

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

Département d'Electronique  
Laboratoire des Dispositifs de Communication  
et de Conversion Photovoltaïque



## Thèse de Doctorat en Electronique

Option : Conversion Photovoltaïque

Présenté par :

**CHIKH Madjid**

Magister en Conversion Photovoltaïque du Centre de Développement des  
Energies Renouvelables

Intitulé

---

# Corrélation de la composante diffuse de l'irradiation solaire globale horizontale en Algérie

---

Soutenue publiquement le 03-10-2019 devant le jury composé de :

Président	Cherif LARBES	Professeur	ENP, Alger
Directeur de thèse	Mourad HADDADI	Professeur	ENP, Alger
Co-Directeur de thèse	Ali MALEK	Directeur de Recherche	CDER, Alger
Examineur	Med Salah AIT CHEIKH	Professeur	ENP, Alger
Examineur	Amar HADJARAB	Directeur de Recherche	CDER, Alger
Examineur	Farid BOUCHAFA	Professeur	USTHB, Alger
Examineur	Abdelaziz TALHA	Professeur	USTHB, Alger
Invité	Achour MAHRANE,	Directeur de Recherche	UDES/CDER

**ENP 2019**



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

Département d'Electronique  
Laboratoire des Dispositifs de Communication  
et de Conversion Photovoltaïque



## Thèse de Doctorat en Electronique

Option : Conversion Photovoltaïque

Présenté par :

**CHIKH Madjid**

Magister en Conversion Photovoltaïque du Centre de Développement des  
Energies Renouvelables

Intitulé

---

# Corrélation de la composante diffuse de l'irradiation solaire globale horizontale en Algérie

---

Soutenue publiquement le 03-10-2019 devant le jury composé de :

Président	Cherif LARBES	Professeur	ENP, Alger
Directeur de thèse	Mourad HADDADI	Professeur	ENP, Alger
Co-Directeur de thèse	Ali MALEK	Directeur de Recherche	CDER, Alger
Examineur	Med Salah AIT CHEIKH	Professeur	ENP, Alger
Examineur	Amar HADJARAB	Directeur de Recherche	CDER, Alger
Examineur	Farid BOUCHAFA	Professeur	USTHB, Alger
Examineur	Abdelaziz TALHA	Professeur	USTHB, Alger
Invité	Achour MAHRANE,	Directeur de Recherche	UDES/CDER

**ENP 2019**

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Monsieur HADDADI Mourad, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, qui m'a encadré tout au long de cette thèse. Qu'il soit aussi remercié pour sa gentillesse, sa disponibilité permanente et pour les nombreux encouragements qu'il m'a prodigués.

Je remercie Monsieur Achour MAHRANE Directeur de Recherche à l'UNED/CDER. Cette thèse est le fruit d'une collaboration de plusieurs années avec lui. C'est à ses côtés que j'ai compris ce que rigueur et précision voulaient dire.

J'adresse tous mes remerciements à Monsieur LARBES Chérif, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse, ainsi qu'à Monsieur MALEK Ali, Directeur de Recherche au CDER, de l'honneur qu'il m'a fait en acceptant d'être Co-encadreur de cette thèse.

Je tiens à remercier Monsieur Amar HADJARAB, Directeur de recherche au CDER, pour avoir accepté de participer à mon jury de thèse et pour sa participation scientifique.

Je remercie également Monsieur Mohamed Salah AIT CHEIKH, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, pour l'honneur qu'il me fait d'être dans mon jury de thèse.

J'exprime ma gratitude à Monsieur Farid BOUCHAFA et à Monsieur Abdelaziz TALHA, Professeurs à l'Université USTHB d'Alger, qui ont bien voulu être examinateurs.

*Je dédie ce modeste travail :*

### **A ma très chère Maman**

Source inépuisable de tendresse, de patience et de sacrifice. Ta prière et ta Bénédiction m'ont été d'un grand secours tout au long de ma vie. Quoique je puisse dire et écrire, je ne pourrais exprimer ma grande affection et ma profonde reconnaissance. J'espère ne jamais te décevoir, ni trahir ta confiance et tes sacrifices. Puisse Dieu tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et Bonheur.

### **A ma très chère épouse FATIMA**

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon amour et mon attachement à toi. Depuis que je t'ai connu, tu n'as cessé de me soutenir et de m'épauler. Tu me voulais toujours le meilleur. Ton amour ne m'a procuré que confiance et stabilité. Tu as partagé avec moi les meilleurs moments de ma vie, aux moments les plus difficiles de ma vie, tu étais toujours à mes côtés, Je te remercie de ne m'avoir jamais déçu. Aucun mot ne pourrait exprimer ma gratitude, mon amour et mon respect. Je remercie le bon dieu qui a croisé nos chemins. Puisse le bon dieu nous procure santé et longue vie.

### **A mes très chers enfants**

Puisse dieu vous protéger, vous procurer santé et longue vie.

A tous mes amis et collègues de travail, en particulier Mon ami et frère Rabah SELLAMI, Puisse Allah te protéger, et renforcer notre fraternité. Je te souhaite tout le bonheur du monde.

**ملخص:** إن دراسة نظام طاقي شمسي في منطقة ما يستدعي معرفة كمية الطاقة الشمسية فيها وإذا كانت إحدى مكونات هذا الكمون الشمسي غير متوفر على غرار المنبث في كل أنحاء الغلاف الجوي غير مقاسا وغير متوفرا يستدعي الأمر إلى اللجوء إلى الاستعانة بنماذج رياضية لإنتاج هذه العناصر الإشعاعية، مؤشر الصفاء الجوي، الحرارة وكذلك نسبة الرطوبة. نقوم في عملنا هذا بدراسة كمية وكيفية لتطورات المركبة المنتشرة في الغلاف الجوي للإشعاع الشمسي الكلي وطبقت هذه الدراسة على موقعين ألا وهما منطقة وهران الواقعة شمال غرب الجزائر وبالأخص على الجانب الساحلي الغربي للوطن. والموقع الثاني يخص منطقة تمنراست الواقعة في جنوب الجزائر وهي منطقة صحراوية ذات مناخ قاري. إن النتائج الناجمة من الدراسة التحليلية لهذا العنصر الإشعاعي أدت إلى وضع نماذج رياضية تحاكي تطور هذا الإشعاع الشمسي بدلالة المؤشر للصفاء الجوي وكذلك مع مختلف قيم الارتفاع الشمسي. واعتدلت هذه الدراسة التحليلية على مدى الفصول السنوية والسنة الكاملة. بعد ذلك قمنا بدراسة مقارنة باستعمال بعض المؤشرات الإحصائية وبعد اتمام الدراسة التحليلية الفصلية والسنوية قمنا بدراسة ثانية مقارنة مع بعض الاعمال العلمية المقامة في نفس الإطار والموجودة في الأدبيات العلمية. أوضحت هذه الدراسة أن إدراج العنصر المناسب للارتفاع الشمسي أدى إلى تقليص الخطأ المعياري في تصميم النموذج الرياضي بصفة معتبرة. ولتسليط الضوء على فائدة استعمال النموذج الرياضي للإشعاع الشمسي في دراسة الانظمة الطاقية الشمسية، طبقنا النماذج المتحصل عليها في دراستنا هذه في تصميم النظام الفولتائي، ودراسة مقوماته الطاقية. أثبتت نتائج هذه الدراسة المقارنة أن اللجوء إلى النموذج للإشعاع الشمسي على سلم الساعة لدراسة مقومات نظام شمسي يعد بالضرورة ولا محالة من عدم استعماله.

الكلمات المفتاحية: نمذجة الإشعاع المنتشر، مؤشر الصفاء، ارتفاع الشمس

**Abstract:** The design of a solar energy system in a region where the solar potential is restricted to the measurement of the global horizontal solar radiation and the diffuse component is not supported requires using models for this estimation with radiometric parameters such as sunshine duration, clearness index, temperature, and relative humidity. The present study deals with a qualitative and quantitative study that was established on the diffuse component of horizontal global radiation, which has been applied for two sites, namely: Oran, which is a coastal region located in northwestern Algeria, and Tamanrasset localized in the south of Algeria. The results obtained from this analysis permitted to find mathematical correlations between the diffuse and the clearness index for different levels of solar altitude and for different seasons. A comparative study was carried out; first, to see the impact of the season on the accuracy of the models established by using statistical indicators namely mean bias error, root-mean-squared error, and the t-stat. Secondly, another comparative study was carried out using other works previously published in the scientific literature. The introduction of the solar altitude as a predictor for establishing correlations of the diffuse component has significantly reduced the standard error compared to other models, which considered the clearness index as the only independent variable. To highlight the interest of the modeling of the hourly diffuse solar radiation in the solar energy systems studies, we applied the models of the diffuse radiation established in this work for a conceptual analysis of the photovoltaic systems (Sizing and performances study).

**Key words:** Modeling Diffuse radiation, Clearness Index, Solar altitude.

**Résumé :** La conception d'un système énergétique solaire dans une région où le potentiel solaire est limité à la mesure du rayonnement solaire global horizontal et où la composante diffuse n'est pas supportée nécessite l'utilisation de modèles pour cette estimation avec des paramètres radiométriques tels que la durée d'ensoleillement, l'indice de clarté, la température et l'humidité relative. La présente étude porte sur une étude qualitative et quantitative établie sur la composante diffuse du rayonnement global horizontal appliquée à deux sites, à savoir : Oran, région côtière située au nord-ouest de l'Algérie, et Tamanrasset, située au sud de l'Algérie. Les résultats obtenus à partir de cette analyse ont permis d'établir des corrélations mathématiques entre l'indice du diffus et l'indice de clarté pour différents niveaux de la hauteur du soleil et pour différentes saisons. Une étude comparative a été réalisée. Tout d'abord, pour voir l'impact de la saison sur la précision des modèles établis à l'aide d'indicateurs statistiques, notamment le MBE, le RMSE et le t-stat. Deuxièmement, une autre étude comparative a été réalisée avec d'autres travaux déjà publiés dans la littérature scientifique. L'introduction de la hauteur du soleil en tant que élément prédicteur pour l'établissement de corrélations de la composante diffuse a considérablement réduit l'erreur standard par rapport à d'autres modèles, qui considéraient l'indice de clarté comme la seule et unique variable indépendante. Pour mettre en évidence l'intérêt de la modélisation de l'irradiation solaire diffuse horaire dans les études des systèmes énergétiques solaires, nous avons appliqué les modèles de l'irradiation diffuse établis dans ce travail pour une analyse conceptuelle des systèmes photovoltaïques (dimensionnement et étude des performances). La simulation du système PV établie pour les deux dimensionnements, a démontré que le dimensionnement fait sur la base du modèle horaire du rayonnement solaire présente de meilleures performances.

**Mots clés :** Modélisation de l'irradiation diffuse, Indice de clarté, Hauteur du soleil

# LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 :	Procédure de contrôle de qualité. Enveloppe de dispersion 27
Figure 1.2a :	Nombre d'occurrences et distribution des fréquences cumulées de l'indice de clarté (Kt) au niveau d'Oran et pour l'année complète dans la période 1996-2005, et pour les hauteurs du soleil inférieures à 30°. 31
Figure 1.2b :	Nombre d'occurrences et distribution des fréquences cumulées de l'indice de clarté (Kt) au niveau d'Oran et pour l'année complète dans la période 1996-2005, et pour les hauteurs du soleil supérieures à 30°. 31
Figure 1.3a :	Nombre d'occurrences et distribution des fréquences cumulées (Kt) au niveau d'Oran et pour la saison d'hiver dans la période 1996-2005, et pour les hauteurs du soleil inférieures à 30°. 33
Figure 1.3b :	Nombre d'occurrences et distribution des fréquences cumulées de l'indice de clarté (Kt) au niveau d'Oran et pour la saison d'hiver dans la période 1996-2005, et pour les hauteurs du soleil supérieures à 30°. 33
Figure 1.4a :	Nombre d'occurrences et distribution des fréquences cumulées de l'indice de clarté (Kt) au niveau d'Oran et pour la saison d'été dans la période 1996-2005, et pour les hauteurs du soleil inférieures à 30°. 34
Figure 1.4b :	Nombre d'occurrences et distribution des fréquences cumulées de l'indice de clarté (Kt) au niveau d'Oran et pour la saison d'été dans la période 1996-2005, et pour les hauteurs du soleil supérieures à 30°. 35
Figure 1.5 :	Distribution des fréquences cumulées de l'indice de clarté (Kt) au niveau de la région d'Oran pour l'année complète dans la période de 1996-2005 et pour différentes hauteurs du soleil. 35
Figure 1.6 :	Pourcentage du ciel clair Vs la hauteur du soleil pour des indices de clarté $Kt \geq 0.6$ , Site d'Oran 36
Figure 1.7 :	Nombre d'occurrences et distribution des fréquences cumulées de l'indice de clarté (Kt) au niveau de Tamanrasset et pour l'année complète dans la période 1996-2005, et pour les hauteurs du soleil inférieures à 30°. 37
Figure 1.8 :	Nombre d'occurrences et distribution des fréquences cumulées de l'indice de clarté (Kt) au niveau de Tamanrasset et pour l'année complète dans la période 1996-2005, et pour les hauteurs du soleil supérieures à 30°. 38
Figure 1.9 :	Nombre d'occurrences et distribution des fréquences cumulées de l'indice de clarté (Kt) au niveau de Tamanrasset et pour la saison hivernale dans la période 1996-2005, et pour les hauteurs du soleil inférieures à 30°. 40
Figure 1.10 :	Nombre d'occurrences et distribution des fréquences cumulées de l'indice de clarté (Kt) au niveau de Tamanrasset et pour la saison hivernale dans la période 1996-2005, et pour les hauteurs du soleil supérieures à 30°. 40
Figure 1.11 :	Nombre d'occurrences et distribution des fréquences cumulées de l'indice de clarté (Kt) au niveau de Tamanrasset et pour la saison d'été dans la période 1996-2005, et pour les hauteurs du soleil inférieures à 30°. 42
Figure 1.12 :	Nombre d'occurrences et distribution des fréquences cumulées de l'indice de clarté (Kt) au niveau de Tamanrasset et pour la saison d'été dans la période 1996-2005, et pour les hauteurs du soleil supérieures à 30°. 43

Figure 1.13 :	Distribution des fréquences cumulées de l'indice de clarté ( $K_t$ ) au niveau de la région de Tamanrasset pour l'année complète dans la période de 1996-2005 et pour différentes hauteurs du soleil.	44
Figure 1.14 :	Pourcentage du ciel clair Vs la hauteur du soleil pour des indices de clarté $K_t \geq 0.6$ , Site de Tamanrasset	45
Figure 2.1 :	Variation de l'indice du diffus $K_s$ Vs $K_t$ , pour le site d'Oran sur une période de l'année complète (1996-2005), sous différentes gammes de la hauteur du soleil.	50
Figure 2.2 :	Variation de l'indice du diffus $K_s$ Vs $K_t$ , pour le site de Tamanrasset sur une période de l'année complète (1996-2005), sous différentes gammes de la hauteur du soleil.	51
Figure 2.3 :	Evolution des moyennées de l'indice du diffus $K_s$ en fonction des moyennes de $K_t$ sur une période d'une année complète et pour des hauteurs du soleil inférieures à $30^\circ$ .	52
Figure 2.4 :	Evolution des moyennées de l'indice du diffus $K_s$ en fonction des moyennes de $K_t$ sur une période d'une année complète et pour des hauteurs du soleil supérieures à $30^\circ$ .	52
Figure 2.5 :	Segmentation de l'évolution du couple $K_s$ - $K_t$ en quatre zones de variation	53
Figure 2.6 :	Tracé des valeurs moyennes du $K_s$ Vs $K_t$ pour le mois de janvier 1996 au niveau du site de Tamanrasset	55
Figure 2.7 :	Tracé du $K_s$ Vs $K_t$ pour le même jour de l'année, mais pour deux niveaux de nébulosité différents (B présentant la nébulosité la plus élevée).	55
Figure 2.8 :	Graphique illustrant comment les variations de la masse d'air déplacent le graphique $K_d$ par rapport au $K_t$ . La transition AA 'est provoquée par l'absorption et A'A" par diffusion.	57
Figure 2.9 :	Effet du comportement bimodal clair et nuageux sur la relation $K_d / K_t$ (ligne de droite d'équation (2.7)).	58
Figure 2.10a :	Evolution de l'indice du diffus horaire $K_s$ vs l'indice de clarté $K_t$ pour la saison d'hiver à différentes hauteurs du soleil	61
Figure 2.10b :	Evolution de l'indice du diffus horaire $K_s$ vs l'indice de clarté $K_t$ pour la saison d'été à différentes hauteurs du soleil.	62
Figure 2.10c :	Evolution de l'indice du diffus horaire $K_s$ vs l'indice de clarté $K_t$ pour la période de l'année complète à différentes hauteurs du soleil.	62
Figure 2.11 :	Valeurs de l'indice du diffus horaire $K_s$ vs la hauteur du soleil à $K_t=0.55$ pour une année complète	64
Figure 2.12a :	Evolution de l'indice du diffus horaire $K_s$ Vs l'indice de clarté $K_t$ pour l'année complète à des hauteurs du soleil $<30^\circ$ .	65
Figure 2.12b :	Evolution de l'indice du diffus horaire $K_s$ Vs l'indice de clarté $K_t$ pour l'année complète à des hauteurs du soleil $>30^\circ$ .	66
Figure 2.13a :	Evolution de l'indice du diffus horaire $K_s$ Vs l'indice de clarté $K_t$ pour la saison d'été à des hauteurs du soleil $<30^\circ$ .	66
Figure 2.13b :	Evolution de l'indice du diffus horaire $K_s$ Vs l'indice de clarté $K_t$ pour la saison d'été à des hauteurs du soleil $>30^\circ$ .	67
Figure 2.14a :	Evolution de l'indice du diffus horaire $K_s$ Vs l'indice de clarté $K_t$ pour la saison d'hiver à des hauteurs du soleil $<30^\circ$ .	68
Figure 2.14b :	Evolution de l'indice du diffus horaire $K_s$ Vs l'indice de clarté $K_t$ pour la saison d'hiver à des hauteurs du soleil $>30^\circ$ .	68
Figure 2.15 :	Valeurs de l'indice du diffus horaire $K_s$ Vs la hauteur du soleil à $K_t=0.55$ et pour toutes les périodes de l'année.	69

Figure 3.1 :	La distribution des fréquences cumulées pour différentes valeurs des erreurs relatives RE ( $\pm$ %) pour les neufs modèles avec les coefficients originaux. Station d'Oran.	77
Figure 3.2 :	La distribution des fréquences cumulées pour différentes valeurs des erreurs relatives RE ( $\pm$ %) pour les neufs modèles avec les coefficients originaux. Station de Tamanrasset	78
Figure 3.3 :	La distribution des fréquences cumulées pour différentes valeurs des erreurs relatives RE ( $\pm$ %) pour les neufs modèles avec les coefficients adaptés. Station d'Oran.	81
Figure 3.4 :	La distribution des fréquences cumulées pour différentes valeurs des erreurs relatives RE ( $\pm$ %) pour les neufs modèles avec les coefficients adaptés. Station de Tamanrasset.	82
Figure 3.5 :	Distribution fréquentielle des résidus observés entre la fraction diffuse horaire mesurée et celle prédite avec des coefficients originaux et adaptés des trois modèles : Soares, Jacovides et Hawlader.	85
Figure 4.1a :	Evolution de l'indice du diffus $K_s$ vs l'indice de clarté $K_t$ ainsi que la corrélation correspondante pour la saison d'hiver et les hauteurs du soleil $<30^\circ$	92
Figure 4.1b :	Evolution de l'indice du diffus $K_s$ vs l'indice de clarté $K_t$ ainsi que la corrélation correspondante pour la saison d'hiver et les hauteurs du soleil $>30^\circ$	92
Figure 4.2a :	Evolution de l'indice du diffus $K_s$ vs l'indice de clarté $K_t$ ainsi que la corrélation correspondante pour la saison d'été et les hauteurs du soleil $<30^\circ$	93
Figure 4.2b :	Evolution de l'indice du diffus $K_s$ vs l'indice de clarté $K_t$ ainsi que la corrélation correspondante pour la saison d'été et les hauteurs du soleil $>30^\circ$	93
Figure 4.3a :	Evolution de l'indice du diffus $K_s$ vs l'indice de clarté $K_t$ ainsi que la corrélation correspondante pour l'année complète et les hauteurs du soleil $<30^\circ$	94
Figure 4.3b :	Evolution de l'indice du diffus $K_s$ vs l'indice de clarté $K_t$ ainsi que la corrélation correspondante pour l'année complète et les hauteurs du soleil $>30^\circ$	94
Figure 4.4 :	Comparaison de la distribution fréquentielle des valeurs résiduelles $(K_{S,m} - K_{S,c})$ du modèle proposé avec quatre modèles empiriques choisis, (Site d'Oran).	100
Figure 4.5a :	Evolution de l'indice du diffus $K_s$ vs l'indice de clarté $K_t$ ainsi que la corrélation correspondante pour l'année complète et les hauteurs du soleil $<30^\circ$	101
Figure 4.5b :	Evolution de l'indice du diffus $K_s$ vs l'indice de clarté $K_t$ ainsi que les corrélations correspondantes pour l'année complète et les hauteurs du soleil $>30^\circ$	102
Figure 4.6a :	Evolution de l'indice du diffus $K_s$ vs l'indice de clarté $K_t$ ainsi que les corrélations correspondantes pour la saison d'été et les hauteurs du soleil $<30^\circ$	102
Figure 4.6b :	Evolution de l'indice du diffus $K_s$ vs l'indice de clarté $K_t$ ainsi que la corrélation correspondante pour la saison d'été et les hauteurs du soleil $>30^\circ$	103
Figure 4.7a :	Evolution de l'indice du diffus $K_s$ vs l'indice de clarté $K_t$ ainsi que la corrélation correspondante pour la saison d'hiver et les hauteurs du soleil $<30^\circ$	103

Figure 4.7b :	Evolution de l'indice du diffus $K_s$ vs l'indice de clarté $K_t$ ainsi que la corrélation correspondante pour la saison d'hiver et les hauteurs du soleil $>30^\circ$	104
Figure 4.8 :	Valeurs de l'indicateur statistique MBE (%) pour différents modèles à des hauteurs du soleil bien définies.	107
Figure 4.9 :	Valeurs de l'indicateur statistique t-stat pour différents modèles à différentes gammes de la hauteur du soleil.	109
Figure 4.10 :	Comparaison de la distribution fréquentielle des valeurs résiduelles $(K_{s,m} - K_{s,c})$ du modèle proposé avec quatre modèles empiriques choisis, (Site de Tamanrasset).	110
Figure 5.1 :	Schéma de la distribution du rayonnement diffus sur le dôme du ciel montrant les composantes circumsolaires et l'éclaircissement d'horizon ajoutés à la composante isotropique. Adapté par Perez et al. (1988).	121
Figure 5.2 :	Rayonnement direct, diffus et le réfléchi du sol sur une surface inclinée	123
Figure 5.3 :	Principales parties du système photovoltaïque	125
Figure 5.4 :	Profil de consommation d'un groupe de maisons dans une localité de la région de Tamanrasset	126
Figure 5.5 :	Méthode analytique pour la détermination du cout minimal	128
Figure 5.6 :	Cout de l'installation Vs le nombre d'heures de pénurie	131
Figure 5.7 :	Cout de l'installation Vs le facteur da qualité $K_r$	133
Figure 5.8 :	Variation de PR en fonction de UF	136
Figure 5.9 :	Le nombre d'occurrence et les fréquences cumulées du ratio de performance PR	137
Figure 5.10 :	Variation du ratio de performance PR en fonction de l'irradiation solaire	138
Figure 5.11 :	Evolution des écarts des rendements du système PR/PF	139
Figure 5.12 :	Les écarts des Pertes du système $L_s$	139

# LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 : Banque de données	24
Tableau 1.2 : Nombre d'occurrences et le pourcentage de fréquence de l'indice de clarté (Kt) au niveau d'Oran dans la période (1996-2005), et pour l'année complète.	32
Tableau 1.3 : Nombre d'occurrences et le pourcentage de fréquence de l'indice de clarté (Kt) au niveau d'Oran durant la période (1996-2005), pour la saison d'hiver.	34
Tableau 1.4 : Nombre d'occurrences et le pourcentage de fréquence de l'indice de clarté (Kt) au niveau d'Oran durant la période (1996-2005), pour la saison d'Eté.	34
Tableau 1.5 : Nombre d'occurrences et le pourcentage de fréquence de l'indice de clarté (Kt) au niveau de Tamanrasset dans la période (1996-2005), et pour l'année complète.	38
Tableau 1.6 : Nombre d'occurrences et le pourcentage de fréquence de l'indice de clarté (Kt) au niveau de Tamanrasset dans la période (1996-2005), et pour la saison d'hiver	41
Tableau 1.7 : Nombre d'occurrences et le pourcentage de fréquence de l'indice de clarté (Kt) au niveau de Tamanrasset dans la période (1996-2005), et pour la saison d'Eté.	42
Tableau 3.1 : Pourcentage des résultats correspondants aux différentes valeurs des erreurs relatives RE(%) avec des coefficients originaux des 09 modèles appliqués sur les données d'Oran.	78
Tableau 3.2 : Pourcentage des résultats correspondants aux différentes valeurs des erreurs relatives RE(%) avec des coefficients originaux des 09 modèles appliqués sur les données de Tamanrasset.	79
Tableau 3.3 : comparaison des 09 modèles en termes de MBE, RMSE et t-stat, pour la station d'Oran	80
Tableau 3.4 : comparaison des 09 modèles en termes de MBE, RMSE et t-stat, pour la station de Tamanrasset.	81
Tableau 3.5 : Pourcentage des résultats correspondants aux différentes valeurs des erreurs relatives RE(%) avec des coefficients originaux et adaptés des modèles de Soares, Jacovides et Hawlader, Station d'Oran	82
Tableau 3.6 : Pourcentage des résultats correspondants aux différentes valeurs des erreurs relatives RE(%) avec des coefficients originaux et adaptés des modèles de Soares, Jacovides et Hawlader, Station de Tamanrasset	82
Tableau 3.7 : comparaison des modèles de Soares, Jacovides et Hawlader en termes de MBE, RMSE et t-stat, pour la station d'Oran	83
Tableau 3.8 : comparaison des modèles de Soares, Jacovides et Hawlader en termes de MBE, RMSE et t-stat, pour la station de Tamanrasset.	84
Tableau 4.1 : Coefficients de corrélation des modèles établis pour l'estimation de la composante diffuse de l'irradiation globale horizontale pour les trois (03) périodes de l'année et à tous les paliers de la hauteur du soleil.	95
Tableau 4.2 : Performances statistiques des modèles calculant Ks	96

Tableau 4.3 :	Indicateurs statistiques appliqués pour la validation des modèles empiriques proposés (Station d'Oran).	99
Tableau 4.4 :	Coefficients de corrélation des modèles établis pour l'estimation de la composante diffuse de l'irradiation globale horizontale pour les trois (03) périodes de l'année et à tous les paliers de la hauteur du soleil. (Station de Tamanrasset).	105
Tableau 4.5 :	Indicateurs statistiques appliqués pour la validation des modèles empiriques proposés (Station de Tamanrasset).	108
Tableau 5.1 :	Valeurs optimales du dimensionnement du système PV pour différents nombre d'heures de pénurie	129
Tableau 5.2 :	Dimensionnement du système PV avec un profil journalier du rayonnement solaire	130
Tableau 5.3 :	Couts d'investissement et économies correspondant à quelques niveaux de pénurie.	131
Tableau 5.4 :	Cout d'effacement de l'heure de pénurie.	132
Tableau 5.5 :	Economies relatives et absolues correspondant à quelques niveaux de pénurie.	132
Tableau 5.6 :	Couts d'investissement et économies correspondant à quelques valeurs de Kr.	134
Tableau 5.7 :	Configurations de référence retenues	134

# NOMENCLATURE DE QUELQUES SYMBOLES

Symbole	Définition
$\phi$	La latitude du lieu (°deg),
$\delta$	La déclinaison (°deg)
$\omega_1$	L'angle horaire à l'instant t
$\omega_2$	L'angle horaire à l'instant t+1h
$n$	Le numéro de jour dans l'année
$G_{sc}$	La constante solaire prise égale à 1367W/m <sup>2</sup> ,
$\theta_z$	L'angle zénithal du soleil (°deg)
$I_d$	L'irradiation solaire horaire diffuse (Wh/m <sup>2</sup> )
$I_g$	L'irradiation solaire horaire globale horizontale sur un site donné (Wh/m <sup>2</sup> )
$I_0$	L'irradiation solaire globale hors atmosphere (Wh/m <sup>2</sup> )
$K_d$	La fraction diffuse horaire de l'irradiation solaire globale
$K_t$	L'indice de clarté horaire
$K_s$	L'indice du diffus horaire
$K_{s\text{cor}}$	L'indice du diffus horaire calculé
$K_{s\text{mes}}$	L'indice du diffus horaire mesuré
$N$	Le nombre de valeurs mesurées
$t_c$	Valeur critique égale à 2.9 selon les tables statistiques
$a_0$ & $a_i$	Les coefficients de corrélation du modèle
$m$	Le degré du polynôme régissant la corrélation entre $K_s$ et $K_t$ .

# SOMMAIRE

	Page
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclatures	
<b>Introduction générale</b>	<b>15</b>
<b>Chapitre 01 : Etude qualitative de l'irradiation solaire pour les sites d'Oran et de Tamanrasset</b>	<b>22</b>
Introduction	23
1.1. Traitement des données de mesures	25
1.2. Méthodologie adoptée	28
1.3. Calcul de $K_t$ , $K_d$ et $K_s$	28
1.4. Analyse qualitative des données expérimentales	30
1.4.1. Site d'Oran	30
1.4.1.1. Fréquences d'occurrence et distribution cumulative de l'indice de clarté horaire $K_t$	30
1.4.2. Site de Tamanrasset	36
1.4.2.1. Analyse qualitative des données expérimentales pour une année complète dans la période 1996-2005.	36
1.4.2.2. Analyse qualitative des données expérimentales pour la saison d'hiver dans la période 1996-2005.	39
1.4.2.3. Analyse qualitative des données expérimentales pour la saison d'été dans la période 1996-2005	41
1.5. Conclusion	45
<b>Chapitre 02 : Effet de la diffusion, l'absorption, la masse d'air et de la hauteur du soleil sur l'indice du diffus <math>K_s</math> et l'indice de clarté <math>K_t</math></b>	<b>48</b>
Introduction	49
2.1. Tracé de l'évolution de l'indice du diffus $K_s$ en fonction de l'indice de clarté $K_t$ pour différentes hauteurs du soleil	49
2.2. Segmentation artificielle de la variation de $K_s$ en fonction de $K_t$ en quatre zones.	53
2.2.1. Zone 01	53
2.2.1.1. Effet de la diffusion	54
2.2.1.2. Effet de l'absorption	57
2.2.1.3. Effet de la masse d'air	57
2.2.2. Zone 02	58
2.2.3. Zone 03	58
2.2.4. Zone 04	59
2.3. Effet de la hauteur du soleil sur la corrélation Diffus-Global.	60

2.3.1.	Cas du site d'Oran	60
2.3.2.	Cas du site de Tamanrasset	64
a.	Evolution de l'indice du diffus $K_s$ dans l'intervalle $K_t < 0.3$	64
b.	Evolution de l'indice du diffus $K_s$ dans l'intervalle $K_t > 0.3$ :	64
2.4.	Conclusion	69

### **Chapitre 03 : Corrélation de la fraction diffuse avec l'indice de clarté $K_t$** **71**

	Introduction	72
3.1.	Brève revue des modèles sélectionnés	72
3.1.1.	Corrélation d'Orgill et Hollands	72
3.1.2.	Corrélation d'Erbs	73
3.1.3.	Corrélation de Douglas Reindl	73
3.1.4.	Corrélation de Chendo et Maduekwe	73
3.1.5.	Corrélation de Jacovides	74
3.1.6.	Corrélation de De Miguel	74
3.1.7.	Corrélation de Soares	74
3.1.8.	Corrélation de Hawlader	75
3.1.9.	Corrélation de Boland	75
3.2.	Evaluation des performances des modèles sélectionnés	75
3.2.1.	Analyse comparative en utilisant les coefficients originaux des modèles sélectionnés	77
3.2.2.	Etablissement de nouveaux coefficients pour les trois modèles performants adaptés aux données radiométriques des deux sites : Oran et Tamanrasset	81
3.2.3.	Analyse de la distribution fréquentielle des résidus des trois performants modèles	84
3.3.	Etablissement de nouvelles corrélations adaptées pour les sites d'Oran et de Tamanrasset	84
3.4.	Conclusion	87

### **Chapitre 04 : Corrélation de la composante diffuse de l'irradiation solaire globale en fonction de l'indice de clarté et de la hauteur du soleil** **88**

	Introduction	89
4.1.	Modèles de la composante diffuse du rayonnement solaire globale	90
4.2.	Etablissement de la corrélation mathématique de la composante diffuse solaire pour la station d'Oran	91
4.2.1.	Validation des modèles de corrélation de la composante diffuse de l'irradiation globale solaire.	96
4.2.1.1.	Comparaison des modèles établis pour les différentes périodes considérées	96
4.2.1.2.	Comparaison du modèle de référence avec les modèles établis et présentés dans d'autres travaux.	97
4.2.1.3.	Distribution fréquentielle des valeurs résiduelles	99
4.3.	Etablissement de la corrélation mathématique de la composante diffuse solaire pour la station de Tamanrasset	101
4.3.1.	Validation des modèles d'estimation de l'indice du diffus $K_s$	106

4.3.1.1.	Comparaison des modèles établis de $K_s$ avec les modèles rapportés dans la littérature.	106
4.3.1.2.	Distribution fréquentielle des valeurs résiduelles ( $K_{s,c} - K_{s,m}$ )	109
4.4.	Conclusion	113
<b>Chapitre 05 : Impact du profil du rayonnement solaire sur le dimensionnement et les performances des systèmes photovoltaïques</b>		<b>115</b>
	Introduction	116
5.1.	Estimation de l'irradiation solaire globale journalière sur le plan des modules photovoltaïques	117
5.1.1.	Estimation du rayonnement solaire diffus journalier sur une surface horizontale.	117
5.1.2.	Rayonnement global journalier sur les surfaces inclinées	118
5.2.	Irradiation solaire globale horaire sur une surface inclinée	119
5.3.	Etude conceptuelle du dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome	124
5.3.1.	Description de la méthode de dimensionnement basée sur le modèle horaire du rayonnement solaire.	125
5.3.1.1.	Méthodologie adoptée et suivie	125
a.	Profil de consommation d'énergie électrique	125
b.	Critères de dimensionnement	126
c.	Notion et définition de la pénurie	126
5.3.1.2.	Recherche de la solution optimale	127
5.3.2.	Description de la méthode de dimensionnement basée sur le modèle journalier du rayonnement solaire.	129
5.4.	Analyse de la sensibilité du système	130
5.4.1.	Analyse de la sensibilité du système selon le profil horaire du rayonnement solaire	130
5.4.2.	Analyse de la sensibilité du système selon le profil journalier du rayonnement solaire.	133
5.5.	Analyse des performances des deux systèmes PV de référence.	134
5.5.1.	Variation du ratio de performance $PR$ en fonction du facteur d'utilisation $UF$	136
5.5.2.	Variation du ratio de performance $PR$ en fonction du rayonnement solaire global	137
5.5.3.	Calcul des écarts de performances	138
5.5.3.1.	Ecarts des rendements du système $PR/PF$	138
5.5.3.2.	Ecarts des pertes du système $L_s$	139
5.6.	Conclusion	140
<b>Conclusion Générale</b>		<b>142</b>
<b>Références</b>		<b>145</b>

## **INTRODUCTION GENERALE**

Afin de concevoir un système énergétique solaire ou d'évaluer le potentiel d'énergie solaire d'une région ou d'une localité donnée, il est nécessaire de disposer d'informations sur la disponibilité du rayonnement solaire. Dans des conditions de ciel dégagé, le rayonnement solaire qui frappe la surface de la Terre peut généralement être calculé à l'aide de modèles théoriques.

Toutefois, dans les régions où le ciel est entièrement ou partiellement couvert, les valeurs moyennes mensuelles ou annuelles du rayonnement solaire global peuvent être estimées à l'aide de paramètres climatiques, tels que le nombre d'heures d'ensoleillement [1, 2]. Les corrélations établies sous ces considérations sont basées sur les valeurs mesurées du rayonnement solaire global. Par conséquent, il est nécessaire d'avoir accès aux valeurs mesurées du rayonnement solaire.

Dans de nombreuses régions du monde, les valeurs journalières ou horaires du rayonnement solaire sur des surfaces horizontales sont enregistrées et stockées. Ces valeurs correspondent généralement au rayonnement solaire global.

Pour calculer le rayonnement solaire sur des surfaces non horizontales, il est nécessaire de procéder, en premier lieu, en l'estimation de la composante diffuse (ou directe) du rayonnement solaire global sur une surface horizontale.

Avant 1990, vingt (20) stations radiométriques sur le territoire algérien permettaient, outre la mesure de la température, la pluviométrie, l'humidité relative, etc., d'enregistrer le rayonnement solaire global et ses composantes directe et diffuse, sur une surface horizontale. À l'origine, ces données posaient un certain nombre de problèmes principalement liés à la continuité et la disponibilité des enregistrements de données sur le rayonnement solaire. Depuis 1990, l'Office national de météorologie (ONM) d'Algérie a mis en place un nouveau réseau de stations météorologiques. La plupart des stations de ce nouveau réseau enregistraient une irradiation globale sur une surface horizontale. Quelques-unes de ces stations effectuaient également des mesures indépendantes du rayonnement solaire diffus.

Pour les régions ne disposant pas d'équipements de mesure, le principe de base consiste à établir des corrélations entre le rayonnement global et sa composante diffuse à l'aide des valeurs mesurées de ces deux quantités obtenues des stations

de mesure existantes, puis à les appliquer dans des régions où les valeurs de la composante diffuse ne sont pas disponibles.

Afin de mieux expliquer le but de la présente étude, il nous a été judicieux d'abord de passer en revue, sommairement, sur les travaux qui ont été effectués dans ce domaine et présentés dans la littérature scientifique.

Une prédiction, pour des journées particulières, du rayonnement diffus journalier par le rayonnement global journalier a été établie pour la première fois par Liu & Jordan [3]. Ils ont développé une corrélation entre la fraction diffuse  $K_d$  et l'indice de clarté  $K_t$ , en utilisant les données de plusieurs stations aux états unis. Par la suite, Choudhoury [4] et Stan Hill [5], ont appliqué l'approche de Liu & Jordan, en utilisant les données provenant de deux stations, une en Inde et l'autre en Israël. Leurs estimations donnaient des valeurs plus élevées du diffus par rapport à celles trouvées par Liu-Jordan [3]. Ruth et Chant [6] l'ont appliqué pour quatre stations canadiennes. Un certain nombre de raisons ont été apportées relevant la non concordance de la corrélation de Liu & Jordan et celles rapportées dans [4,6].

Ruth et Chant [6] ont indiqué que la raison de cet écart semblait être dû au fait que la latitude avait une influence sur ces corrélations. Tandis-que Buckius et King [7] ont prouvé que non seulement la latitude du lieu semble avoir une influence, mais d'autres paramètres tels que l'albédo et la masse d'air aboutissent à des valeurs plus élevées de la composante diffuse.

Page [8], en utilisant une approche d'analyse par régression, a présenté une corrélation linéaire entre la fraction diffuse journalière et l'indice de clarté  $K_t$ . Il a utilisé des moyennes journalières et mensuelles du rayonnement diffus et global à partir d'un certain nombre de stations situées dans le nord ainsi que dans l'hémisphère sud. Les résultats de corrélations établies par Page n'étaient pas en conformité avec ceux issus de la corrélation de Liu & Jordan.

Klein & Duffie [9], en utilisant des corrélations du rayonnement diffus établies par [4-5], et ont recalculé les relations entre la fraction diffuse et  $K_t$  en employant l'approche statistique de [3]. Ils ont conclu qu'une corrélation universelle doit être proposée et y reste encore à développer.

En utilisant le nombre d'heures d'ensoleillement comme paramètre prédicteur, Iqbal [10, 11] a présenté des expressions simples où l'irradiation diffuse peut être estimée

soit à partir de l'irradiation globale terrestre ou l'irradiation globale hors atmosphère. L'avantage de l'utilisation de ce type de corrélations est que les mesures du nombre d'heures d'ensoleillement sont largement disponibles partout dans le monde.

Le rayonnement global horaire sur des surfaces horizontales est maintenant enregistré dans de nombreuses stations dans le monde. Bien que le rayonnement global horaire soit mesuré dans de nombreux endroits, les stations de mesure du rayonnement diffus horaire sont extrêmement rares. Il est donc nécessaire de développer des méthodes de prédiction de la composante diffuse du rayonnement global horaire.

Erbs et al. [12] ont utilisé une nouvelle base de données (composée de quatre stations météorologiques américaines) composée d'un rayonnement direct horaire et d'un rayonnement global afin de développer une estimation de la fraction diffuse horaire, quotidienne et mensuelle. Ils ont également déterminé à quel point ces relations dépendent de la saison et du lieu.

Orgill et Hollands [13], en utilisant les données d'une station au Canada, ont présenté une corrélation entre la fraction diffuse horaire  $K_d$  et l'indice de clarté  $K_t$ . Les résultats de leurs estimations sont pratiquement acceptables, sauf dans les conditions d'un temps nuageux.

D'autre part, Iqbal [14] et Skartveit et Olseth [15] ont utilisé deux prédicteurs pour leurs corrélations, l'indice de clarté et la hauteur du soleil. Garrison [16] a proposé une dépendance de la fraction diffuse à l'albédo de surface, de la précipitation des eaux pluviales dans l'atmosphère, de la turbidité atmosphérique, de la hauteur du soleil et du rayonnement global horizontal. Mais aucune autre analyse statistique n'ayant été réalisée.

Reindl et al. [17] ont ajouté deux autres prédicteurs significatifs à l'indice de clarté et à la hauteur du soleil : la température ambiante et l'humidité relative. Ils ont donc réussi à réduire l'erreur standard des modèles type Liu et Jordan. Ils ont utilisé une régression itérative pour réduire un ensemble de 28 variables prédictives potentielles à quatre prédicteurs significatifs.

De plus, Skartveit et Olseth [18] ont ensuite introduit un nouveau paramètre : l'indice de variabilité horaire, qui prend en compte la variation de l'indice de clarté entre deux intervalles de temps successifs. Ils ont utilisé les données horaires de

plusieurs stations européennes et ont évité les périodes où une couverture neigeuse importante était présente.

D'un autre côté, Maxwell [19] a développé un modèle exponentiel pour l'estimation du rayonnement direct à partir du rayonnement global. Le modèle s'appelait « modèle DISC ». Ce modèle a ensuite été amélioré par Perez et al. [20]. Ils ont présenté deux modèles différents : le premier est une correction du modèle DISC et le second est composé de relations linéaires. La température de surface et l'humidité relative sont utilisées lorsqu'elles sont disponibles. Comme dans Skartveit et Olseth [17], un indice de variabilité horaire a été introduit. Un tableau quadridimensionnel de constantes numériques permettant d'ajuster les valeurs estimées a également été présenté. La base de données était composée des enregistrements de 18 stations aux États-Unis et en Europe. D'autres modèles ont été développés sur la base de ceux mentionnés ci-dessus. Par exemple, Gonzalez et Calbo [21] ont introduit un modèle, en utilisant les données de stations espagnoles, basé sur le rapport entre le rayonnement diffus et le rayonnement global extraterrestre.

Marty [22] a développé une méthode de splines cubiques utilisant la valeur mesurée à midi solaire dans des conditions du ciel clair, pour estimer la fraction diffuse. Maintenant, la nouvelle méthode estime la fraction diffuse en utilisant comme paramètre principal la transmissivité du rayonnement global comparée au rayonnement extraterrestre. Il utilise des données d'intervalle de deux minutes, qui sont ensuite moyennées sur 30 minutes.

Boland et al. [23] affirment que la prévisibilité n'est pas significativement améliorée lorsque la hauteur du soleil est utilisée comme prédicteur. Ils montrent également que le modèle pour un intervalle de 15 minutes est essentiellement le même que pour les intervalles horaires. De plus, ils démontrent que le temps solaire apparent est un bon deuxième prédicteur. L'étude a été menée en Australie et devrait donc être étendue à d'autres régions.

De Miguel et al [24] ont développé leurs propres modèles liés au projet CLIMED, en utilisant des données de l'Europe méditerranéenne et en s'appuyant sur le fait que la plupart des modèles ont été établis pour les localités de l'hémisphère nord à albédo et masse d'air élevés. Ils ont procédé à un examen approfondi de ce type

de corrélation avec la proposition d'adopter le type de modèle linéaire d'Orgill et Hollands [13].

D'autres auteurs tels que Soares [25] ont adopté la technique des réseaux de neurones pour l'estimation du rayonnement diffus.

Munneer et Munawwar [26] ont étudié l'effet de la fraction d'ensoleillement, de la couverture nuageuse et de la masse d'air sur la fraction diffuse. Ils ont remarqué que le dernier paramètre a une grande influence sur la fraction diffuse pour des jours particuliers où le ciel est pratiquement clair. Cependant, pour les jours couverts, les deux premiers paramètres sont plus significatifs.

Boland et al. [27] ont utilisé une fonction logistique qui consiste à utiliser une fonction linéaire ou non linéaire à différents intervalles. Ils ont établi un modèle basé sur la fonction exponentielle. En outre, ils ont mis au point une méthode de traitement des données afin d'obtenir de bonnes performances pour leurs modèles. En 2010, un nouveau modèle, appelé modèle BRL (modèle Boland-Ridley-Lauret) [28], a été créé, fondé sur une fonction logistique.

Helbig [29] a présenté un modèle pour la balance du rayonnement de surface à ondes courtes en terrain complexe. Pour l'estimation du rayonnement diffus, elle a appliqué une combinaison de deux modèles proposés par Reindl et al. [17] Reindl (I) utilise à la fois l'indice de clarté et la hauteur du soleil, tandis que Reindl (II) ne considère que l'indice de clarté. Le modèle de Reindl-Helbig est une amélioration par rapport au modèle établi par Erbs [12]. Cependant, on peut clairement voir que ce modèle de décomposition surestime le rayonnement diffus mesuré. Helbig a donc déclaré qu'aucun modèle de décomposition fiable n'était applicable aux Alpes de la Suisse orientale. Ainsi, un modèle statistique valable au moins pour les Alpes suisses devrait être développé à partir des valeurs mesurées localement du rayonnement diffus et du rayonnement global.

Les modèles mentionnés ci-dessus ont été comparés les uns aux autres sur différents sites. À titre d'exemple, Nottton et al. [30] ont comparé différents modèles sur Ajaccio, un site balnéaire méditerranéen. Une étude similaire a été réalisée par Gueymard [31], par Jacovides et al. [32] à Chypre ; Possadillo et al [33] ont mis l'accent sur la possibilité d'inclure la hauteur du soleil en tant que paramètre en plus de l'indice de clarté.

Des modèles analytiques ont été établis à partir des données radiométriques de la station de Cordoba (Espagne). Enfin, Magarreiro et al [34], dans le but d'estimer le rayonnement solaire sur la base de données de la région açorienne, ont évalué plusieurs modèles de la littérature scientifique et ont constaté que le modèle établi par BRL [28] était statistiquement plus significatif.

En ce qui concerne notre étude, nous avons repris les travaux préparés par Iqbal et Garrison sur la dépendance du rayonnement solaire diffus à la hauteur du soleil dans différentes conditions météorologiques. Pour se faire, L'étude élaborée dans ce manuscrit est appliquée sur deux localités algériennes, à savoir : Oran, région côtière située au nord-ouest de l'Algérie, et Tamanrasset, située au sud de l'Algérie. Le cœur de cette thèse est composé de 05 chapitres, basés sur quatre travaux de recherche examinés par des pairs. Les objectifs de recherche de chaque chapitre sont présentés ci-dessous et le lien avec l'objectif général de la thèse est expliqué. Le premier chapitre traite l'évolution de la fraction diffuse ou de l'indice du diffus solaire horaire sous forme de nombre d'occurrence en fonction des conditions atmosphériques régnantes dans les régions et les localités considérées. De plus, une analyse statistique basée sur les fréquences et distributions de fréquences cumulées de l'indice de clarté horaire et une caractérisation subséquente des conditions du ciel des stations, ont été effectuées à la suite des premiers travaux initiés par Liu-Jordan [3] et de ceux de Li et al [34]. Cette technique de courbes de distribution cumulative est adoptée dont l'objectif est de faire apparaître l'impact de la hauteur du soleil, en plus de l'état du ciel, sur la quantité de l'énergie solaire globale et sa composante diffuse.

Le chapitre 2 vise à apporter des explications physiques de la large dispersion observée sur l'évolution de l'indice du diffus  $K_s$  dans l'intervalle  $0.2 \leq K_t < 0.8$ . Cette dispersion qui est due à la variabilité de certains paramètres atmosphériques tels que la masse d'air, les coefficients de troubles d'Angstrom, l'albédo de surface, la diffusion, l'absorption et la géométrie du soleil a été bien traitée dans cette partie d'étude.

Le troisième chapitre présente une étude comparative de neuf (09) modèles d'estimation de la fraction diffuse horaire du rayonnement solaire global horizontal,

établis par différents chercheurs activant dans le domaine des énergies renouvelables.

Le but de cette étude comparative est d'adopter en fin de compte un modèle avec des performances bien adaptées aux localités algériennes considérées.

Le quatrième chapitre explore la possibilité de réduire l'erreur standard dans la modélisation de la composante diffuse en ajoutant la hauteur du soleil comme un prédicteur significatif impactant sensiblement cette composante diffuse. Une étude quantitative comparative a été traitée, dans ce même chapitre, sur l'évolution de la composante diffuse du rayonnement solaire global et a permis de développer des corrélations mathématiques entre l'indice diffus  $K_s$  et l'indice de clarté  $K_t$  pour différents niveaux de la hauteur du soleil et pour les saisons d'hiver et d'été ainsi que pour la période de l'année complète.

Dans le chapitre cinq (05), nous avons mis en exergue l'impact du profil du rayonnement solaire dans le dimensionnement et même dans la simulation des systèmes énergétiques notamment les systèmes photovoltaïques. Le profil le plus utilisé dans le dimensionnement des systèmes photovoltaïques est le profil du rayonnement solaire journalier, mais il s'avère que les installations faites sont souvent sur dimensionnées engendrant des surcouts significatifs. Pour pallier à cette problématique, nous avons établi une analyse conceptuelle comparative de deux techniques de dimensionnement basées sur deux profils du rayonnement solaire : horaire et journalier. Nous avons établi dans notre étude deux techniques de dimensionnement basées sur les deux profils ci-dessus, les résultats de performances des deux techniques de dimensionnement et de simulation des systèmes PV ont été soigneusement traités et analysés.

## **Chapitre 01 :**

Etude qualitative de l'Irradiation solaire pour les sites  
d'Oran et de Tamanrasset

## Introduction

Le flux d'énergie solaire reçu en dehors de l'atmosphère, par unité de surface et par intervalle d'une heure  $I_o$  (requis pour le calcul de l'indice de clarté horaire  $K_t$  et de l'indice du diffus solaire horaire) sont respectivement estimés analytiquement par les expressions établies par Iqbal [14, 35] avec la constante solaire  $I_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$ . L'évolution de la fraction diffuse ou de l'indice du diffus solaire horaire sous forme de nombre d'occurrence ainsi que l'indice de clarté horaire est présentée et discutée en fonction des conditions atmosphériques inhérentes à des régions et des localités considérées.

De plus, une analyse statistique (fréquence et distribution de fréquences cumulées) de l'indice de clarté horaire et une caractérisation subséquente des conditions du ciel des stations, prises comme cas d'étude dans ce travail, ont été effectuées à la suite des premiers travaux initiés par Liu-Jordan [3] et de ceux de Li et al [36].

A l'aide des données provenant d'un réseau de 27 stations comptant chacune environ cinq (05) années de mesures radiométriques, Liu-Jordan ont proposé un ensemble de courbes de distribution cumulative (CDC) généralisées, utilisées depuis, dans de nombreuses études.

L'affirmation de l'applicabilité universelle des CDC généralisées par Liu-Jordan, a été contestée par plusieurs travaux typiques réalisés, entre autres, par Hawas et Muneer [37], Saunier et al [38], Ideriah et souliman [39] et Kuye et Jagtap [40] pour certaines régions tropicales.

Par ailleurs, cette technique de courbes de distribution cumulative a été adoptée pour notre cas d'étude en faisant apparaître l'impact de la hauteur du soleil, en plus de l'état du ciel, sur la quantité de l'énergie solaire globale et sa composante diffuse. En termes de classification des conditions du ciel, l'indice de clarté est un paramètre largement utilisé car il ne dépend que de l'irradiation solaire globale, c'est-à-dire d'un paramètre mesurable. Un faible indice de clarté signifie un faible rayonnement solaire global, ce qui représente généralement un ciel nuageux avec une partie élevée de sa composante diffuse. Un indice de clarté élevé signifie une quantité élevée d'énergie solaire globale, dominé par sa composante solaire directe.

Cependant, il n'existe pas de valeurs de  $K_t$  précises pour définir les conditions du ciel. Plusieurs chercheurs ont donc adopté des valeurs différentes, on peut citer par

exemple, Reindl et al [17] qui ont proposé que pour des valeurs de  $K_t > 0.6$  le ciel est considéré comme clair et dégagé, et pour des  $K_t < 0.2$  le ciel est complètement couvert. Li et al [36] ont utilisé des valeurs de  $K_t < 0.15$  pour un ciel couvert, et  $K_t > 0.7$  pour un ciel bien dégagé. Hawlader [41] a proposé que pour  $K_t < 0.22$ , le ciel est complètement couvert, et que pour  $K_t > 0.77$  le ciel est clair...etc.

Pour notre cas d'étude, les valeurs de  $K_t < 0.3$ ,  $0.3 \leq K_t \leq 0.6$  et  $K_t > 0.6$  ont été utilisées pour définir le ciel couvert, partiellement couvert (nuageux) et temps clair respectivement, sur la base de nos expériences dans le domaine.

L'étude présentée dans ce chapitre traite le cas de deux sites représentatifs. Le premier site est Oran qui est la principale ville sur la côte nord-ouest de la Méditerranée en Algérie et la deuxième plus grande ville du pays. Oran présente un climat semi-aride avec des hivers doux et humides et des étés chauds et secs. Le climat d'Oran montre les influences d'un climat méditerranéen. Cependant, la combinaison de la température annuelle moyenne relativement élevée de la ville et des précipitations annuelles relativement faibles l'empêche de tomber dans cette catégorie de climat. Oran fait en moyenne 326 mm (13 in) de précipitations par année, dont la plus grande partie se situe entre novembre et mai. Les étés sont chauds et secs avec des températures moyennes élevées dans le mois le plus chaud (août) approchant les 32 degrés Celsius. Les hivers sont doux à Oran, avec des températures élevées dans le mois le plus frais (janvier), environ 17 degrés Celsius. Le deuxième site choisi est la région de Tamanrasset qui est une ville oasisienne dans le sud de l'Algérie, située dans les montagnes de l'Ahaggar. Elle culmine une altitude de 1320 mètres. Tamanrasset a un climat désertique chaud, avec des étés très chauds et des hivers doux. Il y a très peu de pluie tout au long de l'année, bien que la pluie occasionnelle tombe à la fin de l'été du fait qu'elle est située à l'extension nord de la zone de convergence inter tropicale.

Pour élaborer un modèle de la composante diffuse du rayonnement solaire adapté à nos régions, nous avons dans un premier temps utilisé des rayonnements solaires diffus et global mesurés pendant dix (10) années pour les deux localités considérées Oran et Tamanrasset. Ces données ont été utilisées pour examiner l'influence des paramètres radiométriques tels que l'indice de clarté et la hauteur du soleil sur la composante diffuse du l'irradiation solaire globale.

Dans le tableau 1.1 sont consignées les périodes de la base de données qui ont été utilisées pour les sites sélectionnés.

Tableau 1.1 : Banque de données

Site	Oran	Tamanrasset
Latitude	35.7° Nord	22.8° Nord
Période des données	01-01-1996 31-12-2005	01-01-1996 31-12-2005

Les stations de mesure de ces données sont installées au niveau des toits du siège des directions régionales de l'office national de la météorologie (ONM) d'Oran et de Tamanrasset. Ces deux stations sont équipées chacune par deux pyranomètres spectraux de précision, type EPPLEY PSP.

Le premier pyranomètre sert à mesurer le rayonnement solaire global et le deuxième, muni d'un anneau d'ombrage, est dédié pour la mesure de la composante diffuse du rayonnement global.

Les spécifications de ce type d'équipements sont les suivantes :

- Sensibilité : environ  $9\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$
- Impédance : environ  $650\Omega$
- Linéarité :  $\pm 0.5\%$  de 0 à  $2800\text{W}/\text{m}^2$
- Temps de réponse : 01 seconde (Signal 1/e).

## 1.1. Traitement des données de mesures

Les données utilisées dans cette étude ont été fournies par l'Office national de la météo

(ONM). Dans un premier temps, les données brutes sont traitées pour s'assurer qu'elles sont suffisantes et fiables car elles déterminent la précision des corrélations empiriques qui seront établies et qui seront également à la base du développement des modèles. Ce processus de traitement est effectué afin d'identifier les données manquantes ou erronées. Ainsi, dans le cas de données manquantes, la zone correspondante est remplie par une série de chiffres qui indique clairement que les mesures sont erronées. Dans la base de données, les heures correspondant à une donnée manquante ou erronée sont automatiquement éliminées. De même, les

données qui ne semblent pas avoir un sens physique telles que les valeurs négatives de l'irradiation solaire ou la fraction diffuse supérieure à 1 sont systématiquement éliminées.

En outre, certaines règles de base ont été adoptées pour contrôler les données qui pourraient affecter les corrélations. Par exemple, dans des conditions de ciel couvert (faibles valeurs de  $K_t$ ), il est raisonnable de considérer qu'une grande partie du rayonnement solaire est diffusée par les nuages dans l'atmosphère, ce qui entraîne une quantité importante de la fraction diffuse. Ces règles sont exprimées dans les cas 1 et 2 [17] présentés ci-après.

Le cas 1 donne les limites de la fraction diffuse sous ciel couvert. Si une mesure horaire fournit une valeur de la fraction diffuse inférieure à 0,9 pour un indice de clarté inférieur à 0,2, cette mesure est alors supprimée.

$$\text{Cas 1} \quad K_d < 0.9 \quad \text{et} \quad K_t < 0.2$$

De même, le cas 2 donne les limites de la fraction diffuse sous ciel clair.

$$\text{Cas 2} \quad K_d > 0.8 \quad \text{et} \quad K_t > 0.6$$

Pour améliorer la qualité des données de mesure de l'irradiation solaire globale et sa composante diffuse, une autre stratégie de filtrage de données est adoptée aussi pour identifier d'autres valeurs aberrantes ou physiquement insignifiantes. Dans cette stratégie de filtrage, nous avons utilisé la procédure d'écart type, basée sur le concept d'enveloppe de dispersion introduite par Claywell et al [42]. La figure (1.1) montre un exemple d'enveloppe de dispersion des couples de fraction diffuse et d'indice de clarté. Cette enveloppe de dispersion étant la région limitée par deux courbes en pointillés, c'est-à-dire les courbes inférieure et supérieure.

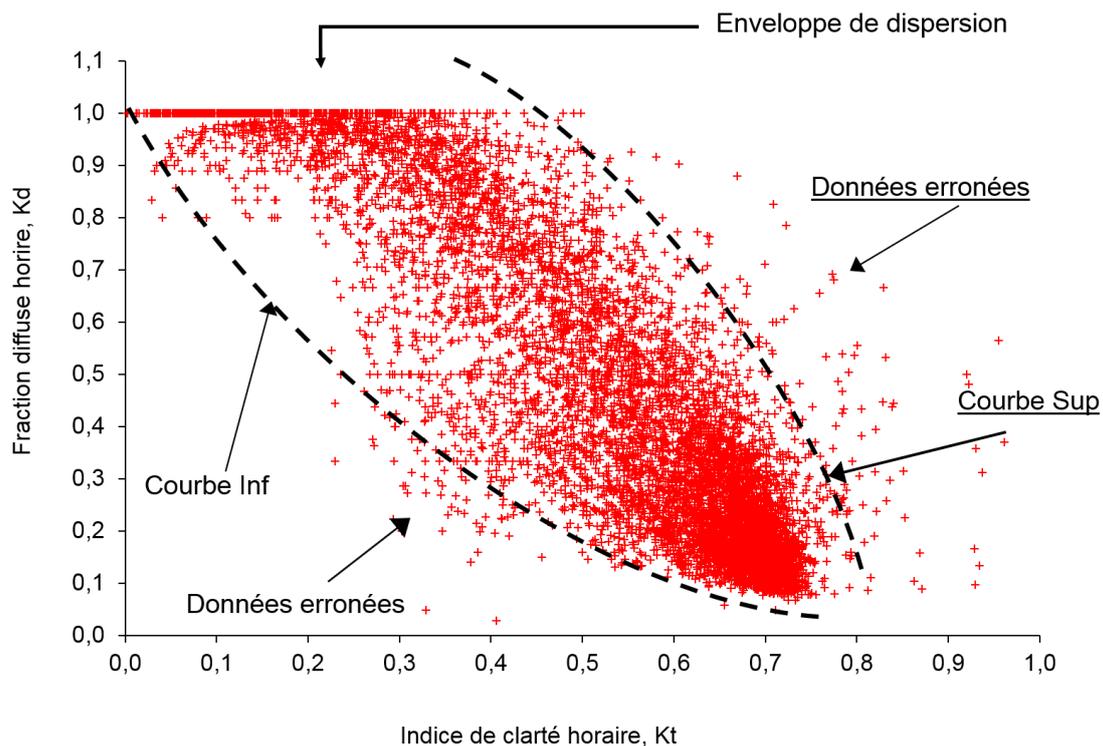


Fig.1.1 : Procédure de contrôle de qualité. Enveloppe de dispersion.

Raisonnablement, toutes les données aberrantes, hors de l'enveloppe de dispersion, doivent être traitées. Les courbes inférieure et supérieure sont définies selon la procédure de l'écart type suivante :

Les données de mesure pour la période considérée (1996-2005) ont été divisées en dix franges égales, basées selon les valeurs de l'indice de clarté. Pour chaque frange 'F', nous calculons la valeur moyenne de la fraction diffuse horaire  $K_{dF}$  et la valeur de l'écart type  $\sigma_F$ . L'enveloppe de dispersion considérée inclut des valeurs comprises dans la plage  $\pm 2\sigma_F$ . La courbe inférieure provient de l'interpolation des dix couples de valeurs  $(K_F ; K_{dF} - 2\sigma_F)$  où  $K_F$  est la valeur médiane de la frange F. De même, la courbe supérieure est le résultat de l'interpolation des dix couples  $(K_F ; K_{dF} + 2\sigma_F)$ . Toutes les données se trouvant hors de l'enveloppe de dispersion ont été éliminées. Ces tests aident à éliminer les données erronées en minimisant les impacts qui provoquent des écarts dans la corrélation à établir.

Après le traitement et filtrage des données, le nombre de données horaires réellement pris en compte dans cette étude est de 30255 pour Oran et de 21640 pour Tamanrasset.

## **1.2. Méthodologie adoptée**

La procédure suivie dans la conduite du travail dans ce chapitre est subdivisée en plusieurs étapes :

Dans une première étape, les données horaires mesurées de l'irradiation globale et de sa composante diffuse sont utilisées pour déterminer l'indice de clarté  $K_t$ , la fraction diffuse  $K_d$ , l'indice du diffus  $K_s$  et la hauteur du soleil exprimée ici par le terme  $\cos(\theta_z)$

Dans une deuxième étape, des histogrammes du nombre d'occurrence de l'indice de clarté horaire, suivis par des distributions de fréquences cumulées ont été tracés dans le but de quantifier la fréquence d'apparition de l'état du ciel (clair, couvert et nuageux) en fonction de l'indice de clarté sur 10 ans couvrant la période 1996 - 2005.

Les histogrammes et les fréquences cumulées ont été tracés pour différentes gammes de la hauteur du soleil à savoir : les gammes ( $0^\circ$ - $08^\circ$ ), ( $08^\circ$ - $18^\circ$ ), ( $18^\circ$ - $30^\circ$ ), ( $30^\circ$ - $45^\circ$ ), ( $45^\circ$ - $60^\circ$ ) et les hauteurs du soleil  $> 60^\circ$ .

La construction de ces histogrammes et les courbes établis à l'échelle d'une année complète, est répétée pour toutes les saisons d'hiver et d'été sur la période considérée (1996-2005). Le but de cette partie d'étude est d'évaluer l'influence des saisons sur la quantification de la composante diffuse du rayonnement solaire globale pour tous les états du ciel et pour toutes les gammes de la hauteur du soleil considérées pour chaque saison et période prises dans notre cas d'étude.

### **1.3. Calcul de $K_t$ , $K_d$ et $K_s$ :**

Le calcul des paramètres  $K_t$ ,  $K_d$  et  $K_s$  est déterminé par les expressions mathématiques suivantes [43]

#### **❖ L'indice de clarté horaire $K_t$ :**

Il est défini comme étant le rapport entre l'irradiation globale horizontale horaire  $I_g$ , mesurée sur un site donné, et l'irradiation globale horaire hors atmosphère  $I_0$ ,

$$K_t = \frac{I_g}{I_0} \quad (1.1)$$

Le calcul de  $I_0$  se fait par l'expression suivante :

$$I_0 = \frac{12 * 3600}{\pi} * G_{SC} \left( 1 + 0.033 * \cos\left(\frac{360 * n}{365}\right) \right) * \left[ \cos(\phi) * \cos(\delta) * (\sin(\omega_2) - \sin(\omega_1)) + \frac{\pi * (\omega_2 - \omega_1)}{180} * \sin(\phi) * \sin(\delta) \right] \quad (1.2)$$

La déclinaison  $\delta$  est donnée par l'équation suivante :

$$\delta = 23.45 * \sin\left\{ 360 * \frac{284 + n}{365} \right\} \quad (1.3)$$

La hauteur du soleil est exprimée par la relation (1.4) :

Pour des surfaces horizontales (le cas de notre étude), l'angle de la hauteur du soleil est défini comme étant le complément de l'angle zénithal du soleil,  $\theta_z$ . Il est compris entre 0 et 90°. Son expression serait alors :

$$\cos(\theta_z) = \cos(\phi) * \cos(\delta) * \cos(\omega) + \sin(\phi) * \sin(\delta) \quad (1.4)$$

#### ❖ La fraction diffuse horaire $K_d$ :

La fraction diffuse horaire  $K_d$  est par définition le rapport entre l'irradiation horaire diffuse  $I_d$  et l'irradiation globale horaire horizontale  $I_g$ ,

$$K_d = \frac{I_d}{I_g} \quad (1.5)$$

#### ❖ L'indice du diffus horaire $K_s$ :

L'indice du diffus  $K_s$  est défini comme étant le rapport entre l'irradiation horaire diffuse  $I_d$  et l'irradiation globale horaire hors atmosphère  $I_0$ .

Cet indice de diffus peut être exprimé également par la combinaison de l'indice de clarté et la fraction diffuse :

$$K_s = \frac{I_d}{I_0} \quad (1.6)$$

Partant de ces définitions nous notons que la valeur de  $K_s$  dépend étroitement de  $K_t$ , c'est-à-dire que plus  $K_t$  tend vers 1 ( $K_t \geq 0.8$ ), plus l'indice du diffus  $K_s$  avoisinera la valeur de la fraction diffuse  $K_d$  ( $K_s \approx K_d$ ) et pour des valeurs de  $K_t \leq 0.3$  ( $K_d \approx 1$ ),  $K_s$  varie linéairement avec  $K_t$ .

## **1.4. Analyse qualitative des données expérimentales**

### **1.4.1. Site d'Oran**

#### **1.4.1.1. Fréquences d'occurrence et Distribution cumulative de l'indice de clarté horaire $K_t$ :**

Le nombre d'occurrence et les fréquences cumulées en fonction de l'indice de clarté  $K_t$  ont été tracés sur une base de données annuelle et saisonnière et pour des gammes de hauteurs du soleil bien définies, ( $0^\circ$ - $08^\circ$ ), ( $08^\circ$ - $18^\circ$ ), ( $18^\circ$ - $30^\circ$ ), ( $30^\circ$ - $45^\circ$ ), ( $45^\circ$ - $60^\circ$ ) et supérieures à  $60^\circ$  comme le montrent les figures 1.2a, 1.2b, 1.3a, 1.3b, 1.4a et 1.4b.

Les tableaux (1.2-1.3) et la distribution des fréquences cumulées donnent également, à titre d'illustration, une idée sur la fréquence d'apparition des différentes conditions de l'état du ciel.

Les figures 1.2a, 1.2b et le tableau 1.2, qui représentent la base de données sur une période annuelle, montrent que le nombre d'occurrence pour des hauteurs du soleil inférieures à  $30^\circ$ , présente une tendance en forme de courbe de Gauss avec un pic étendu dans la gamme de  $0.6 < k_t < 0.75$ . Par contre pour les hauteurs du soleil supérieures à  $30^\circ$ , le pic est atteint aux alentours de  $0.7 < k_t < 0.8$ .

#### **Région $k_t < 0.6$**

En analysant la région où le ciel est couvert ou nuageux ( $k_t < 0.6$ ) dans laquelle la quantité du diffus est assez importante, on trouve respectivement, pour la gamme des hauteurs du soleil ( $0^\circ$ -  $08^\circ$ ) un pourcentage de 81% du nombre total des données d'observation, 66% pour la gamme des ( $08^\circ$ - $18^\circ$ ) et 52% pour la gamme ( $18^\circ$ - $30^\circ$ ). Pour les hauteurs du soleil supérieures à  $30^\circ$ , le pourcentage des données enregistrées dans la zone de  $k_t < 0.6$  ne dépasse pas les 35%.

#### **Région $k_t > 0.6$**

Par ailleurs, le pourcentage des données enregistrées pour un ciel clair ( $k_t > 0.6$ ) évolue d'une manière proportionnelle avec l'augmentation de la hauteur du soleil, c'est-à-dire que seulement 19% des données sont enregistrées pour les hauteurs

du soleil appartenant à la gamme (0-08°), 33% pour la gamme des hauteurs du soleil comprises entre 08° et 18° et 48% des valeurs de  $kt > 0.6$  sont observées dans la gamme (18°-30°). On enregistre toujours pour un ciel clair, un pourcentage minimal de 65% des données pour des hauteurs du soleil supérieures à 30°.

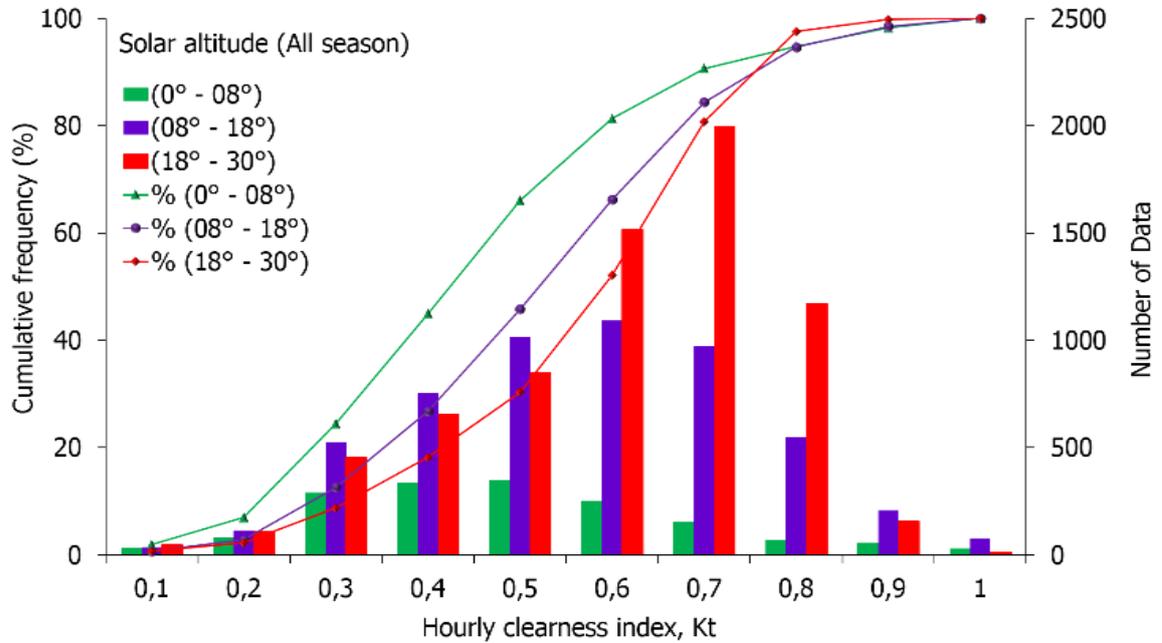


Fig. 1.2a : Nombre d'occurrences et distribution des fréquences cumulées de l'indice de clarté (Kt) au niveau d'Oran et pour l'année complète durant la période 1996-2005, pour les hauteurs du soleil inférieures à 30°.

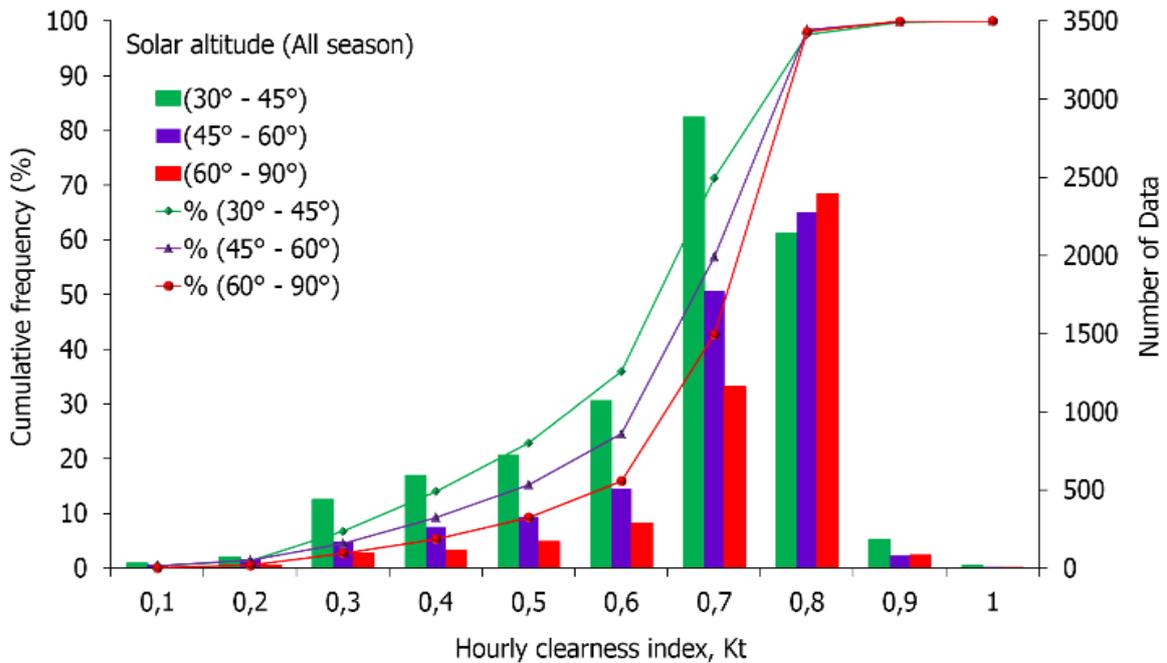


Fig. 1.2b : Nombre d'occurrences et distribution des fréquences cumulées de l'indice de clarté (Kt) au niveau d'Oran pour l'année complète durant la période 1996-2005, pour les hauteurs du soleil supérieures à 30°.

Tableau 1.2 : Nombre d'occurrences et le pourcentage de fréquence de l'indice de clarté (Kt) au niveau d'Oran dans la période (1996-2005), et pour l'année complète.

Intervalle Kt	Nombre d'occurrences de la période 1996-2005 (Année complète)						Fréquence (%)					
	0 - 8°	8°-18°	18°-30°	30°-45°	45°-60°	60°-90°	0-8°	8°-18°	18°-30°	30°-45°	45°-60°	60°-90°
0.0 - 0.1	32	36	48	134	24	2	1,9	0,7	0,7	0,4	0,4	0,0
0.1 - 0.2	84	114	109	73	55	20	5,1	2,1	1,6	0,9	1,0	0,5
0.2 - 0.3	290	526	453	441	169	94	17,5	9,8	6,5	5,4	3,1	2,2
0.3 - 0.4	340	757	655	595	260	113	20,5	14,1	9,4	7,3	4,7	2,6
0.4 - 0.5	351	1018	849	722	327	171	21,1	19,0	12,2	8,8	6,0	3,9
0.5 - 0.6	253	1093	1515	1070	510	289	15,2	20,4	21,8	13,1	9,3	6,7
0.6 - 0.7	156	973	1994	2887	1776	1162	9,4	18,2	28,6	35,4	32,4	26,8
0.7 - 0.8	69	549	1171	2143	2277	2397	4,2	10,3	16,8	26,2	41,5	55,3
0.8 - 0.9	56	208	156	182	78	84	3,4	3,9	2,2	2,2	1,4	1,9
0.9 - 1.0	30	79	15	18	8	1	1,8	1,5	0,2	0,2	0,1	0,0
Total	1661	5353	6965	8165	5484	4333	100	100	100	100	100	100

Le même constat a été observé pour les saisons de l'hiver et de l'été. Ainsi, pour des  $kt < 0.6$ , durant la saison d'hiver (figures 1.3a, 1.3b et le tableau 1.3), un pourcentage de 85.4% du nombre d'occurrence enregistré est obtenu pour des hauteurs du soleil inférieures à  $08^\circ$ , tandis que pour les gammes des hauteurs du soleil ( $8^\circ-18^\circ$ ) et ( $18^\circ-30^\circ$ ), nous obtenons un pourcentage respectivement de 55.4% et 40.6%. Pour des hauteurs du soleil dépassant les  $30^\circ$ , le maximum du pourcentage du nombre d'occurrence observé est de 33.5%.

Par ailleurs, pour les saisons d'hiver et d'été, quelle que soit la hauteur du soleil, le nombre d'occurrences observés pour des  $kt > 0.8$  est très faible comparé à celui enregistré durant toute l'année. Ce phénomène s'explique par le fait que le taux d'humidité enregistré est très élevé durant la saison d'hiver et d'été, augmentant ainsi le taux de diffus dans l'atmosphère.

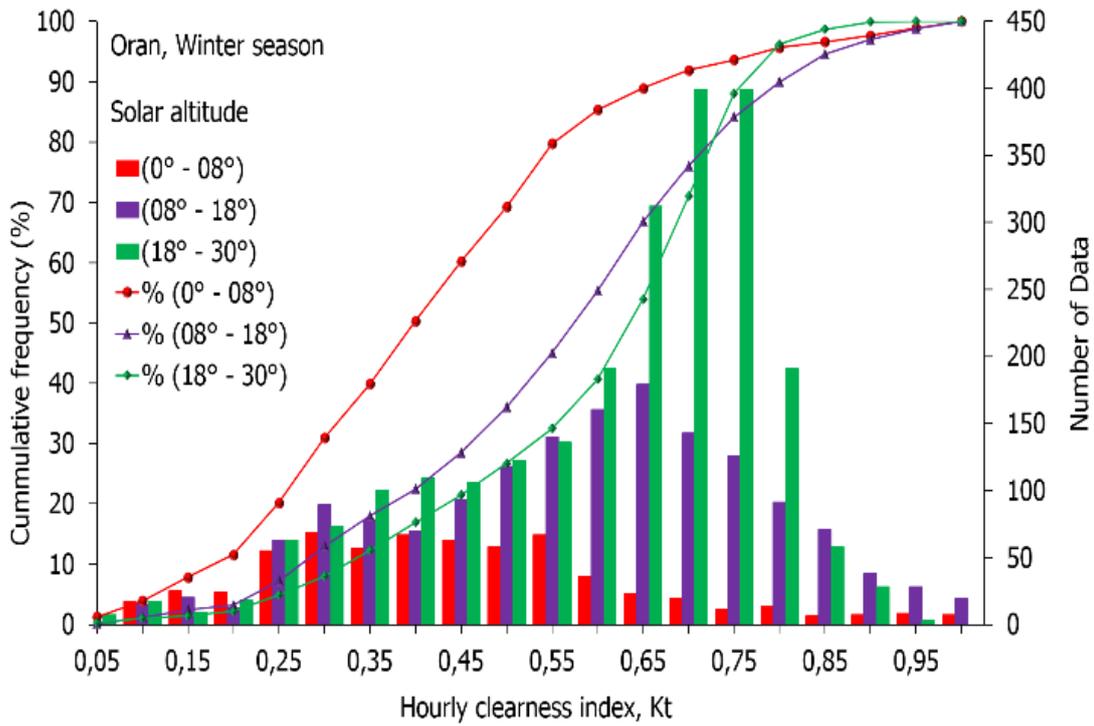


Fig. 1.3a : Nombre d'occurrences et distribution des fréquences cumulées (Kt) au niveau d'Oran pour la saison d'hiver durant la période 1996-2005, pour les hauteurs du soleil inférieures à 30°.

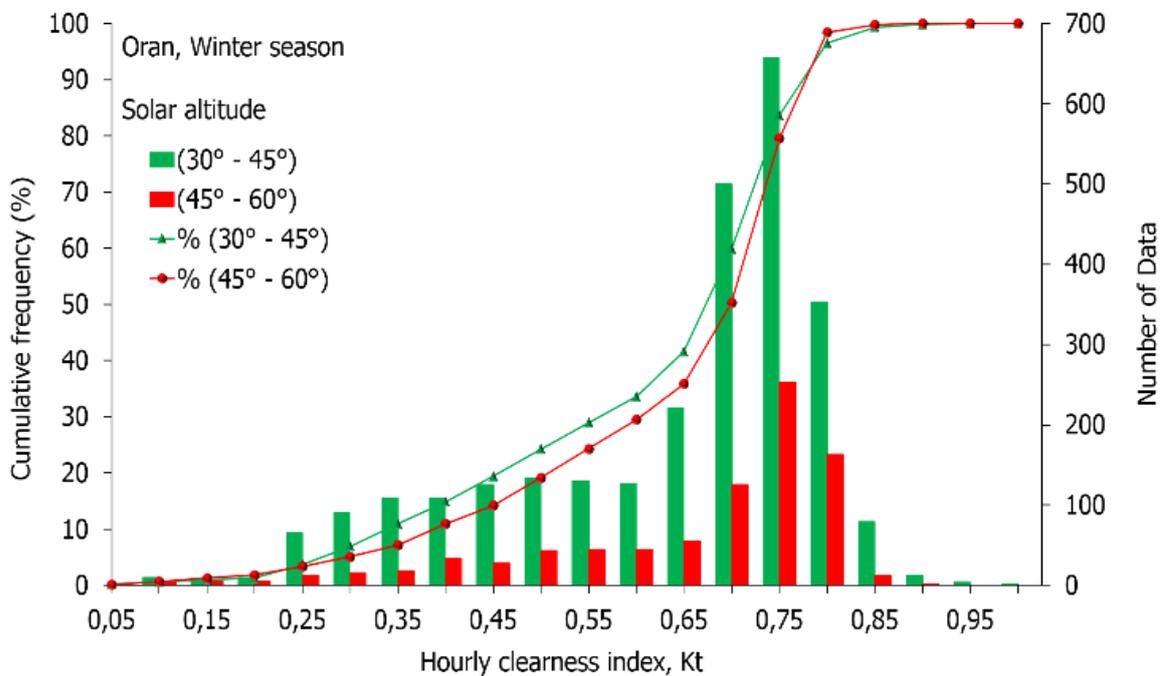


Fig. 1.3b : Nombre d'occurrences et distribution des fréquences cumulées de l'indice de clarté (Kt) au niveau d'Oran pour la saison d'hiver durant la période 1996-2005, pour les hauteurs du soleil supérieures à 30°.

Tableau 1.3 : Nombre d'occurrences et le pourcentage de fréquence de l'indice de clarté (Kt) au niveau d'Oran durant la période (1996-2005), pour la saison d'hiver.

Intervalle Kt	Nombre d'occurrences de la période 1996-2005 (Saison d'hiver)						Fréquence (%)					
	0-8°	8°-18°	18°-30°	30°-45°	45°-60°	60°-90°	0-8°	8°-18°	18°-30°	30°-45°	45°-60°	60°-90°
0.0 - 0.1	25	17	24	17	6	-	3,9	1,1	1,0	0,6	0,7	-
0.1 - 0.2	49	32	27	19	10	-	7,7	2,1	1,2	0,7	1,2	-
0.2 - 0.3	124	152	136	155	28	-	19,4	9,8	5,8	5,6	3,2	-
0.3 - 0.4	124	148	209	218	51	-	19,4	9,5	8,9	7,9	5,9	-
0.4 - 0.5	121	211	228	258	71	-	18,9	13,6	9,7	9,4	8,2	-
0.5 - 0.6	103	300	327	257	89	-	16,1	19,3	14,0	9,3	10,3	-
0.6 - 0.7	42	322	711	721	180	-	6,6	20,7	30,4	26,2	20,8	-
0.7 - 0.8	24	217	590	1010	416	-	3,8	14,0	25,2	36,7	48,1	-
0.8 - 0.9	13	109	86	92	14	-	2,0	7,0	3,7	3,3	1,6	-
0.9 - 1.0	15	47	3	6	0	-	2,3	3,0	0,1	0,2	0,0	-
Total	640	1555	2341	2753	865	-	100	100	100	100	100	-

Tableau 1.4 : Nombre d'occurrences et le pourcentage de fréquence de l'indice de clarté (Kt) au niveau d'Oran durant la période (1996-2005), pour la saison d'Eté.

Intervalle Kt	Nombre d'occurrences de la période 1996-2005 (Saison d'Eté)						Fréquence (%)					
	0-8°	8°-18°	18°-30°	30°-45°	45°-60°	60°-90°	0-8°	8°-18°	18°-30°	30°-45°	45°-60°	60°-90°
0.0 - 0.1	12	11	18	6	8	2	2,1	0,9	1,2	0,3	0,3	0,1
0.1 - 0.2	19	34	29	19	27	5	3,4	2,6	1,9	1,0	1,0	0,3
0.2 - 0.3	120	115	68	71	59	29	21,4	8,9	4,5	3,8	2,1	1,8
0.3 - 0.4	138	161	116	102	87	39	24,6	12,5	7,7	5,4	3,1	2,4
0.4 - 0.5	127	335	201	131	132	55	22,6	25,9	13,3	6,9	4,7	3,4
0.5 - 0.6	78	330	509	315	231	79	13,9	25,6	33,7	16,7	8,2	4,8
0.6 - 0.7	40	196	468	945	1336	601	7,1	15,2	31,0	50,0	47,3	36,8
0.7 - 0.8	9	81	87	292	936	819	1,6	6,3	5,8	15,4	33,1	50,2
0.8 - 0.9	9	23	11	7	7	4	1,6	1,8	0,7	0,4	0,2	0,2
0.9 - 1.0	10	5	3	3	2	0	1,8	0,4	0,2	0,2	0,1	0,0
Total	562	1291	1510	1891	2825	1633	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

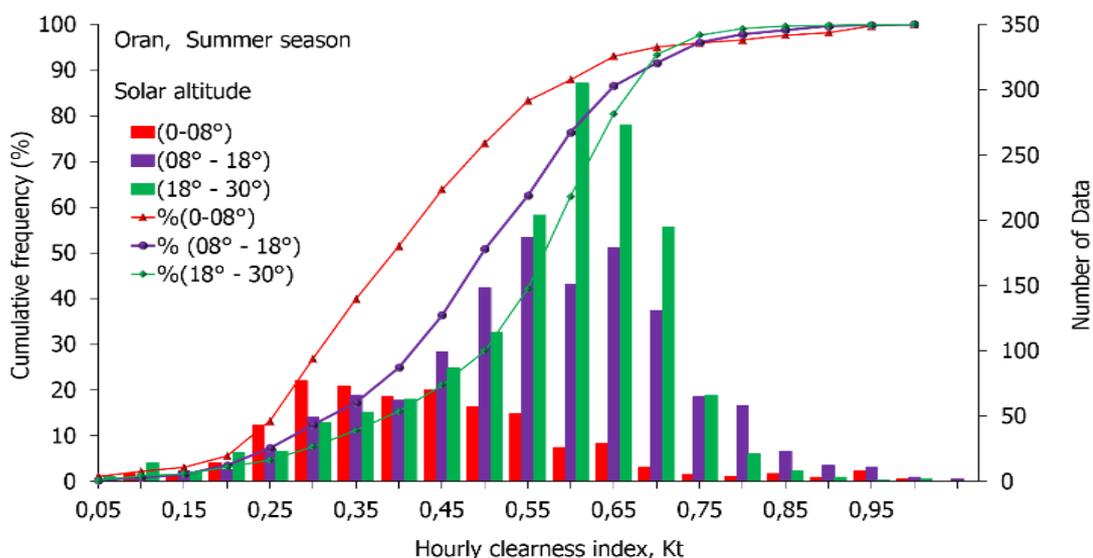


Fig. 1.4a : Nombre d'occurrences et distribution des fréquences cumulées de l'indice de clarté (Kt) au niveau d'Oran, pour la saison d'Eté durant la période 1996-2005, pour les hauteurs du soleil inférieures à 30°.

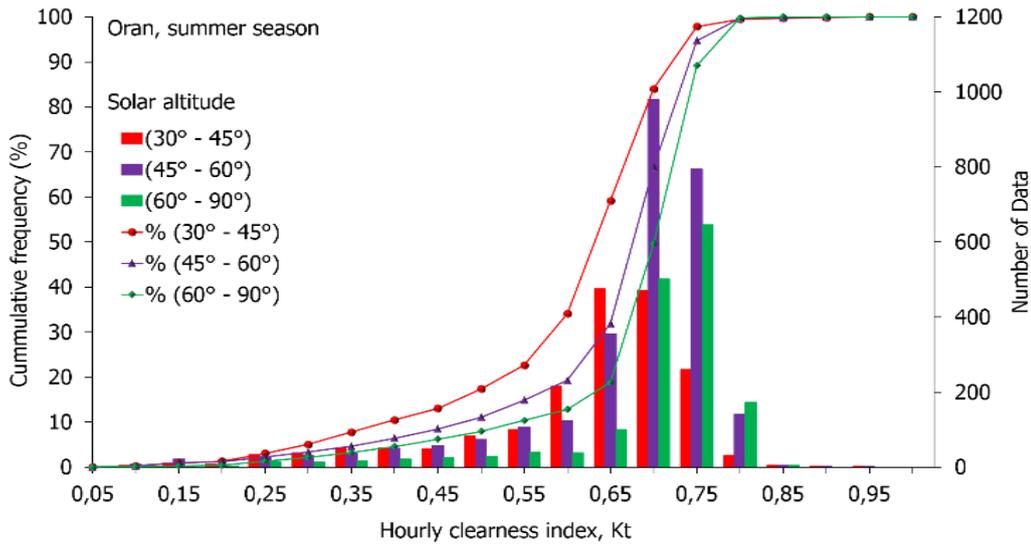


Fig. 1.4b : Nombre d'occurrences et distribution des fréquences cumulées de l'indice de clarté (Kt) au niveau d'Oran pour la saison d'Été durant la période 1996-2005, pour les hauteurs du soleil supérieures à 30°.

En analysant la figure (1.5) donnant la variation des fréquences cumulées correspondant aux données de l'année complète et pour différentes hauteurs du soleil, nous constatons que pour des  $kt < 0.8$ , la vitesse d'évolution des fréquences cumulées varie avec l'augmentation de la hauteur du soleil. Ainsi, pour des  $kt < 0.6$ , cette vitesse croît d'une manière quasi linéaire pour des hauteurs du soleil inférieures à 30°, et croît avec une pente faible pour des hauteurs du soleil dépassant les 30°.

Par contre pour des  $0.6 < kt < 0.8$ , et pour des hauteurs du soleil supérieures à 30°, cette vitesse croît rapidement atteignant des fréquences cumulées assez importantes.

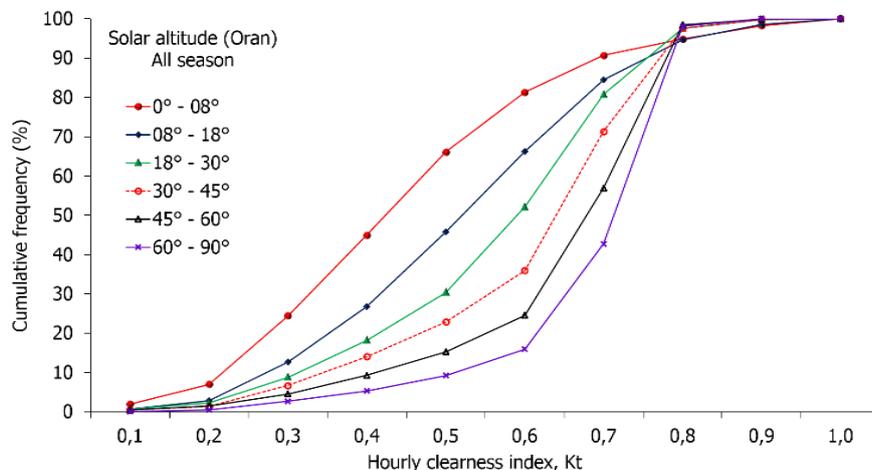


Fig.1.5 : Distribution des fréquences cumulées de l'indice de clarté (Kt) au niveau de la région d'Oran pour l'année complète durant la période de 1996-2005, pour différentes hauteurs du soleil.

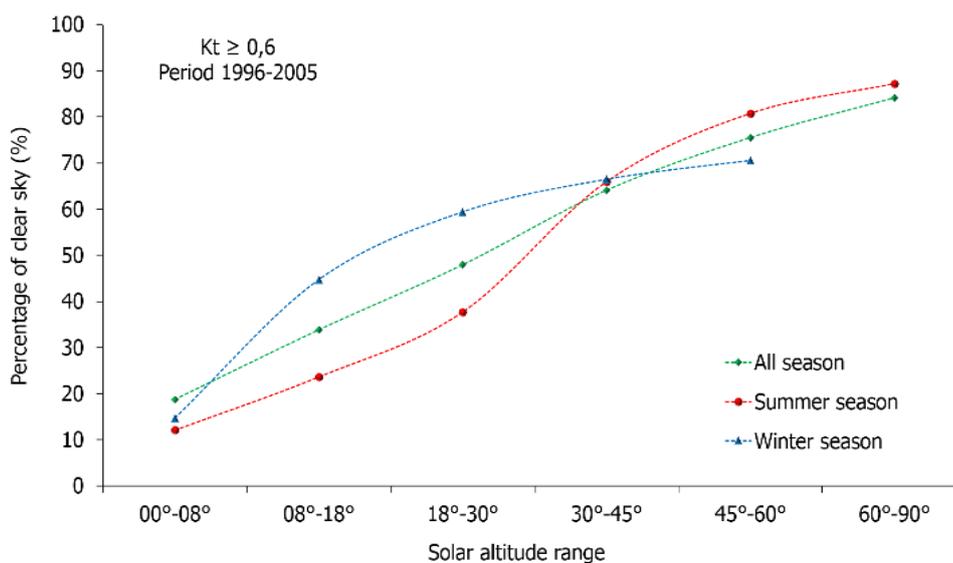


Fig.1.6 : Pourcentage du ciel clair Vs la hauteur du soleil pour des indices de clarté  $K_t \geq 0.6$ , Site d'Oran

A titre d'illustration, la figure (1.6) affiche la variation des fréquences cumulées en fonction de la hauteur du soleil en se focalisant à la partie où l'indice de clarté  $0.6 < k_t < 0.8$ . On remarque que plus la hauteur du soleil augmente, plus le pourcentage du ciel clair augmente et plus le taux de diffus diminue.

Il est à noter également que pour des hauteurs du soleil inférieures à  $45^\circ$ , il y a une forte disparité du pourcentage de ciel clair qui est enregistré pour les différentes saisons. Ce pourcentage est plus important pendant la saison hivernale que pour celui enregistré pour la période estivale. Notons, également que le taux d'évolution de ce pourcentage est plus accentué pendant l'été que durant l'hiver, c'est-à-dire que la vitesse d'évolution de ce taux est bien plus élevée en été qu'en hiver où elle a tendance à être nulle au-delà de la hauteur du soleil de  $45^\circ$ .

## 1.4.2. Site de Tamanrasset

### 1.4.2.1. Analyse qualitative des données expérimentales pour une année complète dans la période 1996-2005.

Les figures (1.7-1.12) donnent la distribution des fréquences cumulées de l'indice de clarté  $K_t$  ainsi que le nombre d'occurrences de  $K_t$  dans la région de Tamanrasset et ce pour trois différentes périodes de l'année : La période d'hiver, la période d'été et pour la période de l'Année complète.

Ces tracés de courbes sont réalisés pour différents paliers de la hauteur du soleil, à savoir les gammes (0°-08°), (08°-18°), (18°-30°), (30°-45°), (45°-60°) et (60°-90°).

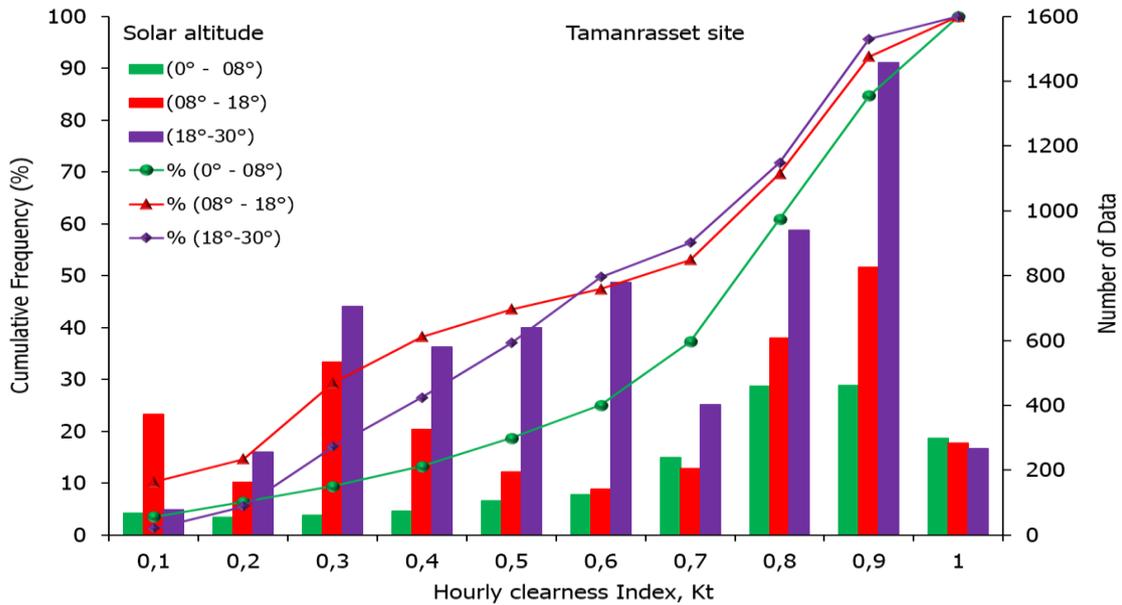


Fig. 1.7 : Nombre d'occurrences et distribution des fréquences cumulées de l'indice de clarté (Kt) au niveau de Tamanrasset et pour l'année complète durant la période 1996-2005, pour les hauteurs du soleil inférieures à 30°.

Les figures (1.7), (1.8) et le tableau 1.5 affichent le nombre d'occurrence et la distribution des fréquences cumulées de Kt pour la période de l'année complète. On peut constater deux cas de figures pour des hauteurs du soleil inférieures à 30° (fig.1.7). Le premier cas de figure correspond aux valeurs de  $Kt < 0.6$  (ciel couvert et partiellement couvert) où la quantité du diffus est très importante, la distribution fréquentielle ne suit pas la même évolution pour les différentes gammes de la hauteur du soleil. Pour les hauteurs du soleil inférieures à 08°, le nombre d'observations enregistré dans cette gamme reste très faible, comme le montre les fréquences affichées dans le tableau 1.5, soit 25.05% du nombre total enregistré. Par contre pour les hauteurs du soleil de la gamme (08°-18°) et (18°-30°), on retrouve un pourcentage de 48% et 50% du nombre total enregistré successivement. Ces résultats montrent que le ciel a tendance à être beaucoup plus nuageux que plutôt complètement couvert.

Pour  $Kt > 0.6$  (ciel dégagé et clair), relatif au deuxième cas de figure, la distribution des fréquences cumulées suit la même allure et ce pour les différentes gammes de

la hauteur du soleil. Plus la clarté du ciel s'accroît plus le nombre d'occurrences est élevé. On enregistre un pourcentage de 75% pour la gamme (0-08°), 52% pour la gamme de (08°-18°) et 50% pour les hauteurs du soleil comprises entre 18° et 30°.

Il est à noter que le pic du nombre d'occurrence enregistré pour les hauteurs du soleil inférieures à 30° est atteint dans la gamme (08°-18°) et pour Kt = 0.9.

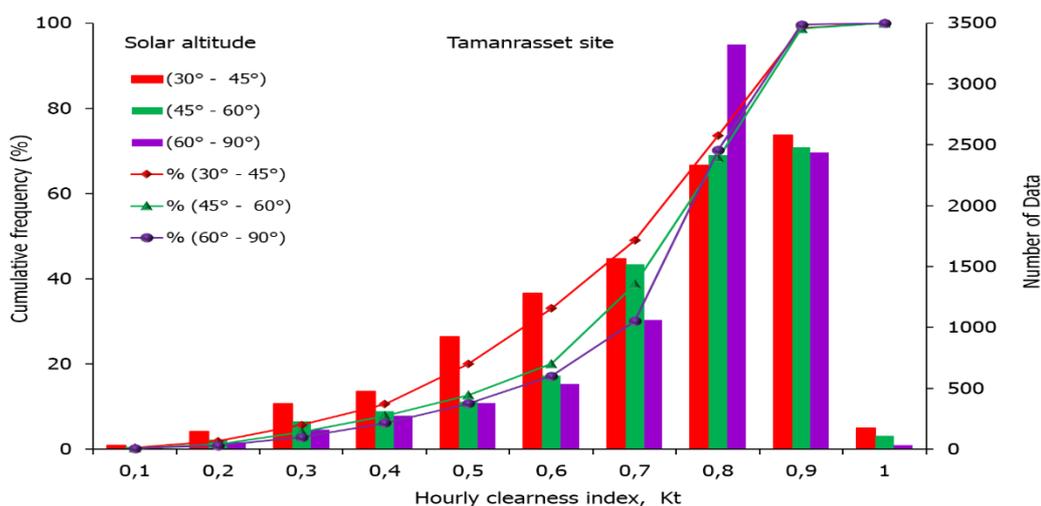


Fig. 1.8 : Nombre d'occurrences et distribution des fréquences cumulées de l'indice de clarté (Kt) au niveau de Tamanrasset et pour l'année complète dans la période 1996-2005, et pour les hauteurs du soleil supérieures à 30°.

Tableau 1.5 : Nombre d'occurrences et le pourcentage de fréquence de l'indice de clarté (Kt) au niveau de Tamanrasset dans la période (1996-2005), et pour l'année complète.

Intervalle de Kt	Nombre d'occurrences dans la période 1996-2005 (Année complète)						Fréquence (%)					
	0-8°	8°-18°	18°-30°	30°-45°	45°-60°	60°-90°	0-8°	8°-18°	18°-30°	30°-45°	45°-60°	60°-90°
0.0 - 0.1	68	372	78	34	18	15	3,50	10,19	1,28	0,34	0,22	0,18
0.1 - 0.2	55	163	256	148	78	56	2,83	4,46	4,19	1,50	0,96	0,68
0.2 - 0.3	60	534	705	376	231	163	3,09	14,63	11,55	3,80	2,83	1,97
0.3 - 0.4	74	325	580	478	313	274	3,81	8,90	9,50	4,83	3,84	3,31
0.4 - 0.5	106	195	639	922	390	379	5,45	5,34	10,47	9,32	4,78	4,58
0.5 - 0.6	124	142	780	1280	605	534	6,38	3,89	12,78	12,94	7,42	6,45
0.6 - 0.7	238	205	403	1566	1519	1062	12,24	5,61	6,60	15,83	18,62	12,83
0.7 - 0.8	459	607	940	2334	2415	3325	23,61	16,63	15,40	23,59	29,61	40,17
0.8 - 0.9	462	825	1457	2581	2477	2437	23,77	22,60	23,87	26,09	30,37	29,44
0.9 - 1.0	298	283	267	174	111	32	15,33	7,75	4,37	1,76	1,36	0,39
Total	1944	3651	6105	9893	8157	8277	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Pour les hauteurs du soleil supérieures à 30° (figure 1.8), l'évolution des fréquences cumulées pour les trois gammes de hauteur du soleil suit pratiquement la même allure avec des nombres d'occurrences différents. On note pour des Kt < 0.6 (ciel couvert et partiellement couvert), qu'un faible taux d'observations de Kt est

enregistré, soit 32.73% correspondant à la gamme des hauteurs du soleil ( $30^{\circ}$ - $45^{\circ}$ ), 20% pour la gamme ( $45^{\circ}$ - $60^{\circ}$ ) et un pourcentage de 17.17% pour les hauteurs du soleil dépassant les  $60^{\circ}$ . Ces indications reflètent en quelque sorte la dominance du ciel clair pour ces différentes gammes de hauteur du soleil.

Notons également que plus la hauteur du soleil est élevée, plus la clarté du ciel devient dominante ( $K_t > 0.6$ ) et par suite, la quantité du diffus est beaucoup moins importante.

#### **1.4.2.2. Analyse qualitative des données expérimentales pour la saison d'hiver durant la période 1996-2005.**

La figure (1.9) donnant l'évolution du nombre d'occurrence ainsi que la distribution fréquentielle cumulative de l'indice de clarté  $K_t$  pendant la période d'hiver et pour les hauteurs du soleil inférieures à  $30^{\circ}$ , affiche les éléments suivants :

##### ▪ **$K_t < 0.3$** :

Les histogrammes tracés pour cet interval de  $K_t$ , représentant un ciel complètement couvert, présentent un nombre d'occurrences très faible pour les trois gammes de hauteur du soleil. Le pourcentage enregistré dans cet interval de  $K_t$  ne dépasse pas les 04% du nombre total d'occurrences.

##### ▪ **$0.3 \leq K_t < 0.6$** :

Dans cet interval de  $K_t$ , traduisant un ciel nuageux ou partiellement couvert, nous pouvons constater que pour les hauteurs du soleil inférieures à  $08^{\circ}$ , le nombre d'occurrence reste faible avec un pourcentage de moins de 26%, par contre pour les hauteurs du soleil comprises entre  $08^{\circ}$  et  $30^{\circ}$ , nous enregistrons une forte concentration du nombre d'occurrences avec un pourcentage de plus de 52% dans la gamme de ( $08^{\circ}$ - $18^{\circ}$ ) et plus de 45% de valeurs enregistrées dans la gamme de ( $18^{\circ}$ - $30^{\circ}$ ) des hauteurs du soleil.

##### ▪ **$K_t \geq 0.6$** :

Dans cette rangée d'indice de clarté, synonyme d'un ciel clair, nous enregistrons un pourcentage de plus de 70% du nombre d'occurrences est enregistré dans la gamme ( $0^{\circ}$ - $08^{\circ}$ ) de la hauteur du soleil, un taux de 43.8% est observé au niveau de la gamme ( $08^{\circ}$ - $18^{\circ}$ ) et 53.11% dans la gamme des hauteurs du soleil comprises entre  $18^{\circ}$  et  $30^{\circ}$ .

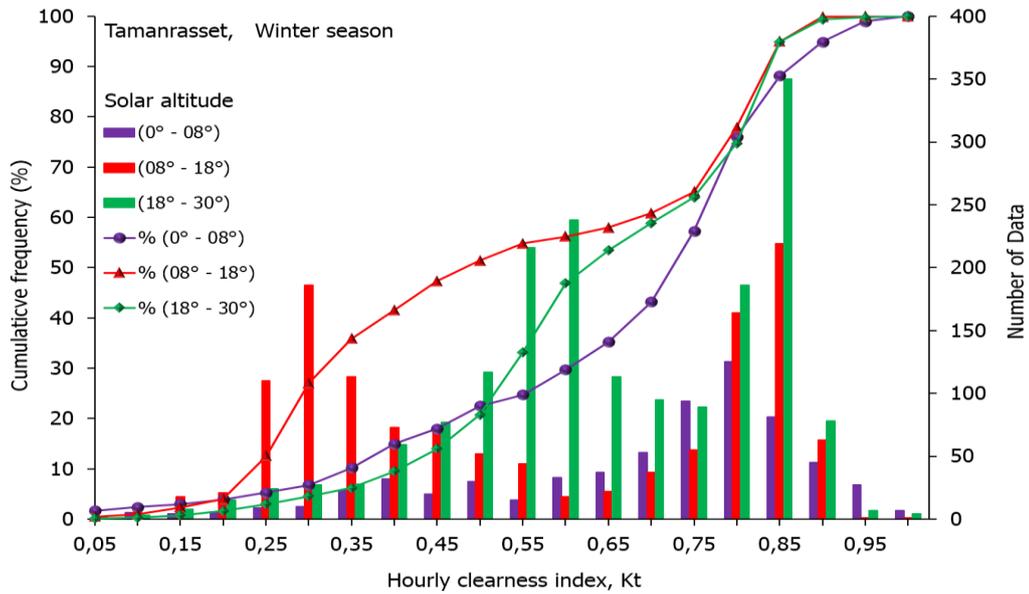


Fig. 1.9 : Nombre d'occurrences et distribution des fréquences cumulées de l'indice de clarté (Kt) au niveau de Tamanrasset et pour la saison hivernale dans la période 1996-2005, et pour les hauteurs du soleil inférieures à 30°.

Ce qu'on doit retenir de cette analyse et pour cette catégorie de hauteurs du soleil (<30°) qui correspond au début et à la fin de la journée, que le ciel a tendance à être clair pour les hauteurs du soleil inférieures à 08° (lever et coucher du soleil). Par contre pour les hauteurs du soleil comprises entre 08° et 30° le ciel a tendance à être partiellement clair à clair avec une quantité de la composante diffuse du rayonnement solaire non négligeable.

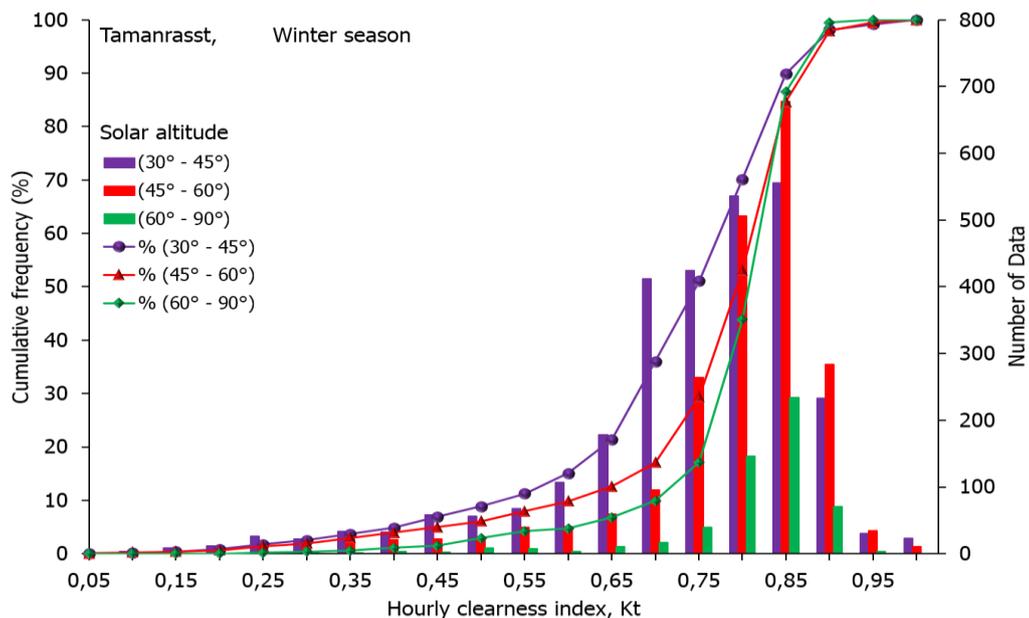


Fig.1.10 : Nombre d'occurrences et distribution des fréquences cumulées de l'indice de clarté (Kt) au niveau de Tamanrasset et pour la saison hivernale dans la période 1996-2005, et pour les hauteurs du soleil supérieures à 30°.

Le tableau 1.6 résume en valeurs discrètes le nombre d'occurrences et le pourcentage des valeurs de Kt pour la saison d'hiver dans la période 1996-2005.

Tableau 1.6 : Nombre d'occurrences et le pourcentage de fréquence de l'indice de clarté (Kt) au niveau de Tamanrasset dans la période (1996-2005), et pour la saison d'hiver

Intervalle de Kt	Nombre d'occurrences dans la période 1996-2005 (saison d'hiver)						Fréquence (%)					
	0-8°	8°-18°	18°-30°	30°-45°	45°-60°	60°-90°	0-8°	8°-18°	18°-30°	30°-45°	45°-60°	60°-90°
0.0 - 0.1	16	12	5	3	5	0	2,40	0,94	0,29	0,11	0,23	0,00
0.1 - 0.2	10	39	23	20	9	0	1,50	3,04	1,32	0,71	0,42	0,00
0.2 - 0.3	19	296	51	48	28	2	2,85	23,07	2,94	1,70	1,31	0,36
0.3 - 0.4	55	186	87	65	42	4	8,25	14,50	5,01	2,31	1,96	0,73
0.4 - 0.5	50	126	194	114	46	10	7,50	9,82	11,18	4,05	2,15	1,82
0.5 - 0.6	48	62	454	174	81	10	7,20	4,83	26,15	6,18	3,78	1,82
0.6 - 0.7	90	59	208	590	154	28	13,49	4,60	11,98	20,95	7,19	5,11
0.7 - 0.8	219	219	275	960	770	186	32,83	17,07	15,84	34,09	35,95	33,94
0.8 - 0.9	126	282	428	789	962	305	18,89	21,98	24,65	28,02	44,91	55,66
0.9 - 1.0	34	2	11	53	45	3	5,10	0,16	0,63	1,88	2,10	0,55
Total	667	1283	1736	2816	2142	548	100	100	100	100	100	100

En ce qui concerne l'évolution du nombre d'occurrences et les fréquences cumulées de l'indice de clarté Kt pour les hauteurs du soleil supérieures à 30°, le constat est pratiquement similaire à celui observé dans la figure (1.8) relative à l'année complète. Une forte concentration est enregistrée dans la gamme des hauteurs du soleil comprise entre 30° et 60° avec un pic enregistré pour Kt=0.85 où le ciel est très clair.

#### 1.4.2.3. Analyse qualitative des données expérimentales pour la saison d'été durant la période 1996-2005.

En suivant la démarche d'analyse faite sur l'évolution du nombre d'occurrences et la distribution fréquentielle durant la période d'hiver, nous constatons sur la figure (1.11) qu'un phénomène inverse se manifeste pour la saison d'été (à l'exception des valeurs enregistrées pour la gamme des hauteurs du soleil (18°-30°)). Nous enregistrerons, pour les Kt <0.3 représentant un ciel complètement couvert, une forte concentration du nombre d'occurrence pour les hauteurs du soleil inférieures à 18°. Les courbes de la distribution des fréquences cumulées présentent un fléchissement de leurs formes en passant d'un ciel complètement couvert (0 < kt < 0.3) à un ciel partiellement couvert (0.3 ≤ kt < 0.60). Cette forte concentration est traduite par le fait que la région de Tamanrasset est bien connue par l'abatement des pluies diluviennes durant la saison estivale et surtout en mois d'août, occasionnant ainsi une quantité assez importante du diffus solaire.

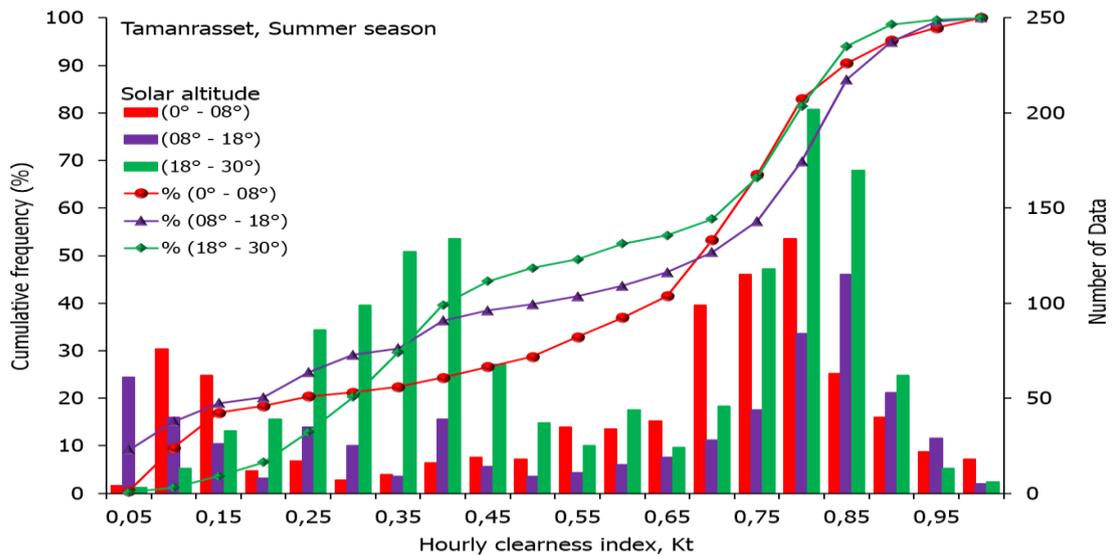


Fig 1.11 : Nombre d'occurrences et distribution des fréquences cumulées de l'indice de clarté (Kt) au niveau de Tamanrasset et pour la saison d'été durant la période 1996-2005, et pour les hauteurs du soleil inférieures à 30°.

Au-delà de  $Kt = 0.6$ , le ciel clair s'avère dominant avec des pourcentages assez élevés et ce pour les différentes gammes de la hauteur du soleil.

Le tableau 1.7 illustre numériquement les nombres d'occurrences enregistrés de l'indice de clarté Kt ainsi que les fréquences correspondantes.

Tableau 1.7 : Nombre d'occurrences et le pourcentage de fréquence de l'indice de clarté (Kt) au niveau de Tamanrasset dans la période (1996-2005), et pour la saison d'Eté.

Intervalle de Kt	Nombre d'occurrences dans la période 1996-2005 (saison d'Eté)						Fréquence (%)					
	0-8°	8°-18°	18°-30°	30°-45°	45°-60°	60°-90°	0-8°	8°-18°	18°-30°	30°-45°	45°-60°	60°-90°
0.0 - 0.1	80	101	16	3	6	0	9,54	15,10	1,19	0,16	0,29	0,00
0.1 - 0.2	74	34	72	48	20	17	8,82	5,08	5,34	2,49	0,96	0,50
0.2 - 0.3	24	60	185	135	94	53	2,86	8,97	13,71	7,00	4,49	1,56
0.3 - 0.4	26	48	261	142	99	112	3,10	7,17	19,35	7,37	4,73	3,31
0.4 - 0.5	37	23	105	184	128	152	4,41	3,44	7,78	9,54	6,12	4,49
0.5 - 0.6	69	26	69	387	203	210	8,22	3,89	5,11	20,07	9,70	6,20
0.6 - 0.7	137	47	70	196	506	426	16,33	7,03	5,19	10,17	24,19	12,58
0.7 - 0.8	249	128	320	380	485	1528	29,68	19,13	23,72	19,71	23,18	45,11
0.8 - 0.9	103	168	232	420	534	883	12,28	25,11	17,20	21,78	25,53	26,07
0.9 - 1.0	40	34	19	33	17	6	4,77	5,08	1,41	1,71	0,81	0,18
Total	839	669	1349	1928	2092	3387	100	100	100	100	100	100

En visualisant l'évolution du nombre d'occurrences et les fréquences cumulées de l'indice de clarté affichée dans la figure 1.12 pour les hauteurs du soleil supérieures à 30°, nous constatons que plus la hauteur du soleil est élevée, plus la clarté du ciel

devienne dominante ce qui est traduit par une forte concentration du nombre d'occurrences enregistrée au niveau de  $kt > 0.6$ .

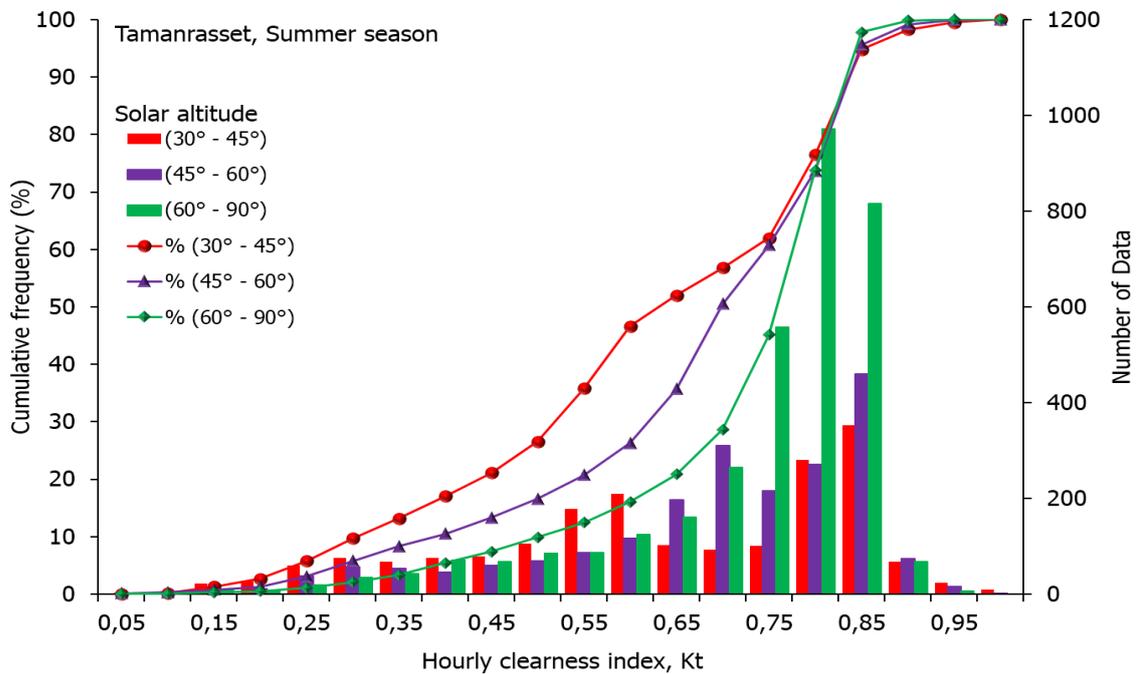


Fig 1.12 : Nombre d'occurrences et distribution des fréquences cumulées de l'indice de clarté (Kt) au niveau de Tamanrasset pour la saison d'été durant la période 1996-2005, et pour les hauteurs du soleil supérieures à 30°.

En analysant la figure (1.13) donnant la variation des fréquences cumulées correspondant aux données de l'année complète et pour différentes hauteurs du soleil, nous constatons que pour des  $kt < 0.9$ , la vitesse d'évolution des fréquences cumulées varie avec l'augmentation de la hauteur du soleil. Ainsi, pour des  $kt < 0.6$ , Les fréquences cumulées pour des hauteurs inférieures à 08° et supérieures à 30° croient lentement avec une pente faible. Par contre pour des  $0.6 < kt < 0.9$ , cette vitesse croit rapidement atteignant des fréquences cumulées assez importantes. Par ailleurs, pour les hauteurs du soleil comprises entre 08° et 30° et pour des  $Kt < 0.6$ , les fréquences cumulées présentent des valeurs assez élevées et leur évolution présente une pente assez importante. Dans ces franges de hauteurs du soleil, on enregistre des quantités importantes de la composante diffuse de l'irradiation solaire globale.

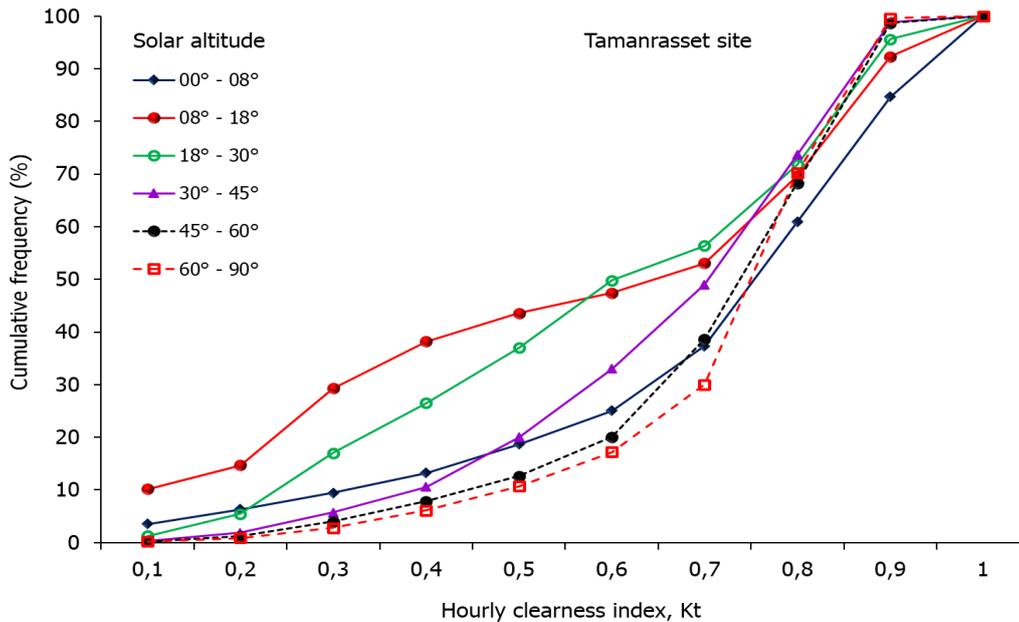


Fig 1.13 : Distribution des fréquences cumulées de l'indice de clarté (Kt) au niveau de la région de Tamanrasset pour l'année complète dans la période de 1996-2005 et pour différentes hauteurs de soleil.

La figure (1.14) affiche la variation des fréquences cumulées en fonction de la hauteur du soleil en se focalisant à la partie où l'indice de clarté  $K_t \geq 0.6$ . On remarque que le pourcentage du ciel clair varie différemment d'une gamme de hauteurs du soleil à une autre. On enregistre un taux élevé pour les hauteurs du soleil inférieures à  $8^\circ$  et supérieures à  $30^\circ$ . On note également un minimum atteint par le pourcentage du ciel

clair au niveau des gammes ( $08^\circ-18^\circ$ ) et ( $18^\circ-30^\circ$ ), synonyme de présence d'une quantité non négligeable de l'irradiation solaire diffuse dans cette gamme de la hauteur du soleil. Cette figure illustre aussi que les valeurs du pourcentage du ciel clair sont très rapprochées pour les hauteurs du soleil inférieures à  $30^\circ$  et pour les différentes saisons considérées dans ce travail. Par contre pour les hauteurs du soleil au-delà de  $30^\circ$ , ces pourcentages sont très dispersés avec un léger rapprochement de ces valeurs entre la saison d'été et celle de l'année entière pour les hauteurs du soleil supérieures à  $45^\circ$ .

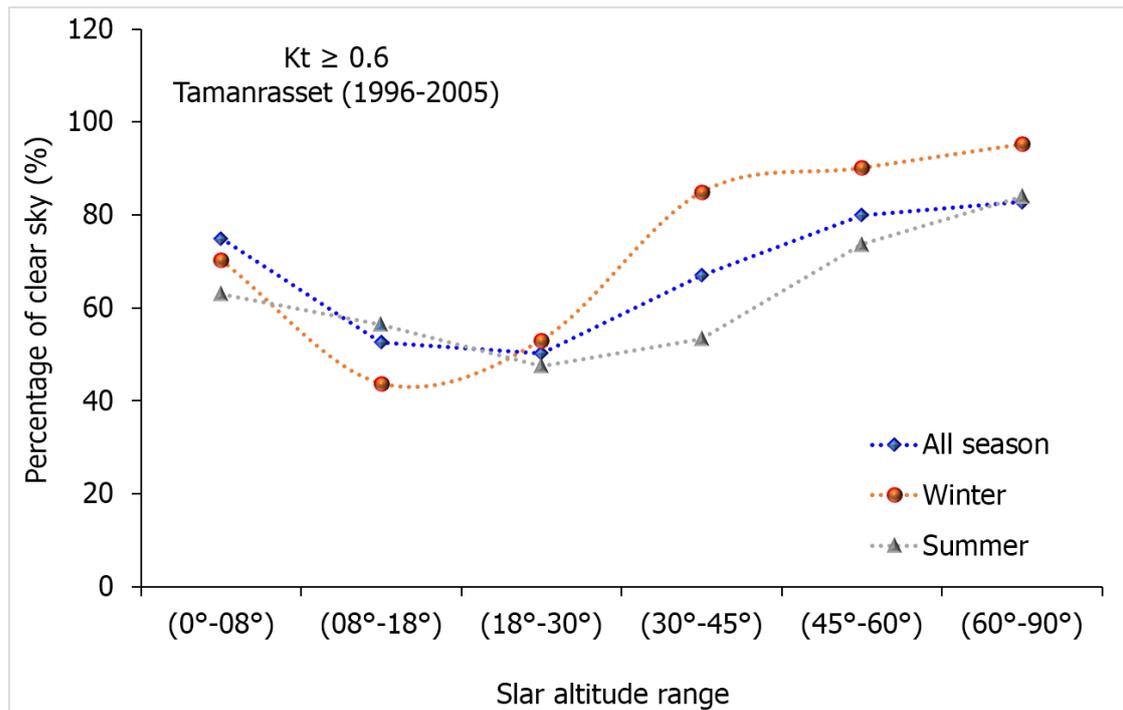


Fig.1.14 : Pourcentage du ciel clair Vs la hauteur du soleil pour des indices de clarté  $K_t \geq 0.6$ , Site de Tamanrasset.

## 1.5. Conclusion

L'analyse qualitative et stochastique de l'irradiation solaire caractérisé par son indice de clarté a permis de faire apparaître l'impact de la hauteur du soleil et les conditions du ciel sur la quantité de l'irradiation solaire globale et sa composante diffuse.

Cette partie d'étude a traité le cas de deux sites représentatifs qui sont : la région d'Oran (ville côtière, au nord du pays) et la région de Tamanrasset, ville oasienne représentant le sud de l'Algérie.

Des histogrammes et des fréquences cumulées ont été tracés en fonction de l'indice de clarté, sur une base de données annuelle et saisonnière et pour des gammes de hauteurs du soleil bien déterminées.

Des constats et conclusions ont été observés au niveau de ces deux sites. Il est à noter que, pour le site d'Oran et pour les valeurs de  $K_t < 0.6$ , représentant un état du ciel couvert et partiellement couvert avec une quantité du diffus assez considérable, le nombre d'occurrence des données d'observations diffère d'une gamme de hauteur du soleil à une autre. Ce nombre d'occurrence, pour les hauteurs du soleil inférieures à  $30^\circ$ , dépasse un pourcentage de 50%, en atteignant un pourcentage de 81% pour la gamme  $(0^\circ-08^\circ)$ .

Pour les hauteurs du soleil supérieures à  $30^\circ$ , le nombre d'occurrence observé ne dépasse guère les 35% du nombre total de données enregistrées dans cette gamme.

Par ailleurs, pour les valeurs de  $K_t > 0.6$ , où le ciel est considéré comme clair, le nombre d'occurrence évolue proportionnellement avec la hauteur du soleil. On note pour cet intervalle qu'un pourcentage minimal de 65% est enregistré pour des hauteurs supérieures à  $30^\circ$ .

L'analyse faite sur le site de Tamanrasset nous révèle que pour des hauteurs du soleil inférieures à  $30^\circ$  et pour des indices de clarté  $K_t < 0.6$ , les résultats observés sont complètement différents de ceux issus de l'analyse faite sur le site d'Oran. Le ciel a tendance à être partiellement couvert (nuageux) avec un faible taux du nombre d'occurrence enregistré pour les hauteurs du soleil ne dépassant pas  $08^\circ$ , soit 25% uniquement est observé dans cette gamme.

Par ailleurs, pour les indices de clarté  $K_t > 0.6$  où l'on considère que le ciel est dégagé, les courbes de distribution des fréquences cumulées suivent la même allure, avec un pourcentage du nombre d'occurrence évoluant dans le sens contraire de la hauteur du soleil. Plus la hauteur du soleil augmente, plus le nombre d'occurrence diminue.

Pour les hauteurs du soleil supérieures à  $30^\circ$  et pour  $K_t < 0.6$ , nous enregistrons une forte concentration du nombre d'occurrence dans l'intervalle ( $08^\circ$ - $30^\circ$ ), soit plus de 52% dans la gamme ( $08^\circ$ - $18^\circ$ ) et plus de 45% dans la gamme ( $18^\circ$ - $30^\circ$ ). Par contre pour les hauteurs du soleil inférieures à  $08^\circ$ , le nombre d'occurrence ne dépasse pas un pourcentage de 26%. Cependant pour les indices de clarté  $K_t > 0.6$ , le nombre d'occurrence enregistré pour les faibles hauteurs du soleil ( $0^\circ$ -  $08^\circ$ ), est très important, atteignant plus de 70% du nombre total de données. Ce qui dénote que pour cette gamme de hauteur du soleil, traduisant la période du lever et du coucher du soleil, le ciel a tendance à être clair ; mais pour les hauteurs du soleil comprises entre  $08^\circ$  et  $30^\circ$ , le ciel présente un temps nuageux avec une quantité du diffus non négligeable (voir fig. 1.14). En ce qui concerne les hauteurs du soleil supérieures à  $30^\circ$ , la clarté du ciel évolue proportionnellement avec la hauteur du soleil.

L'analyse faite sur la période d'une année complète a été répétée pour les saisons d'hiver et d'été. Ce que nous pouvons retenir pour ces deux saisons est :

Pour le site d'Oran, le même constat a été observé pour les indices de clarté  $K_t < 0.8$ , quel que soit la hauteur du soleil ; par contre pour  $K_t > 0.8$ , on a enregistré un faible pourcentage comparé à celui obtenu pour la saison complète. Ce phénomène est dû à l'élévation du taux d'humidité durant ces périodes de l'année entraînant ainsi l'augmentation du taux du diffus dans l'atmosphère.

Pour ce qui est du site de Tamanrasset et pour des indices de clarté  $K_t < 0.6$ , les choses évoluent de la même façon que pour le site d'Oran, à l'exception des hauteurs du soleil inférieures à  $08^\circ$ , où le nombre d'occurrence reste relativement faible traduisant un taux du diffus assez faible dans cette gamme.

Nous pouvons affirmer donc, en tenant compte de ces multiples observations qu'il existe bel et bien une corrélation très étroite entre l'irradiation solaire diffuse et les différentes gammes de la hauteur du soleil.

## **Chapitre 02 :**

Effet de la diffusion, l'absorption, la masse d'air et de la hauteur du soleil sur l'indice du diffus  $K_s$  et l'indice de clarté  $K_t$

## INTRODUCTION

A la lumière de ce qu'a démontré Liu-Jordan [3] au sujet de la relation existante entre la fraction diffuse solaire horizontale et l'indice de clarté  $K_t$ , défini comme étant le rapport entre le rayonnement global horizontal et le rayonnement global hors atmosphère, plusieurs corrélations ont été proposées par la suite pour des données locales journalières, horaires ou instantanées.

La principale raison d'étudier l'évolution de  $K_d$  ou  $K_s$  en fonction de  $K_t$  a été orientée par la nécessité d'obtenir les composantes directes ou diffuses lorsque seule la composante globale est mesurée. Cependant, peu de recherches ont été consacrées à l'étude de l'aspect physique, telle que l'incidence des particules en suspension dans l'air sous forme de diffusion, d'absorption dans cette relation. Par conséquent, les explications trouvées dans la littérature scientifique sont souvent inexactes ou contradictoires (voir quelques exemples cités dans la section « Zone 04 »). Ainsi, le lecteur peut être confus et ne pas comprendre les caractéristiques de base des modèles de  $K_d$  ou  $K_s$  Vs  $K_t$ , telle que l'anomalie apparente pour des indices de clarté  $K_t$  très élevés.

Notre objectif est de fournir des descriptions qualitatives à la fois claires et physiquement cohérentes de la relation  $K_s$  (ou  $K_d$ )- $K_t$ , et qui peuvent aider le lecteur à mieux comprendre et, éventuellement, à faire de futures investigations.

### **2.1. Tracé de l'évolution de l'indice du diffus $K_s$ en fonction de l'indice de clarté $K_t$ pour différentes hauteurs du soleil**

Dans la première partie de ce chapitre, les données radiométriques réparties dans les plages de la hauteur du soleil ( $0^\circ$ - $08^\circ$ ), ( $08^\circ$ - $18^\circ$ ), ( $18^\circ$ - $30^\circ$ ), ( $30^\circ$ - $45^\circ$ ), ( $45^\circ$ - $60^\circ$ ) et la gamme ( $60^\circ$ - $90^\circ$ ) ont été prises séparément. Les valeurs fractionnelles  $I_g/I_0$  notées  $K_t$  ont été arrangées dans un ordre croissant. Des groupes de valeurs horaires de  $K_s$  traduisant le rapport  $I_d/I_0$  ont été formés par la procédure décrite dans le chapitre I.

Les figures 2.1 et 2.2 présentent l'évolution de l'indice du diffus  $K_s$  Vs  $K_t$ , pour les sites d'Oran et Tamanrasset et sur une période de 10 ans (1996-2005), année par année, avec différentes gammes de la hauteur du soleil.

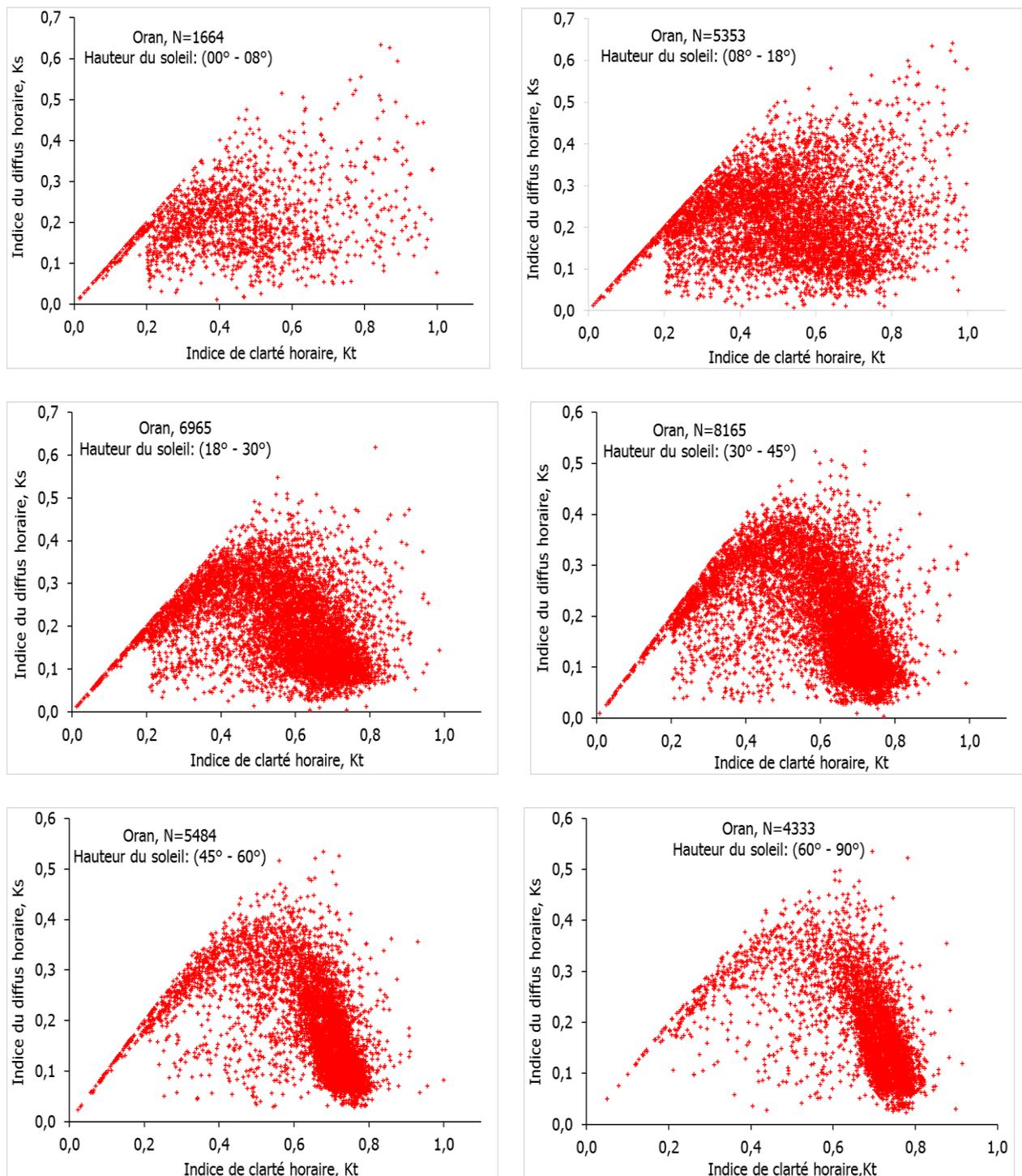


Fig. 2.1 : Variation de l'indice du diffus  $K_s$  Vs  $K_t$ , pour le site d'Oran pour toute l'année sur la période (1996-2005) et sous différentes gammes de la hauteur du soleil.

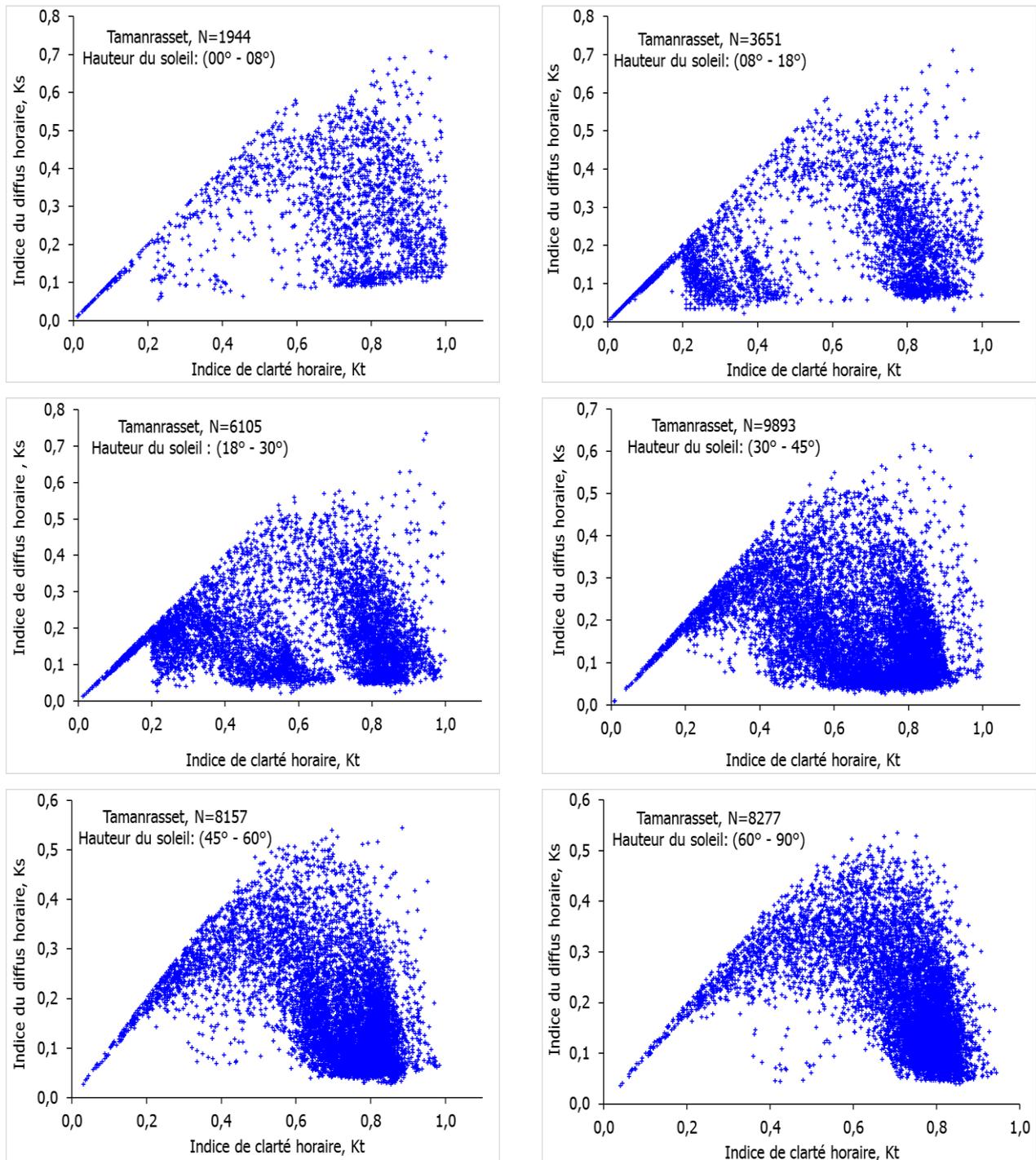


Fig. 2.2 : Variation de l'indice du diffus Ks Vs Kt, pour le site de Tamanrasset pour toute l'année sur la période (1996-2005) et sous différentes gammes de la hauteur du soleil.

Dans ces figures (2.1 et 2.2), nous observons une large dispersion de Ks dans l'intervalle  $0.2 \leq K_t < 0.8$ . Cela peut s'expliquer par la variation de certains paramètres atmosphériques tels que la masse d'air, les coefficients de troubles d'Angstrom et l'albédo de surface. Dans l'analyse des données prises au niveau des deux stations d'Oran et de Tamanrasset, l'albédo de surface a été considéré comme

pratiquement constant, les causes possibles étant la variation de la masse d'air et les coefficients de trouble d'Angstrom.

Pour ce faire, nous avons tracé l'évolution de  $K_s$  en fonction de  $K_t$  par l'élaboration des moyennes de  $K_s$  sur des intervalles de  $K_t$  fixes selon un pas de 0.05. Des courbes d'illustration ont été tracées et démontrées dans les figures 2.3 et 2.4 pour des hauteurs du soleil différentes. Ces deux figures font références au site d'Oran.

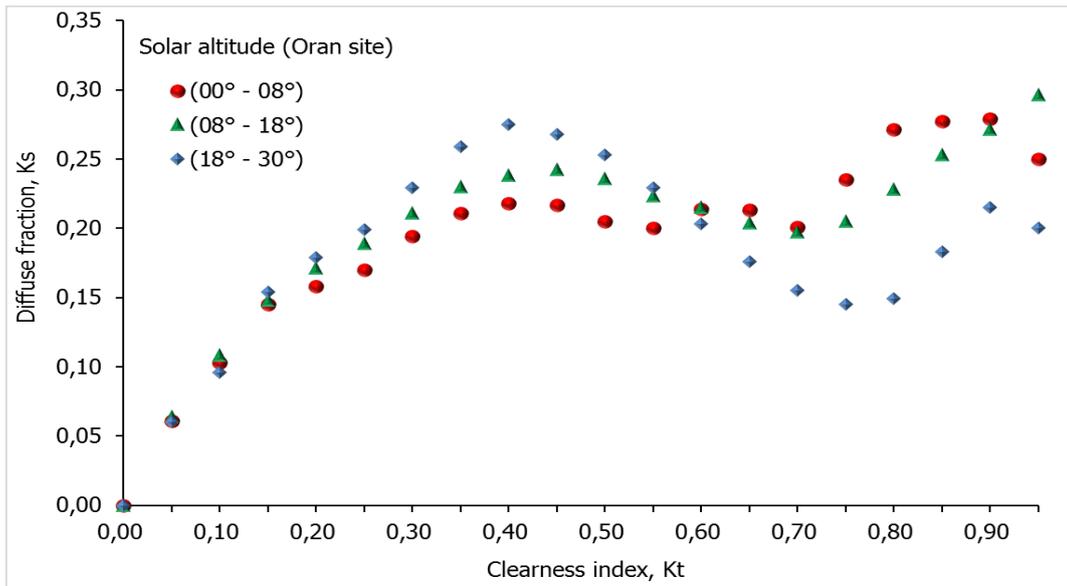


Fig. 2.3 : Evolution des moyennes de l'indice du diffus  $K_s$  en fonction des moyennes de  $K_t$  sur une période d'une année complète et pour des hauteurs du soleil inférieures à  $30^\circ$ .

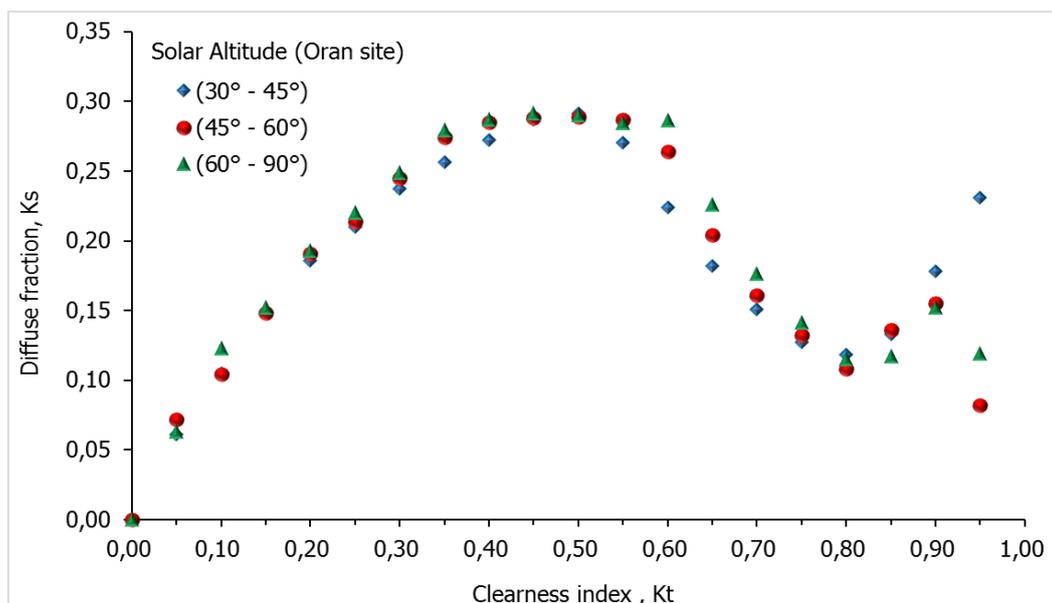


Fig. 2.4 : Evolution des moyennes de l'indice du diffus  $K_s$  en fonction des moyennes de  $K_t$  sur une période d'une année complète et pour des hauteurs du soleil supérieures à  $30^\circ$ .

## 2.2. Segmentation artificielle de la variation de $K_s$ en fonction de $K_t$ en quatre zones.

Toutes les corrélations  $K_s$  versus  $K_t$  rapportées dans la littérature [3, 6,12-15,44-45], qu'elles soient instantanées, horaires ou journalières, ont une forme commune, comme c'est illustré à la Fig. 2.5. Certains d'entre elles, généralement pour de courts intervalles, présentent en outre une extension à droite ( $K_t > 0.8$ ). Des variations saisonnières des corrélations horaires [14-16] avec la hauteur du soleil ont été rapportées. Nous montrerons que la forme entière de la courbe peut être simplement expliquée par la diffusion seule, contrairement à Hollands [13], l'absorption étant introduite pour expliquer les variations des corrélations horaires avec la hauteur du soleil.

Pour mieux comprendre ce phénomène de dispersion observé, nous avons subdivisé cette variation en 04 zones distinctes illustrées dans la figure (2.5).

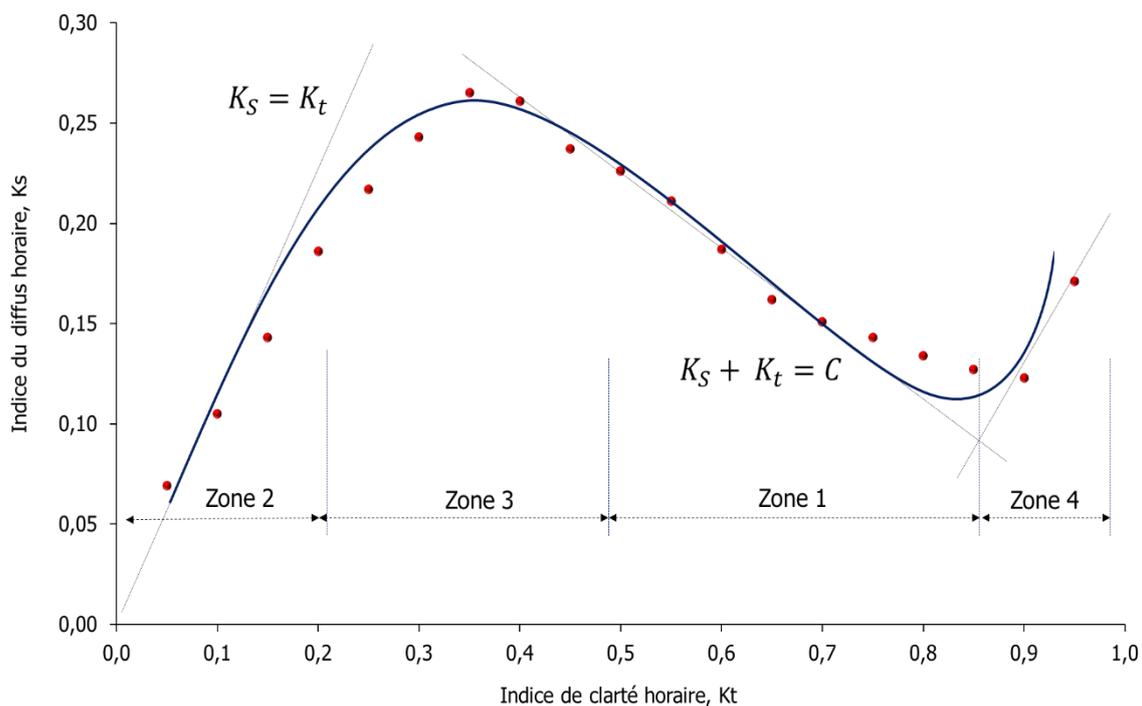


Fig.2.5 : Segmentation de l'évolution du couple  $K_s$ - $K_t$  en quatre zones de variation.

### 2.2.1. ZONE 01 :

Cette zone correspond aux segments de droites de pente négative. Une interprétation physique de cette observation est fournie ci-dessous, en tenant

compte de trois effets : la diffusion, l'absorption et la géométrie du soleil et qui sont respectivement traités.

#### **2.2.1.1. Effet de la diffusion :**

Il est tout à fait clair qu'en plus de la masse d'air, les principaux facteurs responsables de la variation de  $K_t$  et de  $K_s$  sont la nébulosité et la vapeur d'eau atmosphérique, la poussière et l'Ozone. Il est important de noter que la nébulosité est prise ici dans ce document, dans un contexte général, comme étant une nébulosité incluant à la fois la turbidité (brume) et les nuages réels.

Parmi tous ces facteurs, la nébulosité reste le facteur le plus influant affichant de très larges variations d'une journée à une autre, comme l'a été correctement souligné par Liu-Jordan [3]. Cela dénote que les écarts enregistrés entre les différentes données du graphique de  $K_s$ - $K_t$  peuvent être attribués aux variations de la nébulosité dans la journée. La figure 2.6 affiche l'évolution de moyennes journalières de  $K_s$  versus  $K_t$  du mois de janvier 1996, site de Tamanrasset, avec plusieurs jours d'indice de clarté élevé. Notez que les points de données du côté  $K_t$  élevé ont tendance à être placés presque sur une ligne droite. Ces segments de droite ont pour équation la relation suivante :

$$K_s + K_t = C \quad (2.1)$$

C étant une constante inférieure à un. La pente de cette ligne est égale à -1. Hollands [13] a déjà signalé une tendance similaire dans la région d'indice de clarté élevé. Il est important de noter que la ligne droite présente un déplacement parallèle pour différentes hauteurs du soleil et pour différentes périodes de l'année (voir fig. 2.8).

L'augmentation de la nébulosité fait diminuer l'indice de clarté  $K_t$ . Les Valeurs de  $K_s$  apparaissant sur le côté gauche du segment de droite représentent des heures de nébulosité plus élevée que ceux se trouvant sur le côté droit de la droite.

La pente négative de ces segments de droite indique que, dans cette zone, plus la nébulosité augmente plus l'indice du diffus  $K_s$  augmente également en amplitude.

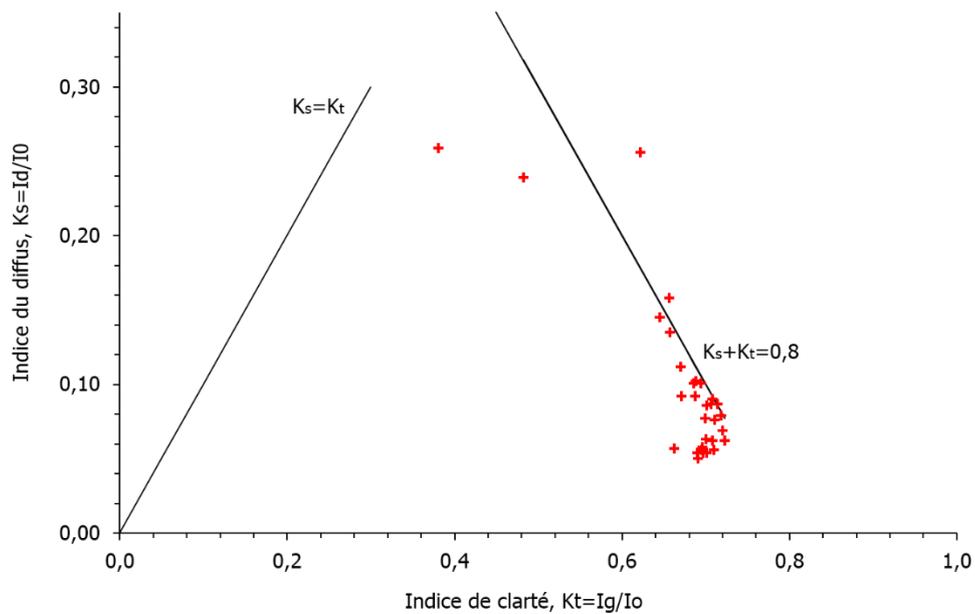


Fig.2.6 : Tracé des valeurs moyennes du Ks Vs Kt pour le mois de janvier 1996 au niveau du site de Tamanrasset

Ainsi, pour le même jour de l'année, mais avec deux niveaux de faible nébulosité, apparaissent deux points A et B correspondant à l'équation (2.1), sur une ligne droite de la figure (2.7). Le point B représente une nébulosité plus importante que celle au point A.

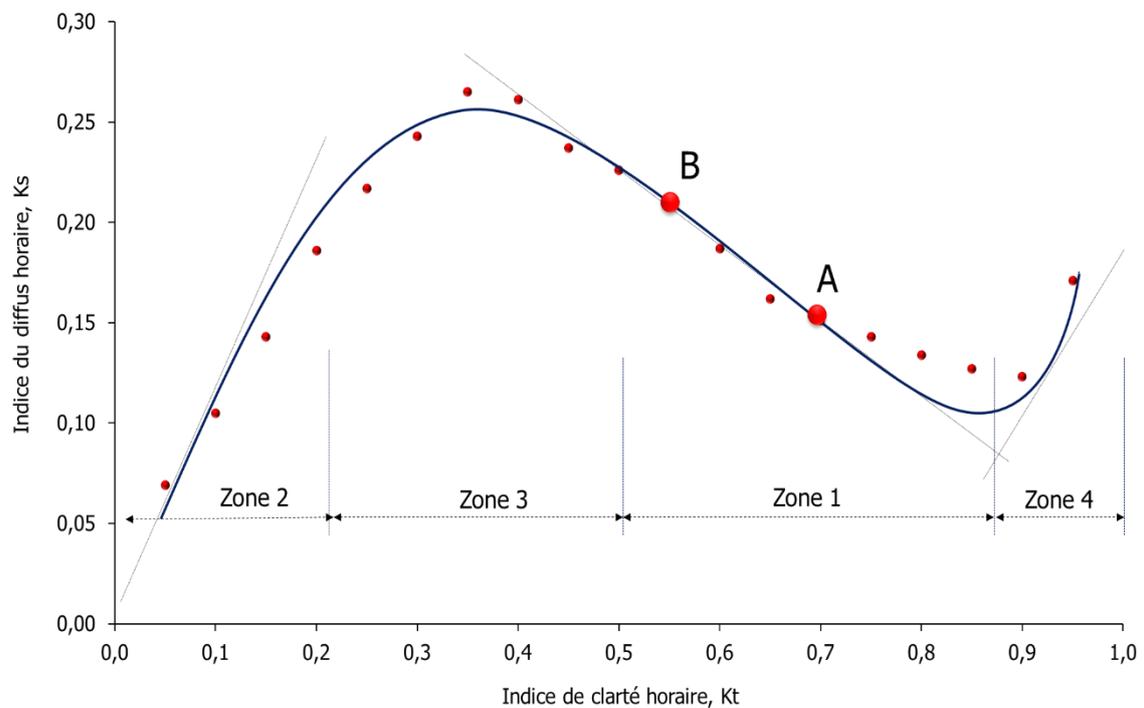


Fig.2.7 : Tracé du Ks Vs Kt pour le même jour de l'année, mais pour deux niveaux de nébulosité différents (B présentant la nébulosité la plus élevée).

En introduisant l'indice du direct  $K_b$ , qui est par définition le rapport de l'irradiation solaire directe  $I_b$  sur l'irradiation solaire globale hors atmosphère  $I_0$ , nous aurons,

puisque :

$$I_d + I_b = I_g \quad (2.2)$$

Et par suite

$$K_s + K_b = K_t \quad (2.3)$$

$$2K_s + K_b = C \quad (2.4)$$

En appliquant l'équation (2.4) aux point A et B, et par élimination de la constante C, nous obtenons la relation suivante :

$$K_{s,B} - K_{s,A} = (K_{b,A} - K_{b,B})/2 \quad (2.5)$$

En éliminant le paramètre  $I_0$  de l'équation (2.5), nous aurons l'équation suivante :

$$I_{d,B} - I_{d,A} = (I_{b,A} - I_{b,B})/2 \quad (2.6)$$

La partie gauche de l'équation (2.6) représente une augmentation de l'irradiation solaire diffuse causée par la nébulosité, et le numérateur de la partie droite de l'équation représente la décroissance de l'irradiation solaire directe causée également par cette même nébulosité. L'équation (2.6) ainsi, et par conséquent l'équation (2.1), peut être interprétée comme suit : Les moments où l'indice de clarté est élevé, près de la moitié de l'irradiation solaire directe qui est stoppée par la nébulosité, atteint la terre sous forme d'irradiation solaire diffuse.

Compte tenu du fait que :

- i. la moitié du rayonnement perdu à partir de la composante continue ne parviennent pas à la surface de la terre comme diffuse,
- ii. la nébulosité est seulement responsable de la différence entre A et B,
- iii. les changements d'absorption induits par la nébulosité sont négligeables par rapport aux changements de diffusion.

Il faut en conclure que près de la moitié du rayonnement direct du faisceau perdu entre A et B est renvoyé dans l'espace. Sur la base de ces observations, les dispersions vers le bas et vers le haut en raison de la nébulosité sont presque égales pour une journée entière des indices de clarté  $K_t$  élevés.

### 2.2.1.2. Effet de l'absorption

L'absorption affecte les deux composantes solaires diffuse et directe et donc d'une manière qualitative similaire l'irradiation solaire globale. C'est-à-dire qu'hormis les différences spectrales, si l'absorption du rayonnement directe est élevée, il doit en être de même de l'absorption du rayonnement diffus. Par conséquent, une réduction de  $K_t$  par absorption correspond à une réduction de  $K_s$ , tous les autres paramètres demeurant inchangés.

Ceci est illustré à la Fig. 2.8 où le point A' correspond à un niveau d'absorption supérieur au point A. En conséquence, les périodes avec des niveaux d'absorption différents doivent être représentées par des ensembles de lignes parallèles.

### 2.2.1.3. Effet de la masse d'air

L'absorption et la diffusion varient avec la masse d'air. Par conséquent, l'effet du changement de la hauteur du soleil sur la relation  $K_s$ - $K_t$  sera une combinaison des deux effets précédents, C'est ce que montre la figure (2.8), où le point A correspond à une altitude du soleil plus élevée que celle du point B. La transition AA' est provoquée par l'absorption et la transition A'B est provoquée par la diffusion.

Comme dans le cas de l'effet d'absorption, les périodes avec des masses d'air différentes sont représentées par des groupes de lignes de droites parallèles.

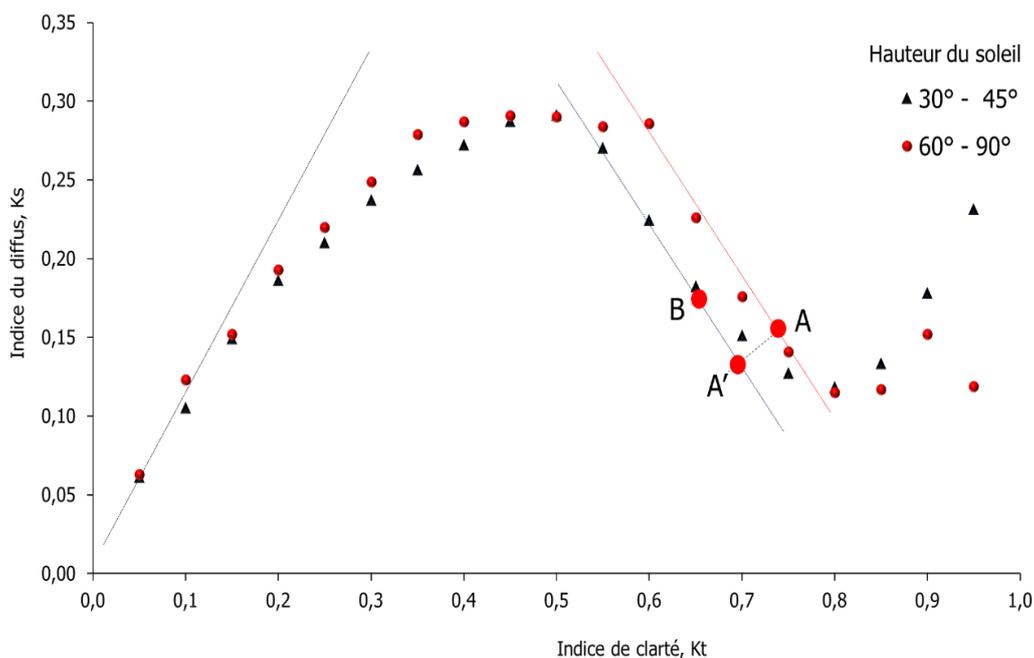


Fig.2.8 : Graphique illustrant comment les variations de la masse d'air déplacent le graphique  $K_d$  par rapport au  $K_t$ . La transition AA' est provoquée par l'absorption et A'A'' par diffusion.

### 2.2.2. ZONE 02 :

Cette partie de l'évolution du couple  $K_s$ - $K_t$  est caractérisée par un ciel complètement couvert, donc par l'absence du rayonnement direct. Le rayonnement global est évidemment égal au rayonnement diffus et  $K_s = K_t$ .

### 2.2.3. ZONE 03 :

Il s'agit d'une courbe qui s'étend de la région gauche de la zone 01 à la région droite de la zone 02. Cette évolution de  $K_s$  Vs  $K_t$  ne peut s'expliquer aussi que par la diffusion due à la nébulosité et également comme un prolongement des lignes de droites de la zone 01.

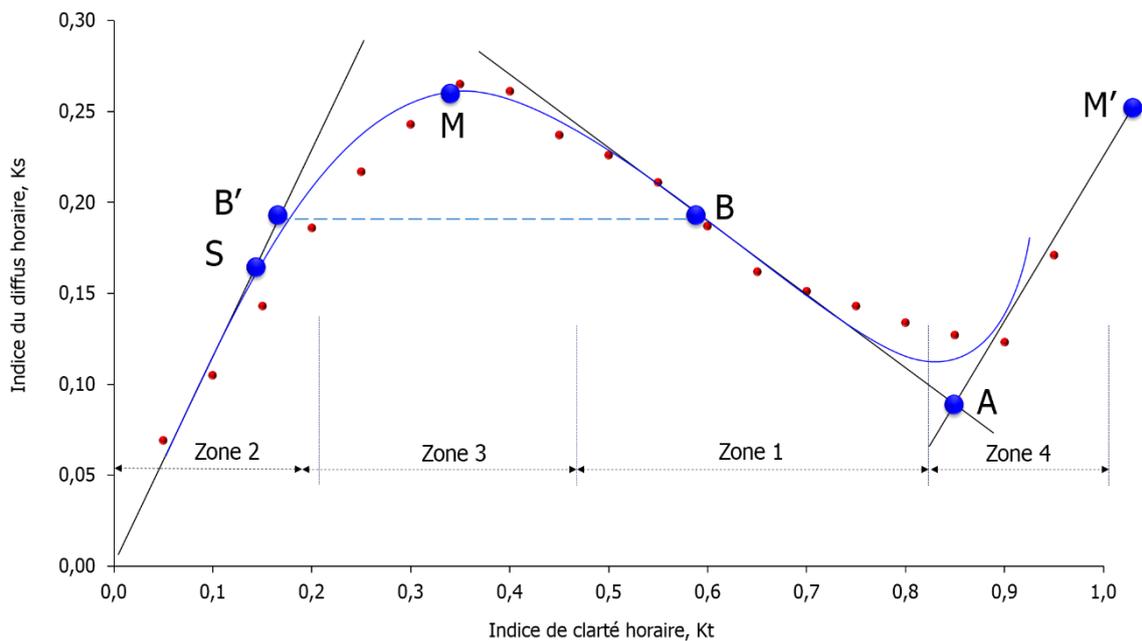


Fig.2.9 : Effet du comportement bimodal clair et nuageux sur la relation  $K_d / K_t$  (ligne de droite d'équation (2.7)).

Supposons que le point A de la figure (2.9) correspond à un ciel clair. Selon l'analyse faite pour la zone 01, s'il y'avait un peu de nébulosité, près de la moitié du rayonnement direct arrêté par cette nébulosité devrait atteindre la surface de la terre sous forme diffuse, et un nouveau point B devrait se placer sur la ligne droite de l'équation (2.1) contenant le point A. Il est à noter que par faible nébulosité, le rayonnement direct diffusé par chaque nuage se dirige soit directement vers la terre ou vers l'espace hors atmosphère subissant probablement et sans difficultés de multiples diffusions.

Une nouvelle augmentation de la nébulosité tend à augmenter le rayonnement diffus sur la terre de la moitié du rayonnement direct qui est stoppée par cette augmentation de la nébulosité ; mais tend également à diminuer la quantité du diffus à raison de la diffusion multiple qui devient plus importante (c'est-à-dire que le rayonnement diffusé par les nuages est à son tour diffusé par d'autres éléments de nuages).

En effet, la nébulosité augmente la diffusion du rayonnement solaire direct, mais rend en même temps plus difficile l'accès du rayonnement diffus à la surface de la terre. Par conséquent, moins de la moitié de la quantité du rayonnement direct atteindra la terre sous forme du diffus.

En conséquence, lorsque  $K_t$  diminue à cause de la nébulosité, les augmentations de  $K_s$  deviennent moins prononcées et son évolution change de courbure par rapport à la ligne de droite de pente -1, comme indiqué au niveau du sommet de la courbe de cette zone.

A force de voir la nébulosité en augmentation continue, on parvient à une situation dans laquelle l'irradiation diffuse, obtenue grâce à la diffusion de l'irradiation directe supplémentaire, serait équilibrée par rapport à celle perdue en raison des diffusions multiples (point max M).

A mesure que la nébulosité augmente, l'effet obstructif des nuages devient plus accentué entraînant ainsi une diminution de  $K_s$ , qui devient plus prononcée à mesure que  $K_t$  diminue. Cela continue jusqu'à ce que l'éclairement direct soit totalement masqué (ciel couvert) et que le point S de la zone 02 soit atteint.

#### **2.2.4. ZONE 04 :**

L'augmentation de l'indice du diffus  $K_s$  avec l'augmentation de l'indice de clarté  $K_t$  ( $K_t \geq 0.8$ ), a été observé par plusieurs auteurs [13, 14, 15, 44, 45]. Certains considèrent que cela se produit par temps clair en raison des effets de dispersion d'une masse d'air plus épaisse [14], ou par des temps nuageux en raison des effets de diffusion directe des nuages [44], mais la plupart l'associent à des périodes d'ombrage du soleil dans un ciel partiellement nuageux, bien qu'il soit souvent attribué à un albédo de surface ou à des nuages légers ou à une concentration locale de la lumière du soleil [15] réfléchi par les nuages [13,45].

Parmi toutes ces remarques descriptives, une seule est d'importance majeure qui prend en considération ce phénomène anormal : Les périodes du soleil non voilé dans un temps partiellement nuageux. Ceci s'explique comme s'est décrit ci-dessous :

Considérons l'exemple précédent et supposons des conditions de nuages dispersés. Chaque nuage étant suffisamment épais pour bloquer ou cacher complètement le soleil. Le point A sur la figure (2.9) représente à nouveau des conditions du ciel clair ; sur la base de ce qui a été dit précédemment au niveau de la zone 01, une nébulosité légèrement croissante devrait déplacer légèrement le point situé sur la droite de pente -1 vers le point B. Mais il convient de noter que cette interprétation ne tient la route qu'une nébulosité homogène telle que la brume par exemple. Pour des conditions de nuages éparses caractérisés par des intervalles d'ombres et d'ensoleillement, les coefficients  $K_s$  et  $K_t$  calculés à cet instant, à un endroit donné, ne serait jamais représenté par le point B. Lorsque le soleil est pratiquement caché, le rayonnement total est égal au rayonnement diffus. Les points sont donc sur la ligne  $K_s = K_t$ . Considérant que  $K_s$  reste presque constant que le soleil soit visible ou pas, le point représentatif serait par exemple B' (qui a la même valeur  $K_s$  au point B).

Par temps ensoleillé, le rayonnement direct enregistré devrait être le même que s'il n'y avait pas de nuages et donc  $K_b$  devrait être le même que pour le point A. La position géométrique de tous les points avec le même coefficient du rayonnement direct que le point A, est la ligne droite AM'' d'équation :

$$K_s - K_t = C \quad (2.7)$$

C étant une constante égale à  $K_b$  au point A et reste constant le long de la ligne droite d'équation (2.7) et bien entendu, plus  $K_t$  augmente le coefficient  $K_s$  le sera aussi.

## **2.3. Effet de la hauteur du soleil sur la corrélation Diffus-Global.**

### **2.3.1. Cas du site d'Oran**

Afin de quantifier la variation de la composante diffuse de l'irradiation solaire globale sous différentes conditions du ciel et pour une large gamme de la hauteur du soleil

considérée précédemment, des courbes retraçant l'évolution de  $K_s$  en fonction de l'indice de clarté  $K_t$  sont établies pour des gammes de hauteurs du soleil fixées dans les paragraphes précédents.

Les figures 2.10a, 2.10b et 2.10c illustrent la distribution des valeurs moyennes de l'indice du diffus  $K_s$  en fonction de  $K_t$  moyen sur des pas de 0.05 de l'indice de clarté  $K_t$ , pour les saisons hivernales, estivales et sur l'année complète. Il est à noter que pour  $K_t < 0.3$ , les courbes de variation de  $K_s$  ont pratiquement la même allure pour toutes les gammes de la hauteur du soleil. Dans cette frange de  $K_t$ , considérée comme étant à ciel complètement couvert, la hauteur du soleil n'a aucune influence sur la composante diffuse de l'irradiation solaire et par suite, l'indice du diffus  $K_s$  croît linéairement avec l'indice de clarté  $K_t$  avec un coefficient directeur pratiquement presque égale à l'unité.

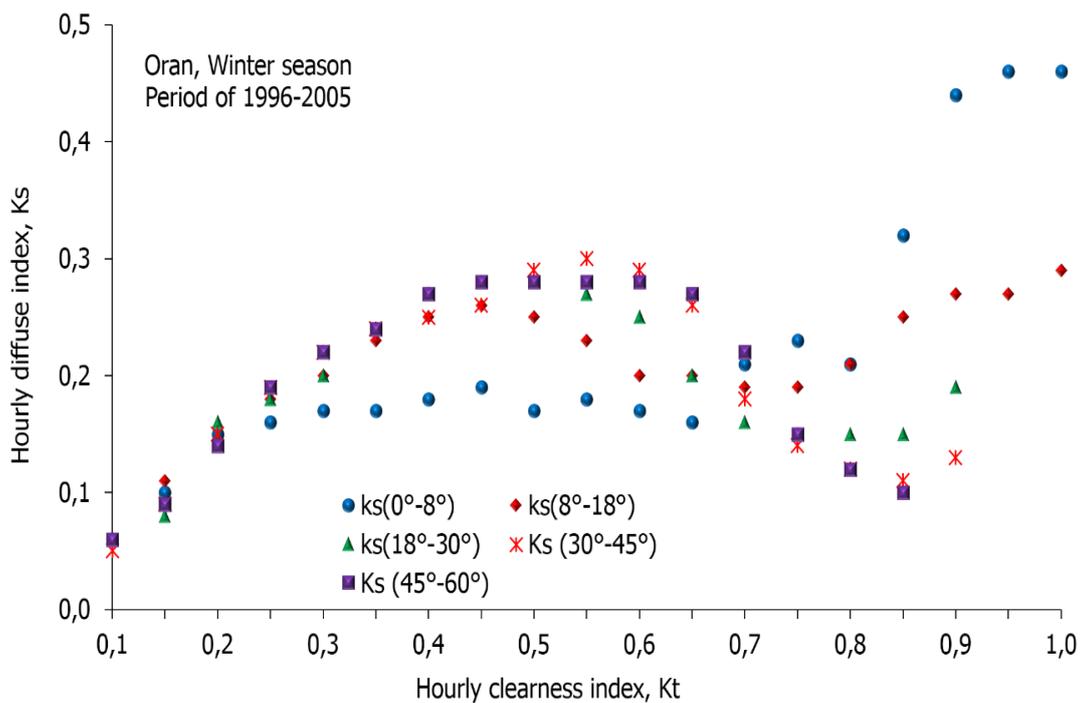


Fig. 2.10a : Evolution de l'indice du diffus horaire  $K_s$  VS l'indice de clarté  $K_t$  pour la saison d'hiver à différentes hauteurs du soleil.

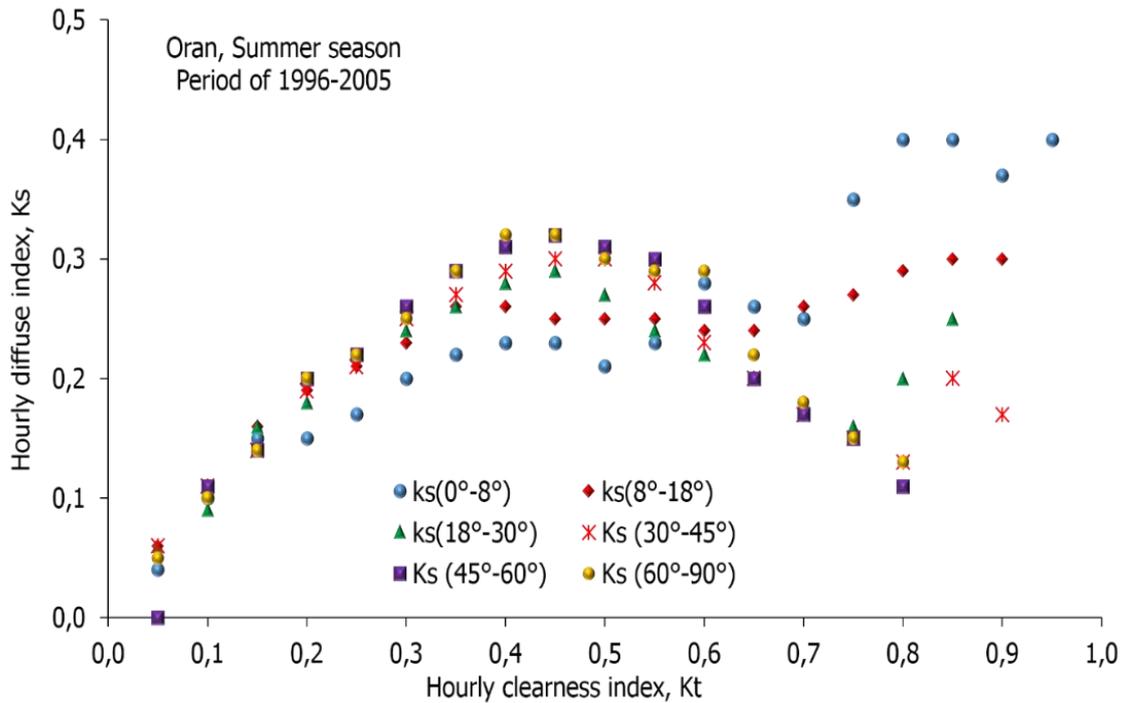


Fig. 2.10b : Evolution de l'indice du diffus horaire Ks VS l'indice de clarté Kt pour la saison d'été à différentes hauteurs du soleil.

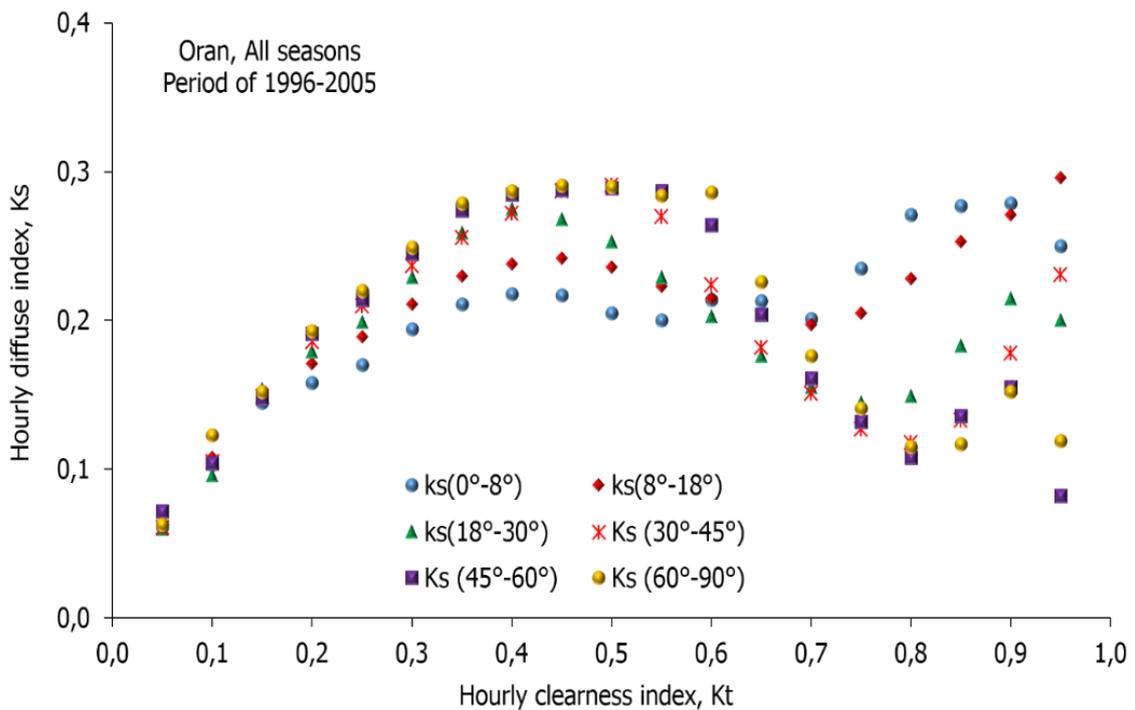


Fig.2.10c : Evolution de l'indice du diffus horaire Ks VS l'indice de clarté Kt pour la période de l'année complète à différentes hauteurs du soleil.

Pour des  $0.3 \leq Kt < 0.6$  où le ciel est partiellement couvert (nuageux), l'effet de la hauteur du soleil commence à se sentir. L'indice du diffus Ks, dans cette région, croit d'une manière non linéaire avec l'indice de clarté Kt. Après une courte

augmentation,  $K_s$  commence à décroître jusqu'à atteindre son niveau minimum. Notons également que le maximum atteint par  $K_s$  varie avec la hauteur du soleil. Plus la hauteur du soleil augmente plus ce pic de  $K_s$  augmente jusqu'à une valeur limite qui sera atteinte à des hauteurs du soleil supérieures ou égales à  $40^\circ$ .

Dans la partie où  $K_t > 0.3$ , en considérant par exemple la période de l'année complète, les valeurs minimales atteintes par  $K_s$  varient également avec la hauteur du soleil. Ainsi, les valeurs minimales de  $K_s$  se situent respectivement aux alentours de  $K_t = 0.55$  pour la gamme ( $0^\circ - 08^\circ$ ),  $K_t = 0.65$  pour la gamme ( $08^\circ - 18^\circ$ ),  $K_t = 0.75$  pour la gamme ( $18^\circ - 30^\circ$ ) et  $K_t = 0.8$  pour la gamme située au-delà de  $30^\circ$ .

Notons également que pour la région de  $K_t > 0.3$ , les courbes de variation de  $K_s$  se décalent entre elles. Les écarts entre les différentes courbes s'accroissent pour de faibles hauteurs du soleil et pour des  $K_t > 0.8$ . Cette disparité est probablement due au fait que :

- Le nombre de données mesurées pour chaque gamme de la hauteur du soleil est très différent ;
- Pour  $K_t > 0.8$  (ciel clair), l'indice du diffus  $K_s$  est fortement affecté par les constituants de l'atmosphère au niveau de la région oranaise [46].

Ce constat est pratiquement identique pour chaque période de l'année considérée.

Revenant à la région de  $0.3 \leq K_t < 0.6$  où le ciel est partiellement couvert (nuageux), les données radiométriques issues de la station météo d'Oran affichent des disparités en terme de magnitude de  $K_s$  pour les différentes gammes de la hauteur du soleil. La figure 2.11 par exemple, affiche pour  $K_t = 0.55$ , les valeurs de  $K_s$  pour différentes hauteurs du soleil et pour les trois périodes de l'année (hiver, été et l'année totale). Pour des hauteurs du soleil inférieures à  $45^\circ$ ,  $K_s$  présente des valeurs qui augmentent uniformément avec la hauteur du soleil. Mais au-delà de la gamme ( $30^\circ - 45^\circ$ ) ce taux de croissance commence à s'affaiblir en atteignant une valeur limite.

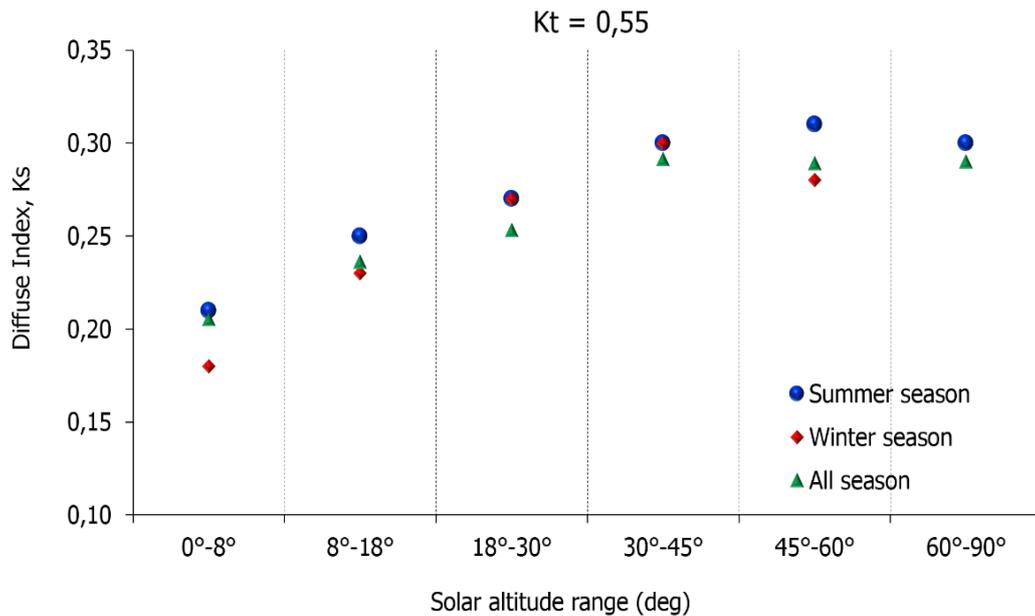


Fig.2.11 : Valeurs de l'indice du diffus horaire Ks VS la hauteur du soleil à Kt=0.55 pour différentes périodes de l'année

### 2.3.2. Cas du site de Tamanrasset

Afin de quantifier la variation de la composante diffuse de l'irradiation solaire globale sous différentes conditions du ciel et pour une large gamme de la hauteur du soleil considérée précédemment, des courbes retraçant l'évolution de Ks en fonction de l'indice de clarté Kt sont établies pour des gammes de hauteurs du soleil fixées dans les paragraphes précédents.

Les figures 2.12, 2.13 et 2.14 illustrent la distribution des valeurs moyennes de l'indice du diffus Ks en fonction de Kt moyen sur des pas de 0.05 de l'indice de clarté Kt, pour les différentes saisons de l'année.

#### a. Evolution de l'indice du diffus Ks dans l'intervalle Kt < 0.3 :

Il est à noter que pour  $Kt < 0.3$ , les courbes de variation de Ks ont pratiquement la même allure pour toutes les gammes de la hauteur du soleil. Dans cette frange de Kt, considérée comme étant à ciel complètement couvert, la hauteur du soleil n'a aucune influence sur la composante diffuse de l'irradiation solaire et par suite, l'indice du diffus Ks croît linéairement avec l'indice de clarté Kt avec un coefficient directeur pratiquement presque égale à l'unité.

#### b. Evolution de l'indice du diffus Ks dans l'intervalle Kt ≥ 0.3 :

L'effet de la hauteur du soleil commence à se distinguer dans cet intervalle.

- Pour les hauteurs du soleil de la gamme (0-08°), l'indice du diffus continu à progresser d'une manière quasi linéaire jusqu'à atteindre un maximum aux alentours de  $K_t$  compris entre 0.55 et 0.6, ensuite il entame une décroissance en atteignant un minimum au point de  $K_t = 0.8$ . Ce constat est valable pour les différentes périodes de l'année considérées à l'exception de la saison d'hiver où cet indice accuse un léger fléchissement au début de cet intervalle ensuite il reprend après son évolution linéaire.
- Pour les hauteurs du soleil des gammes (08°-18°) et (18°-30°), diverses constatations peuvent être mises en exergue : En ce qui concerne la période de l'année complète (figure 2.12a) et Pour les hauteurs du soleil (08°-18°),  $K_s$  cesse d'accroître et se stabilise légèrement, ensuite il commence à augmenter à partir de  $K_t = 0.4$  en atteignant un pic aux environs de  $K_t = 0.6$ , par la suite il recommence à décroître jusqu'à atteindre son minimum à  $K_t = 0.8$ . Par contre pour les hauteurs du soleil (18°-30°), Après une légère augmentation il commence à décroître jusqu'à un minimum atteint aux environs de  $K_t = 0.55$ . Par la suite il entame une ascension jusqu'à une valeur maximale atteinte au point de  $K_t = 0.7$ .

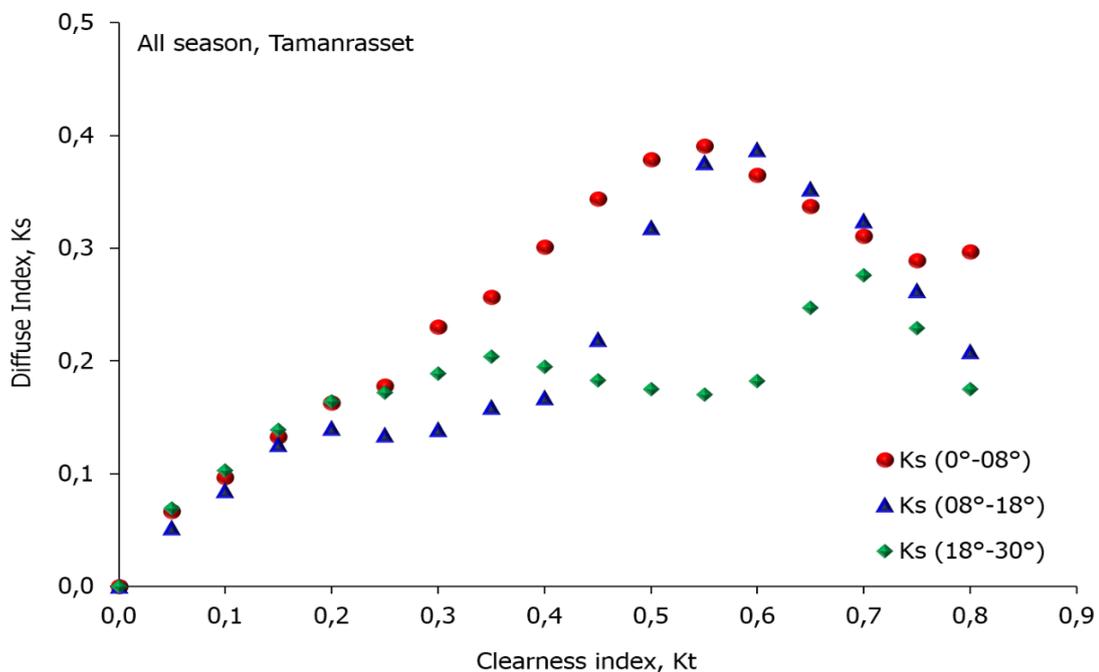


Fig. 2.12a : Evolution de l'indice du diffus horaire  $K_s$  Vs l'indice de clarté  $K_t$  pour l'année complète à des hauteurs du soleil  $< 30^\circ$ .

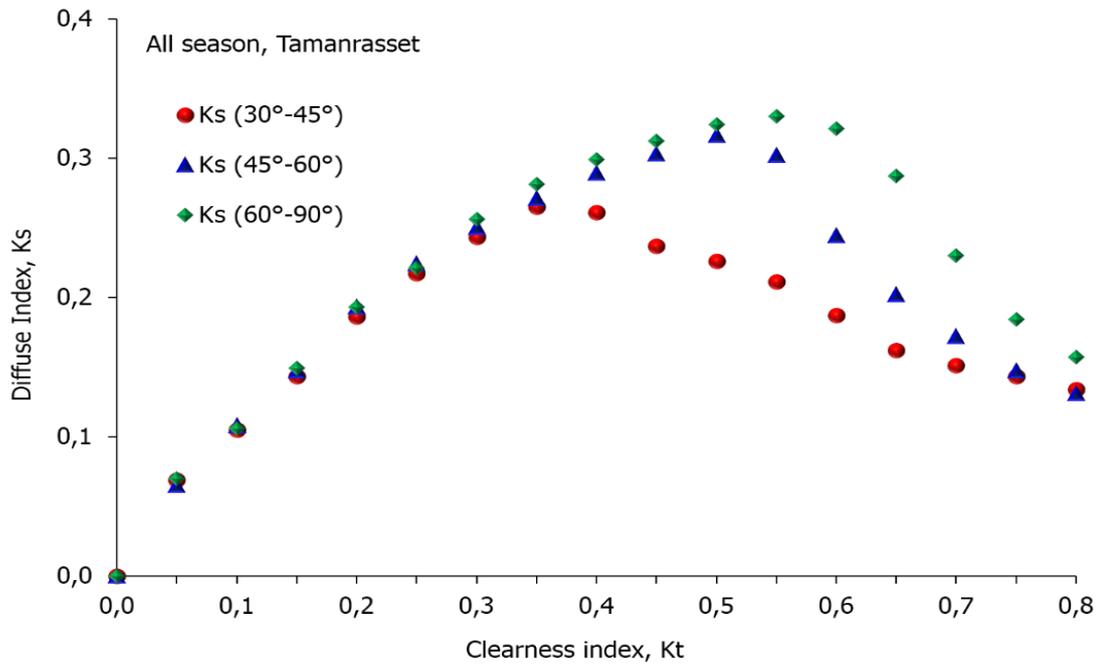


Fig. 2.12b : Evolution de l'indice du diffus horaire Ks Vs l'indice de clarté Kt pour l'année complète à des hauteurs du soleil >30°.

Il est à noter que les extrémums de l'indice du diffus Ks varient d'une saison à une autre et varient avec la hauteur du soleil.

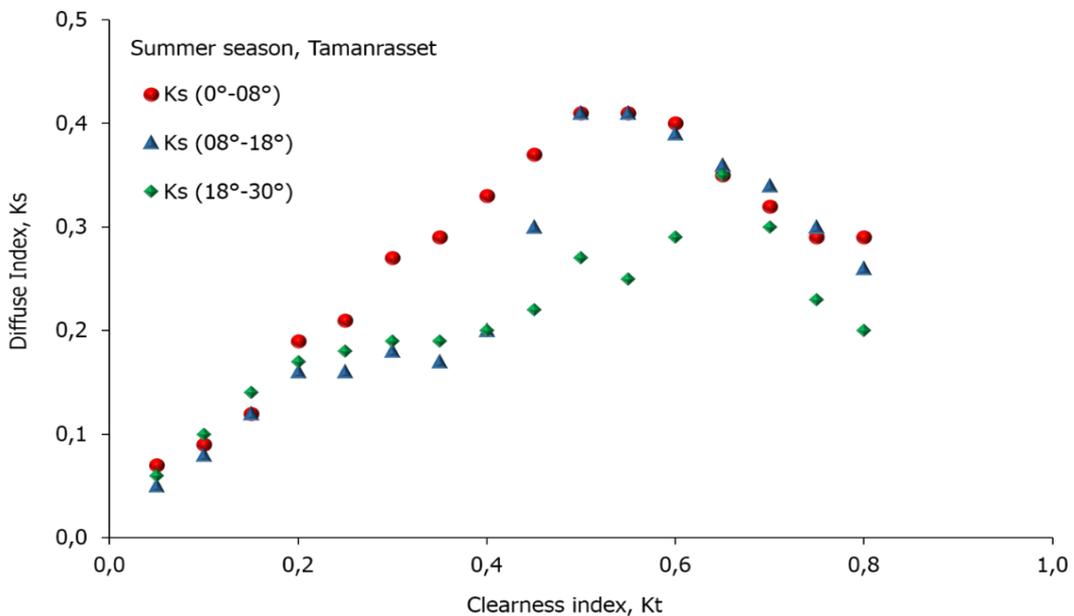


Fig. 2.13a : Evolution de l'indice du diffus horaire Ks Vs l'indice de clarté Kt pour la saison d'été à des hauteurs du soleil <30°.

A titre d'illustration, Le maximum atteint par Ks dans la période d'été, (figure 2.13a), et pour des hauteurs du soleil (08°-18°) serait au point de Kt=0.5, tandis que le minimum est atteint à Kt=0.35.

Par ailleurs, et toujours durant la période d'été, le maximum atteint par  $K_s$  pour la gamme des hauteurs du soleil ( $18^\circ$ - $30^\circ$ ) serait au point de  $K_t= 0.65$  et le minimum est atteint au niveau de  $K_t=0.35$ .

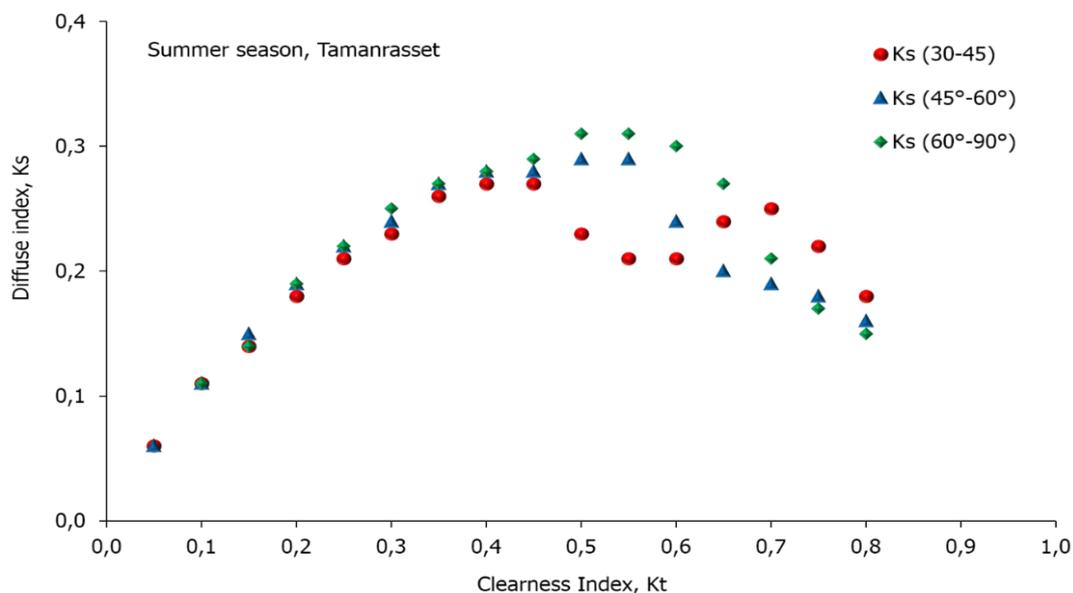


Fig. 2.13b : Evolution de l'indice du diffus horaire  $K_s$  Vs l'indice de clarté  $K_t$  pour la saison d'été à des hauteurs du soleil  $>30^\circ$ .

Un effet antagoniste est observé pendant la période d'hiver, au niveau de la figure 2.14a, en considérant l'évolution de  $K_s$  pour les hauteurs du soleil de la gamme ( $08^\circ$ - $18^\circ$ ) et ( $18^\circ$ - $30^\circ$ ), Le maximum atteint par  $K_s$  dans la gamme ( $18^\circ$ - $30^\circ$ ) se trouve au même point de  $K_t$  où on enregistre le minimum atteint par  $K_s$  dans la gamme ( $08^\circ$ - $18^\circ$ ) et vice versa, i.e. : le min de  $K_s$  est atteint, pour la gamme ( $18^\circ$ - $30^\circ$ ), au même point où  $K_s$  atteint son max dans la gamme ( $08^\circ$ - $18^\circ$ ).

En ce qui concerne les hauteurs du soleil supérieures à  $30^\circ$ , bien que les différentes courbes présentent pratiquement la même allure, les valeurs de  $K_s$  sont bien différentes d'une gamme de hauteur du soleil à une autre. On note également que plus l'indice de clarté augmente, plus l'indice du diffus diminue.

Restant dans la région de  $0.3 \leq K_t < 0.6$  où le ciel est partiellement couvert (nuageux), les données radiométriques issues de la station météo de Tamanrasset affichent des disparités en terme de magnitude de  $K_s$  pour les différentes gammes de la hauteur du soleil. La figure 2.15 par exemple, affiche pour  $K_t = 0.55$ , les valeurs de  $K_s$  pour différentes hauteurs du soleil et pour les trois périodes de l'année (hiver, été et l'année totale).

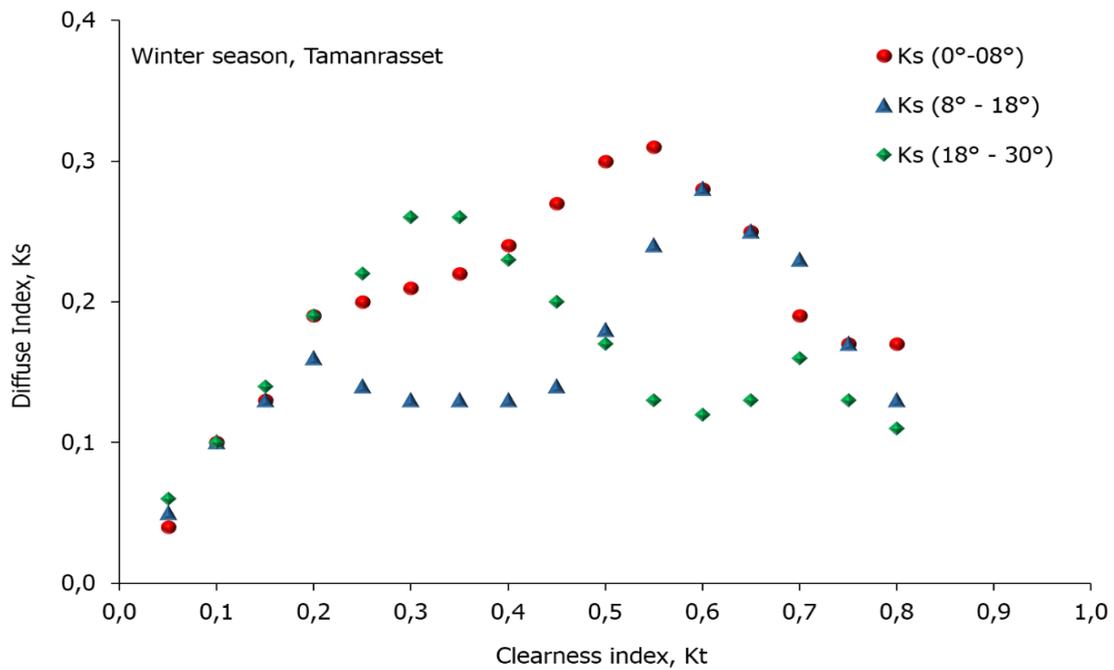


Fig. 2.14a : Evolution de l'indice du diffus horaire Ks Vs l'indice de clarté Kt pour la saison d'hiver à des hauteurs du soleil  $< 30^\circ$ .

Pour des hauteurs du soleil inférieures à  $30^\circ$ , Ks présente des valeurs qui ont tendance à diminuer avec la hauteur du soleil. Le phénomène s'inverse pour des hauteurs du soleil supérieures à  $30^\circ$ , en constatant une croissance progressive de Ks jusqu'à atteindre une valeur limite.

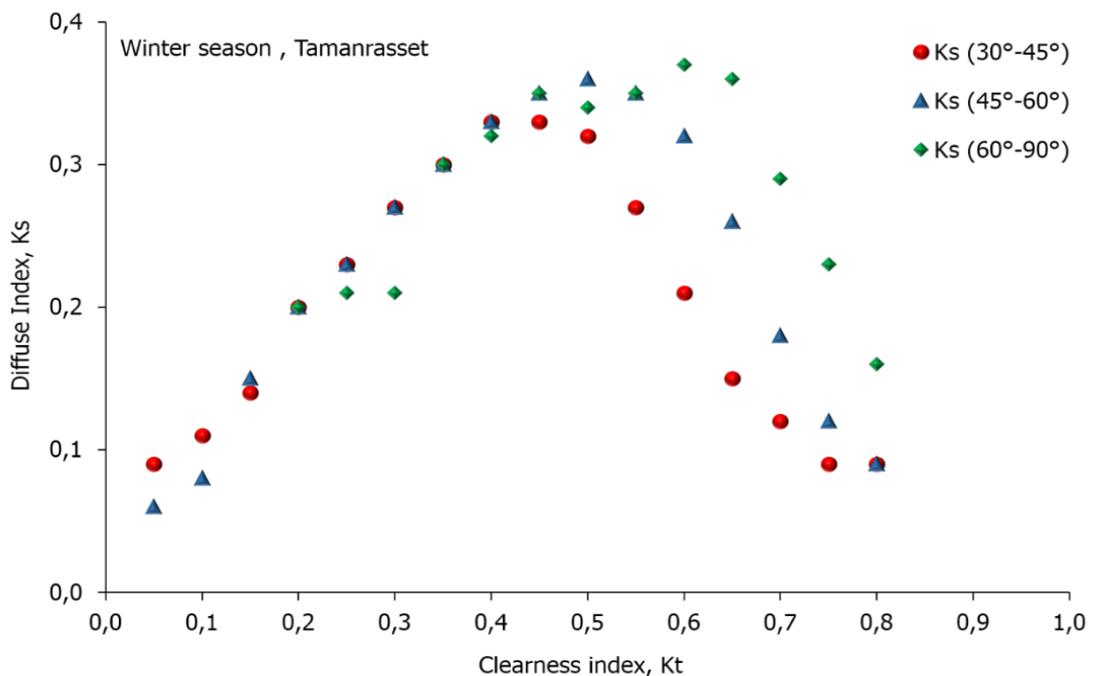


Fig. 2.14b : Evolution de l'indice du diffus horaire Ks Vs l'indice de clarté Kt pour la saison d'hiver à des hauteurs du soleil  $> 30^\circ$ .

Ces différents résultats et ces divers constatations nous emmènent à conclure que la composante diffuse est bien affectée par la variation de la hauteur du soleil.

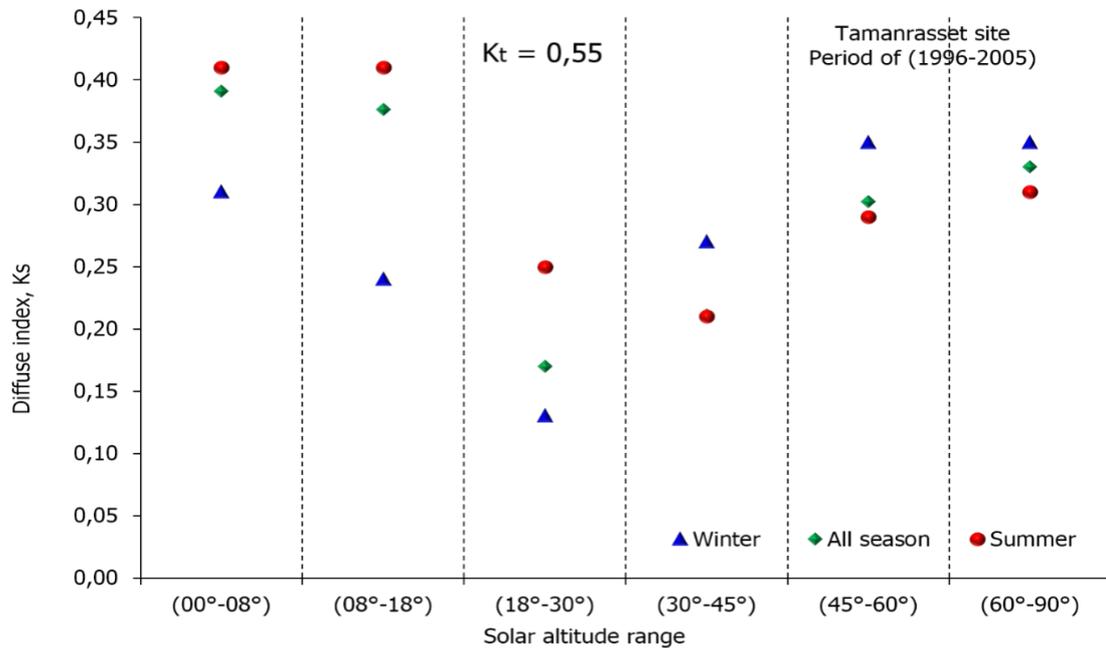


Fig.2.15 : Valeurs de l'indice du diffus horaire Ks Vs la hauteur du soleil à Kt=0.55 et pour toutes les périodes de l'année.

## 2.4. CONCLUSION

Les courbes tracées de variation du ratio Ks par rapport à l'indice de clarté Kt ont montré que les points de Kt élevés ont tendance à être placés presque sur une ligne droite d'équation  $K_s + K_t = C$ . C étant une constante inférieure à 1. Cette ligne droite présente des translations ou des déplacements parallèles pour différentes période de l'année et pour différentes hauteurs du soleil. Une interprétation physique de cette évolution nous a amené à conclure que pendant les périodes de faible nébulosité, pratiquement la moitié de l'irradiation solaire directe est stoppée par la nébulosité et est dispersée dans l'atmosphère sous forme diffuse. Cette interprétation suppose que l'absorption ne varie pas sensiblement avec la nébulosité pour des conditions de nébulosité très basse.

Cependant, la nébulosité a été définie ici comme une nébulosité générale comprenant à la fois la turbidité (la brume) et les nuages réels.

Nous avons montré que la courbe de  $K_s$  Vs  $K_t$ , sous toutes ses formes, peut être expliquée uniquement par l'effet de diffusion. Les variations d'absorption causées par la masse d'air ou par le changement des constituants absorbants n'ont pas d'incidence sur la forme de base de la courbe de variation  $K_s$  Vs  $K_t$ , mais tiennent plutôt compte de la variabilité de la hauteur du soleil.

Plusieurs descriptions de ce processus, rapportées dans la littérature, ont été soulignées, car elles pourraient conduire à des incompréhensions de cette relation simple. La région où l'indice de clarté  $K_t$  est élevé avec un indice du diffus  $K_s$  élevé ne peut être considérée comme une anomalie, il a été démontré que ce n'était qu'une conséquence naturelle des périodes d'ensoleillement ou d'éclat (surgissement) des rayons solaires durant les périodes d'un temps partiellement couvert, et que les mesures de l'irradiation solaire n'ont pas été effectuées sur des zones étendues mais plutôt à des points spécifiques.

On a également trouvé que cette région de corrélation suit des lignes droites avec des pentes positives d'équation  $K_s - K_t = C$ .

L'analyse faite sur l'évolution de  $K_s$  avec  $K_t$  et pour des gammes de la hauteur du soleil bien déterminées, a révélé qu'il existe une bonne corrélation de la composante diffuse de l'irradiation solaire globale avec la hauteur du soleil que ce soit sur la forme de l'évolution de l'indice du diffus  $K_s$  ou sur sa grandeur physique.

Compte tenu des résultats d'analyse faite dans cette partie d'étude, nous recommandons vivement d'utiliser des corrélations du ratio  $K_s$  en fonction de  $K_t$  et la comparer à celles qui pourraient se faire avec le ratio  $K_d$  en fonction de  $K_t$ .

## **Chapitre 03 :**

Corrélation de la fraction diffuse avec l'indice de clarté  $K_t$

## **Introduction**

Dans le but d'estimer la composante diffuse de l'irradiation solaire globale horizontale dans des localités algériennes, nous avons procédé à une étude comparative de neuf (09) modèles d'estimation de la fraction diffuse horaire du rayonnement solaire global horizontal en fonction uniquement de l'indice de clarté  $K_t$ , qui sont établis par différents chercheurs activant dans le domaine des énergies renouvelables. Parmi eux nous citerons : Orgill et Hollands [13], Erbs et al. [12], Reindl et al. [17], Chendo et Maduekwe [47], Jacovides et al. [32], Miguel et al [24], Soares et al [25], Hawlader [41] et Boland et al [27]. La comparaison est basée sur les données d'irradiation solaires mesurées au niveau des sites d'Oran et de Tamanrasset.

Le choix de ces modèles a été motivé par leurs performances prouvées ainsi que la disponibilité des données de mesure requises pour une éventuelle étude comparative de ces modèles. Nous avons sélectionné ces modèles également pour la variété de leurs formes, à savoir la forme linéaire, la forme quadratique, la fonction polynomiale du 3ème et 4ème degré et le modèle de forme exponentielle. Suite à une première comparaison des neuf modèles, trois modèles les plus performants ont été sélectionnés pour une analyse plus approfondie. Ainsi, les versions originales des modèles ont été comparées à leurs versions modifiées avec des coefficients ajustés pour une meilleure correspondance avec les données d'Oran et de Tamanrasset. À cette fin, les fonctions d'ajustement des courbes polynomiales ont été appliquées à l'aide d'une estimation non linéaire utilisant des techniques numériques. Un bref résumé des modèles sélectionnés est fourni ci-dessous :

### **3.1. Modèles sélectionnés**

#### **3.1.1. Modèle d'Orgill et Hollands :**

Orgill et Hollands [13] ont vérifié le modèle de Liu et Jordan [3] de telle sorte que, pour chaque intervalle de valeurs de  $K_t$  avec un pas de 0.05, les valeurs moyennes de  $K_d$  correspondantes ont été tracées en fonction de la valeur moyenne de l'indice de clarté  $K_t$  dans cet intervalle. En utilisant des données issues de la ville de Toronto, Canada, ils ont établi la corrélation linéaire suivante pour la fraction diffuse horaire :

$$\begin{aligned}
K_d &= 1.557 - 1.84K_t & 0.35 \leq K_t \leq 0.75; \\
K_d &= 1.0 - 0.249K_t & K_t < 0.35 \\
&\& \\
K_d &= 0.177 & K_t > 0.75
\end{aligned} \tag{3.1}$$

### 3.1.2. Modèle d'Erbs :

Erbs et al. [12] ont utilisé un ensemble de données collectées à partir de quatre localités aux États-Unis. Ils ont établi une corrélation de forme polynomiale de quatrième ordre pour la fraction diffuse solaire horaire :

$$\begin{aligned}
K_d &= 0.951 - 0.1604K_t + 4.388K_t^2 - 16.638K_t^3 + 12.336K_t^4 & 0.22 < K_t \leq 0.80; \\
K_d &= 1.0 - 0.09K_t & K_t \leq 0.22 \\
&\& \\
K_d &= 0.165 & K_t > 0.80
\end{aligned} \tag{3.2}$$

### 3.1.3. Modèle de Douglas Reindl :

Reindl et al. [17] ont utilisé des mesures effectuées en Europe du Nord et en Amérique du Nord pour étudier l'influence des variables climatiques et géométriques sur la fraction diffuse horaire. Ces auteurs visaient à déterminer si, en plus de l'indice de clarté, d'autres variables prédictives telles que la température, la hauteur du soleil ainsi que l'humidité relative peuvent réduire significativement l'erreur standard de ce type de corrélations. Ils ont établi les expressions suivantes :

$$\begin{aligned}
K_d &= 1.45 - 1.67K_t & 0.3 \leq K_t \leq 0.78; \\
K_d &= 1.02 - 0.248K_t & K_t < 0.30 \\
&\& \\
K_d &= 0.147 & K_t > 0.78
\end{aligned} \tag{3.3}$$

### 3.1.4. Modèle de Chendo et Maduekwe :

Chendo et Maduekwe [47] ont utilisé des données de Lagos, Nigéria, enregistrées sur une période de deux (02) ans pour étudier l'influence des paramètres climatiques sur la fraction diffuse horaire. Cela a été fait pour réduire l'erreur standard inhérente aux corrélations de type Liu et Jordan. Ils ont établi les expressions suivantes :

$$\begin{aligned}
K_d &= 1.385 - 1.396K_t & 0.3 < K_t \leq 0.8; \\
K_d &= 1.022 - 0.156K_t & K_t \leq 0.3 \\
&\& \\
K_d &= 0.264 & K_t > 0.8
\end{aligned}
\tag{3.4}$$

### 3.1.5. Modèle de Jacovides :

La corrélation de Jacovides [32] est basée sur des données radiométriques horaires recueillies sur le site semi-rural d'Athalassa, à Chypre, sur une période de 5 ans. Il a comparé ses corrélations à 10 modèles disponibles dans la littérature scientifique largement utilisés en termes d'indicateurs statistiques. En conséquence, pour les différentes gammes de  $K_t$ , une seule corrélation polynomiale résultante est exprimée comme suit :

$$K_d = 0.94 - 0.937K_t - 5.01K_t^2 + 3.32K_t^3 \tag{3.5}$$

### 3.1.6. Modèle de De Miguel :

Miguel et al [24] ont évalué des modèles existants avec des données de la région nord de la Méditerranée et ont développé de nouvelles corrélations journalières et horaires. Les sites considérés comprennent des localités situées au Portugal, en Espagne, en France et en Italie. Ils ont fourni un polynôme de troisième ordre pour les corrélations de fractions diffuses horaires :

$$\begin{aligned}
K_d &= 0.724 + 2.738K_t - 8.32K_t^2 + 4.967K_t^3 & 0.21 < K_t \leq 0.76; \\
K_d &= 0.995 - 0.081K_t & K_t \leq 0.21 \\
&\& \\
K_d &= 0.18 & K_t > 0.76
\end{aligned}
\tag{3.6}$$

### 3.1.7. Modèle de Soares :

Soares et al [25] ont appliqué une technique de perception des réseaux de neurones pour l'estimation du rayonnement solaire diffus horaire au niveau de la ville de Sao Paulo, au Brésil. En utilisant des paramètres météorologiques mesurés dans la période allant de 1998 à 2001, Soares a pu établir un polynôme du quatrième ordre de la forme suivante :

$$\begin{aligned}
K_d &= 0.9 + 1.1K_t - 4.5K_t^2 + 0.01K_t^3 + 3.14K_t^4 & 0.17 < K_t \leq 0.75; \\
K_d &= 1.0 & K_t \leq 0.17; \\
&\& \\
K_d &= 0.0.17 & K_t > 0.75
\end{aligned}
\tag{3.7}$$

### 3.1.8. Modèle de Hawlader :

Hawlader [41] a utilisé des données de mesures d'un site tropical à Singapour ; Il a établi la corrélation polynomiale de second ordre pour la fraction diffuse horaire :

$$\begin{aligned}
K_d &= 1.1350.9422K_t - 0.3878K_t^2 & 0.225 < K_t \leq 0.775; \\
K_d &= 0.915 & K_t \leq 0.225 \\
&\& \\
K_d &= 0.215 & K_t > 0.775
\end{aligned}
\tag{3.8}$$

### 3.1.9. Modèle de Boland :

Boland et al [27] ont développé un modèle générique pour l'estimation du rayonnement solaire diffus à partir du rayonnement solaire global sur une surface horizontale.

En utilisant des données de mesure pour des sites australiens, africains et européens, Boland a généré un modèle mathématique de la fraction diffuse solaire horaire donné par l'expression suivante :

$$K_d = \frac{1}{1 + e^{-5.00 + 8.60K_t}}
\tag{3.9}$$

## 3.2. Evaluation des performances des modèles sélectionnés

Pour une étude comparative des performances des modèles décrits dans le paragraphe 3.1, quatre indicateurs statistiques communs ont été utilisés, à savoir le MBE (%) (Mean Bias Error), (Eq. 3.10), l'erreur relative RE(%), (Eq. 3.11), et l'erreur quadratique moyenne RMSE (Eq. 3.12) et un indicateur statistique supplémentaire, le t-stat, a été proposé (Eq. 3.13). Le t-stat permet de comparer les modèles et, en même temps, d'indiquer si les estimations d'un modèle sont statistiquement significatives à un niveau de confiance particulier. En outre, il peut être calculé en utilisant à la fois le MBE et le RMSE, tels que définis dans les équations (3.10 et 3.11), et prend en compte la dispersion des résultats qui est

négligée lorsque l'erreur quadratique moyenne RMSE et le MBE sont considérées séparément [48].

Les erreurs MBE et RMSE sont définies comme suit :

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (K_{dm(i)} - K_{de(i)}) * 100 (\%) \quad (3.10)$$

$$RE = \frac{(K_{dm(i)} - K_{de(i)})}{K_{dm(i)}} * 100 (\%) \quad (3.11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (K_{dm(i)} - K_{de(i)})^2} \quad (3.12)$$

$$t - stat = \sqrt{\left( \frac{(n-1) MBE^2}{RMSE^2 - MBE^2} \right)} \quad (3.13)$$

Où n est le nombre d'observations (données de mesure),  $K_{dm(i)}$  est la  $i^{\text{ème}}$  valeur mesurée de la fraction diffuse et  $K_{de(i)}$  est la  $i^{\text{ème}}$  valeur de la fraction diffuse estimée.

Le MBE nous informe, sur le long terme, des performances du modèle. La valeur positive de MBE indique une surestimation des valeurs prédites par rapport aux valeurs expérimentales. Le contraire serait pour les valeurs négatives de MBE. Plus les valeurs absolues de MBE sont plus faibles, plus le modèle est performant. Un inconvénient de ce test, qui est très significatif, est que des valeurs surestimées du MBE annuleraient les valeurs sous-estimées de ceci.

Le RMSE indique les performances à court terme du modèle en comparant, terme à terme, la différence réelle entre les valeurs estimées et mesurées. Un inconvénient de ce test est que quelques erreurs importantes dans la somme peuvent produire une augmentation significative du RMSE. En outre, le test ne fait pas de distinction entre sous-estimation et surestimation [48].

Pour juger avec affirmation que le modèle est statistiquement significatif, on utilise le test t-stat, il suffit de déterminer la valeur critique 'tc' obtenue à partir de la table statistique standard, soit  $t_{\alpha/2}$  pour la distribution avec (n-1) degrés de liberté et pour une proportion  $\alpha$ . Pour considérer que le modèle présente de meilleures performances et qu'il est statistiquement significatif, la valeur calculée de t-stat doit

être inférieure à la valeur  $t_c$  critique. Plus la valeur de  $t$ -stat est petite, meilleure est la performance du modèle [48].

### 3.2.1. Analyse comparative des modèles en utilisant leurs coefficients originaux

Afin de synthétiser au mieux cette analyse comparative des différents modèles cités ci-dessus, nous avons appliqué la technique de la fonction des distributions cumulées des erreurs relatives (en  $\pm\%$ ) [49], [50] pour les neuf (09) modèles avec leurs coefficients originaux pour les sites d'Oran et de Tamanrasset.

Les figures (3.1) et (3.2) montrent la distribution des fréquences cumulées pour différentes valeurs des erreurs relatives RE ( $\pm\%$ ).

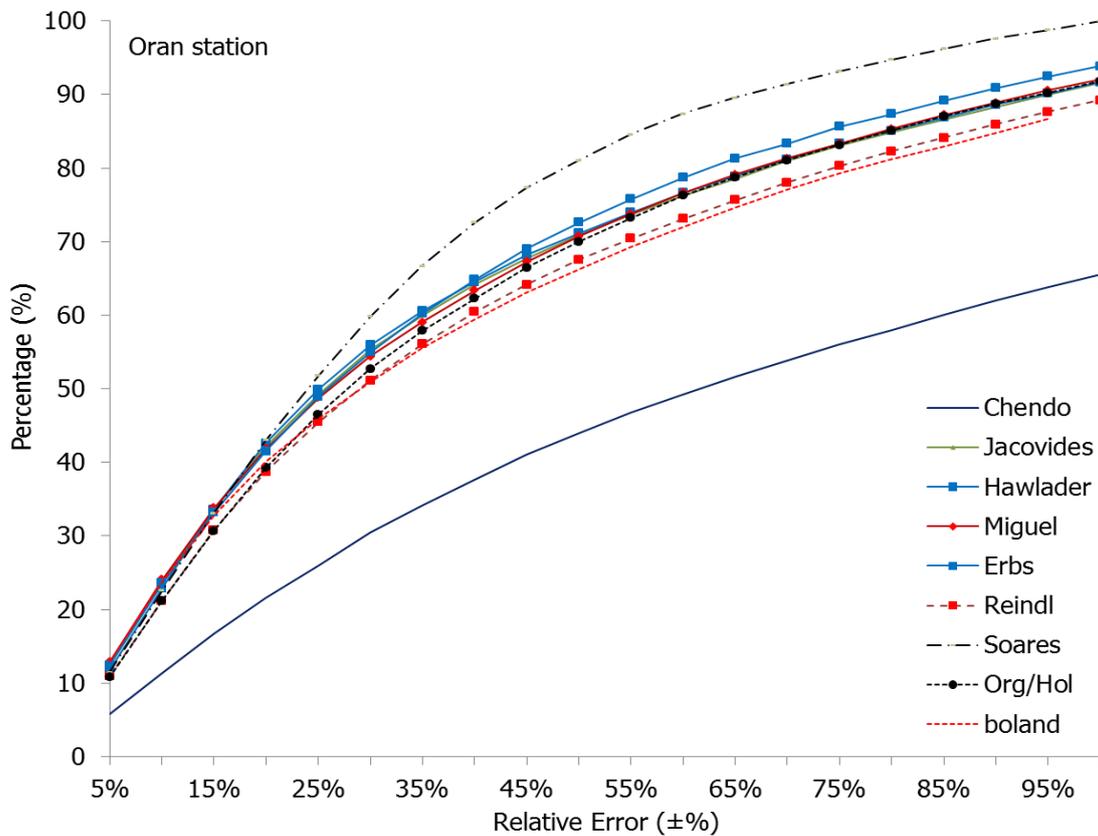


Fig.3.1 : La distribution des fréquences cumulées pour différentes valeurs des erreurs relatives RE ( $\pm\%$ ) pour les neuf modèles avec les coefficients originaux. Station d'Oran.

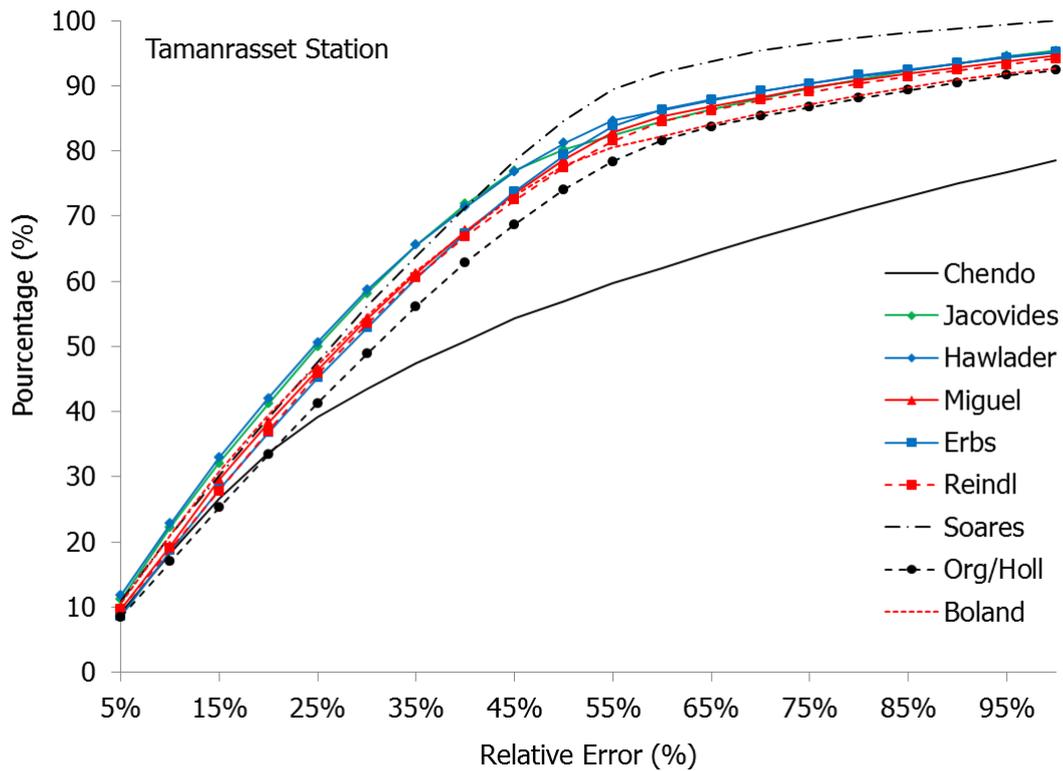


Fig.3.2 : La distribution des fréquences cumulées pour différentes valeurs des erreurs relatives RE ( $\pm$  %) pour les neuf modèles avec les coefficients originaux. Station de Tamanrasset.

Les tableaux 3.1 et 3.2 présentent, pour les deux stations, ces informations sous forme de valeurs discrètes et pour un intervalle d'erreur relative de  $\pm 5\%$  à  $\pm 45\%$ .

Tableau 3.1 : Pourcentage des résultats correspondants aux différentes valeurs des erreurs relatives RE(%) avec des coefficients originaux des 09 modèles appliqués sur les données d'Oran.

Modèles	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$	$\pm 15\%$	$\pm 20\%$	$\pm 25\%$	$\pm 30\%$	$\pm 35\%$	$\pm 40\%$	$\pm 45\%$
<b>Modèle linéaire</b>									
▪ Reindl et al	10.93	21.23	30.82	38.75	45.46	51.17	56.07	60.46	64.16
▪ Orgill&Holand	10.79	21.22	30.70	39.29	46.50	52.75	57.92	62.30	66.48
▪ Chendo&Maduek	5.84	11.37	16.76	21.54	26.01	30.46	34.13	37.71	41.03
<b>Modèle exponentiel</b>									
▪ Boland et al	12.88	23.80	32.74	40.15	45.98	50.94	55.53	59.41	63.07
<b>modèle du Second Ordre</b>									
▪ Hawlader et al	11.69	22.89	33.60	42.62	49.91	55.96	60.56	64.56	68.21
<b>modèle du 3<sup>ème</sup> Ordre</b>									
▪ Miguel et al	12.88	24.05	33.79	41.83	48.75	54.43	59.07	63.38	67.28
▪ Jacovides et al	12.31	23.64	33.63	42.20	49.20	55.26	59.94	64.19	67.72
<b>modèle du 4<sup>ème</sup> Ordre</b>									
▪ Erbs et al	12.45	23.58	33.21	41.51	48.98	55.00	60.24	64.83	69.02
▪ Soares et al	11.44	22.60	33.11	43.05	51.83	59.84	66.71	72.62	77.38

Tableau 3.2 : Pourcentage des résultats correspondants aux différentes valeurs des erreurs relatives RE(%) avec des coefficients originaux des 09 modèles appliqués sur les données de Tamanrasset.

Modèles	±5%	±10%	±15%	±20%	±25%	±30%	±35%	±40%	±45%
<u>Modèle linéaire</u>									
▪ Reindl et al	9.70	18.99	27.80	36.99	45.82	53.51	60.64	66.92	72.49
▪ Orgill&Holand	8.50	16.95	25.25	33.35	41.27	48.91	56.15	62.90	68.72
▪ Chendo&Maduek	9.16	18.37	26.61	33.69	39.10	43.43	47.43	50.89	54.38
<u>Modèle exponentiel</u>									
▪ Boland et al	10.63	21.11	30.76	39.44	47.11	54.62	61.52	67.61	73.28
<u>modèle du Second Ordre</u>									
▪ Hawlader et al	11.82	22.80	32.95	42.04	50.67	58.71	65.56	71.44	76.87
<u>modèle du 3<sup>ème</sup> Ordre</u>									
▪ Miguel et al	9.79	19.34	29.46	38.31	46.42	54.23	61.22	67.73	73.53
▪ Jacovides et al	11.18	22.28	32.07	41.23	50.01	58.18	65.60	71.84	76.98
<u>modèle du 4<sup>ème</sup> Ordre</u>									
▪ Erbs et al	8.65	18.69	28.05	36.78	45.20	52.87	60.55	67.37	73.76
▪ Soares et al	10.97	21.15	30.14	38.99	47.62	56.17	63.92	71.45	78.60

Un contrôle visuel des résultats nous permet de tirer de nombreuses déductions et conclusions. Ces modèles de la fraction diffuse ne fournissent pas de bonnes informations et montrent des écarts significatifs. La comparaison des neuf modèles avec leurs coefficients originaux pour l'évaluation de la fraction diffuse du rayonnement horizontal global montre que les modèles établis par Soares [25], Jacovides [32] et Hawlader [41] donnent de meilleurs résultats pour les deux stations d'Oran et de Tamanrasset.

Environ 50% des résultats obtenus avec ces trois modèles ont une erreur relative inférieure à  $\pm 25\%$  comme le montrent les tableaux (3.1) et (3.2). La représentation des fréquences cumulées dans les figures (3.1) et (3.2) montrent, pour le site d'Oran, que le modèle de Soares présente des erreurs relatives assez faibles pour une partie appréciable des résultats, suivi du modèle hawlader, alors que le modèle de Jacovides apparaît en troisième position.

Cependant, pour le site de Tamanrasset, le modèle de Hawlader (polynôme du second ordre) montre de meilleures performances suivies par les modèles Jacovides et Soares.

Les tableaux (3.3) et (3.4) affichent les valeurs des indicateurs quantitatifs et statistiques pour les deux sites considérés (Oran et Tamanrasset).

Le calcul basé sur MBE, RMSE et t-stat, montre, pour le site d'Oran, que le modèle de Soares donne des valeurs MBE et RMSE les plus faibles, suivies par le modèle de Hawlader et celui de Jacovides.

Pour le site de Tamanrasset, les mêmes constats ont été observés, à l'exception des valeurs du MBE présentant des écarts très faibles entre les trois modèles mentionnés ci-dessus. De plus, le calcul de t-stat, pour les deux stations, donne des valeurs loin d'être statistiquement significatives, les valeurs t-stat sont beaucoup plus élevées que les valeurs critiques tc estimées ici pour le niveau de confiance  $\alpha = 0.001$  à  $t_c = 3.29$ . Cela indique clairement que le fait de s'appuyer séparément sur le RMSE et le MBE peut conduire à une mauvaise décision dans la sélection du meilleur modèle parmi une série de modèles candidats. Le t-stat doit être utilisé conjointement avec ces deux indicateurs pour mieux évaluer les performances du modèle.

Pour cette partie d'étude, nous pouvons conclure que bien que les trois modèles à savoir : Le modèle établi par Soares, le modèle de Hawlader et, celui établi par Jacovides, sont relativement les plus performants, il reste toutefois de les réajuster au données locales des deux stations algériennes (Oran et Tamanrasset), en déterminant de nouveaux coefficients pour réduire les erreurs et les déviations entre les valeurs estimées et celle mesurées.

Tableau 3.3 : comparaison des 09 modèles en termes de MBE, RMSE et t-stat, pour la station d'Oran

Modèles	MBE (%)	RMSE	t-stat	critical-tc
<u>modèle Linéaire</u>				
▪ Reindl et al	-8.860	0.170	140.70	3.29
▪ Orgill&Holand	-9.24	0.180	104.00	3.29
▪ Chendo&Maduek	-22.45	0.270	259.23	3.29
<u>modèle Exponentiel</u>				
▪ Boland et al	-9.8	0.172	120.54	3.29
<u>modèle du 2<sup>ème</sup> Ordre</u>				
▪ Hawlader et al	-4.26	0.148	46.74	3.29
<u>modèle du 3<sup>ème</sup> Ordre</u>				
▪ Miguel et al	-8.04	0.164	94.79	3.29
▪ Jacovides et al	-5.94	0.150	74.80	3.29
<u>modèle du 4<sup>ème</sup> Ordre</u>				
▪ Erbs et al	-7.91	0.168	91.76	3.29
▪ Soares et al	-1.23	0.140	15.21	3.29

Tableau 3.4 : comparaison des 09 modèles en termes de MBE, RMSE et t-stat, pour la station de Tamanrasset.

Modèles	MBE (%)	RMSE	t-stat	critical-tc
<b>modèle Linéaire</b>				
▪ Reindl et al	-3.53	0.14	32.72	3.29
▪ Orgill&Holand	-5.62	0.16	46.59	3.29
▪ Chendo&Maduek	-14.14	0.19	151.76	3.29
<b>modèle Exponentiel</b>				
▪ Boland et al	-5.18	0.15	48.90	3.29
<b>modèle du 2<sup>ème</sup> Ordre</b>				
▪ Hawlader et al	-1.45	0.12	15.57	3.29
<b>modèle du 3<sup>ème</sup> Ordre</b>				
▪ Miguel et al	-3.39	0.14	31.44	3.29
▪ Jacovides et al	-2.54	0.12	27.53	3.29
<b>modèle du 4<sup>ème</sup> Ordre</b>				
▪ Erbs et al	-3.55	0.15	31.36	3.29
▪ Soares et al	1.38	0.12	14.62	3.29

### 3.2.2. Etablissement de nouveaux coefficients pour les trois modèles performants adaptés aux données radiométriques des deux sites : Oran et Tamanrasset

Comme l'on pouvait s'y attendre, ces modèles donnent de bonnes performances lorsque leurs coefficients sont modifiés en introduisant des données locales, comme nous pouvons le voir dans les figures (3.3), (3.4) et les tableaux (3.5) et (3.6).

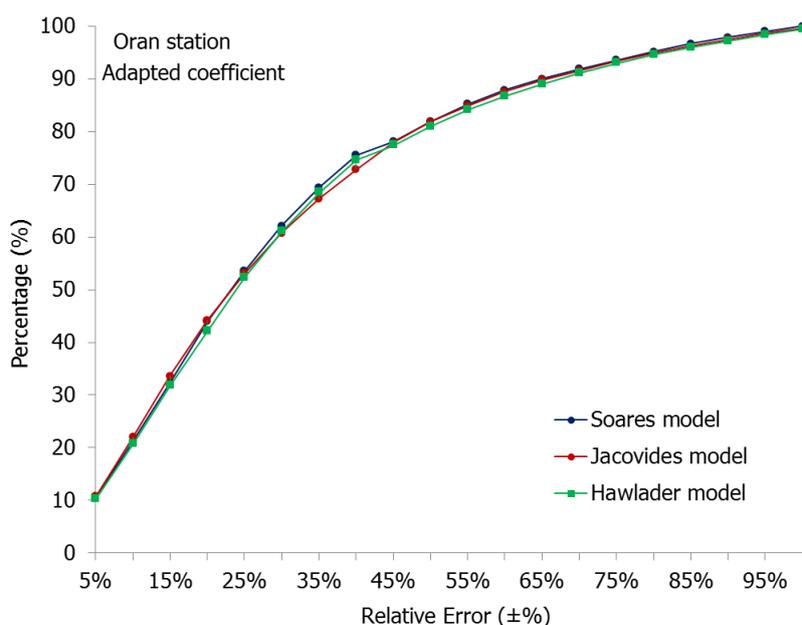


Fig.3.3 : La distribution des fréquences cumulées pour différentes valeurs des erreurs relatives RE (± %) pour les trois modèles avec les coefficients adaptés. Station d'Oran.

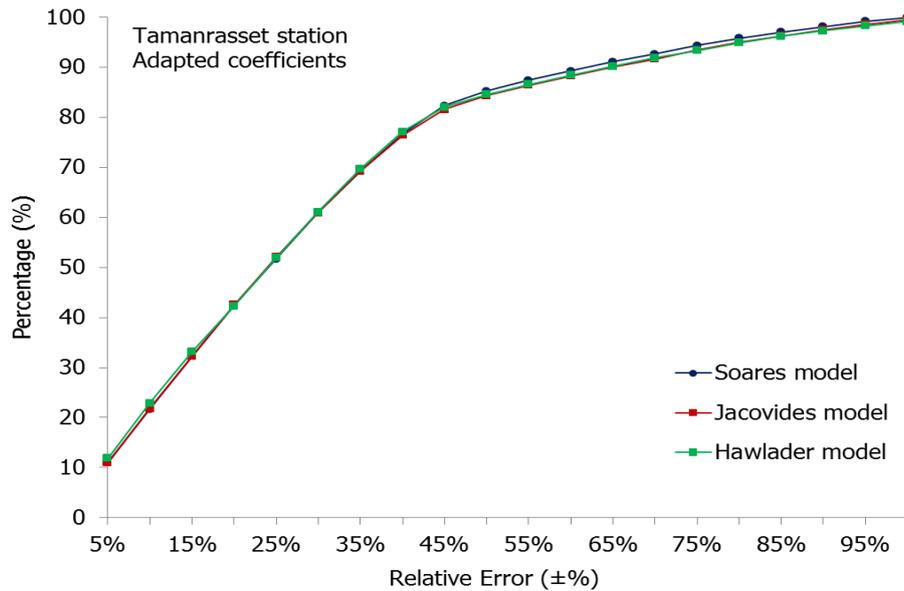


Fig.3.4 : La distribution des fréquences cumulées pour différentes valeurs des erreurs relatives RE ( $\pm$  %) pour les trois modèles avec les coefficients adaptés. Station de Tamanrasset.

Tableau 3.5 : Pourcentage des résultats correspondants aux différentes valeurs des erreurs relatives RE(%) avec des coefficients originaux et adaptés des modèles de Soares, Jacovides et Hawlader, Station d'Oran

RE (%)	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$	$\pm 15\%$	$\pm 20\%$	$\pm 25\%$
<u>coefficients Originaux</u>					
Soares	11.44	22.60	33.11	43.05	51.83
Jacovides	12.31	23.64	33.63	42.20	49.20
Hawlader	11.69	22.89	33.60	42.62	49.91
<u>coefficients Adaptés</u>					
Soares	11.48	23.06	35.16	47.91	58.26
Jacovides	12.33	23.97	36.57	48.17	57.83
Hawlader	11.55	22.45	34.50	45.82	56.87

Tableau 3.6 : Pourcentage des résultats correspondants aux différentes valeurs des erreurs relatives RE(%) avec des coefficients originaux et adaptés des modèles de Soares, Jacovides et Hawlader, Station de Tamanrasset

RE (%)	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$	$\pm 15\%$	$\pm 20\%$	$\pm 25\%$
<u>coefficients Originaux</u>					
Soares	10.97	21.15	30.14	38.99	47.62
Jacovides	11.18	22.28	32.07	41.23	50.01
Hawlader	11.82	22.80	32.95	42.04	50.67
<u>coefficients Adaptés</u>					
Soares	11.00	21.61	32.26	42.41	51.68
Jacovides	10.94	21.76	32.31	42.51	52.07
Hawlader	11.84	22.87	33.16	42.27	51.95

La comparaison de ces trois modèles avec des coefficients adaptés basés sur RE, MBE et RMSE montre que :

- Pour la station d'Oran, le modèle de Jacovides donne de meilleurs résultats en termes d'ER, tandis que le modèle Soares offre de meilleures performances en termes de RMSE et de MBE.
- Pour la station de Tamanrasset, le modèle Soares donne de meilleurs résultats en termes de RE, tandis que le modèle établi par Hawlader offre de meilleures performances en termes de MBE. Les valeurs de RMSE sont identiques pour les trois modèles.

Cependant, l'ajustement de ces modèles via des coefficients adaptés s'est traduit par une nette amélioration. Le pourcentage de résultats observés avec une erreur relative inférieure à  $\pm 25\%$  a connu une augmentation d'environ 15% en moyenne sur le site d'Oran et une augmentation de 5% en moyenne sur le site de Tamanrasset. Les valeurs de la MBE ont été réduites à de très faible valeur (0,05% en moyenne) et est bien illustrée dans les tableaux (3.7) et (3.8) pour les deux stations Tamanrasset et Oran. Le RMSE a été réduit à une valeur de 0,1 en moyenne pour le site d'Oran, alors qu'une légère baisse de RMSE de 0,12 à 0,11 est observée sur le site de Tamanrasset.

En analysant les valeurs de t-stat (tableaux (3.7) et (3.8)), les trois modèles fournissent, en introduisant des coefficients adaptés, une amélioration significative de t-stat. Les valeurs de cet indicateur statistique ont été réduites à bien en dessous des valeurs critiques tc.

Table 3.7 : comparaison des modèles de Soares, Jacovides et Hawlader en termes de MBE, RMSE et t-stat, pour la station d'Oran

Indicateurs	MBE (%)	RMSE	t-stat	critical-tc
<u>Coefficients Originaux</u>				
Soares	-1.23	0.140	15.21	3.29
Jacovides	-5.94	0.150	74.80	3.29
Hawlader	-4.26	0.148	46.74	3.29
<u>Coefficients Adaptés</u>				
Soares	-0.00047	0.130	0.006	3.29
Jacovides	0.046	0.100	1.00	3.29
Hawlader	-0.095	0.165	1.00	3.29

Table 3.8 : comparaison des modèles de Soares, Jacovides et Hawlader en termes de MBE, RMSE et t-stat, pour la station de Tamanrasset.

Indicateurs	MBE (%)	RMSE	t-stat	critical-tc
<u>Coefficients Originaux</u>				
Soares	1.38	0.12	14.62	3.29
Jacovides	-2.54	0.12	27.53	3.29
Hawlader	-1.45	0.12	15.57	3.29
<u>Coefficients Adaptés</u>				
Soares	0.038	0.11	4.36	3.29
Jacovides	-0.003	0.11	0.036	3.29
Hawlader	0.0009	0.11	0.010	3.29

Il est à noter que pour le site d'Oran, le modèle de Soares donne de meilleurs résultats avec un t-stat égal à 0.006, beaucoup plus faible que la valeur tc, et pour le site de Tamanrasset, le modèle de Hawlader donne un t-stat de 0.01 <<tc, alors que pour le modèle de Soares, la valeur de t-stat est légèrement supérieure à la valeur de t-stat critique.

### 3.2.3. Analyse de la distribution fréquentielle des résidus des trois modèles performants

Une autre analyse [51] qui vient renforcer l'analyse faite en utilisant l'erreur relative RE(%), est celle qui consiste à présenter la distribution fréquentielle des résidus existants entre la fraction diffuse mesurée et celle calculée avec des coefficients originaux et adaptés. La figure (3.5) montre que, pour le site d'Oran, le modèle de Soares fournit une amélioration de 9,5% par rapport à la distribution à zéro écart (résidus nuls). Une augmentation de la distribution de fréquence observée est de l'ordre de 3% par rapport au modèle de Jacovides et de 9% par rapport au modèle de Hawlader.

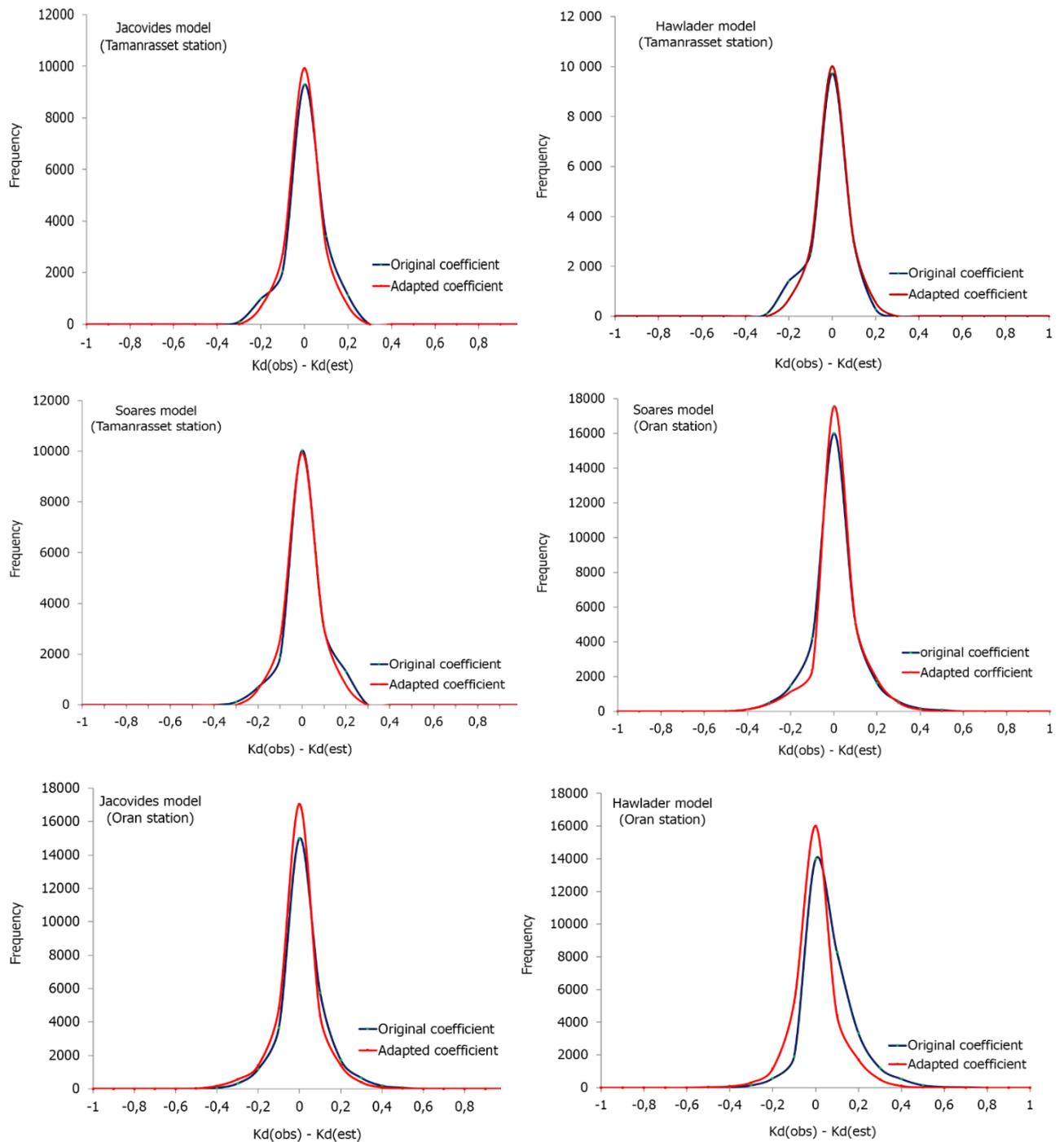


Fig.3.5 : Distribution fréquentielle des résidus observés entre la fraction diffuse horaire mesurée et celle prédite avec des coefficients originaux et adaptés des trois modèles : Soares, Jacovides et Hawlader.

On note également que le modèle établi par Soares offre une bonne sélectivité pour le site d'Oran. Par ailleurs, il apparaît, pour le site de Tamanrasset, que le modèle de Hawlader offre de meilleures performances.

Les résultats obtenus par cette technique de test sont véritablement cohérents avec ceux obtenus en utilisant le test t-stat.

### **3.3. Etablissement de nouvelles corrélations adaptées pour les sites d'Oran et de Tamanrasset**

L'objectif était de trouver une corrélation de la fraction diffuse horaire adaptée aux sites locaux algériens, plus précises que les corrélations déjà établies, simples à utiliser dans les simulations horaires des systèmes énergétiques solaires.

La relation entre  $K_d$  et  $K_t$  a été développée en utilisant les données des stations d'Oran et de Tamanrasset présentées dans le tableau (3.1). Compte tenu de l'analyse des résultats précédents, il apparaît que le modèle de Soares avec des coefficients adaptés a été choisi pour le site d'Oran ; alors que le modèle de Hawlader avec des coefficients adaptés est le mieux indiqué pour le site de Tamanrasset.

Pour la station d'Oran, la corrélation résultante montre les caractéristiques suivantes : Pour des valeurs de  $K_t$  inférieures à 0.80, une corrélation est représentée avec précision par une expression polynomiale du quatrième ordre et pour  $K_t > 0.80$  ; une valeur  $K_d$  constante est obtenue.

La nouvelle corrélation horaire est représentée par les expressions suivantes :

$$\begin{aligned} K_d &= 0.95 - 1.4 * K_t + 6.62 * K_t^2 - 16.56 * K_t^3 + 11.16 * K_t^4 & K_t \leq 0.8 \\ K_d &= 0.159 & K_t > 0.8 \end{aligned} \quad (3.14)$$

Pour la station de Tamanrasset, la corrélation résultante montre les caractéristiques suivantes : Pour les valeurs de  $K_t$  inférieures à 0.20, une expression linéaire est recommandée ; pour la plage  $0.20 < K_t \leq 0.80$ , la corrélation est représentée avec précision par une expression polynomiale quadratique, tandis que pour  $K_t > 0.8$ , une valeur de  $K_d$  constante est obtenue.

La nouvelle corrélation horaire est représentée par les expressions suivantes :

$$\begin{aligned}
K_d &= 1 - 0.505 * K_t & K_t &\leq 0.2 \\
K_d &= 1.21 - 1.65 * K_t + 0.462 * K_t^2 & 0.2 < K_t &\leq 0.8 \\
K_d &= 0.188 & K_t &> 0.8
\end{aligned}
\tag{3.15}$$

### 3.4. Conclusion

Pour cette partie de l'étude, les modèles décrits précédemment proposés par Orgill and Hollands [13], Erbs et al. [18], Reindl et al [9], Chendo and Maduekwe [19], Jacovides et al [32], Miguel et al [24], Soares et al [25], Hawlader [41], et Boland et al [27] ont été examinés et appliqués pour deux sites algériens (Oran et Tamanrasset) dont le but de sélectionner le modèle le plus adéquat. En fonction des résultats mentionnés précédemment, les conclusions obtenues sont les suivantes :

- Trois modèles (Soares, Jacovides et Hawlader) reproduisent les résultats des mesures avec précision. Environ 50% des résultats obtenus avec ces trois modèles affichent pour une erreur relative inférieure à  $\pm 25\%$ , un MBE de l'ordre de 4% et 1,5% respectivement pour Oran et Tamanrasset et un RMSE de l'ordre de 0,145 et 0,120 pour Oran et Tamanrasset respectivement.
- Nous avons exploré le potentiel de ces trois modèles afin d'améliorer leurs performances en les étalonnant via des données locales avec de nouveaux coefficients de corrélation. Cela a entraîné des améliorations significatives dans la performance de ces modèles.

Par ailleurs, nous remarquons une augmentation de plus de 7% du pourcentage de résultats avec une erreur relative de  $\pm 25\%$ , une valeur de MBE réduite à un niveau très bas (0,05%) et une réduction de RMSE allant jusqu'à 0,1.

- L'introduction de t-stat renforce l'évaluation des performances de ces trois modèles en distinguant le modèle le plus approprié pour chaque site.
- Une nouvelle corrélation a été établie pour chaque site, en fonction des résultats de cette étude. Cela a montré la nécessité de développer des modèles qui correspondent exactement au potentiel climatique et énergétique solaire de l'Algérie.

## **Chapitre 04 :**

Corrélation de la composante diffuse de l'irradiation solaire globale en fonction de l'indice de clarté et de la hauteur du soleil

## Introduction

Les données radiométriques mesurées dans notre pays (Algérie), notamment celles en relation avec le gisement solaire tel que la composante diffuse du rayonnement solaire global ne sont disponibles que pour quelques sites. Cependant, la conception d'un système énergétique photovoltaïque ou thermique dans une région où l'irradiation solaire diffuse n'est pas mesurée, nécessite le recours aux modèles d'estimation de cette composante diffuse à partir d'autres paramètres mesurés, tels que, par exemple, le rayonnement global, la durée d'ensoleillement, l'indice de clarté, la température, la turbidité relative et la hauteur du soleil. La plupart des travaux présentés dans la littérature scientifique dans ce domaine établissaient des corrélations de la fraction diffuse du rayonnement solaire global en fonction de l'indice de clarté  $K_t$  pris comme étant le prédicteur principal dans la modélisation de la fraction diffuse. La hauteur du soleil est considérée aussi comme un prédicteur loin d'être négligeable dans l'estimation de l'irradiation solaire comme il a été dicté par Iqbal [1], Garrisson [28] et notamment par Reindl [9] et De Miguel [21]. Par ailleurs, les auteurs cités ci-dessus n'ont pas fait de modélisation mathématique, à l'exception de Reindl [9] qui a introduit sommairement la variable ' hauteur du soleil' dans son modèle linéaire type Liu-Jordan.

La procédure d'analyse qualitative présentée dans les deux premiers chapitres, a été subdivisée en deux phases, en passant tout d'abord (en première phase) par l'établissement d'une quantification de la fréquence d'apparition de l'état du ciel (clair, couvert et nuageux) en fonction de l'indice de clarté sur une période 10 ans. Cette étape a été examinée par le biais des histogrammes et les fréquences cumulées qui ont été tracés pour différentes gammes de la hauteur du soleil à savoir : les gammes ( $0^\circ-08^\circ$ ), ( $08^\circ-18^\circ$ ), ( $18^\circ-30^\circ$ ), ( $30^\circ-45^\circ$ ), ( $45^\circ-60^\circ$ ) et les hauteurs du soleil supérieures à  $60^\circ$ . Cette partie d'étude a révélé que pour des  $K_t < 0.6$ , où le ciel est couvert ou partiellement couvert, la quantité du diffus est très variables pour de faibles hauteurs du soleil ( $< 30^\circ$ ) et que cette variabilité est totalement différente en passant du site d'Oran à celui de Tamanrasset. Pour des hauteurs du soleil supérieures à  $30^\circ$ , la clarté du ciel devient dominante.

Dans une deuxième phase, en traçant l'évolution de l'indice du diffus  $K_s$  en fonction de l'indice de clarté  $K_t$  et pour les différentes gammes de la hauteur du soleil ainsi que pour les différentes saisons de l'année, décrites toujours dans les deux premiers chapitres, plusieurs éléments ont été observés. Dans la frange de  $k_t < 0.3$ , où le ciel est complètement couvert, la hauteur du soleil n'a aucun effet sur la composante diffuse et que l'indice du diffus  $K_s$  croît linéairement avec l'indice de clarté  $K_t$ .

Pour  $K_t > 0.3$ , l'indice du diffus  $K_s$  est fortement affecté par la hauteur du soleil en terme de magnitude et de forme de courbes.

Les résultats issus de l'analyse qualitative de l'évolution de la composante diffuse de l'irradiation solaire globale nous permettront, dans ce nouveau chapitre, d'élaborer des corrélations mathématiques entre l'indice du diffus  $K_s$  et l'indice de clarté  $K_t$  pour différents paliers de la hauteur du soleil et pour les saisons d'hiver et d'été ainsi que pour l'année complète.

Une étude comparative a été effectuée, en premier lieu, pour voir l'impact de la saison sur la qualité et la précision des corrélations établies en utilisant des paramètres ou des indicateurs statistiques à savoir MBE, RMSE et bien évidemment le test « t-Stat ».

Le modèle qui offre les meilleures performances en vue de cette première analyse, sera pris comme modèle de référence pour une validation et confrontation aux résultats issus des corrélations faites au niveau du chapitre 03 et également à des travaux publiés dans la littérature scientifique.

#### **4.1. Modèles de la composante diffuse du rayonnement solaire globale**

L'élaboration du modèle de la composante diffuse du rayonnement solaire global horizontal est basée sur les résultats qualitatifs présentés dans le chapitre 01 & 02. L'établissement des corrélations entre l'indice du diffus  $K_s$  et l'indice de clarté  $K_t$  pour différents paliers de la hauteur du soleil se limitent à des valeurs de  $K_t < 0.8$ .

Par ailleurs, concernant le site d'Oran et pour des hauteurs du soleil supérieures à  $30^\circ$ , il est fait appel à une seule corrélation mathématique représentant la variation de  $K_s$  en fonction de  $K_t$ . Par contre pour le site de Tamanrasset, la représentation mathématique de l'évolution de la composante diffuse de l'irradiation solaire globale se fait pour toutes les gammes de la hauteur du soleil considérées.

L'expression générale traduisant la relation entre l'indice du diffus  $K_s$  et l'indice de clarté  $K_t$  à des hauteurs du soleil bien particulières est donnée par la relation linéaire suivante :

$$K_s = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i * K_t^i \quad (4.1)$$

Où :

$a_0$  et  $a_i$  sont les coefficients de corrélation du modèle ;

$m$  est le degré du polynôme régissant la corrélation entre  $K_s$  et  $K_t$ .

Il s'agira donc de déterminer les coefficients de l'expression (4.1) pour les différents cas de figure qui se présentent en tenant compte des saisons et des différentes gammes de la hauteur du soleil.

Compte tenu des résultats et des analyses décrits dans le chapitre 02, L'intervalle de l'indice de clarté  $K_t$  a été subdivisé en deux (02) zones. La première zone traite l'intervalle où  $0 < K_t < 0.8$  qui est caractérisée par une fonction polynomiale d'ordre 5, la deuxième zone quant à elle correspond à  $K_t > 0.8$  où  $K_s$  est exprimé par une constante relative à la dernière valeur estimée par le modèle régissant la première zone avec  $K_t = 0.8$ .

**Première zone :  $0 < K_t < 0.8$**

$$K_s = a_0 + \sum_{i=1}^5 a_i * K_t^i \quad (4.2)$$

**Deuxième zone :  $K_t \geq 0.8$**

$$K_s = a_6 \quad (4.3)$$

#### **4.2. Etablissement de la corrélation mathématique de la composante diffuse solaire pour la station d'Oran**

Les valeurs de l'indice du diffus estimé par ce type de corrélations ont été confrontées aux valeurs mesurées localement sur le site d'Oran et sont affichées dans les différents graphiques suivants (figures 4.1a, 4.1b, 4.2a, 4.2b, 4.3a et 4.3b). Notons que le coefficient de détermination  $R^2$ , qui est une mesure de la qualité de la prédiction d'une régression non linéaire, est estimé à plus de 0.96 pour les

différentes corrélations établies. Cette valeur de  $R^2$  est statistiquement très significative en termes de précision du modèle qui traduit une bonne fiabilité du modèle développé.

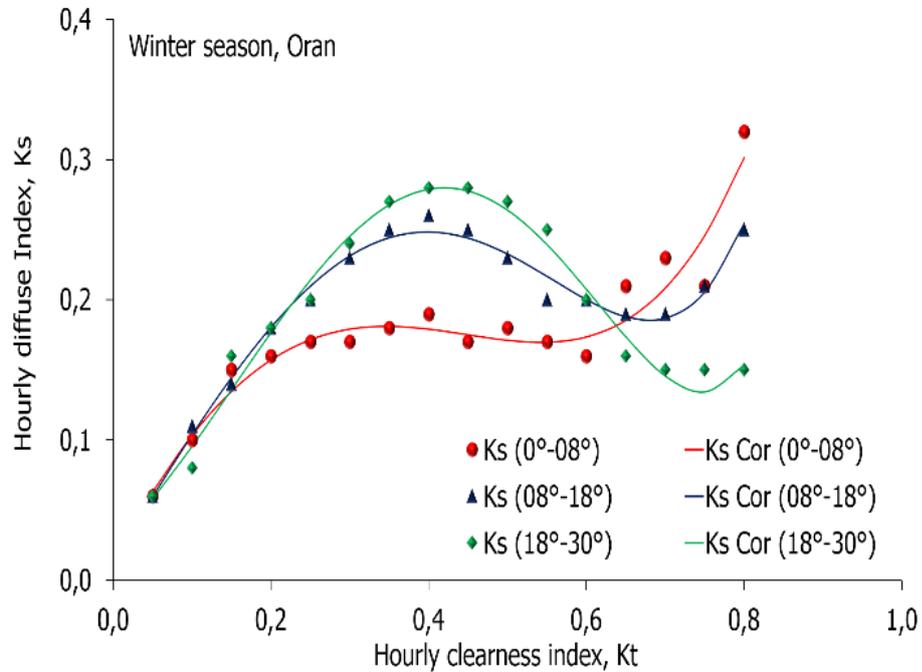


Fig. 4.1a : Evolution de l'indice du diffus  $K_s$  vs l'indice de clarté  $K_t$  ainsi que la corrélation correspondante pour la saison d'hiver et les hauteurs du soleil  $<30^\circ$

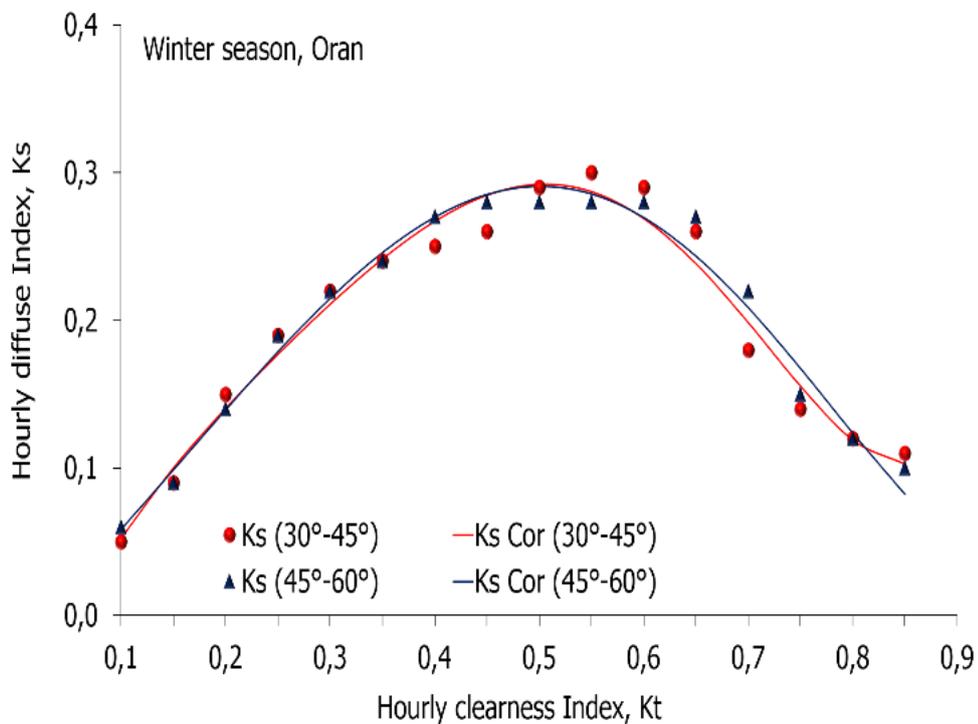


Fig 4.1b : Evolution de l'indice du diffus  $K_s$  vs l'indice de clarté  $K_t$  ainsi que la corrélation correspondante pour la saison d'hiver et les hauteurs du soleil  $>30^\circ$

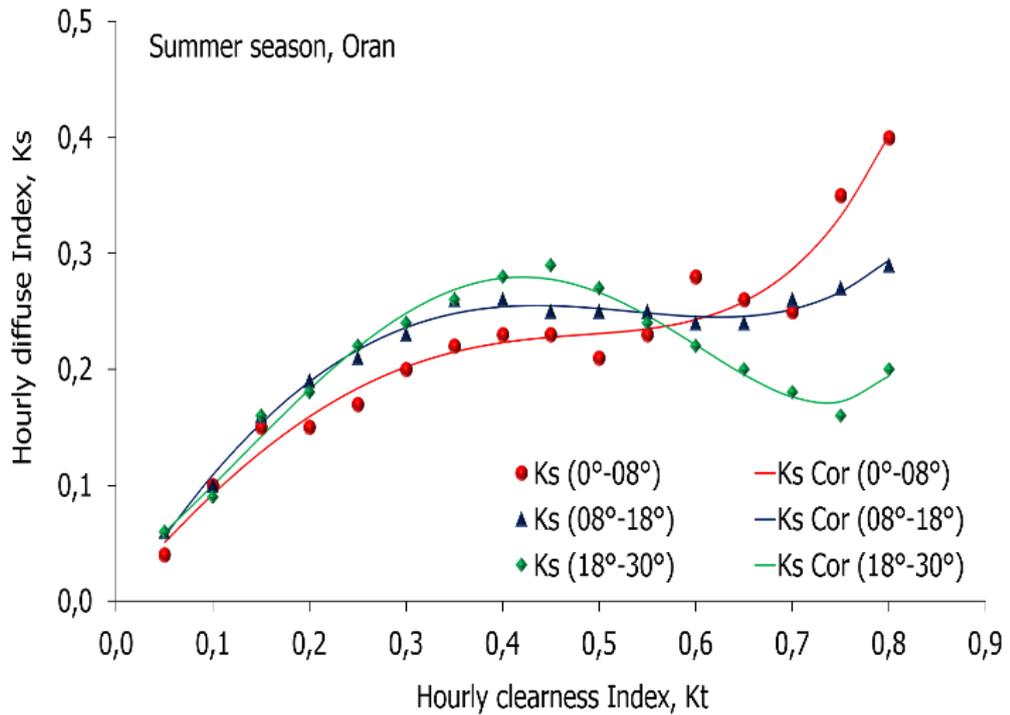


Fig. 4.2a : Evolution de l'indice du diffus Ks vs l'indice de clarté Kt ainsi que la corrélation correspondante pour la saison d'Eté et les hauteurs du soleil  $< 30^\circ$

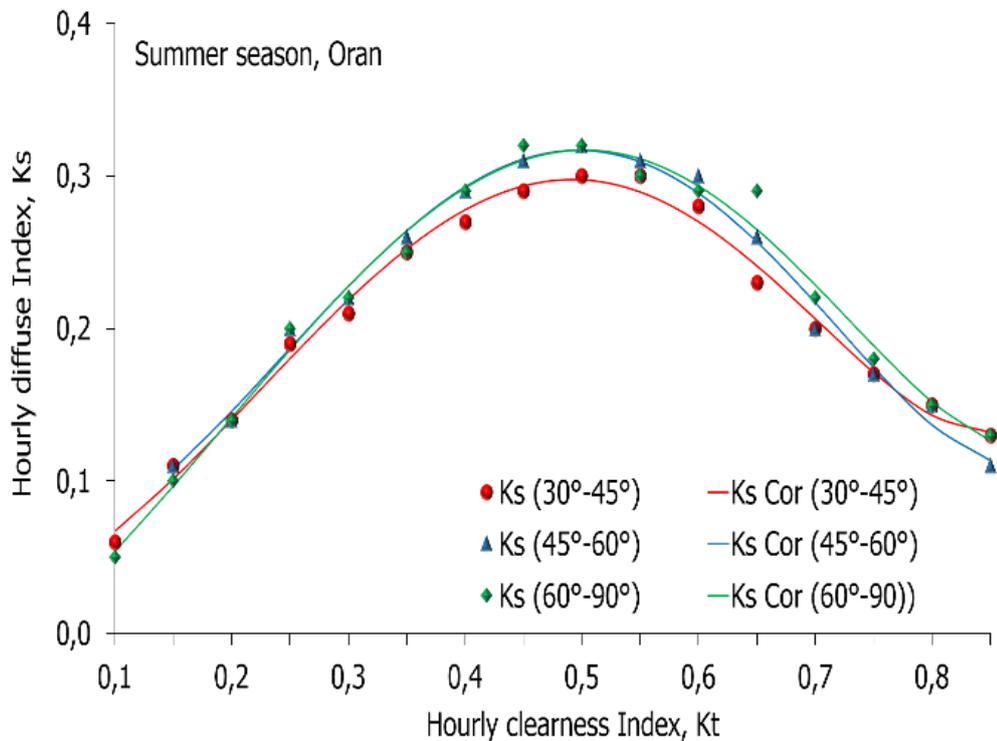


Fig. 4.2b : Evolution de l'indice du diffus Ks vs l'indice de clarté Kt ainsi que la corrélation correspondante pour la saison d'Eté et les hauteurs du soleil  $> 30^\circ$

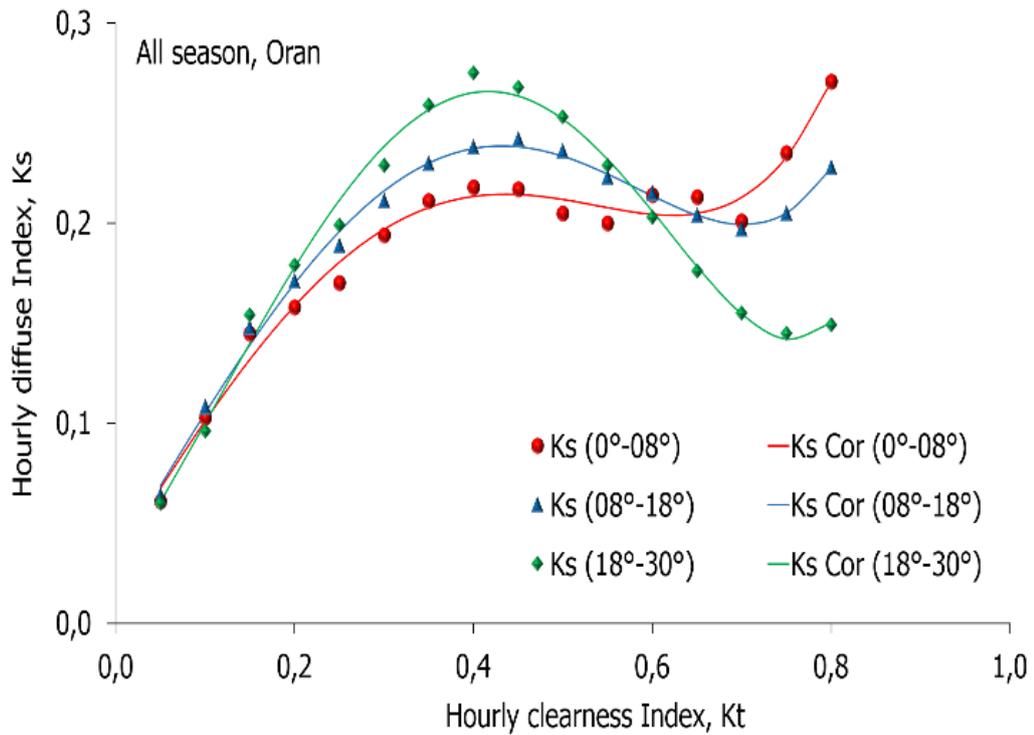


Fig. 4.3a : Evolution de l'indice du diffus Ks vs l'indice de clarté Kt ainsi que la corrélation correspondante pour l'année complète et les hauteurs du soleil  $< 30^\circ$

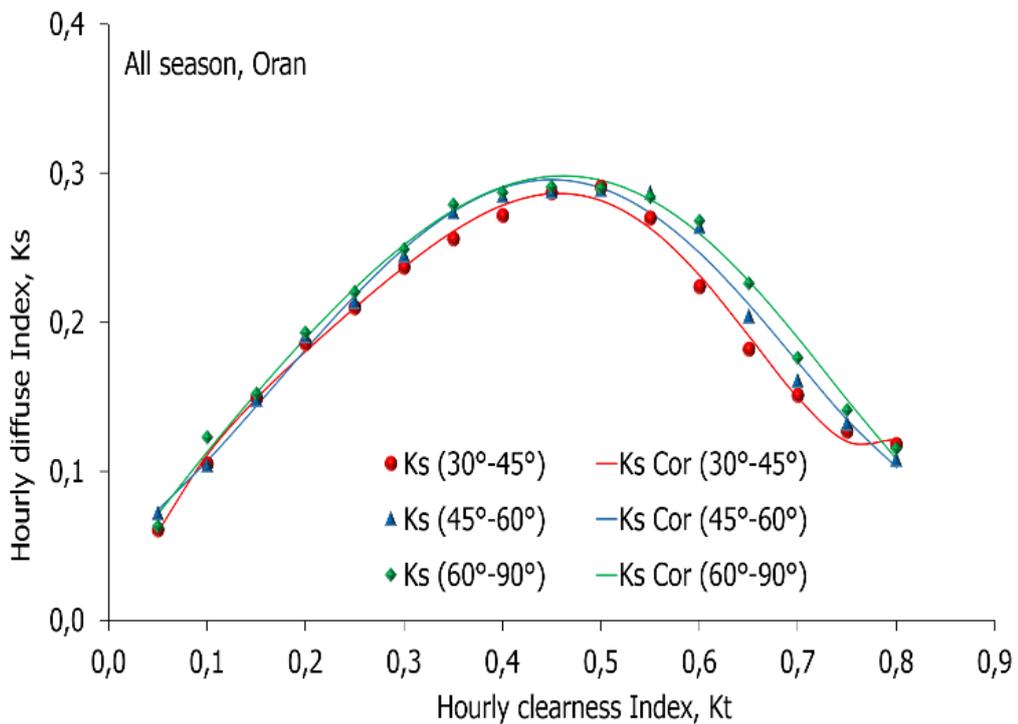


Fig. 4.3b : Evolution de l'indice du diffus Ks vs l'indice de clarté Kt ainsi que la corrélation correspondante pour l'année complète et les hauteurs du soleil  $> 30^\circ$

En observant les graphes (4.1 - 4.3), nous remarquons que les corrélations établies pour des hauteurs du soleil inférieures ou égales à  $30^\circ$  présentent des différences

qui sont loin d'être négligeables en termes d'amplitude et de point d'inflexion (d'allure) des courbes. Par contre, pour les hauteurs du soleil supérieures à 30°, les courbes d'évolution de  $K_s$  sont pratiquement superposées les unes sur les autres et sont similaires pour toutes les hauteurs du soleil appartenant à cette gamme. Ce constat est valable pour toutes les périodes de l'année considérées dans cette étude. A cet effet, nous nous limitons pour l'établissement des corrélations de la composante diffuse de l'irradiation solaire globale à des gammes de la hauteur du soleil suivantes : (0°-08°), (08°-18°), (18°-30°) et (30°-90°).

Le tableau 4.1 affiche les valeurs des coefficients de corrélation  $a_i$  pour les trois périodes de l'année (hiver, été et l'année complète), ainsi que pour toutes les gammes de la hauteur du soleil considérées dans cette étude.

Tableau 4.1 : Coefficients de corrélation des modèles établis pour l'estimation de la composante diffuse de l'irradiation globale horizontale pour les trois (03) périodes de l'année et à tous les paliers de la hauteur du soleil.

Période de l'année	Solar altitude range	Coefficients de Corrélation						
		$0 < K_t < 0.8$						$K_t \geq 0.8$
		$K_s = a_0 + a_1 * K_t^1 + a_2 * K_t^2 + a_3 * K_t^3 + a_4 * K_t^4 + a_5 * K_t^5$						$K_s = a_6$
	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	
All season	(00° - 08°)	0.032	0.711	-0.028	-2.059	0.748	1.327	0.270
	(08° - 18°)	0.031	0.738	0.123	-1.731	-0.910	2.394	0.230
	(18° - 30°)	0.024	0.685	1.021	-2.624	-2.893	4.432	0.150
	(30° - 90°)	-0.018	1.926	-8.753	28.363	-44.188	23.739	0.120
Winter	(00° - 08°)	0.0139	1.080	-1.790	-0.607	2.420	-0.340	0.300
	(08° - 18°)	0.014	0.921	-0.054	-1.615	-2.620	4.390	0.250
	(18° - 30°)	0.026	0.573	1.417	-1.405	-7.600	7.917	0.150
	(30° - 90°)	-0.009	1.430	-4.740	16.152	-27.953	15.809	0.100
Summer	(00° - 08°)	0.004	0.964	-0.745	-1.229	0.613	1.466	0.400
	(08° - 18°)	-0.004	1.288	-1.425	-1.286	2.130	-0.104	0.290
	(18° - 30°)	0.023	0.650	1.486	-3.419	-2.956	5.068	0.190
	(30° - 90°)	0.041	0.438	1.983	-2.726	-4.832	5.632	0.130

#### 4.2.1. Validation des modèles de corrélation de la composante diffuse de l'irradiation globale solaire.

##### 4.2.1.1. Comparaison des modèles établis pour les différentes périodes considérées.

Pour voir l'impact de l'effet de la saison sur la qualité et la précision du modèle établi, nous avons comparé les différents modèles établis (Tableau 4.1), donnant les valeurs de l'indice du diffus  $K_s$  en fonction de l'indice de clarté  $K_t$  à différents paliers de la hauteur du soleil.

Cette comparaison a été effectuée en ayant recours à des paramètres statistiques couramment utilisés de sorte que, dans ce chapitre, trois indicateurs quantitatifs statistiques [24], décrits dans le chapitre 03, ont été utilisés pour évaluer ces différents modèles établis pour les saisons d'hiver, d'été et en considérant l'année complète.

Le tableau 4.2 présente les valeurs du MBE, RMSE, et t-stat pour chaque période ou saison considérée et pour différentes gammes de la hauteur du soleil.

Tableau 4.2 : Performances statistiques des modèles calculant  $K_s$

Période de l'année	Solar altitude range	Data Number	Indicateurs statistiques			
			MBE(%)	RMSE	t-stat	tc
All season	(00° - 08°)	1585	-0.044	0.076	0.230	2.9
	(08° - 18°)	9070	-0.048	0.087	0.390	2.9
	(18° - 30°)	6830	-0.071	0.079	0.740	2.9
	(30° - 90°)	8016	0.001	0.073	0.010	2.9
Winter season	(00° - 08°)	642	0.550	0.097	1.428	2.9
	(08° - 18°)	1557	1.690	0.127	5.240	2.9
	(18° - 30°)	2343	0.047	0.083	0.279	2.9
	(30° - 90°)	2755	0.410	0.080	2.710	2.9
Summer season	(00° - 08°)	564	-0.871	0.088	2.350	2.9
	(08° - 18°)	1292	-0.128	0.080	7.380	2.9
	(18° - 30°)	1511	-0.106	0.071	0.570	2.9
	(30° - 90°)	2040	-0.560	0.065	3.890	2.9

Bien que les valeurs de l'indicateur quantitatif RMSE soient faibles, il reste toutefois que celles estimées pour la période de l'année complète, enregistrent le taux le plus bas comparé à ceux affichés pour les saisons d'hiver et d'été. Il est à noter

également que pour les valeurs statistiques relatives à l'indicateur MBE, la période globale de l'année offre de meilleures performances, en présentant les plus faibles valeurs et ce pour les différentes gammes de la hauteur du soleil. On peut citer à titre illustratif, que pour la gamme (0°-08°), le modèle établi relatif à la période de l'année complète, offre une performance de 92% par rapport au modèle établi pour la saison hivernale, et de 95% par rapport aux performances du modèle établi pour la saison d'été.

Comme les valeurs de l'indicateur statistique RMSE sont plus ou moins rapprochées (pour les différentes saisons de l'année), nous avons recours à l'indicateur t-stat, qui est en fait une combinaison du MBE et de RMSE, pour suivre l'évolution de l'indicateur MBE. Nous constatons qu'il présente de bonnes performances en affichant, pour la période de l'année complète, les valeurs les plus faibles comparées à celles affichées pour les deux autres saisons considérées.

Par ailleurs, les valeurs de t-stat observées pour la période de l'année complète, sont toutes inférieures à la valeur critique  $t_c$  qui est de 2.9 selon les tables de statistiques.

A ce titre, le modèle établi pour la période de l'année complète, servira comme modèle de base pour l'estimation de la composante diffuse de l'irradiation solaire globale sur un plan horizontal pour le site d'Oran. Ce modèle sera pris également comme modèle de référence pour une éventuelle validation et confrontation aux résultats des travaux antérieurs ainsi que le modèle donnant la fraction diffuse en fonction de l'indice de clarté établi dans le chapitre 03.

#### **4.2.1.2. Comparaison du modèle de référence avec les modèles établis et présentés dans d'autres travaux.**

Les travaux établis par les chercheurs et universitaires de par le monde, présentent des corrélations de la fraction diffuse  $K_d$  de l'irradiation solaire globale, en fonction de l'indice de clarté  $K_t$ , alors que dans ce chapitre, la corrélation s'est effectuée sur l'indice du diffus  $K_s$  Vs  $K_t$  et pour différents paliers de la hauteur du soleil.

Cependant, pour rendre les choses comparables, nous avons calculé, pour chaque modèle établi par d'autres auteurs, l'indice du diffus  $K_s = K_d * K_t$ , c'est-à-dire : en multipliant leurs équations par l'indice de clarté  $K_t$ .

Les modèles établis par des travaux antérieurs et choisis pour une étude comparative dans ce travail, sont au nombre de quatre (04), représentant les différentes formes de polynômes publiés dans la littérature scientifique, à savoir : la forme linéaire, parabolique, quadratique et exponentielle.

Les travaux utilisés pour l'étude comparative sont les suivants :

D.T.Reindl et Al [9], ont établis des corrélations de la fraction diffuse de forme linéaire,

Erbs et al [18], ont élaboré des modèles avec des polynômes en forme quadratique (de degré 4),

Hawlader [10], a réalisé une fonction polynomiale de degré 2 (forme parabolique),

Boland et al [23], ont estimé la relation liant la fraction diffuse avec l'indice de clarté  $K_t$  en forme exponentielle.

Pour donner plus de crédibilité à cette analyse comparative, le modèle établi et décrit dans le chapitre 03, relatif à la corrélation de la fraction diffuse en fonction de l'indice de clarté, est ajouté aux modèles cités ci-dessus. Il est à noter que cette étude comparative est effectuée sur la base de l'intervalle  $0.2 \leq K_t < 0.8$ , dans lequel le nombre de données considéré est supérieur à 80% du nombre total de mesures. Le calcul basé sur la détermination des valeurs des indicateurs quantitatifs statistiques tels que MBE, RMSE et t-stat, qui sont affichés dans le tableau 4.3, ont montré que le modèle proposé et pris comme référence pour la comparaison, donne de meilleures performances et affiche les plus faibles valeurs de ces indicateurs avec un écart de taille par rapport aux valeurs données par les autres modèles établis par Reindl, Hawlader, Erbs et Boland. On peut citer une performance par rapport au modèle de Hawlader, (considéré ici le meilleur parmi les quatre modèles établis), en terme des valeurs de MBE, de plus de 97% sur toutes les gammes de la hauteur du soleil, et une performance, en terme des valeurs du RMSE, de 20% pour les gammes de hauteur du soleil inférieures à  $18^\circ$  et de 12.5% pour les hauteurs du soleil dépassant  $18^\circ$ .

En analysant les valeurs de l'indicateur t-stat, le modèle que nous avons proposé apporte une amélioration très significative avec des valeurs de t-stat bien au-dessous de la valeur critique  $t_c$ .

Tableau 4.3 : Indicateurs statistiques appliqués pour la validation des modèles empiriques proposés (Station d'Oran).

Station d'Oran												
Gammes de la hauteur du soleil												
Modèles	(00° - 08°)			(08° - 18°)			(18° - 30°)			(30° - 90°)		
	MBE(%)	RMSE	t-stat									
D.T.Reindl	-7.26	0.12	25.1	-4.88	0.10	36.0	-4.70	0.09	47.5	-3.74	0.08	44.7
Hawladar	-4.90	0.10	21.6	-2.88	0.10	22.2	-3.31	0.08	33.5	-2.83	0.08	33.2
Erbs	5.20	0.13	26.5	-5.13	0.11	36.1	-4.45	0.09	44.5	-3.02	0.08	36.4
Boland	-7.58	0.12	32.1	-5.44	0.11	38.7	-5.03	0.09	50.0	-3.73	0.08	44.9
Kd cor	-2.59	0.09	11.9	-0.37	0.09	2.86	-0.27	0.08	2.82	0.55	0.07	6.73
Ks cor	-0.08	0.08	00.4	-0.05	0.08	0.39	-0.07	0.07	0.74	0.01	0.07	0.01

#### 4.2.1.3. Distribution fréquentielle des valeurs résiduelles

Une autre analyse vient renforcer les résultats affichés dans le tableau 4.3. Celle-ci est basée sur la fréquence de distribution des écarts ou des résidus enregistrés entre les valeurs calculées et celles mesurées de l'indice du diffus  $K_s$  (figure 4.4), et pour différents paliers de la hauteur du soleil.

Il est à noter que le modèle proposé (modèle de référence) donne pour des hauteurs du soleil inférieures à 08°, une performance meilleure au niveau des valeurs résiduelles proches de zéro. Cette performance est estimée à 16.3% par rapport à la meilleure performance donnée par les autres modèles relative à celle du modèle établi par Hawladar. Pour les hauteurs du soleil dans la gamme de (08°-18°), on notera que le modèle proposé présente une meilleure performance (de plus de 15%) par rapport aux autres modèles, bien que ces derniers présentent une bonne symétrie mais qui sont loin des valeurs résiduelles proches de zéro. Le même constat est observé pour les gammes des hauteurs du soleil de (18°-30°) et (30°-90°), où le modèle proposé enregistre des performances améliorées de 11.1% et 10% successivement.

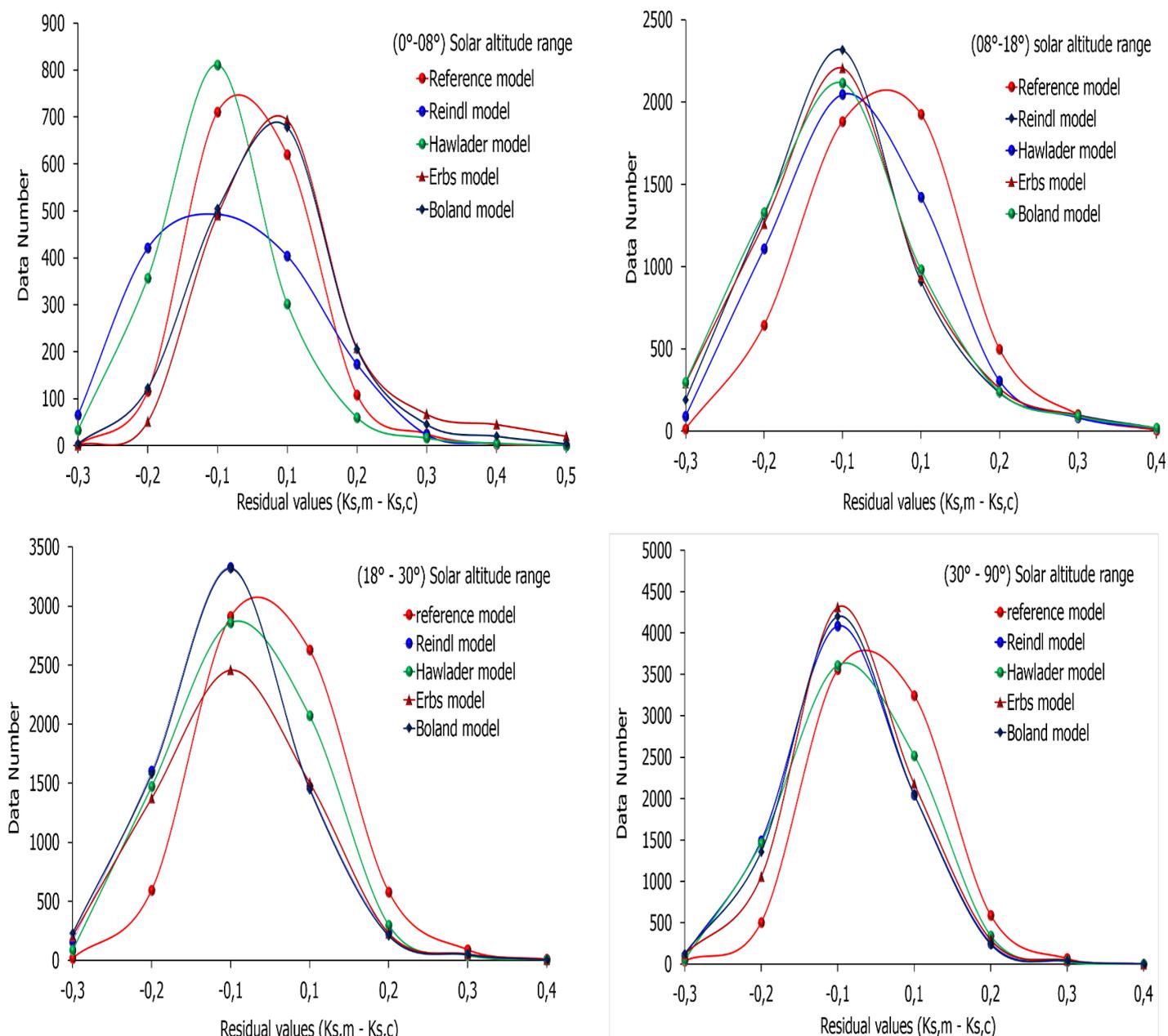


Figure 04.4 : Comparaison de la distribution fréquentielle des valeurs résiduelles ( $K_{S,m} - K_{S,c}$ ) du modèle proposé avec quatre modèles empiriques choisis, (Site d'Oran).

Il est à souligner également, que les valeurs résiduelles du modèle proposé présentent une distribution de fréquence avec une symétrie pratiquement parfaite par rapport aux valeurs résiduelles nulles, ce qui explique les très faibles valeurs du paramètre MBE (Tableau 4.3). Alors que les autres modèles présentent une asymétrie de leur distribution fréquentielle qui est décalée d'un facteur de 0.1 par

rapport aux zéro résidus, entraînant systématiquement une élévation des valeurs du paramètre statistique MBE.

### 4.3. Etablissement de la corrélation mathématique de la composante diffuse solaire pour la station de Tamanrasset

En adoptant la même procédure d'analyse faite sur la région d'Oran, pour l'établissement de modèles d'estimation de la composante diffuse de l'irradiation solaire à des hauteurs du soleil bien précises relatifs au site de Tamanrasset ; des graphiques représentés par les figures (4.5a, 4.5b, 4.6a, 4.6b, 4.7a et 4.7b) retraçant la variation des valeurs mesurées et estimées de l'indice du diffus  $K_s$  en fonction de l'indice de clarté  $K_t$ , pour les différentes saisons considérées dans cette étude.

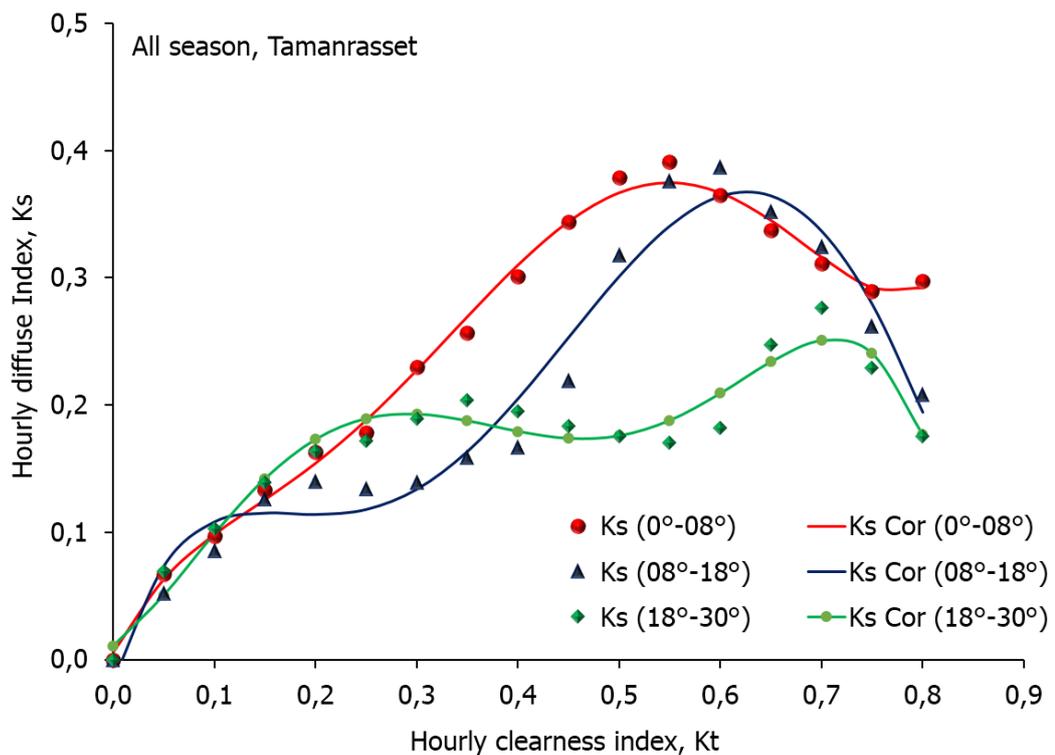


Figure 4.5a : Evolution de l'indice du diffus  $K_s$  vs l'indice de clarté  $K_t$  ainsi que la corrélation correspondante pour l'année complète et les hauteurs du soleil  $<30^\circ$

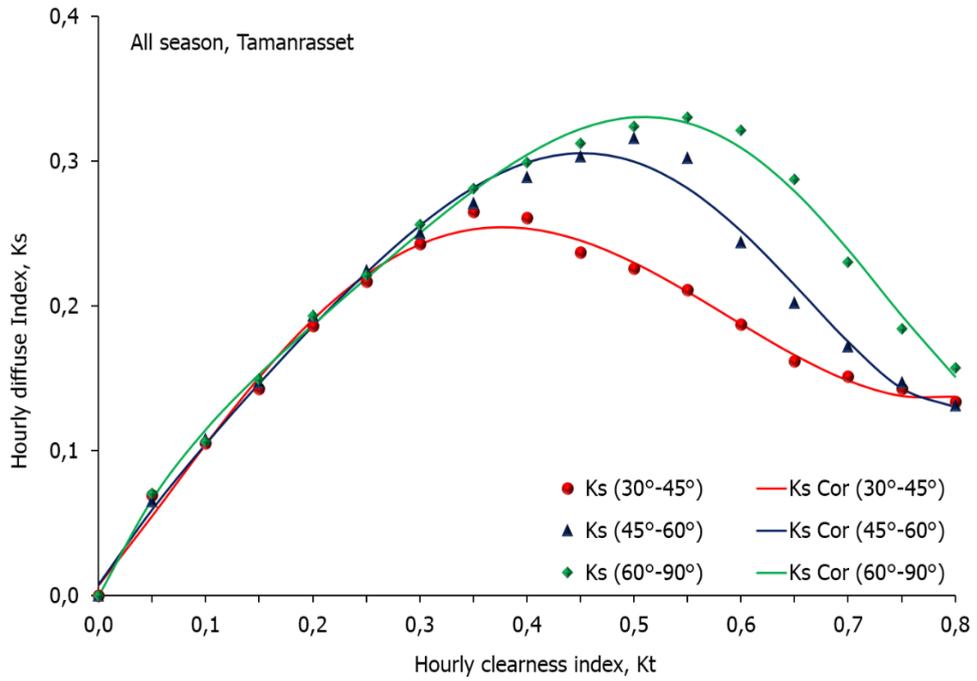


Figure 4.5b : Evolution de l'indice du diffus Ks vs l'indice de clarté Kt ainsi que la corrélation correspondante pour l'année complète et les hauteurs du soleil >30°

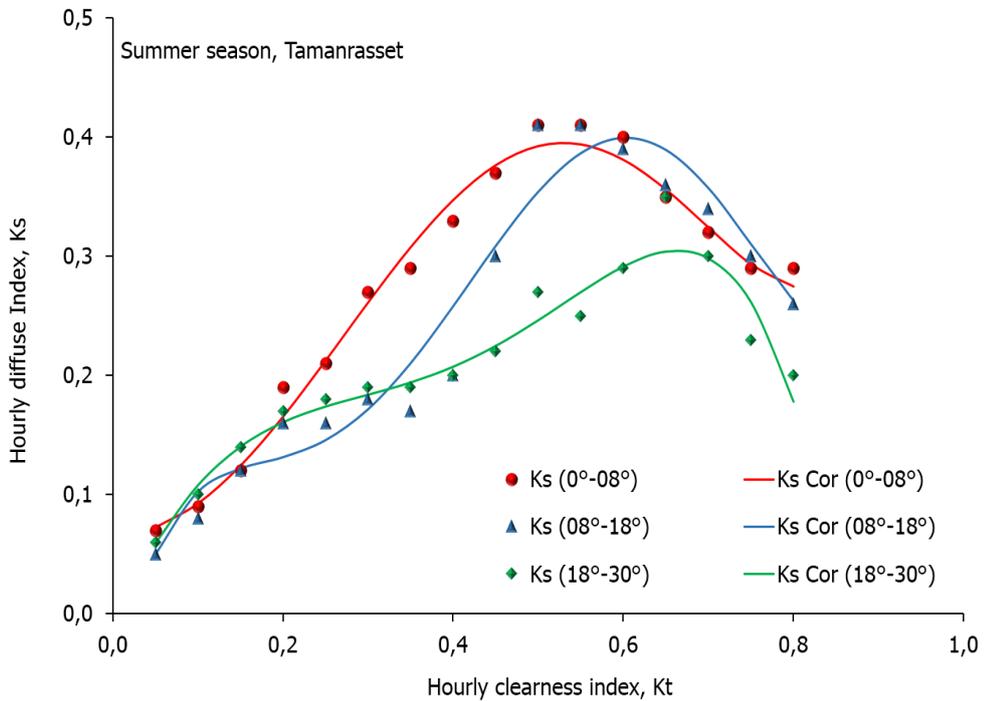


Figure 4.6a : Evolution de l'indice du diffus Ks vs l'indice de clarté Kt ainsi que la corrélation correspondante pour la saison d'été et les hauteurs du soleil <30°

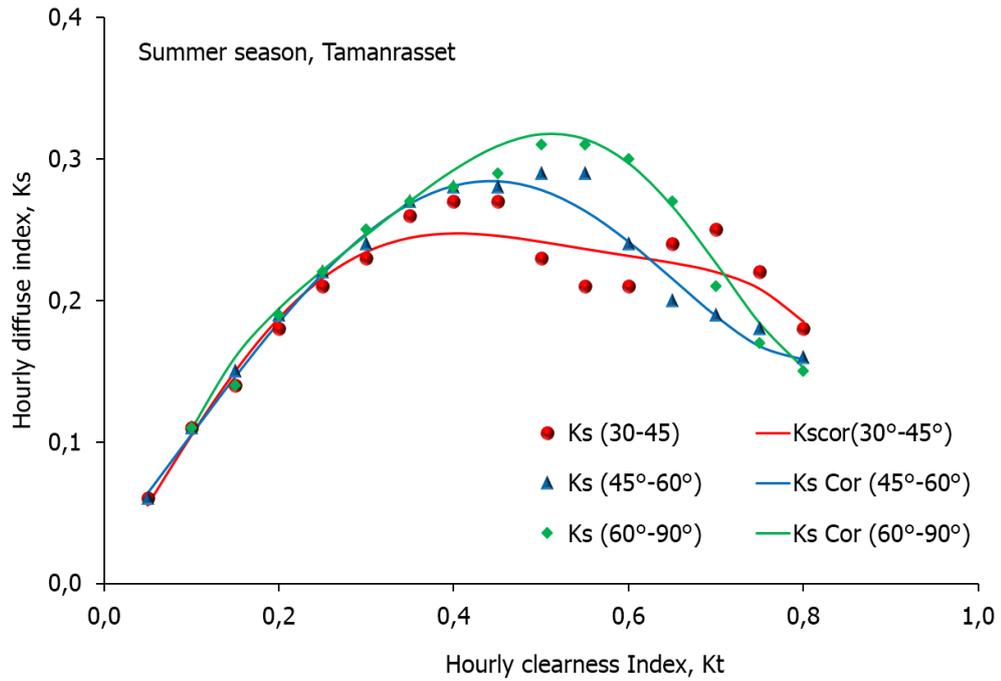


Figure 4.6b : Evolution de l'indice du diffus Ks vs l'indice de clarté Kt ainsi que la corrélation correspondante pour la saison d'été et les hauteurs du soleil >30°

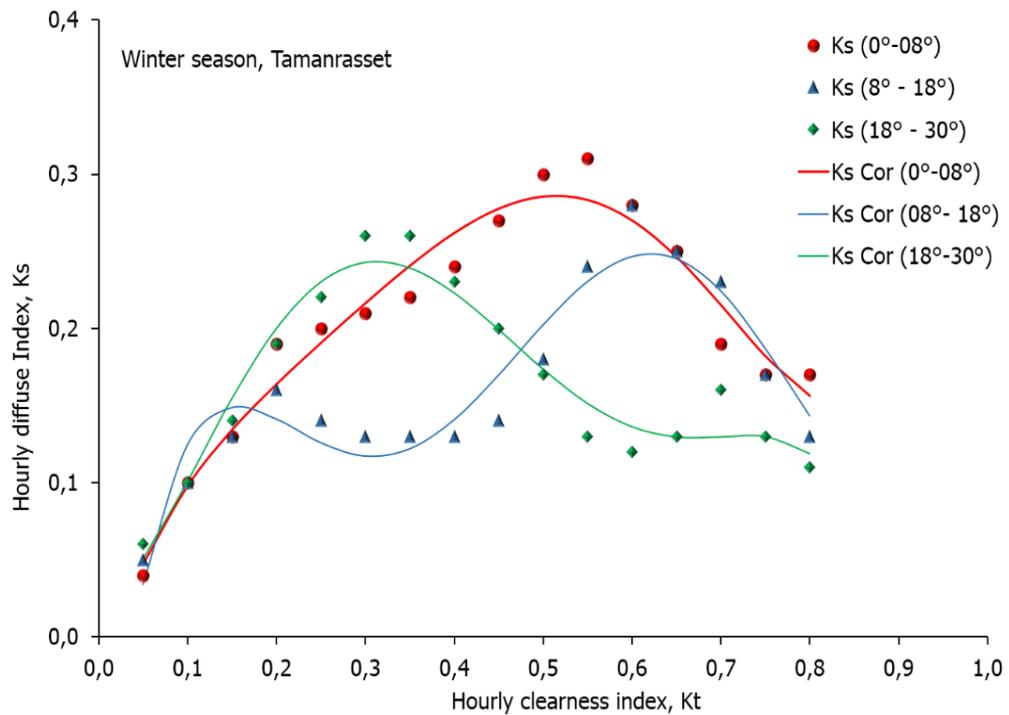


Figure 4.7a : Evolution de l'indice du diffus Ks vs l'indice de clarté Kt ainsi que la corrélation correspondante pour la saison d'hiver et les hauteurs du soleil <30°

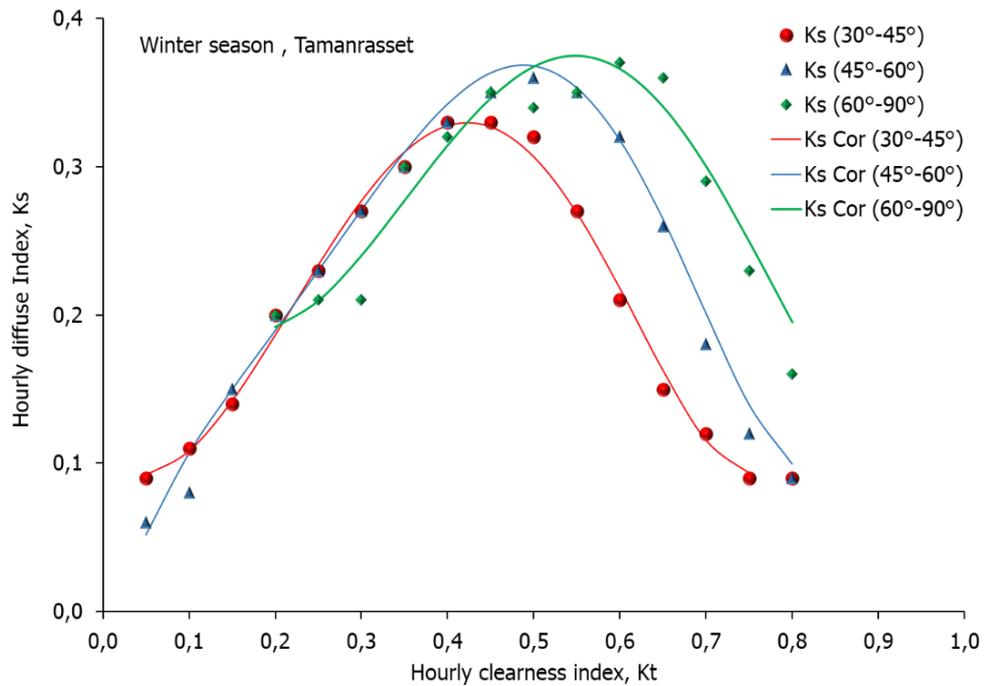


Figure 4.7b : Evolution de l'indice du diffus Ks vs l'indice de clarté Kt ainsi que la corrélation correspondante pour la saison d'hiver et les hauteurs du soleil >30°

En observant ces figures, nous remarquons que pour les hauteurs du soleil inférieures à 30°, les courbes estimées de Ks sont totalement différentes en forme et en amplitude. Les extremums atteints par ces courbes diffèrent d'une gamme de hauteur du soleil à une autre. Par contre pour les hauteurs du soleil dépassant les valeurs de 30°, nous constatons que pratiquement que toutes les courbes estimées présentent la même allure avec des amplitudes (points d'inflexion) différentes. Ce constat est pratiquement le même pour toutes les saisons et les périodes considérées (Hiver, Eté et l'année complète) dans ce travail.

En continuant toujours dans les hauteurs du soleil supérieures à 30° et pour des valeurs de  $K_t < 0.3$ , synonyme d'un temps complètement couvert, on observe que toutes les courbes, sans exception, se superposent formant une ligne droite d'équation  $K_s = K_t$ . Dans cet intervalle de  $K_t$ , la hauteur du soleil n'a aucun impact sur la composante diffuse de l'irradiation solaire.

Au-delà de  $K_t > 0.3$ , les courbes de corrélations se détachent entre elles, présentant des variations sous formes de lignes droites parallèles de pentes négatives (comme c'est indiqué dans le chapitre 02).

Eu égard de ce qui a été prononcé concernant les corrélations établies pour le site d'Oran, et pour les hauteurs du soleil > 30°, qu'une seule équation a été établie et équivalente aux trois gammes de la hauteur du soleil, Les corrélations établies pour le site de Tamanrasset ne se limitent pas à une seule équation mais que chaque gamme de hauteur du soleil lui correspond une corrélation à part.

Le Tableau 4.4 affiche les coefficients de corrélations estimés pour chaque gamme de la hauteur du soleil et pour chaque saison et période de l'année.

Tableau 4.4 : Coefficients de corrélation des modèles établis pour l'estimation de la composante diffuse de l'irradiation globale horizontale pour les trois (03) périodes de l'année et à tous les paliers de la hauteur du soleil. (Station de Tamanrasset).

Période de l'année	Solar altitude range	Coefficients de Corrélation						
		$0 < K_t < 0.8$						$K_t \geq 0.8$
		$K_s = a_0 + a_1 * K_t^1 + a_2 * K_t^2 + a_3 * K_t^3 + a_4 * K_t^4 + a_5 * K_t^5$						$K_s = a_6$
	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	
All season	(00° - 08°)	0.05615	1.503	-8.643	33.667	-52.65	27.294	0,292
	(08° - 18°)	-0.0165	2.590	-18.337	55.519	-66.735	26.803	0,194
	(18° - 30°)	0.0106	0.587	5.7468	-33.429	58.063	-32.498	0,176
	(30° - 45°)	0.007	0.9027	1.511	-9.0136	9.773	-2.891	0,137
	(45° - 60°)	0.0075	1.1309	-2.3398	9.0954	-19.173	11.937	0,130
	(60° - 90°)	-0.0005	1.595	-6.1359	19.3658	-28.823	14.3209	0,151
Winter	(00° - 08°)	0.0281	1.8562	-7.9862	+23.429	-32.681	15.8716	0,156
	(08° - 18°)	-0.1703	5.6043	-34.751	91.886	-105.15	43.0123	0,143
	(18° - 30°)	0.0222	0.1864	9.4104	-36.524	55.2837	-25.888	0,119
	(30° - 45°)	0.100	-0.450	6.060	-6.730	-10.100	12.460	0,090
	(45° - 60°)	-0.030	2.030	-9.500	33.700	-53.170	27.800	0,100
	(60° - 90°)	0.370	2.210	7.500	-2.600	-11.460	8.600	0,195
Summer	(00° - 08°)	0.065	0.030	2.320	2.800	-15.240	10.710	0,275
	(08° - 18°)	-0.070	3.350	-22.350	69.500	-89.500	39.770	0,263
	(18° - 30°)	-0.01	1.610	-4.800	4.170	6.210	-8.260	0,178
	(30° - 45°)	0.008	0.870	2.110	-13.600	20.700	-10.330	0,185
	(45° - 60°)	0.023	0.800	0.347	-0.957	-3.810	4.040	0,158
	(60° - 90°)	-0.110	3.430	-16.300	43.960	-56.300	25.950	0,152

Les coefficients de corrélation obtenus pour le site de Tamanrasset sont totalement différents de ceux estimés pour le site d'Oran. Ceci est dû certainement à la différence du climat existant au niveau de ces localités et à la variabilité du gisement solaire dans notre pays.

#### **4.3.1. Validation des modèles d'estimation de l'indice du diffus Ks**

##### **4.3.1.1. Comparaison des modèles établis de Ks avec les modèles rapportés dans la littérature.**

Pour valider les corrélations de l'indice du diffus Ks, nous avons procédé à la comparaison, en premier lieu, les corrélations établies pour chaque saison et période de l'année entre elles, en utilisant toujours les indicateurs statistiques quantitatifs qui sont Le MBE (Mean Bias Error), le RMSE (Root Mean Square Error) et l'indicateur t-stat.

Les résultats de cette comparaison sont affichés dans le tableau 4.5, où on démontre clairement que les modèles établis pour la période de l'année complète, présente de meilleures performances avec des valeurs de l'indicateur MBE (%) les plus basses sur pratiquement l'ensemble des gammes de la hauteur du soleil.

En termes de valeurs de l'indicateur t-stat, le modèle de l'année complète offre de meilleures performances présentant des valeurs qui sont physiquement très significantes et inférieures à la valeur critique Tc prise dans les tables statistiques égale à 2.9.

Il est à souligner également que les corrélations faites pour la saison d'hiver présentent des performances légèrement meilleures en termes de valeurs du MBE et de t-stat uniquement pour des hauteurs du soleil inférieures à 18°.

A cet effet et compte tenu de tout cela, le modèle établi pour la période de l'année complète est le mieux indiqué pour être pris comme étant le modèle de référence pour une comparaison avec les modèles établis par d'autres chercheurs et universitaires et qui sont souvent rapportés dans la littérature scientifique.

Nous avons ajouté à cela le modèle établi et décrit dans le chapitre 03 pour la région de Tamanrasset et qui dénommé modèle 'Kd cor', où on enregistre un écart relatif de plus de 90% en terme de valeurs de MBE(%) et de t-stat.

Les résultats de cette comparaison sont dénombrés dans le tableau 4.5 affichant clairement les meilleures performances du modèle Ks cor (All season) de la période de l'année complète par rapport aux autres modèles cités dans ce même tableau. L'introduction du paramètre hauteur du soleil comme variable indépendante pour l'établissement de corrélations de la composante diffuse du rayonnement solaire global, a fait réduire sensiblement l'erreur standard par rapport à la modélisation faite uniquement avec l'indice de clarté Kt (chapitre 03).

Les figures 4.8 et 4.9 montrent l'évolution, en valeurs discrete, des indicateurs statistiques MBE(%) et t-stat en fonction de la hauteur du soleil. Notons que le modèle Ks cor(All season) de la période de l'année complète présente des erreurs en termes de MBE(%) beaucoup plus faibles par rapport aux autres modèles, offrant ainsi des performances avec des écarts relatifs dépassant les 80%.

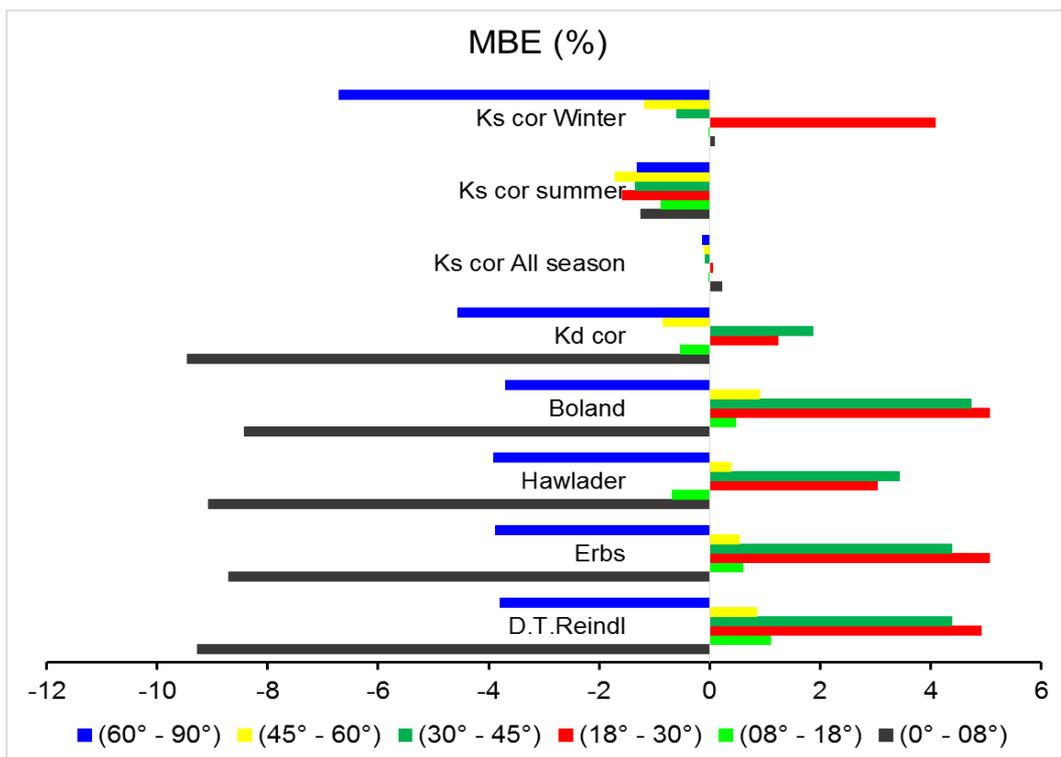


Figure 4.8 : Valeurs de l'indicateur statistique MBE (%) pour différents modèles à des hauteurs du soleil bien définies.

Tableau 4.5 : Indicateurs statistiques appliqués pour la validation des modèles empiriques proposés (Station de Tamanrasset).

Station de Tamanrasset																		
Gammes de la hauteur du soleil																		
Modèles	(00° - 08°)			(08° - 18°)			(18° - 30°)			(30° - 45°)			(45° - 60°)			(60° - 90°)		
	MBE(%)	RMSE	t-stat	MBE(%)	RMSE	t-stat	MBE(%)	RMSE	t-stat	MBE(%)	RMSE	t-stat	MBE(%)	RMSE	t-stat	MBE(%)	RMSE	t-stat
D.T.Reindl	-9.273	0.17	20.9	1.097	0.14	2.63	4.915	0.14	24.3	4.375	0.11	34.1	0.844	0.09	6.73	-3.798	0.09	33.1
Erbs	-8.708	0.16	21.5	0.603	0.14	1.42	5.058	0.14	24.0	4.381	0.11	33.9	0.528	0.09	4.28	-3.878	0.09	32.8
Hawlader	-9.072	0.16	23.7	-0.675	0.13	1.79	3.026	0.12	16.0	3.428	0.11	27.3	0.393	0.09	3.14	-3.908	0.09	35.0
Boland	-8.422	0.16	21.0	0.475	0.14	1.15	5.064	0.14	24.1	4.729	0.12	36.0	0.907	0.09	7.30	-3.690	0.09	31.9
Kd cor	-9.46	0.11	59.2	-0.527	0.08	2.81	1.24	0.05	15.1	1.86	0.02	86.1	-0.84	0.02	26.6	-4.56	0.06	80.7
<b>Ks cor All season</b>	<b>0.22</b>	<b>0.12</b>	<b>0.64</b>	<b>-0.01</b>	<b>0.09</b>	<b>0.03</b>	<b>0.056</b>	<b>0.10</b>	<b>0.36</b>	<b>-0.082</b>	<b>0.10</b>	<b>0.68</b>	<b>-0.097</b>	<b>0.09</b>	<b>0.79</b>	<b>-0.133</b>	<b>0.08</b>	<b>1.20</b>
Ks cor summer	-1.24	0.07	4.01	-0.88	0.07	2.61	-1.58	0.06	5.61	-1.34	0.08	5.58	-1.71	0.07	5.36	-1.32	0.07	5.39
Ks cor Winter	0.09	0.11	0.22	-0.002	0.08	0.01	4.08	0.09	17.1	-0.60	0.07	3.67	-1.18	0.07	5.69	-6.71	0.10	13.8

Par ailleurs, les valeurs de l'indicateur t-stat (fig.4.9) estimées pour le modèle Ks cor (All season) sont beaucoup plus faibles à la valeur de t-stat critique  $t_c$ , offrant des performances dépassant un pourcentage de 90% en terme d'écart relatif.

Le modèle adopté pour les localités de la région de Tamanrasset relatif à l'estimation de la composante diffuse de l'irradiation solaire globale serait le modèle Ks cor (All season) de la période de l'année complète.

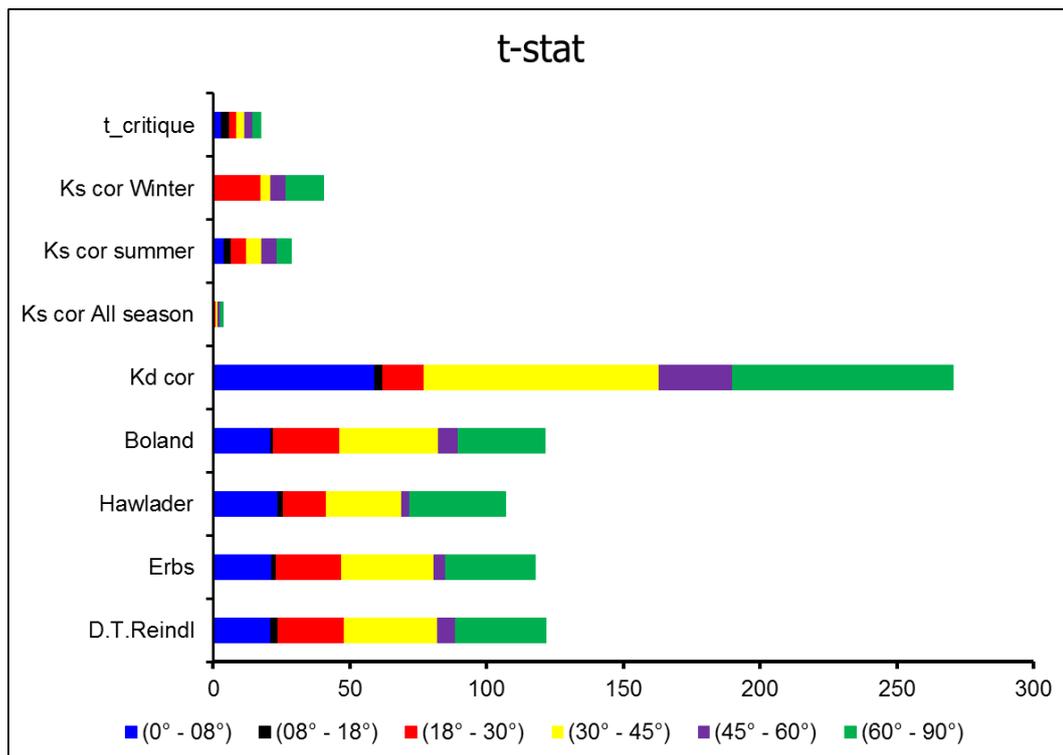


Figure 4.9 : Valeurs de l'indicateur statistique t-stat pour différents modèles à différentes gammes de la hauteur du soleil.

#### 4.3.1.2. Distribution fréquentielle des valeurs résiduelles ( $K_{S,c} - K_{S,m}$ )

Une autre manière de valider les modèles proposés traitant l'évolution de l'indice du diffus  $K_s$  en fonction de l'indice de clarté  $K_t$  pour le site de Tamanrasset, est de calculer la différence entre les valeurs estimées de  $K_s$  et celle mesurées  $\varepsilon_i = K_{S,c} - K_{S,m}$  et qui porte le nom de 'résidu' pour l'observation  $i$ .

La démarche à suivre pour cette technique est de faire évoluer la distribution fréquentielle de ces valeurs résiduelles pour chaque gamme de la hauteur du soleil. Cette technique nous renseigne sur le nombre d'occurrence observé pour chaque

rangée de ces valeurs résiduelles. Plus le nombre d'occurrence est élevé pour des résidus proches de zéro, plus la corrélation correspondante est performante.

Les graphiques de la figure 4.10 donnent cette distribution fréquentielle pour chaque gamme de la hauteur du soleil. Plusieurs informations peuvent être soulignées dans ces graphiques.

Notons que pour les hauteurs du soleil inférieures à  $08^\circ$  (fig.4.10a), la distribution fréquentielle « Réf (All season) » relative à la corrélation  $K_{scor}$  (All season), présente une symétrie presque parfaite par rapport aux valeurs résiduelles nulles, présentant ainsi une performance de plus de 16% par rapport aux autres modèles considérés. Cependant, pour les hauteurs du soleil supérieures à  $08^\circ$ , et malgré une asymétrie observée de ces distributions (décalées d'une valeur de 0.1 par rapport aux résidus nuls), le modèle de référence offre des performances de l'ordre de 27% pour la gamme de hauteur du soleil ( $08^\circ - 18^\circ$ ), 22% pour les gammes ( $18^\circ - 30^\circ$ ) et ( $30^\circ - 45^\circ$ ) Une légère amélioration est constatée pour les hauteurs du soleil supérieures à  $45^\circ$  et est estimée à 5%.

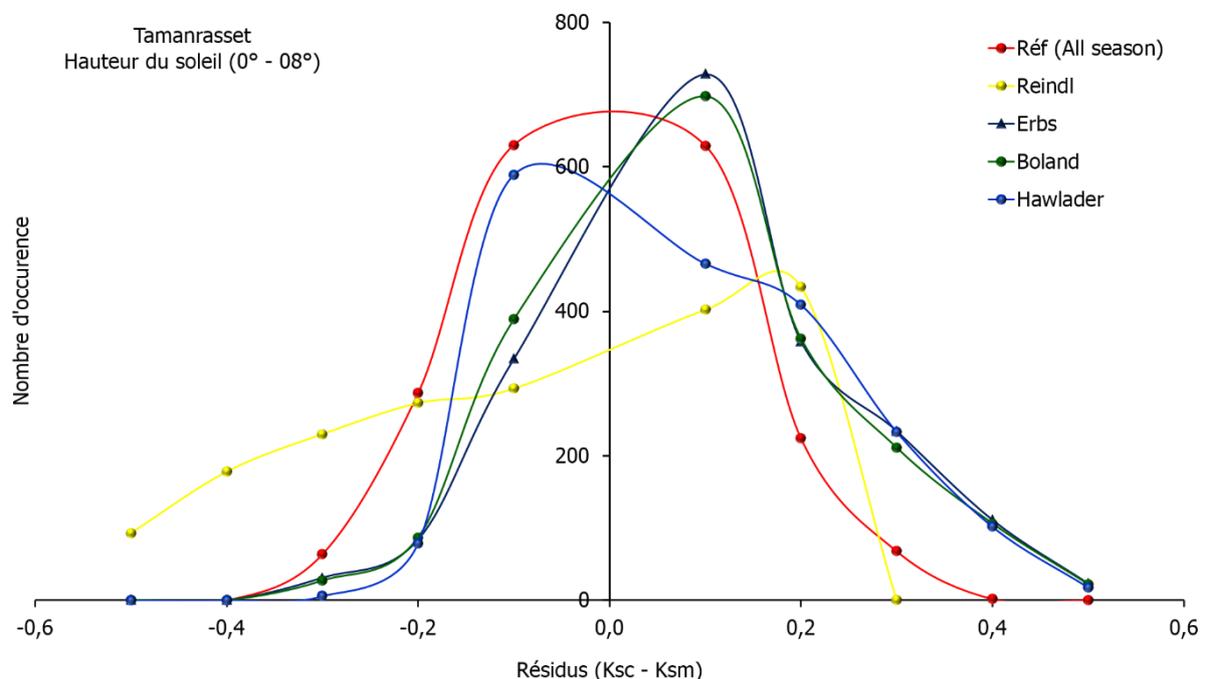


Figure 04.10a : Comparaison de la distribution fréquentielle des valeurs résiduelles ( $K_{S,m} - K_{S,c}$ ) du modèle proposé avec quatre modèles empiriques choisis, (Site de Tamanrasset).

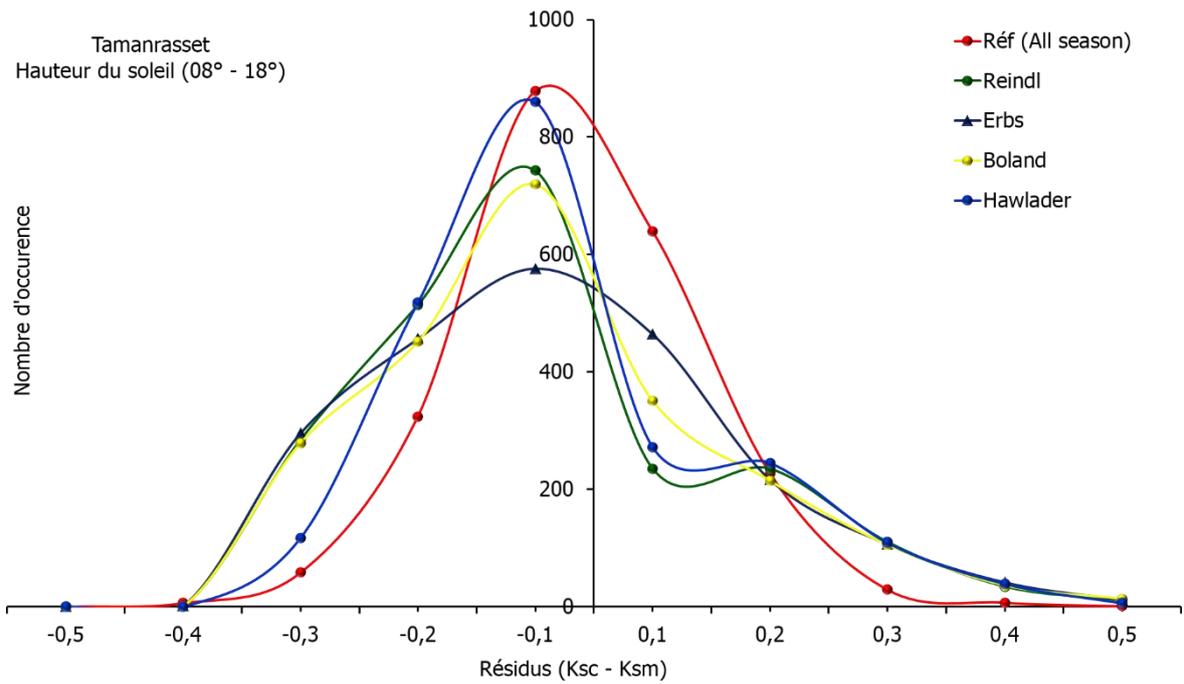


Figure 04.10b : Comparaison de la distribution fréquentielle des valeurs résiduelles ( $K_{S,m} - K_{S,c}$ ) du modèle proposé avec quatre modèles empiriques choisis, (Site de Tamanrasset).

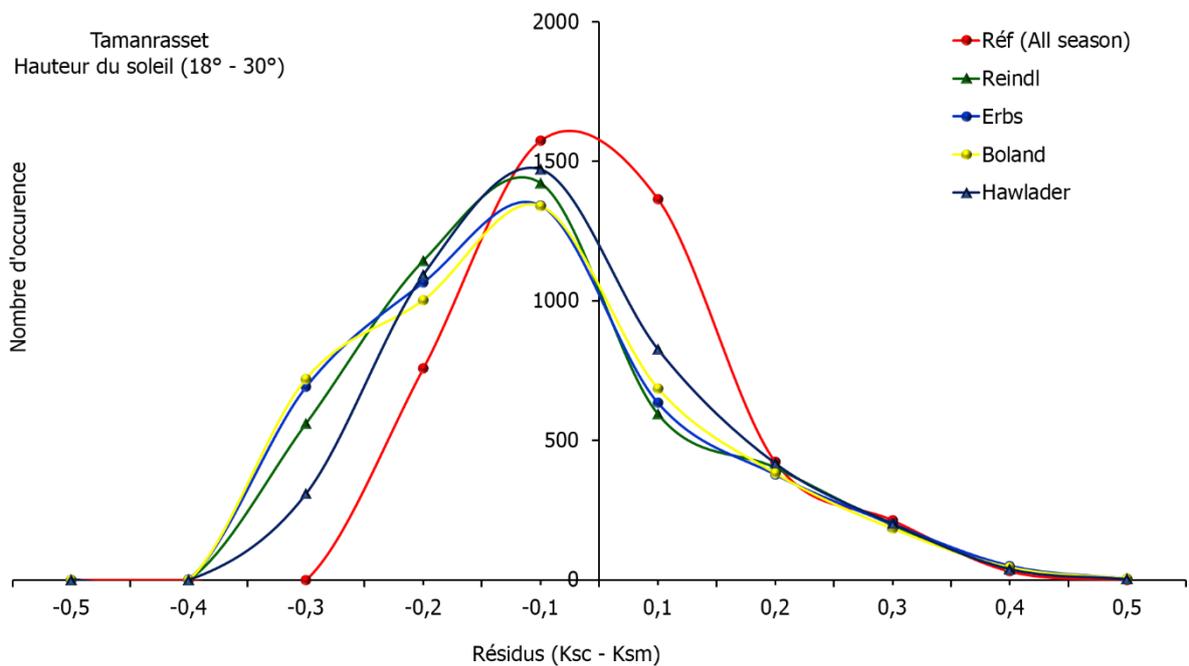


Figure 04.10c : Comparaison de la distribution fréquentielle des valeurs résiduelles ( $K_{S,m} - K_{S,c}$ ) du modèle proposé avec quatre modèles empiriques choisis, (Site de Tamanrasset).

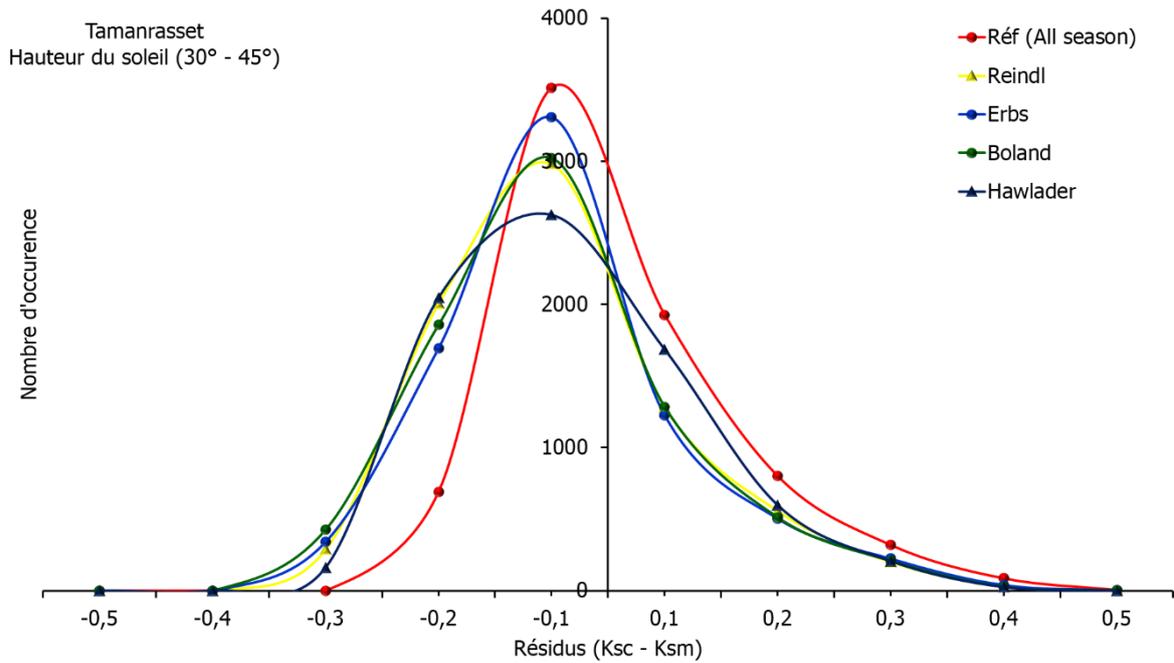


Figure 04.10d : Comparaison de la distribution fréquentielle des valeurs résiduelles ( $K_{S,m} - K_{S,c}$ ) du modèle proposé avec quatre modèles empiriques choisis, (Site de Tamanrasset).

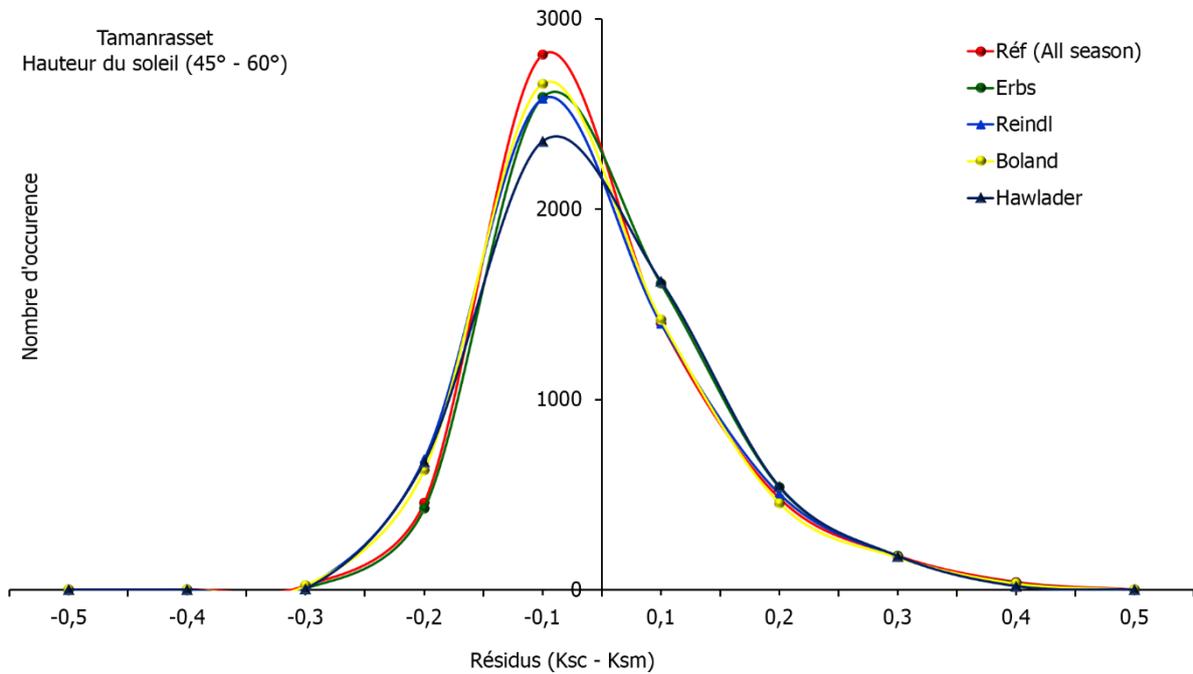


Figure 04.10e : Comparaison de la distribution fréquentielle des valeurs résiduelles ( $K_{S,m} - K_{S,c}$ ) du modèle proposé avec quatre modèles empiriques choisis, (Site de Tamanrasset).

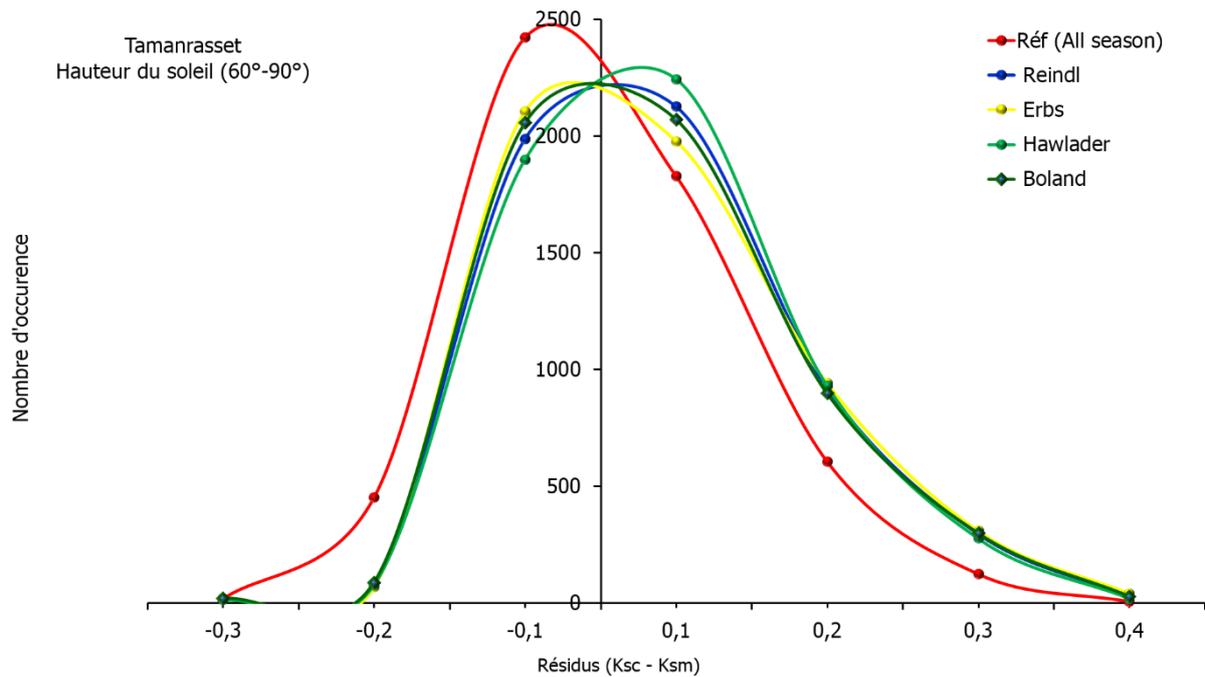


Figure 04.10f : Comparaison de la distribution fréquentielle des valeurs résiduelles ( $K_{S,m} - K_{S,c}$ ) du modèle proposé avec quatre modèles empiriques choisis, (Site de Tamanrasset).

#### 4.4. CONCLUSION

Les résultats de l'analyse qualitative de l'évolution de la composante diffuse du rayonnement solaire global a permis de développer des corrélations mathématiques entre l'indice diffus  $K_s$  et l'indice de clarté  $K_t$  pour différents niveaux de la hauteur du soleil et pour les saisons d'hiver et d'été ainsi que pour la période de l'année complète.

Une étude comparative entre le modèle proposé (All season) et quatre modèles rapportés souvent dans la littérature a été réalisée, dans une première phase, pour évaluer l'impact de la saison sur la qualité et la précision des corrélations établies à l'aide de paramètres ou d'indicateurs statistiques, à savoir: MBE, RMSE et, bien sûr, le test t-stat. Il a été constaté que les corrélations estimées pour toute la période de l'année (All season) enregistrent le taux le plus bas et donc une meilleure performance, en termes d'indicateurs statistiques, par rapport à celles affichées pour les saisons d'hiver et d'été. Notons que pour pratiquement toutes les plages de la hauteur du soleil, le modèle établi pour la période de l'année complète offre, en termes de MBE, une performance de plus de 90% comparé à celles trouvées pour la saison hivernale et de même pour la saison estivale.

De plus, les valeurs de t-stat observées pour la période de l'année complète sont toutes inférieures à la valeur critique  $t_c$ , qui est de 2,9 selon les tables statistiques. Le modèle établi pour l'année entière (All season), servant de modèle de base pour l'estimation de la composante diffuse du rayonnement solaire global sur un plan horizontal pour les sites d'Oran et de Tamanrasset, a également été pris comme modèle de référence pour une validation et une évaluation comparative avec les résultats des travaux issus de la littérature scientifique.

Une autre étude comparative est réalisée entre le modèle de référence, établi pour la période de l'année complète, et d'autres travaux établis sur la même thématique et choisis, d'une part, pour leur citation assez importante et d'autre part, pour la forme et structure de leurs modèles. Les auteurs de ces modèles sont Reindl [9], Erbs [18], Hawlader [10] et Boland [23]. Le modèle de référence offre de très bonnes performances par rapport aux modèles des quatre auteurs choisis dans cette étude.

Ainsi, il affiche, pour le site d'Oran, une performance supérieure à 97% pour le MBE sur toutes les plages de la hauteur du soleil et de 20 et 12,5% pour la RMSE, respectivement, pour les plages de la hauteur du soleil inférieure à  $18^\circ$  et supérieures à  $18^\circ$ . Pour le site de Tamanrasset des performances qui dépassent un taux de 80% sur toutes les gammes de la hauteur du soleil.

Le modèle proposé apporte une amélioration très significative avec des valeurs de t-stat bien inférieures à la valeur critique  $t_c$  (tableaux 4.3 et 4.5).

La présente étude révèle que la composante diffuse du rayonnement solaire horizontal global, en plus de sa dépendance aux conditions du ciel (couvert ou nuageux), est considérablement affectée par la hauteur du soleil. L'introduction de la hauteur du soleil dans l'établissement de la corrélation de la composante diffuse a permis de réduire l'erreur standard par rapport à d'autres modèles qui ne prenaient en compte que l'indice de clarté comme variable unique et indépendante.

L'établissement de cette approche méthodologique pour l'estimation de la composante diffuse solaire peut être utilisé, par la réduction des erreurs standards, pour le calcul précis du rayonnement solaire global sur un plan incliné.

## **Chapitre 05 :**

Impact du profil du rayonnement solaire sur le dimensionnement et les performances des systèmes photovoltaïques

## Introduction

Le dimensionnement et la simulation des systèmes PV autonomes nécessitent une bonne connaissance de la variabilité du gisement solaire sur un site donné, notamment les modèles du rayonnement solaire global reçu sur le plan des modules photovoltaïques.

Dans le but de faire un dimensionnement des systèmes PV autonomes, plusieurs techniques ont été élaborées et décrites dans la littérature scientifique. Parmi ces techniques de dimensionnement, on peut citer deux grandes techniques principales qui sont largement utilisées par les concepteurs et utilisateurs des installations photovoltaïques.

La première technique est basée sur un profil du rayonnement solaire dont la variation de sa quantité d'énergie se fait à l'échelle horaire.

La deuxième technique considère la quantité d'énergie solaire cumulée sur une durée d'une journée.

Cependant, ces deux techniques, aboutissant certes à des tailles et dimensions du système PV, présentent des valeurs du couple ( $P_s$ ,  $C_s$ ), [ $P_s$  : Puissance Crête du champ PV et  $C_s$  : Capacité nominale de la batterie], totalement différentes.

Ce présent travail a pour objectif de mettre en évidence l'impact de ces profils du rayonnement solaire sur le dimensionnement des systèmes photovoltaïques et de voir à quel point la variabilité de cette énergie solaire affectera les performances et la fiabilité de ces systèmes photovoltaïques.

Dans la première partie de ce chapitre, nous présentons la méthode d'estimation de rayonnement solaire global horaire et journalier, sur le plan des modules PV, suivie d'une étude conceptuelle du dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome.

Nous présentons dans la deuxième partie les résultats des simulations et les analyses y afférentes. Nous expliquerons comment, à travers l'analyse des différents indices de performance, évaluer un système photovoltaïque autonome et identifier, s'il y a lieu, ses carences et leurs sources probables.

Cette procédure d'analyse est appliquée, à titre de démonstrateur, sur une localité de la région de Tamanrasset.

## **5.1. Estimation de l'irradiation solaire globale journalière sur le plan des modules photovoltaïques.**

Comme les données mesurées sur le rayonnement solaire diffus ne sont pas facilement disponibles pour le site étudié, des méthodes de corrélation bien connues et généralement adaptées ont été utilisées pour estimer les composantes du rayonnement solaire diffus journalier sur une surface horizontale. Ensuite, différents composants du rayonnement solaire sur une surface inclinée sont déterminés afin d'estimer le rayonnement solaire global sur cette surface.

Enfin, le rayonnement total sur différentes surfaces inclinées a été obtenu pour estimer l'angle d'inclinaison optimal.

### **5.1.1. Estimation du rayonnement solaire diffus journalier sur une surface horizontale.**

Le rayonnement solaire diffus journalier est très important pour déterminer l'angle d'inclinaison optimal de n'importe quel emplacement. Plusieurs études concernant le rayonnement solaire ont montré que la composante de rayonnement diffus dépend soit de la durée d'ensoleillement, soit de l'indice de clarté, soit de la combinaison des deux [8, 52-55, 11,12]. Dans cette étude, certains modèles existants sont utilisés pour estimer le rayonnement solaire diffus moyen mensuel sur une surface horizontale. Sur la base des valeurs moyennes obtenues à partir des modèles existants, neuf nouveaux modèles ont été établis pour prédire la composante du rayonnement diffus solaire.

Le modèle optimal présentant les meilleures performances en termes de précision et de qualité est donné par l'équation suivante :

$$H_d/H = 0.741 - 0.552(n/N) - 0.208(n/N)^2 + 0.099(n/N)^3 \quad (5.1)$$

Où  $H$  et  $H_d$  sont les moyennes mensuelles des irradiances solaires globales et diffuses, respectivement ;  $n$  est la moyenne mensuelle des heures d'ensoleillement ; et  $N$  est la moyenne maximale mensuelle journalière d'heures d'ensoleillement.

Pour une estimation correcte du rayonnement diffus moyen mensuel journalier, l'indice de clarté moyen  $H/H_0$  correspondant et la durée d'ensoleillement moyenne mensuelle  $n/N$  sont déterminés à partir des données mesurées de  $n$  et de  $H$ .

La moyenne mensuelle journalière du rayonnement solaire extraterrestre sur une surface horizontale ( $H_0$ ) peut être obtenue à partir de l'équation suivante [43,56];

$$H_0 = \frac{24}{\pi} G_{on} \left( \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \varphi \sin \delta \right) \quad (5.2)$$

Où  $\varphi$  est la latitude du lieu étudié,  $\delta$  est la déclinaison solaire,  $\omega_s$  est l'angle horaire au coucher du soleil et  $G_{on}$  est le rayonnement extraterrestre et qui peut être déterminé à partir de [41,53] ;

$$G_{on} = G_{sc} \left( 1 + 0.033 \cos \frac{360 \cdot j}{365} \right) \quad (5.3)$$

Où  $G_{sc}$  est la constante solaire (= 1367 W/m<sup>2</sup>) et  $j$  le numéro du jour dans l'année. La déclinaison solaire  $\delta$  et l'angle horaire au lever du soleil  $\omega_s$  et la durée d'ensoleillement maximale possible  $N$  peuvent être calculés comme suit [56].

$$\delta = 23.45 \sin \left( \frac{360}{365} (284 + D) \right) \quad (5.4)$$

$$\omega_s = \cos^{-1} (-\tan \varphi \tan \delta) \quad (5.5)$$

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1} (-\tan \varphi \tan \delta) = \frac{2}{15} \omega_s \quad (5.6)$$

### 5.1.2. Rayonnement global journalier sur les surfaces inclinées

Le rayonnement solaire global sur une surface inclinée (plan des modules PV) est estimé à l'aide des composantes correspondantes calculées pour une surface horizontale. La moyenne mensuelle journalière de l'irradiation diffuse, la moyenne mensuelle journalière de l'irradiation directe et la composante de réflexion du sol sont utilisés pour calculer le rayonnement solaire global moyen journalier sur une surface inclinée et est donné par [57] ;

$$H_g = H_b R_b + H_d R_d + H_\rho \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \quad (5.7)$$

Où  $\rho$  est l'albédo du sol,  $\beta$  représente l'angle d'inclinaison des modules photovoltaïques,  $R_b$  et  $R_d$  sont les facteurs de conversion directe et diffuse respectivement. La moyenne mensuelle de l'irradiation solaire directe peut être calculée par l'équation suivante :

$$H_b = H - H_d \quad (5.8)$$

$R_b$  est le rapport entre le rayonnement direct sur une surface inclinée et le rayonnement direct sur une surface horizontale et peut être calculé à partir de [43] :

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \sin \omega'_s + (\pi/180) \omega'_s \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + (\pi/180) \omega_s \sin \varphi \sin \delta} \quad (5.9)$$

Où  $\omega'_s$  est l'angle horaire au lever du soleil pour une surface inclinée et peut être déterminé par :

$$\omega'_s = \min \left\{ \begin{array}{l} \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) \\ \cos^{-1}(-\tan(\varphi - \beta) \tan \delta) \end{array} \right\} \quad (5.10)$$

Le facteur de conversion du rayonnement diffus  $R_d$  peut être déterminé à l'aide des équations suivantes [54] :

$$R_d = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta) \quad (5.11)$$

Le rayonnement solaire total sur une surface inclinée a été calculé pour l'angle d'inclinaison  $\beta$  de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  avec un intervalle de 1 afin de déterminer l'angle d'inclinaison optimal. L'angle auquel  $H_g$  produisait la valeur maximale était considéré comme l'angle d'inclinaison optimal. Cette procédure a été suivie afin d'obtenir un angle d'inclinaison optimal pour chaque mois de l'année, pour les quatre saisons de l'année, tous les six mois et pour une année complète.

## **5.2. Irradiation solaire globale horaire sur une surface inclinée.**

Nous passons maintenant au problème général du calcul du rayonnement horaire sur des surfaces inclinées lorsque seul le rayonnement global sur une surface horizontale est connu. Pour cela, nous avons besoin des directions à partir desquelles le direct et les composantes diffuses atteignent la surface en question. La direction à partir de laquelle le rayonnement diffus est reçu, c'est-à-dire sa répartition sur le dôme du ciel, est fonction des conditions de la nébulosité et de la clarté atmosphérique qui sont hautement variables.

Il est nécessaire de connaître ou d'estimer le rayonnement solaire incident sur des surfaces inclinées telles que des capteurs solaires, des fenêtres ou d'autres récepteurs de systèmes passifs. Le rayonnement solaire incident est la somme d'un ensemble de flux de rayonnement comprenant le rayonnement direct, les trois composantes du

rayonnement diffus du ciel et le rayonnement réfléchi par les diverses surfaces «vues» par la surface inclinée. Le rayonnement incident total sur cette surface peut être écrit comme suit :

$$I_T = I_{T,b} + I_{T,d,iso} + I_{T,d,cs} + I_{T,d,hz} + I_{T,refl} \quad (5.12)$$

Où les indices *iso*, *cs*, *hz* et *refl* se réfèrent aux flux de rayonnements isotropiques, circumsolaires, à l'horizon et réfléchis.

Le rayonnement global sur une surface inclinée est composé de trois éléments : Le direct, le diffus et le réfléchi par le sol.

Le facteur de conversion géométrique  $R_b$  est le rapport du rayonnement direct horaire (ou instantané) sur une surface inclinée au rayonnement direct horaire sur une surface horizontale,

$$R_b = I_{b,T} / I_b = \cos \theta / \cos \theta_z \quad (5.13)$$

Une méthode courante pour calculer le rayonnement réfléchi par le sol incident sur une surface inclinée consiste à supposer que le premier plan du capteur est un réflecteur diffus et que l'horizon n'est pas obstrué.

D'autres auteurs ont proposé des modèles de réflectance du sol anisotropes [8, 59], mais le manque de données expérimentales a entravé leur validation. Par conséquent, le rayonnement réfléchi par le sol est supposé diffus et est obtenu par [52].

$$I_{g,T} = I \rho_g (1 - \cos \beta) / 2 \quad (5.14)$$

Où  $\rho_g$  est l'albédo du sol.

Le rayonnement diffus est difficile à modéliser car sa distribution spatiale est généralement inconnue et dépend du temps.

Trois sous-composantes diffuses sont utilisés pour estimer le comportement anisotrope d'un rayonnement diffus : un rayonnement circumsolaire, un éclaircissement d'horizon et un rayonnement diffus isotrope.

Le rayonnement circumsolaire est principalement le rayonnement diffusé par des aérosols dans l'atmosphère. L'éclaircissement de l'horizon correspond à l'augmentation du rayonnement diffus près de l'horizon en raison d'une plus grande partie (par rapport

au dôme du ciel) de la diffusion du rayonnement incident lorsqu'il traverse dans l'atmosphère la plus longue longueur d'un trajet près de l'horizon et par de multiples réflexions internes dans l'atmosphère terrestre.

Isotrope est la partie restante de diffusion supposée être uniformément répartie sur le dôme du ciel. La figure 5.1 montre schématiquement ces trois parties du rayonnement diffus.

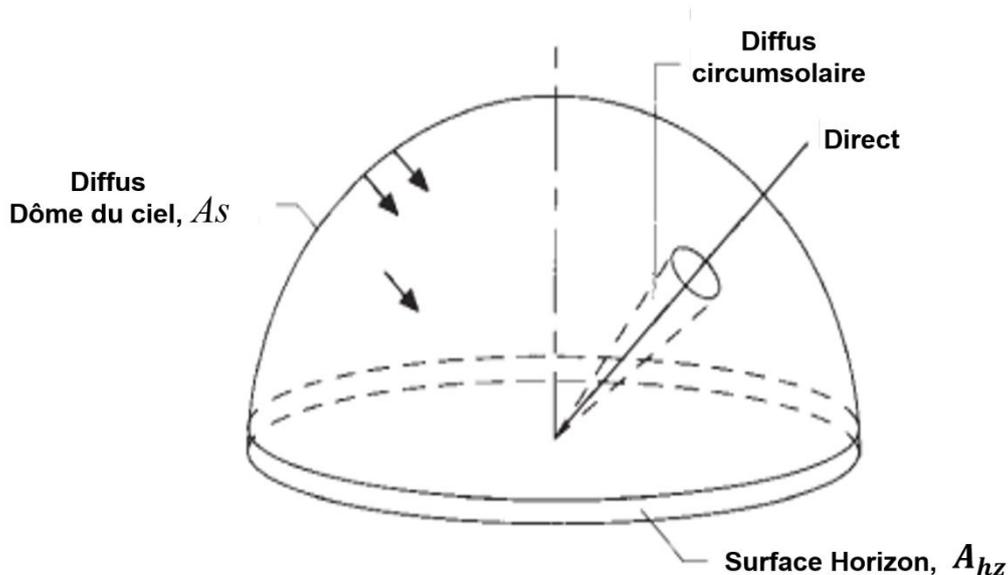


Fig.5.1 : Schéma de la distribution du rayonnement diffus sur le dôme du ciel montrant les composantes circumsolaires et l'éclaircissement d'horizon ajoutés à la composante isotropique. Adapté par Perez et al. (1988).

Plusieurs modèles ont été proposés pour estimer le rayonnement diffus sur une surface inclinée (qui ne représentent pas tous ces trois sous-composantes du diffus).

Le modèle isotopique [60] est le plus simple des modèles donnant le diffus sur une surface inclinée. Ce modèle suppose que tout le rayonnement diffus est uniformément réparti sur tout le dôme du ciel. Le rayonnement diffus par une unité de surface inclinée correspond au produit du rayonnement diffus dans le ciel et du facteur de vue de la surface vers le ciel,  $(1 + \cos \beta)/2$ .

Sous un ciel entièrement nuageux, le modèle isotropique devient une bonne approximation. Au fur et à mesure que le ciel devient plus clair, la validité du modèle isotropique se dégrade en raison de la présence de l'effet circumsolaire et l'effet anisotropique éclaircissant l'horizon.

**Hay et Davies** [61] ont développé un modèle permettant de prédire le rayonnement diffus en surface inclinée qui tient compte du rayonnement diffus à la fois circumsolaire et isotrope.

Etant donné que le comportement anisotrope du rayonnement diffus circumsolaire devient plus prononcé par temps clair, Hay et Davies ont défini un "Indice d'Anisotropie"  $A_I = I_{bn}/I_{on} = I_b/I_0$  pour pondérer les composantes du rayonnement circumsolaire et isotropique. L'indice d'anisotropie définit une partie du rayonnement diffus à traiter comme circumsolaire, la partie restante étant considérée comme isotropique. La diffusion circumsolaire est projetée sur la surface inclinée de la même manière que le rayonnement direct.

$$I_{T,cir} = I_d A_I R_b \quad (5.15)$$

$$I_{T,iso} = I_d (1 - A_I) \frac{(1 + \cos \beta)}{2} \quad (5.16)$$

L'irradiation diffuse horaire sur une surface inclinée serait la somme des deux équations (5.14) et (5.15) :

$$I_{d,T} = I_d \left[ (1 - A_I) \frac{(1 + \cos \beta)}{2} + A_I R_b \right] \quad (5.17)$$

Sous un ciel dégagé, l'indice d'anisotropie serait élevé et le diffus circumsolaire aura un poids plus important que le diffus isotropique. Sous un ciel nuageux, l'indice d'anisotropie passe à zéro et tout ce qui est diffus est traité comme étant isotropique. Ce comportement est cohérent avec les mesures effectuées par Temps et Coulson [62] (et d'autres comme indiqué dans Hay et McKay [63]).

**Le modèle de Perez** [64] incorpore les trois sous-composantes pour tenir compte du rayonnement diffus circumsolaire, du diffus à l'horizon et du diffus isotropique. Le modèle Perez utilise une région circumsolaire avec des coefficients empiriques dérivés de cinq localités américaines. Les versions complètes des deux modèles de Perez ne seront pas présentées ici ; le lecteur est référé à [64] et [27] pour plus de détails.

Un nouveau modèle de calcul du diffus sur des surfaces inclinées a été développé par **Reindl et al.** Cependant, ce modèle amélioré a été mis au point pour prendre en

compte les composantes du diffus circumsolaire et / ou éclaircissant l'horizon sur une surface inclinée, représentés schématiquement à la figure 5.2.

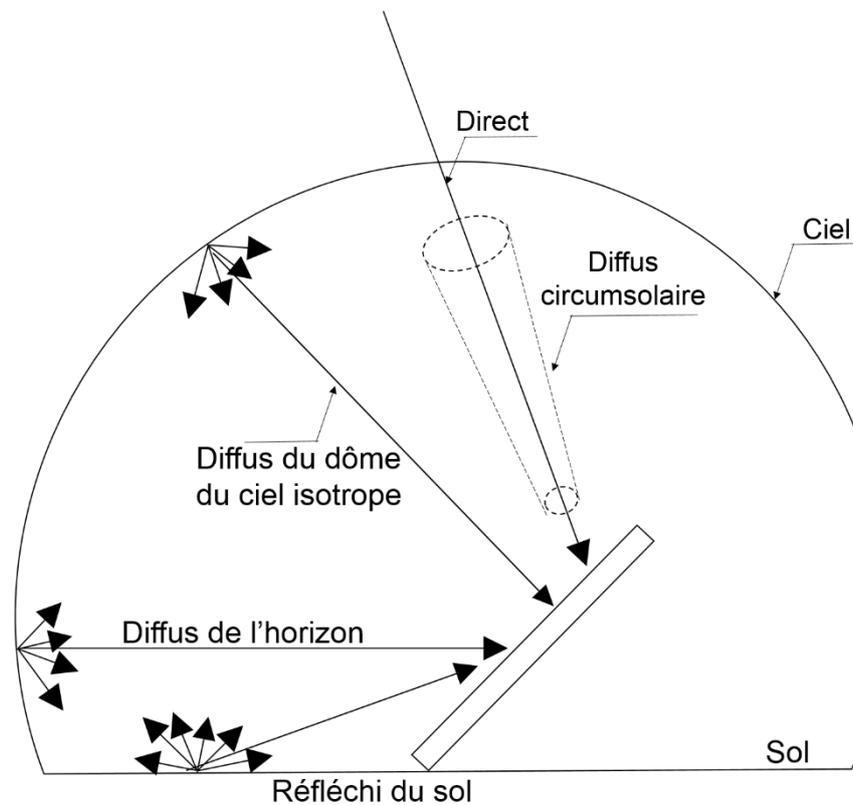


Fig.5.2 : Rayonnement direct, diffus et le réfléchi du sol sur une surface inclinée

Le modèle de Hay ne tient pas compte du rayonnement diffus éclairant l'horizon. Les calculs préliminaires du rayonnement diffus incident sur les surfaces orientées au sud ont indiqué que le modèle de Hay sous-estimait le rayonnement diffus sur des surfaces inclinées. Le modèle de Hay peut être amélioré en ajoutant un terme d'éclaircissement d'horizon.

Le facteur de correction de l'éclaircissement de l'horizon utilisé par Temps et Coulson a été appliqué au terme isotropique dans le modèle de Hay. Diverses fonctions modulantes ont été appliquées au facteur de correction pour éclaircir l'horizon.

Le facteur  $f = \sqrt{I_b/I}$  a été déterminé comme étant la meilleure fonction pour moduler le terme de correction du diffus pour l'éclaircissement de l'horizon (le facteur de correction de Klucher, avait une performance similaire). Le nouveau modèle anisotropique devient :

$$I_{d,T} = I_d \left[ (1 - A_I) \frac{(1 + \cos \beta)}{2} \times (1 + f \sin^3 (\beta/2)) + A_I R_b \right] \quad (5.18)$$

Le premier terme entre parenthèses représente le rayonnement diffus isotropique corrigé pour inclure le rayonnement diffus éclairant l'horizon. Le second terme représente la contribution du rayonnement diffus circumsolaire. Sous un ciel nuageux, le facteur de modulation et l'indice d'anisotropie passent à zéro et le modèle revient au modèle isotropique. Sous un ciel partiellement nuageux, la fonction de modulation et l'indice d'anisotropie sont non nuls.

En ajoutant les termes de l'irradiation directe et du réfléchi du sol au modèle anisotropique modifié par Reindl, il en résulte un modèle HDKR (modèle de Hay, Davies, Klucher, et Reindl) qui permet de calculer l'irradiation solaire globale horaire sur un plan incliné :

$$I_T = (I_b + I_d A_I) R_b + I_d \left[ (1 - A_I) \frac{(1 + \cos \beta)}{2} \times (1 + f \sin^3 (\beta/2)) \right] + I \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (5.19)$$

### **5.3. Etude conceptuelle du dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome.**

Les principales parties du système photovoltaïque sont représentées sur la figure (5.3).le système est piloté de la manière suivante [65]:

- ❖ C'est la batterie qui impose sa tension au système
- ❖ Le stockage dans les batteries est prioritaire
- ❖ La batterie est pilotée entre deux seuils de l'état de charge : seuil maximal  $SOC_{max}$  et seuil minimal  $SOC_{min}$ , correspondants respectivement aux tensions max  $V_{bh}$  et tension min  $V_{bl}$  de la batterie.

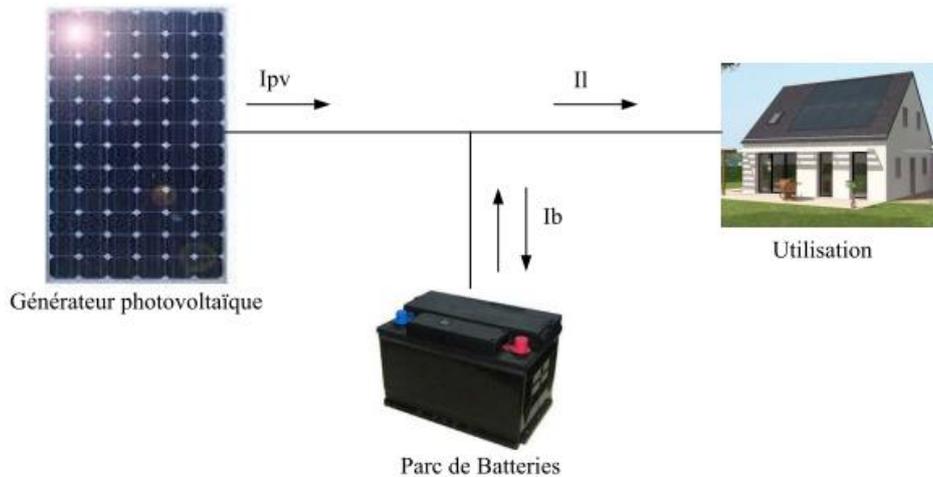


Fig.5.3 : Principales parties du système photovoltaïque

### 5.3.1. Description de la méthode de dimensionnement basée sur le modèle horaire du rayonnement solaire.

#### 5.3.1.1 Méthodologie adoptée et suivie

La méthode adoptée pour ce cas à étudier est la suivante : [65]

- ❖ Le choix d'un profil de consommation d'énergie électrique représentatif du site, ainsi que le choix d'une architecture du système.
- ❖ La simulation du fonctionnement du système durant une année entière avec la détermination du coût relatif à cette architecture.
- ❖ L'élaboration des courbes déterminant le couple optimal de la puissance crête du champ photovoltaïque et de la capacité du stockage électrochimique, et cela en fonction d'un coût minimal correspondant du système PV global.

#### a- Profil de consommation d'énergie électrique

Le profil de consommation d'énergie électrique adopté dans cette étude est celui représenté à la figure (5.4). Ce profil de consommation journalière est pratiquement identique pour chaque jour de l'année, et correspond au profil de consommation généralement rencontré dans les sites isolés.

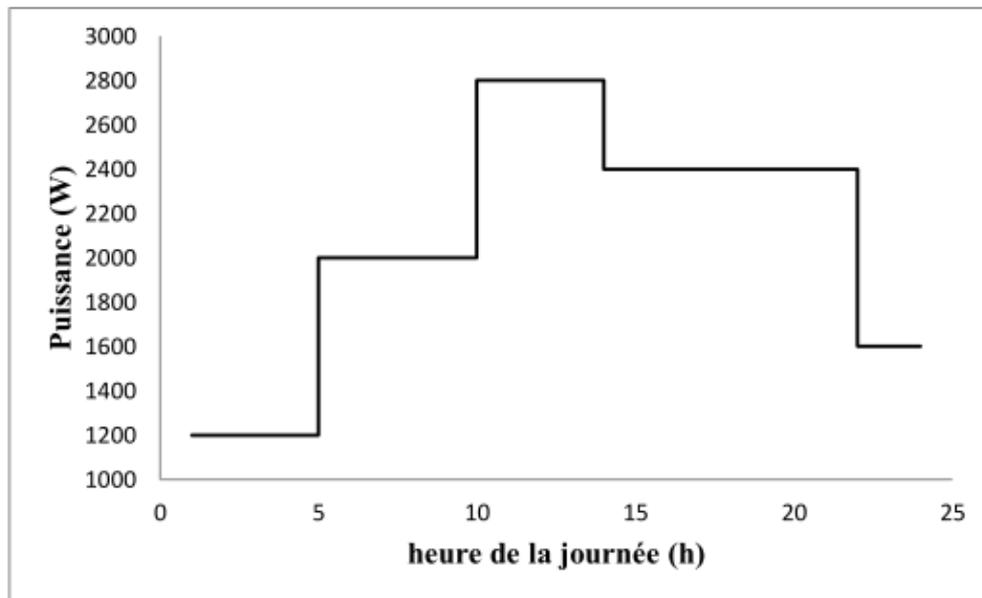


Fig.5.4 : Profil de consommation d'un groupe de maisons dans une localité de la région de Tamanrasset

### **b- Critères de dimensionnement :**

Les principaux critères de dimensionnement choisis dans le cadre de cette étude sont les suivantes :

- ❖ La pénurie ;
- ❖ Le cout de l'installation.

### **c- Notion et définition de la pénurie :**

Le mode choisi de production de l'énergie étant du type centralisé, en partant de l'hypothèse que les utilisateurs sont des simples abonnés, payant ainsi l'énergie électrique utilisée.

Ces utilisateurs accepteraient donc difficilement de ne pouvoir disposer d'énergie en un moment donné. Il en est supposé que ces derniers exigent une satisfaction totale de tous leurs besoins à chaque instant de la journée.

Nous dirons qu'il y a pénurie, quand la puissance demandée est supérieure à celle fournie par le champ de modules photovoltaïque et les éléments de batterie sont déchargés au seuil minimal, la gestion interdit alors toute fourniture d'énergie aux abonnés.

A chaque instant où cela se produit est comptabilisée par le programme de simulation comme heure de pénurie.

### 5.3.1.2. Recherche de la solution optimale

#### Position du Problème :

Le problème consiste en la détermination de la puissance crête  $P_c$  du champ photovoltaïque et de la capacité nominale  $C_s$  du système de stockage électrochimique, correspondant au coût total minimal de l'installation.

La méthode adoptée pour effectuer le dimensionnement des composants du système PV, considère que la puissance crête  $P_c$  et la capacité nominale  $C_s$  sont variables, les autres sous-systèmes restant à coût constant.

Les principaux coûts d'investissement, qui sont liées à la réalisation d'une centrale photovoltaïque, peuvent être décomposés selon certaines rubriques, à savoir [65] :

- ❖ Coût relatif aux études de conception ;
- ❖ Coût relatif aux équipements et matériels solaires :
  - modules photovoltaïques
  - régulateur de charge et de décharge
  - Onduleur
  - éléments de batterie de stockage électrochimique
  - diverse fournitures...
- ❖ Coût de l'installation du système sur site ;
- ❖ Coût des travaux de génie civil ;
- ❖ Mise en service de la centrale PV ;

A cet effet, le coût global de l'installation d'un système photovoltaïque de puissance, soit  $C_T$ , peut être exprimé selon l'expression suivante :

$$C_T = A.P_c + B.Q_s + C_{T0} \quad (5.20)$$

Avec :

$A$  : coût du watt crête photovoltaïque (€/Wc)

$B$  : coût du kilowattheure de la batterie (€/kWh)

$Q_s$  : quantité d'énergie dans la batterie (kWh)

$C_{T0}$  : la somme des coûts de tous les autres sous-systèmes, d'études de conception, d'installation du système sur site (€)

Dans le programme de simulation établi, un paramètre  $\alpha_e$  correspondant au nombre d'heures de pénurie a été défini. Ce nombre  $\alpha_e$  est déterminé pour chacun des couples ( $P_c$ ,  $C_s$ ) et cela sur l'année entière.

Pour qu'il y ait une continuité des courbes en fonction de  $P_c$  et  $C_s$ , de très faibles variations  $\Delta P_c$  et  $\Delta C_s$  ont été considérées.

Nous pouvons remarquer que le nombre d'heures de pénurie  $\alpha_e$  peut également résulter de diverses combinaisons réalisées entre la puissance crête  $P_c$  du champ PV et la capacité nominale  $C_s$  du système de stockage. La solution optimale retenue serait toujours celle correspondant au coût global minimal de l'installation.

La simulation du fonctionnement du système PV nous a permis de déterminer une série de couples ( $P_c$ ,  $C_s$ ) correspondants à un certain nombre de pénurie  $\alpha_e$  fixé au préalable (figure 5.5). Pour chaque couple ( $P_c$ ,  $C_s$ ) nous calculons le coût global de l'installation PV, le point optimal relatif au couple ( $P_c$ ,  $C_s$ ), donnant la taille optimale du champ PV et la capacité nominale de la batterie de stockage électrochimique, correspond au coût minimal estimé pour le système photovoltaïque en entier.

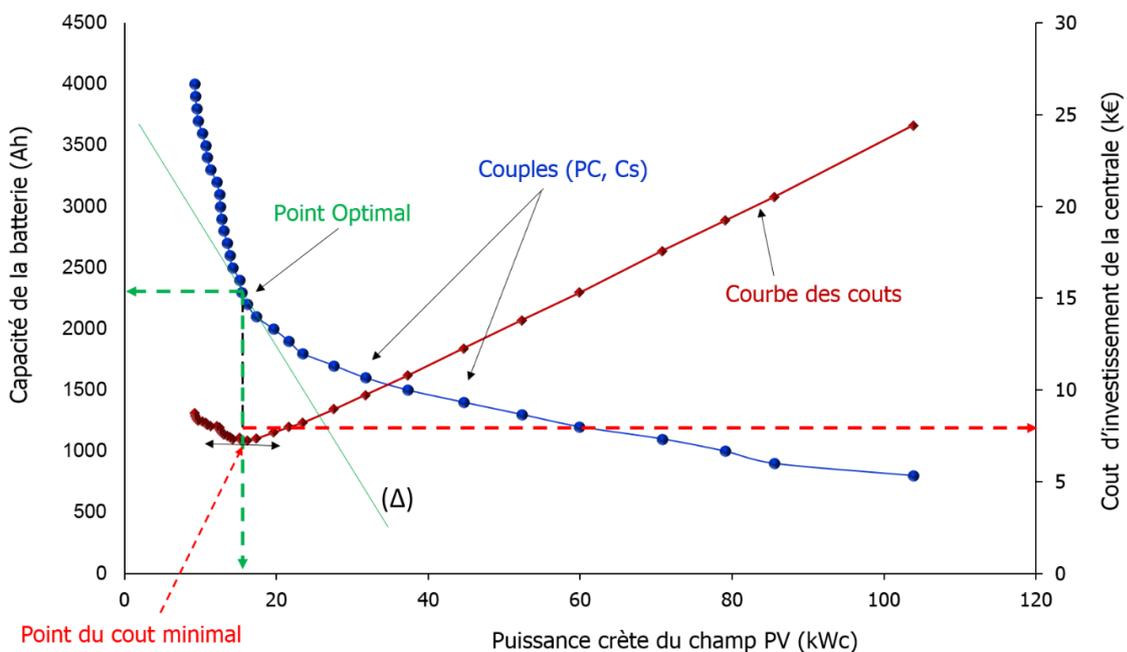


Fig.5.5 : Méthode analytique pour la détermination du coût minimal

Cette procédure de dimensionnement du système PV donnant la taille optimale du champ PV et de la capacité de la batterie est répétée pour plusieurs valeurs du nombre de pénurie, à savoir 0heures, 100h, 500h et 1000h de pénurie. Le tableau 5.1 affiche les valeurs optimisées du système PV et le cout minimal correspondant.

Tableau 5.1 : Valeurs optimales du dimensionnement du système PV pour différents nombre d'heures de pénurie  $\alpha_e$

<i>Nbre d'heures de pénurie <math>\alpha_e</math></i>	<i>Puissance crête (kWc)</i>	<i>Capacité de la batterie (Ah)</i>	<i>Cout minimale du système PV (k€)</i>
0	15.4	2300	72.6
100	10.3	2000	56.3
500	9.9	1200	42.0
1000	8.3	1000	35.0

### 5.3.2. Description de la méthode de dimensionnement basée sur le modèle journalier du rayonnement solaire.

La taille du champ photovoltaïque est caractérisée par sa puissance de crête  $P_c$  (Wc) dont le calcul est basé sur un profil de consommation (fig.5.4) d'un groupe de maisons et par l'irradiation moyenne quotidienne globale en tenant compte d'un ratio  $K_r$ , appelé aussi facteur de qualité. Ce facteur  $K_r$  dépend d'une multitude d'éléments : distribution des capteurs, orientation et inclinaison des panneaux photovoltaïques, qualité des diodes, des câbles et de l'onduleur... Il est généralement compris entre 0,55 et 0,65 pour des installations classiques correctement conçues, selon l'Agence Internationale de l'Energie (AIE).

La puissance crête du champ photovoltaïque est donnée par l'expression suivante :

$$P_c = \frac{DE \times H_{STC}}{H_g \times K_r} \quad (5.21)$$

Où

$DE$  : Demande énergétique journalière (wh) ;

$H_g$  : L'éclairement moyen journalier, sur le plan des modules PV, du mois le plus défavorable (wh/m<sup>2</sup>) et estimé par l'équation (5.7) ;

$H_{STC}$  : L'éclairement solaire aux conditions STC (1000 w/m<sup>2</sup>) ;

$K_r$  : Facteur de qualité.

La capacité nominale de la batterie de stockage est calculée à partir du nombre de jours d'autonomie du système avec une profondeur de décharge réglée au préalable. Cette capacité est donnée par l'expression suivante :

$$C_b = \frac{A_s \times DE}{DOD \times V_b} \quad (5.22)$$

Où

$A_s$  : Autonomie du système de stockage (jours)

$DOD$  : Profondeur de décharge prise à 80%

$V_b$  : Tension de la batterie (V)

Le tableau 5.2 affiche les tailles du système PV et les couts de l'installation PV pour 03 valeurs du facteur de qualité Kr.

Tableau 5.2 : Dimensionnement du système PV avec un profil journalier du rayonnement solaire

<i>Facteur Kr</i>	<i>Puissance crête (kWc)</i>	<i>Capacité de la batterie (Ah)</i>	<i>Cout du système PV (k€)</i>
0.55	23.3	4000	118.4
0.60	21.3	4000	114.0
0.65	19.7	4000	110.4

#### **5.4. Analyse de la sensibilité du système**

Avant de procéder à l'analyse comparative des deux techniques de dimensionnement établies pour les deux profils de l'irradiation solaire (horaire et journalier), il est souhaitable de chercher la configuration optimale pour chacune des deux méthodes.

##### **5.4.1. Analyse de la sensibilité du système selon le profil horaire du rayonnement solaire.**

La figure 5.6 représente le cout de l'installation en fonction de la durée de pénurie admissible.

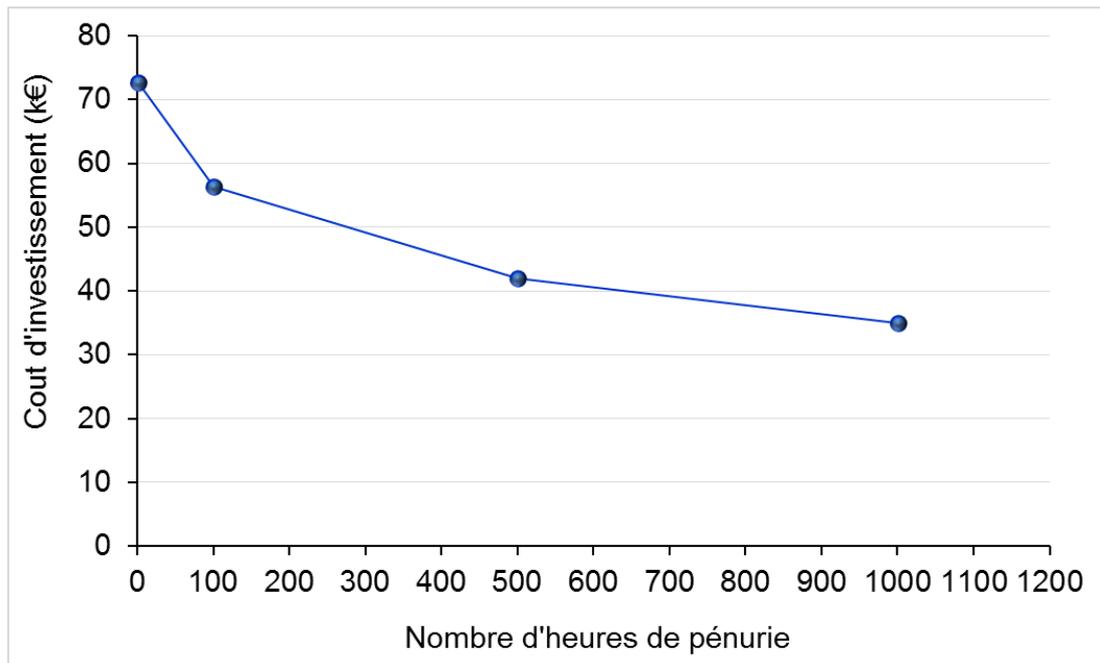


Fig.5.6 : Cout de l'installation Vs le nombre d'heures de pénurie

Le tableau 5.3 présente les dimensionnements optimaux, les couts  $C_T$  et les économies correspondants à différents niveaux de pénurie.

$\Delta C_T$  : représente l'économie réalisée (en valeur absolue) si on admet une certaine pénurie,

$\frac{\Delta C_T}{C_T}$  : L'économie en valeur relative.

Tableau 5.3 : Cout d'investissement et économies correspondant à quelques niveaux de pénurie.

pénurie $\alpha_e (h)$	$P_c (kWc)$	$C_b (Ah)$	$C_T (k€)$	$\Delta C_T$	$\frac{\Delta C_T}{C_T} \%$
1	15.4	2300	72.6	0,00	0,00
100	10.3	2000	56.3	16,30	22,45
500	9.9	1200	42.0	30,60	42,15
1000	8.3	1000	35.0	37,60	51,79

On peut constater (figure 5.6) que la pente de la courbe du cout augmente quand le nombre d'heures de pénurie diminue ; cette augmentation est brusque entre 0 et 100 heures de pénurie. Ceci est parfaitement illustré dans le tableau 5.4 ; on peut constater que le coût d'effacement de l'heure de pénurie augmente avec la diminution de la

durée de pénurie et qu'il croit brusquement quand on passe de 100 à 0 heures de pénurie.

Tableau 5.4 : Cout d'effacement de l'heure de pénurie.

<i>Intervalle de pénurie</i>	<i>Cout d'effacement de l'heure de pénurie ((k€/heure)</i>
0-100	0,16
100-500	0,04
500-1000	0,02

Sur le tableau 5.5 sont représentées les économies relatives et absolues correspondant à quelques niveaux de pénurie, en prenant comme référence le niveau  $\alpha_e = 100$  heures.

Le rapport  $\frac{\alpha_e}{\alpha_{e,100}}$  correspond au facteur d'accroissement (ou de diminution) de la

pénurie par rapport au niveau de référence : la pénurie de 100h.

On peut se rendre compte qu'autour de ce niveau de référence, un accroissement de l'investissement de 29% diminue la pénurie d'un facteur de 100 et qu'une diminution de 25% conduit à accroître la pénurie d'un facteur de 5.

Tableau 5.5 : Economies relatives et absolues correspondant à quelques niveaux de pénurie.

<i>pénurie <math>\alpha_e (h)</math></i>	<i><math>C_T (k€)</math></i>	<i><math>\Delta C_T</math></i>	<i><math>\frac{\Delta C_T}{C_T} \%</math></i>	<i><math>\frac{\alpha_e}{\alpha_{e,100}}</math></i>
1	72.6	16,30	28,95	1/100
100	56.3	0,00	0,00	1
500	42.0	-14,30	-25,40	5
1000	35.0	-21,30	-37,83	10

Le dimensionnement correspondant à ce niveau de pénurie pourrait servir de cas de référence réaliste pour le choix de la taille définitive de l'installation. En effet, 100h de pénurie pourraient être admises par certains utilisateurs, Elles correspondent à 16minutes de pénurie journalière.

### 5.4.2. Analyse de la sensibilité du système selon le profil journalier du rayonnement solaire.

La figure 5.7 représente le cout de l'installation en fonction du facteur de qualité  $K_r$

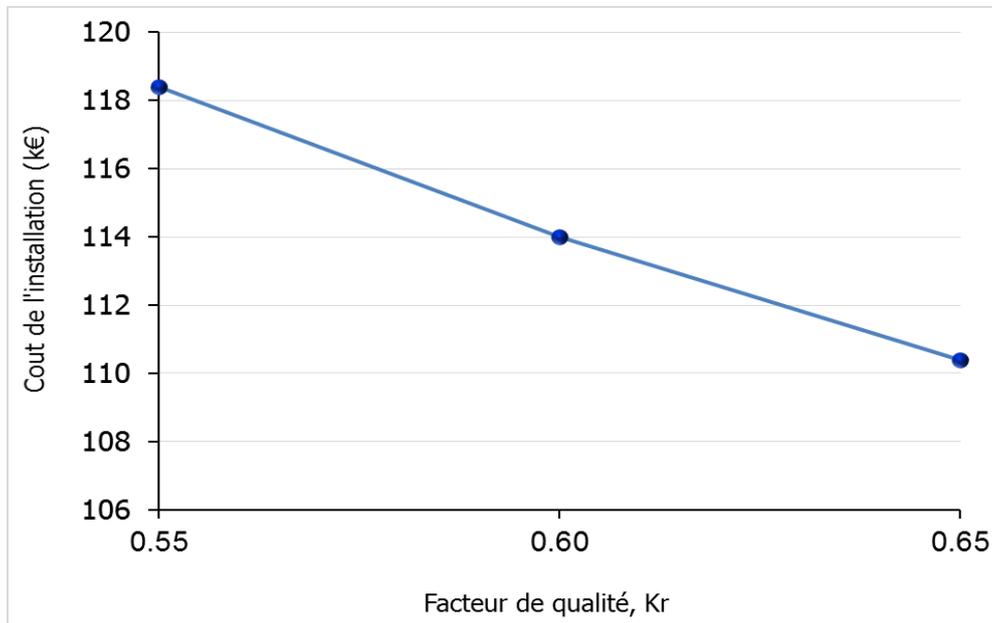


Fig.5.7 : Cout de l'installation Vs le facteur da qualité  $K_r$

On peut constater (figure 5.7) que la pente de la courbe du cout reste quasiment constante quel que soit la valeur de  $K_r$  ; traduisant une variation linéaire du cout d'investissement du système avec le facteur de  $K_r$ .

Le tableau 5.6 présente les dimensionnements, les couts  $C_T$  et les économies correspondants à différents valeurs de  $K_r$ . Le tableau 5.6 démontre clairement ce constat. En augmentant la valeur de  $K_r$ , les économies occasionnées deviennent plus importantes ; en passant de  $K_r = 0.6$  à 0.65, les économies doublent de chiffres.

Cela sous-entend que plus  $K_r$  augmente, plus les économies deviennent plus accentuées ; mais d'après l'étude faite par [66], que pour des  $K_r$  supérieurs à 0.65 ne signifie pas que le système est performant. On risque de concevoir un système en sous dimensionnement, c'est-à-dire que la demande énergétique ne peut être satisfaite à tout moment. Mais il semble qu'une valeur de  $K_r$  proche de 0,65 caractérise un système optimisé.

Tableau 5.6 : Coûts d'investissement et économies correspondant à quelques valeurs de Kr.

<i>Facteur Kr</i>	<i>PC (kWc)</i>	<i>Cb (Ah)</i>	<i>C<sub>T</sub> (k€)</i>	$\Delta C_T$	$\frac{\Delta C_T}{C_T} \%$
0.55	23.3	4000	118.4	0,0	0,00
0.60	21.3	4000	114.0	4,4	3,86
0.65	19.7	4000	110.4	8,0	7,25

En fin de compte l'analyse des performances du système PV se fera pour les deux architectures déterminées sur la base de deux profils (horaire et journalier) du rayonnement solaire.

Les deux configurations retenues sont présentées dans le tableau 5.7 :

Tableau 5.7 : Configurations de référence retenues

<i>Configuration</i>	<i>PC (kWc)</i>	<i>Cb (Ah)</i>	<i>CT (k€)</i>
Profil horaire du rayonnement solaire	10.3	2000	56.3
Profil journalier du rayonnement solaire	19.7	4000	110.4

### 5.5. Analyse des performances des deux systèmes PV de référence.

L'analyse des performances des systèmes photovoltaïques autonomes (SAS) n'est pas aussi simple que pour les systèmes PV connectés au réseau. Une mauvaise performance ne signifie pas que le système rencontre des problèmes techniques, mais peut aussi être la conséquence d'une mauvaise adéquation entre la production et la charge, un mauvais dimensionnement peut en être la source également.

Dans ce chapitre, nous allons essayer de voir à quel point le profil du rayonnement solaire peut affecter les performances des systèmes photovoltaïques.

En utilisant des indices de performances et certains coefficients indicateurs publiés dans IEA PVPQS Task2 [67] et [68], nous procéderons à la quantification des écarts en termes de performances entre les deux techniques de dimensionnement déjà décrites au début de ce chapitre.

Les indicateurs de performances généralement utilisés dans l'évaluation du fonctionnement d'un SAS (Stand Alone System) sont :

❖ **Le rendement du champ rapporté à l'énergie produite par le champ photovoltaïque,**

$$Y_a = EPV_{p,d} / P_0 \quad (kWh/kW_{p,d}) \quad (5.23)$$

❖ **Le rendement de référence rapporté à l'énergie reçue sur le plan des modules photovoltaïques,**

$$Y_r = \sum_1^{24} I_T / I_{T,STC} \quad (kWh/kW) \quad (5.24)$$

❖ **Le rendement final rapporté à l'énergie utilisée par le consommateur,**

$$Y_f = EPV_{u,d} / P_0 \quad (kWh/kW_{p,d}) \quad (5.25)$$

❖ **Les pertes de captation du rayonnement solaire par le champ PV**

$$L_C = Y_r - Y_a \quad (kWh/kW_{p,d}) \quad (5.26)$$

❖ **Les pertes du système occasionnées par les différents équipements composant le système PV.**

$$L_S = Y_a - Y_f \quad (kWh/kW_{p,d}) \quad (5.27)$$

❖ **Le Ratio de Performance**

$$PR = Y_f / Y_r \quad (5.28)$$

Où

$EPV_{p,d}$  : Energie électrique journalière produite par le champ photovoltaïque ;

$EPV_{u,d}$  : Energie électrique journalière produite par le champ photovoltaïque et utilisée par le consommateur ;

$I_T$  : Irradiation solaire globale horaire reçue sur le plan des modules PV ;

$I_{T,STC}$  : Irradiation solaire globale aux conditions standards (=1000W/m<sup>2</sup>).

Un SAS qui ne fonctionne pas correctement présentera un  $PR$  faible, mais inversement, une valeur de  $PR$  élevée ne signifie pas que le système fonctionne correctement. Pour avoir une idée de la manière dont le système utilise le potentiel d'énergie solaire, un nouveau facteur a été introduit. Il a été défini comme un ratio de la puissance photovoltaïque utilisée par la charge sur la puissance photovoltaïque produite par le champ photovoltaïque. Ce facteur est appelé  $UF$  ou facteur d'utilisation. Il traduit aussi la notion d'autoconsommation. Il est calculé par l'expression suivante :

$$UF = EPV_{u,d} / EPV_{p,d} \quad (5.29)$$

Plus ce facteur est élevé, en atteignant l'unité, plus le système présente de très faibles pertes énergétiques, donc des performances meilleures.

Si le facteur  $UF$  peut nous donner une idée sur le système dans son ensemble, il apparaît nécessaire de définir un autre facteur pour évaluer les performances du champ PV. C'est le facteur de production qui est le rapport entre deux indices de performance  $Y_a$  et  $Y_r$ .

$$PF = Y_a / Y_r \quad (5.30)$$

### 5.5.1. Variation du ratio de performance $PR$ en fonction du facteur d'utilisation $UF$

La figure 5.8 montre la corrélation de  $PR$  et de  $UF$  pour les deux cas de dimensionnement de référence (100h de pénurie et  $Kr = 0.65$ ).  $PR$  est plus ou moins une fonction linéaire de  $UF$ . Plus  $UF$  est élevé plus le système utilise son potentiel solaire. On remarque clairement que la courbe de tendance relative à la variation de  $PR$  pour le cas de 100h de pénurie (profil horaire du rayonnement solaire) présente un coefficient directeur plus important que celui du cas de  $Kr = 0.65$  (profil journalier du rayonnement solaire) ; ceci prouve que le dimensionnement établi sur la base d'un profil solaire horaire est plus ou moins cohérent.

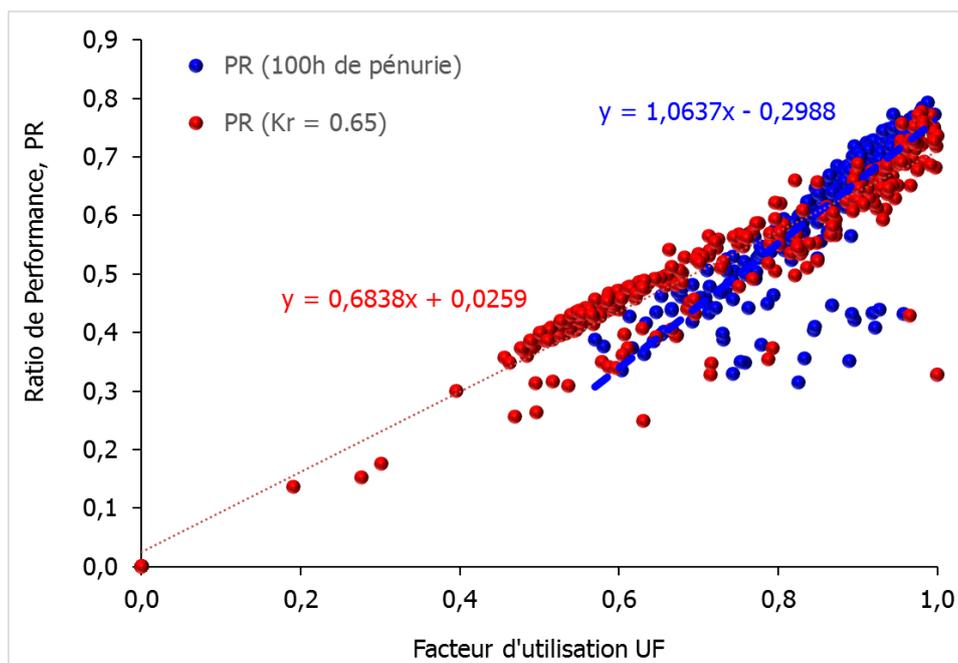


Figure 5.8 : Variation de  $PR$  en fonction de  $UF$

La figure 5.9 illustre les histogrammes du nombre d'occurrence dans des intervalles bien définis du PR, ainsi que les fréquences cumulées correspondantes. Nous constatons que plus de 68% du nombre d'occurrence enregistré pour le système de référence de 100h de pénurie se trouvent dans la gamme des PR comprises entre 0.6 et 0.8. Ce type de valeurs de PR nous renseigne sur le bon fonctionnement de la centrale PV.

Par contre pour le système de référence ( $K_r = 0.65$ ), 45% des valeurs de PR enregistrés se trouvent dans la gamme (0.4-0.5) du PR. Cela démontre que le système PV est surdimensionné occasionnant des surcoûts dans le capital d'investissement initial.

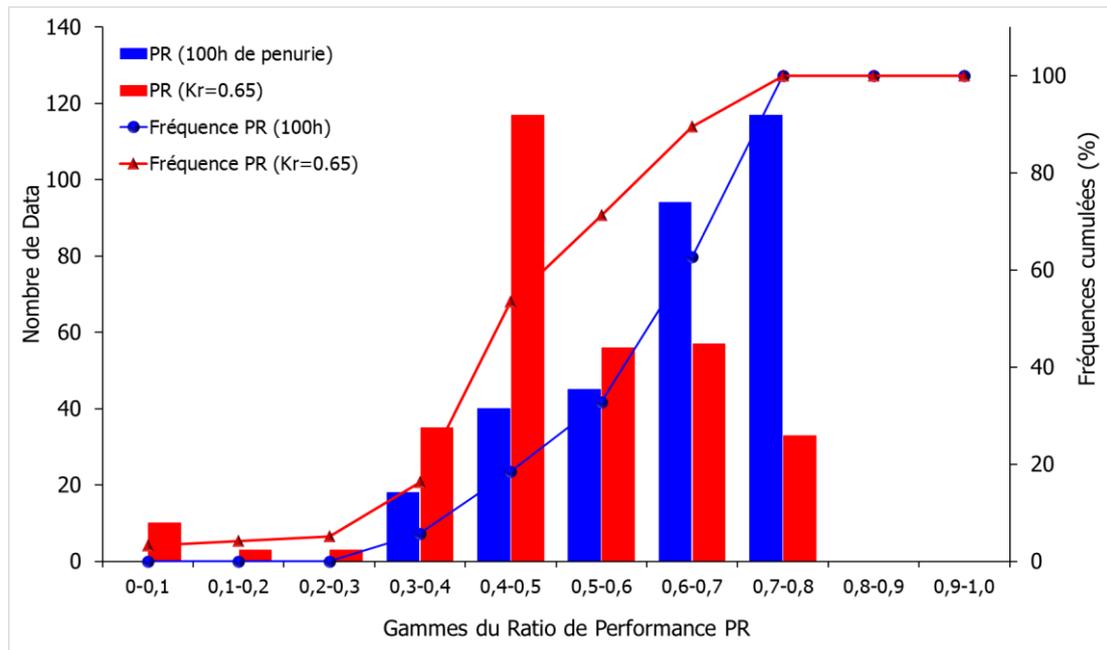


Figure 5.9 : Le nombre d'occurrence et les fréquences cumulées du ratio de performance PR.

### 5.5.2. Variation du ratio de performance PR en fonction du rayonnement solaire global

La courbe 5.10 démontre que le PR dépend nettement de la quantité d'énergie reçue sur le plan des modules photovoltaïques. Pour le cas de 100h de pénurie, plus l'irradiation solaire augmente plus le PR suit une courbe ascendante, alors que pour le cas de  $K_r = 0.65$ , on voit tout à fait le contraire, synonyme d'un surdimensionnement du système. En d'autres termes, La production photovoltaïque n'a pas été consommée en sa totalité ; une partie non négligeable est restée inutilisable.

Cela démontre aussi que le système PV pour le cas de référence de 100h de pénurie, utilise d'une manière efficace son potentiel d'énergie solaire.

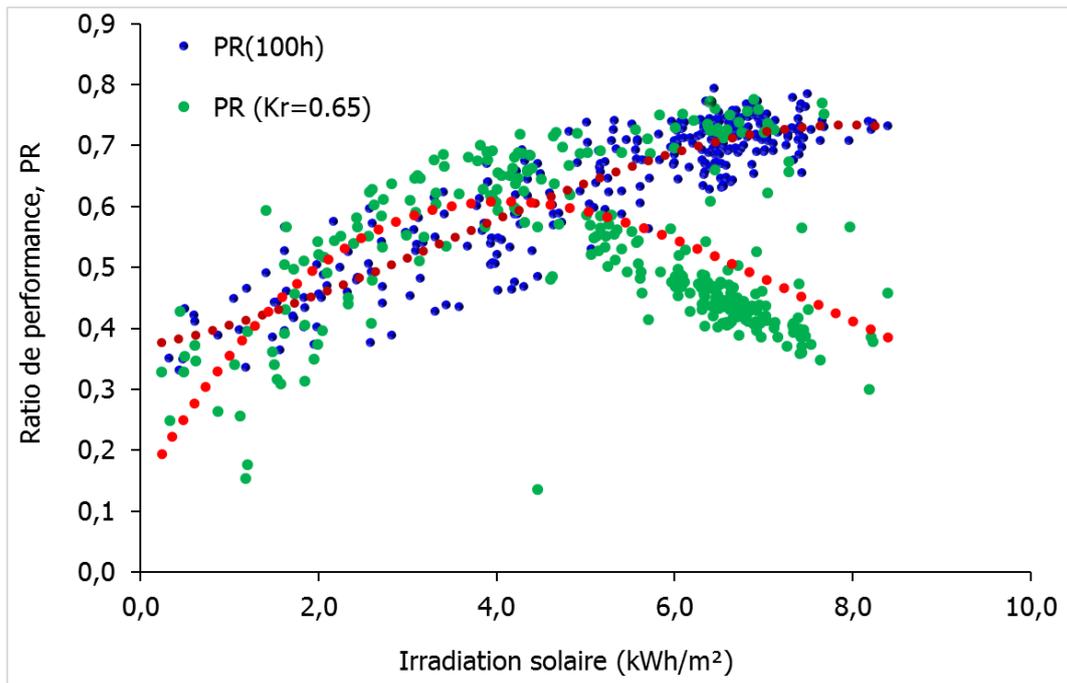


Figure 5.10 : Variation du ratio de performance PR en fonction de l'irradiation solaire

### 5.5.3. Calcul des écarts de performances

Pour bien illustrer l'impact des deux profils du rayonnement solaire sur les performances des systèmes photovoltaïques, nous avons préféré de quantifier cette influence par l'établissement des écarts entre les performances du système PV des deux techniques de dimensionnement.

#### 5.5.3.1. Ecart des rendements du système PR/PF

La figure 5.11 montre les écarts des rendements du système pour chaque mois de l'année. On observe sur l'ensemble des mois de l'année des écarts positifs et significatifs, à l'exception de l'écart enregistré en mois de Février mais qui reste toutefois relativement faible. On note également qu'un pic d'écart est atteint au mois d'Aout et qui s'évalue pratiquement à 35%, une valeur qui est loin d'être négligeable. Pour les autres mois les écarts varient entre 12% et 22% environ.

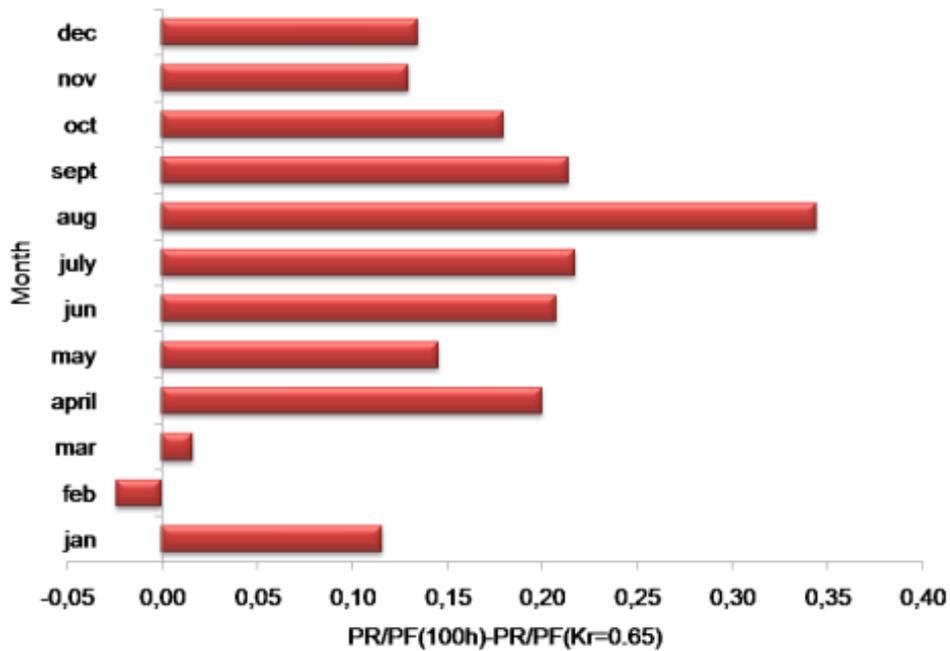


Figure 5.11 : Evolution des écarts des rendements du système PR/PF

### 5.5.3.2. Ecart des pertes du système Ls

Même constat s'observe dans la figure 5.12 qui affiche les écarts entre les pertes du système occasionnées par les deux systèmes de références (Cas de 100h de pénurie et cas de Kr=0.65). Le pic (négatif) est atteint en mois d'Aout et qui s'évalue à pratiquement 02h équivalentes d'énergie maximale produite par le système.

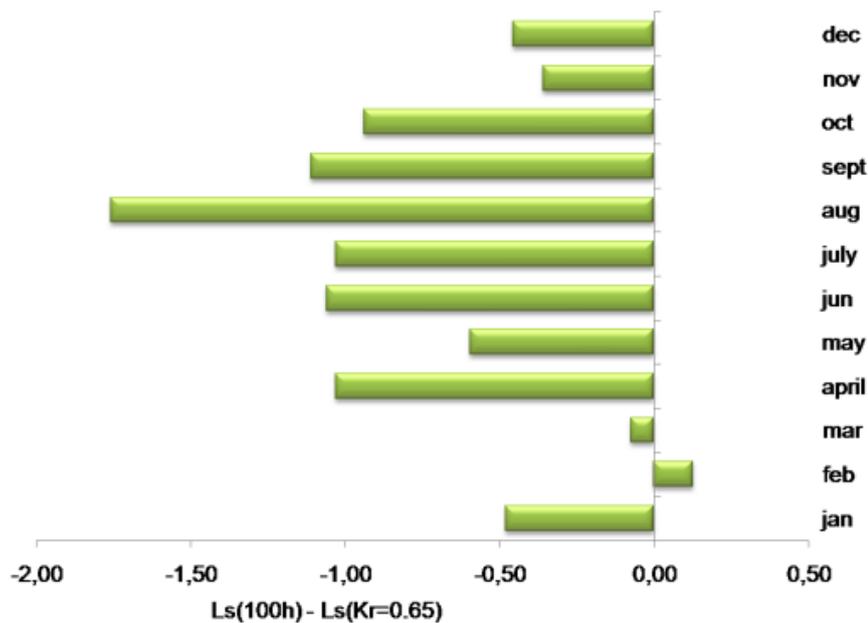


Figure 5.12 : Les écarts des Pertes du système Ls

Il est clair que ces écarts se traduisent par un gain en énergie produite par le système PV et utilisée par la suite par le consommateur.

## **5.6. Conclusion**

Cette partie de notre travail consiste à mettre en exergue l'impact du profil du rayonnement solaire dans le dimensionnement et même dans la simulation des systèmes énergétiques notamment les systèmes photovoltaïques.

Le profil le plus utilisé dans le dimensionnement des systèmes photovoltaïques est le profil du rayonnement solaire journalier, mais il s'avère que les installations faites sont souvent surdimensionnées engendrant des surcoûts significatifs.

Pour pallier à cette problématique, nous avons établi une analyse conceptuelle comparative de deux techniques de dimensionnement basées sur des profils de rayonnement solaire différents. Nous avons établi dans notre cas deux techniques de dimensionnement basées sur deux profils de rayonnement solaire, l'un à pas horaire et l'autre basé sur un modèle journalier.

Les résultats de dimensionnement ont été établis et interprétés d'une manière détaillée, suivis d'une analyse comparative des performances des systèmes photovoltaïques étudiés.

La première technique de dimensionnement utilisant le modèle du rayonnement solaire horaire, est basée sur la comptabilisation du nombre d'heures de pénurie déterminés sur une période d'une année. Les résultats de dimensionnement ont démontré que la sensibilité du système pour 100 heures de pénurie est la plus importante présentant un coût d'investissement initial le plus faible.

De même pour la technique de dimensionnement utilisant le profil journalier du rayonnement solaire est basée sur l'établissement d'un facteur de qualité noté  $K_r$ . A cet effet, nous avons pris trois valeurs de ce facteur à savoir  $K_r = 0.55$ ,  $0.60$  et  $0.65$ . Les résultats de dimensionnement pour cette technique ont révélé que pour  $K_r = 0.65$ , la sensibilité du système est meilleure.

La simulation du système PV établie pour les deux dimensionnements, a démontré que le dimensionnement fait sur la base du modèle horaire du rayonnement solaire présente de meilleures performances. Le ratio de performance PR pour 100h de

pénurie (profil horaire du rayonnement solaire) évolue d'une manière cohérente avec l'utilisation du potentiel énergétique solaire. Le rendement du système pour 100h de pénurie est nettement plus élevé par rapport à celui du profil journalier ( $K_r = 0.65$ ).

En général, la technique de dimensionnement basée sur le profil horaire du rayonnement solaire est la plus cohérente présentant un faible cout d'investissement initial et un minimum d'énergie produite par le champ photovoltaïque non utilisée par le consommateur.

Compte tenu de tout cela, la modélisation du rayonnement solaire à l'échelle horaire et même à l'échelle de la minute s'avère incontournable pour l'évaluation des systèmes énergétiques solaires.

## CONCLUSION GENERALE

Les données radiométriques mesurées en Algérie, notamment celles relatives au gisement solaire, telles que la composante diffuse du rayonnement solaire global, ne sont disponibles que pour quelques sites. Cependant, la conception d'un système photovoltaïque ou thermique dans une région où le rayonnement solaire diffus n'est pas mesuré, nécessite l'utilisation de modèles d'estimation de cette composante diffuse à partir d'autres paramètres mesurés, tels que le rayonnement global, la durée d'ensoleillement, l'indice de clarté, la température, la turbidité et la hauteur du soleil.

La plupart des travaux présentés dans la littérature scientifique dans ce domaine, établissent des corrélations de la fraction diffuse du rayonnement solaire global en fonction de l'indice de clarté  $K_t$  pris comme principal prédicteur dans la modélisation de la fraction diffuse. La hauteur du soleil est également considérée comme un prédicteur non négligeable dans l'estimation du rayonnement solaire diffus, comme le suggèrent Iqbal [8], Garrisson [10] et, en particulier, Reindl [12] et De Miguel [14]. De plus, les auteurs cités ci-dessus n'ont proposé aucune modélisation mathématique, à l'exception de Reindl [12] qui a introduit sommairement l'effet de la hauteur du soleil dans son modèle linéaire type Liu–Jordan.

La procédure d'analyse qualitative et quantitative présentée dans cette étude a été subdivisée en plusieurs phases. Dans une première phase, une quantification de la fréquence d'occurrence de l'état du ciel (clair et nuageux) a été effectuée en fonction de l'indice de clarté sur une période de 10 ans. Cette étape a été examinée à l'aide des histogrammes et des fréquences cumulées tracés pour différentes plages de la hauteur du soleil à savoir : les plages ( $0-08^\circ$ ), ( $8^\circ-18^\circ$ ), ( $18^\circ-30^\circ$ ), ( $30^\circ-45^\circ$ ), ( $45^\circ-60^\circ$ ) et des hauteurs du soleil  $> 60^\circ$ . Cette partie de l'étude a révélé que, pour  $K_t < 0,6$ , lorsque le ciel est couvert ou partiellement recouvert, la quantité de rayonnement diffus augmente pour les hauteurs du soleil  $< 30^\circ$ , tandis que pour les hauteurs du soleil  $> 30^\circ$ , la clarté du ciel devient dominante.

Dans une seconde phase, en traçant l'évolution de l'indice du diffus  $K_s$  en fonction de l'indice de clarté  $K_t$  à différentes plages de la hauteur du soleil et pour différentes

saisons de l'année décrites précédemment, plusieurs éléments ont été observés. Dans la gamme de  $k_t < 0,3$ , où le ciel est complètement couvert, la hauteur du soleil n'a aucun effet sur la composante diffuse et l'indice du diffus  $K_s$  augmente linéairement avec l'indice de clarté  $K_t$ . Pour  $K_t > 0,3$ , l'indice du diffus  $K_s$  est fortement affecté par la hauteur du soleil en termes de magnitude et de forme des courbes.

Cette approche méthodologique a été appliquée sur deux stations sélectionnées situées sur le territoire algérien. Les sites considérés ont été choisis pour représenter deux conditions climatiques différentes : le site d'Oran ( $35,7^\circ\text{N}$ ) dans la zone côtière nord et le site de Tamanrasset ( $21,8^\circ\text{N}$ ) dans la zone désertique sud.

Les résultats de l'analyse qualitative de l'évolution de la composante diffuse du rayonnement solaire global ont permis de développer des corrélations mathématiques entre l'indice du diffus  $K_s$  et l'indice de clarté  $K_t$  à des niveaux différents de la hauteur du soleil et pour les saisons d'hiver, d'été ainsi que pour la période de l'année complète.

Une étude comparative entre le modèle proposé (All season) et quatre modèles apparaissant dans la littérature a été réalisée. Dans une première phase, l'évaluation de l'impact de la saison sur la qualité et la précision des corrélations établies a été traitée à l'aide de paramètres ou d'indicateurs statistiques, à savoir : MBE, RMSE et le test t-stat. Il a été constaté que les corrélations estimées pour la période de l'année complète (All season), enregistrent le taux le plus bas, en termes d'indicateurs statistiques, et donc une meilleure performance par rapport à ceux affichés pour les saisons d'hiver et d'été.

De plus, les valeurs de t-stat observées pour la période de l'année complète sont toutes inférieures à la valeur critique  $t_c$ , qui est 2,9 selon les tables statistiques. Le modèle établi pour l'année entière (All season), a également été pris comme modèle de référence pour une validation et une évaluation comparative avec les résultats des travaux de la littérature scientifique.

Une autre étude comparative est réalisée entre le modèle de référence, établi pour la période de l'année complète, et d'autres travaux établis sur cette même thématique et choisis, d'une part, pour leur citation assez importante et, d'autre part, pour la forme et structure de leurs modèles. Le modèle de référence offre de très bonnes performances par rapport aux modèles choisis dans cette étude.

Le modèle proposé apporte une amélioration très significative avec des valeurs de  $t$ -stat bien inférieures à la valeur critique  $t_c$ .

La présente étude révèle que la composante diffuse du rayonnement solaire horizontal global, en plus de sa dépendance aux conditions du ciel (couvert ou nuageux), est considérablement affectée par la hauteur du soleil. L'introduction de la hauteur du soleil dans l'établissement de la corrélation de la composante diffuse a permis d'améliorer la précision du modèle comparé à d'autres modèles qui ne prenaient en compte que l'indice de clarté comme variable unique et indépendante. L'établissement de cette approche méthodologique d'estimation de la composante diffuse solaire peut être utilisé par la réduction de l'erreur standard pour le calcul précis du rayonnement solaire sur un plan incliné.

Pour mettre en évidence l'intérêt d'une telle modélisation de l'irradiation solaire diffuse horaire dans les études des systèmes énergétiques solaires, nous avons appliqué les modèles de l'irradiation diffuse établis dans cette étude pour une analyse conceptuelle des systèmes photovoltaïques (dimensionnement et étude des performances).

A cet effet, Une étude comparative entre deux techniques de dimensionnement des systèmes PV, basées sur deux modèles du rayonnement solaires, à savoir, le modèle du rayonnement solaire horaire (objet de ce travail) et le modèle du rayonnement solaire journalier. La simulation du système PV établie pour les deux dimensionnements, a démontré que le dimensionnement fait sur la base du modèle horaire du rayonnement solaire présente de meilleures performances. Le rendement du système PV estimé suite à l'utilisation de ce modèle solaire horaire évolue d'une manière cohérente avec l'utilisation du potentiel énergétique solaire.

Cela nous emmène à conclure que la modélisation du rayonnement solaire à l'échelle horaire et même à l'échelle de la minute s'avère incontournable pour l'évaluation des systèmes énergétiques solaires.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] A. K. Angstr6m, Solar and atmospheric radiation. Q.J.R.M.S. 20, 121-126 (1924).
- [2] G. O. G. Liar, J.A. Duffie and C.O. Smith, World distribution of solar radiation. Report No.21, Engineering Experiment Station, Madison (1966).
- [3] B.Y.H Liu, R.C. Jordan. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. Solar Energy. 4 (1960) 1–19.
- [4] N. K. O. Choudhury. Solar radiation at New Delhi. Solar Energy 7 (2) (1963) 44-52.
- [5] G. Stanhill, Diffuse sky and cloud radiation in Israel: Solar Energy 10 (2) (1966) 96-101.
- [6] D. W. Ruth and R. E. Chant, The relationship of diffuse radiation to total radiation in Canada. Solar Energy 15 (2) (1976) 153-154.
- [7] R.O. Buckius and R. King, Diffuse solar radiation on a horizontal surface for a clear sky. Solar energy 21 (6) (1978) 503-509.
- [8] J.K. Page, The estimation of monthly mean values of daily total short-wave radiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitudes 40°N-40°S. Proc. UN Conf. on New Sources of Energy, Paper No. S/98. (1961).
- [9] S. A. Klein and J. A. Duffie, Estimation of monthly average diffuse radiation. Presented at the National Solar Energy Conference. (1978)
- [10] M. Iqbal, Estimation of the monthly average of the diffuse component of total insolation on a horizontal surface. Solar Energy 20 (1) (1978) 101-105.
- [11] M. Iqbal. Correlations of average diffuse and beam radiation with hours of bright sunshine. Solar Energy 23 (2) (1979) 169-173.
- [12] Erbs. D.G, S.A. Klein and J.A. Duffie. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly average global radiation. Solar Energy 28 (1982) 293–302.
- [13] J.F Orgill and K.G.T. Hollands. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. Solar Energy 19 (1977) 357–59.
- [14] M. Iqbal, Prediction of hourly diffuse solar radiation from measured hourly global radiation on a horizontal surface. Solar Energy 24 (1980) 491-503.
- [15] A. Skartveit, and J. A. Olseth. A model for the diffuse fraction of hourly global radiation. Solar Energy 38 (1987) 271–4.
- [16] J. D. Garrison. A study of the division of global irradiance into direct and diffuse irradiance at thirty-three U.S. sites. Solar Energy 35, (1985) 341-351,
- [17] Reindl D.T, W.A. Beckman and J.A. Duffie. Diffuse fraction correlations. Solar Energy 45 (1990) 1–7.
- [18] A. Skartveit and J.A. Olseth. An hourly diffuse fraction model with correction for variability and surface albedo. Solar Energy, 63(3) (1998) 173–183,
- [19] E. L. Maxwell. A quasi-physical model for converting hourly global horizontal to direct normal insolation. Report SERI/TR-215-3087, Solar Energy Institute, Golden, CO, (1987).
- [20] R. Perez, R. Seals, A. Zelenka and P. Ineichen. Climatic evaluation of models that predict hourly direct irradiance from hourly global irradiance: prospects for performance improvements. Solar Energy 44 (1990) 99–108.
- [21] J.A. Gonzalez and J. Calbo. Influence of the global radiation variability on the hourly diffuse fraction correlations. Solar Energy, 65 (1999) 119–131.
- [22] Ch. Marty. Surface radiation, cloud forcing and greenhouse effect in the Alps. PhD thesis, Swiss Federal Institut of Technology Zurich, (2000).

- [23] J. L. Boland Scott and M. Luther. Modeling the diffuse fraction of global solar radiation on a horizontal surface. *Environmetrics* 12 (2001) 103–16.
- [24] A. De Miguel., J. Bilbao, R. Aguiar, H. Kambezidis and E. Negro. Diffuse solar irradiation model evaluation in the north Mediterranean belt area. *Solar Energy* 70 (2001) 143–53.
- [25] J. Soares, A.P. Oliveira, M.Z. Boznar, P. Mlakar, J.F. scobedo, A.J. Machado. Modeling hourly diffuse solar radiation in the city of Sao Paulo using a neural-network technique. *Applied Energy* 79 (2004). 201–14 doi:10.1016/j.apenergy.2003.11.004
- [26] T. Munneer and S.Munawwar. Potential for improvement in estimation of solar diffuse irradiance. *Energy Convers Manage* 47 (2006) 68–86. doi:10.1016/j.enconman.2005.03.015
- [27] J.Boland. B. Ridley and B. Brown. Models of diffuse solar radiation. *Renewable Energy* 33 (2008) 575-84. doi:10.1016/j.renene.2007.04.012
- [28] B.Ridley, J. Boland and P. Lauret. Modeling of diffuse solar fraction with multiple predictors. *Renewable Energy* 35 (2010) 478-83 doi:10.1016/j.renene.2009.07.018
- [29] N. Helbig. Application of the radiosity approach to the radiation balance in complex terrain. PhD thesis, University Zurich, (2009).
- [30] G. Notton., C. Cristofari, M.Muselli and P. Poggi. Calculation on an hourly basis of solar diffuse irradiances from global data for horizontal surfaces in Ajaccio. *Energy Conversion and Management* 45 (2004) 2849–66. doi:10.1016/j.enconman.2004.01.003
- [31] C.A. Gueymard. Importance of atmospheric turbidity and associated uncertainties in solar radiation and luminous efficacy modelling. *Energy* 30 (2005) 1603-21 doi:10.1016/j.energy.2004.04.040.
- [32] C.P. Jacovides, F.S. Tymvios, V.D. Assimakopoulos and N.A. Kalsounides. Comparative study of various correlations in estimating hourly diffuse fraction of global solar radiation. *Renewable Energy* 31 (2006) 2492-2504. doi:10.1016/j.renene.2005.11.009.
- [33] R. Posadillo, R. López Luque. Hourly distributions of the diffuse fraction of global solar irradiation in Córdoba (Spain) *Energy Conversion and Management* 50 (2009) 223–231 doi:10.1016/j.enconman.2008.09.042
- [34] C. Magarreiro, M.C.Brito and P.M.M. Soares. Assesment of diffuse radiation models for cloudy atmospheric conditions in Azores region. *Solar Energy* 108(2014) 538-47. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2014.08.003>.
- [35] Iqbal M. 1983. *An Introduction to Solar Radiation*. Academic Press: New York; 59–67.
- [36] Li DHW, Lau CCS, Lam JC. Overcast sky conditions and luminance distribution in Hong Kong. *Building and Environment* 2004, 39: 101–108.
- [37] Hawas M, Muneer T. 1984. Study of diffuse and global radiation characteristics in India. *Energy Conversion and Management* 24 : 143.
- [38] Saunier GY, Reddy TA, Kumar S. 1987. On the monthly probability distribution function of daily global irradiation, values appropriate for both tropical and temperate locations. *Solar Energy* 38: 169–177.
- [39] Ideriah FJK, Suleman SO. 1989. Sky conditions at Ibadan during 1975–1980. *Solar Energy* 43(6): 325–330.
- [40] Kuye A, Jagtap SS. 1992. Analysis of solar radiation data for Port Harcourt, Nigeria. *Solar Energy* 49(2): 139–145.
- [41] M.N.A. Hawlader. Diffuse, global and extraterrestrial solar radiation for Singapore. *International Journal of Ambient Energy* 5 (1984) 31–38.
- [42] Claywell R, Muneer T, Asif M. An efficient method for assessing the quality of large solar irradiance datasets. *J Sol Energy Eng* 2005; 127:150–2.
- [43] Duffie, J.A., Beckman, W.A.: 'Solar engineering of thermal processes'; John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2013.

- [44] R. Bruno, A correction procedure for separating direct and diffuse insolation on a horizontal surface, *Solar Energy* 20, 97 (1978).
- [45] H. Suehrcke and P. G. McCormick, The diffuse fraction of instantaneous solar radiation, *Solar Energy* 40, 423 (1988).
- [46] Karim, Z. 'La pollution urbaine dans la wilaya d'Oran'. Magister thesis, Faculté des Sciences, Département de physique, Université d'Oran, 2008.
- [47] M.A.C. Chendo and A.A.L. Maduekwe. Hourly global and diffuse radiation of Lagos, Nigeria-correlation with some atmospheric parameters. *Solar Energy* 52 (1994) 247-51.
- [48] R.J. Stone. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. *Solar Energy* 51 (1993) 289-91
- [49] K. Orehounig, S.Dervishi, A. Mahdavi. Computational derivation of irradiance on building surfaces: An empirically based model comparison. *Renewable Energy* 71 (2014) 185-92 <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.015>
- [50] S. Dervishi and A. Mahdavi. Computing diffuse fraction of global horizontal solar radiation: A model comparison. *Solar Energy* 86 (2012) 1796-1802. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2012.03.008>
- [51] H.K. Elminir. Experimental and theoretical investigation of diffuse solar radiation: Data and models quality tested for Egyptian sites. *Energy* 32 (2007) 73-82. doi:10.1016/j.energy.2006.01.020.
- [52] Aras H, Balli O, Hepbasli A. Estimating the horizontal diffuse solar radiation over the Central Anatolia Region of Turkey. *Energy Convers Manage* 2006; 47:2240–9.
- [53] Ulgen K, Hepbasli A. Diffuse solar radiation estimation models for Turkey's big cities. *Energy Convers Manage* 2009; 50:149–56.
- [54] Jiang Y. Estimation of monthly mean daily diffuse radiation in China. *Applied Energy* 2009; 86:1458–64.
- [55] Tarhan S, Sari A. Model selection for global and diffuse radiation over the Central Black Sea (CBS) region of Turkey. *Energy Convers Manage* 2005; 46:605–13.
- [56] Helwa N, Bahgat A, El Shafee A, El Shenawy E. Computation of the solar energy captured by different solar tracking systems. *Energy Sources* 2000; 22:35–44.
- [57] El-Sebaili A, Al-Hazmi F, Al-Ghamdi A, Yaghmour SJ. Global, direct and diffuse solar radiation on horizontal and tilted surfaces in Jeddah, Saudi Arabia. *Applied Energy* 2010; 87:568–76.
- [58] Liu BY, Jordan RC. The long-term average performance of flat-plate solar energy collectors: with design data for the US, its outlying possessions and Canada. *Sol Energy* 1963; 7:53–74.
- [59] Janjai S, Pankaew P, Laksanaboonsong J. A model for calculating hourly global solar radiation from satellite data in the tropics. *Applied Energy* 2009; 86:1450–7.
- [60] Iqbal M. A study of Canadian diffuse and total solar radiation data—II monthly average hourly horizontal radiation. *Sol Energy* 1979; 22:87–90.
- [61] Sen Z. Simple nonlinear solar irradiation estimation model. *Renewable Energy* 2007; 32:342–50.
- [62] Liu B, Jordan R. The interrelationship and catechistic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Sol Energy* 1979; 22:87–90.
- [63] Chegaar M, Chibani A. Global solar radiation estimation in Algeria. *Energy Convers Manage* 2001; 42:967–73.
- [64] Bulut H, Büyükalaca O. Simple model for the generation of daily global solar radiation data in Turkey. *Appl Energy* 2007; 84:477–91.
- [65] M.Chikh « Etude analytique et conceptuelle des systèmes PV de puissance en Algérie» Thèse de Magister CDER 1994.

- [66] Madjid Chikh, Achour Mahrane & Ahmed Chikouche. A proposal for simulation and performance evaluation of standalone PV systems; 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 1-5 September 2008, Valencia, Spain; 3579-3584.
- [67] Analysis of photovoltaic systems", Report IEA- PVPS T2-01: 2000.
- [68] Operational Performance, Reliability and Promotion of Photovoltaic Systems" Report IEA-PVPS T2-03: 2002.