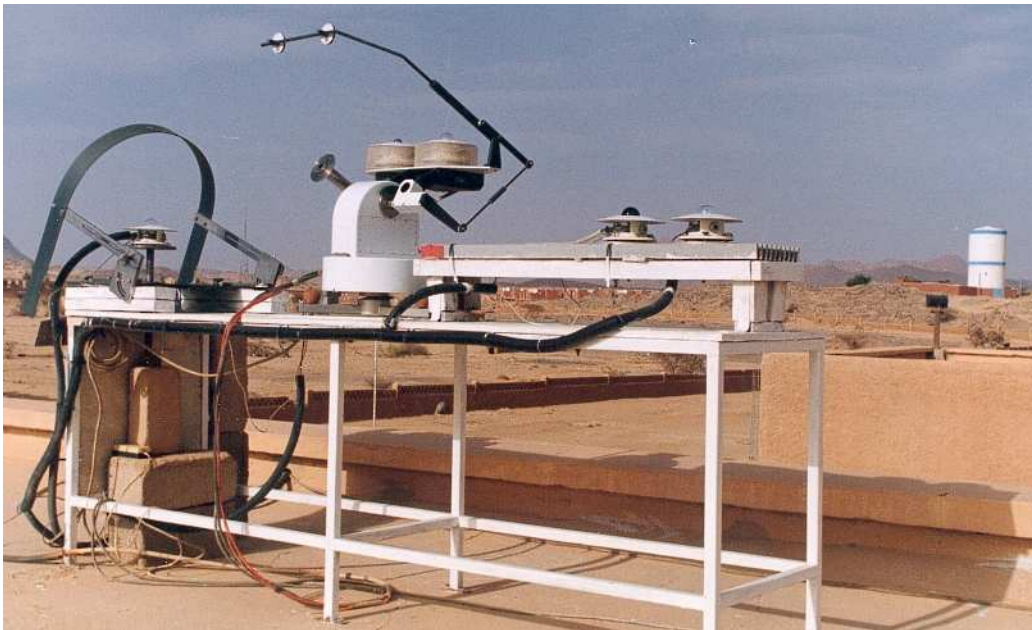


Figure3.1: station de mesure VAG de Tamanrasset ville.



Figure 3.2: station de mesure VAG de Tamanrasset ville.

Sur le site de Tamanrasset et en raison de la particularité du climat de cette région qui est fortement influencé par le régime tropical : temps clair et limpide en période d'hiver et fortement nuageux avec présence des aérosols et orages en période d'été de mai à septembre.

3.2.2.5. Ordres de grandeur

En hiver et en absence de nuages et poussières, le rayonnement direct est très élevé avec des irradiances maximales de 1100 w/m^2 par contre les valeurs du diffus sont très faibles. En période d'été, l'inverse se produit , le rayonnement direct diminue fortement en présence des nuages , mais le diffus devient plus important. En moyenne annuelle, le rayonnement solaire reçu au sol est d'environ 65 % contre 50 % pour toute la planète. C'est un résultat logique car toutes les stations de la région intertropicale reçoivent plus de rayonnement solaire.

3.2.2.6. Mesures relatives à la composition chimique de l'atmosphère [34]

a. Tamanrasset ville

Trouble atmosphérique

Mesure effectuée manuellement 03 fois par jour à 09, 12 et 15 TU à l'aide d'un photomètre solaire pour déterminer le coefficient d'extinction du rayonnement par les aérosols. Elle est effectuée de manière régulière depuis janvier 1995. Les données sont saisies et archivées en fichiers mensuels.

Ozone total

Mesure effectuée manuellement 03 fois par jour autour de 09, 12 et 15 TU à l'aide du spectrophotomètre Dobson N°11. Les données sont saisies et archivées mensuellement, l'envoi vers le centre mondial d'archivage des données à Toronto s'effectue tous les 02 mois). L'étalonnage mensuel de l'équipement s'effectue régulièrement à l'aide des lampes UV et standards pour vérifier les éventuelles dérives de l'appareil.

Mesures de l'épaisseur optique à l'aide d'un photomètre CIMEL(projet AERONET)

Cet équipement a été installé en octobre 2006 en collaboration avec la météorologie espagnole (INM), il permet de mesurer l'épaisseur optique (AOD) de manière continue sur 07 longueurs d'onde.

b. Site de l'Assekrem :

Les paramètres mesurés sur ce site sont l'ozone de surface (O3) , le monoxyde de carbone (CO), les aérosols (comptage de particules et concentration en masse) et échantillonnage des gaz à effet de serre.

Ozone de surface (O3)

Cette mesure s'effectue de manière continue avec un pas de 1 mn à l'aide du TECO 49C, qui donne des concentrations en ppb. Les données de

l'ozone de surface sont envoyées une fois par année au centre mondial d'archivage des données des gaz à effet de serre au Japon (WDCGG).

Monoxyde de carbone (CO)

Cette mesure est effectuée à l'aide de l'instrument HORIBA avec un pas de 1 mn de façon continue .

Mesures des concentrations en masse des aérosols

Cette mesure est en arrêt depuis juin 2004 suite à la panne de la balance du TEOM et n'a pu être dépanné par le fournisseur ECOMESURE (France).

Mesures de comptage de particules

Cette mesure s'effectue trois fois par jour (09 , 12 et 15 TU) à l'aide d'un compteur de particules laser pour 06 classes granulométriques autour de 0.3 μ , 0.5 μ , 0.7 μ , 1 μ , 2 μ et 5 μ m. Le compteur est tombé en panne en fin novembre 2007 suite à un problème dans la pompe .

Echantillonnage de l'air

Le prélèvement des échantillons d'air s'effectue une fois par semaine (tous les samedis) dans des bouteilles spéciales reçues de Boulder (NOAA) pour déterminer la concentration des principaux gaz à effet de serre (GES) : **CO₂, CH₄ et CO**. Les colis contenant les bouteilles sont envoyées au laboratoire de la NOAA pour analyse chimique.

3.2.2.7. Mesures météorologiques [34]

Les mesures météorologiques enregistrées au niveau de la station VAG de Tamanrasset sont suivantes:

- la temperature,
- l'humidité,
- la vitesse des vents,
- la pluviométrie,
- la nébulosité,
- l'insolation.

3.2.2.8. Edition du bulletin de la VAG

Un bulletin de la VAG est édité tous les trimestres pour l'analyse des différents paramètres mesurés dans les deux sites de Tamanrasset "ville" et Assekrem . Ce bulletin est édité de manière régulière depuis l'année 1995 ; au cours de cette année les bulletins N°48 à 51 ont été édités.

3.3. La base de données étudiée

Dans le cadre du présent travail et en collaborations avec les ingénieurs de l'Office National de la Météorologie, nous avons traité les données radiométriques enregistrées au niveau de la station VAG de la ville de Tamanrasset,

3.3.1. Plan d'incidence : les données étudiées sont celles incidentes sur un plan horizontal orienté plein sud.

3.3.2. Présentations des données

Les données traitées sont relatives aux années 2001, 2002, 2003. En l'occurrence, celles relatives aux irradiances solaires globales, diffuses et UVB c'est une étude statistiques qui vise dans un premier temps de suivre l'évolution des différentes composantes du rayonnement solaire puis, dans un deuxième temps, de mettre en évidence les corrélations qui existent entre eux.

L'enregistrement relatif à chaque journée est présenté sous forme d'un tableau de quinze colonnes où chacune d'elle contient la valeur de l'irradiation solaire horaire incidente sur un plan horizontal. Les quinze colonnes sont relatives aux

enregistrements des tranches horaires qui vont de 4 heures jusqu'à 19 heures en temps universel.

3.3.3. Qualité de la base de données

Le choix de l'étude a été fixé sur ces années, en particulier, pour leur bonne qualité d'enregistrement. Les données manquantes, pour défaillance techniques, sont signalées par la note 9999.

- Concernant les données de l'irradiation solaire globale horaire: sur les 16425 données disponibles pour la totalité des années 2001, 2002 et 2003, seulement 75 données sont défectueuses, ce qui équivaut à 45 données pour 10000.
- Pour les données relatives à l'irradiation solaire diffuse horaire: sur les 16425 données disponibles, 203 sont défectueuses. Cela est équivalent à un manque de 1% des données.
- Pour les données relatives aux UVB, 544 données sur 16425 sont à écarter. Cela représente 3 %.

En résumé, et sur la totalité de la base de données relatives aux trois composantes globale, diffuse et UVB, moins de 1.5 % est manquant. Ce qui donne une validité de plus 98.5%. Ce chiffre permet de juger que la qualité de la base de données traitée est excellente.

3.4. La procédure numérique

3.4.1. Traitement de la base de données

Le traitement de la base de données s'est fait par le logiciel origin 6 et Fortran 90. Nous avons établis des programmes numériques en fortran pour chaque étape du traitement.

Chaque ligne du tableau de la base de données représente la succession des 14 heures constituant une journée de mesure. Les étapes du traitement sont les suivantes:

1. Détection des manques

Les mesures manquantes à cause d'un enregistrement erroné sont signalées par 9999.9. Un programme fortran se charge de la lecture de la bande de données et de détecter ces valeurs pour les remplacer par (-) avant de traiter avec Origin 6.

2. Calcul de la moyenne de chaque heure séparément

- a. Sur une journée : le calcul de la moyenne se fera sur une seule ligne.
- b. Sur un mois : le calcul se fera sur une colonne délimitant le mois.
- c. Sur une année : le calcul se fera sur une colonne délimitant l'année.

3. Calcul de la moyenne horaire

Indifféremment sur un mois, ou un an, le calcul de la moyenne se fera d'abord sur les lignes de la période concernée, on obtient une seule colonne. On calcule alors la moyenne horaire sur cette colonne. On obtient la moyenne d'une heure sur la période qu'on veut.

4. Calcul des indices de clartés KT

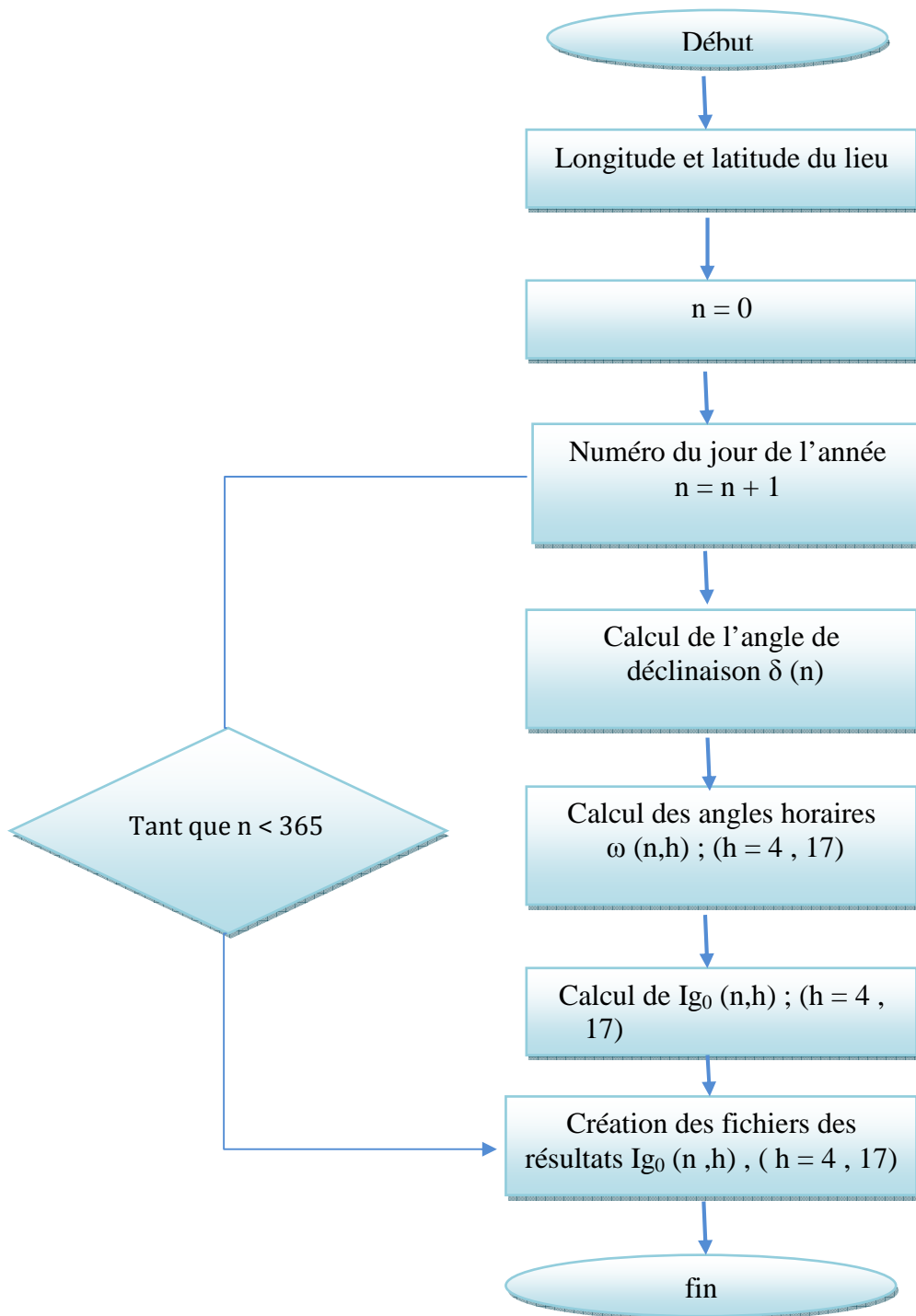
- a. Conversion de la matrice de l'irradiation globale en vecteur pour que les valeurs horaires relatives aux différentes journées se suivent sur la même colonne
- b. Les valeurs 9999.9 seront remplacées par des valeurs d'un ordre très grand supérieur à l'ordre des irradiations extraterrestre.
- c. Le programme numérique reçoit grâce à un compteur les dates des jours de l'année, il calcule l'angle de déclinaison δ relatif à chaque journée, l'angle de coucher et de lever ω_c et ω_L du soleil ainsi que les angles horaires ω relatifs à chaque tranche horaire de chaque journée.

- d. Toutes ces valeurs obtenues sont introduites dans l'équation de calcul de l'irradiation horaire globale hors atmosphère I_{g_0} . Nous obtenons un fichier contenant le vecteur des I_{g_0} pour 5475 tranche horaire de la base de données annuelle.
 - e. Le vecteur I_g est divisé par le vecteur I_{g_0} on obtient le vecteur KT .
 - f. Un test par la lecture numérique des données sélectionnera les valeurs de KT supérieures à 1. Se sont celles obtenues avec les valeurs de mesures erronées. Elles seront remplacées par la valeur 9999.9
 - g. Enfin une conversion du vecteur KT en matrice ou chaque ligne représentera sera constituée par les quinze valeurs horaire de la journée.
5. La même procédure sera suivie dans le programme de calcul de l'irradiation horaire UVB en dehors de l'atmosphère I_{UVB_0} , sauf que la valeur de la constante solaire relative à tous le spectre solaire sera remplacée par la constante solaire relative à la bande UVB.

3.4.2. Organigramme de calcul de la composante globale hors atmosphere

Pour le calcul de l'indice de clarté relatif à l'irradiation horaire global en dehors de l'atmosphère, le calcul de cette dernière a été fait grâce à un programme fortran 90 dont voici l'organigramme. Le même programme a été rectifié pour calculer la composante uvb horaire incidente sur une surface horizontale hors atmosphère, en remplaçant la constante solaire relative à tous le spectre solaire par celle relative à la bande uvb seulement dont la valeur est égale à 19.02 w/m^2 .

Organigramme du programme de calcul de l'irradiation solaire globale horaire I_{g0} , reçue sur une surface horizontale hors atmosphère terrestre



3.4.3. La procédure de corrélation

Après avoir obtenu les graphes représentant les différentes régressions liants les différentes composantes étudiées, nous sommes passés à l'étape de la corrélation.

En effet, L'analyse de régression permet de produire un modèle de relation entre deux variables, d'estimer l'adéquation de ce modèle et de voir graphiquement la correspondance entre les données et le modèle. Elle permet en premier lieu de définir une équation mathématique qui lie deux variables. L'établissement de cette équation fait appel à la notion de **modèle**. Par la suite on vérifie l'aspect statistique du modèle avec les coefficients de corrélation.

on mesure la "force" de l'interaction entre la variable x_i mesurée (irradiation horaire globale I_g) et la variable $y_{i,c}$ calculée (Irradiation horaire UVB I_{UVB}) au travers du calcul du coefficient de corrélation de Pearson R dont la valeur donne des informations sur le lien entre les deux variables.

Si R est proche de +1, cela signifie que les deux variables sont très fortement corrélées et que si x_i augmente, $y_{i,c}$ augmente.

Si R 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 $y_{i,c}$. Si R est proche de -1, cela signifie que les deux variables sont très fortement corrélées et que si x_i augmente, $y_{i,c}$ diminue.

CHAPITRE 4

RESULTATS ET DISCUSSIONS

4.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différents résultats obtenus par l'étude statistiques des données relatives aux différentes composantes du rayonnement solaire.

4.2. Le rayonnement solaire global

4.2.1. Des journées types

A titre d'exemple, nous présentons, dans la figure 4.1 l'évolution horaire de l'irradiation solaire globale incidente sur un plan horizontal au cours de quatre journées extraites de quatre saisons des différentes trois années 2001, 2002 et 2003. Les journées choisies sont des journées types recommandées pour chaque mois [11].

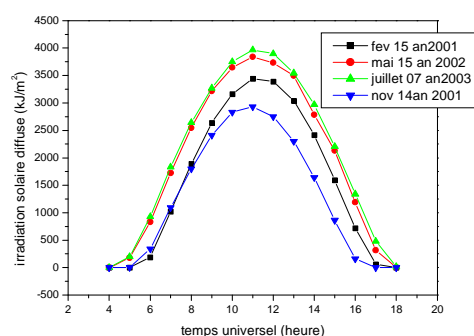


Figure 4.1: Evolution de l'irradiation solaire globale horaire incidente sur un plan horizontal pour le 15 février 2001, 15 mai 2002, 17 juillet 2003 et 14 novembre 2001.

Il est à noter que pour le graphe ci-dessus, l'allure de l'évolution de l'irradiation solaire au cours de la journée est sinusoïdale. Elle évolue entre

deux valeurs minimales nulles, correspondant au moment du coucher et du lever du soleil; le minimum étant zéro lorsque le soleil se couche en passant par des maxima différents propres à chaque journée, révélant des intensités d'irradiations différentes mais aussi des durées d'insolation différentes. Les valeurs des maximums associés à chaque journée appuient cela: 2930.7 KJ/m² pour la journée du 14 novembre 2001. La valeur de 3389.3 KJ/m² pour celle du 16 février 2001. La valeur de 3839.9 KJ/m² pour la journée du 17 juillet 2003 et enfin la valeur de 3839.9 KJ/m² pour la journée du 15 mai 2002.

La figure 4.2. représente l'évolution de l'irradiation solaire horaire pour plusieurs journées consécutives.

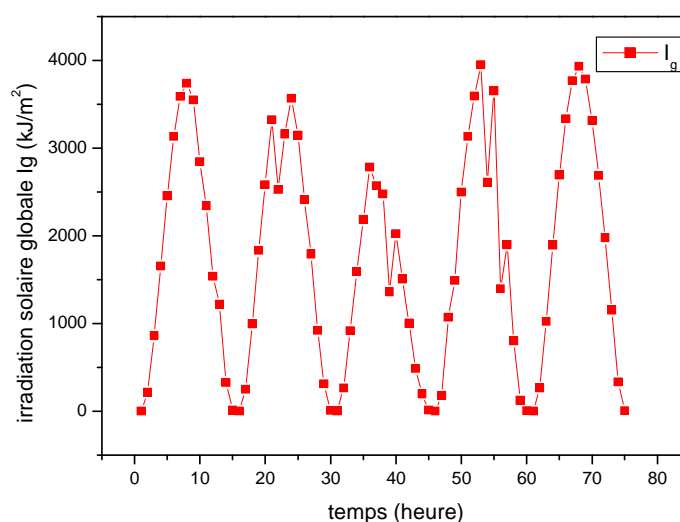


Figure 4.2 : Evolution de l'irradiation solaire globale horaire du 1^{er} au 5 juin 2001.

La figure 4.2. révèle l'aspect quasi-périodique de l'irradiation solaire globale horaire lorsqu'elle est représentée pour plusieurs journées consécutives. On voit que l'assemblage des graphes relatifs aux journées allant du 1^{er} au 5 juin 2001 confirme l'allure en cloche de l'évolution journalière de cette variable. Les sommets sont atteints aux environs du midi solaire et les minimums nuls aux moments du coucher et avant le lever. Cependant, ces maximums différents avec une croissance irrégulière d'une journée à une autre, indiquant des amplitudes de l'irradiation solaire globale horaires différentes. Non seulement les ordres de grandeurs sont différents (moins de 3000 kJ/m²

comme maximum pour la 3^{ème} journée et près de 4000 kJ/m² pour la 4^{ème} et la 5^{ème} journée), mais de plus, les courbes de chaque journée présentent des fluctuations qui les rendent non lisses. Ces battements évoquent une irrégularité du taux de l'irradiation solaire extraterrestre qui arrive à traverser l'atmosphère terrestre et atteint le sol sous forme de rayonnement global. Le paramètre dominant qui régule ce taux est l'état du ciel. L'irrégularité des courbes relatives chacune à une journée distincte, la non égalité des maxima laisse supposer des états de ciel non clairs. Car si le ciel était clair, le facteur prédominant dans l'évolution de l'irradiation horaire au cours d'une journée serait l'angle du zénith, qui évolue sinusoïdalement entre le lever et le coucher du soleil donnant la même allure de cloche parfaite à l'irradiation

4.1.2. Evolution de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire globale horaire

Nous allons exposer, dans ce qui suit, l'évolution de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire globale horaire au cours de chacune des trois années 2001, 2002 et 2003, séparément.

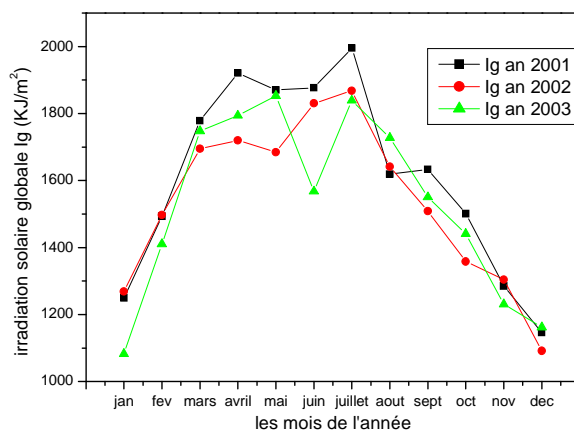


Figure 4.3 : Evolution annuelle de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire globale horaire pour les années 2001, 2002 et 2003.

La figure 4.3. révèle que les minimums de la valeur moyenne mensuelle de l'irradiation solaire globale horaire pour l'année 2001 sont enregistrées aux mois de janvier et de décembre avec des valeurs respectives de 1249.57 kJ/m²

et 1146.33 kJ/m^2 . Ces valeurs augmentent graduellement dans le sens de l'échauffement des saisons mais accusent une diminution relative aux environs du mois de juin. En effet mars enregistre une moyenne de 1778.62 kJ/m^2 , puis une augmentation jusqu'à 1920.96 kJ/m^2 au mois d'avril, mais baisse au mois de juin et de août avec respectivement une moyenne de 1876.7 kJ/m^2 et 1618.67 kJ/m^2 .

L'évolution de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire globale horaire au cours de l'année 2002 affiche la même tendance que celle notée au cours de l'année qui la précède. Les minimums de ces moyennes sont enregistrés pendant l'hiver en décembre, avec une valeur de 1091.66 kJ/m^2 . Les valeurs augmentent dans le sens de l'échauffement des saisons, le maximum de la moyenne est enregistré en été, au mois de juillet avec la valeur de 1868.1 kJ/m^2 .

Pour l'année 2003, le minimum de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire globale horaire est enregistré en janvier 1082.97 kJ/m^2 . Le maximum est enregistré au mois de mai et est égal à 1852.76 kJ/m^2 .

En établissant la comparaison entre les trois années, on relève que l'année 2001 présente les moyennes mensuelles de l'irradiation solaire globale horaire les plus importantes (figure 15) et ce, sur presque tous les mois de l'année. C'est la seule année parmi les deux autres qui atteint le maximum de 1995.36 kJ/m^2 . Les années 2002 et 2003 permutent dans la supériorité des moyennes enregistrées d'une période à une autre de l'année avec une nette supériorité de 2002 aux mois de janvier, février et jusqu'à mi mars et également en juin, juillet et novembre. Pour les autres mois de l'année, 2003 enregistre des moyennes plus importantes que 2002.

Dans le tableau 4.1, on présente les valeurs moyennes mensuelles de l'irradiation solaire globale horaire et les valeurs maximales de l'irradiation solaire globale horaires pour l'année 2001, ainsi que la date d'enregistrement de ces maximums.

Tableau 4.1. Valeurs des moyennes mensuelles et valeurs maximales de l'irradiation solaire globale horaire pour l'année 2001.

Mois	Moyenne mensuelle (kJ/m ²)	Maxima mensuel		
		Valeur (kJ/m ²)	Jour du mois	Heure du jour (TU)
Janvier	1249.57	3093.23	29	11h12h
Février	1493.32	3669.66	28	//
Mars	1778.62	3963.95	30	//
Avril	1920.96	4126.60	25	//
Mai	1870.40	4059.90	12	//
Juin	1876.70	4027.10	30	//
Juillet	1995.36	4067.84	18	//
Août	1618.67	4066.00	20	//
Septembre	1633.13	3851.23	07	//
Octobre	1500.90	3595.76	04	//
Novembre	1285.20	3184.70	01	//
Décembre	1146.33	2981.80	01	//

L'analyse du tableau 4.1. permet de noter que, concernant les valeurs maximales des irradiances solaires globales horaires, la plage de variation s'étend sur l'intervalle [2900, 4200 kJ/m²]. La plus importante de ces valeurs est enregistrée en avril et est égale à 4126.6 kJ/m². Toutes les valeurs maximales, pour l'année 2001, sont enregistrées dans la tranche horaire allant entre 11h et 12h en temps universel. Cette tranche de temps coïncide avec le midi solaire.

Tableau 4.2 : Valeurs moyennes mensuelles et valeurs maximales de l'irradiation solaire globale horaire pour l'année 2002.

Mois	Moyenne mensuelle (kJ/m ²)	Maxima mensuel		
		Valeur (kJ/m ²)	Jour du mois	Heure du jour (TU)
Janvier	1268.53	3263.6	30	11h12h
Février	1497.21	3629.1	28	//
Mars	1694.75	3945.4	24	//
Avril	1719.77	4190.7	15	//
Mai	1684.51	3822.6	12	12h13h
Juin	1830.37	3994.0	03	11h12
Juillet	1868.10	4021.2	10	12h13h
Août	1641.22	3985	23	11h12h
Septembre	1509.04	3776.2	06	//
Octobre	1358.02	3592.2	02	//
Novembre	1304.03	3188.5	04	//
Décembre	1091.66	2842.5	26	//

Le tableau 4.2 présente les valeurs moyennes mensuelles et les valeurs maximales des irradiances solaires globales horaires pour l'année 2002, ainsi que la date de leur enregistrement. La plus importante valeur maximale enregistré durant l'année est accusée au mois d'avril et est égale à 4190.7 kJ/m². Les valeurs maximales des irradiances solaire globales horaires sont enregistrées entre 11h12h ou 12h13h en temps universel, toujours aux environs du midi solaire.

Tableau 4.3: Valeurs moyennes mensuelles et valeurs maximales de l'irradiation solaire globale horaire pour l'année 2003.

Mois	Moyenne mensuelle (kJ/m ²)	Maxima mensuel		
		Valeur (kJ/m ²)	Jour du mois	Heure du jour (TU)
Janvier	1082.97	3227.3	25	11h12h
Février	1410.24	3662.3	28	//
Mars	1747.66	4022.1	30	//
Avril	1793.93	4193.7	20	//
Mai	1852.76	4311.9	03	//
Juin	1567.59	3988.8	13	//
Juillet	1838.85	3975.0	18	//
Août	1728.00	4090.7	12	12h13h
Septembre	1550.30	3948.6	01	11h12h
Octobre	1441.29	3552.3	03	//
Novembre	1230.72	3167.5	10	//
Décembre	1161.71	2921.6	12	//

Les valeurs des moyennes mensuelles et les valeurs maximales des irradiances solaires globales horaires, pour les mois de l'année 2003, sont représentées au tableau 6. Il relève un maximum de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire globale horaire au mois de mai égal à 1852.76 kJ/m². Le maximum absolu est enregistré au même mois avec une valeur égale à 4311.9 kJ/m².

A travers l'analyse de l'évolution de la moyenne mensuelle journalière au cours des trois années d'étude, nous remarquons que l'irradiation solaire globale augmente durant les saisons chaudes par rapport aux saisons froides. Cependant, au cours de l'été, aux alentours du mois de juin, une chute est à noter. Ceci est en rapport avec le climat spécifique de Tamanrasset qui se distingue par un été particulièrement perturbé par un temps pluvieux, un ciel nuageux et la fréquence importante des tempêtes de sable. Cela atténue la

clarté du ciel ; par conséquence, le rayonnement solaire s'en retrouve atténué à son tour.

4.2.3. Evolution de la moyenne mensuelle pour chaque tranche horaire de la journée

Pour plonger d'avantage dans le détail de l'évolution de l'irradiation solaire globale, on procèdera, à présent, à l'analyse de l'évolution de la moyenne mensuelle de l'irradiation globale pour chaque tranche horaire de la journée séparément, donnant un profil journalier moyen pour chaque mois des trois années d'étude. Dans la figure 4.4., on peut suivre l'évolution de cette moyenne pour l'année 2001.

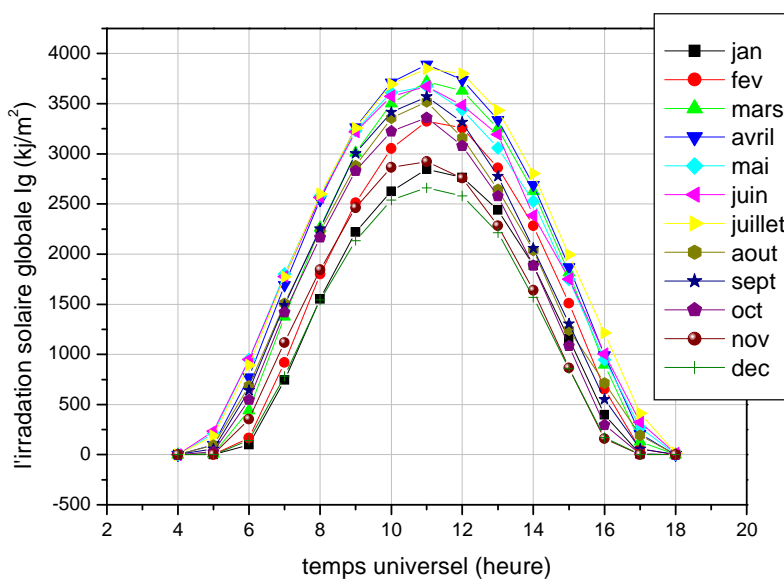


Figure 4.4. : Evolution de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire globale pour chaque tranche horaire de la journée, pour l'année 2001.

Le profil journalier moyen pour chaque mois montre et ce, conformément à l'évolution de l'irradiation solaire globale présentée par les figures 4.1. et 4.2., que le maximum est toujours aux environs du midi solaire, situé entre les minimums nuls du coucher et avant le lever du soleil. On note aussi, clairement, que les irradiances les plus importantes sont enregistrées dès le

début du printemps avec un maximum absolu enregistré au mois d'avril et une irradiation solaire globale moyenne maximale atteignant la valeur de 3890.8 kJ/m². Les mois qui suivent et qui précèdent le mois de septembre, bien qu'accusant des valeurs toujours importantes de l'irradiation solaire globale par rapport au reste de l'année, affichent des mesures inférieures à celles enregistrées au mois d'avril. En effet, on enregistre une irradiation solaire globale maximale égale à 3671.11 kJ/m² pour le mois de mai, 3671.28 kJ/m² pour le mois de juin, 3849.57 kJ/m² pour juillet, 3519.84 kJ/m² pour août et enfin 3569.75 kJ/m² pour le mois de septembre. La supériorité du mois d'avril même par rapport aux mois de la saison estivale est due à la particularité du climat de Tamanrasset qui se distingue, comme sus cité, par un été pluvieux avec des tempêtes de sable. L'état du ciel très peu clair, en cette saison, atténue considérablement l'irradiation solaire atteignant le sol.

La figure 4.5. représente la moyenne mensuelle de chaque de la valeur de l'irradiation solaire globale pour chaque tranche horaire de la journée et ce, pour l'année 2002.

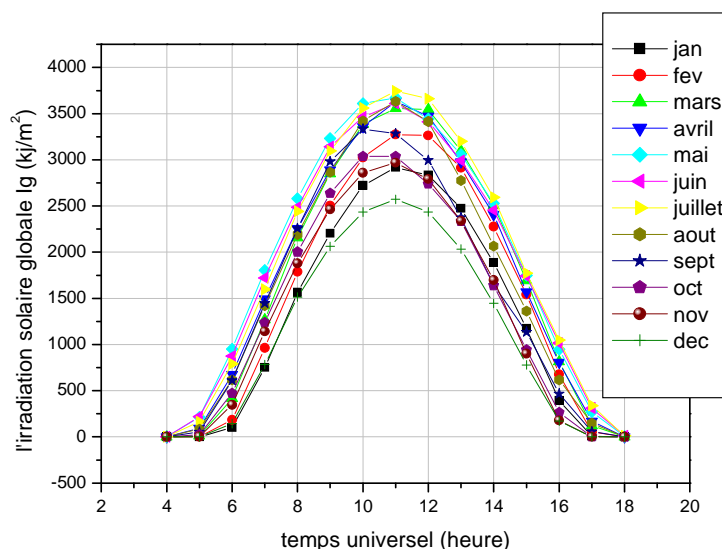


Figure 4.5. : Evolution de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire globale pour chaque tranche horaire de la journée , pour l'année 2002.

A quelques différences près, l'année 2002 affiche la même tendance de l'évolution de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire globale horaire

calculée sur chaque tranche horaire de la journée, séparément, que la tendance de l'année 2001. Bien que le maximum de cette moyenne ait été enregistré au mois de juillet, les mois d'avril et de mai, qui sont des mois printaniers, révèlent des valeurs plus importantes que les mois de juillet et de août de la saison estivale. Les mêmes raisons relatives à la spécificité du climat local, évoquées plus haut sont à l'origine de cette particularité. En effet, on relève pour avril et mai, respectivement, les valeurs de 3632.13 kJ/m^2 et 3671.11 kJ/m^2 . Le maximum enregistré revient au mois de juillet avec une valeur de 3743.91 kJ/m^2 . Les mois de juin et de août accusent des valeurs égales à 3610.68 kJ/m^2 et 3631 kJ/m^2 , respectivement; ce qui demeure moins important que la valeur enregistrée au mois d'avril.

La figure 4.6. représente l'évolution de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire globale horaire pour chaque tranche horaire de la journée, pour l'année 2003.

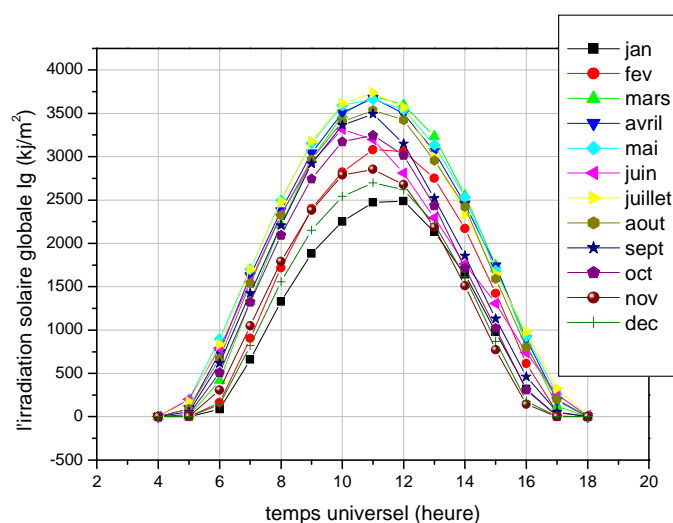


Figure 4.6. : Evolution de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire globale pour chaque tranche horaire de la journée , pour l'année 2003.

L'évolution de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire globale horaire, calculée sur chaque tranche horaire de la journée, au cours de l'année 2003 révèle les mêmes tendances que les années 2001 et 2002. Bien que le maximum absolu soit enregistré au mois de juillet avec une valeur de 3743.91

kJ/m^2 , les valeurs enregistrées au cours du printemps sont plus importantes que celles relatives aux autres mois de l'été; avec une valeur de 3072.78 kJ/m^2 pour le mois de mars, 3675.83 kJ/m^2 pour le mois d'avril et 3660.46 kJ/m^2 pour le mois de mai contre 3199.16 kJ/m^2 pour le mois de juin et 3533.84 kJ/m^2 pour le mois d'août.

4.1.4. Evolution de la moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale pour chaque tranche horaire de la journée

La figure 4.7. représente l'évolution de la moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale horaire, calculée séparément pour chaque tranche horaire de la journée, au cours de l'année 2001.

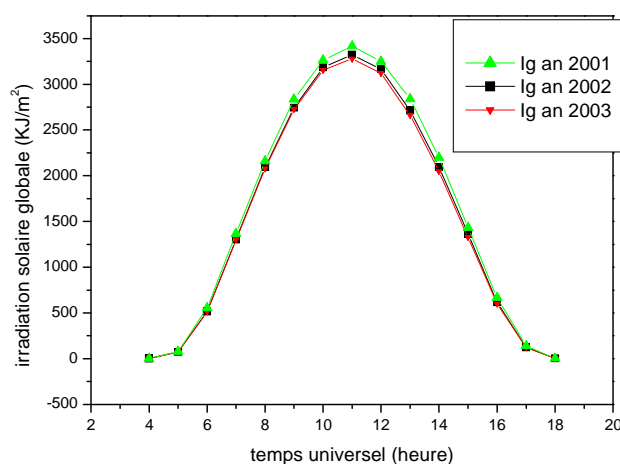


Figure 4.7. : Evolution de la moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale pour chaque tranche horaire de la journée, au cours des années 2001, 2002 et 2003.

On voit bien que l'évolution de cette courbe présente l'allure d'une cloche à l'instar des journées prises en exemple en début du chapitre (figure 4.1). De plus, les trois courbes s'épousent et n'affichent de différences sensibles qu'aux environs du midi solaire avec la valeur maximale de 3417.26 kJ/m^2 pour l'année 2001, celle de 3324.77 kJ/m^2 pour l'année 2002 et celle de 3279.69 kJ/m^2 . Les minimums sont nuls et indifféremment enregistrés autour du moment coucher et du lever du soleil. Cela permet de conclure que

l'évolution la moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale est assez stable, d'une année à une autre, durant les trois années 2001, 2002, 2003.

4.3. Le rayonnement solaire diffus

4.3.1. Des journées types

Nous allons passer, à présent, à l'analyse des tendances de l'évolution de la composante diffuse de l'irradiation solaire. La figure 4.8 présente les valeurs enregistrées au cours des journées du 15 février et 14 novembre 2001, du 15 mai 2002 et du 17 juillet 2003, en guise d'exemple de l'évolution du rayonnement solaire diffus au cours d'une journée.

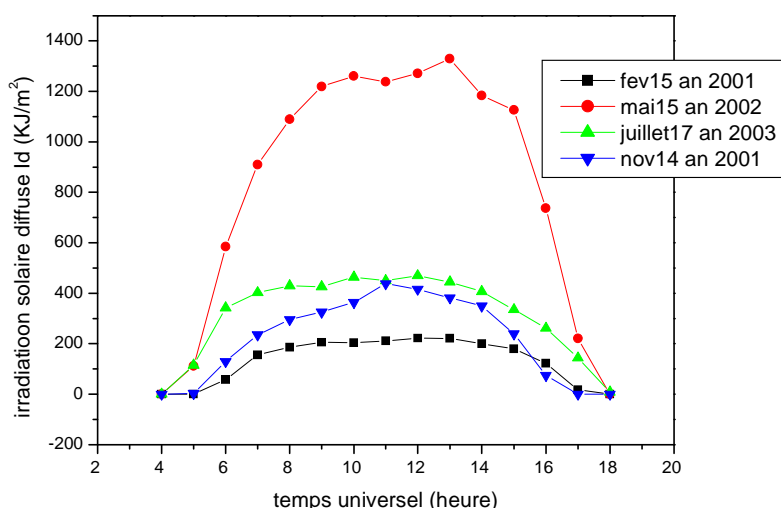


Figure 4.8: Evolution horaire de l'irradiation solaire diffuse pour les journées du 15 février et 14 novembre 2001, 15 mai 2002 et 17 juillet 2003.

La figure 4.8 révèle la tendance de l'évolution de la composante diffuse de l'irradiation solaire incidente pour les quatre journées du 15 février et 14 novembre 2001, 15 mai 2002 et 17 juillet 2003. Ce sont quatre journées typiques pour chacun des quatre mois. Les valeurs passent des minimums nuls aux moments du coucher et avant le lever du soleil vers des valeurs maximales aux environs du midi solaire; en l'occurrence, 222 KJ/m² pour le 15 février 2001, 415.9 KJ/m² pour le 14 novembre 2001, 469.7 KJ/m² pour le 17

juillet 2003 et 1271.1 KJ/m^2 pour la journée du 15 mai 2003. Il est à noter la supériorité des valeurs enregistrées au cours de la journée du 15 mai 2002, indiquant un ciel particulièrement peu clair ce qui a fait augmenter la composante diffuse de l'irradiation solaire globale incidente, sachant que cette dernière est constituée de la composante directe et de la composante diffuse. L'augmentation de l'une des deux est, toujours, au détriment de l'autre. Plus le ciel est clair, plus la composante directe est avantagé. Si le ciel est pollué ou nuageux, un surplus de l'irradiation solaire directe subit le phénomène de diffusion.

Si on compare la figure 4.8 à la figure 4.1. , on peut noter que l'ordre de supériorité des journées pour les irradiances globales horaire diffère de celui des irradiances diffuses horaires. Sur la figure 4.1. , la journée de juillet affiche les plus importantes valeurs des irradiances solaires globales horaires, suivie, de près, par la journée du 15 mai puis de celle 15 février et enfin celle du 14 novembre. Pour les irradiances diffuses horaires, l'ordre est tout autre. D'abord, la journée du 15 mai affiche les plus importantes valeurs, suivie, mais de loin, par la journée du 07 juillet puis le 14 novembre et enfin celle du 15 février. On peut en déduire que le rayonnement solaire diffus n'est pas seulement fonction croissante du rayonnement global mais qu'il est aussi influencé par d'autres paramètres probablement, en premier lieu, par la clarté du ciel. En effet, plus les journées sont claires moins la proportion du diffus est importante.

4.3.2. Evolution de la moyenne mensuelle des irradiations solaires diffuses horaires

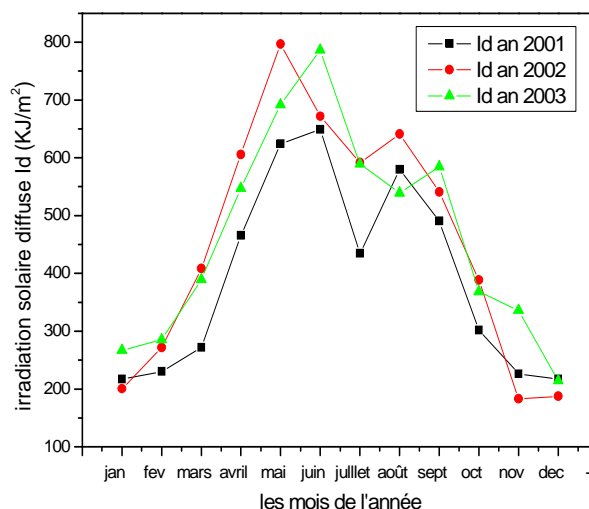


Figure 4.9: Evolution de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire diffuse horaire pour l'année 2001, 2002, 2003.

La figure 4.9 représente l'évolution de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire diffuse horaire pour les années 2001, 2002 et 2003. Elle permet de noter que pour les trois années, la tendance est à la hausse pendant les mois du printemps et de l'été de l'année. C'est dû au fait que l'irradiation solaire globale est plus importante durant cette période et comme la composante diffuse est une fraction – toute fois non constante- de cette composante globale, elle évolue également vers la hausse. Mais durant cette même période qui s'étale entre mars et septembre, des fluctuations assez irrégulières s'affichent reflétant une différence de l'état du ciel et du niveau de pollution de chaque mois au sein de la même saison.

Si on reprend la figure 4.3, qui donne l'évolution de la moyenne mensuelle des irradiations solaires globales horaires pour les années 2001, 2002, 2003, on constate que par ordre croissant vient l'année 2001, ensuite l'année 2003 et enfin l'année 2002 qui, globalement, affiche les plus petites moyennes pour la plupart des mois de l'année. Par contre, concernant la fraction diffuse du rayonnement solaire dont l'évolution des moyennes

mensuelles des irradiances solaires horaires est montrée sur la figure 4.10, l'ordre de grandeur est tout autre. L'année 2001, et paradoxalement à la figure 4.3, affiche les valeurs les moins importantes des trois années. L'année 2002, et globalement pour presque tous les mois de l'année, semble afficher les valeurs les plus importantes. L'année 2003 occupe une position intermédiaire, sauf pour les mois de juillet et de septembre. Encore une fois, cette comparaison entre les deux figures montre que la fraction diffuse n'est pas totalement fonction de l'irradiation globale. Elle est surtout liée à l'état du ciel, et pour preuve les ordres de croissances totalement paradoxaux entre la figure 4.3 et la figure 4.9.

Le tableau 4.4 résume les valeurs moyennes mensuelles des irradiances solaires diffuses horaires pour toute l'année 2001 ainsi que les valeurs maximales de l'irradiation diffuse horaire enregistrées au cours de chaque mois et les heures d'enregistrement.

Tableau 4.4: Valeurs moyennes mensuelles et valeurs maximales de l'irradiation diffuse horaire pour l'année 2001.

Mois	Moyenne mensuelle (kJ/m ²)	Maxima mensuel		
		Valeur (kJ/m ²)	Jour du mois	Heure du jour (TU)
Janvier	216.95	1336.90	11	10h11h
Février	230.13	1839.32	26	11h12h
Mars	271.82	1703.42	31	12h13h
Avril	465.78	1877.60	09	//
Mai	624.50	2328.33	08	11h12h
Juin	648.92	1994.19	03	10h11h
Juillet	434.35	1968.01	13	12h13h
Août	579.99	2046.56	05	12h13h
Septembre	490.65	2062.18	20	10h11h
Octobre	301.82	1562.40	06	12h13h
Novembre	225.89	1554.66	19	//
Décembre	216.90	1336.91	11	10h11h

L'analyse du tableau 4.4. permet de noter que les valeurs moyennes mensuelles de l'irradiation solaire diffuse horaire pour l'année 2001, varie dans la plage de [200, 650 kJ/m²]. Elle atteint la valeur de 648.9 kJ/m² pour le mois de juin. Pour les valeurs horaires maximales, la plage de variation s'étend sur l'intervalle [1300, 2400 kJ/m²], la valeur horaire maximale enregistrée est égale à 2328.3 kJ/m², au mois de mai.

Le tableau 4.5 résume les valeurs moyennes mensuelles de l'irradiation solaire diffuse horaire au cours de l'année 2002 ainsi que les valeurs horaires maximales enregistrées en chaque mois.

Tableau 4.5: Valeurs des moyennes mensuelles et valeurs maximales de l'irradiation solaire diffuse horaire pour l'année 2002.

Mois	Moyenne mensuelle (kJ/m ²)	Maxima mensuel		
		Valeur (kJ/m ²)	Jour du mois	Heure du jour (TU)
Janvier	200.20	1401.09	19	11h12h
Février	271.83	1727.09	20	11h12h
Mars	408.42	1950.19	07	10h11h
Avril	605.75	1916.40	07	//
Mai	797.04	2265.69	30	11h12h
Juin	671.71	2091.1	05	10h11h
Juillet	591.88	2163.89	28	12h13h
Août	640.94	2199.30	15	12h13h
Septembre	540.79	2031.30	12	12h13h
Octobre	388.59	2059.60	09	10h11h
Novembre	182.76	1181.19	30	11h12h
Décembre	187.23	1369.80	10	11h12h

Le tableau 4.5 révèle les valeurs des moyennes mensuelles de l'irradiation solaire diffuse horaire pour l'année 2002. Le maximum de cette moyenne est égal à 797.04 kJ/m², enregistré pour le mois de mai. Les minimums de cette moyenne sont relatifs aux mois de novembre et de

décembre avec, respectivement, 182.76 kJ/m² et 187.23 kJ/m². La valeur horaire maximale enregistrée au cours de l'année est relevée au mois de mai avec une valeur de 2265.69 kJ/m².

Le tableau 4.6. présente les valeurs numériques des moyennes mensuelles de l'irradiation solaire diffuse horaire ainsi que les maximums de cette irradiation enregistrés durant chaque mois.

Tableau 4.6.: Valeurs des moyennes mensuelles et maximales de l'irradiation solaire diffuse horaire pour l'année 2003.

Mois	Moyenne mensuelle (kJ/m ²)	Maxima mensuel		
		Valeur (kJ/m ²)	Jour du mois	Heure du jour (TU)
Janvier	266.79	1469.09	19	11h12h
Février	285.13	1842.69	25	//
Mars	389.55	2002.40	22	//
Avril	546.99	2122.19	09	//
Mai	691.80	2258.60	26	//
Juin	786.58	2307.50	18	//
Juillet	589.54	1800.55	24	13h14h
Août	539.31	2102.50	22	11h12h
Septembre	584.61	2065.89	16	//
Octobre	368.45	1688.54	18	09h10h
Novembre	336.10	1335.50	12	12h13h
Décembre	214.44	1488.90	01	12h13h

Les moyennes mensuelles de l'irradiation solaire diffuse horaire de l'année 2003 présentent la même tendance que les deux autres années. La saison froide enregistre la plus faible moyenne avec 214.4 kJ/m² pour le mois de décembre et le maximum de cette moyenne est relatif au mois de juin avec 786.5 kJ/m². Quand aux valeurs absolues de la fraction diffuse horaire mesurées en l'an 2003, le maximum enregistré est égal à 2307.5 kJ/m², au mois de juin.

Concernant les trois années, et à travers les tableaux 4.4, 4.5, 4.6 on note que les dates des journées où les valeurs maximales des irradiations solaires diffuses sont enregistrées ne coïncident pas avec les journées où les irradiations globales maximales sont enregistrées. Cela confirme le fait que le rayonnement solaire diffus est fonction surtout de l'état du ciel. On voit aussi dans les trois tableaux, que les heures où ces valeurs maximales sont enregistrées varient de beaucoup autour du midi solaire, jusqu'à 9h-10h pour la journée du 18 novembre. Alors que le maximum de l'irradiation globale est enregistré aux environs du midi solaire où l'angle du zénith est au maximum. Encore une fois, le diffus dépend plus de la clarté du ciel que des autres paramètres.

4.3.3. Evolution de la moyenne mensuelle pour chaque tranche horaire de la journée

Dans ce qui suit, on présentera les graphes qui donnent les moyennes mensuelles pour chaque tranche horaire de la journée de l'irradiation solaire diffuse horaire, pour chaque année séparément.

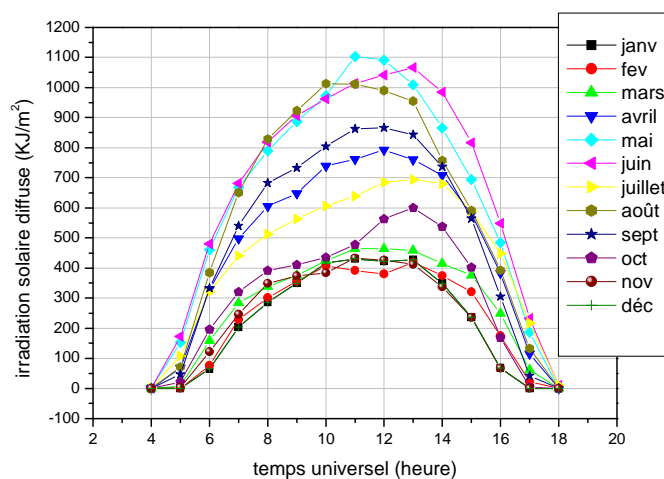


Figure 4.10: Evolution de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire diffuse pour chaque tranche horaire, pour l'année 2001.

La figure 4.10 montre que les mois de mai, juin et août enregistrent les plus importantes moyennes mensuelles de l'irradiation solaire diffuse, calculées pour chaque tranche horaire séparément,. Le mois de mai accuse la plus grande de ces valeurs avec 1102.82 KJ/m^2 ; suivi du mois de juin avec 1041.34 kJ/m^2 . À part les trois mois sus cités, pour le reste de l'année, les moyennes évoluent dans une plage de valeurs entre 400 et 800Kj/m^2 .

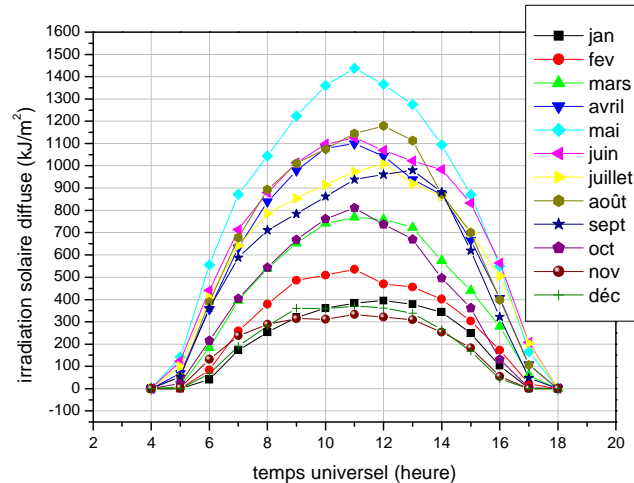


Figure 4.11 Evolution de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire diffuse pour chaque tranche horaire, pour l'année 2002.

L'année 2002 présente les mêmes tendances que l'année 2001, avec un maximum de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire diffuse horaire, calculée pour chaque tranche horaire de la journée, avec la valeur de 1438.19 KJ/m^2 au mois de mai suivi du mois de juin avec la valeur de 1125.82 KJ/m^2 et, en troisième position, le mois d'août avec la valeur de 1179.55 KJ/m^2 . Le reste de l'année, les valeurs évoluent entre 400 et 850 KJ/m^2 .

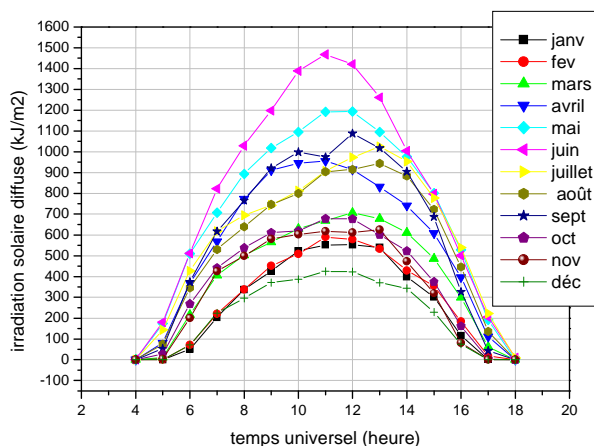


Figure 4.12: Evolution de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire diffuse pour chaque tranche horaire, pour l'année 2003.

La figure 4.12 représente l'évolution de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire diffuse horaire calculée, séparément, pour chaque tranche horaire de la journée, pour l'année 2003. Le mois de juin prend la tête de la file avec 1467.72 KJ/m^2 suivi du mois de mai avec la valeur de 1193.12 KJ/m^2 et enfin le mois de juillet avec la valeur de 1024.79 KJ/m^2 . Il est à noter, à travers la forme en cloche des courbes, que toutes les valeurs maximales sont enregistrées aux environs du midi solaire.

Pour les trois graphes précédents, il est à noter que les valeurs les plus importantes sont enregistrées durant les mois s'étalant entre mars et septembre. Comme expliqué un peu plus haut, la fraction diffuse augmente en partie avec l'irradiation solaire globale qui, à son tour, augmente précisément durant ces mêmes mois. La fraction diffuse augmente aussi lorsque le ciel n'est pas clair à cause des nuages qui accompagnent le mauvais temps ou à cause des poussières et aérosols qui polluent l'air pendant les tempêtes de sable. Ces deux phénomènes sont particulièrement fréquents durant les mois de l'été à Tamanrasset dont le climat est assez perturbé durant cette saison.

4.3.4. Evolution de la moyenne annuelle de l'irradiation solaire diffuse calculée séparément pour chaque tranche horaire de la journée

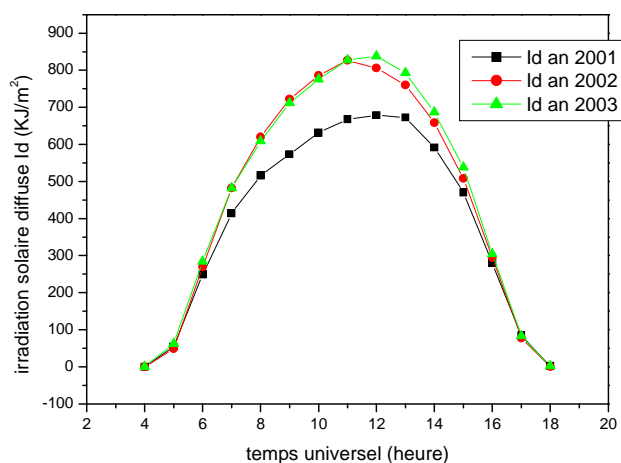


Figure 4.13: Evolution de la moyenne annuelle de l'irradiation solaire diffuse, calculée pour chaque tranche horaire de la journée séparément, pour l'année 2001, 2002, 2003.

La figure 4.13 indique les valeurs de la moyenne annuelle de l'irradiation horaire de la composante solaire diffuse arrivant au sol. A l'instar de l'irradiation globale, la courbe affiche une allure de cloche avec des minimums nuls aux moments du coucher et avant le lever du soleil. Pour l'année 2001, un maximum moyen égal à 678.58 KJ/m^2 est atteint aux environs du midi solaire. Pour l'année suivante et aux mêmes environs temporels, une valeurs moyenne maximale de 826.80 KJ/m^2 . Enfin et toujours aux environs du midi solaire, l'année 2003 présente la valeur moyenne maximale de 837.66 KJ/m^2 . Notons bien que l'ordre de grandeur des valeurs pour l'année 2002 et 2003 est le même au point où les deux courbes coïncident sur la quasi-totalité du profil journalier. Pour l'année 2001, la courbe se détache des deux autres avec des valeurs plus petites ne dépassant pas les 700 kJ/m^2 . Cela évoque que la qualité du ciel durant cette année 2001, et moyennement raisonné, était moins claire que durant les deux autres années.

4.4. L'irradiation solaire UVB

Dans cette partie, nous allons à présent exposer les résultats de l'étude des données relatives à la composante UVB de l'irradiation solaire arrivant au sol au niveau de la station de mesure de Tamanrasset.

4.4.1. Des journées types

A l'instar des autres paramètres de l'irradiation solaire, nous avons choisi quatre journées typiques de quatre mois appartenant chacun à une saison différente, éparpillés sur les trois années d'étude de l'irradiation solaire UVB.

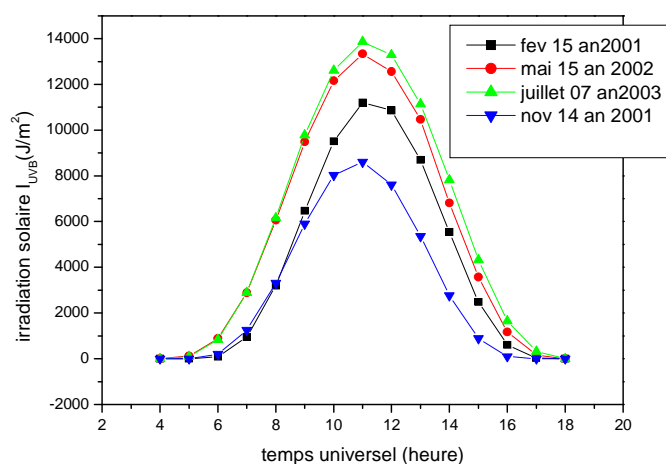


Figure 4.14: Evolution horaire de l'irradiation solaire UVB pour les journées du 15 février et 14 novembre 2001, 15 mai 2002 et 17 juillet 2003.

A travers la figure 4.14, on constate qu'à l'image de l'évolution de l'irradiation solaire globale, la fraction spectrale UVB présente l'allure d'une cloche qui va du minimum nul entre le lever et le coucher du soleil. Le maximum est atteint aux environs du midi solaire, mais il atteint à chaque fois une valeur distincte selon le mois concerné. Les quatre journées en question sont celles considérées comme journées types comme le suggèrent Duffie et Beckman. Le plus grand maximum est enregistré durant la journée du 17 juillet 2003 et est égal à 13870 J/m^2 , suivi par le 15 mai 2002 qui affiche la valeur maximale de

13333 J/m². La troisième position est celle de février 2001 dont le maximum est égal à 11197 J/m². Enfin, le 14 novembre 2001 dont le maximum ne dépasse pas la valeur de 8609 J/m².

Si on reprend les figures 4.1, 4.8 et 4.14, pour comparer leurs évolutions, il en ressort ce qui suit:

- La figure 4.1 et la figure 4.8 ne présentent pas de similitudes dans l'ordre de croissance des mesures relatives aux différentes journées (vu au paragraphe 4. 2.1).
- La figure 4.1 et la figure 4.14, par contre, présente le même ordre de croissance pour les 4 journées types. D'abord la journée du 07 juillet avec les plus grandes valeurs que se soit pour les irradiances solaires globales ou UVB, ensuite suivie, de très près dans les deux cas de figures, par celle du 15 mai. La journée du 15 février en troisième position avec un écart un peu plus important entre cette journée et celle du 15 mai que celui qui existe entre cette dernière et le 07 juillet. Enfin, vient la journée du 14 novembre en quatrième position. Dans les deux figures 4.1 et 4.14, le maximum de chaque journée est identiquement atteint aux environs du midi solaire avec l'allure déjà vue de la cloche. Cependant, le rayonnement solaire diffus semble obéir à des facteurs plus ou moins indépendants de la composante globale.

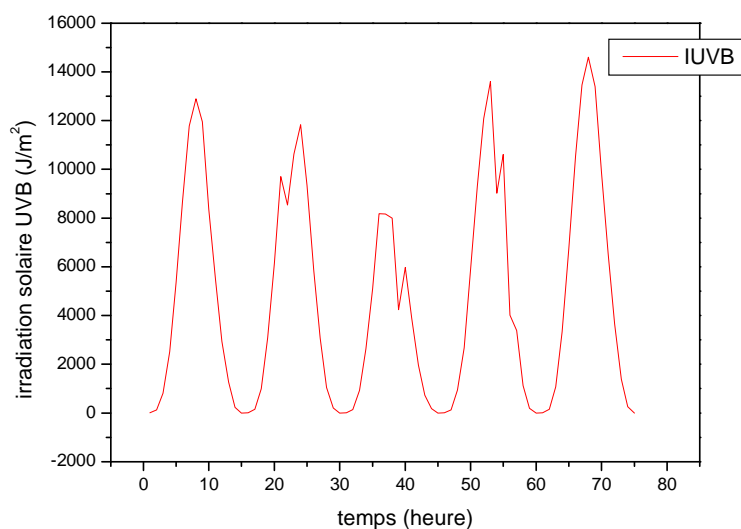


Figure 4.15: Evolution horaire de l'irradiation solaire UVB du 1^{er} au 5 juin 2001.

La figure 4.15 représente l'évolution horaire de l'irradiation solaire UVB pour les journées du 1^{er} au 5 juin 2001. Chaque cloche représente une journée. Même si l'ampleur de chaque journée diffère de celle d'une autre, on voit que l'évolution sur plusieurs journées consécutives possède une allure sinusoïdale.

Si on reprend la figure 4.2 qui concerne les irradiances solaires globales horaires pour les mêmes journées que celles de la figure 4.15, on est frappé par l'évolution identique des deux courbes. Les journées présentent les mêmes allures, les battements coïncident parfaitement dans le temps et dans l'ampleur. Encore une fois, on suppose une relation très forte liant le rayonnement solaire global et le rayonnement solaire en UVB.

4.4.2. La moyenne journalière horaire

Pour cerner d'avantage l'évolution de la composante spectrale UVB au cours de la période d'étude, nous allons présenter la moyenne journalière horaire enregistrée tout au long de l'année 2001.

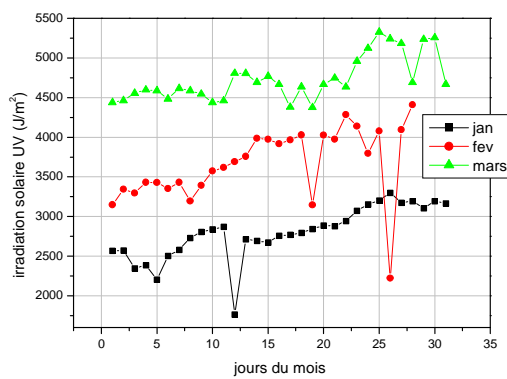


Figure 4.16: moyenne journalière de l_{uv} du premier trimestre 2001

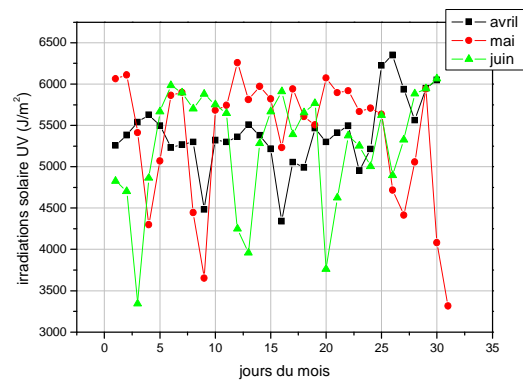


Figure 4.17: moyenne journalière de l_{uv} du deuxième trimestre 2001.

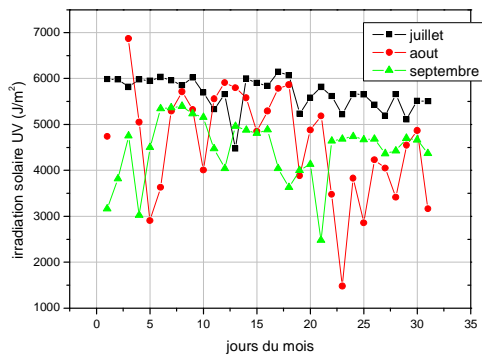


Figure 4.18 : moyenne journalière de l_{uv} du troisième trimestre 2001

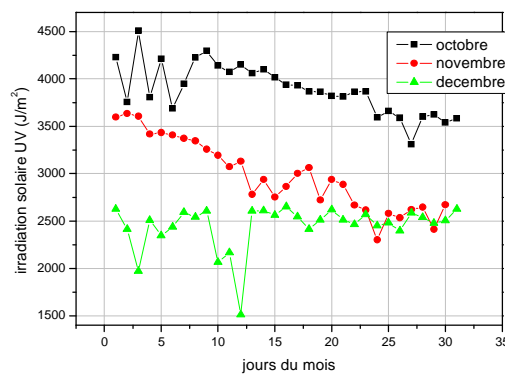


Figure 4.19 : moyenne journalière de l_{uv} du quatrième trimestre 2001.

La figure 4.16 représente la moyenne journalière horaire de l'irradiation solaire UVB tout au long du premier trimestre. On note que la fluctuation d'une journée à une autre au cours du même mois est arbitraire et ne semble pas obéir à une loi de variation régulière. Par contre, il ressort nettement que plus on avance vers le printemps, plus la différence entre les mois devient importante.

La figure 4.17 représente la moyenne journalière horaire de l'irradiation solaire UVB au cours du deuxième trimestre. Les mois affichent un plus grand rapprochement dans les valeurs moyennes enregistrées qu'au cours du trimestre qui a précédé. Le mois de mai est particulièrement remarquable par la

grande plage de variation de ses valeurs. Il passe des environs de 4000 J/m² et atteint les 6350 J/m².

Dans le même contexte, la figure 4.18 concerne le troisième trimestre. Un peu mois imbriquées que les courbes de la figure précédente, celles relatives aux trois mois de juillet, d'août et de septembre affichent d'importantes valeurs moyennes journalières horaires de l'irradiation solaire UVB, avec une nette supériorité pour le mois de juillet. Enfin, la figure 4.19 représente le dernier trimestre de l'année 2001. Les courbes représentatives des trois mois de ce trimestre se distinguent nettement les unes des autres reflétant une grande variation des valeurs des moyennes journalières d'un mois à un autre.

Le tableau 4.7 résume les valeurs moyennes journalière minimales et les moyennes journalières maximales des irradiances solaires UVB horaires enregistrées au cours de chaque mois de l'année 2001, 2002 et 2003 donnant, de la sorte, une idée précise de la marge de variation de ces valeurs.

Tableau 4.7: Les minimums et les maximums des moyennes journalières de l'irradiation UVB pour l'année 2001, 2002, 2003.

mois	2001		2002		2003	
	Mini (J/m ²)	Max (J/m ²)	Mini (J/m ²)	Max (J/m ²)	Mini (J/m ²)	Max (J/m ²)
Janvier	1764.26	3299.46	1566.73	3341.33	251.33	3040.13
Février	2222.39	4409.66	2139.19	4131.86	1912.40	4110.66
Mars	4376.46	5327.06	2749.46	5242.20	3294.66	5210.46
Avril	4342.26	6350.93	2447.46	6161.67	2659.66	5718.73
Mai	3315.73	6259.13	2340.34	6216.47	2485.13	5726.79
Juin	3340.66	6065.39	2200.20	5713.60	1873.19	5569.20
Juillet	4474.60	6144.46	109.00	6276.00	3406.06	5651.33
Août	1476.59	6870.09	173.21	7787.83	2314.86	5507.00
Septembre	2475.19	5397.26	2143.06	5189.13	2749.06	5225.60
Octobre	3311.26	4507.66	1508.00	4185.86	2903.06	3659.39
Novembre	2301.80	3635.19	2128.53	3249.80	2106.33	3147.53
décembre	1512.66	2651.33	1279.80	2496.06	1682.00	2459.60

Il ressort du tableau ci-dessus, pour l'année 2001, que la plus grande des valeurs moyennes journalière enregistrées est celle du mois d'août et égale 6870.09 J/m^2 . La plus petite moyenne enregistrée au cours de la même année est relative au mois de décembre avec une valeur de 1512.66 J/m^2 . Pour l'année suivante, le plus grand maximum est enregistré au mois d'août et est égal à 7787.83 J/m^2 et la plus petite valeur moyenne égale 109.0 J/m^2 , et de façon paradoxale, toujours au cours du même mois. Enfin pour l'année 2003, le plus grand maximum est celui du mois de mai avec une valeur de 5726.79 J/m^2 et le plus petit minimum est égal à 251.33 J/m^2 au mois de janvier.

L'étude de la moyenne journalière des deux autres années révèle les mêmes tendances aussi, il serait plus représentatif de récapituler la chose en calculant l'évolution de la moyenne journalière sur trois années au lieu de présenter la moyenne journalière pour chaque année séparément.

Dans ce qui suit, nous allons présenter les résultats obtenus.

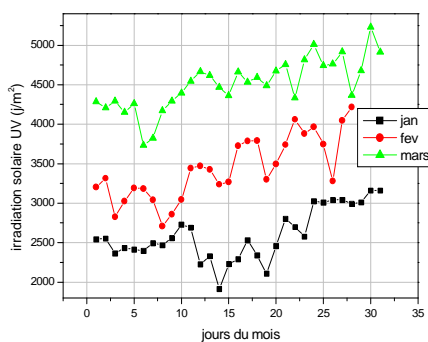


Figure 4.20: moyenne journalière de I_{UVB} du premier trimestre pour trois années.

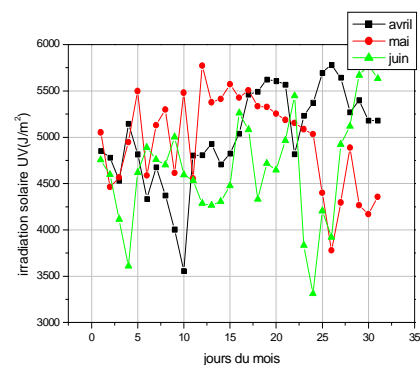


Figure 4.21: moyenne journalière de I_{UVB} du 2^{ème} trimestre pour trois années.

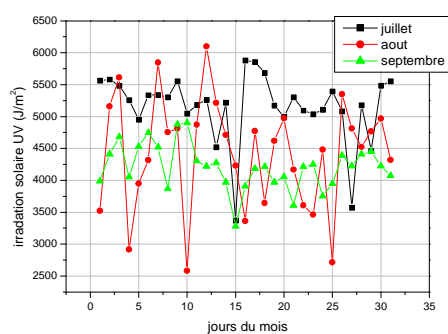


Figure 4.22: moyenne journalière de I_{UVB} du troisième trimestre des trois années.

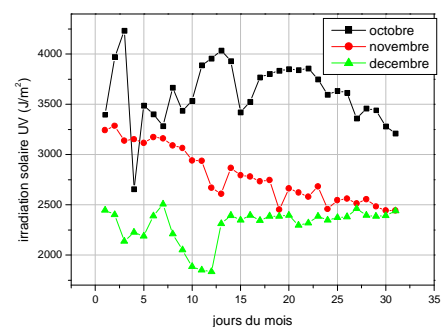


Figure 4.23: moyenne journalière de I_{UVB} du quatrième trimestre des trois années

La figure 4.20 représente la moyenne journalière au cours du premier trimestre calculée sur les trois années 2001, 2002 et 2003. L'évolution de la variable d'un jour à l'autre au cours d'un même mois ne semble obéir à aucune variation régulière. Le mois de mars affiche les valeurs les plus importantes du trimestre. Et l'augmentation de ces valeurs va du mois le plus froid vers le mois le plus chaud au cours de ce trimestre.

Au cours du deuxième trimestre, comme l'indique la figure 4.21, les courbes représentatives des moyennes des trois mois du 2^{ème} trimestre calculées sur trois années s'imbriquent et ne sont plus aussi distinctes les unes des autres, reflétant un certain rapprochement des valeurs calculées.

La figure 4.22 représente le même type de données relatives au troisième trimestre. L'imbrication continue mais les mois de juillet et d'août affichent les valeurs les plus importantes. La variation d'un jour à un autre est toujours arbitraire et ne semble toujours pas obéir à aucune loi régulière.

La figure 4.23 est celle qui représente le dernier trimestre des trois années. Les courbes retrouvent une différence des ordres de grandeurs des valeurs moyennes journalières calculées avec la supériorité du mois d'octobre, suivi du mois de novembre puis du mois de décembre qui affiche les plus faibles valeurs dans ce dernier trimestre.

Tableau 4.7: valeurs moyennes journalières minimales et maximales de l'irradiation solaire UVB horaire pour chaque mois de l'année 2001, 2002, 2003.

Les mois de l'année	valeurs minimales (J/m²)	Valeurs maximales (J/m²)
janvier	1914.66	3161.08
Février	2709.06	4217.39
mars	3732.95	5231.95
avril	3557.62	5782.93
mai	3778.73	5771.78
juin	3312.78	5782.73
juillet	3371.80	5880.84
août	2581.09	6099.38
septembre	3282.62	4902.88
octobre	2656.73	4232.73
novembre	2443.02	3286.02
Décembre	1835.75	2506.02

Le tableau 4.7 résume les valeurs maximales et minimales pour chaque mois de la moyenne journalière de l'irradiation solaire UVB horaire, calculée sur les trois années 2001, 2002 et 2003.

Le maximum est obtenu au mois d'août avec une valeur de 6099.38 J/m² même si, paradoxalement, ce mois enregistre l'une des moyennes les plus faibles de l'année avec 2581.09 J/m². Le minimum est propre au mois de décembre avec la valeur de 1835.75J/m².

4.4.3. La moyenne mensuelle de l'irradiation solaire horaire UVB

A présent, la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire horaire UVB, sera analysée pour chaque année, à travers différents graphes.

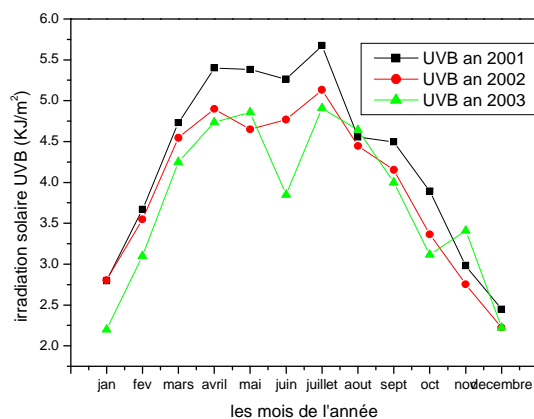


Figure 4.24: La moyenne mensuelle de l'irradiation solaire horaire UVB pour les années 2001, 2002 et 2003.

La figure 4.24 nous indique l'évolution de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire UVB horaire pour les trois années 2001, 2002 et 2003. Indifféremment pour les trois années, cette moyenne augmente régulièrement pendant les quatre premiers mois de l'année. Pendant la saison chaude, les moyennes calculées continuent à être plus importantes que celles des saisons froides mais n'évoluent plus avec régularité. Pour l'an 2001, le maximum des moyennes est celui calculé au mois de juillet avec la valeur de 5.4 KJ/m^2 ; le minimum au mois de décembre et égale 2.44 KJ/m^2 . On note que la moyenne relative au mois de juin est inférieure à celle des deux mois de mai et de juillet reflétant une chute au sein même de la période chaude. La même tendance enregistrée en 2001 anime l'évolution en 2002. Le maximum de la moyenne est obtenu en juillet et est égal à 5.13 KJ/m^2 . Le minimum en décembre avec 2.22 KJ/m^2 avec, aussi, une diminution autour des mois de mai et de juin. Pour l'année 2003, les saisons chaudes enregistrent de plus importantes valeurs que les saisons froides. Cependant, en juin, la moyenne calculée est plus faible que celle de mars et est égale à 3.8 KJ/m^2 . Le maximum est calculé en juillet avec 4.90 KJ/m^2 ; le minimum en janvier avec 2.20 KJ/m^2 .

Tableau 4.8.: moyennes des irradiations solaires horaires UVB et globales calculées sur les trois années 2001, 2002 et 2003.

Mois de l'année	I_{UVB} (kJ/m ²)	I_g (kJ/m ²)	I_{UVB}/I_g
Janvier	2.60005	1200.35669	0.00217
Février	3.43913	1466.92334	0.00234
Mars	4.50838	1740.34338	0.00259
Avril	5.01235	1811.55334	0.00277
Mai	4.96279	1864.51672	0.00266
Juin	4.62683	1758.21997	0.00263
Juillet	5.2378	1900.77002	0.00276
Août	4.54816	1662.63135	0.00274
Sept	4.21622	1564.15662	0.0027
Octobre	3.4568	1433.40332	0.00241
Novembre	3.04871	1273.31665	0.00239
Decembre	2.29889	1133.23328	0.00203

Le tableau 4.8 nous donne les valeurs des moyennes des irradiations solaires globales horaires et UVB horaires, calculées sur la période des trois années 2001, 2002 et 2003 dans la 1^{ère} et la 2^{ème} colonne respectivement. Dans la troisième colonne, c'est le rapport entre les deux variables. La moyenne calculée sur la 3^{ème} colonne nous permet d'obtenir le taux que représente l'irradiation horaire UVB de l'irradiation globale. Ce taux est égal à 0.0025.

Tableau 4.9: Les mesures maximales au cours de chaque mois de l'irradiation UVB pour les années 2001, 2002 et 2003.

mois	2001 Max (kJ/m ²)	2002 Max (kJ/m ²)	2003 Max (kJ/m ²)
Janvier	9.506	9.527	8.83
Février	12.152	11.358	11.276
Mars	14.127	13.853	13.656
Avril	16.142	15.618	14.513
Mai	15.625	15.777	14.143
Juin	14.805	14.351	13.639
Juillet	15.309	19.196	13.939
Août	14.963	13.518	14.329
Septembre	14.118	13.469	13.47
Octobre	12.701	11.778	10.239
Novembre	10.293	9.278	9.078
Décembre	8.136	7.476	7.244

Le tableau 4.9 indique les valeurs maximales de la composante UVB de l'irradiation solaire horaire, enregistrées en chaque mois durant les trois années sous considération. Le maximum pour l'année 2001 est enregistré au mois d'avril avec la valeur de 16.142 KJ/m². La plus petite valeur maximale, au mois de décembre et est égal à 8.136 KJ/m². Pour l'année 2002, le maximum est égal à 19.19KJ/m², enregistré en juillet. Le plus petit maximum est égal à 2.20KJ/m², enregistré en janvier. Enfin, pour l'année 2003, le mois d'avril enregistre la plus grande valeur maximale avec 14.513 KJ/m². Un autre point culminant est à noter en août avec 14.329 KJ/m². La plus petite valeur maximale enregistrée est égale à 7.244 KJ/m² en décembre.

En établissant la comparaison interannuelle entre 2001, 2002 et 2003, à travers la figure 4.24, on note que la courbe relative à l'année 2001 affiche les valeurs les plus importantes des moyennes mensuelles de l'irradiation solaire UVB horaire, s'approchant des 6 kJ/m² au mois de juillet. Les deux autres années 2002 et 2003, se distinguent par une ampleur moindre dont la courbe

se détache nettement de celle de 2001 pendant la saison chaude avec une chute de l'ordre de 1kJ/m^2 .

En revenant à la figure 4.3 qui donne les moyennes mensuelles de l'irradiation solaire globale horaire pour les trois années sous considération, on relève le parallèle parfaitement identique des différences et des similitudes interannuelles entre la figure 4.1 et la figure 4.24. Ce qui confirme, une fois de plus, la relation entre l'irradiation solaire globale et l'irradiation solaire UVB.

4.4.4. Evolution de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire UVB horaire, calculée séparément pour chaque tranche horaire de la journée

Dans ce qui suit, on exposera les résultats du calcul des moyennes mensuelles de l'irradiation solaire UVB horaire, calculées séparément pour chaque tranche horaire de la journée.

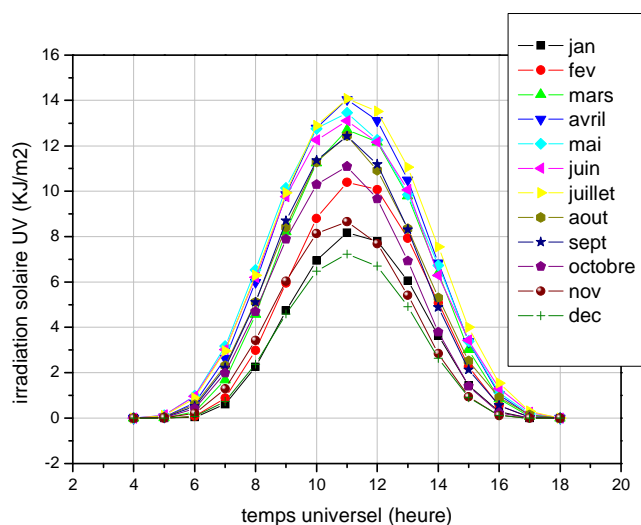


Figure 4.25: Les moyennes mensuelles de l'irradiation solaire UVB calculées pour chaque tranche horaire de la journée, au cours de l'année 2001.

L'analyse du profil journalier de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire UVB horaire relève une augmentation qui va dans le même sens que l'avènement de la saison estivale de l'année. Le mois d'août enregistre la plus grande valeur égale à 14.07 KJ/m^2 suivi par le mois d'avril avec 14.04 KJ/m^2

puis mai avec 13.45 KJ/m². Donc, au sein de la période tempérée de l'année, l'augmentation ne va pas dans le même sens que le temps. La supériorité du mois d'avril par rapport aux mois de la saison estivale, à l'exception de juillet, est à noter.

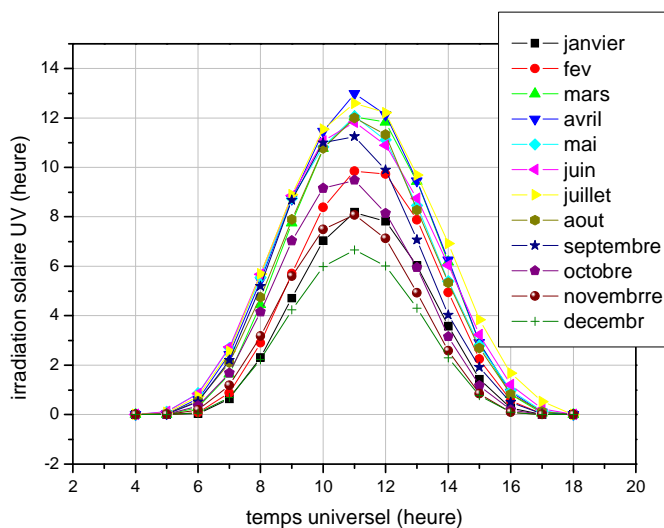


Figure 4.26: Les moyennes mensuelles de l'irradiation solaire UVB calculées pour chaque tranche horaire de la journée, au cours de l'année 2002.

A travers la figure 4.26, il ressort que, pendant l'année 2002, c'est le mois d'avril qui enregistre la plus importante valeur dans la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire UVB, calculée séparément pour chaque tranche horaire de la journée. Cette valeur est égale à 12.98 KJ/m². La deuxième plus importante valeur est enregistrée trois mois plus tard, au mois de juillet avec 12.59 KJ/m². Le mois de mai reprend le relais ensuite avec 12.06 kJ/m².

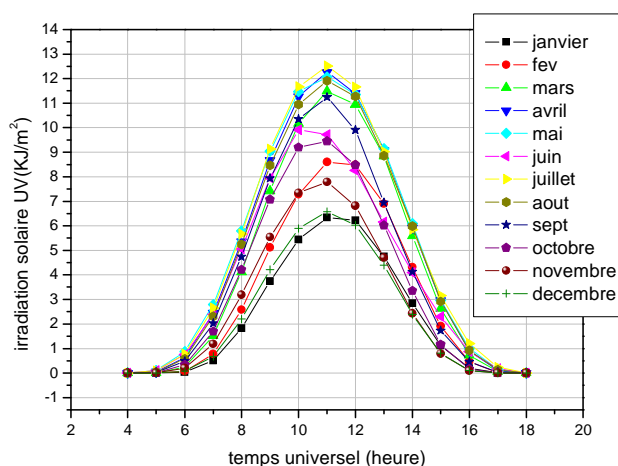


Figure 4.27: Les moyennes mensuelles de l'irradiation solaire UVB calculées pour chaque tranche horaire de la journée, au cours de l'année 2003.

La figure 4.27 montre que le mois de juillet affiche le plus important profil journalier moyen de l'année. La moyenne maximale enregistrée au cours d'une journée est calculée en juillet, avec la valeur de 12.51 KJ/m^2 . Au cours du printemps, la deuxième plus importante moyenne est enregistrée et ce, au mois d'avril et est égale à 12.25 KJ/m^2 . Mais d'une manière générale, les mois de l'été enregistrent la tendance la plus importante dans les valeurs moyennes mensuelles de l'irradiation solaire horaire UVB.

Le profil journalier dans les trois courbes ci-dessus présente une évolution avec une allure sinusoïdale dont les minimums sont ceux du début et de la fin de la période diurne, et le maximum aux environs du midi solaire. Pour les trois années aussi, les mois du début et de la fin de l'année affichent des valeurs moins importantes que les mois du printemps et de l'été.

4.4.5. Evolution de la moyenne annuelle de l'irradiation solaire I_{UVB} , calculée pour chaque tranche horaire de la journée

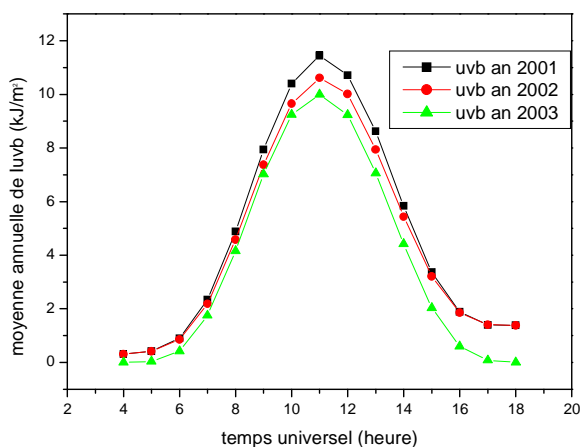


Figure 4.28: Evolution de la moyenne annuelle de l'irradiation solaire diffuse, calculée pour chaque tranche horaire de la journée séparément, pour l'année 2001, 2002, 2003.

La figure 4.28 donne la moyenne annuelle de l'irradiation solaire UVB, calculée séparément pour chaque tranche horaire de la journée. A l'instar de l'évolution de la même moyenne calculée pour l'irradiation solaire globale, l'année 2001 enregistre le plus grande valeurs, suivie de l'année 2002 et enfin 2003.

4.5. Indice de clarté horaire k_T relatif à l'irradiation solaire horaire globale

L'indice de clarté horaire k_T représente le rapport entre l'irradiation solaire globale incidente sur une surface horizontale au niveau du sol et l'irradiation solaire horaire incidente sur une surface en dehors de l'atmosphère terrestre. Ce rapport donne une très bonne idée de l'atténuation que subit l'irradiation solaire globale au cours de son parcours dans cette atmosphère, atténuation due à différents paramètres et phénomènes largement décrit au chapitre 1.

4.5.1. Evolution de la moyenne mensuelle de l'indice de clarté k_T , calculée pour chaque tranche horaire de la journée

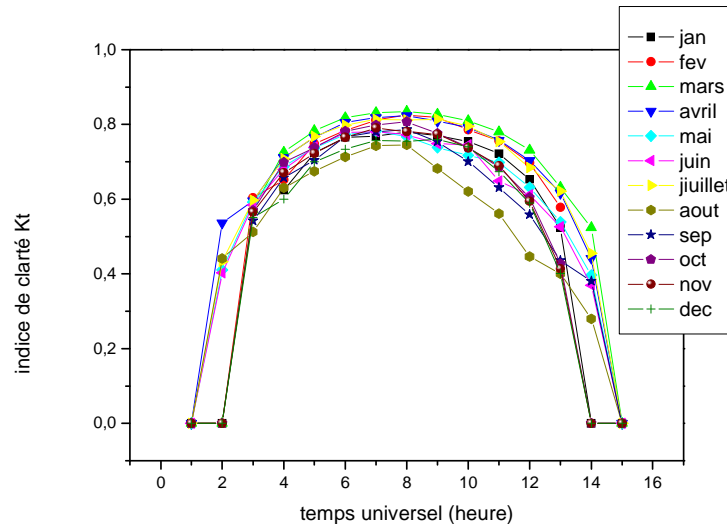


Figure 4.29: Evolution de la moyenne mensuelle de l'indice de clarté horaire k_T pour chaque tranche horaire, pour l'année 2001.

La figure 4.29 indique l'évolution de la moyenne mensuelle de l'indice de clarté horaire k_T , calculée séparément pour chaque tranche horaire de la journée, pour l'année 2001. Il est à noter, en premier lieu, l'allure en cloche de chaque courbe, allant du minimum nul aux moments du début et de la fin de la journée, vers un sommet aux environs du midi solaire. Les valeurs nulles indiquent simplement l'absence du rayonnement solaire aux coucher et avant le lever du soleil. Pour cette année en particulier, la supériorité de la courbe relative au mois de mars indique que le ciel, pendant ce mois, était plus clair que le reste de l'année et que l'atmosphère était plus pure, permettant le passage d'une irradiation solaire globale plus importante que les autres mois; à travers l'atmosphère terrestre. D'ailleurs, c'est au cours de ce mois que le maximum de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire globale horaire est enregistré et elle est égale à 0.83. En deuxième position, concernant la clarté du ciel et la pureté de l'atmosphère, vient le mois de juillet. Août, par contre, enregistre les plus petites valeurs indiquant un ciel très peu clair avec des moyennes mensuelles des indices de clarté horaire k_T pour chaque tranche

horaire dans l'intervalle $[0.5, 0.6]$, aux environs du midi solaire, moment qui se distingue par les valeurs les plus importantes de k_T pour les autres mois. Ceci est en accord avec le climat de Tamanrasset, distingué par un ciel particulièrement trouble en été à cause du mauvais temps et des tempêtes de sables qui règnent pendant cette saison polluant considérablement l'atmosphère avec les particules de poussières et les aérosols d'une manière générale.

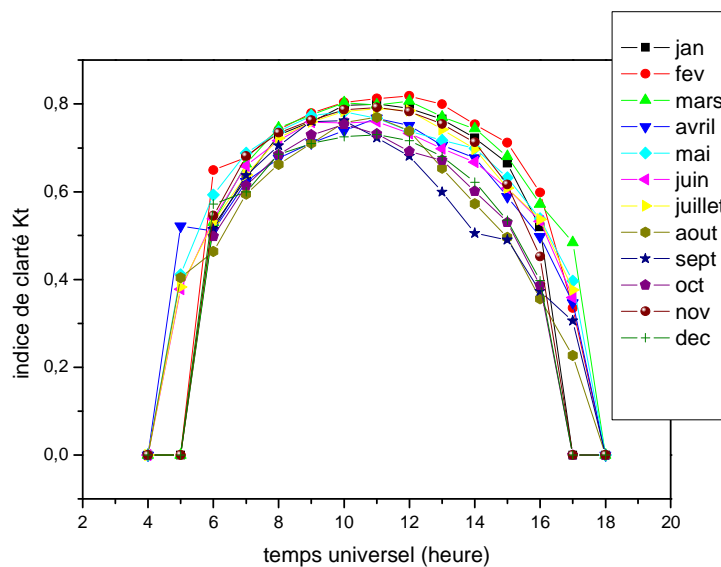


Figure 4.30: Evolution de la moyenne mensuelle de l'indice de clarté horaire k_T pour chaque tranche horaire, pour l'année 2002.

La figure 4.30 concerne l'année 2002, elle donne les moyennes mensuelles de l'indice de clarté horaire k_T , calculées pour chaque tranche horaire de la journée. La tendance globale du profil journalier est identique à celle de l'année 2001, mais c'est le mois de février qui prend la tête de file avec les valeurs les plus importantes avec un maximum égal à 0.81, suivi du mois de mars qui enregistre la deuxième valeur plus importante égale à 0.8. Septembre et août semblent avoir enregistré les plus faibles moyennes, dans un intervalle de $[0.5, 0.6]$, aux environs du midi solaire.

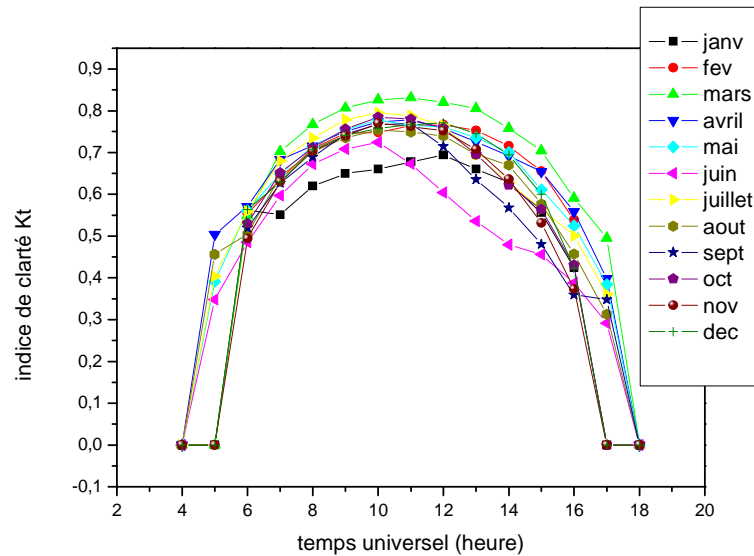


Figure 4.31: Evolution de la moyenne mensuelle de l'indice de clarté horaire k_T pour chaque tranche horaire, pour l'année 2003.

L'évolution des moyennes mensuelles de l'indice de clarté horaire k_T , calculées pour chaque tranche horaire de la journée, pour l'année 2003, est représentée à travers la figure 4.31. Le mois de mars affiche les valeurs les plus importantes de tous les mois de l'année avec valeur maximale de cette moyenne égale à 0.83 indiquant une meilleure clarté du ciel et pureté de l'atmosphère par rapport au reste de l'année. En deuxième position, le mois de juillet prend distinctement l'avance pour la portion de la journée qui précède 10 heures du matin. Pour le reste de la journée, les courbes s'imbriquent étroitement laissant entrevoir, cependant, que les mois de juin, septembre et janvier enregistrent les plus faibles valeurs qui ne dépassent pas, même aux environs du midi solaire, la limite de 0.6.

4.5.2. Evolution de la moyenne annuelle calculée pour chaque tranche horaire de la journée

Pour avoir une vue plus générale de l'évolution de l'indice de clarté au cours de la période d'étude, nous allons présenter la moyenne annuelle de chaque heure du profil journalier pour chaque année 2001, 2002 et 2003.

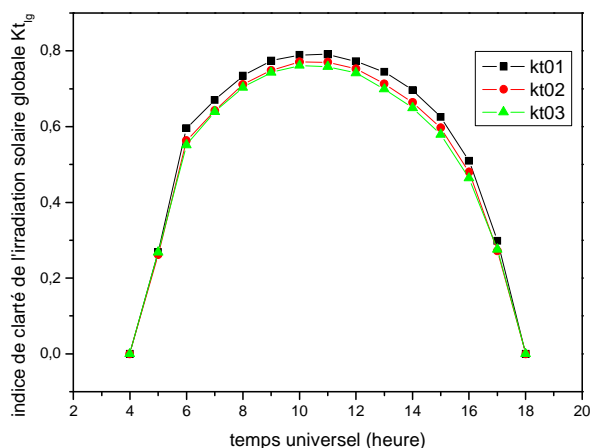


Figure 4.32 : La moyenne annuelle horaire de l'indice de clarté horaire k_T , calculée séparément pour chaque tranche de la journée, pour les années 2001, 2002, 2003.

Sur la figure 4.32, on voit l'évolution de la moyenne annuelle de l'indice de clarté horaire k_T relatif à l'irradiation solaire globale, calculée, séparément, pour chaque tranche horaire de la journée. Pour les trois années d'étude 2001, 2002 et 2003, l'évolution semble similaire et avoir la même tendance. De la valeur nulle entre le début et la fin de la journée, l'allure est quasi sinusoïdale et tend vers le maximum aux environs du midi solaire. Ce maximum est voisin de la valeur 0.8 pour l'année 2001 qui affiche les valeurs les plus importantes témoignant d'une atmosphère plus claire que les deux autres années. Cependant, les trois courbes demeurent très voisines l'une de l'autre témoignant d'une importante similitude des conditions de clarté du ciel et de la pureté de l'atmosphère.

Le tableau 4.10 présente la moyenne tri annuelle (calculée sur trois ans) pour chaque tranche horaire de la journée, de l'indice de clarté horaire k_T

Tableau 4.10 : La moyenne tri annuelle pour chaque tranche horaire de l'indice de clarté k_T

Temps universel (heure)	Indice de clarté k_T
4	0
5	0.26
6	0.57
7	0.65
8	0.71
9	0.75
10	0.77
11	0.77
12	0.75
13	0.71
14	0.67
15	0.60
16	0.48
17	0.28
18	0

L'évolution de la moyenne tri annuelle calculée pour chaque tranche horaire de la journée, de l'indice de clarté k_T , montre la même tendance de l'évolution que celle calculée pour chaque année séparément. Du minimum nul en début et en fin de journée, il évolue graduellement au cours de la journée pour atteindre la valeur maximale 0.77 aux environs de midi. Cette valeur correspond à un ciel assez clair.

4.5.3. Evolution de la moyenne mensuelle horaire de l'indice de clarté horaire k_T

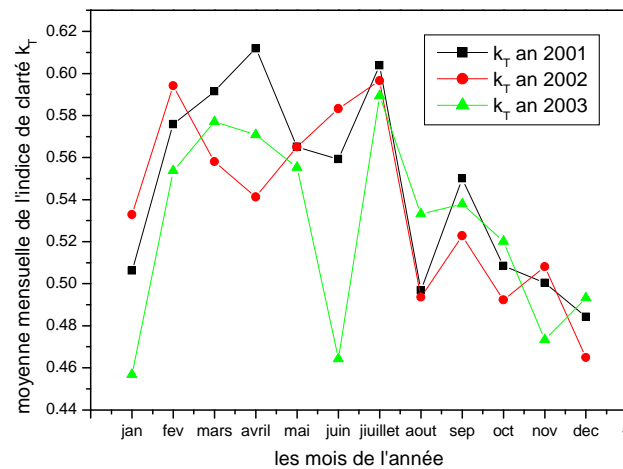


Figure 4.33 : Evolution de la moyenne mensuelle horaire de l'indice de clarté horaire k_T pour les années 2001, 2002 et 2003.

La figure 4.33 donne la moyenne mensuelle horaire de l'indice de clarté horaire k_T pour les trois années 2001, 2002 et 2003. Concernant les trois années à la fois, il est apparent que les six derniers mois de l'année plus le mois de janvier présentent les valeurs les plus faibles par rapport à ceux du 1^{er} semestre. Ce dernier, affiche des variations irrégulières des trois courbes avec quand même des valeurs plus importantes que les autres mois

La courbe relative à l'année 2001 semble afficher les plus importantes valeurs des moyennes de l'indice de clarté horaire k_T , particulièrement pendant les mois du printemps, en juin et en septembre. Il enregistre, cependant, une chute en juin et en août, laissant la prépondérance aux deux autres années. Les courbes relatives à 2002 et 2003 s'imbriquent et s'alternent irrégulièrement sur la supériorité des valeurs moyennes.

Tableau 4.11 : moyenne mensuelle horaire de l'indice de clarté horaire k_T relatif à l'irradiation solaire globale, calculée sur l'ensemble des trois années 2001, 2002, 2003.

Les mois de l'année	Moyenne mensuelle de k_T
Janvier	0.498
Février	0.574
Mars	0.575
Avril	0.574
Mai	0.561
Juin	0.535
juillet	0.596
Août	0.507
Septembre	0.536
Octobre	0.506
Novembre	0.493
Décembre	0.480

Le tableau 4.11 donne les valeurs de la moyenne mensuelle horaire de l'indice de clarté horaire k_T relatif à l'irradiation solaire globale, calculées sur l'ensemble de la période d'étude 2001, 2002 et 2003. Les mois de novembre, décembre et janvier affichent les plus basses valeurs, indiquant une plus grande atténuation de l'irradiation solaire. Cela est dû à la hauteur du soleil, plus basse durant ces mois qui fait que le parcours de l'irradiation vers la surface de la terre est plus long donc, subit une plus importante atténuation due au phénomène de diffusion.

4.6. Indice de clarté horaire k_{TUVB} relatif à l'irradiation solaire UVB

L'indice de clarté horaire k_{TUVB} relatif à l'irradiation solaire horaire UVB, est calculé en divisant l'irradiation solaire horaire I_{UVB} incidente sur une surface horizontale au niveau du sol par l'irradiation solaire horaire UVB incidente sur une surface horizontale en dehors de l'atmosphère terrestre, notée I_{UVB0} . Pour calculer I_{UVB0} , il faut remplacer la constante solaire relative à tout le spectre solaire par celle relative à la longueur d'onde UVB et ce, dans la formule de

calcul de l'irradiation solaire hors atmosphère (équation 23). La valeur de solaire relative à l'irradiation UVB est égale à 19.02

La première chose à discuter concernant le k_{TUVB} est l'ordre de grandeur. En effet, la plage de variation de ce paramètre est dans l'intervalle [0.01 et 0.2]. Cela est petit comparé à l'indice de clarté horaire relatif à l'irradiation solaire globale qui varie dans une plage de valeur allant entre [0.1, 1]. On peut en déduire, simplement, que l'atténuation que subit l'irradiation solaire UVB lors de son parcours dans l'atmosphère terrestre est bien plus importante. En effet, en dehors de la diffusion, il y'a la forte absorption de l'UVB par l'ozone, ce qui fait qu'une faible fraction seulement de l'UVB extraterrestre réussit à s'infiltrer jusqu'au niveau de la surface de la terre.

4.6.1. Evolution de la moyenne mensuelle de l'indice de clarté horaire k_{TUVB} , calculée pour chaque tranche horaire de la journée

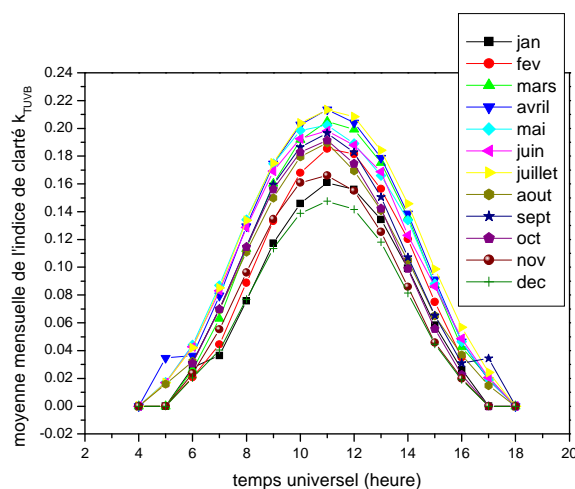


Figure 4.34: Evolution de la moyenne mensuelle de l'indice de clarté horaire k_{TUVB} , calculée pour chaque tranche horaire, pour l'année 2001.

La figure 4.34 indique l'évolution de la moyenne mensuelle de l'indice de clarté horaire k_{TUVB} , calculée séparément pour chaque tranche horaire de la journée, pour l'année 2001. Il est à noter, en premier lieu, l'allure en cloche de chaque courbe, allant du minimum nul aux moments du début et de la fin de la journée, vers un sommet aux environs du midi solaire. Les valeurs nulles

indiquent simplement l'absence du rayonnement solaire aux coucher et avant le lever du soleil.

Pour cette année les valeurs maximales sont enregistrées au cours des deux mois d'avril et de juillet. Ils enregistrent un maximum au moment du midi solaire égal à 0.21. Cela signifie que pendant ces deux mois, l'atmosphère était plus pure et donc le ciel plus clair que le reste des mois de l'année, permettant ainsi le passage d'une irradiation solaire UVB plus importante que les autres mois à travers l'atmosphère terrestre. Août, par contre, enregistre une valeur maximale de 0.8 indiquant un ciel un taux de transfert moyen des UVB. Ceci est en accord avec le climat de Tamanrasset, distingué par un ciel particulièrement trouble en été à cause du mauvais temps et des tempêtes de sables qui règnent pendant cette saison polluant considérablement l'atmosphère avec les particules de poussières et les aérosols d'une manière générale.

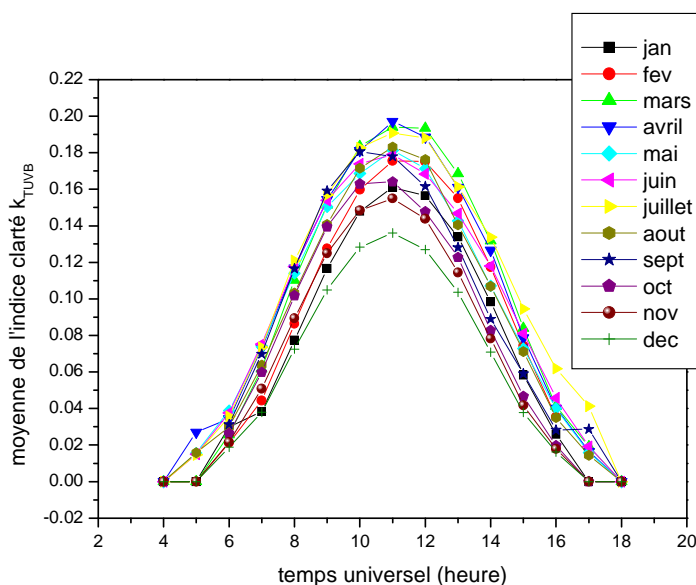


Figure 4.35: Evolution de la moyenne mensuelle de l'indice de clarté horaire k_T pour chaque tranche horaire, pour l'année 2002.

Pour l'année 2002, les mois qui se disputent la tête de file sont ceux d'avril, mars, juillet et août. Avec comme valeur maximale de la moyenne mensuelle du k_{TUVB} , calculée séparément pour chaque tranche horaire, variant de 0.18 à 0.19.

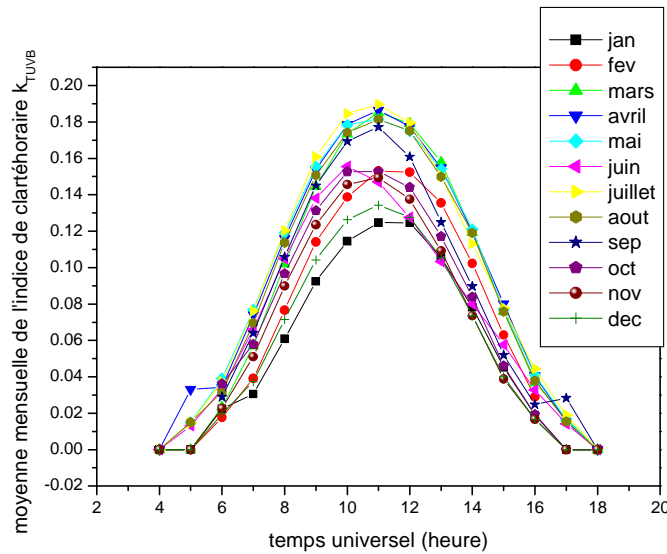


Figure 4.36 : Evolution de la moyenne mensuelle de l'indice de clarté horaire k_T pour chaque tranche horaire, pour l'année 2003.

Sur la figure 4.36, l'année 2003 affiche les mêmes tendances saisonnières de l'évolution de la moyenne mensuelle de l'indice de clarté k_{TUVB} , calculée pour chaque tranche horaire de la journée séparément. Avril, mai, juillet et août occupent les premières places avec des maximums aux environs du midi solaire de l'ordre de 0.18. Les autres mois de l'année et à la même heure, leurs valeurs vont du 0.15 au 0.13, pour le mois de décembre.

4.6.2. Evolution de la moyenne annuelle calculée séparément pour chaque tranche horaire de la journée

Pour avoir une vue plus globale de l'évolution de l'indice de clarté horaire k_{TUVB} au cours de la période d'étude, nous allons présenter la moyenne annuelle calculée séparément pour chaque heure du profil journalier et ce, pour chaque année 2001, 2002 et 2003.

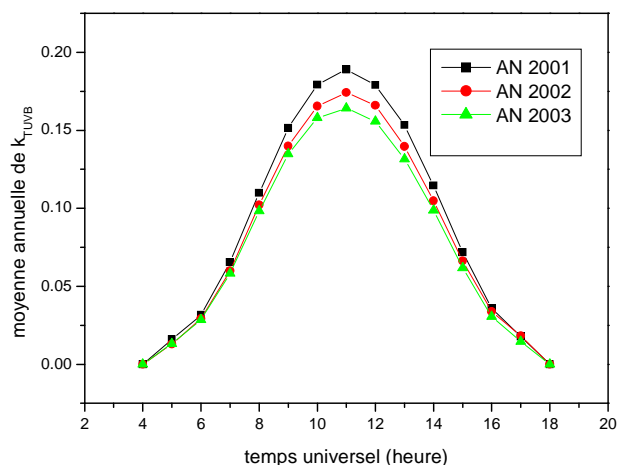


Figure 4.37 : La moyenne annuelle horaire de l'indice de clarté horaire k_{TUVB} pour les années 2001, 2002, 2003.

Sur la figure 4.37, on voit l'évolution de la moyenne annuelle de l'indice de clarté horaire k_{TUVB} relatif à l'irradiation solaire UVB, calculée, séparément, pour chaque tranche horaire de la journée. Pour les trois années d'étude 2001, 2002 et 2003, l'évolution semble similaire et avoir la même tendance. De la valeur nulle entre le début et la fin de la journée, l'allure est quasi sinusoïdale et tend vers le maximum aux environs du midi solaire. Ce maximum est voisin de la valeur 0.19 pour l'année 2001 qui affiche les valeurs les plus importantes témoignant d'une atmosphère plus claire que les deux autres années. Cependant, les trois courbes demeurent très voisines l'une de l'autre témoignant d'une importante similitude des conditions de clarté du ciel et de la pureté de l'atmosphère. L'année 2002 enregistre un maximum de 0.17 aux environs du midi solaire et enfin, l'année 2003 la valeur de 0.16. Cet ordre de supériorité interannuel est le même que celui relatif à l'indice de clarté horaire relatif à l'irradiation solaire globale (figure 4.32). Ce qui d'ores et déjà, laisse supposer une relation entre les deux paramètres.

Le tableau 4.12 présente la moyenne tri annuelle (calculée sur trois ans) pour chaque tranche horaire de la journée, de l'indice de clarté horaire k_{TUVB} .

Tableau 4.12: La moyenne tri annuelle pour chaque tranche horaire de l'indice de clarté k_{TUVB}

Temps universel (heure)	Indice de clarté k_{TUVB}
4	0
5	0.01
6	0.03
7	0.06
8	0.10
9	0.14
10	0.17
11	0.18
12	0.17
13	0.14
14	0.11
15	0.07
16	0.03
17	0.02
18	0

L'évolution de la moyenne tri annuelle calculée pour chaque tranche horaire de la journée, de l'indice de clarté k_{TUVB} , montre la même tendance de l'évolution que celle calculée pour chaque année séparément. Du minimum nul en début et en fin de journée, il évolue graduellement au cours de la journée pour atteindre la valeur maximale 0.18 aux environs de midi.

Le calcul du taux que représente la moyenne des k_{TUVB} par rapport à la moyenne des k_T , calculées sur trois années est de 15.43%.

4.6.3. Evolution de la moyenne mensuelle horaire de l'indice de clarté horaire

k_{TUVB}

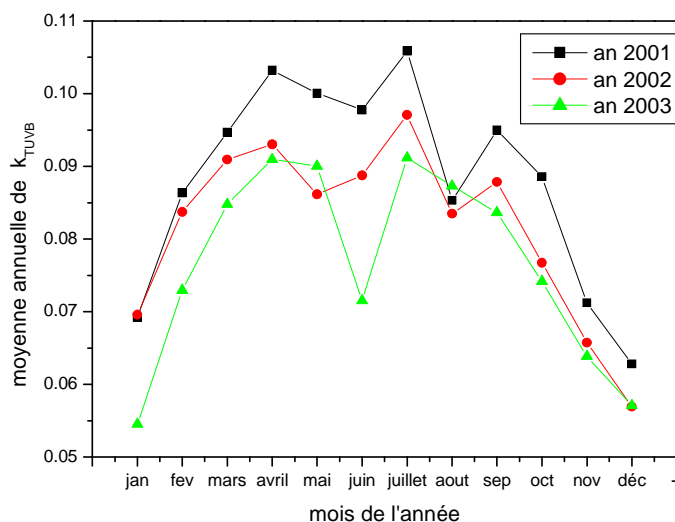


Figure 4.38: Evolution de la moyenne mensuelle horaire de l'indice de clarté horaire k_{TUVB} pour les années 2001, 2002 et 2003.

La figure 4.38 donne la moyenne mensuelle horaire de l'indice de clarté horaire k_{TUVB} pour les trois années 2001, 2002 et 2003. Concernant les trois années à la fois, il est apparent que les six derniers mois de l'année plus le mois de janvier présentent les valeurs les plus faibles de l'année. La saison printanière ainsi que l'été affichent les plus importantes valeurs. L'année 2001 présente les valeurs les plus importantes. Le mois de juillet enregistre les plus importantes moyennes au cours des trois années égales à 0.11 pour 2001, 0.09 pour 2002 et 0.09 pour 2003. Le minimum est toujours enregistré en hiver. En décembre pour 2001 et 2002 avec 0.06. Et en janvier pour 2003 avec 0.05. Une chute notable est enregistrée en juin 2003 indiquant une détérioration de la clarté du ciel.

Tableau 4.13 : moyenne mensuelle horaire de l'indice de clarté horaire k_{TUVB} relatif à l'irradiation solaire UVB, calculée sur l'ensemble des trois années 2001, 2002, 2003.

Les mois de l'année	Moyenne mensuelle du k_{TUVB}
Janvier	0.06
Février	0.08
Mars	0.09
Avril	0.1
Mai	0.09
Juin	0.09
juillet	0.1
Août	0.08
Septembre	0.09
Octobre	0.08
Novembre	0.07
Décembre	0.06

Le tableau 4.13 donne les valeurs de la moyenne mensuelle horaire de l'indice de clarté horaire k_{TUVB} relatif à l'irradiation solaire UVB, calculées sur l'ensemble de la période d'étude 2001, 2002 et 2003. Les mois de novembre, décembre et janvier affichent les plus basses valeurs, indiquant une plus grande atténuation de l'irradiation solaire UVB lors de son passage dans l'atmosphère terrestre. Cela est dû à la hauteur du soleil, plus basse durant ces mois qui fait que le parcours de l'irradiation vers le sol est plus long donc, subit une plus importante atténuation due au phénomène de diffusion. Les mois de juillet et d'avril affichent les plus importantes moyennes égales à 0.1

4.7. Corrélations

Dans ce qui a précédé, nous avons largement passé en vue l'évolution des différentes composantes de l'irradiation solaire horaire incidente en l'occurrence, celle de l'irradiation solaire globale et de la composante spectrale UVB ainsi que les indices de clarté horaires relatifs aux deux et ce, au cours de la période d'étude s'étalant sur une durée de trois années consécutives, de janvier 2001 à décembre 2003. Dans ce qui suit, nous allons présenter différentes corrélations existant entre différents paramètres et composantes de l'irradiation solaire incidente pour mettre en relief l'interrelation qui réunit chaque paramètres aux autres.

4.7.1. Corrélations entre l'irradiation solaire globale horaire et l'irradiation UVB horaire

4.7.1.1. Moyenne mensuelle de l'irradiation horaire, calculée sur l'ensemble des trois années 2001, 2002 et 2003

Tableau 4.14: moyenne mensuelle horaire de I_g et I_{UVB} calculée sur les trois années 2001, 2002, 2003.

Les mois de l'année	Irradiation globale (KJ/m²)	Irradiation I_{UVB} (KJ/m²)
Janvier	1200.35	2.60
Février	1466.92	3.43
Mars	1740.34	4.50
Avril	1811.55	5.01
Mai	1864.51	4.96
Juin	1758.21	4.62
Juillet	1900.77	5.23
Août	1662.63	4.54
Septembre	1564.15	4.21
Octobre	1433.40	3.45
Novembre	1273.31	3.04
Décembre	1133.23	2.29

Le tableau 4.14 donne les moyennes mensuelles horaire des irradiations solaire globale et UVB calculées sur l'ensemble des trois années 2001, 2002 et 2003.

Représenté sur un graphe, le tableau 4.14 permet d'obtenir la corrélation qui relie les moyennes mensuelles horaires relatives aux deux variables à savoir, l'irradiation solaire globale horaire et l'irradiation solaire UVB horaire pour toute la durée d'étude.

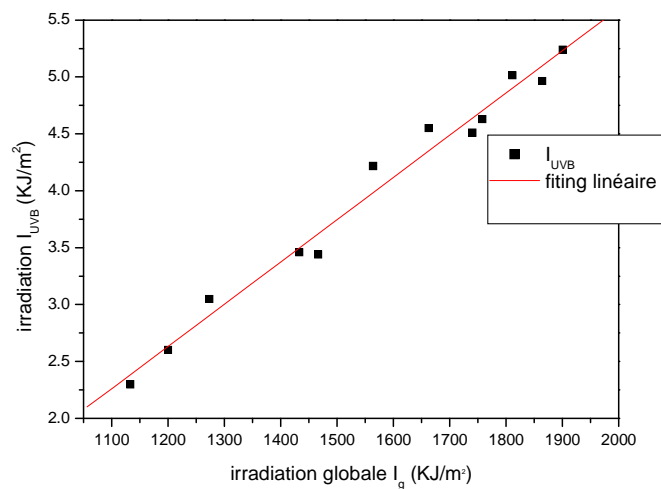


Figure 4.39 : corrélation entre I_{UVB} et I_g

La figure 4.39 présente la corrélation linéaire qui lie les valeurs moyennes mensuelles horaires des deux variables I_{UVB} et I_g .

$$I_{UVB} = -1.821 + 0.0037I_g \quad (58)$$

Avec un facteur de corrélation $R = 0.99$.

Cette valeur du facteur de corrélation proche de 1 reflète la forte relation qui existe entre l'évolution de l'UVB en fonction de I_g qui de plus est une simple relation linéaire.

4.6.1.2. Moyenne triannuelle calculée pour chaque tranche horaire de la journée séparément

Sur figure 4.39 est représentée la variation de la moyenne tri annuelle de l'irradiation horaire de la composante UVB, calculée pour chaque tranche horaire de la journée séparément en fonction de la moyenne tri annuelle de l'irradiation horaire du rayonnement solaire global, calculée pour chaque tranche horaire de la journée séparément.

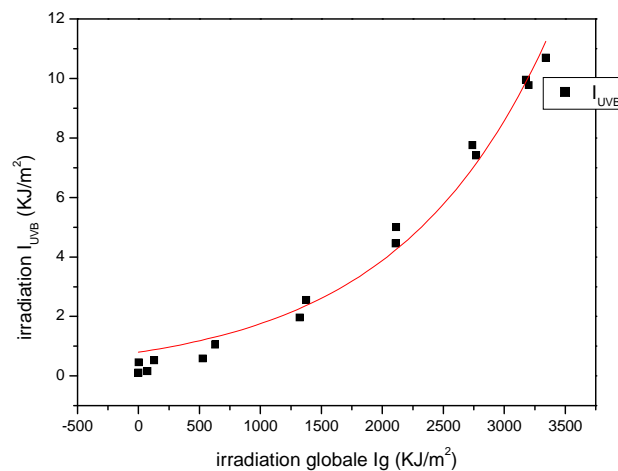


Figure 4.40: corrélation entre I_{UVB} et I_g

Il est clair à travers la dispersion des points représentant l'irradiation solaire UVB suivant l'axe des valeurs de l'irradiation solaire globale dans la figure 51 que la relation entre ces deux variables est croissante. Il est manifeste que cette évolution possède une forme exponentielle croissante. Après fitting, nous obtenons la corrélation suivante:

$$I_{UVB} = 0.794 \exp(I_g / 1260.86) \quad (60)$$

Avec un facteur de corrélation $R = 0.984$.

Le facteur de corrélation très proche de 1 confirme le résultat précédent, à savoir la forte relation qui lie la fraction solaire spectrale UVB à l'irradiation solaire globale.

Une étude menée par EL-HADIDY et all au Dhahran[28], sur des mesures des irradiances solaires globales et irradiances UV journalières sur deux années propose une corrélation linéaire entre les deux paramètres avec un facteur de corrélation $R = 0.974$.

Concernant les travaux antécédents, El Aruri (1990) [37], propose une corrélation linéaire sur l'évolution d'une série de mesure des irradiances UV en fonctions des irradiances globales journalières enregistrées au Kuwait sur une période de trois années. Le facteur de corrélation égal à 0.93.

Sur une série autres de mesure de 6 années à Valence, Espagne, Martinez Lorenzo[18] (1998) propos une corrélation linéaire avec un facteur de corrélation de 0.96.

Pédros et all (1997), sur une série de mesure de deux années ont obtenus une corrélation linéaire avec un facteur de corrélation égal à 0.96 [32].

Zadovska et Reichrt (19985) [44] ont obtenu pour dix années de mesures un facteur de corrélation linéaire de 0.92.

4.7.2. Corrélations entre l'irradiation solaire globale et l'irradiation UVB pour certaines tranches horaires

Dans une autre alternative pour corréler les composantes de l'irradiation solaire arrivant au sol et dans le but de réduire les effets de l'angle du zénith, de la turbidité et de l'albédo, les irradiances solaires horaires UVB et diffuses horaires sont exprimées en taux relatif à l'irradiation solaire horaire diffuse (I_{UVB}/I_d) et l'irradiation solaire horaire globale (I_d/I_g) respectivement. Les figures 52, 53, 54 et 55 montrent la variation des valeurs horaires de (I_{UVB}/I_d) en fonction de (I_d/I_g) aux tranches horaires [9h00, 10h00], [11h00, 12h00] , [13h00, 14h00], [15h00, 16h00] en temps universel, respectivement.

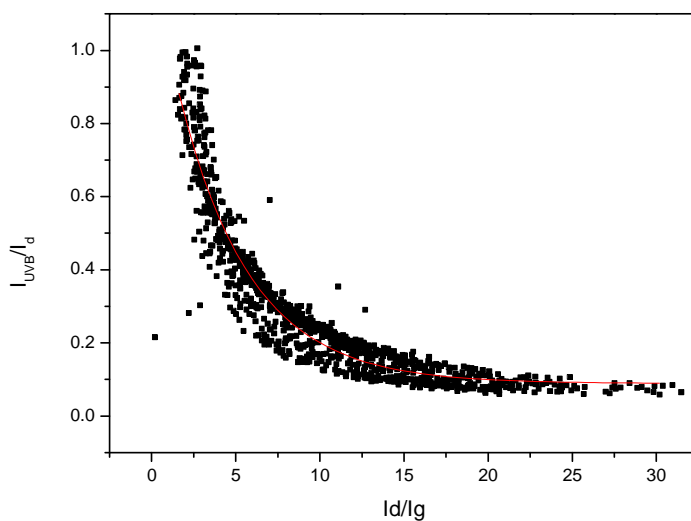


Figure 4.41 : diagramme de points des valeurs horaires dans l'intervalle [9h00, 10h00] des irradiations exprimées en taux adimensionnels I_{UVB}/I_d et I_d/I_g pour les trois années 2001-2003.

$$I_{UVB}/I_d = 2.79122(I_d/I_g)^{-0.80036} \quad (61)$$

Avec un taux de corrélation $R = 0.86$. Ce taux est assez important pour dire que la corrélation qui lie les deux variables adimensionnelles dans la tranche horaire [9h00, 10h00] est bonne. D'ailleurs, la dispersion assez régulière du nuage de points consolide cette affirmation.

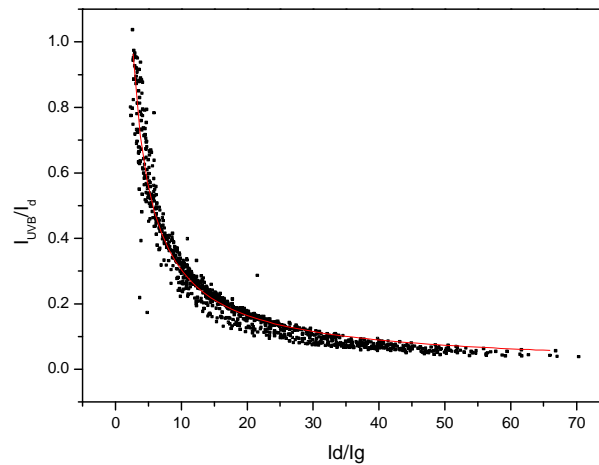


Figure 4.42: diagramme de points des valeurs horaires dans l'intervalle [11h00, 12h00] des irradiances exprimées en taux adimensionnels I_{UVB}/I_d et I_d/I_g pour les trois années 2001-2003.

Pour la figure 4.42 relative à l'intervalle [11h00, 12h00], la corrélation qui semble représenter le mieux l'évolution des variables en question est du type:

$$I_{UVB}/I_d = 2.30656(I_d/I_g)^{-0.88145} \quad (62)$$

Avec un facteur de corrélation $R = 0.94$. Ce facteur indique une forte corrélation entre les deux variables dans la tranche horaire qui va de 11h00 à 12h00.

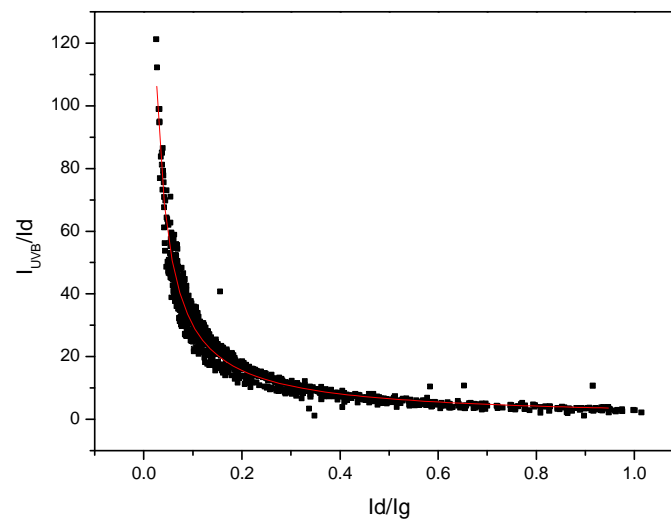


Figure 4.43: diagramme de points des valeurs dans l'intervalle [13h00, 14h00] des irradiations exprimées en taux adimensionnels I_{UVB}/I_d et I_d/I_g pour les trois années 2001-2003.

La figure 4.43 concerne les données relatives à 13 heures. La corrélation qui en ressort est la suivante:

$$I_{UVB}/I_d = 3.37751 \left(I_d/I_g \right)^{-0.94909} \quad (63)$$

Avec un facteur de corrélation $R^2 = 0.96$. Ce facteur très proche de 1 indique la bonne corrélation mathématique qui relie les deux variables adimensionnelles dans l'intervalle de temps [15h00, 16h00].

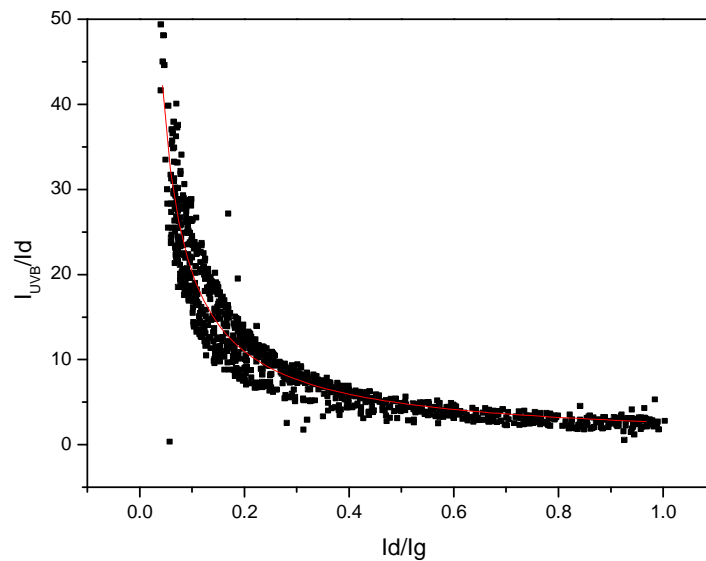


Figure 4.44 : diagramme de points des valeurs horaires dans l'intervalle de temps [15h00, 16h00] des irradiances exprimées en taux adimensionnels I_{UVB}/I_d et I_d/I_g pour les trois années 2001-2003

Pour la corrélation relative aux données de l'intervalle de temps [15h00, 16h00], exprimée par la figure 4.44, le fitting proposé est exponentiel décroissant sous la forme suivante:

$$I_{UVB}/I_d = 2.64692 (I_d/I_g)^{-0.8861} \quad (64)$$

Avec $R = 0.90$. Pour cet intervalle aussi, le facteur de corrélation est dans le même ordre de grandeur.

D'après les quatre résultats ci-dessus, on peut constater que c'est aux deux tranches horaires [11h00, 12h00] et [13h00, 14h00] qui présentent respectivement des facteurs de corrélations 0.94 et 0.96 que la meilleure corrélation mathématique existe entre les deux variables adimensionnelles (I_{UVB}/I_d) et (I_d/I_g) . Cette approche adimensionnelle a déjà été utilisée par P.S.Kronakis et al sur des données horaires des irradiances horaires globales et UVB en grèce [33]. Ils l'ont appliqué à 9heure et à 13h temps solaire en

grâce. Ils ont trouvé des facteurs de corrélations, respectifs aux heures sus citées de 0.978 et 0.899.

4.7.3. corrélation entre indice de clarté horaire k_{TUVB} relatif aux UVB et l'indice de clarté horaire k_T relatif à l'irradiation solaire globale.

4.7.3.1. Moyenne mensuelle horaire de l'indice de clarté horaire, calculée sur l'ensemble des trois années 2001, 2002 et 2003

Tableau 4.15: moyenne mensuelle de k_T et K_{TUVB} calculée sur les trois années 2001, 2002, 2003.

Les mois de l'année	k_T	K_{TUVB}
Janvier	0.49862	0.06445
Février	0.57458	0.08102
Mars	0.57553	0.09013
Avril	0.57467	0.09575
Mai	0.56179	0.09208
Juin	0.5356	0.08602
Juillet	0.59663	0.09804
Août	0.50792	0.08537
Septembre	0.53692	0.08883
Octobre	0.50697	0.07982
Novembre	0.49394	0.06695
Décembre	0.48085	0.05895

Le tableau 4.15 donne les moyennes mensuelles des indices de clarté horaires k_T et k_{TUVB} , calculées sur l'ensemble des trois années 2001, 2002 et 2003. Représenté sur un graphe, le tableau 4.15 permet d'obtenir la corrélation qui relie les moyennes mensuelles relatives aux deux variables, calculées sur toute la période d'étude.

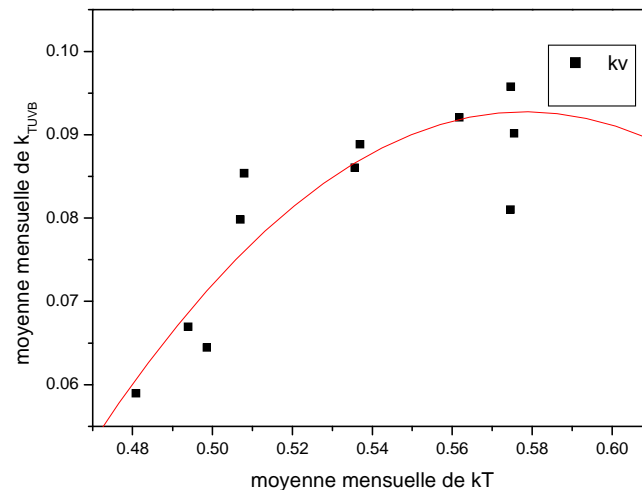


Figure 4.45: corrélation moyenne mensuelle de k_T et k_{TUVB}

A travers la dispersion des points, le fitting proposé est de la forme polynomiale du second degré sous la forme:

$$k_{TUVB} = -1.0389 + 3.9142k_T - 3.38465k_T^2 \quad (65)$$

Ce fitting donne un facteur de corrélation $R = 0.80$.

4.7.3.2. Moyenne tri annuelle calculée pour chaque tranche horaire

Séparément

Dans le tableau 4.16, on donne la variation de la moyenne tri annuelle de l'indice de clarté horaire k_{UVB} , calculée pour chaque tranche horaire de la journée séparément, et la moyenne tri annuelle de l'indice de clarté horaire relatif au rayonnement solaire global, calculée pour chaque tranche horaire de la journée séparément.

Tableau 4.16: moyenne triannuelle de k_T et de k_{TUVB} pour chaque tranche horaire

Le temps universel (heure)	k_T	K_{TUVB}
4	0	0
5	0.26631	0.01405
6	0.57031	0.02977
7	0.65107	0.06124
8	0.71646	0.10343
9	0.75511	0.14206
10	0.77406	0.16762
11	0.77328	0.17586
12	0.75582	0.16699
13	0.71901	0.14155
14	0.67021	0.10605
15	0.60068	0.06664
16	0.48466	0.03344
17	0.28222	0.0169
18	0	0

En figure 4.46, est représentée la variation de la moyenne tri annuelle de l'indice de clarté horaire k_{UVB} , calculée pour chaque tranche horaire de la journée séparément, en fonction de la moyenne tri annuelle de l'indice de clarté horaire relatif au rayonnement solaire global, calculée pour chaque tranche horaire de la journée séparément.

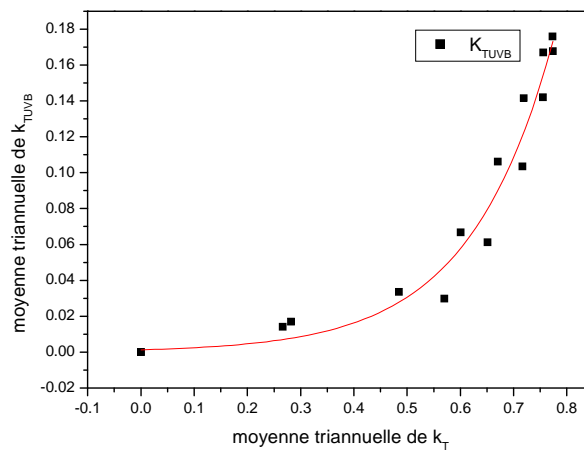


Figure 4.46: corrélation entre moyennes tri annuelles k_T et k_{TUVB}

La dispersion des points dans la figure 4.46 montre une évolution exponentielle croissante qui relie les moyennes triannuelles des k_T et des k_{TUVB} . Aussi, le fitting proposé est de la forme suivante:

$$k_{TUVB} = 0.0013 \exp(k_T/0.1582) \quad (66)$$

Le facteur de corrélation dans ce cas est égal à $R = 0.96$. Ce facteur proche de la valeur 1, indique une très bonne relation liant l'indice de clarté horaire relatif à l'irradiation solaire UVB à celui relatif à l'irradiation solaire globale.

4.7.3.3. Corrélation entre les valeurs horaires des indices de clarté horaire

k_T et k_{TUVB} relatifs à chaque mois

Dans une autre approche, on va établir les corrélation entre les valeurs horaires des indices de clarté k_T et k_{TUVB} pour chaque mois séparément. Le fitting choisi est du type exponentiel croissant dont la forme générale est la suivante:

$$y = a \exp(x/t)$$

Où y représente la variable k_{TUVB} horaire et x l'indice de clarté horaire k_T .

Pour chaque mois de l'année nous obtenons une corrélation différente dont les paramètres a , t et le facteur de corrélation R sont données par le tableau 4.17.

Tableau 4.17: paramètres de corrélation exponentielle $k_{TUVB} = a \exp(k_T/t)$

Mois	a	t	R
Janvier	0.01427	0.39216	0.58
Février	0.00272	0.2048	0.79
Mars	0.00122	0.16628	0.91
Avril	0.00388	0.20995	0.82
Mai	0.00536	0.23169	0.81
Juin	0.00707	0.24366	0.86
Juillet	0.00353	0.20244	0.89
Août	0.0068	0.23667	0.87
Septembre	0.01406	0.33163	0.68
Octobre	0.00475	0.22497	0.86
Novembre	0.00124	0.16447	0.94
Décembre	0.00324	0.21466	0.83

Le tableau 4.17 montre que pour tous les mois de l'année, exception faite pour les mois de janvier et de septembre, les facteurs de corrélations sont entre 0.81 et 0.93. Cet intervalle reflète la relation forte qui lie le k_T au k_{TUVB} . La moyenne des facteurs de corrélations calculées sur les douze mois de l'année donnent la valeur de 0.82.

En prenant en considération toute les données horaires et en faisant un fitting sur la totalité des années 2001, 2002 et 2003 on obtient, respectivement, le graphe, la corrélation et le facteur de corrélations suivants:

J Martinez Lozano (1998) propose pour les valeurs horaires k_T et k_{TUV} une corrélation linéaire avec un facteur de corrélation $R= 0.83$ [18].

Pedros et al (1997) avec une étude similaire menée sur deux années en Espagne, Cordoba , en utilisant une corrélation polynomiale du second ordre entre les k_T et k_{TUV} ont obtenu un facteur de 0.93 [32].

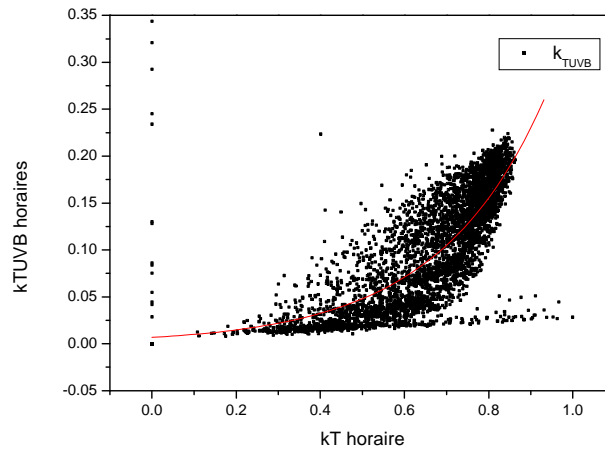


Figure 4.47: corrélation entre les valeurs horaires des k_T et k_{TUVB}

$$k_{TUVB} = 0.00674 \exp(k_T / 0.25498) \quad (67)$$

Avec $R= 0.75$

Une étude similaire menée par J.A.Martinez-Lozano et al en Espagne [18] a proposé une corrélation linéaire pour chaque mois de l'année. Les résultats obtenus sont du même ordre de grandeur.

Pedros et al (1997) ont également étudié une relation similaire sur deux années de données en Espagne, cordoba et ont utilisé une relation polynomiale du second ordre avec un facteur de corrélation de 0.93 [32] .

CONCLUSION

Les données relatives aux irradiances solaires horaires globales I_g , diffuses I_d et I_{UVB} incidentes sur un plan horizontal, mesurées à la station VAG de Tamanrasset, durant la période allant du 1^{er} janvier 2000 au 31 décembre 2003, ont été analysées dans le cadre de cette étude.

L'objectif est d'étudier l'évolution de ces trois paramètres du rayonnement solaire au cours de la journée, des mois et de l'année et l'effet des différentes saisons sur les quantités d'énergie incidentes. Ensuite, l'interaction des différents paramètres a été déterminée.

L'intensité du rayonnement solaire extraterrestre est atténuée lors de son passage à travers la couche atmosphérique terrestre. Les conditions atmosphériques régulent cette atténuation. Le taux de cette atténuation, exprimé par le rapport k_T indice de clarté relatif à l'irradiation horaire globale et k_{TUVB} , celui relatif à l'irradiation solaire UVB a été calculé pour chaque période du temps de mesure. Les conditions atmosphériques qui dépendent du taux d'aérosols, de particules de vapeur ou de gouttelettes d'eau et de différents composants qui atténuent le rayonnement solaire incident sur toutes les longueurs d'ondes du spectre solaire, sont liées à l'évolution des indices de clarté.

Les résultats déduits de l'analyse statique indiquent que la valeur maximale de I_g enregistrée durant les trois années de mesure est de 4193.7 kJ/m² en avril 2003. Celle relative à I_d est de 2265.69 kJ/m², enregistrée en mai 2002. La valeur de I_{UVB} maximale enregistrée est de 19.6 kJ/m², juillet 2002.

Les petites valeurs relatives aux trois composantes sont toujours mesurées en janvier et décembre.

Sur toute la période de mesure étudiée, les irradiances I_{UVB} ont représenté 0,24 % de l'irradiation globale I_g . En dehors de l'atmosphère, ce rapport est égal 0.014 %.

Indifféremment pour toutes les composantes étudiées du rayonnement solaire, au cours d'une même journée, l'évolution possède une forme de cloche avec des minimums nuls aux deux moments du lever et du coucher du soleil un maximum est enregistré aux environs du midi solaire. Cela reflète fidèlement l'évolution sinusoïdale de l'angle du zénith entre le lever et le coucher du soleil au cours d'une même journée. Ce résultat met en relief l'effet important de l'angle du zénith sur l'évolution des différents composants du rayonnement solaire au cours d'une journée

L'étude statistique a fait ressortir qu'au cours de l'année, les valeurs les plus importantes sont enregistrées aux cours des mois de l'été; celles minimales aux mois de janvier et de décembre. L'angle de la hauteur du soleil évolue exactement de la même manière au cours de l'année. C'est-à-dire que durant les mois de l'hiver, le soleil est plus bas et donc l'angle de sa hauteur est plus petit. Par un calcul géométrique de la variation des sinus de cet angle, on déduit que le parcours du rayonnement solaire dans l'atmosphère, avant d'atteindre la surface de la terre augmente durant les mois de cette saison. Ce surplus de parcours augmente l'atténuation. Ce sens de l'évolution permet de conclure l'impact important de la hauteur du soleil.

L'étude statistique a aussi fait ressortir des diminutions subites, relatives aux valeurs des irradiances solaires, enregistrées durant les mois de juillet et d'août. Ces mois se distinguent par des tempêtes de sables et des orages liés au climat tropical qui règne à Tamanrasset, particulièrement perturbé en été. Le trouble du ciel s'accroît alors à cause des tempêtes de sable, du temps pluvieux qui augmente respectivement le taux d'aérosols, de gouttelettes et de vapeurs d'eau. Il faut y ajouter la présence des nuages. L'accroissement de tous ces paramètres cause, automatiquement l'accroissement des phénomènes d'absorption et de diffusion du rayonnement solaire lors de son passage dans l'atmosphère. Ce résultat permet de conclure l'effet important des conditions atmosphériques et météorologiques sur les quantités relatives aux différentes composantes du rayonnement solaire atteignant la surface de la terre.

La représentation de la variation de I_{UVB} en fonction de I_g permet de tirer un grand nombre de corrélations:

- Une corrélation linéaire liant les valeurs mensuelles entre elles avec un facteur de corrélation $R = 0.99$.
 - Une corrélation de la forme exponentielle croissante liant les moyennes triannuelles calculées, séparément pour chaque tranche horaire de la journée, avec $R = 0.984$.
- La représentation des irradiances solaires sous une forme adimensionnelle où les I_{UVB} et I_d forment un taux représenté en ordonnées et (I_d / I_g) représentant les abscisses, donnent des corrélations de la forme $y = ax^b$ et ce, aux tranches horaires suivantes, [9h,10h], [11h,12h], [13h,14h], [15h,16h] avec des facteurs de corrélations respectifs $R = 0.86$, $R = 0.94$, $R = 0.96$, $R = 0.90$. Les valeurs des paramètres a et b sont donnés au chapitre résultats.
 - La représentation des k_{TUVB} en fonction des k_T donne aussi lieu à des progressions multiples qui indiquent la forte corrélation entre les deux variables:

- les moyennes mensuelles horaires des deux variables horaires donnent une évolution polynomiale du second ordre avec $R = 0.8$.

- la dispersion des points de la moyenne tri-annuelle calculée pour chaque tranche horaire de la journée, séparément, donne la corrélation exponentielle de la forme $y = a \exp(x/t)$ avec $R=0.96$. Ce taux de corrélation indique la grande dépendance entre les deux variables.

- Les corrélations tirées de la représentation des valeurs horaires k_{TUVB} en fonction de k_T relatives à chaque mois de l'année donnent 12 facteurs de corrélations dont la moyenne est égale à 0.82.

- Globalement, le k_{TUVB} représente 15.43 % du k_T .

- Dans une perspective future, le travail doit s'étendre sur un nombre d'années plus grand pour que les résultats de l'étude statistique aient une plus grande signification concernant la variation des UVB à long terme.

- La disponibilité des données météorologiques et atmosphériques en parallèle aux données radiométriques permettrait de cerner l'évolution de tous ces paramètres de manière plus rigoureuse.

APPENDICE A
LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

G_{sc}	: Constante solaire	[w/m ²]
H_0	: Irradiation solaire journalière extraterrestre	[kJ/m ²]
I_0	: Irradiation solaire horaire extraterrestre	[kJ/m ²]
I_b	: Irradiation solaire directe incidente horaire	[kJ/m ²]
I_d	: Irradiation solaire diffuse incidente horaire	[kJ/m ²]
I_g	: Irradiation solaire globale incidente horaire	[kJ/m ²]
I_{UVB}	: Irradiation solaire Ultraviolet horaire	[kJ/m ²], [J/m ²]
k_T	: indice de clarté relatif à l'irradiation solaire globale	
k_{TUVB}	: indice de clarté relatif à l'irradiation UVB horaire.	
m	: masse optique	
R	: facteur de corrélation	
T_{SV}	: temps solaire vrai	[heure]
T_U	: temps universel	[heure]
w'	: eau précipitable	

Lettres grecques

δ	: angle de déclinaison du soleil	[degrés; radian]
λ	: longueur de l'onde électromagnétique	[micromètre, Å]
μ	: micon	
θ_z	: angle zénithal du soleil.	[degrés; radian]
ρ	: albédo du sol	
ω	: angle horaire	[degrés; radian]

REFERENCES

1. A.A. Sayigh . Solar Energy Engineering, Academic Press, INC, (1977)
2. A.I.Kudish , V. Lyubensky, E.G.Eseev, A.lanetzl. Energy 30 (2005) 1623-1641. Inter comparaison of the solar UVB, UVA and global radiation clearness and UV indices for Beer Sheva and Neve Zohar (dead sea), Israel.
3. André Hufly. Introduction à la climatologie, le rayonnement et la température, l'atmosphère, l'eau; le climat et l'activité humaine. Debeck Université, (2001).
4. Brian Norton. Solar energy thermal technology. Springer-Verlag edition,(1991).
5. CH.Perrin de Brichimbaut. Le gisement solaire , Edition Tec et doc lavoisier, Paris (1982).
6. CH.Perrin de Brichimbaut. Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels, Gauthiers Villars, Paris (1968).
7. Ch. P. Pegry. Précis de climatologie. Paris, 2^{ème} Edition ,(1970).
8. Claude delannoy. Programmer en Fortran 90, Edition Eyrolles, (1998).
9. C.P. Jacovides et all. Energy 31 (2006) 2728-2738. Solar global radiation and its relationship with solar radiation measured on the island of Cyprus.
10. Daguenet. M. Les séchoirs solaires théorie et pratique .Unesco, (1985).
11. Duffie and Beckman. Solar engineering of thermal processes.Wiley-interscience publication. Second edition (1991).
12. Foukal. P.V. Solar astrophysics. Edition John Wiley and Sons. NY (1990).
13. Foukal. B. Le soleil, une étoile variable . Edition Pour la science. (1990).
14. J Frohlich, C. In the solar output and its variation . Colorado Association University Press, Boulder (1977).

15. George E.P. Box William, G Hunter, J. Stuart Hunter. Statistics of experimenters. John and sons Edition,(2005).
16. Gordon J., Van Wylen., Thermodynamique Appliquée. Edition Du Renouveau (1992).
17. Gough. D et Toomre.J. Annual rewievs of astronomy 29,(1991), 627-684, Siesmic observation of the solar interior.
18. JA Martinez Lozano , F. Tina, M.P.Utrillas. International journal of climatology 19, (1999) 903-911 .Ratio of uv to global broad band irradiation in valencia , spain.
19. J. R. Vaillant. Utilisation et promesse de l'énergie solaire. Edition Eyrolles (1978).
20. Kenneth. R. Lang. Le soleil et ses relations avec la terre. Springer, (1995).
21. Khogali , A. El Bar, Solar Energy 48 (1992.)79-87. A study of solar ultraviolet radiation at Makkah solar station.
22. KL. Koulson. Solar and terrestrial radiation, Academic Press, New York, (1975).
23. Klein..A. Solar Energy 19, 325, (1977) . Calculation of monthly average insolation on titeld surfaces.
24. Kondratyev. K. YA. Radiation in the atmosphere. Academic Press, NY et Londre (1969).
25. K.O.Ogunjobi et Y.J. Kim. Atmospheric Research 71(2004)193-214. Ultraviolet (0.280-0.400 μm) and broadband solar hourly radiation at Kwangju, south Korea: analysis of their correlation with aerosol optical depth and clearness index.
26. L'atmosphère. Histoire, phénomènes météorologiques, effets des activités humaines. Dossier hors série pour la science. (Juin 1996).
26. Le grand Atlas de la l'astronomie. Encyclopédie Universalis (1983).
28. M.A.El Hadidy , Abdel-Nabi .D.Y, Kruss. P.D. . Solar Energy Vol 44.(1990). Ultraviolet solar radiation at Dhahran, Saudi Arabia..
29. Michel Capederou. Atlas solaire de l'Algérie. Office des Publications Universitaires (1985).
30. Mohamed Iqbal. An introduction to solar radiation. Academic press (1983).
31. Mouvier G. La pollution atmosphérique . Collection Dominos, Flammarion, (1994).

32. Pedros .S.M. E.(ed), VIII C ongreso Iberico de Energia Solar,(1997) Porto, Portugal, p. 159.Generaçion de series largas de radiaçion ultravioleta global sobre una superficie horizontal' in de oliveria Fernandes.
33. PS.Koronokis . Atmospheric Environment 36(2002) 3173-3181.Interrelation of UV-global /global/diffuse solar irradiance components and UV-global attenuation on air pollution episode days in athens, Greece.
34. Rapport station Vag ONM.(2006).
35. Rapport ONM ' raiseau radiométrique national'
36. R. Bernard , G. Menguy , M. Schwartz.. Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications. Edition Lavoisier (1983).
37. Sami. D. El Aruri. Solar energy vol 45.N° 2,(19 90). The empirical relationship between global radiation and global ultraviolet (0.290-0.385) μm solar radiation components.
38. U.S. Standard Atmosphere U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. (1976).
39. Thekaekara, M.P.and A.J.Drummond, National Physical Science 229,6, (1971). Standard values for the solar constant and its spectral components.
40. Thekaekara, M.P. Solarr Energy 18, 309, (1976)."Solar radiation measurement: Tecniques and instrumentation"
41. William. J. Buroughs. L'encyclopédie du climat. Edition Delachaux et Niestlé (2000).
42. www.wikipedia..com
43. www. onm.dz
44. Zadovska E. et Reichrt, Contrib . Slovak Academy. Sci.Ser. Meteorol,5,21 (1985). 'Ultraviolet and total global radiation in Bratislava'.

