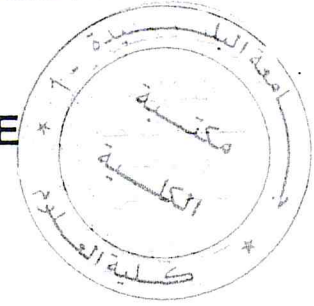


UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

Master

En Energies Renouvelables

Thème

**Modélisation du Gisement solaire pour
les Sites d'Oran-Sénia et Tlemcen**

Par : BOUAZZA FEKKAK

FAROUK HANNANE
DJILALI KHANE
MADJID CHICK
MUSTAPHA MERZOUK

Pr
MCB
CR
Pr

Président
Examineur
Examineur
Rapporteur

MA-530-44-1

Année Universitaire 2013/2014

RÉSUMÉ

Après traitement des données brutes (toutes les 60 minutes) fournies par les stations radiométriques de l'ONM, des modèles d'estimation des différentes composantes des irradiations solaires ont été établies pour les sites d'Oran-Senia et Tlemcen.

Les modèles ont été établies aussi bien en fonction de la fraction d'insolation que de l'indice de clarté pour chaque mois. Comme suggéré par la littérature, les ajustements ont été faits en utilisant des formes

Polynomiales d'ordres 1 à 3.

En utilisant le coefficient de corrélation comme indicateur de validation des ajustements on montre que les modèles polynomiaux d'ordre 3 sont plus précis, cependant les modèles cubiques en fonction de la fraction d'insolation ont l'inconvénient de présenter des ondulations peu compatibles avec la physique. Par ailleurs, les éclaircissements générés par les modèles de Capderou et R.Sun ont été comparées aux données mesurées sur les 2 sites. La comparaison montre que le modèle de Capderou surestime les valeurs recherchées.

ABSTRACT

After processing the raw data (every 60 minutes) provided by radiometric stations ONM, models estimating the different components of solar radiation have been established for the Oran-Senia and Tlemcen sites.

The models also have been established both in terms of the insolation fraction and the clearness index for each month. As suggested by the literature, adjustments were made, using the 1rd to the 3rd order polynomial

By using the correlation coefficient as a validation indicator of adjustments, shows that the 3rd order polynomial models are more accurate, however, the cubic models in terms of the insolation fraction have the disadvantage to present undulations low compatible with the physics.

Furthermore, the illuminances of the models generated by Capderou and R.Sun were compared to the measured data on the two locations. The comparison shows that the Capderou model overestimates search values.

المُلخَص

بعد معالجة البيانات الخام (كل 60 دقيقة) التي تقدمها محطات الإشعاع لمكتب الأرصاد الجوية الوطنية، تم إنشاء نماذج مختلفة للإشعاع الشمسي. بين موقعين : موقع وهران- السينيا- وموقع تلمسان. وقد تم اقتراح النماذج بدلالة جزء الإشعاع و مؤشر الوضوح خلال كل شهر ،

و قدمت التعديلات باستخدام الأشكال متعددة الحدود 1 إلى 3 .

باستخدام معامل الارتباط كقياس للتحقق من التعديلات ، يظهر أن النماذج الثلاثية الحد هي الأكثر دقة، ومع ذلك، فإن النماذج المكعبة بدلالة جزء الإشعاع لديها سلبيات في اظهار التموجات في المنحنيات المتوافقة قليلا مع الفيزياء.

وعلاوة على ذلك، تمت مقارنة الإضاءة بين النماذج التي اقترحها Capderou و R.Sun والبيانات المقاسة على موقعين. تظهر المقارنة أن نموذج Capderou بالغ في قيم البحث.

Remerciements

Avant tout , je tiens à remercier mon directeur de thèse Monsieur M.MERZOUK , Professeur à l'université de Blida pour avoir assuré l'encadrement de ce travail , et pour ses suggestions pertinentes ,ses conseils et commentaires pratiques, qui ont été fondamentaux pour mener à bon terme ce mémoire.

Mes chaleureux remerciements à Monsieur F. HANNANE, Professeur à l'université de Blida, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider mon jury de thèse

Je tiens aussi à remercier Monsieur M.CHIKH, directeur de recherche à l'UDES et professeur N.SAID, pour leurs aides et encouragements.

J'adresse tout mes remerciements au Professeur A. MEFTI et à Monsieur M. FARHAT, professeur à l'université de Mostaganem ainsi qu'à Monsieur P.SIMONNEAUD, expert auprès de la firme Kipp & Zonen, pour m'avoir fourni des documents servant à l'enrichissement de ce travail.

Mes remerciements aux personnels de l'académie allemande des énergies renouvelables RENAC, spécialement Madame Katrin Backhaus de m'avoir fait profiter de leur plateforme en ligne, de leurs matériels et surtout de leurs connaissances scientifiques.

TABLE DES MATIÈRES



| | |
|---|----|
| INTRODUCTON GENERALE | 1 |
| CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE | 3 |
| I.1 : Introduction | 4 |
| I.2 : Définitions et concepts | 5 |
| I.2.1 : Position géométrique du soleil | 5 |
| I.2.2 : Paramètres géographiques | 5 |
| I.2.3 : Paramètres astronomiques | 6 |
| I.2.3.1 : Coordonnées équatoriales | 6 |
| I.2.3.1.1: Déclinaison du soleil | 6 |
| I.2.3.1.2: Temps Solaire Vrai | 7 |
| I.2.3.2: Coordonnées horizontales | 7 |
| I.2.3.2.1: L'angle horaire | 8 |
| I.2.3.2.2: Hauteur du soleil | 8 |
| I.2.3.2.3: Angle horaire aux lever et coucher du soleil | 8 |
| I.2.3.2.4: Azimut du soleil | 9 |
| I.2.3.2.5: Angle zénithal | 9 |
| I.2.4: La constante solaire | 9 |
| I.2.4.1 : Correction due à la variation de la distance Terre – Soleil | 9 |
| I.2.5 : Irradiation solaire hors atmosphère | 10 |
| I.2.6 : Atténuation du rayonnement solaire | 10 |
| I.2.6.1 : Masse d'air Optique | 11 |
| I.2.6.2 : Les aérosols | 12 |
| I.2.6.3 : Influence des nuages sur les éclaircements | 13 |
| I.2.6.4 : Notion de nébulosité | 13 |
| I.2.6.5 : Trouble d'Angstrom | 13 |
| I.2.6.6 : Facteur de trouble de Linke | 14 |
| I.2.6.6.1 : Trouble total de Linke | 14 |

| | |
|--|----|
| I.2.6.7 : Notion sur l'indice de Clarté | 15 |
| I.6.8 : Fraction d'insolation | 15 |
| a) Durée d'insolation | |
| b) Mesure de la durée d'insolation (l'Héliographe) | |
| I.2.7 : Les composantes solaires | 16 |
| I.2.7.1 : Le direct : I_b | 16 |
| I.2.7.2 : Le diffus : I_d | 17 |
| I.2.7.3 : Le global : I_g | 17 |
| I.2.8 : Mesure du rayonnement solaire au sol | 17 |
| I.2.8.1 : Mesure du rayonnement direct (Le Pyrhéliomètre) | 17 |
| I.2.8.2 : Mesure du rayonnement diffus et global (Le Pyranomètre) | 18 |
| I-3 : Présentation des principaux modèles | 19 |
| I.3.1 : Corrélations de Black et Angström | 19 |
| I.3.1.1 : Formule de Black | 19 |
| I.3.1.2 : Formule d'Angstrom | 20 |
| I.3.2 : Estimation du rayonnement solaire par ciel clair | 20 |
| I.3.2.1 : Estimation de l'éclairement solaire par ciel clair | 20 |
| 1 : Modèle de Hottel et Liu Jordan 1976 | 20 |
| 2 : Modèle Semi Empirique de Perrin de Brichambaut | 21 |
| 3 : Modèle de Capderou 1987 | 21 |
| 4 : Modèle de R.Sun | 23 |
| I.3.2.2 : Estimation de l'irradiation solaire par ciel clair | 24 |
| 1 : Modèle de Bernard, Menguy et Schwartz | 24 |
| 2 : Modèle Perrin de Brichambaut | 24 |
| I.3.3: Estimation du rayonnement solaire par ciel variable | 24 |
| I.3.3.1 : Les Modèles météorologiques | 25 |
| I.3.3.1.1 : Estimation de la moyenne mensuelle par jour de l'irradiation globale | 25 |
| 1 : Modèle de Coppolino 1989 | 25 |
| 2 : Modèle de Hussain 1982 | 25 |
| I.3.3.1.2:Estimation de l'Irradiation globales mensuelle : Modèle de SivKov 1964 | 25 |

| | |
|--|----|
| I.3.4 : Modèles du type Black-Angström (en fonction de la fraction d'insolation) | 26 |
| I.3.4.1 : modèles linéaires | 26 |
| 1 : Modèle de Glover et McCulloch 1958 | 26 |
| 2 : Modèle de Rietveld 1978 | 26 |
| 3 : Modèle de Bahel et al 1986 | 27 |
| 4 : Modèle de Capderou 1987 | 27 |
| 5 : Modèle linéaire de Mefti 1987 | 27 |
| 6 : Modèle de Tiris et al 1997 | 27 |
| I.3.4.2 : Modèles polynomiaux | 28 |
| 1 : Modèle d'Ogelman et al 1984 | 28 |
| 2 : Modèles polynomiaux de Mefti 1987 | 28 |
| a : Par ciel quelconque | 28 |
| b : Par ciel clair : Modèle quadratique de Mefti | 28 |
| I.3.5 : Modèles du type Page (en fonction de L'indice de Clarté) | 29 |
| I.3.5.1 : Modèles linéaires | 29 |
| 1 : Modèle de Page 1964 | 29 |
| 2 : Modèle d'Orgill et Hollandés 1977 | 29 |
| 3 : Modèle d'Iqbal 1979 | 29 |
| 4 : Modèle de Spencer 1982 | 30 |
| 5 : Modèle linéaire de Mefti 1987 | 30 |
| 6 : Modèle de Reindl et al 1990 | 30 |
| 7 : Modèle de Duffie et Beckman 1991 | 31 |
| 8 : Modèle de Lam et Li 1996 | 31 |
| I.3.5.2 : Modèles polynomiaux | 31 |
| 1 : Modèle de Liu et Jordan 1960 | 31 |
| 2 : Modèle de Collares-Pereira et al 1978 | 31 |
| 3 : Modèle d'Erbs 1982 | 32 |
| 4 : Modèles polynomiaux de Mefti 1987 | 32 |
| 5 : Modèle de Louche et al 1991 | 32 |
| I.4 : Conclusion | 33 |

| | |
|---|-----------|
| CHAPITRE II : ESTIMATION DE LA FRACTION DIFFUSE A PARTIR DE LA FRACTION D'INSOLATION ET L'INDICE DE CLARTÉ | 34 |
| II.1 Introduction | 35 |
| II.2 : Caractérisation expérimentale radiométrique des Sites de Sénia et de Tlemcen | 36 |
| II.2.1 : Étude des données d'insolation journalière | 36 |
| II.2.1.1 : Évolution des séquences journalières de l'insolation | 37 |
| II.2.1.2 : Analyse de la moyenne mensuelle de l'insolation | 37 |
| II.1.2.3 : Histogrammes des insolutions mensuelles pour les deux Sites | 38 |
| II.2.2 : Indice de clarté | 38 |
| II.2.2.1 : Distribution journalière de l'Indice de Clarté | 39 |
| II.2.3 : Irradiations Globales | 39 |
| II.2.3.1 : Evolution annuelle des données d'Irradiations Globales Journalières mesurées sur un plan horizontal pour les Sites de Sénia et Tlemcen | 39 |
| II.2.3.2: Histogrammes des rayonnements Globaux mensuels mesurés sur un plan horizontal pour les Sites de Sénia et Tlemcen | 40 |
| II.2.4 : Irradiations Diffuses | 41 |
| II.3 : Paramètres statistiques utilisés dans l'évaluation de la qualité des modèles | 42 |
| II.4 : Résultats et Discussions des Modèles | 44 |
| II.4.1 : Site de Sénia | 45 |
| II.4.1.1 : Estimations des fractions diffuses Journalières en fonction de la fraction d'insolation : Mois Par Mois | 45 |
| a : Modèle Linéaire | 45 |
| b : Modèle basé sur la régression polynomiale du second degré | 48 |
| c : Modèle basé sur la régression polynomiale du troisième degré | 51 |
| II.4.1.2 : Estimations des fractions diffuses Journalières en fonction de l'Indice de Clarté : Mois Par Mois | 54 |
| a : Modèle Linéaire | 54 |
| b : Modèle basé sur la régression polynomiale du second degré | 57 |
| c : Modèle basé sur la régression polynomiale du troisième degré | 60 |

| | |
|--|----|
| II.4.2 : Site de Tlemcen | 63 |
| II.4.2.1 : Estimations des fractions diffuses Mensuelles en fonction de la fraction d'insolation : Mois Par Mois | 63 |
| a : Modèle Linéaire | 63 |
| b : Modèle basé sur la régression polynomiale du second degré | 66 |
| c : Modèle basé sur la régression polynomiale du troisième degré | 69 |
| II.4.2.2 : Estimations des fractions diffuses Journalières en fonction de l'indice de clarté: Mois Par Mois | 72 |
| a : Modèle Linéaire | 72 |
| b : Modèle basé sur la régression polynomiale du second degré | 75 |
| c : Modèle basé sur la régression polynomiale du troisième degré | 78 |
| II.5 : Conclusion | 81 |
| CHAPITRE III : CONFRONTATION AVEC LA LITTERATURE | 82 |
| III.1 : Introduction | 83 |
| III.2 : Confrontations avec la littérature | 84 |
| III.2.1 : Confrontation avec les Modèles de R.sun et Capderou | 84 |
| III.2.1.1 : Site de Sénia | 84 |
| III.2.1.2 : Site de Tlemcen | 86 |
| III.2.2 : Confrontation avec le Modèle de Coppolino | 88 |
| III.2.3 : Comparaison avec le modèle de Mefti [54] 1996 | 90 |
| III.2.4 : Confrontation avec le modèle de Sivkov | 91 |
| III.3 : Conclusion | 92 |
| CONCLUSION GENERALE | 93 |
| BIBLIGRAPHIE | 95 |
| ANNEXE | 99 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|----|
| Tableau I.1: La constante solaire en fonction du nombre d'air masse pour une atmosphère de type méditerranéen | 12 |
| Tableau I.2 : les coefficients de Hottel | 20 |
| Tableau I.3 : Coefficients donnés par Perrin de Brichambaut | 21 |
| Tableau I.4: données des journées respectives de chaque mois | 24 |
| Tableau I.5: Coefficients des relations du type Angström | 26 |
| Tableau I.6 : Résultat de l'ajustement pour le modèle linéaire de Mefti en fonction de σ : Oran et Odeillon | 27 |
| Tableau I.7 : Résultat de l'ajustement pour les modèles Polynomiaux de Mefti en fonction de σ : Oran et Odeillon | 28 |
| Tableau I.8: Coefficients du Modèle de Mefti d'ordre 2 par ciel clair | 28 |
| Tableau I.9 : Résultat de l'ajustement pour le modèle Linéaire de Mefti en fonction de kt : Oran et Odeillon | 30 |
| Tableau I.10 : Résultat de l'ajustement pour les modèles Polynomiaux en fonction de kt de Mefti : Oran et Odeillon | 32 |
| Tableau II.1.1 : Coordonnées géographiques des sites de Sénia et de Tlemcen | 36 |
| Tableau II.2.1 : Durée d'insolation annuelle des sites de Sénia et de Tlemcen | 36 |
| Tableau II.2.2 : Présentation de la distribution (en jours) de l'indice de clarté. | 38 |
| Tableau II-4-1-1-1 : Résultats de l'ajustement par la relation $\frac{H_d}{H_g} = a + b.\sigma$: Site de Sénia | 47 |
| Tableau II-4-1-1-2 : Résultats de l'ajustement par la relation $\frac{H_d}{H_g} = a + b.\sigma + c.\sigma^2$: Site de Sénia | 50 |
| Tableau II-4-1-1-3 : Résultats de l'ajustement par la relation $\frac{H_d}{H_g} = a + b.\sigma + c.\sigma^2 + d.\sigma^3$: Site de Sénia | 53 |
| Tableau II-4-1-2-1 : Résultats de l'ajustement par la relation $\frac{H_d}{H_g} = a + b.kt$: Site de Sénia | 56 |
| Tableau II-4-1-2-2 : Résultats de l'ajustement par la relation $\frac{H_d}{H_g} = a + b.kt + c.kt^2$: Site de Sénia | 59 |

| | |
|---|----|
| Tableau II-4-1-2-3 : Résultats de l'ajustement par la relation $\frac{H_d}{H_g} = a + b.Kt + c.kt^2 + d.kt^3$: Site de Sénia | 62 |
| Tableau II-4-2-1-1 : Résultats de l'ajustement par la relation $\frac{H_d}{H_g} = a + b.\sigma$: Site de Tlemcen | 65 |
| Tableau II-4-2-1-2 : Résultats de l'ajustement par la relation $\frac{H_d}{H_g} = a + b.\sigma + c.\sigma^2$: Site de Tlemcen | 68 |
| Tableau II-4-2-1-3 : Résultats de l'ajustement par la relation $\frac{H_d}{H_g} = a + b.\sigma + c.\sigma^2 + d.\sigma^3$: Site de Tlemcen | 71 |
| Tableau II-4-2-2-1 : Résultats de l'ajustement par la relation $\frac{H_d}{H_g} = a + b.kt$: Site de Tlemcen | 74 |
| Tableau II-4-2-2-2 : Résultats de l'ajustement par la relation $\frac{H_d}{H_g} = a + b.kt + c.kt^2$: Site de Tlemcen | 77 |
| Tableau II-4-2-2-3 : Résultats de l'ajustement par la relation $\frac{H_d}{H_g} = a + b.kt + c.kt^2 + d.kt^3$: Site de Tlemcen | 80 |
| Tableau III-1 : Données des Rayonnements par ciel clair collectées des Sites de Sénia et Tlemcen | 83 |
| Tableau III-2-2-1 : Résultats des moyennes mensuelles du global expérimentales et prédites par Coppolino :Sénia | 88 |
| Tableau -2-2-2 : Résultats des moyennes mensuelles du global expérimentales et prédites par Coppolino :Sénia | 89 |
| Tableau III-2-3 : Résultats des cumuls journalier par ciel clair du global expérimental et prédit par Mefti :Sénia et Tlemcen | 90 |
| Tableau : III-2-4 : Résultats des cumuls mensuelles du global expérimental et prédit par Sivkov : Sénia et Tlemcen | 91 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure I.1: situation Terre-Soleil | 5 |
| Figure I.2 : Paramètres géographiques | 5 |
| Figure I.3: Repère équatorial | 6 |
| Figure I.4: repère horizontal | 7 |
| Figure I.5 : Coordonnées horaires | 8 |
| Figure I.6: Coordonnées horizontales | 9 |
| Figure I.7 : Variation annuelle de l'éclairement hors atmosphère I_0 | 9 |
| Figure I.8: Spectre du rayonnement solaire | 11 |
| Figure I.9: définition de la masse d'air optique | 11 |
| Figure I.10 : La moyenne de l'éclairement global (à gauche) et direct (à droite) avec l'épaisseur optique des nuages pour les différentes configurations géométriques des nuages | 13 |
| Figure I.11: Héliographe pour la mesure de la durée d'insolation | 16 |
| Figure I.12: les différentes composantes du rayonnement solaire sur un plan horizontal | 16 |
| Figure I.13: Pyrhéliomètre pour la mesure d'irradiation directe | 17 |
| Figure I.14: Pyranomètre pour la mesure des irradiances diffuse et globale | 18 |
| Figure. II.2.1.1: Variations des durées d'insolation journalières potentielle et mesurée pour les sites de Tlemcen et Sénia | 37 |
| Figure II.2.1.2: Courbes des insolutions .mensuelles, potentielle et mesurée | 37 |
| Figure II.2.1.3 : Distribution mensuelle de l'insolation pour Tlemcen et Sénia | 38 |
| Figure II.2.2.1 : Distribution journalière de l'indice de clarté pour Tlemcen et Sénia | 39 |
| Figure II.2.3.1: Evolution annuelle des irradiances Globales journalières pour les sites de Tlemcen et de Sénia | 39 |
| Figure II.2.3.2: Distributions de l'évolution annuelle des irradiances Globales mensuelles mesurées pour : Sénia et Tlemcen. | 40 |
| Figure II.2.4: Distributions de l'évolution annuelle des irradiances Diffuses mensuelles mesurées pour Sénia et Tlemcen. | 41 |
| Figure II.4.1.1.1: Distribution Linéaire représentative des fractions diffuses Journalières en fonction de σ , Site de Sénia. | 46 |
| Figure II.4.1.1.2: Distribution Quadratique représentative des fractions diffuses Journalières en fonction de σ , Site de Sénia. | 49 |

| | |
|---|----|
| Figure II.4.1.1.3: Distribution Cubique représentative des fractions diffuses Journalières en fonction de σ , Site de Sénia. | 52 |
| Figure II.4.1.2.1: Distribution Linéaire représentative des fractions diffuses Journalières en fonction de Kt , Site de Sénia. | 55 |
| Figure II.4.1.2.2: Distribution Quadratique représentative des fractions diffuses Journalières en fonction de Kt , Site de Sénia. | 58 |
| Figure II.4.1.2.3: Distribution Cubique représentative des fractions diffuses Journalières en fonction de Kt , Site de Sénia. | 61 |
| Figure II.4.2.1.1 : Distribution Linéaire représentative des fractions diffuses Journalières en fonction de σ , Site de Tlemcen. | 64 |
| Figure II.4.2.1.2 : Distribution Quadratique représentative des fractions diffuses Journalières en fonction de σ , Site de Tlemcen. | 67 |
| Figure II.4.2.1.3 : Distribution Cubique représentative des fractions diffuses Journalières en fonction de σ , Site de Tlemcen. | 70 |
| Figure II.4.2.2.1 : Distribution Linéaire représentative des fractions diffuses Journalières en fonction de Kt , Site de Tlemcen. | 73 |
| Figure II.4.2.2.2: Distribution Quadratique représentative des fractions diffuses Journalières en fonction de Kt , Site de Tlemcen. | 76 |
| Figure II.4.2.2.3 : Distribution Cubique représentative des fractions diffuses Journalières en fonction de Kt , Site de Tlemcen. | 79 |
| Figure III.2.1.1.a : Comparaison des éclairagements Globaux Mesuré et prédits Par R.sun et Capderou : Sénia | 84 |
| Figure III.2.1.1.b : Comparaison des éclairagements Diffus Mesuré et prédits Par R.sun et Capderou : Sénia | 85 |
| Figure III.2.1.2.a : Comparaison des éclairagements Globaux Mesuré et prédits Par R.sun et Capderou : Tlemcen. | 86 |
| Figure III.2.1.2.b: Comparaison des éclairagements Diffus Mesuré et prédits Par R.sun et Capderou : Tlemcen | 87 |

INTRODUCTON GENERALE

L'énergie est la base de toute activité humaine. De nos jours, une grande partie de la demande mondiale en énergie est assurée à partir de ressources fossiles. Cependant, les Réserves de combustibles fossiles sont limitées, la croissance de la demande énergétique mondiale ainsi que l'épuisement inévitable des ressources fossiles, à plus ou moins long terme et la détérioration de l'environnement causée par ces types d'énergies, a incité au développement de nouvelles sources d'énergies renouvelables, tel que l'énergie solaire, assurant ainsi une durabilité et une protection de l'environnement qui est devenue un point très important. Cela doit passer par l'étude du gisement solaire, cependant Le gisement solaire est l'ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Ces données sont indispensables pour la conception, le dimensionnement, la réalisation, de systèmes énergétiques utilisant le flux solaire.

La connaissance du gisement solaire d'une région est plus ou moins précise selon:

- la densité des stations pour lesquelles on a des données,
- le nombre d'années de mesures disponibles,
- le pas de temps des données (mois, jour, heure),
- la nature des données : durée d'enseillement, composante directe et diffuse et globale du rayonnement solaire, albédo du sol.....

Le besoin de données d'insolation est d'une importance capitale aussi bien dans la conception et le développement de ces systèmes que dans l'évaluation de leurs performances. L'existence d'une solide et fiable base de données est une nécessité pour au moins la survie économique des installations de collection et de conversion de l'énergie solaire. Bien qu'il existe un réseau de stations d'évaluation du gisement solaire, le nombre de ces stations est très limité. En Algérie, seules sept stations assurent depuis 1970 la mesure de la composante globale et diffuse du rayonnement solaire. Le nombre de ces stations étant insuffisant et c'est pour cela que divers modèles ont été proposés pour estimer le gisement solaire à une échelle locale ou régionale. Ces modèles s'étendent des codes de calcul les plus complexes et les plus sophistiqués aux simples relations empiriques. Le choix du modèle est dicté par la nature des données et par la précision recherchée.

En effet, la conception et les dimensions d'un système énergétique dépendent en partie de valeurs instantanées des variables météorologiques mesurés au sol. Cependant Il faut souligner que L'avantage des mesures au sol, c'est qu'elles sont précises pour un emplacement spécifique. La couverture spatiale limitée est cependant un inconvénient.

C'est dans cette démarche que nous nous sommes amenés à développer des modèles statistiques de l'irradiation solaire d'un site avec un pas de temps horaire, journalier, mensuel ou même annuel mettant ainsi en évidence la relation directe entre le rayonnement solaire global et sa composante diffuse.

Une année de données mesurées de l'irradiation solaire issue de deux sites algériens (Tlemcen, Sénia), ont été employées pour ce but.

Les premiers travaux accomplis par Angstrom [8] [9] [10] en 1924 et Liu-Jordan [1] en 1960, donnaient des relations entre l'irradiation globale sur une surface horizontale et la fraction d'insolation pour le premier et entre la fraction diffuse et l'indice de Clarté pour le deuxième, Considérant que ces corrélations sont une originalité dans ce domaine et développée pour des valeurs journalières, elles ont été utilisée pour le calcul de la fraction diffuse en fonction de l'indice de clarté kt et en fonction de la fraction d'insolation σ pour des intervalles horaires.

En suivant la même approche, notre travail consiste en première étape en une étude bibliographique qui nous permet de regrouper quelques modèles théoriques établis-en d'autres sites à travers le monde. Ces modèles sont sous forme de relations empiriques qui relient les composantes du rayonnement solaire aux principaux paramètres météorologiques, comme, l'indice de clarté, la fraction d'insolation ou la durée d'insolation, la

nébulosité, et des paramètres astronomiques, comme la durée maximale du jour, la déclinaison du soleil, la variation distance terre-soleil et l'irradiation solaire à la limite de l'atmosphère.

Dans une seconde étape, sur la base des mesures d'ensoleillement effectuées dans les régions cités auparavant, nous avons étudié les corrélations possibles entre les divers rayonnements solaires sur un plan horizontal et la fraction d'insolation afin de trouver une approche permettant d'exprimer la fraction diffuse en fonction de la fraction d'insolation et en second lieu en fonction de l'indice de clarté, ainsi déterminer les coefficients de régression mathématique des modèles , dans une troisième étape on procédera à la confrontation des résultats trouvés avec la littérature.

CHAPITRE I
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 : Introduction

Cette étude bibliographique est présentée en deux parties ; la première partie, est un rappel sur l'énergie solaire, on étudie les différents paramètres géographiques et astronomiques pouvant influencer l'intensité de l'irradiation solaire reçue au niveau du sol. En effet l'exploitation de l'énergie solaire et l'optimisation de sa collecte par les systèmes photovoltaïques et solaire thermique nécessite une connaissance exacte de la distribution de l'irradiation solaire, qui est fonction de plusieurs paramètres géographiques, météorologiques et astronomiques, sur le lieu d'implantation de ce système.

Ainsi, nous avons consacré cette partie pour donner des rappels sur l'énergie solaire, les différents paramètres qui influent sur l'intensité du flux solaire reçu au niveau du sol.

Cependant les irradiances solaires sont mesurées seulement en un nombre limité de sites dans le monde entier. La mesure de l'irradiation exige l'utilisation de pyranomètre, cependant cette opération nécessite beaucoup de moyens matériels et instruments ainsi que leurs maintenances ce qui défavorise beaucoup les stations météorologiques locales dont le budget est limité. Donc, les interpolations objectives de mesures sont cherchées pour des sites ne disposant que de mesures des durées d'ensoleillement, d'ailleurs beaucoup de stations dans le monde les mesurent aussi facilement, c'est le facteur le plus largement disponible et le moins coûteux pour les évaluations d'irradiation solaire, ceci nous oblige à se réfugier aux modèles.

Ainsi on décrira dans la deuxième partie de ce chapitre, les principaux modèles statistiques afin de décrire de façon complète et précise le gisement solaire. Une attention plus particulière sera adressée à la corrélation black angström et la corrélation de page, tel est notre but d'étude.

I.2 : Définitions et concepts :

I.2.1 : Position géométrique du soleil

Le soleil est une étoile située à environ 150 millions de kilomètres de la Terre. Vu de notre planète, il se présente sous la forme d'un disque assez homogène, son rayon est 109 fois celui de la Terre (soit 696 000 km) et sa masse 333 000 fois celle de notre planète.

Le soleil est composé de 80% d'hydrogène, de 19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments lourds (Fer, Néon, Azote, Silicium, ...).

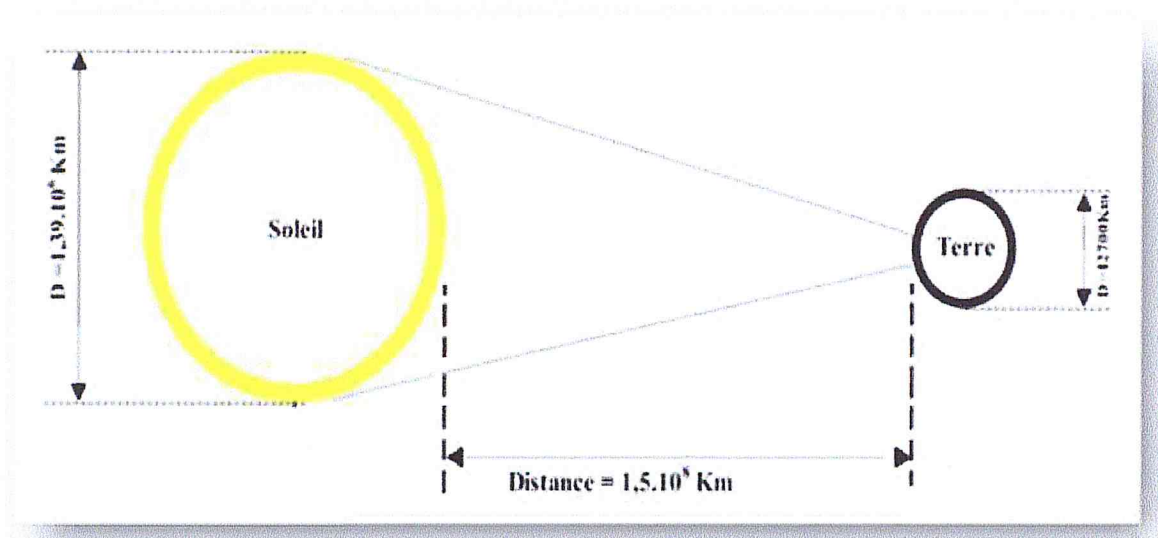


Figure I.1: situation Terre-Soleil

I.2.2 : Paramètres géographiques :

Pour repérer un site donné S sur la surface terrestre on définit deux grandeurs :

- la latitude du lieu φ qui représente la distance angulaire du site S par rapport au plan de l'équateur φ varie entre -90° et $+90^\circ$ tel que $[\varphi > 0$ vers le Nord et $\varphi < 0$ vers le Sud].
- la longitude du lieu λ c'est l'angle que fait le méridien de Greenwich avec le méridien du lieu.
- la projection du méridien de lieu sur le plan équatorial.

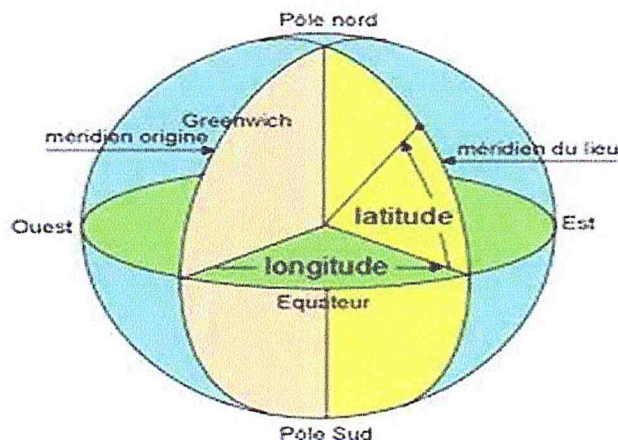


Figure I.2 : Paramètres géographiques

I.2.3 : Paramètres astronomiques

I.2.3.1 : Coordonnées équatoriales

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la Terre à l'aide de deux angles ; la déclinaison δ et l'angle horaire ω .

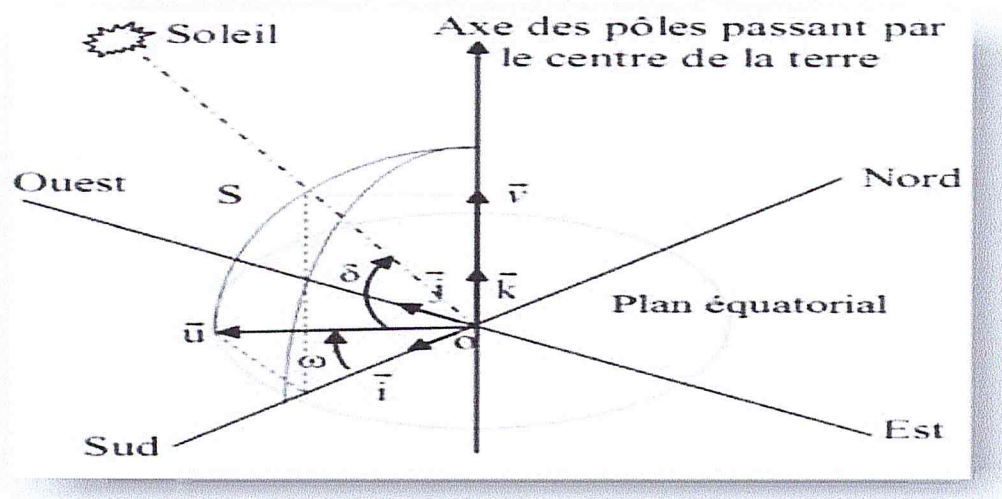


Figure I.3: Repère équatorial

I.2.3.1.1: Déclinaison du soleil

La déclinaison solaire est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan équatorial. Elle varie entre $+23^{\circ}27'$ au solstice d'été (le 21 Juin) et $-23^{\circ}27'$ au solstice d'hiver (le 21 Décembre). Plusieurs chercheurs ont proposé des formules permettant de calculer la déclinaison, l'expression suivante permet de le faire avec précision [1].

$$\delta = (0,00618 - 0,399912 \cos B + 0,070257 \sin B - 0,006758 \cos 2B + 0,000907 \sin 2B - 0,002697 \cos 3B + 0,00148 \sin 3B) \left(\frac{180}{\pi} \right)$$

$$B = 2\pi(nj - 1)/365 \quad (B \text{ est exprimé en radians})$$

Cooper a proposé une équation simplifiée donnée par :

$$\delta = 23,45^{\circ} \cdot \sin \left| \frac{360}{365} (nj + 284)^{\circ} \right|$$

Les angles étant exprimés en degrés.

On a aussi l'équation proposé par P.Brichambaut :

$$\delta = \sin^{-1} \left\{ 0,4 \sin \left[\frac{360}{365} (nj - 82)^{\circ} \right] \right\} \text{ (Degrés)}$$

nj : Le numéro du jour dans l'année, variant de 1 à 365.

I.2.3.1.2: Temps Solaire Vrai

Le temps Solaire Vrai en 1 point du globe est donné par :

$$T_{sv} = T_L + E_t + 4(L_{ref} - L_{lieu}) + D$$

Avec :

T_L : Temps légal,

D : Décalage horaire (en Algérie $D = +1$ toute l'année,

L_{ref} : Longitude du méridien de référence (Greenwich pour l'Algérie),

L_{lieu} : Longitude du lieu comptée positivement à l'ouest et négativement à l'est,

E_t : Equation du temps donnée par :

$$E_t = 9,87 \sin 2B - 7,53 \cos B - 1,5 \sin B$$

Ou en plus précis :

$$E_t = 229,2 (0,000075 + 0,001868 \cos B - 0,032077 \sin B - 0,014615 \cos 2B - 0,04089 \sin 2B)$$

Avec : $B = \frac{360(n-81)}{364}$

I.2.3.2: Coordonnées horizontales

Le repère horizontal est formé par le plan de l'horizon astronomique et la verticale du lieu.

Dans ce repère, les coordonnées sont la hauteur du soleil, 'h' et l'azimut 'az'.

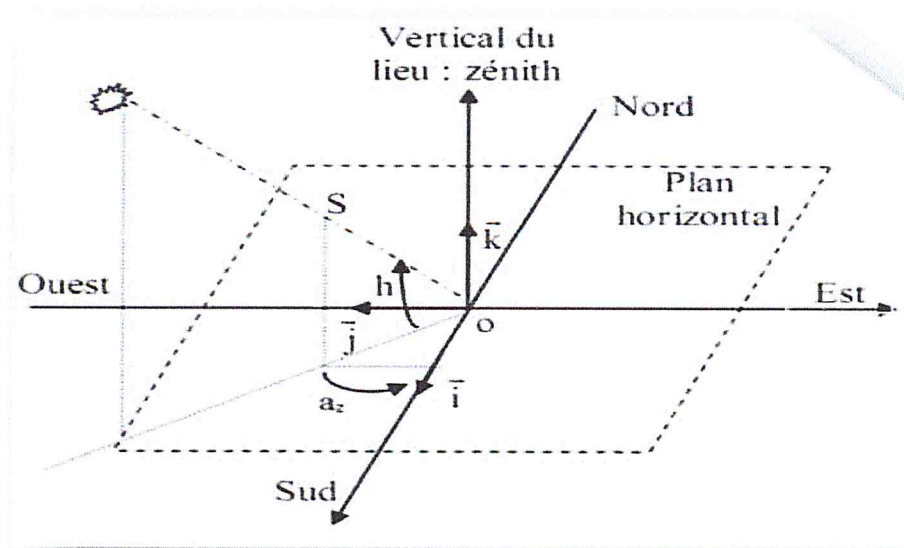


Figure I.4: repère horizontal

I.2.3.2.1: L'angle horaire

L'angle horaire du soleil qu'on note (ω) est le déplacement angulaire du soleil autour de l'axe polaire, dans sa course de l'est à ouest, par rapport au méridien local. La valeur de l'angle horaire est nulle à midi solaire, négative le matin, positive en après-midi et augmente de 15° par heure.

(Un tour de 360° en 24 heures)

$$\omega = 15(\text{TSV}-12)$$

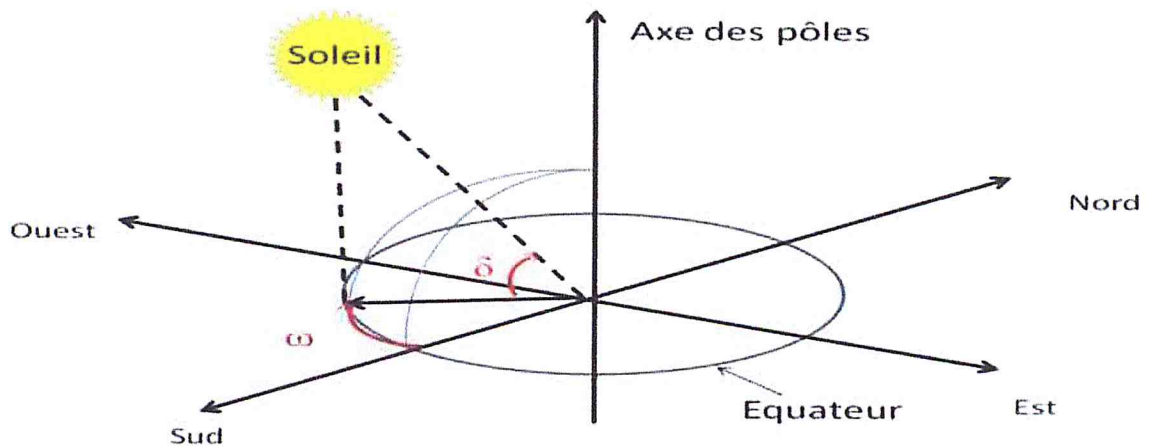


Figure I.5 : Coordonnées horaires [43]

I.2.3.2.2: Hauteur du soleil

La hauteur du soleil est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal. Il est particulièrement égal à 0° au lever et au coucher astronomiques du soleil, sa valeur est maximale à midi, en temps solaire vrai.

L'expression de la hauteur du soleil est donnée par :

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

Avec :

φ : La latitude du lieu , δ : La déclinaison du soleil, ω :L'angle horaire

I.2.3.2.3: Angle horaire aux lever et coucher du soleil :

L'angle horaire au lever (ou coucher) du soleil correspond à $h = \sin h = 0$, soit :

$$\cos\omega_s = -\tan\varphi \tan\delta$$

La durée du jour ou La durée astronomique du jour est donné par :

$$Dj = \left(\frac{2}{15}\right) \text{acos}\left(-\frac{\tan\varphi}{\tan\delta}\right) \quad (\text{En heures})$$

La durée astronomique du jour est maximale le 21 juin (le jour le plus long de l'année) et minimale le 21 décembre (le jour le plus court de l'année).

I.2.3.2.4: Azimut du soleil

L'azimut du soleil est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et la direction sud. Il est donné par : $\sin(a_z) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\cos(h)}$

Il est nul à midi TSV et maximal au lever et au coucher du soleil

I.2.3.2.5: Angle zénithal

C'est l'angle entre le zénith local et la ligne joignant l'observateur et le soleil. Il varie de 0 à 90°

$$\cos(\theta_z) = \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \cos(\varphi) + \sin(\delta) \cdot \sin(\varphi)$$

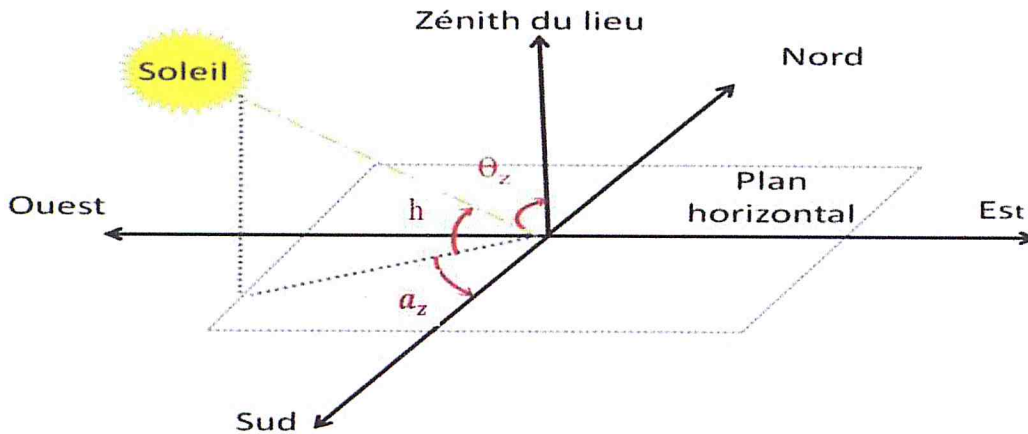


Figure I.6: Coordonnées horizontales [43]

I.2.4: La constante solaire

Mesurée à la distance moyenne, la constante solaire adoptée par le Centre International de Radiomètre (WRC) dépendant de l'ONM est de 1367 W/m^2 avec une incertitude de 1% (Beckman, Iqbal).

I.2.4.1 : Correction due à la variation de la distance Terre – Soleil

La variation de la distance Terre – Soleil durant l'année entraîne une variation de l'éclairement solaire, reçu hors atmosphère, de l'ordre de $\pm 3\%$. L'équation suivante permet de corriger les écarts induits par cette variation saisonnière.

$$I_0 = I_{cs} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360}{365} J \right)$$

| Long d'onde μm | 0 – 0,38 | 0,38 – 0,78 | 0,78 – ∞ |
|---------------------------|----------|-------------|-----------------|
| Flux W/m^2 | 87 | 656 | 623 |
| Fraction % | Soleil | 06,4 | 48 |
| | C.N | 9,9 | 46,5 |
| | | | 43,6 |

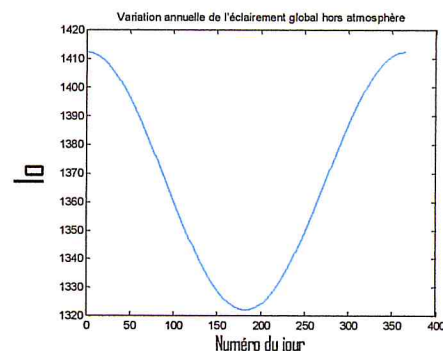


Figure I.7 : Variation annuelle de l'éclairement hors atmosphère I_0

I.2.5 : Irradiation solaire hors atmosphère

L'irradiation solaire est égale à la quantité d'énergie solaire reçue, par unité de surface, durant l'intervalle de temps considéré. Hors atmosphère, l'irradiation solaire sur un plan horizontal est donnée par l'intégration de l'éclairement reçu entre le lever et le coucher du soleil, soit :

$$H_0 = \int_{t_1}^{t_2} I_0 \sin h \, dt = \int_{-\omega_s}^{\omega_s} I_0 \sin h \frac{dt}{d\omega} \, d\omega$$

Avec :

t : Temps solaire vrai.

I_0 : Éclairement solaire reçu solaire hors atmosphère

Sachant que 1 heure (soit 3600 s) correspond à un angle de 15° (soit $\pi/12$), il vient :

$$\frac{dt}{d\omega} = 12 \frac{3600}{\pi} \, s/rad$$

En négligeant la variation de I_0 (la distance Terre-Soleil varie très peu sur une journée), l'irradiation journalière d'une surface horizontale, hors atmosphère, sera de :

$$\begin{aligned} H_0 &= \frac{12 \cdot 3600}{\pi} I_0 \int_{-\omega_s}^{\omega_s} (\sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos\omega) \, d\omega \\ &= \frac{12 \cdot 3600}{\pi} I_0 \cos\varphi \cos\delta (\omega_s \tan\varphi \tan\delta + \sin\omega_s) \end{aligned}$$

En utilisant l'équation de l'angle horaire aux lever et coucher du soleil :

$$\cos\omega_s = -\tan\varphi \tan\delta$$

L'équation devient :

$$H_0 = \frac{12 \cdot 3600}{\pi} I_0 \cos\varphi \cos\delta (\sin\omega_s - \omega_s \cos\omega_s)$$

I.2.6 : Atténuation du rayonnement solaire

Lors de traversée de l'atmosphère, les rayons solaires subissent une série d'altérations par absorption, réflexion par la vapeur d'eau, les divers gaz et les particules en suspension. Ainsi une part importante de l'irradiation solaire est réfléchi par l'atmosphère vers l'espace. Par ciel clair, cette atténuation est de l'ordre de 30%. Atténuation à laquelle il faut ajouter l'effet de la couverture nuageuse.

Ainsi l'atténuation (extinction) du rayonnement solaire est due à :

- ✓ L'écran pour les UV constitué par l'ozone.
- ✓ La diffusion (réflexion) par les gaz, la vapeur d'eau et les particules en suspension.
- ✓ L'absorption par l'oxygène (dans le visible), le CO_2 (IR) et la vapeur d'eau (IR).

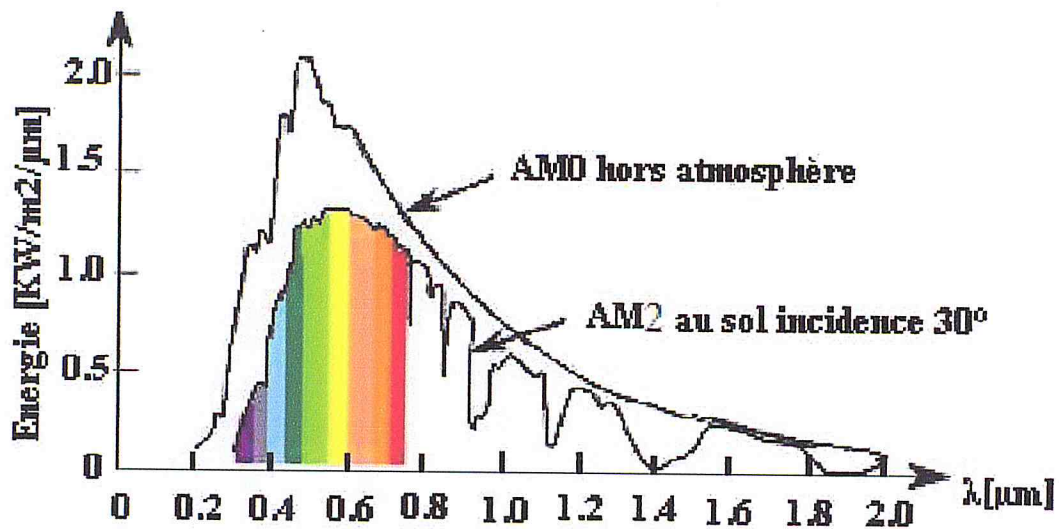


Figure I.8: Spectre du rayonnement solaire [2]

I.2.6.1 : Masse d'air Optique

L'épaisseur de la couche d'air (atmosphère) traversée par les rayons solaires pour arriver jusqu'au sol dépend de la hauteur du soleil et de la courbure de la terre.

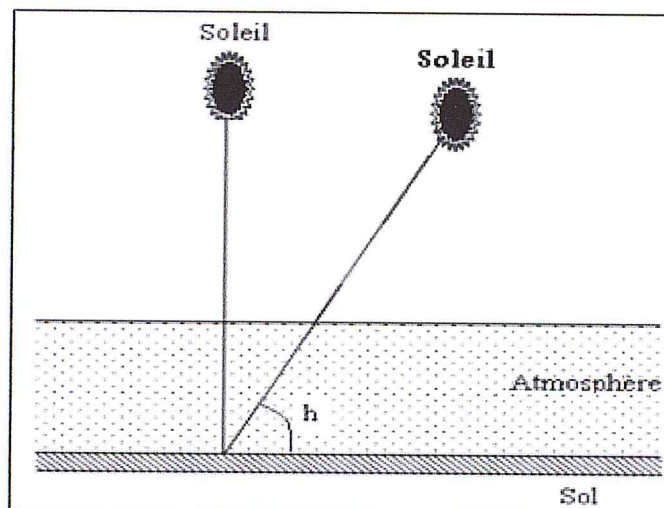


Figure I.9: définition de la masse d'air optique

Pour la longueur d'onde λ la loi d'extinction s'écrit :

$$I_{\lambda} = I_{0\lambda} \exp(-K_{\lambda} m)$$

Avec :

I_{λ} : Eclairement reçu au sol,

$I_{0\lambda}$: Eclairement reçu hors atmosphère,

K_{λ} : Coefficient d'extinction

m : Masse d'air optique.

En négligeant la courbure de la terre, la masse d'air optique est donnée par :

$$m = \frac{1}{\sin h}$$

Et avec la correction d'altitude :

$$m = \frac{0,89^z}{\sin h}$$

z : Altitude du lieu en km .

En considérant la courbure de la terre, Kasten [44] propose une relation plus précise pour la masse d'air optique, en particulier pour les faibles hauteurs. Soit avec la correction d'altitude :

$$m = \frac{0,89^z}{\sin h + 9,410^{-4}(\sin h + 0,0678)^{-1,253}}$$

Tableau I.1: La constante solaire en fonction du nombre d'air masse pour une atmosphère de type méditerranéen [49]

| AM | 0 | 1 | 1,5 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| I_0 (w/M^2) | 1353 | 931 | 834 | 755 | 610 | 530 | 430 |

I.2.6.2 : Les aérosols [3]

Sont appelées aérosols toutes les particules en suspension dans l'air et provenant des activités industrielles et naturelles variées: les pollens, cristaux de sels marins et sable apportés par les vents, les éruptions volcaniques, les poussières de météorites, les feux agricoles et de forêts, etc. La pluie, la neige et la grêle ne sont pas considérées comme des aérosols. Par opposition aux molécules des gaz permanents de l'air sec, les particules suspendues dans l'air ont des volumes, concentrations, distributions, formes et compositions de matériaux très divers. Leurs dimensions varient de quelques nanomètres à la centaine de micromètres pour les plus larges (particules géantes) lesquelles sont sensiblement supérieures aux molécules d'air sec et comparables aux longueurs d'onde du rayonnement lumineux.

Les aérosols sont caractérisés par deux coefficients :

- Le paramètre α caractérise la taille moyenne des particules atmosphériques. Plus α est élevé, plus il décrit des aérosols de grande taille.
- La valeur du facteur de trouble d'Angström β , qui décrit la teneur en aérosols.

De manière générale, la concentration en aérosols est :

- supérieure en site pollué qu'en site rural;
- supérieure au-dessus du continent qu'au-dessus des océans;
- plus importante en période sèche.

I.2.6.3 : Influence des nuages sur les éclaircissements [4]

Dans le cas du ciel nuageux, l'épaisseur optique des nuages est la variable qui a le plus grand impact sur l'éclaircissement global, diffus et direct. La figure I.10 présente un exemple de la valeur moyenne de l'éclaircissement global et direct avec l'épaisseur optique des nuages, pour les différentes phases, hauteurs de la base et épaisseurs géométriques du nuage. Nous observons une forte dépendance de l'éclaircissement global et direct avec l'épaisseur optique des nuages. L'éclaircissement diffus est moins important sous les nuages de cristaux de glace que sous ceux de gouttelettes d'eau pour une même épaisseur optique des nuages. L'éclaircissement direct diminue fortement avec l'épaisseur optique.

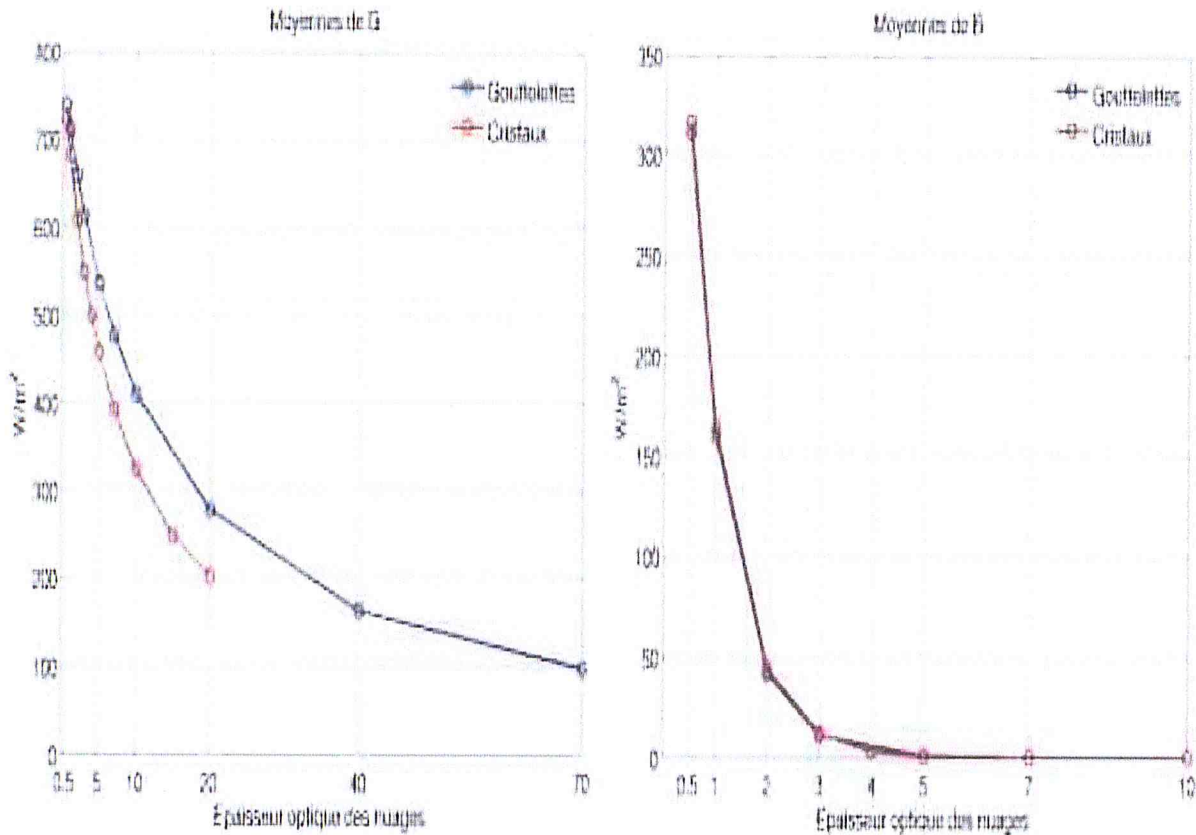


Figure I.10 : La moyenne de l'éclaircissement global (à gauche) et direct (à droite) avec l'épaisseur optique des nuages pour les différentes configurations géométriques des nuages [4].

I.2.6.4 : Notion de nébulosité

La nébulosité est le paramètre météorologique qui permet d'estimer l'importance prise par les nuages dans les phénomènes de diffusion. On la relie à la fraction d'insolation σ qui est une grandeur mesurable dès qu'on connaît les durées d'insolation enregistrées par l'héliographe.

I.2.6.5 : Trouble d'Angstrom

Le coefficient d'extinction monochromatique, dû à la diffusion par les molécules et les aérosols, est donné (théorie de Mie) par :

$$k_{a\lambda} = \beta \lambda^{-\alpha}$$

Avec :

λ : Longueur d'onde en μm ,

α : Coefficient tenant compte de la taille des particules (0 pour les particules et 4 pour les molécules),

β : Coefficient tenant compte de la concentration en particules et molécules (estimé par le clarté de l'atmosphère ou la visibilité météorologique).

Pour l'atténuation totale, on considère pour α la valeur moyenne $\alpha = 1,3$. Le coefficient β peut être estimé la qualité de l'atmosphère, tel que :

$\beta = 0$ Très pure

$\beta = 0,10$ Claire

$\beta = 0,20$ Polluée

$\beta = 0,40$ Très polluée

I.2.6.6 : Facteur de trouble de Linke

Le facteur de trouble de Linke qui caractérise le trouble atmosphérique, peut être défini comme étant le nombre d'atmosphères pures et sèches (absence des aérosols et vapeur d'eau) qui, si elles avaient été superposées, entraîneraient la même atténuation que l'atmosphère réelle. Il s'obtient à partir des mesures pyréliométriques du rayonnement solaire direct.

I.2.6.6.1 : Trouble total de Linke

Le facteur de trouble de Linke est défini comme le rapport du coefficient d'extinction réel à celui d'une atmosphère pure et sèche, soit : $TL^* = \frac{k}{k_0}$

Pour le coefficient d'extinction en atmosphère pure, Kasten propose : $k_0 = \frac{1}{9,4+0,9m}$

Relation corrigée par Iqbal et al. Comme : $k_0 = \frac{1}{9,4+0,8m-5 \exp(-\frac{m}{2})}$

Le facteur de trouble total de Linke représente la somme des effets d'atténuation, intégrées sur tout le spectre, due à la diffusion et à l'absorption des rayons solaires en plus de l'effet de la couverture nuageuse.

Pour l'estimation du facteur de trouble par ciel, des modèles assez complexes ont été développés en considérant séparément les différentes causes d'atténuation (Modèle de Dogniaux-Brichambaut).[\[45\]](#)

Une fois estimé le facteur de trouble total de Linke, l'éclairement solaire direct, sur une surface horizontale, au niveau du sol est donné par :

$$I_b = I_0 * Cts \sin h \exp\left(-\frac{(TL^*)}{0,9 + 9,4(0,89^z) \sin h}\right)$$

I.2.6.7 : Notion sur l'indice de Clarté

Avant d'atteindre le sol, le rayonnement solaire est atténué par l'atmosphère terrestre et les nuages. Le rapport entre le rayonnement au sol et le rayonnement extraterrestre est appelé indice de clarté, la moyenne mensuelle de l'indice de clarté K_t est définie par [5]

$$K_t = \frac{I_g}{I_{g0}}$$

Où :

I_g : Irradiation solaire reçue sur un plan horizontal (Wh. m^{-2} . jour $^{-1}$),

I_{g0} : Rayonnement extraterrestre horizontal (MJ. m^{-2} .jour $^{-1}$ où Wh. m^{-2} .jour $^{-1}$).

La moyenne mensuelle de l'indice de clarté K_t varie selon les endroits et les saisons, elle est généralement entre 0,3 pour des régions ou des saisons pluvieuses et 0,8 pour des saisons ou des climats secs et ensoleillés.

I.6.8 : Fraction d'insolation:

Pendant la durée de jour d'ensoleillement S_0 (de lever au coucher du soleil) et par ciel clair, le sol reçoit le rayonnement solaire maximal. Mais la durée effective d'ensoleillement d'une journée ordinaire est inférieure à cette durée maximale.

La fraction d'insolation est donnée par l'expression : $\sigma = \frac{S}{S_0}$

σ : Fraction d'insolation S : Durée d'insolation journalière (mesurée) (h), S_0 : Durée astronomique du jour (h).

a) Durée d'insolation :

La durée d'insolation correspond à la durée pendant laquelle le rayonnement solaire direct reçu sur un plan normal dépasse un seuil fixé par convention à 120 W.m $^{-2}$.

En l'absence permanente de nuages, la durée d'insolation est pratiquement égale à la durée du jour, qui s'appelle aussi durée astronomique ou théorique du jour .Elle est définie par :

$$S_0 = \frac{2}{15} \omega_0$$

Avec :

ω_0 : L'angle horaire au coucher de soleil ($^{\circ}$),

S_0 : Durée du jour (h).

b) Mesure de la durée d'insolation (l'Héliographe)

La durée d'insolation d'une journée est la durée pendant laquelle l'éclairement énergétique du rayonnement solaire direct dépasse un seuil fixé par convention à 120 W.m $^{-2}$ [6,7]

En l'absence permanente de nuages, la durée d'insolation est pratiquement égale à la durée du jour. Les durées d'insolation mensuelle et annuelle sont obtenues par simple cumul des durées d'insolation des diverses

jours. L'instrument destiné à mesurer la durée d'insolation s'appelle un Héliographe. Ce dernier mesure les périodes de la journée pendant lesquelles l'intensité du rayonnement solaire direct a dépassé son seuil. Il donne les indications lisibles en heures et dixième d'heures.



Figure I.11: Héliographe pour la mesure de la durée d'insolation [7]

Remarque : la sensibilité de l'héliographe est de 120 W/m^2 , Pour un éclairage inférieur à 120 W/m^2 , l'héliographe marque 0, malgré que le soleil est bien visible. Ceci est un inconvénient majeur pour l'estimation de la durée d'insolation et par conséquent la fraction d'insolation.

I.2.7 : Les composantes solaires

Le rayonnement solaire arrivant au sol a au moins deux composantes: une composante directe I_b et une composante diffuse I_d , le tout formant le rayonnement global I_g .

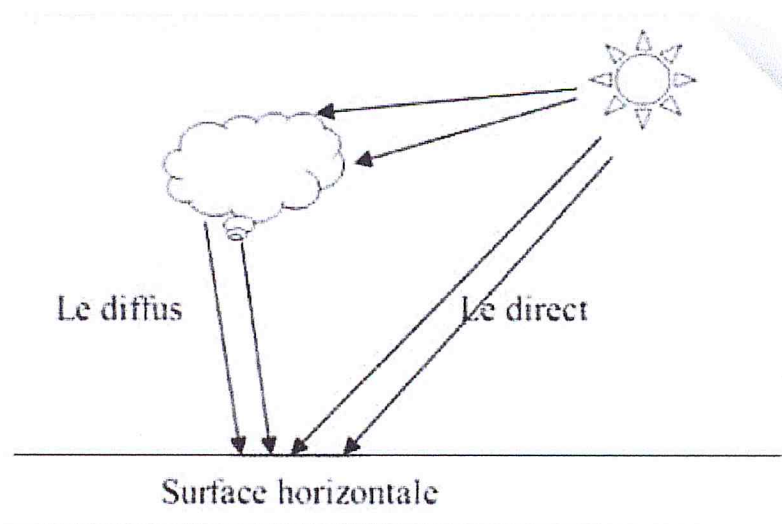


Figure I.12: les différentes composantes du rayonnement solaire sur un plan horizontal

I.2.7.1 : Le direct

C'est la composante parvenant directement de l'angle solide délimité par le disque solaire. C'est un rayonnement, dont le parcours entre le soleil et la surface terrestre est direct.

Pour l'éclairement on le note: I_b

Pour l'irradiation on le note : H_b

I.2.7.2 : Le diffus : I_d

Le diffus parvient de toute la voûte céleste et n'a pas d'orientation privilégiée à cause des effets de l'atmosphère et des nuages.

Pour l'éclairement on le note: I_d

Pour l'irradiation on le note : H_d

Albédo : ρ

C'est la fraction de l'énergie incidente réfléchiée par une surface, ainsi pour un corps noir parfait, l'albédo est nul.

L'albédo du sol est le coefficient de réflexion de lumière diffuse du sol.

I.2.7.3 : Le global

On appelle rayonnement global le rayonnement solaire parvenant au niveau du sol sur une surface horizontale, soit directement, soit après diffusion. Il s'exprime simplement comme la somme du rayonnement diffus et du rayonnement direct.

Pour l'éclairement on le note: I_g

Pour l'irradiation on le note : H_g

$I_g = I_b + I_d$, Ou exprimant des énergies : $H_g = H_b + H_d$

I.2.8 : Mesure du rayonnement solaire au sol

D'une façon générale, la méthode utilisée pour mesurer le rayonnement solaire consiste à transformer l'énergie rayonnée en chaleur. L'irradiation solaire globale est souvent mesurée par des Pyranomètres thermoélectriques, utilisant des piles thermoélectriques à surface plane correctement nivelées pour être parfaitement horizontales. L'insolation est mesurée par un héliographe qui utilise les effets thermiques du rayonnement solaire.

I.2.8.1 : Mesure du rayonnement direct (Le Pyrhéliomètre)

Au sol, la mesure du rayonnement solaire direct est faite à l'aide d'un Pyrhéliomètre. Cet instrument est en permanence orienté vers le Soleil et ne mesure que le rayonnement provenant du seul disque solaire. Le rayonnement capté est absorbé par une surface noire. La différence de température entre cette surface et le corps de l'instrument est proportionnelle à l'éclairement énergétique du rayonnement direct [7,8] .



Figure I.13:Pyrhéliomètre pour la mesure d'irradiation directe [7]

I.2.8.2 : Mesure du rayonnement diffus et global (Le Pyranomètre)

Au sol, la mesure du rayonnement solaire global est faite à l'aide d'un Pyranomètre. Cet instrument collecte le rayonnement arrivant sur une surface horizontale noircie, en provenance d'un angle solide de 2π stéradians¹¹. Le domaine spectral couvert s'étend de 0,3 à 3 μm . Le rayonnement reçu est converti en chaleur par la surface noircie. La différence de température entre cette surface et le corps de l'instrument est proportionnelle à l'éclairement énergétique du rayonnement global; elle est mesurée par une thermopile constituée de plusieurs thermocouples montés en série.

La mesure du rayonnement solaire diffus est faite à l'aide du même instrument, auquel on a adjoint un écran occultant le rayonnement solaire direct. Selon les cas, cet écran peut être, soit un disque ou une sphère, dirigée en permanence vers le soleil, soit une bande pare-soleil parallèle au plan équatorial et déplacée en fonction de la déclinaison solaire [6,7]

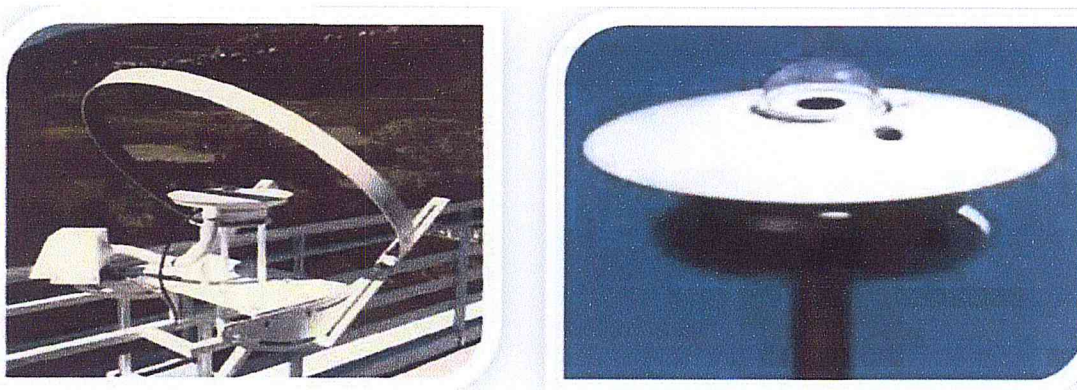


Figure I.14:Pyranomètre pour la mesure des irradiations diffuse et globale[7]

Selon leurs caractéristiques, les pyranomètres sont regroupés par classes (1 ou 2).

La classe 1 se rapporte aux pyranos de grandes précisions.

Des pyranos récents dispose d'une interface intelligente ne fournit pas seulement des sorties polyvalentes. Le capteur de température intégré et les fonctions polynômes numériques délivrent une correction individuelle pour la sensibilité par rapport à la température de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Avec un temps de réponse amélioré et un signal de sortie standardisé, il est facile d'inter-changer les instruments pour recalibrage. Grâce au protocole Modbus, une gamme d'information sur l'état de l'appareil et sa configuration sont disponibles, avec des options sélectionnables par l'utilisateur.

Les Pyrhéliomètres SHP1 consomment très peu d'énergie de sorte que le réchauffement interne n'affecte pas les performances du détecteur. Ils fonctionnent à partir d'une large gamme de tensions d'alimentation, ce qui les rend compatibles pour les applications de puissance critiques. Toutes les entrées et sorties sont protégées contre les inversions de polarité, les surtensions et les courts-circuits.

I-3 : Présentation des principaux modèles

La relation entre la radiation solaire globale et la durée d'ensoleillement a été d'abord démontrée par Angström utilisant un modèle linéaire simple en 1924 : $\frac{H}{H_0} = a + b \left(\frac{S}{S_0} \right)$

Comme les stations de mesures pyranométriques sont en quantité insuffisante, les données de la durée d'insolation disponibles dans de nombreuses stations équipées d'héliographes sont également utilisées pour calculer les moyennes mensuelles du rayonnement solaire global par application de formulations empiriques utilisant la méthode d'Angström [8] [9] [10]

La méthode d'Angström est basée sur l'existence d'une relation linéaire entre la durée d'insolation et le rayonnement solaire global.

La précision des formules du type Angström dépend en partie du lieu de mesure et de la durée des mesures. De plus, de nombreux travaux ont été établis tels que ceux de Bourges [11] qui ont prouvé que la linéarité des relations de ce type est vérifiée dans la mesure où la fraction d'insolation reste comprise entre 0,2 et 0,8. Durand (1974) [12] propose pour des latitudes moyennes :

$$\frac{H_g}{H_{g0}} = 0,24 + 0,45 \left(\frac{S}{S_0} \right)$$

Où H_g rayonnement solaire global journalier, H_{g0} rayonnement solaire global extraterrestre sur un plan horizontal, S la durée d'insolation journalière (mesurée en h), S_0 durée astronomique du jour (mesurée en h).

Ainsi, plusieurs modèles mathématiques permettant de calculer les composantes des radiations solaires (global, diffus et direct). Pour l'estimation du rayonnement solaire il est nécessaire de bien préciser les paramètres géométriques du lieu qui sont la latitude, la longitude et l'altitude ainsi que les paramètres du capteur qui sont l'inclinaison et l'orientation. De nombreuses études ont été faites à cet effet. On peut citer le modèle de Perrin De Brichambaut [13] modèle de Capderou [14] qui servent de référence aux concepteurs de systèmes énergétiques solaires, modèle de Mefti [15] et Gaymard [16].

I.3.1 : Corrélations de Black et Angström :

A partir de très nombreuses mesures en divers lieux et diverses saisons des formules linéaires et non linéaires reliant les énergies ont été établies. Parmi ces formules on présente deux formules linéaires celle de Black et celle d'Angstrom.

I.3.1.1 : Formule de Black

Dans cette formule c'est le global hors atmosphère H_{g0} qui est pris en référentiel pour un jour quelconque par une fonction linéaire en fonction de la fraction d'insolation. La formule est la suivante : [14]

$$\frac{H_g}{H_{g0}} = a_0 \bar{\sigma} + b_0 \quad \bar{\sigma} : \text{La fraction d'insolation moyenne}$$

Le rapport $\frac{H_g}{H_{g0}}$ est appelé "indice de clarté" : $K_T = \frac{H_g}{H_{g0}}$

Les coefficients a_0 et b_0 ne sont pas constants, ils varient avec la date et le lieu.

I.3.1.2 : Formule d'Angstrom

La formule d'Angstrom relie l'énergie globale moyenne sur un plan horizontal pour un jour quelconque avec nuages à l'énergie globale sur un plan horizontal pour un jour clair [14].

$$\frac{H_g}{H_g^*} = a\bar{\sigma} + b \quad \text{Avec :} \quad a \approx 1 - b$$

* : ciel clair (sans nuages), $\bar{\sigma}$: fraction d'insolation moyenne

De même on peut exprimer cette formule à l'aide de la fraction diffuse $K_d = \frac{H_d}{H_g}$

H_d : Irradiation diffuse horizontal ; H_g : Irradiation globale horizontal

$$K_d = a\bar{\sigma} + b$$

I.3.2 : Estimation du rayonnement solaire par ciel clair

I.3.2.1 : Estimation de l'éclairement solaire par ciel clair

Dans le cas d'un jour clair si on désire une évaluation rapide de la puissance reçue au sol sur un plan horizontal on peut utiliser les modèles simplifiées.

1 : Modèle de Hottel et Liu Jordan 1976

Le modèle proposé par Hottel [46], pour l'estimation de l'éclairement direct reçu sur un plan horizontal est de la forme : $I_{bh} = I_0(\sin h) \tau_b$

τ_b et τ_d sont les transmissions pour le direct et le diffus.

$$\tau_b = a_0 + a_1 \cdot \exp(-a_2/\sin(h))$$

Les coefficients a_0, a_1 et a_2 ont été établis pour des visibilité de 23 et 5km, tel que :

$$a_i = a + b(c - z)^2 \quad , i = 0,1,2.$$

z : altitude du lieu en km

Pour tenir compte de la transmittivité du diffus, on peut utiliser la relation proposée par Liu et Jordan [47]:

$$\tau_d = 0.2710 - 0.2939 \cdot \tau_b \quad \text{Avec : } I_d = I_0 \tau_d$$

Le tableau suivant représente les coefficients de Hottel [46]:

Tableau I.2 : les coefficients de Hottel

| Visibilité | a_0 | | | a_1 | | | a_2 | | |
|------------|--------|---------|---|--------|---------|-----|--------|---------|-----|
| | a | b | c | a | b | c | a | b | c |
| 23 km | 0,4237 | -0,0082 | 6 | 0,5055 | 0,00595 | 6,5 | 0,2711 | 0,01858 | 2,5 |
| 5 km | 0,2538 | -0,0063 | 6 | 0,7678 | 0,001 | 6,5 | 0,249 | 0,081 | 2,5 |

La limite du modèle est due au fait qu'il est basé sur une observation météorologique à savoir la visibilité sans autre considération améliorer par les autres modèles régionaux.

2 : Modèle Semi Empirique de Perrin de Brichambaut [10].

Ce modèle est présenté par les formules suivantes : $I_g = I_b + I_d$

$$I_b = A. \sin(h) . \exp \left\{ - \left[C \sin \left(\frac{h + 4\pi}{180} \right) \right]^{-1} \right\}$$

$$I_d = B. \sin(h)^{0,4}$$

Le global est estimé par sommation ou directement par : $I_g = D(\sin h)^E$

Les coefficients A, B, C, D et E dépendent de la qualité du ciel.

Tableau I.3 : Coefficients donnés par Perrin de Brichambaut.

| Ciel | A W/m^2 | B W/m^2 | C | D W/m^2 | E |
|----------|--------------|--------------|-----|--------------|------|
| Très pur | 1300 | 87 | 6 | 1150 | 1,15 |
| Moyen | 1230 | 125 | 4 | 1080 | 1,22 |
| Pollué | 1200 | 187 | 2,5 | 990 | 1,25 |

D'après Capderou [14], la relation donnant le meilleur résultat pour l'Algérie s'écrit :

$$I_g = 1080 \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360 Nj}{365} \right) \right] \sin h \left[\frac{\sin h}{(0,89)^z} \right]^{0,22}$$

Z : l'altitude du lieu, exprimée en km.

L'expérience a montré [14] que l'application de ce modèle entraîne sur une estimation de l'éclairement.

Il a été établi pour la carte solaire de France.

3 : Modèle de Capderou 1987:

Le modèle de Capderou (basé sur le modèle de Brichambaut) [14] utilise le trouble atmosphérique pour calculer les composantes directe et diffuse de l'irradiation reçue sur un plan. L'absorption et la diffusion causée par les constituants de l'atmosphère peuvent être exprimés par des facteurs des troubles.

A partir de ces facteurs, on peut exprimer les irradiances directes et diffuses par ciel clair.

Dans ce modèle, le facteur de trouble atmosphérique de Linke T_L^* par ciel clair est donné par :

$$T_L^* = T_0 + T_1 + T_2$$

T_0 : Le trouble dû à l'absorption gazeuse, il est donné par la relation :

$$T_0 = \frac{9,4 + 0,9m_a}{m_a} \alpha_{aw}$$

α_{aw} : Le coefficient d'extinction après absorption par valeur d'eau,

$$m_a = \frac{\text{pression}}{1013,25} X \frac{1}{\sin(h) + 9,4 \cdot 10^{-4}(\sin(h) + 0,0678)^{-1,253}}$$

m_a : La masse d'air optique,

La modélisation de ce paramètre en fonction des seuls paramètres géo-astronomiques a permis à Brichambaut [14] de proposer l'expression suivante :

$$T_0 = 2,4 - 0,9 \sin(\varphi) + 0,1(2 + \sin(\varphi) A_{he} - 0,2z - (1,22 + 0,14 A_{be})(1 - \sin(h))$$

$$T_1 = (0,89)^z \quad ; \quad T_2 = (0,9 + 0,4 A_{he}) \cdot (0,63)^z \quad ; \quad A_{he} = \sin\left(\frac{360}{365}\right) \cdot (N - 121)$$

Avec : A_{he} : L'alternance hiver-été.

N : Le numéro du jour,

T_2 : Le trouble partiel T est un terme relatif à la diffusion par les aérosols couplée à une légère absorption,

- L'éclairement dû au rayonnement direct obtenu sur plan horizontal dépend uniquement du facteur de trouble de Linke. Il est donné par :

$$I = I_0 \sin(h) \exp\left\{-T_L^* \left[0,9 + \frac{9,4}{(0,89)^z} \sin(h)\right]^{-1}\right\}$$

h : La hauteur du soleil,

z : L'altitude du lieu.

- L'éclairement dû au rayonnement diffus obtenu sur plan horizontal dépend également du facteur de trouble diffusif $T'_{LD} = T_1 + T_2 = T_L^* - T_0$ tel que :

$$\begin{cases} D = I_0 \exp(-1 + 1,06 \log(\sin(h)) + a - \sqrt{b^2 + a^2}) \\ b = \log(T_L^* - T_0) - 2,80 + 1,02(1 - \sin(h))^2 \quad \text{et} \quad a = 1,1 \end{cases}$$

- L'éclairement global est, naturellement, la somme des éclairagements direct et diffus.

$$G = I + D$$

Le modèle d'estimation du trouble atmosphérique est présenté par Kasten [37] en 1996. Il exprime le trouble de Linke à partir de l'irradiation directe reçue sur plan normal par journée de ciel clair:

$$T_L = \frac{1}{\delta_R \cdot m_a} \log\left(\frac{In_0}{In}\right)$$

$$\text{Et } \delta_R = (6,6296 + 1,7513 m_a - 0,1202 m_a^2 + 0,0065 m_a^3 - 0,00013 m_a^4)^{-1}$$

-La complexité du modèle pose un problème quand à son application

-Les travaux de Gama et al [42] montrent que l'application du modèle en Algérie, entraîne une surestimation des éclairagements

4 : Modèle de R.sun

Pour le modèle R.sun [38] , le rayonnement global incident sur un plan horizontal $H_g(h, T_L)$ par ciel clair; calculé en W/m^2 , est divisé en deux parties: le rayonnement direct $I_b(h, T_L)$ et le rayonnement diffus $I_d(h, T_L)$ chacun étant calculé séparément.

Le rayonnement direct est le flux solaire incident directement sur le plan considéré sous un angle représentant la hauteur solaire.

Tel que modélisé par Hofierka et al (2002) [38] ,le rayonnement direct incident sur un plan horizontal $I_b(b, T_L)$ par ciel clair, est donné par:

$$I_b(h, T_L) = H_0 \cdot \sin(h) \cdot \exp(-0,8662 \cdot T_L \cdot m_a \cdot \delta_R)$$

Rayonnement diffus est le flux solaire reçu par un plan considéré qui traverse les nuages, provenant de la voûte céleste dans toutes les directions. Pour l'expression du rayonnement diffus, nous allons prendre la formule publiée par Hofierka et al, avec une légère correction du facteur T_L , cette correction ayant été adoptée en 2004 par le nouveau Atlas Solaire de l'Europe (ESRA) [39] [40] est également prise en considération dans la version 2007 de MeteoNorm V6 [41].

Posons $T_{Lc} = \left(\frac{p}{p_0}\right) \cdot T_L$, l'expression du rayonnement diffus est donnée par :

$$I_d(h, T_L) = H_0 \cdot T_{rd}(T_L) \cdot F_d(h, T_L)$$

$T_{rd}(T_L)$ est la fonction de la transmittance diffuse. Elle est fonction uniquement du facteur T_L

Corrigé, et varie entre 0 et 0,3. L'expression de $T_{rd}(T_L)$ est réécrite de la manière suivante :

$$T_{rd}(h, T_L) = -1,5843 \cdot 10^{-2} + (3,0543010^{-2} \cdot T_{Lc}) + (3,797 \cdot 10^{-4} \cdot T_{Lc}^2)$$

$F_d(h, T_L)$ est la fonction diffuse angulaire, fonction de la hauteur du soleil h et du facteur de trouble T_L corrigé. $F_d(h, T_L)$ est donnée par l'expression suivante :

$$F_d(h, T_L) = A_0 + A_1 \cdot \sin(h) + A_2 \cdot [\sin(h)]^2$$

A_i Sont des coefficients dépendants uniquement du facteur de trouble T_L corrigé.

Ce modèle est actuellement le plus utilisé pour les différents codes de dimensionnement des systèmes solaires tel que PVGIS.

I.3.2.2 : Estimation de l'irradiation solaire par ciel clair

1 : Modèle de Bernard, Menguy et Schwartz [48]

Relations valables pour des conditions moyennes et pour des latitudes comprises entre 30°N et 60°N, soit :

$$H_{gc} = 3250[2 + \tan(\varphi + 0,01(18 - \delta)^2)]\cos^2(\varphi - \delta)$$

$$\frac{H_{bc}}{H_{gc}} = 0,96 \exp \frac{-1}{7,2 \cos(\varphi - \delta + 2)} \quad (\text{Les Angles en degrés})$$

H_{gc} : Irradiation journalière globale par ciel clair. Et H_{bc} : Irradiation journalière directe par ciel clair.

Les limites du modèle reposent sur le fait qu'il n'y a aucune condition particulière (Site, qualité de l'atmosphère,.....)

2 : Modèle Perrin de Brichambaut [14]

Relations tirées des tables de Dogniaux [45] valables pour un facteur de trouble de linke $T < 6$ et une latitude inférieure à 60° (en valeur absolue), soit :

$$\frac{H_{gc}}{H_0} = (0,91 - 0,15 \log T) \cos^k(\varphi - \delta) ;$$

$$\frac{H_{dc}}{H_0} = 0,07(T - 1) \cos^{-0,7}(\varphi - \delta) ;$$

$$\frac{H_{bc}}{H_0} = \exp \frac{-T^*}{7,2 \cos^{0,75}(\varphi - \delta)} \quad \text{Et} \quad k = 0,13\sqrt{T^*}$$

H_{gc} : Irradiation journalière globale par ciel clair. H_0 : Irradiation journalière extraterrestre.

H_{dc} : Irradiation journalière diffuse par ciel clair. H_{bc} : Irradiation journalière directe par ciel clair.

T^* : Facteur de trouble par ciel clair.

I.3.3: Estimation du rayonnement solaire par ciel variable

Par ciel variable les relations établis portent l'estimation de l'irradiation moyenne en fonction de la fraction d'insolation ou de l'indice de clarté. Ces irradiations journalières sont rapportées aux moyennes mensuelles (valeur moyenne de $\overline{\sin h}$) et correspondent aux jours représentatifs de chaque mois. On montre que :

$$\overline{\sin h} = \cos \varphi \cos \delta \frac{\sin \omega_s - \cos \omega_s}{\omega_s}$$

Les journées représentatives de chaque mois sont données dans le tableau suivant :

Tableau I.4: données des journées respectives de chaque mois

| N° du jour | J | F | M | A | M | J | J | O | S | O | N | D |
|--------------|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Dans le mois | 17 | 16 | 16 | 15 | 15 | 11 | 17 | 16 | 15 | 15 | 14 | 10 |
| Dans l'année | 17 | 47 | 75 | 105 | 135 | 162 | 198 | 228 | 258 | 288 | 318 | 344 |

I.3.3.1 : Les Modèles météorologiques

Les modèles météorologiques utilisent des relations linéaires permettant de transformer les données mesurées au sol (l'insolation, la température,...) en flux global d'irradiation solaire.

Ces modèles ont l'avantage d'être appliqués à n'importe quel état du ciel (ciel quelconque).

I.3.3.1.1 : Estimation de la moyenne mensuelle par jour de l'irradiation globale :

1 : Modèle de Coppolino 1989 :

En 1989, Coppolino [51] a proposé une relation très simple pour prédire la moyenne mensuelle du rayonnement global journalier à n'importe quel endroit ne connaissant que la durée d'ensoleillement S (heures) et la hauteur du soleil à midi au milieu de chaque mois (le 15^{ème} jour du mois).

La relation est la suivante :

$$G = 7,8 \cdot S^{0,5} (\sin(h_m))^{1,15}$$

G : La moyenne mensuelle par jour du rayonnement global (MJ/m²/Jour).

S : La durée d'ensoleillement (l'insolation) le 15^{ème} jour du mois (heures).

h_m : La hauteur du soleil à midi le 15^{ème} jour du mois.

2 : Modèle de Hussain 1982:

De même, pour la reconstitution de l'irradiation diffuse, Hussein [19] a proposé un même type de relation que celle établie pour l'estimation de l'irradiation globale. Cette relation est fonction de la durée d'insolation, de l'humidité et de la moyenne mensuelle par jour de l'irradiation extraterrestre calculée sur un plan horizontal. Elle est donnée par :

$$H_d = H_{g0} \left(0,306 + 0,364 \left(\frac{DI}{T_m} \right) - 0,0035 H_a \right)$$

H_d : Moyenne mensuelle par jour de l'irradiation diffuse,

H_{g0} : Irradiation global extraterrestre calculée sur plan horizontal,

DI : Durée d'insolation, T_m : Température moyenne, H_a : Humidité absolue

I.3.3.1.2: Estimation de l'Irradiation globales mensuelle : Modèle de SivKov 1964

Sivkov [35] a proposé la relation empirique originale pour estimer la revue mensuelle de rayonnement solaire global mensuel aux latitudes de 35° à 65° sous la forme suivante :

$$Hg = 4,9(n)^{1,31} + 10550(\sin h)^{2,1}$$

Avec Hg : irradiation globale mensuelle (cal/cm²)

n : Ensoleillement mensuel (h)

h : Hauteur du soleil (°) à midi pour le 15^{ème} ou le 16^{ème} jour du mois

I.3.4 : Modèles du type Black-Angström (en fonction de la fraction d'insolation)

I.3.4.1 : modèles linéaires

Les relations exprimées par rapport à la fraction d'insolation, [Duffie et al, 1980] sont du type :

$$\frac{H_h}{H_0} = a + b\bar{\sigma} \quad \text{relation de Black}$$

$$\frac{H_h}{H_{cc}} = a_0 + b_0\bar{\sigma} \quad \text{relation d'Angström}$$

H_h : Irradiation horizontale. H_0 : Irradiation journalière extraterrestre. H_{cc} : Irradiation par ciel clair.

$\bar{\sigma}$: Fraction d'insolation moyenne.

Pour l'estimation du global et en exploitant les données mesurées en Algérie, [Mefti et al, 1996][54] propose des relations selon le modèle Type d'Angstrom. Les coefficients des relations du type Angström sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau I.5: Coefficients des relations du type Angström

| Site | a | b | validité |
|-------------|------|------|---------------|
| ALGER | 0.49 | 0.45 | Lat>35.5° |
| SAIDA | 0.41 | 0.55 | 33°<Lat<35.5° |
| BECHAR | 0.38 | 0.6 | 31°<Lat<33° |
| BENNI-ABBES | 0.33 | 0.65 | 23°<Lat<31° |
| TAMANRASSET | 0.25 | 0.7 | Lat<23° |

1 : Modèle de Glover et McCulloch 1958 :

Glover et McCulloch [17] tenant compte l'effet de latitude $\phi < 60^\circ$ ont présenté la corrélation suivante :

$$\frac{H}{H_0} = a \cdot \cos \phi + b \cdot \sigma \quad \text{avec } a = 0,29 \text{ et } b = 0,52 \Leftrightarrow \frac{H}{H_0} = 0,29 \cos \phi + 0,52 \sigma$$

On remarque que ces valeurs sont très différentes de celles trouvées pour l'Algérie.

2 : Modèle de Rietveld 1978 :

Rietveld [18] a examiné plusieurs valeurs éditées des coefficients de régression pour la relation de type Angström par la relation :

$$\frac{H}{H_0} = 0,18 + 0,62 \sigma$$

Modèle à forte dépendance avec la fraction d'insolation.

3 : Modèle de Bahel et al 1986 :

Bahel et al [20] ont développé un modèle du type black à partir des données radiométriques fournies par 48 stations réparties dans le monde à savoir :

$$\frac{H}{H_0} = 0,175 + 0,552\sigma$$

4 : Modèle de Capderou 1987 :

Pour l'Algérie, Capderou [Capderou, 1987][14] propose pour la moyenne mensuelle, un modèle de type Angström, soit :

$$\frac{H_{gh}}{H_{cc}} = 0,41 + 0,58 \bar{\sigma}$$

$$\frac{H_{dh}}{H_{cc}} = 0,53 - 0,35 \bar{\sigma}$$

H_{gh} : Irradiation globale horizontale. , H_{dh} : Irradiation diffuse horizontale. H_{cc} : Irradiation par ciel clair.

Si par ciel clair, la précision est acceptable, par ciel moyen les modèles de densités de probabilité ainsi que la formulation du diffus introduisent une erreur d'estimation non négligeable

5 : Modèle linéaire de Mefti 1987[50] : appliqué pour les Sites d'Oran et d'Odeillon

$$\frac{H_d}{H_g} = a + b \cdot \sigma$$

H_d et H_g : Irradiations journalières diffuse et Global sur un plan horizontal.

σ : Fraction d'insolation journalière.

Tableau I.6 : Résultat de l'ajustement pour le modèle linéaire de Mefti en fonction de σ : Oran et Odeillon

| Mois | Site d'Oran | | Site d'Odeillon | |
|---------|-------------|-------|-----------------|--------|
| | a | b | a | b |
| Février | 0.7 | -0.9 | 0.951 | -0.798 |
| Avril | 0.85 | -0.61 | 0.872 | -0.765 |
| Octobre | 0.85 | -0.66 | 0.546 | -0.206 |

6 : Modèle de Tiris et al 1997 :

Tiris et al [21] ont donné les coefficients empiriques a et b de Angström-PreScott-Page pour la Turquie par l'équation suivante :

$$\frac{H}{H_0} = 0,18 + 0,62 \sigma$$

On remarque que les coefficients de régression sont du même ordre que ceux proposés par Bahel et al.

I.3.4.2 : Modèles polynomiaux

1 : Modèle d'Ogelman et al 1984 :

Ogelman et al [22] ont estimé le rayonnement solaire global sur une surface horizontale utilisant une corrélation de type Angström, cette relation à une forme polynomiale du second degré, elle est de la forme suivante :

$$\frac{\bar{H}}{H_0} = 0,195 + 0,676(\bar{\sigma}) + 0,142(\bar{\sigma})^2$$

2 : Modèles polynomiaux de Mefti 1987 [50]-[54]:

a : Par ciel quelconque : appliqués pour les Sites d'Oran et d'Odeillon

$$\frac{H_d}{H_g} = a + b \cdot \sigma + c \cdot \sigma^2 \quad \text{Modèle quadratique} \quad ; \quad \frac{H_d}{H_g} = a + b \cdot \sigma + c \cdot \sigma^2 + d \cdot \sigma^3 \quad \text{Modèle cubique}$$

σ : Fraction d'insolation Journalière

H_d et H_g : Irradiations journalières diffuse et Global sur un plan horizontal.

Tableau I.7 : Résultat de l'ajustement pour les modèles Polynomiaux de Mefti en fonction de σ : Oran et Odeillon

| Mois | Degré du polynôme | Site d'Oran | | | | Site d'Odeillon | | | |
|---------|-------------------|-------------|-------|-------|-------|-----------------|--------|--------|--------|
| | | a | b | c | d | a | b | c | d |
| Février | 2 | 0.68 | -0.93 | -0.72 | - | 0.942 | -0.725 | -0.075 | - |
| | 3 | 1.02 | -1.29 | 0.75 | -0.31 | 0.943 | -0.752 | -0.053 | 0.001 |
| Avril | 2 | 0.77 | -0.21 | -0.37 | - | 0.903 | 0.958 | 0.190 | - |
| | 3 | 0.72 | 0.47 | -2.06 | 1.11 | 0.911 | -1.081 | 0.512 | -0.217 |
| Octobre | 2 | 0.92 | -1.05 | 0.36 | - | 0.891 | -0.859 | 0.0879 | - |
| | 3 | 0.91 | -0.86 | -0.12 | 0.311 | 0.903 | -0.946 | 0.088 | 0.009 |

b : Par ciel clair : Modèle quadratique de Mefti:[54]

A partir d'un fichier de données d'irradiation solaire globale journalière, Mefti [54] a extrait l'irradiation globale maximale reçue pendant chaque décade sur la période 1972-1982.

L'ajustement de ce nuage de points par un polynôme d'ordre 2 est donné par l'expression suivante :

$$Gh_{max} = a(Lat - Dec)^2 + b(Lat - Dec) + c$$

Gh_{max} : Irradiation Global journaliere par ciel clair en Wh/m²

a, b et c sont donnés pour chaque site par le **tableau I.8**. La latitude 'Lat' et la déclinaison 'Dec' sont exprimées en degrés.

Tableau I.8: Coefficients du Modèle de Mefti d'ordre 2 par ciel clair :

| Site | a | b | c |
|----------------------|------|-------|------|
| ALGER | -0.8 | -58 | 8852 |
| SAIDA | -0.6 | -70.4 | 9302 |
| BECHAR | -1.2 | -19.8 | 8759 |
| BENNI-ABBES | -0.8 | -36.5 | 8123 |
| TAMANRASSET | -1.1 | -13.8 | 8453 |
| Tous sites confondus | -1.3 | -16.6 | 8337 |

I.3.5 : Modèles du type Page (en fonction de L'indice de Clarté)

I.3.5.1 : Modèles linéaires:

Pour estimer la fraction diffuse ou la composante du global mensuel horizontal, il existe plusieurs modèles mathématiques fonction de l'indice de clarté, le modèle le plus simple étant celui proposé par page.

1 : Modèle de Page 1964 :

Page [23] [24] utilisant les données relatives à dix sites, dont la latitude s'étale entre 40°Nord et 40°Sud, a établi une corrélation linéaire reliant l'irradiation diffuse journalière à l'indice de clarté, donnée par la relation suivante:

$$\frac{H_d}{H_g} = a - b.kt$$

Pour le sud algérien, Capderou (Capderou, 1987) propose $a = 0,91$ et $b = 0,98$.

2 : Modèle d'Orgill et Hollands 1977:

Orgill et Hollands [25] ont présenté une équation de corrélation pour le rayonnement solaire diffus horaire, basée sur des données météorologiques de Toronto sur une période de 4 ans. À partir de ces données, le rapport

$\frac{I_d}{I_g}$ peut être calculé en fonction de l'indice de clarté horaire «kt».

$$\frac{I_d}{I_g} = 1 - 0,249.kt \quad \text{Pour } 0 \leq kt < 0,35,$$

$$\frac{I_d}{I_g} = 1,577 - 1,84.kt \quad \text{Pour } 0,35 \leq kt \leq 0,75,$$

$$\frac{I_d}{I_g} = 0,177 \quad \text{Pour } kt > 0,75.$$

- La gamme de $0 \leq kt < 0,35$ représente des journées complètement nuageuses avec plus de 90 % du rayonnement solaire global incident étant diffus.
- La gamme de $0,35 \leq kt \leq 0,75$ correspond à des journées partiellement ensoleillées.
- La gamme de $kt > 0,75$ représente les journées entièrement ensoleillées.

I_d : Irradiation diffuse horaire (J/cm²). I_g : Irradiation globale horaire (J/cm²)

3 : Modèle d'Iqbal 1979:

Iqbal [26] a utilisé des données relatives à différents sites canadiens, il a proposé la corrélation suivante :

$$\frac{I_d}{I_g} = 0,958 - 0,982.kt \quad \text{pour } 0,30 \leq kt \leq 0,60$$

Relation avec des coefficients complètement différents de ceux de Orgill et Hollands [25] alors qu'il s'agit du même pays.

4 : Modèle de Spencer 1982:

Spencer [27] a étudié la dépendance de latitude à l'égard de l'utilisation de l'irradiation quotidienne diffuse selon les données de cinq stations en Australie (latitude de 20-45°S)

La corrélation est donnée par : $K_D = a_3 - b_3 \cdot kt$ pour $0,35 \leq kt \leq 0,75$

K_D a des valeurs constantes au-delà de la gamme ci-dessous de kt , les coefficients a_3 et b_3 dépendent de latitude ϕ .

$$a_3 = 0,94 + 0,0118|\phi|$$

$$b_3 = 1,185 + 0,0135|\phi|$$

ϕ : La latitude (degrés)

5 : Modèle linéaire de Mefti 1987 [50]: appliqué pour les Sites d'Oran et d'Odeillon

$$\frac{H_d}{H_g} = a + b \cdot kt$$

H_d et H_g : Irradiations journalières diffuse et Globale sur un plan horizontal.

kt : Indice de clarté journalier

Tableau I.9 : Résultat de l'ajustement pour le modèle Linéaire de Mefti en fonction de kt : Oran et Odeillon

| Mois | Site d'Oran | | Site d'Odeillon | |
|---------|-------------|-------|-----------------|--------|
| | a | b | a | b |
| Février | 0.35 | -0.31 | 1.211 | -1.211 |
| Avril | 1.20 | -1.43 | 1.730 | -1.264 |
| Octobre | 1.16 | -1.41 | 1.170 | -1.284 |

6 : Modèle de Reindl et al 1990:

Reindl et al [28] ont estimé la fraction diffuse, utilisant deux modèles différents développés sur une surface horizontale aux Etats-Unis et en Europe (latitude de 28-60°N), le modèle est donné par l'équation suivante :

$$\frac{I_d}{I_g} = 1,02 - 0,248K_T \quad \text{pour} \quad K_T \leq 0,3$$

$$\frac{I_d}{I_g} = 1,45 - 1,67K_T \quad \text{pour} \quad 0,3 < K_T < 0,78$$

$$\frac{I_d}{I_g} = 0,147 \quad \text{pour} \quad K_T \geq 0,78$$

De part les données utilisées, ce modèle a plus grande portée.

7 : Modèle de Duffie et Beckman 1991 :

A partir de la mesure de la moyenne mensuelle de l'irradiation journalière globale, on estime l'irradiation diffuse journalière moyenne H_d par la corrélation de Beckman [29].

$$\frac{\overline{H_d}}{H_g} = K_D = a + b.kt$$

Pour le Sahara Algérien $a = 0,91$ et $b = 0,98$

H_g : L'irradiation journalière globale, H_d : L'irradiation diffuse journalière moyenne.

8 : Modèle de Lam et Li 1996:

Lam et Li [30] ont étudié la corrélation entre la radiation solaire globale, directe et diffuse à Hong-Kong (latitude de 22,3°N) en 1991-1994. Un modèle de corrélation hybride basé sur des données mesurées pour la prédiction d'horaire directe et diffuse est donné par :

$$K_D = 0,977 \quad \text{pour} \quad kt \leq 0,15$$

$$K_D = 1,237 - 1,361.kt \quad \text{pour} \quad 0,15 < kt \leq 0,7$$

$$K_D = 0,273 \quad \text{pour} \quad kt > 0$$

I.3.5.2 : Modèles polynomiaux

1 : Modèle de Liu et Jordan 1960 :

Une première relation a été établie par Liu & Jordan [31] qui exprime la fraction de l'irradiation diffuse journalière par rapport à l'irradiation globale journalière K_D , en fonction de l'indice de clarté kt . Les données utilisées sont relatives au site de Blue Hill Massachusetts (USA), cette corrélation est donnée comme suit:

$$K_D = 1,39 - 4,027.kt + 5,531.(kt)^2 - 3,108.(kt)^3 \quad \text{Pour} \quad 0,3 < kt \leq 0,7$$

2 : Modèle de Collares-Pereira et al 1978 :

Collares-Pereira & Rabl [32], moyennant les données relatives de cinq sites aux Etats-Unis, ont proposé une corrélation polynomiale d'ordre 4. En première approximation, on peut supposer que ce modèle est valable pour les moyennes mensuelles et aussi pour les valeurs journalières.

La corrélation est donnée par l'équation suivante :

$$K_D = 1,188 - 2,272K_t + 9,4733(K_t)^2 - 21,856(K_t)^3 + 14,648(K_t)^4$$

$$\text{pour } 0,17 < K_t \leq 0,80$$

$$K_D = 0,99 \quad \text{pour } K_t \leq 0,17$$

Une autre relation a été développée par Collares-Pereira & Rabl qui dépendra, cette fois-ci, de l'angle horaire du lever du soleil ω_s , paramètre caractérisant la saison considérée. Cette relation est donnée comme suit:

$$K_D = 0,775 + 0,347 \left(\frac{\pi}{180} \right) (\omega_s - 90) - \left[0,505 + 0,261 \left(\frac{\pi}{180} \right) (\omega_s - 90) \right] \cos[2(K_t - 0,9)]$$

ω_s est l'angle horaire du lever du soleil en degrés; $\omega_s \approx 90^\circ$ s pour les mois de Février, Mars, Avril, Août, Septembre et Octobre, $\omega_s \approx 100^\circ$ s pour les mois de Mai, Juin et Juillet et $\omega_s \approx 80^\circ$ s pour les mois de Novembre, Décembre et Janvier.

Ils ont complété le modèle de Liu&Jordan [31].

3 : Modèle d'Erbs 1982:

Erbs [33] a utilisé des mesures à l'échelle établis sur quatre stations des Etats Unis pour développer un modèle polynomial saisonnier donnant la fraction diffuse mensuelle en fonction de l'indice de clarté :

➤ Pour $\omega_s \leq 80^\circ$ et $0,3 \leq K_T \leq 0,8$: $K_D = 1,391 - 3,560K_t + 4,189(K_t)^2 - 2,137(K_t)^3$

➤ Pour $\omega_s > 80^\circ$ et $0,3 \leq K_T \leq 0,8$: $K_D = 1,311 - 3,022K_t + 3,427(K_t)^2 - 1,821(K_t)^3$

ω_s : L'angle horaire du lever du soleil en degrés;

Le modèle ne traite pas le problème des extrêmes.

4 : Modèles polynomiaux de Mefti 1987_[50]:appliqué pour les Sites d'Oran et d'Odeillon

$$\frac{H_d}{H_g} = a + b.kt + c.kt^2 \text{ Modèle quadratique.} \quad \frac{H_d}{H_g} = a + b.kt + c.kt^2 + d.kt^3 \text{ Modèle cubique}$$

kt :Indice de clarté journalier

H_d et H_g : Irradiations journalières diffuse et Globale sur un plan horizontal.

Tableau I.10 : Résultat de l'ajustement pour les modèles Polynomiaux en fonction de kt de Mefti : Oran et Odeillon

| | | Site d'Oran | | | | Site d'Odeillon | | | |
|---------|-------------------|-------------|-------|--------|-------|-----------------|--------|--------|-------|
| Mois | Degré du polynôme | a | b | c | d | a | b | c | d |
| Février | 2 | 0.300 | -0.36 | -0.20 | - | 0.864 | 0.592 | -1.857 | - |
| | 3 | 0.43 | 4.63 | -13.62 | 9.37 | 0.693 | 2.339 | -6.286 | 3.209 |
| Avril | 2 | 1.15 | -1.18 | -0.27 | - | 0.993 | -0.454 | -0.785 | - |
| | 3 | 0.98 | 0.35 | -4.22 | 3.11 | 0.934 | -0.882 | -1.793 | 0.677 |
| octobre | 2 | 1.01 | -0.64 | -0.86 | - | 0.952 | -0.243 | -1.027 | - |
| | 3 | 1.04 | -0.96 | 0.03 | -0.74 | 0.642 | 2.438 | -7.420 | 4.448 |

Modèles Présenté seulement pour 3 mois pour le Site d'Oran et 4 mois pour le site d'Odeillon

5 : Modèle de Louche et al 1991

Louche et al [34] ont utilisé la Moyenne de l'indice de clarté Mensuel K_t pour évaluer la transmission du facteur de radiation K_D .

La corrélation inclut des données d'irradiations globales et directes pour Ajaccio (la Corse : France, latitude $44,9^\circ$ N) entre octobre 1983 et juin 1985, elle est donnée par l'équation suivante :

$$K_D = 0,002 - 0,059.K_t + 0,994.(K_t)^2 - 5,205.(K_t)^3 + 15,307.(K_t)^4 - 10,627.(K_t)^5$$

La plage d'application n'est pas indiquée. Il est évident qu'il s'agit d'un modèle local

I.4 : Conclusion

La connaissance des mouvements et des positions du soleil pour un observateur terrestre, permet de mettre à jour les principales spécificités d'ensoleillement et de ressources solaires d'un site. L'estimation du rayonnement solaire reçu sur la terre nécessite des informations précises sur les paramètres météorologiques dans un lieu donné. Ces paramètres sont mesurés par des stations radiométriques.

Une base de données typique comprend les mesures du rayonnement solaire global, rayonnement direct et rayonnement diffus, la durée d'ensoleillement et des données complémentaires comme la couverture nuageuse, la turbidité atmosphérique, l'humidité, température etc...., ces données peuvent être utilisés dans des modèles, ainsi les modèles les plus importants ont été présentés dans ce chapitre. Les modèles statiques permettent de calculer les différentes composantes du rayonnement solaire au niveau du sol en utilisant comme paramètres d'entrée, les paramètres astronomiques, les paramètres géographiques ainsi que les paramètres météorologiques. Les modèles météorologiques permettent de calculer l'irradiation globale et parfois diffuse au niveau du sol à partir de la moyenne journalière ou mensuelle de l'insolation, ainsi que l'indice de clarté. Les modèles statistiques sont élaborés en fonction des données disponibles. La durée d'insolation a été la première donnée exploitée vue la facilité de sa disponibilité.

Ces modèles ont l'avantage d'être simples, ils utilisent des équations mathématiques pas trop lourdes pour l'étude de gisement solaire et l'estimation de l'énergie solaire incidente. Cependant il y'a des modèles qui ne peuvent pas être appliqués généralement pour n'importe quelle région et n'importe quelle journée de l'année.

On a pu constater que la connaissance du gisement solaire d'une région est plus ou moins précise selon les mesures au sol suivantes ;

- la densité des stations pour lesquelles on a des données,
- le nombre d'années de mesures disponibles,
- le pas de temps des données (mois, jour, heure),
- la nature des données : durée d'ensoleillement, composante directe et diffuse et globale du rayonnement solaire, albédo du sol

. Ces données sont très importantes pour l'étude et le dimensionnement des systèmes solaires, plus particulièrement les systèmes photovoltaïques.

CHAPITRE II

ESTIMATION DE LA FRACTION DIFFUSE A PARTIR DE LA FRACTION D'INSOLATION ET L'INDICE DE CLARTÉ

II.1 Introduction :

Les stations de mesures sont rares à travers le territoire national. A cet effet, pour l'estimation des irradiances solaires incidentes, on a recours aux modèles. Ces modèles sont établis sous forme de corrélations. Pour qu'ils soient applicables aux sites considérés

Plusieurs auteurs (Rietveld, 1978[18] ; Glover et McCulloch[17],1958; Hussain[19] 1982 ; Angström-Prescott, 1940[52]; Orgill et Hollands[25]1977 ; etc.), ont établi des modèles pour estimer le rayonnement solaire global à partir des différentes variables météorologiques telles que la température, l'humidité, la nébulosité, la durée d'insolation ...

Le paramètre météorologique dont s'articule notre modèle est la durée d'insolation, un paramètre climatique le mieux connu expérimentalement. En effet, partout dans le monde, les stations météorologiques mesurent la durée d'insolation depuis de nombreuses années. Très tôt on a cherché à relier la fraction d'insolation au rayonnement global reçu sur plan horizontal. Les corrélations de type black permettent de reconstituer le rayonnement solaire en un lieu où seule l'insolation est connue.

Cependant ces relations permettent en générale de reconstituer une seule composante du rayonnement, ainsi notre idée est de reconstituer les deux composantes, globales et diffuses en un lieu où seule l'insolation est connue.

L'avantage des paramètre mesurables (H_g , H_d , S) et calculables (S_o , H_o), qui permettent d'estimer certains en connaissant d'autres « ceci est obtenu par traitement d'une grande quantités de données caractérisant le Site étudié », nous a amené à établir 2 types de corrélations au sens des moindre carrés, la fraction diffuse journalière à partir de la fraction d'insolation σ , puis la fraction diffuse journalière à partir de l'indice de Clarté kt , en 3 modèles ,linéaire, quadratique et cubique.

D'une façon générale on peut présenter nos modèles par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \frac{H_d}{H_g} = a + b \cdot \sigma + c \cdot \sigma^2 + d \cdot \sigma^3 \dots \dots \dots (1) \\ \frac{H_d}{H_g} = a_1 + b_1 \cdot kt + c_1 \cdot kt^2 + d_1 \cdot kt^3 \dots \dots (2) \end{cases}$$

Ces corrélations ont été établies à partir des données correspondantes à une certaine période ; dans notre cas d'étude ; nous disposons des données de l'année 2006 pour deux Sites, Sénia et Tlemcen (**Tableau II.1.1**), ceci n'a été possible qu'après Examen approfondi et un tri des valeurs fournies par l'ONM, qui se sont souvent avérées soit discontinues à défaut de mesures, soit non valables.

II.2 : Caractérisation expérimentale radiométrique des Sites de Sénia et de Tlemcen

Comme il a été indiqué, de nombreux travaux ont été élaborés en vue de relier les irradiations diffuses et globales aux variables météorologiques, on a donc jugé judicieux d'étudier chaque paramètre qui entre en jeu pour la réalisation de nos modèles ainsi que sa distribution mensuelle ou sa moyenne mensuelle à savoir, la durée d'insolation, l'indice de clarté, les irradiation globale et diffuse et ce, pour les deux sites de Sénia et de Tlemcen.

Coordonnées géographiques

Tableau II.1.1- Coordonnées géographiques des sites de Sénia et de Tlemcen

| Site | Latitude (en degré décimal) | Longitude (en degré décimal) | Hauteur (en mètres) |
|---------|-----------------------------|------------------------------|---------------------|
| Sénia | 35.6477900 | -0.62397 | 78 |
| Tlemcen | 34.8783300 | -1.3150000 | 843 |

II.2.1 : Étude des données d'insolation journalière

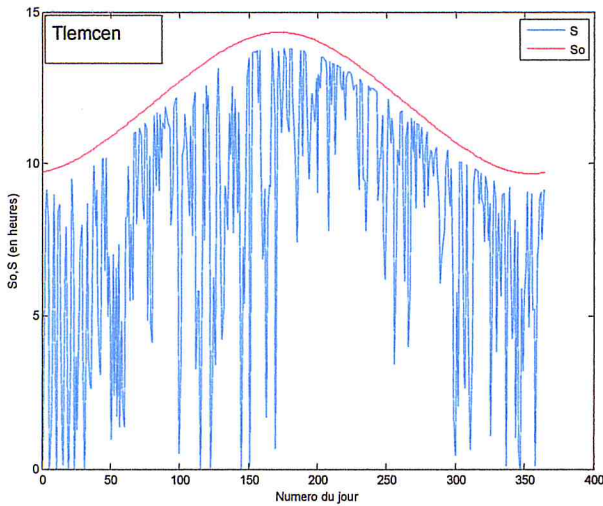
L'insolation représente la durée d'ensoleillement horaire, journalière ou annuelle (**Tableau II.2.1**). Ses variations et caractéristiques seront similaires à celles de l'indice de clarté. La durée d'insolation est plus importante dans la région centrale que sur la bande littorale (tableau 1.1)

Tableau II.2.1 : Durée d'insolation annuelle des sites de Sénia et de Tlemcen

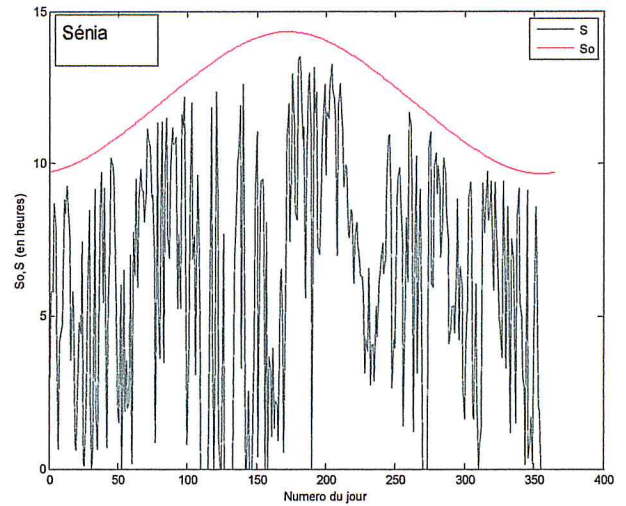
| SITE | SÉNIA | TLEMCEN |
|------------------------------|--------|---------|
| Durée d'Insolation en HEURES | 2233.5 | 3104.4 |

II.2.1.1 : Évolution des séquences journalières de l'insolation

A l'échelle horaire et de la journée, ces paramètres présentent beaucoup de fluctuations comme on peut le constater sur les courbes 1 et 2 de la figure II.1.1



Courbe 1



Courbe 2

Figure. II.2.1.1: Variations des durées d'insolation journalières potentielles et mesurées pour les Sites de Tlemcen et Sénia

II.2.1.2 : Analyse de la moyenne mensuelle de l'insolation

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

Les courbes suivantes montrent les insolation potentielles S_0 , et les moyennes mensuelles des insolation mesurées S , pour les sites de Sénia et de Tlemcen. Nous rappelons que la fraction d'insolation correspond au rapport entre la durée d'insolation réelle S et la durée d'insolation hors atmosphère S_0 :

$$\sigma = S/S_0$$

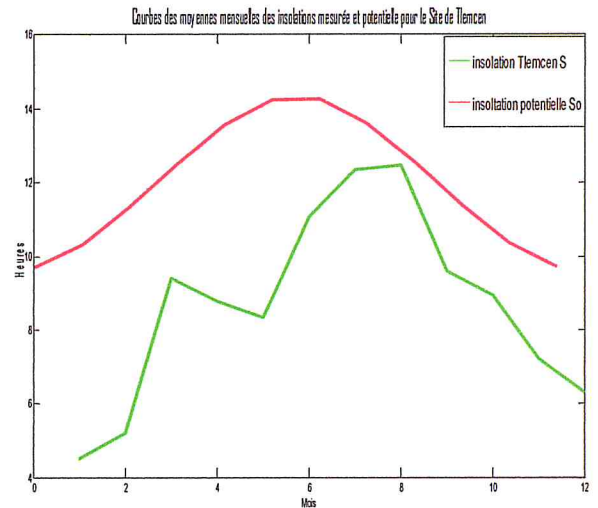
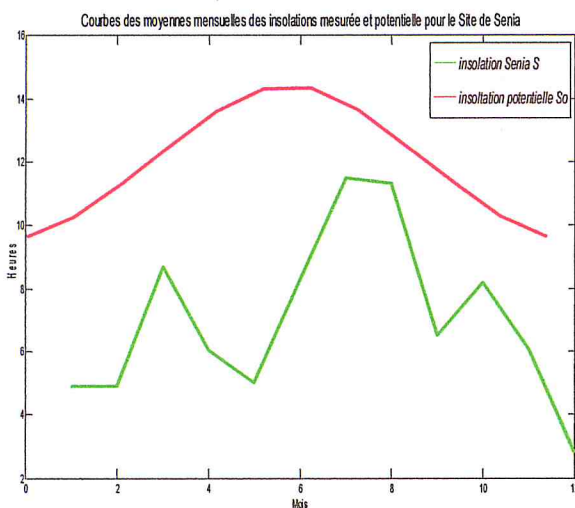


Figure II.2.1.2 : Courbes des insolation mensuelles, potentielles et mesurées

Notons que pour la région (site de Tlemcen), l'insolation S prend la même allure que l'insolation potentielle S_0 , à l'exception du mois de mars au début du mois de mai où S évolue inversement à S_0 . La durée d'insolation

est élevée en été (juin, juillet, août) atteignant 12 heures pour, et faible en hiver (décembre, janvier et février), elle atteint entre 4 et 5 heures

Pour le (site de Seina), l'insolation S change beaucoup d'allure que l'insolation potentielle S_0 .

II.1.2.3 : Histogrammes des insolation mensuelles pour les deux Sites

La figure 2.21 expose les distributions mensuelles de la durée d'insolation pour les deux Sites. On remarque que les distributions sont bonnes pour le site de Tlemcen à part le mois d'Avril et Mai, ce qui n'est pas le cas pour le site de Sénia, qui est souvent caractérisé par des journées couvertes (jours nuageux.).

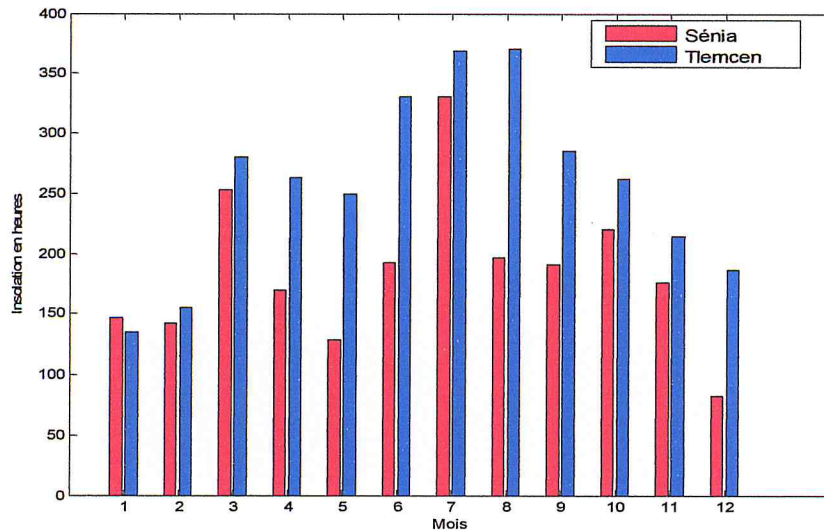


Figure II.2.1.3 : Distribution mensuelle de l'insolation pour Tlemcen et Sénia

II.2.2 : Indice de clarté :

L'indice de clarté journalier kt qui correspond au rapport de la quantité de rayonnement global reçu par la quantité d'énergie solaire disponible hors atmosphère. Elle est significative du taux d'ensoleillement de la journée. On rappelle que : $kt = \frac{H_g}{H_0}$

H_g et H_0 Sont respectivement les irradiances journalières globale et hors atmosphère reçus sur un plan horizontale.

Tableau II.2.2 : Présentation de la distribution (en jours) de l'indice de clarté.

| Intervalles de kt | Nombre de jour | |
|---------------------|----------------|-----------------|
| | Site de Sénia | Site de Tlemcen |
| 0 : 0.1 | 37 | 4 |
| 0.1 : 0.2 | 19 | 8 |
| 0.2 : 0.3 | 40 | 15 |
| 0.3 : 0.4 | 43 | 18 |
| 0.4 : 0.5 | 34 | 12 |
| 0.5 : 0.6 | 53 | 21 |
| 0.6 : 0.7 | 88 | 26 |
| 0.7 : 0.8 | 51 | 57 |
| 0.8 : 0.9 | 0 | 86 |
| 0.9 : 1 | 0 | 111 |

II.2.2.1 : Distribution journalière de l'Indice de Clarté

La figure 1.3 expose la distribution journalière de l'indice de clarté pour les sites de Sénia et Tlemcen.

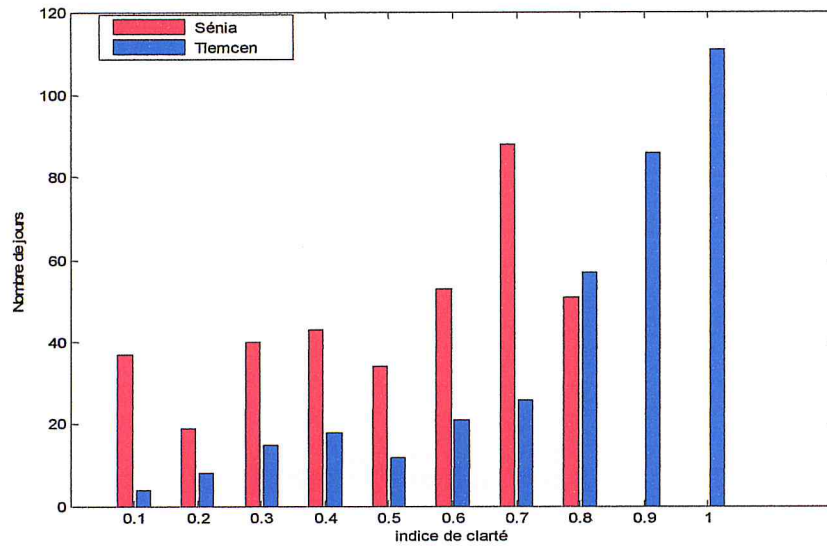


Figure II.2.2.1 : Distribution journalière de l'indice de clarté pour Tlemcen et Sénia

La proportion de journées à fort indice de clarté (de 0.9 à 1) est plus élevée pour le site de Tlemcen ; la majorité des périodes est très ensoleillée puisque 80% des journées disposent d'un indice de clarté supérieur à 0.6. Ce qui n'est pas le cas pour le site de Sénia où les journées à fort ensoleillement (de 0.6 à 0.7) sont majoritaires (38 %). Pour le site de Sénia, le passage d'un type de temps peu ensoleillé à un beau temps est moins fréquent, ce qui caractérise une dégradation rapide et fréquente du temps (Figure 1.3). Ce qui n'est pas le cas pour le site de Tlemcen où le passage d'un mauvais temps à un temps ensoleillé est le plus fréquent, ce qui caractérise une amélioration progressive du temps.

II.2.3 : Irradiations Globales

II.2.3.1 : Evolution annuelle des données d'Irradiations Globales Journalières mesurées sur un plan horizontal pour les Sites de Sénia et Tlemcen

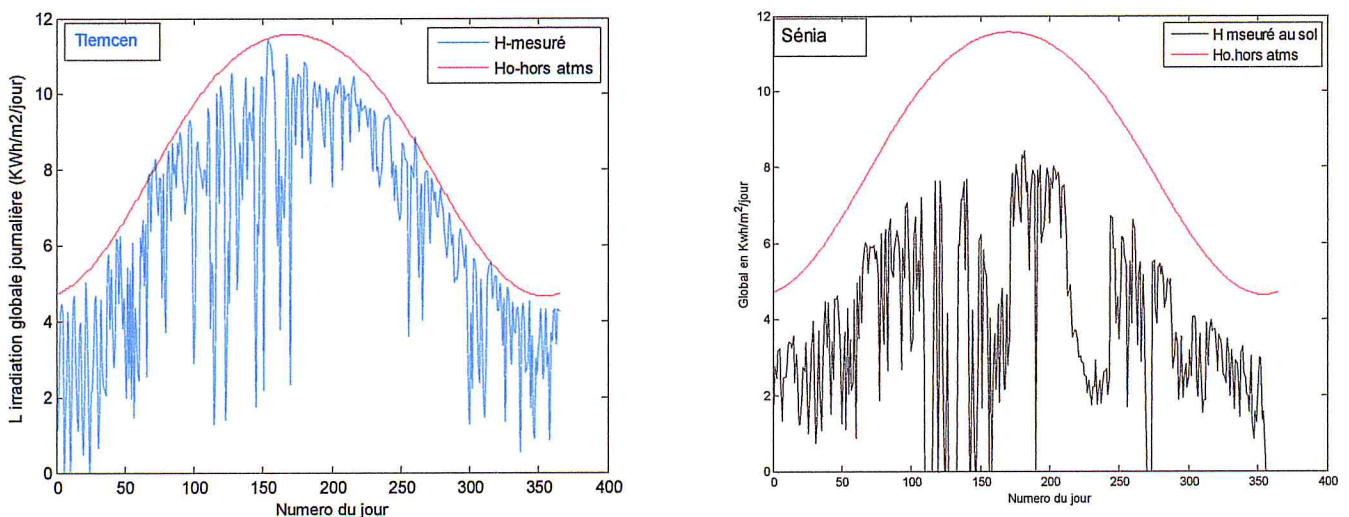


Figure II.2.3.1: Evolution annuelle des irradiations Globales journalières pour les sites de Tlemcen et de Sénia

L'analyse des courbes obtenues ci-dessus indique que les valeurs du rayonnement global sont maximales en été et minimales en hiver dans tous les sites considérés. Dans les deux sites représentant le nord-ouest du pays, les valeurs de l'irradiation obtenues en été pour le site de Tlemcen sont plus élevées que celles obtenues pour le Site de Sénia. A cette même période. Elles peuvent atteindre 11,8 KWh dans La région de Tlemcen. Par contre, pour le Site de Sénia elle ne dépasse pas 8,8 KWh. Pendant l'hiver, on constate que ces valeurs sont plutôt proches pour les deux Sites.

II.2.3.1: Histogrammes des rayonnements Globaux mensuels mesurés sur un plan horizontal pour les Sites de Sénia et Tlemcen

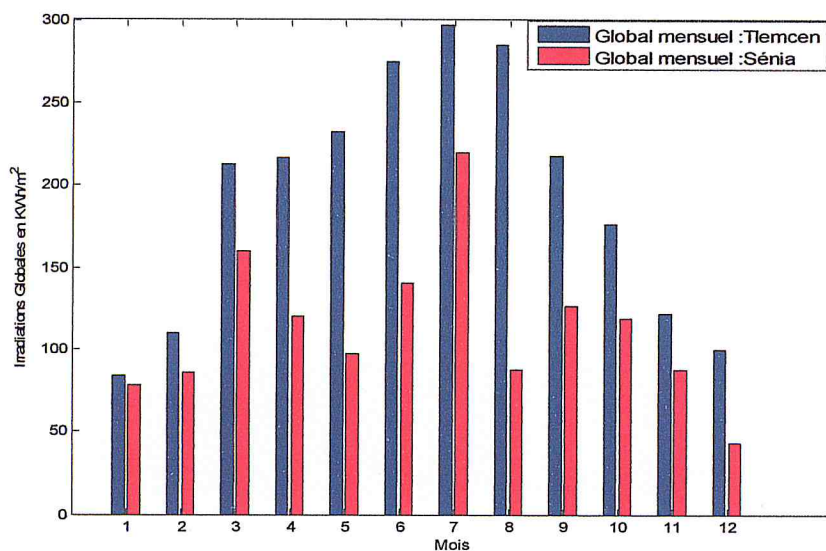


Figure II.2.3.2: Distributions de l'évolution annuelle des irradiations Globales mensuelles mesurées pour : Sénia et Tlemcen.

La figure II.2.3.2 présente le cumul mensuel du rayonnement global pour les sites de Sénia et Tlemcen. Pour Le Site de Tlemcen On remarque la forte proportion de rayonnement fort dans la période qui contient les mois de Mars à Septembre (Supérieure à 200 KWh). Dans la période qui contient les mois d'Octobre à Janvier, on observe une diminution marquée de la quantité de rayonnement global reçue (inférieur a 176 KWh), relative à des journées à forte couverture nuageuse. Le rayonnement solaire global varie très rapidement autour de l'équinoxe de printemps et autour du solstice d'hiver, il varie très peu autour de l'équinoxe d'automne et autour du solstice d'été. Nous avons ainsi mis en évidence un très fort rayonnement (297,16 KWh) le Mois de Juillet et un rayonnement très faible (83.68 KWh), le Mois de Janvier.

----Pour Le Site de Sénia On remarque la forte proportion de rayonnement fort seulement le mois de Juillet (219,82 KWh). Dans la période qui contient les autres Mois, on observe une diminution marquée de la quantité de rayonnement global reçue (inférieur à 159.59 KWh), relative à des journées à forte couverture nuageuse. Le rayonnement solaire global varie très lentement autour de l'équinoxe d'automne et du printemps et autour du solstice d'hiver. Nous avons ainsi mis en évidence un très fort rayonnement (219,82 KWh) le Mois de Juillet et un rayonnement très faible (43.39 KWh), le Mois de Décembre.

II.2.4 : Irradiations Diffuses

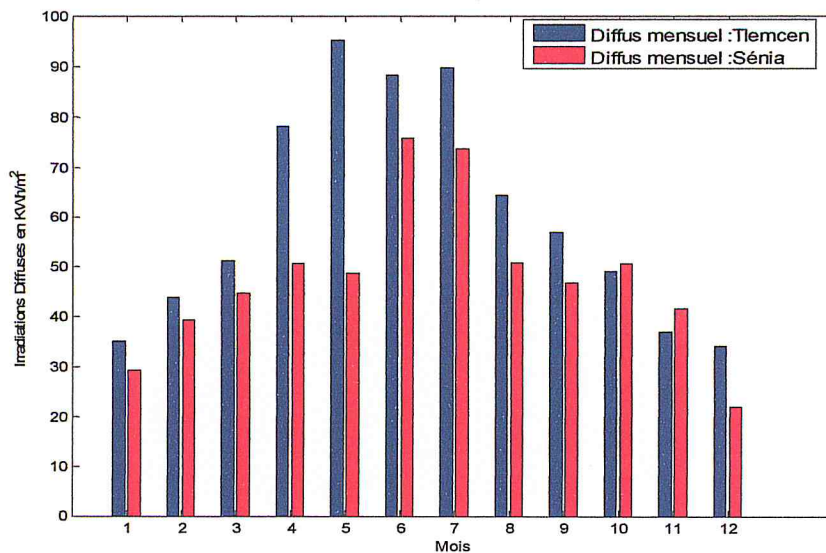


Figure II.2.4: Distributions de l'évolution annuelle des irradiations Diffuses mensuelles mesurées pour Sénia et Tlemcen.

La figure II.2.4 présente le cumul mensuel du rayonnement Diffus pour les sites de Sénia et Tlemcen. On remarque que les valeurs pour les deux Sites sont proches (entre 34 et 90 KWh pour le Site de Tlemcen) et (entre 34 et 70 KWh pour le Site de Sénia). Pendant la période hivernale, les diffus se réduisent approximativement aux globales, et pendant la période estivale, les diffus sont très inférieurs aux globales et ce pour l'ensemble des deux sites.

Le rayonnement solaire diffus varie lentement et très peu autour de l'équinoxe de printemps, de solstice d'hiver, de l'équinoxe d'automne et de solstice d'été.

II.3 : Paramètres statistiques utilisés dans l'évaluation de la qualité des modèles

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

Pour évaluer le degré d'explication du modèle par rapport aux réponses mesurées, on établit le rapport R^2 .

Dans le cas d'une régression linéaire, R^2 est simplement le carré du coefficient de corrélation R qui est donné

$$\text{Par : [53]} R = \frac{\sigma_{x_i, y_i}}{\sigma_{x_i} \cdot \sigma_{y_i}} = \frac{\sum(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

Avec : $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ est la moyenne de x ; $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ est la moyenne de y , n la taille de l'échantillon

La variance σ^2 : un paramètre statistique très important pour mesurer la dispersion quadratique autour de la moyenne.

Avec σ : l'écart type, Notons que :

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

$$\sigma_{y_i} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{est l'écart type de } y \quad (3)$$

$$\sigma_{x_i, y_i} = \frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y}) \quad \text{est la covariance } x, y \quad (4)$$

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

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

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

Dans le cas général Le coefficient de détermination est donné par l'équation (5): [53]

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{i,m} - y_{i,c})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{i,m} - \bar{y}_m)^2} \quad (5)$$

$y_{i,m}$ est la valeur mesurée, $y_{i,c}$ est la valeur calculée, \bar{y}_m la moyenne des valeurs mesurées

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

Le RMSE est donné par: [53]

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_{i,m} - y_{i,c})^2} \quad (6)$$

En appliquant l'équation (5), on obtient la relation suivante [53]

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{i,m} - y_{i,c})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{i,m} - \bar{y}_m)^2} = 1 - \frac{RMSE^2}{\sigma_y^2} \quad (7)$$

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

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

L'équation (7) nous permet de comprendre les rapports entre les paramètres :

R^2 est donné comme une fonction de RMSE et de σ_y^2 .

Si nous prenons un ensemble de données mesurées où σ_y^2 demeure constante, nous déduisons que lorsque R^2 augmente, RMSE diminue.

Les corrélations entre ces deux variables, établies, mettront en évidence les relations entre la fraction d'insolation ou l'indice de clarté et la fraction diffuse. La comparaison entre les modèles, et l'évaluation de leur qualité seront déterminées par R^2 et par le RMSE.

Le meilleur modèle qui sera retenu est celui présentant un bon R^2 et un bon RMSE.

II.4 : Résultats et Discussions des Modèles

A partir de l'échantillon de l'année 2006, de mesures de l'irradiation globale, de l'irradiation diffuse et de la fraction d'insolation qui sont donné, par pas horaire, nous avons estimé la fraction diffuse journalière en fonction de σ , et en fonction de kt ; puis chercher les polynômes qui ajuste au sens des moindres carrés le nuage de points, à savoir les valeurs des constantes $a, b, c, d, a_1, b_1, c_1, d_1$, des polynômes citées dans ce chapitre .

-nous les fournissons avec les allures des courbes.

-Nous discuterons les différents résultats obtenus.

-Nous retiendrons les polynômes dont les coefficients de détermination les plus élevés et dont les RMSE les plus faibles

Remarque :

Interpolation au sens des moindres carrés

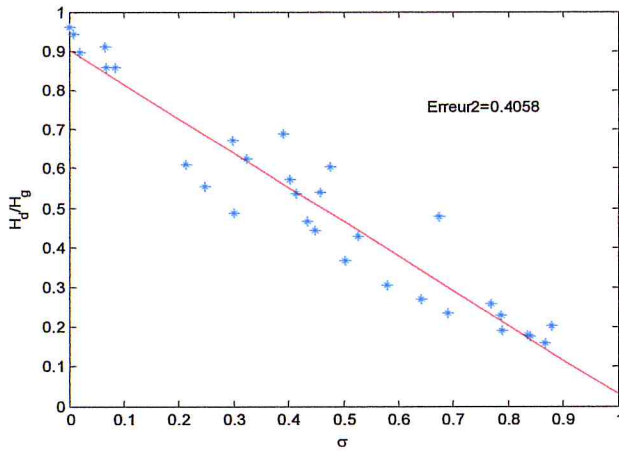
Afin d'établir un modèle mathématique liant plusieurs séries de données expérimentales. L'interpolation polynomiale consiste à approcher la courbe liant les deux séries de mesures par un polynôme. Les coefficients optimaux de ce polynôme sont ceux qui minimisent la variance de l'erreur d'interpolation. Ce principe est connu sous le nom de la méthode des moindres carrés. En Matlab La fonction 'polyfit' retourne le polynôme P de degré n permettant d'approcher la courbe au sens des moindres carrés.

II.4.1 : Site de Sénia

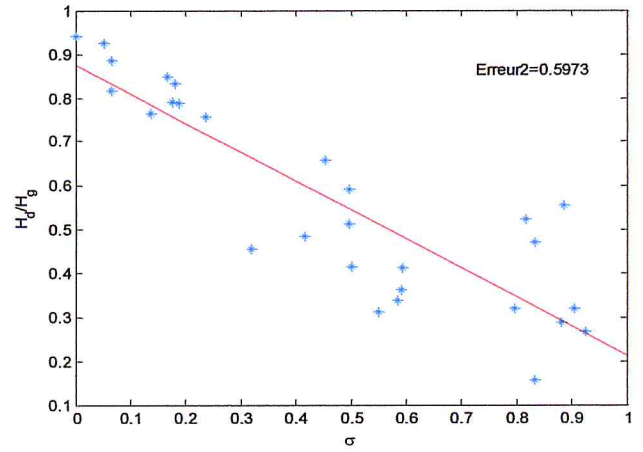
II.4.1.1 : Estimations des fractions diffuses journalières en fonction de la fraction d'Insolation : Mois Par Mois

a/Modèle Linéaire :

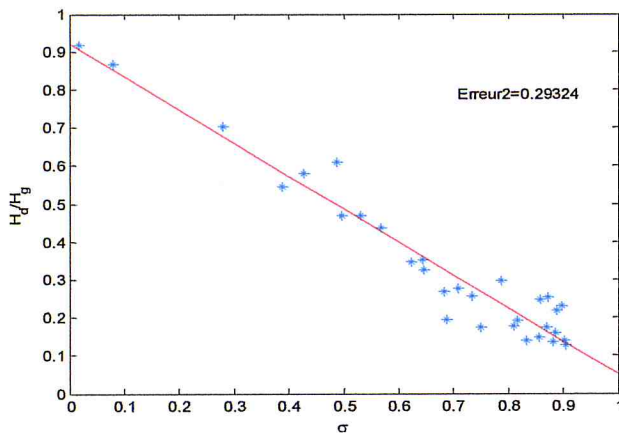
$$\frac{H_d}{H_g} = a + b \cdot \sigma$$



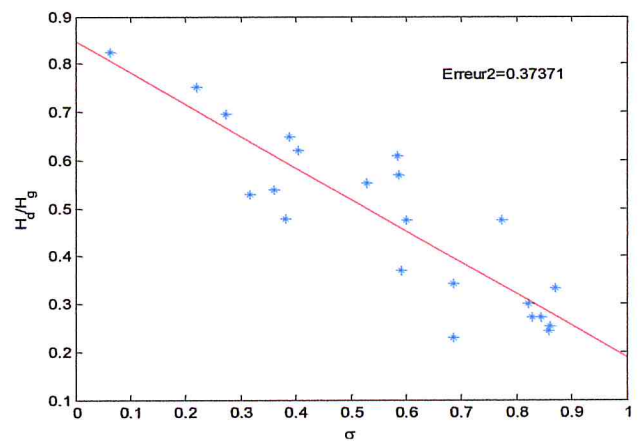
Mois de Janvier



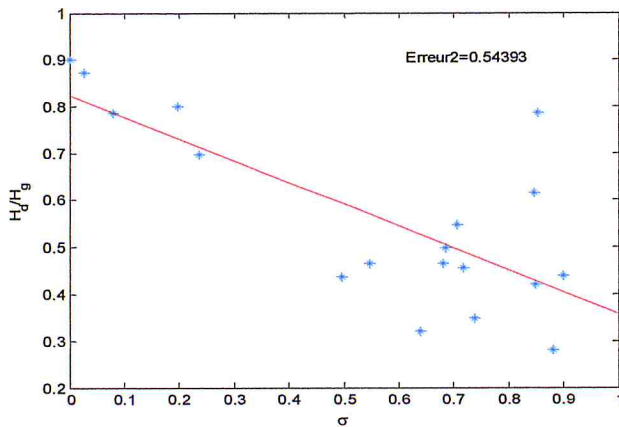
Mois de Février



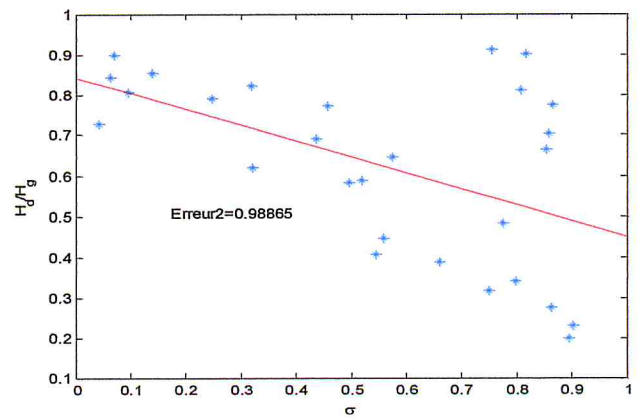
Mois de Mars



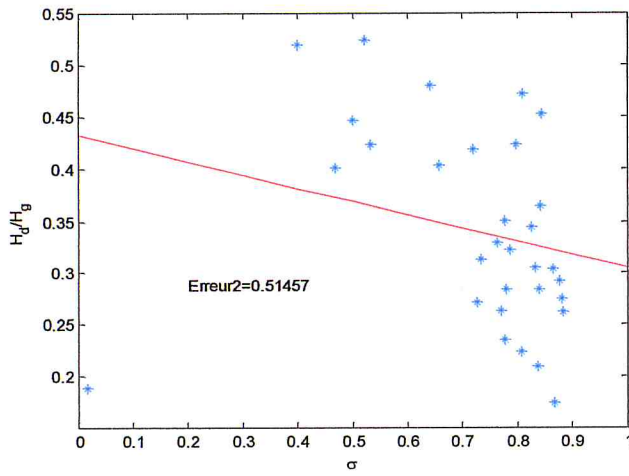
Mois d'Avril



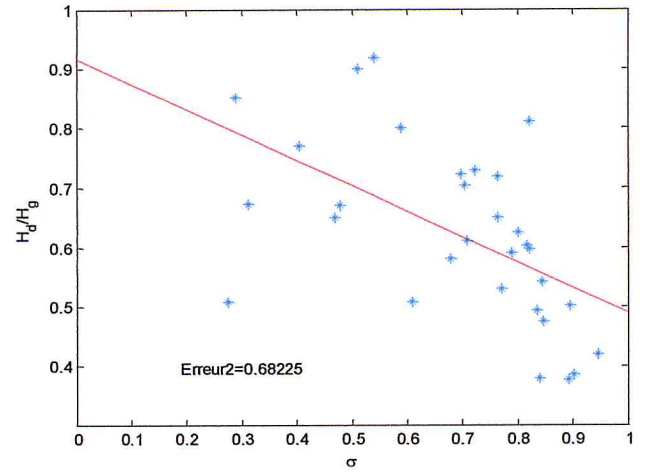
Mois de Mai



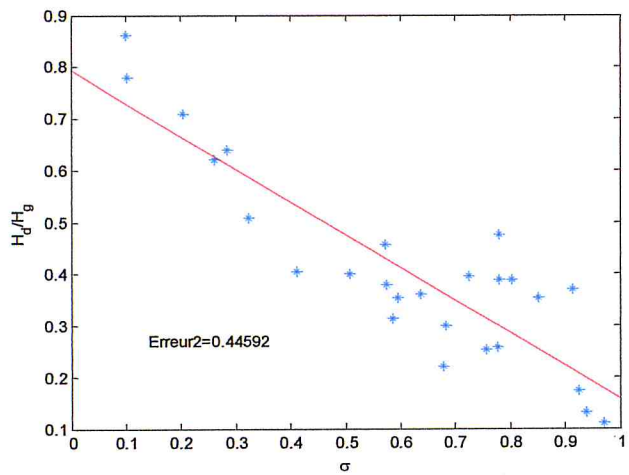
Mois de Juin



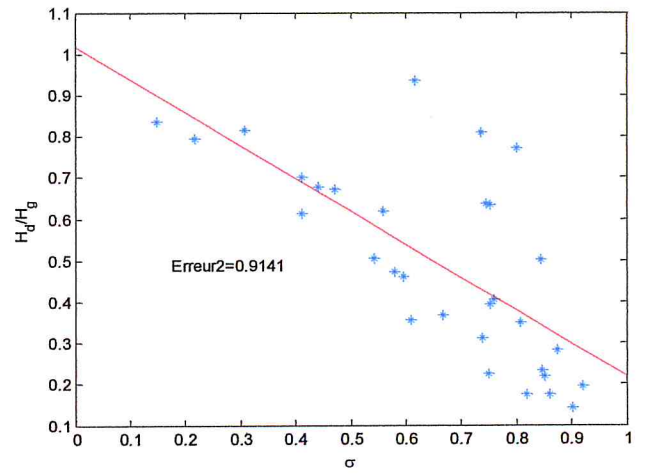
Mois de Juillet



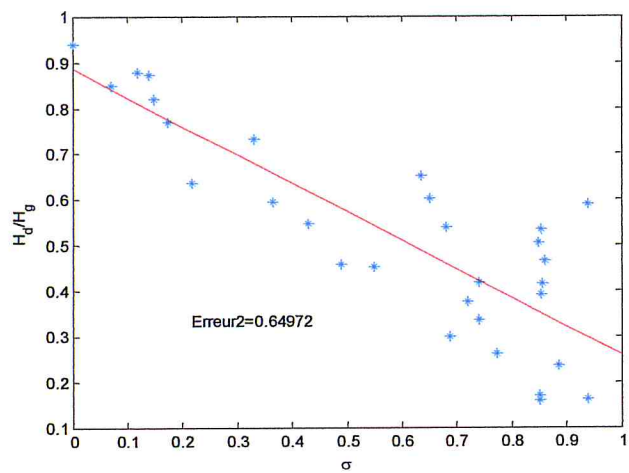
Mois d'Aout



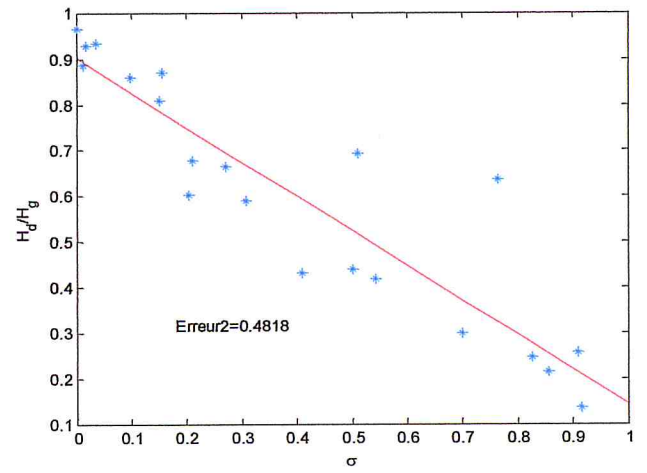
Mois de Septembre



Mois d'Octobre



Mois de Novembre



Mois de Décembre

Figure II.4.1.1.1: Distribution Linéaire représentative des fractions diffuses journalières en fonction de σ , Site de Sénia.

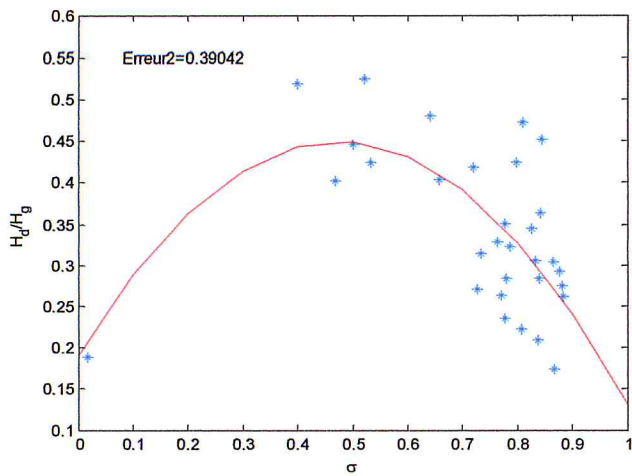
Le tableau II-4-1-1-1 expose les résultats du modèle linéaire, appliqué pour les fractions diffuses journalières en fonction de la fraction d'insolation mois par mois pour le site de Sénia.

Tableau II-4-1-1-1 : Résultats de l'ajustement par la relation $\frac{H_d}{H_g} = a + b \cdot \sigma$: Site de Sénia

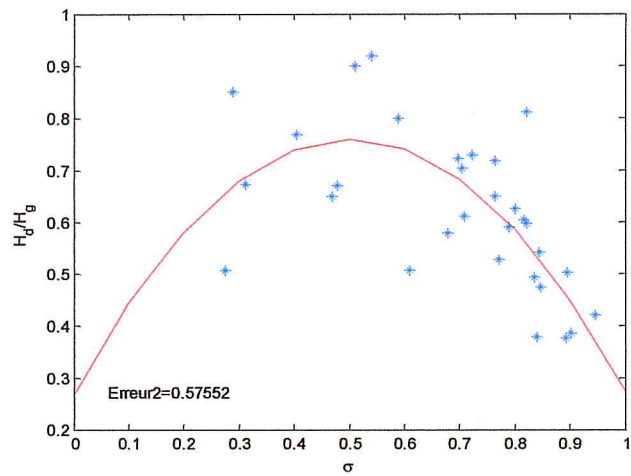
| Mois | b | a | R ² | RMSE |
|-----------|---------|--------|----------------|--------|
| Janvier | -0.8711 | 0.9009 | 0.9149 | 0.0741 |
| Février | -0.6610 | 0.8740 | 0.7563 | 0.1150 |
| Mars | -0.8708 | 0.9209 | 0.9377 | 0.0535 |
| Avril | -0.6582 | 0.8469 | 0.7891 | 0.0816 |
| Mai | -0.4654 | 0.8236 | 0.5485 | 0.1319 |
| Juin | -0.3928 | 0.8421 | 0.2657 | 0.1903 |
| Juillet | -0.1272 | 0.4324 | 0.0595 | 0.0939 |
| Aout | -0.4274 | 0.9171 | 0.3012 | 0.1246 |
| Septembre | -0.6342 | 0.7925 | 0.7746 | 0.0892 |
| Octobre | -0.7996 | 1.0177 | 0.4918 | 0.1669 |
| Novembre | -0.6278 | 0.8859 | 0.7114 | 0.1207 |
| Décembre | -0.7568 | 0.9003 | 0.8369 | 0.1077 |

Du tableau II-4-1-1-1, nous constatons que la qualité du modèle est très bonne pour le mois de Janvier, Février Mars, Avril, Septembre, Novembre et Décembre, ($R^2 > 0.7$), avec un RMSE varie relativement très peu ($0.07 < RMSE < 0.12$), cela se traduit par une meilleur dispersion autour de la droite de régression linéaire, $0.05 < RMSE < 0.12$. La qualité de l'estimation est dégradée pour les mois de Mai, Juin, Aout, Octobre avec : $R^2 < 0.5$ et $0.19 < RMSE < 0.22$.

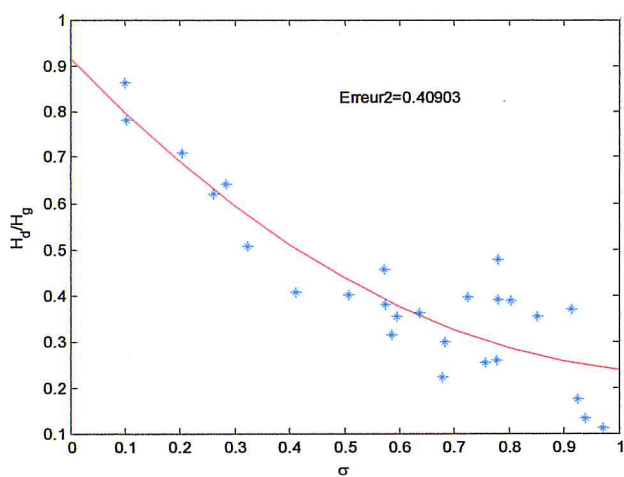
Le mois de Juillet présente un R^2 pratiquement nul = 0.0595 (qualité extrêmement faible) ; le modèle est totalement faible pour ce mois.



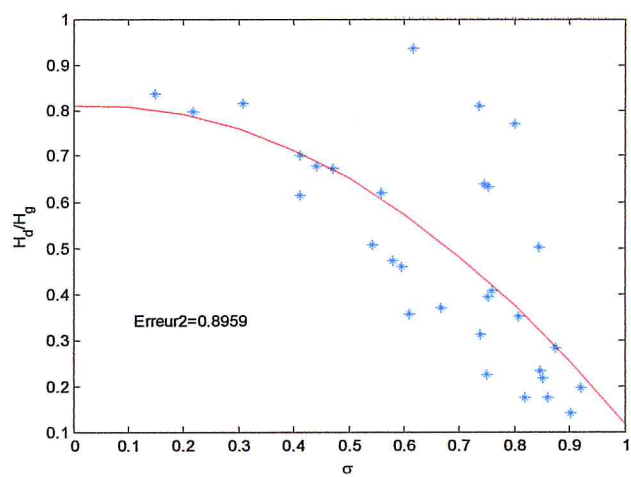
Mois de Juillet



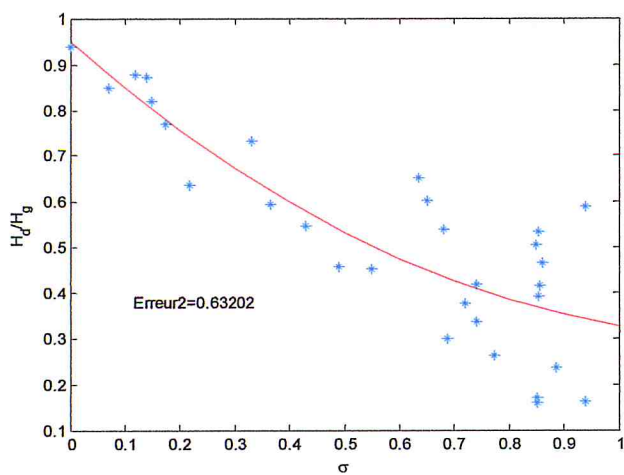
Mois d' Aout



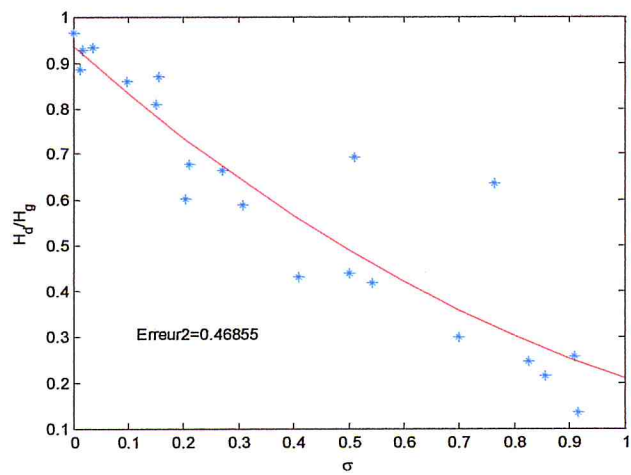
Mois de Septembre



Mois d'Octobre



Mois de Novembre



Mois de Décembre

Figure II.4.1.1.2: Distribution Quadratique représentative des fractions diffuses journalières en fonction de σ , Site de Sénia.

Le tableau II-4-1-1-2 expose les résultats du modèle quadratique, appliqué pour les fractions diffuses journalières en fonction de la fraction d'insolation mois par mois pour le site de Sénia.

Tableau II-4-1-1-2. Résultats de l'ajustement par la relation $\frac{H_d}{H_g} = a + b.\sigma + c.\sigma^2$: Site de Sénia

| Mois | c | b | a | R ² | RMSE |
|-----------|---------|---------|--------|----------------|--------|
| Janvier | 0.2912 | -1.1278 | 0.9355 | 0.9218 | 0.0710 |
| Février | 0.8039 | -1.4274 | 0.9839 | 0.8208 | 0.0986 |
| Mars | 0.2035 | -1.0852 | 0.9619 | 0.9416 | 0.0519 |
| Avril | 0.0137 | -0.6726 | 0.8499 | 0.7891 | 0.0815 |
| Mai | 0.9714 | -1.3430 | 0.9208 | 0.6629 | 0.1140 |
| Juin | 0.2046 | -0.5914 | 0.8726 | 0.2695 | 0.1898 |
| Juillet | -1.1509 | 1.0932 | 0.1897 | 0.4586 | 0.0713 |
| Aout | -1.9597 | 1.9676 | 0.2666 | 0.5028 | 0.1051 |
| Septembre | 0.5553 | -1.2307 | 0.9138 | 0.8103 | 0.0818 |
| Octobre | -0.7491 | 0.0554 | 0.8098 | 0.5119 | 0.1636 |
| Novembre | 0.4260 | -1.0496 | 0.9496 | 0.7269 | 0.1174 |
| Décembre | 0.3279 | -1.0540 | 0.9342 | 0.8458 | 0.1048 |

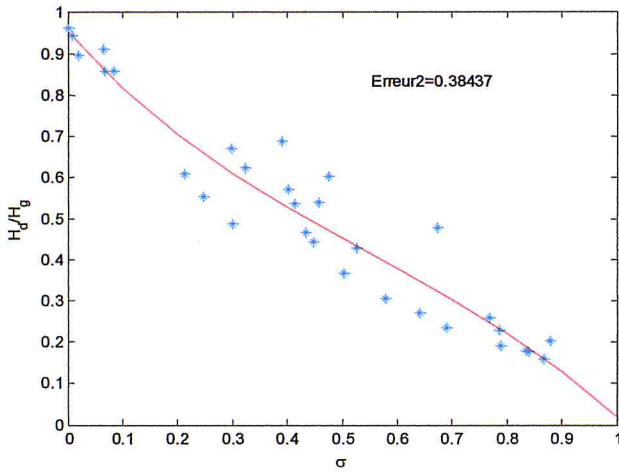
Du tableau II-4-1-1-2, nous constatons que la qualité du modèle est excellente pour le mois de Janvier, Février, Mars, Septembre, Décembre ($R^2 > 0.8$), la corrélation est donc très forte entre la fraction diffuse et la fraction d'insolation, et elle bonne pour le mois d'Avril et novembre ($0.7 < R^2 < 0.8$) avec $0.05 < RMSE < 0.10$, qui traduit une meilleur dispersion autour de la droite de régression pour ces mois.

Pour le mois de juin, le R^2 reste pratiquement le même que pour le modèle linéaire, cependant on remarque une importante augmentation de ce coefficient pour le mois de juillet qui a passé de 0.0595 à 0.4586 Pour les mois ; Mai, Aout, Octobre, la corrélation est moyenne entre la fraction diffuse et la fraction d'insolation. $0.5 < R^2 < 0.7$.

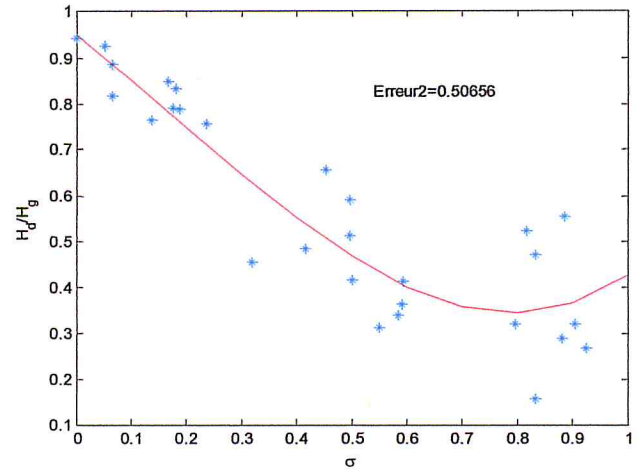


c/ Modèle basé sur la régression Cubique : Sénia

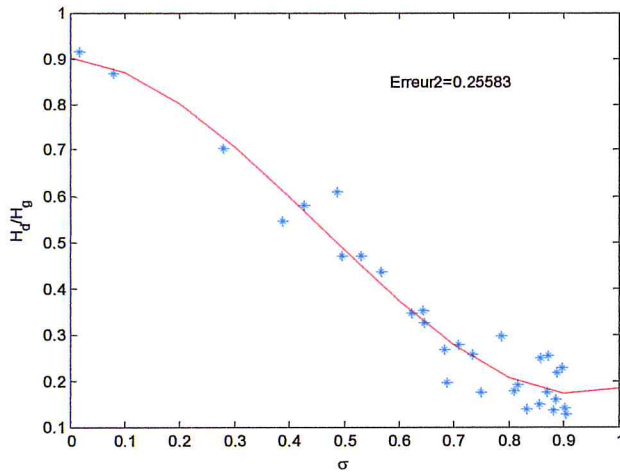
$$\frac{H_d}{H_g} = a + b.\sigma + c.\sigma^2 + d.\sigma^3$$



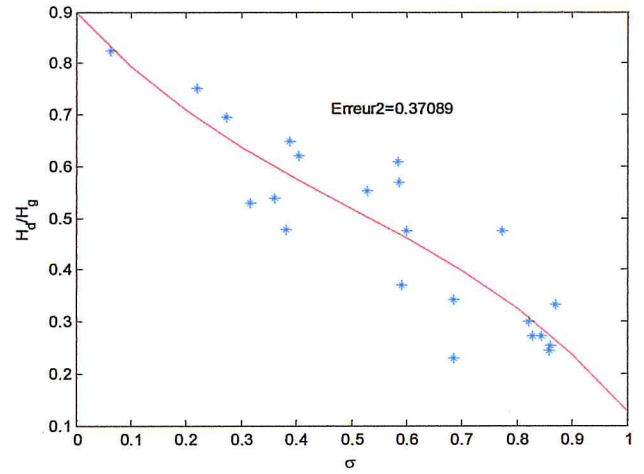
Mois de Janvier



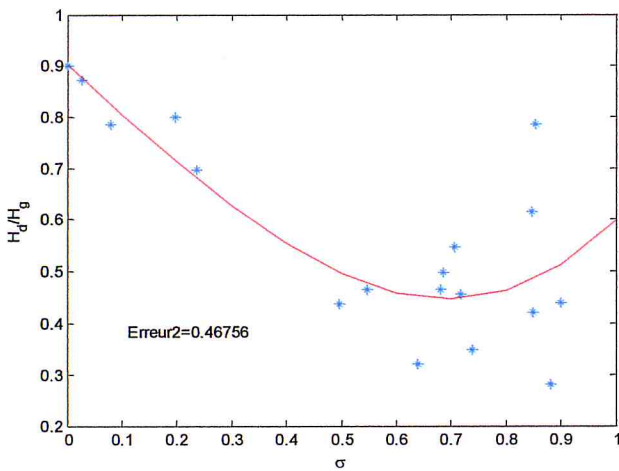
Mois de Février



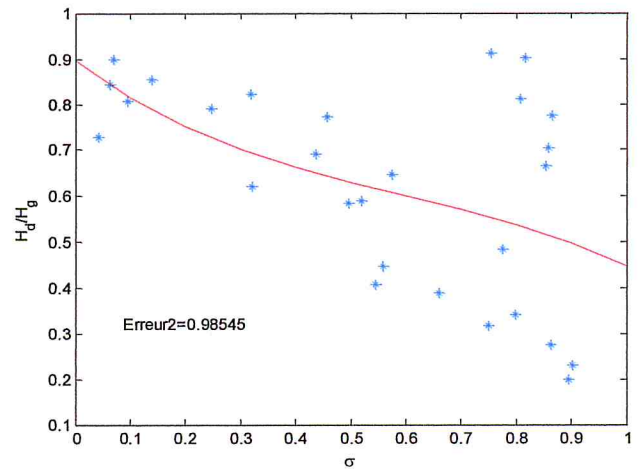
Mois de Mars



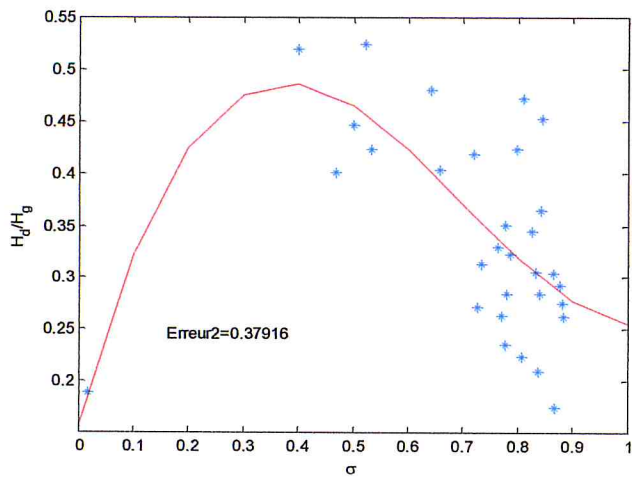
Mois d'Avril



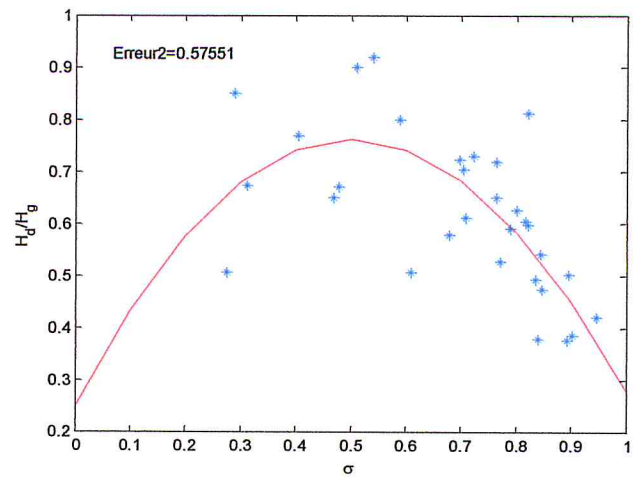
Mois de Mai



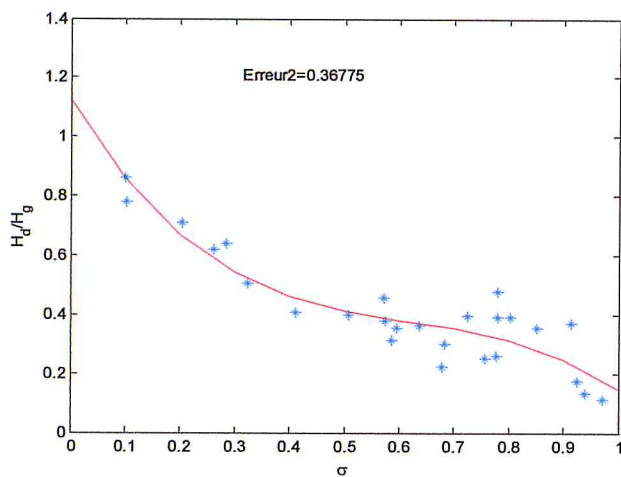
Mois de Juin



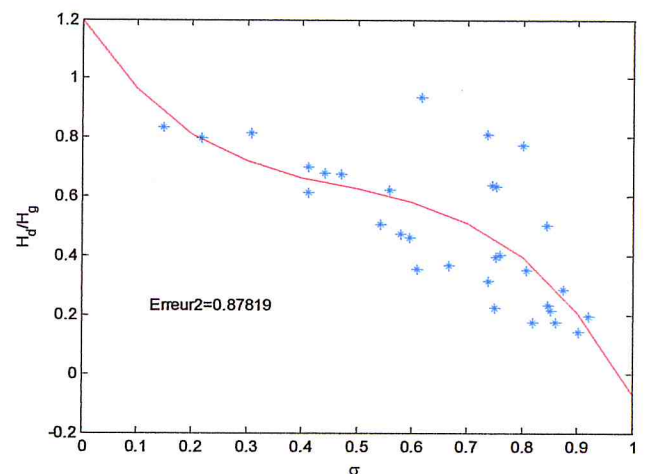
Mois de Juillet



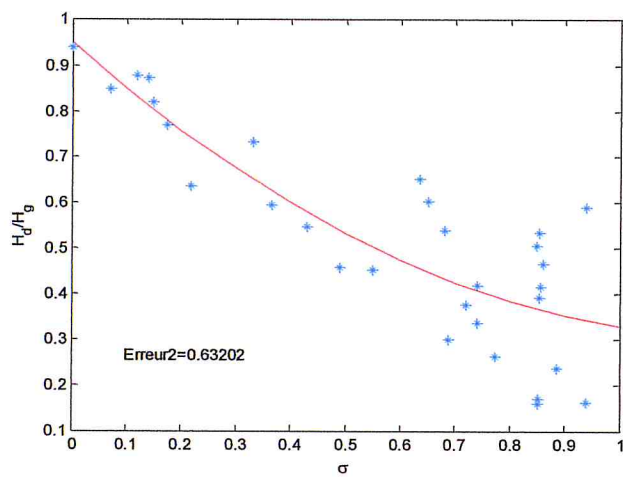
Mois d'Aout



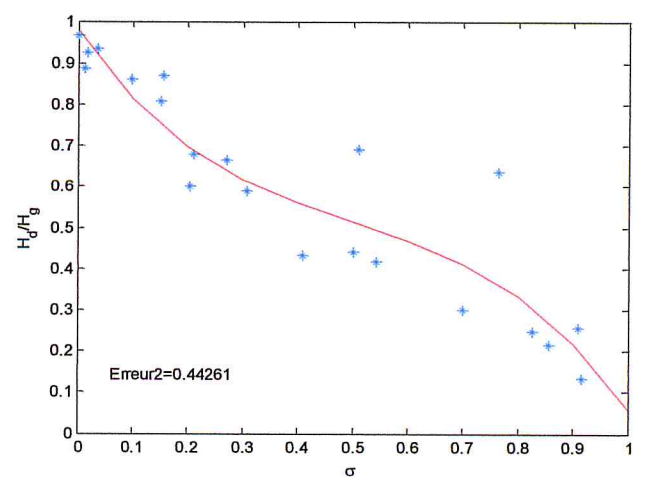
Mois de Septembre



Mois d'Octobre



Mois de Novembre



Mois de Décembre

Figure II.4.1.1.3: Distribution Cubique représentative des fractions diffuses journalières en fonction de σ , Site de Sénia.

Le tableau II-4-1-1-3 expose les résultats du modèle cubique, appliqué pour les fractions diffuses journalières en fonction de la fraction d'insolation mois par mois pour le site de Sénia.

Tableau II-4-1-1-3 Résultats de l'ajustement par la relation $\frac{H_d}{H_g} = a + b.\sigma + c.\sigma^2 + d.\sigma^3$: Site de Sénia

| Mois | d | c | b | a | R ² | RMSE |
|-----------|---------|---------|---------|--------|----------------|--------|
| Janvier | -0.8025 | 1.3389 | -1.4693 | 0.9516 | 0.9236 | 0.0702 |
| Février | 0.9647 | -0.5665 | -0.9215 | 0.9484 | 0.8247 | 0.0975 |
| Mars | 1.7118 | -2.3317 | -0.0971 | 0.9003 | 0.9526 | 0.0467 |
| Avril | -0.8175 | 1.2062 | -1.1602 | 0.8994 | 0.7923 | 0.0809 |
| Mai | 0.7053 | -0.0400 | -0.9681 | 0.9022 | 0.6664 | 0.1134 |
| Juin | -0.5582 | 1.0038 | -0.8953 | 0.8948 | 0.2705 | 0.1896 |
| Juillet | 1.7212 | -3.6192 | 1.9970 | 0.1560 | 0.4893 | 0.0692 |
| Aout | 0.1074 | -2.1564 | 2.0797 | 0.2472 | 0.5028 | 0.1051 |
| Septembre | -2.4294 | 4.5366 | -3.0885 | 1.1248 | 0.8467 | 0.0736 |
| Octobre | -3.5853 | 5.1293 | -2.8122 | 1.1965 | 0.5310 | 0.1603 |
| Novembre | 0.0334 | 0.3763 | -1.0297 | 0.9481 | 0.7269 | 0.1174 |
| Décembre | -1.9303 | 2.9164 | -1.9055 | 0.9776 | 0.8624 | 0.0990 |

On remarque que le modèle cubique nous donne de plus bon résultats que le modèle quadratique en montrant un coefficient de détermination assez bon. ($R^2 \approx 0.7$) sauf pour les mois de Juin et de Juillet où le $R^2 < 0.5$ et $0.05 < RMSE < 0.18$. Mais depuis la Figure II.4.1.1.3, on voit que les courbes n'expliquent pas le phénomène physique, on voit nettement que beaucoup d'entre eux présentent des distorsions.

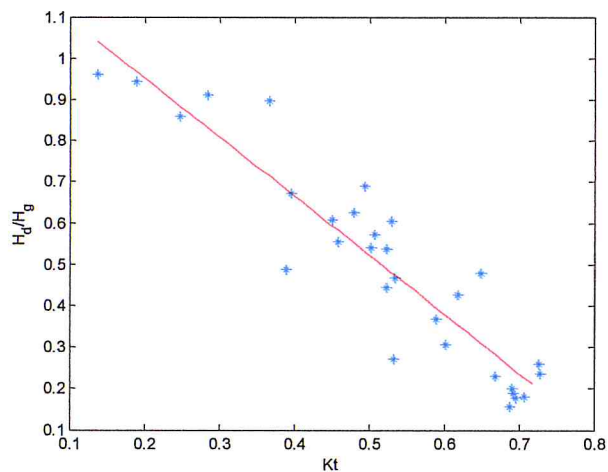
Conclusion concernant les modèles linéaires et polynomiaux en fonction de σ : Site de Sénia

Vu d'une part les résultats des paramètres statiques de ces 3 modèles, le RMSE et le R^2 et d'une autre part le sens physiques des courbes, on peut retenir le deuxième modèle parmi les 3 modèles qui présente une bonne qualité dans l'ensemble avec un R^2 acceptable et une dispersion satisfaisante autour de la courbe de régression pour l'ensemble des mois.

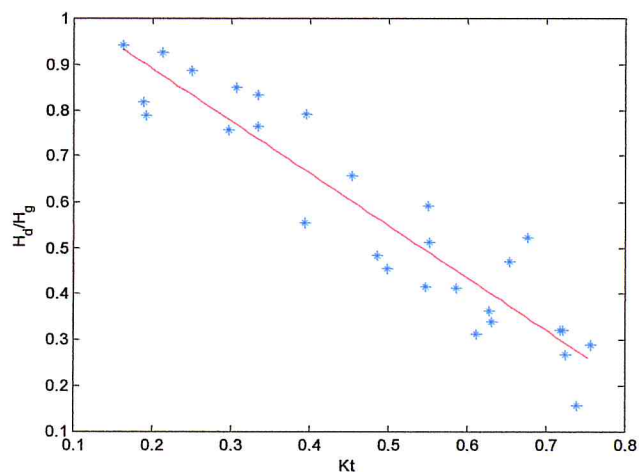
II.4.1.2 : Estimations des fractions diffuses journalières en fonction de l'Indice de Clarté : Mois Par Mois

a/Modèle Linéaire : Sénia

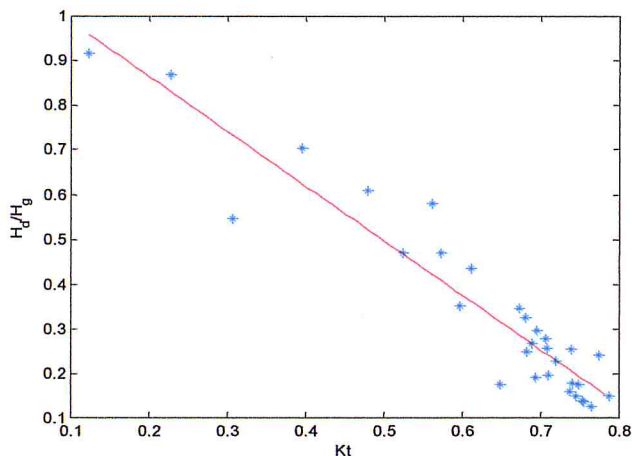
$$\frac{H_d}{H_g} = a + b.kt$$



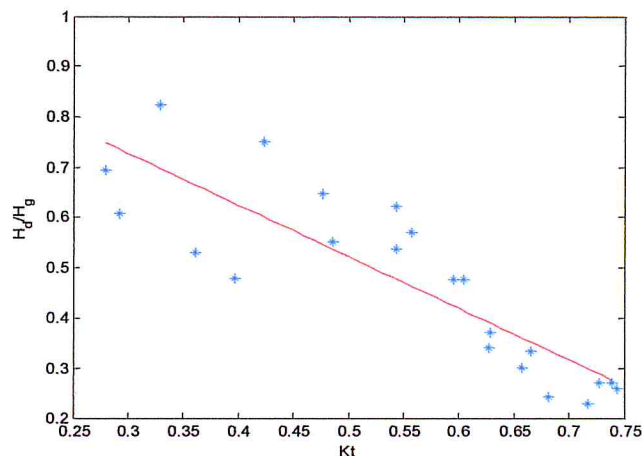
Mois de janvier



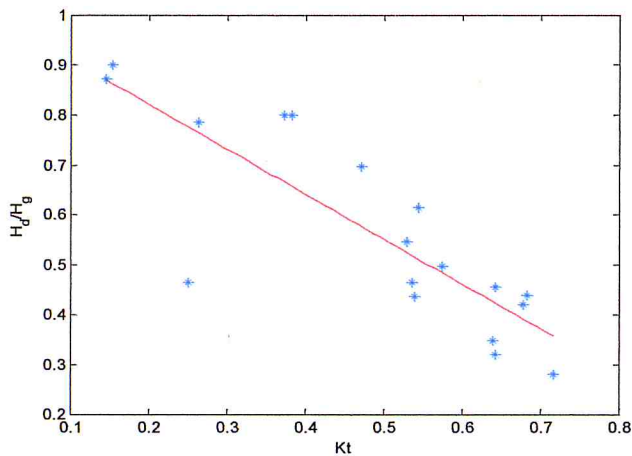
Mois de février



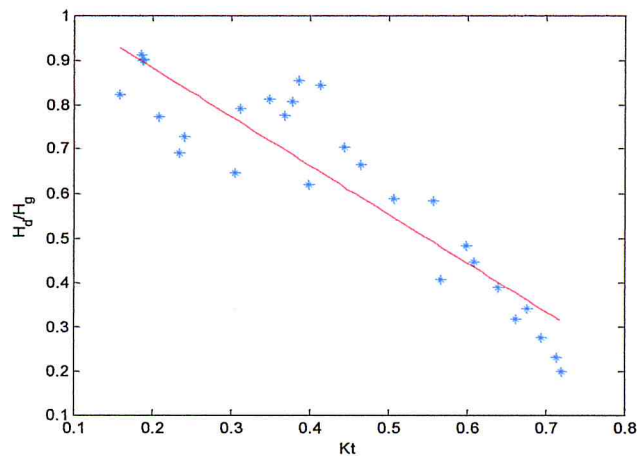
Mois de Mars



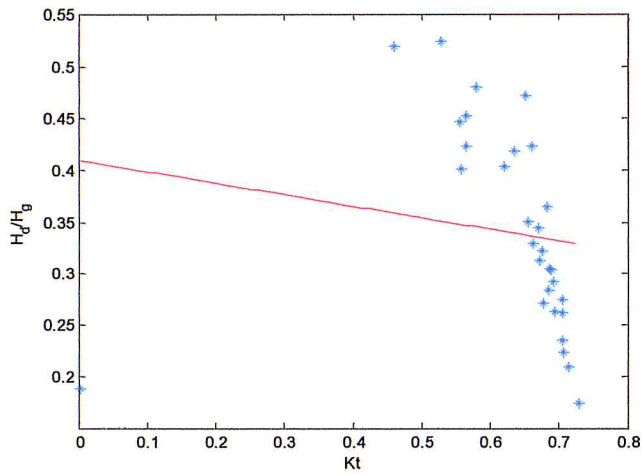
Mois d'Avril



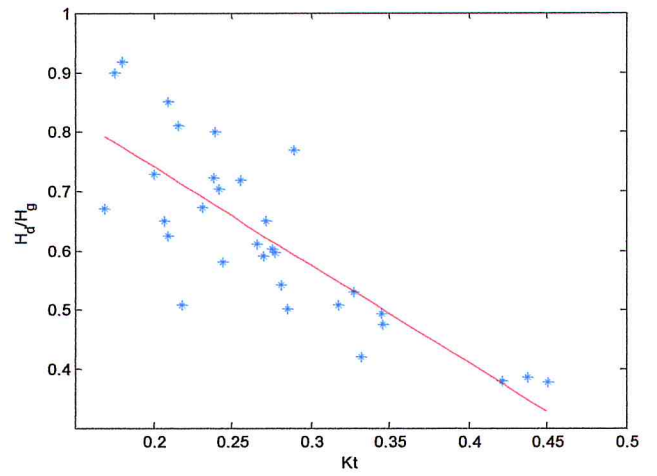
Mois de Mai



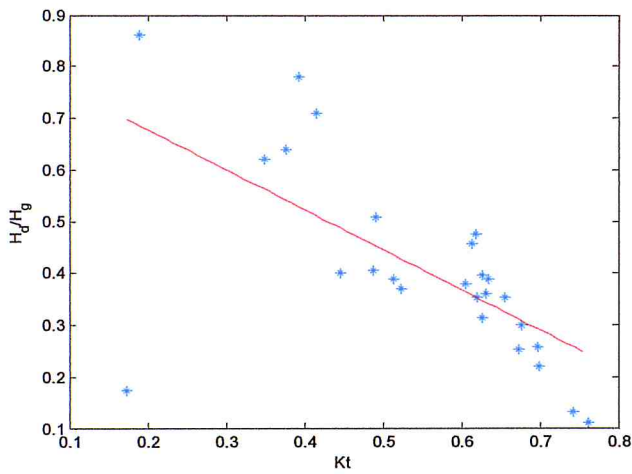
Mois de Juin



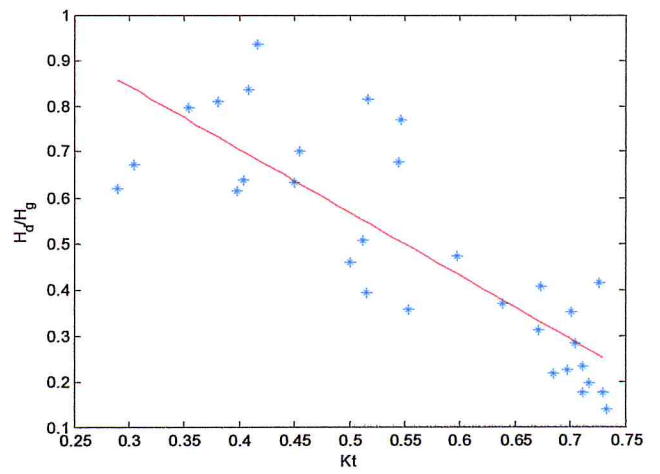
Mois de Juillet



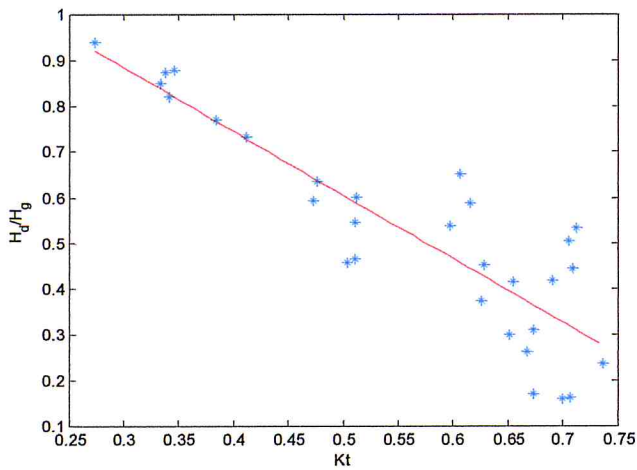
Mois d'Aout



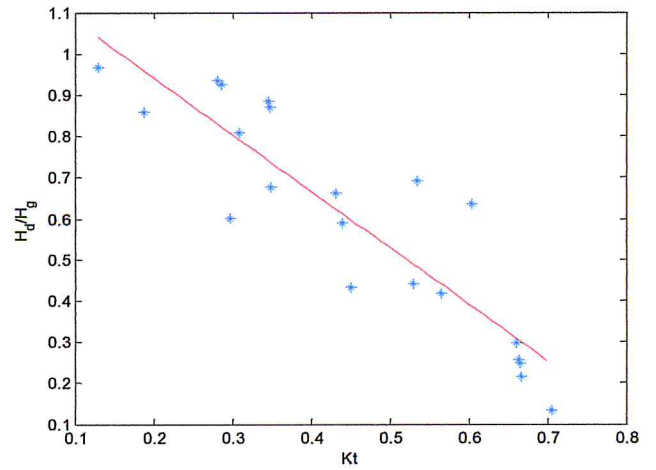
Mois de Septembre



Mois d'Octobre



Mois de Novembre



Mois de Décembre

Figure II.4.1.2.1: Distribution Linéaire représentative des fractions diffuses journalières en fonction de kt , Site de Sénia.

Le tableau II-4-1-2-1 expose les résultats du modèle linéaire, appliqué pour les fractions diffuses journalières en fonction de l'indice de clarté mois par mois pour le site de Sénia.

Tableau II-4-1-2-1 : Résultats de l'ajustement par la relation $\frac{H_d}{H_g} = a + b.kt$: Site de Sénia

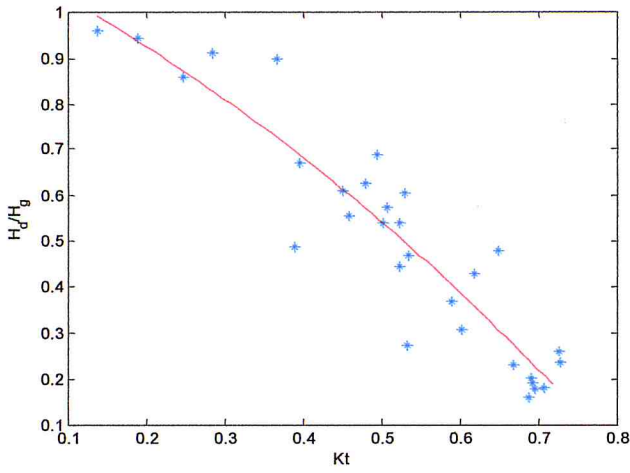
| Mois | b | a | R ² | RMSE |
|-----------|---------|--------|----------------|--------|
| Janvier | -1.4285 | 1.2373 | 0.8698 | 0.0916 |
| Février | -1.1398 | 1.1182 | 0.8760 | 0.0820 |
| Mars | -1.2194 | 1.1071 | 0.8941 | 0.0696 |
| Avril | -1.0257 | 1.0353 | 0.7409 | 0.0902 |
| Mai | -0.8992 | 1.0019 | 0.7023 | 0.1076 |
| Juin | -1.0962 | 1.1015 | 0.8250 | 0.0929 |
| Juillet | -0.1094 | 0.4093 | 0.0224 | 0.0958 |
| Aout | -1.6606 | 1.0743 | 0.6584 | 0.0871 |
| Septembre | -0.7731 | 0.8320 | 0.4171 | 0.1434 |
| Octobre | -1.3770 | 1.2564 | 0.6943 | 0.1298 |
| Novembre | -1.3941 | 1.3018 | 0.7706 | 0.1075 |
| Décembre | -1.3762 | 1.2171 | 0.7999 | 0.1193 |

Du tableau II-4-1-2-1 nous constatons une corrélation assez forte ($0.7 < R^2 < 0.90$) entre les variables étudiées pour le mois de Janvier à Juin et les mois Novembre et Décembre.

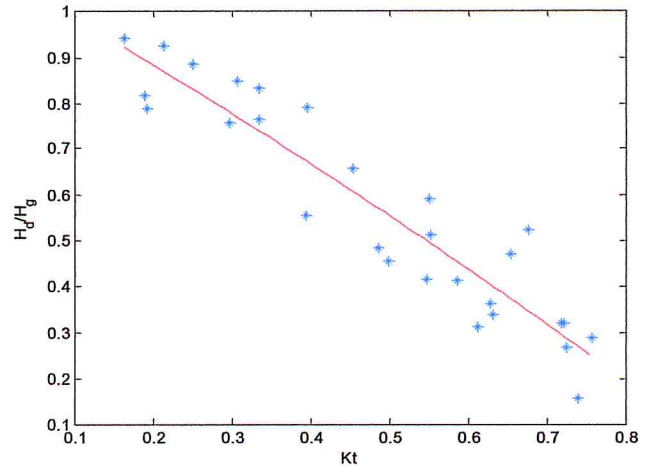
La dispersion des points assez faible pour ces mêmes mois, et atteint son minima le mois de mars (0.06). la qualité du modèle est faible pour les mois de, Septembre, moyenne pour les mois d'Aout et Octobre. Pour le mois de Juillet le $R^2=0.0224$, une corrélation pratiquement nulle.

b/ Modèle basé sur la régression polynomiale du second degré : Sénia

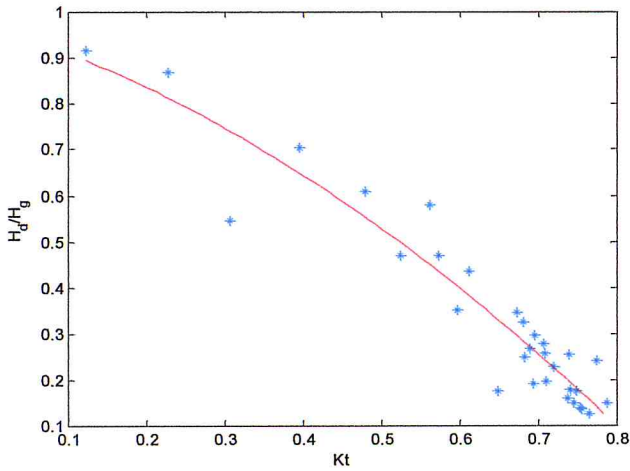
$$\frac{H_d}{H_g} = a + b.kt + c.kt^2$$



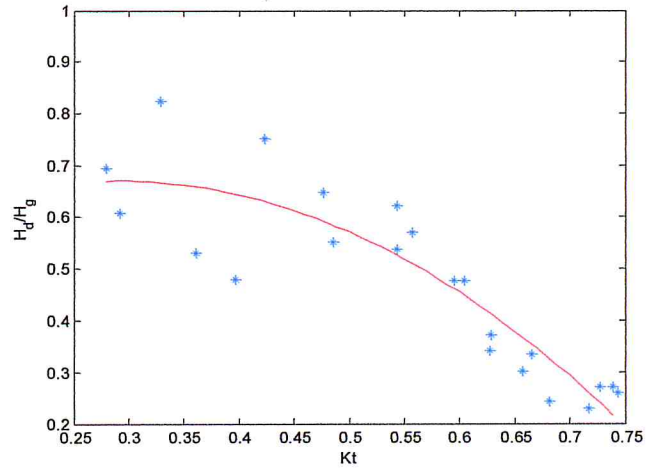
Mois de Janvier



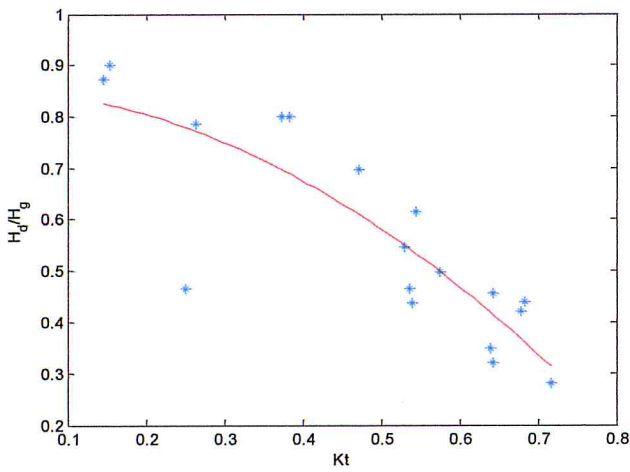
Mois de Février



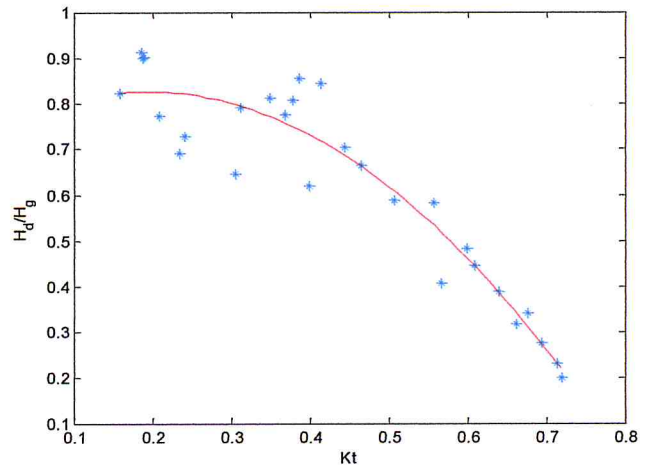
Mois de Mars



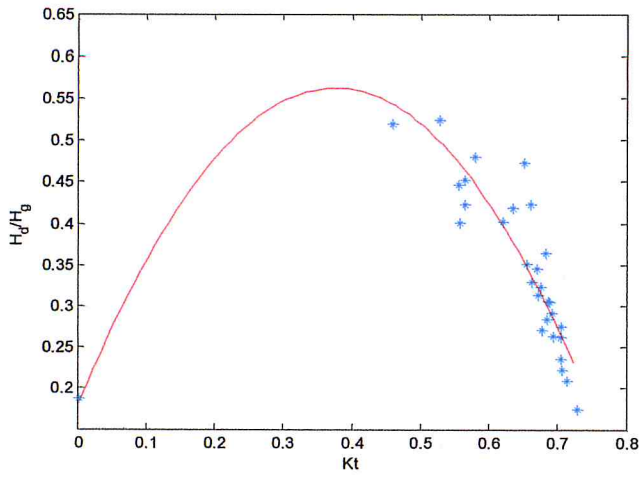
Mois d'Avril



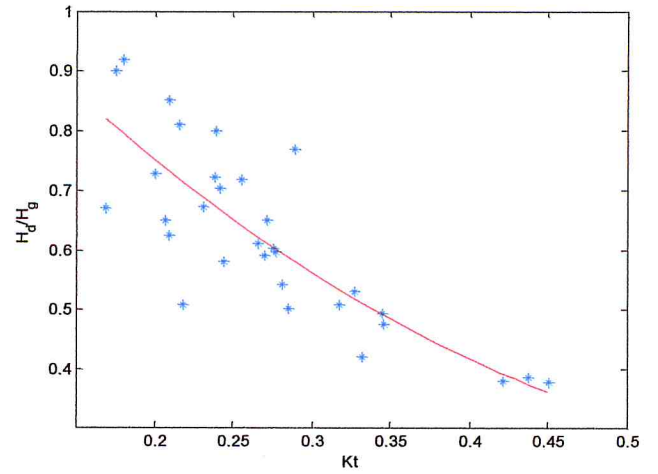
Mois de Mai



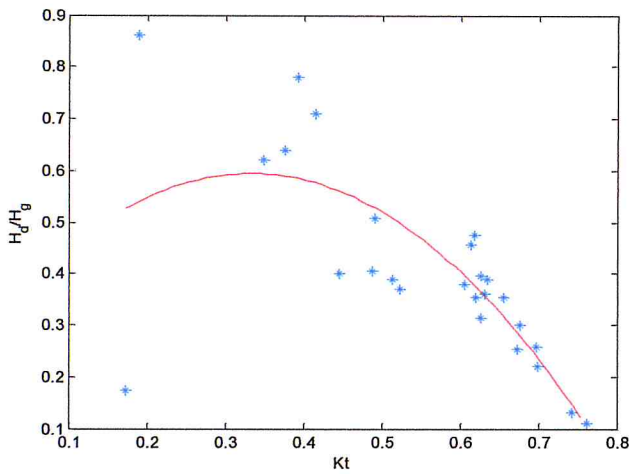
Mois de Juin



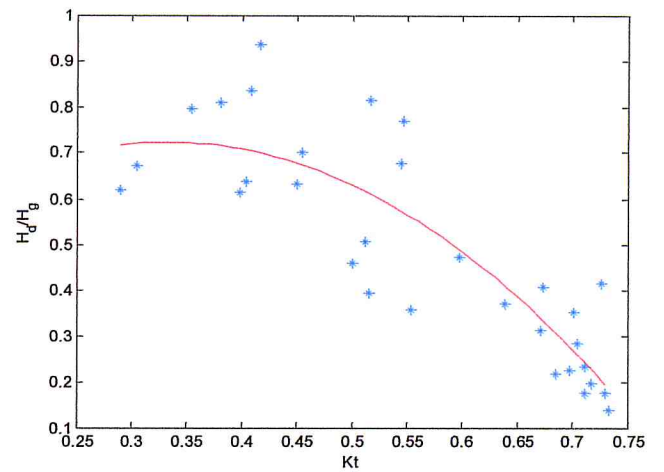
Mois de Juillet



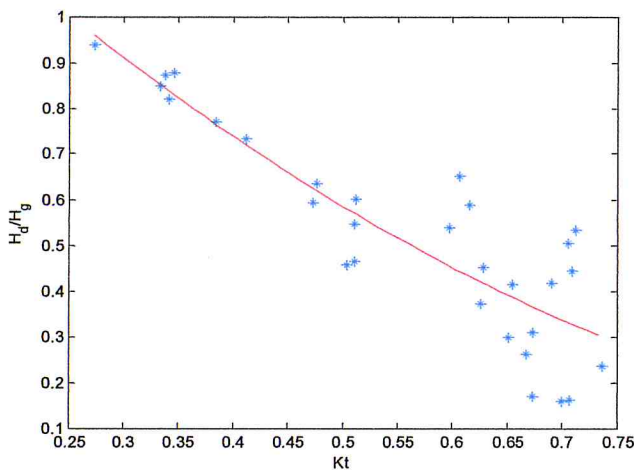
Mois d'Aout



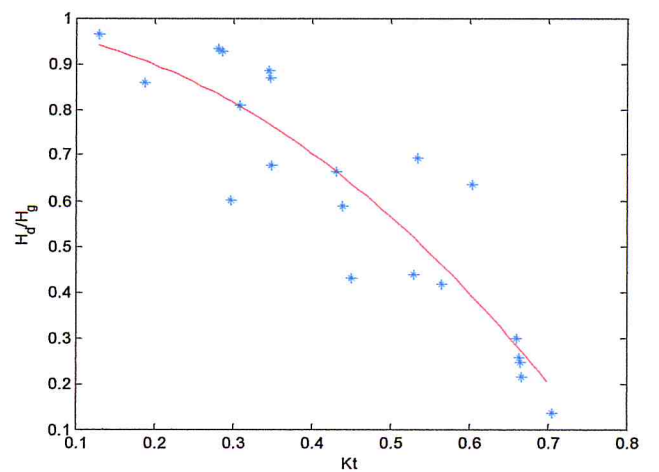
Mois de Septembre



Mois d'Octobre



Mois de Novembre



Mois de Décembre

Figure II.4.1.2.2: Distribution Quadratique représentative des fractions diffuses journalières en fonction de kt , Site de Sénia.

Le tableau II-4-1-2-2 expose les résultats du modèle quadratique, appliqué pour les fractions diffuses journalières en fonction de l'indice de clarté mois par mois pour le site de Sénia.

Tableau II-4-1-2-2 : Résultats de l'ajustement par la relation $\frac{H_d}{H_g} = a + b.kt + c.kt^2$: Site de Sénia

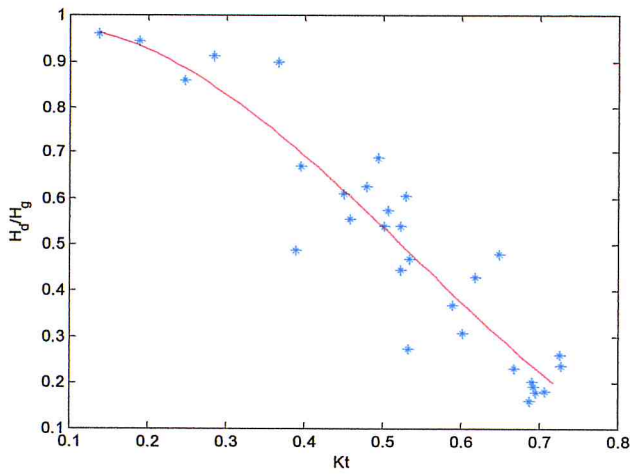
| Mois | c | b | a | R ² | RMSE |
|-----------|---------|---------|--------|----------------|--------|
| Janvier | -0.6446 | -0.8322 | 1.1181 | 0.8751 | 0.0897 |
| Février | -0.1503 | -1.0001 | 1.0911 | 0.8763 | 0.0819 |
| Mars | -0.6925 | -0.5347 | 0.9692 | 0.9035 | 0.0664 |
| Avril | -2.2502 | 1.3058 | 0.4810 | 0.8001 | 0.0793 |
| Mai | -0.9724 | -0.0611 | 0.8554 | 0.7216 | 0.1041 |
| Juin | -2.1882 | 0.8370 | 0.7460 | 0.8991 | 0.0705 |
| Juillet | -2.7407 | 2.0585 | 0.1756 | 0.8371 | 0.0391 |
| Aout | 2.2433 | -3.0278 | 1.2687 | 0.6675 | 0.0859 |
| Septembre | -2.6685 | 1.7785 | 0.2982 | 0.5655 | 0.1238 |
| Octobre | -3.3869 | 2.2661 | 0.3440 | 0.7488 | 0.1176 |
| Novembre | 0.9784 | -2.4123 | 1.5464 | 0.7753 | 0.1064 |
| Décembre | -1.4098 | -0.1244 | 0.9796 | 0.8199 | 0.1132 |

De la figure II.4.1.2.2, nous voyons clairement que Les courbes qui passent au mieux au milieu du nuage de points rendant minimum le RMSE correspondant aux mois de Janvier, Février, Mars, Avril, Juin, Octobre, Novembre, Décembre. On remarque une bonne qualité du modèle puisque $R^2 > 0,70$ pour ces mois, La corrélation est Moyenne pour les mois d'Aout et Septembre. $0.5 < R^2 < 0.7$, mais on remarque nettement la hausse du coefficient de détermination R^2 pour le mois de Juillet qui a passé d'une valeur pratiquement nulle pour le modèle linéaire à 0.8371 pour le modèle quadratique.

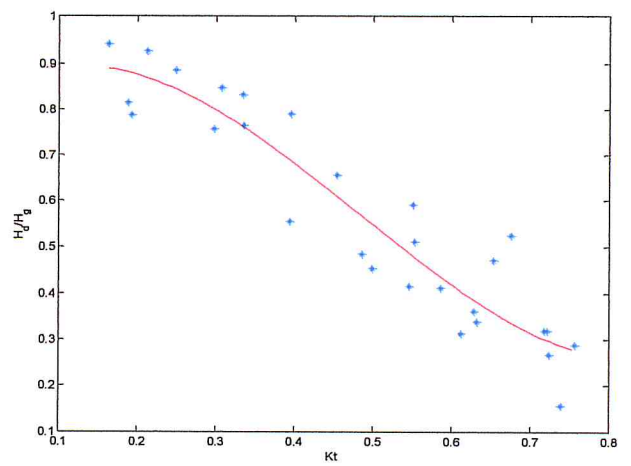
Les séquences du RMSE sont pratiquement les mêmes et varient entre 0.07 et 0.12.

c/ Modèle basé sur la régression polynomiale du Troisième degré : Sénia

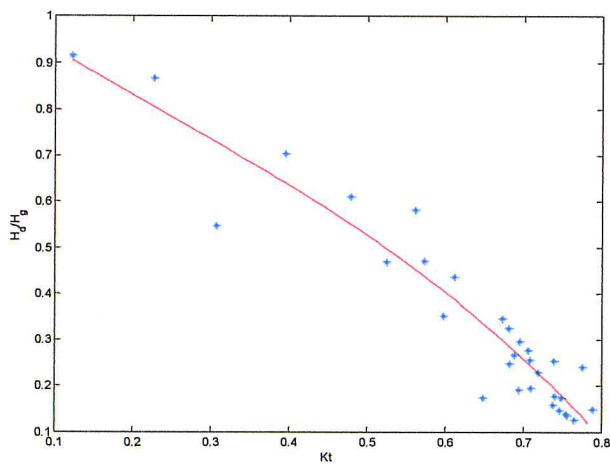
$$\frac{H_d}{H_g} = a + b.kt + c.kt^2 + d.kt^3$$



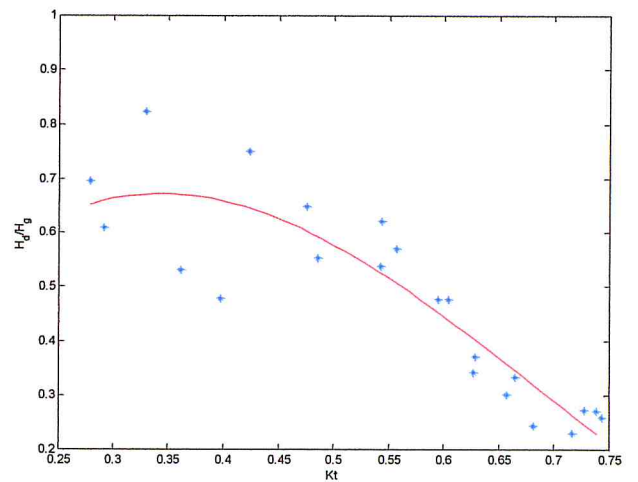
Mois de Janvier



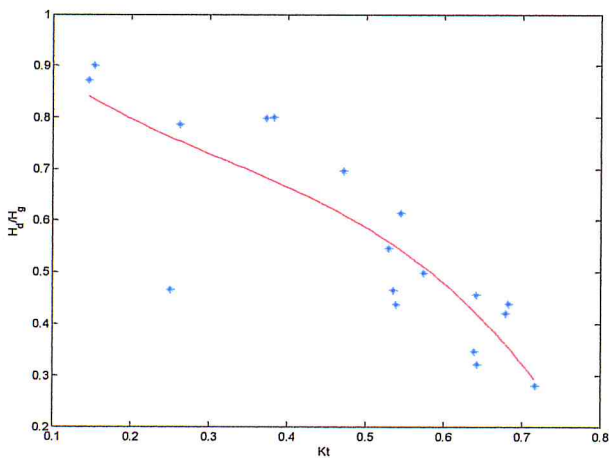
Mois de Février



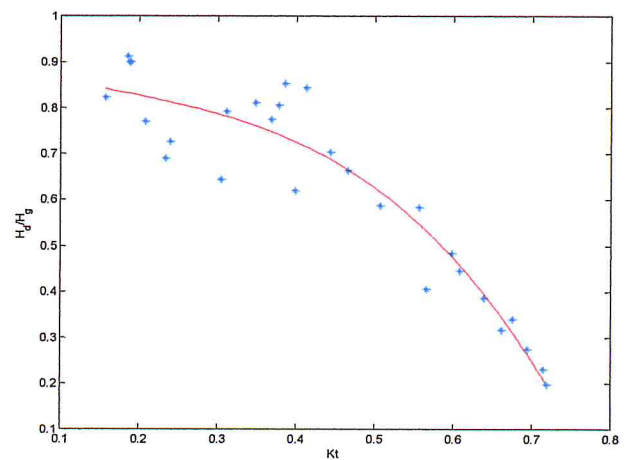
Mois de Mars



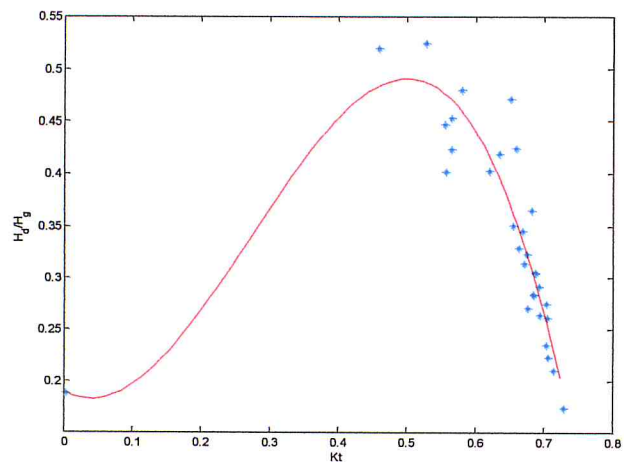
Mois d'Avril



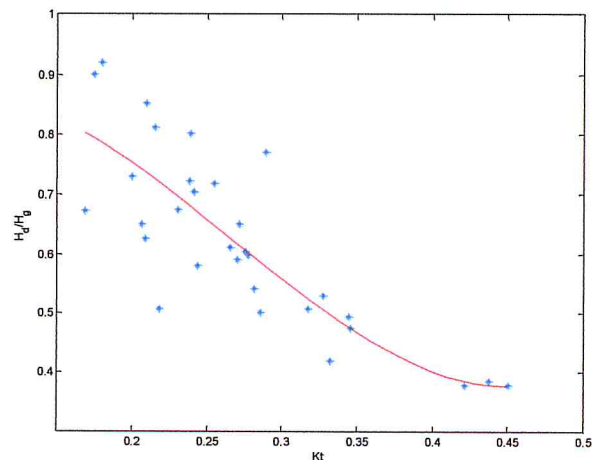
Mois de Mai



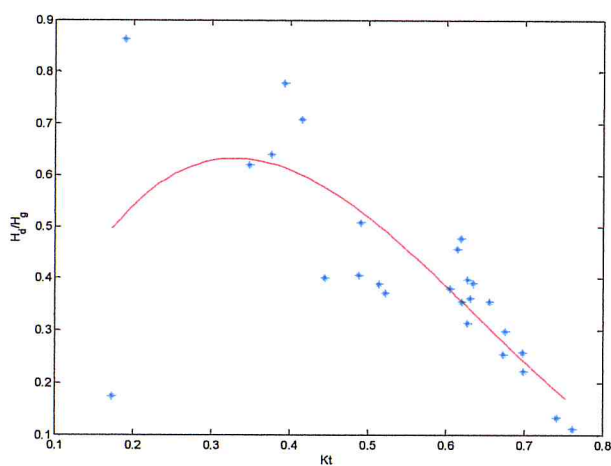
Mois de Juin



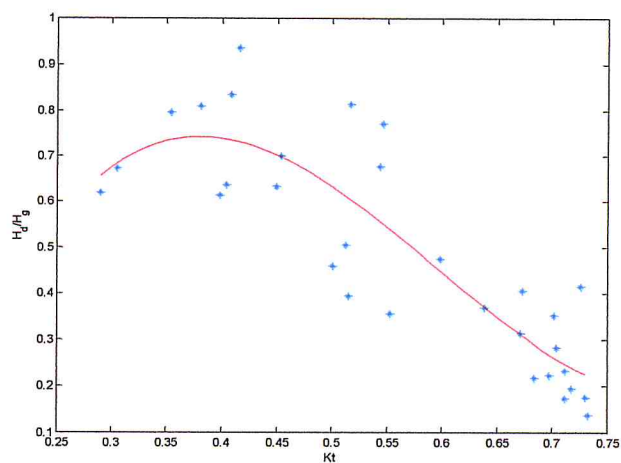
Mois de Juillet



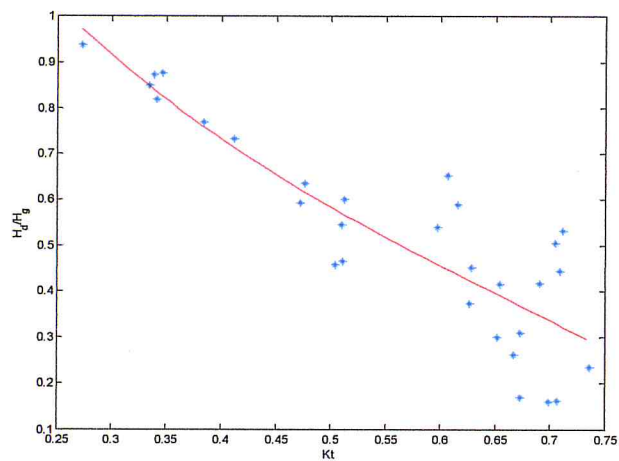
Mois d'Aout



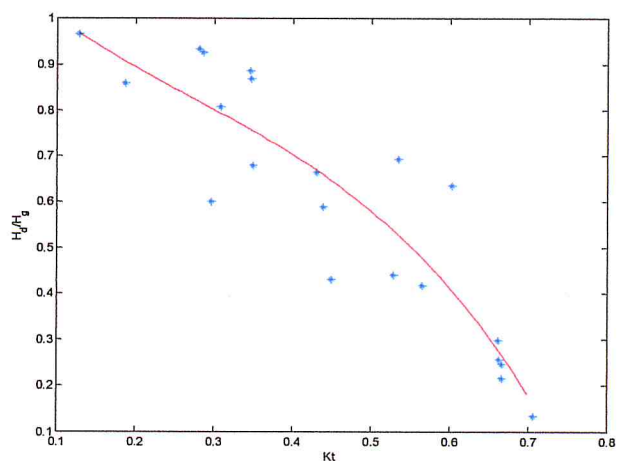
Mois de Septembre



Mois d'Octobre



Mois de Novembre



Mois de Décembre

Figure II.4.1.2.3: Distribution Cubique représentative des fractions diffuses journalières en fonction de kt , Site de Sénia.

Le tableau II-4-1-2-3 expose les résultats du modèle cubique, appliqué pour les fractions diffuses journalières en fonction de l'indice de clarté mois par mois pour le site de Sénia.

Tableau II-4-1-2-3. Résultats de l'ajustement par la relation $\frac{H_d}{H_g} = a + b.kt + c.kt^2 + d.kt^3$: Site de Sénia

| Mois | d | c | b | a | R2 | RMSE |
|-----------|---------|----------|---------|---------|--------|--------|
| Janvier | 2.6124 | -4.1977 | 0.6233 | 0.9483 | 0.8768 | 0.0891 |
| Février | 3.6546 | -5.2527 | 1.1568 | 0.8260 | 0.8816 | 0.0801 |
| Mars | -0.9520 | 0.6768 | -1.1163 | 1.0348 | 0.9041 | 0.0662 |
| Avril | 4.4152 | -9.1345 | 4.7131 | -0.0477 | 0.8034 | 0.0786 |
| Mai | -2.8135 | 2.7021 | -1.4956 | 1.0114 | 0.7253 | 0.1034 |
| Juin | -2.7374 | 1.4049 | -0.5837 | 0.9100 | 0.9012 | 0.0698 |
| Juillet | -6.3382 | 5.1415 | -0.3842 | 0.1897 | 0.8646 | 0.0356 |
| Aout | 20.3780 | -16.4127 | 2.3828 | 0.7707 | 0.6709 | 0.0855 |
| Septembre | 5.2759 | -10.0427 | 4.9036 | -0.0813 | 0.5801 | 0.1217 |
| Octobre | 14.7388 | -26.1965 | 13.5274 | -1.4235 | 0.7612 | 0.1147 |
| Novembre | -2.1466 | 4.2827 | -4.0363 | 1.7992 | 0.7756 | 0.1064 |
| Décembre | -3.3249 | 2.7469 | -1.6744 | 1.1467 | 0.8227 | 0.1123 |

De la figure II.4.1.2.3, nous voyons clairement que Les courbes qui passent au mieux au milieu du nuage de points rendant minimum le RMSE correspondant aux mois de Janvier, Février, Mars, Avril, Mai, Juin, Juillet, Octobre, Novembre, Décembre et les points présentent une faible dispersion autour de la droite. , de qualité très forte puisque $R^2 > 0,80$, La corrélation est Moyenne pour le mois de Septembre, ainsi on remarque une nette hausse du R^2 et une baisse du RMSE et ce, par rapport aux modèles linéaires et quadratique, les courbes ne présentent pas d'ondulations, elles sont donc compatibles avec la physique.

Conclusion concernant les modèles linéaires et polynomiaux en fonction de kt : Site de Sénia

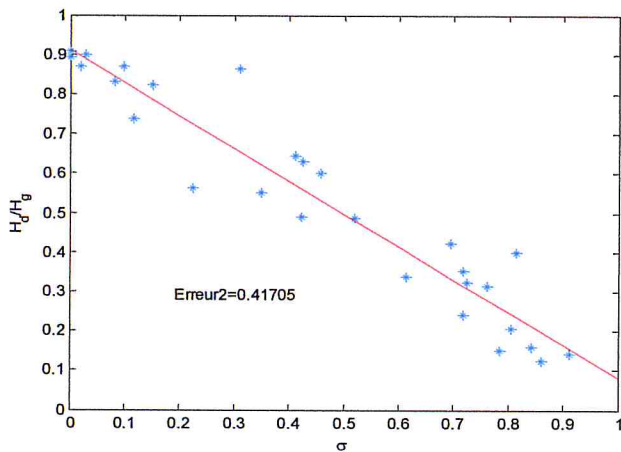
Le modèle cubique explique très bien les variations de kt_i , par les variations de $\frac{H_{d,i}}{H_{g,i}}$, avec une très bonne qualité vu que le coefficient de détermination oscille dans la plus part des mois entre 0.8 et 0.9, ainsi qu'une meilleur dispersion autour de la courbe de régression.

II.4.2 : Site de Tlemcen

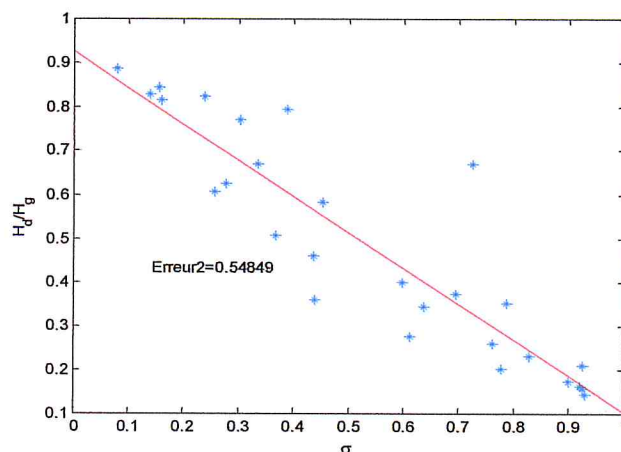
II.4.2.1 : Estimations des fractions diffuses Journalières en fonction de la fraction d'Insolation : Mois Par Mois

a/Modèle Linéaire : Tlemcen

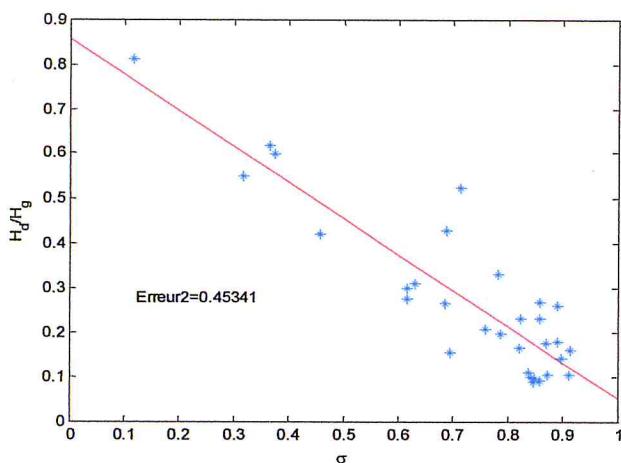
$$\frac{H_d}{H_g} = a + b \cdot \sigma$$



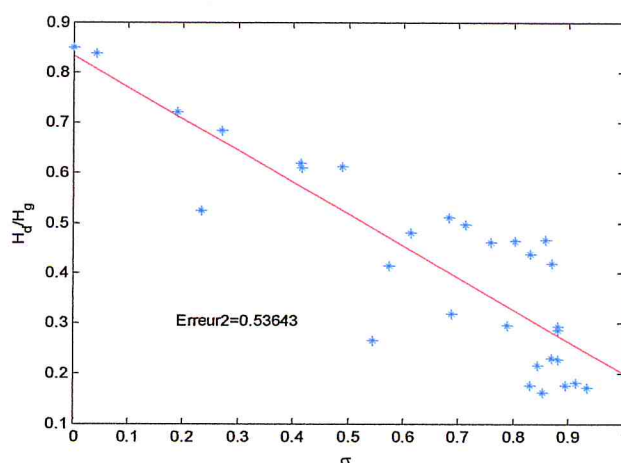
Mois de Janvier



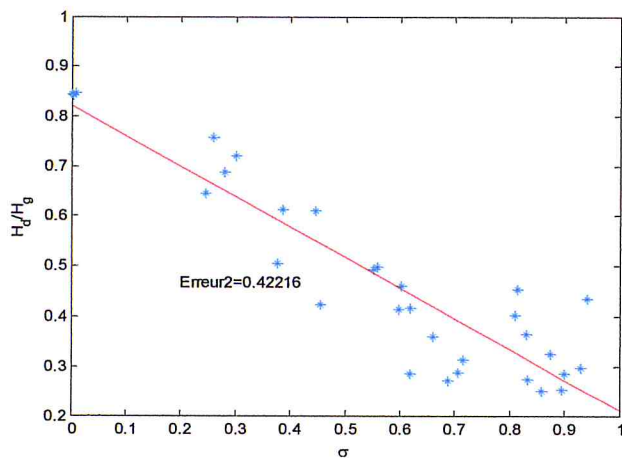
Mois de Février



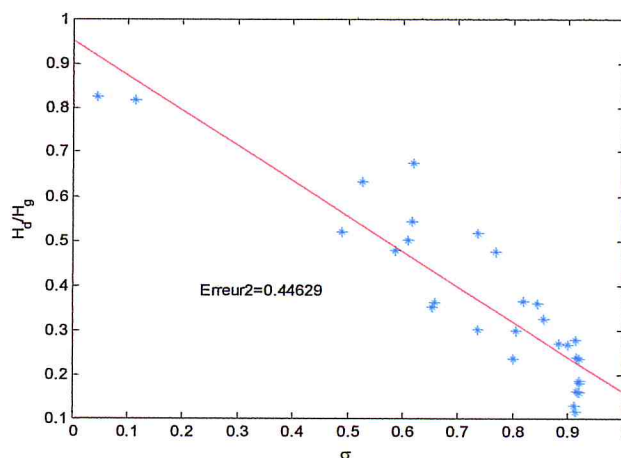
Mois de Mars



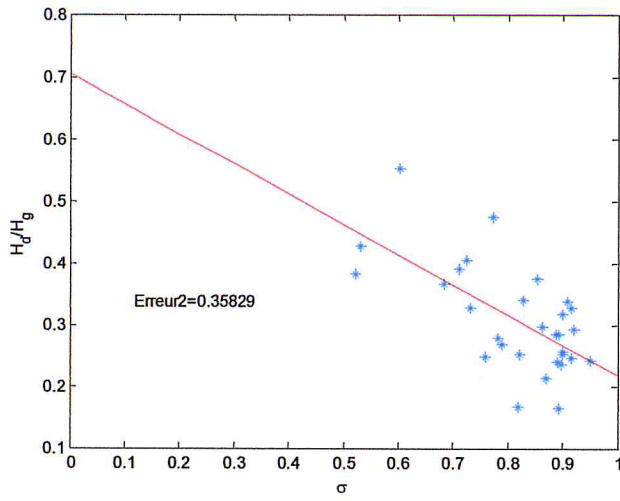
Mois d'Avril



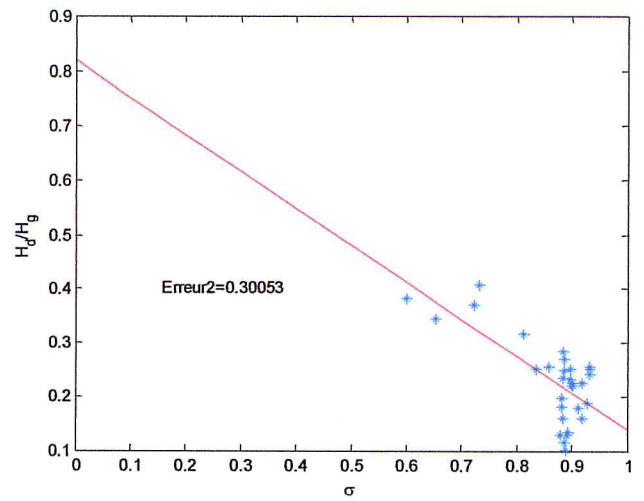
Mois de Mai



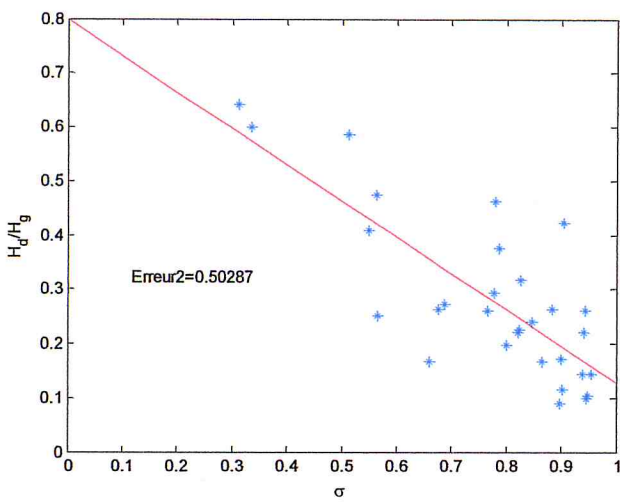
Mois de Juin



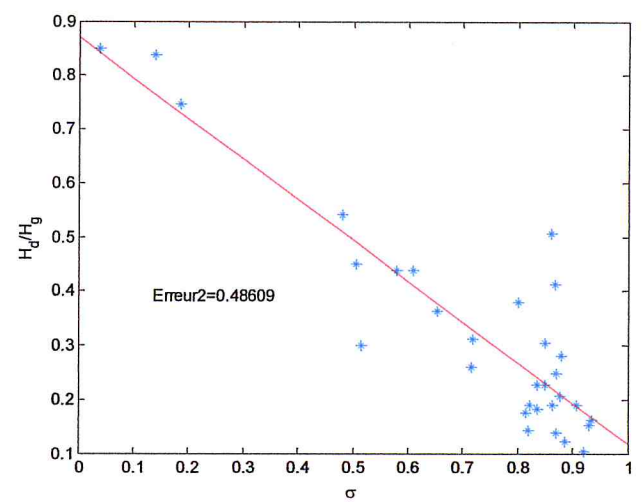
Mois de Juillet



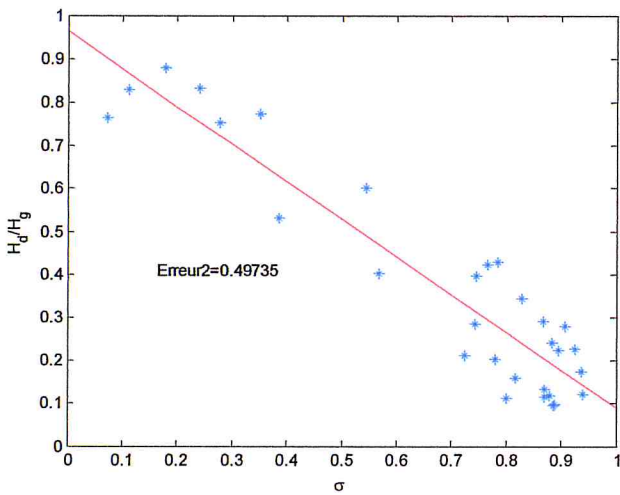
Mois d'Aout



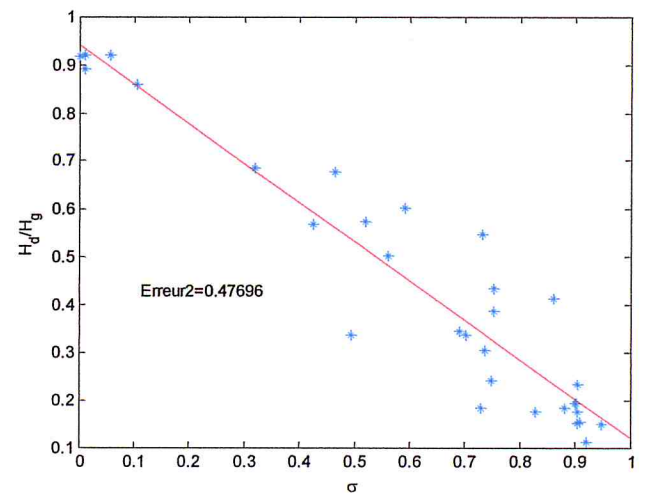
Mois de Septembre



Mois d'Octobre



Mois de Novembre



Mois de Décembre

Figure II.4.2.1.1 : Distribution Linéaire représentative des fractions diffuses journalières en fonction de σ , Site de Tlemcen.

Le tableau II-4-2-1-1 expose les résultats du modèle linéaire, appliqué pour les fractions diffuses journalières en fonction de la fraction d'insolation mois par mois pour le site de Tlemcen.

Tableau II-4-2-1-1 : Résultats de l'ajustement par la relation $\frac{H_d}{H_g} = a + b.\sigma$: Site de Tlemcen

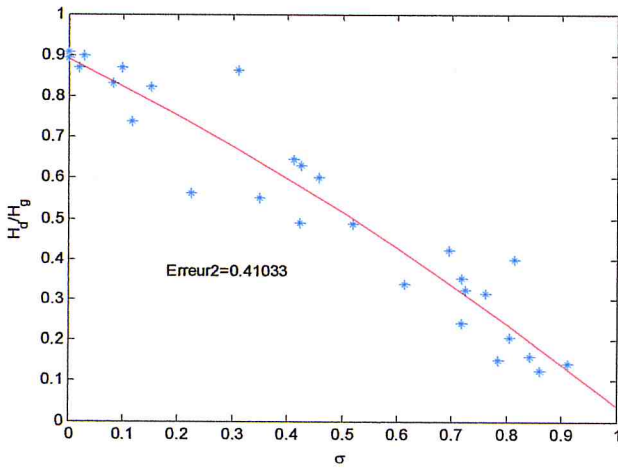
| Mois | b | a | R ² | RMSE |
|-----------|---------|--------|----------------|--------|
| Janvier | -0.8302 | 0.9114 | 0.9122 | 0.0803 |
| Février | -0.8217 | 0.9240 | 0.8269 | 0.1056 |
| Mars | -0.8065 | 0.8574 | 0.7957 | 0.0828 |
| Avril | -0.6337 | 0.8338 | 0.7536 | 0.0996 |
| Mai | -0.6105 | 0.8220 | 0.8338 | 0.0771 |
| Juin | -0.7927 | 0.9516 | 0.8220 | 0.0829 |
| Juillet | -0.4887 | 0.7073 | 0.4170 | 0.0654 |
| Aout | -0.6820 | 0.8205 | 0.4996 | 0.0549 |
| Septembre | -0.6698 | 0.7980 | 0.6193 | 0.0934 |
| Octobre | -0.7527 | 0.8698 | 0.8040 | 0.0887 |
| Novembre | -0.8734 | 0.9638 | 0.8707 | 0.0924 |
| Décembre | -0.8205 | 0.9406 | 0.8938 | 0.0871 |

Du tableau II-4-2-1-1, nous constatons que la qualité du modèle est très bonne pour le mois de Janvier ,Février, Mars ,Avril ,Mai ,Octobre ,Novembre et Décembre , ($R^2 \approx 0.8$) ,avec un RMSE qui varie relativement très peu (0.06) , cela se traduit par une meilleur dispersion autour de la droite de régression linéaire , $0.05 < RMSE < 0.11$

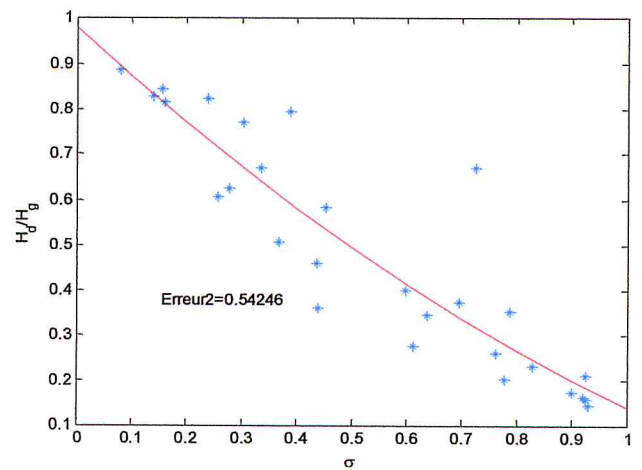
La qualité de l'estimation est dégradée pour les mois de Juillet et d'Aout, et Moyenne pour le mois d'Octobre avec pratiquement le même RMSE que les autres mois.

b/ Modèle basé sur la régression polynomiale du second degré : Tlemcen

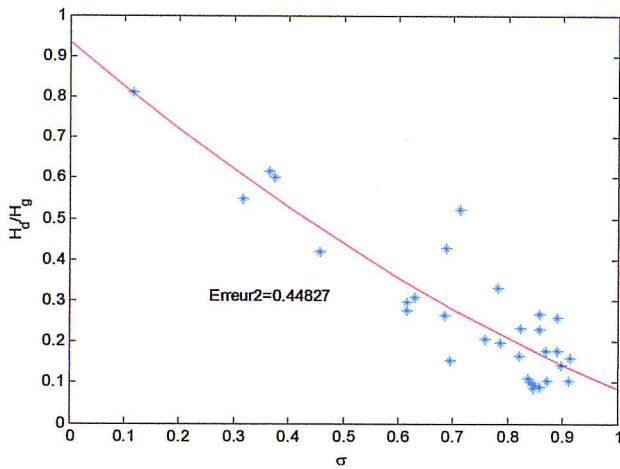
$$\frac{H_d}{H_g} = a + b.\sigma + c.\sigma^2$$



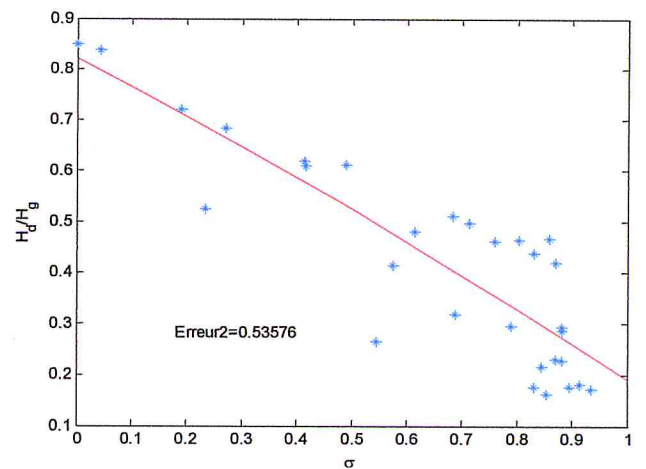
Mois de Janvier



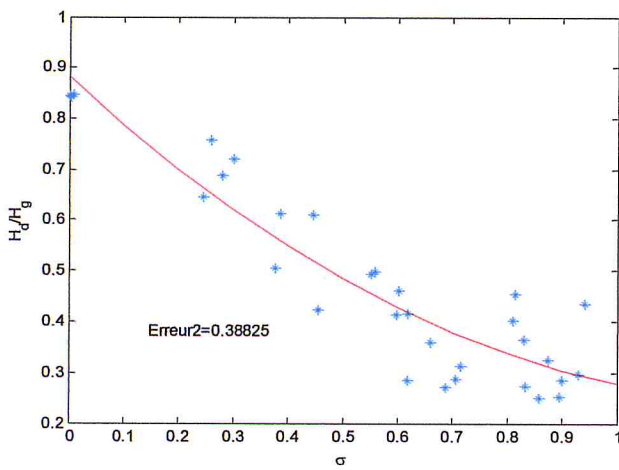
Mois de Février



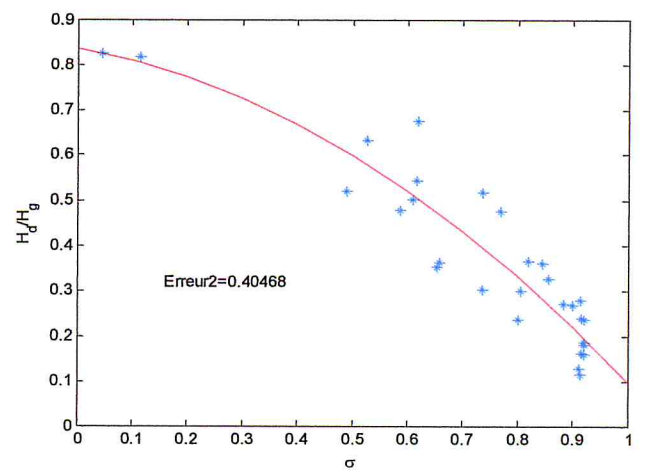
Mois de Mars



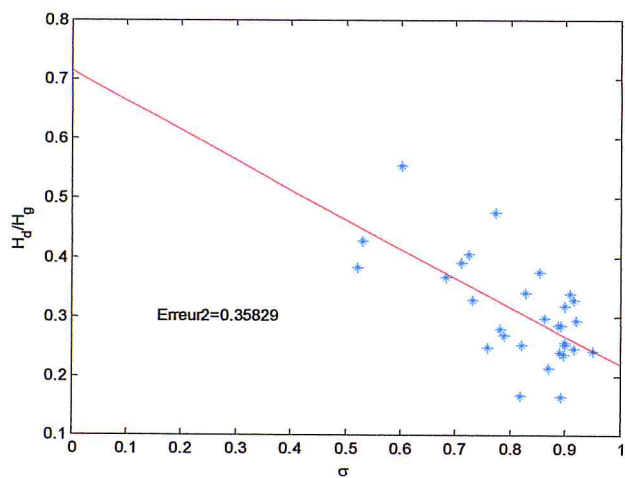
Mois d'Avril



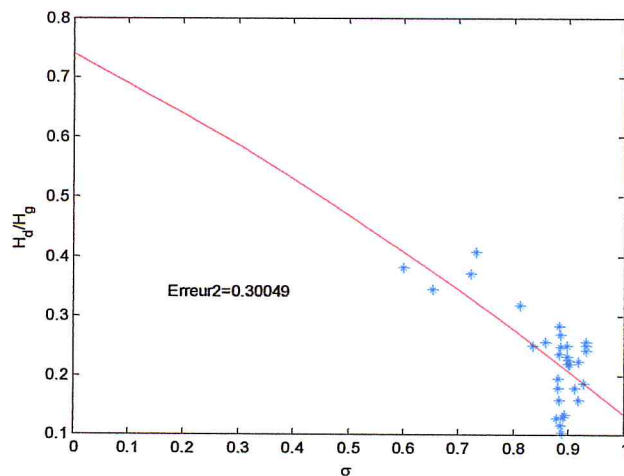
Mois de Mai



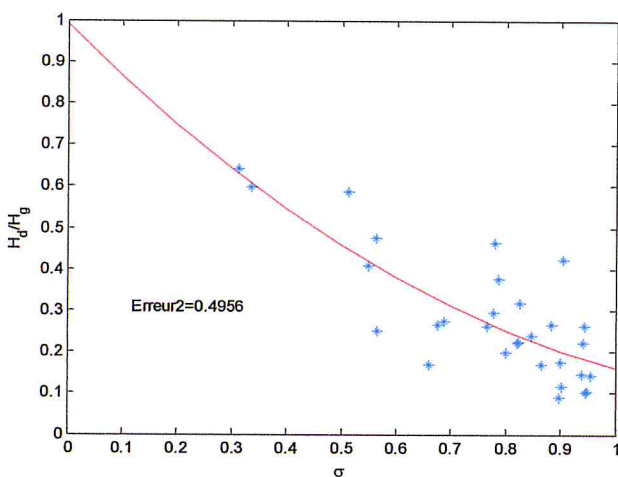
Mois de Juin



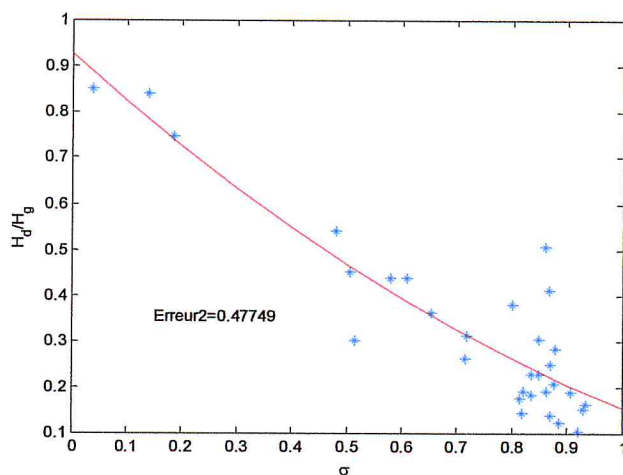
Mois de Juillet



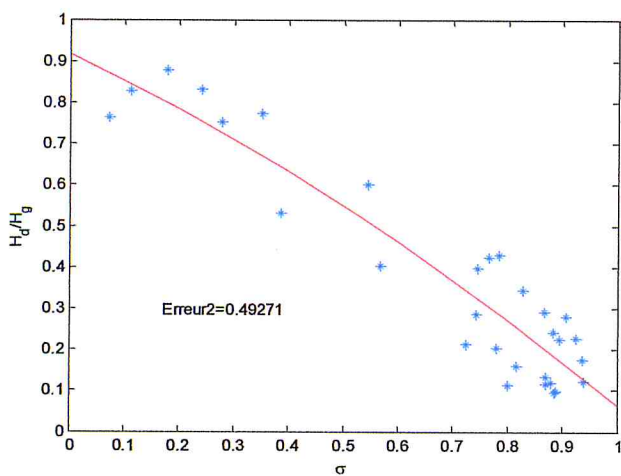
Mois d'Aout



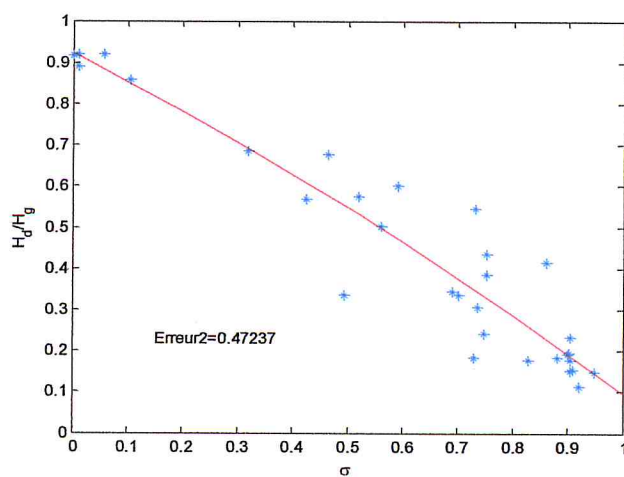
Mois de Septembre



Mois d'Octobre



Mois de Novembre



Mois de Décembre

Figure II.4.2.1.2 : Distribution Quadratique représentative des fractions diffuses journalières en fonction de σ , Site de Tlemcen.

Le tableau II-4-2-1-2 expose les résultats du modèle quadratique, appliqué pour les fractions diffuses journalières en fonction de la fraction d'insolation mois par mois pour le site de Tlemcen.

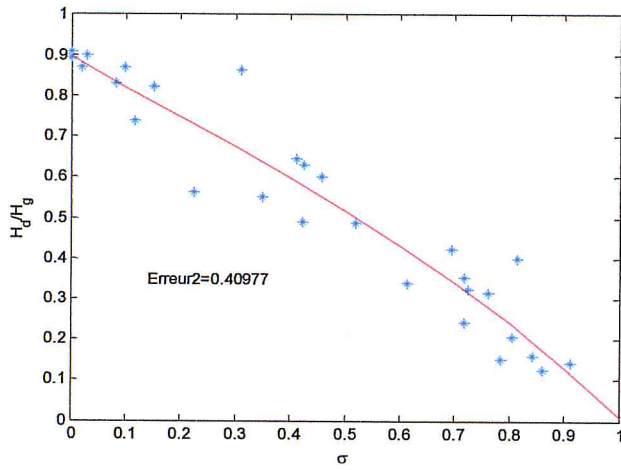
Tableau II-4-2-1-2 : Résultats de l'ajustement par la relation $\frac{H_d}{H_g} = a + b.\sigma + c.\sigma^2$: Site de Tlemcen

| Mois | c | b | a | R ² | RMSE |
|-----------|---------|---------|--------|----------------|--------|
| Janvier | -0.2064 | -0.6498 | 0.8914 | 0.9150 | 0.0790 |
| Février | 0.2577 | -1.0977 | 0.9783 | 0.8307 | 0.1044 |
| Mars | 0.2807 | -1.1328 | 0.9353 | 0.8003 | 0.0818 |
| Avril | -0.0751 | -0.5566 | 0.8209 | 0.7542 | 0.0995 |
| Mai | 0.3822 | -0.9850 | 0.8815 | 0.8594 | 0.0709 |
| Juin | -0.5319 | -0.2063 | 0.8351 | 0.8537 | 0.0751 |
| Juillet | 0.0155 | -0.5119 | 0.7157 | 0.4171 | 0.0654 |
| Aout | -0.1347 | -0.4712 | 0.7397 | 0.4997 | 0.0549 |
| Septembre | 0.4656 | -1.2944 | 0.9886 | 0.6302 | 0.0920 |
| Octobre | 0.2871 | -1.0599 | 0.9259 | 0.8109 | 0.0872 |
| Novembre | -0.2350 | -0.6204 | 0.9176 | 0.8731 | 0.0915 |
| Décembre | -0.1514 | -0.6753 | 0.9227 | 0.8958 | 0.0862 |

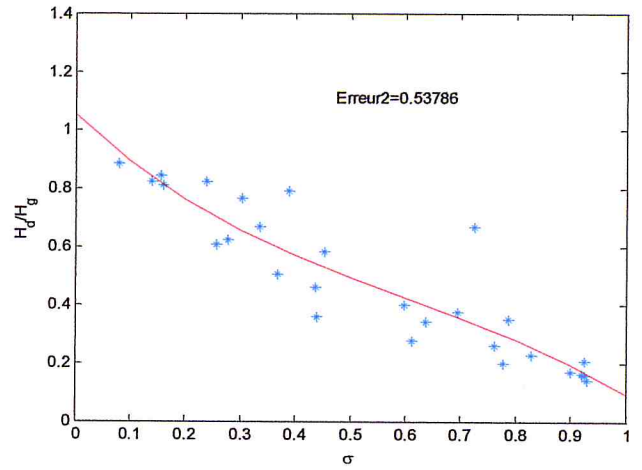
Du tableau II-4-2-1-2, nous constatons que la qualité du modèle est très bonne pour les mois de :Janvier, Février , Mars ,Avril ,Mai ,Juin ,Octobre ,Novembre et Décembre , ($R^2 \approx 0.8$) ,on distingue une légère amélioration du R^2 et du RMSE par rapport au modèle linéaire avec et les mêmes séquences du RMSE . La qualité de l'estimation est dégradée pour les mois de Juillet et d'Aout, et Moyenne pour le mois de Septembre avec pratiquement le même RMSE.

c / Modèle basé sur la régression polynomiale du Troisième degré : Tlemcen

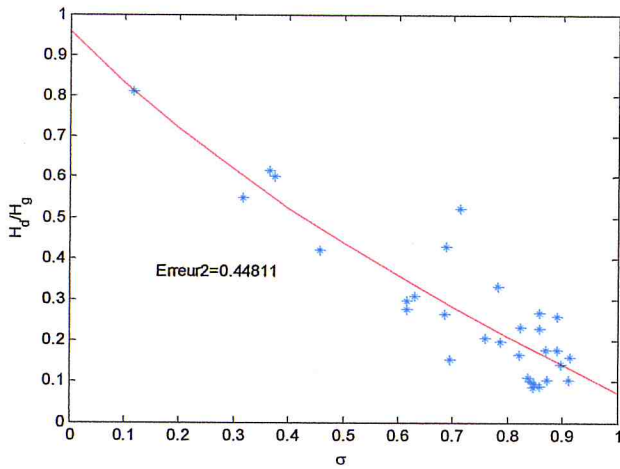
$$\frac{H_d}{H_g} = a + b.\sigma + c.\sigma^2 + d.\sigma^3$$



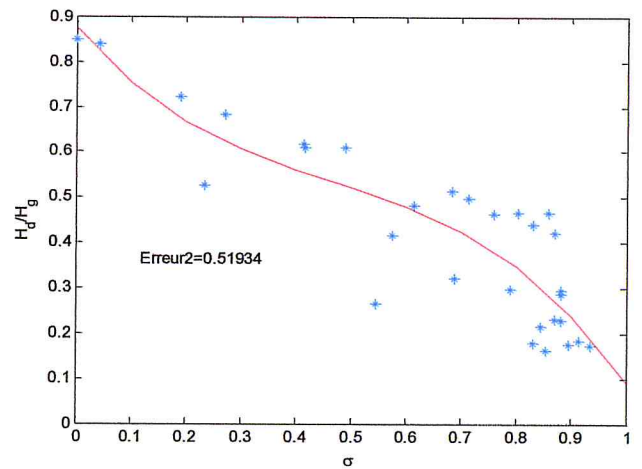
Mois de Janvier



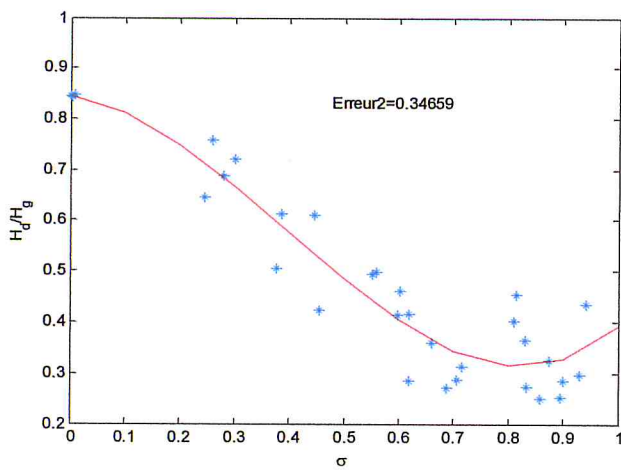
Mois de Février



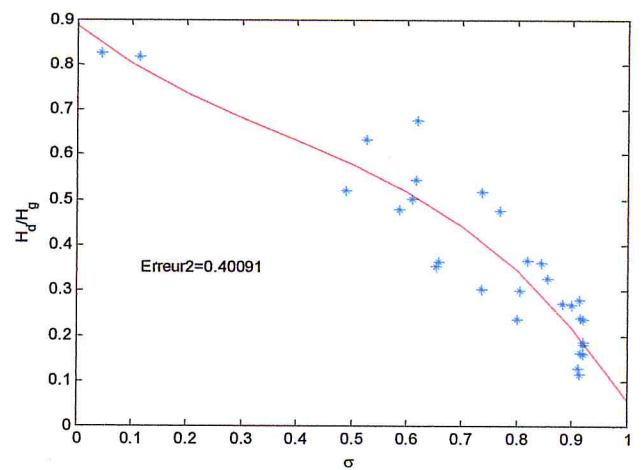
Mois de Mars



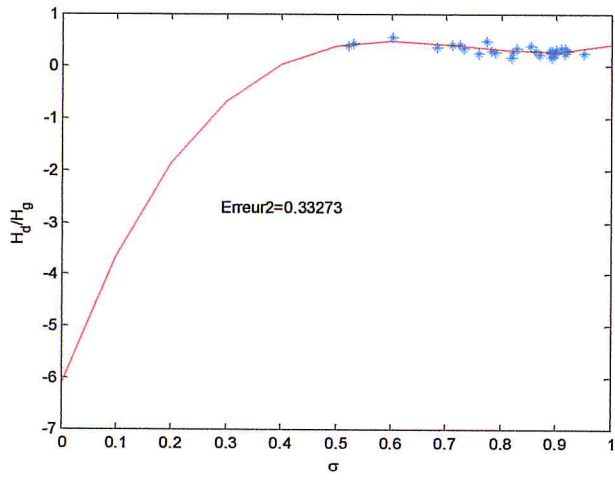
Mois d'Avril



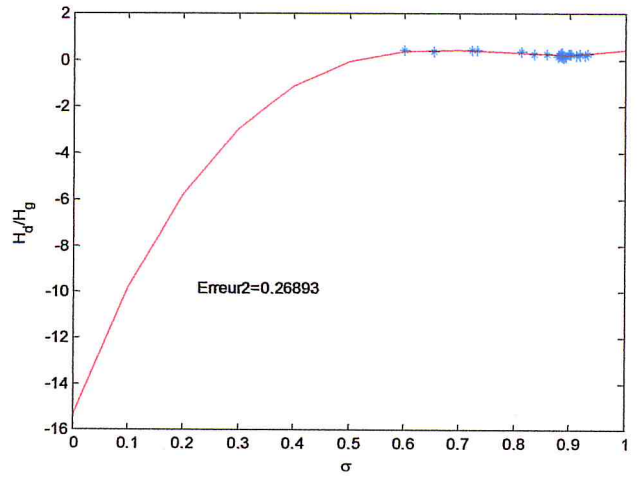
Mois de Mai



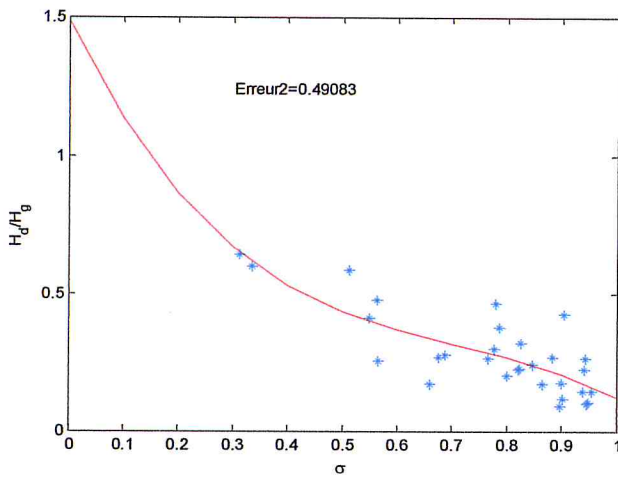
Mois de Juin



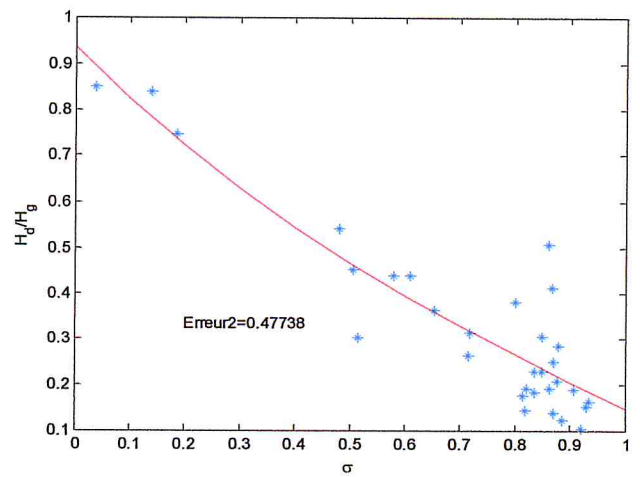
Mois de Juillet



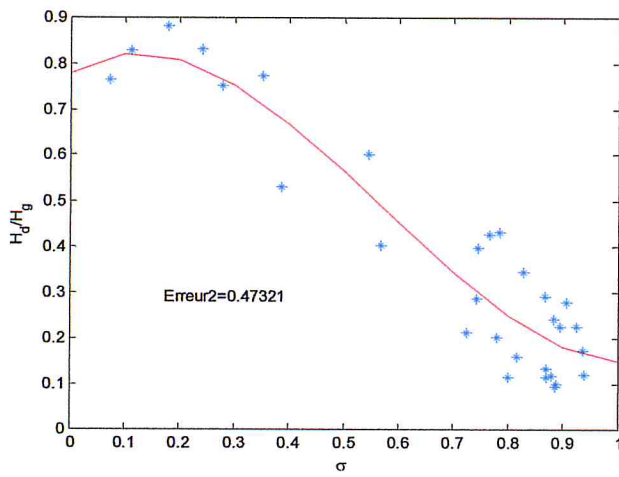
Mois d'Aout



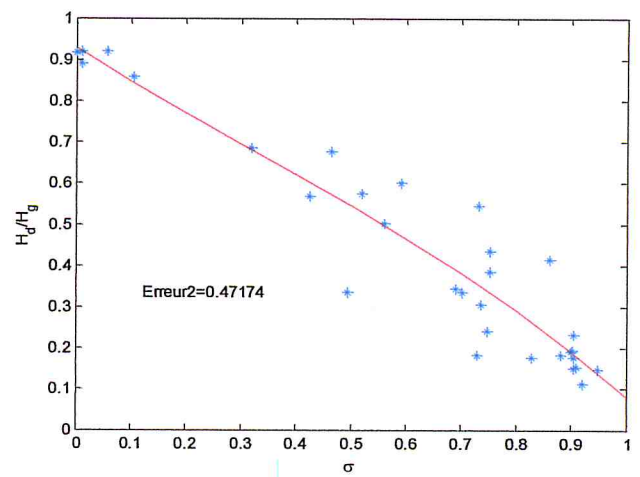
Mois de Septembre



Mois d'Octobre



Mois de Novembre



Mois de Décembre

Figure II.4.2.1.3 : Distribution Cubique représentative des fractions diffuses journalières en fonction de σ , Site de Tlemcen.

Le tableau II-4-2-1-3 expose les résultats du modèle cubique, appliqué pour les fractions diffuses journalières en fonction de la fraction d'insolation mois par mois pour le site de Tlemcen.

Tableau II-4-2-1-3 : Résultats de l'ajustement par la relation $\frac{H_d}{H_g} = a + b.\sigma + c.\sigma^2 + d.\sigma^3$: Site de Tlemcen

| Mois | d | c | b | a | R ² | RMSE |
|-----------|---------|----------|---------|----------|----------------|--------|
| Janvier | -0.2666 | 0.1447 | -0.7656 | 0.8967 | 0.9152 | 0.0789 |
| Février | -0.9474 | 1.7409 | -1.7550 | 1.0533 | 0.8336 | 0.1035 |
| Mars | -0.2203 | 0.6408 | -1.3044 | 0.9566 | 0.8004 | 0.0818 |
| Avril | -1.5500 | 2.1723 | -1.4044 | 0.8737 | 0.7690 | 0.0964 |
| Mai | 1.6943 | -2.0061 | -0.1407 | 0.8443 | 0.8880 | 0.0633 |
| Juin | -1.0954 | 1.2194 | -0.9520 | 0.8848 | 0.8564 | 0.0744 |
| Juillet | 18.2826 | -40.3748 | 28.6343 | -6.1300 | 0.4972 | 0.0607 |
| Aout | 35.2144 | -82.5296 | 63.0823 | -15.3953 | 0.5993 | 0.0491 |
| Septembre | -2.2307 | 4.8178 | -3.9502 | 1.4825 | 0.6373 | 0.0911 |
| Octobre | -0.1720 | 0.5551 | -1.1733 | 0.9350 | 0.8110 | 0.0872 |
| Novembre | 1.8728 | -3.2075 | 0.7054 | 0.7786 | 0.8829 | 0.0879 |
| Décembre | -0.2844 | 0.2685 | -0.8311 | 0.9283 | 0.8961 | 0.0861 |

On remarque du tableau II-4-2-1-3, que le modèle cubique nous donne une légère différence que le modèle quadratique en montrant toujours un coefficient de détermination excellent. ($R^2 \approx 0.8$), le RMSE reste inchangé. Mais on remarque aussi que beaucoup de courbes présentent d'ondulations peu compatibles avec la physique.

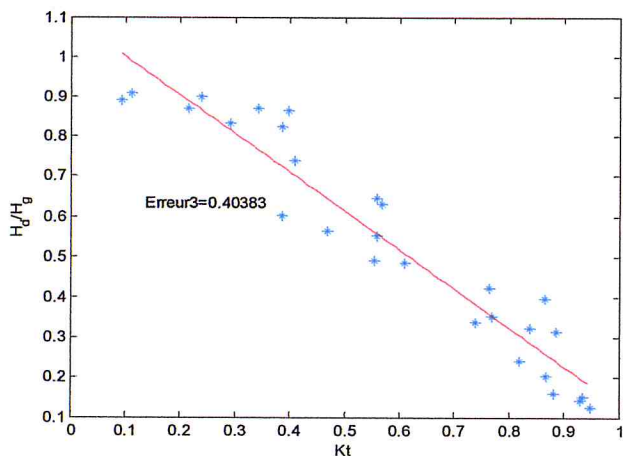
Conclusion concernant les modèles linéaires et polynomiaux en fonction de σ : Site de Tlemcen

Vu d'une part les résultats des paramètres statiques de ces 3 modèles, le RMSE et le R^2 et les sens physiques des courbes, on peut retenir le premier et le deuxième modèle parmi les 3 modèles qui présentent une bonne qualité dans l'ensemble avec une dispersion satisfaisante autour de la courbe de régression pour l'ensemble des mois .

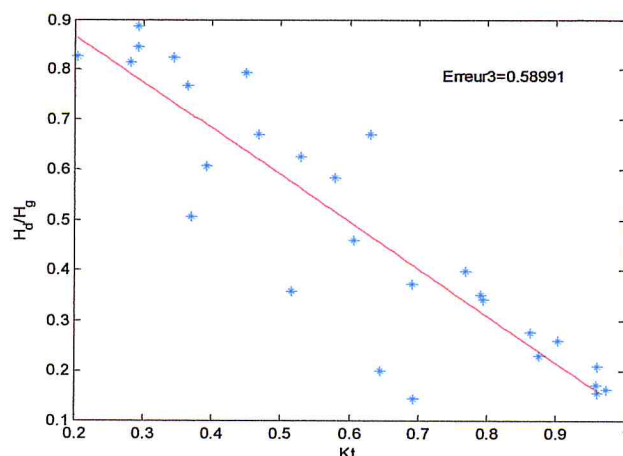
II.4.2.2 : Estimations des fractions diffuses Journalières en fonction de l'Indice de Clarté : Mois Par Mois

a/Modèle Linéaire : Tlemcen

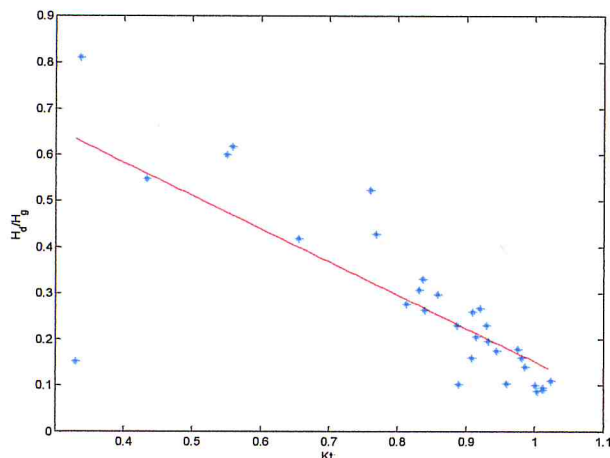
$$\frac{H_d}{H_g} = a + b.kt$$



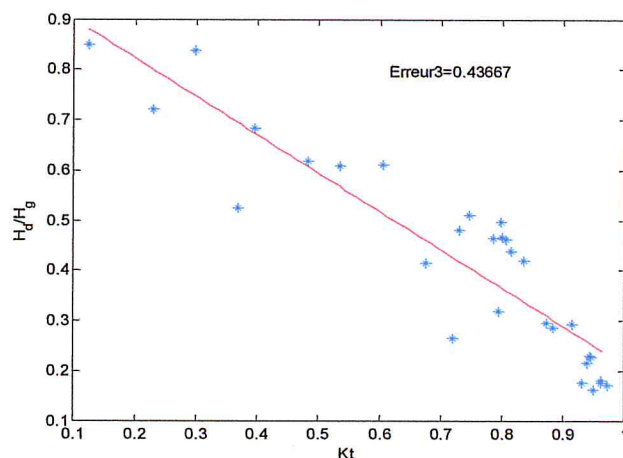
Mois de Janvier



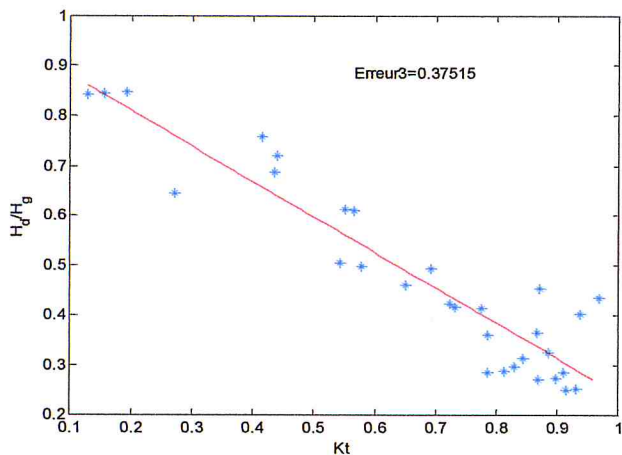
Mois de Février



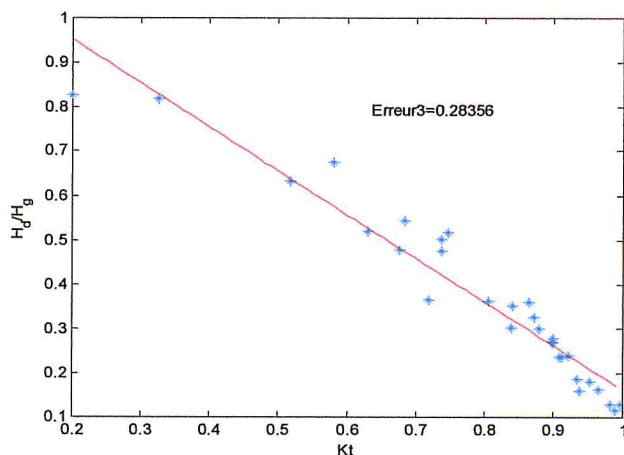
Mois de Mars



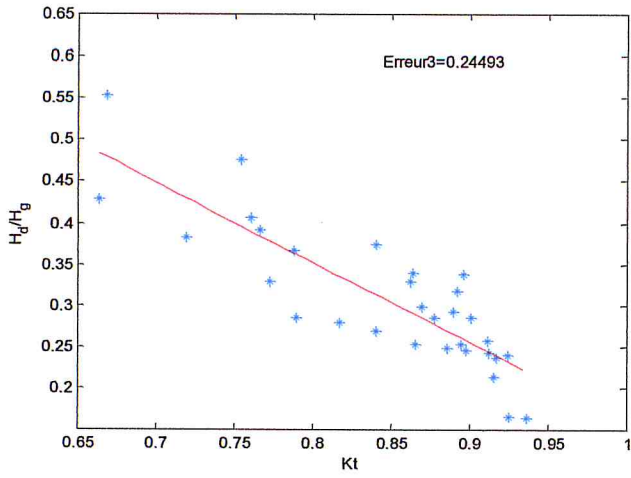
Mois d'Avril



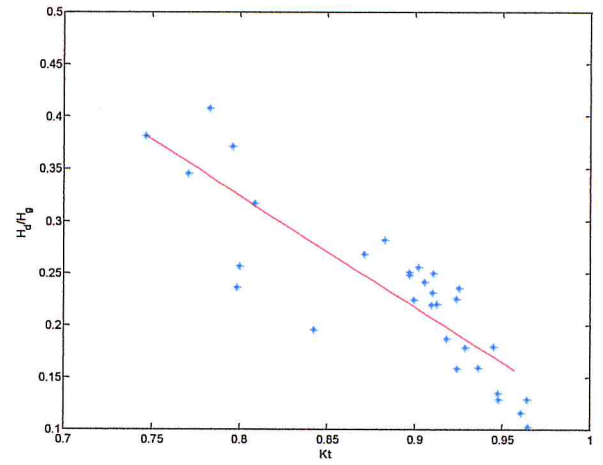
Mois de Mai



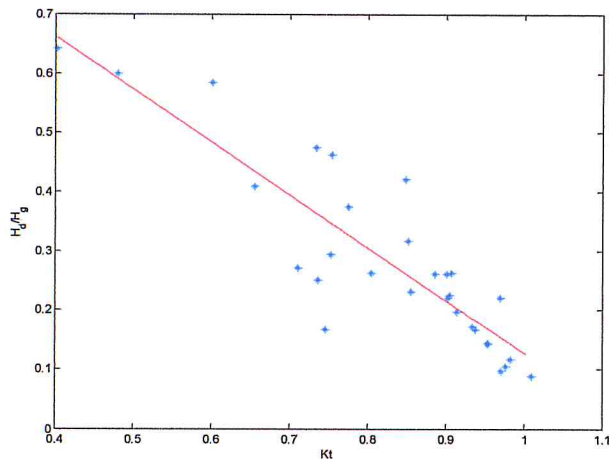
Mois de Juin



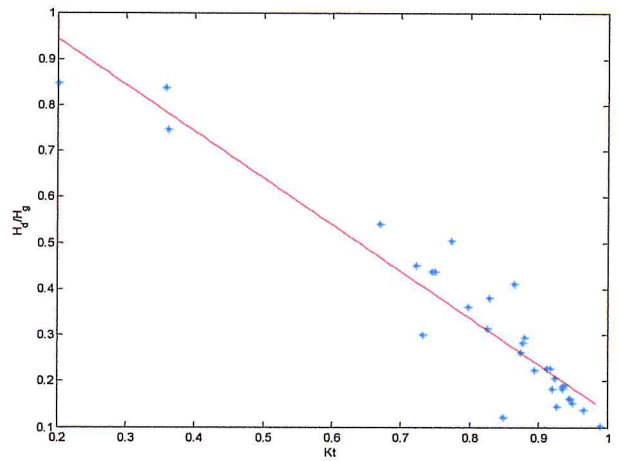
Mois de Juillet



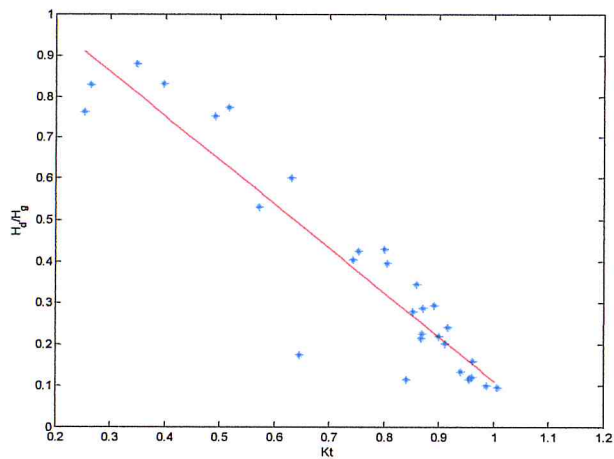
Mois d'Aout



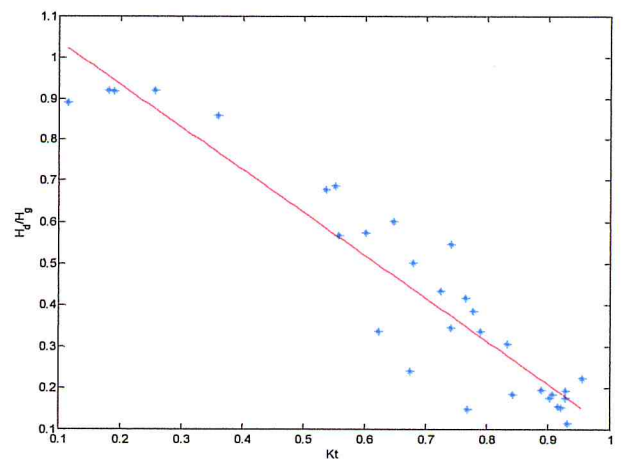
Mois de Septembre



Mois d'Octobre



Mois de Novembre



Mois de Décembre

Figure II.4.2.2.1 : Distribution Linéaire représentative des fractions diffuses journalières en fonction de kt , Site de Tlemcen.

Le tableau II-4-2-2-1 expose les résultats du modèle linéaire, appliqué pour les fractions diffuses journalières en fonction de l'indice de clarté, mois par mois pour le site de Tlemcen.

Tableau II-4-2-2-1: Résultats de l'ajustement par la relation $\frac{H_d}{H_g} = a + b.kt$: Site de Tlemcen

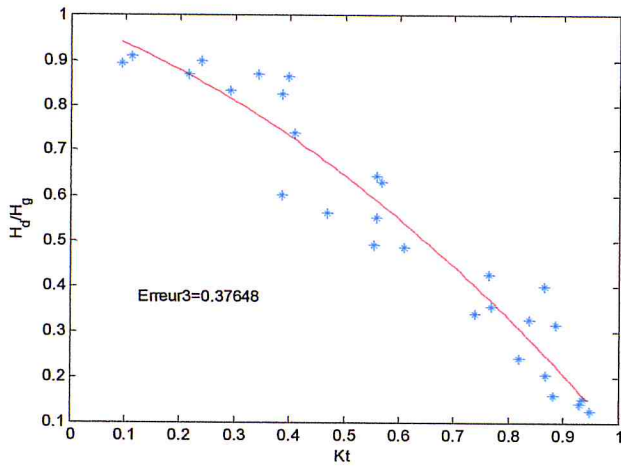
| Mois | b | a | R ² | RMSE |
|-----------|---------|--------|----------------|--------|
| Janvier | -0.9663 | 1.0971 | 0.9177 | 0.0777 |
| Février | -0.9336 | 1.0556 | 0.7998 | 0.1135 |
| Mars | -0.7203 | 0.8720 | 0.5971 | 0.1163 |
| Avril | -0.7637 | 0.9755 | 0.8367 | 0.0811 |
| Mai | -0.7097 | 0.9516 | 0.8688 | 0.0685 |
| Juin | -0.9871 | 1.1492 | 0.9282 | 0.0527 |
| Juillet | -0.9829 | 1.1429 | 0.7544 | 0.0425 |
| Aout | -1.0703 | 1.1808 | 0.7406 | 0.0395 |
| Septembre | -0.8924 | 1.0202 | 0.7717 | 0.0724 |
| Octobre | -1.0151 | 1.1489 | 0.9004 | 0.0635 |
| Novembre | -1.0704 | 1.1805 | 0.8700 | 0.0926 |
| Décembre | -1.0378 | 1.1413 | 0.8874 | 0.0898 |

Du tableau II-4-2-2-1, nous constatons une corrélation assez forte ($0.7 < R^2 < 0.90$) entre les variables étudiées pour tous les mois sauf pour le mois de Mars où il présente une corrélation moyenne, $R = 0.59$.

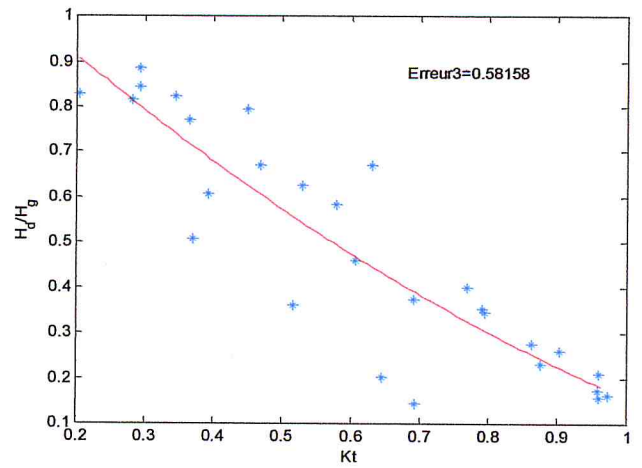
La dispersion des points assez faible pour ces mêmes mois, et atteint son minima le mois d'Aout (0.0395).

b/Modèle basé sur la régression polynomiale du second degré : Tlemcen

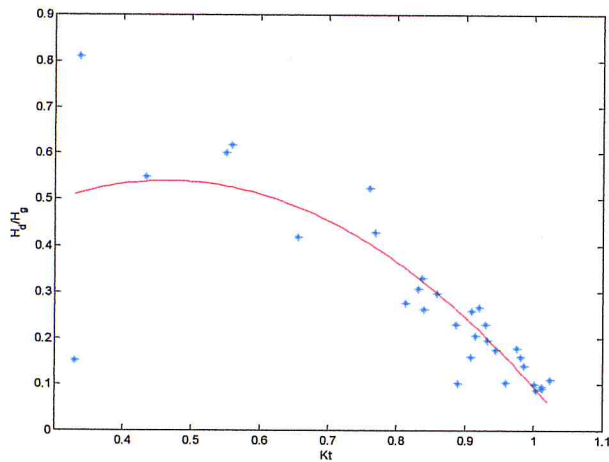
$$\frac{H_d}{H_g} = a + b.kt + c.kt^2$$



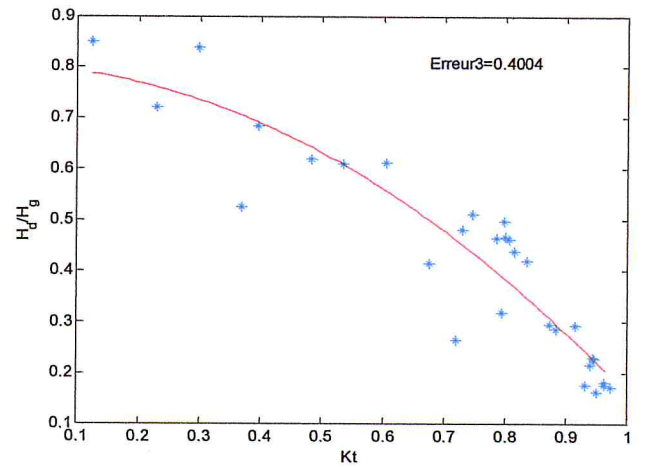
Mois de Janvier



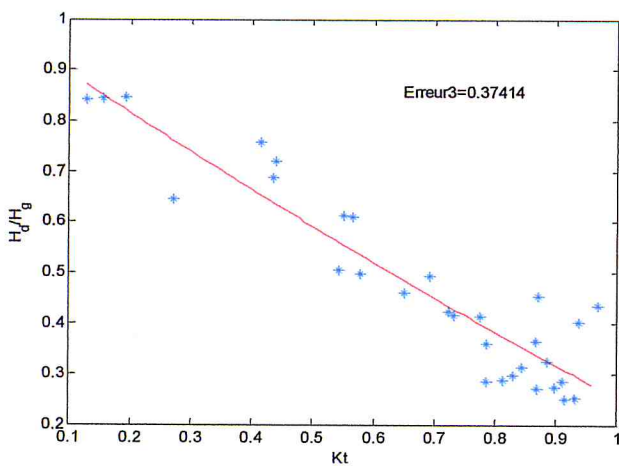
Mois de Février



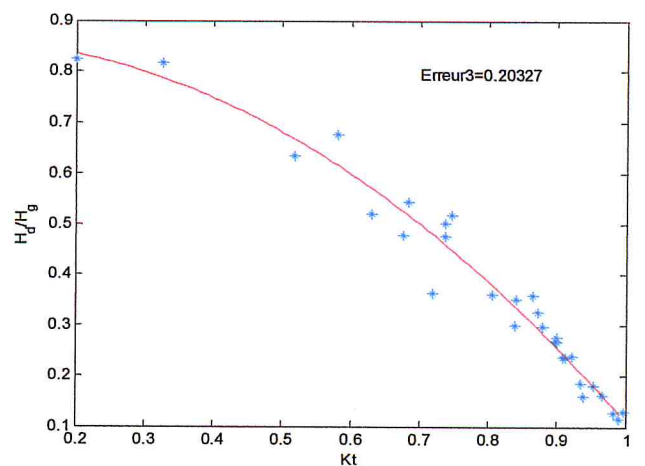
Mois de Mars



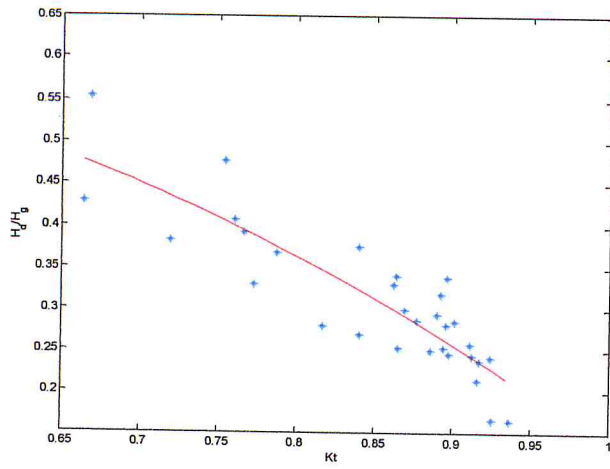
Mois d'Avril



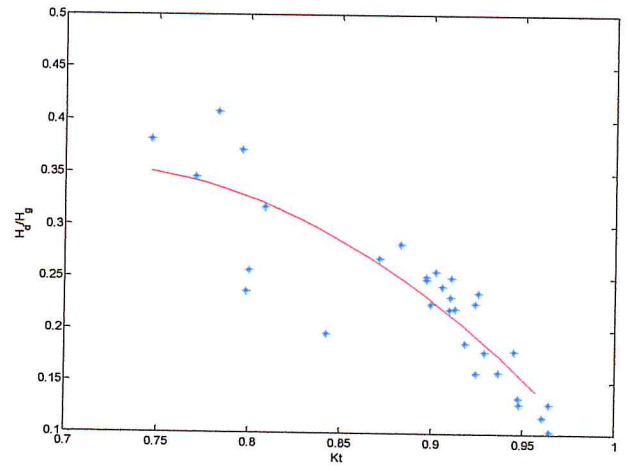
Mois de Mai



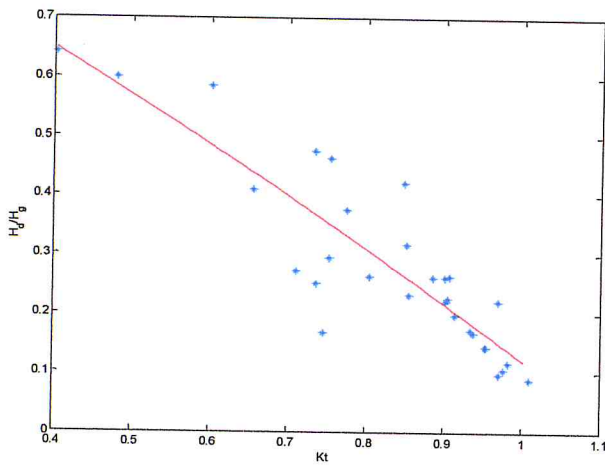
Mois de Juin



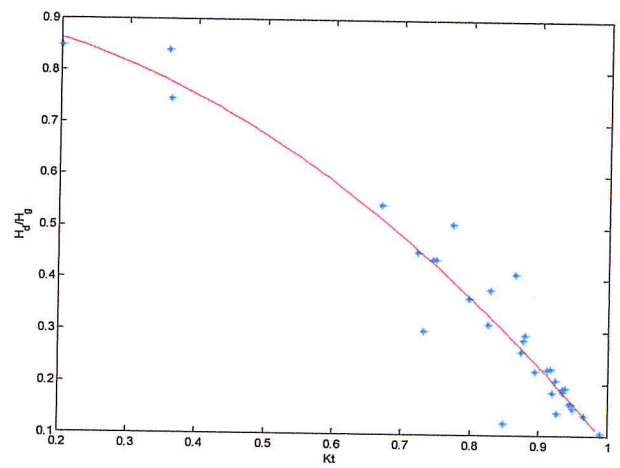
Mois de Juillet



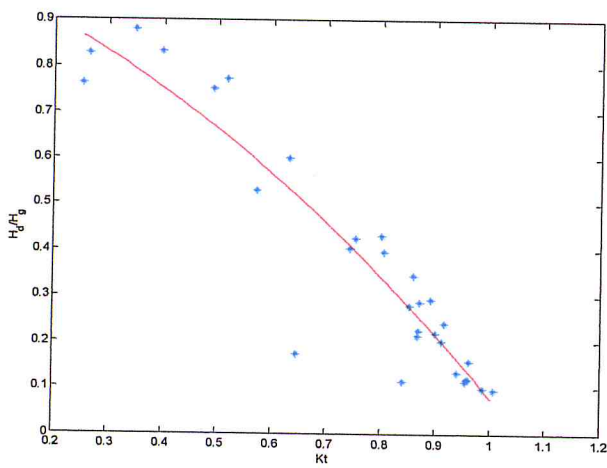
Mois d'Aout



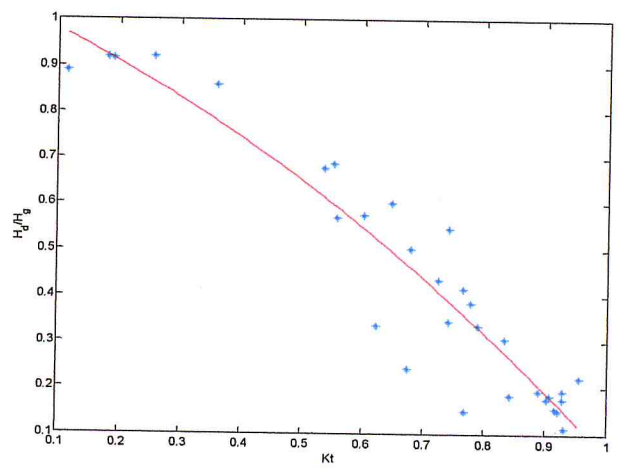
Mois de Septembre



Mois d'Octobre



Mois de Novembre



Mois de Décembre

Figure II.4.2.2.2: Distribution Quadratique représentative des fractions diffuses journalières en fonction de Kt , Site de Tlemcen.

Le tableau II-4-2-2-2, expose les résultats du modèle quadratique, appliqué pour les fractions diffuses journalières en fonction de l'indice de clarté, mois par mois pour le Site de Tlemcen.

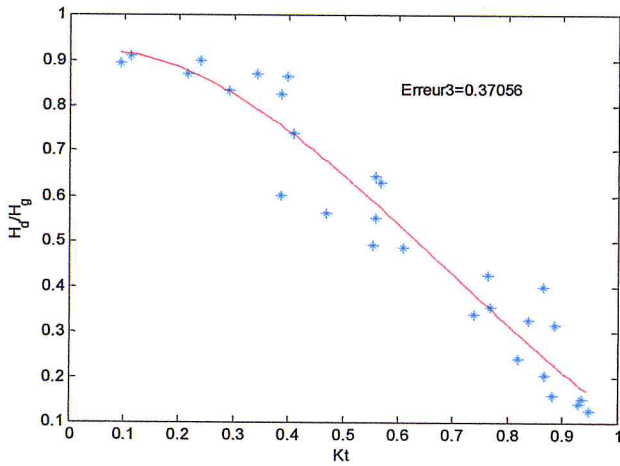
Tableau II-4-2-2-2 : Résultats de l'ajustement par la relation $\frac{H_d}{H_g} = a + b.kt + c.kt^2$: Site de Tlemcen

| Mois | c | b | a | R ² | RMSE |
|-----------|---------|---------|---------|----------------|--------|
| Janvier | -0.4606 | -0.4547 | 0.9875 | 0.9284 | 0.0725 |
| Février | 0.3890 | -1.4117 | 1.1803 | 0.8054 | 0.1119 |
| Mars | -1.5529 | 1.4450 | 0.2031 | 0.6969 | 0.1009 |
| Avril | -0.5969 | -0.0460 | 0.8025 | 0.8627 | 0.0744 |
| Mai | 0.0889 | -0.8109 | 0.9741 | 0.8695 | 0.0683 |
| Juin | -0.7828 | 0.0339 | 0.8601 | 0.9631 | 0.0377 |
| Juillet | -1.0059 | 0.6452 | 0.4913 | 0.7586 | 0.0421 |
| Aout | -3.5385 | 5.0294 | -1.4321 | 0.7641 | 0.0376 |
| Septembre | -0.1460 | -0.6759 | 0.9441 | 0.7725 | 0.0723 |
| Octobre | -0.7036 | -0.1284 | 0.9172 | 0.9203 | 0.0568 |
| Novembre | -0.4719 | -0.4598 | 1.0118 | 0.8763 | 0.0904 |
| Décembre | -0.4101 | -0.5750 | 1.0400 | 0.8954 | 0.0865 |

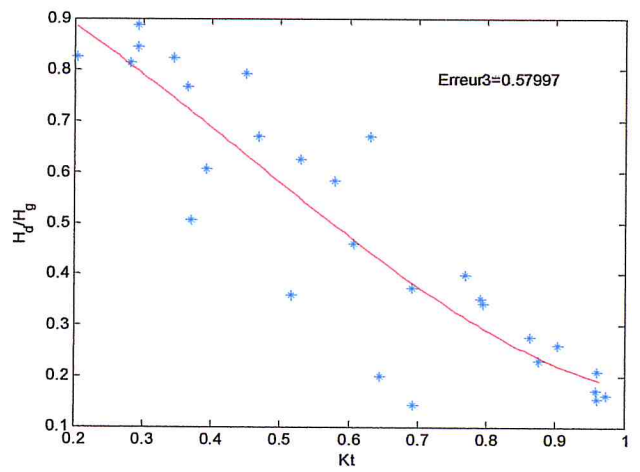
Du tableau 2-2-3-2 nous constatons une amélioration du R², oscillant entre 0.75 et 0.93, impliquant que la qualité de ce modèle quadratique est excellente, une légère augmentation pour le mois de Mars, R²= 0.69. On remarque aussi une baisse du RMSE, donc une bonne dispersion autour de la courbe de régression,

c/ Modèle basé sur la régression polynomiale du Troisième degré : Tlemcen

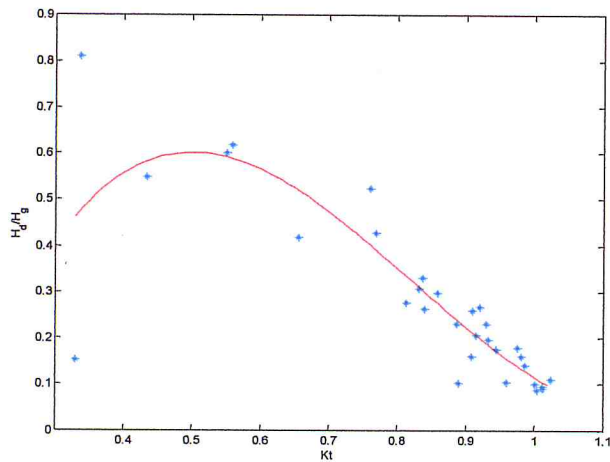
$$\frac{H_d}{H_g} = a + b.kt + c.kt^2 + d.kt^3$$



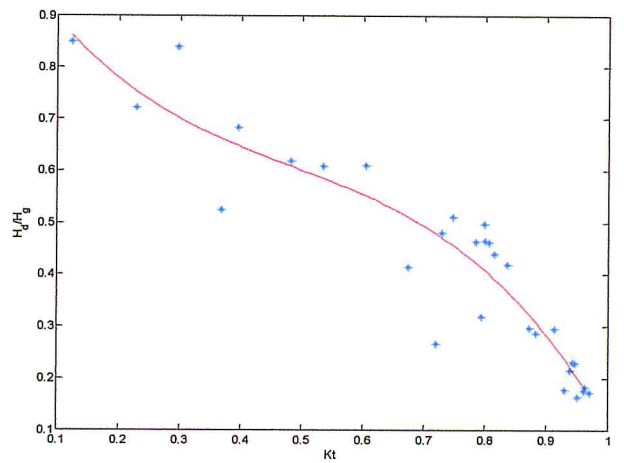
Mois de Janvier



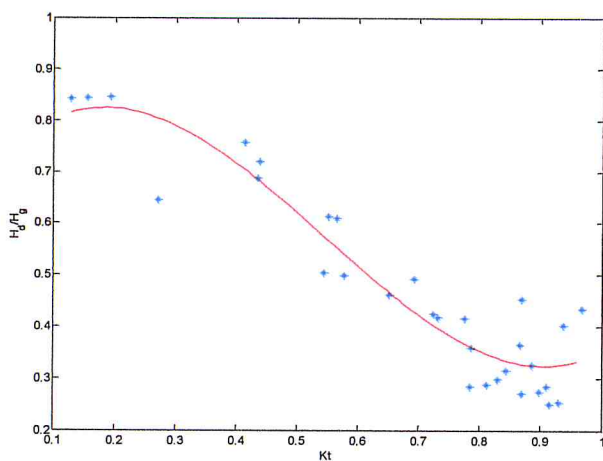
Mois de Février



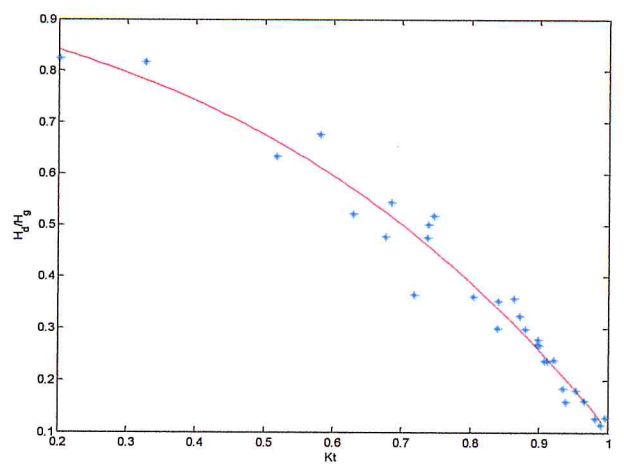
Mois de Mars



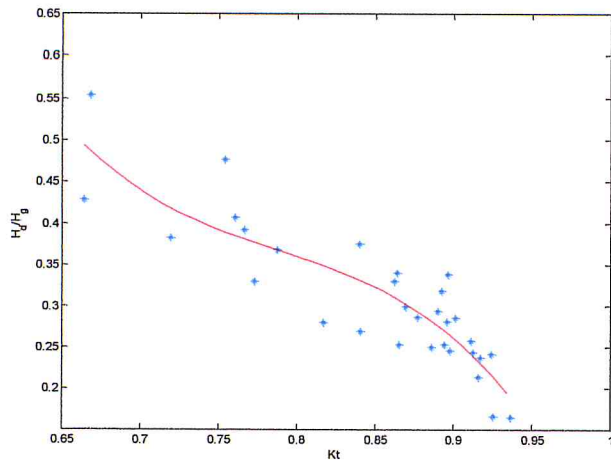
Mois d'Avril



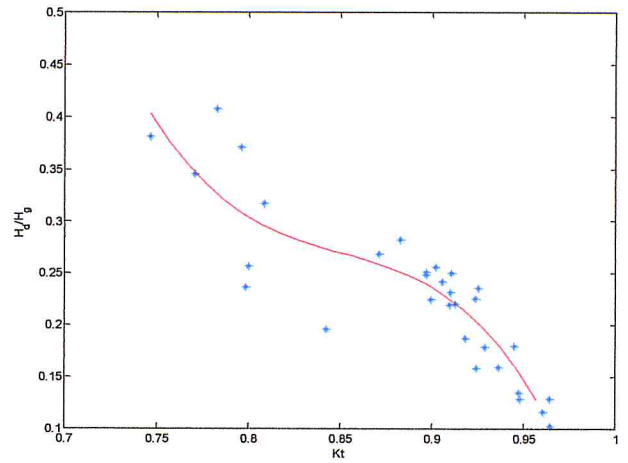
Mois de Mai



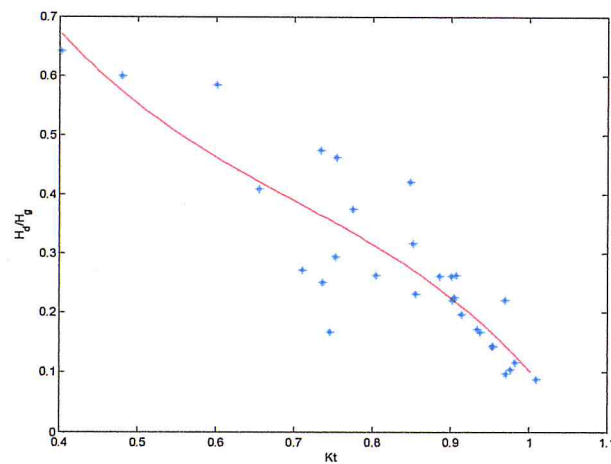
Mois de Juin



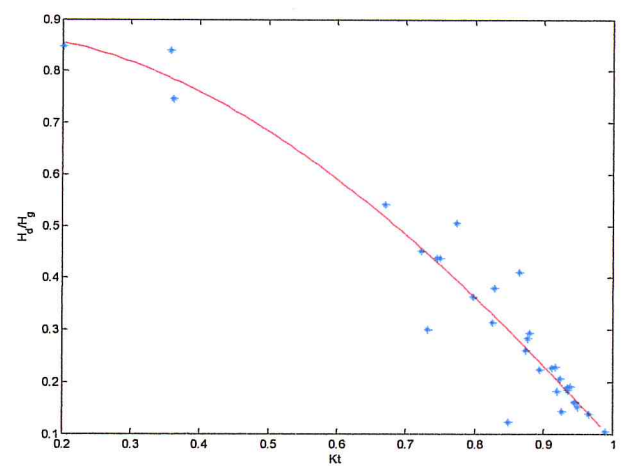
Mois de Juillet



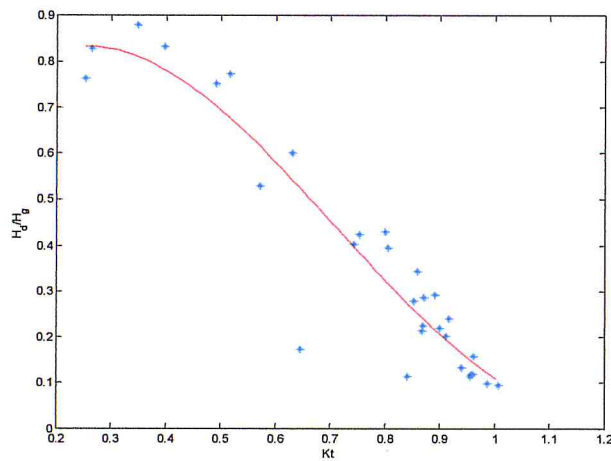
Mois d'Aout



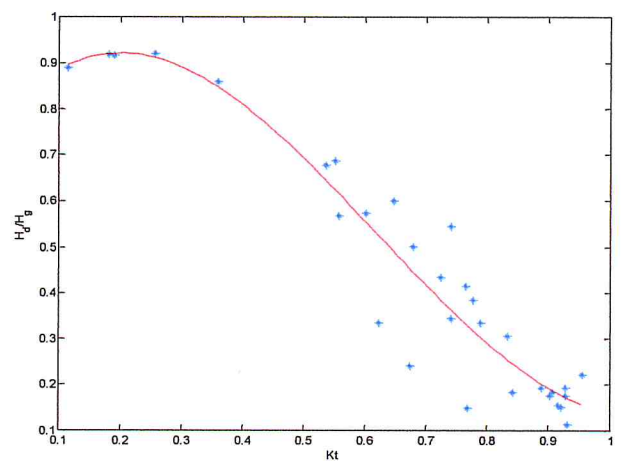
Mois de Septembre



Mois d'Octobre



Mois de Novembre



Mois de Décembre

Figure II.4.2.2.3 : Distribution Cubique représentative des fractions diffuses journalières en fonction de kt, Site de Tlemcen.

Le tableau II-4-2-2-3, expose les résultats du modèle quadratique, appliqué pour les fractions diffuses journalières en fonction de l'indice de clarté, mois par mois pour le Site de Tlemcen.

Tableau II-4-2-2-3: Résultats de l'ajustement par la relation $\frac{H_d}{H_g} = a + b.kt + c.kt^2 + d.kt^3$: Site de Tlemcen

| Mois | d | c | b | a | R ² | RMSE |
|-----------|----------|----------|-----------|---------|----------------|--------|
| Janvier | 0.9492 | -1.9433 | 0.1979 | 0.9144 | 0.9307 | 0.0713 |
| Février | 0.8631 | -1.1829 | -0.5416 | 1.0379 | 0.8065 | 0.1116 |
| Mars | 4.1849 | -10.3200 | 7.1852 | -0.9346 | 0.7219 | 0.0966 |
| Avril | -2.0144 | 2.9436 | -1.8720 | 1.0521 | 0.8800 | 0.0695 |
| Mai | 2.6705 | -4.3580 | 1.3287 | 0.7112 | 0.8954 | 0.0612 |
| Juin | -0.2759 | -0.2639 | -0.2589 | 0.9057 | 0.9632 | 0.0377 |
| Juillet | -26.0773 | 61.6746 | -49.2438 | 13.6344 | 0.7749 | 0.0407 |
| Aout | -74.2292 | 189.3407 | -161.4822 | 46.3173 | 0.8092 | 0.0338 |
| Septembre | -2.6587 | 5.5860 | -4.6239 | 1.8014 | 0.7770 | 0.0715 |
| Octobre | 0.3074 | -1.2908 | 0.2107 | 0.8629 | 0.9205 | 0.0568 |
| Novembre | 2.0839 | -4.4656 | 1.8864 | 0.6068 | 0.8814 | 0.0885 |
| Décembre | 2.6631 | -4.9568 | 1.6679 | 0.7649 | 0.9066 | 0.0818 |

De la figure II.4.2.2.3, nous voyons clairement que Les courbes passent au mieux au Milieu du nuage de points rendant minimum le RMSE correspondant sans exception à tous les mois de l'année. Les points présentent une faible dispersion autour de la droite. , de qualité très forte dans l'ensemble puisque $R^2 \approx 0,80$, ainsi on remarque une nette hausse du R^2 et une baisse du RMSE, et ce, par rapport aux modèles linéaires et quadratique, les courbes gardent tjrs un sens physique.

Conclusion concernant les modèles linéaires et polynomiaux en fonction de kt : Site de Tlemcen

Le modèle cubique explique très bien les variations de kt_i par les variations de $\frac{H_{d,i}}{H_{g,i}}$, avec une qualité très forte et une meilleur dispersion autour de la courbe de régression .

II.5 : Conclusion

Après cette étude de modélisation de la fraction diffuse journalière en fonction de la fraction d'insolation et de l'indice de clarté et ce pour les Sites de Sénia et de Tlemcen, on a pu retenir les modèles suivants :

En fonction de la fraction de l'insolation :

Parmi les trois modèles proposés pour le site de Sénia et de Tlemcen, nous constatons que le modèle quadratique est assez représentatif de la fraction diffuse en donnant des coefficients de détermination R^2 les plus élevés et des RMSE les plus bas.

Le modèle Linéaire qui est le plus simple parmi les modèles a été aussi retenu, mais au point de vue performance, nous constatons que le modèle quadratique est le meilleur.

Pour Le modèle cubique nous constatons qu'il n'est pas assez représentatif de la fraction diffuse, les courbes présentent beaucoup d'ondulations qui ne peuvent pas décrire le système physique et ce, malgré des coefficients de détermination R^2 élevés et des RMSE bas. Le modèle cubique n'a pas été donc retenu.

En fonction de l'indice de clarté :

D'après les résultats obtenus, nous pouvons parler à ce stade d'une dépendance de l'indice de clarté du modèle linéaire pour le site de Tlemcen, cependant nous constatons pour les deux sites de Sénia et de Tlemcen que les valeurs estimées par les différents modèles sont en bonne corrélation avec les valeurs mesurées et les courbes ne présentent pas d'ondulations pour les 3 modèles . En tenant compte de R^2 et RMSE nous déduisons que : les 3 modèles sont assez représentatifs .Le modèle cubique prédit le mieux la variation de la fraction diffuse en fonction de l'indice de Clarté.

Les 3 modèles ont été donc retenus.

CHAPITRE III

CONFRONTATION AVEC LA LITTERATURE

III.1 : Introduction

Ce chapitre est réservé à la comparaison avec la littérature avec différents modèles, elle a été effectuée sur les rayonnements solaires incidents sur un plan horizontal orientée vers le Sud.

En ce qui concerne l'estimation des éclairagements solaires par ciel clair, ainsi que l'estimation des cumuls journaliers par ciel clair, quatre journées de différentes saisons ont été sélectionnées pour la comparaison des tracés des courbes prédites par les modèles Capderou et R.sun et les courbes expérimentales représentant les données des stations radiométriques, et la comparaison du global expérimental et celui prédit par Mefti (Tableau.III.1).

En ce qui concerne l'Estimation des irradiations globales mensuelles et moyennes mensuelles, on procédera à la comparaison sous forme de tableaux entre les irradiations estimées par le présent modèle et les irradiations expérimentales avec celles prédites par les modèles de Coppolino et Sivkov.

Chaque fois que nous procéderons à la confrontation des résultats simulés et mesurés, un calcul d'erreur relative sera mise en place pour juger la fiabilité du modèle proposé au niveau du site.

Puisque cette partie est consacrée aux aspects théoriques et expérimentaux, nous utilisons l'expression de l'erreur relative qui est donnée par l'équation suivante:

$$\text{Err} = \frac{G_m - G_c}{G_m}$$

G_m et G_c Désignant des Irradiations solaires (mesurés et calculés)

On rappelle que Les données utilisées ont été collectées chaque 60 minute

Tableau III-1 : Données des Rayonnements par ciel clair collectées des Sites de Sénia et Tlemcen

| Site de Sénia | | | Site de Tlemcen | | |
|----------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Date –par Ciel clair | Global - KWh/ m ² | Diffus KWh/ m ² | Date –par Ciel clair | Global - KWh/ m ² | Diffus- KWh/ m ² |
| 16 Février | 4.61 | 1.474 | 22 Janvier | 4.998 | 0.623 |
| 20 Mai | 7.666 | 3.363 | 08 avril | 9.066 | 2.091 |
| 1 Juillet | 8.4192 | 1.46 | 29 Juin | 10.825 | 1.719 |
| 02 Octobre | 5.531 | 1.078 | 26 Septembre | 7.944 | 0.775 |

III.2 : Confrontations avec la littérature

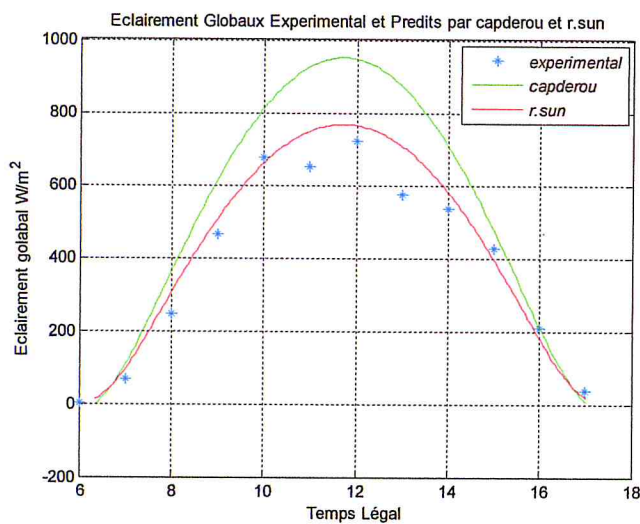
Pour obtenir une validation du rayonnement solaire, nous allons confronter, le rayonnement solaire fournies par les deux stations radiométriques de Sénia et de Tlemcen, sur plan horizontal, et les valeurs estimés par quelques modèles ; par le logiciel de calcul, Matlab.

III.2.1 : Confrontation avec les Modèles de R.sun [38] et Capderou [14]

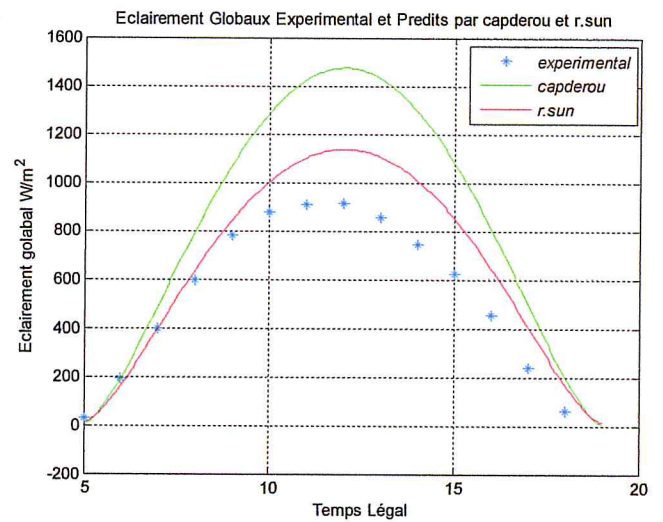
On présentera sur les figures suivantes, des graphes comparatifs relatifs au rayonnement global, des modèles Capderou, et le modèle R.sun, avec les données expérimentales par ciel clair donnés dans le tableau III-1 du site de Sénia et Tlemcen

III.2.1.1 : Site de Sénia :

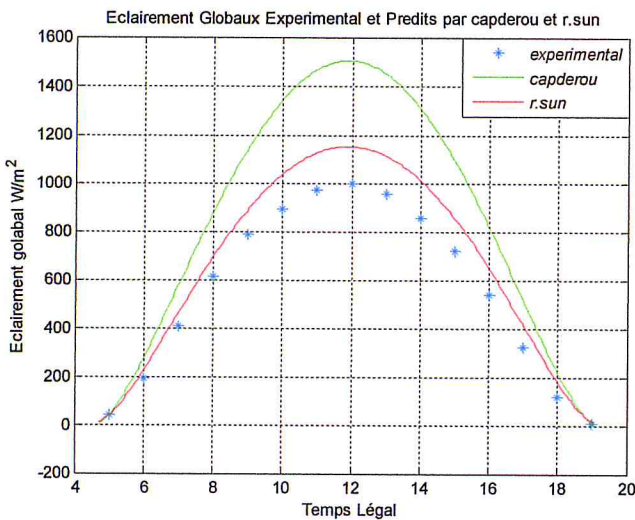
a : Eclairage global



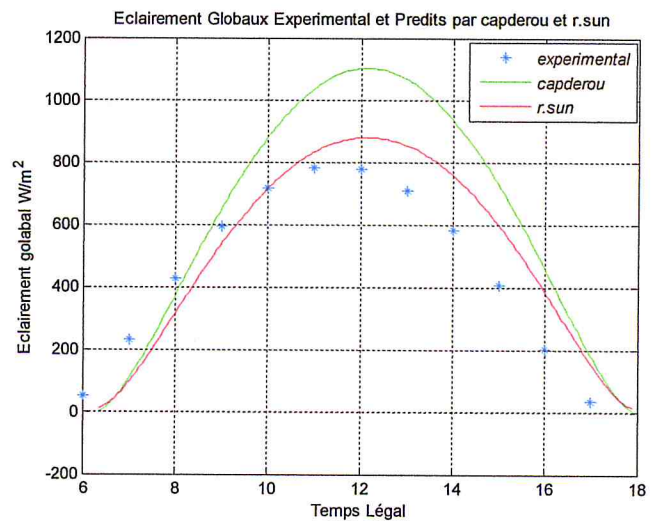
Le 16 Février 2006



Le 20 Mai 2006



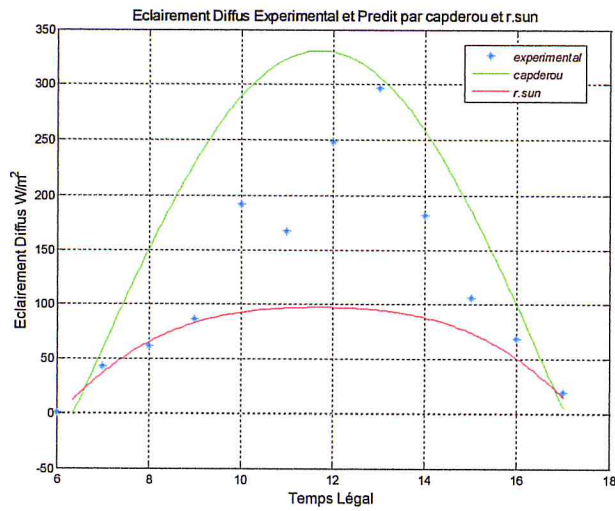
Le 01 Juillet 2006



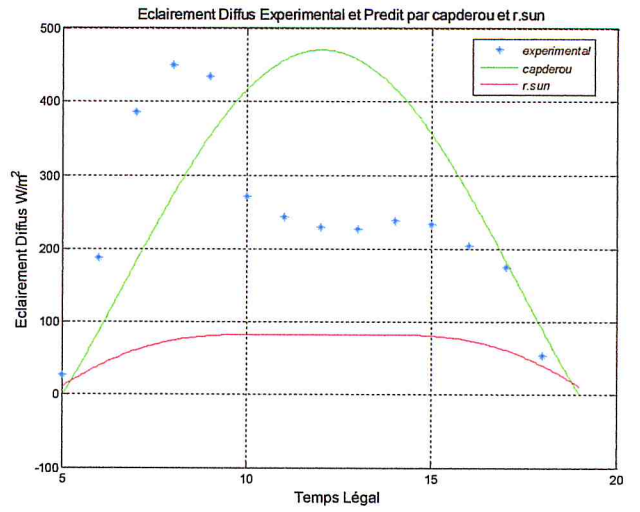
Le 02 Octobre 2006

Figure III.2.1.1.a : Comparaison des éclairagements Globaux Mesuré et prédits Par R.sun et Capderou : Sénia

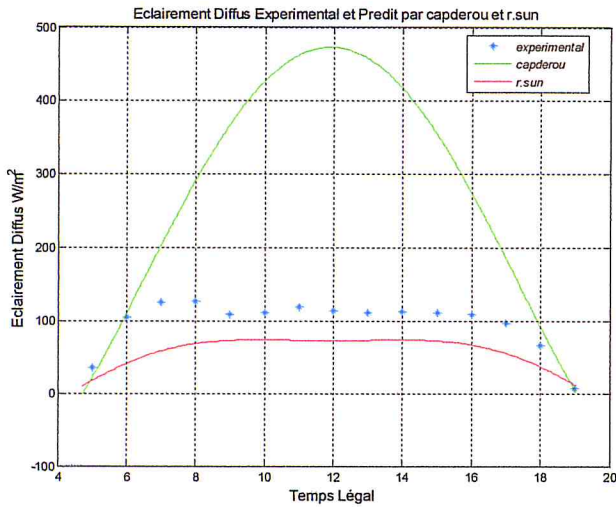
b : Eclairage diffus : Sénia



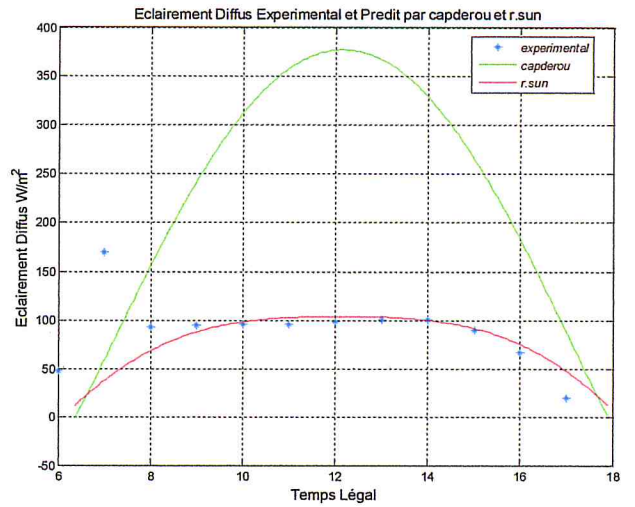
Le 16 Février 2006



Le 20 Mai 2006



Le 01 Juillet 2006

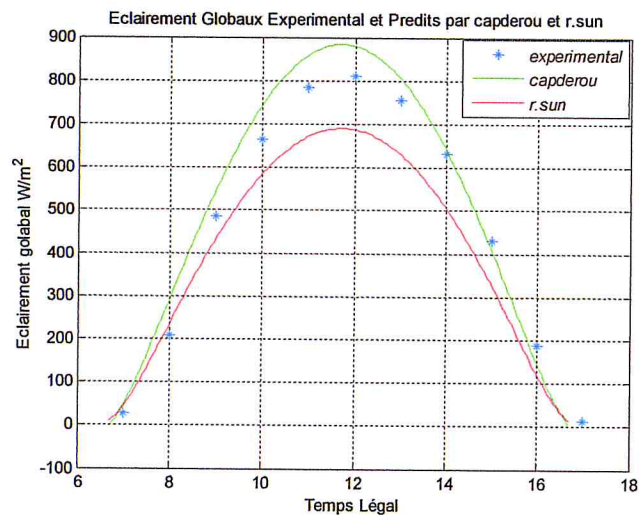


Le 02 Octobre 2006

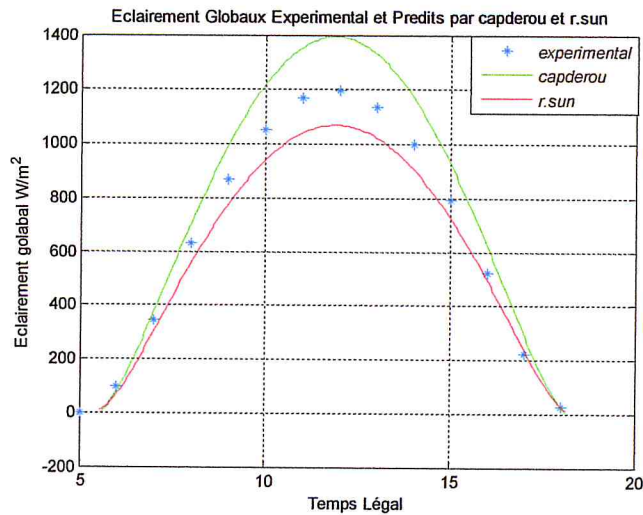
Figure III.2.1.1.b : Comparaison des éclairagements Diffus Mesuré et prédits Par R.sun et Capderou : Sénia

III.2.1.2 : Site de Tlemcen :

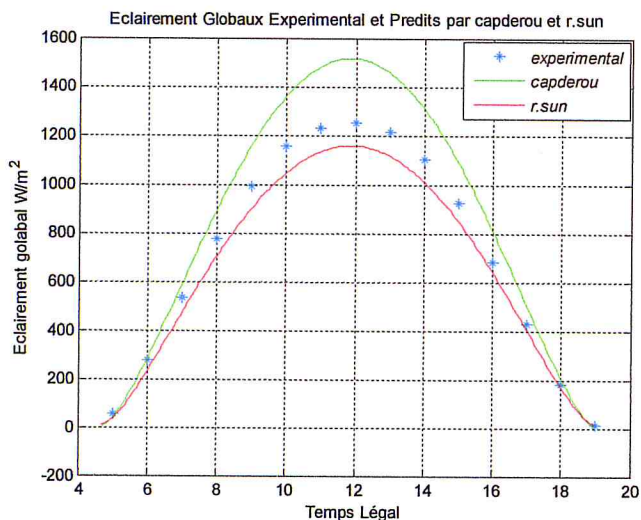
a: Eclairage global



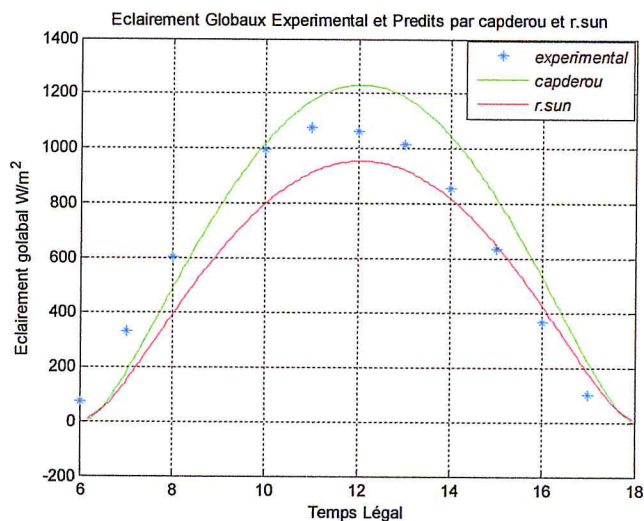
Le 22 Janvier 2006



Le 08 Avril 2006



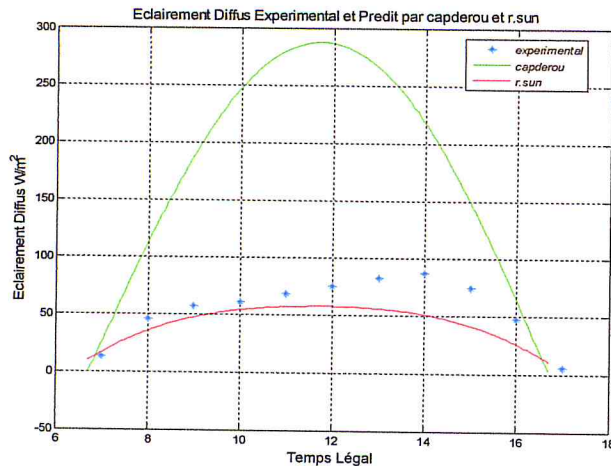
Le 29 Juin 2006



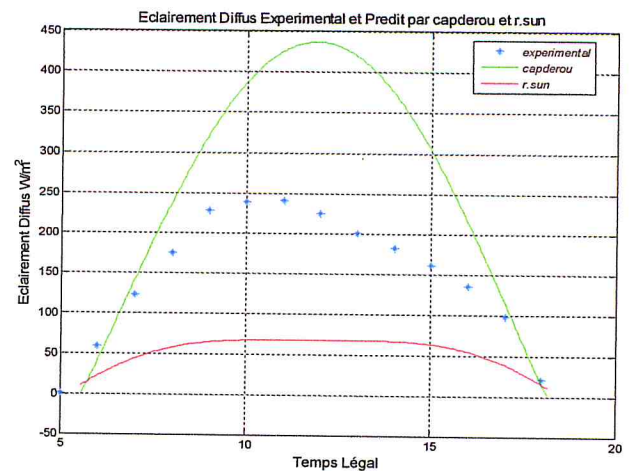
Le 26 Septembre 2006

Figure III.2.1.2.a : Comparaison des éclairagements Globaux Mesuré et prédits Par R.sun et Capderou : Tlemcen

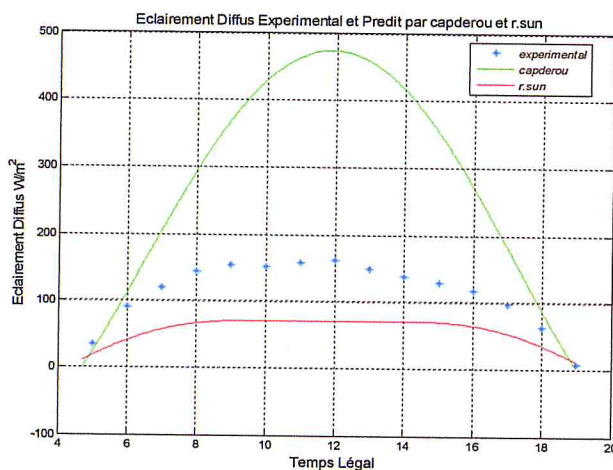
b : Eclairage diffus : Tlemcen



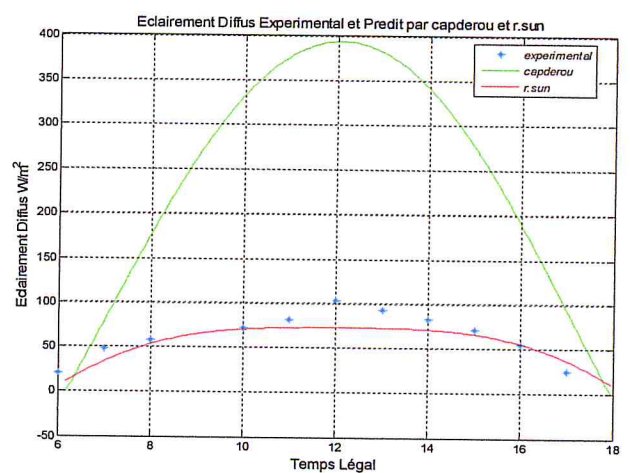
Le 22 Janvier 2006



Le 08 Avril 2006



29 Juin 2006



Le 26 Septembre 2006

Figure III.2.1.2.b: Comparaison des éclairages Diffus Mesuré et prédits Par R.sun et Capderou : Tlemcen

Interprétations des Graphes

- Le modèle Capderou donne une surestimation de la composante Globale et diffuse pour les deux Sites, seulement avec une erreur moins importante concernant la composante Globale pour le Site de Tlemcen, quant au modèle de R.sun, surestime la composante Global pour le Site de Sénia et sous-estime la même composante pour le Site de Tlemcen,. Cependant, l'erreur Commise par Capderou a une influence remarquable sur l'estimation du rayonnement global pour le Site de Tlemcen, tandis que l'erreur commise par le modèle R.sun influe peu.

- Le modèle R.sun donne une bonne estimation de la composante diffuse que le modèle de Capderou pour les deux Sites. En effet, si on analyse bien les équations calculant le rayonnement diffus donnés par les deux modèles, on trouve qu'elles ont la même forme et avec exactement les mêmes variables d'entrée (AM, δR), mais le modèle R.sun utilise des formules améliorées pour calculer ces trois variables, ce qui donne une précision meilleure des calculs. .

Mais d'une manière générale, on peut dire que le modèle R.sun donne une estimation assez bonne du rayonnement solaire global et diffuse pour les mois d'été et d'automne par rapport aux mois d'hiver et de printemps.

Nous avons remarqué également, que les deux modèles, donnent de bons résultats au lever et au coucher du soleil concernant le globale mais diverge l'un par rapport à l'autre au milieu de la journée, l'erreur est maximale à midi.

III.2.2 : Confrontation avec le Modèle de Coppolino [51]

Pour déterminer la moyenne mensuelle du global estimé par notre modèle, nous avons le choix de le calculer à travers le modèle linéaire, dans ce cas on aura :

$$\begin{cases} \frac{H_{d,i}}{H_{g,i}} = a + b \cdot \sigma_i \dots \dots \dots (1) \\ \frac{H_{d,i}}{H_{g,i}} = a_1 + b_1 \cdot Kt_i \dots \dots \dots (2) \end{cases} \quad a, b, a_1, b_1 \text{ Coefficient de régression des modèles. } i, \text{ numéro du jour dans le mois}$$

Dans ce cas le calcul est simple .De (1) et (2) : le global journalier se réduit à $H_{g,i} = H_{0,i} \cdot \left(\frac{a - a_1 + b \cdot \sigma_i}{b_1} \right) \dots \dots \dots (3)$

Quand il s'agit du modèle quadratique ou cubique, on utilisera la méthode de Newton Raphson.

On démontre aussi pour le modèle linéaire que la Moyenne Mensuelle : $\overline{H_g} = \overline{H_0} \cdot \left(\frac{a - a_1 + b \cdot \overline{\sigma}}{b_1} \right) \dots \dots \dots (4)$

III.2.2.1 : Site de Sénia : les résultats sont en MJ/ m²/Jour

Tableau III-2-2-1 : Résultats des moyennes mensuelles du global expérimentales et prédites par Coppolino : Sénia

| Mois | G-expérimental | G-présent modèle | E% | G-Coppolino | E% |
|---------------------|----------------|------------------|---------------|----------------|----------------|
| Janvier | 9.1114 | 9.1660 | 0.5997 | 8.2871 | 8.9927 |
| Février | 11.0130 | 11.0563 | 0.3926 | 11.9424 | 8.4059 |
| Mars | 18.1234 | 18.5384 | 2.2898 | 14.5509 | 19.2706 |
| Avril | 19.2266 | 19.2905 | 0.3323 | 16.6103 | 13.5626 |
| Mai | 19.4342 | 19.5692 | 0.6948 | 13.4004 | 30.8333 |
| Juin | 18.0808 | 18.0808 | 0.0000 | 17.3143 | 4.2392 |
| Juillet | 25.5268 | 25.5565 | 0.1164 | 18.7369 | 26.5680 |
| Aout | 10.1663 | 10.1019 | 0.6335 | 15.0157 | 48.0037 |
| Septembre | 17.5243 | 17.4682 | 0.3206 | 15.9186 | 9.1922 |
| Octobre | 13.6263 | 13.6527 | 0.1941 | 12.5596 | 7.8132 |
| Novembre | 10.3746 | 10.6091 | 2.2606 | 10.8900 | 4.8578 |
| Décembre | 7.4383 | 7.4201 | 0.2446 | 1.2059 | 83.9933 |
| Moy.Annuelle | 14.9705 | 15.0425 | 0.4807 | 13.0360 | 12.9220 |

III.2.2.2 : Site de Tlemcen : les résultats sont en MJ/ m²/Jour

Tableau -2-2-2: Résultats des moyennes mensuelles du global expérimentales et prédites par Coppolino : Tlemcen

| Mois | G-expérimental | G-présent modèle | E% | G-Coppolino | E% |
|---------------------|----------------|------------------|---------------|----------------|----------------|
| Janvier | 10.7582 | 10.8067 | 0.4505 | 8.4171 | 21.6636 |
| Février | 14.1571 | 14.2167 | 0.4210 | 10.2529 | 27.4620 |
| Mars | 24.5698 | 24.6340 | 0.2613 | 14.6149 | 40.4113 |
| Avril | 25.9839 | 26.0739 | 0.3464 | 20.2534 | 21.9777 |
| Mai | 27.0138 | 26.9943 | 0.0723 | 19.0394 | 29.5411 |
| Juin | 33.0110 | 33.0197 | 0.0264 | 21.1020 | 36.0665 |
| Juillet | 34.3701 | 34.5203 | 0.4370 | 23.8638 | 30.4351 |
| Aout | 32.7533 | 33.0826 | 1.0053 | 22.8061 | 30.0678 |
| Septembre | 25.9843 | 26.2232 | 0.9196 | 18.5835 | 28.2222 |
| Octobre | 20.0092 | 20.3003 | 1.4548 | 14.1162 | 29.0292 |
| Novembre | 14.5769 | 14.7367 | 1.0965 | 11.1648 | 23.1540 |
| Décembre | 11.4754 | 11.5699 | 0.8235 | 5.6641 | 50.2280 |
| Moy.annuelle | 22,8885 | 23,0148 | 0.5516 | 15,8231 | 30.6882 |

Interprétations des Résultats

Pour le site de Sénia, les résultats obtenus montrent que le modèle coppolino permet de prédire la moyenne annuelle du rayonnement journalier avec une bonne fiabilité. En ce qui concerne la moyenne mensuelle du rayonnement global, les mois de Mai, Juillet, Aout, Décembre, présentent une erreur très importante, à ce niveau le modèle sur-estime la densité mensuelle du flux global, ceci est probablement lié aux conditions météorologiques de l'année 2006 en ce lieu d'études.

Pour le site de Tlemcen, l'erreur est pratiquement très importante pour tous les mois de l'année, cela est dû probablement à l'altitude de Tlemcen (843m), le modèle à ce niveau ne prédit pas avec une bonne fiabilité les zones au-delà d'une certaine altitude, le modèle ne tient pas compte d'autres paramètres à savoir, le trouble de linke.

III.2.3 : Confrontation avec le modèle de Mefti 1996 [54]

Tableau III-2-3 : Résultats des cumuls journalier par ciel clair du global expérimental et prédit par Mefti–Sénia et Tlemcen

| Site de Sénia | | | | Site de Tlemcen | | | |
|---------------------|-------------------------------------|---|--------|---------------------|-------------------------------------|---|---------|
| Date par Ciel clair | G -Expérimental KWh/ m ² | G -estimé par Mefti KWh/ m ² | E% | Date par Ciel clair | G -Expérimental KWh/ m ² | G -estimé par Mefti KWh/ m ² | E% |
| 16 Février | 4.61 | 4.4545 | 3.3734 | 22 Janvier | 4.9981 | 3.5192 | 29.5893 |
| 20 Mai | 7.6664 | 7.7532 | 1.1328 | 08 avril | 9.0661 | 6.8388 | 24.5675 |
| 1 Juillet | 8.4192 | 7.9255 | 5.8636 | 29 Juin | 10.8247 | 7.9681 | 26.3894 |
| 02 Octobre | 5.5308 | 5.5698 | 0.7042 | 26 Septembre | 7.1156 | 5.9400 | 16.5207 |

Interprétations des Résultats

On remarque des résultats obtenus que le modèle Mefti 1996 permet de prédire la moyenne journalière du rayonnement global par ciel clair avec une très bonne fiabilité pour le Site de Sénia, cependant ce n'est pas le cas pour le Site de Tlemcen, on voit clairement que l'erreur est très importante, probablement car le modèle est basé sur une étude statistique pour extraire l'irradiation globale maximale reçue pendant chaque décade sur la période 1972-1982, et ce, seulement pour les régions d'Alger, Saida, Béchar, Béni Abbes et Tamanrasset, la région de Tlemcen n'était pas incluse.

III.2.4 : Confrontation avec le modèle de Sivkov [35]

Tableau : III-2-4 : Résultats des cumuls mensuelles du global expérimental et prédit par Sivkov : Sénia et Tlemcen

| Site de Sénia | | | | Site de Tlemcen | | | |
|---------------------|--|---|-----------------|---------------------|---|---|-----------------|
| Mois | G -mensuel expérimental MJ/ m ² | G- mensuel Estimé par Sivkov MJ/ m ² | E% | Mois | G-mensuel expérimental MJ/ m ² | G- mensuel Estimé par Sivkov MJ/ m ² | E% |
| Janvier | 282.4536 | 265.1043 | 6.1424 | Janvier | 301.2310 | 256.0410 | 15.0018 |
| Février | 308.3654 | 319.0375 | 3.4609 | Février | 396.4000 | 341.4205 | 13.8697 |
| Mars | 561.8252 | 553.3256 | 1.5129 | Mars | 761.6642 | 600.1289 | 21.2082 |
| Avril | 422.9844 | 517.8925 | 22.4377 | Avril | 779.5162 | 660.2086 | 15.3053 |
| Mai | 349.8155 | 522.2069 | 49.2806 | Mai | 837.4283 | 689.6181 | 17.6505 |
| Juin | 506.2628 | 622.7134 | 23.0020 | Juin | 990.3302 | 833.3348 | 15.8528 |
| Juillet | 791.3303 | 824.0640 | 4.1365 | Juillet | 1065.500 | 889.2017 | 16.5440 |
| Aout | 315.1566 | 585.2954 | 85.7157 | Aout | 1015.400 | 857.7873 | 15.5183 |
| Septembre | 455.6330 | 502.0081 | 10.1782 | septembre | 779.5284 | 646.1216 | 17.1138 |
| Octobre | 422.4143 | 452.2510 | 7.0634 | Octobre | 620.2838 | 520.6633 | 16.0605 |
| Novembre | 311.2382 | 319.5519 | 2.6712 | Novembre | 437.3076 | 377.9954 | 13.5630 |
| Décembre | 156.2049 | 176.8331 | 13.2059 | Décembre | 358.6669 | 308.4884 | 13.2822 |
| Moy.annuelle | 406.973683 | 471.690308 | 15.90191 | Moy.annuelle | 695.271383 | 581.7508 | 16.32752 |

Interprétations des Résultats

Pour le Site de Sénia, l'examen du tableau ci-dessus montre que les valeurs théoriques de G sont assez proches, pour les saisons d'été et d'automne. Toutefois les écarts relatifs sont totalement différents, oscillant entre 20 et 50 % pour les mois d'Avril à Juin, et devient 85 % en mois d'Aout, pour le Site de Tlemcen, cette écart relatif est pratiquement constant pour tous les mois de l'Année. A signaler à ce niveau que le modèle sur-estime la densité mensuelle du flux global pour le Site de Sénia et la sous-estime pour le Site de Tlemcen, ceci est probablement lié aux conditions météorologiques de l'année 2006, Mais d'une façon générale et à travers les résultats obtenues qui montrent que le modèle de Sivkov peut être utilisé pour les villes de Sénia et de Tlemcen pour prédire le flux global mensuel, si en tenant compte d'autres variables opératoires et pour beaucoup plus de données expérimentales (données de 3 à 5 ans).

III.3 : Conclusion

La mise au point de la confrontation a été effectuée à l'aide d'une campagne de mesures de l'éclairement solaire global sur des surfaces horizontales. Le traitement des données est effectué sur des mesures choisies couvrant l'année 2006, collectées toutes les soixante minutes pour les deux Sites de Sénia et de Tlemcen.

-Le modèle de R.sun est généralement le plus favorable pour l'estimation de l'éclairement solaire incident sur un capteur horizontal, même si l'éclairement diffus estimé par ce dernier présente parfois un écart important par rapport à l'éclairement diffus expérimental, par ailleurs, le modèle R.sun sur-estime le global pour le Site de Sénia et le sous-estime pour le Site de Tlemcen. Par contre, Le modèle Capderou sur-estime toute les composantes du rayonnement pour les deux Sites et donne parfois des résultats qui divergent radicalement par rapport aux valeurs mesurées au niveau des deux Sites. Cependant nous avons trouvé que ce modèle donne de bons résultats au lever et au coucher du soleil. Tandis que le modèle de R.sun est le plus conseillé en dehors de cet intervalle.

Pour l'estimation de la moyenne mensuelle par jour du rayonnement Global incident sur un capteur horizontal, le modèle de Coppolino est plus conforme pour le Site de Sénia que pour le Site de Tlemcen.

Et selon les erreurs relatives trouvées pour le Site de Sénia, ce modèle est très fiable particulièrement pendant les mois de: Janvier, Février, Juin, Septembre, Octobre, Novembre. Le mois de décembre présente une erreur relative très importante due probablement aux conditions météorologiques pendant ce mois. Pour le Site de Tlemcen l'erreur relative est pratiquement constante est assez élevée durant tous les mois.

Pour le modèle de Sivkov et suivant les études menées sur les deux Sites, prouvent globalement que ce dernier donne les meilleures estimations concernant le cumul mensuel du global pour le Site de Sénia que pour le Site de Tlemcen. Pour le Site de Sénia, le modèle de Sivkov est très performant sauf pour les mois de Mai et Aout ou l'erreur relative est très importante, mais qui influe peu sur la moyenne annuelle. Par contre pour le Site de Tlemcen l'erreur est pratiquement constante et oscille autour de 16%.

Le modèle Mefti 1996 permet de prédire la moyenne journalière du rayonnement global par ciel clair avec une très bonne fiabilité pour le Site de Sénia, mais ne traite pas le problème des altitudes, ce qui le rend moins fiable pour le Site de Tlemcen.

CONCLUSION GENERALE

Notre travail consiste à la détermination du gisement solaire en 3 chapitres, le premier était consacré pour la définition et concept des paramètres astronomiques et météorologiques et une définition du rayonnement solaire et ses principaux constituants, ainsi que le regroupement de modèles statistiques établis en d'autres sites à travers le monde. Ces modèles sont sous forme de relations mathématiques qui relient les composantes du rayonnement solaire aux principaux paramètres météorologiques, comme, l'indice de clarté, la fraction d'insolation, la durée d'insolation et des paramètres astronomiques, comme la durée maximale du jour, la déclinaison du soleil, la variation distance terre-soleil et l'irradiation solaire à la limite de l'atmosphère.....

En outre la connaissance du gisement solaire d'une région est plus ou moins précise selon les mesures au sol suivantes ;

- la densité des stations pour lesquelles on a des données,
- le nombre d'années de mesures disponibles,
- le pas de temps des données (mois, jour, heure),
- la nature des données : durée d'ensoleillement, composante directe, diffuse et globale du rayonnement solaire, albédo du sol.....

Ces données sont très importantes pour l'étude et le dimensionnement des systèmes solaires, plus particulièrement les systèmes photovoltaïques.

Cependant Il est difficile d'évaluer exactement la précision de mesure pour le calcul des composantes solaire tel que la composante directe , cela est dû à plusieurs paramètres influent sur la qualité de la mesure : lieu, fréquence de l'étalonnage, type d'appareil, saison, durée des mesures, entretien et vérification quotidienne des résultats ;

D'où la nécessité de trouver une relation mathématique entre la durée d'insolation et l'indice de clarté , avec les composantes solaires , ainsi et Dans un deuxième chapitre et sur la base des mesures d'ensoleillement et des irradiances globales et diffuses effectuées dans les régions de Sénia et de Tlemcen, nous avons étudié les corrélations possibles entre les divers rayonnements solaires sur un plan horizontal afin de trouver une approche permettant d'exprimer la fraction diffuse en fonction de la fraction d'insolation et en second lieu en fonction de l'indice de clarté, ainsi déterminer les coefficients de régression des modèles d'Angstrom et ceux de page pour construire notre propre modèle ; Il s'agit de la régression basée sur les modèles , linéaire , quadratique et cubique au sens des moindres carrés .

La comparaison entre les modèles, et l'évaluation de leur qualité sont déterminées par le R^2 et par le RMSE.

Le meilleur modèle retenu est celui présentant un bon R^2 et un bon RMSE.

Après cette étude de modélisation de la fraction diffuse journalière en fonction de la fraction d'insolation et de l'indice de clarté et ce pour le Site de Sénia et de Tlemcen, on a soumis les modèles retenus à la confrontation avec la littérature, le modèle de R.sun était plus favorable que celui de Capderou pour l'estimation des éclaircissements globale et du diffus pour les deux Sites. Mais concernant l'estimation de la moyenne mensuelle par jour du rayonnement Global horizontal par le modèle de Coppolino, et l'estimation du cumul mensuel du global horizontal par le modèle de Sivkov, ainsi que la moyenne journalière du rayonnement global horizontal par ciel clair prédite par le modèle de Mefti-1996, les résultats étaient plus favorables pour le Site de Sénia que pour le Site de Tlemcen.

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

- 1- Si on dispose que de la fraction d'insolation on peut reconstituer les mêmes composantes du rayonnement solaire à l'aide du présent modèle et ce, pour d'autres années pour les mêmes Sites.
- 2- Les modèles peuvent être améliorés par traitement de données de plusieurs années consécutives (5 années au minimum).
- 3- Caractérisation radiométrique plus fine d'un site donné en tenant compte des caractéristiques particulières du relief, (micro climat).

BIBLIGRAPHIE

- [1] M. Iqbal, 'An Introduction to Solar Radiation'. Academic Press, Department of Mechanical Engineering, University of British Columbia, Canada, 1983].
- [2] S.M Ait cheik « Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques », thèse de Doctorat en électronique, Ecole Nationale Polytechnique, 2007. S.
- [3] thèse Doctorat, « Introduction au gisement solaire algérien Théorie et applications, Merad Mesri Mokhtaria, Université Amar Telidji –Laghouat– Faculté de Technologie.
- [4] thèse Doctorat, La nouvelle méthode Heliosat-4 pour l'évaluation du rayonnement solaire au sol, Zhipeng QU, 'École nationale supérieure des mines de Paris Spécialité "Energétique et Procédés" ,2013.
- [5] Document, RETScreen International centre d'aide à la décision sur les énergies propres « Analyse de projets d'installation photovoltaïque », Ministère de Ressources Naturelles, Canada 2001-2004.
- [6] Pierre Bessemoulin et Jean Oliiviéri, 'Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette', Météo-France, Service central d'exploitation de la météorologie Toulouse, La Météorologie 8eme série -n°31-septembre 2000. A. Mefti, 'Contribution à la détermination du gisement solaire par traitement de données solaires au sol et d'images Météosat', Thèse de Doctorat d'état, USTHB, Alger, 2007.
- [7] A. Mefti, 'Contribution à la détermination du gisement solaire par traitement de données solaires au sol et d'images Météosat', Thèse de Doctorat d'état, USTHB, Alger, 2007.
- [8] C. Gautier, G. Diak and S. Masse, J. Appl. Meteor., 19, 1005 (1980).
- [9] Masson C. Pastre, La Météorologie, 6, 24, 5 (1981).
- [10] Perrin de Brichambaut et Vauge [W. Moser and E. Raschke, Met. Rundschau, 36, 33-41 (1983)].
- [11] Bourges B., 1979, Reconstitution des courbes de fréquence cumulée du rayonnement solaire à l'aide de la durée d'insolation, Rapport CEE 295-77-ESF, Centre d'Energétique de l'Ecole des Mines de Paris, tome II, France.
- [12] Durand R. (1974), "Estimation du rayonnement global à partir de la durée d'insolation", AH«, agron, 25 (6) : 779-795.
- [13] A.A.SFEIR et G.GUARRACINO, Ingénierie des systèmes solaires, pp. 57 – 65, 1981.
- [14]Capderou [M. Capderou, 'Atlas Solaire de l'Algérie, Tome1, Vol 1 et 2.
- [15] A. Mefti, 'Comparison between two methods for the determination of the Angstrom turbidity in Algiers, Bouzaréah', First Renewable Energy Congress, pp. 3122-3126, 1990.
- [16] C. Gaynard and F. Vignola, 'Determination of the atmospheric. turbidity from the diffuse beam broadband irradiance ratio', Solar Energy, 63, pp. 135-146, 1998.
- [17] Glover and McCulloch Glover, J. and McCulloch, F. (1958). The empirical relationship between solar radiation and hours of sunshine.Q.J.R.Met. Soc. 84(359): 56-60.

- [18] Rietveld, M.R., 1978. A new method for estimating the regression coefficients in the formula relating solar radiation to sunshine. *Agric. Meteorol.* 19 (3), 243–252.
- [19] D.G Erbs, S.A. Klein and J.A. Duffie, 'Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily and Monthly-Average Global Radiation', *Solar Energy*, Vol. 28, N°4, pp. 293 – 302, 1982.
- [20] Bahel V, Srinivasan R, Bakhsh H. Solar radiation for Dhahran, Saudi Arabia. *Energy* 1986;11:985–9.
- [21] Tiris M, Tiris C, Erdalli Y. Water heating systems by solar energy. Marmara Research Centre, Institute of Energy Systems and Environmental Research, NATO TU-COATING, Gebze, Kocaeli, Turkey, 1997 in Turkish.
- [22] Ogelman H, Ecevit A, Tasdemiroglu E. A new method for estimating solar radiation from bright sunshine data. *Solar Energy* 1984;33:619–25.
- [23] A. Zeroual, M. Ankrim and A.J. Wilkinson, 'The Diffuse-Global Correlation: Its Application to Estimating Solar Radiation on Tilted Surface In Marrakesh, Morocco', *Renewable Energy*, Vol. 7, N°1, pp. 1 – 13, 1996.
- [24] C.P. Jacovides, L. Hadjoannou, S. Pashirdis and L. Stefannou, 'On the Diffuse Fraction of Daily and Monthly Global Radiation for the Island of Cyprus', *Solar Energy*, Vol. 56, N°6, pp. 565 – 572, 1996.
- [25] J.F. Orgill and K.G.T. Hollands, "Correlation equation for hourly diffuse radiation on horizontal surface", *Solar Energy*, Vol 19, n°4, pp. 357-359, 1977.
- [26] M. Iqbal, « Correlation of average diffuse and beam radiation with hours bright sunshine », *Solar Energy* 23, 169-173, 1979.
- [27] Spencer JW. A comparison of methods for estimating hourly Diffuse solar-radiation from global solar-radiation. *Solar Energy* 1982;29(1):19–32.
- [28] Reindl DT, Beckman WA, Duffie JA. Diffuse fraction corrections. *Solar Energy* 1990;45(1):1–7.
- [29] J. A. Duffie, A. Wiley and W.A. Beckman, « Solar Engineering of Thermal Processes », Second Edition. -Interscience Publication, 1991.
- [30] Lam JC, Li DHW. Correlation between global solar-radiation and its direct and diffuse components. *Building and Environment* 1996;31(6):527–35.
- [31] B.Y.H. Liu and R.C. Jordan « The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation », *Solar Energy* 4, 1-19, 1960.
- [32] M. Collares-Pereira and A. Rabl, 'The Average Distribution of Solar Radiation Correlations between Diffuse and Hemispherical and between Daily and Hourly Insolation Values', *Solar Energy*, Vol. 22, pp. 155 – 164, 1978.
- [33] D.G. Erbs, S.A. Klein and J.A. Duffie, « Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation », *Solar Energy*, 28, 293-302, 1982.
- [34] Louche A, Notton G, Poggi P, Simonnot G. Correlations for direct normal and global horizontal irradiances on a French Mediterranean site. *Solar Energy* 1991;46(4):261–6.
- [35] S.I., 1964. To the methods of computing possible radiation in Italy. *Trans. Main Geophys. Obs.* 160.

- [36] Modélisation de la Densité du Flux Solaire Global de la Ville de Gabès R. F. Mechlouch et A. Ber Brahim ,Unité de Recherche : Thermodynamique Appliquée aux Machines ,Ecole Nationale d'Ingénieurs de Gabès, Rue Omar Ibn Elkhattah, 6029 Zrig , Gabès, Tunisie,1997.
- [37] F. Kasten, 'The Linke turbidity factor based on improved values of the integral Rayleigh optical thickness', *SolarEnergy*, 56, pp. 239-244, 1996.
- [38] J. Hofierka and M. Sári, 'The Solar Radiation Model for Open Source GIS: Implementation and Applications', *Proceedings of the Open source GIS - GRASS users'conference*, Trento, Italy, 11-13 September 2002.
- [39] C. Rigollier, O. Bauer and L. Wald, 'On the Clear Sky Model of the 4th European Solar Radiation Atlas with Respect to the Heliosat Method', *Solar Energy*, Vol. 68, N°1, pp. 33 – 48, 2000.
- [40] M. Lefèvre, M. Albuissou and L. Wald, 'Description of the software HELIOSAT-II for the conversion of images acquired by METEOSAT satellites in the visible band into maps of solar radiation available at ground level', *Rapport, Groupe Télédétection & Modélisation, Centre d'Energétique, Armines, Ecole des Mines de Paris, France*, 43 p., 2004.
- [41] METEONORM version 6.0, 'Handbook Part II: Theory', Swiss Federal Office of Energy (SFOE), Technical Documentation, 101 p., 2007.
- [42] Etude comparative de deux modèles de calcul du rayonnement solaire par ciel clair en Algérie, *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 12 N°2 (2009) 331 – 346
- [43] mémoire de Magister,Prédiction de l'irradiation solaire globale pour la région de Tizi-Ouzou par les réseaux de neurones artificiels. Application pour le dimensionnement d'une installation photovoltaïque pour l'alimentation du laboratoire de recherche LAMPA, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou,département d'Electronique,2011.
- [44] F. Kasten and A.T. Young, 'Revised Optical Air Mass Tables and Approximation Formula', *Applied Optics*, Vol. 28, N°22, pp. 4735 - 4738, 1989.
- [45] R. Dogniaux, 'De l'influence de l'Estimation du Facteur Total de Trouble Atmosphérique sur l'Evaluation du Rayonnement Solaire Direct par Ciel Clair. Application aux Données Radiométriques de l'IRM à Uccle', *Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM),Miscellanea, Serie C, N°20*, 1984.
- [46]Hottel,H. C. (1976) . A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres. *Solar Energy* .18(2):129-134.
- [47] B.Y.H. Liu and R.C. Jordan, 'The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse, and Total Solar Radiation', *Solar Energy*, Vol 4, pp. 1-19, 1960.
- [48] Bernard, Menguy, Schwartz, *The solar radiation, thermal conversion and applications; Technique and documentation*, 2nd edition, Paris, 1980. pp 73-90.
- [49] Yassine Sahnoune. Modélisation du rayonnement solaire sur quelques sites algériens. Mémoire de magister (2007), université de Sétif.
- [50] Mefti, Contribution de la détermination du gisement solaire, mémoire de Magister, 1987 P64,68.

[51]Mokhtaria Mesri Merad. Numerical Methods to Calculate Solar Radiation, Validation through a New Graphic User Interface Design,International Journal of Science and Research (IJSR), 2014.

[52]Prescott,J.A.,1940. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. Trans. Roy. Soc. South Australia64,114–125.

[53]Toğrul, İ. T., Onat, M.E .E.A comparison of estimated and measured values of solar radiation inElazığ,Turkey.Renew Energy 2007.

[54]A. : Estimation et Cartographie de la Composante Globale du Rayonnement Solaire . Rev. Energ. Ren Valorisation (1999) 219-224

ANNEXE

Script Matlab

```
clear

Mois=['janvier'
'fevrier''mars''avril''mai''juin''juillet''aout''septembre''octobre''novembre''decembre']
;
NJM=[31 28 31 30 31 30 31 31 30 31 30 31];

Cas = menu('veuillez choisir le Site de votre choix :','Site de SENIA','Site de
Tlemcen');
if Cas==1
A=xlsread('senia');
Lat=35.6477900;
[I2, J2]=find(isnan(A)==1); A(I2,:)=[];
G=A(:,6); D=A(:,7);

I1=find(D==0 | G==0 ); A(I1,:)=[];
S=A(:,5); I3=find(S>1); A(I3,:)=[];
M=A(:,2); S=[];D=[]; G=[];

Cas = menu('Cas d''étude :','Hd/Hg en fonction de la fraction d.insolation','Hd/Hg en
fonction de l.indice de clarté');

NMois=input('N° du mois :');

% Traitement Irradiations Mensuelles
I=find(M==NMois); A1=A(I,:); NJ=NJM(NMois);
J=A1(:,3); G=A1(:,6)*1e4; D=A1(:,7)*1e4; S=A1(:,5);

% IRRADIATIONS JOURNALIERES
ii=0;
for i=1:NJ
IJ=find(J==i);
if length(IJ)>=1
ii=ii+1;JJ(ii)=i;
Hg(ii,1)=sum(G(IJ));
Hd(ii,1)=sum(D(IJ)); SJ(ii,1)=mean(S(IJ));

end
end

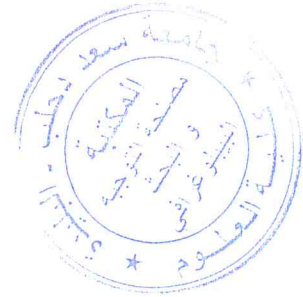
if Cas==1

SS=(0:.1:1)';
% IRRADIATIONS JOURNALIERES
ii=0;
for i=1:NJ
IJ=find(J==i);
if length(IJ)>=1
ii=ii+1;JJ(ii)=i;
Hg(ii,1)=sum(G(IJ));
Hd(ii,1)=sum(D(IJ)); SJ(ii,1)=mean(S(IJ));

end

end

nl=input('degré du polynome:');
```



```
CJ=polyfit(SJ,Hd./Hg,n1);
DSGJ1=polyval(CJ,SS);
DSGJ=polyval(CJ,SJ);
figure(2); plot(SJ,Hd./Hg,'*',SS,DSGJ1,'r');
xlabel('\sigma'); ylabel('H_d/H_g');
k1=DSGJ-mean(DSGJ);
k2=Hd./Hg-mean(Hd./Hg);
r=(Hd./Hg)-DSGJ;
R=sum(k1.*k2)/sqrt(sum(k1.^2)*sum(k2.^2));
VARY=sum(k2.^2/(length(Hd./Hg)-1));
sigmay=sqrt(VARY);
RMSE=sqrt(sum(r.^2)/((length(Hd./Hg))-1));
R2=1-(RMSE^2/VARY);
SCEr=norm(r);
```

```
SCEr
R2
RMSE
CJ
```

```
end
```

```
if Cas==2
```

```
% Indice de Clarté
```

```
Nj = JJ+sum(NJM(1:NMois-1));
for i=1:length(Nj); Ho(i,1) = HorsAtmosphere(Lat,Nj(i)); end
Kt = Hg./Ho;
n2=input('degré du polynome:');
CKt=polyfit(Kt,Hd./Hg,n2);
Ktt=min(Kt):.01:max(Kt); DSGKt1=polyval(CKt,Ktt); DSGKt=polyval(CKt,Kt);
figure(3); plot(Kt,Hd./Hg,'*',Ktt,DSGKt1,'r');
xlabel('Kt'); ylabel('H_d/H_g')
```

```
k1=DSGKt-mean(DSGKt);
k2=Hd./Hg-mean(Hd./Hg);
r=(Hd./Hg)-DSGKt;
R=sum(k1.*k2)/sqrt(sum(k1.^2)*sum(k2.^2));
VARY=sum(k2.^2/(length(Hd./Hg)-1));
sigmay=sqrt(VARY);
RMSE=sqrt(sum(r.^2)/((length(Hd./Hg))-1));
R2=1-(RMSE^2/VARY);
SCEr=norm(r);
```

```
SCEr
R2
RMSE
CKt
```

```
end
end
```

```
if Cas==2
```

```
A=xlsread('tlemcen');
Lat=34.8783300;
[I2, J2]=find(isnan(A)==1); A(I2,:)=[];
G=A(:,6); D=A(:,7);
```

```
I1=find(D==0 | G==0); A(I1,:)=[];
S=A(:,5); I3=find(S>1); A(I3,:)=[];
```

```

M=A(:,2); S=[];D=[]; G=[];

Cas = menu('Cas d''étude :','Modélisation Hd/Hg en fonction de la fraction
d.insolation','Modélisation Hd/Hg en fonction de l.indice de clarté');

NMois=input('N° du mois :');

% Traitement Irradiations Mensuelles
I=find(M==NMois); A1=A(I,:); NJ=NJM(NMois);
J=A1(:,3); G=A1(:,6)*1e4; D=A1(:,7)*1e4; S=A1(:,5);

% IRRADIATIONS JOURNALIERES
ii=0;
for i=1:NJ
IJ=find(J==i);
if length(IJ)>=1
ii=ii+1;JJ(ii)=i;
Hg(ii,1)=sum(G(IJ));
Hd(ii,1)=sum(D(IJ)); SJ(ii,1)=mean(S(IJ));

end
end

if Cas==1

SS=(0:.1:1)';
% IRRADIATIONS JOURNALIERES
ii=0;
for i=1:NJ
IJ=find(J==i);
if length(IJ)>=1
ii=ii+1;JJ(ii)=i;
Hg(ii,1)=sum(G(IJ));
Hd(ii,1)=sum(D(IJ)); SJ(ii,1)=mean(S(IJ));

end

end

n1=input('degré du polynome:');
CJ=polyfit(SJ,Hd./Hg,n1);
DSGJ1=polyval(CJ,SS);
DSGJ=polyval(CJ,SJ);
figure(2); plot(SJ,Hd./Hg,'*',SS,DSGJ1,'r');
xlabel('\sigma'); ylabel('H_d/H_g');
k1=DSGJ-mean(DSGJ);
k2=Hd./Hg-mean(Hd./Hg);
r=(Hd./Hg)-DSGJ;
R=sum(k1.*k2)/sqrt(sum(k1.^2)*sum(k2.^2));
VARy=sum(k2.^2/(length(Hd./Hg)-1));
sigmay=sqrt(VARy);
RMSE=sqrt(sum(r.^2)/((length(Hd./Hg)-1)));
R2=1-(RMSE^2/VARy);
SCEr=norm(r);

SCEr
R2
RMSE
CJ

end

```



```

if Cas==2
    % Indice de Clarté

    Nj = JJ+sum(NJM(1:NMois-1));
    for i=1:length(Nj); Ho(i,1) = HorsAtmosphere(Lat,Nj(i)); end
    Kt = Hg./Ho;
    n2=input('degré du polynome:');
    CKt=polyfit(Kt,Hd./Hg,n2);
    Ktt=min(Kt):.01:max(Kt); DSGKt1=polyval(CKt,Ktt); DSGKt=polyval(CKt,Kt);
    figure(3); plot(Kt,Hd./Hg,'*',Ktt,DSGKt1,'r') ;
    xlabel('Kt'); ylabel('H_d/H_g')

    k1=DSGKt-mean(DSGKt);
    k2=Hd./Hg-mean(Hd./Hg);
    r=(Hd./Hg)-DSGKt;
    R=sum(k1.*k2)/sqrt(sum(k1.^2)*sum(k2.^2));
    VARY=sum(k2.^2/(length(Hd./Hg)-1));
    sigmay=sqrt(VARY);
    RMSE=sqrt(sum(r.^2)/((length(Hd./Hg))-1));
    R2=1-(RMSE^2/VARY);
    SCER=norm(r);

    SCER
    R2
    RMSE
    CKt

end
end

```

